





Università degli Studi di Udine

Dottorato di Ricerca in Matematica e Fisica - Ciclo XXVI

SSD: FIS/08 - Didattica e Storia della Fisica

---

## TESI DI DOTTORATO DI RICERCA

**La didattica in prospettiva verticale delle proprietà di trasporto elettrico nei solidi: i modelli microscopici partendo dalla fenomenologia**

Relatore

prof.ssa Marisa Michelini

Dottorando

**Giuseppe Fera**

---

ANNO ACCADEMICO 2013-14

### ***Abstract***

Vengono presentate e discusse le fasi di progettazione, realizzazione e valutazione di efficacia di un percorso didattico verticale di insegnamento/apprendimento sui fenomeni di trasporto elettrico nei solidi articolato per livelli di scolarità. Sperimentazioni di metodologie e materiali didattici innovativi per favorire l'apprendimento degli studenti sono integrate con attività di formazione insegnanti di scuola primaria e secondaria svolte nell'ambito del progetto PLS-IDIFO3 e IDIFO4.

### ***parole chiave***

Didattica della fisica, trasporto elettrico, conduzione elettrica, progettazione verticale, apprendimento concettuale, formazione insegnanti

# Indice

<b>I. <i>Introduzione</i></b>		
1. L'apprendimento della fisica	.....	6
2. Le proprietà di trasporto elettrico	.....	8
3. I modelli microscopici	.....	10
4. La prospettiva verticale	.....	13
5. L'apprendimento concettuale	.....	15
6. La formazione insegnanti	.....	16
<b>II. <i>Quadro teorico di riferimento</i></b>		
1. Metodologie di ricerca		
1.1 Model of Educational Reconstruction	.....	18
1.2 Design Based Research	.....	21
1.3 Content Oriented Research	.....	23
1.4 Qualitative Content Analysis	.....	26
1.5 Teaching Learning Sequences	.....	28
2. Strategie didattiche		
2.1 Cambiamento concettuale	.....	30
2.2 Il ciclo Predict, Observe, Explain	.....	32
2.3 Model Based Inquiry	.....	33
3. Modelli scientifici e modelli mentali	.....	36
4. Natura della ricerca descritta nella tesi	.....	41
5. Domande di ricerca e struttura della tesi	.....	42
<b>III. <i>Modelli della conduzione elettrica</i></b>		
1. Il punto di vista strutturale	.....	44
2. Le principali tappe storiche	.....	46
3. Resistività nel modello classico	.....	49
4. Il riscaldamento Joule	.....	57
5. Resistività nel modello semiclassico	.....	59
6. Resistività nel modello di Bloch	.....	60
7. Resistività nel modello a bande	.....	65
8. Resistività dei semiconduttori	.....	66
9. Prospetto riassuntivo	.....	68
10. Confronto critico di aspetti selezionati	.....	69

<b>IV. Ricostruzione storico-concettuale a scopo didattico</b>	
1. Aspetti dello sviluppo storico delle idee sulla carica elettrica	72
1.1 i fluidi imponderabili nella spiegazione dei fenomeni	73
1.2 il contributo della pila di Volta all'integrazione tra elettrostatica ed elettrodinamica	76
1.3 l'elettrolisi, culla delle teorie sull'elettrone	81
1.4 le prime teorie dell'elettrone	84
1.5 la concezione moderna della carica elettrica	87
2. Nuclei fondanti	90
3. Aspetti epistemologici	92
<b>V. Rassegna della letteratura di ricerca didattica</b>	
1. Quadro della letteratura	94
2. Discussione della letteratura	
2.1 Chiusura circuito	100
2.2 Idea di corrente	100
2.3 Relazione tra tensione e corrente	102
2.4 Raccordo elettrostatica-elettrodinamica	103
2.5 Ruolo del campo elettrico	103
2.6 Integrazione dei modelli macro-micro	104
2.7 Raccordo con il modello particellare	106
3. Risultati di ricerca	
3.1 Scuola primaria	107
3.2 Scuola secondaria	108
3.3 Università	108
4. Proposte didattiche	
4.1 L'integrazione degli aspetti macro/micro dei circuiti (Licht, 1991)	110
4.2 Il ruolo delle particelle nei circuiti (Tveita, 1997)	111
4.3 Le relazioni tra variabili macroscopiche nei circuiti (Psillos, 1998)	112

4.4	Le cariche di superficie nella conduzione (Chabay & Sherwood, 1999)	115
4.5	Il raccordo elettrostatica-elettrodinamica (Borghetti et al., 2007)	120
4.6	Il campo elettrico nel funzionamento dei circuiti (Stocklmayer, 2010)	121
5.	Confronto critico di proposte didattiche	123
6.	Fondazione della ricerca	124
<b>VI.</b>	<b><i>La ricerca con i bambini</i></b>	
1.	Progettazione dell'intervento didattico	126
2.	Contesto	127
3.	Strategia	128
4.	Analisi dati	130
5.	Discussione e revisione	133
<b>VII.</b>	<b><i>La ricerca con gli studenti di scuola media e superiore</i></b>	
1.	Progettazione dell'intervento didattico	136
2.	Contesto	138
3.	Strategia	139
4.	Analisi dati	141
5.	Discussione e revisione	148
<b>VIII.</b>	<b><i>La ricerca con gli studenti eccellenti</i></b>	
1.	Progettazione dell'intervento didattico	153
2.	Contesto	154
3.	Strategia	155
4.	Analisi dati	158
5.	Discussione e revisione	160
<b>IX.</b>	<b><i>La ricerca con gli insegnanti</i></b>	
1.	Il modello IDIFO per la formazione insegnanti in servizio	163
2.	Attività con insegnanti in servizio di scuola dell'infanzia, primaria e media	165
2.1	Nodi di apprendimento	165
2.2	Laboratorio	
2.2.1	Tensione e corrente	167
2.2.2	Carica e resistenza	169
2.3	Analisi	171

2.4 Discussione	.....	174
3. Attività con insegnanti in formazione di scuola		
primaria	.....	175
3.1 Laboratorio	.....	176
3.2 Analisi	.....	178
3.3 Discussione	.....	181
4. Attività con insegnanti in formazione di scuola		
secondaria	.....	183
4.1 Laboratorio/Seminario	.....	188
4.2 Analisi	.....	189
4.3 Discussione	.....	191
<b>X. Un percorso concettuale di insegnamento/apprendimento sulla conduzione elettrica</b>		
1. Rationale	.....	194
2. Strategie e metodi	.....	197
3. Prerequisiti	.....	198
4. Mappa	.....	198
5. Concetti e nodi	.....	199
6. Attività	.....	200
7. Esperimenti - Materiali	.....	214
<b>XI. Conclusioni</b>	.....	225
<b>XII. Bibliografia</b>	.....	230
<b>XIII. Appendici</b>		
1. Dati raccolti con bambini	.....	249
2. Dati raccolti con studenti di scuola media	.....	256
3. Dati raccolti con studenti di scuola superiore	.....	264
4. Dati raccolti con studenti eccellenti	.....	298
5. Dati raccolti con insegnanti	.....	311

## I. Introduzione

1. L'apprendimento della fisica
2. Le proprietà di trasporto elettrico
3. I modelli microscopici
4. La prospettiva verticale
5. L'apprendimento concettuale
6. La formazione insegnanti

### **1. L'apprendimento della fisica**

Il rapido aumento della conoscenza in una vasta gamma di discipline scientifiche e tecnologiche influenza profondamente la vita umana e trasforma la cultura. M. Euler (2003) sostiene che la società post-industriale sta attraversando un processo di transizione verso la cosiddetta “società della conoscenza” nel senso che la conoscenza sta diventando una risorsa fondamentale e un fattore centrale del processo decisionale politico.

Tra gli studi internazionali, l'indagine PISA (Programme for International Student Assessment) costituisce un riferimento importante per la valutazione delle competenze degli studenti. L'indagine PISA viene svolta dal 2000 con cadenza triennale con l'obiettivo generale di verificare in che misura i quindicenni scolarizzati abbiano acquisito alcune competenze giudicate essenziali per svolgere un ruolo consapevole e attivo nella società e per continuare ad apprendere per tutta la vita. In particolare viene valutata la *literacy* scientifica, definita come capacità di utilizzare le conoscenze scientifiche per identificare domande scientifiche, per acquisire nuove conoscenze, per spiegare fenomeni scientifici e per trarre conclusioni basate sui fatti in merito a questioni di carattere scientifico. Alla quinta edizione dell'indagine (2012) hanno partecipato 66 paesi; i risultati saranno presentati nel dicembre 2013. I risultati relativi alla precedente edizione dell'indagine non sono incoraggianti: nella “Prima presentazione dei risultati di PISA 2009” (INVALSI, 2011) si legge che per quanto riguarda la *literacy* scientifica l'Italia si colloca significativamente al di sotto della media OCSE (501) con un punteggio medio di 489, seppure differenziato per macroaree geografiche. Ciò segnala che il livello di alfabetizzazione scientifica degli studenti italiani è mediocre e che sono considerati poco preparati ad affrontare le sfide del futuro rispetto ai loro colleghi europei.

La Società Europea di Fisica (EPS PED, 2012) ha indicato l'apprendimento della fisica come aspetto di importanza vitale per garantire ad ogni futuro cittadino quelle



conoscenze e competenze adeguate per la partecipazione attiva alla società democratica. In Italia, il MIUR ha calibrato le *Indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento per i percorsi liceali* (INDIRE, 2010) cercando di intervenire sulle lacune denunciate dalle rilevazioni sugli apprendimenti (INVALSI, 2010) e tenendo conto sia delle strategie suggerite nelle sedi europee (Raccomandazioni di Lisbona, 2000) ai fini della realizzazione della “società della conoscenza”, sia dei quadri di riferimento delle indagini nazionali e internazionali e dei loro risultati. Tra gli obiettivi generali di apprendimento della fisica individuati nei nuovi programmi per gli studenti liceali (INDIRE, 2010) è posto: “l’aver consapevolezza dei vari aspetti del metodo sperimentale, dove l’esperimento è inteso come interrogazione ragionata dei fenomeni naturali, analisi critica dei dati e dell’affidabilità di un processo di misura, costruzione e/o validazione di modelli”.

Il divario ancora oggi presente tra i paesi che ottengono le migliori collocazioni nel test PISA e quelli che ottengono le peggiori è stato ricondotto da M. Euler (2003) all’orientamento curricolare specifico dei diversi paesi e in particolare al modo in cui si insegnano le materie scientifiche. Il divario sembra essere correlato alla diversità degli approcci nell’insegnamento/apprendimento della fisica:

- approccio tradizionale, basato sull’insegnamento sistematico dei contenuti disciplinari;
- approccio “progressivo”, orientato alla trattazione di problemi e processi fisici.

Euler sostiene che l’alfabetizzazione scientifica sembra essere agevolata da un insegnamento che attiva cognitivamente gli studenti e consente l’opportunità di porre domande significative. Il ruolo attivo dello studente sembra essenziale per l’apprendimento della fisica consentendo di ridurre la separazione tra ciò che agli studenti viene insegnato e ciò che imparano. La relazione di Euler evidenzia inoltre la necessità di affrontare congiuntamente sia la progettazione del curriculum di fisica sia la formazione degli insegnanti in ambito scientifico; di ciò si è tenuto conto nella ricerca qui illustrata.

Osborne & Dillon (2008) raccomandano di porre attenzione all’apprendimento dei ragazzi al di sotto dei quattordici anni, in quanto essi mostrano un atteggiamento molto positivo verso le scienze, sicché un buon insegnamento permetterebbe di mantenere questo interesse anche negli anni successivi, quando invece si riscontra una netta disaffezione. Questi autori sostengono, in accordo con Euler, che la proposta di indagini e di sperimentazioni hands-on promuove il coinvolgimento degli studenti nello studio delle scienze in misura maggiore rispetto all’insegnamento tradizionale basato su un modello trasmissivo della conoscenza. Il passaggio nella didattica delle scienze da

metodi principalmente deduttivi a metodi *inquiry-based* promuove l'interesse degli studenti, aumenta la qualità dell'apprendimento e, al tempo stesso, stimola la motivazione dell'insegnante. In particolare, i metodi di coinvolgimento attivo nell'apprendimento sembrano produrre una conoscenza concettuale della fisica persistente nel tempo, come risulta dallo studio di Francis et al. (1998) sugli studenti universitari che hanno utilizzato il testo *Tutorials in Introductory Physics* (McDermott, 1998).

La ricerca didattica (Chinn & Malhotra, 2002; Krajcik, McNeill, Reiser, 2007) evidenzia che per realizzare un efficace apprendimento della fisica è necessario un laboratorio didattico dove le attività coinvolgono gli studenti nella sfida ad interpretare i fenomeni con progressiva assunzione di responsabilità sul proprio apprendimento attraverso un processo di analisi delle problematiche, di selezione critica delle alternative, di indagine e di argomentazione coerente. Con questa impostazione la ricerca descritta nella tesi affronta i problemi della didattica scientifica sopra richiamati delineando la progettazione di un percorso di apprendimento sullo specifico argomento della conduzione elettrica.

## **2. Le proprietà di trasporto elettrico**

Una parte rilevante delle innovazioni nella tecnologia dell'informazione e della comunicazione che hanno profondamente cambiato la società negli ultimi decenni è fondata sulla conoscenza e sulla manipolazione delle proprietà elettriche dei materiali, si pensi per esempio ai semiconduttori su cui si basa il funzionamento dei circuiti elettronici. Lo studio dei superconduttori rappresenta a tutt'oggi una delle frontiere più avanzate e interessanti della ricerca in fisica, con ricadute di notevole interesse sia dal punto di vista degli aspetti scientifici che per le applicazioni pratiche (Varlamov et al., 2012).

I fenomeni collegati alla conduzione elettrica sono alla base di una vastissima gamma di applicazioni e, anche per questa ragione, la loro trattazione è inclusa nei curricula a tutti i livelli di studio per l'apprendimento degli importanti concetti coinvolti nella loro descrizione dal punto di vista della fisica: carica, campo, potenziale, tensione, corrente, resistenza, ... (Euridyce 2012).

Una delle aree che è stata diffusamente esplorata dalla ricerca didattica negli ultimi decenni su un ampio spettro di età dei soggetti di studio è la conduzione nei circuiti elettrici.

Due ragioni alla base di questa forte concentrazione di ricerche sono illustrate nell'introduzione agli atti del convegno sulla didattica della conduzione elettrica svolto

in Germania nel 1984 (Duit, Jung & von Rhöneck, 1985) e mantengono ancora oggi la loro validità. La prima ragione è che l'elettricità è vista come un argomento centrale nei curriculum di fisica e/o scienze a tutti i livelli di istruzione, primaria, secondaria e universitaria. La seconda ragione è che i concetti legati all'elettricità (carica, campo, potenziale, tensione, corrente, resistenza) presentano aspetti problematici in quanto molto astratti e complessi, sicché la loro comprensione è strettamente legata a modelli differenti, difficili da integrare per gli studenti in un quadro concettuale coerente e completo (Wittmann, Steinberg & Redish, 2002). Secondo Mulhall, McKittrick, Gunstone (2001) la comprensione degli studenti di tutte le età al termine dei percorsi formativi è altamente idiosincratca, fortemente influenzata dagli usi quotidiani della terminologia, per la potenza, ad esempio, la resistenza, la corrente, e, soprattutto, per la tensione, e molto spesso in completo contrasto con la visione scientifica. Questi e altri autori (McDermott & Shaffer, 1992; Periago & Bohigas, 2005; Guisasola, 2010) segnalano le diffuse difficoltà nell'apprendimento dei concetti fondamentali riguardo alla conduzione elettrica (necessità della chiusura del circuito, topologia dei circuiti, corrente come effetto della tensione e non come causa, relazioni tra tensione e potenziale elettrico definito in elettrostatica) e la persistenza di concezioni non scientifiche anche al termine del ciclo dell'istruzione secondaria. Essi sottolineano che l'insegnamento tradizionale nel caso migliore fornisce agli studenti algoritmi formali per risolvere i problemi del libro di testo, ma non produce il cambiamento concettuale auspicato in letteratura (Vosniadou, 2008). Questo risultato non è sorprendente: gli studenti osservano e cercano di spiegare fenomeni macroscopici derivanti da processi microscopici che essi non rilevano né percepiscono direttamente e che coinvolgono l'analisi della propagazione dei campi elettromagnetici nei differenti mezzi, le relazioni dinamiche tra particelle cariche e campo elettrico e la coesistenza di comportamenti resistivi, induttivi e capacitivi anche nei circuiti elettrici più semplici (Cottingham & Greenwood, 1991).

Per affrontare le difficoltà di apprendimento altri autori (Eylon & Ganiel, 1990; Thacker, Ganiel & Boys, 1999) auspicano la necessità di adottare un approccio microscopico alla conduzione elettrica.

Nella stessa prospettiva, Tveita (1997) utilizza metodi di insegnamento non tradizionale nella trattazione del modello cinetico del gas di elettroni di conduzione a studenti di scuola superiore. La sua ricerca mostra che lo studente, partendo dalla rappresentazione dei processi che coinvolgono le particelle, rappresenta elementi importanti della conduzione elettrica nei circuiti, quali corrente, tensione, resistenza.

Eylon e Ganiel (1990) sottolineano inoltre la mancanza del raccordo concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica: in elettrostatica si utilizzano i concetti di campo/potenziale elettrico; in elettrodinamica i concetti di tensione/corrente. Per ricondurre la fenomenologia di entrambi i contesti ad un unico quadro interpretativo sembra necessario un modello microscopico.

Lavori più recenti (Hirvonen 2007; Hart, 2008; Stocklmayer, 2010) mostrano come la comprensione delle relazioni tra le grandezze fisiche relative all'elettrostatica e la fenomenologia elettrodinamica richiede la chiarificazione al livello microscopico delle relazioni dinamiche tra le particelle cariche e il campo elettrico, ciò che costituisce ambito specifico della teoria del trasporto. Nonostante queste chiare indicazioni, l'insegnamento dell'elettrodinamica svolto a scuola non viene integrato con la teoria del trasporto; una proposta didattica al riguardo, come quella qui delineata, appare quindi utile e necessaria.

### ***3. I modelli microscopici***

I modelli che la fisica utilizza per interpretare la realtà costituiscono spesso un ponte tra il livello macro e micro di descrizione dei processi e contribuiscono a una più profonda comprensione dei fenomeni (Euler, 2003). Modelli qualitativi della conduzione elettrica sono già stati adottati in molte situazioni di insegnamento/apprendimento (Licht, 1991; Tveita, 1997; Psillos, 1998).

La conduzione della corrente elettrica (continua) è un fenomeno complesso. Wittmann, Steinberg & Redish (2002) sottolineano che fisici e ingegneri usano differenti modelli per descriverla, e spesso questi modelli non sono tra loro coerenti. Un modello vede la conduzione come un fenomeno macroscopico descritto da grandezze quali corrente e tensione. Un modello microscopico semiclassico della conduzione fa riferimento al gas di elettroni liberi in un reticolo di ioni che oscillano intorno a posizioni di equilibrio. Un modello basato sulla fisica quantistica utilizza la descrizione della struttura a bande di energia del conduttore e la presenza di elettroni in stati delocalizzati. Questi modelli sono utili e significativi e nel loro insieme offrono interpretazioni funzionali della conduzione elettrica nei solidi. Tuttavia la molteplicità della modellizzazione è una potenziale fonte di confusione: per poter utilizzare il ruolo interpretativo di un modello scientifico è necessaria una visione organica che è spesso in contrasto con il ragionamento locale degli studenti (Viennot, 2003).

Una prima sfida posta dall'insegnamento della conduzione elettrica è il superamento del ragionamento locale verso una visione globale del processo di conduzione attraverso l'utilizzo del modello del trasporto come base per l'interpretazione dei fenomeni (Hart,

2008). Nella tesi si è affrontata questa sfida utilizzando da un lato l'approccio laboratoriale che comprende l'osservazione, l'analisi e la discussione di fenomeni e proprietà fisiche (Euler, 2003), dall'altro l'approccio interpretativo che porti gli studenti, attraverso la costruzione del significato e del ruolo di un modello microscopico, verso la visione quantistica dei sistemi fisici basata sui livelli energetici, che supera la primitiva rappresentazione particellare. Il confronto tra modello microscopico classico e quantistico, per esempio per quanto riguarda i diversi andamenti previsti per la resistività dei metalli in dipendenza della temperatura, offre agli studenti l'opportunità di poter analizzare lo stesso fenomeno da differenti prospettive.

A sostegno dell'impostazione accolta nella tesi, Chabay e Sherwood (2007) mostrano che quando lo sviluppo di modelli dei fenomeni microscopici è introdotto come parte integrante dello studio a livello universitario dell'elettricità e del magnetismo, gli studenti interiorizzano meglio i concetti, costruiscono modelli interpretativi coerenti e li usano per analizzare ed interpretare fenomeni fisici. Al contrario, studenti che non hanno sviluppato adeguati modelli dei fenomeni microscopici, mostrano grandi difficoltà nel ragionare qualitativamente sul comportamento di circuiti in situazioni transitorie (Thacker et al., 1999). Il livello microscopico è necessario per superare l'approccio formale nello studio dei circuiti in corrente alternata (Härtel, 1991).

Quando lo studente affronta la termodinamica può accadere che confonda energia, calore e temperatura (Wittmann, Steinberg & Redish, 2002). Una confusione simile si ripropone nello studio dei circuiti, per quanto riguarda le grandezze energia, corrente, tensione. Il modello della teoria cinetica dei gas contribuisce a chiarire il significato fisico delle diverse grandezze termodinamiche, come un modello microscopico della conduzione elettrica fonda la distinzione tra le grandezze energia, corrente, tensione.

Non tutti gli autori concordano con questa visione. Nello studio di Benseghir & Closset (1996) il ruolo del modello microscopico è ridimensionato, principalmente perché le conoscenze di elettrostatica acquisite dagli studenti sono spesso non ancora consolidate quando gli studenti iniziano lo studio dell'elettrodinamica. Considerazioni simili sono presenti anche in Borges & Gilbert (1999, p. 113) per i quali "l'introduzione di questo tipo di modelli genera un sovraccarico concettuale per gli studenti a causa del gran numero di processi che sono coinvolti anche nelle situazioni semplici". Certamente la trattazione contestuale dei livelli macro/micro di descrizione/interpretazione richiede uno sforzo notevole da parte degli insegnanti e degli studenti. Il livello macroscopico è necessario per l'interpretazione del funzionamento, per esempio, dei circuiti elettrici in termini delle grandezze tensione e corrente. Ma se si vuole offrire una spiegazione dei

fenomeni, superando la didattica delle “istruzioni per l’uso”, cioè passare dalla descrizione di *come* funziona un circuito al *perché* funziona, è necessario il livello microscopico, anche solo per rispondere alla domanda di un bambino: perché la lampadina si accende? L’approccio tradizionale ai fenomeni elettrici, fondato su relazioni matematiche tra grandezze macroscopiche quali tensione e corrente, lascia senza risposte domande come: perché un resistore percorso dalla corrente si scalda? Perché in un filo conduttore la corrente dipende linearmente dalla tensione?

La descrizione della conduzione elettrica in termini microscopici presenta molti problemi di apprendimento che riguardano la descrizione delle particelle che costituiscono la materia, del loro stato e dei loro processi di interazione (Wittmann, Steinberg & Redish, 2002). Tuttavia la comprensione dei processi microscopici alla base dei fenomeni fisici è un obiettivo di rilievo nell’insegnamento della fisica. Il motivo è duplice: è importante da un lato che gli studenti acquisiscano consapevolezza degli aspetti epistemologici dei modelli fisici, ovvero l’intreccio tra ipotesi teoriche e fenomenologia che li caratterizza, dall’altro la necessità di realizzare, in cooperazione con altre discipline quali ad esempio la chimica, possibili descrizioni unitarie di sistemi e fenomeni complessi. Il percorso presentato in questa tesi propone agli studenti di collegare la spiegazione dei fenomeni osservati al modello particellare della materia facendo riconoscere le interazioni tra le particelle cariche presenti nella materia e il campo elettrico. L’utilizzo anche quantitativo di un modello microscopico dei fenomeni elettrodinamici si pone quindi in questi termini e non come un semplice meccanismo qualitativo e descrittivo.

Il confronto con lo sviluppo storico delle idee si è rivelato utile per affrontare i problemi interpretativi relativi alla fenomenologia presentata nel percorso, in quanto i nodi evidenziati dalla storia riguardano la comprensione profonda degli argomenti, come ha evidenziato Duit (2005) nel quadro della *Educational Reconstruction*. Lo sviluppo storico delle idee relative alla conduzione elettrica ha comportato il superamento di alcuni dei principali nodi che spesso si ritrovano anche come difficoltà di apprendimento degli studenti, quali ad esempio la identificazione tra i concetti di energia e corrente, il riconoscimento della carica elettrica come proprietà delle particelle costituenti la materia, il collegamento concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica. Gli studenti tendono a percepire sovente i modelli microscopici come copie in scala ridotta della realtà e non come sue rappresentazioni concettuali. In tal caso l’aspetto sperimentale assume una forte centralità per far comprendere che i modelli sono sviluppati e testati mediante un confronto sistematico con i risultati sperimentali (McDermott et al., 2000). La ricerca descritta in questa tesi focalizza su come giustificare i diversi modelli, come

evidenziare i loro rapporti con le osservazioni e con i risultati sperimentali, come/dove introdurre nuove ipotesi interpretative in relazione al graduale allargamento del campo sperimentale.

Resta aperto, ed ancora ampiamente discusso, il problema didattico del collegamento tra fenomenologia elettrica e struttura della materia. Le modalità con le quali gli studenti utilizzano modelli microscopici per interpretare i fenomeni naturali identificandone valenze e limiti non sono state oggetto di studio estensivo in didattica della fisica (Bonura, 2008). La ricerca discussa in questa tesi, partendo dall'indagine della visione microscopica dei processi di conduzione elettrica degli studenti, si propone di definire strategie e materiali didattici a supporto di un percorso concettuale di connessione tra il modello particellare e le proprietà elettriche della materia in prospettiva verticale, dal livello di scuola primaria fino all'ultimo anno di scuola secondaria superiore. Il percorso parte dalla fenomenologia macroscopica per motivare la necessità di un modello microscopico e fonda gli elementi concettuali alla base dei comportamenti sperimentali osservati per poterne discutere. Vengono studiati gli strumenti significativi (formali, iconografici, ecc.) che rendono gli studenti capaci di usare un modello per formulare previsioni e confrontarle con le proprietà elettriche misurate di differenti materiali metallici e semiconduttori.

#### **4. La prospettiva verticale**

La corrente pedagogica del *costruttivismo* ha rielaborato, realizzando una sintesi felice, i punti di forza del contributo pedagogico di alcuni grandi psicopedagogisti del Novecento, quali Dewey, Piaget, Vygotskij e Bruner (Calvani, 1998) arrivando a costituirsi come “rivoluzione pedagogica del XX secolo” (Bottani, 2002). Il *costruttivismo* pone al centro del processo di insegnamento/apprendimento l'attività dello studente di costruzione della conoscenza superando il modello dell'insegnante onnisciente, che illustra in maniera esplicita gli argomenti ad allievi presumibilmente ignari.

Gli aspetti fondamentali del costruttivismo sono riassunti da Ogborn (1997, pag 131) in quattro punti:

- la scienza consiste di idee create dagli esseri umani
- la progettazione dell'attività didattica dovrebbe dare massima priorità alla costruzione di situazioni significative per gli studenti, sfruttando e utilizzando ciò che sanno e affrontando le difficoltà che possono derivare da come essi immaginano le cose siano
- rispetto per le idee dello studente

- coinvolgimento attivo degli studenti nell'attività didattica.

Per Bottani (2002), la diffusione nella didattica ordinaria dei principi del costruttivismo costituisce condizione necessaria per la riqualificazione della scuola in termini di apprendimento realizzato dallo studente. In questa prospettiva, Fiorentini (2008) sottolinea la necessità di attuare pratiche didattiche laboratoriali come ambito di processi di insegnamento/apprendimento centrate sulla problematizzazione, sulle ipotesi, sugli errori, e quindi sul ruolo attivo degli studenti nella costruzione della conoscenza. La realtà della scuola sembra, tuttavia, contraddire la teoria: le didattiche laboratoriali continuano ad essere marginali, anche nella scuola primaria, nell'insegnamento delle principali materie scolastiche. Tra le cause di questa limitata diffusione delle didattiche laboratoriali Fiorentini (2008) individua la mancata realizzazione del curricolo verticale, inteso come ripensamento in prospettiva unitaria delle conoscenze disciplinari che si propongono alle diverse età. Lo stesso autore evidenzia che l'individuazione delle conoscenze essenziali alle varie età e le metodologie laboratoriali che mettano il ragionamento dello studente al centro del processo di costruzione della conoscenza sono aspetti inseparabili della costruzione del curricolo verticale che consente la scuola di qualità per tutti (Fiorentini, 2008). Infatti la didattica in prospettiva verticale affronta il nodo della discontinuità tra ordini diversi di scuola sia accompagnando lo studente con continuità nell'acquisizione graduale dell'apprendimento sia contribuendo a ridurre la dispersione scolastica e a rafforzare l'interesse dei giovani per le discipline scientifiche come auspicato nel rapporto Rocard (2007). In questo documento, una commissione di esperti analizza i problemi riscontrati nell'insegnamento/apprendimento delle discipline scientifiche, individuandone i punti critici: le materie scientifiche sono insegnate spesso in modo troppo astratto, senza sufficiente background sperimentale, osservativo e interpretativo. Come risultato, gli studenti hanno una percezione dell'educazione scientifica come irrilevante e/o difficile (Rocard et al, 2007). Nella prospettiva verticale di progettazione del percorso didattico, al contrario, l'attività laboratoriale basata sull'apprendere in contesto si differenzia nettamente dall'insegnamento scientifico tradizionale centrato su forme di decontestualizzazione comprensibili a menti adulte e quindi il più delle volte non adeguate per gli studenti o, nel migliore dei casi, acquisite meccanicamente. In sintesi, la prospettiva verticale utilizzata nella tesi per lo sviluppo di un percorso di insegnamento/apprendimento sulla conduzione elettrica affronta il problema di adattare il contenuto fisico alle strutture cognitive degli studenti di età da 5 a 18 anni favorendo il processo di riorganizzazione dei concetti ai fini dell'apprendimento.



### 5. *L'apprendimento concettuale*

Per rappresentare la conoscenza la mente umana utilizza i *concetti* che, nella forma più semplice, possono essere espressi da una sola parola, come ad esempio vegetale, rosso o elettrone (Carey, 2000). Attraverso l'uso del linguaggio, i concetti elementari possono essere collegati per rappresentare idee più complesse, come per esempio “gli uccelli volano” oppure “la carica genera il campo”. Due concetti possono essere combinati per formarne un altro, ad esempio: “la densità è il rapporto tra massa e volume di un corpo”. Procedendo in questo modo si arriva a rappresentazioni estremamente complesse, quali ad esempio “il modello del Big Bang dell'universo”. In sintesi, la manipolazione dei concetti aiuta ad effettuare deduzioni e a rappresentare idee complesse. I concetti, come le maglie di una rete, consentono di costruire rappresentazioni più complesse o astratte, realizzate generalmente in forma di immagini in casi semplici, e come modelli in situazioni più astratte.

Secondo Piaget “l'apprendimento è un processo mentale che coinvolge percezione e consapevolezza di come stimoli e nuove idee vengono integrati nel quadro delle conoscenze preesistenti (un processo chiamato da Piaget *assimilazione*), e di come, attraverso il ragionamento, l'intero sistema delle conoscenze viene riorganizzato attraverso la ristrutturazione delle strutture preesistenti di conoscenza e la creazione di nuove”. Questa definizione implica che l'aggiunta di nuove informazioni è solo una parte dell'apprendimento in quanto il processo di apprendimento nella sua completezza coinvolge un processo chiamato da Piaget *accomodamento*: riorganizzazione, integrazione e creazione di nuove conoscenze.

Nelle scienze cognitive l'apprendimento inteso come “comprensione profonda” si riferisce generalmente alla ricchezza della rappresentazione concettuale, alla sua pertinenza allo specifico argomento, e soprattutto alla numerosità dei collegamenti tra concetti diversi (Grotzer, 1999). Comprensione profonda allora significa che i concetti sono attinenti, numerosi e ben collegati, ossia collegati in modo logico e significativo. La ricerca nel campo delle neuroscienze cognitive ha stabilito che la conoscenza profonda di un argomento implica la capacità di ricordarlo senza necessità di memorizzazione (Zirbel, 2004), ciò che costituisce un aspetto importante dell'apprendimento efficace. Spesso gli studenti non riescono ad affrontare problemi o situazioni nuovi, a causa di una insufficiente comprensione concettuale. La conoscenza concettuale è alla base della capacità di utilizzare idee fisiche per interpretare situazioni quotidiane e realistiche, ciò che dovrebbe fare parte della cultura del cittadino (McDermott, 2013). Se vogliamo che lo studente raggiunga una comprensione profonda e persistente, allora dobbiamo sostenerlo nell'integrare coerentemente la

nuova conoscenza nella struttura preesistente. Ciò richiede da parte dell'insegnante la rinuncia al suo ruolo tradizionale di sorgente della conoscenza per porsi invece come facilitatore del processo di costruzione della conoscenza da parte dello studente che utilizza ciò che ha già appreso e/o ciò che ha già sperimentato per avanzare gradualmente nell'apprendimento. L'azione dell'insegnante va principalmente rivolta a supportare i ragionamenti compiuti da chi apprende, non di compierli al suo posto. La qualità dell'apprendimento concettuale è legata alle strategie di insegnamento in misura molto maggiore rispetto a quanto si riscontra nell'insegnamento tradizionale. Ciò implica una maggiore responsabilità dell'insegnante che deve provvedere ad una progettazione organica dei passi del percorso didattico, evitando discontinuità e l'uso di concetti non preliminarmente trattati. Con questa impostazione nella tesi è discussa la scelta di contesti fenomenologici adeguati alla progettata costruzione/riorganizzazione dei concetti come pure la correlata strutturazione delle schede che accompagnano lo studente nel percorso di apprendimento fornendo stimoli significativi per affrontare le sfide interpretative.

### ***6. La formazione insegnanti***

Vi è la necessità di potenziare nel processo formativo il peso delle discipline scientifiche e della fisica in particolare per creare in tutti i futuri cittadini quella base culturale che supera l'analfabetismo scientifico denunciato dall'indagine PISA e considerato da tutti i Paesi europei come una delle più urgenti sfide da affrontare (Euler, 2003). Gli insegnanti di fisica si trovano quindi in una posizione chiave per formare gli atteggiamenti e le concezioni delle generazioni future verso la scienza oltre che per orientare la visione che la società ha della scienza. Essi hanno anche una grande responsabilità nell'educare i futuri scienziati (Mantyla, 2011). Nella visione didattica tradizionale l'insegnante di fisica valuta la capacità degli studenti di affrontare esercizi ed esami attraverso ragionamenti basati sulle formule. Nella didattica "progressiva" l'insegnante favorisce l'esplicitazione dei ragionamenti degli studenti e li prende in considerazione per guidare il processo di apprendimento. Pertanto lo sviluppo della professionalità degli insegnanti in questa direzione è un aspetto fondamentale della ricaduta dei risultati di ricerca nella pratica didattica (McDermott, 2013).

Lo studio e la realizzazione di laboratori didattici co-progettati di fisica moderna per la formazione insegnanti in fisica sono obiettivi di ricerca del progetto IDIFO (Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento, Michellini, 2010) che vede la collaborazione di 20 atenei italiani coordinati dall'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Udine. Nei laboratori IDIFO3-4 di impostazione PLS (PLS, 2009) la conoscenza dei

contenuti della fisica riguardanti lo specifico argomento viene ricostruita ai fini dell'insegnamento con attenzione al ruolo di esperimenti e modelli.

Nel corso della ricerca descritta in questa tesi sono stati svolti laboratori IDIFO3 e IDIFO4 sul tema della conduzione elettrica con insegnanti di scuola dell'infanzia, primaria, media e superiore che affrontano: 1) la riflessione sugli aspetti concettuali rilevanti ma anche storici ed epistemologici dell'argomento (fase metaculturale); 2) i nodi didattici, attraverso il coinvolgimento degli insegnanti negli esperimenti e nella discussione del percorso (fase esperienziale); 3) la sperimentazione nelle classi del percorso (fase situata). L'integrazione tra la conoscenza dei contenuti e la conoscenza pedagogica risponde al bisogno formativo degli insegnanti fornendo la conoscenza pedagogica dei contenuti necessaria per l'insegnamento (Shulman, 1987).

In questa tesi è presentata la ricostruzione didattica della conduzione elettrica come base del percorso sviluppato con gli insegnanti e sperimentato nelle classi. Una parte importante della ricerca riguarda la proposta di approcci, esperimenti e materiali che affrontano la sfida dell'integrazione tra la conoscenza fisica e la conoscenza pedagogica.

## II. Quadro teorico di riferimento

1. Metodologie di ricerca
  - 1.1 Model of Educational Reconstruction
  - 1.2 Design Based Research
  - 1.3 Content Oriented Research
  - 1.4 Qualitative Content Analysis
  - 1.5 Teaching Learning Sequences
2. Strategie didattiche
  - 2.1 Cambiamento concettuale
  - 2.2 Il ciclo Predict, Observe, Explain
  - 2.3 Model Based Inquiry
3. Modelli scientifici e modelli mentali
4. Natura della ricerca descritta nella tesi
5. Domande di ricerca e struttura della tesi

### ***1.1 Model of Educational Reconstruction***

Il MRE si inserisce nel quadro della visione dell'apprendimento come costruzione (Philips, 2000; Duit et al., 2012) che presenta due aspetti chiave:

1. chi apprende costruisce le nuove conoscenze sulla base di quelle che già possiede; quindi le concezioni intuitive già presenti negli studenti non sono viste come un ostacolo, ma come un punto di partenza per costruire la conoscenza.
2. la strutturazione dei contenuti finalizzata all'istruzione non rispecchia semplicemente quella della scienza, ma va progettata sulla base degli obiettivi dell'insegnamento del particolare argomento.

In altre parole i contenuti per l'insegnamento vanno ricostruiti dalla prospettiva didattica. Questo è il senso del termine ricostruzione didattica.

Duit (2005) osserva che l'insegnante ha una visione della struttura del contenuto scientifico di uno specifico argomento diversa dalla visione dello studente. Quindi, ai fini dell'insegnamento, la struttura del contenuto scientifico va ricostruita prendendo in considerazione lo scopo dell'insegnamento e la prospettiva dello studente. La ricostruzione didattica dei contenuti richiede profonde modificazioni del ruolo dell'insegnante e dei metodi di insegnamento. E' necessario passare da una didattica

centrata sul docente ad una didattica centrata sullo studente. I punti nodali del cambiamento dello stile didattico sono evidenziati in tab. 1:

Tabella 1 - apprendimento attivo/passivo (Sokoloff, 2007)

Apprendimento passivo	Apprendimento attivo
Basato sull'autorità dell'insegnante identificato come fonte di conoscenza consolidata	Il mondo fisico è la fonte della conoscenza. L'insegnante è una guida, l'apprendimento è costruito dallo studente
Le concezioni preesistenti degli studenti non sono prese in considerazione e permangono inalterate	Attraverso attività hands-on/minds-on gli studenti vengono guidati al cambiamento concettuale dalle idee spontanee/di senso comune verso la visione scientifica
I risultati sperimentali sono presentati come fatti	I risultati sperimentali sono osservati
Le esperienze di laboratorio servono a confermare le teorie apprese	Le esperienze di laboratorio sono usate per costruire i concetti

Il passaggio dallo stile didattico centrato sul docente a quello centrato sullo studente richiede un cambiamento concettuale da parte dell'insegnante, favorito da una opportuna formazione. Il MRE porta un significativo contributo alla formazione insegnanti suggerendo che gli insegnanti facilitino i processi di costruzione della conoscenza da parte degli studenti. In dettaglio, l'apporto alla fase metaculturale della formazione insegnanti si articola nei seguenti tre punti:

- a) analisi del contenuto fisico dal punto di vista della conoscenza concettuale che si intende gli studenti raggiungano. La ricostruzione didattica dei contenuti evidenzia i nuclei fondanti relativi alla tematica e definisce gli elementi del percorso adattandolo alle strutture cognitive degli studenti.
- b) integrazione tra la ricostruzione didattica dei contenuti e la conoscenza dei nodi di apprendimento specifici, che deriva dallo studio della letteratura di ricerca e dalla esplorazione delle idee spontanee degli studenti.
- c) confronto con lo sviluppo storico delle idee che può essere utile per affrontare i problemi interpretativi relativi alla fenomenologia presentata nel percorso, in quanto i nodi evidenziati dalla storia riguardano la comprensione profonda degli argomenti.

La chiarificazione dei contenuti disciplinari che individua i nuclei fondanti significativi per la didattica dell'argomento precede la costruzione dell'istruzione e svolge un ruolo

importante nella pianificazione dello studio empirico sull'insegnamento/apprendimento dello specifico argomento (Méheut, 2004).

A partire dalla sua originale formulazione (Kattman, Duit, Gropengießer & Komorek, 1996) il MRE ha acquistato sempre di più la valenza di un principio organizzatore della ricerca didattica in più aree interconnesse, come evidenziato nel seguente diagramma:

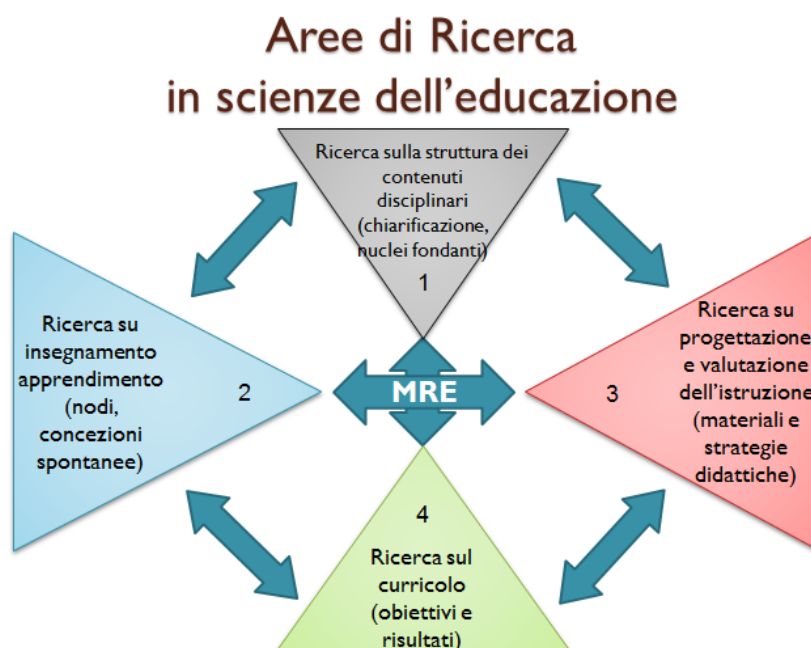


Figura 1 - MRE come organizzatore della ricerca didattica

Il MRE costituisce un quadro di riferimento della ricerca descritta nella tesi. Sono stati sviluppati, in particolare, i seguenti aspetti indicati dal modello:

- Chiarificare i contenuti disciplinari
- Individuare i nuclei fondanti
- Riconoscere i nodi di apprendimento e affrontare le concezioni spontanee
- Progettare un percorso didattico (materiali e strategie)
- Confrontare la comprensione attesa con quella ottenuta (schede di monitoraggio, pre e post test, ecc.)

Una caratteristica distintiva del MRE è la relazione di reciproca influenza tra l'analisi della struttura del contenuto scientifico e delle concezioni degli studenti che sono considerati sullo stesso piano come parametri importanti nel processo di ricostruzione didattica e per il conseguimento degli obiettivi di insegnamento.

### 1.2 Design Based Research

La tradizione di ricerca *Design Based (DBR)* affronta il collegamento tra ricerca e pratica didattica con un approccio basato sulla progettazione. La progettazione è un elemento

molto significativo della ricerca didattica. Edelson afferma che: “il cuore della didattica è lo sforzo progettuale. Se il fine ultimo della ricerca didattica è il miglioramento della qualità dell’istruzione, allora i risultati più utili per questo scopo sono la progettazione di attività, materiali e scenari” (2002, p. 119). Per scenario si intende l’insieme delle motivazioni che sostengono e giustificano teoricamente la costruzione di attività/materiali, riguardo cosa si intende realizzare e perché dovrebbe essere realizzato in quel modo. Nella letteratura di ricerca si ritrovano diverse caratterizzazioni dell’approccio *DBR*, ma alcuni aspetti sembrano essere largamente condivisi (Design-Based Research Collective, 2003): a) la ricerca è svolta in contesti scolastici reali, b) approccio pluralista rispetto a teorie, metodi e strumenti, c) progettazione di interventi/materiali didattici. Di conseguenza, l’approccio *DBR* è considerato una modalità con cui la ricerca contribuisce al miglioramento della didattica scientifica scolastica e universitaria (Rissanen, 2010). Lijnse (2000) sostiene che sia possibile, e desiderabile, cercare di precisare gli aspetti caratterizzanti la qualità dell’insegnamento. Essi riguardano: le motivazioni che sostengono l’insegnamento dell’argomento in quel modo e non in un altro, la coerenza della strutturazione sequenziale dei concetti e dei collegamenti tra loro, la scelta degli esempi, dei modelli e delle analogie e il modo in cui vengono presentati agli studenti, il collegamento tra i concetti ed i materiali di supporto alla didattica, le risorse per garantire che tutti gli studenti abbiano accesso a significative idee disciplinari, ecc. La specificazione di questi elementi costituisce una teoria della didattica dell’insegnamento/apprendimento di uno specifico argomento il cui sviluppo è obiettivo di una ricerca *Design Based*. In questi termini la *DBR* contribuisce a costruire una conoscenza didattica che può essere discussa e condivisa. L’apporto della ricerca consiste quindi: nell’aumentare la comprensione delle condizioni favorevoli all’apprendimento dello specifico argomento, nel produrre materiali utili, come percorsi didattici, guide per gli insegnanti, esperimenti, esempi, esercizi, simulazioni, analogie a supporto dell’apprendimento, nell’esplicitare le ipotesi e le decisioni spesso implicite nella progettazione di percorsi e materiali (ad es.: il commento con cui l’insegnante presenta e accompagna le diverse attività).

Nella prospettiva *DBR* un processo di progettazione didattica inizia spesso con la definizione di un problema e la descrizione di un’idea alla base di una possibile soluzione. L’analisi teorica del problema caratterizza i bisogni, opportunità, obiettivi, e precede una fase di interventi empirici che si conclude con la presentazione di un artefatto, il percorso didattico e/o i materiali di supporto (Rissanen, 2010).

La *Design Based Research* (DBR) affronta la complessità del contesto educativo scolastico reale con un approccio fortemente intenzionale (Tiberghien, Vince & Gaidioz, 2009): la progettazione didattica si prefigge lo scopo di apportare un contributo significativo in termini di prospettive d'apprendimento, approcci pedagogici innovativi, strumenti didattici, ecc. all'interno del contesto di applicazione. Le idee disciplinari rilevanti, i referenti concettuali, le forme di ragionamento che costituiscono obiettivi di apprendimento degli studenti vengono determinati attingendo e sintetizzando la letteratura di ricerca relativa allo specifico argomento. In ambiti relativamente ben studiati, ciò fornisce la necessaria conoscenza sulle interpretazioni spontanee e sulle concezioni iniziali degli studenti. Tuttavia può essere necessario condurre interventi didattici preliminari per rilevare: a) aspetti inediti delle concezioni degli studenti che devono essere presi in considerazione, b) le ricadute dell'insegnamento precedente sulle idee degli studenti. Tipicamente questi interventi sono condotti con un piccolo gruppo di studenti allo scopo di studiare in profondità e dettaglio una versione in scala ridotta dell'intervento didattico.

L'implementazione di un intervento didattico di tipo *DBR* prevede delle modalità di generazione e raccolta di dati (elaborati degli studenti, dialoghi, postura del corpo, gestualità in classe, interazioni sociali, risposte alle interviste, test, ecc.) che supportino l'analisi sistematica del processo di apprendimento oggetto di indagine. L'analisi rende conto dell'apprendimento realizzato collocandolo in un quadro coerente che permetta inoltre di prevedere il risultato degli interventi futuri in quanto correlato agli strumenti e alle strategie con cui viene sostenuto e organizzato. In tal modo l'analisi contribuisce ad accrescere le conoscenze teoriche sui processi d'insegnamento/apprendimento dello specifico argomento. Tuttavia la complessità delle interazioni coinvolte nel processo d'insegnamento/apprendimento limita la possibilità di generalizzare i risultati della progettazione. La ricerca descritta in questa tesi affronta il problema didattico in tutta la sua complessità in quanto i gruppi di studenti e i docenti coinvolti nell'intervento didattico non sono stati selezionati preventivamente, sulla base di opportuni requisiti funzionali all'intervento o agli obiettivi della ricerca, ma fanno parte della realtà scolastica così come essa è. Per affrontare questa situazione complessa e tentare di estendere il livello di generalità della ricerca si è dato: a) un carattere evolutivo e flessibile alla ricerca, che si concretizza attraverso il susseguirsi ciclico di quattro fasi: progettazione, sperimentazione, valutazione e revisione; b) si è condotta la ricerca in prospettiva verticale, in modo da esplorare in diversi contesti la validazione delle ipotesi, degli



elementi teorici e dei materiali didattici su cui si basa la progettazione tenendo conto della variabilità legata sia al grado d'istruzione che all'età degli allievi.



Figura 2 - ciclo DBR

L'iterazione del ciclo *DBR* in contesti differenti consente un approfondimento delle ragioni alla base delle scelte didattiche consolidando i risultati rivelatisi più efficaci; la valutazione degli interventi svolti facilita l'identificazione di inadeguatezze nell'analisi del problema didattico, inadeguatezze che non possono essere rilevate attraverso un processo di riflessione solo teorica.

### 1.3 Content Oriented Research

Lijnse (2000) ha sostenuto che la “dimensione dimenticata” nella ricerca in didattica delle scienze è il contenuto disciplinare. Individua questa come una delle ragioni principali per la mancanza di impatto della ricerca sulla pratica didattica. Egli descrive il suo disappunto, all'inizio della sua carriera, scoprendo che le teorie della psicologia dell'apprendimento e della formazione non gli hanno offerto quasi nessun aiuto nello sviluppo di una serie di lezioni per introdurre la meccanica quantistica nella scuola secondaria. Questo autore sostiene che le teorie dell'apprendimento, o dell'insegnamento, o del curriculum, o dell'organizzazione della classe, scollegate dallo specifico argomento oggetto dell'insegnamento, non forniscono orientamenti utili a chi lo insegna. Partendo da queste riflessioni, ha elaborato un quadro di riferimento teorico per la ricerca in didattica scientifica, noto come *Developmental Research* (Lijnse & Klaassen, 2004) dove indica la necessità di una didattica costruita a partire dai contenuti specifici. Nel corso dell'ultimo ventennio la ricerca didattica (Méheut & Psillos, 2004) ha rivolto un crescente interesse verso la progettazione e validazione di

percorsi brevi (poche ore) di insegnamento/apprendimento su contenuti specifici, quali ad esempio, il modello particellare dei gas o la teoria dell'evoluzione per selezione naturale (Andersson & Wallin, 2006). Cobb et al. (2003) al riguardo osservano che gli interventi didattici non sono utili solo per ottimizzare empiricamente “ciò che funziona”, ma possono condurre a sviluppare teorie. Queste teorie su processi di insegnamento/apprendimento relativi ad uno specifico settore sono relativamente umili. Una teoria di questo tipo consisterebbe nello specificare la sequenza concettuale del ragionamento degli studenti insieme con materiali e strategie a supporto dell'apprendimento.

La ricerca descritta nella tesi, accogliendo questi suggerimenti, fornisce indicazioni che orientano direttamente la pratica dell'istruzione sullo specifico argomento della conduzione elettrica attraverso la strutturazione dei passi concettuali e degli strumenti di un percorso didattico fondato sulla fisica. Il passaggio dalla cultura fisica alla didattica richiede uno sforzo non indifferente per individuare le tematiche, i nuclei fondanti e la fenomenologia da collocare in un quadro interpretativo coerente della conduzione elettrica. L'integrazione tra il punto di vista del ricercatore e quello dell'insegnante auspicata da Lijnse (2000) è stata facilitata dal fatto che chi ha condotto la ricerca descritta in questa tesi è anche un insegnante.

La progettazione degli interventi didattici accoglie alcuni aspetti individuati da Niedderer (2010) come caratterizzanti la *Content oriented research*:

1. determina obiettivi e strumenti in relazione allo specifico contenuto,
2. prende in considerazione le concezioni e i processi di apprendimento degli studenti,
3. elimina i concetti che non sono necessari (esempio: conducibilità al posto di resistività),
4. fornisce risultati generalizzabili sulla validità dell'approccio.

Un aspetto rilevante in relazione all'ultimo punto è il confronto tra la comprensione attesa e quella ottenuta (Méheut & Psillos, 2004), che fornisce indicazioni sulla validità dell'approccio su cui si fonda il percorso didattico sulla conduzione elettrica sviluppato in questa tesi. Tale confronto è stato compiuto sulla base dell'analisi dei questionari semistrutturati a risposte aperte (Cohen et al., 2007) compilati dagli studenti. L'approccio utilizzato in questa tesi, oltre alla valutazione complessiva del percorso attraverso un questionario di ingresso/uscita, monitora il processo interpretativo degli studenti durante gli interventi didattici preliminari, fornendo un'analisi dettagliata delle specifiche situazioni di apprendimento per rivedere le ipotesi, alla base della relativa progettazione, sull'apprendimento atteso.

La progettazione delle schede di monitoraggio, sebbene diversificata rispetto ai differenti contesti in cui sono stati somministrati, presenta alcuni elementi comuni: a) ogni quesito è introdotto da una presentazione della situazione presa in considerazione, b) ogni quesito è stato eventualmente suddiviso in più punti ciascuno riguardante un singolo e specifico aspetto del fenomeno/esperimento preso in considerazione.

La questione della validazione delle schede di monitoraggio in termini di: a) adeguatezza delle domande rispetto agli specifici aspetti indagati; b) coerenza e completezza dei contenuti, è stata affrontata attraverso due modalità (Fazio et al., 2013): A) *Face validation*: il questionario è stato testato dagli insegnanti delle classi coinvolte nella sperimentazione, allo scopo di individuare e correggere i possibili errori di interpretazione delle domande, le domande superflue, mancanti, confuse o inappropriate, etc. Gli insegnanti hanno commentato domande e risposte, facendo emergere eventuali criticità dello strumento. B) *Content validation*: l'analisi a-priori delle possibili risposte al questionario ha permesso di verificare che ogni domanda del questionario fosse adeguata alla misurazione voluta e che ogni aspetto che si intende misurare sia realmente in condizioni di essere misurato.

Queste modalità garantiscono che i metodi di indagine adottati catturano il significato ricercato e sono quindi adeguati per affrontare le domande di ricerca.

In questa tesi si è accolta la visione dell'analisi dati intesa come ricerca sistematica di significato (Hatch, 2002): un modo per elaborare i dati raccolti allo scopo di comunicare ad altri ciò che da essi è stato ricavato. Quindi i dati sono stati organizzati e interrogati in modo da permettere di individuare modelli, scoprire relazioni, sviluppare spiegazioni, fare interpretazioni, generare teorie, confrontare situazioni diverse. Strauss & Corbin (1998) indicano i fini assegnati all'analisi dati nella ricerca descritta nella tesi: orientare il ricercatore, evitare modalità standard di pensiero, supportare il ragionamento induttivo, chiarire le ipotesi di ricerca, ascoltare ciò che le persone dicono e fanno, dare delle risposte alle domande di ricerca, consentire l'uso di concetti, individuare categorie utili per la ricerca.

Tenendo presente che le attività didattiche, in quanto eventi di carattere sociale, hanno esiti strettamente dipendenti dal contesto e influenzati da fattori complessi, interconnessi e difficili da esprimere in modo quantitativo, si è scelta una modalità qualitativa di analisi, per realizzare queste finalità. L'analisi dei dati raccolti in forma scritta e audioregistrata è stata effettuata qualitativamente (Groves et al., 2004) classificando in categorie definite induttivamente le risposte e i disegni dei singoli studenti secondo la metodologia della *Qualitative Content Analysis*.

### 1.4 Qualitative Content Analysis

L'analisi qualitativa del contenuto (Mayring, 2004), consiste in un insieme di tecniche per l'analisi sistematica di testo (risposte scritte ad interviste, questionari, trascrizioni di audioregistrazioni, ecc.) sviluppate a partire da circa 30 anni fa allo scopo di rendere possibili deduzioni su caratteristiche specifiche dei soggetti di indagine. Al centro del processo di analisi è la definizione delle categorie in cui si classificano le risposte, che vanno accuratamente fondate in base alle domande di ricerca, e possono essere riviste nel corso del processo di analisi. L'approccio scelto in questa ricerca è basato sulla definizione *induttiva* delle categorie (Mayring, 2004). Esse sono il più possibile vicine alle frasi scritte dagli studenti e sono formulate in termini di queste. L'idea chiave del procedimento di analisi consiste nel formulare un criterio derivato dal contesto teorico e/o dalle domande di ricerca, che determina gli aspetti del materiale testuale da prendere in considerazione. Il materiale viene analizzato alla luce di tale criterio e classificato in categorie indicative e provvisorie. Durante l'analisi dei dati, nuove categorie possono essere formulate, vecchie categorie possono essere compattate o scomparire. Questo processo di revisione costituisce la base della definizione induttiva delle categorie. Al termine dell'analisi si stabiliscono categorie definitive e l'interpretazione dei risultati si basa sulla determinazione delle frequenze delle categorie mutuamente esclusive individuate. Un quadro di sintesi può fornire definizioni esplicite, esempi e regole di classificazione per ogni categoria, oltre che la frequenza di ciascuna categoria espressa in termini assoluti o relativi secondo la numerosità del campione.

Questa modalità consente di attribuire significato ai dati, di comunicare questo significato e di inferire conseguenze generalizzando i risultati dell'analisi (Mayring, 2004) e quindi è stata adottata come strumento di analisi dei dati nella ricerca descritta in questa tesi.

La fase di analisi dei dati è seguita dalla legittimazione dei risultati su essa fondate. Al riguardo Maxwell (1992) descrive tre dimensioni della legittimazione, che sono state considerate nella ricerca descritta nella tesi:

Tabella 2 - dimensioni della legittimazione

Dimensione	Definizione	Attuazione
Descrittiva	precisione fattuale del resoconto documentato dal ricercatore	Le interviste sono state trascritte con cura. La lettura dei questionari compilati dagli studenti ha comportato

		difficoltà dovute a grafia poco comprensibile in media nel 3% dei casi analizzati.
Interpretativa	la misura in cui l'interpretazione del ricercatore rappresenta una comprensione dei significati di parole e azioni dei membri del campione	Il ricercatore è anche docente di ruolo nella scuola secondaria con venticinquennale esperienza di comprensione delle comunicazioni degli studenti. La correttezza del risultato dell'analisi poggia: a) sulla definizione delle categorie, b) sulla attribuzione degli item alle categorie. Nei casi dubbi sono state riportate le frasi virgolettate degli studenti come esempi dell'estensione di una categoria.
Generalizzabilità	la misura in cui un ricercatore può generalizzare l'esito dell'analisi dati raccolti in una particolare situazione, contesto o popolazione ad altre situazioni, contesti o popolazioni	La valutazione degli esiti di un esperimento d'insegnamento, alla luce della complessità del sistema oggetto di studio, appare condizionata da una imprecisione difficilmente stimabile, dovuta ad elementi non oggettivi, quali evidenze basate su pochi casi. La difficoltà di generalizzare risultati ottenuti dall'analisi di un campione ridotto nella presente ricerca è stata affrontata curando che la scelta degli elementi del campione fosse del tutto casuale, in modo che il campione rappresentasse significativamente la popolazione oggetto dello studio.

Tashakkori & Teddlie (2008) individuano tre elementi, considerati nella ricerca descritta in questa tesi, che definiscono il rigore del procedimento inferenziale che determina i risultati dell'analisi dati:

Tabella 3 - elementi del processo inferenziale

Elemento	Descrizione	Attuazione
accordo interpretativo	il grado di coerenza dei risultati ottenuti a partire da soggetti differenti	La prospettiva verticale della ricerca ha consentito di riconoscere l'utilizzo delle stesse categorie in soggetti differenti per età.
univocità interpretativa	la misura in cui sono escluse altre possibili interpretazioni dei dati	L'interpretazione dei dati dipende dalle categorie che sono state definite in stretta relazione alle frasi degli studenti
coerenza teorica	la coerenza dei risultati con le conoscenze nel campo	Sono state ritrovate categorie già riportate in letteratura

### 1.5 Teaching Learning Sequences

Una consolidata linea di ricerca, che risale al 1980, considera la didattica di percorsi brevi per l'insegnamento/apprendimento (I/A) di argomenti scientifici specifici in ambiti quali, ad esempio, ottica, struttura della materia, fluidi (Méheut & Psillos, 2004). Gli aspetti trattati riguardano le concezioni degli studenti, gli elementi disciplinari specifici, i presupposti epistemologici, le prospettive di apprendimento, i differenti approcci didattici e le caratteristiche del contesto in cui il percorso viene attuato. Una caratteristica distintiva di questa impostazione, che attinge alla tradizione della ricerca-azione, differenziandosi dalla ricerca *Design Based*, è il contributo della ricerca al miglioramento, non alla progettazione ex-novo, di situazioni specifiche di apprendimento in contesto. Il termine *percorso di I/A*, utilizzato anche nella ricerca descritta in questa tesi, evidenzia lo stretto legame tra l'insegnamento proposto e l'apprendimento previsto dello specifico argomento. Méheut & Psillos (2004) hanno indicato due dimensioni principali che possono caratterizzare i percorsi di I/A: la dimensione pedagogica e la dimensione epistemica. La dimensione pedagogica varia da un estremo in cui l'approccio è centrato sul docente all'estremo opposto in cui l'approccio è centrato sullo studente; la dimensione epistemica varia da un estremo in

cui l'approccio è centrato sulla conoscenza scientifica all'estremo opposto in cui l'approccio è centrato sulla fenomenologia. Rappresentando le due dimensioni con due rette ortogonali, risultano individuati anche dei collegamenti trasversali che costituiscono i quattro lati di un rombo, definito dagli autori "rombo didattico" (fig. 3).

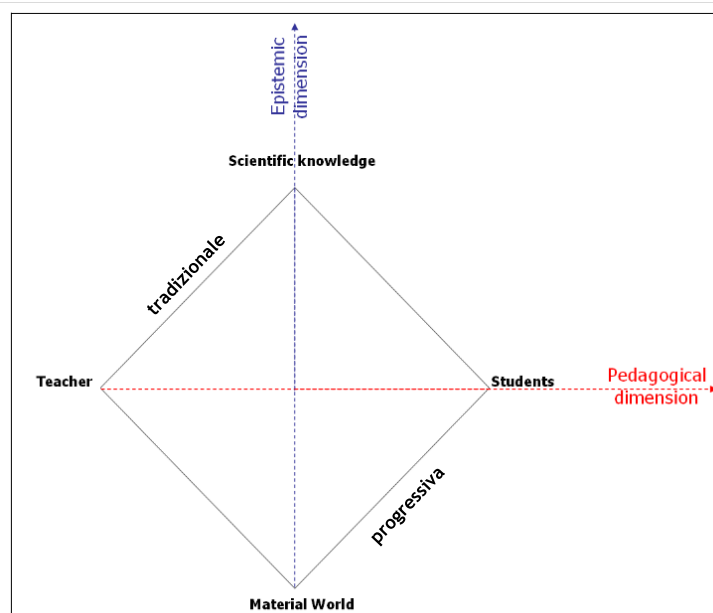


Figura 3 - rombo didattico

Il lato *material world-students* separa gli approcci centrati sul cambiamento concettuale da quelli centrati sulle conoscenze degli studenti; il lato *students-scientific knowledge* separa gli approcci che puntano a motivare ed interessare gli studenti dagli approcci rivolti alla conoscenza disciplinare; il lato *scientific knowledge-teacher* separa gli approcci in cui gli studenti sono incoraggiati a costruire autonomamente le conoscenze disciplinari dagli approcci in cui l'insegnante si propone come fonte della conoscenza; infine il lato *teacher-material world* separa gli approcci in cui le dimostrazioni empiriche sono svolte da cattedra dagli approcci in cui sono prevalenti le attività *student-centered*.

La didattica tradizionale, basata sulla trasmissione delle conoscenze, si colloca nel quadrante superiore sinistro del rombo, mentre quella "progressiva" (Euler, 2003) ispirata alla visione dell'apprendimento come costruzione da parte degli studenti di conoscenza partendo dalla fenomenologia, si colloca nel quadrante inferiore destro del rombo. L'asse orizzontale del rombo didattico riassume il confronto tra due prospettive: quella centrata sullo studente protagonista di un apprendimento con modalità non strutturate, e quella tradizionale in cui la didattica è diretta dall'insegnante verso l'acquisizione di conoscenze e competenze prefissate (Wells, 1999). Nel riferimento del rombo didattico (fig. 3) la ricerca descritta nella tesi, in quanto punta al coinvolgimento

attivo degli studenti introducendo i concetti relativi alla conduzione elettrica partendo dalla fenomenologia, si può collocare nel quadrante inferiore destro.

### **2.1 Cambiamento concettuale**

Lo sviluppo cognitivo secondo Piaget è il frutto di una continua negoziazione (potenzialmente non priva di distorsioni) tra strutture cognitive interne e realtà esterna. Ciò contrasta con l'idea risalente a Locke di vedere la mente dello studente come una *tabula rasa* nella situazione di apprendimento, che è stata presentata come fondamentale nell'insegnamento tradizionale (Rissanen, 2010) basato sulla trasmissione di conoscenze dal docente allo studente. Molte ricerche in diversi settori della didattica scientifica (Duit & Treagust, 2003) hanno mostrato che lo studente non è una *tabula rasa*, ma è portatore di concezioni intuitive e spontanee costruite in termini locali e contingenti a partire dall'esperienza quotidiana attraverso ragionamenti basati sul senso comune per dare senso alle proprie esperienze. La conoscenza così costituita è formulata in termini vaghi e/o ambigui, appare frammentaria, anche se presenta isole di coerenza è un sincretismo di elementi divergenti e non correlati, non è aperta a confutazioni (Viennot, 2001). Queste idee e concezioni possono essere ampie, spesso sono profondamente radicate e raramente in armonia con la visione scientifica quando non addirittura in netto contrasto. Esse restano implicite e persistono se non vengono fatte emergere e discusse. In senso generale, il cambiamento concettuale indica il risultato dell'azione didattica che guida gli studenti dalle concezioni spontanee verso la visione scientifica (Duit & Treagust, 2003). Questi autori sottolineano che il cambiamento concettuale non indica un processo di mera sostituzione delle concezioni spontanee con quelle scientifiche. Al contrario, l'apprendimento è visto come un processo graduale durante il quale le strutture concettuali interpretative spontanee degli studenti sono tenute in considerazione e continuamente arricchite e ristrutturare. Popper ha sostenuto che il confronto con il mondo materiale permette di modificare e far evolvere tali strutture (sia quelle individuali che quelle collettive). Tale posizione epistemologica ha una diretta e significativa influenza sulle scelte progettuali e metodologiche adottate nella presente ricerca.

In passato il termine *misconcezione* (Hammer, 1996) riferito alle concezioni degli allievi in conflitto con le conoscenze scientifiche, frutto dell'istruzione precedente o di una costruzione spontanea, ha dominato il dibattito sulle difficoltà d'apprendimento. Gli approcci didattici basati sul cambiamento concettuale guardano le misconcezioni come il prodotto di un modo ragionevole e personale di dare senso alle cose e che esse possono evolversi e modificarsi (avvicinandosi alle conoscenze scientifiche) se



l'insegnante predispone strategie didattiche che tengano conto di tali concezioni e che le utilizzino come punto di partenza per l'istruzione (Hammer, 1996). Tale idea appare coerente con gli studi sui meccanismi cognitivi di formazione delle concezioni spontanee (Bonura, 2008).

E' stato dimostrato (Periago & Bohigas, 2005) che solo raramente l'esposizione cattedratica delle idee scientifiche consente agli studenti di abbandonare le loro idee alternative, che tendono a rimanere invariate dopo lunghi periodi di insegnamento e convivono con le idee scientifiche. Ciò accade anche dopo che gli studenti ricevono una formazione sulla base di programmi specificamente progettati per modificare questi preconcetti (Furio & Guisasola, 2001). Il risultato è che gli studenti mantengono due regimi paralleli di conoscenza. Da un lato la conoscenza accademica di fenomeni, teorie, leggi, formule e metodi, che usano a scuola per risolvere esercizi ed affrontare gli esami. Dall'altro, invece, gli studenti mantengono il loro arsenale di concezioni alternative e lo usano per capire la realtà e interagire con l'ambiente.

E' importante notare che uno studente non assimila un nuovo quadro concettuale, se non avverte la necessità di cambiarlo. Pertanto, l'apprendimento significativo della scienza avverrà non attraverso l'accumulo di informazioni trasmesse, ma attraverso un cambiamento concettuale, secondo un processo che sembra simile al progresso scientifico (Vosniadu, 2008). Lo studente deve quindi essere consapevole della necessità del cambiamento concettuale per essere attivamente coinvolto nell'apprendimento di nuovi concetti. Nella prospettiva costruttivista di insegnamento/apprendimento lo studente, di fronte a una situazione che sta cercando di capire, può contribuire al processo di apprendimento con i suoi stessi schemi o modi di pensare preesistenti. Il percorso progettato in questa tesi consente allo studente di costruire attivamente la propria conoscenza praticando un metodo simile a quello del lavoro scientifico anche sotto l'aspetto della partecipazione a un dibattito di tipo scientifico. Ciò favorisce l'attitudine verso un atteggiamento critico, anche riguardo alle proprie idee, sorretto da un adeguato scetticismo, ma anche di fiducia nella razionalità condivisa che guida il processo di costruzione della conoscenza.

Le concezioni alternative degli studenti non rappresentano, tuttavia, l'unico fattore da considerare per il cambiamento concettuale. L'apprendimento può essere, infatti, ostacolato da fattori relativi ai nodi interni alla disciplina che hanno richiesto un travagliato processo storico per essere sistemati organicamente all'interno della teoria scientifica. L'apprendimento dei concetti relativi alla conduzione elettrica, ad esempio, può risultare difficile in quanto i concetti implicati quali carica, potenziale, corrente, sono astratti e le loro relazioni con l'esperienza percettiva degli allievi sono scarse, o

del tutto assenti. In questo caso, allora, viene a mancare uno dei termini (la realtà esterna) del processo d'adattamento, descritto da Piaget, necessari per lo sviluppo cognitivo. L'apprendimento dei modelli microscopici implica questo tipo di difficoltà che in questa tesi è stata affrontata attraverso un percorso di costruzione e di graduale revisione dei modelli microscopici della conduzione elettrica il più possibile ancorato ad informazioni tratte dall'osservazione dei fenomeni macroscopici. Si è scelto inoltre di illustrare i modelli microscopici attraverso opportune simulazioni per favorire la formulazione di ragionamenti basati sui modelli.

Duit & Treagust (2003) mostrano che gli approcci didattici basati sul cambiamento concettuale sono più efficaci in termini di apprendimento realizzato rispetto a quelli tradizionali. Psillos & Kariotoglu (1999) suggeriscono di valutare l'apprendimento, sulla base del monitoraggio in itinere e del confronto tra pre e post test, in termini di stabilità e persistenza delle nuove concezioni e di come vengono impiegati dagli studenti al fine di dare un senso alle situazioni sperimentali osservate durante gli interventi didattici. Givry & Tiberghien (2005) evidenziano che aspetti centrali che caratterizzano il cambiamento concettuale in itinere sono: a) esprimere una nuova idea, b) accrescere/decrescere il dominio di validità di una idea, c) stabilire legami tra differenti idee/situazioni sperimentali.

Tutti questi aspetti sono stati presi in considerazione nella progettazione degli interventi didattici della tesi contribuendo alla progettazione del percorso sulla conduzione elettrica in prospettiva verticale. Tuttavia l'attuazione del percorso nella realtà scolastica concreta richiede all'insegnante di discostarsi dallo stile tradizionale basato sulla trasmissione delle conoscenze, per costruire un contesto di apprendimento in cui avviene la costruzione di conoscenza e dunque centrato sull'attivazione cognitiva dello studente.

## ***2.2 Il ciclo Predict, Observe, Explain***

Il cambiamento concettuale può essere favorito da opportune strategie didattiche, quali il ciclo Predict, Observe, Explain (POE, White & Gunstone, 1992) che è stato utilizzato nella formulazione delle schede di monitoraggio degli apprendimenti compilate dagli studenti nel corso degli interventi didattici della ricerca. Il ciclo POE è adatto per studenti di ogni livello di età, si basa sulla visione costruttivista dell'apprendimento e tende a creare le condizioni dell'attivazione cognitiva degli studenti che consente loro di iniziare a riesaminare le concezioni di cui sono portatori. Nell'interpretazione spontanea della fenomenologia lo studente utilizza ragionamenti di senso comune tipicamente lontani dalla visione scientifica. Tali idee e concezioni, sempre presenti nel

soggetto che apprende, restano implicite e radicate se non vengono fatte emergere e discusse per favorire il cambiamento concettuale. A tale scopo la strategia POE si articola nelle seguenti richieste rivolte agli studenti: a) prevedere lo svolgimento del fenomeno, b) motivare le previsioni, c) confrontare le previsioni con l'osservazione del fenomeno.

Nella presente ricerca il ciclo POE è stato utilizzato per:

- rilevare le concezioni iniziali degli studenti;
- fornire informazioni sui ragionamenti degli studenti e sulla loro evoluzione;
- motivare gli studenti ad osservare i fenomeni e a ricercarne una spiegazione;
- favorire la discussione dell'argomento preso in considerazione.

Le domande di tipo POE hanno un carattere fortemente legato alla specificità dell'argomento, non sono generiche, come per esempio: "che cosa succede?", riguardano i ragionamenti svolti dagli studenti, non le loro conoscenze, né richiedono definizioni, che sono l'esito del processo di apprendimento e non l'inizio. Si riporta un esempio tratto dal cap. VIII: per indagare la dipendenza della resistenza elettrica dalla temperatura si immerge una bobina di filo di rame smaltato percorsa dalla corrente in azoto liquido, chiedendo agli studenti di prevedere il cambiamento della luminosità della lampadina quando la temperatura del filo si abbassa.

La strategia POE è adatta per affrontare argomenti in cui è facile ottenere evidenze fenomenologiche immediate; in certi casi può essere utile orientare le scelte degli studenti indicando delle opzioni tra cui possono optare nella fase di previsione. La possibilità offerta agli studenti di esprimere il proprio parere e di constatare che viene preso in seria considerazione favorisce lo sviluppo di un atteggiamento riflessivo e interpretativo.

### **2.3 Model based inquiry**

Il National Research Council (2012) individua schematicamente tre fasi nello sviluppo della pratica scientifica: 1) indagine empirica fondata sull'osservazione del mondo reale; 2) sviluppo di spiegazioni utilizzando ragionamento, pensiero creativo, teorie note e modelli interpretativi; 3) analisi critica, discussione e valutazione delle idee emerse, quali ad esempio l'adeguatezza di modelli e spiegazioni. Il modo in cui la scienza costruisce spiegazioni del mondo costituisce un elemento base dell'educazione scientifica ed al tempo stesso un principio regolatore nella programmazione e concreta realizzazione dell'attività didattica (De Toni & Dordit, 2012). Nel contesto scolastico la realizzazione di queste fasi di attività richiede da parte dello studente la mobilitazione di risorse eterogenee in termini di conoscenze ed abilità, dal formulare domande,

all'osservazione, dalla conduzione di esperimenti alla misurazione, con l'impiego dell'immaginazione, del ragionamento, di metodi di calcolo e di previsione, impiegando processi mentali di tipo induttivo e deduttivo ed utilizzando linguaggi diversi, sia naturali che formali. L'approccio centrato sulla fenomenologia realizza un valore conoscitivo che è spesso scarso nella didattica tradizionale, l'integrazione di diversi tipi di conoscenza (Colombo, 2011):

- conoscenza percettiva (ad esempio, gli esperimenti basati sulla percezione della luminosità della lampadina),
- conoscenza di senso comune (ad esempio, suscitando idee e previsioni ingenuie);
- conoscenza sperimentale (ad esempio, impostazione di esperimenti e misure);
- conoscenza astratta (ad esempio, grafici temporali di misure di tensione, corrente);
- conoscenza variazionale (ad esempio, analisi delle conseguenze delle variazioni delle condizioni sperimentali);
- conoscenza correlativa (ad esempio, mettendo in relazione le diverse rappresentazioni di uno stesso fenomeno e confrontando i modelli).

L'*inquiry* consiste nel fare osservazioni, porre domande, cercare informazioni, pianificare e progettare indagini, utilizzando strumenti per raccogliere, analizzare e interpretare i dati, spiegare e comunicare i risultati (Linn, et al., 2004). Molti sono i punti di vista sull'*inquiry* nella ricerca didattica (Schwartz & Crawford, 2006): spesso l'*inquiry* è inteso solo come attività laboratoriale, ma ciò non esaurisce il senso complesso del termine. Il dibattito sulla scelta tra *open inquiry* e *guided inquiry* e quindi su ciò che è *authentic inquiry*, e come può essere realizzato nella scuola è ancora aperto, anche se si può condividere l'idea (Schwartz & Crawford, 2006) che l'*authentic inquiry* riguarda la pratica di scienziati professionisti e che nella didattica scolastica delle discipline scientifiche possono essere presenti solo alcune analogie con il processo attuato dagli scienziati nella loro prassi. Alcune caratteristiche essenziali della pratica scientifica che possono essere importate nella realtà scolastica sono delineate da Pirrani (2010) come indicazioni metodologiche per una didattica basata sull'*inquiry*:

1. Sarà presentato un problema o uno scenario reale o autentico. Successivamente, dopo una prima riflessione a livello personale, seguita dalla discussione a livello di gruppo o di classe, scaturiranno una o più domande significative.
2. Gli studenti saranno chiamati a ricercare le informazioni individuate come importanti, ad analizzarle e sintetizzarle.
3. Si formuleranno ipotesi per rispondere alle domande sorte e/o per risolvere il problema posto o si proporranno modelli di interpretazione della realtà.

4. Verranno progettati semplici protocolli sperimentali o progetti di ricerca con lo scopo di validare quanto ipotizzato, avendo cura di selezionare chiaramente le variabili da considerare.

5. Si effettuerà la raccolta di dati, qualitativi e/o quantitativi

6. Si procederà alla rappresentazione e all'analisi dei dati ottenuti, organizzandoli in tabelle e grafici al fine di mettere alla prova le ipotesi o i modelli formulati inizialmente.

7. Gli studenti riflettono sulla congruenza tra i dati e l'adeguatezza degli stessi all'obiettivo posto inizialmente (le procedure che contengono errori sono più educative rispetto ai protocolli sperimentali testati ed affidabili, qualora il docente riscontri che le procedure proposte dagli allievi abbiano elementi di inesattezza, dovrebbe astenersi dal farlo notare prima dello svolgersi dell'attività in laboratorio e portare successivamente gli studenti a riflettere sui risultati).

8. Gli studenti rifletteranno e discuteranno su quanto avranno sperimentato o osservato o raccolto informazioni e individueranno le relazioni tra le variabili ed il rapporto tra le cause e le conseguenze dei fenomeni studiati. Saranno eventualmente anche chiamati a scegliere tra diverse spiegazioni o possibilità e ad argomentare le proprie scelte, sulla base delle evidenze riscontrate.

9. Le riflessioni e la discussione porteranno alla formalizzazione delle implicazioni/considerazioni finali, riguardanti sia la metodologia usata, sia la tematica affrontata.

10. Gli studenti, soprattutto quando avranno raggiunto una maggiore esperienza, potranno essere chiamati a confrontare il proprio lavoro con altri studi attinenti.

Si sono riportate estesamente le indicazioni di Pirrani (2010) in quanto utilizzate come linee-guida per la stesura delle schede di monitoraggio degli interventi didattici sulla conduzione elettrica sviluppato in questa tesi. Tenendo conto: a) che gli studenti delle classi interessate dall'intervento didattico non avevano familiarità con una didattica basata sull'*inquiry*, b) delle disponibilità dei tempi e dei materiali, il livello di *inquiry* ha implicato solo alcune delle fasi descritte, offrendo comunque una guida ed un supporto relativamente forte all'apprendimento. L'esplorazione della fenomenologia non è stata completamente priva di vincoli (*open inquiry*), ma organizzata attorno a poche idee chiave (la natura particellare della carica elettrica e il ruolo del campo elettrico nella conduzione). Il rischio dell'*open inquiry* è che le domande diventino arbitrarie, le ipotesi avanzate dagli studenti diventino casuali e non abbiano alcuna attinenza con il contesto di esplorazione (Windschitl, Thompson & Braaten, 2008). Al contrario, l'*inquiry* degli interventi didattici è stato guidato mediante una preliminare

pianificazione che conduce lo studente ad affrontare gradatamente situazioni problematiche concrete e/o astratte, in modo da promuovere una crescita graduale della comprensione. Ciò non coincide con il fornire estese esposizioni della teoria, in quanto l'apprendimento parte dall'esplorazione della fenomenologia e si sviluppa attraverso un processo di continua discussione delle idee sulla base degli elementi noti per consentire allo studente di costruire la comprensione. E' stata stimolata la formulazione di critiche rivolte dagli studenti alle spiegazioni proposte da parte degli studenti per favorire lo sviluppo del pensiero critico (Duschl & Grandy, 2008).

Il Rapporto Eurydice (2006) sull'insegnamento delle scienze nelle scuole in Europa evidenzia che le attività sperimentali svolgono un ruolo prioritario nell'apprendimento delle scienze solo se sono svolte in forme non stereotipate. Al riguardo, Windschitl, Thompson & Braaten (2008) individuano il *Model based inquiry* come un nuovo paradigma per le attività scolastiche *inquiry-oriented* che supera i limiti dell'approccio scolastico tradizionale al metodo scientifico, spesso utilizzato nella prospettiva di verifica di leggi note in base ad un procedimento induttivista articolato nelle fasi esperimento, osservazioni, misure e conclusioni. Tenendo conto di queste indicazioni, i modelli del fenomeno di conduzione elettrica vengono sviluppati nella tesi in accordo a cinque caratteristiche epistemiche della conoscenza scientifica (Windschitl, Thompson & Braaten, 2008): un modello deve essere controllabile (mediante confronto con i dati sperimentali), rivedibile (può cambiare in risposta a nuove prove o a nuove concettualizzazioni: ad esempio per il trasferimento di calore, modello cinetico vs fluido calorico), esplicativo (fornisce spiegazioni causali di fenomeni e processi), congetturale (le spiegazioni spesso si basano su ipotesi su enti e/o processi non direttamente osservabili) e generativo (fornisce nuove previsioni).

### **3. Modelli scientifici e modelli mentali**

I modelli sono elementi di un processo generale di produzione della conoscenza scientifica e giocano un ruolo di grande importanza nello sviluppo della fisica (Bellone, 1973). E' accaduto che le teorie non siano falsificate dagli esperimenti, bensì dai modelli. Un esempio è il modello atomico di Rutherford: in base agli esiti sperimentali, l'atomo doveva avere una carica centrale positiva praticamente puntiforme e molto massiva. Ciò implicava che gli elettroni orbitassero stabilmente attorno a questa carica, in disaccordo con le leggi fondamentali della meccanica e dell'elettrodinamica. Eppure la proposta di Bohr fu di cambiare quelle leggi. Questo esempio mostra che se il modello appare sufficientemente corroborato dai risultati sperimentali, almeno in alcune sue

caratteristiche strutturali, esso può essere un punto di partenza per superare teorie fisiche anche molto generali.

Un modello scientifico è una rappresentazione concettuale astratta e semplificata di un sistema che individua alcuni elementi chiave per spiegare e prevedere i fenomeni che coinvolgono il sistema (Schwarz et al., 2009). Gilbert & al. (1998a, 1998b) individuano come caratteristiche epistemologiche di un modello scientifico:

- specificità (a differenza delle teorie, riguarda un campo fenomenologico limitato),
- plausibilità (accordo con i dati),
- parsimonia,
- coerenza,
- generalizzabilità,
- potenzialità (di consentire previsioni, suggerire nuove osservazioni).

Possono essere considerati esempi di modelli scientifici: il modello atomico di Bohr, il modello particellare della materia, il modello dei raggi luminosi in ottica, il modello del ciclo dell'acqua, ecc. Gli elementi che rappresentano gli aspetti rilevanti del sistema, le relazioni tra essi e le regole di processo del modello sono basate sulle osservazioni dei fenomeni e sono coerenti con i dati sperimentali. Il modello e i fenomeni sono in relazione dialettica, l'analisi empirica permette di ipotizzare elementi, relazioni e regole di processo sulla base delle quali le previsioni del modello sono poste a confronto con gli esperimenti. I modelli scientifici sono utilizzati per spiegare e prevedere i fenomeni, ma sono anche generativi nel senso che consentono di generare previsioni su nuovi fenomeni che possono essere oggetto di ulteriore sperimentazione.

In questa ricerca, i modelli scientifici della conduzione elettrica sono utilizzati anche come strumenti di apprendimento in una prospettiva di integrazione delle loro valenze epistemologiche e pedagogiche.

Il concetto di modello mentale è usato in differenti aree di ricerca con significati differenti. In questa tesi un modello mentale sarà inteso come una rappresentazione di una parte del mondo reale in termini di concetti e di relazioni tra questi (Johnson-Laird, 1989). Le scienze cognitive indicano che le persone utilizzano i modelli per acquisire diversi tipi di conoscenza: per riflettere sulle loro esperienze, per trovare delle descrizioni sintetiche di fatti e fenomeni osservati, per predire che cosa avviene sotto determinate circostanze e per spiegare perché e come le cose accadono.

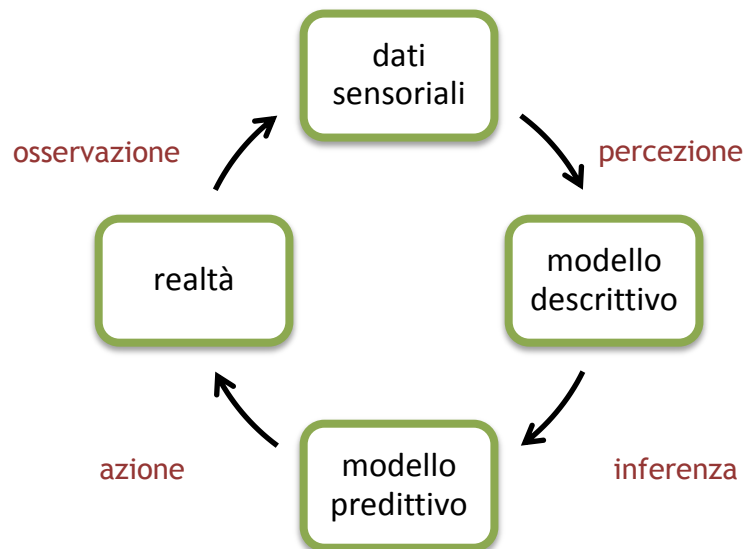


Figura 4 - ciclo Percezione/Azione

L'interazione di una persona con il mondo reale è mediata dal sistema percettivo e tipicamente si attua secondo un ciclo Percezione/Azione (fig. 4): il dato sensoriale è elaborato dal sistema nervoso centrale per produrre una rappresentazione mentale *descrittiva* della situazione. Al fine di pianificare un'azione effettiva viene generato un modello mentale *predittivo*; per effetto della esecuzione dell'azione il mondo reale può essere modificato producendo ulteriori dati percettivi, ed il ciclo si ripete (Hestenes, 2006).

E' importante chiarire che non tutte le rappresentazioni mentali sono modelli (Schwarz et al., 2009): i modelli, oltre all'aspetto descrittivo del sistema, sono caratterizzati da aspetti *esplicativi* che determinano l'azione del soggetto e che tipicamente sono espressi in termini di relazioni causa-effetto. Questo senso del termine *spiegazione* come resoconto causale si ritrova negli atti del *National Research Council*: gli studenti costruiscono spiegazioni che stabiliscono le cause di determinati effetti in base ad evidenze empiriche e argomentazioni logiche (1996, p. 145).

Per quanto riguarda la conduzione elettrica, esiste una differenziazione tra il modello descrittivo macroscopico che utilizza le grandezze tensione e corrente basato sulle leggi di Ohm stabilite per via empirica e il modello esplicativo classico (Drude, 1900) o semiclassico (Sommerfeld, 1928) basati sulla descrizione di processi microscopici in termini di teoria del trasporto che forniscono delle risposte sul perché esiste una relazione lineare tra tensione e corrente in un conduttore metallico. La considerazione degli aspetti cognitivi nella didattica evidenzia l'importanza di distinguere con cura tra descrizione e interpretazione di un fenomeno, sia quando si rivolgono domande agli



studenti che nei contesti di formazione insegnanti (Aiello & Sperandeo, 2000; Michelini, 2010).

Hestenes (2006) sottolinea che il linguaggio si riferisce a concetti appartenenti ad un qualche modello mentale e non agli oggetti del mondo reale. Questa distinzione gioca un ruolo importante sul piano didattico laddove i modelli contengono rappresentazioni concettuali di enti non direttamente osservabili quali particelle, forze, campi di cui non è possibile parlare come se fossero copie di oggetti del mondo reale, ma solo come elementi di un modello.

Rispetto alla visione dell'attività scientifica come determinazione se una certa ipotesi sia più o meno corretta (Windschitl et al., 2008), l'introduzione di modelli scientifici nella didattica si colloca nella visione generale della conoscenza scientifica come congetturale e rivedibile, caratteri riconosciuti come fondamentali dal punto di vista epistemologico (Lederman, 2007). In filosofia, l'epistemologia della scienza è una descrizione della natura della conoscenza scientifica, in relazione alle fonti, al valore di verità, alla validazione, ecc. di tale conoscenza (Rissanen, 2010). Dalla prospettiva pedagogica è riconosciuto che la posizione epistemologica dell'insegnante influisce consciamente o inconsciamente sull'istruzione in quanto essa determina sia le scelte culturali generali che la pratica didattica quotidiana (Craven & Penick, 2001). Sembra necessario che gli insegnanti discutano alcuni aspetti di un modello scientifico, quali i limiti del campo di applicabilità, i rapporti con la teoria fisica (Michelini et al., 2002). Per questi motivi appare utile che in sede di progettazione didattica sia presente una esplicita riflessione critica sulla posizione epistemologica adottata, considerandone valenze e limiti, per favorire anche un confronto tra diverse prospettive epistemologiche.

Un'analisi di carattere epistemologico può favorire l'avvicinamento dell'inquiry praticato nella scuola all'autentica indagine scientifica (Chinn & Malhotra, 2002) e può aiutare la progettazione didattica a considerare come obiettivi metacognitivi per gli studenti (Smith & Wenk, 2006):

- 1) differenziare descrizioni e interpretazioni dei fenomeni,
- 2) differenziare ipotesi e teorie scientifiche,
- 3) riconoscere la natura congetturale della conoscenza scientifica.

Driver & al. (1996) nella loro ricerca sulla capacità degli studenti di collegare l'osservazione con la teoria, identificano tre tipi di ragionamento: il primo è il ragionamento basato sui fenomeni, quando gli studenti non mostrano alcuna chiara distinzione tra la descrizione del fenomeno e la sua spiegazione; il secondo è il ragionamento basato sulle relazioni, quando la spiegazione emerge come formulazione

di una legge empirica che collega i dati sperimentali; il terzo è il ragionamento basato su un modello, quando la spiegazione del fenomeno è derivata da un modello di esso e si avvicina al ragionamento scientifico. Favorire la partecipazione degli studenti alle pratiche scientifiche, quali sperimentazioni e spiegazioni, promuovendo lo sviluppo del ragionamento scientifico è uno degli obiettivi centrali nella didattica scientifica (Chinn & Malhotra, 2002; Krajcik, McNeill, e Reiser, 2007). Di conseguenza la ricerca didattica ha rivolto molta attenzione all'utilizzo di modelli scientifici nell'insegnamento/apprendimento (una rassegna al riguardo è riportata in Sins et al., 2009).

Schwarz et al. (2009) individuano quattro fasi compatibili con la pratica didattica *Design Based*:

1. Gli studenti costruiscono modelli coerenti con le osservazioni e le teorie note
2. Gli studenti utilizzano modelli per illustrare, spiegare e prevedere i fenomeni
3. Gli studenti confrontano e valutano diversi modelli dello stesso sistema
4. Gli studenti rivedono i modelli per ampliarne il campo esplicativo e predittivo

Alcune ricerche (riportate in Schwarz et al., 2009) suggeriscono che la pratica didattica basata su queste fasi è gestibile in classi di scuola elementare e media. Tuttavia caratteristiche sofisticate dei modelli, quali potere predittivo e parsimonia, che non nascono dalle esperienze quotidiane, possono comportare difficoltà per gli studenti. Comunque il vantaggio pedagogico di lavorare con modelli scientifici consiste nell'impegnare gli studenti ad articolare la propria comprensione di come si svolge un fenomeno. In questa prospettiva, la costruzione e la valutazione di modelli descritta nella tesi è una modalità per approfondire la spiegazione dei fenomeni, che intende superare l'uso tipico dei modelli nelle scuole per scopi computazionali o come rappresentazioni descrittive dei fenomeni (Schwarz & Gwekwerere, 2007).

Dal punto di vista pedagogico, alcuni criteri cui dovrebbe soddisfare un modello per realizzare queste finalità sono enucleati da Hart (2008):

- 1) Il modello è plausibile per gli studenti, ossia è chiaro perché la spiegazione è data in termini di certi enti/relazioni e non di altri.
- 2) Il modello spiega i fenomeni osservati e suggerisce ulteriori domande, esperimenti o osservazioni.
- 3) I meccanismi esplicativi utilizzati nel modello sono significativi per gli studenti, in modo che possano pensare al modello in termini propri.
- 4) Il modello affronta e supera le difficoltà concettuali e le concezioni alternative degli studenti.

I modelli possono essere utilizzati per rappresentare fenomeni complessi o difficili da osservare direttamente. Nelle Indicazioni Nazionali per il Liceo Scientifico, Opzione Scienze Applicate (INDIRE, 2010), viene inserito come argomento curricolare la trattazione del modello particellare della materia (pag. 45), del modello cinetico per il gas perfetto (pag. 42) visto come connessione tra l'ambito microscopico e quello macroscopico. Per quanto riguarda la conduzione elettrica, Hart (2008) sottolinea la presenza nei curricula australiani del modello del trasporto per lo studio dei circuiti elettrici che ritiene adeguato alla trattazione didattica a tutti i livelli di età, in accordo con quanto si sostiene in questa tesi.

#### **4. Natura della ricerca descritta nella tesi**

La ricerca condotta in questa tesi si colloca nel quadro delle ricerche empiriche, finalizzate a contribuire alla pratica didattica (Lijnse, 2000) e a produrre proposte di insegnamento/apprendimento. Integra due prospettive differenti della tradizione europea (Duit, 2006): Science Oriented, all'interno della quale la progettazione di percorsi di insegnamento/apprendimento è collegata al contenuto scientifico; Student Oriented, in cui il focus è posto sulle difficoltà di apprendimento degli studenti affrontate con l'obiettivo del cambiamento concettuale (Vosniadou, 2008).

La tesi tratta problemi che nascono dalla pratica didattica in fasi temporali differenti: una prima fase di ricerca sui fondamenti disciplinari accompagnata dall'analisi di libri di testo e di proposte didattiche sull'argomento della conduzione elettrica. Una rassegna di lavori tratti dalla letteratura di ricerca didattica sui nodi di apprendimento specifici precede la fase di indagine delle idee e sui ragionamenti interpretativi della fenomenologia in studio. Segue la progettazione didattica nel quadro della *Design Based Research* che comprende più interventi in contesti formali/informali differenziati per livello scolare e caratterizzati dall'evoluzione dei materiali di appoggio e valutazione. La produzione di materiali per la didattica (proposta di percorso, strumenti di monitoraggio, schede di lavoro in classe, apparati per esperimenti, ...) strettamente legata al lavoro di esplorazione concettuale, è stata modificata a seguito dell'analisi degli esiti di ogni intervento. Ripensare le problematiche dei contenuti scientifici in termini di fondamenti disciplinari e ricostruirli in prospettiva educativa è il primo passo della ricerca didattica secondo l'impostazione metodologica definita dal *Model of Educational Reconstruction*.

### 5. Domande di ricerca e struttura della tesi



Figura 5 - flusso delle attività di ricerca

I quadri di riferimento illustrati hanno orientato in modo significativo le modalità con cui è stata affrontata la ricerca e la progettazione didattica descritta in questa tesi. La ricerca, condotta nella prospettiva *MRE*, vede l'integrazione di una analisi disciplinare, di tipo storico ed epistemologico, e di una analisi pedagogica, finalizzata a individuare concezioni spontanee, potenziali difficoltà d'apprendimento e approcci didattici esistenti. Ciò ha costituito l'analisi preliminare del problema didattico affrontato dalla ricerca descritta nella tesi che può essere sintetizzato dalle seguenti domande:

- Come gli studenti spiegano la conduzione elettrica, e quali difficoltà di apprendimento questo comporta?
- Con quale percorso gli studenti pensano attivamente e con interesse ai vari aspetti della conduzione elettrica?
- Quali referenti utilizzare per fondare un modello concettuale della conduzione elettrica?
- Come rendere coerenti i livelli macro/micro di descrizione dei processi?
- Quali attività/simulazioni/esperimenti producono il cambiamento concettuale degli studenti dalle concezioni di senso comune verso la visione scientifica?

Le risposte a queste domande costituiscono uno studio delle condizioni che favoriscono l'apprendimento della conduzione elettrica e sono state ricercate determinando gli aspetti dei contenuti fisici specifici da prendere in considerazione, al fine di favorirne l'apprendimento.

Il flusso delle attività di ricerca (orientate dalla prospettiva *MRE*) ha avuto una progettazione di tipo *DBR* (fig. 5) che ha determinato l'organizzazione della tesi in capitoli. Pertanto nel cap. III vengono discussi i modelli della conduzione elettrica utilizzati nella fisica, nel cap. IV vengono trattati gli aspetti della ricostruzione didattica dei contenuti disciplinari e nel cap. V viene presentata una rassegna della letteratura di ricerca didattica sulla tematica di ricerca. I capitoli da VI a IX presentano le varie fasi degli interventi didattici focalizzati sui contenuti, attuati nel corso della ricerca con studenti ed insegnanti differenziati per livello scolastico, mentre il percorso didattico sulla conduzione elettrica in prospettiva verticale centrato sui contenuti disciplinari pur presentando la flessibilità necessaria per accogliere le revisioni derivate dalle sperimentazioni in diverse realtà formative è illustrato nel cap. X. Il cap. XI riassume i risultati della ricerca, il XII la bibliografia e il XIII riporta come appendice i dati raccolti nella ricerca.

### III. Modelli della conduzione elettrica

1. Il punto di vista strutturale
2. Le principali tappe storiche
3. Resistività nel modello classico
4. Il riscaldamento Joule
5. Resistività nel modello semiclassico
6. Resistività nel modello di Bloch
7. Resistività nel modello a bande
8. Resistività dei semiconduttori
9. Prospetto riassuntivo
10. Confronto critico di aspetti selezionati

#### **1. Il punto di vista strutturale**

Le caratteristiche più significative dei metalli sono le loro eccellenti proprietà di conduzione elettrica e termica. In particolare la legge di Ohm suggerisce che non esiste una tensione di soglia sotto la quale la corrente è zero. Queste caratteristiche nel loro complesso indicano l'esistenza nei metalli di portatori di carica relativamente liberi, che possono muoversi sotto l'influsso di piccoli campi elettrici.

Tutti gli elementi metallici presentano strutture con alti numeri di coordinazione (NC) rispetto ai solidi ionici (tipico NC = 6) e a quelli covalenti (tipico NC = 4). Ciò indica che gli elettroni di valenza occupano lo spazio interionico reticolare in modo più uniforme nei metalli rispetto agli altri solidi. Nel caso di legame covalente, la densità elettronica intorno agli atomi si concentra solo in certe direzioni. La duttilità dei metalli indica che, rispetto ai covalenti, i legami metallici sono molto meno direzionali. Tuttavia la resistenza alla rottura per trazione significa che i legami sono relativamente forti, come viene confermato dalle misure dell'energia di legame per atomo nei metalli tipici.

Per esempio, l'energia di legame per atomo nella molecola covalente  $\text{Li}_2$  è 0,6 eV, mentre il valore per atomo nel Li metallico è 1,8 eV. Nel secondo caso, il valore di 1,8 eV deriva dai legami con numerosi atomi vicini.

Un altro aspetto importante dei metalli è che vi è molto spazio vuoto interionico. Nel Li metallico la distanza tra i centri di due ioni primi vicini è 3,04 Å, maggiore della somma dei raggi ionici del  $\text{Li}^+$  ( $2 \times 0,60$  Å). Ne segue che il volume accessibile agli elettroni di conduzione è relativamente grande. Gli elettroni di conduzione possono essere distribuiti in modo uniforme nella maggior parte del volume del metallo, in modo molto diverso da quanto accade nei solidi covalenti o ionici.

Si può pensare alla formazione del legame metallico nel modo seguente. Per un atomo isolato gli elettroni di valenza si trovano in una buca di potenziale creata dal nucleo e dagli elettroni dei gusci interni. All'avvicinarsi dei diversi atomi, la sovrapposizione dei potenziali atomici determina nei punti interni al metallo e lontani dal bordo un potenziale effettivo che è inferiore a quello degli atomi isolati. Per i metalli si può fare una utile assunzione di grande semplificazione. Si può assumere che il complicato potenziale effettivo, con minimi molto accentuati in corrispondenza agli ioni metallici, sia costante all'interno del metallo. Ciò equivale ad assumere che il campo elettrico medio all'interno del metallo, in assenza di tensioni applicate dall'esterno, è zero. Queste considerazioni strutturali sostengono il modello dell'elettrone quasi libero nel metallo schematizzato come una buca rettangolare di energia potenziale (fig. 1, da <http://dcssi.istm.cnr.it/DCSSlindx.htm>).

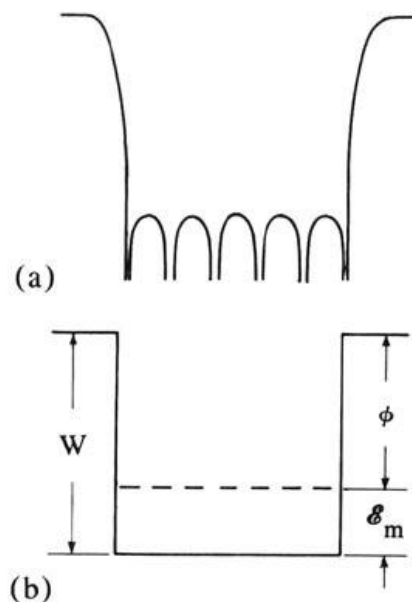


Figura 1 - potenziale all'interno del metallo (a) e sua approssimazione (b)

Gli elettroni di conduzione sono relativamente liberi all'interno del metallo, ma non di uscire da esso, in condizioni ordinarie, per la presenza delle pareti della buca, di altezza dell'ordine del lavoro di estrazione del metallo, tipicamente qualche eV.

L'effetto Joule, che consiste nel riscaldamento di un materiale percorso da corrente, indica l'esistenza di interazioni tra gli elettroni di conduzione e gli ioni reticolari. Questi processi sono responsabili al livello microscopico del trasferimento di energia al reticolo cristallino e si manifestano al livello macroscopico come resistenza. Il comportamento elettrico del conduttore è infatti descritto dalla resistenza che compare

come parametro fenomenologico nella prima legge di Ohm. La corrispondente grandezza fisica che descrive il comportamento elettrico del materiale è la resistività.

## 2. Le principali tappe storiche

Un primo aspetto caratteristico della resistività dei solidi, osservato già nel 1843 da Michael Faraday, è la differenza tra l'andamento della resistività con la temperatura tra metalli (fig. 2) e semiconduttori (fig. 3).

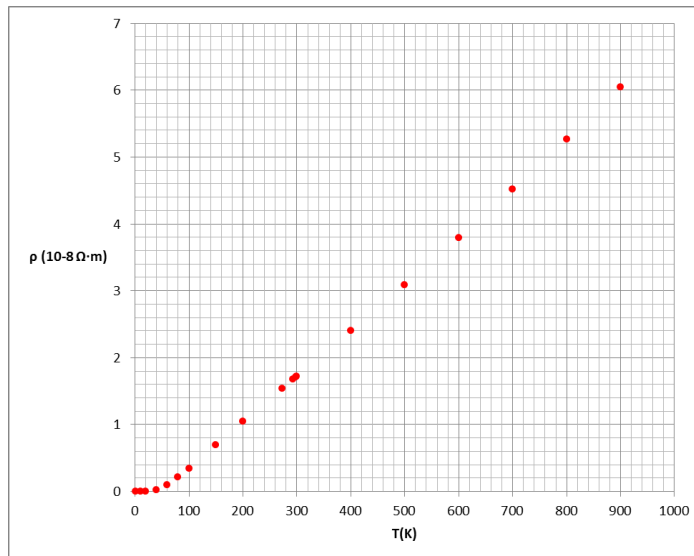


Figura 2 - resistività del rame (Desai, 1984)

Un semiconduttore è un solido cristallino le cui proprietà elettriche sono tipicamente intermedie tra quelle dei metalli e degli isolanti e possono cambiare significativamente modificando la concentrazione del drogante inserito nel materiale.

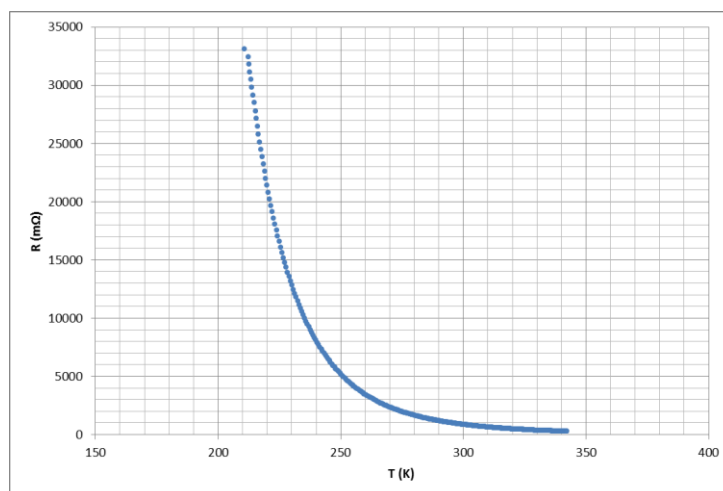


Figura 3 - resistenza di un diodo NTC (Scuola Estiva 2013)



Mentre tipicamente in un metallo la resistenza aumenta all'aumentare della temperatura, seppure con andamenti differenziati a seconda dell'intervallo di temperature considerato, la resistività dei semiconduttori intrinseci diminuisce con la temperatura, fenomeno noto come coefficiente negativo della resistività.

In generale, un modello della conduzione elettrica dovrebbe spiegare: a) perché la resistività di materiali differenti è differente, ad esempio, il quarzo fuso ha resistività  $10^{24}$  volte maggiore della resistività dell'argento; b) come e perché la resistività di un materiale varia con la temperatura. Nella fisica sono utilizzati come modelli esplicativi microscopici: il modello classico di Drude-Lorentz ed il modello semiclassico di Sommerfeld, che si sono succeduti storicamente e che rappresentano le principali tappe di avvicinamento al modello pienamente quantistico dei solidi basato sulla struttura a bande che si presenta come potente strumento concettuale per produrre una spiegazione unitaria di tutti i fenomeni osservati.

Tabella 1 - momenti nella storia della conduzione

Primo tentativo	Weber	1875
Scoperta dell'elettrone	J. J. Thomson	1897
Modello classico elettroni liberi	Drude	1900
Revisione del modello di Drude	Lorentz	1905
Modello quantistico elettroni liberi	Sommerfeld	1928
Modello ondulatorio elettroni liberi	Bloch	1929
Modello a bande per i solidi	A. H. Wilson	1931
Transizione metallo-semiconduttore	Mott	1936
Transistor	Bardeen e Brattain	1948-49
Superconduttività	Bardeen, Cooper e Schrieffer	1957
Leghe, policristalli, film sottili	?	Oggi

Nel seguito del paragrafo si illustra una breve rassegna delle tappe principali della storia dei modelli della conduzione elettrica (tab. 1) che saranno approfonditi nel seguito del capitolo.

Weber (1875): un primo tentativo di spiegare la conduzione elettrica fu fatto da Weber. Egli immaginò che le molecole di un metallo fossero instabili e che particelle cariche fossero continuamente espulse e riassorbite da esse (Wilson, 1953).

Drude (1900): applica la teoria cinetica dei gas agli elettroni di conduzione del metallo, trattando le collisioni con gli ioni reticolari come urti tra molecole di un gas ideale. L'espressione per la resistività elettrica di un metallo in termini delle proprietà microscopiche dei portatori

$$\rho = m/e^2 n \tau$$

ricavata per la prima volta da Drude è usata ancora oggi (Lipperheide et al., 2001; Mizutani, 2003; Chudnovsky, 2007; Horng et al., 2011). Qui,  $n$  è il numero di elettroni per unità di volume e  $\tau$  è l'intervallo di tempo medio tra due collisioni consecutive dell'elettrone con gli ioni reticolari. Il modello fornisce previsioni qualitative sulle proprietà elettriche dei metalli del gruppo 1A e 1B. Drude utilizza il modello per calcolare anche la conducibilità termica fornendo con successo una base teorica alla legge di Wiedemann-Franz (1853). Egli trova che il rapporto tra la conducibilità termica ed elettrica di qualsiasi metallo ad una data temperatura è proporzionale alla temperatura e ne fornisce una espressione in termini di costanti fondamentali (la costante di Boltzmann e la carica dell'elettrone). Il modello di Drude è alla base della visione del legame metallico in chimica (Jensen, 2009).

Lorentz (1905): rivede il modello di Drude applicando la statistica di Maxwell-Boltzmann per descrivere le velocità degli elettroni di conduzione. Tuttavia il modello incontra serie difficoltà. In primo luogo la concentrazione degli elettroni di conduzione è circa 1000 volte maggiore della concentrazione delle molecole di un gas ideale in condizioni standard di temperatura e pressione. Ciò pone seri dubbi sulla validità della descrizione in termini di gas perfetto classico. Inoltre, se si utilizza la legge di equipartizione dell'energia di Boltzmann  $\frac{1}{2}mv^2 = k_B T$  per determinare la velocità media degli elettroni di conduzione, si ottiene che la resistività varia proporzionalmente alla radice quadrata della temperatura, essendo la sezione d'urto elettrone-ione reticolare indipendente dalla temperatura nel modello di Drude in cui gli ioni reticolari erano considerati fermi. Era ben noto che la resistività dei metalli tipicamente aumenta linearmente con l'aumentare della temperatura in un ampio intervallo di temperature. Un'altra difficoltà correlata sorgeva dall'applicazione della legge di equipartizione di Boltzmann al calcolo del contributo degli elettroni liberi al calore specifico. La validità della legge di Dulong-Petit per il calore specifico sia per gli isolanti che per i metalli indicava che questo contributo era assente, in contrasto con la previsione fornita dal modello.

Sommerfeld (1928): la meccanica quantistica risolve queste difficoltà mostrando che gli elettroni, in quanto fermioni, non seguono la legge di equipartizione di Boltzmann. Nel 1926, Fermi e Dirac derivano indipendentemente una nuova meccanica statistica basata sul principio di esclusione di Pauli. Sommerfeld applica la meccanica quantistica al gas

di elettroni di conduzione in un metallo mantenendo le ipotesi degli elettroni non interagenti e di campo medio nullo introdotte da Drude e Lorentz. Con questa impostazione il modello fornisce espressioni in accordo con le misure per il calore specifico, l'emissione termoionica, la conducibilità elettrica e termica e l'effetto Hall. Il modello di Sommerfeld tuttavia non fornisce spiegazioni dell'elevato cammino libero medio degli elettroni di conduzione che a temperatura ambiente in un metallo buon conduttore raggiunge valori da 10 a 100 volte maggiori del passo reticolare, in disaccordo con l'intuizione.

Bloch (1929) Dimostra che la grandezza che determina la mobilità degli elettroni di conduzione non è il potenziale ionico, ma la sua deviazione dalla periodicità. Egli descrive la funzione d'onda di un elettrone di conduzione come un'onda piana modulata da una funzione periodica con il periodo spaziale del reticolo.

Wilson (1931) Sulla base del teorema di Bloch, descrive una teoria delle bande di energia degli elettroni che abbraccia metalli, semiconduttori e isolanti. La resistività elettrica resta legata alla sezione d'urto di interazione elettrone-ione reticolare, come nei precedenti modelli, ma la nuova meccanica quantistica consente di descrivere tale interazione in termini di fononi e da ciò si determinano espressioni della dipendenza della resistività con la temperatura in accordo con le misure per un ampio numero di materiali cristallini.

Sviluppi recenti: nel 1948-49 Bardeen e Brattain inventano il transistor sulla base delle proprietà elettriche dei semiconduttori drogati. Per questa realizzazione Bardeen, Brattain e Shockley ricevono il premio Nobel per la fisica nel 1956. La superconduttività è un fenomeno in cui la resistività elettrica scende bruscamente a zero in corrispondenza ad una temperatura di transizione. La teoria della superconduttività fondata nel 1957 da Bardeen, Cooper e Schrieffer viene riconosciuta come uno dei più grandi risultati sulle proprietà degli elettroni dei metalli dopo l'avvento del modello di Sommerfeld (Mizutani, 2003). La teoria degli elettroni partendo dai metalli nei quali si presuppone l'esistenza di un reticolo cristallino periodico è stata estesa anche ai sistemi disordinati, come i metalli liquidi, dove il reticolo ionico è lontano dalla periodicità. Attualmente si tenta di estenderla a composti metallici amorfi. La realizzazione recente (Weber et al., 2012) di fili conduttori nanometrici in silicene di bassissima resistività indica che la validità della legge di Ohm si estende fino alla scala atomica.

### **3. Resistività nel modello classico**

La sintesi riportata nel paragrafo precedente evidenzia che le proprietà conduttive dei metalli possono essere spiegate ammettendo la presenza in essi di un gas di elettroni

tra loro non interagenti in termini Coulombiani, detti di conduzione. Ad esempio, la configurazione elettronica dell'atomo di rame  $[\text{Ar}]3d^{10}4s^1$  è costituita da 29 elettroni con differenti energie di legame. Di questi, 28 occupano gusci elettronici completi, mentre uno, detto di valenza, occupa il livello 4s. Il potenziale di prima ionizzazione vale 7,726 eV, circa 3 volte inferiore al potenziale di seconda ionizzazione. Ciò indica che l'elettrone di valenza dell'atomo di rame isolato è meno legato al nucleo degli altri elettroni.

In un campione di rame solido le posizioni di equilibrio degli atomi sono i nodi di un reticolo cubico a facce centrate e gli elettroni di valenza (uno per atomo) non sono più legati al nucleo ma costituiscono un gas di particelle libere di muoversi all'interno del materiale interagendo con il reticolo ionico e con un campo elettrico eventualmente presente. Questo tipo di assetto che caratterizza il legame metallico venne giustificato da Wilson (par. 7).

Dal punto di vista strutturale, le grandezze che descrivono le proprietà microscopiche del conduttore sono:

- a) Concentrazione degli elettroni di conduzione (nel seguito indicata con  $n$ )
- b) Passo reticolare (distanza media tra due ioni reticolari primi vicini)

Nel rame, per esempio, dato il numero di Avogadro  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  atomi/mole, la densità  $d = 8,92 \text{ g/cm}^3$  e la massa atomica  $M=63,5 \text{ g/mole}$ , la concentrazione degli elettroni di conduzione risulta:

$$n = N_A d / M = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ elettroni/m}^3$$

assumendo che ogni atomo di Cu contribuisca alla conduzione con un elettrone. In generale le concentrazioni degli elettroni di conduzione dei metalli sono espresse dalla relazione:

$$n = Z N_A d / M$$

dove il fattore  $Z$  è pari al numero di elettroni liberi forniti da ogni atomo, che può identificarsi con il numero di elettroni di valenza del metallo. Non sempre è evidente quale sia il valore di  $Z$ , ad esempio in metalli come Fe o Pb. Nella tab. 2 sono dati i valori di  $n$  per diversi metalli. Misure basate sull'effetto Hall indicano che nei metalli  $n$  è sostanzialmente indipendente dalla temperatura, in accordo con l'elevato valore dell'energia di ionizzazione degli elettroni non di valenza.

I valori di  $n$  sono nell'intervallo  $10^{28} - 10^{29} \text{ m}^{-3}$ . La grandezza  $r_s$  rappresenta il raggio di una sfera il cui volume è uguale al volume occupato da uno ione reticolare

$$r_s = (3V / 4\pi N)^{1/3}$$

Il passo reticolare ha l'ordine di grandezza di  $r_s$ . La tab. 2 mostra che il passo reticolare è maggiore nei metalli alcalini rispetto a quasi ogni altro metallo, in accordo con altre misure ottenute utilizzando metodi di diffrazione alla Bragg dei raggi X sui cristalli.

Tabella 2 - Resistività elettrica di diversi metalli (Ashcroft & Mermin, 1976)

Elemento	Z	n ( $10^{28}/\text{m}^3$ )	$r_s$ (Å)	Resistività elettrica ( $10^{-8} \Omega\text{m}$ )	
				T=77 K	T=273 K
Li	1	4,70	1,72	1,04	8,55
Na	1	2,65	2,08	0,8	4,2
K	1	1,40	2,57	1,38	6,1
Rb	1	1,15	2,75	2,2	11,0
Cs	1	0,91	2,98	4,5	18,8
Cu	1	8,47	1,41	0,2	1,56
Ag	1	5,86	1,60	0,3	1,51
Au	1	5,90	1,59	0,5	2,04
Be	2	24,7	0,99	-	2,8
Mg	2	8,61	1,41	0,62	3,9
Ca	2	4,61	1,73	-	3,43
Sr	2	3,55	1,80	7,0	23,0
Ba	2	3,15	1,96	17,0	60,0
Fe	2	17,0	1,12	0,66	8,9
Zn	2	13,2	1,22	1,1	5,5
Cd	2	9,27	1,37	1,6	6,8
Hg	2	8,65	1,40	5,8	Fuso
Al	3	18,4	1,10	0,3	2,45
Ga	3	15,4	1,16	2,75	13,6
In	3	11,5	1,27	1,8	8,0
Tl	3	10,5	1,31	3,7	15,0
Sn	4	14,8	1,17	2,1	10,6
Pb	4	13,2	1,22	4,7	19,0
Bi	5	14,1	1,19	35,0	107,0
Sb	5	16,5	1,13	8,0	39,0

Passiamo adesso a considerare la dinamica degli elettroni di conduzione considerando per semplicità un conduttore metallico omogeneo di forma cilindrica complessivamente neutro dal punto di vista elettrico. In assenza di tensione applicata al conduttore, il campo elettrico al suo interno dipende dalla distribuzione spaziale delle particelle cariche nel conduttore e dalla sua evoluzione temporale. Il valore del campo elettrico

mediato sullo spazio e nel tempo è zero (se così non fosse si avrebbero delle correnti in assenza di energia per sostenerle, cfr. Landau & Lifšits, 1986, pag. 12-13) e la densità media di carica all'interno del conduttore è zero e tale si mantiene nel tempo. Ciò significa che il moto degli elettroni di conduzione nel metallo è disordinato e le interazioni con gli ioni del reticolo non trasferiscono in media energia. Si può escludere che gli elettroni di conduzione siano fermi nel metallo in base all'esperimento di Johnson (1928). Egli misura in un resistore non alimentato con resistenza  $R=0,5 \text{ M}\Omega$  una corrente con valore medio nullo che però presenta una fluttuazione dell'ordine di 10 pA. Trova anche che la corrente misurata dipende dalla temperatura del resistore. La fluttuazione della corrente in un resistore non alimentato indica che gli elettroni responsabili della conduzione all'interno di un metallo sono in movimento caotico, come le particelle di un gas.

La velocità media degli elettroni di conduzione  $v_m$  in assenza di tensione applicata si può stimare utilizzando il teorema di equipartizione dell'energia e risulta  $v_m=(3k_B T/m)^{1/2} \approx 10^5 \text{ m/s}$  a temperatura ambiente. Ciò implica che il moto può essere descritto in termini non relativistici.

Quando si applica e si mantiene una tensione costante non troppo elevata tra due punti di un conduttore, ad esempio collegando i due terminali di una batteria, la distribuzione spaziale delle particelle cariche all'interno del conduttore si modifica in modo peculiare. Compiono delle cariche stazionarie sulla superficie del conduttore, la cui densità non è uniforme e dipende dalla tensione applicata, in modo da generare all'interno del conduttore un campo elettrico stazionario  $\mathbf{E}$  parallelo all'asse del conduttore, non dipendente dalla posizione né dalla lunghezza e sezione del conduttore (Härtel, 1991; Jackson, 1996; Chabay & Sherwood, 1999). Una dimostrazione di questa affermazione basata sulla soluzione delle equazioni di Maxwell per un conduttore cilindrico è riportata in Marcus (1941).

Quindi, applicando una tensione tra due punti del metallo, gli elettroni di conduzione sono soggetti ad una forza costante che dipende solo dal campo applicato  $\mathbf{E}$ . Tipicamente applicando una forza costante ad un corpo si osserva un moto ad accelerazione costante. Nel caso degli elettroni di conduzione, l'effetto degli urti con il reticolo ionico dà luogo, dopo una fase transitoria, ad un moto a velocità costante, la velocità di deriva. Ciò può essere descritto introducendo nell'equazione del moto di un elettrone con carica  $-e$ , massa  $m$  una forza viscosa proporzionale alla velocità:

$$m \frac{dv}{dt} = -eE - m \frac{v}{\tau}$$

Qui  $\tau$  indica il tempo libero medio di un elettrone ovvero il tempo che in media trascorre tra un urto e il successivo (Feynman, Leyton, Sands, 2011, vol. 1 cap. 43). Risolvendo l'equazione differenziale si ottiene che dopo un transiente con durata dell'ordine di  $\tau$ , il regime diventa stazionario. Si realizza un moto rettilineo uniforme con velocità costante detta di *deriva*:

$$v_d = -eE\tau/m$$

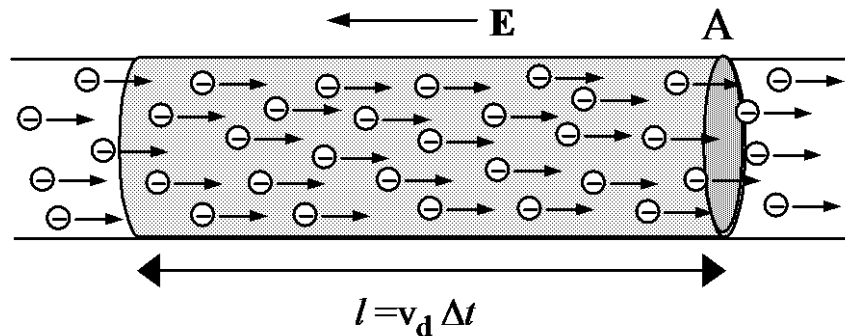


Figura 4 - deriva elettronica

Il modello può essere rappresentato come in fig. 4, che evidenzia il moto ordinato di deriva degli elettroni di conduzione in un conduttore cilindrico di sezione  $A$  al cui interno è presente un campo elettrico  $E$ .

Nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  gli elettroni che attraversano la superficie  $A$  sono solo quelli contenuti nel cilindro di base  $A$  ed altezza  $v_d \Delta t$ . Ciò dà luogo al flusso della carica  $Q$  attraverso la superficie  $A$ , che risulta  $Q = n e A v_d \Delta t$  essendo  $n$  la concentrazione dei portatori di carica già introdotta. La grandezza atta a descrivere al livello microscopico il flusso di carica nel conduttore è la densità di corrente  $J = Q / A \Delta t$ . Otteniamo pertanto

$$J = -e n v_d$$

Ad esempio, in un filo di rame di sezione  $1 \text{ mm}^2$  percorso da una corrente di  $1 \text{ A}$ , risulta  $J = 10^6 \text{ A/m}^2$  da cui  $v_d = J / ne \approx 10^{-4} \text{ m/s}$ . In condizioni ordinarie questa velocità è di molti ordini di grandezza inferiore alla velocità media  $v_m$  del moto disordinato degli elettroni di conduzione: ciò implica che il moto di deriva è una piccola perturbazione del moto disordinato. Se la tensione applicata  $\Delta V$  è così grande da invalidare la condizione  $v_m \gg v_d$  allora una ipotesi alla base del modello perde validità in quanto occorre tener conto del contributo al campo elettrico prodotto dalle modifiche alla distribuzione delle velocità del moto disordinato degli elettroni (Purcell, 1985).

Per stabilire una espressione per la resistività, si sostituisca  $v_d = -eE\tau/m$  nella relazione  $J = -en v_d$  esprimendo l'intensità del campo  $E$  nel conduttore cilindrico di lunghezza  $L$  e sezione  $A$  (fig. 4) come  $E = \Delta V / L$ . Si ottengono le leggi di Ohm  $I = \Delta V / R$ ,  $R = \rho L / A$  essendo

$$\rho = m/e^2 n \tau$$

La teoria elementare del trasporto della carica elettrica, nell'ambito della fisica non quantistica, giustifica le leggi di Ohm e consente di ricondurre le proprietà elettriche del conduttore alle grandezze microscopiche. Ricordando che la resistività del rame misurata a temperatura ambiente risulta  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$ , si ottiene facilmente il tempo libero medio per un elettrone di conduzione nel rame:

$$\tau = 2,5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

Ciò significa che la durata della fase transitoria è trascurabile rispetto ai tempi di osservazione del regime stazionario, confermando la validità della trattazione, e pone le basi della sua estensione ai campi rapidamente variabili nel tempo. In tal caso il moto degli elettroni di conduzione del metallo determina le sue proprietà ottiche che possono essere descritte (Jackson, 1999, §7.5C) da una interessante espressione della conducibilità come funzione complessa della frequenza della radiazione elettromagnetica incidente, che generalizza il modello di Drude.

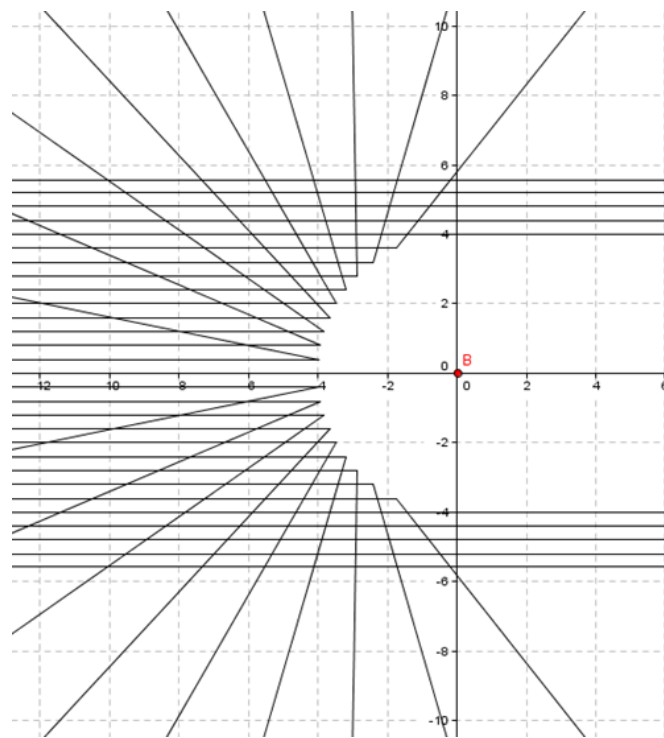


Figura 5 - urti elastici su una sfera

La descrizione del moto degli elettroni di conduzione va completata introducendo l'interazione con gli ioni reticolari. Nella visione classica sia gli elettroni che gli ioni reticolari si comportano come sfere impenetrabili perfettamente elastiche (Jeans, 1959) elettricamente neutre, in conseguenza dell'ipotesi di campo medio nullo. In un gas perfetto classico, le interazioni tra le molecole possono essere accompagnati da diversi processi, al variare dell'energia delle molecole: diffusione (deviazione dalle traiettorie



di incidenza), ionizzazione, eccitazione, scissione in atomi, ecc. In fisica un processo di interazione tra particelle è caratterizzato da una grandezza detta *sezione d'urto*.

Si chiama *sezione d'urto* di un processo che avviene per interazione di una data particella (bersaglio) con una/più particelle (incidenti), il rapporto tra il numero di eventi di interazione nell'unità di tempo e l'intensità del flusso di particelle incidenti. L'intensità del flusso descrive le particelle incidenti con ugual velocità sul bersaglio e si calcola come numero di particelle che attraversano nell'unità di tempo una superficie unitaria perpendicolare alla velocità misurata nel riferimento del bersaglio. Alle energie tipiche degli elettroni di conduzione l'eccitazione dei gradi di libertà interni degli ioni reticolari negli urti è trascurabile per cui si può assumere come modello di interazione tra elettrone e ione reticolare l'urto elastico tra sfere rigide in cui la sezione d'urto si riduce alla sezione geometrica  $S$  dello ione reticolare supposto fermo, in quanto ha massa molto maggiore dell'elettrone (fig. 5).

Classicamente lo stato di una particella come l'elettrone si può descrivere assegnando ad esso un impulso  $\mathbf{p}$  che cambia durante l'interazione. Se l'interazione è invariante rispetto a cambiamenti tra sistemi di riferimento in moto relativo rettilineo uniforme, allora la sezione d'urto può dipendere solo dalla differenza tra l'impulso finale e iniziale  $\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i$  che viene chiamato impulso trasferito. Se l'interazione è invariante rispetto alle rotazioni spaziali del sistema di riferimento, allora la sezione d'urto può dipendere solo dal quadrato del modulo dell'impulso trasferito.

Nonostante che gli urti siano elastici, è comunque possibile descrivere in questo contesto un meccanismo di trasferimento di energia tra elettroni e ioni reticolari responsabile del riscaldamento Joule (par. 4): in sintesi, in presenza di un campo elettrico esterno, la velocità scalare media di uscita da una collisione è *minore* della velocità scalare media di entrata, in quanto tra un urto ed il successivo l'elettrone è accelerato dal campo.

Il cammino libero medio  $\ell$  degli elettroni di conduzione è legato all'area geometrica  $S$  dello ione reticolare attraverso la relazione

$$\ell = 1/Sn$$

(Feynman, Leyton, Sands, 2011, vol. 1 cap. 43). Per dimostrarlo si consideri il riferimento della carica in movimento: nell'intervallo di tempo  $t$  uno ione del reticolo (con superficie  $S$ ) copre una distanza  $v_m t$  spazzando un volume  $Sv_m t$ . Se  $v_m t$  è il cammino libero medio, allora nel volume  $S\ell$  è contenuta in media una carica, ossia  $nS\ell = 1$  da cui la tesi. Il tempo  $\tau$  tale che  $\ell = v_m \tau$  è il tempo libero medio già definito.

Utilizzando questo risultato, si ottiene la dipendenza della resistività del metallo dalle grandezze fondamentali:

$$\rho = (m/e^2)Sv_m$$

La sezione d'urto  $S$  compare in questa relazione come concetto ponte tra il livello macroscopico (la resistività) e i processi microscopici di interazione tra particelle.

Dal punto di vista non quantistico nel membro di destra la sola grandezza che può dipendere dalla temperatura è  $v_m$ . Nel modello di Drude gli elettroni sono considerati come un gas ideale che obbedisce alla statistica di Maxwell-Boltzmann, quindi la loro velocità media è proporzionale a  $\sqrt{T}$ . Questa relazione è accordo qualitativo con le misure (tab. 3) che mostrano però, ad esempio per il rame su un ampio intervallo di temperature, una linearità tra la resistività e la temperatura.

Tabella 3 - resistività dei metalli (Mizutani, 2003)

Table 10.1. *Electron transport properties of metals at 273 K*

element	electrical conductivity, $\sigma$ ( $\times 10^6 / \Omega\text{-m}$ )	resistivity, $\rho$ ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	TCR <sup>a</sup> , $\alpha$ ( $\times 10^{-3}/\text{K}$ )
Li	11.8	8.5	4.37
Na	23.4	4.27	5.5
Cu	64.5	1.55	4.33
Ag	66	1.5	4.1
Au	49	2.04	3.98
Mg	25.4	3.94	4.2
Ca	28	3.6	4
Zn	18.3	5.45	4.20
Al	40	2.50	4.67
Pb	5.17	19.3	4.22
Bi	0.93	107	
Ti	2.38	42	5.5
V	0.54	18.2	
Fe	11.5	8.71	6.57
Zr	2.47	40.5	4.0
W	20.4	4.89	4.83

Note:

<sup>a</sup> Temperature coefficient of resistivity (TCR):  $\alpha_{273\text{ K}} = (1/\rho)(d\rho/dT)_{T=273\text{ K}}$

Comunque, assumendo che  $S$  sia la sezione di una sfera di raggio pari al raggio di Bohr, si ottiene per la resistività di un metallo a temperatura ambiente il valore  $3 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  (per il rame le misure danno il valore  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ).

Il successo di alcune previsioni del modello di Drude sembra un paradosso, poiché esso descrive stato e interazione delle particelle in termini di fisica classica. Tuttavia in molti casi le relazioni tra le grandezze fisiche dedotte con ragionamenti fondati sulla fisica classica sono identiche alle relazioni che si otterrebbero calcolando valori di aspettazione delle corrispondenti grandezze sulle funzioni d'onda quantistiche delle particelle. Questo aspetto sarà ripreso nel par. 5.

#### 4. Il riscaldamento Joule

Nel seguito si mostra come nel quadro del modello classico possa essere dato conto del trasferimento di energia al reticolo che si manifesta macroscopicamente come effetto Joule. Il modello di Drude ammette un parametro  $\tau$ , che non dipende dalla posizione e velocità dell'elettrone di conduzione, definito come segue: la probabilità che un elettrone abbia una collisione nell'intervallo  $dt$  vale  $\frac{dt}{\tau}$  (Ashcroft & Mermin, 1976, pag.

6). Il parametro  $\tau$  coincide con il tempo libero medio già definito. Ciò si dimostra mediante considerazioni derivanti dalla teoria elementare del trasporto che di seguito vengono delineate.

Si consideri la probabilità che l'elettrone abbia una collisione all'istante 0 e una consecutiva all'istante  $t$ . Tale probabilità è il prodotto tra la probabilità che l'elettrone non abbia collisioni nell'intervallo tra 0 e  $t$  e la probabilità che abbia una collisione tra  $t$  e  $t+dt$ . Si divida l'intervallo tra 0 e  $t$  in  $m$  parti uguali, con  $m$  intero positivo. Allora la probabilità che l'elettrone non abbia collisioni tra 0 e  $t$  è espressa dal prodotto

$\left(1 - \frac{t}{m\tau}\right)^m$  che nel limite  $m \rightarrow \infty$  coincide con  $e^{-t/\tau}$ . Pertanto la probabilità che

l'elettrone abbia una collisione all'istante 0 ed una consecutiva all'istante  $t$  risulta  $e^{-t/\tau} dt/\tau$ .

Utilizzando questo risultato, il valor medio del tempo libero si calcola come

$$\langle t \rangle = \int_0^{\infty} t e^{-t/\tau} \frac{dt}{\tau} = \tau$$

Ciò mostra quanto già affermato ed implica che un elettrone subisce in media  $1/\tau$  collisioni in un secondo. Se  $n$  indica la concentrazione di elettroni liberi, avvengono in media  $n/\tau$  collisioni elettrone-ione reticolare per unità di volume e di tempo all'interno del conduttore.

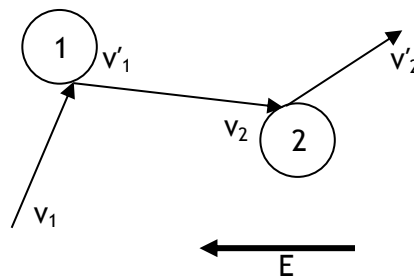


Figura 6 - collisioni elettrone-ione reticolare

Si considerino ora due ioni reticolari 1 e 2. Un elettrone urta lo ione 1 con velocità iniziale  $v_1$  e finale  $v'_1$ . Analogamente lo ione 2 viene urtato con velocità iniziale  $v_2$  e finale  $v'_2$  (fig. 6). Si osservi che  $v_2 \neq v'_1$  in quanto l'elettrone è accelerato da un campo elettrico di intensità  $E$ .

La variazione di energia dell'elettrone nel secondo urto risulta

$$\Delta U = \frac{1}{2}mv_2'^2 - \frac{1}{2}mv_2^2$$

Il moto dell'elettrone tra due urti consecutivi che avvengono agli istanti 0 e  $t$  è governato dall'equazione

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 - \frac{e\vec{E}}{m}t$$

Ne segue che

$$v_2^2 = v_1^2 - \frac{2e\vec{E} \cdot \vec{v}_1}{m}t + \left(\frac{eEt}{m}\right)^2$$

Si consideri la media di questa espressione effettuata su un intervallo di tempo lungo.

L'angolo tra il vettore  $\vec{v}_1$  e la direzione del campo elettrico è distribuito uniformemente in  $[0, 2\pi]$ , sicché il valor medio del prodotto scalare si annulla. Inoltre il valor medio del quadrato della velocità di uscita da un urto è indipendente dall'urto, e quindi  $\langle v_1'^2 \rangle = \langle v_2'^2 \rangle$ . Ne consegue che

$$\langle \Delta U \rangle = -\frac{(eE)^2 \langle t \rangle^2}{2m}$$

In base a quanto stabilito a proposito del tempo libero medio, il valor medio di  $t^2$  si ricava dall'espressione

$$\langle t^2 \rangle = \int_0^{\infty} t^2 e^{-t/\tau} \frac{dt}{\tau} = 2\tau^2$$

Ne segue che

$$\langle \Delta U \rangle = -\frac{(eE\tau)^2}{m}$$

Pertanto si prevede che in presenza di campo elettrico gli urti trasferiscano energia al reticolo: il modello classico interpreta microscopicamente il meccanismo alla base del riscaldamento del conduttore (effetto Joule).

Si indichi con  $u$  il valor medio dell'energia trasferita complessivamente in tutti gli urti per unità di volume e di tempo. Allora

$$u = n \frac{\langle \Delta U \rangle}{\tau} = -\frac{(eE)^2 n \tau}{m} = JE$$

Questa relazione rappresenta la legge di Joule al livello microscopico. Quando la si applica ad un conduttore omogeneo cilindrico di lunghezza  $b$  e sezione  $S$ , si ottiene la potenza trasferita al reticolo negli urti

$$P=IV$$

che esprime la legge del riscaldamento (Joule).

### **5. Resistività nel modello semiclassico**

Una importante svolta verso la soluzione delle difficoltà della teoria di Drude si ebbe intorno al 1913 sulla base degli sviluppi della teoria quantistica del calore specifico dei solidi di Einstein e Debye. Nel 1925 Pauli applica la statistica di Fermi-Dirac al gas di elettroni e nel 1926 Sommerfeld estende il modello di Drude riuscendo a spiegare il contributo trascurabile a temperature ordinarie degli elettroni al calore specifico e la legge di Wiedemann e Franz. L'idea di assegnare stati energetici discreti a una particella racchiusa in un volume limitato, insieme col principio di Pauli secondo cui non più di due elettroni (uno per ciascuna direzione dello spin) possono occupare lo stesso stato energetico implica infatti che la distribuzione delle velocità degli elettroni in un metallo non è maxwelliana nemmeno approssimativamente: gli elettroni di conduzione, in quanto fermioni, seguono la statistica quantistica di Fermi-Dirac. Sommerfeld descrive il metallo come una buca di potenziale rettangolare. Gli stati di  $N$  elettroni non interagenti si costruiscono riempiendo i livelli energetici fino ad un valore massimale: l'energia di Fermi  $E_F$  che dipende dalla concentrazione degli elettroni di conduzione e dalle peculiarità del reticolo cristallino e varia nei diversi metalli da 1,5 a 15 eV. La prima correzione operata di conseguenza al modello di Drude riguarda l'energia media associata al moto termico di un elettrone: è dell'ordine dell'energia di Fermi del metallo. Di conseguenza, la velocità di agitazione termica di un elettrone in un metallo (velocità di Fermi  $v_F^2 \approx 2E_F/m$ ) è indipendente dalla temperatura per tutte le temperature  $T \ll T_F$  essendo  $T_F = E_F/k_B$  la temperatura di Fermi del metallo,  $T_F$  tipicamente dell'ordine di  $10^4$  K. Se il gas di elettroni liberi in un metallo viene descritto dalla statistica di Fermi-Dirac, allora gli elettroni che partecipano al processo di conduzione sono solo quelli con energie vicine al livello di Fermi; gli altri elettroni non possono essere eccitati dal campo elettrico in quanto i livelli energetici vicini sono già occupati. Ciò risolve il problema del calore specifico: a temperature ordinarie i gradi di libertà elettronici sono "congelati" e quindi il gas degli elettroni di conduzione non contribuisce al calore specifico del solido.

In conseguenza del principio di Pauli, le interazioni e-e sono circa  $10^4$  volte meno frequenti tra gli elettroni di conduzione rispetto alle interazioni con gli ioni reticolari (Ashcroft & Mermin, 1976, pag. 348).

Nel modello di Sommerfeld l'elettrone è descritto da un "pacchetto di onde localizzato" che si muove sotto l'azione del campo elettrico esterno secondo l'equazione classica del moto. Per giustificare questa ipotesi si osservi che un elettrone di conduzione in un metallo ha una quantità di moto  $p \approx mv_F$ . Per poterlo trattare come una particella, deve essere verificata la condizione  $\Delta p \ll p$  relativa all'incertezza  $\Delta p$  sulla quantità di moto. Poiché il principio di indeterminazione implica che  $\Delta p \approx \hbar/\Delta x$ , essendo  $\Delta x$  l'incertezza sulla posizione dell'elettrone, la trattazione in termini di pacchetto d'onde localizzato è possibile se

$$\Delta x \gg \hbar/mv_F \approx 1 \text{ \AA}$$

Questo valore va confrontato con il cammino libero medio dell'elettrone, che rappresenta la grandezza che ne determina la posizione. Ricordando il valore del tempo libero medio già calcolato per un elettrone di conduzione nel rame  $\tau = 2,5 \cdot 10^{-14}$  s si ricava il cammino libero medio  $\ell$ , nota la velocità di Fermi per il rame  $v_F = 1,6 \cdot 10^6$  m/s.

Risulta

$$\ell = 40 \text{ nm}$$

Ciò indica che nel rame il cammino libero medio di un elettrone di conduzione è più di 100 volte maggiore del passo reticolare (circa  $3 \text{ \AA}$ ). Risultati analoghi si ottengono negli altri metalli. Poiché a temperature ordinarie si ha che

$$\ell \gg \hbar/mv_F$$

allora nel modello di Sommerfeld l'elettrone può essere trattato come una particella e di conseguenza la resistività viene determinata applicando la teoria del trasporto come nel modello di Drude, e si perviene alla stessa espressione (Ashcroft & Mermin, 1976, pag. 51).

### **6. Resistività nel modello di Bloch**

Il calcolo del cammino libero medio eseguito in precedenza pone un problema centrale per la comprensione della descrizione quantistica delle proprietà degli elettroni di conduzione nei metalli: poiché il passo reticolare ha l'ordine di grandezza delle dimensioni degli ioni reticolari, come possono gli elettroni di conduzione evitare le collisioni con gli ioni reticolari con tanta efficacia? Questo problema fu risolto da Felix Bloch (1929) adottando una visione pienamente quantistica. Tenuto conto della periodicità del reticolo cristallino, egli ottiene un importante risultato: la soluzione dell'equazione di Schroedinger per un elettrone di conduzione nel metallo è costituita

da un'onda piana modulata da una funzione periodica con il periodo spaziale del reticolo. L'energia dell'elettrone, descritto come pacchetto d'onda con frequenza  $\omega/2\pi$  e lunghezza  $\lambda=2\pi/k$ , è una funzione  $E(k)=\hbar\omega(k)$  periodica sullo spazio del reticolo reciproco. La velocità dell'elettrone è la velocità di gruppo del pacchetto e si esprime come  $v=d\omega/dk=(1/\hbar)dE/dk$ .

Ne segue che l'accelerazione dell'elettrone nel solido vale

$$a=dv/dt=(1/\hbar)d^2E/dk^2(dk/dt)$$

Poiché l'impulso dell'elettrone risulta  $p=\hbar k$ , si ha che  $F=\hbar(dk/dt)$ . Dunque risulta:

$$F/a = \hbar^2/(d^2E/dk^2)$$

Per definizione, questa grandezza è la massa efficace  $m^*$  dell'elettrone nel potenziale periodico, una grandezza che può avere carattere tensoriale (Ashcroft & Mermin, 1976). Dunque la massa dell'elettrone di conduzione in un cristallo non è una proprietà intrinseca ma relazionale, dipende dalla struttura reticolare che determina la forma della funzione  $E(k)$  che descrive i livelli energetici dell'elettrone. Per l'elettrone libero risulta  $E(k)=\hbar^2k^2/2m$  da cui ovviamente  $m=m^*$ .

Bloch descrive l'interazione elettroni-reticolo come diffusione delle funzioni d'onda elettroniche in un potenziale periodico. Si tratta di una approssimazione di elettroni indipendenti in un campo medio nullo, come nelle teorie di Drude-Lorentz e Sommerfeld, ma viene presa in considerazione la periodicità del reticolo. Bloch dimostra che: 1) la resistività in un reticolo perfettamente periodico sarebbe zero; 2) la resistività deriva dalla deviazione del reticolo dalla periodicità perfetta. Tale deviazione è dovuta a due fattori: 1) presenza di impurità; 2) oscillazioni degli ioni reticolari intorno alle posizioni di equilibrio. Di conseguenza la sezione d'urto e quindi la resistività (Matthiessen rule) si può esprimere in prima approssimazione come somma di due contributi:  $S=S_{imp}+S_{ret}$ . Il primo contributo è piccolo nei metalli puri (ma non nelle leghe come la costantana) ed è sostanzialmente indipendente dalla temperatura in quanto dipende dalla concentrazione di impurità e dal quadrato della differenza tra i numeri atomici ( $Z_{imp}-Z_{ret}$ ). Bloch calcola il secondo contributo trattando le oscillazioni reticolari secondo il modello di Debye (1912). Nella fisica classica, sulla base del teorema di Fourier, è possibile descrivere un sistema oscillante in termini di sovrapposizione lineare di modi normali di oscillazione. Tuttavia è possibile utilizzare un modello corpuscolare analogo a quello introdotto da Einstein per la radiazione di corpo nero. Debye pertanto descrive le oscillazioni reticolari come un sistema di fononi che segue la statistica di Bose-Einstein. Nel modello di Debye compare un importante parametro, la temperatura di Debye  $T_D$  legata alla frequenza di Debye  $\nu_D$  dalla relazione  $h\nu_D=k_B T_D$

Tabella 4 - temperature di Debye (De Launay, 1956)

DEBYE TEMPERATURES FOR SELECTED ELEMENTS			
ELEMENT	$T_D$ (K)	ELEMENT	$T_D$ (K)
Li	400	A	85
Na	150	Ne	63
K	100		
		Cu	315
Be	1000	Ag	215
Mg	318	Au	170
Ca	230		
		Zn	234
B	1250	Cd	120
Al	394	Hg	100
Ga	240		
In	129	Cr	460
Tl	96	Mo	380
		W	310
C (diamond)	1860	Mn	400
Si	625	Fe	420
Ge	360	Co	385
Sn (grey)	260	Ni	375
Sn (white)	170	Pd	275
Pb	88	Pt	230
		La	132
As	285	Gd	152
Sb	200	Pr	74
Bi	120		

Essa viene introdotta nel conteggio di tutti i modi di oscillazione del cristallo per ottenere un risultato finito, essendo finito il numero di ioni oscillanti. Ciò implica che la frequenza dei fononi del cristallo deve avere un valore massimo  $\nu_D$  ovvero l'esistenza di un minimo per la lunghezza d'onda. Tale minimo non può che essere determinato dal passo reticolare  $a$ . Considerando che i fononi sono soluzioni dell'equazione di propagazione delle onde sonore nel solido, si stabilisce la relazione  $\nu_D \approx u/a$  tra  $\nu_D$  e la velocità media del suono nel solido  $u$ . Se  $t$  rappresenta il periodo delle oscillazioni degli atomi intorno alle posizioni di equilibrio, risulta  $u \approx a/t$ . Ciò implica che  $\nu_D$  descrive la frequenza delle oscillazioni atomiche.

Nel modello di Bloch, il contributo reticolare alla resistività è dato dalla diffusione degli elettroni di conduzione da parte dei fononi reticolari. Ciò implica che la temperatura di Debye (tab. 4), che condiziona la distribuzione dei fononi nel cristallo, determina anche l'andamento della resistività in funzione della temperatura.

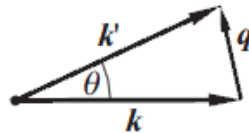
L'espressione della resistività derivata nel contesto del modello semiclassico resta valida, a patto di introdurvi la massa efficace:

$$\rho = m^*/e^2 n \tau$$



Il fattore  $1/\tau$  rappresenta ancora la probabilità per unità di tempo che un elettrone interagisca con un fonone ed è proporzionale alla sezione d'urto del processo. Bloch ottiene che:

- a) alle temperature  $T > T_D$  si può utilizzare la descrizione classica in cui la sezione d'urto è proporzionale all'area spazzata dallo ione che oscilla e quindi al valore quadratico medio  $\langle R^2 \rangle$  dell'ampiezza di oscillazione; il teorema di equipartizione dell'energia implica che  $\langle R^2 \rangle$  è proporzionale a  $T$ , per cui l'andamento della resistività con la temperatura è lineare;
- b) alle temperature  $T < T_D$  invece, occorre un'analisi più dettagliata. La sezione d'urto è proporzionale al prodotto di due fattori: la densità dei fononi che varia come  $(T/T_D)^3$  nel modello di Debye, moltiplicato per un altro fattore che tiene conto della conservazione dell'impulso nell'interazione, che si trova essere proporzionale a  $T^2$ . Ne risulta che l'andamento della resistività con la temperatura è proporzionale a  $T^5$ .



Electron and phonon wave vectors in small-angle quasielastic scattering

Figura 7 - diffusione elastica (Solyom, 2009, pag. 392)

Si riporta in dettaglio il calcolo del fattore dipendente dall'impulso a basse temperature (Solyom, 2009). In questo caso sono prevalenti i processi di diffusione elastica degli elettroni a piccoli angoli (anche se essi non rendono conto dei processi anelastici che trasferiscono energia al reticolo dando luogo all'effetto Joule) e la sezione d'urto di diffusione elettrone-fonone dipende dal quadrato dell'impulso trasferito  $\hbar(\mathbf{k}' - \mathbf{k})$ . Se  $\hbar\mathbf{q}$  è l'impulso del fonone, allora  $\mathbf{q} = \mathbf{k}' - \mathbf{k}$  onde  $q^2 = k'^2 + k^2 - 2\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}'$ . Poichè  $k \approx k_F \approx k'_F$  (cambia solo la direzione dell'impulso iniziale, ma non il suo modulo) allora  $q^2 \approx 2k_F^2(1 - \cos\theta) \approx (k_F\theta)^2$  essendo  $\theta$  l'angolo di diffusione dell'elettrone. Del resto, in un cristallo a temperatura  $T$ , i fononi hanno un'energia analoga a quella dei fotoni  $E = \hbar\omega \approx k_B T$  onde risulta che  $q^2$  è proporzionale a  $T^2$ .

Il calcolo completo della sezione d'urto di interazione elettrone-fonone conduce a rappresentare l'andamento del contributo reticolare alla resistività di un metallo con la seguente formula detta di Bloch-Grüneisen (Mizutani, 2003 pag. 288)

$$\rho_{ret}(T) = C \left(\frac{T}{T_D}\right)^5 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^5 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$$

dove compaiono due parametri  $C$ ,  $T_D$  relativi allo specifico metallo che possono essere determinati partendo dalla fenomenologia (Grüneisen, 1928). La formula di Bloch-Grüneisen indica che la dipendenza di  $\rho(T/T_D)$  dalla grandezza  $T/T_D$  è espressa da una funzione indipendente dal particolare metallo, come è stato accertato per molti metalli attraverso opportune misure (fig. 8 e 9). Si verifica banalmente che l'andamento della resistività nel limite  $T \gg T_D$  (lineare in  $T$ ) e  $T \ll T_D$  (come  $T^5$ ) riproduce quello già discusso.

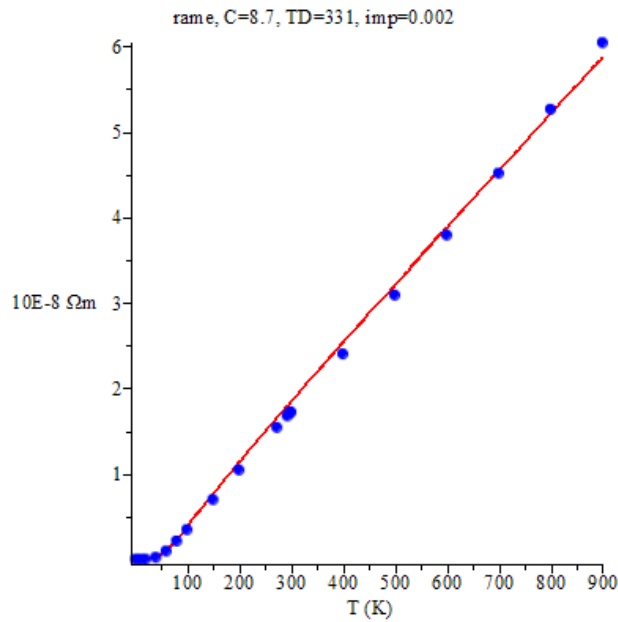


Figura 8 - interpolazione dell'autore

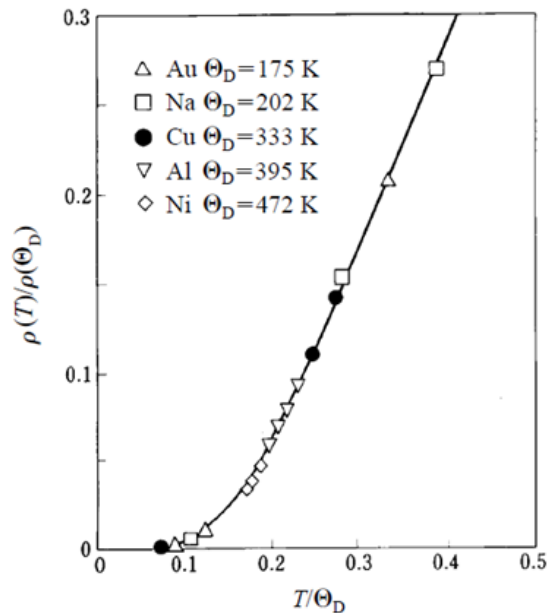


Figure 10.9. Temperature dependence of the electrical resistivity for various metals. The Debye temperature is deduced so as to fit the experimental data to equation (10.107). There is reasonable agreement with the Debye temperature deduced from the low-temperature specific heat (see Table 3.1). [J. Bardeen, *J. Appl. Phys.* 11 (1940) 88]

Figura 9

### 7. Resistività nel modello a bande

Secondo la teoria di Wilson (1953) quando gli atomi isolati si uniscono per formare una struttura cristallina, la struttura dei livelli energetici degli elettroni più esterni e le corrispondenti funzioni d'onda vengono drasticamente modificate. Mentre, infatti, i livelli energetici e le funzioni d'onda degli elettroni degli strati interni non vengono apprezzabilmente cambiati, di modo che tali elettroni rimangono vincolati ai singoli atomi, i livelli degli elettroni più esterni risultano sensibilmente alterati dalla presenza degli atomi vicini; al posto dei singoli livelli energetici nettamente distinti presenti nell'atomo isolato, si forma una fitta banda di livelli energetici a cui corrispondono stati elettronici delocalizzati. In altri termini, un elettrone che occupa uno dei livelli della banda non è vincolato ad un atomo ma è condiviso da diversi atomi del cristallo. Sono proprio gli elettroni appartenenti a tale banda, chiamata banda di valenza, che non essendo confinati all'interno del singolo atomo, possono contribuire alla conduzione elettrica. Al disopra della banda di valenza (ma, in genere, anche al disotto) si ha la formazione di altre bande di energia, separate una dall'altra da intervalli proibiti di energia, chiamati gap energetici.

Le proprietà elettriche di un solido cristallino dipendono dalle peculiari caratteristiche della struttura a bande e dal numero di elettroni presenti nella banda di valenza.

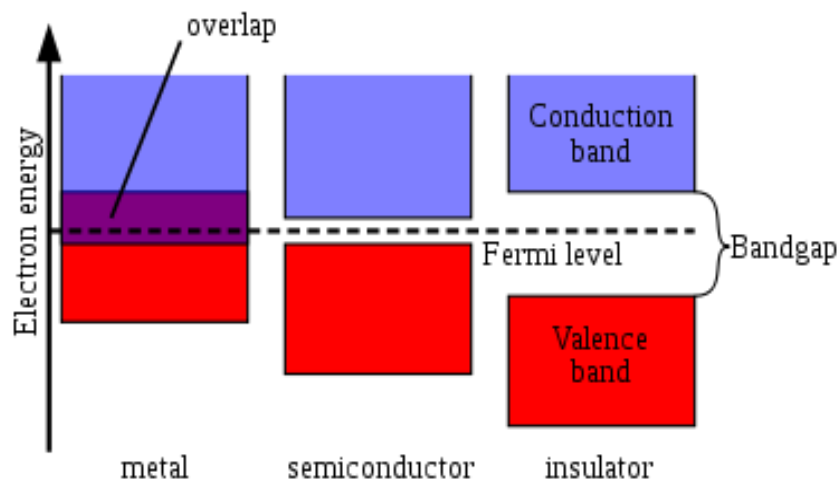


Figura 10 - bande di energia

Riferendosi ai casi più semplici, se la banda di valenza è parzialmente occupata, di modo che vi sono livelli di energia superiori disponibili per gli elettroni nella stessa banda, il solido è un conduttore; se, invece, la banda di valenza è completamente occupata, il solido può essere un semiconduttore o un isolante, in base all'ampiezza del gap energetico che separa la banda di valenza da quella immediatamente superiore

(banda di conduzione). In particolare, alla temperatura  $T$ , il solido è un semiconduttore se il gap  $E_g$  è minore, confrontabile o non molto più grande di  $k_B T$  (in modo tale che il moto di agitazione termica permetta ad un certo numero di elettroni di valenza di passare nella banda di conduzione), è un isolante se  $E_g$  è molto più grande di  $k_B T$ . Tipicamente i cristalli ionici presentano un gap energetico dell'ordine 8-10 eV (tab. 5) per cui tali materiali sono isolanti. Anche i cristalli covalenti, fatta eccezione per la grafite, presentano un gap energetico che può arrivare fino a 5 eV che è quello più elevato, del diamante.

Tabella 5 - Gap energetico

materiale	$E_g$ (eV)	classificazione
MgO	7,8	isolante
NaCl	9	isolante
C (diamante)	5,3	isolante
Si	1,1	semiconduttore
Ge	0,7	semiconduttore
GaAs	1,4	semiconduttore

### **8. Resistività dei semiconduttori**

Un aspetto caratteristico dei semiconduttori è che il processo di conduzione è dovuto agli elettroni in banda di conduzione e alle lacune in banda di valenza. Una lacuna è definita come un vuoto o elettrone mancante all'interno di una banda quasi del tutto occupata dagli elettroni, la banda di valenza. Le lacune non possiedono una realtà fisica, ma rappresentano semplicemente un modo conveniente di descrivere il comportamento di un insieme di elettroni in una banda quasi del tutto occupata. Il comportamento dinamico di una lacuna è quello di una particella con carica positiva ed energia opposta rispetto all'elettrone mancante. Vicino allo zero assoluto i semiconduttori hanno tutti gli stati della banda di valenza occupati dagli elettroni, mentre a temperature superiori possono avere un apprezzabile numero di elettroni in banda di conduzione che si comportano come gli elettroni liberi nei metalli. Questi elettroni e le lacune che sono rimaste in banda di valenza producono tutti gli effetti (conduzione di corrente e calore) che produrrebbero nei metalli con densità e massa efficace corrispondenti. I semiconduttori con piccolo gap di energia hanno interessanti proprietà di trasporto già a temperatura ambiente. I più studiati sono i cristalli degli

elementi del gruppo IV (soprattutto Silicio e Germanio) ed i composti III-V (come GaAs o InP).

I valori della resistività elettrica dei semiconduttori sono di molti ordini di grandezza maggiori di quelli per i metalli: ad esempio nel Ge otteniamo un valore di resistività a temperatura ambiente dell'ordine di  $10^{-2} \Omega\text{m}$ , da confrontare con  $10^{-7} \Omega\text{m}$  nei metalli. Ciò indica che la concentrazione di portatori liberi deve essere di molti ordini di grandezza inferiore ai valori tipici per i metalli. Alle basse temperature la concentrazione di coppie elettrone-lacune è piccola e il materiale si comporta da isolante. Al crescere della temperatura la concentrazione di coppie elettrone-lacune aumenta e di conseguenza la resistività del semiconduttore diminuisce, al contrario di quanto avviene per i metalli. La rapida caduta della resistività con la temperatura indica che la dipendenza della concentrazione dei portatori liberi dalla temperatura deve essere esponenziale. Si può ipotizzare la presenza del fattore di Boltzmann  $\exp(-A/k_B T)$  nella concentrazione  $n$  dei portatori liberi che compare al denominatore di  $\rho$  nella formula

$$\rho = m^*/e^2 n \tau$$

Ciò è coerente con l'esistenza di una "barriera energetica"  $A$  che viene attraversata da elettroni eccitati termicamente. Il modello quantistico poi identifica tale "energia di attivazione" con metà del gap.

Quando la presenza di impurezze accidentalmente presenti o volutamente introdotte nel reticolo produce effetti non trascurabili, si parla di semiconduttore *drogato*. Se la concentrazione di drogante è molto più grande della concentrazione delle coppie elettrone-lacuna generate per eccitazione termica allora si parla di conduzione *estrinseca*. In questo caso, purché la temperatura non sia troppo bassa, la concentrazione dei portatori liberi è indipendente dalla temperatura, e il trasferimento di carica è essenzialmente dovuto ai portatori maggioritari (lacune se drogato p, o elettroni se drogato n). La formula

$$\rho = m^*/e^2 n \tau$$

resta valida e il calcolo della sezione d'urto (Blakemore, 1985 pag. 306) mostra che  $\rho \propto T^{3/2}$ .

La generazione termica delle coppie elettrone-lacuna cresce esponenzialmente con la temperatura e quando la temperatura è sufficientemente alta l'andamento della resistività entra nella regione *intrinseca* dove la concentrazione del drogante diventa trascurabile rispetto alla concentrazione di elettroni e lacune generati termicamente. Di conseguenza, nella regione intrinseca l'andamento della resistività è dominato dal

fattore  $\exp(E_g/2k_B T)$ , dove  $E_g$  rappresenta il gap di energia tra la banda di conduzione e la banda di valenza.

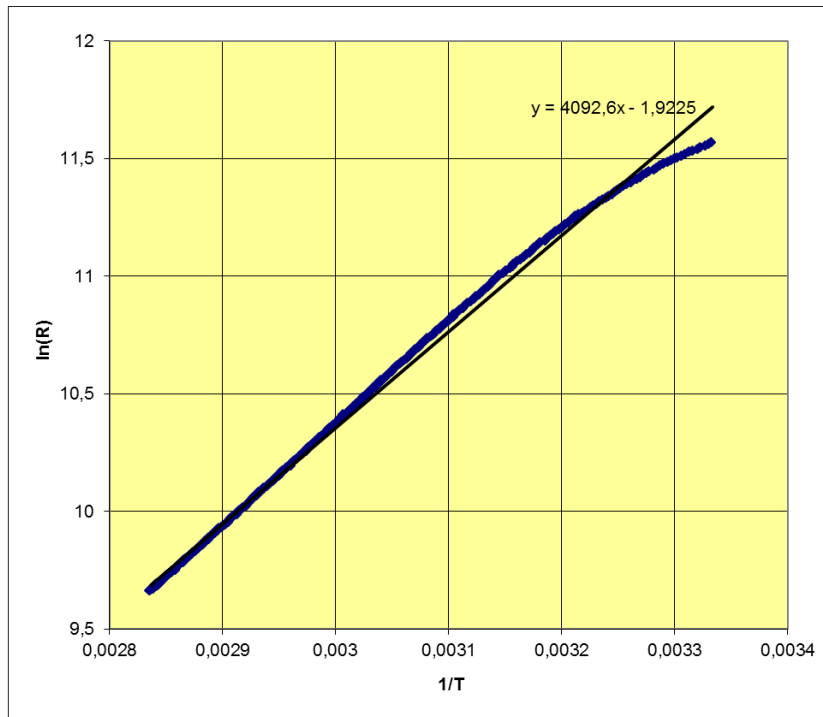


Figura 11 - elaborazione di dati raccolti alla scuola estiva 2011

L'interpolazione lineare del grafico semilogaritmico di  $\rho$  vs  $1/T$  è una linea retta con pendenza  $E_g/2k_B$ . Essendo  $k_B=8,62 \cdot 10^{-5}$  eV/K, risulta  $E_g=71$  eV per Ge::P (fig. 11).

### 9. Prospetto riassuntivo

#### METALLO

Su un ampio intervallo di temperature, tutti i livelli nella banda di conduzione sotto l'energia di Fermi  $E_F$  sono riempiti con elettroni, mentre tutti i livelli al di sopra di  $E_F$  sono vuoti. Gli elettroni con energia vicina ad  $E_F$  sono liberi di accedere agli stati vuoti della banda anche con un debole campo elettrico, da cui elevata conducibilità elettrica.

#### ISOLANTE

$E_F$  è circa a metà di un largo gap energetico (2-10 eV) tra la banda di valenza e di conduzione.

Su un ampio intervallo di temperature, la banda di valenza è piena di elettroni mentre la banda di conduzione è vuota, da cui conducibilità circa zero. Data l'ampiezza del

gap, diventa statisticamente improbabile che un elettrone sia promosso alla banda di conduzione: la popolazione di elettroni liberi in un materiale isolante è molto piccola, da cui l'impossibilità di avere correnti significative. Per esempio a temperatura ambiente  $k_B T \approx 1/40$  eV, quindi  $E_g \gg k_B T$ .

#### SEMICONDUTTORE NON DROGATO

$E_F$  è circa a metà di un piccolo gap energetico (0-2 eV) tra la banda di valenza e di conduzione. A basse temperature la situazione è quella di un isolante: banda di valenza completamente occupata, banda di conduzione completamente vuota. All'aumentare della temperatura aumenta la concentrazione di elettroni eccitati dalla banda di valenza a quella di conduzione. Ogni elettrone che passa in banda di conduzione lascia una lacuna in banda di valenza. Anche la buca in banda di valenza è mobile, perché può essere occupata da un elettrone che lascia a sua volta una lacuna, e così via. Sotto l'azione di un campo elettrico esterno il moto di deriva avviene sia in banda di conduzione che in banda di valenza. In questo caso la resistività diminuisce all'aumentare della temperatura (conduzione intrinseca).

#### SEMICONDUTTORE DROGATO

A basse temperature predomina il comportamento del drogante per cui l'andamento è simile a quello di un metallo (conduzione estrinseca). A temperature sufficientemente alte prevale il regime intrinseco.

### ***10. Confronto critico di aspetti selezionati***

#### Legge di Ohm e di Joule

I trattati di elettromagnetismo (Landau & Lifshitz, 1986; Panofsky & Phillips, 1962; Jackson, 1999) basati sulle equazioni di Maxwell introducono la legge di Ohm ( $J=E/\rho$ ) e di Joule ( $dP/dV=E \cdot J$ ) come relazioni fenomenologiche. Questi autori non descrivono un meccanismo fisico che giustifichi la validità della legge di Ohm e ciò non consente di trattare le condizioni in cui essa può non valere. Jackson (1999, §7.5C) afferma che esprimere la resistività in termini di grandezze microscopiche riguarda la fisica dello stato solido. Smythe (1989, pag. 253) dimostra con considerazioni matematiche che la condizione che il riscaldamento del conduttore per effetto Joule sia minimo implica la validità della legge di Ohm. Si distaccano da questa impostazione talora troppo empirica e altre volte troppo formale autori come Purcell (1985) e Cottingham & Greenwood (1991) che richiamano il modello di Drude per motivare su base fisica la legge di Ohm e la legge di Joule realizzando una significativa integrazione tra la visione macroscopica e microscopica della conduzione.

Campo nel conduttore senza/con corrente

La maggior parte degli autori (Landau & Lifshitz, 1986; Panofsky & Phillips, 1962; Jackson, 1999) presenta inizialmente le proprietà dei campi elettromagnetici nel vuoto per poi passare alla trattazione dei campi nella materia. Questo passaggio richiede di considerare i contributi al campo di tutte le particelle presenti nella materia definendo operativamente un campo medio nello spazio e nel tempo che è quello rilevato da strumenti di misura insensibili alle fluttuazioni dei campi legate ai processi microscopici. Ciò pone il problema che le operazioni di media possono essere definite arbitrariamente (Jackson, 1999, §6.6).

Gli autori citati utilizzano la legge di Ohm ( $\mathbf{J}=\mathbf{E}/\rho$ ) per giustificare la presenza del campo in un conduttore omogeneo percorso da corrente. Poiché la legge di Ohm è stata da essi introdotta come relazione fenomenologica, anche la presenza del campo nel conduttore risulta priva di giustificazioni dal punto di vista della teoria fisica. Al contrario, Assis & Hernandez (2007) riconoscono il ruolo delle cariche di superficie come causa fisica del campo elettrico stazionario nel conduttore percorso dalla corrente. Questi autori discutono inoltre la neutralità elettrica dell'interno del conduttore osservando che il moto di deriva elettronico genera un campo magnetico azimutale che esercita una forza di Lorentz in direzione radiale sugli elettroni in movimento con la velocità di deriva. Come per l'effetto Hall, è necessaria la presenza di un campo elettrico radiale per equilibrare la forza di Lorentz e ciò non può che derivare da una densità di carica media locale non nulla all'interno del conduttore (Assis & Hernandez, 2007). Questo aspetto della conduzione elettrica è ancora oggetto di discussione (Redžić, 2012).

Trasferimento di energia

Panofsky & Phillips (1962, pag. 122) sostengono che gli effetti legati al campo magnetico associato alla corrente continua sono trascurabili in condizioni stazionarie, mentre sono importanti nelle situazioni transitorie in cui la corrente, per esempio, passa da zero al valore di regime o viceversa. Al contrario, Cottingham & Greenwood (1991) riconoscono il ruolo del campo magnetico come determinante anche nelle situazioni stazionarie per assicurare il trasporto di energia che dà luogo al riscaldamento Joule. Ciò costituisce una giustificazione della legge di Joule basata sulla presenza delle cariche di superficie. Gli autori considerano un conduttore cilindrico di lunghezza  $L$  e raggio  $a$  percorso dalla corrente  $I$ : appena all'esterno della superficie di questo è presente un campo elettrico con componente tangenziale pari al campo elettrico longitudinale  $\mathbf{E}$  interno al conduttore; è presente pure un campo magnetico azimutale  $\mathbf{B}$  di intensità  $\mu_0 I / 2\pi a$  data dalla legge di Biot-Savart. Di conseguenza, c'è un flusso di energia  $P$  verso l'interno del



conduttore la cui entità si ricava integrando il vettore di Poynting  $\mathbf{E} \times \mathbf{B} / \mu_0$  sulla superficie del conduttore. La componente del vettore di Poynting normale alla superficie risulta  $E/2\pi a$  sicché l'integrazione dà IEL. Ricordando che EL rappresenta la tensione ai capi del conduttore, si ottiene il risultato  $P=IV$ . In questa trattazione l'energia trasportata dal campo elettromagnetico si propaga da entrambi i terminali della batteria, fluisce attorno ad un conduttore ideale ed entra in un elemento resistivo nella misura stabilita dalla legge di Joule (fig. 12).

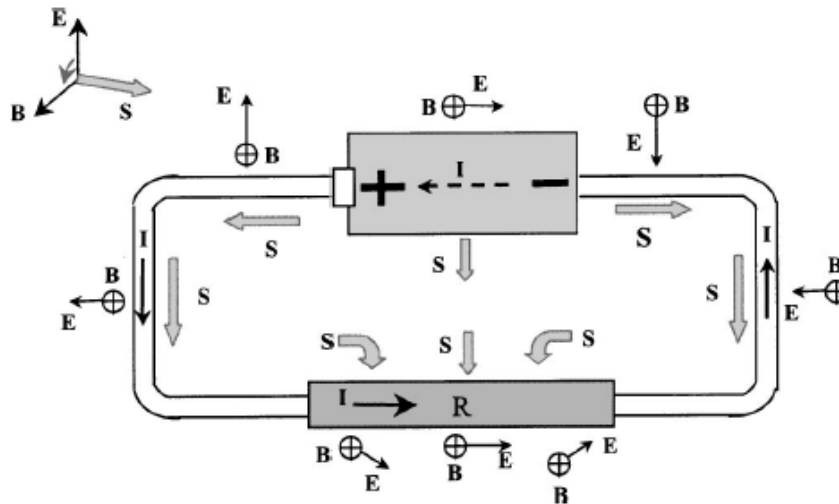


Fig. 4. The electric and magnetic fields,  $\mathbf{E}$  and  $\mathbf{B}$ , and Poynting vector  $\mathbf{S}$  along the closed dc circuit. The case of ideal wires, homogeneous resistor  $R$ , and ideal source with no internal resistance is considered.

Figura 12 - Galili & Goihbarg, 2005

## IV. Ricostruzione storico-concettuale a scopo didattico

1. Aspetti dello sviluppo storico delle idee sulla carica elettrica
  - 1.1 i fluidi imponderabili nella spiegazione dei fenomeni
  - 1.2 il contributo della pila di Volta all'integrazione tra elettrostatica ed elettrodinamica
  - 1.3 l'elettrolisi, culla delle teorie sull'elettrone
  - 1.4 le prime teorie dell'elettrone
  - 1.5 la concezione moderna della carica elettrica
2. Nuclei fondanti
3. Aspetti epistemologici

### ***1. Aspetti dello sviluppo storico delle idee sulla carica elettrica***

Nel 1905 Marie Curie affermava: *se riflettiamo sul progresso della fisica negli ultimi dieci anni, restiamo sorpresi dal crescente sviluppo delle nostre idee sull'elettricità e sulla materia* (Sheen, 1937).

Lo sviluppo delle teorie fisiche sulla natura della carica elettrica e, in particolare dell'elettrone, attraversa la storia della scienza a partire dal Settecento per arrivare ai nostri giorni, continuando ad intrecciare le idee sull'elettricità e sulla materia. Le ponderose monografie (O'Rahilly, 1938; Whittaker, 1953; Buchwald, 1985; Jungnickel & McCormach, 1986; Darrigol, 2002) prevalentemente centrate sulle teorie dei fenomeni elettrici e magnetici non ne esauriscono la trattazione.

Spesso gli studenti, posti di fronte ad un fenomeno, ripercorrono inconsapevolmente i ragionamenti degli scienziati del passato. Dunque la consapevolezza della storia delle interpretazioni fisiche da parte dell'insegnante può originare considerazioni significative. Appare importante stimolare negli insegnanti un'attività di riflessione sui concetti cardine delle teorie e di ricostruzione dell'impostazione interpretativa della fenomenologia (Michelini, 2007). Il contributo dell'indagine storica sembra quindi indispensabile sia nel contesto della progettazione didattica che in quello della formazione insegnanti.

L'intento della trattazione qui illustrata è duplice: a) far emergere l'intreccio tra i problemi epistemologici e quelli didattici in relazione alle concezioni alternative degli studenti sui fenomeni elettrici riconosciute dalla ricerca; b) esplicitare alcuni dei temi ricorrenti nel dibattito sulla carica elettrica, la visione corpuscolare vs il mezzo

continuo, l'azione a distanza vs l'azione per contatto, la materia vs il campo, l'esistenza di un tipo vs l'esistenza di due tipi di carica.

In questo dibattito si ritrovano alcune delle radici di molti sviluppi recenti della fisica fondamentale, come, per esempio, il ruolo delle simmetrie nelle teorie di campo, la classificazione delle particelle elementari, la quantizzazione del campo elettromagnetico.

Il quadro storico di sviluppo delle idee sulla natura della carica elettrica può essere ripartito, ai fini della presente trattazione, nelle seguenti fasi: 1) i fluidi imponderabili nella spiegazione dei fenomeni; 2) il contributo della pila di Volta all'integrazione tra elettrostatica ed elettrodinamica; 3) l'elettrolisi, culla delle teorie sull'elettrone; 4) le prime teorie dell'elettrone; 5) la concezione moderna della carica elettrica.

### ***1.1 I fluidi imponderabili nella spiegazione dei fenomeni***

Nel corso del 1700 l'elettricità era conosciuta attraverso lo studio dei fenomeni elettrostatici: attrazione e repulsione tra corpi caricati per strofinio, contatto o induzione da un lato, e scariche elettriche dall'altro. Le scariche generalmente erano prodotte in circuiti che chiudevano i terminali di apparecchi, come la bottiglia di Leyda, che oggi chiamiamo condensatori carichi. Il fenomeno della scarica, che veniva riconosciuto come violento e istantaneo, era associato all'idea della neutralizzazione di quantità di elettricità di segni opposti. La bottiglia di Leyda, inventata in Olanda da Pieter Van Musschenbroeck verso la metà del 700, era un contenitore di vetro parzialmente riempito d'acqua entro cui pescava un cavo metallico. Se il cavo veniva collegato ad una macchina elettrostatica funzionante, lo strumento accumulava la *virtù elettrica* ovvero la capacità di dare potenti scosse e la conservava anche per diversi giorni.

Le proprietà elettriche osservate furono interpretate come manifestazione di una sostanza specifica: il *fluido elettrico*. Nella teoria dell'elettricità che prese forma sotto l'influsso di Franklin a partire dal 1740, il concetto fondamentale era l'esistenza del fluido elettrico contenuto nei corpi, distinto dalla materia ponderabile e coesistente con essa. Questo fluido elettrico si pensava composto di particelle che tra loro si respingevano; ed era, nel linguaggio dell'epoca, *elastico e sottile*, ossia in grado di compenetrare la materia ordinaria. L'elettrificazione era concepita come un processo in cui un corpo perdeva o guadagnava una certa quantità di fluido elettrico. Si postulava che ogni corpo avesse una quantità naturale di fluido elettrico; quindi un corpo con *meno* fluido di questa quantità naturale era nello stato negativo; e nello stato positivo quando conteneva *più* fluido elettrico della quantità naturale.

*La materia elettrica differisce dalla materia ordinaria in quanto, mentre le parti della seconda si attraggono reciprocamente, quelle della prima reciprocamente si respingono; ma anche se le particelle della materia elettrica si respingono l'un l'altra, esse sono fortemente attratte da tutta la materia rimanente* (Franklin, 1751)

La formalizzazione matematica della teoria elettrostatica era basata su una legge di interazione simile a quella gravitazionale derivata da Cavendish e da Coulomb. A livello teorico lo studio si concentrava principalmente sulla distribuzione dell'elettricità sui differenti corpi e sulla sua misura con l'elettrometro.

Il fluido elettrico era un componente di una famiglia di fluidi imponderabili utilizzati per spiegare i fenomeni fisici. In ambito termico, per esempio, la teoria del fluido *calorico* (Lavoisier, 1787) permetteva di render conto, dal punto di vista dei risultati quantitativi, di diversi fenomeni: 1) la temperatura di equilibrio fra masse differenti di sostanze differenti mescolate partendo da temperature differenti; 2) il parametro specifico di una certa sostanza che regola il passaggio da uno stato di aggregazione ad un altro; 3) la relazione con la variazione di temperatura, in fenomeni lontani dai cambiamenti di stato.

Queste diverse sostanze furono chiamate fluidi per indicare che potevano *scorrere* attraverso corpi materiali detti *conduttori*. Discendenti degli effluvi, dei respiri e di tutte quelle analogie animistiche che gli scienziati del Cinquecento e del Seicento usavano per descrivere i fenomeni fisici, durante il Settecento, sotto l'influsso delle opere di Cartesio e Newton vennero sempre meglio definiti; persero le varie proprietà, di sapore magico, per venire infine inquadrati nell'ambito della meccanica newtoniana. Una volta riconosciuto il fluido elettrico come sostanza, tenendo presente che la qualità primaria delle sostanze è la loro proprietà di conservazione, ne segue come ovvia conseguenza una legge di conservazione.

Seguendo l'esempio fornito dalla legge di gravitazione di Newton tra particelle materiali e la sua teoria corpuscolare della luce, venne sviluppato un coerente programma di unificazione della fisica (Cohen, 1957): il *meccanicismo*. Questo programma, riferito a Laplace come suo più illustre esponente, mirava a descrivere tutte le aree della fisica conosciute nell'Ottocento, gravità, elettricità, magnetismo e calore, in termini di distinti fluidi materiali il cui comportamento macroscopico derivava dalla somma delle interazioni indipendenti dei rispettivi costituenti elementari. Le azioni di tali ipotetici costituenti potevano essere di duplice natura: o esercitavano una forza in un punto distante, come nella gravitazione, oppure il costituente stesso si propagava nello spazio, come i corpuscoli della luce. In un raffinamento della concezione del secolo precedente, i fluidi elettrici e magnetici erano pensati come costituiti da particelle

interagenti con una legge di forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza; le particelle del fluido calorico si respingevano tra loro, e la conduzione del calore nella materia era vista come la compenetrazione di particelle del fluido calorico tra le particelle della materia. Questa rappresentazione unificante dei fenomeni occorrenti in ambiti differenti, anche se priva di una base fisica comune, rappresentava un programma esplicativo coerente. Un risultato rilevante fu ottenuto da D. Bernoulli (1738) nel ricondurre la legge di Boyle sulla relazione tra pressione e volume di un gas all'impatto delle particelle costituenti il gas sulle pareti del contenitore (Jeans, 1959). Molti scienziati soprattutto francesi, come Poisson, Biot, Laplace, sostenevano che il meccanicismo era il solo quadro di riferimento per la spiegazione dei fenomeni.

Per quanto riguarda il dibattito sulla natura del fluido elettrico, all'inizio dell'Ottocento veniva considerata più attendibile l'esistenza di due fluidi elettrici, chiamati *resinoso* e *vetroso* dal tipo di sostanze strofinate per produrli, che aveva il vantaggio di non postulare due processi distinti, guadagno e perdita, per spiegare i fenomeni di elettrizzazione. Il fluido elettrico considerato da Franklin era quello vetroso della teoria dualistica. Mentre la visione di Franklin portava a considerare l'elettricità come un fenomeno avulso dalla materia, anche a causa della sua manifesta imponderabilità, la teoria dei due fluidi elettrici istituiva una stretta connessione fra elettricità e materia, in quanto era la materia stessa che aveva delle proprietà elettriche. Ipotesi sul piano microscopico in questa direzione furono avanzate da Berzelius (1819), sostenitore della teoria atomica di Dalton. Nella formulazione della teoria dell'affinità chimica egli ipotizzò che ogni atomo possedesse due poli, sedi di elettrificazione di segno opposto, e che la forza elettrica tra essi fosse alla base delle combinazioni chimiche. Il fenomeno dell'elettrolisi, all'epoca intensamente studiato, poteva interpretarsi in modo naturale sulla base della teoria dualistica: i cationi e gli anioni ricevevano una quantità di elettricità rispettivamente negativa e positiva ai due elettrodi. Berzelius e Hisinger (1803) osservarono lo sviluppo di idrogeno gassoso al polo negativo e conseguentemente attribuirono elettricità di tipo vetroso (positiva) agli atomi di idrogeno, non ancora chiamati ioni, originando la convenzione in base alla quale, oggi, gli elettroni hanno carica negativa. Maxwell (Chalmers, 2001) sollevò una critica rilevante alla visione dualistica: se l'elettricità si manifesta in forma di due sostanze, la legge di conservazione implica che una sostanza debba distruggere l'altra, idea decisamente contraria alla visione del fluido elettrico come sostanza.

Questa riflessione di Maxwell introduce le difficoltà dei modelli atti a descrivere la carica elettrica nella didattica. E' stata rilevata (Mulhall, McKittrick & Gunstone, 2001) una diffusa confusione nei libri di testo tra carica elettrica vista come *proprietà di stato*

*dei corpi* (che può essere cambiato, per esempio, strofinandoli o ponendoli a contatto) e carica come sinonimo di *particella* (elettrone, ione, ecc.) portatrice di carica elettrica. Alla luce delle considerazioni precedenti, questa confusione sulla natura della carica elettrica affonda le sue radici nello sviluppo storico delle idee. E' stato accertato che quando gli studenti interpretano semplici fenomeni di elettrizzazione e induzione elettrostatica evidenziano difficoltà nel riconoscere la dualità della carica elettrica ed in particolare gli spostamenti delle cariche di segno negativo (Guruswamy et al., 1997). Gli studenti, come i primi studiosi, tendono ad utilizzare modelli distinti per la carica elettrica: a) un fluido, b) composta da entità particellari che agiscono a distanza. Il superamento del nodo concettuale evidenziato dalla storia costituito dall'integrazione di questi modelli è utile e funzionale per affrontare i ragionamenti che stanno alla base delle difficoltà di apprendimento.

### ***1.2 Il contributo della pila di Volta all'integrazione tra elettrostatica ed elettrodinamica***

Nel 1700 lo studio dell'elettricità non era limitato all'elettrostatica: con le macchine elettrostatiche si poteva produrre una corrente, sebbene dell'ordine del microampere. Tuttavia, la scarica della bottiglia di Leyda, il migliore dei condensatori dell'epoca, poteva generare un impulso di corrente fino a 100 A, anche se solo per pochi microsecondi. Fu osservato (Jeszenszky, 1999) che la corrente di scarica della bottiglia di Leyda era capace di fondere un filo metallico; sulla base dei suoi esperimenti di fusione, Priestley determinò che la conduttività di metalli diversi era differente. Troostwijk nei Paesi Bassi riuscì a decomporre acqua mediante la corrente generata da una macchina elettrostatica. Nel 1799, Pearson in Inghilterra era in grado di produrre circa 1 cm<sup>3</sup> di ossigeno, sebbene per ottenerlo, dovesse operare con una macchina a strofinio per 3 ore. Franklin aveva notato che dopo una scarica elettrica, un ago d'acciaio non magnetico era diventato magnetico. In sintesi, gli effetti chimici, termici e magnetici legati alla corrente elettrica erano osservati, ma la scienza prima di Volta non poteva analizzarli.

La novità introdotta dalla pila di Volta (Volta, 1800) era che essa generava per tempi lunghi una corrente di qualche Ampere, rendendo possibile esaminare gli effetti della corrente. Ma si pose immediatamente il problema se il nuovo ente messo in gioco dalla pila potesse identificarsi col fluido elettrico proprio delle macchine elettrostatiche. Il dubbio derivava principalmente dal confronto tra gli effetti elettrici della pila, assenti o molto deboli, rispetto agli effetti delle macchine elettrostatiche. Alcuni corpi che si mostravano conduttori per il fluido elettrico, sembravano invece isolanti per il nuovo

fluido prodotto dalla pila; non si sapeva spiegare che il *fluido elettrico* delle pile, così debole nel dare effetti elettrici, riuscisse poi a produrre gli effetti chimici di decomposizione di alcuni liquidi ed ossidazioni di alcuni metalli laddove l'elettricità *assai più forte e strepitante* delle macchine elettrostatiche non riusciva a produrli. Era incomprensibile la diversità di effetti fisiologici tra le scariche delle macchine elettrostatiche e la corrente della pila (come, per esempio, alcuni piccoli animali fossero solamente storditi dalla scarica di una bottiglia o di una macchina, mentre morivano per azione della corrente di una pila). Si manifestava dunque in questi termini il nodo del raccordo fenomenologico tra elettrostatica ed elettrodinamica. Il problema fu all'epoca formulato come segue: si trattava di un nuovo fluido, oppure le manifestazioni collegate alla pila erano dovute al movimento del noto fluido elettrico? Volta era decisamente favorevole alla seconda ipotesi e giustificò le *pretese differenze nel modo di agire dei due fluidi* dicendo che queste *sono da ricercare nella tensione diversa delle macchine elettrostatiche e della pila*. L'idea di *tensione* in Volta talora indica la quantità di carica presente sui terminali della pila e non sempre coincide con l'attuale concetto di differenza di potenziale. Wollaston nel 1801, sulla base di alcuni esperimenti, appoggiò le idee di Volta. Prendendo in considerazione la decomposizione di sali metallici, la usò come test per provare l'identità delle correnti elettriche della pila e quelle ottenute dalla scarica nelle macchine. Verificò che gli stessi fenomeni chimici avvenivano cambiando la sorgente elettrica e che quindi il fluido elettrico era lo stesso in tutti i casi. Ma altre differenze osservate tra i fenomeni non permisero l'accettazione di questa idea. Fu soltanto nel 1833, quando Faraday mostrò che ogni effetto noto dell'elettricità poteva essere ottenuto indifferentemente sia con l'elettricità per frizione che con quella voltaica, che ogni disputa sull'identità o no delle due elettricità ebbe fine e si identificò il fluido galvanico con il fluido elettrico in movimento.

Condizione necessaria per il movimento del fluido elettrico era un circuito chiuso. Galvani viene considerato il primo scienziato che riconobbe sistematicamente la necessità della chiusura del circuito negli esperimenti sull'elettricità (Testa, 2008). Mettendo a contatto il muscolo ed il nervo ad esso afferente di una rana con un collegamento costituito da due metalli differenti (argento e zinco) si osservava una contrazione del muscolo che Galvani interpretò come manifestazione di un nuovo fluido. Le sue indagini sulla contrazione dei nervi della rana costituivano un'importante novità rispetto al contesto della ricerca dell'epoca, in cui i fenomeni erano studiati utilizzando prevalentemente sistemi di conduttori in circuiti aperti.

Volta interpretò le osservazioni di Galvani in termini di una causa: il contatto tra due metalli differenti, attribuendo alla contrazione dei nervi della rana il ruolo di misuratore. Questa teoria del contatto è alla base della progettazione della pila. Nei suoi lavori Volta distingue chiaramente tra gli effetti elettrostatici della pila osservati a circuito aperto, da quelli dinamici osservati con il circuito chiuso. Molti scienziati cercarono di osservare gli effetti della corrente utilizzando la pila di Volta, ma senza riconoscere la necessità della chiusura del circuito. L'attenzione si concentrava sui poli elettrici o magnetici invece che sulla realizzazione di un circuito chiuso: ciò è alla base delle difficoltà di costruzione delle prime macchine elettriche e indica l'utilizzo di idee legate all'elettrostatica nei primi tentativi di comprensione della corrente elettrica.

Analogamente, i ragionamenti sulla corrente degli studenti nella scuola secondaria e nell'università (Benseghir & Closset, 1996) derivano da una base concettuale che include una conoscenza più o meno intuitiva dell'elettrostatica. Gli studenti tendono ad attribuire le cause degli effetti magnetici, chimici, della attrazione e repulsione elettrostatica alle cariche presenti sui poli della batteria. Queste cariche sono viste come elementi essenziali nell'analisi del circuito elettrico all'interno di un ragionamento che rende irrilevante la distinzione tra circuito aperto e chiuso e distoglie dall'idea della circolazione della corrente in specie all'interno del generatore. Nell'apprendimento dell'elettrodinamica occorre evitare che gli studenti riutilizzino le conoscenze riferite all'elettrostatica come una *lente deformante* nella descrizione dei processi. Questo è quanto è accaduto nel corso della storia della formulazione della teoria fisica. Dal punto di vista didattico, appare importante una solida costruzione del concetto di carica e di tensione elettrica, ed una chiara distinzione tra le due grandezze. Nel quadro meccanicista, la tensione (un termine che non corrisponde al concetto attuale) dava una misura del grado di accumulazione del fluido elettrico sui corpi. Si manifestava dunque una parziale sovrapposizione tra il concetto di tensione e quello di densità di carica. Questa sovrapposizione si ritrova nelle difficoltà degli studenti intorno al concetto di tensione elettrica, che spesso non è usato per interpretare i processi del trasferimento della carica (Mossenta & Michelini, 2009). Studenti universitari spiegano l'elettrizzazione utilizzando l'idea del trasferimento di carica da un corpo all'altro, da quello più carico al meno carico; c'è una identificazione tra carica e potenziale che viene considerato un indicatore della quantità di carica che un corpo può contenere. Per i futuri insegnanti di scuola primaria la ragione del trasferimento di carica tra sfere metalliche connesse da un filo conduttore è la differenza tra il numero di elettroni su esse (Barbas & Psillos, 1997). Emerge quindi che



gli studenti non hanno una visione scientifica del concetto di potenziale e non riescono a stabilire relazioni significative tra il potenziale e la corrente elettrica.

Il quadro storico ad inizio 800 evidenzia una situazione analoga. Si manifestava la difficoltà di identificare il potenziale elettrico definito in elettrostatica da Poisson con la *forza elettroscopica* della pila di Volta. In questo quadro si colloca la definizione matematica del potenziale elettrico che viene riproposta nei testi scolastici dei giorni nostri.

Lagrange, in una memoria sul moto dei corpi gravitanti, aveva mostrato (Whittaker, 1951) che la forza in un punto P poteva essere espressa come il gradiente di una funzione scalare  $\varphi(x,y,z)$  ottenuta sommando la massa di ogni singolo corpo, diviso per la sua distanza dal punto P; e Laplace aveva mostrato che questa funzione soddisfaceva l'equazione

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} = 0$$

in tutti i punti dello spazio liberi da masse. Nel 1813 Poisson, partendo da questo risultato, mostrò che quando il punto P era interno ad un corpo, l'equazione di Laplace andava sostituita con la

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} = -4\pi\rho$$

dove  $\rho$  indica la densità della materia nel punto P. Sulla base della corrispondenza tra l'espressione della forza coulombiana e di quella gravitazionale, Poisson richiamò l'attenzione sull'utilità di questa funzione  $\varphi$  in ambito elettrostatico, evidenziando che il suo valore sulla superficie di un conduttore doveva essere costante. Quando si hanno diversi corpi conduttori nello spazio, la conoscenza delle condizioni al contorno consente di determinare univocamente il valore del potenziale in ogni punto dello spazio e conseguentemente la distribuzione della carica elettrica, risolvendo l'equazione che oggi porta il nome di Poisson. Il problema generale dell'elettrostatica era dunque risolto nel quadro della teoria matematica del potenziale elettrico. In questo schema concettuale, la convinzione di una struttura continua della carica elettrica non veniva in alcun modo messa in dubbio.

Quali questioni solleva la prima fenomenologia elettrodinamica? Era ben noto che la differenza di potenziale fra due corpi carichi veniva rapidamente annullata se collegati mediante un conduttore. Ma cosa accade collegando i due terminali di una pila con un conduttore? La differenza di potenziale non si annulla, a differenza del caso elettrostatico. Ciò viene evidenziato da Volta (1801): *le piastre si comportano come conduttori debolmente carichi che agiscono incessantemente, ossia in modo che la loro*

*carica si ristabilisce da sé dopo ogni scarica; che, in una parola, forniscono una carica illimitata, ovvero provocano un'azione o propulsione perpetua del fluido elettrico.*

Volta spiegava la *forza elettroscopica* della pila riconducendola alla presenza sui terminali di due *elettricità* opposte (positiva e negativa), attribuendone la separazione ad una qualche forza interna alla pila, agente continuamente nel tempo. Mentre in elettrostatica il processo di elettrizzazione che generava la differenza di potenziale tra due conduttori era evidente, i tentativi di interpretare il funzionamento della pila in termini di potenziale elettrico venivano frustrati dalla difficoltà di rendere conto di processi microscopici inaccessibili all'osservazione diretta. Questa situazione ha contribuito a ritardare l'identificazione tra il potenziale elettrico definito da Poisson in condizioni statiche e la *forza elettroscopica* della pila di Volta.

Circa trent'anni dopo la pubblicazione dei lavori di Volta, nel 1826, Ohm propose una analogia tra elettricità e calore, in cui il potenziale elettrico era la grandezza corrispondente alla temperatura, associando la densità di carica contenuta in una parte P di filo percorso da corrente alla differenza di potenziale tra le due sezioni normali che delimitano P. Questa visione, che oggi sappiamo non corretta (Chabay & Sherwood, 1999), fu superata dal lavoro di Kirchhoff del 1848 in cui la trattazione di Ohm relativa ai soli conduttori monodimensionali veniva estesa ai conduttori tridimensionali (Whittaker, 1951).

Kirchhoff osservò che la funzione potenziale definita da Poisson doveva presentare una discontinuità alla superficie di contatto tra due conduttori di materiale differente ed identificò tale discontinuità con la *forza elettroscopica* definita da Volta. Inoltre Kirchhoff stabilì che la continuità della corrente attraverso la superficie di separazione dei conduttori era descritta dalla continuità dell'espressione  $\sigma \frac{\partial V}{\partial n}$ , essendo  $\sigma$  la conduttività del materiale e  $\frac{\partial V}{\partial n}$  la componente del gradiente nella direzione normale alla superficie di separazione. Il lavoro di Kirchhoff dette origine ad altre importanti ricerche sulla descrizione matematica dei fenomeni al confine tra elettrostatica ed elettrodinamica; in particolare, quella di W. Thomson (1853) analizzava i fenomeni oscillatori riscontrati nella scarica della bottiglia di Leyda in termini di capacità ed induttanza, ponendo le basi della teoria delle oscillazioni elettriche.

La pila voltaica che convertiva effetti chimici in effetti elettrici, le esperienze di Oersted in cui gli effetti elettrici davano luogo ad effetti magnetici, e le esperienze sull'induzione (Faraday, 1831) in cui gli effetti magnetici davano luogo ad effetti elettrici, non potevano essere interpretate in termini di fluidi indipendenti e conservati. Si avvia dunque il superamento del programma meccanicista, determinato principalmente dalla scoperta di fenomeni che non potevano essere ricondotti a quel

quadro concettuale (Chalmers, 2001). Oggi noi sappiamo che il principio unificatore alla base dei fenomeni fisici è quello della conservazione dell'energia, la cui formulazione cominciò a partire dal 1840. Tuttavia furono fatti dei tentativi per salvare l'idea dell'azione a distanza. Uno di questi è costituito dalla teoria di Weber che riconduceva i fenomeni all'interazione tra particelle di natura elettrica estendendo la dipendenza della legge di forza alla velocità e all'accelerazione. Un altro tentativo, popolare tra i fisici britannici, fu di ricondurre elettricità, magnetismo, calore e luce a processi meccanici relativi all'etere. La terza alternativa fu avanzata da Faraday che evitò l'idea dell'etere rappresentando le azioni a distanza tra i corpi in termini di linee di forza, ponendo le basi della struttura teorica elaborata da Maxwell.

### ***1.3 L'elettrolisi, culla delle teorie sull'elettrone***

A partire da metà 800, si avvia il superamento della concezione meccanicista di una trasmissione diretta a distanza degli effetti fisici. Seri tentativi in questa direzione furono avanzati da Fresnel nella teoria matematica di propagazione ondulatoria della luce e da Fourier nella sua descrizione della propagazione del calore come processo di flusso macroscopico (Wise, 1979). Sia Fourier che Fresnel interpretarono i fenomeni di propagazione utilizzando delle relazioni matematiche tra grandezze fisiche macroscopiche, un gradiente e un flusso. In particolare, per quanto riguarda la trasmissione del calore, Fourier determinò una semplice relazione lineare tra il flusso di calore attraverso una superficie e il gradiente della temperatura, che poteva essere vista come una relazione di causa-effetto, suggerendo una analoga relazione tra il gradiente del potenziale e la corrente elettrica nella legge di Ohm. La nuova visione si estendeva dall'ambito dei fenomeni termici ed ottici anche ai fenomeni elettrici e magnetici. Il concetto di potenziale venne gradualmente riconosciuto come fondamentale, in particolare dai fisici più orientati alla formalizzazione matematica, quali Green e Gauss. Più tardi questa nuova visione avrebbe giocato un ruolo fondamentale nella nuova sintesi di elettricità e magnetismo ad opera di Maxwell. Tuttavia Maxwell cercò di spiegare i fenomeni elettromagnetici attraverso un modello meccanico, in termini degli stati di un etere dotato di densità ed elasticità (Chalmers, 2001). Per ironia della sorte, proprio in ambito elettromagnetico si ebbe la dimostrazione che una spiegazione meccanicista dei fenomeni era impossibile: l'energia associata ad un campo elettromagnetico non è riconducibile ad energia cinetica di materia in movimento.

Restava aperta la questione della natura del fluido elettrico. Sebbene gli esperimenti di Wollaston nel 1801 avessero dimostrato l'identità delle correnti generate dalle

macchine elettrostatiche e dalle pile, permanevano delle perplessità: nessuna spiegazione era stata proposta del fatto che l'elettricità appariva un fenomeno di superficie nelle situazioni elettrostatiche, mentre la corrente della pila si presentava come un fenomeno di volume, spostandosi *all'interno* dei corpi. Faraday rivolse la sua attenzione a questo problema, dimostrando definitivamente nel 1833 che ogni effetto noto del passaggio di corrente, fisiologico, magnetico, luminoso, termico, chimico e meccanico, poteva essere ottenuto indifferentemente sia utilizzando macchine elettrostatiche che utilizzando pile. Faraday riconobbe che il processo di conduzione nei metalli poteva essere interpretato come movimento di un solo tipo di fluido in una direzione oppure di due tipi di fluido in direzioni opposte, ma si astenne dal privilegiare una ipotesi rispetto all'altra e prese le distanze dall'ipotesi atomica. Al contrario, Helmholtz (1881) nella sua rassegna sulle concezioni dell'elettricità asserisce, sulla base del lavoro di Faraday, l'esistenza di *definite porzioni elementari di elettricità* (Robotti, 1995).

La prima teoria dei fenomeni elettrici e magnetici, imperniata sulla nozione di carica elettrica particellare e di corrente elettrica come moto di cariche, è quella di W. Weber, elaborata tra gli anni 1846 e 1848 (Wilson, 1953), anche se il termine elettrone fu introdotto quasi 20 anni dopo da Stoney (1874). Accogliendo l'ipotesi atomica e la visione del legame chimico ad essa collegata, Stoney aveva interpretato le ricerche di Faraday sull'elettrolisi usando queste parole: *For each chemical bond which is ruptured within an electrolyte a certain quantity of electricity traverses the electrolyte which is the same in all cases.*

Da queste considerazioni emerge il ruolo centrale dell'elettrolisi nello sviluppo delle prime idee sulla natura particellare della carica elettrica, aspetto denso di potenziali ricadute didattiche. L'elettrolisi fu scoperta nell'aprile del 1800 da William Nicholson (1753-1815) e da Anthony Carlisle (1768-1840) mentre studiavano il funzionamento delle batterie elettriche. Gli esperimenti di Sir Humphrey Davy (1778-1829) mostrarono che alcune sostanze si potevano decomporre facendo passare una corrente elettrica attraverso una soluzione acquosa; spesso si depositava un metallo sul conduttore immerso nella soluzione e si sviluppavano bolle di gas. Per esempio, nell'elettrolisi di NaCl, si deposita sodio metallico all'elettrodo negativo e si sviluppa cloro gassoso all'elettrodo positivo. L'elettrolisi è un fenomeno che differenzia in modo macroscopico i due elettrodi della pila. Faraday interpretò i fenomeni osservati ipotizzando la presenza in una soluzione elettrolitica di portatori carichi positivamente e negativamente, per i quali introdusse il nome di *ioni*. Nel 1833 stabilì che: 1) la massa (in moli) di sostanza prodotta ad un elettrodo è proporzionale alla carica che ha

attraversato il circuito; 2) è inversamente proporzionale alla valenza della sostanza in soluzione.

Furono sollevati dubbi sulla differenza tra le proprietà di atomi e ioni di sodio. Nel dibattito sull'origine degli ioni prevalse lentamente l'idea (Arrhenius, 1887) che gli ioni in soluzione esistessero prima del passaggio della corrente. In ambito didattico, Schmidt, Marohn e Harrison (2007) riscontrano negli studenti l'idea che la corrente elettrica produce gli ioni in soluzione durante l'elettrolisi. Legata a questa, una concezione alternativa diffusa e difficile da superare (Huddle et al., 2000) è che gli elettroni possono fluire attraverso la soluzione acquosa quando il circuito è chiuso. Alla base del ragionamento degli studenti c'è il significato evocato dal termine elettrolisi. Quando Faraday usò questo termine, lo riferì ad un processo in cui il passaggio della corrente elettrica decompone le sostanze. Altri termini della chimica che terminano in *-lisi* descrivono processi simili: idrolisi = decomposizione di una sostanza (per esempio, un estere) con acqua; termolisi = decomposizione di una sostanza (per esempio, polistirolo) utilizzando il calore. All'epoca di Faraday il termine elettrolisi fu opportunamente scelto per descrivere la fenomenologia; tuttavia lo stesso termine diventa ambiguo quando in classe viene riferito al livello microscopico, poiché suggerisce che è la corrente elettrica che produce gli ioni. Così lo interpretano gli studenti: dalla parola elettrolisi *deducono una decomposizione di molecole in ioni*. Pertanto, affrontare i ragionamenti degli studenti con consapevolezza della ricostruzione storica dell'impostazione interpretativa della fenomenologia può contribuire, nel caso specifico, al superamento delle concezioni alternative.

In ambito didattico, una cella elettrolitica ad idrogeno può essere usata come misuratore di carica elettrica e circuiti costituiti con più celle dimostrano la proprietà di conservazione della carica elettrica (IPS Group, 1974). Se si suppone di conoscere la massa dell'atomo di idrogeno (o equivalentemente il numero di Avogadro) da semplici misure eseguite sullo sviluppo di gas nella cella elettrolitica è possibile determinare la carica dell'elettrone. Procedimenti di misura simili sono riportati da Stoney che poteva annunciare già nel 1874 un valore della carica fondamentale in accordo con quello attuale.

Anche J. J. Thomson riconobbe la continuità concettuale tra l'indagine sui fenomeni elettrochimici e quelli relativi alla scarica nei gas, ed in particolare l'importanza dell'elettrolisi nello studio della costituzione atomica, in un saggio del 1895 dove difendeva l'originale teoria di Berzelius. Qualche anno dopo, utilizzando un tubo a vuoto, dimostrò che i portatori di carica nei metalli coincidevano con gli elettroni ipotizzati da Stoney nel contesto elettrochimico, portando un contributo decisivo alla

risoluzione della controversia sulla natura dei raggi catodici, ove la scuola britannica sosteneva una interpretazione corpuscolare mentre quella tedesca attribuiva la propagazione della corrente nei gas rarefatti alle proprietà ondulatorie dell'etere (Robotti, 1995). I risultati di differenti misure eseguite da Thomson (1897-99) mostravano che la massa dell'elettrone era circa 2000 volte minore di quella dell'atomo di idrogeno, ed erano indipendenti sia dal gas nel tubo sia dal metallo che costituiva il catodo, suggerendo che gli elettroni fossero costituenti degli atomi di tutte le sostanze. A seguito di queste considerazioni, le diverse concezioni di *ione*, *atomo*, *molecola*, *particella*, *corpuscolo di elettricità* confluiranno nell'accertata realtà fisica dell'elettrone. Le pubblicazioni di Thomson chiariscono la natura dell'elettrone come entità corpuscolare separabile dall'atomo, che cessa di essere considerato indivisibile. Nel 1897 Thomson scrive: *From what we have seen, this negative ion (corpuscle) must be a quantity of fundamental importance in any theory of electrical action; indeed, it seems not improbable that it is the fundamental quantity in terms of which all electrical processes can be expressed. For, as we have seen, its mass and its charge are invariable, independent both of the processes by which the electrification is produced and of the gas from which the ions are set free. It thus possesses the characteristics of being a fundamental conception in electricity.* (cit. in Robotti, 1995). Questa idea della divisibilità dell'atomo appare veramente rivoluzionaria a fine Ottocento, ponendo le basi di ricerche che sfoceranno nelle grandi teorie della fisica del Novecento, ed evidenzia anche una concezione unitaria della comprensione dei fenomeni fisici e chimici smarrita nella attuale compartimentazione dei contenuti disciplinari in ambito didattico. Trattare la chimica e la fisica come contesti distinti e indipendenti, utilizzando terminologie diverse per descrivere lo stesso fenomeno è all'origine delle difficoltà di comprensione degli studenti (Garnett & Treagust, 1992).

#### **1.4 Le prime teorie dell'elettrone**

Nell'importante periodo di messa a fuoco dei problemi relativi all'idea di elettrone, molte questioni vengono approfondite (Peruzzi, 1996). Tra le principali: (a) si affronta la questione del trasporto della carica elettrica nei solidi, in particolare nei metalli (Drude, 1900); (b) si evidenzia il dualismo crescente tra *materia* (costituita, secondo un modello corpuscolare, da particelle, i cui moti continuano ad essere descritti all'interno di quadri interpretativi meccanicisti) e *campo* (entità continua, diffusa in tutto lo spazio, la cui dinamica è soggetta alle equazioni di Maxwell); (c) si pongono, in ambito matematico, i problemi relativi alla compatibilità tra la formulazione differenziale delle

equazioni del campo e le leggi delle interazioni elementari tra cariche puntiformi; (d) si approfondisce il ruolo dei principi di conservazione e dei principi di simmetria.

a) Secondo Whittaker (1953), la teoria atomistica di Weber non aveva consentito progressi nella comprensione della conduzione nei metalli. Mancava un quadro teorico unitario nel quale ricondurre la diversa fenomenologia osservata, la conduzione della corrente secondo le leggi di Ohm, l'effetto termoelettrico rilevato da Seebeck e Peltier, l'effetto Hall, la relazione tra conducibilità elettrica, termica e temperatura stabilita dalla legge di Wiedemann e Franz (1853). Thomson (1888) propose una visione della corrente nei metalli come una serie di scariche intermittenti, dovute alla ridisposizione dei costituenti interni alle molecole. In questo quadro teorico veniva fornita una spiegazione della relazione di Wiedemann e Franz. Nonostante il prestigio di Thomson, i ricercatori all'epoca optavano per una diversa ipotesi, che gli interstizi tra gli atomi dei metalli fossero occupati in ogni istante da uno sciame di particelle dotate di carica elettrica in rapido movimento. Nel 1900 Paul Drude propose che l'energia cinetica di queste fosse proporzionale alla radice quadrata della temperatura assoluta, assimilando i portatori di carica alle molecole di un gas perfetto. Anche Thomson aderì a questa ipotesi avanzando l'idea che particelle con carica di segno diverso giocassero un differente ruolo nella conduzione, quelle positive solidali alla struttura del metallo e quelle negative, identificate come elettroni, in libero movimento nel metallo. Un convincente esperimento a sostegno dell'ipotesi di Thomson fu condotto da Tolman e Stewart nel 1916. Esso consiste nel misurare l'impulso di corrente suscitato dal rapido arresto di un disco metallico rotante ad alta velocità.

b) Particolarmente esemplificativa del dualismo tra materia e campo è la trattazione dell'interazione tra elettrone ed onda elettromagnetica ad opera di Thomson (Jackson, 1999). Considerando un elettrone libero investito da un'onda elettromagnetica piana monocromatica, sotto l'azione di questa l'elettrone si mette in movimento diffondendo radiazione in tutte le direzioni. Se la velocità dell'elettrone è piccola rispetto alla velocità della luce, la frequenza della radiazione diffusa coincide con quella della radiazione incidente. Il processo di diffusione può essere caratterizzato dal rapporto tra la potenza irradiata in una data direzione nell'unità di tempo e il flusso della potenza incidente. Questo rapporto ha le dimensioni di una superficie e, integrato su tutte le direzioni, fornisce la sezione d'urto totale del processo

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2$$

essendo  $r_e = e^2/m_e c^2$  (in unità naturali) il raggio classico dell'elettrone introdotto da Thomson. Questo risultato consolidava l'immagine dell'elettrone come particella di dimensioni finite, non assimilabile ad un punto materiale.

Una novità importante nel quadro fenomenologico è la dipendenza della massa dell'elettrone dalla velocità, punto di partenza, tra l'altro, di studi teorici sulla struttura dell'elettrone. Intorno al 1900 furono elaborati modelli diversi da parte di Abraham, Lorentz e Bucherer (Peruzzi, 1996) le cui previsioni si differenziavano per quanto riguarda la dipendenza della massa dalla velocità rispetto ai valori dei coefficienti del termine di secondo ordine in  $v/c$ . I dati sperimentali di Kaufmann erano in accordo con il modello di Lorentz, che più tardi fu reinterpretato da Einstein nel quadro della teoria relativistica. L'idea alla base di questi modelli può essere espressa in modo semplice: l'energia del campo elettromagnetico dell'elettrone in movimento è maggiore rispetto alla situazione in cui è fermo (Cushing, 1981). La legge di Biot-Savart (Jackson, 1999) fornisce il valore del campo magnetico generato a distanza  $r$  da una particella con carica  $q$  in moto con velocità  $v \ll c$

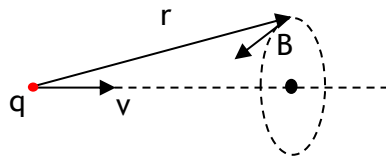


Figura 1 - campo magnetico di una particella carica

Nel vuoto risulta  $\vec{B} = q \frac{\vec{v} \wedge \vec{r}}{r^3}$  (in unità naturali). L'energia  $U$  associata a questo campo è distribuita nello spazio con densità  $u = B^2/8\pi$ . Integrando su tutto lo spazio si ottiene

$$U = \frac{q^2 v^2}{6a},$$

dove  $a$  rappresenta il raggio dell'elettrone. Dunque il lavoro da compiere per mettere in movimento un corpo è maggiore se il corpo è elettricamente carico. Se si interpreta questo lavoro aggiuntivo in termini di un aumento  $m_{EM}$  della massa dell'elettrone, utilizzando il teorema dell'energia cinetica  $L = \frac{1}{2}(m + m_{EM})v^2$  con  $U = \frac{1}{2}m_{EM}v^2$ , si ottiene  $m_{EM} = q^2/3a$ , espressione valida nel limite di velocità piccole rispetto alla velocità della luce.

Elemento comune ai diversi modelli era il tentativo di ricondurre una parte dell'inerzia dell'elettrone ad una origine elettromagnetica, questa possibilità essendo consentita dal riconoscimento del campo come ente dotato di intrinseche proprietà fisiche (energia e quantità di moto). Il problema delle forze di coesione di natura non elettromagnetica necessarie per garantire la stabilità dell'elettrone e della loro consistenza con le



richieste di invarianza per trasformazioni di Lorentz cui soddisfa il campo elettromagnetico, viene affrontato nel 1906 da Poincaré e costituisce il punto di partenza della successiva ricerca di Dirac del 1928 (Cushing, 1981).

In sintesi, all'interno del modello classico (non quantistico), l'ipotesi di una struttura spazialmente estesa dell'elettrone lascia aperto il problema della stabilità, mentre l'ipotesi di un elettrone puntiforme conduce alla divergenza fisicamente inaccettabile del campo elettromagnetico nelle regioni di spazio vicine (il cosiddetto "problema dell'auto-energia dell'elettrone"). Questo dilemma sarà superato nella descrizione quantistica di campi e particelle ad opera di Feynman (1949).

### **1.5 La concezione moderna della carica elettrica**

Alla fine del 1900 l'elettrodinamica si configura come un settore della descrizione unificata delle particelle e delle interazioni oggi nota come Modello Standard (Braibant et al, 2010). Il Modello Standard fornisce una descrizione quantomeccanica coerente delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti basata su costituenti fondamentali (quark e leptoni) che interagiscono attraverso particelle mediatori di forze, il fotone per l'interazione elettromagnetica, i bosoni vettori intermedi  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$  per l'interazione debole, gli 8 gluoni per l'interazione forte. L'apparato teorico unificatore poggia sul gruppo continuo delle simmetrie di gauge delle forze e sul gruppo discreto delle simmetrie delle particelle rappresentati da  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ . All'interno del Modello Standard l'elettrodinamica classica (ossia non quantistica) è il limite dell'elettrodinamica quantistica, per valori piccoli dell'impulso e dell'energia scambiati nelle interazioni e per grandi numeri di fotoni. A sua volta l'elettrodinamica quantistica è conseguenza della rottura spontanea di simmetria in una teoria relativistica di campo nella quale l'interazione debole ed elettromagnetica sono unificate con mediatori a massa nulla. La rottura della simmetria lascia a massa nulla il mediatore dell'interazione elettromagnetica, il fotone, dando luogo al raggio d'azione infinito della legge di forza di Coulomb. In questo quadro teorico l'elettrone è un costituente fondamentale della materia ordinaria, insieme ai quark  $u$ ,  $d$ ; il valore della carica dell'elettrone determina l'intensità ad energia zero  $\alpha = e^2/\hbar c$  (in unità naturali) dell'interazione tra elettrone e fotone, la cosiddetta *costante di struttura fine*. L'elettrodinamica quantistica richiede come parametro fenomenologico una sola quantità da determinare sperimentalmente, la carica dell'elettrone.

Nel quadro teorico costituito dal Modello Standard, la carica elettrica è una grandezza scalare conservata, quantizzata e invariante relativistico. Nel seguito si illustrano sommariamente questi aspetti.

Per quanto riguarda la proprietà di conservazione, essa può essere giustificata seguendo un ragionamento di Wigner (1949) fondato sulla proprietà del potenziale elettrico  $\varphi$  di essere definito a meno di una costante additiva arbitraria. Ciò implica che ogni grandezza fisica può dipendere solo da differenze di potenziale (ad esempio, il campo elettrico). Ragioniamo per assurdo supponendo che la carica non sia conservata, ovvero che possa essere creata o distrutta. Supponiamo inoltre che per creare la carica  $Q$  sia necessario fare un lavoro  $W$  (che può essere compensato dal lavoro ottenuto nel distruggerla) e che la carica sia creata in un punto  $P$  avente potenziale  $\varphi$ . Se la carica viene poi portata in un punto  $P'$  avente potenziale  $\varphi'$  si compie un lavoro  $Q(\varphi' - \varphi)$ . Distruggiamo poi la carica ottenendo il lavoro  $-W$ . Il bilancio energetico totale è  $W + Q(\varphi' - \varphi) - W = Q(\varphi' - \varphi)$ , assumendo che il lavoro per creare o distruggere la carica non dipenda dal valore del potenziale. Si è fatto quindi un lavoro diverso da zero, ma lo stato dell'Universo è inalterato: ciò viola il principio di conservazione dell'energia. Dunque, se il potenziale  $\varphi$  è definito a meno di una costante additiva e l'energia si conserva, allora non è possibile creare o distruggere la carica elettrica.

La conservazione della carica gioca un ruolo importante in elettrodinamica quantistica: quando le particelle cariche vengono rappresentate da campi - alla stessa stregua del campo elettromagnetico - allora la conservazione della carica elettrica è associata, attraverso il teorema di Noether, al gruppo continuo di simmetrie ad un parametro  $U(1)$  che descrive l'invarianza di gauge delle equazioni di Maxwell. La teoria dei campi quantistica e relativistica rimuove la distinzione tra campi e particelle presente nella fisica precedente: la materia (elettroni e positroni) e l'interazione (fotone) sono descritte da un unico ente matematico, il campo quantistico. L'immagine del mondo fisico in elettrodinamica quantistica è molto diversa da quella classica, in particolare per quanto riguarda il vuoto. Assumendo per l'elettrone una carica nuda infinita e utilizzando la tecnica della rinormalizzazione per calcolare la carica risultante dell'effetto di schermo dovuto alla creazione di particelle virtuali e alla conseguente polarizzazione del vuoto, si ha un processo dinamico che dà senso alla misura finita della carica dell'elettrone. Tale processo può essere comprovato sperimentalmente osservando gli effetti della carica nuda in esperimenti di collisione ad altissime energie che "forzano" la schermatura delle particelle virtuali.

Per quanto riguarda la quantizzazione, a partire dalle misure di Millikan (1911), non è mai stata contraddetta dalle osservazioni la seguente affermazione: le cariche di tutte le particelle elementari (fatta eccezione per i quark, che comunque non sono stati rivelati individualmente) sono multipli interi, negativi o positivi, della carica

dell'elettrone. In particolare, la differenza relativa tra il valore assoluto della carica dell'elettrone e quella del protone è inferiore a  $10^{-19}$  (Jackson, 1999).

Questi fatti sperimentali sulla neutralità elettrica di molecole di gas, possono essere usati per sostenere l'invarianza della carica elettrica rispetto a trasformazioni di Lorentz, che sembra avere una solida base sperimentale (Jackson, 1999). Lo stesso può dirsi per la natura della carica elettrica di essere una grandezza scalare, ossia invariante per rotazioni spaziali.

L'elettrodinamica classica, ossia non quantistica, prescinde dalla natura discreta della carica elettrica ed assume che le sorgenti del campo elettromagnetico possano essere descritte da distribuzioni continue  $\rho(x^\mu)$  per la carica e  $J(x^\mu)$  per la densità di corrente. Come osserva Jackson (1999), c'è una mancanza di simmetria nella forma dei termini relativi alle sorgenti nelle equazioni di Maxwell. Questo fatto riflette l'evidenza sperimentale sull'assenza di cariche magnetiche e delle relative correnti. Tuttavia, nel formalismo delle equazioni di Maxwell, la non esistenza delle cariche magnetiche appare una convenzione (Jackson, 1999). Questo ha costituito il punto di partenza di una brillante argomentazione teorica di Dirac (1931) secondo cui l'esistenza di monopoli magnetici giustificerebbe la proprietà di quantizzazione della carica elettrica.

L'invarianza relativistica della carica ha un ruolo importante nella trattazione delle sorgenti del campo elettromagnetico: consente di dimostrare che  $J^\mu = (c\rho, \mathbf{J})$  è effettivamente un quadrivettore. Infatti dall'invarianza del quadrivolume  $dx^0 d^3x$  e dall'invarianza della carica  $\rho d^3x$  contenuta in un certo volume spaziale segue che  $\rho$  trasforma come la componente temporale di un quadrivettore. E' questo il punto di partenza per introdurre il quadrivettore cariche/correnti  $J^\mu$  nella formulazione delle equazioni di Maxwell in termini del quadripotenziale  $A^\mu$  con la condizione di gauge di Lorentz:

$$\square A^\mu = (4\pi/c) J^\mu$$

$$\partial_\mu A^\mu = 0$$

Pur essendo accettato dalla comunità scientifica, ci sono motivazioni che inducono a ritenere che il Modello Standard sia incompleto. E' attualmente senza spiegazione il fatto che i costituenti ultimi fermionici compaiano in tre famiglie, ognuna costituita da due leptoni e due quark, che sono tre repliche dello stesso tipo. Inoltre la carica elettrica dei fermioni fondamentali appare quantizzata in multipli di  $1/3$  senza una profonda giustificazione. Da ciò deriva l'uguaglianza del valore assoluto della carica di elettrone e protone, fatto sperimentalmente ben accertato.

Tentativi di superare il Modello Standard sono noti come teorie di Grande Unificazione e si basano sull'ipotesi che i quark e i leptoni siano manifestazioni differenti di una stessa

particella. Ciò porterebbe a ritenere che esista un collegamento tra l'interazione forte, che agisce fra quark, e l'interazione elettrodebole che agisce fra leptoni e fra quark. Per incorporare quark e leptoni in una singola famiglia, occorre allargare il gruppo delle simmetrie discrete delle particelle fondamentali note. Il più semplice gruppo di simmetria a cui si può pensare è il gruppo speciale di simmetria unitaria SU(5) che descrive le rotazioni in uno spazio complesso a 5 dimensioni. Il modello di grande unificazione che ammette la simmetria SU(5) (Georgi & Glashow, 1974; Georgi, Quinn & Weinberg, 1974) spiega l'uguaglianza in valore assoluto della carica di elettrone e protone. Inoltre prevede l'esistenza di monopoli magnetici (di massa molto grande) con carica data dalla relazione di Dirac (1931). L'esistenza dei monopoli giustificerebbe la quantizzazione della carica elettrica, che nell'ambito del Modello Standard è un dato sperimentale.

E' difficile sopravvalutare l'importanza delle ricerche intorno alla natura della carica elettrica nello sviluppo della fisica, dalle prime indagini sulla separazione del fluido elettrico per strofinio fino alla teoria della relatività che prende le mosse dall'elettrodinamica dei corpi in movimento. L'elettrodinamica quantistica è il primo tentativo di armonizzare la teoria della relatività ristretta con la meccanica quantistica, un modello per le successive teorie delle particelle elementari. Parallelamente a queste ricerche nell'ambito della fisica teorica, si dispiegano gli sviluppi tecnologici che, sotto il nome di *elettronica*, segnano la nostra epoca.

## **2. Nuclei fondanti**

Il contesto fenomenologico della conduzione elettrica riguarda il passaggio della corrente elettrica nei diversi materiali, solidi liquidi e gas. La conduzione elettrica in metalli e semiconduttori è importante in quanto: a) il 78% degli elementi sono metalli; b) rilevanza delle applicazioni tecnologiche; c) presenza dell'argomento nei programmi scolastici.

Il passaggio della corrente è condizionato da due fattori: a) campo elettrico applicato; b) proprietà elettriche del materiale.

La fisica riconduce le proprietà elettriche alla resistività elettrica dei diversi materiali e interpreta i processi della conduzione elettrica utilizzando differenti modelli che intrecciano livelli macroscopici e microscopici. L'elettrodinamica assume particolare rilievo per l'interpretazione dei fenomeni conduttivi in quanto ha per oggetto lo studio delle interazioni fra particelle cariche e campi elettromagnetici. Se la trattazione viene fatta senza ricorrere ai principi e ai risultati della meccanica quantistica, cioè nell'ambito della sistemazione maxwelliana dell'elettromagnetismo, si parla di

elettrodinamica classica; altrimenti, si parla di elettrodinamica quantistica. Si parla poi di elettrodinamica relativistica quando le velocità in gioco sono così grandi da rendere necessaria la trattazione nei termini della teoria della relatività. L'importanza dell'elettrodinamica quantistica nella fisica risiede nel fatto che essa costituisce una parte fondante del Modello standard in base al quale attualmente la fisica interpreta la realtà. La carica elettrica compare nel Modello standard come proprietà intrinseca e fondamentale delle particelle elementari.

Alla base di ogni modello microscopico della conduzione elettrica in un metallo sono tre elementi: 1) il campo elettrico, 2) gli elettroni di conduzione, 3) gli ioni reticolari. Ogni modello specifica proprietà e interazioni tra questi elementi assumendo una teoria fisica di riferimento. La fisica assume l'esistenza di particelle e campi. Nella didattica è necessario portare delle prove dell'esistenza di particelle e campi, prima di utilizzarli come concetti. Il passaggio dalla conoscenza fisica a quella pedagogica pone allora la questione di giustificare su base fenomenologica: A) l'esistenza e le proprietà degli elettroni di conduzione nei metalli, B) la presenza del campo in un conduttore percorso da corrente, C) il suo legame con la tensione di alimentazione, D) l'esistenza e le proprietà dell'interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari. Un meccanismo per la formazione del campo all'interno del conduttore in termini di cariche di superficie è delineato da Chabay & Sherwood (2007), che però non sembra facilmente trasponibile ad un livello di trattazione scolastico. Sul piano didattico sembra possibile giustificare la presenza del campo in un filo conduttore a circuito chiuso mettendolo in relazione alla caduta di tensione misurata ai capi del filo. Va tenuto conto tuttavia che l'esistenza e le proprietà del campo elettrico in un filo conduttore sono in contrasto con le conoscenze degli studenti associate al campo elettrostatico.

Un aspetto fondamentale associato alla conduzione è il trasferimento di energia per esempio da un generatore ad un resistore collegati da conduttori. Anche in questo semplice caso gli aspetti transitori, per esempio alla chiusura del circuito, richiedono una trattazione separata rispetto alla trattazione degli effetti stazionari quali il riscaldamento del resistore. Nel primo caso si ha la propagazione di un segnale elettromagnetico nel circuito, con velocità che dipende dalle sue caratteristiche capacitive ed induttive, e risulta dell'ordine della velocità della luce. Sul piano didattico si può affrontare questo aspetto attraverso misure all'oscilloscopico della velocità di propagazione del segnale in un cavo coassiale. La proprietà di un circuito elettrico di essere un sistema di elementi interagenti, derivano appunto dalla propagazione del campo elettrico nel circuito. Ciò pone la necessità sul piano didattico del passaggio dal concetto del campo elettrico come ente statico al concetto del campo

elettrico come ente dotato di proprietà di propagazione. Nel secondo caso il riscaldamento di un resistore può essere interpretato in base ad un meccanismo microscopico dei processi di interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari.

### **3. Aspetti epistemologici**

Il tentativo di comprendere, ad un livello più profondo, le proprietà elettriche della materia ha innescato un processo di sviluppo scientifico che ha condotto, nell'arco dei 30 anni che separano la teoria di Drude (1900) da quella di Bloch (1929), alla formulazione di una completa teoria della struttura della materia che ha contribuito in modo significativo all'evoluzione della meccanica quantistica (Hoddeson & Baym, 1980). Ciò costituisce un esempio concreto delle modalità e dei processi implicati nello sviluppo di una teoria scientifica, nella fattispecie la teoria elettronica della materia. E' utile evidenziare le mutue e sinergiche relazioni fra tre diversi elementi: teoria, fatti sperimentali, modelli esplicativi (Bunge, 1973). In primo luogo, la formulazione del modello classico della conduzione è, da un lato, basata su statuti teorici (elettromagnetismo, termodinamica, meccanica), dall'altro su alcuni fatti sperimentali (ad esempio, le leggi di Ohm, l'effetto Hall, studio dei raggi catodici). In secondo luogo, l'evoluzione ed il perfezionamento dei modelli microscopici della conduzione è trainato da due fattori: dalla necessità di estendere il potenziale esplicativo del modello ad un ambito fenomenologico sempre più ampio (ad esempio, l'interpretazione dell'andamento della resistività con la temperatura o del calore specifico dei metalli o delle proprietà dei semiconduttori) e dal tentativo di includere all'interno del modello nuove ipotesi e principi teorici (ad esempio, il principio di Nerst, la teoria di Plank, la statistica di Fermi - Dirac). Infine, la discordanza tra previsioni basate sul modello e l'andamento osservato dei fenomeni, ad esempio per quanto riguarda la resistività dei metalli in relazione alla temperatura, ha stimolato l'avanzamento della teoria e la formulazione di nuovi modelli che includono nuovi elementi teorici.

In diverse aree della fisica è possibile ricavare informazioni sulle proprietà di un sistema partendo dalla fenomenologia. Ad esempio, l'analisi fatta da Keplero dei moti planetari in un riferimento eliocentrico consente di ottenere informazioni sulla legge di forza che ne governa le orbite, sulla sua dipendenza dalla distanza e sulla costante di gravitazione universale. Ancora, la disposizione delle righe spettrali nella serie di Balmer fornisce informazioni sulle costanti che compaiono nel modello di Bohr dell'atomo di idrogeno. Nel campo specifico dello stato solido, un parametro importante per la descrizione degli stati reticolari di un solido in termini di meccanica statistica è la temperatura di Debye. La determinazione empirica della dipendenza della resistività dalla temperatura di un

metallo consente una possibile determinazione di questa grandezza. Nel quadro della teoria delle bande di energia per gli elettroni nei solidi, un parametro importante è il gap energetico dei semiconduttori. Anche in questo caso la dipendenza misurata della resistività dalla temperatura nella regione intrinseca consente una possibile determinazione di questa grandezza. Queste considerazioni sostengono la validità didattica di una trattazione della conduzione elettrica nei solidi a partire dalla descrizione fenomenologica dell'andamento della resistività con la temperatura.

## V. Rassegna della letteratura di ricerca didattica

1. Quadro della letteratura
2. Discussione della letteratura
  - 2.1 Chiusura circuito
  - 2.2 Idea di corrente
  - 2.2 Relazione tra tensione e corrente
  - 2.4 Raccordo elettrostatica-elettrodinamica
  - 2.5 Ruolo del campo elettrico
  - 2.6 Integrazione dei modelli macro-micro
  - 2.7 Raccordo con il modello particellare
3. Risultati di ricerca
  - 3.1 Scuola primaria
  - 3.2 Scuola secondaria
  - 3.3 Università
4. Proposte didattiche
  - 4.1 L'integrazione degli aspetti macro/micro dei circuiti (Licht, 1991)
  - 4.2 Il ruolo delle particelle nei circuiti (Tveita, 1997)
  - 4.3 Le relazioni tra variabili macroscopiche nei circuiti (Psillos, 1998)
  - 4.4 Le cariche di superficie nella conduzione (Chabay & Sherwood, 1999)
  - 4.5 Il raccordo elettrostatica-elettrodinamica (Borghi et al., 2007)
  - 4.6 Il campo elettrico nel funzionamento dei circuiti (Stocklmayer, 2010)
5. Confronto critico di proposte didattiche
6. Fondazione della ricerca

### **1. Quadro della letteratura**

Le ricerche sulla didattica della conduzione elettrica elaborate negli ultimi trent'anni (tab. 1-4) sono numerose e diversificate in base agli scopi, ai contesti di analisi e agli aspetti considerati. E' possibile comunque riconoscere quattro aspetti principali, rilevanti ai fini della ricerca condotta nella tesi, che hanno guidato la classificazione degli studi riportata in ordine cronologico nelle tabelle 1-4:

1) la prospettiva funzionale per i circuiti elettrici, 2) il raccordo concettuale tra elettrostatica e elettrodinamica, 3) i livelli macro/micro dei fenomeni di conduzione elettrica, 4) il modello particellare della materia.

(1) Gli studi focalizzano sulle grandezze macroscopiche tensione e corrente, sulle loro relazioni e sul loro utilizzo per comprendere il funzionamento del circuito. Alcuni autori



(Azaiza, Bar & Galili, 2006; Periago & Bohigas, 2005; Jabot & Henry, 2004; Solomonidou & Kakana, 2000; Cheng & Kwen, 1998; McDermott & Shaffer, 1992; Shipstone, 1984; Cohen, Eylon & Ganiel, 1983) attraverso l'analisi delle risposte a questionari/interviste svolgono indagini sulle concezioni degli studenti evidenziandone la persistenza di concezioni non in accordo con la visione scientifica anche al termine del ciclo dell'istruzione. Per produrre un effettivo cambiamento concettuale Eylon e Ganiel (1990) suggeriscono che l'aspetto microscopico della corrente deve essere affrontato già ai livelli scolari iniziali. Altri autori illustrano strategie di insegnamento/apprendimento quali la *Concept substitution* (Grayson, 2004) o richiamano l'efficacia dell'approccio storico nella didattica (Viard & Khantine-Langlois, 2001). Suggerimenti specifici sulla didattica della conduzione sono avanzati da Duit & von Rhöneck (1998) e McDermott & Shaffer (1992) che individuano la differenziazione delle grandezze fisiche e lo sviluppo di una visione sistemica del circuito come elementi importanti per la comprensione dei circuiti elettrici.

(2) Gli studi focalizzano sul raccordo concettuale tra elettrostatica e elettrodinamica. Alcuni autori (Viennot, 2001; Gomez & Duran, 1998; Benseghir & Closset, 1996) riconoscono nello sviluppo storico delle idee sull'elettricità le radici delle difficoltà di apprendimento riguardanti i concetti di potenziale e tensione e il loro inserimento in un quadro coerente per spiegare anche i fenomeni elettrodinamici. La ricerca di una visione unificata dei fenomeni elettrostatici ed elettrodinamici pone dei problemi sul piano della comprensione del legame fondamentale tra campo e carica elettrica (Stocklmayer & Treagust, 1996; Viennot, 2002) che possono essere affrontati nella didattica attraverso l'introduzione delle cariche di superficie in relazione all'esistenza di un campo elettrico all'interno di un filo conduttore percorso da corrente (Hirvonen, 2007). In una ricerca svolta nell'ambito della formazione insegnanti (Borghi, De Ambrosis & Mascheretti, 2007), la costruzione di un modello microscopico si presenta come utile schema interpretativo per interpretare i fenomeni transitori dei circuiti alimentati in corrente continua.

(3) L'integrazione coerente da parte degli studenti delle conoscenze di aspetti microscopici e macroscopici è un problema ampiamente trattato in didattica della fisica (Gutwill, Frederiksen & White, 1999; Thacker, Ganiel & Boys, 1999; Gutwill, Frederiksen & Ranney, 1996). Per quanto riguarda i ragionamenti degli studenti sulla conduzione elettrica, carenze nella correlazione fra la descrizione funzionale dei circuiti in termini delle variabili macroscopiche corrente e tensione ed i processi alla base del loro funzionamento descritti da modelli microscopici, sono state segnalate inizialmente da Eylon & Ganiel (1990). Successivamente sono stati indagati, a livello di scuola primaria

(Michelini & Mossenta 2006; Kibble, 1999; Stephens, McRobbie & Lucas, 1999; Barbas & Psillos, 1997) e secondaria/università (Bonura, Fazio, Guastella & Sperandeo-Mineo, 2009; Guisasola, Zubimendi, Almudí & Ceberio, 2005; Wittmann, Steinberg & Redish, 2002; De Posada, 1997) i modelli spontanei ed il loro utilizzo per spiegare o prevedere i fenomeni della conduzione.

(4) Molti studi (García Franco & Taber, 2009; Mashhadi & Woolnough, 1999; Johnson, 1998; Albanese & Vicentini, 1997) hanno evidenziato che mentre nella visione scientifica le proprietà dei materiali sono ricondotte alle proprietà delle particelle componenti e delle loro interazioni, gli studenti tendono ad attribuire alle particelle proprietà macroscopiche (quali durezza, colore, ecc.) in termini delle quali formulano le spiegazioni dei fenomeni. Nonostante l'enfasi data nei curricoli all'idea di particella, spesso i termini atomo, molecola, elettrone, ione sono utilizzati dagli studenti senza consapevolezza del loro senso fisico. Nella ricerca didattica si rinviene, di fronte a queste criticità nell'apprendimento, una ampia convergenza sulla necessità di raccordare il modello microscopico alla fenomenologia macroscopica, pianificando il processo di apprendimento come attraversamento consapevole e sistematico di livelli differenti di ragionamento (Seifert & Fischler, 2003) e rivolgendo attenzione al ruolo dei modelli scientifici esplicativi come rappresentazioni della realtà (Snir, Smith & Raz, 2003).

Tabella 1 - La prospettiva funzionale per i circuiti elettrici

Anno di pubblicazione	Titolo	Autore/i
2006	Learning electricity in elementary school	Azaiza, Bar & Galili
2005	The persistence of prior concepts about electric potential, current intensity and Ohm's Law in students of engineering	Periago & Bohigas
2004	Concept substitution: A teaching strategy for helping students disentangle related physics concepts	Grayson
2004	Assessing elementary and middle school students' understanding of electric current	Jabot & Henry
2001	The Concept of Electrical Resistance: How Cassirer's Philosophy, and the Early Developments of Electric Circuit Theory,	Viard & Khantine-Langlois

	Allow a Better Understanding of Students' Learning Difficulties	
2000	Preschool Children's Conceptions About the Electric Current and the Functioning of Electric Appliances	Solomonidou & Kakana
1998	Primary pupils' conception about some aspects of electricity	Cheng & Kwen
1998	Learning and understanding key concepts of electricity	Duit & von Rhöneck
1992	Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. Part II: Design of instructional strategies	McDermott & Shaffer
1988	Voltage Presented as a Primary Concept in an Introductory Teaching Sequence on DC Circuits	Psillos, Koumaras & Tiberghien
1984	A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits	Shipstone
1983	Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts	Cohen, Eylon & Ganiel

Tabella 2 - Il raccordo concettuale tra elettrostatica e elettrodinamica

Anno di pubblicazione	Titolo	Autore/i
2007	Microscopic models for bridging electrostatics and currents	Borghi, De Ambrosis & Mascheretti
2007	Surface-charge-based micro-models: a solid foundation for learning about direct current circuits	Hirvonen
2002	Questions sur les mérites du «microscopique»	Viennot

2001	From electrostatics to electrodynamics: historical and present difficulties	Viennot
1998	Didactic Problems in the Concept of Electric Potential Difference and an Analysis of its Philogenesis Science and Education	Gomez & Duran
1996	The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties	Benseghir & Closset
1996	Images of electricity: how do novices and expert model electric current?	Stocklmayer & Treagust

Tabella 3 - I livelli macro/micro dei fenomeni di conduzione elettrica

Anno di pubblicazione	Titolo	Autore/i
2009	Microscopic and macroscopic aspects of student knowledge in electric conduction in metals	Bonura, Fazio, Guastella & Sperandeo-Mineo
2006	Role play as a strategy to discuss spontaneous interpreting models of electric properties of matter: an informal education model	Michelini & Mossenta
2005	Using the processes of electrical charge of bodies as a tool in the assessment of university students' learning in electricity	Guisasola, Zubimendi, Almudí & Ceberio
2002	Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous models of conductivity	Wittmann, Steinberg & Redish
1999	Making Their Own Connections: Students' Understanding of Multiple Models in Basic Electricity	Gutwill, Frederiksen & White
1999	How do you picture electricity?	Kibble
1999	Model-based reasoning in a year 10 classroom	Stephens, McRobbie & Lucas
1999	Macroscopic phenomena and microscopic	Thacker, Ganiel & Boys

	processes: Student understanding of transients in direct current electric circuits	
1997	Causal Reasoning as a Base for Advancing a Systemic Approach To Simple Electrical Circuits	Barbas & Psillos
1997	Conceptions of High School Students Concerning the Internal Structure of Metals and Their Electric Conduction: Structure and Evolution	De Posada
1996	Seeking the causal connection in electricity: shifting among mechanistic perspectives	Gutwill, Frederiksen & Ranney
1990	Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning	Eylon & Ganiel

Tabella 4 - Il modello particellare della materia

Anno di pubblicazione	Titolo	Autore/i
2009	Secondary Students' Thinking about Familiar Phenomena: Learners' explanations from a curriculum context where 'particles' is a key idea for organising teaching and learning	García Franco & Taber
2003	A multidimensional approach for analyzing and constructing teaching and learning processes about particle models	Seifert & Fischler
2003	Linking phenomena with competing underlying models: A software tool for introducing students to the particulate model of matter	Snir, Smith & Raz
1999	Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities	Mashhadi & Woolnough
1998	Progression in children's understanding of a	Johnson

	“basic” particle theory: a longitudinal study	
1997	Why Do We Believe that an Atom is Colourless? Reflections about the Teaching of the Particle Model	Albanese & Vicentini
1995	Macroscopic vs microscopic: a problem of history, epistemology and teaching of physics	Busini & Tarsitani

## 2. *Discussione della letteratura*

La letteratura di ricerca analizzata nei paragrafi precedenti ha identificato i problemi di ricerca di seguito discussi.

### 2.1 Chiusura circuito

Molti studi (Osborne, 1983; McDermott & Shaffer, 1992; Psillos, 1998) hanno affrontato la didattica della conduzione elettrica focalizzando sui circuiti alimentati in corrente continua. Il principale nodo di apprendimento relativo a quest’area è il riconoscimento della necessità della chiusura del circuito (Osborne, 1983) e, ad esso correlato, riconoscere la bipolarità degli elementi del circuito (Osborne, 1983). Il coinvolgimento degli studenti più giovani in sperimentazioni concrete sul funzionamento di semplici circuiti costituiti da fili conduttori, batterie, lampadine è generalmente riconosciuto come efficace per affrontare i nodi di apprendimento sopra riportati. Ciò è il punto di partenza per trattare il funzionamento dei circuiti elettrici alimentati in corrente continua nella prospettiva sistemica in termini di grandezze macroscopiche quali tensione e corrente (Testa, 2008).

### 2.2 Idea di corrente

Modelli spontanei (fig. 1): A) unipolare, B) scontro, C) consumazione, D) scientifico (Osborne, 1983; Jabot & Henry, 2004).

A) Alla base del modello unipolare è la visione della corrente come vettore dell’energia del circuito. Poiché l’energia è vista andare dalla batteria alla lampadina, gli studenti non ravvisano la necessità della chiusura del circuito.

B) Gli studenti ragionano in termini di due correnti (“positiva” e “negativa”) che partono dai terminali della batteria e si scontrano nella lampadina dando luogo alla luminosità osservata.

C) La batteria è vista come contenitore/sorgente di qualcosa che di volta in volta è chiamato corrente, carica, energia, potenza, che si sposta in un solo verso nel circuito e che viene consumato quando attraversa la lampadina. Di conseguenza, nei ragionamenti degli studenti, la corrente non è conservata.

D) Il modello scientifico è in accordo con la conservazione della corrente. Gli studenti vedono la batteria come generatore di tensione e distinguono tra flusso di corrente (bidirezionale) e flusso di energia (monodirezionale).

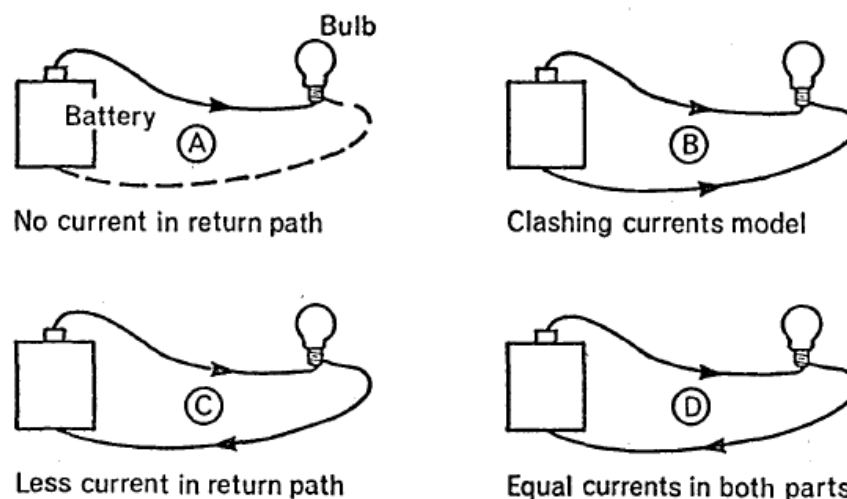


Figura 1 - modelli spontanei della corrente

Shipstone (1984) affronta la questione del cambiamento di un componente del circuito rilevando che nei ragionamenti degli studenti la corrente, circolando, è influenzata dal componente che incontra. Se viene effettuato un cambiamento di questo, allora la corrente ne viene influenzata quando lo raggiunge, non prima. In realtà ogni cambiamento si propaga nel circuito come onda elettromagnetica in tutte le direzioni e genera immediatamente un nuovo stato di equilibrio nel quale tensione e corrente possono aver subito un cambiamento in ogni parte del circuito. Alla base del ragionamento degli studenti c'è l'assunto che il cambiamento viene propagato dalla corrente nella direzione in cui scorre. Appare naturale attribuire alla corrente il ruolo di veicolo del cambiamento. Questa visione è alla base di fraintendimenti che persistono anche dopo l'avanzamento dell'istruzione (McDermott & Shaffer, 1992), quali: a) ragionamento locale: modificando un elemento del circuito si modificano tensioni e correnti solo di quell'elemento, b) ragionamento sequenziale: un elemento del circuito influenza la corrente dopo esserne stato attraversato. Altri autori (Eylon & Ganiel, 1990; Stocklmayer & Treagust, 1996; Chabay & Sherwood, 1999; Hart, 2008) sostengono che per una comprensione concettuale completa di circuiti elettrici anche semplici ed anche a livelli iniziali di scolarità è necessario esplicitare un modello interpretativo

microscopico per la corrente e la resistenza, in accordo con quanto sostenuto in questa tesi. L'utilizzo del modello microscopico consente di differenziare la propagazione del segnale elettromagnetico nel circuito dalla propagazione della corrente (Gutwill, Frederiksen & Ranney, 1996).

### 2.3 Relazione tra tensione e corrente

Nei ragionamenti degli studenti i concetti di tensione, energia, corrente, tutti e tre con le proprietà di movimento, immagazzinamento e consumo sono interscambiabili (Shipstone, 1984). La tensione è considerata conseguenza della corrente (Cohen, Eylon & Ganiel, 1983) in contrasto con la visione scientifica basata sulla legge di Ohm. Questa concezione deriva dalla visione della batteria come un generatore di corrente (Psillos, 1998) o di elettroni (Wittmann et al., 2002). Anche la relativa abbondanza della carica elettrica può essere considerata come causa del trasferimento di carica (Viennot, 2001). In tal caso gli studenti che vedono la carica come una sostanza che tende a distribuirsi uniformemente non riconoscono il ruolo della differenza di potenziale. Hart (2008) evidenzia la necessità nella didattica di dare un senso fisico al potenziale elettrico definito in termini matematici nel quadro della teoria dei campi conservativi. Ciò può essere realizzato utilizzando un modello microscopico basato sulla teoria del trasporto elettronico che consente: la comprensione della tensione della batteria come energia per unità di carica; l'interpretazione microscopica della legge di Ohm; la trasformazione di energia nelle resistenze come esito di processi microscopici; di distinguere tra carica elettrica descritta da una grandezza estensiva continua e carica elettrica come proprietà di una particella elementare (Mulhall, McKittrick & Gunstone, 2001).

L'indagine sui ragionamenti degli studenti universitari sulla conduzione elettrica nei metalli (Wittmann et al., 2002) mostra che gli studenti, piuttosto che ragionare nella prospettiva del gas di elettroni liberi (modello di Drude), costruiscono spontaneamente un modello di come gli atomi divengano donatori di elettroni: 1) non ci sono elettroni liberi prima di attaccare la batteria, 2) l'energia della batteria spinge gli elettroni fuori dall'atomo, permettendo loro di muoversi nel filo conduttore.

I ragionamenti degli studenti non considerano le proprietà del legame metallico, ma si concentrano sul comportamento del singolo atomo. La conseguente visione della corrente si inquadra in due categorie: 1) gli elettroni emessi da un atomo vengono assorbiti da un altro, che aveva precedentemente perso un elettrone; 2) l'elettrone entra in un atomo neutro creando una instabilità che lo forza a cedere un elettrone.

Questa visione (*push and jump*) impedisce di dedurre la corretta dipendenza della resistività dalla temperatura (Wittmann et al., 2002): l'aumento di temperatura



aggiunge energia all'elettrone spinto fuori dall'atomo, sicché facilita la conduzione, esattamente l'opposto della previsione del modello di Drude per i metalli.

#### 2.4 Raccordo elettrostatica-elettrodinamica

La necessità nella didattica del raccordo concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica, inizialmente sottolineata da Eylon & Ganiel (1990), è vista da Hirvonen (2007) come aiuto per contrastare lo sviluppo di idee alternative degli studenti sulla conduzione elettrica, quale la visione che cariche elettriche attribuite ai poli della batteria sono elementi essenziali anche nell'analisi del circuito (Benseghir & Closset, 1996). Viennot (2001) sostiene che le idee elettrostatiche possono portare ad interpretare il funzionamento dei circuiti in termini di ragionamento locale anziché sistemico. In un circuito aperto il campo elettrico della batteria produce un accumulo di cariche sui terminali fino al raggiungimento di una situazione di equilibrio. Ricondurre la corrente alle cariche di segno diverso presenti sui terminali della batteria genera però la difficoltà di spiegare la circolazione della corrente in senso opposto al campo all'interno della batteria quando il circuito è chiuso (Galili & Goihbarg, 2005). La presenza di cariche sulla superficie di tutti i componenti del circuito chiuso è necessaria per spiegare come le linee di campo seguano la direzione dei fili al loro interno. Ciò pone il problema didattico di giustificare nel quadro dell'elettrostatica quelle proprietà delle cariche di superficie che determinano il campo elettrico all'interno di un conduttore percorso da corrente.

#### 2.5 Ruolo del campo elettrico

La presenza e il ruolo del campo elettrico nei fili conduttori percorsi dalla corrente e la sua relazione con la tensione della batteria sono stati oggetto di poche ricerche. Mentre la visione della corrente come flusso di particelle cariche non sembra suscitare difficoltà in chi apprende, il modello microscopico in cui le cariche di superficie sono responsabili del campo elettrico all'interno di un conduttore percorso da corrente (Chabay & Sherwood, 1999) è molto complesso e richiede una comprensione delle proprietà del campo elettrico che non è facilmente accessibile agli studenti. Tuttavia il campo elettrico ha un ruolo centrale non solo come ente responsabile del movimento degli elettroni di conduzione, ma anche come vettore del trasferimento di energia nel circuito, e sembra condivisibile l'introduzione dell'intensità del campo  $E$  all'interno del conduttore come grandezza dipendente dalla tensione  $V$  ai capi del conduttore. Nel caso semplice di un conduttore cilindrico omogeneo di lunghezza  $L$ , risulta  $E=V/L$  (Marcus, 1941; Jefimenko, 1962), in accordo con la definizione del potenziale come

lavoro compiuto sull'unità di carica. La presenza della forza elettrica all'interno del conduttore percorso da corrente viene data per scontata in tutte le dimostrazioni scolastiche della legge di Joule, per giustificare il lavoro svolto sulla carica in movimento. La propagazione del campo elettromagnetico nel circuito spiega inoltre come la batteria può agire quasi simultaneamente su tutte le particelle cariche del circuito, rendendo conto della caratteristica del circuito di essere un sistema di elementi interagenti. L'individuazione del campo come ente responsabile dell'aspetto sistemico dei circuiti sembra essere sfuggita agli autori (McDermott, 1992; Psillos, 1998; Testa, 2008) che pure hanno individuato tale aspetto come rilevante nella didattica.

## 2.6 Integrazione dei modelli macro-micro

L'utilità di presentare diversi modelli non è del tutto evidente. Gutwill, Frederiksen & Ranney (1996) sostengono che: "Si potrebbe ritenere che il modello particellare sia non solo inutile, ma anche fonte di confusione. D'altra parte, ci si potrebbe chiedere se si debba insegnare l'elettricità solo a livello di modello particellare, eliminando completamente il modello macroscopico". Questi autori dimostrano che la comprensione dei circuiti negli studenti delle scuole superiori migliore se vengono utilizzati coerentemente differenti modelli per spiegare i fenomeni. Ad esempio si può chiedere ad uno studente di ragionare su un circuito con due resistenze in serie. Lo studente potrebbe spiegare correttamente che le due resistenze in serie sono attraversate dalla stessa corrente, per cui la tensione dipende dalla resistenza di ciascuna, secondo la formula  $V = IR$ . Anche se si potrebbe essere soddisfatti di questa spiegazione, gli autori sostengono che lo studente deve utilizzare diversi punti di vista in modo coerente per collegare la fisica alla formula. Dopo aver lodato lo studente per la sua risposta corretta, l'insegnante potrebbe chiedere di spiegare perché la quantità di corrente è la stessa attraverso le resistenze. Poi, l'insegnante potrebbe chiedere una spiegazione più approfondita: come si forma una differenza di potenziale ai capi di un resistore percorso da corrente? Perché la tensione è proporzionale alla resistenza? Per rispondere a queste domande è necessario un modello microscopico. Come esempio, Gutwill, Frederiksen & Ranney (1996) considerano il seguente ragionamento per spiegare la legge di Ohm: "Se la carica sui due terminali della batteria è maggiore, allora la tensione della batteria è maggiore e la carica elettrica all'interno dei fili sperimenterà una forza maggiore (esercitata dal campo elettrico) e quindi si muoverà più velocemente". Questa affermazione spiega la legge di Ohm (maggiore tensione provoca maggiore corrente) dalla prospettiva microscopica. Il modello microscopico consente di analizzare i fenomeni transitori nei circuiti: ad esempio Gutwill,

Frederiksen & Ranney (1996) affermano che alla chiusura di un interruttore una variazione della densità superficiale di carica si propaga nel circuito come il fronte di un'onda progressiva. Dopo un breve intervallo di tempo, la densità di carica superficiale diventa costante sui fili. Questo modello fornisce una spiegazione causale di come le tensioni all'interno di un circuito si modificano cambiando la conduttività di un componente del circuito. Esso descrive inoltre come, in un circuito batteria-fili-carico, la differenza di potenziale, inizialmente tra i capi dell'interruttore, si sposti ai capi del carico.

La necessità dell'integrazione di diversi modelli nella didattica della conduzione elettrica (Gutwill, Frederiksen & Ranney, 1996) è giustificata dallo studio di Wittmann, Steinberg & Redish (2002). Questi autori sostengono che per descrivere la conduzione elettrica sono necessari tre modelli:

a) un modello macroscopico basato sulle grandezze corrente e tensione. Le proprietà degli elementi circuitali sono specificate da resistenza, capacità, ecc. e da relazioni fenomenologiche (legge di Ohm,  $C=Q/V$ , ecc.)

b) un modello microscopico in termini di un gas di elettroni liberi in un reticolo di ioni che oscillano intorno alle loro posizioni di equilibrio, riconducibile alla teoria di Drude (1900). Gli studenti lo utilizzano per descrivere il comportamento degli elettroni (per esempio, se la temperatura del metallo aumenta, le vibrazioni reticolari aumentano di ampiezza e quindi si riduce il cammino libero medio degli elettroni di conduzione, ciò aumenta la resistenza del metallo), con consapevolezza dei limiti dovuti alla trattazione basata sulla fisica classica.

c) un modello quantistico della struttura a bande del conduttore che considera la presenza di elettroni in stati delocalizzati. Il moto degli elettroni non è classico e la loro appartenenza ad una banda, come pure la possibilità di portarsi in differenti bande di energia è essenziale per comprendere la conduzione. Lo scambio di energia con il reticolo è descritto considerando l'interazione con i fononi. Gli studenti possono illustrare come la struttura a bande dei solidi ne determini le differenti proprietà di conduzione elettrica. Inoltre possono descrivere come la temperatura influenza la concentrazione dei portatori di carica nei semiconduttori.

La relazione tra (a) e (b) è simile alla relazione tra termodinamica e teoria cinetica per quanto riguarda l'interpretazione della pressione di un gas, definita come grandezza macroscopica in termodinamica, ricondotta agli urti delle molecole del gas contro le pareti del contenitore. Questi modelli sono utili e significativi e nel loro insieme forniscono una descrizione completa della conduzione elettrica nei solidi. Wittmann, Steinberg & Redish (2002) sostengono che è necessario che gli studenti li conoscano e

sappiano integrarli in una visione complessiva, in accordo con l'approccio sostenuto in questa tesi.

## 2.7 Raccordo con il modello particellare

Snir, Smith & Raz (2003) sostengono che l'apprendimento del modello particellare della materia è difficile perché richiede la comprensione di due idee importanti ma controintuitive: l'idea della discontinuità della materia e l'idea del modello scientifico esplicativo. Spesso gli studenti usano i termini "atomo" e "elettrone" come semplici nomi privi di referente concettuale, senza riconoscerli come elementi di un modello che può essere usato per spiegare i comportamenti macroscopici osservati. Come esempio della tendenza a trasferire al mondo microscopico le proprietà di quello macroscopico, la differenza tra solidi e liquidi è attribuita all'esistenza di particelle differenti, piuttosto che a differenti interazioni tra le stesse particelle (Albanese e Vicentini, 1997). Gli studenti possono anche non cogliere che le particelle fondamentali di una sostanza sono identiche e restano immutate nel corso di processi come un cambiamento di stato. La nozione di particelle in continuo movimento appare difficile per gli studenti (García Franco & Taber, 2009). Queste particelle (elettroni, ioni, atomi, ecc.) hanno proprietà molto diverse da quelle dell'esperienza quotidiana. Non è inusuale per gli studenti concettualizzare le particelle come incorporate all'interno dei materiali (piuttosto che pensare i materiali costituiti dalle particelle), o assumere che l'aria scorra tra le particelle (García Franco & Taber, 2009). Nonostante l'enfasi posta sull'idea di particella nel corso di chimica, studenti delle scuole superiori non usano atomi e molecole come costrutti esplicativi delle proprietà dei materiali in termini di proprietà delle particelle componenti e delle loro interazioni. Per gli studenti spesso è sufficiente attribuire alle particelle delle proprietà macroscopiche e quindi utilizzare questa come spiegazione. Un esempio di ragionamento è: i solidi sono duri perché costituiti da particelle dure. Una particella è vista come la più piccola parte in cui un oggetto può essere suddiviso pur continuando a mantenere le sue caratteristiche macroscopiche (Snir, Smith & Raz, 2003). Di conseguenza, proprietà macroscopiche come conducibilità elettrica, malleabilità, colore, odore e reattività sono attribuite ai singoli atomi. Sono comuni anche spiegazioni in termini teleologici o antropomorfi, ad esempio, le particelle vogliono allontanarsi le une dalle altre (García Franco & Taber, 2009).

De Posada (1997) osserva che le conoscenze sulla struttura della materia dagli studenti di scuola superiore non sono sufficienti per interpretare semplici fenomeni conduttivi. Gli studenti persistono nell'utilizzare le loro concezioni spontanee come un riferimento

organico per interpretare la realtà senza superare il ragionamento locale incentrato sul comportamento del singolo atomo trattato in chimica. Mentre la conoscenza della legge di Coulomb può essere sufficiente per descrivere l'elettrone di valenza nell'atomo di rame, è necessario portare prove dell'esistenza di elettroni liberi nei metalli e caratterizzarne le proprietà fisiche e i processi di interazione con il reticolo ionico. Ad esempio, la "libertà" degli elettroni di conduzione dipende dal fatto che il campo elettrico medio in un metallo è pari a zero, a circuito aperto, quindi le particelle cariche non interagiscono in modo coulombiano (Stocklmayer 2010). Gli studenti adottano il quadro di riferimento della legge di Coulomb a loro familiare ragionando in termini di singolo atomo senza tener conto degli effetti globali di sovrapposizione dei campi di tutte le cariche presenti nel metallo. Gli studenti possono vedere la carica dell'elettrone come grandezza variabile in quanto la proprietà di caricarsi/scaricarsi dei corpi macroscopici viene estesa ad una particella come l'elettrone. Queste ed altre difficoltà connesse alla rappresentazione del mondo microscopico da parte degli studenti (Snir, Smith & Raz, 2003) possono essere affrontate anche attraverso l'uso di opportuni software didattici e simulazioni (Sins, Savelsbergh, van Joolingen & van Hout-Wolters, 2009) come è stato fatto in questa tesi.

Nonostante le molte difficoltà collegate all'utilizzo del concetto di particella, la consapevolezza delle caratteristiche specifiche dei sistemi fisici al livello microscopico aiuta gli studenti a superare le concezioni alternative (Seifert & Fischler, 2003; Hirvonen, 2007) a favore della visione scientifica in cui le proprietà macroscopiche emergono dal comportamento collettivo delle particelle costituenti (Johnson, 1998). Tutte queste indicazioni hanno influenzato la progettazione del percorso descritto in questa tesi.

### **3. Risultati di ricerca**

La crescita degli studi su ragionamenti/concezioni degli studenti ha caratterizzato la ricerca in didattica della fisica degli ultimi tre decenni. La maggior parte dei lavori prodotti è orientata da una visione costruttivista dell'apprendimento all'interno della quale appare fondamentale la necessità di capire la natura delle idee e dei ragionamenti di fisica negli studenti di differenti età, sia prima che dopo l'istruzione, e di utilizzare la conoscenza acquisita nella progettazione didattica.

#### **3.1 Scuola primaria**

Azaiza, Bar & Galili (2006), Jabot & Henry (2004), Cheng & Kwen (1998), Shipstone (1984) hanno indagato i modelli spontanei dei bambini sotto i seguenti aspetti: (1) riconoscimento della bipolarità degli elementi del circuito; (2) riconoscimento della

necessità della chiusura del circuito se una corrente deve passare in esso; (3) conservazione della corrente; (4) effetti della resistenza elettrica sulla corrente. La concezione della tensione elettrica negli studenti di scuola primaria è l'oggetto dello studio di Psillos, Koumaras & Tiberghien (1988).

I risultati di questi ed altri studi sono stati sintetizzati da Duit & von Rhöneck (1998) nel ritenere essenziale in un approccio introduttivo ai circuiti elettrici porre attenzione ai seguenti elementi: a) differenziare i concetti di corrente, tensione, energia; b) superare il ragionamento locale e sequenziale che domina le opinioni degli studenti proponendo una visione sistemica del circuito in cui ogni volta che c'è un cambiamento di qualche tipo in un punto del circuito possono contemporaneamente verificarsi cambiamenti anche in altri punti.

### 3.2 Scuola secondaria

Gutwill, Frederiksen & White (1999), Thacker, Ganiel & Boys (1999), Gutwill Frederiksen & Ranney (1996), Eylon & Ganiel (1990) analizzano i ragionamenti degli studenti sui fenomeni transitori nei circuiti alimentati in c.c. sostenendo la necessità di integrare coerentemente diversi modelli della conduzione a livello macro/micro. De Posada (1997) focalizza sulle idee e i ragionamenti degli studenti sulla conduzione elettrica nei metalli. Lo studio rivela che le conoscenze curricolari di chimica non sono sufficienti per interpretare semplici fenomeni elettrici in quanto gli studenti usano i termini atomo, molecola, ione, senza consapevolezza del loro senso fisico. L'autore suggerisce che l'insegnamento della conduzione elettrica va coordinato con quello del legame metallico e dell'elettrochimica in modo da esplicitare il ruolo degli elettroni nella conduzione nei metalli attraverso la correlazione di modelli microscopici e macroscopici.

### 3.3 Università

McDermott & Shaffer (1992) nel loro ampio studio rilevano le difficoltà di apprendimento degli studenti sui circuiti elettrici alimentati in c.c. dal punto di vista funzionale in termini delle grandezze corrente e tensione:

- a) di natura generale (utilizzo algebrico formale delle grandezze fisiche nelle formule, mancanza del significato fisico dei concetti quali corrente, resistenza, ecc., mancanza di esperienza concreta sui circuiti, difficoltà di considerare la necessità della chiusura del circuito)
- b) di natura specifica sulla corrente elettrica (ragionamento sequenziale, credenza che la corrente sia consumata, credenza che la batteria sia sorgente di corrente costante)

- c) di natura specifica sulla tensione elettrica (difficoltà di riconoscere che una batteria ideale mantiene una d.d.p. costante tra i suoi terminali, difficoltà a riconoscere la topologia dei collegamenti, difficoltà di distinguere tra potenziale e tensione)
- d) di natura specifica sulla resistenza elettrica (difficoltà di distinguere le connessioni in serie e parallelo, difficoltà di riconoscere il concetto di resistenza equivalente)
- e) legate alla misura delle grandezze fisiche (difficoltà a riconoscere che lo schema del circuito ne rappresenta la topologia e non relazioni spaziali o fisiche, difficoltà di riconoscere gli strumenti di misura come elementi circuitali e le differenti modalità di inserimento nel circuito)
- f) legate ai ragionamenti qualitativi sul comportamento dei circuiti (difficoltà di adottare il punto di vista sistemico al posto del ragionamento locale e sequenziale, difficoltà nell'applicare le leggi di Ohm)

Nella stessa prospettiva Periago & Bohigas (2005) focalizzano sulla legge di Ohm trovando che nelle concezioni degli studenti la differenza di potenziale è una conseguenza del flusso di corrente, non la sua causa.

La mancanza del raccordo concettuale tra elettrostatica e elettrodinamica è ipotizzato da Guisasola, Zubimendi, Almodí & Ceberio (2005) come causa delle difficoltà degli studenti nell'interpretare i processi di carica dei corpi. Altri autori come Bonura, Fazio, Guastella & Sperandeo-Mineo (2009), Wittmann, Steinberg & Redish (2002), focalizzano sulla prospettiva microscopica affrontando la caratterizzazione del modello in termini di componenti (elettroni, ioni, atomi, ...), delle loro proprietà fisiche, delle modalità di interazione e dell'evoluzione con la temperatura. La giustificazione della presenza di un campo elettrico in un conduttore percorso da corrente è affrontata da Stocklmayer & Treagust (1996) e le relazioni tra esso, le cariche di superficie e la tensione applicata al conduttore da Hirvonen (2007).

#### ***4. Proposte didattiche***

La ricerca didattica ha analizzato i nodi concettuali da affrontare e le difficoltà didattiche da superare, individuando strategie che, pur differenziandosi per modalità di approccio, impostazione e contenuti trattati, delineano possibili percorsi per introdurre nella scuola aspetti significativi della conduzione elettrica. Le proposte didattiche sulla conduzione elettrica di seguito riportate sono state selezionate come esempi dei principali approcci presenti in letteratura.

#### **4.1 L'integrazione degli aspetti macro/micro dei circuiti (Licht, 1991)**

La proposta deriva da una posizione critica dell'autore rispetto alle strategie di insegnamento tradizionale dei circuiti elettrici e intende adattare il contenuto fisico alle idee intuitive degli studenti seguendo cinque fasi: 1) introduzione fenomenologica, 2) trattazione qualitativa macroscopica, 3) trattazione qualitativa microscopica; 4) trattazione quantitativa macroscopica, 5) trattazione quantitativa microscopica (compreso il concetto di campo elettrico).

Nella prima fase gli studenti esplorano il comportamento di semplici circuiti in termini di grandezze osservabili direttamente, quali l'intensità luminosa delle lampadine. Gli studenti scoprono regolarità nei fenomeni elettrici, variando il numero e la posizione degli elementi del circuito. Gli studenti formulano argomentazioni in termini di luminosità relativa delle lampadine senza utilizzare vocaboli tecnici quali tensione o corrente.

Una volta che gli studenti hanno raggiunto una certa confidenza con la fenomenologia del circuito elettrico, riconoscendo la necessità della chiusura del circuito, la bipolarità dei diversi componenti, è possibile introdurre i concetti di corrente e tensione utili per prevedere il comportamento di circuiti complessi, in primo luogo a livello macroscopico, evitando ogni uso di termini quali elettroni, carica elettrica, ecc. Il concetto di energia appare più strettamente legato alle osservazioni fatte nella prima fase rispetto ai concetti di corrente e tensione: il circuito stesso può essere visto come un supporto per il trasferimento di energia dalla batteria alle lampadine. La necessità della chiusura del circuito può essere interpretata in termini di una corrente circolante in esso, mentre la tensione della batteria può essere legata al suo potere di fornire energia. Il flusso di corrente (bidirezionale) va distinto dal flusso di energia (monodirezionale).

Nella terza fase si introduce un modello microscopico per chiarire differenze e correlazioni tra energia, tensione e corrente elettrica. Il modello riconduce la tensione alla differente densità di elettroni, per esempio nei due terminali della batteria, mentre la corrente è vista come flusso di elettroni.

La quarta fase viene sviluppata in modo vicino alla trattazione tradizionale, basata sulle leggi di Ohm e di Kirchhoff, mentre la quinta fase collega i concetti di campo e potenziale elettrico con la fenomenologia dei circuiti. L'autore osserva che tradizionalmente i concetti di campo e potenziale elettrico sono applicati solo in situazioni elettrostatiche (sfere metalliche cariche o condensatori). Questi concetti possono essere utilizzati per portare gli studenti a una comprensione più profonda di energia, tensione e corrente elettrica.



Questo approccio rappresenta il primo tentativo di una strategia di insegnamento che colleghi gli aspetti microscopici e macroscopici dei circuiti elettrici, come auspicato da Ganiel & Eylon (1990).

#### **4.2 Il ruolo delle particelle nei circuiti (Tveita, 1997)**

L'autore condivide la convinzione che gli studenti sono portatori di una loro personale spiegazione dei fenomeni che spesso è in contrasto con la visione scientifica. Per affrontare la presenza delle concezioni alternative negli studenti, l'autore adotta una prospettiva didattica costruttivista utilizzando metodi tradizionali e non tradizionali (role play, mappa concettuale, scrittura creativa, riproposizione dei modelli appresi a scuola alle famiglie degli studenti da parte degli studenti stessi) per insegnare a livello di scuola secondaria superiore il modello cinetico della materia ed il modello dell'elettrone libero nei conduttori. L'ipotesi alla base della proposta è che i modelli utilizzati nella fisica (in specie quelli microscopici) sono troppo astratti per gli studenti e che i metodi tradizionali di insegnamento non sono sufficienti per consentire loro una comprensione profonda. Metodi didattici non tradizionali aiutano gli studenti a sviluppare strumenti concettuali utili per spiegare i fenomeni. Il role play è una strategia comune nell'educazione scientifica dei bambini nella scuola primaria e può consistere di rappresentazioni analogiche, metaforiche o di simulazioni (McSharry & Jones, 2000). L'immersione corporea, emozionale e cognitiva nel contesto di apprendimento realizzata attraverso il role play migliora la comprensione di concetti scientifici complessi e favorisce la padronanza dei contenuti da parte di studenti attivamente impegnati nella loro rappresentazione. Questi studenti mostrano inoltre una maggiore responsabilità del loro personale processo di apprendimento. Gli studenti possono assumere il ruolo di enti fisici, come particelle o campi, purché le proprietà rilevanti di questi possano essere rappresentati con elementi del role play. Ciò rende il role play particolarmente utile per esplorare il ruolo dei modelli nella scienza.

L'autore introduce il modello cinetico particellare specificando che sarà utilizzato il termine *particelle* piuttosto che molecole o atomi. L'essenza del modello può essere sintetizzata come segue: la materia è costituita da particelle che sono costantemente in movimento. Molti fenomeni quotidiani possono essere spiegati utilizzando il modello cinetico particellare:

- i solidi si espandono quando sono riscaldati (perché l'ampiezza del movimento particellare aumenta)
- la dispersione lenta di un profumo in un ambiente (perché le particelle del profumo sono rallentate dagli urti con le molecole dell'aria)

- la colorazione dell'acqua con un inchiostro (le particelle di ciascuna sostanza sono in moto e conseguentemente il colore si diffonde)
- l'acqua versata sul pavimento scompare (perché le particelle dell'acqua sfuggono dalla superficie bagnata e si mescolano con le molecole dell'aria)

Nella strategia didattica adottata dall'autore, prima di effettuare un esperimento viene richiesto agli studenti di formulare una ipotesi. Particolarmente significativo appare un esperimento in cui si scioglie dello zucchero in un bicchiere di acqua calda e in un bicchiere di acqua fredda e si chiede di interpretare la differenza tra i tempi di scioglimento. Sulla base di questa osservazione gli studenti correlano il moto delle particelle alla temperatura.

Tuttavia il modello è piuttosto astratto: le particelle di un gas non hanno volume, tuttavia sono come sfere rigide che subiscono collisioni elastiche. Per affrontare questa difficoltà si rivelano utili metodi didattici non tradizionali. In particolare, nell'apprendimento della conduzione elettrica, il role play in cui gli studenti rappresentano gli elettroni in un semplice circuito costituito da batteria, cavi e lampadina. I tavoli sono posizionati per delineare il percorso (che rappresenta un conduttore, un resistore o la batteria) in cui studenti-elettroni possono muoversi formando una catena. Gli studenti sono in piedi con il braccio teso verso la spalla del vicino e se sentono una spinta si muovono nella direzione della spinta più velocemente se la spinta è più forte. Nel cavo conduttore gli studenti si muovono liberamente; nel resistore devono strisciare una mano sul tavolo, percependo così la "resistenza"; nella batteria uno studente seduto sul tavolo spinge gli altri.

In sintesi, gli elementi della conduzione elettrica sono delineati nei seguenti punti:

- La corrente è rappresentata da quanto velocemente gli elettroni-studenti si muovono.
- Poiché ogni elettrone-studente è in contatto con il suo vicino in movimento alla stessa velocità, la corrente è la stessa in ogni parte del circuito.
- La tensione della batteria è rappresentata dalla spinta sugli studenti-elettroni quando attraversano la batteria.
- La tensione è rappresentata localmente dalla spinta tra studenti contigui.
- La resistenza è rappresentata dall'attrito tra la mano e il tavolo.

#### **4.3 Le relazioni tra variabili macroscopiche nei circuiti (Psillos, 1998)**

L'autore affronta alcuni nodi di apprendimento rilevati, quali la difficoltà di spiegare il funzionamento dei circuiti in termini di un sistema in cui il cambiamento di un elemento può influenzare tutti gli altri; la mancata differenziazione dei concetti di tensione,

corrente, energia; stabilire relazioni concettuali tra elettrostatica e elettrodinamica; collegare le grandezze macroscopiche al modello microscopico.

Lo studio sottolinea gli aspetti chiave di un approccio didattico ai concetti base della conduzione elettrica nella scuola secondaria. Come presupposto epistemologico l'autore accetta che la funzione della scienza consista nel costruire modelli del mondo reale, visti come costrutti congetturali sottoposti a prove sperimentali, nel quadro dell'epistemologia costruttivista secondo cui la teoria è fortemente legata alle osservazioni empiriche. Come assunzione metodologica, l'autore sostiene che l'insegnamento della scienza deve coinvolgere tutti gli aspetti della ricerca scientifica, sia teorici che sperimentali. Poiché i modelli scientifici sono in generali distanti da quelli intuitivi degli studenti, la comprensione di un modello scientifico può implicare un cambiamento concettuale per gli studenti.

Nell'insegnamento della scienza occorre mantenere la coerenza tra il modello e gli esperimenti: se si amplia il quadro sperimentale occorre presentare un modello più ricco.

L'obiettivo del percorso concettuale proposto dall'autore è lo sviluppo della capacità di interpretare e descrivere i fenomeni elettrostatici e il comportamento dei circuiti in termini delle grandezze fisiche tensione, corrente, resistenza, energia, carica, tempo. Gli obiettivi cognitivi includono la differenziazione dei concetti di tensione, corrente, energia; lo sviluppo e l'uso di modelli appropriati dei fenomeni elettrici; la comprensione delle relazioni tra fenomeni elettrostatici e elettrodinamici; lo sviluppo di un punto di vista sistemico del funzionamento dei circuiti elettrici. Il campione è costituito da 156 studenti di scuola superiore cui sono state poste interviste semistrutturate e questionari scritti durante e dopo il ciclo di istruzione. L'attività in classe è stata registrata. I risultati dell'analisi mostrano che al termine dell'intervento di istruzione circa due terzi degli studenti ha superato i nodi affrontati.

Il percorso si struttura in quattro fasi: 1) fenomenologia; 2) concettuale; 3) microscopica; 4) quantitativa.

Nella prima fase gli studenti familiarizzano con fenomeni elettrici in oggetti di uso comune, quali batterie e lampadine, considerati non solo in situazioni stazionarie ma anche evolutive, prendendo in considerazione, per esempio, la durata di una batteria. Agli studenti viene offerta l'opportunità di sperimentare con batterie, lampadine e materiali diversi al fine di comprendere la necessità della chiusura del circuito e per classificare i materiali come conduttori e isolanti. Differenti connessioni tra batterie e le lampadine mostrano che l'illuminazione non dipende solo dal numero di batterie e lampadine ma anche dalla topologia del circuito.

Una volta che gli studenti hanno acquisito una comprensione fenomenologica dei circuiti elettrici, si passa alla trattazione concettuale delle grandezze che descrivono il funzionamento del circuito a livello macroscopico: tensione (V), corrente (I), resistenza (R) per rendere conto della luminosità delle lampadine ed energia (E), tempo (t) per rendere conto della durata di illuminazione. Il riferimento ad entità microscopiche (elettroni) viene fatto solo in risposta alle domande degli studenti riguardo “ciò che scorre”. L'autore sottolinea che il concetto di resistenza svolge un ruolo importante nello sviluppo di un modello di flusso macroscopico per la corrente (sostenuto anche da analogie idrauliche) e fornisce un ponte verso il modello microscopico. Tuttavia gli studenti si trovano ad affrontare un compito difficile quando assegnano una resistenza alle lampadine in quanto devono attribuire due funzioni allo stesso oggetto: di utilizzatore di energia e di regolatore di corrente. La seconda fase si conclude con una serie di esperimenti che suggeriscono che il tasso di energia trasferita dipende non solo dalla quantità di corrente in un circuito ma anche dalla tensione.

Quando gli studenti hanno sviluppato il concetto di conservazione della corrente sono proposte domande riguardanti entità microscopiche. Gli studenti cercano una spiegazione fondata su un meccanismo microscopico causale della funzione di un resistore come regolatore di corrente. Una questione cruciale in questa fase è come collegare il campo elettrico studiato in elettrostatica al campo agente in situazioni elettrodinamiche. Può essere utile a tale scopo mostrare che una macchina elettrostatica può generare una corrente, o considerare le analogie tra batteria e macchina di Wimshurst. Il modello microscopico fornisce un meccanismo esplicativo causale per la corrente nel circuito basato sulle forze di attrazione e repulsione esercitate sugli elettroni liberi a causa della presenza di un surplus di carica sui terminali della batteria. Il modello fornisce una interpretazione microscopica delle variabili macroscopiche I, V, R.

Nella quarta fase gli studenti sono impegnati in attività di misura per esplorare quantitativamente diversi aspetti della relazione  $V = IR$ . Il campo sperimentale è allargato a comprendere anche la variazione della resistenza con la temperatura. Una caratteristica specifica di questa fase è il coinvolgimento degli studenti in esperimenti atti a mostrare che un cambiamento locale, come l'aumento del valore di una resistenza, implica un cambiamento globale nell'intero circuito, favorendo l'acquisizione della visione del circuito come sistema di elementi interconnessi.

#### 4.4 Le cariche di superficie nella conduzione (Chabay & Sherwood, 1999)

Evidenziando il ruolo cruciale svolto dalle cariche sulle superfici degli elementi circuitali gli autori mostrano come sia possibile una trattazione didattica a livello universitario del comportamento dei circuiti in termini di campo e di carica elettrica. Questa trattazione dei circuiti evidenzia i concetti fondamentali e consente di stabilire il collegamento concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica auspicato in letteratura (Eylon & Ganiel, 1990).

CONFRONTO	
<i>Trattazione tradizionale dei circuiti</i>	<i>Approccio di Chabay &amp; Sherwood</i>
Nessuno o scarso collegamento con l'elettrostatica	Trattazione unificata di elettrostatica e circuiti
Esclusivamente in termini di potenziale e corrente	Inizialmente in termini di carica e di campo (seguito poi da un'analisi in termini di potenziale e corrente)
Solo macroscopico	Microscopico e macroscopico
Solo lo stato stazionario	Transitorio e stazionario
Scarso senso del processo	Forte senso del processo

Questo nuovo approccio affronta esplicitamente la tendenza degli studenti ad adottare forme di ragionamento locale e sequenziale nella spiegazione del funzionamento dei circuiti. Il comportamento dinamico del circuito è analizzato in una prospettiva sistemica e viene proposto un meccanismo fondato sulla fisica per mostrare come le diverse componenti del circuito interagiscono una con l'altra. Viene esplicitato, ad esempio, il modo in cui un resistore a valle del generatore può influenzarne il funzionamento.

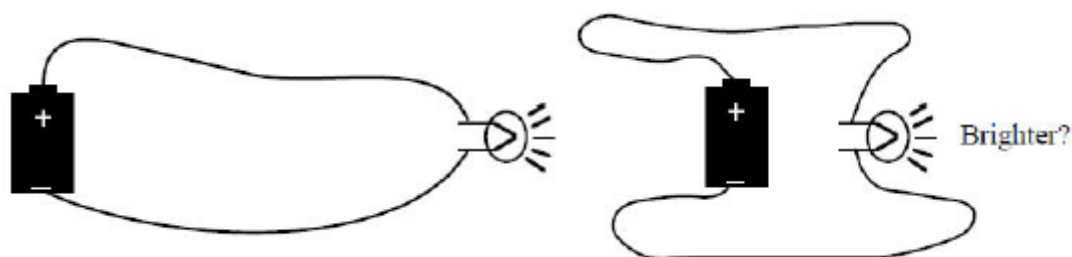
Concezioni alternative comuni degli studenti direttamente affrontate sono: la corrente viene consumata dalla lampadina; il campo elettrico all'interno di un metallo è sempre zero (anche quando il sistema non è in equilibrio statico); gli elettroni si spingono reciprocamente come le molecole di acqua in un tubo (nonostante l'interno del metallo sia elettricamente neutro); la legge di Ohm si applica a tutti gli elementi del circuito (non solo alle resistenze); la legge di Kirchhoff alle maglie è identica alla legge di Ohm (invece di essere considerato un principio molto più generale); la d.d.p. attraverso un interruttore aperto è zero perché  $V = IR$ , e  $I=0$ ; una batteria costituisce un generatore di corrente costante; la f.e.m. e la differenza di potenziale sono sinonimi.

Gli autori utilizzano un modello essenzialmente classico degli elettroni nel metallo, come è consuetudine nei corsi introduttivi. In particolare, gli elettroni nei conduttori

metallici vengono descritti secondo il modello di Drude e sono pensati come particelle puntiformi, non come gli enti delocalizzati a cui fa riferimento la descrizione quantistica dei metalli. Il modello di Drude è sufficiente per spiegare una vasta gamma di fenomeni in corrente continua come pure i circuiti RC, ma naturalmente non può essere utilizzato per spiegare vari effetti quantistici, quali la superconduttività.

E' facile comprendere la luminosità costante di una lampadina in termini di potenziale: la caduta di potenziale attraverso il filamento della lampadina è quasi uguale alla f.e.m. della batteria, e il campo elettrico all'interno del filamento è semplicemente il gradiente del potenziale. Ma gli studenti sanno che le cariche sono le uniche sorgenti di campo elettrico (in assenza di campi magnetici), ed è legittimo chiedersi dove sono le cariche responsabili del campo all'interno del filamento. Rispondere a questa domanda significa avere una visione unitaria dei fenomeni elettrostatici e dei circuiti, come auspicato in letteratura (Eylon & Ganiel, 1990).

In situazioni elettrostatiche, i campi elettrici sono generati dalle cariche, mentre nei circuiti i campi elettrici sono generati da differenze di potenziale. Questa distinzione non pare opportuna, dal momento che uno degli obiettivi principali nell'insegnamento della fisica a livello introduttivo è quello di mostrare come un piccolo numero di principi fondamentali possa spiegare una vasta gamma di fenomeni. Nella trattazione degli autori, il campo elettrico all'interno di un conduttore percorso da corrente è generato dalle cariche presenti sulla superficie del conduttore medesimo. Ciò viene motivato attraverso la presentazione di numerosi casi.



Il percorso parte da una semplice considerazione: se le cariche responsabili del campo elettrico all'interno del filamento della lampadina fossero quelle sui terminali della batteria, il filamento dovrebbe diventare più luminoso avvicinando la batteria alla lampadina!

Evidentemente le cariche della batteria non possono essere l'unica sorgente del campo elettrico all'interno del filamento. Si pone allora un problema profondo: dove sono le cariche sorgenti del campo elettrico all'interno del filamento della lampadina?

Gli autori propongono di interpretare il comportamento di un elemento circuitale sulla base della relazione tra densità di corrente e campo elettrico,  $J=\sigma E$  essendo  $\sigma$  la conducibilità del materiale. Come esempio di analisi, gli studenti considerano la scarica di un condensatore su un filo metallico di resistenza  $R$  che presenta delle curve. In un intervallo di tempo piccolo rispetto al tempo di scarica  $RC$ , la corrente è quasi stazionaria. Se il filo ha una sezione costante, allora la relazione  $J=\sigma E$  implica che il campo all'interno del filo deve essere diretto, come la corrente, lungo l'asse del filo e la sua intensità non deve dipendere dalla posizione.

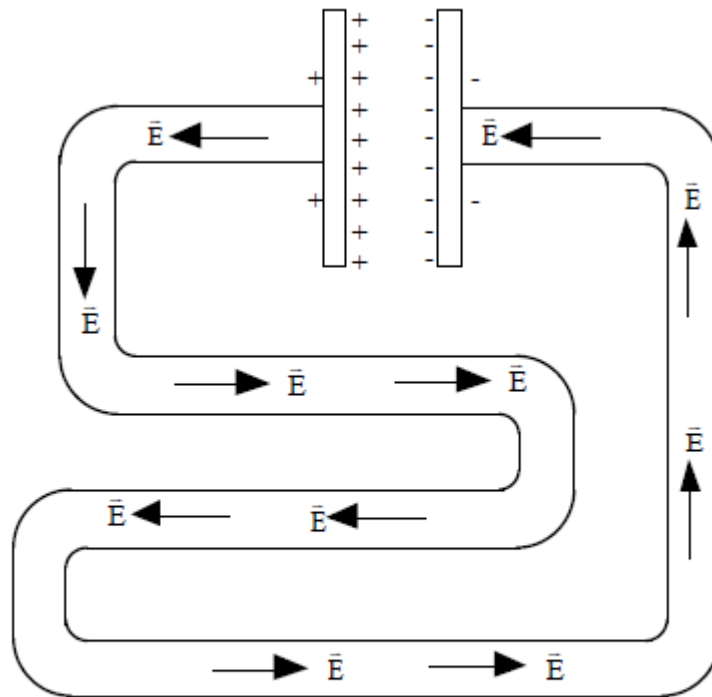


Figure 4. Discharging a large-capacity parallel-plate capacitor through a very thin resistive wire of constant cross section (not drawn to scale). In the quasi-steady state, the electric field inside the wire must be uniform in magnitude and parallel to the wire.

Gli autori considerano il contributo al campo del filo conduttore dovuto alle cariche presenti sulla superficie esterna del condensatore. Tale contributo si presenta come il campo di un dipolo elettrico e non può dar luogo ad una corrente quasi stazionaria nel filo in quanto varia con la posizione e non è sempre parallelo all'asse del filo. Di conseguenza, la carica presente sul condensatore non può essere la sorgente del campo all'interno del filo ed è quindi necessario ammettere la presenza di altre cariche sorgenti. Ma dove si trovano?

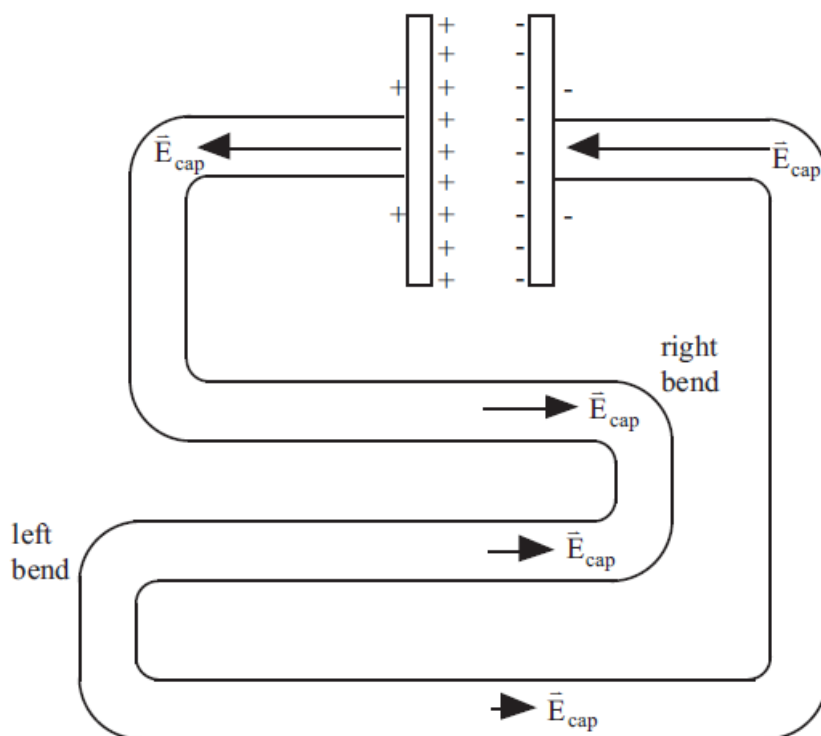


Figure 5. The electric field  $\vec{E}_{cap}$  due to the charges on the capacitor plates is not uniform in magnitude, and between the left and right bends it even points in the wrong direction for driving the current in the quasi-steady state.

Per rispondere a questa domanda gli autori propongono un esperimento mentale. Si immagini di collegare il filo al condensatore “congelando” gli elettroni liberi nel filo. Poi si rilasciano gli elettroni. Il campo di dipolo presente all’inizio tende ad accumulare gli elettroni sulla curva sinistrorsa del filo estraendoli dalla curva destrorsa. Questo processo di redistribuzione continua finché il campo delle cariche di superficie, componendosi con il campo del condensatore, dà luogo ad un campo totale uniforme nel filo in accordo con una situazione di flusso quasi stazionario di corrente.

In definitiva, questo meccanismo produrrà una distribuzione complessa di carica superficiale su tutto il filo in modo tale che il campo elettrico dovuto a tutte le cariche (carica superficiale e carica sull’esterno delle armature del condensatore) è uniforme in tutto il filo ed ha intensità in accordo con la legge della circuitazione (legge di Kirchhoff). La distribuzione di carica nella situazione di corrente quasi-stazionaria potrebbe apparire come in figura 7, anche se la sua determinazione può essere molto complicata. Tuttavia questa complessità non è essenziale. Gli autori sottolineano che il modello basato sul campo elettrico è semplice e che la carica superficiale fornisce un meccanismo per la comprensione ad un livello fondamentale del comportamento dinamico stazionario del circuito, in ciò individuando la valenza didattica del modello.



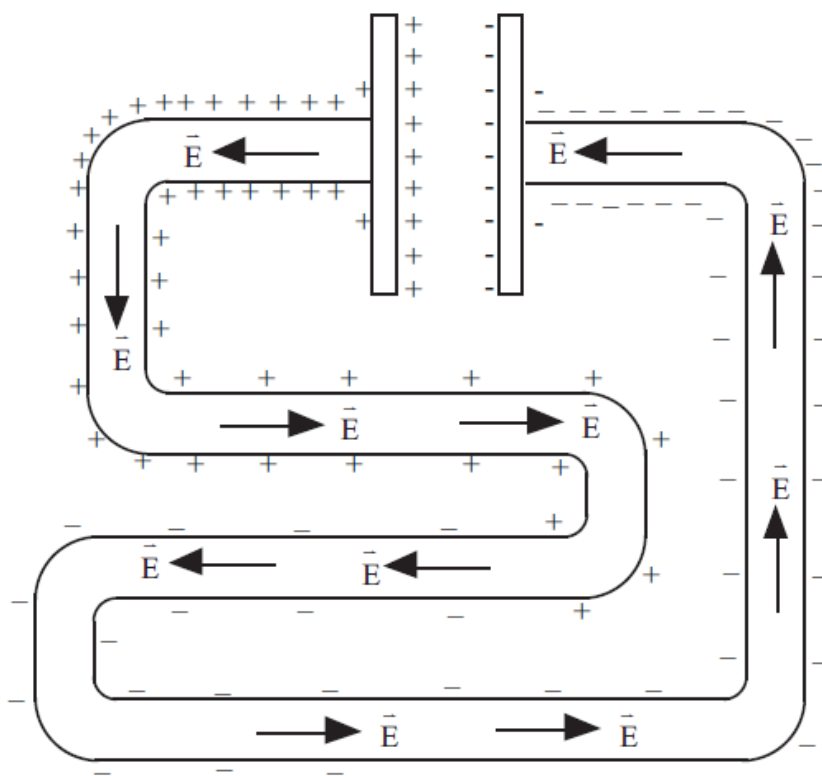


Figure 7. A possible, *very approximate* surface-charge distribution which, together with the charges on the capacitor plates, could produce the simple pattern of uniform-magnitude electric field.

Infine viene preso in considerazione il campo elettrico all'interno di un tratto di filo rettilineo. Per aiutare gli studenti a capire che una distribuzione di carica superficiale non uniforme può produrre un campo elettrico uniforme in un filo, viene considerato il campo elettrico di particolari distribuzioni di carica, gli anelli, prima di iniziare lo studio dei circuiti. Il campo sull'asse dell'anello è utilizzato per mettere in relazione la carica superficiale del filo, considerato come una sequenza di anelli di carica, e il campo elettrico all'interno del filo. Gli studenti vedono che un gradiente di carica superficiale determina il campo elettrico dentro al filo. Infatti due anelli con uguale carica (dello stesso segno) determinano un campo elettrico nullo nel punto medio, mentre due anelli con carica diversa (o segno diverso) determinano un campo elettrico non nullo nel punto medio. Nel caso di un lungo cavo coassiale rettilineo con una batteria a una estremità e cortocircuitato all'altra estremità, il campo elettrico uniforme all'interno è effettivamente prodotto da un gradiente costante della densità di carica superficiale. In altri casi la distribuzione della densità di carica superficiale può non essere determinabile con considerazioni elementari.

#### **4.5 Il raccordo elettrostatica-elettrodinamica (Borghi et al., 2007)**

Gli autori affrontano la difficoltà da parte degli studenti delle scuole superiori nel collegare i concetti di elettrostatica alla descrizione dei fenomeni che si verificano nei circuiti elettrici. Essi attribuiscono un ruolo importante al concetto di potenziale introdotto in elettrostatica che non sembra essere utilizzato operativamente dagli studenti per spiegare anche i fenomeni elettrodinamici.

Lo studio presenta una proposta per l'insegnamento di elettrostatica e circuiti in c.c. a studenti delle scuole superiori. Il campione esaminato è costituito da 30 corsisti di una scuola di specializzazione per l'insegnamento della fisica nei licei. Il percorso è basato sull'uso di modelli microscopici per il raccordo tra i fenomeni elettrostatici e la corrente continua. Secondo gli autori, una migliore comprensione della corrente può essere ottenuta centrando l'attenzione sui modelli microscopici utilizzati per interpretare i fenomeni elettrostatici, partendo dall'analisi di semplici esperimenti, alcuni dei quali legati all'idea di tensione e di capacità. Evidenziare il ruolo della tensione nel determinare il moto degli elettroni può favorire lo sviluppo di un legame tra elettrostatica e circuiti.

Sia per la progettazione degli esperimenti che per la loro interpretazione, è stata tratta ispirazione dalle opere originali di Alessandro Volta; inoltre è stato proposto un modello strutturale basato sulla particolarità del ruolo degli elettroni sia nei fenomeni elettrostatici che nei circuiti. Il percorso parte da esperimenti sulla carica di oggetti per strofinio e per induzione, e sviluppa la costruzione di modelli microscopici per interpretare le osservazioni dei fenomeni. Utilizzando tali modelli e esaminando le idee di tensione e capacità, gli studenti riconoscono che un processo di carica (o scarica) è dovuto al moto degli elettroni che, sia pure per brevi intervalli di tempo, costituiscono una corrente. Lo stesso schema interpretativo è applicato ai fenomeni transitori dei circuiti alimentati in corrente continua.

L'analisi delle interpretazioni scritte e dei disegni dei corsisti relativi ai fenomeni osservati mostra che è necessario coinvolgere gli insegnanti nel discutere i seguenti aspetti: discriminare tra osservazioni e interpretazioni; riconoscere gli elettroni come le cariche spostate da un materiale all'altro; superare l'idea che in un metallo si muovono sia le cariche positive che negative; interpretare l'attrazione tra una bacchetta carica ed una metallica neutra; riconoscere che i metalli possono essere caricati per strofinio e che il legno, seppure isolante, può interagire con un oggetto carico.

I risultati ottenuti indicano che la proposta di un modello strutturale basato sul ruolo degli elettroni sia nei fenomeni elettrostatici che nei circuiti è conveniente per:

- a) proporre esperimenti simili a quelli usati storicamente nell'elettrostatica per impegnare gli studenti nella costruzione dei concetti di base e della prima formalizzazione;
- b) utilizzare analogie con altri fenomeni già conosciuti dagli studenti che aiutano a identificare le variabili significative e la loro relazioni;
- c) incoraggiare gli studenti a sviluppare un modello interpretativo microscopico coerente;
- d) utilizzare il modello microscopico per raccordare concettualmente elettrostatica e correnti, concentrando l'attenzione sul movimento degli elettroni nei fenomeni transitori sia in elettrostatica che nei circuiti alimentati in c.c.;
- e) considerare i fenomeni elettrostatici dal punto di vista energetico.

#### ***4.6 Il campo elettrico nel funzionamento dei circuiti (Stocklmayer, 2010)***

Nella letteratura sono state ampiamente trattate le difficoltà di apprendimento della corrente continua. Molte di queste difficoltà sono riconducibili al contesto del modello tradizionale della corrente come flusso di elettroni. In questo studio è descritto un approccio alternativo basato sul campo elettrico rivolto a studenti di scuola superiore. I risultati preliminari indicano che questo approccio può produrre risultati migliori nell'apprendimento dell'elettrodinamica in studenti di scuola superiore, rispetto all'uso del modello macroscopico che utilizza le leggi di Ohm e di Kirchhoff per le grandezze tensione e corrente.

E' stato introdotto negli USA un corso innovativo a livello universitario sull'argomento della conduzione elettrica, basato sul campo (Chabay & Sherwood, 2007). L'autrice esplora il modo di estendere il modello basato sul campo a livelli di età più bassi, sostenendone l'uso a partire dalla scuola primaria in quanto consente di affrontare le molte concezioni alternative sui circuiti elettrici illustrate dalla letteratura.

L'autrice sottolinea che nell'insegnamento della conduzione elettrica agli studenti viene richiesto di capire gli aspetti elementari dei circuiti, i collegamenti in serie e parallelo, le leggi di Ohm. In termini generali, il punto di vista scientifico presentato agli studenti nella scuola superiore è quello degli elettroni che rispondono alla differenza di potenziale applicata ai capi del filo conduttore muovendosi in esso. Questo modello richiede come prerequisito che gli studenti abbiano qualche conoscenza della struttura particellare della materia.

L'autrice esprime una posizione critica riguardo ad un aspetto del modello del flusso di elettroni: non è chiaro l'agente fisico che causa il moto ordinato degli elettroni. Uno studente può immaginare che un elettrone respinga un altro elettrone con la forza di

Coulomb e che ciò produca il flusso della corrente (modello a spinta). Ma nel conduttore non è presente un eccesso di carica libera, esso è elettricamente neutro, e quindi il campo elettrico al suo interno in media è zero. Il risultato è che gli elettroni di conduzione si comportano come un gas di particelle non interagenti tra loro. Questa è una delle ragioni per cui l'analogia tra la corrente elettrica e il flusso di un liquido può essere fuorviante. E' la differenza di potenziale prodotta dalla batteria che causa il movimento di deriva degli elettroni di conduzione, nel senso che la corrente è l'esito dell'azione del campo elettrico sui portatori di carica liberi. Mettere in moto gli elettroni richiede energia, che viene fornita dal campo creato dal generatore; in questo senso la tensione della batteria governa i trasferimenti di energia nel circuito.

Quando si chiude il circuito, il campo elettrico si propaga in esso ad una velocità paragonabile alla velocità della luce. Il riferimento al campo elettrico può essere per gli studenti una risorsa per superare il ragionamento locale a favore di una visione del circuito come un sistema di elementi interagenti. Si possono istituire analogie con il campo gravitazionale, magnetico ed elettrostatico.

Dopo aver introdotto il concetto di campo elettrico lo si utilizza per spiegare il funzionamento dei circuiti. Il concetto principale in questa fase è che la batteria produce una tensione che governa il campo in tutto il circuito. Il concetto di corrente è secondario rispetto a quello di tensione e a quello di trasferimento dell'energia. L'idea che i fili conduttori siano semplicemente una guida per propagare il campo fino al carico resistivo, in ordine ad ottenere un effetto utile, viene stabilita con cura. La corrente è semplicemente una conseguenza dell'azione del gradiente di potenziale sui portatori di carica liberi.

Il campione considerato comprende 25 studentesse (14 anni) con nessuna o scarsa conoscenza dell'elettricità per un periodo di 5 settimane; 18 studenti di una classe mista secondaria superiore (16 anni) per un periodo di 3½ settimane; 20 studenti di un corso preuniversitario di fisica per un periodo di 4 settimane.

I risultati indicano che gli studenti riescono a spiegare i fenomeni osservati nei circuiti utilizzando il linguaggio del campo per integrare il livello microscopico e macroscopico. Il modello basato sul campo realizza il collegamento concettuale tra elettrostatica e elettrodinamica auspicato in letteratura (Eylon & Ganiel, 1990). Per utilizzare questo modello è necessario superare la pratica didattica tradizionale attraverso lo sviluppo di competenze negli insegnanti e di materiale didattico.

### **3. Confronto critico di proposte didattiche**

Mulhall, McKittrick & Gunstone (2001) hanno efficacemente sintetizzato il dibattito sulle proposte di insegnamento/apprendimento della conduzione elettrica evidenziando differenze significative tra le posizioni sostenute dai ricercatori. Ad esempio, McDermott (McDermott & Shaffer, 1992) sostiene che la corrente e non la tensione è l'adeguato punto di partenza per lo studio sistematico dell'elettricità a livello di scuola superiore/università, mentre Psillos (Psillos, Koumaras, Tiberghien, 1988; Psillos, 1998) ha sempre sostenuto la posizione precisamente opposta. Per quanto riguarda le analogie tra corrente elettrica e flusso di un liquido, Psillos (1998) prevede di utilizzarle nella proposta qui esaminata, mentre la maggioranza dei ricercatori le ritiene inappropriate in quanto: a) i circuiti idraulici tipicamente non sono chiusi, b) non rendono conto della variazione di corrente erogata dalla batteria al variare del circuito, c) aprire un rubinetto ha significato opposto ad aprire un circuito, d) ciò che si sposta nei conduttori dando luogo alla corrente è un componente della struttura del conduttore, non un fluido che scorre in un tubo cavo. Per questi motivi nella proposta didattica illustrata in questa tesi si evita di utilizzare l'analogia idraulica per la corrente.

C'è un'ampia convergenza dei ricercatori sulla validità didattica dell'approccio laboratoriale che utilizza fili conduttori, batterie e lampadine comunemente usato nelle presentazioni dei fenomeni elettrici nella scuola, che è stato inglobato nella proposta illustrata in questa tesi. L'approccio consente agli studenti di familiarizzare con i fenomeni elettrici (Licht, 1991; Psillos, 1998) e consente di affrontare la bipolarità di batteria e lampadina e la necessità della chiusura del circuito.

Nelle proposte didattiche considerate la comprensione concettuale della conduzione elettrica è declinata in modo differente a seconda del livello di età di chi apprende: compaiono forme differenti di concetti quali corrente, tensione, resistenza. Mentre Licht (1991) e Psillos (1998) sostengono che la comprensione del funzionamento dei circuiti in termini delle grandezze macroscopiche tensione e corrente è preliminare rispetto all'introduzione di un modello microscopico, Tveita (1997) e Stocklmayer (2010) sostengono che il modello microscopico è il punto di partenza per la comprensione della fenomenologia e che può essere introdotto a partire dai livelli iniziali di scolarizzazione (Hart, 2008). Questo approccio rende necessario affrontare: a) le conoscenze di senso comune e le concezioni alternative degli studenti sulle particelle costitutive della materia; b) la chiarificazione delle relazioni tra processi e proprietà che riguardano le particelle con grandezze fisiche quali corrente, campo elettrico, energia; c) la causa della corrente in termini di forza esercitata dal campo elettrico sui portatori di carica e non di tensione come vorrebbe Psillos.

Per quanto riguarda la f.e.m. della batteria, sia Licht (1991) che Psillos (1998) la riconducono alla differente densità di elettroni presenti sui due terminali, ma ciò può indurre confusione tra tensione e densità di carica, come evidenziato da Benseghir & Closset (1996).

La questione del trasferimento di energia dalla batteria ad altri elementi nei circuiti in corrente continua è trattata superficialmente, quando non del tutto ignorata, in molti testi introduttivi (Galili & Goihbarg, 2005). Essa viene esplicitamente affrontata in prospettiva didattica da Harbola (2010) sulla base della proposta di Chabay & Sherwood, attraverso l'introduzione del vettore di Poynting che concettualizza e quantifica il trasporto di energia da parte del campo elettromagnetico. Tuttavia ciò richiede: a) una comprensione delle proprietà delle onde elettromagnetiche basata sulle equazioni di Maxwell; b) di prendere in considerazione la presenza delle cariche di superficie. Sembra più accessibile la trattazione qualitativa concettualmente semplice basata sul modello di Drude presentata nel par. III.4 che affronta il livello microscopico dei processi nel circuito. Occorre tener presente che l'ipotesi di campo medio nullo ha come conseguenza che gli elettroni di conduzione e gli ioni reticolari possono essere modellizzati come sfere elastiche elettricamente neutre, ma che in presenza di un campo elettrico esterno gli elettroni si comportano come particelle cariche.

Infine, sembra assente in tutti i percorsi citati una riflessione della natura della carica elettrica come proprietà delle particelle, che tuttavia nei modelli microscopici basati sul campo assume un ruolo centrale in quanto determina la risposta dei portatori di carica al campo applicato e sembra essere un aspetto rilevante della integrazione concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica che le proposte illustrate prendono in considerazione.

## **6. Fondazione della ricerca**

L'analisi della letteratura di ricerca didattica svolta nei paragrafi precedenti ha messo in luce le principali idee alla base delle proposte di insegnamento/apprendimento sulla conduzione elettrica. Tra queste sono state scelte le seguenti, come basi delle sperimentazioni descritte nei successivi capitoli (da VI a IX) della tesi:

- 1) integrazione coerente tra visione macroscopica della conduzione basata sulle grandezze tensione/corrente e la visione basata sul modello microscopico
- 2) tensione come energia fornita dalla batteria per unità di carica: ciò rende superfluo il concetto di potenziale
- 3) presenza di particelle cariche relativamente libere nei metalli
- 4) corrente come flusso ordinato di particelle cariche descritto dalla velocità di deriva

- 5) campo elettrico in un filo conduttore percorso da corrente in relazione alla tensione applicata al filo
- 6) campo elettrico come vettore del trasferimento di energia che giustifica la visione del circuito come sistema di elementi interagenti
- 7) interpretazione microscopica delle leggi di Ohm in termini di relazione tra campo elettrico e velocità di deriva: quindi campo elettrico come ente responsabile del movimento degli elettroni di conduzione
- 8) interpretazione microscopica della legge di Joule in termini di processi di interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari

Le scelte enucleate costituiscono le fondamenta del quadro di riferimento per le sperimentazioni di ricerca attuate per differenti livelli scolari (cap. VI e VII). Tali sperimentazioni consentono di rilevare il ruolo delle idee spontanee, di raccogliere ed analizzare i ragionamenti degli studenti allo scopo di valutare l'efficacia didattica delle scelte individuate come fondanti. Quindi le sperimentazioni si pongono come elementi di approfondimento delle scelte adottate e di verifica di fattibilità ed efficacia didattica e trovano una sintesi organica nella proposta di percorso (cap. X). L'impostazione verticale del percorso recupera i concetti rilevanti emersi dall'analisi degli apprendimenti nelle sperimentazioni integrando gli elementi delle attività diversificate per livello scolastico sia come propedeuticità del percorso sia come elementi del percorso stesso. La sperimentazione con gli studenti eccellenti (cap. VIII) e la ricaduta dell'organizzazione concettuale verticale nel contesto della formazione insegnanti (cap. IX) forniscono ulteriori riscontri per la progettazione del percorso illustrato nel cap. X che si pone come prodotto complessivo della ricerca.

## VI. La ricerca con i bambini

1. Progettazione dell'intervento didattico
2. Contesto
3. Strategia
4. Analisi dati
5. Discussione e revisione

### **1. Progettazione dell'intervento didattico**

Lo studio sulla fondazione dei concetti scientifici nei bambini (Duschl et al., 2007) ha documentato come i bambini entrano nella scuola elementare con una ampia conoscenza del mondo naturale e mostrando capacità di impegnarsi in ragionamenti complessi. In contrasto con l'opinione comune che il pensiero dei bambini piccoli è concreto, a-causale, a-logico, a-relazionale, la ricerca ha mostrato che il loro pensiero è sorprendentemente sofisticato. Ciò costituisce una solida base per l'apprendimento di concetti scientifici, quali il ragionamento correlato al modello, l'interpretazione di esperimenti, le relazioni tra teoria ed evidenze empiriche. Tuttavia, molte idee chiave e modi di pensare tipici della scienza sono difficili se non impossibili da raggiungere senza un sostegno didattico da attuare mediante strategie che favoriscono il coinvolgimento dei bambini nell'esplorazione di idee e problemi per loro significativi. Gli adulti svolgono un ruolo centrale nel promuovere la curiosità dei bambini dirigendo la loro attenzione, strutturando le loro esperienze, sostenendo i loro tentativi di apprendimento, e regolando il livello di complessità e di difficoltà delle informazioni (Duschl et al., 2007 pag. 337). Gli insegnanti possono ricoprire questo ruolo. Troppo spesso, però, gli approcci didattici utilizzati nelle scuole di base non considerano i bambini dotati delle capacità necessarie per impegnarsi in una attività scientifica a partire dalla quale costruire una comprensione concettuale. Al contrario, i curricoli sono spesso basati su conoscenze ormai superate circa lo sviluppo cognitivo che non viene preso in considerazione nella progettazione didattica per gli studenti della scuola elementare. I bambini possono mobilitare cospicue risorse intellettuali nell'impresa dell'apprendimento scientifico. In particolare, le prime credenze epistemologiche possono servire da base per sviluppare una comprensione di come è costruita la conoscenza scientifica. Infatti i bambini sviluppano già in età prescolare la consapevolezza della presenza di altre menti nelle persone. Questa loro capacità di prendere in considerazione idee e convinzioni come concetti separati dal mondo materiale consente di impegnarsi in dibattiti sull'interpretazione delle evidenze



empiriche. Di conseguenza i bambini possono comprendere alcuni aspetti della natura della conoscenza, come il suo grado di incertezza e la relativa attendibilità delle fonti. In sintesi, i bambini possono essere impegnati con profitto in attività di istruzione che comprendono pratiche scientifiche relativamente complesse fin dall'inizio della loro scolarizzazione (Duschl et al., 2007 pag. 83). Ciò potrebbe favorire lo sviluppo di interesse e di un atteggiamento positivo nei confronti della scienza, contribuendo a prevenire la disaffezione che si riscontra negli adolescenti (Rocard et al., 2007). Per tutti questi motivi, conviene introdurre molto presto l'educazione scientifica, già a partire dalla scuola dell'infanzia e primaria, come parte integrante, non marginale della formazione di base, insieme alle prime esperienze di osservazione e rappresentazione del mondo circostante. Per attivare il processo di apprendimento è necessario un approccio didattico basato sugli angoli spontanei di attacco allo specifico contenuto (Michelini, 2007). Appare quindi importante esplorare le idee spontanee e le rappresentazioni con cui i bambini interpretano a livello microscopico le proprietà elettriche dei materiali a partire dalle osservazioni, il che rappresenta uno scopo della ricerca illustrata in questa tesi. Nel caso specifico, l'intervento didattico realizzato si propone come esplorazione preliminare per rispondere alle seguenti domande:

RQ1. Con quali idee/rappresentazioni spontanee la fenomenologia osservata viene correlata ai processi microscopici?

RQ2. Quali modelli microscopici emergono nei ragionamenti sulla conduzione elettrica?

RQ3. Come questi modelli vengono riutilizzati per interpretare nuove situazioni?

## **2. Contesto**

L'intervento didattico è stato realizzato durante l'aprile 2011 nel contesto di apprendimento informale della mostra interattiva Giochi, Esperimenti, Idee (GEI). Realizzata ad Udine dall'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica ed esposta con cadenza annuale fin dal 1994, si è affermata sia come ambiente efficace per incoraggiare l'esplorazione qualitativa e quantitativa dei fenomeni fisici nelle aree della meccanica, termodinamica, elettricità, magnetismo da parte di studenti da 6 a 15 anni, sia come un potente strumento di ricerca volto a indagare i ragionamenti spontanei e i modelli mentali utilizzati da bambini e ragazzi per interpretare la fenomenologia osservata.

I Laboratori Cognitivi di Esplorazione Operativa (CLOE, Michelini, 2005) sono contesti di apprendimento basati sull'indagine attiva dello studente, realizzati nell'ambito della mostra GEI. La metodologia utilizzata prevede che i bambini, esplorando in prima

persona i fenomeni fisici, costruiscano gli elementi necessari per l'acquisizione e la produzione di nuova conoscenza attraverso il loro coinvolgimento diretto sia in termini operativi che in termini di discussione ed apprendimento. All'interno dei laboratori CLOE la produzione di ipotesi del soggetto che apprende si articola in passi concettuali elementari partendo dal bisogno di interpretare una specifica situazione fenomenologica. Il materiale della mostra, che gli studenti possono utilizzare, comprende circuiti realizzati a basso costo, con elementi di facile reperibilità, al fine di promuovere la riproducibilità dell'attività anche nelle classi. Il laboratorio è stato condotto con 46 studenti che hanno anche visitato la mostra GEI 2011 (11 bambini di una classe quinta elementare e 35 ragazzi di due classi terza media, che hanno operato in sessioni comprendenti ragazzi dello stesso livello scolare).

### 3. *Strategia*

Il laboratorio CLOE qui illustrato è un'attività condotta dal ricercatore sulla tematica della conduzione elettrica nei metalli seguendo un protocollo di intervista semi-strutturata attraverso cui vengono monitorati i ragionamenti elaborati dai ragazzi sulla base degli stimoli offerti (Fera & Michelini, 2012).

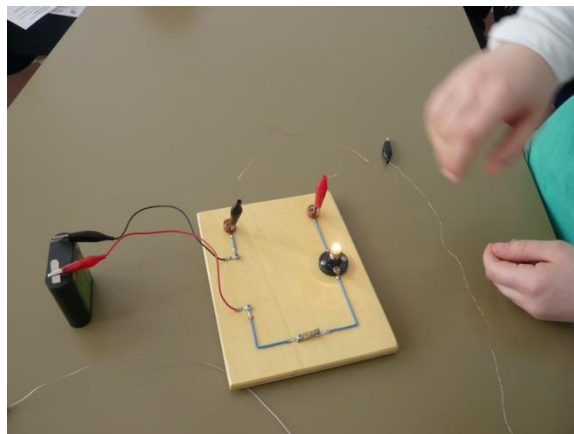


Figura 1 - circuito utilizzato nella fase 1

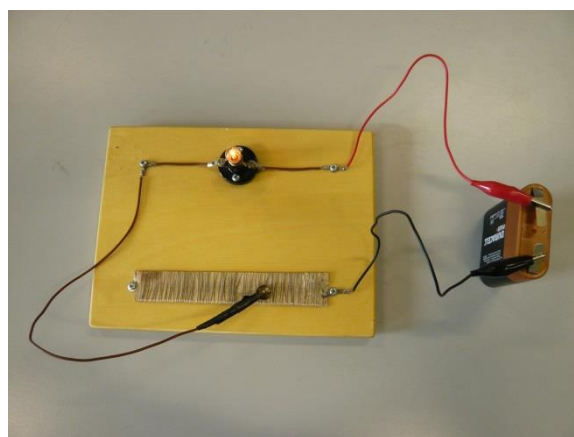


Figura 2 - circuito con una resistenza variabile

L'intervento didattico (1 ora per classe) è stato suddiviso in due fasi: nella prima fase viene richiesto di chiudere un circuito costituito da una batteria, dei cavi elettrici ed una lampadina con dei fili metallici: due con uguale lunghezza e sezione ma di materiale differente (rame e costantana); tre dello stesso materiale (costantana) con uguale sezione ma differente lunghezza e due dello stesso materiale (costantana) con uguale lunghezza ma differente sezione (fig.1). Tale fase è progettata per consentire di esplorare il ruolo dei differenti fili nel circuito e di immaginare un modello microscopico che renda conto della corrispondente variazione di luminosità della lampadina, mentre la seconda fase riguarda il riutilizzo del modello microscopico per interpretare le nuove situazioni proposte: un circuito con una resistenza variabile (fig. 2), un circuito con tre lampadine in parallelo ed un circuito con tre lampadine in serie, alimentate dalla stessa batteria utilizzata nella fase precedente.

La formulazione delle domande è stata progettata secondo la strategia del ciclo Predict, Observe, Explain (cap. II). Per esplorare le rappresentazioni dell'interno del filo sono state fornite ai bambini dei fogli su cui vi era lo spazio per disegnare, con il seguente invito: *Immagina di diventare piccolo piccolo da poter entrare nel filo e vedere cosa succede all'interno del filo. Prova a pensare com'è il filo intorno a te. Disegna come ti rappresenti l'interno del filo.*

I bambini vengono intervistati a piccoli gruppi nel contesto operativo in cui lavorano in autonomia. Per semplicità la costantana è stata chiamata ferro.

Di seguito sono riportate le domande dell'intervista condotta dal ricercatore e audioregistrata.

D1. Qual è il compito della batteria?

D2. Qual è il compito dei fili?

D3. Qual è il compito dell'interruttore?

D4. Si accende la lampadina chiudendo il circuito con un filo. Cosa immagini sia diverso dentro al filo quando la lampadina è accesa?

D5. Si usano un filo di rame ed uno di ferro di uguale lunghezza e sezione per chiudere il circuito. Come mai cambiando il materiale del filo cambia la luminosità della lampadina?

D6. Si usano un bastoncino di plastica o di rame o di alluminio, una matita in legno, la mina di grafite della matita per chiudere il circuito. Come mai la luminosità della lampadina è diversa?

D7. Si usano fili di ferro con diversa lunghezza e uguale sezione per chiudere il circuito.

D7a. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina? Motiva la tua previsione.

D7b. Proviamo. Cosa si osserva? Come mai aumentando la lunghezza del filo diminuisce la luminosità della lampadina?

D8. Si usano fili di ferro con diversa sezione e uguale lunghezza per chiudere il circuito.

D8a. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina? Motiva la tua previsione.

D8b. Proviamo. Cosa si osserva? Come mai aumentando la sezione del filo aumenta la luminosità della lampadina?

Nella seconda fase sono presentate tre nuove situazioni e le relative domande sono:

D9. Si usa un circuito con una resistenza variabile. Come mai la luminosità della lampadina varia muovendo il cursore?

D10. Si usa un circuito con tre lampadine in parallelo.

D10a. Come ti aspetti che sarà la luminosità delle lampadine in parallelo?

D10b. Proviamo. Come mai le lampadine in parallelo hanno la stessa luminosità?

D10c. Come ti aspetti che cambi la luminosità delle lampadine in parallelo svitandone una?

D10d. Proviamo. Come mai le altre lampadine mantengono la stessa luminosità?

D11. Si usa un circuito con tre lampadine in serie.

D11a. Come ti aspetti che sarà la luminosità delle lampadine in serie?

D11b. Proviamo. Come mai la luminosità delle lampadine in serie è uguale tra loro?

D11c. Come mai la luminosità delle lampadine in serie è minore di quella della lampadina nel circuito semplice?

D11d. Come ti aspetti che cambi la luminosità delle lampadine in serie svitandone una?

D11e. Proviamo. Come mai le altre lampadine si spengono?

Le domande D1, D2, D3 sono proposte per esplorare le idee sul ruolo dei diversi componenti del circuito; D4, D5, D6 per rilevare i modelli microscopici utilizzati per spiegare la variazione di luminosità della lampadina al variare del materiale del conduttore; D7, D8 per individuare le spiegazioni del cambiamento di luminosità della lampadina al variare del parametro geometrico del filo; D9, D10, D11 per rilevare il riutilizzo dei modelli nell'interpretazione di nuove situazioni.

#### **4. Analisi dati**

L'analisi dei dati raccolti in forma scritta e audioregistrata è stata effettuata qualitativamente (cap. II) classificando in categorie le risposte orali e i disegni dei singoli studenti riportati in appendice (cap. XIII).

Tabella 1 - Categorie utilizzate dai bambini

categoria	esempio	utilizzo
Numerosità particelle	“Il rame ha più particelle che trasmettono l’energia”	3/11
Velocità particelle	“Ci sono particelle molto piccole e velocissime”	3/11
Compattezza materiale	“Il ferro è più compatto e trasmette meno”	2/11
N. R.	-	3/11

Tabella 2 - Categorie utilizzate dai ragazzi

categoria	esempio	utilizzo
Capacità del materiale di trasmettere particelle	“atomi più larghi/più stretti”, “più/meno atomi”, “atomi più lontani/più vicini”	15/35
Numerosità particelle	“passano più/meno elettroni”, “nel rame ci sono più elettroni e meno atomi”	9/35
Libertà particelle	“elettroni liberi/pressati”	8/35
Mobilità particelle	“elettroni mobili/fermi”	3/35





Sia i bambini (età=10) che i ragazzi (età=13), provando ad accendere la lampadina, si rendono conto della necessità di realizzare un circuito chiuso (Shipstone, 1984, 1988). La batteria è considerata da tutti i bambini come fonte di energia mentre i ragazzi la vedono come generatrice di corrente (9/35) o addirittura di elettroni (5/35) in accordo con quanto rilevato in letteratura (Psillos, 1998; Wittmann et al., 2002). Il compito dei fili di trasferire qualcosa è chiaro a tutti anche se è diverso ciò che si immagina sia trasferito, energia e/o particelle. Anche il compito dell’interruttore è chiaro a tutti, far passare o interrompere ciò che sta fluendo nei fili. Due bambini dicono che i terminali del circuito sono calamite che “ricevono l’energia” associando il fenomeno elettrico con quello magnetico come documentato in letteratura (Azaiza et al., 2006).

Chiudendo il circuito con un filo di rame o uno di ferro di uguale lunghezza e sezione (domanda D5) i bambini hanno utilizzato le categorie di carattere microscopico rappresentate in tab. 1 mentre i ragazzi utilizzano le loro conoscenze scolastiche sulla struttura particellare della materia organizzandole come descritto in tab. 2.

La maggioranza dei bambini (8/11) formula ragionamenti che correlano la differenza di luminosità della lampadina alla numerosità e alla velocità di enti discreti che

trasmettono energia nel materiale oppure alla compattezza del materiale. I bambini fanno emergere una duplice prospettiva interpretativa: particellare e strutturale (compattezza). La prima viene utilizzata per descrivere i processi anche in termini di energia, mentre la seconda resta poco definita.

Tabella 3 - Categorie utilizzate nei disegni dei bambini

categoria	esempio	utilizzo
Fasci di linee sinusoidali o a zigzag		4/11
Cerchietti, crocette o trattini		3/11
Fasci di linee parallele all'asse del filo		2/11
Combinazione		1/11
N. R.	-	1/11

Nei disegni (tab. 3) i bambini rappresentano elementi astratti usando spontaneamente simboli ai quali attribuiscono specifici significati associati alla loro idea di conduzione; ad esempio, la rarefazione dei simboli corrisponde alla situazione in cui la luminosità della lampadina è minore. In particolare, al crescere della lunghezza oppure al diminuire della sezione del filo, la differente luminosità della lampadina è correlata: nei bambini, alla dispersione dell'energia delle particelle e/o ad analogie con il traffico in cui il filo è visto come una strada e le particelle come auto; nei ragazzi, alla struttura microscopica del filo che ostacola il passaggio delle particelle, oppure alla dispersione delle particelle (“Se il circuito si allunga le particelle devono fare più strada e quindi si disperdono”).

L'immagine dell'interno del filo per i bambini si articola in due punti di vista: a) entità discrete, b) idea della propagazione. In quest'ultimo caso i bambini associano scariche elettriche e piccoli fulmini all'idea dell'energia trasmessa con disegni che ricordano l'elettrizzazione rappresentata nei cartoni animati. L'energia all'interno dei fili conduttori è immaginata come un insieme di particelle microscopiche “che vanno velocissime” nelle parole dei bambini.

Anche nella maggioranza delle risposte dei ragazzi vi è una visione microscopica di particelle, che chiamano elettroni, in moto tra gli atomi del filo, considerati come

ostacoli. La possibilità di inserire nel circuito oggetti diversi (domanda D6) produce nelle risposte dei ragazzi la formulazione di ben cinque ipotesi sulla dipendenza della luminosità della lampadina da: a) la capacità del materiale di facilitare la trasmissione degli elettroni, b) la numerosità degli elettroni, c) la libertà degli elettroni, d) la mobilità degli elettroni, e) l'ordine degli atomi e la relativa difficoltà degli elettroni ad attraversare il materiale (prima idea di resistività).

Tutti i bambini motivano la maggiore luminosità della lampadina col filo corto (domanda D7) attribuendo ad esso una minore dispersione di energia. I ragazzi riutilizzano il modello degli atomi come ostacoli per spiegare perché la lampadina diminuisce di luminosità aumentando la lunghezza del filo.

Quando i bambini chiudono il circuito con fili di diversa sezione (domanda D8) motivano la diversa luminosità della lampadina usando un'analogia tra il movimento di particelle microscopiche e il traffico.

Nella seconda fase del laboratorio gli studenti usano tre nuovi circuiti, uno con una resistenza variabile, un altro con tre lampadine in parallelo e infine uno con tre lampadine in serie. Per spiegare perché la luminosità della lampadina varia muovendo il cursore, i bambini riutilizzano l'idea di dispersione dell'energia correlando la luminosità della lampadina alla vicinanza della batteria ("l'energia deve fare un percorso più breve"; la fonte di energia è più vicina") mentre i ragazzi riutilizzano il modello relativo alla dispersione delle particelle. Questa visione del circuito come sistema sorgente-consumatore senza conservazione viene riutilizzata dalla maggioranza dei bambini e dei ragazzi anche per prevedere il comportamento del circuito in parallelo ("La più vicina alla batteria sarà più luminosa"). Pochi ragazzi richiamano il concetto scolastico di invarianza della tensione elettrica ai capi di utilizzatori in parallelo. L'osservazione della luminosità delle lampadine nel circuito in serie è in contrasto con le previsioni secondo cui "le lampadine più vicine assorbono più energia" e di conseguenza nessun bambino fornisce spiegazioni. Osservando la stessa luminosità delle lampadine nel circuito in serie sia i bambini che i ragazzi riconoscono che la corrente non è consumata; osservando la luminosità delle lampadine nel circuito in parallelo (differente da quello in serie) riconoscono che la corrente erogata dalla batteria dipende dal circuito cui è collegata; svitando una lampadina riconoscono che il cambiamento di un elemento del circuito influenza tutto il circuito.

### **5. Discussione e revisione**

Sulla base dei dati raccolti in forma scritta ed audioregistrata nel corso dell'attività si formulano le risposte alle domande di ricerca:

- RQ1) la differente luminosità della lampadina è correlata: nei bambini, al numero/velocità/densità delle particelle che ritengono presenti nei fili conduttori o alla compattezza del materiale, restando implicito il modo in cui tale condizione determina il processo osservato; nei ragazzi, al differente stato dinamico di particelle che percolano attraverso strutture ordinate.
- RQ2) i bambini non menzionano la carica elettrica ma utilizzano un concetto indefinito di energia ponendolo alla base del loro modello microscopico della conduzione elettrica nel filo, differenziandolo in tre categorie: l'energia è trasportata dal filo (2/11); le particelle trasportano l'energia (4/11); particelle di energia sono nel filo (2/11). Per i ragazzi, invece, il modello microscopico è costituito da piccoli elementi in moto tra ostacoli più o meno numerosi (20/35), più o meno vicini (8/35), più o meno grandi (7/35).
- RQ3) durante la discussione sui circuiti in serie e parallelo, il modello microscopico è riutilizzato da quasi tutti gli studenti (11/11 bambini e 31/35 ragazzi). I bambini applicano il modello della consumazione alla loro entità di riferimento: l'energia, mentre i ragazzi usano una analogia con il traffico per interpretare la diminuzione di luminosità delle lampadine in serie in confronto con quelle in parallelo poiché, con la stessa batteria, la corrente nel circuito in parallelo ha più strade disponibili che nel circuito in serie ed è, quindi, maggiore.

Il ragionamento dei bambini non è naturalmente legato al livello microscopico, ma le domande e le situazioni proposte hanno stimolato la riflessione sul livello microscopico. Complessivamente nelle risposte si nota una differenziazione concettuale in riferimento alla corrente elettrica: per i bambini è energia, mentre i ragazzi parlano di flusso di elettroni salvo un caso in cui si afferma che nei materiali isolanti come il legno gli elettroni non sono presenti. I bambini percepiscono il filo come un oggetto impenetrabile: di conseguenza usano un ente immateriale che chiamano energia come sintesi interpretativa del processo di conduzione attribuendogli la proprietà di passare intorno/dentro un filo pieno. Anche se l'energia di cui parlano rimane un'entità non definita, questo referente è applicato in modo coerente sul piano qualitativo per interpretare i fenomeni, e presenta le caratteristiche di una proprietà quasi fisica che acquista via via la natura di un quadro interpretativo di ampiezza crescente. Per raccordare questa visione a quella scientifica, nella prospettiva di un percorso verticale sulla conduzione elettrica, occorre mettere in relazione: a) ciò che si sposta nel filo con la proprietà delle particelle costitutive della materia di possedere una carica elettrica, b) l'energia con i processi di interazione tra le particelle costitutive della materia, c) il campo elettrico con l'influenza del cambiamento di un elemento su tutto il circuito.



I ragazzi usano atomi ed elettroni come referenti per costruire una rappresentazione organica della struttura interna e del processo di conduzione in termini di interazioni meccaniche tra particelle. La rappresentazione che i ragazzi forniscono per interpretare i fenomeni in termini della struttura e del ruolo di entità microscopiche è talvolta sorprendentemente vicina al punto di vista fisico, per esempio quando richiamano la relativa difficoltà degli elettroni ad attraversare il materiale si avvicinano alla descrizione della resistività in termini di sezione d'urto elettrone-ione reticolare, e realizza il collegamento tra i livelli di descrizione microscopica e macroscopica dei fenomeni considerato in questa tesi di particolare rilevanza per l'apprendimento.

I ragionamenti prodotti dagli studenti mostrano una importante caratteristica: individuano il cambiamento delle proprietà microscopiche del sistema come *causa* del cambiamento osservato a livello macroscopico. Ciò sembra indicare la presenza di spiegazioni causali nel ragionamento spontaneo spesso assunte come "meccanismo" alla base di una prima modellizzazione dei processi fisici. Dunque i modelli dei processi microscopici possono svolgere due ruoli: da un lato fornire una chiara interpretazione dei fenomeni in accordo con le idee scientifiche, dall'altro come potenziale strumento di apprendimento che i bambini esplicitano, elaborano e condividono.

Di conseguenza, l'indicazione didattica che si ricava dall'analisi dell'intervento con i bambini è di focalizzare sulle proprietà delle particelle che favoriscono una lettura parallela dei livelli macroscopici e microscopici di descrizione dei fenomeni. Negli interventi successivamente descritti in questa tesi il processo di apprendimento della conduzione elettrica sarà pianificato come attraversamento consapevole e sistematico di modelli interpretativi a differenti livelli. In tal modo l'analisi dell'intervento didattico con i bambini contribuisce alla progettazione dei successivi interventi in accordo con la natura evolutiva della *Design Based Research* (cap. II). Anche il materiale didattico ha subito una evoluzione nel corso della ricerca: il circuito della fase 1 dell'intervento è stato sostituito dall'esperimento con fili conduttori, batterie e lampadine (par. X.7) in cui al posto dei portalampade, la cui struttura interna non è accessibile, sono stati utilizzati collegamenti a baionetta oppure i fili conduttori sono stati avvolti direttamente sui terminali della batteria e sulla filettatura della lampadina. Ciò per facilitare il riconoscimento della bipolarità della lampadina e la condizione di chiusura del circuito.

## VII. La ricerca con gli studenti di scuola media e superiore

1. Progettazione dell'intervento didattico
2. Contesto
3. Strategia
4. Analisi dati
5. Discussione e revisione

### 1. Progettazione dell'intervento didattico

I fenomeni elettrici sono alla base di una vastissima gamma di applicazioni e, anche per questa ragione, la loro trattazione è inclusa nei curricula a tutti i livelli di studio per l'apprendimento degli importanti concetti coinvolti nella loro descrizione: carica, campo, potenziale, tensione, corrente, resistenza... (Euridyce, 2012). Secondo le Indicazioni Nazionali per il Liceo Scientifico (INDIRE, 2010) l'insegnamento dell'elettrodinamica nella scuola secondaria superiore italiana si sviluppa al termine del secondo biennio, mentre lo studio dei semiconduttori è rinviato al quinto anno del liceo scientifico (tab. 1). La struttura dell'atomo è argomento di chimica del primo biennio e di fisica del quinto anno.

Tabella 1 - La conduzione elettrica nella scuola italiana (INDIRE, 2010)

Primaria				Media				Secondaria			
6			10	11		13	14				18
1			5	6		8	9				13
Circuiti elettrici						Media - Secondaria					
Collegamenti in serie e parallelo, carica e scarica condensatori						Secondaria (età=17)					
Proprietà elettriche dei semiconduttori						Secondaria (età=18)					

I libri di testo adottati nelle scuole (Amaldi, 2012; Walker, 2008; Halliday, Resnick & Walker, 2009; Caforio & Ferilli, 2009) affrontano l'elettrodinamica con un approccio storico presentando nel volume dedicato all'elettromagnetismo prima il campo elettrico, poi la corrente elettrica e a seguire il campo magnetico ed infine, nel settore dedicato alla fisica moderna, poche pagine sulla teoria del trasporto elettronico nei solidi e la teoria a bande in relazione ai semiconduttori. La distinzione tra materiali conduttori ed isolanti riportata nei libri di testo non considera che le proprietà

elettriche dei corpi dipendono dalla temperatura. Il nucleo della teoria dei circuiti elettrici è costituito da una serie di leggi (Ohm, Kirchhoff, Joule) riguardanti il comportamento in corrente continua, sulla base delle quali gli studenti imparano principalmente a ragionare algebricamente, in modo da risolvere equazioni per il calcolo di tensioni, correnti o resistenze all'interno di un circuito. L'intento dichiarato (Halliday, Resnick & Walker, 2009) è spesso di mettere in grado gli studenti di usare il formalismo matematico per risolvere i problemi presenti nel testo. Caratteristica delle trattazioni riportate nei testi scolastici è di far riferimento a modelli dell'atomo o della struttura della materia che non vengono giustificati su base sperimentale, in particolare per affermare alcune proprietà della carica elettrica (Caforio & Ferilli, pag. 11; Walker, pag. 2). Questo approccio presenta alcuni aspetti problematici sotto il profilo didattico:

- a) il campo elettrico studiato in ambito elettrostatico non viene richiamato in nessun modo nella conduzione;
- b) il potenziale elettrico viene inquadrato nel modello matematico della teoria del campo conservativo, che presenta difficoltà concettuali per gli studenti (Gomez & Duran, 1998; Guisasola, 2010) e non viene correlato alla tensione della batteria;
- c) viene data per scontata la presenza degli elettroni di conduzione nei metalli, in disaccordo con il carattere congetturale e basato sulle evidenze empiriche dei modelli scientifici;
- d) il livello macroscopico di descrizione dei fenomeni è scorrelato dal livello microscopico, in particolare per quanto riguarda la carica elettrica che non è vista, in accordo con la fisica, come proprietà delle particelle.

La ricerca didattica ha evidenziato che la costruzione del legame tra i livelli macro/micro di descrizione dei processi e il raccordo concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica sono aspetti rilevanti per l'apprendimento (Ganiel & Eylon, 1990; De Posada, 1997; Wittmann et al, 2002; Hart, 2008). Il modello microscopico consente di interpretare fenomeni complessi come quelli transitori (Eylon & Ganiel, 1990) e di raccordare concettualmente elettrostatica e correnti (Borghi et al., 2007). Questi sono inoltre aspetti centrali nello sviluppo storico delle teorie fisiche dell'elettricità (cap. IV).

Gli esiti dell'intervento con i bambini (cap. VI) indicano che i modelli dei processi microscopici possono svolgere due ruoli: da un lato fornire una chiara interpretazione dei fenomeni in accordo con le idee scientifiche, dall'altro come potenziale strumento di apprendimento. In accordo con questo risultato di ricerca, l'intervento con gli studenti di scuola media e superiore è stato progettato puntando all'integrazione coerente di modelli macroscopici e microscopici. In questa ottica si è scelto di

introdurre il concetto di tensione in relazione al lavoro compiuto dal generatore senza utilizzare il concetto di potenziale. Successivamente la tensione ai capi del filo conduttore viene correlata al campo elettrico presente in esso.

Quindi l'intervento didattico propone agli studenti di:

1. fondare la presenza degli elettroni di conduzione nei metalli e la natura microscopica della corrente attraverso l'esperimento di Millikan
2. realizzare la correlazione fra la descrizione funzionale dei circuiti, in termini delle variabili macroscopiche corrente e tensione, ed i processi alla base del loro funzionamento descritti da modelli microscopici (Eylon & Ganiel, 1990)
3. chiarire l'origine fisica della legge di Ohm in termini di un meccanismo causale campo elettrico-velocità di deriva dell'elettrone (Gutwill, Frederiksen & Ranney, 1996)
4. chiarire l'origine fisica della legge di Joule in termini di interazioni elettroni-ioni reticolari
5. utilizzare il ragionamento basato sul modello che si avvicina al ragionamento scientifico (Stephens, McRobbie & Lucas, 1999)

La progettazione dell'intervento considera le seguenti domande di ricerca:

RQ1. In quale modo ciascuna attività del percorso progettato ha favorito l'integrazione dei livelli macro/micro di comprensione della conduzione elettrica?

RQ2. Quali modelli interpretativi microscopici sono usati dagli studenti e come?

## **2. Contesto**

L'intervento didattico nella scuola media della durata di 4 ore è stato realizzato nella mattina del 18 dicembre 2012 nel laboratorio di fisica presso il polo scientifico dell'Università con una classe terza media di 26 studenti (età 13 anni) il cui insegnante ha aderito al progetto PLS-IDIFO4. Gli studenti lavorano in piccoli gruppi di tre-quattro componenti, in accordo con l'impostazione dell'attività di laboratorio data dall'insegnante. La classe non aveva affrontato l'argomento della conduzione elettrica.

L'intervento didattico nella scuola superiore si è realizzato in 9 incontri di un'ora ciascuno durante l'ottobre 2012 in tre classi quinte indirizzo tradizionale del Liceo Scientifico Statale «G. B. Quadri» di Vicenza i cui insegnanti di fisica hanno aderito al progetto PLS-IDIFO4. Gli studenti coinvolti (età 18 anni) sono stati 29 (5BT), 30 (5CT) e 23 (5DT) per un totale di 82. Gli studenti lavorano individualmente, in accordo con l'impostazione dell'attività scolastica data dall'insegnante. Le classi non avevano affrontato l'argomento della conduzione elettrica che comunque fa parte del programma del corso di studi. L'insegnamento della fisica è previsto per tre ore

settimanale negli ultimi tre anni del Liceo ed è tipicamente centrato sulla deduzione dei fenomeni a partire dalle leggi fisiche con ridotte attività in laboratorio.

### 3. Strategia

I ragionamenti elaborati dai ragazzi sulla base degli stimoli offerti vengono monitorati attraverso un questionario a domande aperte che rappresenta la traccia del percorso. Le domande, unitamente al contestuale rationale, sono riportate in Appendice (cap. XIII). La formulazione delle domande è stata progettata secondo la strategia del ciclo Predict, Observe, Explain (cap. II). Nelle classi del liceo è stato somministrato un ulteriore questionario di ingresso/uscita identico all'inizio ed alla fine dell'attività. Per evitare che gli studenti preparassero le risposte, non sono stati avvertiti della somministrazione del questionario di uscita.

Tabella 2 - Rationale III media

Situazione	Attività	RQ
1. Fili conduttori, batteria, lampadina	Accendere la lampadina	a) Come viene identificata la chiusura del circuito? b) Con quali referenti concettuali viene spiegato il funzionamento del circuito?
2. Tensione variabile	Interpretare la diversa luminosità della lampadina al variare della tensione	a) Quale relazione viene individuata tra tensione e corrente?
3. Riscaldamento di un resistore ceramico	Misurare e interpretare il riscaldamento del resistore	a) Come viene correlato il riscaldamento al passaggio di corrente?
4. Sviluppo di gas in cella elettrolitica	Individuare e interpretare gli effetti chimici del passaggio di corrente	a) Come viene interpretato lo sviluppo di gas dal punto di vista microscopico?
5. Simulazione Supercomet	Descrivere stati e processi delle particelle in un metallo	a) Come viene utilizzata la simulazione per spiegare i fenomeni osservati?

Tabella 3 - Rationale V liceo scientifico

Situazione	Attività	RQ
1. Elettrizzazione	Strappare il nastro adesivo, esplorare i tipi di stato elettrizzato.	a) Come viene interpretato lo stato elettrizzato?
2. Campo elettrico	Esplorare lo spazio attorno ad un corpo elettrizzato, le interazioni tra corpi elettrizzati. Misurare il campo elettrico	a) Come viene descritta l'interazione tra corpi elettrizzati? b) E' riconosciuta la natura vettoriale del campo elettrico?
3. Carica elettrica	Esperimento di Millikan	a) Come viene interpretato l'esito dell'esperimento di Millikan?
4. Tensione e corrente	Pendolino interposto tra due elettroscopi con agente che sposta la carica	a) Il movimento del pendolino è correlato al lavoro dell'agente? b) E' correlata la tensione del generatore al lavoro per unità di carica? c) Quale visione microscopica della corrente emerge?
5. Resistenza e resistività	Stabilire le leggi di Ohm come relazioni fenomenologiche e interpretarle dal punto di vista microscopico	a) La velocità di deriva viene correlata al campo elettrico?
6. Riscaldamento di un resistore ceramico	Misurare e interpretare il riscaldamento del resistore	a) Come viene spiegato il fenomeno osservato in termini di processi microscopici?
7. Dipendenza della resistività dalla temperatura	Osservare la variazione di resistività di un conduttore immerso in azoto liquido	a) Come viene spiegato il fenomeno osservato in termini di processi microscopici?
8. Simulazione Supercomet	Descrivere stati e processi delle particelle in un metallo	a) Come viene utilizzata la simulazione per spiegare l'andamento della resistività dei

		metalli con la temperatura? b) Vengono riconosciuti i limiti della simulazione?
--	--	--

#### 4. Analisi dati

L'analisi dei dati raccolti in forma scritta è stata effettuata qualitativamente (cap. II) classificando in categorie le risposte scritte e i disegni dei singoli studenti riportati in Appendice (cap. XIII).

##### III media

L'attività inizia con la consegna di fili conduttori, batteria e lampadina, chiedendo di accendere la lampadina (D1.1). Quasi tutti gli studenti (23/26) descrivono come hanno collegato ("unito" o "attaccato", nelle loro parole) i fili ai terminali della batteria e "a due parti diverse della lampadina". Questa affermazione indica che ne hanno riconosciuto la bipolarità. Tre studenti interpretano l'illuminamento della lampadina in termini di energia che si "sposta dalla batteria alla lampadina". L'analisi dei collegamenti tra gli elementi circuitali rappresentati nei disegni degli studenti indica che: 15/26 riconoscono la bipolarità di batteria e lampadina; 10/26 non riconoscono la bipolarità della lampadina; 1/26 non riconosce la chiusura del circuito.

Per spiegare come funziona il circuito disegnato (D1.2b) la maggioranza relativa degli studenti (11/26) utilizza come referente concettuale qualcosa che chiama energia/corrente/elettricità e che non sembra avere carattere particellare. Questo *qualcosa* si trasferisce (nelle loro parole: "passa", "si sposta") tramite i fili dalla batteria alla lampadina. Quattro studenti focalizzano sulle proprietà del materiale dei fili, affermando che il circuito funziona perché il rame è buon conduttore di elettricità/energia. Due studenti ipotizzano che correnti uscenti in senso opposto dai terminali della batteria si scontrano nella lampadina.

Si pone attenzione al fatto che c'è un filamento all'interno della lampadina, per cui il circuito è chiuso anche all'interno del bulbo. Si condivide quindi che per accendere la lampadina è necessario chiudere il circuito e che quando la lampadina è accesa qualcosa passa nel circuito: la corrente elettrica.

Per variare la tensione di alimentazione si utilizza un generatore osservando il cambiamento di luminosità della lampadina ad esso collegata (D2.2). Gli studenti riconducono questo cambiamento a: tensione (11/26), energia (9/26), corrente (3/26). Si esaminano tre situazioni: lampadina poco luminosa, mediamente luminosa, lampadina molto luminosa chiedendo agli studenti di specificare cosa cambia nel circuito (D2.3). Vengono nominati come referenti del cambiamento: energia/elettricità (12/26);

tensione (7/26); corrente (4/26). Si condivide che la luminosità della lampadina indica la corrente nel circuito.

Gli studenti attivano la riflessione sul livello microscopico di descrizione dei fenomeni immaginando di entrare nel filo per disegnare ciò che vedono intorno (D2.5). I simboli utilizzati nei disegni sono linee longitudinali che rappresentano fili di rame (6/26); puntini che rappresentano elettroni (4/26); linee ondulate che rappresentano energia (4/26); cerchietti vuoti disposti con regolarità che rappresentano atomi di rame (3/26); omini che corrono nei fili (2/26). Gli studenti individuano due differenti processi nei fili: il passaggio di qualcosa (19/26) che chiamano energia/elettricità/corrente (14/26) oppure elettroni/atomi (5/26); la produzione/presenza di energia (4/26). La visione particellare è presente, seppure minoritaria.

Per esplorare gli effetti termici della corrente si sostituisce la lampadina con un altro dispositivo, un resistore ceramico che viene descritto come una lampadina che si riscalda senza far luce. Si inserisce un misuratore di corrente nel circuito e si misura l'aumento di temperatura del resistore a partire dall'istante di chiusura del circuito. Gli studenti individuano la relazione tra la temperatura e il tempo affermando che: la temperatura aumenta (13/26); il resistore si scalda (2/26). Due studenti spiegano il fenomeno osservato in termini di trasferimento di energia dalla batteria al resistore (D3.1). Per spiegare cosa produce nel tempo il passaggio di corrente nel resistore (D3.2) gli studenti utilizzano differenti descrizioni: aumento della temperatura(15/26); aumento/produzione di calore (7/26); l'energia si trasforma in calore nel resistore (2/26). Inoltre gli studenti individuano differenti processi (D3.3): produzione (7/26), accumulo (5/26), trasformazione (1/26) di energia/calore. E' presente una prima visione microscopica: "le particelle elettriche si sfregano contro le pareti e producono calore" (1/26).

Per esplorare gli effetti chimici della corrente si sostituisce il resistore con un altro dispositivo, la cella elettrolitica, costituita da una vaschetta che contiene una soluzione di bicarbonato di sodio al 10% in cui sono immersi due elettrodi metallici che possono essere collegati ad una batteria. Si dispongono due provette rovesciate colme di soluzione sopra agli elettrodi e si chiude il circuito. In relazione al fenomeno osservato emergono le seguenti descrizioni (D4.1): si formano bolle di gas (11/26); si produce gas (4/26); bolle entrano nelle provette (4/26); si formano bolle di aria (3/26), vapore acqueo (2/26); l'acqua inizia a bollire (1/26). Gli studenti affermano che viene prodotto (D4.2): gas/bolle/bolle di gas (15/26); calore (5/26); aria/bolle di aria (4/26). Nel formulare un'ipotesi sui gas sviluppati con volumi differenti nello stesso tempo (D4.3) 12/26 affermano che sono gas uguali mentre 11/26 che sono gas diversi. 2/26 dicono



che i gas sviluppati potrebbero derivare dall'acqua ed 1/26 che potrebbero derivare dal bicarbonato. Viene richiamata la formula chimica dell'acqua,  $H_2O$  per suggerire un'ipotesi sulla natura dei gas sviluppati. Collegando l'indice stechiometrico al volume di gas sviluppato, 10/26 studenti concludono che si tratta di idrogeno e ossigeno. Si condivide che quando passa la corrente si sviluppa: idrogeno gassoso sopra all'elettrodo negativo, ossigeno sopra all'elettrodo positivo. 5/26 studenti completano correttamente le reazioni chimiche di formazione dei gas riconoscendo la partecipazione degli elettroni (D4.5). Ciò è il punto di partenza del ragionamento di uno studente che afferma che "gli elettroni si trasferiscono" per interpretare la corrente. Altri studenti utilizzano visioni macroscopiche per spiegare come avviene il passaggio della corrente nel circuito (D4.6): attraverso i fili conduttori (17/26) l'energia si sposta (5/26). Questi studenti non collegano alla corrente la presenza degli elettroni nella reazione elettrolitica che poteva costituire una prova del passaggio di elettroni nei fili. Apparentemente gli studenti pensano che gli elettroni non sono forniti dai fili conduttori ma presenti nella soluzione elettrolitica, come documentato in letteratura (Ogude & Bradley, 1994).

Un modello dinamico del trasporto elettrico è fornito dalla simulazione Supercomet. La simulazione mostra che in un conduttore metallico esiste un reticolo di ioni positivi che oscillano intorno a posizioni di equilibrio e particelle cariche (elettroni) in moto tra essi. Quando la tensione è zero il moto degli elettroni è disordinato e la corrente è zero. Quando si applica una tensione, il moto degli elettroni è ordinato e la corrente è diversa da zero. Gli studenti individuano gli urti (che chiamano anche "scontri") come aspetto centrale del modello, e su esso basano le loro spiegazioni per quanto riguarda il riscaldamento del resistore (D5.1) affermando che: gli urti fanno innalzare la temperatura/producono calore (14/26); gli atomi "si scontrano" più frequentemente e quindi l'energia aumenta (3/26). Più difficile appare la spiegazione della luce emessa dalla lampadina (D5.2): solo 8 studenti riconducono la luminosità/calore al movimento/scontri in base ad un ragionamento in termini di energia.

#### V liceo scientifico

##### 1) Elettrizzazione e campo elettrico

Gli studenti interpretano le interazioni osservate tra strisce di nastro adesivo (D3.1) come manifestazione del fatto che le strisce si sono elettrizzate in seguito allo strappo (62%). Per spiegare la differente interazione attrattiva o repulsiva osservata (D3.2) ammettono l'esistenza di due tipi di elettrizzazione (31%). Utilizzando come rivelatori delle frange simili alle strisce di nastro adesivo, vedono lo strofinio (D4.1) come processo che consente di elettrizzare la gruccia (45%). I fenomeni osservati sono

interpretati in termini di “qualcosa” che viene trasferito tra i corpi dallo strappo o dallo strofinio. Avvicinando la gruccia elettrizzata ad una lattina la divaricazione delle frange ad essa attaccate (D5) viene attribuito ad una redistribuzione di questo “qualcosa” già presente nella lattina (41%). Si condivide quindi di chiamare carica elettrica questo “qualcosa” che è responsabile dell’elettrizzazione ed è mobile negli oggetti metallici. Il 32% degli studenti vede il campo elettrico come proprietà dello spazio attorno ad un corpo elettrizzato (D7) affermando che: “le cariche/il corpo influenzano lo spazio”. Secondo gli studenti (D8) la misura del campo con le placchette dipende da: orientamento (34%), posizione (24%), posizione e orientamento (14%). La dipendenza della misura dall’orientamento delle placchette indica che la grandezza che si sta misurando ha natura vettoriale, come viene indicato da chi (34%) rappresenta il campo elettrico di una sfera elettrizzata con segmenti orientati passanti per il centro della sfera.

### 2) Carica elettrica come proprietà delle particelle

Gli studenti (22%) attribuiscono il cambiamento di orientazione di chicchi di pasta nello spazio interposto tra due corpi elettrizzati in modo diverso alla presenza del campo elettrico che nei loro ragionamenti può esercitare una forza su piccoli corpi (D2): “il campo elettrico fa orientare i chicchi di pasta”. Analogamente è presente un campo elettrico tra le due piastre dell’esperimento di Millikan. In relazione a questo esperimento emergono le seguenti idee: la velocità limite delle goccioline elettrizzate varia con la forza elettrica (26%), il suo verso dipende dai due tipi di elettrizzazione già visti (7%), la forza elettrica agente su una gocciolina dipende dal campo elettrico  $E$  e dalla carica  $Q$  secondo la relazione  $F=QE$  (4%) ed infine la carica elettrica delle goccioline è sempre proporzionale allo stesso valore (37%). In conseguenza di questo, la carica elettrica della gocciolina viene attribuita alla perdita/acquisizione per strofinio di entità discrete (33%) che quindi hanno carattere particellare: gli elettroni.

### 3) La carica come sorgente del campo

Gli studenti interpretano il processo di elettrizzazione dei corpi: per contatto (D3) in base al passaggio/scambio di elettroni nel contatto (67%), per strofinio (D4) in base al passaggio di elettroni con lo strofinio (38%), per induzione (D5) in base alla diversa distribuzione delle cariche/elettroni (29%), anche se qualche studente (8%) attribuisce all’elettrone una proprietà dei corpi macroscopici: “gli elettroni si elettrizzano”. Il 38% degli studenti riconduce (D6.2) la neutralità di un corpo non elettrizzato ad un principio astratto: “perché protoni ed elettroni si equivalgono in numero” e successivamente interpreta l’elettrizzazione della lattina per induzione (D7) in base al movimento di particelle cariche all’interno (25%). Si condivide di chiamarle elettroni di conduzione.

Se un corpo metallico non elettrizzato viene inserito in una regione di spazio dove è presente un campo elettrico costante (D8.2) gli studenti prevedono che gli elettroni di conduzione si muoveranno (8%).

#### 4) Tensione e corrente elettrica

Un agente sposta la carica tra due elettroscopi e di conseguenza un pendolino tra essi interposto oscilla. Gli studenti (23%) non interpretano lo spostamento di carica come effetto del lavoro compiuto dall'agente (D1) ma attraverso un ragionamento basato sulle formule stabiliscono (85%) la relazione  $E=V/d$  tra campo elettrico e tensione tra due corpi a distanza  $d$  (D2), e non vedono i terminali della batteria come corpi elettrizzati in modo diverso (D3). L'accensione di una lampadina viene interpretata (D4) come: "passaggio di elettroni" nel filamento (42%), passaggio di energia (24%) e in base ad una analogia tra luce e scintille (15%). Il moto degli elettroni di conduzione è (D5.2-3): disordinato in assenza di campo (39%), uniforme (27%) oppure ordinato (4%) in presenza di campo. Un'ampia percentuale (38%) ritiene inesistente/nullo/statico il moto degli elettroni di conduzione in assenza di campo. Mediante un ragionamento basato sulle formule il 38% degli studenti collega la densità di corrente nel filo alla velocità di deriva (D6) senza ricondurre l'uniformità del moto di deriva all'interazione tra gli elettroni di conduzione e il reticolo ionico (D7.2).

#### 5) Resistenza e resistività

Osservando la diversa luminosità della lampadina al variare di lunghezza  $L$  e sezione  $A$  del filo il 55% degli studenti attribuisce la diminuzione di luminosità alla minore intensità del campo nel filo più lungo (D4). Il livello microscopico è utilizzato anche per spiegare l'aumento della luminosità al crescere della sezione del filo (D7): passano più elettroni nello stesso intervallo di tempo (45%). La differente resistività di materiali diversi (D10) è ricondotta: alla diversa quantità di elettroni liberi (21%), alla diversa libertà di movimento degli elettroni (14%).

#### 6) Dal riscaldamento del resistore alla struttura della materia

Il riscaldamento di un resistore ceramico chiuso su una batteria è interpretato in termini microscopici (D1) dal 4% degli studenti. Il 70% degli studenti identifica la relazione di proporzionalità diretta tra il ritmo di riscaldamento del resistore e il prodotto  $I \cdot V$  essendo  $I$  la corrente nel resistore e  $V$  la tensione ai suoi capi (D3) ma solo il 13% afferma che energia passa dalla batteria al resistore. Non viene individuato un meccanismo microscopico di trasferimento di energia al reticolo ionico del metallo.

#### 7) Dipendenza della resistività dalla temperatura

Immergendo una bobina di filo di rame smaltato percorsa dalla corrente in azoto liquido il 52% degli studenti prevede un aumento della luminosità della lampadina "perché

diminuiscono gli urti con gli ioni e aumenta la corrente” (D1) anche se il 7% degli studenti prevede una diminuzione della luminosità “perché il movimento degli elettroni diminuisce”. Il ragionamento basato sulla simulazione Supercomet consente al 41% degli studenti di spiegare che la resistività diminuisce con la temperatura perché “diminuiscono gli urti elettroni-ioni” (D3). Alcuni studenti (14%) sono consapevoli (D4) che la rappresentazione delle dimensioni delle particelle fornita dalla simulazione “non è in scala (17%)”, “è arbitraria”.

V liceo scientifico - questionario di ingresso/uscita

I processi alla base del funzionamento di dispositivi elettrici di uso comune (D4) sono descritti in termini di:

referenti	V BT		V CT		V DT	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
energia/calore	15%	18%	34%	35%	10%	32%
particelle	15%	64%	7%	36%	0%	23%
particelle che generano energia/calore/luce	4%	4%	16%	18%	0%	28%

La corrente elettrica viene descritta (D5) in termini di:

referenti	V BT		V CT		V DT	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
energia	21%	11%	44%	0%	20%	0%
flusso/passaggio/spostamento di elettroni	43%	89%	24%	75%	19%	100%

Gli studenti riconducono le differenze tra conduttori, semiconduttori ed isolanti elettrici (D6) a:

referenti	V BT		V CT		V DT	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
Proprietà chimiche/strutturali	40%	11%	43%	4%	14%	23%
Diversa libertà/mobilità degli elettroni	0%	28%	0%	86%	33%	32%

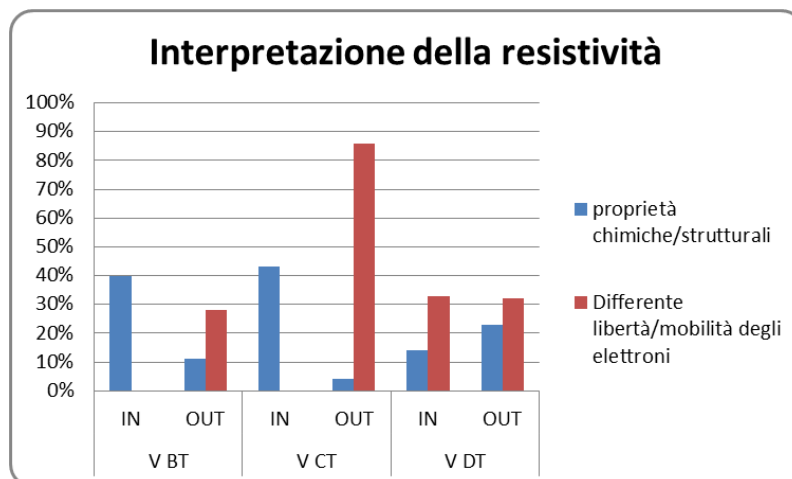
Gli studenti riconducono la conduzione elettrica nei metalli (D8) a:

referenti	V BT		V CT		V DT	
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
Stato delle particelle/legame chimico	15%	14%	14%	14%	24%	28%
Presenza di elettroni liberi	25%	36%	28%	78%	10%	41%

Non sono presenti descrizioni significative dei concetti fisici relativi alla conduzione (campo, carica, tensione e corrente elettrica) prima della sperimentazione.

Dopo la sperimentazione gli studenti esprimono la visione dei concetti riportata in tabella:

concetto	V BT	V CT	V DT
campo elettrico	“grandezza vettoriale” (7%) che “dipende dalla tensione elettrica” (7%) e “si manifesta intorno ad un corpo elettrizzato” (18%) e che “influenza il passaggio di carica” (32%)	perturbazione dello spazio prodotta dalla distribuzione della carica elettrica” (82%)	“proprietà di una sorgente carica” (59%) “di tipo vettoriale” (9%) che “genera il flusso di corrente” (14%)
carica elettrica	“proprietà delle particelle” (21%) o “di un corpo elettrizzato” (14%) che “può essere positiva o negativa” (46%)	“proprietà delle particelle” (50%)	“eccesso/difetto di elettroni” (27%) oppure “proprietà delle particelle” (23%) che può essere “positiva o negativa” (45%)
tensione elettrica	qualcosa “presente tra corpi elettrizzati in modo diverso” (18%)	“lavoro diviso carica” (43%)	“lavoro diviso carica” (27%)
corrente elettrica	“flusso di elettroni” (89%) “causato dal campo elettrico” (7%)	“flusso ordinato di elettroni” (89%) “sotto l’azione di forze elettriche” (32%)	“flusso di elettroni” (100%) “generato da un campo elettrico” (14%)



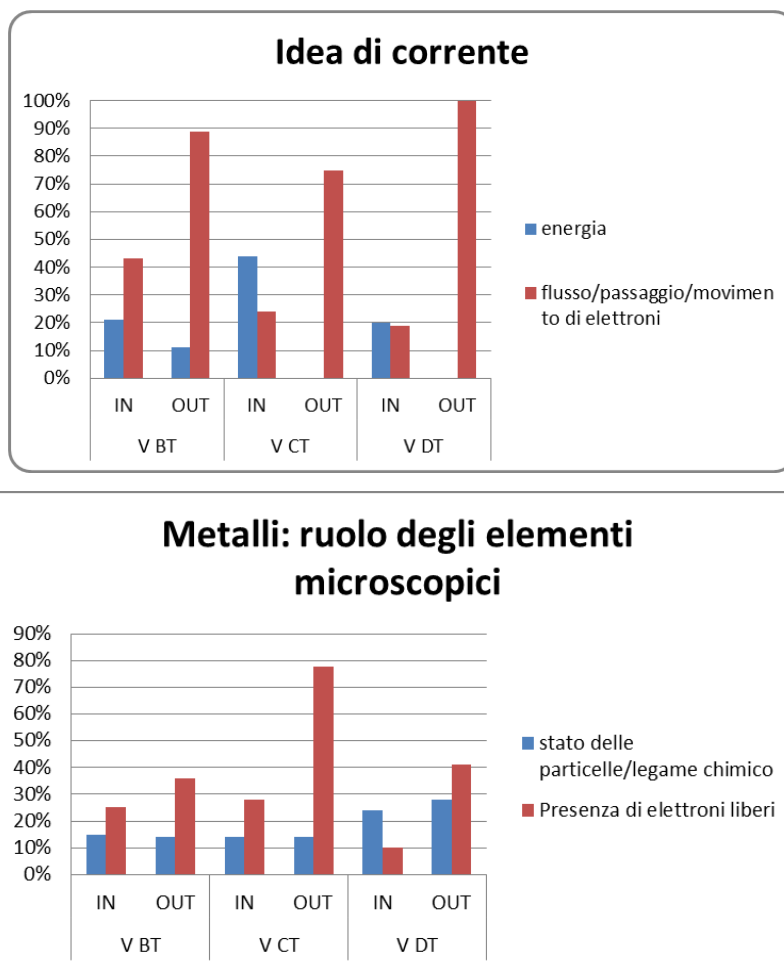


Figura 1 - cambiamento nelle idee degli studenti

### 5. Discussione e revisione

Sulla base dei dati raccolti in forma scritta ed audioregistrata nel corso dell'attività si formulano le risposte alle domande di ricerca:

RQ1) Gli studenti di scuola media mostrano nei disegni di essere consapevoli della struttura particellare del materiale (7/26), ma tale struttura viene concepita in modo statico, non correlata nei ragionamenti al passaggio della corrente né al riscaldamento del filo conduttore. Pochi riconoscono la partecipazione degli elettroni alle reazioni di formazione dei gas nell'elettrolisi (5/26) e solo uno correla questa conoscenza alla natura corpuscolare della corrente nei fili conduttori.

Negli studenti di scuola superiore, sulla base dell'esperimento di Millikan, emerge l'idea della natura particellare della carica elettrica (33%) e la conseguente interpretazione dei fenomeni osservati: particelle cariche nella lattina metallica (25%) possono essere messe in movimento da un campo elettrico (8%) presente in un filo conduttore (55%). Non riconducono il

riscaldamento del resistore ai processi di interazione tra elettroni e ioni reticolari ma restano legati a visioni macroscopiche.

RQ2) Il carattere dinamico della simulazione Supercomet favorisce il ragionamento degli studenti di scuola media sui processi microscopici in base al quale gli urti fanno innalzare la temperatura/producono calore (14/26). Tuttavia il concetto di urto utilizzato nelle spiegazioni resta vago e l'interazione tra elettroni e ioni reticolari sembra essere riconosciuta solo parzialmente.

Il ragionamento basato sulla simulazione Supercomet consente al 41% degli studenti di scuola superiore di spiegare qualitativamente l'andamento della resistività di un metallo con la temperatura. Gli studenti riconoscono la difficoltà di una rappresentazione in scala del mondo microscopico (31%) e ciò non sembra costituire un ostacolo per la discussione dei processi microscopici basata sulla simulazione.

Il ragionamento degli studenti di scuola media non si presenta legato al livello microscopico, ma le domande e le situazioni proposte hanno stimolato l'integrazione tra il livello macroscopico e microscopico di descrizione dei fenomeni. Ciò si realizza sotto due aspetti: in primo luogo la corrente viene vista come flusso di particelle (5/26); poi il riscaldamento del resistore è attribuito allo "sfregamento" delle particelle contro le pareti del filo conduttore (1/26). L'aspetto microscopico è percepito come importante solo da una minoranza di studenti.

Le interazioni tra elettroni di conduzione e ioni reticolari rappresentate nella simulazione Supercomet sono il punto di partenza dei ragionamenti degli studenti sia di scuola media che del liceo per discutere le proprietà elettriche di un metallo e in questi termini la simulazione appare un valido strumento didattico.

Per gli studenti di scuola superiore la forza esercitata dal campo elettrico è causa del moto degli elettroni di conduzione nel filo. Di conseguenza scrivono la legge di Ohm dal punto di vista microscopico come relazione causale tra campo elettrico e densità di corrente (38%), riconducono la differente conducibilità di materiali diversi alla diversa libertà di movimento degli elettroni (14%) ed utilizzano il modello microscopico per spiegare l'andamento osservato della resistività di un metallo con la temperatura (41%), mostrando di possedere una visione complessiva della conduzione elettrica nei metalli. Ciò è confermato dal confronto tra gli esiti del questionario proposto in ingresso ed in uscita (fig. 1) che vede uno spostamento, differenziato nelle diverse classi, dalla visione strutturale del metallo in termini di legame chimico verso una visione più fisica in cui vengono fondate presenza, proprietà e interazioni delle particelle cariche e il ruolo del campo elettrico nella conduzione.

Gli esiti della sperimentazione hanno dato luogo a considerazioni condivise con gli insegnanti delle tre classi del liceo coinvolte che conducono a rivedere aspetti specifici del percorso e/o costituiscono stimoli per approfondire alcune tematiche affrontate. Ciò rappresenta il valore aggiunto dalla coprogettazione (prevista nel quadro del progetto IDIFO) alla conoscenza didattica sullo specifico argomento della conduzione elettrica.

Di seguito si riportano le considerazioni condivise con gli insegnanti delle classi coinvolte nella sperimentazione.

Per quanto riguarda il campo elettrico, trascurare il campo elettrico dei piccoli oggetti utilizzati come rivelatori (quali foglioline, chicchi di pastina, goccioline, ecc.) rispetto al campo elettrico degli oggetti grandi utilizzati come sorgenti (sfere, piastre, ecc.) è una semplificazione in accordo con la visione intuitiva degli studenti, che non sembra introdurre difficoltà in un approccio iniziale ai fenomeni considerati, ma che deve essere giustificata quando si affronta una trattazione più approfondita.

Nella visione degli insegnanti gli studenti pensano che gli elettroni “non si creano, né si distruggono”. Ciò è vero per gli elettroni alle energie considerate e può costituire il punto di partenza per una riflessione che conduca a stabilire la legge di conservazione della corrente (legge di Kirchhoff ai nodi) che è inclusa nei programmi scolastici. Gli studenti, secondo gli insegnanti, possono escludere che i protoni giochino un ruolo nell'elettrizzazione perché sanno che hanno massa maggiore degli elettroni e sono costituenti del nucleo atomico. Ciò è in accordo con quanto riportano Campbell & Neilson (2012): *The motion of electrons is far more affected by electrical forces than protons are because electrons are much less massive and are outside of the nucleus*. Poiché la trattazione della natura particellare della materia nel quadro dell'insegnamento tradizionale appare dogmatica, l'attenzione va focalizzata sulla costruzione concettuale delle proprietà delle particelle che giocano un ruolo importante nella conduzione elettrica all'interno dei metalli. Viene suggerito, al riguardo, di utilizzare il fenomeno del rumore Johnson nei resistori per introdurre l'idea del moto di agitazione degli elettroni di conduzione in assenza di tensione applicata, che gli esiti dell'analisi dati hanno rivelato essere un fatto non in accordo con le concezioni degli studenti, come rilevato in letteratura (Wightman et al, 1986).

Per alcuni studenti l'elettrone non è stabile: può “scaricarsi”, reagire, trasformarsi. Appare quindi importante enfatizzare che la misura della carica dell'elettrone è una proprietà intrinseca indipendente dal particolare elettrone considerato, per affrontare la tendenza degli studenti di applicare categorie macroscopiche ad oggetti microscopici.



A tale scopo è utile la misura della carica dell'elettrone attraverso l'elettrolisi (par. X.7).

Tutti gli insegnanti concordano che la sequenza 6 centrata sul riscaldamento del resistore ha offerto le maggiori difficoltà agli studenti in quanto non sono stati abituati a collegare il concetto di energia al concetto di interazione, come è consuetudine nella visione fisica. Gli insegnanti ritengono che la correlazione della grandezza  $I \cdot V$  (prodotto corrente per tensione) al ritmo di aumento dell'energia interna del resistore sia difficile per gli studenti. Si fa osservare che rispetto alla dimostrazione tradizionale della legge di Joule su base formale, l'approccio presentato nella sperimentazione affronta la conservazione dell'energia su base sperimentale.

In relazione alla rappresentazione microscopica fornita dalla simulazione Supercomet, gli insegnanti hanno espresso perplessità relativamente al fatto che al diminuire della temperatura gli ioni reticolari rallentano mentre gli elettroni di conduzione, che pure sono modellizzati come particelle di un gas perfetto, non subiscono variazioni apprezzabili del loro moto. Ciò può costituire il punto di partenza per esplorare sperimentalmente il contributo degli elettroni di conduzione al calore specifico di un metallo e quindi affrontare i limiti del modello rappresentato dalla simulazione.

In relazione all'andamento della resistenza di un metallo con la temperatura, un insegnante propone di prendere in considerazione anche la variazione dei parametri geometrici del filo cilindrico (lunghezza  $L$  e sezione  $A$ ) con la temperatura in base al coefficiente di dilatazione termica  $\lambda$ . Questa variazione, da sola, determina una diminuzione della resistenza  $R$  con l'aumentare della temperatura  $T$ . Gli insegnanti trovano didatticamente significativa la discussione della piccolezza di questo effetto ( $\Delta R/R = -\lambda \Delta T$ , con  $\lambda \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) in confronto alla variazione della resistenza con la temperatura  $\Delta R/R = \alpha \Delta T$ , con  $\alpha \approx 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (tab. III.3)

Per quanto riguarda l'elettrolisi, gli insegnanti evidenziano che di tutti gli effetti del passaggio di corrente elettrica, l'elettrolisi è l'unico che differenzia i due terminali della batteria, ciò che resta un punto non affrontato nella trattazione matematica formale del potenziale elettrico. Queste osservazioni confermano la valenza didattica dell'elettrolisi in un percorso sulla conduzione elettrica, anche se va discusso l'effetto della pressione sulla stima della densità dell'idrogeno sviluppato nella provetta sopra al terminale negativo in modo da giustificare di averlo trascurato. Gli insegnanti osservano che ricondurre la spiegazione dei fenomeni al livello microscopico comporta il rischio che gli studenti applichino categorie macroscopiche ad oggetti microscopici. Per affrontare questa difficoltà potrebbe essere opportuna una maggiore integrazione con l'insegnante di scienze, quando tratta la struttura particellare della materia.

Per quanto infine riguarda le diffuse difficoltà degli studenti nell'esecuzione di calcoli con numeri espressi in notazione scientifica (per esempio riguardo alla determinazione in  $m^2$  dell'area del cerchio di raggio 0,2 mm ai fini del calcolo della resistività di un filo conduttore cilindrico) gli insegnanti attribuiscono tali difficoltà ad una carenza di esercizio, in quanto si tratta di un argomento affrontato nella matematica del biennio.

## VIII. La ricerca con gli studenti eccellenti

1. Progettazione dell'intervento didattico
2. Contesto
3. Strategia
4. Analisi dati
5. Discussione e revisione

### **1. Progettazione dell'intervento didattico**

L'analisi della letteratura di ricerca didattica svolta nel cap. III indica che la comprensione dei fenomeni relativi alla conduzione elettrica nei solidi è strettamente legata a modelli che difficilmente gli studenti integrano in un quadro concettuale coerente e completo anche al termine del percorso di scuola secondaria superiore (Stocklmayer & Treagust, 1996; Wittman, Steinberg, Redish, 2001). Un'ampia discussione pone il problema dell'opportunità di una trattazione che integri i livelli macro/micro di descrizione della fenomenologia della conduzione elettrica (Eylon & Ganiel, 1990; Duit & von Rhöneck, 1998; Thacker, Ganiel & Boys, 1999; Chabay & Sherwood, 1999). Recenti lavori evidenziano che la comprensione della relazione tra grandezze fisiche coinvolte e fenomenologia elettrodinamica richiede la chiarificazione delle relazioni tra carica, corrente, potenziale e campo elettrico (Hirvonen 2007; Hart, 2008; Stocklmayer, 2010). L'apprendimento inteso come conoscenza concettuale di tali relazioni pone il problema della chiarificazione della natura delle grandezze stesse ed in particolare del superamento dei seguenti punti:

- esistenza e proprietà di particelle cariche nella materia,
- interazioni tra campo elettrico ed elettroni di conduzione,
- interazioni tra elettroni di conduzione e ioni reticolari

La trattazione di un modello microscopico della conduzione elettrica nei solidi cristallini si pone pertanto in questi termini e non in termini puramente descrittivi di possibili meccanismi e/o di rappresentazioni utili alla memoria figurativa. Coinvolgere gli studenti in pratiche scientifiche significative richiede agli studenti di comprendere la logica che regge tali pratiche. E' quindi importante che gli studenti comprendano il ruolo dei modelli nella scienza (Schwarz et al., 2009) in termini di metacoscienza su: a) come i modelli vengono utilizzati, b) perché sono utilizzati, c) quali sono valenze e limiti di modelli differenti dello stesso sistema, al fine di apprezzare come funziona la scienza e la natura dinamica della conoscenza che la scienza produce (Abd-El-Khalick et al., 2004). La fisica riconduce le proprietà elettriche alla resistività dei diversi materiali

e interpreta i processi della conduzione elettrica utilizzando differenti modelli che intrecciano livelli macroscopici e microscopici (cap. III). Ogni modello microscopico specifica proprietà e interazioni tra campo elettrico, elettroni di conduzione e ioni reticolari assumendo una teoria fisica di riferimento che può essere classica, semiclassica o quantistica.

L'intervento didattico propone agli studenti di individuare: 1) le ragioni alla base dei diversi modelli, classico (Drude), semiclassico (Sommerfeld), a bande (Bloch) utilizzati in fisica per descrivere la conduzione elettrica nei solidi cristallini, 2) le valenze e i limiti di ciascun modello.

La valutazione dell'intervento con gli studenti di scuola media e superiore (cap. VII) consolida la valenza didattica di una trattazione che parte dalla fenomenologia, fatta eccezione per l'esperimento di riscaldamento del resistore, che non ha chiarito l'origine fisica della legge di Joule in termini di interazioni elettroni-ioni reticolari. Tenendo conto che gli studenti hanno già affrontato lo studio dell'elettromagnetismo, si è ritenuto opportuno inserire tra gli esperimenti che fondano la trattazione: l'esperimento di Thomson e l'effetto Hall per fondare l'esistenza degli elettroni e per determinarne la concentrazione.

Sono state considerate le seguenti domande di ricerca:

RQ1. Come vengono fondati dagli studenti i differenti modelli interpretativi microscopici della conduzione elettrica?

RQ2. Come viene affrontato il passaggio dal modello classico a quello quantistico?

## **2. Contesto**

Il laboratorio-seminario è stato realizzato nel luglio 2011 presso il polo scientifico dell'Università di Udine con 40 studenti di classi quarte e quinte della scuola secondaria superiore, provenienti da diverse città italiane, selezionati per partecipare alla Scuola Estiva Nazionale di Fisica Moderna, organizzata con cadenza biennale a partire dal 2007 come parte del progetto Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento (IDIFO) nell'ambito del Piano Nazionale Lauree Scientifiche.

L'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Udine con la Scuola Estiva offre agli studenti degli ultimi due anni delle scuole secondarie superiori italiane una opportunità formativa di alto livello, rivolta alla valorizzazione delle eccellenze nell'ambito della fisica moderna. Vengono proposti temi di forte impatto e interesse per i ragazzi, come quelli della fisica del 900, generalmente trascurati nella pratica didattica delle scuole, attraverso strategie che prevedono un forte coinvolgimento personale degli studenti con l'oggetto di studio, condizione necessaria per garantire un

effettivo apprendimento scientifico e per l'orientamento formativo (Michelini, 2009). Gli studenti, in piccoli gruppi di tre-quattro componenti, svolgono direttamente attività sperimentali in laboratorio didattico orientate da attività seminariali sui quadri concettuali di riferimento.

### 3. Strategia

Il laboratorio-seminario è stato condotto dal ricercatore sulla tematica della conduzione elettrica nei solidi cristallini. E' stato suddiviso in due fasi:

- A. esplorazione laboratoriale delle proprietà elettriche dei solidi (gli studenti eseguono misure di resistività di metalli e semiconduttori in funzione della temperatura dalla temperatura dell'azoto liquido a temperatura ambiente e misurano il segno e la densità dei portatori di carica attraverso il coefficiente di Hall in rame, zinco e semiconduttori a temperatura ambiente;
- B. seminario sui modelli della conduzione elettrica nei solidi cristallini (un questionario a domande aperte raccoglie i ragionamenti elaborati dai ragazzi sulla base degli stimoli offerti sui seguenti argomenti: a) Elettrizzazione e carica elettrica, b) Corrente e resistenza, c) Dipendenza della resistenza dalla temperatura, d) Un modello microscopico classico, e) Il modello a bande di energia.

Nella fase A dell'intervento gli studenti utilizzano una sonda USB (Gervasio e Michelini, 2009) per misurare la resistività in funzione della temperatura e il coefficiente di Hall di metalli e semiconduttori. Le misure di resistività e dell'effetto Hall consentono di ottenere informazioni sul segno della carica  $q$  e sulla concentrazione  $n$  dei portatori di carica (fig. 1)

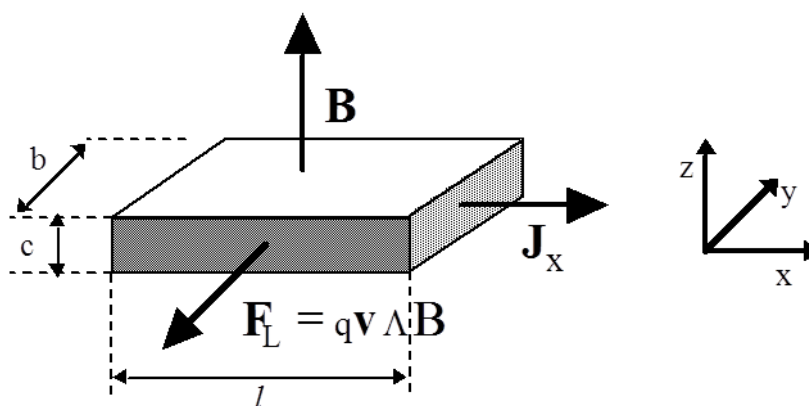


Figura 1 - effetto Hall

Definendo il coefficiente di Hall:

$$R_H = c V_H / (I B)$$

e misurando  $c$ ,  $V_H$ ,  $B$ ,  $I$  si ottiene che

$$n = 1/qR_H$$

Ad esempio, utilizzando un campione con  $c = 0,9 \pm 0,05$  mm, un campo magnetico di intensità  $B = 290 \pm 5$  G e supponendo  $q$  uguale alla carica dell'elettrone, gli studenti interpolando i dati come in fig. 2 ottengono la concentrazione  $n \approx 10^{20}/\text{m}^3$  dei portatori di carica in Ge::P e trovano che il segno dei portatori di carica è positivo.

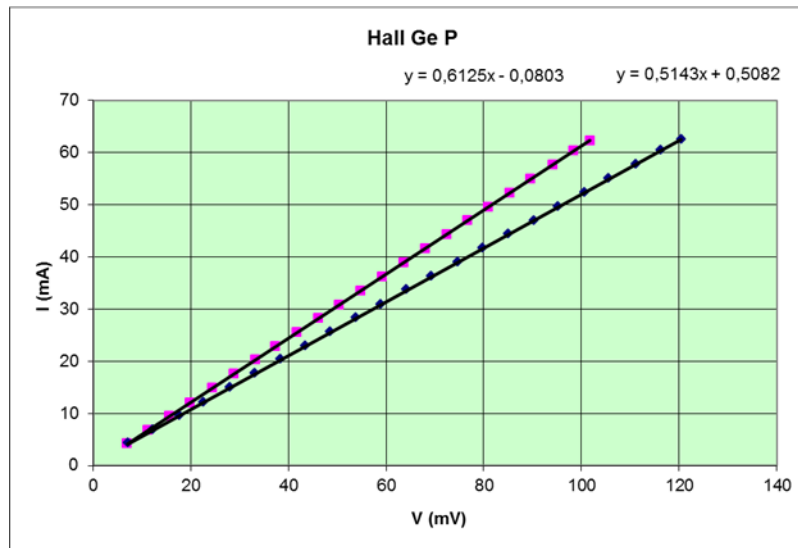


Figura 2 - effetto Hall in semiconduttore

Nella fase B dell'intervento, la discussione nella forma di dimostrazione interattiva (Sokoloff et al., 2007) affronta i seguenti argomenti:

- 1) Elettrizzazione e carica elettrica (partendo dalla fenomenologia elettrostatica si giustifica l'ipotesi della carica mobile nei metalli e del concetto di d.d.p. come motore del trasferimento di carica)
- 2) Corrente, resistenza e resistività (utilizzando fili di differente materiale, lunghezza e sezione per chiudere un semplice circuito costituito da una batteria e da una lampadina, si costruisce il concetto di resistenza e resistività elettrica di un filo)
- 3) Dipendenza della resistenza dalla temperatura (si mostra il cambiamento delle luminosità della lampadina risultante dall'immersione del filo in azoto liquido e si richiamano i grafici della resistività in funzione della temperatura di conduttori come Cu e Zn e semiconduttori)
- 4) Un modello microscopico classico (attraverso la simulazione Supercomet si presenta il modello di Drude, lo si utilizza per prevedere l'andamento della resistività di un metallo con la temperatura e se ne evidenziano i limiti)

- 5) Il modello a bande di energia (attraverso la simulazione di Zollman *Energy Band Creator* si presenta il modello che viene utilizzato in fisica per spiegare le situazioni sperimentali già esaminate dagli studenti)

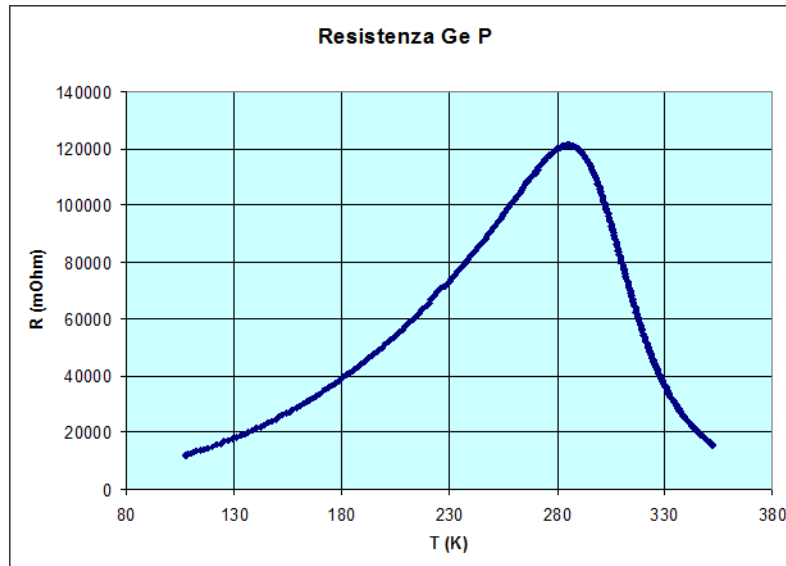


Figura 3 - resistività di un semiconduttore

Il nucleo di questa proposta didattica è il superamento del modello classico. Gli studenti interpretano la resistività dei conduttori metallici sulla base della simulazione Supercomet, ma il coefficiente di Hall evidenzia che il segno dei portatori di carica in un metallo come lo zinco è positivo. Questo risultato non può essere giustificato nel contesto del modello del gas di elettroni liberi. Inoltre a basse temperature il comportamento della resistenza dei semiconduttori drogati è qualitativamente simile a quella dei metalli (fig. 3): la resistenza aumenta con la temperatura secondo una legge quasi lineare. Al contrario, il comportamento a temperature più elevate indica chiaramente la necessità di una nuova interpretazione fisica. La rapida caduta della resistenza mostra una dipendenza esponenziale della concentrazione dei portatori di carica liberi dalla temperatura. Ciò significa che la concentrazione dei portatori liberi aumenta con la temperatura in modo proporzionale al fattore  $\exp(-A/kT)$ : questo risultato è coerente con l'ipotesi di un meccanismo di conduzione elettrica attivato termicamente superando una "barriera di energia". Questi fatti sperimentali richiedono un cambiamento importante del modello microscopico, che non può più essere costruito ignorando la fisica quantistica. Il modello del gas di elettroni diventa allora un riferimento intuitivo, che lascia spazio ad una rappresentazione dello stato elettronico nei solidi basata sulla descrizione del loro stato in termini di livelli di energia. Questo

modello consente agli studenti una spiegazione unitaria delle proprietà elettriche dei solidi cristallini.

#### **4. Analisi dati**

Si analizzano le risposte in forma scritta dei ragazzi alle questioni cardine proposte durante l'attività B (seminariale) in relazione agli argomenti 3, 4, 5 più rilevanti per la ricerca.

- 3) Un aspetto importante è indagare la dipendenza della resistenza elettrica dalla temperatura. Si immerge una bobina di filo di rame smaltato percorsa dalla corrente in azoto liquido, chiedendo agli studenti di prevedere il cambiamento della luminosità della lampadina quando la temperatura del filo si abbassa (domanda 3.1). In accordo con quanto rilevato da Wittmann et al. (2002) un 5% di studenti prevede che la luminosità diminuisce perché “nel filo di rame raffreddato gli elettroni si spostano più lentamente”. L'effettivo aumento della luminosità viene interpretato dal 48% degli studenti con la motivazione: “gli ioni del reticolo vibrano meno ostacolando meno il moto degli elettroni” (domanda 3.2). Per spiegare le differenze nell'interno del filo al variare della temperatura (domanda 3.4) gli studenti utilizzano le seguenti categorie: aumenta l'agitazione termica e quindi gli urti/ostacoli per le cariche in movimento (43%), resistenza maggiore a temperatura ambiente (8%), a temperatura ambiente il moto delle cariche è più disordinato (8%), a temperatura ambiente gli elettroni sono più rallentati dalla resistenza (8%) a temperatura ambiente le particelle sono maggiormente eccitate (3%), l'azoto liquido facilita la trasmissione di elettricità (3%), a temperatura ambiente i legami sono più forti (3%). Gli studenti utilizzano il modello ad elettroni liberi per spiegare l'andamento osservato della resistività dei metalli con la temperatura.
- 4) Si approfondisce il modello ad elettroni liberi per la conduzione nei metalli utilizzando la simulazione Supercomet. Il 38% degli studenti (domanda 4.1) afferma che a temperatura maggiore l'agitazione termica degli ioni reticolari è maggiore, e tra questi il 60% mette in relazione l'aumento dell'agitazione termica con la maggior frequenza degli urti elettroni/ioni reticolari. Il 35% afferma che il modello non può essere utilizzato per spiegare l'andamento della resistività del semiconduttore Ge::P con la temperatura (domanda 4.2). Per attivare la riflessione sul rapporto tra simulazione e realtà si chiede se proprietà fisiche delle particelle cariche rappresentate nella simulazione siano plausibili, con riferimento alle dimensioni (domanda 4.3) ed alle velocità (domanda 4.4). Molti studenti non



rispondono (rispettivamente il 60% e il 70%) non possedendo strumenti di valutazione dei parametri fisici microscopici, e tra le risposte emergono alcune concezioni alternative rilevate da altri autori (De Posada, 1997; Wittmann et al., 2002): che la velocità di deriva è molto più grande di quella del moto disordinato (10%) e che gli elettroni di conduzione sono soggetti alla forza di Coulomb (3%).

- 5) Osservando le posizioni che può assumere il centro di massa di una sedia e le transizioni tra esse gli studenti costruiscono il concetto di livello energetico discreto. Nel descrivere gli stati che può assumere la sedia in termini di energia potenziale rispetto al pavimento (domanda 5.1) emergono le seguenti idee: cambiamento dell'energia potenziale della sedia (35%), presenza di livelli discreti di energia della sedia (13%), cambiamento di posizione della sedia (5%). Si condivide che è possibile descrivere lo stato di un sistema fisico mediante una rappresentazione dei suoi livelli energetici, che possono essere discreti. Si introduce la descrizione dell'elettrone legato rappresentando l'atomo come una buca di potenziale, analogamente ad una pallina in una scodella. I livelli energetici di un elettrone legato ad un atomo sono discreti, analogamente ai livelli energetici di una sedia. La simulazione *Energy Band Creator* (Zollman, 2004) evidenzia che quando gli atomi isolati si uniscono per formare il cristallo, la struttura dei livelli energetici degli elettroni più esterni cambia drasticamente. Mentre, infatti, i livelli energetici degli elettroni degli strati interni non cambiano sostanzialmente, di modo che tali elettroni rimangono vincolati ai singoli atomi, i livelli degli elettroni più esterni risultano sensibilmente alterati dalla presenza degli atomi vicini; al posto dei singoli livelli energetici nettamente distinti presenti nell'atomo isolato, si forma una fitta banda di livelli energetici a cui corrispondono stati elettronici delocalizzati. In altri termini, un elettrone che occupa uno dei livelli della banda non è vincolato ad un atomo, ma è condiviso da diversi atomi del cristallo. Sono proprio gli elettroni appartenenti a tale banda, chiamata banda di valenza, che non essendo confinati al singolo atomo, possono contribuire alla conduzione elettrica. Al disopra della banda di valenza (ma, in genere, anche al disotto) si ha la formazione di altre bande di energia, separate una dall'altra da intervalli di energia proibita, chiamati gap energetici. Nel modello a bande di energia, le proprietà elettriche di un solido cristallino dipendono dalle peculiari caratteristiche della struttura a bande e dal numero di elettroni presenti nella banda di valenza.

Il 36% degli studenti utilizza correttamente questo modello per spiegare la conduzione elettrica nei metalli (domanda 5.3) in base al seguente ragionamento: "in un metallo la banda di valenza è parzialmente piena per cui se do energia gli

elettroni si portano a livelli energetici più alti. Il metallo quindi è un buon conduttore termico ed elettrico perché gli elettroni sono liberi di passare a livelli energetici più alti.” Tuttavia compaiono concezioni alternative poco comuni: riconducono la differenza tra metalli ed isolanti all’ampiezza del gap (8%), non distinguono la promozione termica degli elettroni dal moto di deriva (8%), inseriscono nel modello la gravità e l’attrazione elettroni-ioni reticolari (3%). Il modello a bande di energia manifesta la sua capacità esplicativa in relazione alla conduzione elettrica nei semiconduttori intrinseci, in particolare per quanto riguarda l’andamento osservato della resistività in funzione della temperatura, che nella zona intrinseca è decrescente. Il 13% degli studenti utilizza correttamente il modello (domanda 5.5) per descrivere la conduzione nella zona intrinseca ragionando tipicamente così: “a temperatura sufficientemente alta gli elettroni possono saltare di banda e condurre. Con la temperatura aumenta il numero di elettroni che saltano di banda quindi la resistenza diminuisce”. Solo il 5% distingue la conduzione intrinseca da quella estrinseca mentre il 25% non considera il ruolo dell’ampiezza del gap.

### **5. *Discussione e revisione***

Sulla base dei dati raccolti in forma scritta ed audioregistrata nel corso dell’attività si formulano le risposte alle domande di ricerca:

RQ1) Per conquistare una comprensione integrata sui livelli macro/micro della conduzione elettrica è necessario provare la presenza di elettroni relativamente liberi in un conduttore e descriverne lo stato ed i processi di interazione nel quadro di una teoria fisica di riferimento che può essere classica o quantistica. A questo scopo le misure di resistività e di coefficiente Hall consentono di ottenere informazioni sul segno, numero e mobilità dei portatori di carica in metalli e semiconduttori.

L’esperimento di immersione di un filo conduttore percorso da corrente in azoto liquido (con conseguente aumento di luminosità della lampadina) favorisce la riflessione degli studenti sul ruolo dei processi microscopici di interazione elettroni - reticolo (fig. 4).

L’ampia percentuale di risposte che riconducono la variazione delle resistenza di un metallo con la temperatura al moto di agitazione termica degli ioni reticolari ed all’interazione di questi con gli elettroni di conduzione conferma la validità della simulazione Supercomet, pur tenendo conto delle sue limitazioni in termini di rappresentazione delle corrette relazioni tra le proprietà fisiche e della

inadeguatezza per descrivere il comportamento dei semiconduttori. Emerge la necessità di discutere criticamente e dettagliatamente alcuni aspetti introdotti dalla simulazione Supercomet che sono rilevanti per la comprensione del mondo microscopico, quali le dimensioni di elettroni e ioni reticolari, il passo reticolare, il cammino libero medio degli elettroni di conduzione.

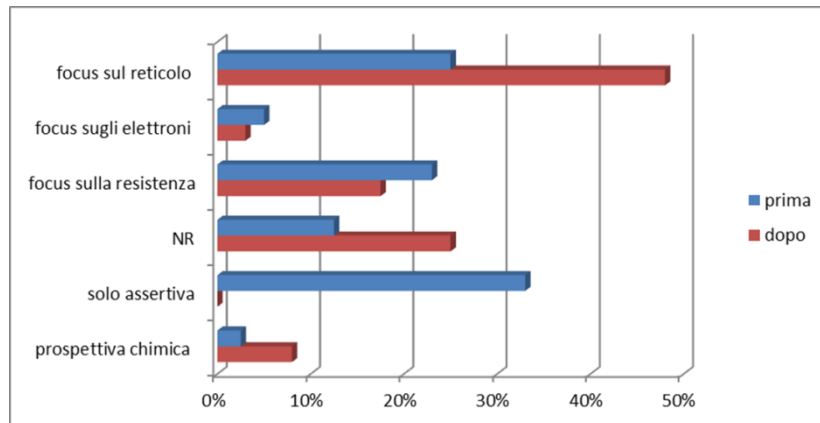


Figura 4 - ragionamenti prima e dopo l'esperimento

RQ2) L'approccio innovativo presentato in questo lavoro si basa sull'energia come angolo di attacco. L'introduzione dei livelli discreti è fatta sfruttando l'analogia con i livelli energetici di una sedia; viene evitato di introdurre il formalismo matematico con cui si giustifica la struttura a bande, ma sono forniti gli strumenti concettuali per una descrizione completa dei fenomeni osservati. Per quanto riguarda la conduzione elettrica nei metalli, più di un terzo degli studenti interpreta la fenomenologia in base alla teoria delle bande di energia; la percentuale cala drasticamente al 5% quando si tratta di interpretare la dipendenza della resistenza del semiconduttore con la temperatura nelle diverse regioni di conduzione intrinseca ed estrinseca. Questa difficoltà potrebbe essere evitata utilizzando un semiconduttore intrinseco.

L'intervento didattico qui illustrato ha affrontato le ragioni alla base dei diversi modelli interpretativi microscopici della conduzione elettrica nei solidi cristallini. L'analisi degli esiti indica che la simulazione Supercomet può essere uno strumento didatticamente efficace per fondare il modello microscopico semiclassico della conduzione elettrica e per analizzarne le previsioni qualitative sull'andamento della resistività dei metalli con la temperatura. Peculiari difficoltà emergono nei ragionamenti degli studenti sull'utilizzo del modello quantistico a bande per giustificare le proprietà elettriche dei semiconduttori. La complessità della conduzione elettrica richiede di riconoscere e

valutare i contributi dai diversi processi fisici in una visione globale che connette modelli microscopici e grandezze macroscopiche.

## **IX. La ricerca con gli insegnanti**

1. Il modello IDIFO per la formazione insegnanti in servizio
2. Attività con insegnanti in servizio di scuola dell'infanzia, primaria e media
  - 2.1 Nodi di apprendimento
  - 2.2 Laboratorio
    - 2.2.1 Tensione e corrente
    - 2.2.2 Carica e resistenza
  - 2.3 Analisi
  - 2.4 Discussione
3. Attività con insegnanti in formazione di scuola primaria
  - 3.1 Laboratorio
  - 3.2 Analisi
  - 3.3 Discussione
4. Attività con insegnanti in formazione di scuola secondaria
  - 4.1 Laboratorio/Seminario
  - 4.2 Analisi
  - 4.3 Discussione

### **1. Il modello IDIFO per la formazione insegnanti in servizio**

L'indagine internazionale *Trends in International Mathematics and Science Study* (TIMSS, 2011) ha permesso di individuare strategie e metodi comunemente utilizzati nella pratica didattica in 63 paesi, evidenziando che: la quasi totalità degli insegnanti è vincolata ai libri di testo (circa il 100%), per metà del tempo di insegnamento impegna i ragazzi in letture della "teoria" o in come fare esercizi (più del 50%), a volte facendo loro assistere a dimostrazioni sperimentali (11- 54%) e solo in pochi casi coinvolgendoli direttamente nello svolgimento di esperimenti (0 - 30%). Al contrario, l'apprendimento della fisica sembra essere agevolato da un insegnamento che attiva cognitivamente gli studenti attraverso attività minds-on/hands-on e consente l'opportunità di porre domande significative (Cap. I). Quindi è necessario che la formazione insegnanti consideri l'acquisizione di competenze nel creare e gestire percorsi coerenti di apprendimento attivo. Rispondere a questo bisogno formativo significa porre le basi per migliorare l'apprendimento degli studenti e per rinnovare la pratica didattica nelle scuole introducendo innovazione didattica e metodologica.

La necessità di impostare la didattica tenendo conto dei processi di apprendimento degli studenti richiede da parte degli insegnanti, per ogni specifico argomento, l'integrazione tra la conoscenza dei contenuti (per quanto riguarda: quantità, qualità, organizzazione, struttura, base concettuale) e la conoscenza pedagogica (per quanto riguarda: processi di apprendimento, strumenti e metodi di insegnamento, difficoltà di apprendimento, concezioni alternative degli studenti). La consapevolezza crescente della centralità del ruolo dell'insegnante nel favorire i processi di apprendimento ha spinto i ricercatori a focalizzare l'attenzione sul modo in cui la conoscenza dei contenuti disciplinari, integrata con la conoscenza pedagogica, possa diventare competenza professionale specifica (*Pedagogical Content Knowledge*, Shulman, 1986, 1987). In questo quadro di riferimento il progetto Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento (IDIFO), realizzato a partire dal 2006 dall'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Udine, prevede laboratori innovativi co-progettati per la formazione degli insegnanti nell'area disciplinare della fisica moderna con la finalità di favorire l'integrazione di *Content Knowledge* e *Pedagogical Knowledge* da parte dell'insegnante. Il modello IDIFO risponde al bisogno formativo attraverso l'integrazione tra le seguenti modalità (Michellini, 2004):

- 1) metaculturale, basata sull'analisi e sulla discussione critica degli elementi culturali e didattici della progettazione didattica oggetto della formazione, per quanto riguarda coerenza, connessione, sviluppo della comprensione concettuale, contenuto disciplinare, correlate difficoltà di apprendimento;
- 2) esperienziale, che coinvolge gli insegnanti nella stessa attività progettata per gli studenti, in modo da attivare la riflessione sui singoli passi in cui essa si sviluppa, per valutarne valenze e limiti didattici e per individuare i nodi rimasti aperti e i processi di apprendimento da attivare per superarli;
- 3) situata, che comprende la sperimentazione in classe della progettazione didattica oggetto della formazione e le attività di documentazione, monitoraggio e valutazione necessarie affinché la riflessione sull'esperienza di lavoro in classe acquisti una dimensione di ricerca.

L'attività di formazione insegnanti illustrata in questa tesi, svolta nel contesto del progetto IDIFO, ha riguardato la riflessione sui concetti cardine della teoria, la ricostruzione dell'impostazione interpretativa della fenomenologia, il confronto di diverse proposte di insegnamento/apprendimento sull'argomento della conduzione elettrica, l'individuazione dei nodi concettuali e delle strategie per superarli.

Aspetti che hanno caratterizzato i laboratori di formazione insegnanti svolti sulla conduzione elettrica sono stati:

- collaborazione reciproca tra gli insegnanti coinvolti;
- realizzazione di ambienti di discussione verticali;
- co-progettazione dei percorsi didattici;
- autonomia progettuale di definire gli obiettivi di apprendimento;
- valutazione dei materiali utilizzati/delle attività svolte in classe.

Nel seguito vengono illustrate le attività svolte con gruppi di insegnanti.

## **2. Attività con insegnanti in servizio di scuola dell'infanzia, primaria e media**

Il laboratorio IDIFO3 (Fera & Michelini, 2013) è volutamente realizzato in prospettiva verticale con insegnanti che hanno competenze professionali differenziate. E' stato frequentato da 4 insegnanti di ruolo provenienti: 2 dalla scuola dell'infanzia, 1 dalla scuola elementare ed 1 dalla scuola media. Sono stati svolti 3 incontri di 3 ore ciascuno a partire dal dicembre 2011 fino al febbraio 2012. Gli insegnanti partecipanti hanno analizzato e discusso i principali nodi di apprendimento della conduzione elettrica ed hanno elaborato questionari ed interviste per la rilevazione delle idee dei propri allievi. Ne hanno portato avanti l'analisi, acquisendo competenze nella individuazione delle idee, dei modelli e dei ragionamenti degli studenti. In collaborazione con il ricercatore, hanno progettato alcune possibili strategie per affrontare in classe i nodi di apprendimento esaminati, scegliendo i materiali e attuando percorsi personalizzati discussi all'interno del laboratorio.

L'attività è stata svolta in tre incontri:

- 1) situazioni sperimentali problematiche stimolavano la discussione tra gli insegnanti su alcuni nodi di apprendimento selezionati (par. 2.1). Gli insegnanti hanno sperimentato in prima persona le difficoltà di apprendimento per riconoscerle e affrontarle in classe con un approccio appropriato.
- 2) Discussione su base fenomenologica di: tensione e corrente (par. 2.2.1), carica e resistenza elettrica nel contesto elettrochimico ed elettrotermico (par. 2.2.2)
- 3) Analisi (par. 2.3) e discussione (par. 2.4) della progettazione didattica presentata dagli insegnanti alla luce delle seguenti domande di ricerca:
  - RQ1: Come il modello di formazione utilizzato ha aiutato gli insegnanti nel costruire un percorso?
  - RQ2: Quale ruolo ha avuto la co-progettazione?

### **2.1 Nodi di apprendimento**

I principali risultati circa le difficoltà e le concezioni alternative degli studenti possono essere riassunti come segue:

Ragionamento locale. Gli studenti adottano spesso il ragionamento locale concentrandosi solo su quello che accade in un elemento del circuito: di conseguenza non si rendono conto che i cambiamenti in un elemento del circuito ne influenzano l'intero funzionamento (Shipstone et al, 1988; Duit & Von Rhöneck, 1998).

Ragionamento sequenziale. Il ragionamento sequenziale si riferisce alla tendenza ad analizzare i circuiti in termini di “prima e dopo”: di conseguenza, esiste una direzione privilegiata dei cambiamenti in corso e solo ciò che sta prima di un elemento può influenzare il suo comportamento (Shipstone et al., 1988). Un tipico esempio è la previsione che una lampadina “lontana” dalla batteria sarà meno luminosa di una “vicina” in serie con essa nel circuito.

Questi schemi di ragionamento producono spesso previsioni non in accordo con la fisica e lo strumento della previsione (ciclo POE, par. II.3.2) diventa importante per l'esplicitazione delle idee interpretative dei ragazzi.

Comprensione concettuale della corrente elettrica. Idee molto comuni sono, ad esempio: in un circuito in serie, la corrente viene consumata quando passa per una lampadina; la corrente fornita da una batteria è costante indipendentemente dalla topologia del circuito; la corrente viene identificata con una vaga e astratta idea di energia (Cohen et al, 1983; Shipstone et al, 1988; McDermott & Shaffer, 1992)

Comprensione concettuale della tensione. La tensione viene confusa con la corrente o l'energia; molti studenti pensano che rappresenti la “forza” di una batteria (Psillos, Koumaras & Tiberghien, 1988); ciò sembra costituire un angolo di attacco (Viennot, 2003) nei ragionamenti: la batteria è vista come un contenitore/erogatore di energia o corrente, che poi viene rilasciata nel circuito (Cohen et al., 1983). Di conseguenza gli studenti tendono a pensare che la tensione sia una proprietà che descrive la corrente, piuttosto che vederla come una condizione necessaria per la corrente (von Rhoneck, 1984). Inoltre molti studenti pensano che attraverso un interruttore aperto non ci può essere una differenza di potenziale perché la corrente è zero. Spesso gli studenti non mettono in relazione le tensioni ai capi degli elementi di un circuito alla sua topologia: McDermott & Shaffer, (1992) riportano che, per gli studenti, se due lampadine uguali sono connesse ad una batteria il risultato in termini di luminosità è indipendente dalla connessione.

Ruolo della resistenza. Gli studenti difficilmente si rendono conto dell'utilità del circuito equivalente nel determinare la corrente ed in particolare raramente sono consapevoli che la resistenza totale di resistori in parallelo, contrariamente a quanto avviene nei circuiti in serie, diminuisce aumentando il numero dei resistori connessi (McDermott & Schaffer, 1992).



Come primo passo di un approccio didattico alla conduzione nei circuiti elettrici risulta essenziale che gli studenti fin dall'inizio trattino il circuito come un sistema caratterizzato da un funzionamento ben definito (McDermott et al., 2000). Il funzionamento deve essere correlato alla topologia del circuito al fine di permettere agli studenti di rendersi conto che i cambiamenti locali influiscono sul funzionamento globale. In questo modo sorge spontanea la necessità di introdurre alcune grandezze fisiche (corrente, tensione, resistenza), che descrivono sistematicamente un comportamento complesso, senza dover affrontare anche il significato fisico di tali grandezze.

Poiché il ragionamento locale e sequenziale emerge anche quando gli studenti interpretano rappresentazioni astratte dei circuiti, è essenziale che gli studenti familiarizzino e facciano esperienza con gli schemi dei circuiti al fine di riconoscere che uno stesso schema descrive circuiti differenti.

Questi due semplici passi costituiscono l'essenza di un approccio all'insegnamento dei circuiti elettrici basato sulle grandezze macroscopiche tensione e corrente che promuove la comprensione di come il comportamento globale di un circuito è influenzato dai cambiamenti in qualche parte di esso, approccio detto *sistemico* (Testa, 2008). Poiché tale approccio mira ad affrontare le difficoltà di base degli studenti, esso appare particolarmente indicato per interventi di formazione degli insegnanti delle scuole primarie (studenti 6-10 anni) e medie (studenti di età 11-13 anni). A sostegno dello sviluppo della visione funzionale si è scelto di collegare, ogni volta che appariva possibile, la fenomenologia elettrica alla rappresentazione microscopica dei processi, in accordo con i risultati della ricerca illustrata in questa tesi. Raccordare i livelli micro e macro di descrizione dei fenomeni non solo ha rappresentato un importante successo nello sviluppo della fisica, ma appare anche un possibile modo per affrontare le diffuse e persistenti difficoltà che gli studenti incontrano nel comprendere il significato fisico delle grandezze in gioco ed il ruolo dei modelli interpretativi microscopici. Ciò rappresenta un passo operativo verso la comprensione e l'uso dei modelli microscopici, che rappresenta un obiettivo della ricerca illustrata in questa tesi.

### **2.2.1 Tensione e corrente**

La tensione della batteria  $V$  viene proposta inizialmente come grandezza che promuove il passaggio di corrente. Usando il reostato a filo (fig. 1) per variare la luminosità della lampadina, gli insegnanti osservano che la caduta di tensione si ripartisce uniformemente in ogni parte della lunghezza del filo conduttore percorso da corrente.

Quindi la caduta di tensione avviene in rapporto alla lunghezza del filo  $L$  del reostato. Questa proprietà consente di individuare una nuova grandezza:

$$G=V/L$$

L'introduzione di  $G$  in questa fase è importante dal punto di vista metodologico, per mostrare come avviene che nuove grandezze e nuovi significati emergano dalla relazione tra grandezze note.

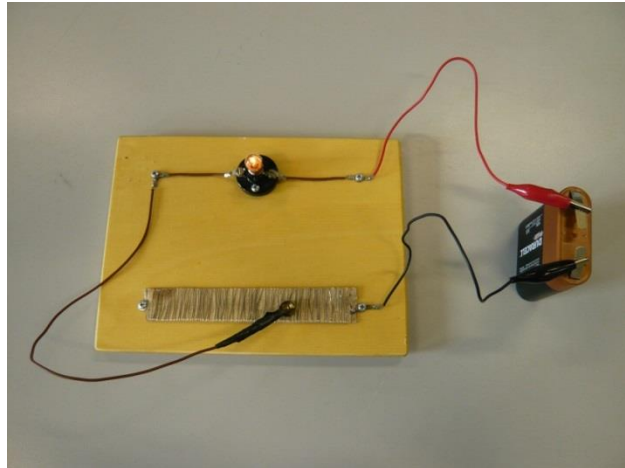


Figura 1 - reostato (mostra GEI)

E' importante ai fini di un percorso verticale richiamare il contesto delle grandezze elettrostatiche (a livello di triennio secondario) evidenziando come  $G$  abbia un importante significato fisico: rappresenta l'intensità del campo elettrico presente nel filo conduttore percorso da corrente.

Usando la luminosità della lampadina come rivelatore di corrente, il fenomeno osservato usando il reostato si può spiegare affermando che la corrente  $I$  nel filo è proporzionale a  $V/L$ ,

$$I \propto V/d \propto G$$

La grandezza  $G$  *promuove* il passaggio di corrente, in accordo con la visione fisica.

La riflessione sul livello microscopico dei processi è utile per interpretare anche altri fenomeni che di seguito si osservano: il cambiamento della luminosità della lampadina al variare di lunghezza o sezione del filo conduttore che si usa per chiudere il circuito, a parità di tensione. Aumentando la sezione  $A$  del filo, la corrente aumenta: si può allora pensare alla corrente come al passaggio di particelle attraverso una porta, grande quanto la sezione del filo: attraverso una porta larga, nello stesso intervallo di tempo, passano più particelle. Per tener conto del nuovo fenomeno, la relazione precedente va riscritta

$$I \propto VA/L$$

Essa implica anche

$$I \propto AG$$

Una importante informazione sulla costante (a temperatura costante) di proporzionalità che compare in questa relazione viene fornita dalla differenza di luminosità della lampadina, che segnala una diversa corrente, maggiore nel filo di rame e minore nel filo di costantana di stessa sezione e lunghezza. Ciò indica che tale costante descrive una proprietà caratteristica del materiale di facilitare/ostacolare la conduzione di corrente. La proprietà caratteristica del materiale è la resistività  $\rho$  in termini della quale si può scrivere la legge di Ohm, che diversi autori in letteratura (Psillos et al., 1988; Duit & von Rhöneck, 1998) ritengono essere la base fisica irrinunciabile nella trattazione dei circuiti elettrici:

$$I = V A / \rho L$$

Le insegnanti osservano che l'allungamento del filo di rame non produce variazioni apprezzabili della luminosità della lampadina. Ciò approssima un conduttore ideale, come i fili disegnati negli schemi dei circuiti, che trasferisce la tensione senza variazioni.

### 2.2.2 Carica e resistenza

Presentare differenti strade per costruire il concetto di carica elettrica favorisce l'apprendimento (Seifert & Fischler, 2003). Anche tenendo presente lo sviluppo storico delle idee, si sono dunque scelti 2 contesti di ragionamento e sperimentazione: elettrochimico ed elettrotermico. Alla base di questa scelta c'è il tentativo di utilizzare il livello microscopico per affrontare *ab initio* le concezioni alternative rilevate in letteratura, in particolare il diffuso e persistente "modello della consumazione della corrente" (Osborne, 1983; Shipstone et al., 1988) e il ragionamento locale (Cohen et al, 1983; Liégeois & Mullet, 2002), e sequenziale (Closset, 1984) ad esso collegati, sopra indicati.

Nel contesto elettrochimico, viene utilizzata una cella elettrolitica (cap. X.7). La pila produce e mantiene una tensione elettrica costante, per tempi relativamente lunghi, tra i suoi terminali. Nonostante la carica non sia visibile, la cella elettrolitica permette di visualizzare gli effetti del passaggio della carica elettrica nel circuito. Si osserva in particolare che il volume di gas sviluppato in ciascuna provetta è proporzionale al tempo trascorso dalla chiusura del circuito. Si può pensare che il gas sviluppato sia proporzionale alla carica che ha attraversato il circuito: quindi si ha un ritmo costante del passaggio di carica, ciò che può essere definito *corrente*:

$$I = \Delta q / \Delta t$$

in accordo con l'indicazione dell'amperometro, che segnala una corrente costante nel circuito. Si esplorano le proprietà della carica elettrica: la carica elettrica si *consuma* attraversando il circuito? Utilizzando le misure dei volumi del gas prodotto nell'elettrolisi in diversi circuiti (fig. 2): 2 celle in serie:  $V_A=V_B$ ; due celle in parallelo + 1 in serie:  $V_A+V_B=V_C$  (V indica il volume) si stabilisce che la carica elettrica si conserva.

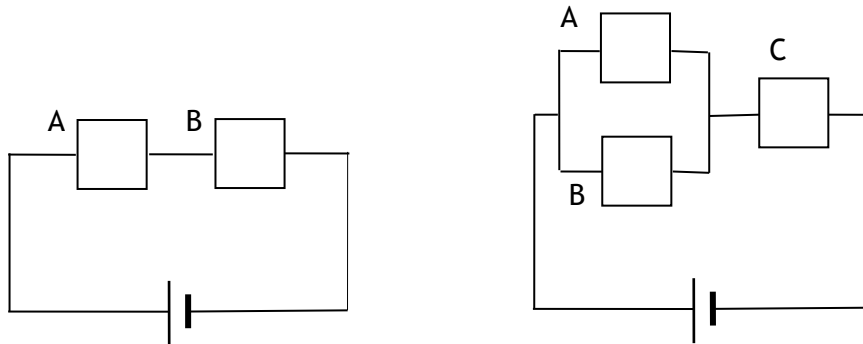


Figura 2 - circuiti con celle elettrolitiche

Nel contesto elettrotermico, si osserva il riscaldamento di un resistore ceramico (cap. X.7). L'andamento lineare della temperatura nel tempo riportato dal sensore segnala un ritmo costante di aumento della temperatura. Si può pensare che la temperatura del cilindretto è direttamente proporzionale alla carica che si è spostata nel circuito. Ciò è in accordo con l'indicazione di una corrente costante data dall'amperometro. A questo punto si innesta la riflessione sul processo microscopico che può rendere conto del riscaldamento del resistore.

L'esame dei grafici mostra che nello stesso intervallo di tempo la quantità di carica che si sposta nel circuito è differente in resistori differenti. Quindi, a parità di tensione applicata, il movimento della carica è differente in resistori differenti. Ciò fornisce una informazione importante sui processi microscopici che determinano la corrente in materiali diversi: esiste una relazione tra struttura del resistore e corrente elettrica (carica in moto). Per prevedere la corrente nel resistore è necessario conoscere un'altra grandezza che descrive questa interazione: la resistenza elettrica, che dipende dalla struttura del materiale e dalle sue caratteristiche geometriche, come si è visto utilizzando i fili. La formalizzazione del concetto ha la sua base nella legge di Ohm già introdotta nella forma  $I=VA/\rho L$  che lega la corrente (effetto) alla tensione (causa), per cui appare naturale definire la resistenza  $R$  come reciproco della costante di proporzionalità tra  $I$  e  $V$  in tale legge:

$$R = \rho L/A$$

Il contesto elettrotermico si rivela utile per affrontare il nodo relativo alla differenziazione tra tensione e energia (Psillos et al., 1988): a parità di tensione della batteria, a resistori differenti viene trasferita nello stesso tempo una diversa energia, in quanto il ritmo di aumento della loro temperatura è differente.

### 2.3 Analisi

Gli insegnanti hanno inserito nella loro progettazione i seguenti concetti: tensione, corrente, conduttori/isolanti, carica elettrica, con livelli di approfondimento differenziati in ordine all'età degli studenti a cui sono rivolti. Quelli della scuola dell'infanzia hanno usato fili conduttori, batterie, lampadine per mostrare la necessità della chiusura del circuito e la diversa conducibilità dei materiali. Il contesto elettrochimico e elettrotermico hanno suscitato difficoltà di gestione del materiale sperimentale. I due percorsi progettati hanno la stessa struttura concettuale ma si differenziano per la scelta degli esperimenti. In particolare un'insegnante ha trovato adatto il gioco *Sapientino* per illustrare la necessità della chiusura del circuito. L'insegnante della scuola media ha affrontato anche aspetti della relazione formale tra corrente e tensione e circuiti più complessi con collegamenti in serie e in parallelo.



Figura 3 - scuola dell'infanzia

La metodologia utilizzata dagli insegnanti di scuola dell'infanzia prevede i seguenti passi:

- 1) indagine delle idee dei bambini sull'elettricità: conversazione in gruppo con giro di parola;
- 2) disegnare l'elettricità;

- 3) prevedere-fare-rappresentare-ridiscutere in gruppo, confrontando le previsioni con i risultati dell'azione;
- 4) lavoro individuale, a coppie o in piccolo gruppo sui circuiti.

Uno dei percorsi è stato strutturato in 6 attività che riprendono quattro esperimenti sui circuiti (fig. 3 e 4) realizzati mediante materiali autoprodotti.

Le due maestre dell'infanzia hanno provveduto ad eseguire una rilevazione preliminare delle idee dei bambini sull'elettricità, che è stata presentata e discussa nel terzo incontro. Queste due insegnanti ritengono importante mettere in mano ai loro bambini una batteria, due fili conduttori e una lampadina, chiedendo loro di accenderla. Una di loro introduce l'attività attraverso il racconto di un burattino-lampadina sul folletto Corrente.

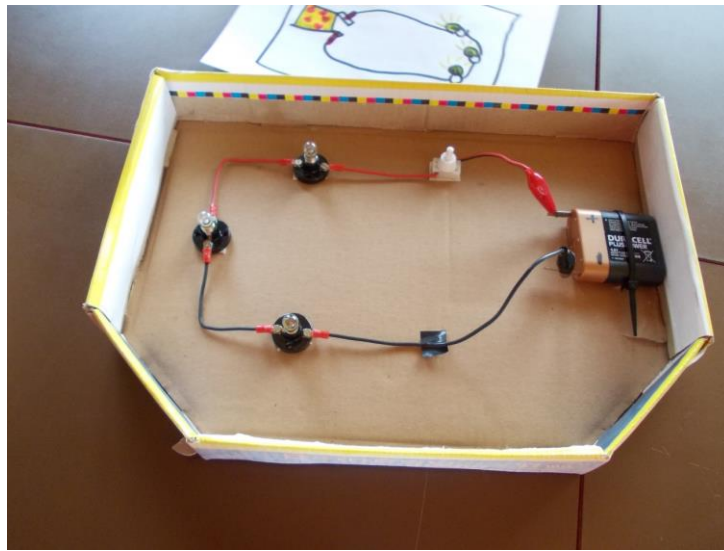


Figura 4 - materiali prodotti

Nella traduzione didattica delle proposte mediante narrazioni ed analogie, a volte molto belle sul piano immaginativo, emergono alcuni problemi da discutere con gli insegnanti perché possano porre all'attenzione dei bambini i limiti delle analogie stesse. Vediamo due casi.

La bella narrazione animistica che segue comporta l'idea di corrente come entità (al posto delle particelle cariche) in movimento nel filo conduttore.

*C'era una volta Corrente, un folletto magico che viveva dentro ad un filo. Questo folletto camminava e correva dentro il filo ma non poteva assolutamente saltare. Per muoversi aveva bisogno di energia. L'energia gliela forniva la batteria. Siccome Corrente non poteva saltare, doveva avere la strada senza interruzioni, e quando la*

*strada era unita lui si divertiva molto a camminare e a correre e così facendo mi accendeva.*

Per spiegare la differente luminosità della lampadina nel reostato l'insegnante introduce una analogia tra la tensione e la Nutella: *se spalmo la stessa quantità di Nutella su un panino lungo il gusto sarà meno intenso che spalmandola su un panino corto. Quindi in un filo lungo l'intensità della corrente è minore.* Se ciò rappresenta bene la caduta di potenziale lungo il filo, il gusto per identificare la corrente ne fa perdere il ruolo in termini di flusso di carica.

Le insegnanti prevedono che i loro bambini penseranno che l'energia è consumata. Per superare questa concezione intendono presentare oggetti di uso comune non come *consumatori* ma come *trasformatori* di energia: la lampadina converte l'energia elettrica in energia luminosa e calore; il tostapane converte l'energia elettrica in calore del tostapane e del pane, il gioco *Sapientino*, in cui la chiusura del circuito genera un suono, converte l'energia elettrica in energia acustica.

Il progetto progettato dall'insegnante di scuola media e sviluppato in tre classi terze accoglie molti aspetti presentati nel laboratorio: parte dall'elettrostatica come contesto per introdurre il concetto di carica libera nei metalli, utilizza l'elettrolisi per definire la corrente elettrica a partire dallo sviluppo di gas osservato, e poi tratta in modo esteso i circuiti elettrici (11 schede), inserendo le riflessioni sul livello microscopico quando ritenute utili per l'interpretazione della conducibilità dei diversi materiali. L'insegnante confronta i circuiti in serie e parallelo anche per quanto riguarda la composizione delle tensioni delle batterie e prevede di far utilizzare agli studenti l'applet *Circuit-construction-kit-dc\_it (PhET Simulation)* per supplire alla carenza di materiale. La simulazione consente infatti di realizzare diversi circuiti con fili conduttori, batterie, interruttori e lampadine e di studiarne il comportamento con amperometri e voltmetri. Viene rivolta attenzione anche al fenomeno del cortocircuito, che l'insegnante ritiene affascinanti i ragazzi. L'insegnante riprogetta in itinere alcuni segmenti del percorso per affrontare difficoltà rilevate nell'apprendimento in classi terza media di diverse sezioni, in particolare la concezione della batteria come sorgente di corrente indipendente dal circuito utilizzato. Attraverso misure di corrente in circuiti costituiti da due lampadine uguali collegate in serie oppure in parallelo alla stessa batteria gli studenti determinano che la corrente erogata dalla batteria dipende dalla topologia del circuito in cui è inserita.

## 2.4 *Discussione*

I percorsi presentati hanno una estesa base sperimentale che comprende anche la fenomenologia elettrostatica, data anche la facilità di implementazione.

Il laboratorio insegnanti IDIFO3 sulla *Conduzione elettrica* ha realizzato le tre modalità della formazione: a) metaculturale, attraverso la comprensione concettuale delle grandezze fondanti (carica, tensione, corrente, resistenza); b) esperienziale, attraverso situazioni sperimentali problematiche sui nodi di apprendimento; c) situata, attraverso la sperimentazione di percorsi didattici elaborati a partire dalle proposte presentate dal ricercatore (co-progettati), di cui costituiscono una prima validazione.

Le insegnanti hanno costruito schede con domande aperte per raccogliere idee e ragionamenti dei ragazzi su elementi specifici della conduzione elettrica; hanno condotto indagini sulle idee spontanee dei ragazzi di scuola dell'infanzia, elementare e media in relazione alla conduzione elettrica; la ricca documentazione del lavoro svolto costituisce una base di discussione e progettazione anche per altri insegnanti.

Sulla base dei dati raccolti in forma scritta ed audioregistrata nel corso dell'attività si formulano le risposte alle domande di ricerca:

RQ1) il laboratorio è stato produttivo sui tre seguenti aspetti: 1) analisi delle idee di senso comune in relazione al superamento delle difficoltà di apprendimento degli studenti; 2) strutturazione di sequenze di ragionamento coerenti che dalla fenomenologia costruiscono relazioni, giustificazioni e interpretazioni. Ad esempio: un insegnante propone di far eseguire “esperimenti con diversi materiali per introdurre operativamente le parole *conduttore* e *isolante*” e interpreta la diversa luminosità della lampadina attraverso l'utilizzo di un modello microscopico; 3) crescita del livello di professionalità degli insegnanti nell'educazione scientifica dimostrata dalla loro capacità di riconoscere i nodi di apprendimento e di progettare strategie specifiche per affrontarli.

RQ2) la co-progettazione ha permesso di discutere: 1) la scelta degli esempi e il loro ruolo in quanto correlati al contenuto e/o ai metodi dell'insegnamento; 2) la scelta di modelli e di analogie e il modo in cui sarebbero stati utilizzati in classe; 3) la riflessione su contenuti e metodologie realizzando il raccordo ricerca-scuola auspicato dalla letteratura.

Un elemento critico individuato dalle insegnanti è la consapevolezza di carenze nelle conoscenze disciplinari di fisica, in particolare per quanto riguarda gli aspetti microscopici della conduzione elettrica.



### **3. Attività con insegnanti in formazione di scuola primaria**

Due sessioni di tre ore ciascuna con dimostrazioni sperimentali sulla conduzione elettrica sono state svolte nel marzo 2012 all'interno del corso *Laboratorio didattico* rivolto agli studenti del 2° anno del corso di laurea in Scienze della Formazione dell'Università di Udine per futuri insegnanti di scuola primaria. Il corso è stato frequentato da 132 studenti di età intorno ai 21 anni che avevano visitato la mostra GEI con particolare attenzione alle proposte didattiche sui circuiti elettrici.

Strategie di formazione insegnanti di tipo PCK (par. 1) hanno guidato la progettazione dell'intervento: è stato proposto agli studenti un percorso laboratoriale sulla fenomenologia della conduzione elettrica al fine di attivare la costruzione di competenze sugli specifici contenuti (*Content Knowledge*) e per esplorare i concetti rilevanti e i correlati nodi di apprendimento attraverso la diretta esperienza di come si manifestano (*Pedagogical Knowledge*). L'integrazione di queste conoscenze è stata valutata in termini di concetti e nodi considerati e di proposte per affrontarli, attraverso la discussione dei percorsi presentati dai futuri insegnanti in sede di esame finale.

Gli studenti hanno sperimentato concretamente in gruppi costituiti da 3-4 persone affrontando i seguenti argomenti: A) chiusura del circuito, bipolarità di pila e lampadina; B) ruolo di batteria, fili conduttori, lampadina; C) modelli microscopici di conduzione elettrica.

Il punto di partenza della trattazione didattica è il riconoscimento delle grandezze fisiche (tensione e corrente) necessarie per la descrizione del comportamento del circuito come sistema di elementi interagenti (Psillos et al., 1988). Tuttavia il livello microscopico sembra necessario per superare il punto di vista funzionale e passare dalla didattica delle "istruzioni per l'uso" alla spiegazione dei fenomeni, cioè passare dalla descrizione di *come* funziona un circuito al *perché* funziona.

Per monitorare i ragionamenti degli studenti sulle attività sperimentali sono state somministrate schede individuali operative. Per rilevare i concetti del percorso ritenuti più importanti e i nodi ritenuti critici rispetto ai concetti da apprendere sono state somministrate schede individuali su concetti e nodi.

I dati raccolti sono stati analizzati per rispondere alle seguenti domande di ricerca:

- RQ1) In quale misura i concetti e i nodi indicati dagli studenti coincidono con quelli riconosciuti come importanti in letteratura?
- RQ2) Rispetto ai concetti e ai nodi riconosciuti come importanti quali sono stati aggiunti dagli studenti?

RQ3) In quale misura le attività proposte hanno consentito agli studenti di integrare nei loro percorsi *Pedagogical* e *Content Knowledge*?

### 3.1 Laboratorio

Partendo dall'esplorazione di semplici circuiti elettrici, il primo obiettivo di chi apprende è la comprensione del funzionamento del circuito. Si consegnano fili conduttori, batterie e lampadine agli studenti chiedendo di accendere la lampadina. Nella prima fase di lavoro individuale ciascuno studente riporta un'ipotesi sulla propria scheda e la spiega. Gli studenti confrontano i propri modelli interpretativi con quelli dei bambini (Osborne, 1983): *unipolare*, in cui il circuito non è chiuso; *scontro di correnti*, in cui i versi della corrente nei due rami del circuito sono opposti; *consumazione* della corrente nella lampadina.

Qualunque apparecchio elettrico deve essere inserito in un circuito chiuso affinché funzioni: questa osservazione suggerisce che quando un apparecchio elettrico è in funzione qualcosa si muove nel circuito. Si richiama la conoscenza dell'elettrostatica: 1) qualcosa chiamato carica elettrica è già presente nei corpi ed è libero di muoversi nei metalli; 2) la carica elettrica è di due tipi, positivo e negativo; 3) viene messa in moto in un elemento di un circuito applicando una tensione elettrica.

Gli studenti confrontano le proprie rappresentazioni grafiche di cosa accade all'interno del filo conduttore quando la carica si sposta in esso con i disegni dei bambini (Fera & Michelini, 2012). In questa fase si rileva la visione degli studenti sulla natura particellare della materia e come questa è utilizzata per rappresentare il livello microscopico del processo di passaggio della carica elettrica nel filo metallico. Gli studenti riportano sulla scheda le loro idee sulla disposizione degli atomi nei metalli come il rame e sulla libertà di movimento degli elettroni. Si mostra la diversa luminosità della lampadina al variare dei parametri geometrici del filo conduttore, lunghezza e sezione, e del materiale, utilizzando fili di rame e di costantana (cap. X.7). In ciascun passo della dimostrazione sperimentale viene chiesto agli studenti di considerare quali proprietà delle particelle che costituiscono la materia possono essere utilizzate per spiegare i fenomeni osservati. Nel caso della conduzione elettrica, il modello fisico considera la carica elettrica costituita da particelle. Le particelle non necessariamente si spostano in presenza di una tensione elettrica applicata ad un corpo, per esempio collegandone gli estremi ad una pila. Lo spostamento delle particelle dipende da tre fattori: 1) tensione applicata; 2) carica elettrica, che per l'elettrone è una proprietà intrinseca; 3) libertà (mobilità) nei differenti corpi, determinata dai

processi di interazione a livello microscopico con altre particelle che costituiscono la struttura del corpo.

Tre differenti contesti fenomenologici possono essere visti come effetti del passaggio di particelle cariche nei corpi: 1) circuiti (la lampadina si accende); 2) elettrochimico (si sviluppano dei gas); 3) termoelettrico (un resistore si scalda). Nei tre contesti considerati gli studenti osservano nel tempo: 1) un ritmo costante di diffusione di luce (nella lampadina); 2) un ritmo costante di produzione di gas (nell'elettrolisi); 3) un ritmo costante di aumento della temperatura (nel riscaldamento). Ciò indica un ritmo costante del passaggio delle particelle che trasportano la carica elettrica: una corrente elettrica costante. Questo aspetto è confermato dall'osservazione che la lancetta dell'amperometro resta ferma durante lo svolgimento dei fenomeni. Ciò può essere visto come moto ordinato di particelle portatori di carica nel circuito.

Il fatto che il passaggio della corrente in una soluzione elettrolitica produce uno sviluppo di gas indica una connessione tra materia e carica elettrica, che rafforza il modello microscopico.

L'elettrolisi può essere utilizzata anche per dimostrare l'importante proprietà di conservazione della carica elettrica. Considerando lo sviluppo di volumi uguali di gas in due celle elettrolitiche A e B in serie e lo sviluppo di volumi di gas in due celle in parallelo disposte in serie ad una terza cella C (fig. 2): si osserva che  $V_A=V_B$  nel primo caso e  $V_A+V_B=V_C$  nel secondo.

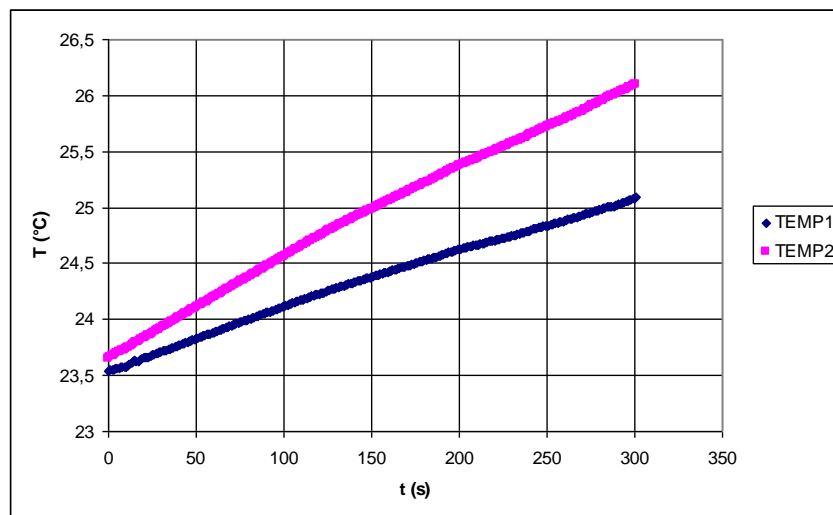


Figura 5 - riscaldamento di resistori diversi

Il riscaldamento del resistore indica un processo di trasferimento di energia che può essere compreso in termini di interazione a livello microscopico tra le particelle cariche in moto e quelle che costituiscono la struttura del resistore. Il differente tasso di riscaldamento indica che l'interazione è differente in resistori differenti (fig. 5),

analogamente alla differente luminosità della lampadina osservata in fili conduttori di materiale differente con ugual lunghezza e spessore. Ciò costituisce la base concettuale della resistenza.

### 3.2 Analisi

L'analisi dei dati raccolti sulle schede compilate dagli studenti è stata condotta in modo qualitativo, organizzando in categorie i concetti e i nodi individuati (par. II.2.4).

#### SCHEDE OPERATIVE

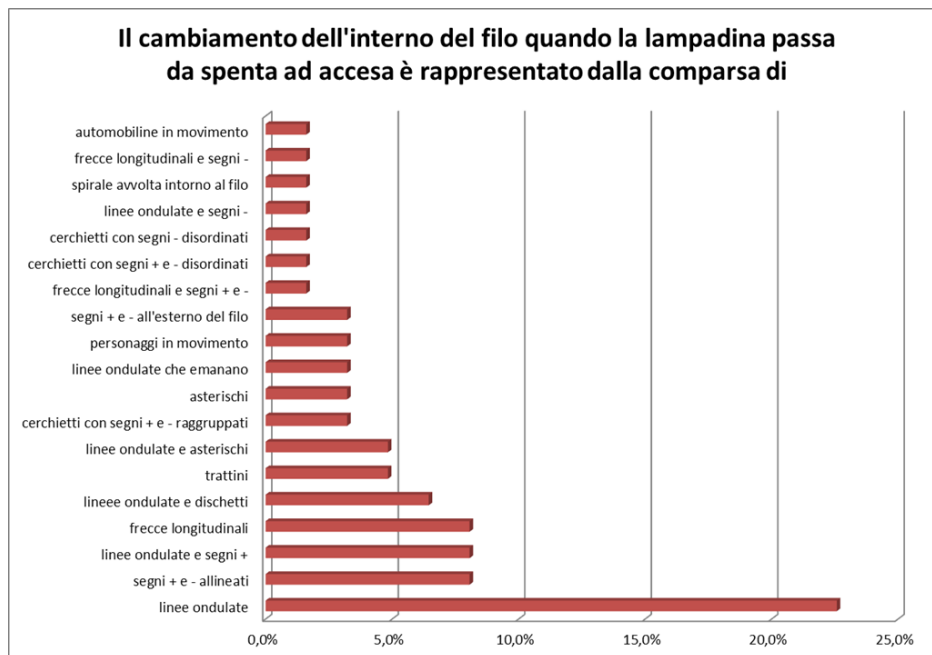


Figura 6 - categorie microscopiche

Dei 132 studenti coinvolti, solo l'8% riconosce la necessità della chiusura del circuito per accendere la lampadina. Il 55% degli studenti ritiene che per accendere la lampadina sia necessario fare arrivare ad essa qualcosa che viene definito corrente/energia/elettricità/carica. Il 58% descrive il procedimento attuato nei termini seguenti: "Collegiamo un polo della batteria con una estremità della lampadina e così per l'altro". Gli aspetti problematici di questa fase vengono individuati nel modo di collegare i fili (30%) oppure nel riconoscere la bipolarità della lampadina (23%), della batteria (4%). La maggioranza relativa degli studenti (35%) spiega il funzionamento del circuito affermando che i fili trasferiscono energia (28%) oppure calore (7%) alla lampadina, mentre un altro 25% riconosce la luminosità della lampadina come indicatore del passaggio nel circuito di qualcosa che viene chiamato corrente/elettricità/carica. La batteria è vista come un erogatore di energia (42%),

corrente (17%), carica (14%) oppure come contenitore di qualcosa che chiamano energia/corrente/carica. Solo il 4% individua la batteria come oggetto che mantiene una differenza di potenziale costante tra i suoi terminali. Il ruolo dei fili è di: trasmettere l'energia (42%), condurre la corrente (38%), trasportare la carica (15%). Il ruolo della lampadina è di: trasformare corrente/energia/carica in luce (32%), mostrare il passaggio di corrente/energia/carica (11%).

19 tipologie di segni differenti (fig. 6) indicano enti presenti all'interno del filo conduttore. Il cambiamento dell'interno del filo quando la lampadina passa da spenta ad accesa è rappresentato dalla comparsa di simboli che indicano la presenza di: onde (53%), particelle (29%), movimento (18%). Il cambiamento dell'interno del filo passando dal rame al ferro, con conseguente diminuzione di luminosità della lampadina, per quanto riguarda gli enti introdotti all'interno del filo è rappresentato dalla: rarefazione (62%), permanenza (11%), modifica di dimensioni/aspetto/disposizione (10%), scomparsa (7%), introduzione di nuovi enti (7%), concentrazione (3%). Il cambiamento dell'interno del filo passando dal filo lungo a quello corto, con conseguente aumento di luminosità della lampadina, per quanto riguarda gli enti introdotti all'interno del filo è rappresentato dalla: concentrazione (58%), modifica di dimensioni/aspetto/disposizione (18%), permanenza (16%), rarefazione (3%), scomparsa (2%), introduzione di nuovi enti (2%). Il cambiamento dell'interno del filo passando dal filo grosso a quello sottile, con conseguente diminuzione di luminosità della lampadina, per quanto riguarda gli enti introdotti all'interno del filo è rappresentato dalla: rarefazione (37%), permanenza (34%), modifica di dimensioni/aspetto/disposizione (24%), concentrazione (3%).

#### CONCETTI E NODI

Le fig. 7 e 8 illustrano i concetti ritenuti importanti dagli studenti e i nodi ritenuti critici rispetto ai concetti da apprendere.

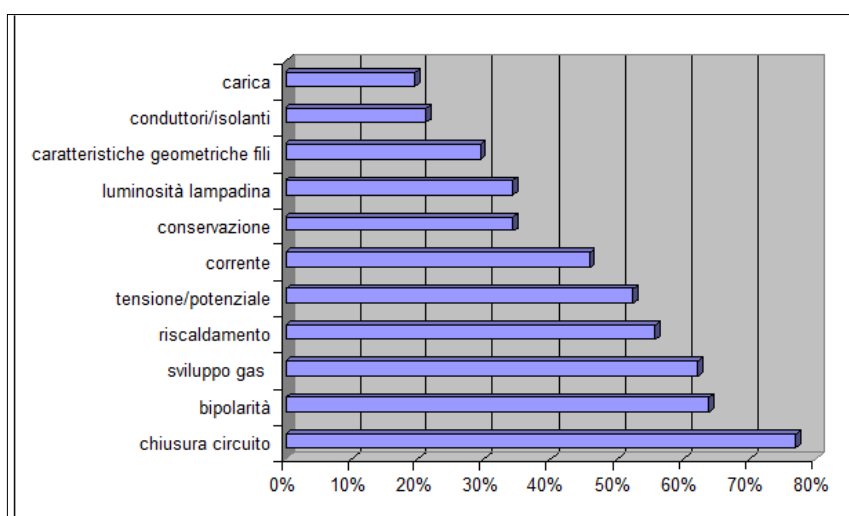


Figura 7 - concetti ritenuti importanti dagli studenti

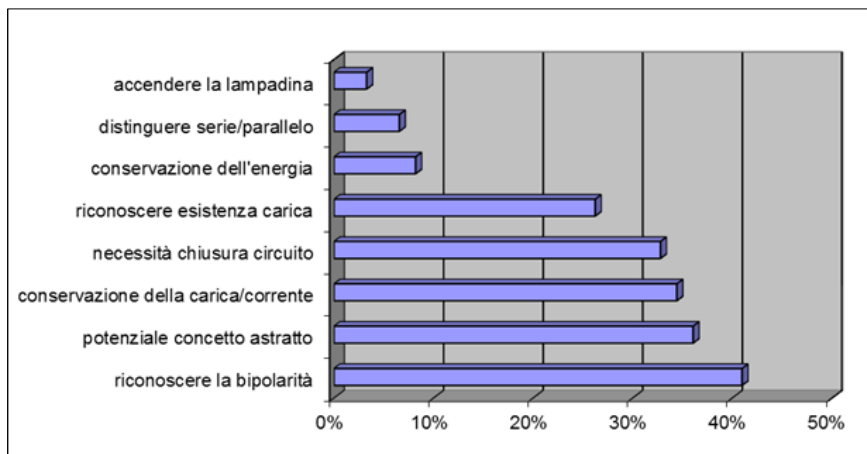


Figura 8 - nodi critici rispetto ai concetti da apprendere

## PERCORSI

Sulla base degli stimoli offerti sono stati presentati dagli studenti come lavori di gruppo 6 percorsi sulla conduzione elettrica rivolti alla scuola primaria, che qui vengono analizzati. Tutti i percorsi, eccetto uno, sono rivolti alla classe quinta elementare. Sul piano dei contenuti, in 3 percorsi viene affrontato il contesto elettrostatico per introdurre il concetto di carica elettrica mentre negli altri 3 percorsi si trattano direttamente semplici circuiti dal punto di vista funzionale approfondendo il ruolo degli elementi (interruttore, fili conduttori, batteria). In un percorso si prevede di trattare anche i collegamenti in serie e parallelo. Sul piano metodologico, i futuri insegnanti dichiarano di voler fondare le conoscenze partendo dall'esplorazione di fenomeni facili da osservare utilizzando oggetti di uso quotidiano e prevedono di impegnare i bambini in attività diverse: accendere e spegnere dispositivi elettrici per riconoscere la chiusura/apertura del circuito; distinguere oggetti isolanti e conduttori osservando la diversa luminosità della lampadina quando vengono utilizzati per chiudere il circuito; costruire giochi (come *Sapientino*) basati su collegamenti elettrici; smontare un circuito ed inserire in esso un nuovo elemento (ad esempio un filo conduttore di diverso materiale); costruire una pila con elementi composti da una moneta da 5 centesimi ed una rondella zincata tra cui è interposto un dischetto di carta assorbente imbevuto di aceto ed utilizzarla per accendere un led; sentire un effetto del passaggio della corrente sulla propria lingua interposta tra gli elettrodi di una batteria da 4,5 V.

Uno dei percorsi utilizza l'analogia idraulica per la corrente.

Una mappa concettuale (fig. 9) riportata da un percorso progettato dagli studenti ne illustra lo sviluppo. La terminologia "circuito chiuso/aperto" si presta a fraintendimenti...

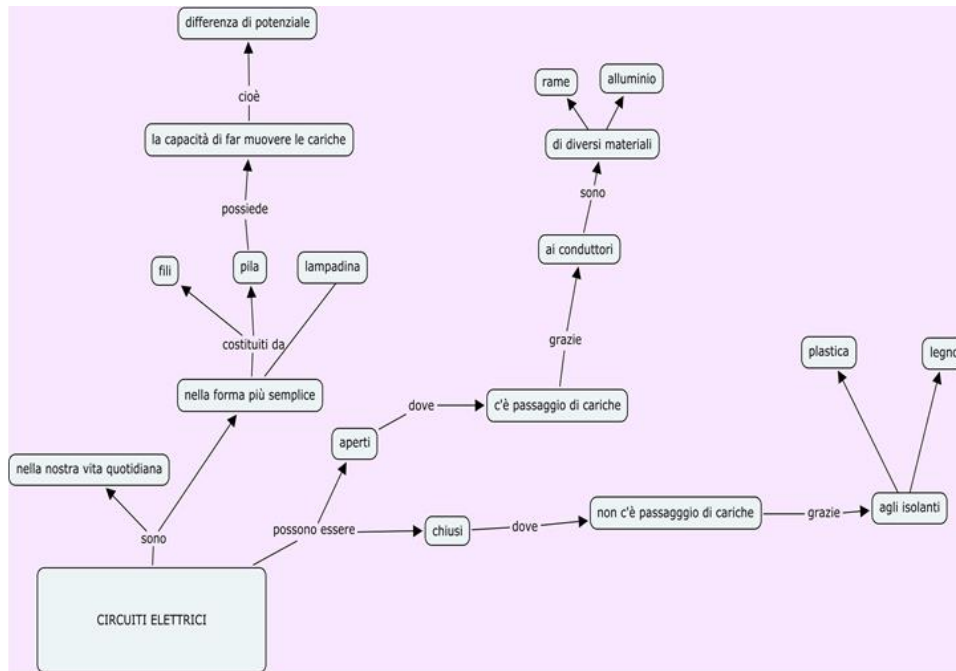


Figura 9 - mappa concettuale

### 3.3 Discussione

Circa un terzo degli studenti universitari utilizza un indefinito concetto di energia come referente per interpretare i fenomeni osservati. Questo esito si avvicina a quanto rilevato nella ricerca sulle concezioni dei bambini (cap. VI). Ciò indica che il ciclo di istruzione secondaria non ha modificato le idee spontanee degli studenti sulla conduzione elettrica. L'energia è contenuta/generata dalla batteria, si sposta nei fili come un'onda e viene trasformata nella lampadina. Questa visione si mantiene vicina più al livello descrittivo che esplicativo e non coglie gli aspetti principali del processo della conduzione elettrica, che vanno descritti non solo in termini di trasferimento e trasformazione di energia, ma anche illustrando il ruolo essenziale della carica elettrica e la sua natura particellare. In fisica il concetto di energia è legato al concetto di interazione, che nel caso della conduzione elettrica va ricondotta al livello microscopico. Gli studenti attivano effettivamente la riflessione a livello microscopico utilizzando fili conduttori di diverso materiale e di diverse caratteristiche geometriche per chiudere il circuito. Essi riconoscono la luminosità della lampadina come indicatore della intensità di corrente nel circuito e formulano ipotesi sulla presenza di enti all'interno del filo conduttore che giustificano la differente luminosità della lampadina in termini di concentrazione/rarefazione di questi enti. Gli studenti mostrano quindi una visione parziale dei processi di conduzione a livello microscopico in quanto hanno difficoltà nel contestualizzare la loro conoscenza del modello particellare della materia

ed utilizzarlo per spiegare semplici fenomeni elettrici, ad esempio perché una lampadina si accende quando è collegata ad una batteria.

I percorsi progettati dagli studenti consentono ai bambini di costruire una conoscenza operativa basata sull'esperienza diretta. Il ragionamento di senso comune non è sempre usato come punto di partenza per produrre l'evoluzione del modo di pensare del bambino, ma è piuttosto evocato come strategia per coinvolgerlo.

Due percorsi trattano i circuiti con coerenza e continuità concettuale; tre percorsi propongono la narrazione come elenco di nozioni non giustificate di: il concetto di campo elettrico partendo dalle interazioni osservate di oggetti elettrizzati per strofinio; l'esistenza e le proprietà degli elettroni di conduzione nei metalli; la corrente come movimento di particelle cariche. Non viene così realizzato il raccordo concettuale tra elettrostatica ed elettrodinamica attraverso il passaggio dalla visione della carica come fluido alla carica come proprietà delle particelle.

Sulla base dei dati raccolti in forma scritta ed audioregistrata nel corso dell'attività si formulano le risposte alle domande di ricerca:

- RQ1) Rispetto ai concetti riconosciuti come importanti (chiusura del circuito, bipolarità della lampadina, grandezze fisiche: carica, corrente, tensione, conservazione della carica) gli studenti si discostano significativamente dalle attese per due aspetti: a) pongono la carica come concetto poco rilevante, b) inseriscono tra i concetti le attività sperimentali (elettrolisi e riscaldamento del resistore). Rispetto ai nodi riconosciuti come importanti (necessità della chiusura circuito, riconoscere le grandezze fisiche, esistenza carica, raccordo con il livello microscopico) gli studenti hanno necessità di essere sostenuti per utilizzare gli strumenti concettuali di raccordo tra i diversi livelli, microscopico e macroscopico, di descrizione dei processi.
- RQ2) Circa un terzo degli studenti inserisce come nuovi concetti: luminosità lampadina, caratteristiche geometriche fili, distinzione tra conduttori e isolanti; meno del 10% degli studenti inserisce come nuovi nodi: conservazione dell'energia, distinguere collegamenti in serie/parallelo, accendere la lampadina. L'attenzione degli studenti si focalizza sugli aspetti macroscopici dei circuiti.
- RQ3) L'integrazione della conoscenza disciplinare con quella pedagogica nella competenza per l'insegnamento dello specifico argomento della conduzione elettrica è stata raggiunta dai futuri insegnanti in relazione ai seguenti nodi riconosciuti ed affrontati nei percorsi progettati: a) chiusura del circuito e bipolarità della lampadina, attraverso il coinvolgimento attivo dei bambini in



attività di costruzione del circuito; b) batteria come erogatore di corrente costante, attraverso l'osservazione della differente luminosità di due lampadine uguali collegate in serie o in parallelo alla stessa batteria.

Le attività realizzate con gli studenti risultano efficaci per superare l'idea spontanea della corrente come flusso di energia, per attivare esigenze esplicative e per rendere gli studenti consapevoli dei processi non analizzati. Emerge la necessità di completare la visione dei processi microscopici all'interno del filo conduttore approfondendo la discussione delle grandezze fisiche rilevanti per la comprensione dei fenomeni osservati.

#### **4. Attività con insegnanti in formazione di scuola secondaria**

##### **IL TIROCINIO FORMATIVO ATTIVO**

La disciplina dei requisiti e delle modalità della formazione iniziale degli insegnanti della scuola dell'infanzia, primaria e secondaria di primo e secondo grado italiana è stata radicalmente innovata con l'istituzione del Tirocinio Formativo Attivo (TFA, D. M. 249 del 10/09/2010). Si tratta di un corso di durata annuale, istituito dalle università, che attribuisce il titolo di abilitazione all'insegnamento a seguito di un esame finale, sostenuto davanti a una commissione mista composta da docenti universitari, un insegnante "tutor" in ruolo presso gli istituti scolastici e un rappresentante dell'Ufficio Scolastico Regionale.

Al fine dell'acquisizione di competenze disciplinari, psico-pedagogiche, metodologico-didattiche, organizzative e relazionali necessarie a far raggiungere

agli allievi i risultati di apprendimento previsti, il TFA prevede che il tirocinante:

- 1) riceva insegnamenti che intrecciano l'approccio disciplinare e l'approccio didattico in contesto laboratoriale;
- 2) riceva insegnamenti di materie psico-pedagogiche e di scienze dell'educazione;
- 3) svolga a scuola sotto la guida di un insegnante tutor un tirocinio comprendente una fase osservativa e una fase di insegnamento attivo.

Durante il corso il tirocinante progetta e sperimenta nella scuola un percorso di insegnamento/apprendimento, scegliendo ed elaborando materiali didattici, valutando la loro efficacia, facendo esperienza di un ampio spettro di metodi didattici e dell'impiego di tecnologie multimediali.

L'organizzazione del TFA dell'Università di Udine per l'insegnamento della Fisica nella scuola secondaria superiore ha accolto le raccomandazioni per la formazione insegnanti di fisica formulate nella conferenza Steps Two (Teaching Physics in Europe, 2011) che di seguito si riportano in quanto hanno orientato la ricerca illustrata in questa tesi. La

conferenza ha ripartito le competenze dell'insegnante di fisica di scuola secondaria superiore in quattro aree: disciplinare, didattica, pedagogica, sociale.

1) Area disciplinare

- a) Familiarità con concetti, ragionamenti e metodi utilizzati per risolvere i problemi delle aree più importanti della fisica
- b) Comprendere le più importanti teorie fisiche, la loro logica, la loro struttura matematica e la loro relazione con l'osservazione e l'esperimento
- c) Familiarità con le principali tecniche sperimentali, capacità di effettuare semplici esperimenti in modo indipendente e di raccogliere e interpretare i dati ottenuti da essi
- d) Possibilità di utilizzare la letteratura di ricerca in fisica e altre fonti di informazione per affrontare problemi specifici riportati dai media e/o derivanti da nuovi sviluppi della fisica e/o delle sue applicazioni
- e) Discutere i metodi e le procedure utilizzate nella ricerca in fisica, illustrare esempi specifici di esperienze di ricerca
- f) Conoscenza di base dello sviluppo storico della fisica e della sua importanza per la tecnologia e per le altre scienze

2) Area didattica

- a) Capacità di presentare natura e valori della scienza, il modo scientifico di pensare e ragionare, anche in contrasto con altri modi di conoscere, il linguaggio usato nella scienza e nella fisica
- b) Capacità di promuovere l'alfabetizzazione scientifica e la disposizione verso la ricerca e l'apprendimento attivo
- c) Capacità di spiegare i problemi fisici anche complessi utilizzando linguaggio e strumenti matematici adeguati per gli studenti, facendo uso di rappresentazioni diverse (ad esempio, verbali, visive, grafiche e matematiche) e mettendole in relazione ove possibile alle loro esperienze quotidiane
- d) Capacità di rispondere adeguatamente alle domande degli studenti sulla fisica restituendo un feedback costruttivo sul loro interesse e lavoro
- e) Capacità di progettare lezioni coerenti, tenendo conto degli standard curriculari, del quadro giuridico e normativo, dei problemi specifici di insegnamento della fisica nelle scuole secondarie
- f) Capacità di svolgere la progettazione nella pratica scolastica quotidiana, di scegliere materiali didattici adeguati al percorso, di riflettere sulle esperienze fatte e di utilizzarle per migliorare il proprio insegnamento;

- g) Conoscenza ed esperienza di un ampio spettro di metodi di insegnamento, in particolare della pianificazione ed esecuzione di dimostrazioni sperimentali e della conduzione di laboratori studenti
  - h) Utilizzare efficacemente computer e strumenti multimediali per l'insegnamento e l'apprendimento
  - i) Capacità di combinare differenti metodologie per ottimizzare motivazione e comprensione degli studenti
  - j) Conoscenza ed esperienza di differenti metodi di verifica e valutazione
  - k) Capacità di comprendere lo stile tipico di ragionamento degli studenti e di riconoscere le loro concezioni del mondo fisico, per identificare idee inadeguate e difficoltà concettuali e sviluppare strategie per superarli.
  - l) Riconoscere il ruolo del fattore di genere e di altri fattori specifici della classe nella motivazione e nell'apprendimento
- 3) Area pedagogica
- a) Conoscenza dei concetti pedagogici e psicologici di base su insegnamento, apprendimento, educazione e sviluppo cognitivo
  - b) Capacità di analizzare, comprendere e governare i processi pedagogici in contesto utilizzando strategie per valutare in itinere lo sviluppo intellettuale, sociale e personale del discente
  - c) Familiarità con strumenti ed metodi di insegnamento e capacità di applicarli per progettare situazioni di insegnamento, per diagnosticare difficoltà di apprendimento e per valutare i progressi verso il raggiungimento degli obiettivi pedagogici
  - d) Capacità di riflettere sul proprio ruolo di insegnante ed educatore, di imparare dall'esperienza a sviluppare ulteriormente le proprie competenze di insegnante
- 4) Area sociale
- a) Capacità di comunicare in modo efficace con gli studenti a livello individuale e di gruppo
  - b) Riconoscere e gestire problemi di apprendimento e relazionali
  - c) Capacità di gestire i conflitti, di creare in classe un clima che favorisca la motivazione, il successo nell'apprendimento e l'integrazione di tutti gli studenti nella classe
  - d) Capacità di comunicare in modo efficace con genitori, rappresentanti dei genitori e altre componenti del sistema scolastico

- e) Disponibilità e capacità di collaborare, sia con i colleghi insegnanti di fisica che con insegnanti di altre materie, al fine di coordinare e sviluppare l'insegnamento e per favorire il buon funzionamento della scuola.

Il TFA organizzato dall'Università di Udine per l'insegnamento della Fisica (A038) è stato frequentato da 15 corsisti di età differenziate, alcuni con esperienza di insegnamento. All'interno del tirocinio sono stati svolti nel maggio 2013 due incontri, il primo a carattere laboratoriale ed il secondo seminariale, sul tema della conduzione elettrica, con la finalità di favorire lo sviluppo nei futuri insegnanti delle competenze nell'area 1 (disciplinare) punti a, b, c, f.

Il laboratorio (primo incontro) ha presentato in prospettiva PCK (par. 1) le grandezze fisiche rilevanti per la conduzione elettrica. Il seminario (secondo incontro) ha illustrato la logica dello sviluppo storico dei modelli microscopici della conduzione elettrica. Il passaggio dai modelli classici a quello quantistico è stato affrontato focalizzando sulla relazione tra concetti e ragionamenti con osservazioni ed esperimenti.

#### IL QUESTIONARIO PCK SULLA CONDUZIONE ELETTRICA

Per analizzare e valutare come i futuri insegnanti concettualizzano il contenuto specifico della conduzione elettrica è stato proposto di compilare un questionario di tipo CoRe (Content Representation) adattato dal testo di Loughran, Berry & Mulhall (2012). Questi autori presentano la conoscenza pedagogica dei contenuti relativi alla conduzione elettrica secondo una impostazione che è molto vicina a quella adottata nella ricerca descritta in questa tesi in quanto rivolge molta attenzione agli aspetti microscopici ed al ruolo del campo elettrico nei conduttori. Le domande del questionario, per il cui rationale si rimanda a Loughran, Berry & Mulhall (2012, pag. 17-19), forniscono agli insegnanti lo stimolo per articolare la PCK sull'argomento della conduzione elettrica e per precisare i collegamenti tra contenuti disciplinari, apprendimento degli studenti, pratica didattica.

Il questionario presenta due assi: orizzontale su cui sono riportate le idee centrali ("big ideas") relative all'insegnamento della conduzione elettrica a livello di scuola secondaria superiore; verticale su cui sono riportate le domande su come il contenuto di ciascuna idea possa essere insegnato. Le idee centrali sono quelle considerate cruciali per lo sviluppo della comprensione dell'argomento negli studenti. In alcuni casi, una idea fondamentale nella scienza può essere fondamentale anche nell'insegnamento, ma non necessariamente si ha questa identità, in quanto il contenuto disciplinare va ripensato in prospettiva didattica (Shulman, 1986). Di seguito si riportano le idee centrali (asse orizzontale del questionario):

- A. Per ottenere la corrente elettrica, ci deve essere un circuito chiuso tra i terminali della batteria e l'utilizzatore.
- B. Una corrente elettrica è un flusso netto di particelle cariche in una direzione. I materiali che costituiscono il circuito contengono particelle cariche relativamente mobili.
- C. La batteria fornisce energia trasportata dal campo elettrico.
- D. Quando un circuito è percorso dalla corrente, l'energia fluisce dalla batteria all'utilizzatore.
- E. Una batteria crea un campo elettrico all'interno dei materiali che compongono il circuito. Questo campo causa la corrente quando il circuito è chiuso.
- F. Un circuito elettrico è un sistema in cui modifiche apportate a un elemento possono influire su altri elementi.
- G. Un voltmetro misura quanta energia è impegnata quando una unità di carica si muove da un punto di un circuito ad un altro.
- H. La luminosità di una lampadina dipende dalla velocità con cui l'energia è trasferita alla lampadina.

Le domande su come il contenuto di ciascuna idea possa essere insegnato (asse verticale del questionario) sono le seguenti:

- 1) Che cosa si vuole che gli studenti apprendano su questa idea
- 2) Perché è importante per gli studenti conoscere questo argomento
- 3) Quali altre informazioni si hanno su questo argomento (che non si propone agli studenti di conoscere)
- 4) Difficoltà / limitazioni collegate all'insegnamento dell'argomento
- 5) Conoscenze riguardo alle concezioni degli studenti che possono influenzare l'insegnamento dell'argomento
- 6) Altri fattori che influenzano l'insegnamento dell'argomento
- 7) Procedure di insegnamento e motivi specifici per l'utilizzo di queste in relazione all'argomento

Loughran, Berry & Mulhall (2012) sostengono che le risposte a queste domande costituiscono la conoscenza pedagogica dei contenuti (PCK) sulla conduzione elettrica in quanto rendono conto del perché questi contenuti sono importanti per l'apprendimento e collegano i contenuti da insegnare con le modalità del loro insegnamento.

Pertanto, allo scopo di monitorare la conoscenza pedagogica dei contenuti sulla conduzione elettrica è stato proposto ai corsisti di rispondere alle domande 1-7 del questionario di cui non è stata resa nota la fonte se non dopo la compilazione.

I dati raccolti sono stati analizzati per rispondere alle seguenti domande di ricerca:

- RQ1) Come i corsisti rappresentano la conoscenza pedagogica dei contenuti relativi alla conduzione elettrica?
- RQ2) In quale misura la PCK dei corsisti sulla conduzione elettrica coincide/si differenzia con quella riportata da Loughran, Berry & Mulhall?

#### **4.1 Laboratorio/seminario**

##### **1) LABORATORIO**

Tre differenti contesti fenomenologici: 1) circuiti (la lampadina si accende); 2) elettrochimico (si sviluppano dei gas); 3) termoelettrico (un resistore si scalda) consentono di osservare: 1) un ritmo costante di diffusione di luce (nella lampadina); 2) un ritmo costante di produzione di gas (nell'elettrolisi); 3) un ritmo costante di aumento della temperatura (nel riscaldamento). Ciò indica un ritmo costante del passaggio di carica elettrica: una corrente elettrica costante. Questo aspetto è confermato dall'osservazione che la lancetta dell'amperometro resta ferma durante lo svolgimento dei fenomeni. L'osservazione dello sviluppo di gas in due celle elettrolitiche A e B in serie e in due celle in parallelo disposte in serie ad una terza cella C (fig. 2) conduce a stabilire la legge di conservazione della corrente. La tensione della batteria viene introdotta attraverso un filmato che mostra due elettroscopi carichi con il pendolino interposto fermo. Utilizzando una sfera metallica con manico isolato si sposta la carica da un elettroscopio ad un altro. Di conseguenza il pendolino oscilla. L'oscillazione del pendolino indica uno spostamento di carica nel circuito che si osserva quando un agente esterno compie un lavoro  $W$  per spostare la carica  $Q$ . Quindi il lavoro compiuto dall'esterno promuove il passaggio di carica tra i due elettroscopi. L'effetto del lavoro esterno può essere visto come "spinta" sulla carica che si sposta nel circuito e misurato dalla tensione  $V=W/Q$  definita come lavoro compiuto per spostare l'unità di carica. Misure di corrente vs tensione in fili conduttori di differente lunghezza, sezione e materiale conducono a introdurre i concetti di resistenza e resistività e a stabilire le leggi di Ohm.

Questa introduzione fenomenologica alla conduzione elettrica nei solidi pone le seguenti questioni: qual è la natura di ciò che circola nei fili del circuito? Si tratta di onde o particelle? Se sono particelle, quali sono? Sono atomi o costituenti degli atomi? Come possono muoversi in un conduttore pieno? Quali sono le forze che le accelerano? Quali sono le forze che le rallentano? Qual è la velocità del loro movimento? Come il loro movimento è legato alle caratteristiche del materiale (composizione, legami chimici, ...) ed al suo stato (temperatura, pressione, ...)?

Rispondere a queste domande significa costruire una teoria microscopica della conduzione elettrica che superi i limiti del modello funzionale (Testa, 2008) fornendo una giustificazione della legge di Ohm e dell'andamento della resistività con la temperatura.

Una prima indicazione sulla natura della corrente viene fornita dall'esperimento di Thomson: in tutti i metalli sono presenti particelle di massa e carica invariabili che non sono atomi ma costituenti degli atomi, gli elettroni.

## 2) SEMINARIO

Il seminario intende proporre le risposte alle domande formulate nel laboratorio sugli aspetti microscopici della conduzione elettrica in termini di un modello. Elementi di un modello microscopico della conduzione elettrica sono: 1) il campo elettrico, 2) gli elettroni di conduzione, 3) gli ioni reticolari. Ogni modello specifica proprietà e interazioni tra questi elementi assumendo una teoria fisica di riferimento allo scopo di spiegare: a) perché la resistività di materiali differenti è differente, b) gli effetti del passaggio della corrente, come il riscaldamento, c) come e perché la resistività di un materiale varia con la temperatura, d) le leggi di Ohm.

Con riferimento allo sviluppo storico delle idee, vengono presentati il modello classico di Drude-Lorentz, quello semiclassico di Sommerfeld, quello quantistico di Bloch, la teoria delle bande di energia. Si focalizza sul passaggio dal modello classico a quello quantistico che presenta due aspetti chiave: 1) estensione del campo di validità del modello ad un intervallo di temperature più ampio per la stessa categoria di materiali; 2) estensione del campo di validità del modello a materiali di categoria differente (metalli, leghe, semiconduttori, isolanti).

## 4.2 Analisi

L'analisi dei dati raccolti in forma scritta è stata effettuata qualitativamente (cap. II) classificando in categorie le risposte scritte dei singoli corsisti (cap. XIII) alle domande 1-7.

### 1) *Che cosa si vuole che gli studenti apprendano*

Per avere corrente elettrica ci deve essere una differenza di potenziale (7/13), il circuito deve essere chiuso (5/13). Le particelle cariche non vengono aggiunte ai conduttori (5/13) e determinano la differenza fra materiali conduttori e non conduttori (4/13). Il campo elettrico generato dalla batteria (5/13) è responsabile del trasporto di energia (5/13), del moto delle cariche (3/13). La luminosità di una lampadina misura la potenza impegnata (7/13). Si vuole costruire una visione globale e non locale del circuito (5/13).

2) *Perché è importante per gli studenti:*

- A. Chiusura del circuito: per capire quando può aversi passaggio di corrente elettrica (3/13), per riconoscere un circuito e cosa significa chiuderlo (2/13)
- B. Particelle cariche: per avere un modello microscopico del passaggio della corrente all'interno del filo (4/13), per collegare la resistenza alle caratteristiche fisiche del materiale (1/13)
- C. Ruolo della batteria: per capire che l'energia è associata alla presenza del campo elettrico generato dalla batteria (5/13)
- D. Trasferimento di energia: per comprendere che anche i fenomeni elettrici nei circuiti sono regolati dalla legge di conservazione dell'energia (5/13)
- E. Campo elettrico: per capire il ruolo del campo nel passaggio della corrente (5/13)
- F. Circuito come sistema: per pensare al circuito come sistema di elementi interconnessi (10/13)
- G. Misura con voltmetro: per comprendere il significato fisico della grandezza misurata dal voltmetro (3/13)
- H. Potenza: per comprendere che maggiore potenza implica consumare più energia nello stesso intervallo di tempo (2/13)

3) *Quali altre informazioni si hanno che non si propone agli studenti di conoscere*

Struttura del generatore in termini di resistenza interna, trasformazione di energia, ricaricabilità, tensione continua/alternata (6/13). Relazione tra densità di corrente e velocità di deriva (5/13), dipendenza della resistività con la temperatura (2/13), esistenza di materiali non ohmici (1/13). L'utilizzo del voltmetro come strumento di misura altera la struttura del circuito elettrico (2/13). Principio su cui si basa l'emissione di luce in una lampadina (3/13).

4) *Difficoltà/limitazioni collegate all'insegnamento*

La corrente elettrica "non si vede" (2/13), rendere evidente che ci sono delle particelle cariche mobili (5/13), capire che l'energia è trasportata dal campo elettrico (4/13), la conservazione dell'energia e le sue trasformazioni (5/13), l'esistenza del campo elettrico all'interno del conduttore (10/13), mancanza dell'idea del circuito come sistema (4/13), collegare una misura di tensione a un'energia (3/13), distinguere energia e potenza (2/13).

5) *Conoscenze riguardo alle concezioni degli studenti che possono influenzare l'insegnamento*

Analogie idrauliche (4/13), natura e proprietà fisiche dei portatori di carica (3/13), confusione tra corrente, energia, tensione (2/13), idea di corrente consumata (2/13), corrente elettrica come causa della tensione (1/13), circuito aperto o chiuso



interpretato in termini del linguaggio comune (1/13), le cariche vengono create dalla batteria (5/13), corrente vista come grandezza esterna alla materia che attraversa (1/13), visione dell'utilizzatore che dissipa/produce energia (2/13), percezione di aspetti contraddittori tra corrente che "circola" ed energia trasferita (1/13), gli studenti pensano che gli strumenti di misura non perturbino il sistema (1/13), gli studenti confondono le grandezze potenza ed energia e quindi non tengono conto della variabile tempo (5/13).

*6) Altri fattori che influenzano l'insegnamento*

Uso del linguaggio comune, ad es. "ricarico la batteria" come se si mettessero dentro le cariche (3/13), gli apparecchi elettrici sono collegati alla presa di rete con un filo apparentemente unico (1/13), modello dell'atomo che ha in mente lo studente appreso negli studi ad es. di chimica (1/13), difficoltà nella comprensione del concetto di campo (3/13), abitudine a risolvere i circuiti come esercizi matematici (2/13), quando si acquista una lampada la potenza viene comunicata come una caratteristica indipendente dalla condizione di funzionamento (1/13)

*7) Procedure di insegnamento e motivi specifici per l'utilizzo di queste*

Osservare un circuito semplice per esplorare apertura e chiusura (8/13), lezione frontale/dialogica (6/13), analogia idraulica (1/13), osservare un circuito semplice in cui modifico gli elementi ad es. aggiungere resistenza in parallelo, cambiare lampadine (9/13), analogia tra energia potenziale gravitazionale ed energia potenziale elettrica (1/13)

**4.3 Discussione**

Sulla base dei dati raccolti in forma scritta ed audioregistrata nel corso dell'attività si formulano le risposte alle domande di ricerca:

RQ1) In relazione ai punti A-H riportati da Loughran, Berry & Mulhall i corsisti hanno preso in considerazione come nodi concettuali: per quanto riguarda l'aspetto macroscopico, vedere il circuito come un sistema di elementi interagenti, come pure i processi di trasformazione dell'energia che avvengono nel circuito; per quanto riguarda l'aspetto microscopico, l'esistenza di portatori di carica liberi e del campo elettrico all'interno del conduttore. Pertanto, gli elementi centrali per la conoscenza della conduzione elettrica che possono dar luogo a difficoltà per gli studenti sembrano essere stati individuati. Ampia e articolata risulta la rassegna delle concezioni degli studenti rilevanti per l'insegnamento, che spaziano dai modelli spontanei riportati in letteratura (Shipstone et al., 1988; McDermott & Shaffer, 1992) all'influenza sulle idee degli studenti del linguaggio

comune (per es. “chiudo” il circuito viene inteso come spegnimento, oppure “carico la batteria” suggerisce che si riempia di cariche) e di oggetti, quali il filo di collegamento alla rete degli apparecchi elettrici apparentemente unico. Per l’insegnamento degli aspetti microscopici della conduzione elettrica, sono considerate rilevanti dai corsisti le concezioni sulla struttura della materia acquisite dagli studenti nello studio della chimica. Tuttavia la consapevolezza del punto di vista degli studenti non viene integrata da strategie quali ciclo POE, simulazioni, role play, utili per affrontare i nodi concettuali: le strategie indicate si rifanno alla didattica tradizionale (lezione frontale, analogia idraulica) e non viene esplicitato come l’osservazione dei fenomeni riguardanti i circuiti possa condurre al superamento dei nodi.

RQ2) L’intersezione tra la PCK sulla conduzione elettrica come viene declinata dai corsisti e quella riportata da Loughran, Berry & Mulhall è molto ampia, in quanto riguarda circa l’80% delle considerazioni espresse. Tuttavia sono presenti elementi di differenziazione rilevanti, che di seguito si riportano.

Loughran, Berry & Mulhall rivolgono attenzione ad alcuni aspetti tralasciati dai corsisti: a) la definizione delle unità di misura delle grandezze fisiche, in particolare la corrente come  $C/s$  per rafforzare il concetto che si riferisce all’intensità del flusso di particelle cariche e la tensione come  $J/C$  per evidenziarne la relazione con l’energia. Per quanto riguarda la batteria, b) comprenderne il ruolo come sorgente di una quantità fissa di energia per unità di carica è essenziale per prevedere e spiegare il comportamento del circuito, c) l’idea del campo elettrico aiuta a spiegare come la batteria può influenzare simultaneamente tutte le particelle cariche mobili in un circuito; d) la lettura di un voltmetro collegato ad una batteria a circuito aperto misura l’energia per coulomb che la batteria può fornire, a circuito chiuso misura l’energia per coulomb effettivamente utilizzata dal circuito. Per quanto riguarda il livello microscopico: e) l’interazione tra gli elettroni di conduzione e gli ioni reticolari, che è alla base dell’effetto Joule; f) il campo all’interno di un filo conduttore è determinato non solo dalla batteria ma anche dalle cariche sia fisse che mobili nel circuito presenti sia sui fili che sugli altri componenti.

I corsisti aggiungono considerazioni sull’insegnamento della conduzione elettrica non presenti in Loughran, Berry & Mulhall: a) introdurre l’eV come unità di misura per il suo vasto utilizzo nella fisica, b) prendere in considerazione la percezione negli studenti di aspetti contraddittori tra corrente che “circola” ed

energia trasferita, c) utilizzare la quantità unitaria di carica nelle definizioni può generare confusione tra d.d.p. ed energia.

## **X. Un percorso concettuale per la scuola secondaria superiore: integrare i modelli macroscopici e microscopici della conduzione elettrica**

1. Rationale
2. Strategie e metodi
3. Prerequisiti
4. Mappa
5. Concetti e nodi
6. Attività
7. Esperimenti - Materiali

### **1. Rationale**

Spesso l'insegnamento tradizionale della fisica è inteso in senso esclusivamente deduttivo, ossia come spiegazione dei fenomeni in base a leggi e principi astratti: ciò conduce gli studenti a fornire risposte mnemoniche a domande non poste, in disaccordo con la costruzione della conoscenza basata sull'evidenza empirica e con aspetti importanti delle pratiche scientifiche, quali la costruzione di modelli partendo dalla fenomenologia, che consentirebbe agli studenti di svolgere un ruolo attivo. La ricerca descritta nei capitoli VI - IX indica che i modelli microscopici svolgono un ruolo di potenziale strumento di apprendimento (cap. VI); ciò richiede di fondare presenza, proprietà e interazioni delle particelle cariche e il ruolo del campo elettrico (cap. VII). Partire dalla fenomenologia macroscopica consente di motivare la necessità di un modello microscopico che renda conto dei fenomeni osservati in termini di particelle e di interazioni tra esse (cap. VIII). La proposta qui illustrata punta a superare i limiti dell'insegnamento tradizionale (cap. IX) proponendo ai ragazzi attività laboratoriali come l'elettrolisi oppure l'esperimento di Millikan per giustificare la presenza degli elettroni nei metalli e non soltanto per misurarne la carica.

Il percorso mira ad attivare e/o potenziare due diverse e complementari competenze degli studenti: da un lato la capacità di estrarre dall'osservazione dei fenomeni macroscopici informazioni utili per costruire e/o affinare i modelli microscopici della materia, dall'altro la capacità di utilizzare modelli microscopici, via via più raffinati, per interpretare o prevedere comportamenti emergenti a livello macroscopico. In particolare si vuole arrivare a comprendere l'andamento della resistività con la temperatura di metalli e semiconduttori.

La fisica spiega le proprietà elettriche dei diversi materiali in termini di modelli microscopici delle particelle costituenti la materia e delle loro interazioni (cap. III). Al livello più semplice si può vedere la conduzione elettrica come il processo risultante dall'interazione degli elettroni liberi con un campo elettrico presente nel metallo e con gli ioni reticolari. Allora nella scuola secondaria superiore è necessario trattare:

- 1) la carica elettrica, partendo dalla fenomenologia dell'elettrizzazione
- 2) il campo elettrico, come proprietà dello spazio circostante i corpi elettrizzati misurabile attraverso la misura dell'elettrizzazione indotta in due placchette
- 3) la natura particellare della carica elettrica, attraverso l'esperimento di Millikan oppure l'elettrolisi
- 4) tensione a partire dal lavoro compiuto da un agente (Dalla Valle, 1999) e corrente elettrica, come grandezze descrittive al livello macroscopico del funzionamento dei circuiti
- 5) la conservazione della corrente
- 6) l'interpretazione microscopica della corrente elettrica in termini di densità di corrente e di velocità di deriva
- 7) l'interpretazione microscopica delle leggi di Ohm e quindi di resistenza e resistività
- 8) il trasferimento di energia, partendo dal riscaldamento del resistore
- 9) l'interpretazione microscopica del riscaldamento del resistore in termini di processi di interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari
- 10) la modellizzazione dei processi microscopici attraverso la simulazione Supercomet
- 11) la dipendenza della resistività dalla temperatura in metalli e semiconduttori basata su:

- a) equazioni del trasporto

$$J = qn v_d$$

$$v_d = qE\tau/m$$

- b) descrizione dei processi di interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari in termini di sezione d'urto  $S$ , cammino libero medio  $\ell=1/Sn$ , tempo libero medio  $\tau$ , velocità media del moto disordinato  $v_m=\ell/\tau$

- c) equazione della resistività:

$$\rho=(m/q^2)Sv_m$$

La sezione d'urto  $S$  può essere calcolata utilizzando: a) il modello classico (Drude, corretto da Lorentz) che assume la statistica di Boltzmann per il gas di elettroni liberi; b) il modello semiclassico (Sommerfeld) che assume la statistica di Fermi-Dirac per il gas di elettroni liberi; c) la teoria quantistica delle bande di energia per gli stati elettronici (Bloch) in cui le interazioni riguardano elettroni e vibrazioni reticolari

(fononi). Per la comprensione qualitativa dell'andamento della resistività dei metalli con la temperatura è sufficiente il modello classico.

Una trasposizione didattica della teoria elettronica dei solidi che intrecci analisi dei fenomeni macroscopici e simulazione dei processi microscopici, può consentire di introdurre le idee della meccanica quantistica a partire dalla fenomenologia della conduzione elettrica. Nell'approccio illustrato, il modello di Drude si presenta come preliminare per condurre gradualmente gli studenti ad apprendere modelli fisici più completi e predittivi. Il modello di Drude introduce l'interpretazione della resistività come manifestazione macroscopica dei processi di interazione tra elettroni di conduzione e reticolo ionico cristallino. Il processo di conduzione elettrica viene pertanto visto come esito di due condizioni: a) la presenza del campo elettrico generato dalla batteria che nel filo conduttore si propaga con la velocità del segnale elettromagnetico; b) la risposta degli elettroni di conduzione a questo campo, condizionata dall'interazione con il reticolo ionico. Di conseguenza, gli elettroni di conduzione acquistano una velocità ordinata di deriva che si manifesta a livello macroscopico come corrente elettrica. Nel quadro della teoria elementare del trasporto (Alonso & Finn, 1980; Bassani & Grassano, 2000) si ottiene la relazione tra resistività e sezione d'urto relativa ai processi di interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari. Il riconoscimento delle proprietà del legame metallico giuoca un ruolo importante per la comprensione dei fenomeni in quanto determina lo stato degli elettroni nel metallo e, più in generale, le proprietà dell'ambiente sede delle interazioni. Dal punto di vista della didattica, Eylon & Ganiel (1990), Chabay & Sherwood (1999) e più recentemente Wittmann, Steinberg & Redish (2002) indicano l'utilizzo del modello di Drude come approccio ai processi microscopici della conduzione; alcuni aspetti del modello, quali la velocità di deriva, compaiono nei testi per la scuola superiore (per es.: Halliday, Resnick, Walker, 2009); il modello di Drude sembra concordare con la visione microscopica spontanea dei fenomeni osservati. Tuttavia alcuni quesiti fondamentali (es.: Perché la dipendenza della resistività dalla temperatura è lineare? Perché in alcuni metalli come lo Zn i portatori di carica sono positivi?) restano irrisolti nell'ambito del modello di Drude: a partire dai limiti interpretativi si può motivare la necessità di altri modelli successivamente introdotti. Un aspetto fondamentale della struttura cristallina viene ignorato nel contesto del modello di Drude: il carattere periodico del reticolo. Per comprendere pienamente le proprietà dei solidi è necessario utilizzare il modello a bande, coerente con la trattazione quantistica, che prende in considerazione la simmetria traslazionale della struttura cristallina (cap. III).

## 2. Strategie e metodi

La strategia didattica è stata sviluppata considerando i seguenti obiettivi:

- analizzare ed interpretare fatti e fenomeni utilizzando e connettendo diversi livelli di rappresentazione;
- comprendere (e/o sviluppare) modelli microscopici, via via più raffinati, a partire da osservazioni sperimentali;
- prevedere comportamenti macroscopici a partire dall'elaborazione di modelli microscopici;
- riconoscere la necessità del passaggio dalla visione classica a quella quantistica a partire da osservazione e analisi di fenomeni macroscopici facilmente riproducibili;
- usare il formalismo matematico quando necessario.

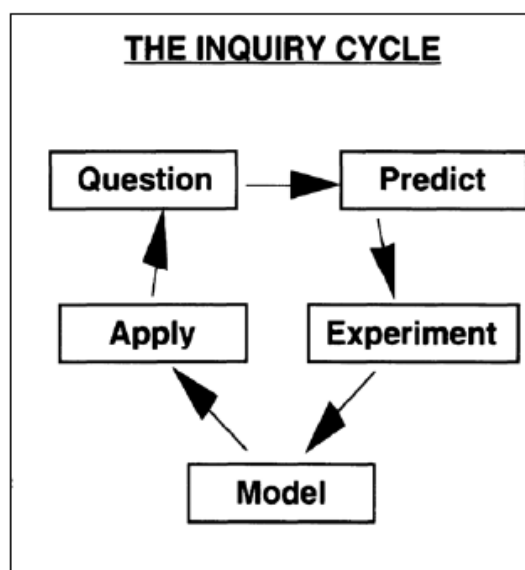


Figura 1 - Model-based Inquiry come ciclo di apprendimento (White & Frederiksen, 1998)

La strategia utilizzata mima il processo di costruzione della conoscenza scientifica in quanto prevede la ripetizione delle seguenti fasi:

- estrazione di elementi concettuali utili dalle osservazioni dei fenomeni macroscopici;
- costruzione di un modello microscopico interpretativo;
- uso del modello microscopico per la previsione dei fenomeni;
- confronto con le osservazioni e revisione del modello.

All'interno di tutti i modelli della conduzione elettrica considerati dalla fisica, le proprietà dell'elettrone assumono un ruolo centrale: di conseguenza una attività del percorso comprende la misura della carica dell'elettrone, superando l'astrattezza dei libri di testo citati.

### **3. Prerequisiti**

Il percorso è rivolto a studenti delle classi terminali della scuola superiore e richiede che gli studenti abbiano una conoscenza a livello scolastico di: a) meccanica newtoniana, per quanto riguarda in particolare la seconda legge della dinamica e l'analisi qualitativa del moto di un corpo soggetto al peso e ad una forza resistente diretta come il peso ma dipendente dalla velocità (il caso del paracadutista); b) termodinamica, per quanto riguarda la relazione tra energia interna e temperatura di un corpo e l'interpretazione microscopica della temperatura come misura dell'agitazione degli ioni reticolari di un solido cristallino intorno alle posizioni di equilibrio; c) teoria cinetica dei gas ideali, per quanto riguarda la relazione tra energia cinetica delle particelle e temperatura.

Per quanto riguarda la matematica, si richiede che gli studenti abbiano le competenze previste dai programmi (INDIRE, 2010) per quanto riguarda il calcolo algebrico, e sappiano eseguire operazioni algebriche con numeri espressi in notazione scientifica.

### **4. Mappa**

Per introdurre la visione scientifica della conduzione elettrica è necessario da un lato costruire il concetto di campo elettrico come proprietà fisica presente all'interno dei conduttori percorsi dalla corrente, e dall'altro trattare la struttura della materia per quanto riguarda: proprietà fisiche, stato e processi di interazione delle particelle cariche in conduttori, semiconduttori e isolanti. Si utilizzano: la teoria del trasporto per quanto riguarda la velocità di deriva dei portatori di carica ed il suo legame con il campo elettrico (livello microscopico della legge di Ohm) e riferimenti ad argomenti di meccanica statistica per quanto riguarda la velocità media dei portatori di carica. Le grandezze macroscopiche resistenza e resistività sono introdotte su base fenomenologica a partire dalle leggi di Ohm. L'obiettivo è di costruire la comprensione concettuale di ciò che accade in un conduttore percorso dalla corrente in termini di particelle cariche e di campo elettrico, e perché. In questi termini, il percorso delineato si propone di affrontare la didattica dell'integrazione tra le descrizioni macroscopiche (a destra in fig. 2) e microscopiche (a sinistra in fig. 2) della conduzione elettrica. L'esperimento di Millikan si presenta come ponte tra le due descrizioni in



quanto fonda la natura particellare della carica elettrica. Il punto di vista microscopico considera la struttura particellare della materia e i processi al suo interno descritti in termini di meccanica statistica e teoria del trasporto; il punto di vista macroscopico considera grandezze elettrostatiche quali carica e campo elettrico e le leggi fenomenologiche (Ohm) alla base del funzionamento dei circuiti. L'integrazione tra i due punti di vista conduce ad interpretare la resistività in termini di grandezze microscopiche.

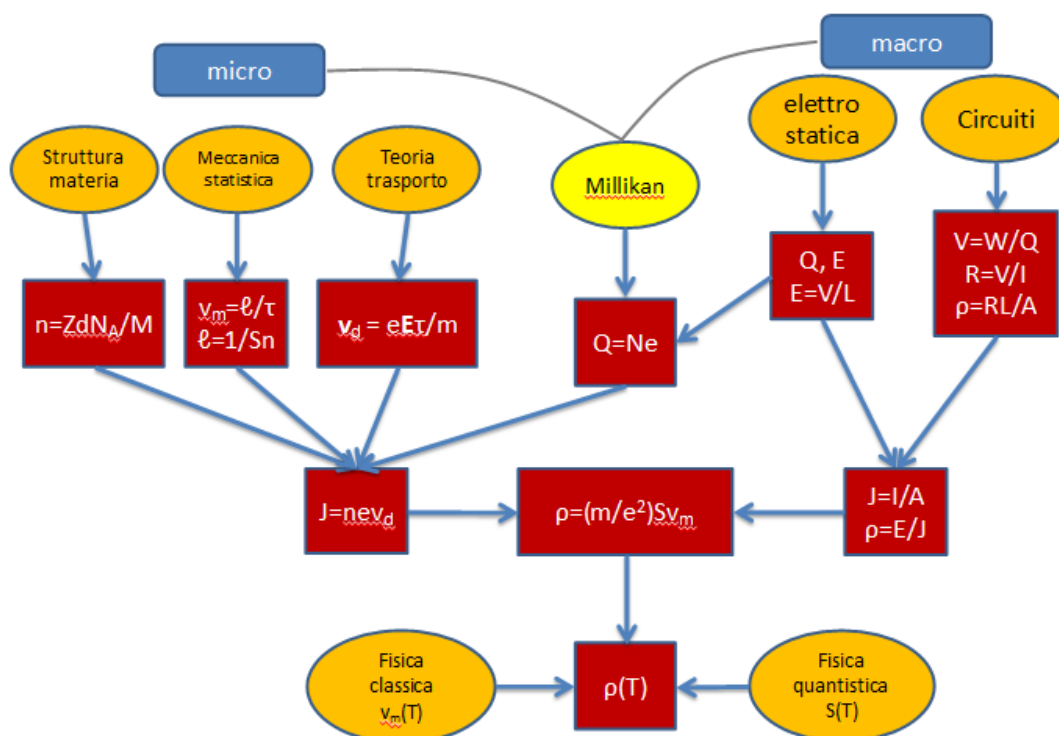


Figura 2 - mappa concettuale

### 5. Concetti e nodi

L'individuazione dei concetti e dei nodi affrontati nel percorso deriva dagli esiti della ricerca svolta per quanto riguarda: a) la base fisica della conduzione elettrica (cap. III) descritta come il processo risultante dall'interazione degli elettroni liberi con un campo elettrico presente nel metallo e con gli ioni reticolari; b) le concezioni/ragionamenti degli studenti (cap. IV) e i nodi di apprendimento rilevati in letteratura (cap. V) e riscontrati nel corso delle sperimentazioni (cap. VI-IX).

#### Attività 1

- a) Elettrizzazione e carica elettrica

- b) Campo elettrico come proprietà vettoriale dello spazio circostante i corpi elettrizzati in grado di esercitare forze

Attività 2

- c) Natura corpuscolare della carica elettrica

Attività 3

- d) Presenza degli elettroni di conduzione nei metalli

Attività 4

- e) Superare la definizione matematica formale del potenziale elettrico a favore di una visione maggiormente legata alla fisica in cui il potenziale è correlato al concetto di lavoro
- f) Bipolarità degli elementi del circuito e necessità della chiusura del circuito
- g) Presenza del campo elettrico nei conduttori percorsi dalla corrente
- h) Distinguere la velocità di deriva degli elettroni dalla velocità di propagazione dell'energia che viene trasportata dal campo elettromagnetico

Attività 5

- i) Interpretazione microscopica della legge di Ohm come relazione tra densità di corrente e campo elettrico

Attività 6

- j) Origine fisica della resistività ricondotta alla sezione d'urto dei processi di interazione elettroni liberi-ioni reticolari
- k) Interpretazione microscopica dell'effetto Joule in termini scambio energetico elettroni-reticolo
- l) Distinguere tra corrente ed energia

Attività 7

- m) Interazione non coulombiana tra elettroni di conduzione e ioni reticolari

Attività 8

- n) Carica elettrica come proprietà invariabile di una particella elementare

## 6. Attività

Il percorso è suddiviso nelle seguenti fasi. Per ciascuna è prevedibile un impegno temporale di una unità oraria.

### 1) Elettrizzazione e campo elettrico.

Scopo: riconoscere i due tipi di stato elettrizzato, il campo elettrico come proprietà dello spazio circostante i corpi elettrizzati, la natura vettoriale del campo elettrico. Strappando delle strisce di nastro adesivo da una superficie esse interagiscono in modo attrattivo o repulsivo. Ciò indica che lo stato delle strisce è cambiato a

seguito dello strappo. Indipendentemente dalla lunghezza delle strisce o dalla loro disposizione e dal materiale su cui sono attaccate, la repulsione si riscontra tra strisce trattate nello stesso modo, mentre l'attrazione si riscontra tra strisce trattate in modo diverso. I fenomeni osservati si possono descrivere come segue: corpi trattati nello stesso modo si respingono; corpi trattati in modo diverso si attraggono. Ciò si può spiegare assumendo che: o i corpi non sono elettrizzati; o sono elettrizzati nello stesso modo; oppure sono elettrizzati in modo diverso. Non si osservano altre possibilità. Quindi si riconosce che esistono due tipi di elettrizzazione (Magnoler et al., 2007).

Si esplorano i diversi processi con cui si possono elettrizzare i corpi. Utilizzando le strisce come rivelatori: a) si può elettrizzare una gruccia strofinandola con un panno; b) i due terminali di un accendino piezoelettrico elettrizzano i corpi in modo diverso (Dalla Valle, 1999).

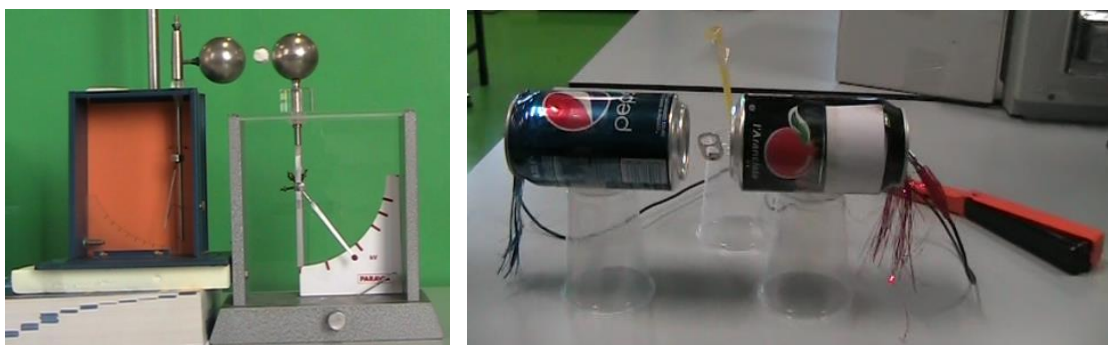


Figura 3 - spostamento di carica

Si collegano ai terminali dell'accendino due lattine accostate. Azionando l'accendino le frange di ciascuna lattina si respingono. Interponendo un pendolino tra le lattine esso oscilla fin quando le frange ritornano nella posizione di riposo. Lo stesso fenomeno è realizzato con due elettroscopi (Dalla Valle, 1999). Una bacchetta strofinata con un panno viene avvicinata ad un elettroscopio A fino a toccarne l'elettrodo. L'angolo d'inclinazione rispetto alla verticale dell'indice di A aumenta. Si avvicina un secondo elettroscopio B: il pendolino interposto tra A e B oscilla e contemporaneamente l'angolo d'inclinazione rispetto alla verticale dell'indice di A diminuisce e di B aumenta (fig. 3).

La fenomenologia osservata fonda l'esistenza di un ente (la cui presenza è rivelata dall'innalzamento dell'indice dell'elettroscopio) che viene trasferito all'elettroscopio A dalla bacchetta strofinata e poi da questo a B, fino al raggiungimento di una situazione di equilibrio. L'oscillazione del pendolino segnala che il trasferimento non avviene nell'aria. La misura indicata sulla scala graduata

degli elettroscopi mostra che questo ente, che identifichiamo con la carica elettrica, si conserva nel trasferimento. I fenomeni che rivelano la presenza della carica sono gli stessi di quelli che rivelano l'elettrizzazione: quindi identifichiamo i corpi elettrizzati come corpi carichi.

Si avvicina una gruccia elettrizzata ad una frangia: le strisce della frangia si respingono. Si chiama induzione l'elettrizzazione a distanza osservata nella frangia. Una gruccia elettrizzata viene avvicinata a diverse frange disposte intorno ad essa, senza toccarle: le strisce di ogni frangia si respingono. L'elettrizzazione delle frange per induzione indica la presenza di una proprietà dello spazio attorno ad un corpo elettrizzato (la gruccia) segnalato dalla frangia. Questa proprietà sarà chiamata campo elettrico.

Si pone il problema della misura del campo elettrico. Si avvicina una gruccia elettrizzata a due lattine unite. Le strisce di ogni frangia si respingono. Separando le lattine le strisce di ogni frangia restano sollevate. Quindi si riconosce che un campo elettrico può separare la carica presente in un corpo metallico. Ciò è alla base dell'utilizzo delle pinze di Maxwell (placchette) come rivelatore di campo elettrico (Dalla Valle, 1999). La carica di due placchette metalliche si può misurare utilizzando un dispositivo che fornisce una indicazione numerica (Dalla Valle, 1999). Le placchette congiunte sono avvicinate a una sfera elettrizzata, poi separate e si misura la carica su ciascuna. Le placchette poste in un campo elettrico si elettrizzano come le due lattine congiunte e poi separate considerate prima. Il segno differente dell'elettrizzazione delle placchette indica la presenza di due tipi di elettrizzazione già riscontrata negli esperimenti col nastro adesivo. Nelle situazioni sfera carica/scarica, vicino/lontano le misure dell'elettrizzazione delle placchette rivelano la diversa intensità del campo elettrico nella posizione in cui sono poste le placchette congiunte. Cambiando l'orientamento delle placchette poste nella stessa posizione il risultato della misura cambia: quindi il campo ha carattere vettoriale (Dalla Valle, 1999). Per consolidare la natura vettoriale del campo elettrico si misura il campo nel punto medio tra due sfere metalliche isolate elettrizzate nello stesso modo: la previsione è che se i campi elettrici delle sfere si sommano come vettori il risultato della misura è zero. Se le sfere (o piastre) sono elettrizzate in modo diverso, la misura del campo è diversa da zero.

## 2) Carica elettrica come proprietà delle particelle

Scopo: riconoscere la natura particellare della carica elettrica.



Figura 4 - chicchi di pastina in olio

Chicchi di pastina sono posti in olio di semi in cui sono immerse due piastre metalliche collegate dall'accendino piezoelettrico. I chicchi inizialmente sono orientati in direzioni casuali. Azionando l'accendino ogni chicco ruota e si dispone in una direzione ben definita. Poiché sappiamo che le piastre si elettrizzano in modo diverso e (come già visto con le sfere) lo spazio tra esse diventa sede di un campo elettrico, ciò mostra che il campo elettrico esercita delle forze sul chicco di pastina che ruota fino a portarsi in una configurazione di equilibrio. Chiameremo *elettriche* le forze osservate. Anche i chicchi esercitano delle forze tra loro: ciò indica che si sono elettrizzati e che conseguentemente sono sorgenti di campo. Il campo da essi generato può alterare il campo da misurare. Per poter utilizzare un corpo, quale un chicco di pastina, come rivelatore del campo elettrico, è necessario che questo effetto sia poco influente.

Si ripete l'esperimento mettendo del semolino al posto della pastina. Sotto l'azione delle forze esercitate dal campo, il semolino si dispone lungo linee ordinate. Queste si chiamano linee del campo elettrico. Quindi il campo elettrico genera delle forze rivelate dalla rotazione (pastina) oppure dal movimento (semolino) dei corpuscoli presenti nell'olio fino a quando si raggiunge una situazione di equilibrio.

Per esplorare la natura della carica elettrica si utilizza l'esperimento di Millikan il cui dispositivo comprende due lastre elettrizzate in modo diverso tra cui si stabilisce un campo elettrico, come già visto. Lo studio dell'esperimento si basa sull'utilizzo della simulazione *Exploring the Millikan Oil Drop Experiment* (fig. 5).

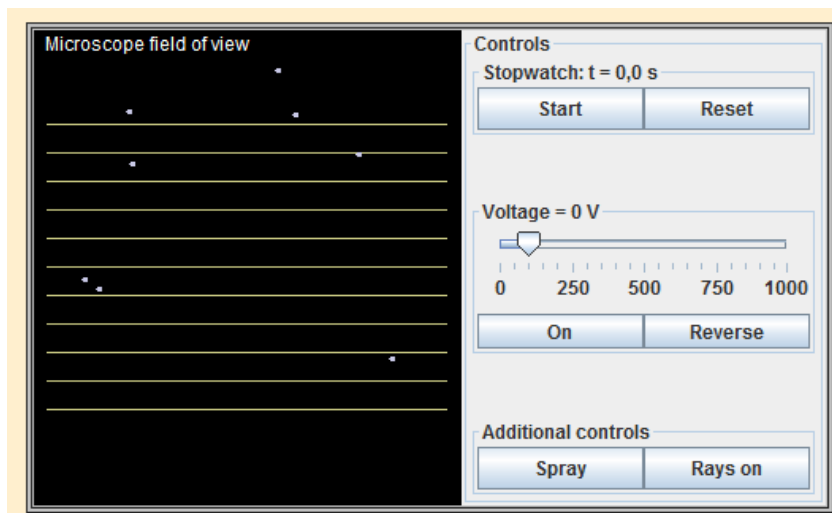


Figura 5 - simulazione Millikan (Belloni, Christian & Cox, 2006)

La simulazione riproduce il campo visivo del microscopio che inquadra lo spazio tra due lamine rettangolari nel quale è possibile spruzzare delle goccioline di olio di raggio variabile. E' possibile spruzzare delle goccioline di olio nella regione di spazio compresa tra i due elettrodi. Le goccioline di olio si strofinano contro le pareti della cannucchia che le inietta nello spazio tra due lastre, elettrizzandosi in modo casuale. In assenza di campo elettrico le goccioline cadono per azione della forza di gravità. Le goccioline che cadono si vedono andare verso l'alto del campo visivo perché il microscopio rovescia le immagini. Le goccioline, cadendo nell'aria, raggiungono una velocità limite costante, come le gocce di pioggia. Accendendo il campo, le traiettorie rettilinee delle goccioline indicano che il campo da esse generato non perturba il campo generato dalle piastre.

Variando il campo elettrico tra le piastre, la forza elettrica agente sulle goccioline varia. La legge di Newton  $F_E + P - kv = F_{RIS} = ma$  implica che la velocità limite delle goccioline (con  $a=0$ ) dipende dalla forza elettrica  $F_E$  e dal peso  $P$ . Le velocità limite sono dirette sia verso l'alto che verso il basso. Considerando goccioline con lo stesso peso, la differente velocità limite è riconducibile ad una differente elettrizzazione. Quindi lo stesso campo esercita forze differenti su goccioline elettrizzate in modo diverso: ciò indica una relazione tra forza e campo che si può supporre lineare, con la carica come costante di proporzionalità. Allora la carica non solo è responsabile dello stato elettrizzato, come già visto, ma determina anche la forza elettrica sulla gocciolina. Regolando opportunamente il campo elettrico è possibile portare una gocciolina in quiete. Eseguendo numerose prove, le misure (in unità arbitrarie) della forza equilibrante esercitata dallo stesso campo elettrico su una stessa gocciolina elettrizzata in modo differente si raggruppano intorno a valori che sono sempre

multipli di una stessa quantità, a meno di imprecisioni di misura. Poiché nelle condizioni descritte la misura della forza equilibrante è una misura della carica, si trova che la carica delle goccioline si presenta sempre in multipli interi positivi o negativi di una stessa quantità.

Nell'insegnamento tradizionale (Caforio & Ferilli, 2009) l'esperimento di Millikan viene presentato come misura della carica dell'elettrone. Ciò appare riduttivo, in quanto l'analisi dell'esperimento sostiene l'ipotesi della natura corpuscolare della carica elettrica, ovvero che la carica elettrica su ogni gocciolina è costituita da particelle ciascuna avente la stessa carica, detta carica elementare. Il ragionamento può far ricorso ad una analogia come la seguente: se misurando l'altezza di diversi muri si trova che è sempre multipla di 30 cm, si conclude che i muri sono fatti di mattoni.

La carica elementare misurata da Millikan sta alla base di tutti i processi di elettrizzazione. Tenendo presenti le differenti proprietà fisiche del protone rispetto all'elettrone, è possibile escludere che il protone giochi un ruolo nell'elettrizzazione delle goccioline. Quindi l'elettrizzazione delle goccioline dipende dalla presenza su di esse di un numero intero di elettroni, in eccesso se cariche di segno negativo o in difetto se cariche di segno positivo. Si può usare la carica dell'elettrone come unità di misura della carica elettrica di tutti i corpi, in quanto costituiti da particelle. Per motivi storici si usa invece definire una unità di misura di carica, il Coulomb, in base alla quale  $1\text{ C} = -6,3 \cdot 10^{18} e$  essendo  $e$  la carica dell'elettrone. In tal modo resta definita l'unità di misura dell'intensità del campo elettrico, come Newton/Coulomb.

### 3) La carica come sorgente del campo

Scopo: interpretare i fenomeni osservati dal punto di vista microscopico.

Sulla base di tutti i fenomeni finora osservati di elettrizzazione dei corpi per induzione, contatto, strofinio, è possibile formulare un'ipotesi sullo stato elettrizzato dei corpi dal punto di vista microscopico: 1) la carica elettrica di un corpo è dovuta ad un eccesso/difetto di elettroni sul corpo rispetto allo stato in cui non è elettrizzato; 2) i processi di elettrizzazione sono dovuti allo spostamento di carica elettrica presente nei corpi e mobile in essi (induzione) o tra corpi diversi (contatto e strofinio); 3) la carica elettrica è sorgente del campo elettrico nel senso che la regione di spazio attorno ad un corpo con eccesso/difetto di carica diventa sede di un campo elettrico. Ad esempio, le foglioline dell'elettroscopio si separano perché sono elettrizzate nello stesso modo (=hanno acquistato un eccesso di particelle cariche dello stesso segno) e quindi il campo intorno ad una fogliolina esercita sull'altra fogliolina (agendo sulle particelle cariche in essa presenti) una

forza repulsiva. Poiché non si osservano variazioni di massa dei corpi in seguito all'elettrizzazione, la massa delle particelle cariche trasferite deve essere molto piccola.

Si misura il campo elettrico di un corpo non elettrizzato: il risultato nullo della misura è in accordo con l'ipotesi formulata purché si ammetta che in un corpo non elettrizzato la carica totale delle particelle di carica negativa è uguale in valore assoluto alla carica totale delle particelle di carica positiva. Ciò è in accordo con le conoscenze sulla struttura della materia già note agli studenti.



Figura 6 - gruccia e lattina

Avvicinando una gruccia elettrizzata ad una lattina inizialmente scarica le frange poste sul lato opposto si separano (fig. 6). Ciò indica che particelle cariche sono già presenti nei metalli e relativamente libere di muoversi in essi. Mediante altri esperimenti (effetto termoelettronico) tali particelle cariche possono essere estratte dai metalli e se ne possono misurare le proprietà fisiche, carica e massa (Thomson). Gli esiti delle misure mostrano che nei metalli si tratta di elettroni, detti *di conduzione*. Inviando un fascio di elettroni su un elettroscopio scarico si osserva un aumento della divergenza delle foglioline: ciò consolida la natura particellare di ciò che determina l'elettrizzazione.

La teoria del legame metallico indica che quando gli atomi si uniscono per formare il reticolo metallico gli elettroni dei gusci atomici più esterni sono liberi di muoversi in tutto il corpo metallico. Un campo elettrico applicato al metallo esercita una forza sugli elettroni di conduzione del metallo che, di conseguenza, si metteranno in movimento. Nel seguito si esplora quali grandezze condizionano il moto e quali grandezze si possono utilizzare per descriverlo.



#### 4) Tensione e corrente elettrica

Scopo: riconoscere la tensione elettrica come lavoro per unità di carica, interpretare la corrente elettrica dal punto di vista microscopico in termini di velocità di deriva.

Si dispone di due elettroscopi carichi con il pendolino interposto fermo (Dalla Valle, 1999). Utilizzando una sfera metallica con manico isolato si sposta la carica da un elettroscopio ad un altro. Di conseguenza il pendolino oscilla. L'oscillazione del pendolino indica uno spostamento della carica  $Q$  nel circuito causato dal lavoro  $W$  compiuto da un agente. La "spinta" sulla carica  $Q$  può essere misurata dalla tensione  $V=W/Q$ . L'unità di misura della tensione elettrica è il Volt,  $1\text{ V} = 1\text{ J/C}$ . Quanto visto consente di introdurre la tensione elettrica legandola al lavoro senza far riferimento al concetto di potenziale elettrico. Si preferisce evitare la locuzione *forza elettromotrice* per evitare confusione tra forza e tensione.

Nella attività 3 si è riconosciuta la presenza del campo elettrico tra due lattine elettrizzate con l'accendino. Il campo esercita la forza  $F=QE$  (Millikan) sul pendolino che trasporta una carica  $Q$  e quindi compie un lavoro  $L=Fs=QEs$  essendo  $s$  lo spostamento del pendolino. Dalla relazione precedente risulta  $L=QV$  essendo  $V$  la tensione elettrica tra i due elettroscopi. Ciò consente di stabilire una importante relazione di carattere generale che lega la tensione  $V_{AB}$  tra due corpi vicini  $A, B$  all'intensità del campo elettrico  $E$  presente nella regione di spazio tra essi interposta:  $E=V_{AB}/s$ . Nel seguito questa relazione potrà essere applicata anche a punti dello stesso corpo.

Una batteria è un oggetto in cui per tempi relativamente lunghi un agente di tipo chimico separa (a circuito aperto) e mantiene (a circuito chiuso) sui terminali della batteria un eccesso di carica rispettivamente positiva e negativa. Poiché i terminali a circuito aperto sono corpi elettrizzati in modo diverso, per quanto già visto, tra essi esiste una tensione elettrica che è misurata dal numero indicato sulla batteria (si preferisce evitare la locuzione *polo* per evitare di suscitare confusione con il magnetismo). Collegando due fili di rame ai terminali di una batteria si misura (a circuito aperto) tra i capi dei fili la stessa tensione che c'è tra i terminali. Allungando o accorciando i fili si misura tra i loro capi la stessa tensione. Ciò indica che cavi metallici possono trasferire la tensione elettrica e pone il problema di *come* la tensione si propaga in un circuito.

Si consegnano fili conduttori, batterie e lampadine e si chiede di accendere la lampadina. Collegando i capi dei fili ai terminali di una lampadina si chiude il circuito e la lampadina si illumina. Nella fase 3 si è riconosciuta la presenza di

elettroni relativamente liberi di muoversi nei corpi metallici. Poiché tra i capi dei cavi esiste una tensione e quindi (per quanto già visto) un campo elettrico, e poiché si è visto (fase 2) che il campo elettrico esercita una forza  $F$  su ogni elettrone di conduzione, la forza elettrica  $F$  determina (per il secondo principio della dinamica) una variazione dello stato di moto degli elettroni. Se gli elettroni di conduzione fossero completamente liberi nel metallo, la loro velocità sotto l'azione di un campo costante aumenterebbe oltre ogni limite, e di conseguenza la luminosità della lampadina non resterebbe costante. La costanza della luminosità della lampadina indica il permanere nel tempo di uno stato di equilibrio dinamico che si può stabilire solo se gli elettroni di conduzione subiscono l'influenza di altre forze che si oppongono al loro movimento. Queste forze sono di tipo viscoso, come quando si mescola il miele con un cucchiaino: la forza costante esercitata dalla mano sul cucchiaino si compone con la resistenza del mezzo dando luogo ad una velocità costante del cucchiaino. Analogamente, gli elettroni di conduzione acquistano una velocità costante detta di *deriva* a seguito delle interazioni con gli ioni reticolari. Il riscaldamento e l'emissione di luce da parte del filamento della lampadina possono essere interpretati come esito dei processi di interazione tra gli elettroni di conduzione e il reticolo ionico del filamento, descritti in termini di una forza viscosa. L'esperimento di Johnson indica che quando la lampadina è spenta il moto degli elettroni di conduzione è disordinato; quando è accesa si sovrappone un moto ordinato con velocità di deriva costante.

Un movimento ordinato di particelle cariche che attraversano una superficie  $S$  perpendicolare alla loro velocità  $v_d$  in un tempo  $t$  trasportando una carica  $Q$  costituisce una corrente elettrica di intensità  $I=Q/t$  e di densità  $J=I/S$ . Per esempio, se attraverso la sezione di un conduttore cilindrico passano  $N$  elettroni nel tempo  $t$ , la corrente risulta  $I=Ne/t$ , essendo  $e$  il valore assoluto della carica dell'elettrone. L'unità di misura della corrente è l'Ampere = Coulomb/secondo. Semplici considerazioni geometriche mostrano che la densità di corrente è legata alla velocità di deriva dalla relazione  $J=nev_d$ , essendo  $n$  la concentrazione degli elettroni di conduzione. Se il filo è omogeneo, la concentrazione dei portatori di carica in esso è costante.

Misure di corrente in punti diversi dei fili di rame che collegano batteria e lampadina mostrano che la corrente è uguale in ogni punto: ciò indica che gli elettroni di conduzione si muovono in ogni tratto del circuito con la stessa velocità di deriva. Di conseguenza deve esistere un campo elettrico in ogni punto interno ad un circuito chiuso. L'intensità di questo campo elettrico in un filo rettilineo si

misura utilizzando la relazione già vista  $E=V/L$ , essendo  $V$  la tensione tra i capi del filo e  $L$  la lunghezza del filo.

Sapendo che la densità del rame  $d_{Cu} = 8.92 \text{ kg/dm}^3$  ( $T=300 \text{ K}$ ) e che la massa atomica del rame  $M_{Cu}=63.5 \text{ g/mole}$ , si può dare una stima della concentrazione degli elettroni di conduzione nel rame. Utilizzando il risultato ottenuto si può dare una stima della velocità di deriva degli elettroni di conduzione in un filo di rame di sezione  $S=1 \text{ mm}^2$  percorso dalla corrente  $I=1 \text{ A}$ . Risulta dell'ordine di  $0,1 \text{ mm/s}$ . Si è già visto che il movimento di particelle cariche dà luogo ad una corrente misurabile. Adesso si esplorano le relazioni macroscopiche tra tensione e corrente.

### 5) Resistenza e Resistività

Scopo: interpretare la legge di Ohm dal punto di vista microscopico come relazione tra campo e densità di corrente.

Seguendo la tradizione didattica consolidata, si presenta la relazione tra le grandezze già introdotte (tensione e corrente) allo scopo di definire la resistenza elettrica e, successivamente, la resistività. Utilizzando un filo metallico, amperometro e voltmetro, si eseguono misure di tensione e corrente. Il grafico  $I$  vs  $V$  mostra una relazione lineare che può essere formalizzata come  $I=V/R$  essendo  $1/R$  il coefficiente angolare della retta interpolante i dati. Cambiando il filo la pendenza della retta varia e si calcola un diverso  $R$ . A parità di tensione la corrente è minore in un filo con  $R$  maggiore. Perciò  $R$  si chiama *resistenza* del filo.  $R$  si misura in Ohm, dove  $1 \text{ Ohm} = 1\text{V/A}$ .

Argomento successivo e centrale è l'osservazione della luminosità della lampadina al variare dei parametri geometrici del filo (sezione  $A$  e lunghezza  $L$ ). Il materiale del filo e la tensione della batteria non variano. Questo contesto fenomenologico favorisce la riflessione sul livello microscopico dei processi della conduzione elettrica nei metalli (Fera & Michelini, 2012). Dall'analisi qualitativa emergono infatti aspetti che consentono di formulare un'ipotesi sulla dipendenza dell'intensità di corrente dalle diverse grandezze prese in considerazione:  $I \propto VA/L$ . Per esplorare il ruolo della costante di proporzionalità che compare in questa relazione, si utilizzano fili conduttori di uguale lunghezza e sezione ma differente materiale. Misurando la costante di proporzionalità si deduce che essa è caratteristica del materiale che costituisce il filo. Tale costante di proporzionalità si chiama *resistività* e si indica con  $\rho$ . Il ragionamento svolto implica che in un filo  $\rho=RA/L$ . Introducendo la densità di corrente già vista  $J=I/A$  si perviene alla legge di Ohm nella forma  $J=E/\rho$ . Questa relazione rappresenta l'idea che il campo elettrico in un punto del filo determina la densità di corrente in *quel* punto del filo. La resistività esprime il modo in cui il filo

risponde al campo applicato dalla batteria: la densità di corrente è maggiore in un materiale nel quale la resistività è minore. Adesso si esplorano le ragioni per cui gli elettroni di conduzione raggiungono una velocità di deriva costante.

#### 6) Dal riscaldamento del resistore alla struttura della materia

Scopo: associare la trasformazione di energia Joule ai processi di interazione tra elettroni e ioni reticolari.

Un resistore ceramico è costituito da un filo metallico con una certa resistività elettrica indipendente dalla tensione elettrica che viene applicata, racchiuso in un involucro ceramico. Si chiude un resistore ceramico su una batteria e si esamina il grafico temperatura vs tempo tracciato dal termocrono. Il grafico mostra che un resistore si scalda quando viene percorso dalla corrente elettrica. La pendenza della retta interpolante  $\Delta T/\Delta t$  si chiama ritmo di riscaldamento del resistore. Alimentando con la stessa tensione resistori differenti il ritmo di riscaldamento è differente. Il grafico che esprime il ritmo di riscaldamento del resistore in dipendenza del prodotto  $I \cdot V$  essendo  $I$  la corrente nel resistore e  $V$  la tensione ai suoi capi mostra invece che per tutti i resistori il ritmo di riscaldamento è proporzionale al prodotto  $I \cdot V$ . Una misura mostra che la tensione ai capi del resistore è uguale alla tensione della batteria. La termodinamica indica che l'energia interna del resistore  $U$  è proporzionale alla sua temperatura, ossia  $U=CT$ . Quindi l'aumento di energia interna del resistore è  $\Delta U=C\Delta T$  essendo  $C$  la capacità termica del resistore. Il grafico mostra che  $I V t = C\Delta T$ : ciò significa che  $I V t$  rappresenta l'energia fornita dalla batteria nel tempo  $t$  che si trasferisce al resistore in accordo con il principio di conservazione dell'energia. Il flusso di energia è distinto dal flusso di corrente per due aspetti: a) il flusso di energia è proporzionale ad  $I^2$  (essendo valida la legge di Ohm per il resistore); b) il flusso di energia è monodirezionale, mentre il flusso di corrente è bidirezionale. La corrente è uno spostamento di particelle cariche; l'energia è associata ad un processo di interazione. La corrente elettrica non si consuma in quanto le particelle non si creano né si distruggono (alle energie considerate). La velocità di propagazione dell'energia è molto diversa dalla velocità di deriva.

Dal punto di vista microscopico, il fatto che il lavoro compiuto dal campo elettrico sui portatori di carica nel resistore  $L=VQ= I \cdot V \cdot t$  è proporzionale all'incremento di energia interna del resistore  $\Delta U=c\Delta T$  indica che il lavoro  $L$  non produce alcun aumento di energia cinetica dei portatori di carica che attraversano il resistore, ma viene interamente convertito in energia interna. L'aumento di temperatura segnala quindi il verificarsi, all'interno del resistore, di interazioni che tendono a convertire energia meccanica in energia interna. Poiché si è già visto che il campo elettrico

causa un moto ordinato degli elettroni di conduzione, si deduce che i processi d'interazione che interessano i portatori di carica all'interno del resistore tendono a disordinare tale moto.

Si introduce la simulazione Supercomet (2003). Essa rappresenta il moto degli elettroni di conduzione in un reticolo ordinato di ioni positivi che oscillano intorno alle loro posizioni di equilibrio. In assenza di tensione elettrica applicata ai capi del filo il moto degli elettroni è disordinato e il loro spostamento in media è nullo. Il moto disordinato indica che in assenza di tensione della batteria il campo elettrico è nullo.

Applicando una tensione elettrica ai capi del filo al moto disordinato degli elettroni si sovrappone un moto ordinato in direzione parallela all'asse del filo da sinistra a destra o da destra a sinistra. La velocità (costante) di questo moto ordinato è la velocità di deriva.

La simulazione mostra che in assenza di campo elettrico della batteria gli urti tra gli elettroni di conduzione e gli ioni reticolari non trasferiscono energia in quanto l'energia cinetica di un elettrone prima dell'urto è mediamente uguale all'energia cinetica dopo l'urto. In presenza di campo elettrico della batteria gli urti tra elettroni di conduzione e ioni reticolari trasferiscono energia al reticolo in quanto ogni elettrone viene accelerato dal campo elettrico nell'intervallo di tempo che trascorre prima dell'urto successivo. Quindi prima di un urto ha una energia cinetica in media maggiore di quella dopo l'urto. Questo difetto di energia si trasferisce al reticolo. La corrente non trasferisce energia: l'energia associata alla corrente è quella cinetica del moto ordinato dei portatori di carica; questa energia non varia mentre il conduttore è percorso dalla corrente, di conseguenza non può essere responsabile del riscaldamento del conduttore. L'ente che distribuisce l'energia nel circuito è il campo elettromagnetico.

La lampadina si illumina poiché l'aumento di energia interna del filamento dovuto al meccanismo microscopico appena visto lo rende incandescente.

Infine viene evidenziato che la simulazione non illustra correttamente la situazione fisica per taluni aspetti, quali le proporzioni tra proprietà delle particelle come dimensioni e velocità, per evitare fraintendimenti sui processi microscopici.

## 7) Dipendenza della resistività dalla temperatura

Scopo: utilizzare il modello microscopico per spiegare i fenomeni osservati, riconoscere i limiti del modello.

Se il passaggio di corrente elettrica modifica l'energia interna del conduttore (effetto Joule), che cosa accade nell'opposta circostanza in cui la temperatura del

conduttore viene modificata dall'esterno? In termini più espliciti si pone il seguente problema: in che modo la variazione di temperatura influenza le proprietà elettriche del conduttore, ad esempio, la resistenza elettrica? Una bobina di filo di rame smaltato percorsa dalla corrente è immersa in azoto liquido. L'aumento della luminosità della lampadina indica un aumento di corrente nel circuito. Poiché la tensione della batteria è rimasta costante, ciò va attribuito alla variazione della resistenza del filo. La simulazione Supercomet mostra che aumentando la temperatura del filo, le oscillazioni degli ioni positivi intorno alle posizioni di equilibrio aumentano in ampiezza. Di conseguenza, il moto di deriva degli elettroni di conduzione risulta maggiormente ostacolato e quindi la riflessione su questo aspetto del modello indica che la resistenza dovrebbe aumentare col crescere della temperatura.

L'ipotesi relativa ad una prevalenza di interazioni di tipo attrattivo tra i portatori di carica (elettroni) e i costituenti elementari della struttura rigida del metallo (ioni positivi), che caratterizza il modello spontaneo "ad elettroni legati" (De Posada, 1997), conduce, invece, alla conclusione opposta che la resistenza del conduttore diminuisce con il crescere della temperatura.

E' importante evidenziare i limiti della simulazione Supercomet: a) poiché la massa del protone è circa 2000 volte quella dell'elettrone, le dimensioni atomiche sono molto maggiori di quelle elettroniche, in disaccordo con quanto mostra la simulazione; b) la velocità del moto disordinato può essere stimata usando la teoria cinetica dei gas ideali e risulta (in condizioni ordinarie) circa 8 ordini di grandezza maggiore della velocità di deriva, in disaccordo con quanto mostra la simulazione; c) l'utilizzo di sensori di temperatura collegati all'elaboratore consente di confrontare le proprietà resistive di metalli e semiconduttori: si comprende allora che il modello costruito per i metalli non è sempre valido, infatti la resistività di un semiconduttore intrinseco diminuisce al crescere della temperatura secondo un andamento esponenziale.

Ciò indica che: a) il modello elaborato per i metalli può essere utilizzato solo per dare conto dell'andamento osservato nella regione estrinseca, nella quale predomina il contributo alla conduzione dato dal drogante; b) è necessaria una nuova fisica per descrivere l'andamento esponenziale osservato.

### **8) Misura della carica elementare**

Scopo: misurare la carica dell'elettrone mediante un esperimento di elettrolisi.

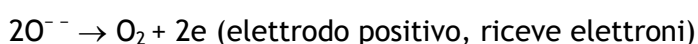
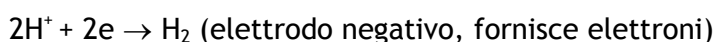
Si utilizza una vaschetta con acqua di rubinetto, una batteria, una lampadina e due elettrodi di rame. Si chiude il circuito immergendo gli elettrodi nell'acqua evitando

che gli elettrodi si tocchino. La lampadina resta spenta indicando un passaggio di corrente non rivelabile: quindi la conduttività dell'acqua è molto bassa. Si immergono gli elettrodi nel sale: non passa corrente. Si getta nell'acqua un cucchiaino di sale da cucina mescolando la soluzione con una bacchetta di vetro o di plastica. Mano a mano che il cristallo si scioglie la luminosità della lampadina aumenta. Ciò indica un aumento della conducibilità della soluzione che può essere interpretato facendo riferimento alla struttura microscopica del sale NaCl che in soluzione origina ioni  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  che si comportano come portatori di carica elettrica relativamente liberi di muoversi sotto l'azione del campo elettrico della batteria.

Sciogliendo del bicarbonato di sodio in una vaschetta di acqua pura in cui sono immersi due elettrodi, l'amperometro indica passaggio di una debole corrente elettrica nella soluzione: quindi il bicarbonato dà luogo ad una debole conduzione in quanto origina la presenza di ioni in soluzione.

La cella elettrolitica (adattata da IPS Group, 1974) è costituita da una vaschetta che contiene una soluzione di bicarbonato di sodio al 10% in cui sono immersi due elettrodi metallici che possono essere collegati ad una batteria. Si dispongono due provette rovesciate colme di soluzione sopra agli elettrodi e si chiude il circuito: si sviluppa del gas nelle due provette. Analizzando i gas si trova che quando passa la corrente si sviluppa: idrogeno gassoso sopra all'elettrodo negativo, ossigeno sopra all'elettrodo positivo.

E' noto che le molecole di questi due gas hanno carica elettrica zero: dunque nella soluzione di bicarbonato di sodio sono presenti ioni idrogeno e ioni ossigeno, con carica elettrica diversa da zero. E' allora possibile riconoscere la partecipazione degli elettroni alle reazioni di formazione dei gas secondo le reazioni:



Le reazioni di produzione dei gas coinvolgono gli elettroni che si legano agli ioni idrogeno e si staccano dagli ioni ossigeno. Ciò fornisce importanti informazioni sulla natura della corrente nel circuito. La partecipazione degli elettroni alle reazioni di produzione dei gas può essere spiegata ammettendo che elettroni vengono scambiati tra gli elettrodi della cella ed il circuito. Ciò conferma che la corrente è un flusso di elettroni messi in moto dalla batteria.

Infine il numero di elettroni che attraversano una sezione del filo in un secondo può essere contato in due modi diversi: a) utilizzando l'indicazione dell'amperometro e dell'orologio; b) utilizzando la misura del volume di idrogeno sviluppato, nota la sua densità alla temperatura dell'esperimento. Collegando queste due misure è possibile

ottenere il valore della carica elementare espresso in Coulomb. Sia  $t$  il tempo di funzionamento della cella misurato a partire dalla chiusura del circuito. Se  $I$  è la corrente nel circuito, allora  $Q=It$  è la carica che ha attraversato il circuito. Se  $N$  è il numero di elettroni contenuto in tale carica, allora la carica dell'elettrone risulta  $e=Q/N$ . La reazione già scritta per l'elettrodo negativo indica che per ogni atomo di gas idrogeno, un elettrone ha attraversato il circuito. Quindi  $N$  è pari al numero di atomi di gas idrogeno che si calcola conoscendo la massa di un atomo di idrogeno  $m_H$ , la densità dell'idrogeno nelle condizioni dell'esperimento  $d$  ed il volume di gas idrogeno sviluppato  $V$ . Risulta  $N=dV/m_H$

### 7. Esperimenti - Materiali

Nella progettazione degli esperimenti sono stati considerati i seguenti criteri:

Tabella 1 - criteri per la progettazione degli esperimenti

Semplicità	gli esperimenti rivelano la fisica sottostante nel più semplice modo possibile
Economicità	ogni volta che fosse possibile sono stati utilizzati elementi poco costosi
Fattibilità	vengono utilizzati materiali facilmente reperibili, anche per quanto riguarda il software, ed è richiesta una abilità minima per montare gli esperimenti
Sicurezza	ove possibile, sono stati evitati materiali pericolosi e correnti intense. Sono state richiamate le norme di sicurezza per la dimostrazione con l'azoto liquido
Compattezza	si è cercato di rendere gli esperimenti non ingombranti, leggeri e facilmente trasportabili
Prontezza	la maggior parte degli esperimenti può essere montata ed eseguita in pochi minuti

Essendo gli esperimenti semplici, compatti e poco costosi, è facile riprodurli e portarli in classe. Inoltre, queste stesse proprietà li rendono adatti per essere utilizzati dagli studenti, in classe o a casa. Molti esperimenti presentano un fenomeno solo qualitativamente, qualcuno permette di eseguire misurazioni con sensori collegabili al PC che consentono una analisi quantitativa dei principi fisici.

Nel seguito vengono descritti i più significativi esperimenti del percorso, tralasciando quelli più tradizionali (ad esempio, le leggi di Ohm). Le descrizioni riportano foto



esplicative, cenni sulla esecuzione e sulle eventuali insidie da evitare nel condurre l'esperimento.

### ***E1 - Fili conduttori, batterie e lampadine***

I primi esperimenti sistematici sugli effetti del passaggio della corrente elettrica in fili metallici furono compiuti da J. G. Children a partire dal 1808. In una serie di questi esperimenti, fili di platino di lunghezze differenti sono chiusi su una pila di Volta. Children (1808) riporta i seguenti dati:

Esp. 1) Un filo di platino, di lunghezza 18 pollici (45,7 cm) e diametro  $1/30$  di pollice è stato completamente fuso in circa 20 secondi.

Esp. 2) Tre piedi (0,9 m) dello stesso filo sono stati riscaldati assumendo un colore rosso brillante, visibile alla luce del giorno.

Esp. 3) Quattro piedi (1,2 m) dello stesso filo sono stati resi molto caldi, assumendo un colore rosso non percepibile alla luce del giorno ma al buio.

Esp. 4) L'effetto su un filo di ferro, di lunghezza tre piedi (0,9 m) e diametro circa  $1/70$  di pollice, è stato sorprendentemente debole. Non riusciva a riscaldarlo.

In questa serie di esperimenti Children (1808) considerava due variabili: la lunghezza e il materiale (platino e ferro) del filo. I risultati ottenuti hanno fornito indicazioni sulla dipendenza tra la lunghezza e il materiale del filo e gli effetti osservati della corrente elettrica in termini di riscaldamento del filo. Ciò ha consentito a Children di riconoscere che la ragione principale dei diversi effetti poteva essere ricondotta a differenze nelle proprietà elettriche dei materiali.



Figura 7 - chiusura del circuito

In una versione moderna di questi esperimenti (fig. 7), l'effetto prodotto dal passaggio della corrente nel filo viene rivelato dalla diversa luminosità di una lampadina ad incandescenza. Sono stati utilizzati cinque fili: quattro dello stesso materiale (costantana,  $\rho=4,8 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ ) ma con diversa lunghezza (corto, medio, lungo); uno più spesso ma con la stessa lunghezza di quello medio; l'ultimo filo ha la stessa lunghezza e lo stesso spessore del filo medio, ma è fatto di rame ( $\rho=1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ). Per valutare la fattibilità sono state misurate: lunghezza  $l$  e diametro  $d$  dei fili, la corrente  $I$  nel circuito mantenendo la batteria fissa, la potenza relativa  $(I/I_{\max})^2$  e la luminosità relativa della lampadina con un sensore di luce.

Tabella 2 - misure di luminosità

Filo	$l$ (cm)	$d$ (mm)	$I$ (A)	$I^2/I_{\max}^2$	Lum rel.
Corto	18	0,2	0,16	71%	90%
Medio	38	0,2	0,13	47%	39%
Lungo	57	0,2	0,11	34%	19%
Grosso	38	1,1	0,19	100%	100%
Rame	38	0,2	0,19	100%	100%

I dati nell'ultima colonna della tab. 2 indicano che la luminosità della lampadina è valutabile come  $I^2R$  con una resistenza  $R$  della lampadina incognita ma indipendente dalla corrente, e dimostrano che non è difficile vedere la variazione della luminosità della lampadina cambiando il filo.

### ***E2 - Misura del campo elettrico***

La misura del campo elettrico si effettua utilizzando due placchette (fig. 8, dischi di alluminio, spessore 1 mm, diametro circa 6 cm) montate su bacchette di supporto in plexiglas (circa 35 cm). Se le placchette scariche ed accostate vengono disposte in una regione di spazio in cui è presente un campo elettrico uniforme e costante  $E$  che forma un angolo  $\theta$  con la direzione normale ad esse, allora ogni elettrone libero in esse è soggetto ad una forza  $F_n=eE\cos\theta$  nella direzione normale alle placchette e  $F_t=eE\sin\theta$  nella direzione parallela.



Figura 8 - placchette per la misura del campo elettrico (Dalla Valle, 1999)

Di conseguenza, degli elettroni si accumulano su una placchetta lasciando un difetto di elettroni sull'altra. La separazione della carica dà luogo ad un campo elettrico all'interno delle placchette che ha verso opposto al campo esterno. Tale separazione prosegue finché il campo totale all'interno delle placchette diventa zero. Nella situazione di equilibrio la carica separata dalla componente parallela del campo ha somma zero in ciascuna placchetta. Invece la carica separata dalla componente normale del campo è proporzionale alla sua intensità e ne rappresenta una misura in unità arbitrarie.

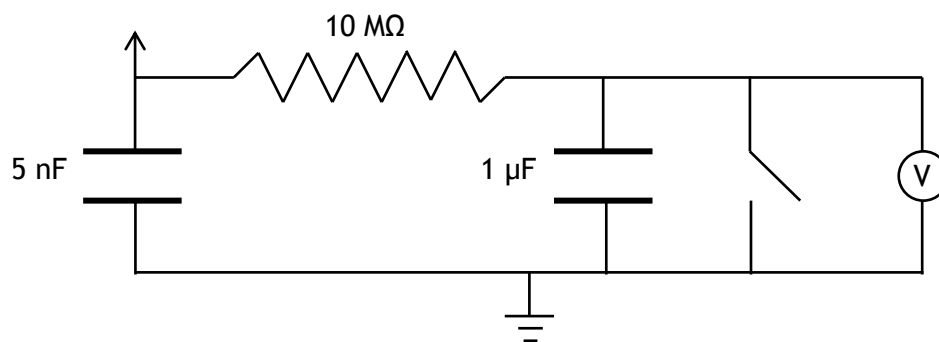


Figura 9 - schema del circuito

Per la misura della carica si è utilizzato il circuito rappresentato in fig. 9 (Dalla Valle, 1999). Il circuito è racchiuso in una scatola metallica dotata di un pulsante, un elettrodo arrotondato e due spinotti (fig. 10).

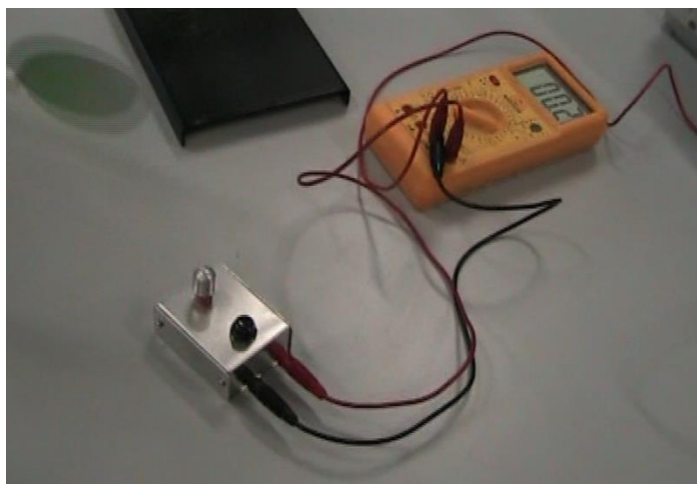


Figura 10 - misuratore di carica

Il multimetro è utilizzato come voltmetro (con impedenza  $10\text{ M}\Omega$ ) e va collegato ad una presa di terra, cui si collega l'involucro metallico della scatola. Il pulsante azzerava la lettura del voltmetro. Appoggiando un corpo carico all'elettrodo arrotondato della scatola l'indicazione del voltmetro nel giro di 1-2 secondi si porta su un valore massimo, che tipicamente è intorno ai  $10\text{ mV}$ , e poi lentamente calare. Il fenomeno può essere qualitativamente spiegato come segue: ponendo un corpo carico a contatto con l'elettrodo, esso si scarica completamente sul condensatore da  $5\text{ nF}$ ; ciò determina la carica rapida del condensatore da  $1\text{ }\mu\text{F}$  che poi si scarica lentamente sulla resistenza interna del voltmetro. Poiché il processo è descritto da equazioni lineari, il valore massimo della tensione letta sul voltmetro  $V_{\text{MAX}}$  è proporzionale alla carica del corpo secondo una costante di trasferimento che può essere determinata empiricamente.

Per caricare i corpi in ambiente scolastico, dove non è opportuno utilizzare generatori di tensioni elevate, si può utilizzare un accendino piezoelettrico. Misure ripetute di carica di una sfera metallica di raggio  $5\text{ cm}$  montata su un supporto isolante hanno dato  $V_{\text{MAX}}=21,4\pm 4,2\text{ mV}$  da cui si ricava una tensione dell'accendino di circa  $4\text{ kV}$  in accordo con una stima basata sulla lunghezza delle scintille ( $4\text{ mm}$ ) in aria umida (rigidità dielettrica  $1\text{ kV/mm}$ ).

Poiché la carica separata su una placchetta è proporzionale all'intensità del campo elettrico, la lettura della tensione indicata dal voltmetro è una misura del campo elettrico in unità arbitrarie.

Il costo complessivo dell'apparato è molto contenuto. Dal punto di vista didattico questo strumento è utile per dare concretezza al concetto di campo elettrico.

### E3 - Riscaldamento di resistori ceramici

Sono utilizzati resistori ceramici da 68 e 270  $\Omega$  e un sensore di temperatura. Si alimenta con una certa tensione V un resistore posto in un involucro di polistirolo che funge da isolante termico e si misura la temperatura T in funzione del tempo t. L'interpolazione dei dati consente di ottenere il ritmo di riscaldamento  $\Delta T/\Delta t$  (fig. 11) che poi viene graficato per i due resistori considerati in funzione della grandezza IV (prodotto corrente-tensione) per differenti valori della tensione di alimentazione.

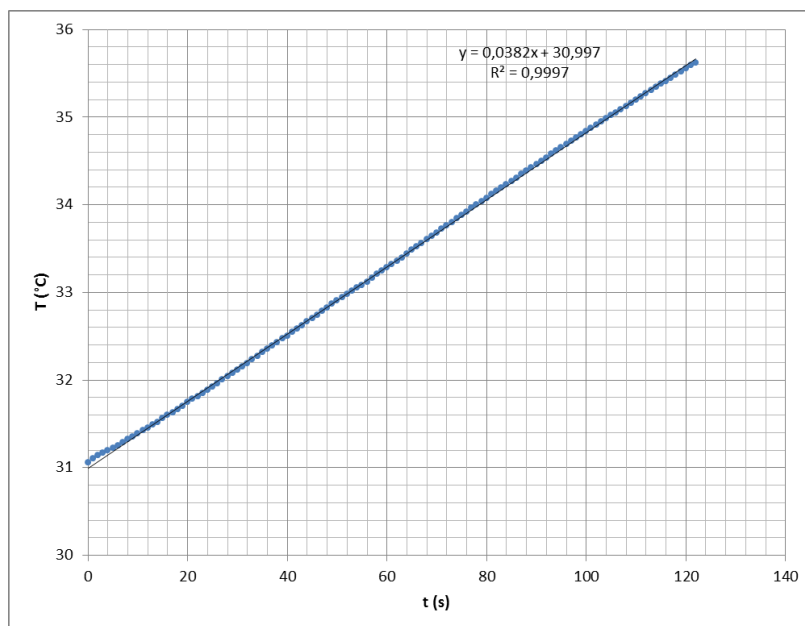


Figura 11 - aumento di temperatura del resistore alimentato a 6 V

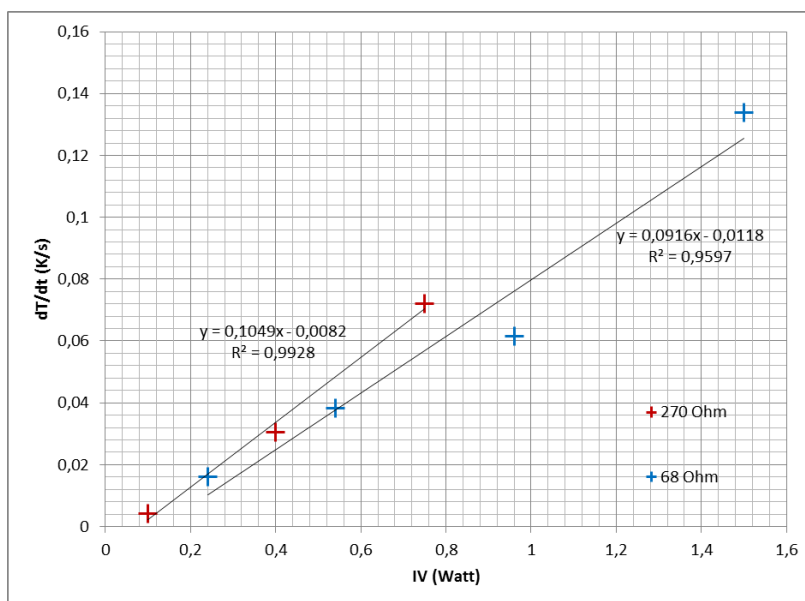


Figura 12 - ritmo di riscaldamento in funzione di IV

Questo grafico (fig. 12) è molto interessante in quanto mostra che per entrambi i resistori il ritmo di riscaldamento è proporzionale al prodotto tra la corrente e la tensione ai capi del resistore (che è praticamente uguale alla tensione della batteria). Alcuni dati (tab. 3) consentono di stimare l'efficienza del trasferimento di energia nel riscaldamento di un resistore da  $68 \Omega$  alimentato con tensioni differenti e racchiuso in un involucro isolante. La massa misurata del resistore è 6,35 g mentre il calore specifico stimato del resistore è  $2,3 \text{ J/(g K)}$ . L'ultima colonna della tab. 3 riporta la differenza tra la potenza fornita dalla batteria e quella impegnata nel riscaldamento del resistore.

Tabella 3 - trasferimento di energia nel riscaldamento

V (volt)	I (A)	IV (Watt)	$\Delta T/\Delta t$ (K/s)	$C\Delta T/\Delta t$ (Watt)	diff
4	0,06	0,24	0,016	0,23	3%
6	0,09	0,54	0,038	0,56	-3%
8	0,12	0,96	0,062	0,90	6%

#### ***E4 - Simulazione Supercomet***

Snir, Smith & Raz (2003) distinguono due distinte modalità di utilizzo del computer nella didattica: 1) computer come ausilio nella presentazione dei contenuti, 2) computer come strumento di indagine. Nel primo caso, il computer viene utilizzato principalmente per presentare delle informazioni agli studenti. Nel secondo caso, il computer viene utilizzato come strumento per esplorare il mondo o l'ambiente creato sullo schermo e lo studente può interagire con esso. In questo caso l'utilizzo del computer offre delle opportunità specifiche che mancano ad altri mezzi di comunicazione: la capacità di rappresentare sullo schermo simulazioni a livelli differenti dello stesso fenomeno. Questa caratteristica è importante nella didattica scientifica in quanto può aiutare gli studenti a collegare gli aspetti macroscopici dei fenomeni ai modelli microscopici (White & Frederiksen, 1998).

Nel caso della conduzione elettrica, gli studenti possono collegare le osservazioni sull'andamento della resistività dei metalli con la temperatura all'influenza dell'agitazione termica degli ioni reticolari sul processo di interazione con gli elettroni di conduzione, distinguendo un livello di osservazione e un livello di spiegazione basata sul modello microscopico. Questa considerazione sul valore aggiunto al processo di apprendimento è stata la ragione principale per introdurre la simulazione Supercomet.

La simulazione (fig. 13) rappresenta l'interno di un conduttore a temperatura  $T$  che può essere variata ed in assenza/presenza di campo elettrico di intensità pure variabile. Dischetti rossi in movimento rappresentano gli elettroni di conduzione, mentre dischi oscillanti intorno a posizioni di equilibrio disposte sui nodi di un reticolo piano a maglie quadrate rappresentano gli ioni reticolari.

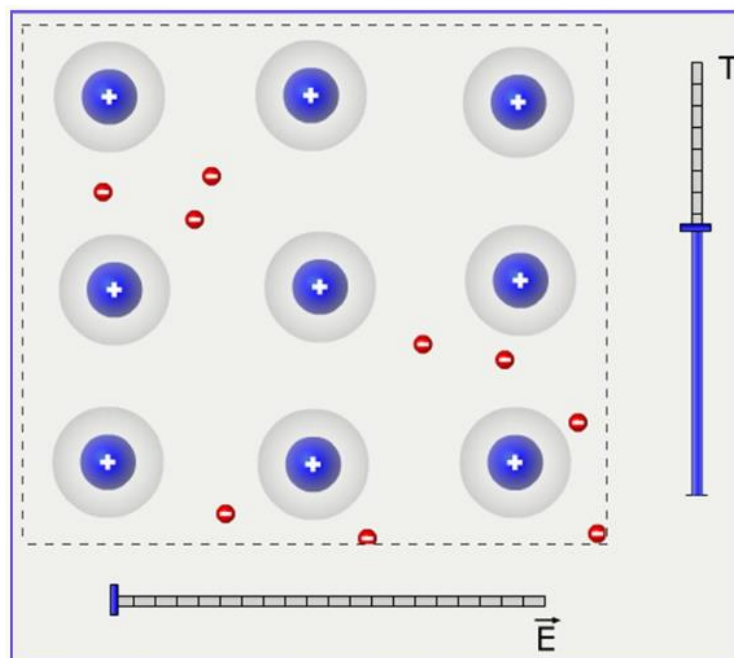


Figura 13 - simulazione Supercomet

E' stata utilizzata per: a) osservare il moto disordinato degli elettroni di conduzione in assenza di campo elettrico applicato; b) osservare la sovrapposizione di un moto ordinato introducendo il campo elettrico; c) osservare la differente ampiezza di oscillazione degli ioni reticolari attorno alle posizioni di equilibrio variando la temperatura. Gli effetti sul moto degli elettroni osservati al variare del campo elettrico sono riconducibili al modello di Drude; al variare della temperatura invece la simulazione è riconducibile al modello di Sommerfeld, in quanto non varia la velocità media del moto disordinato degli elettroni di conduzione. La rappresentazione fornita dalla simulazione non è in accordo con la realtà fisica. Infatti l'interno di un conduttore non è bidimensionale, come mostrato dalla simulazione, e non sono rispettate le proporzioni tra le grandezze fisiche di elettroni e ioni per quanto riguarda dimensioni e velocità.

#### ***E5 - Raffreddamento della bobina in azoto liquido***

Una bobina costituita da un avvolgimento di filo di rame smaltato (diametro=0,16 mm; lunghezza=15 m) su un supporto di legno percorsa dalla corrente viene immersa in azoto

liquido contenuto in un thermos (fig. 14). La bobina è alimentata con una batteria da 4,5 V ed è chiusa su una lampadina fissata sull'altro capo del supporto di legno.

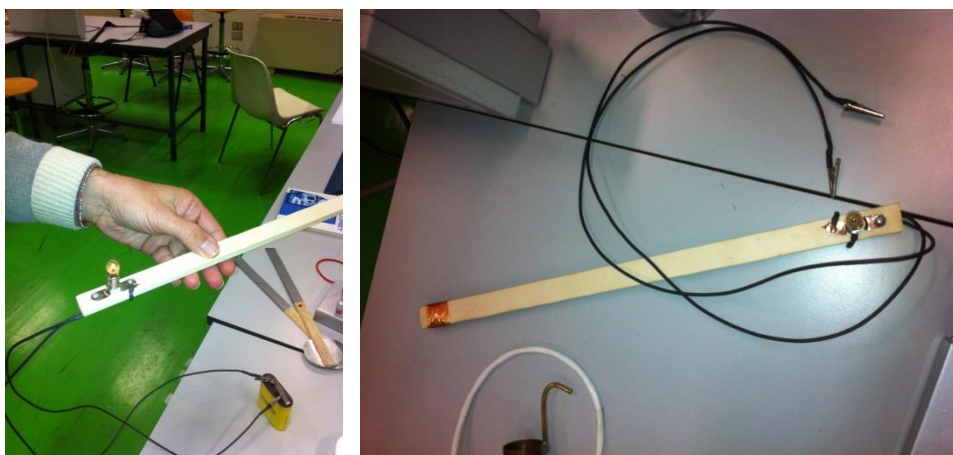


Figura 14 - bobina in azoto liquido

La resistenza della bobina a temperatura ambiente può essere stimata dell'ordine di 13  $\Omega$ , paragonabile alla resistenza del filo di costantana di lunghezza 57 cm, utilizzato nell'esperienza con fili conduttori, batterie e lampadine. Infatti la luminosità della lampadina a temperatura ambiente è bassa, ma comunque percepibile alla luce del giorno. La temperatura dell'azoto liquido è intorno a 100 K e ciò determina un abbassamento della temperatura del filo di rame con conseguente diminuzione della resistività di un fattore pari circa a 5 (Desai et al., 1984). Di conseguenza la luminosità della lampadina aumenta vistosamente, come nell'esperienza E1 con i fili conduttori.

### ***E6 - Elettrolisi***

L'apparato utilizzato (fig. 15, adattato da IPS Group, 1974) è costituito da una vaschetta di plastica con una soluzione di  $\text{NaHCO}_3$  al 10% in cui sono immersi due elettrodi di acciaio fissati al bordo della vaschetta con pinze per fogli. Con la stessa soluzione si riempiono due provette fino all'orlo e si tappano con un pezzettino di carta. Rovesciando le provette la soluzione non cade e ciò consente di immergerle nella vaschetta rimuovendo successivamente il pezzettino di carta con una pinzetta. Le provette sono sostenute da un supporto di polistirolo opportunamente forato. A questo punto il dispositivo può essere collegato ad una batteria da 4,5 V o ad un generatore di tensione costante.



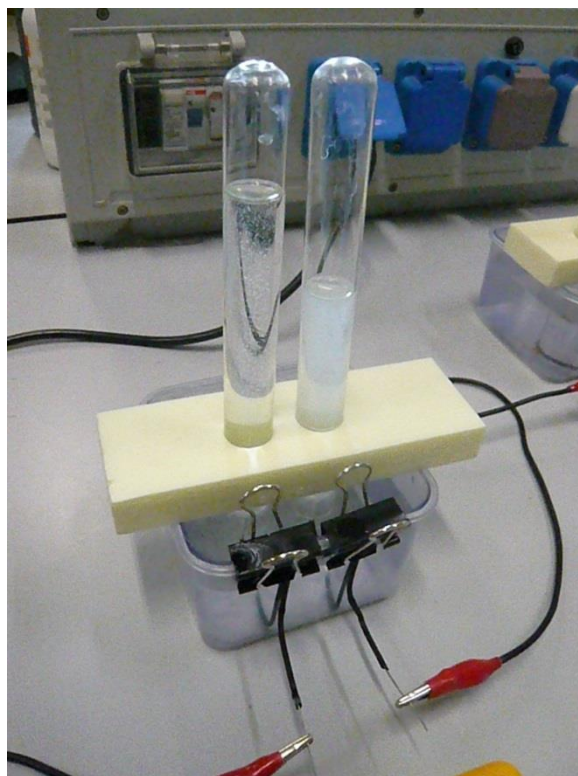


Figura 15 - elettrolisi

Alimentando la cella ad una tensione di 6 V, in 20 minuti si raccoglie una quantità di gas più che sufficiente per la misura.

Tabella 4 - misura della carica fondamentale

tensione	6 V		corrente	70 mA
tempo	20 min			
			carica	84 C
h (-)	4,9	cm	12,1814	cm <sup>3</sup>
h (+)	2,6	cm	6,4636	cm <sup>3</sup>
			rapp V	1,88
1	cm	equivale	2,486	ml
1	amu	equivale	1,66E-24	g
densità H <sub>2</sub>	0,0835	g/dm <sup>3</sup>	21 °C	
massa H <sub>2</sub>	0,00101715	g		
atomi H	6,1274E+20			
			e	1,37E-19 C

Si riportano in tab. 4 i dati ottenuti in una sperimentazione. Una fonte di errore non considerata in questo esperimento è la valutazione del volume della parte arrotondata della provetta in cui si raccoglie il gas.

### ***E7 - Esperimento di Johnson***

L'esito dell'esperimento di Thomson indica che da tutti i metalli possono essere estratte particelle di massa e carica invariabili che non sono atomi ma costituenti degli atomi:

gli elettroni. Queste particelle costituiscono la corrente nel gas rarefatto presente nel tubo utilizzato da Thomson. In una soluzione elettrolitica il deposito di massa sugli elettrodi indica che la corrente è trasportata dagli ioni. Poiché non vi è deposito di massa ai capi di un filo conduttore percorso da corrente per un tempo comunque lungo, si può pensare che nei metalli la corrente sia costituita da un flusso di elettroni. Non può trattarsi di onde poiché queste non trasportano carica elettrica.

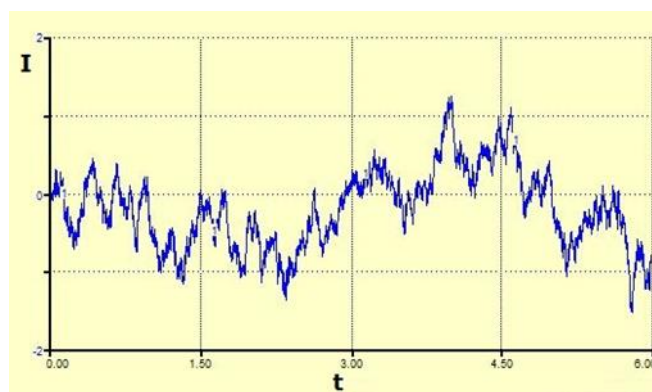


Figura 16 - grafico corrente vs tempo per un conduttore non alimentato

Per indagare la natura della corrente nei metalli, si misura la corrente in un conduttore non alimentato (fig. 16). Johnson in un esperimento del 1928 misura in un resistore con resistenza  $R=0,5 \text{ M}\Omega$  una corrente con valore medio nullo che però presenta una fluttuazione dell'ordine di  $10 \text{ pA}$ . Trova anche che la corrente misurata dipende dalla temperatura del resistore. La fluttuazione della corrente in un resistore non alimentato indica che gli elettroni responsabili della conduzione all'interno di un metallo sono in movimento caotico, come le particelle di un gas.

## XI. Conclusioni

La ricerca descritta in questa tesi verte sulla ricostruzione didattica (MRE, cap. II), in prospettiva verticale, delle proprietà di trasporto elettrico nei solidi. Il progetto di ricerca, di tipo *Design Based*, (DBR, cap. II) ha sviluppato un percorso di insegnamento/apprendimento sullo specifico argomento. Sperimentazioni di metodologie e materiali innovativi per favorire l'apprendimento degli studenti a livelli di scolarità differenziati sono state integrate con attività di formazione insegnanti di scuola primaria, media e superiore sulla conoscenza pedagogica (PCK, Shulman, 1986) dei relativi contenuti. La prospettiva verticale ha consentito di mantenere una visione unitaria del contenuto fisico adattato alle strutture cognitive di studenti di età diverse. Scopo della ricerca è stato di chiarire gli elementi dell'insegnamento/apprendimento della conduzione elettrica nei solidi. Alla luce di questa finalità sono stati utilizzati quadri di riferimento teorici, conoscenze disciplinari, dati empirici in quanto supporti alla progettazione didattica. In questi termini si sono affrontati le sfide poste dalla progettazione di un percorso da utilizzare in contesti scolastici. In questo senso la ricerca illustrata in questa tesi fornisce quindi un esempio di come la progettazione può contribuire a ridurre il gap tra teoria e pratica didattica, che è uno degli aspetti considerati nel quadro di riferimento della *Design Based Research*.

Il lavoro di ricerca è stato organizzato secondo le tre componenti principali della *Design Based Research* (cap. II, fig. 5): 1) analisi preliminare; 2) ciclo di progettazione, sperimentazione, valutazione, revisione; 3) costruzione di conoscenza didattica dell'argomento in termini di un percorso. L'approccio *DBR* adottato nella ricerca intreccia la riflessione disciplinare, la ricerca in contesto sull'interazione tra i processi di insegnamento e apprendimento, lo sviluppo di curriculum su piccola scala, consentendo di affrontare le domande di ricerca attraverso un collegamento sistematico tra teoria e prassi didattica che ha rafforzato coerenza e flessibilità del processo progettuale.

### 1) Analisi preliminare

La progettazione didattica ha avuto come punto di partenza una analisi disciplinare, storica, epistemologica (cap. III e IV), e pure della letteratura di ricerca didattica (cap. V). L'analisi disciplinare ha individuato come nuclei concettuali rilevanti: a) la giustificazione su base fisica della legge di Ohm e della legge di Joule per realizzare una significativa integrazione tra la visione macroscopica e microscopica della conduzione, b) la presenza del campo elettrico in un conduttore omogeneo percorso da corrente, c) il trasferimento di energia nei circuiti.

Dalla discussione della letteratura didattica è emerso: a) la validità didattica dell'approccio laboratoriale ai fenomeni elettrici che consente di fondare i concetti partendo dalla fenomenologia, b) la necessità di affrontare il livello microscopico per chiarificare le relazioni tra proprietà e processi delle particelle con grandezze fisiche quali carica, corrente, campo elettrico, energia.

Elementi chiave per aiutare gli studenti a superare le difficoltà di apprendimento sono: a) carica elettrica come proprietà delle particelle che nei modelli microscopici basati sul campo assume un ruolo centrale in quanto determina la risposta dei portatori di carica al campo applicato, b) campo elettrico non solo come ente responsabile del movimento dei portatori di carica, ma anche come vettore del trasferimento di energia nel circuito, che rende conto della caratteristica del circuito di essere un sistema di elementi interagenti.

Questi elementi sono importanti anche per la comprensione dei fenomeni della conduzione elettrica da parte degli insegnanti. Infatti i corsi liceali e universitari forniscono relazioni matematiche (ad esempio per quanto riguarda il potenziale elettrico, la legge di Ohm e di Joule) che gli studenti manipolano formalmente, senza guadagnare una comprensione concettuale profonda e articolata anche sul piano microscopico dei contenuti fisici sottostanti (Stocklmayer & Treagust, 1996).

## 2) Ciclo di progettazione, sperimentazione, valutazione, revisione

Sulla base degli aspetti individuati nella fase di analisi preliminare, sono state progettate le attività per gli studenti e per gli insegnanti. In questa fase empirica della ricerca sono state studiate: a) le strategie di ragionamento degli studenti di scuole elementari, medie e superiori impegnati in contesti formali e informali nelle attività progettate; b) le strategie didattiche di insegnanti in formazione ed in servizio nelle scuole elementari, medie e superiori. In funzione delle differenti necessità e scenari della ricerca sono state adottate modalità di analisi qualitativa dei dati raccolti.

I dati analizzati provengono dalle schede compilate dagli studenti, dai progetti elaborati dagli insegnanti, dalla osservazione diretta dei processi di insegnamento/apprendimento e dalla loro discussione. L'analisi dei dati ha fornito gli elementi per la valutazione dei processi di apprendimento e delle attività, delle strategie di inquiry guidato e ciclo POE (cap. II), dei materiali a supporto della didattica e ha consentito la conferma/disconferma delle ipotesi preliminari e la formulazione di nuove ipotesi progettuali che hanno attivato un nuovo ciclo di progettazione, sperimentazione, valutazione, revisione.

La valutazione dei risultati delle sperimentazioni effettuate in termini di confronto tra gli apprendimenti attesi ed ottenuti, per quanto riguarda gli studenti, ed in termini di

trasformazione della conoscenza disciplinare in competenza pedagogica, per quanto riguarda gli insegnanti, hanno permesso di consolidare l'utilizzo di esperimenti, simulazioni e strategie come strumenti che sostengono efficacemente l'approccio adottato.

### 3) Percorso

Il percorso (cap. X) promuove la comprensione concettuale unitaria delle proprietà elettriche di conduttori, semiconduttori, isolanti e delle leggi della conduzione elettrica presentando elementi innovativi quali l'integrazione partendo dalla fenomenologia dei modelli macroscopici e microscopici. Sebbene l'approccio adottato nella ricerca descritta in questa tesi sia centrato sul modello microscopico in termini di entità astratte quali particelle e campi, la fenomenologia gioca un ruolo essenziale: sia gli studenti che gli insegnanti hanno bisogno di essere coinvolti in esperimenti e attività laboratoriali per suscitare interesse e facilitare il ragionamento.

Tradizionalmente studenti e insegnanti intendono l'esperimento come verifica di leggi note e, per questo motivo, ritengono più significativi gli esperimenti quantitativi. Essi vedono l'esperimento come una riproduzione controllata di un fenomeno eseguita per determinare correlazioni tra grandezze. Per superare questa visione si è scelto di inserire nel percorso degli esperimenti di carattere qualitativo che stimolano il ragionamento sui concetti fisici.

L'approccio basato sulla fenomenologia facilita i ragionamenti degli studenti al livello microscopico, in particolare su:

- a) campo elettrico come proprietà misurabile dello spazio;
- b) carica elettrica come proprietà delle particelle (esp. Millikan) e non come sostanza o fluido. Ciò consente agli studenti di superare le analogie idrauliche per la corrente e distinguere tra corrente ed energia;
- c) presenza di elettroni nei metalli (esp. gruccia e lattina) e loro stato di moto (esp. Johnson) superando i modelli spontanei (Wittmann, Steinberg & Redish, 2002);
- d) collegare la tensione al lavoro della batteria (esp. Dalla Valle), superando le definizioni matematiche astratte;
- e) collegare la presenza del campo elettrico nei fili conduttori alla tensione della batteria (esp. Dalla Valle);
- f) distinguere velocità di deriva degli elettroni e velocità di propagazione dell'energia;
- g) legge di Ohm come relazione tra densità di corrente e campo elettrico;
- h) interazione tra elettroni di conduzione e ioni reticolari (effetto Joule);
- i) collegare la resistività alla sezione d'urto dei processi di interazione elettroni liberi-ioni reticolari (simulazione Supercomet).

Gli studenti hanno superato gradualmente il livello della descrizione formulando previsioni e producendo spiegazioni basate su interpretazioni dei fenomeni osservati in termini fisici, non limitandosi a dedurre le osservazioni dalla teoria.

Nell'introdurre il modello microscopico è stato sottolineato il concetto di modello come rappresentazione della realtà osservata e della sua connessione con il dominio empirico di validità. Questo approccio presenta delle difficoltà iniziali per gli studenti che sono portati a dare spiegazioni basate sulle loro concezioni spontanee/conoscenze preesistenti piuttosto che a ragionare sui processi fisici del sistema osservato. Due fattori sono stati rilevanti per la comprensione del modello microscopico: a) l'interpretazione delle leggi di Ohm consentita dal modello in termini di relazioni causali tra enti microscopici, b) il progressivo allargamento del dominio di validità, necessario per correlare le proprietà del modello ai risultati sperimentali sull'andamento della resistività con la temperatura.

In conclusione, la ricostruzione didattica dei contenuti disciplinari (*MRE*) integrata con l'approccio *PCK* alla formazione insegnanti, si è rivelata come un quadro di riferimento utile per sviluppare una ricerca finalizzata alla produzione di conoscenza didattica in termini di un percorso concettuale sulla conduzione elettrica (*DBR*). La descrizione dei processi di sviluppo della progettazione è essa stessa un prodotto di ricerca che può orientare studi futuri rivolti alla progettazione di percorsi didattici. I risultati della ricerca forniscono una prima validazione della progettazione didattica illustrata in questa tesi in termini di strategie di apprendimento e di formazione insegnanti. Gli insegnanti coinvolti nei laboratori hanno potuto verificare direttamente la validità didattica del percorso e allo stesso tempo farne uso al fine di consolidare una visione complessiva della conduzione elettrica basata su modelli fisici microscopici realizzando una crescita significativa della conoscenza del contenuto disciplinare ma anche di competenza pedagogica.

Gli esiti della sperimentazione condotta con studenti di scuola superiore (cap. VII) mostrano che essi in percentuale ampia (anche se non maggioritaria) sulla base dell'esperimento di Millikan formulano l'ipotesi della natura particellare della carica elettrica e di conseguenza interpretano i fenomeni osservati in base alla presenza di particelle cariche nei metalli che possono essere messe in movimento dalla forza esercitata da un campo elettrico. Ragionando sulle grandezze microscopiche riconducono: a) la legge di Ohm ad una relazione causale tra campo elettrico e densità di corrente, b) la differente conducibilità di materiali diversi alla diversa interazione elettroni-reticolo. L'esperimento di immersione di un filo conduttore percorso da corrente in azoto liquido (con conseguente aumento di luminosità della lampadina) fa

emergere l'idea dei processi microscopici di interazione tra elettroni di conduzione e reticolo ionico. Gli studenti utilizzano il modello microscopico rappresentato nella simulazione Supercomet per spiegare l'andamento osservato della resistività di un metallo con la temperatura.

Ciò dimostra che integrare le attività di osservazione e sperimentazione con la simulazione dello stato e dei processi microscopici ha stimolato gli studenti a svolgere un ruolo attivo nel processo di apprendimento e ad utilizzare il modello nello sviluppo di idee e spiegazioni. Quindi i risultati della ricerca illustrata in questa tesi, in accordo con una impostazione largamente condivisa, sostengono la validità di strategie didattiche di tipo *inquiry guidato* nella didattica della fisica. L'approccio didattico che giustifica il modello microscopico partendo dalla fenomenologia può essere esteso anche ad altri specifici contenuti scientifici come sostegno alla progettazione di percorsi didattici e/o di interventi di formazione insegnanti di scienze con lo scopo di promuovere il passaggio dalla didattica tradizionale ad una didattica innovativa in grado di affrontare le sfide poste dall'apprendimento.

## XII. Bibliografia

*Nota: I siti indicati sono stati consultati nell'autunno 2013*

Abd-El-Khalick, F., Boujaoude, S., Duschl, R., Lederman, N. G., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A., ... & Tuan, H. L. (2004) Inquiry in science education: International perspectives. *Science Education*, 88(3), 397-419

Aiello-Nicosia M. L. & Sperandeo-Mineo R. M. (2000) Educational reconstruction of physics content to be taught and of pre-service teacher training: a case study, *International Journal of Science Education*, 22:10, 1085-1097

Albanese A. & Vicentini M. (1997) Why Do We Believe that an Atom is Colourless? Reflections about the Teaching of the Particle Model, *Science & Education* 6(3), 251-261

Alonso M. & Finn E. J. (1980) *Fundamental University Physics*, 2nd edition, California: Addison Wesley

Andersson B. & Wallin A. (2006) On Developing Content-oriented Theories Taking Biological Evolution as an Example, *International Journal of Science Education*, 28:6, 673-695

Arrhenius, S. (1887) Arbeiten über die Leitfähigkeit mit Kohlrauschs Konduktometer und Postulat der Dissoziation von Salzen in positive und negative Ladungsträger, Begründer der Dissoziationstheorie. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 1: 631-648

Ashcroft N.W. & Mermin N. D. (1976) *Solid State Physics*, Philadelphia: Saunders

Assis, A. & Hernandez J. (2007) *The Electric Force of a Current*, Montreal: Apeiron

Azaiza, I., Bar, V. & Galili, I. (2006) Learning electricity in elementary school, *International Journal of Science and Mathematics Education* 4, 45-71

Barbas, A. & Psillos, D. (1997) Causal reasoning as a base for advancing a systemic approach to simple electrical circuits. *Research in Science Education*, 27(3), 445-459

Bassani F. & Grassano U. (2000) *Fisica dello stato solido*, Torino: Bollati Boringhieri

Bellone, E. (1973) *I modelli e la concezione del mondo nella fisica moderna da Laplace a Bohr*, Milano: Feltrinelli



- Belloni M., Christian, W. & Cox A.J. (2006) Exploring the Millikan Oil Drop Experiment, online [http://webphysics.davidson.edu/applets/pqp\\_preview/contents/pqp\\_errata/cd\\_errata\\_fixes/section4\\_5.html](http://webphysics.davidson.edu/applets/pqp_preview/contents/pqp_errata/cd_errata_fixes/section4_5.html)
- Benseghir, A. & Closset J. L. (1996) The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties, *International Journal of Science Education*, 18, 2, 179-191
- Berzelius (1819) *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité*, Paris: Méquignon-Marvis
- Berzelius & Hisinger (1803) *Expériences galvaniques*, *Annales de Chimie*, t. LI, 167
- Blakemore J.S. (1985) *Solid State Physics*, Cambridge University Press
- Bloch, F. (1929) Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern, *Zeitschrift für Physik*, 52(7-8): 555-600
- Bonura A. (2008) *Modelli della conduzione elettrica e connessioni tra livelli di descrizione: aspetti metodologici e dinamiche d'apprendimento*, Tesi di dottorato, Università di Palermo
- Bonura A., Fazio C., Guastella I. & Sperandeo-Mineo R.M. (2009) Microscopic and macroscopic aspects of student knowledge in electric conduction in metals, *Proceedings of GIREP Conference*
- Borges, A. T. & Gilbert, J. K. (1999) Mental models of electricity, *International Journal of Science Education*, 21, 1, 95 - 117
- Borghi L., De Ambrosis A. & Mascheretti P. (2007) Microscopic models for bridging electrostatics and currents, *Physics Education* 42(2) 146-155
- Bottani, N. (2002) *Insegnanti al timone*, Bologna: Il Mulino
- Braibant S., Giacomelli G., Spurio M. (2010) *Particelle e interazioni fondamentali*, Milano: Springer-Verlag
- Buchwald J. Z. (1985) *From Maxwell to microphysics. Aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the nineteenth century*, Chicago: University of Chicago Press
- Bunge, M. (1973) *Method and matter*. Dordrech, Holland: D. Reidel

- Busini D. & Tarsitani C. (1995) Macroscopic vs microscopic: a problem of history, epistemology and teaching of physics in Teaching the science of condensed matter and new materials, GIREP eds., 281-286
- Calvani A. (1998) Costruttivismo, progettazione didattica e tecnologie, in D. Bramanti, (a cura di), Progettazione formativa e valutazione, Roma: Carocci
- Campbell, T., & Neilson, D. (2012) Modeling electricity: Model-based inquiry with demonstrations and investigations. *The Physics Teacher*, 50, 347
- Carey, S. (2000) Science Education as Conceptual Change, *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1): 13-19
- Chabay R. W. & Sherwood B. A. (1999) A unified treatment of electrostatics and circuits, online <http://matterandinteractions.org/Content/Articles/circuit.pdf>
- Chabay, R. W. & Sherwood, B. A. (2007) Matter and interactions II: Electric and magnetic interactions, New York: Wiley
- Chalmers, A. (2001) Maxwell, mechanism, and the nature of electricity. *Physics in Perspective*, 3(4), 425-438
- Cheng A. K. & Kwen B. H. (1998) Primary pupils' conception about some aspects of electricity, Conference of the Australian Association for Research in Education, online [www.aare.edu.au/98pap/abs98.htm](http://www.aare.edu.au/98pap/abs98.htm)
- Children, J. G. (1808) An account of some experiments, performed with a view to ascertain the most advantageous method of constructing a voltaic apparatus, for the purposes of chemical research. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 32-38
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002) Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175-218
- Chudnovsky, E. M. (2007) Theory of Spin Hall Effect: Extension of the Drude Model, *Physical review letters*, 99(20), 206601
- Closset, J. L. (1984) Sequential reasoning in electricity. In *Research on Physics Education: Proceedings of the First International Workshop*. Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, La Londe les Maures, France, 313-319
- Cobb P., Confrey J., diSessa A., Lehrer R., Schauble L. (2003) Design Experiments in Educational Research, *Educational Researcher*, 32 (1), 9-13

Cohen L. B. (1957) Conservation and the concept of electric charge: an aspect of philosophy in relation to physics in the nineteenth century, in Clagett M., *Critical Problems in the History of Science: Proceedings Of The Institute For The History Of Science*, University of Wisconsin

Cohen L., Manion L. & Morrison K. (2007) *Research Methods in Education*, London: Routledge

Cohen, R., Eylon, B. & Ganiel, M. (1983) Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal Of Physics*, 51, 5, 407-412

Colombo, M. (2011) *Un percorso di Inquiry Learning sull'energia basato sulle Tecnologie della Informazione e della Comunicazione nella scuola secondaria riformata*, tesi di dottorato, Università di Udine

Cottingham, W. N. & Greenwood, D. A. (1991) *Electricity and magnetism*. Cambridge University Press

Craven III, J. A. & Penick, J. (2001) Preparing new teachers to teach science: The role of the science teacher educator. *Electronic Journal of Science Education*, 6(1)

Cushing, J. T. (1981) Electromagnetic mass, relativity, and the Kaufmann experiments. *American Journal of Physics*, 49, 1133-1149

Dalla Valle F. (1999) *Un metodo sperimentale e teorico per l'insegnamento dell'elettromagnetismo*, fascicolo stampato presso il Liceo Scientifico "G. Ricci Curbastro", Lugo di Romagna

Darrigol O. (2002) *Electrodynamics from Ampere to Einstein*, Oxford University Press

De Launay, J. (1956) *Solid State Physics*. Eds. F. Seitz and D. Turnbull, Academic Press, New York, 2, 219

De Posada, J. M. (1997) Conceptions of High School Students Concerning the Internal Structure of Metals and Their Electric Conduction: Structure and Evolution, *Science Education*, 81(4) 445-467

De Toni A. F. & Dordit L. (2012) *Il cannocchiale di Galileo*, INDIRE, online [www.indire.it](http://www.indire.it)

Debye, P. (1912) On the theory of specific heats. In *The Collected Papers of Peter J.W. Debye* (pp. 650-696) New York : Interscience Publishers

Desai, P. D., Chu, T. K., Janes, H. M., & Ho, C. Y. (1984) Electrical resistivity of selected elements. *Journal of physical and chemical reference data*, 13(4), 1069-1096

Design-Based Research Collective (2003) Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32, 1, 5-8

Dirac P. A. M. (1951) A New Classical Theory of Electrons, *Proceedings of the Royal Society of London*, A 209 (1098) 291-296

Dirac, P. A. M. (1931) Quantised singularities in the electromagnetic field, *Proceedings of the Royal Society of London A* 133(821) 60-72

Driver, R., Leach, J., Millar, R., & Scott, P. (1996) *Young people's images of science*. Buckingham, UK: Open University Press

Drude, P. (1900) Zur Elektronentheorie der Metalle. *Annalen der Physik* 306(1): 566-613, e 306(3): 369-402

Duit R. (2006) Science Education Research - An Indispensable Prerequisite for Improving Instructional Practice, ESERA Summer School, Braga

Duit, R. & Treagust, D. F. (2003) Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688

Duit, R. & von Rhöneck, C. (1998) Learning and understanding key concepts of electricity. In Andrée Tiberghien, E. Leonard Jossem, Jorge Barojas (eds), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, online <http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/TOC.html>

Duit, R., Gropengießer, H. & Kattmann, U. (2005) Towards science education that is relevant for improving practice: The model of Educational Reconstruction. In H. Fischer, Ed., *Developing standards in research on science Education* (pp. 1-9). Leiden: Taylor & Francis

Duit R., Gropengießer H., Kattmann U., Komorek M., Parchmann I. (2012) The Model of Educational Reconstruction - a Framework for Improving Teaching and Learning Science, in *Science Education Research and Practice in Europe*, Doris Jorde & Justin Dillon editors, Rotterdam: Sense Publishers, pag. 13-37

- Duit, R., Jung, W. & von Rhöneck, C. (1985) Aspects of understanding electricity. Proceedings of the International Workshop, 10-14 September, Ludwigsburg, Kiel: Schmidt and Klaunig
- Duschl R. A., Schweingruber H. A. & Shouse A. W. (2007) Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K-8. Washington, DC: The National Academies Press
- Duschl, R. A., & Grandy, R. E. (2008) Teaching scientific inquiry: Recommendations for research and implementation. Rotterdam: Sense Publishers
- Edelson, D. C. (2002) Design research: What do we learn when we engage in design. The Journal of the Learning Sciences, 11(1), 105-121
- Euler, M., (2003) Quality Development: Challenges to Physics Education, Udine: proceedings of GIREP Seminar, online <http://www.fisica.uniud.it/~cird/girepseminar2003/abstracts/pdf/gt0.pdf>
- Eurydice (2006) L'insegnamento delle scienze nelle scuole in Europa. Politiche e ricerca. Bruxelles: Direzione Generale Istruzione e Cultura della Commissione Europea, online [http://www.indire.it/eurydice/content/index.php?action=read\\_cnt&id\\_cnt=3130](http://www.indire.it/eurydice/content/index.php?action=read_cnt&id_cnt=3130)
- Eurydice (2012), Recommended annual taught time in full-time compulsory education in Europe, online <http://eacea.ec.europa.eu/education/eurydice/>
- Eylon, B. & Ganiel, U. (1990) Macro-micro relationship: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. International Journal of Science Education, 12(1) 79-94
- Faraday, M. (1839), Experimental Researches in Electricity, vol. I, London: Qauritch
- Fazio C., Battaglia O. R. & Di Paola B. (2013) Investigating the quality of mental models deployed by undergraduate engineering students in creating explanations: The case of thermally activated phenomena, accepted on Physical Review Special Topics - Physics Education Research
- Fera G. & Michelini M. (2013) Il laboratorio IDIFO3 sulla conduzione elettrica: innovazione didattica nella formazione insegnanti, in Atti del 51° convegno nazionale AIF, Napoli

Fera G. & Michelini M. (2012) Pupils' ideas exploration on metal electrical transport models in the informal context of an hands-on exhibit, *Latin American Journal of Physics Education* 6(1), 198-207

Fera G., Michelini M., Mossenta A., Prasad Challapalli S., Pugliese E., Santi L., Stefanel A., Vercellati S. (2012) Professional development of teachers in research based co-planning of intervention modules in physics, in proceedings of WCPE, Istanbul

Feynman, R. P. (1949) Space-time approach to quantum electrodynamics. *Physical Review*, 76(6), 769-789

Feynman, R. P., Leighton, R. B. & Sands, M. (2011) *The Feynman Lectures on Physics, Volume I*, Basic Books (AZ)

Fiorentini, C. (2008) Il curricolo verticale, online <http://lnx.cidi.it/ricerca/didattica/wp-content/uploads/2009/10/Il-curricolo-verticale-C.Fiorentini.pdf>

Francis, G., Adams, J. & Noonan, E. (1998) Do They Stay Fixed?, *Physics Teacher*, 36, 488 - 490

Franklin, B. (1751) *Experiments and observations on electricity*, commentary by I. B. Cohen, Palo Alto, CA: Octavo Corporation

Furió, C. & Guisasola, J. (2001) La enseñanza del concepto de campo eléctrico basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada. *Enseñanza de la Ciencias*, 19 (2), 319-334

Galili, I. & Goihbarg, E. (2005) Energy transfer in electrical circuits: A qualitative account. *American journal of physics*, 73, 141

García Franco A. & Taber K. S. (2009) Secondary Students' Thinking about Familiar Phenomena: Learners' explanations from a curriculum context where 'particles' is a key idea for organizing teaching and learning, *International Journal of Science Education*, 31(14), 1917-1952

Garnett, P. J. & Treagust, D. F. (1992) Conceptual difficulties experienced by senior high school students of electrochemistry: Electrochemical (galvanic) and electrolytic cells. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(10), 1079-1099

GEI, online <http://www.fisica.uniud.it/GEI/GEIweb/index.htm>

Georgi H. & Glashow S.L. (1974) *Physics Review Letters*, 32, 438

- Georgi H., Quinn H. R. & Weinberg S. (1974) *Physics Review Letters*, 33, 451
- Gervasio, M. & Michelini, M. (2009) A USB probe for resistivity versus temperature and Hall coefficient, in proceedings of MPTL14
- Gilbert, J. K., Boulter, C. & Rutherford, M. (1998a) Models in explanations, part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83-97
- Gilbert, J. K., Boulter, C. & Rutherford, M. (1998b) Models in explanations, part 2: Whose voice, whose ears? *International Journal of Science Education*, 20(2), 187-203
- Givry, D. & Tiberghien, A. (2005) Studying the evolution of student's ideas in a physics classroom. In: R. Pintò & D. Couso (Eds.), *Proceedings of the fifth international ESERA conference on Contributions of Research to Enhancing Students' Interest in Learning Science*, CD, Barcelona, Spain, 451-463
- Gomez E. J. & Duran E. F. (1998) Didactic Problems in the Concept of Electric Potential Difference and an Analysis of its Philogenesis, *Science & Education* 7: 129-141
- Grayson, D.J. (2004) Concept substitution: A teaching strategy for helping students disentangle related physics concepts. *American Journal of Physics*, 72(8) 1126-1133
- Grotzer, T. (1999) *Math/Science Matter: Resource Booklets on Research in Math and Science Learning: Booklet 1: Cognitive Issues that Affect Math and Science Learning: Understanding Counts: Teaching Depth in Math and Science*, Project Zero, Harvard Graduate School of Education
- Groves et al. editors, (2004) *Methods for Testing and Evaluating Survey Questionnaires*, New York: John Wiley & Sons
- Grüneisen, E. (1928) *Metallische Leitfähigkeit*. In *Handbuch der Physik* (pp. 1-75) Berlin-Heidelberg: Springer
- Guisasola J., Zubimendi J. L. Almodí J. M. & Ceberio M. (2005) Using the processes of electrical charge of bodies as a tool in the assessment of university students' learning in electricity, *Proceedings of ESERA Conference*
- Guisasola, J. (2010) Il concetto di potenziale elettrico in elettrostatica: una proposta didattica basata sulla ricerca, in *Progetto IDIFO - Fisica moderna per la scuola*, a cura di M. Michelini, pagg. 121-130, Udine: LithoStampa
- Guruswamy C., Somers M.D. & Hussey R.G. (1997) Students' understanding of the transfer of charge between conductors, *Physics Education* 32, 91-96

- Gutwill J. & Frederiksen J. & Ranney M. (1996) Seeking the causal connection in electricity: shifting among mechanistic perspectives, *International Journal of Science Education* 18(2) 143
- Gutwill, J. P. , Frederiksen, J. R. & White, B. Y. (1999) Making Their Own Connections: Students' Understanding of Multiple Models in Basic Electricity, *Cognition and Instruction*, 17(3) 249 - 282
- Hammer, D. (1996) More than misconceptions: multiple perspectives on student knowledge and reasoning and an appropriate role for education research. *American Journal of Physics*, 64 (10), 1316-1325
- Harbola, M. K. (2010) Energy flow from a battery to other circuit elements: Role of surface charges. *American Journal of Physics*, 78, 1203
- Hart, C. (2008) Models in Physics, Models for Physics Learning, and Why the Distinction may Matter in the Case of Electric Circuits, *Research in Science Education* 38, 529-544
- Härtel, H. (1991) New approach to introduce basic concepts in electricity, in M. Caillot (eds) *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. Berlin: Springer-Verlag, 5-21
- Hatch, J. A. (2002) *Doing qualitative research in education settings*. Albany, NY: SUNY Press
- Helmholtz H. (1881) On the modern development of Faraday's conception of electricity, *Journal of the Chemical Society*, 39, 277-304
- Hestenes, D. (2006) Notes for a Modeling Theory of Science, *Cognition and Instruction*, *Proceedings of the 2006 GIREP conference*
- Hirvonen P. E. (2007) Surface-charge-based micro-models: a solid foundation for learning about direct current circuits, *European Journal of Physics* 28, 581-592
- Hoddeson, L. H. & Baym, G. (1980) The development of the quantum mechanical electron theory of metals: 1900-28. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 371(1744) 8-23.
- Hornig, J., Chen, C. F., Geng, B., Girit, C., Zhang, Y., Hao, Z., ... & Wang, F. (2011) Drude conductivity of Dirac fermions in grapheme, *Physical Review B*, 83(16), 165113



Huddle, P. A., Dawn White M., Rogers, F. (2000) Using a teaching model to correct known misconceptions in electrochemistry, *Journal of Chemical Education*, 77(1) 104-110

IDIFO (Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento) online <http://www.fisica.uniud.it/URDF/>

INDIRE (2010) Indicazioni Nazionali per il Liceo Scientifico, Opzione Scienze Applicate, online <http://nuovilicei.indire.it/>

INVALSI (2010), Prima presentazione dei risultati di PISA 2009, online [www.invalsi.it](http://www.invalsi.it)

IPS Group (1974) Haber-Schaim U., Cross J. B., Abegg G. L., Dodge J. H., Walter J. A. *Scienza Fisica Due*, Bologna: Zanichelli

Jabot M. & Henry D. (2004) Assessing elementary and middle school students' understanding of electric current, in *Proceedings of the National Association of Research in Science Teaching NARST Annual Meeting*

Jackson, J. D. (1996) Surface charges on circuit wires and resistors play three roles. *American Journal of Physics*, 64, 855-870

Jackson, J. D. (1999) *Classical Electrodynamics*, USA: Wiley

Jeans, J. (1959) *An introduction to the kinetic theory of gases*, Cambridge University Press

Jefimenko, O. (1962) Demonstration of the electric fields of current-carrying conductors. *American Journal of Physics*, 30, 19-21

Jensen, W. B. (2009) The Origin of the Metallic Bond. *Journal of Chemical Education*, 86: 278-279

Jeszenszky S. (2004) Electrostatics and Electrodynamics at Pest University in the mid-19th Century, in *Pavia Project Physics*, a cura di Bevilacqua F. e Giannetto E. A., 175-182, online <http://ppp.unipv.it/PagesIT/VoltaHistElecSec1Frame.htm>

Johnson J. B. (1928) Thermal agitation of electricity in conductors, *Physical Review*, 32, 97-109

Johnson P. (1998) Progression in children's understanding of a "basic" particle theory: a longitudinal study, *International Journal of Science Education*, 20:4, 393-412

Johnson-Laird, P. N. (1989) Mental models. In M.I.Posner (Ed.), Foundations of cognitive science, 469-499. Cambridge, MA: MIT Press

Jungnickel C. & McCormach R. (1986) Intellectual mastery of nature. Theoretical physics from Ohm to Einstein, Chicago: University of Chicago Press

Kattman, U., Duit, R., Gropengieber, H. & Komorek, M. (1995) A model of Educational Reconstruction. Paper presented at The NARST annual meeting, San Francisco, CA

Kibble, B. (1999) How do you picture electricity? Physics Education 34(4) 226-229

Krajcik, J., McNeill, K. L. & Reiser, B. J. (2007) Learning-goals-driven design model: Developing curriculum materials that align with national standards and incorporate project-based pedagogy. Science Education, 92(1), 1-32

Landau L. D. & Lifshitz E. M. (1986) Fisica Teorica Vol. 08, Elettrodinamica dei mezzi continui, Roma: Editori Riuniti

Lederman, N.G. (2007) Nature of science: Past, present, and future. In S.K. Abell & N.G. Lederman (Eds.), Handbook of research on science education (pp. 831-879). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates

Licht, P. (1991) Teaching electrical energy, voltage and current: an alternative approach. Physics Education, 25, 271-277

Liegeois, L. & Mullet, E. (2002) High School Students' Understanding of Resistance in Simple Series Electric Circuits. International Journal of Science Education, 24, 6, 551-64

Lijnse, P. & Klaassen, K. (2004) Didactical structures as an outcome of research on teaching learning sequences? International Journal of Science Education, 26(5), 537-554

Lijnse, P. (2000) Didactics of science: the forgotten dimension of science education research. In R. Millar, J. Leach, & J. Osborne (Eds.), Improving science education. The contribution of research (pp. 308-326). Buckingham, UK: Open University Press

Linn, M. C., Davis, E., Bell P. (2004) (eds.) Internet Environments for Science Education. New York: Lawrence Erlbaum Associates

Lipperheide, R., Weis, T., & Wille, U. (2001) Generalized Drude model: unification of ballistic and diffusive electron transport, Journal of Physics: Condensed Matter, 13(14), 3347

- Lorentz, H. A. (1905) The motion of electrons in metallic bodies III. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings, Series B, Physical Sciences, 7, 684-691
- Loughran J., Berry A. & Mulhall P. (2012) Understanding and Developing Science Teachers' Pedagogical Content Knowledge, Rotterdam: Sense Publishers
- Magnoler P., Michelini M., Mossenta, A. & Santi, L. (2007) Una ricerca-azione verso la carica elettrica, atti del Convegno Nazionale AIF
- Mantyla, T. (2011) Didactical reconstructions for organizing knowledge in physics teacher education, Doctoral Thesis, University of Helsinki, Helsinki, Finland
- Marcus, A. (1941) The electric field associated with a steady current in long cylindrical conductor. American Journal of Physics, 9, 225-226
- Mashhadi A. & Woolnough B. (1999) Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities, European Journal of Physics 20, 511-516
- Maxwell, L. A. (1992) Understanding and validity in qualitative research. Harvard Educational Review, 62, 279-300
- Mayring, P. (2004) Qualitative content analysis. In U. Flick, E. von Kardoff and I. Steinke (eds) A Companion to Qualitative Research. London: Sage
- McDermott L. C., Shaffer P. S. & Constantinou C. P. (2000) Preparing teachers to teach physics and physical science by inquiry, Physics Education 35, 411-416
- McDermott, L. C. & Shaffer, P. S. (1992) Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. Part II: Design of instructional strategies. American Journal Of Physics 60, 11, 994-1013
- McDermott, L. C. (1998) Tutorials in Introductory Physics, Lebanon (USA): Prentice-Hall
- McDermott, L. C. (2013) Closing the Gap Between Teaching and Learning by Physics Education Research, Conferenza in Udine, 23 settembre 2013
- McSharry, G. & Jones, S. (2000) Role-play in science teaching and learning. School Science Review, 82 (298): 73-82
- Méheut M. & Psillos D. (2004) Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. International Journal of Science Education, 26, 5, 515-535

Méheut M. (2004) Designing and validating two teaching-learning sequences about particle models, *International Journal of Science Education*, 26:5, 605-618

Michelini M., ed. (2004) *Quality Development in the Teacher Education and Training*, selected papers in Girep book, Udine: Forum

Michelini M., Santi L. & Sperandio R. M. (eds) (2002) *Proposte didattiche su forze e movimento*. Udine: Forum

Michelini, M. & Mossenta, A. (2006) Role play as a strategy to discuss spontaneous interpreting models of electric properties of matter: an informal education model, *Proceedings of GIREP conference*

Michelini, M. (2005) *The Learning Challenge: A Bridge between Everyday Experience and Scientific Knowledge*. Talk given at the GIREP Seminar Informal Learning and Public Understanding of Physics, Lubjiana

Michelini, M. (2007) *Educazione scientifica ed approcci di ricerca in didattica della fisica*, in atti del Seminario di studi "Cultura Scientifica e Ricerca Didattica", Università di Modena e Reggio Emilia

Michelini, M. (2009) *Scuola estiva di fisica moderna per studenti di scuole secondarie superiori*, online [http://www.fisica.uniud.it/URDF/laurea/ftp/pls2/IDIFO2\\_ScuolaEstivaFisMod\\_31dic09.pdf](http://www.fisica.uniud.it/URDF/laurea/ftp/pls2/IDIFO2_ScuolaEstivaFisMod_31dic09.pdf)

Michelini, M. (2010) *Progetto IDIFO. Formazione a distanza degli insegnanti all'innovazione didattica in fisica moderna e orientamento*, Udine: LithoStampa

Millikan, R. A. (1911) The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law, *Physical Review (Series I)*, 32(4), 349-397

Mizutani U. (2003) *Introduction to the Electron Theory of Metals*, Cambridge University Press

Mott N. F. & Jones H. (1936) *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*, London: Oxford University Press

Mulhall P., McKittrick B., Gunstone R. (2001) A Perspective on the Resolution of Confusions in the Teaching of Electricity, *Research in Science Education* 31, 575-587

National Research Council (2012) *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*, Washington: The National Academies Press

- Niedderer H. (2010) Content-specific research in science education, ESERA Summerschool, Udine
- O’Rahilly A. (1938) Electromagnetics: A Discussion of Fundamentals, London: Longmans, Green and co.
- Ogborn, J (1997) Constructivist metaphors of learning science. *Science & Education*, 6(1-2), 121-133
- Ogude, A.H. & Bradley, J.D. (1994) Ionic conduction and electrical neutrality in operating electrochemical cells, *Journal of Chemical Education*, 71, 29-34
- Osborne, J. & Dillon, J. (2008) Science Education in Europe: Critical Reflections. A Report to the Nuffield Foundation. London: King’s College
- Osborne, R. J. (1983) Towards modifying children’s ideas about electric current. *Research in Science and Technological Education*, 1, 1, 73-82
- Panofsky W. & Phillips M. (1962) Classical electricity and magnetism, Addison Wesley
- Periago, M. C. & Bohigas, X. (2005) The persistence of prior concepts about electric potential, current intensity and Ohm’s Law in students of engineering, *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 7 (2)
- Peruzzi, G. (1996) La questione dell’”elettrone classico” tra Ottocento e Novecento. In *Atti del XVI Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell’Astronomia*, SISFA
- Phillips, D.C., (2000) Constructivism in education: Opinions and second opinions on controversial issues, Chicago: The University of Chicago Press
- Pirrami F. (2010) Una didattica per far sviluppare competenze scientifiche, *Le scienze naturali nella scuola*, 40
- PLS (2009), Il Piano Lauree Scientifiche, Linee guida, online <http://www.istruzione.it>
- Psillos, D. & Kariotoglou, P. (1999) Teaching fluids: Intended knowledge and students’ actual conceptual evolution. *International Journal of Science Education* 21(1): 17-38
- Psillos, D. (1998) Teaching introductory electricity. In A. Tiberghien, E. L. Jossem & J. Barojas (Eds.), *Connecting research in physics education with teacher education*. International Commission on Physics Education, online <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>

Psillos, D., Koumaras, P. & Tiberghien, A. (1988) Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching sequence on DC circuits. *International Journal of Science Education*, 10, 29-43

Purcell, E. M. (1985) *Electricity and magnetism*. Cambridge University Press.

Redžić, D. V. (2012) Charges and fields in a current-carrying wire. *European Journal of Physics*, 33(3), 513

Rissanen, A. (2010) *Enhancing Physics Education in the National Defence University*, doctoral thesis, Finnish National Defence University

Robotti, N. (1995) J. J. Thomson at the Cavendish laboratory: The history of an electric charge measurement, *Annals of Science*, 52:3, 265-284

Rocard, M. et al. (2007) *Science Education NOW: a Renewed Pedagogy for the Future of Europe*. European Commission, Directorate-General for Research Science, Economy and Society, Information and Communication Unit, online <http://ec.europa.eu/research/index.cfm>

Schmidt, H. J., Marohn, A. & Harrison, A. G. (2007) Factors that prevent learning in electrochemistry. *Journal of research in science teaching*, 44(2), 258-283

Schwartz, R. S. & Crawford, B. A. (2004) *Authentic Scientific Inquiry As Context For Teaching Nature Of Science: Identifying Critical Element*. In *Scientific inquiry and nature of science* (pp. 331-355). Springer Netherlands

Schwarz, C. V. & Gwekwerere, Y. N. (2006) Using a guided inquiry and modeling instructional framework (EIMA) to support preservice K-8 science teaching. *Science Education*, 91(1), 158-186

Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... & Krajcik, J. (2009) Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.

Seifert, S. & Fischler H. (2003) *A multidimensional approach for analyzing and constructing teaching and learning processes about particle models*, online <http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/esera/book/s021+fis.pdf>

Sheen, V. (1937) *Madame Curie*, USA: Doubleday & C.

- Shipstone, D. M. (1984) A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits. *European Journal of Science Education*, 6, 2, 185-188
- Shipstone, D. M., Rhöneck, C., Jung, W., Karrqvist, C., Dupin, J.J., Johsua, S. Licht, P. (1988) A study of student understanding of electricity in five European countries *International Journal of Science Education*, 10, 3, 303-316
- Shulman L. S. (1986) Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching, *Educational Researcher*, 15(2), 4-14
- Shulman, L.S. (1987) Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-21
- Sins P. H. M., Savelsbergh E. R., van Joolingen W. R. & van Hout-Wolters B. H. A. M. (2009) The Relation between Students' Epistemological Understanding of Computer Models and their Cognitive Processing on a Modelling Task, *International Journal of Science Education*, 31:9, 1205-1229
- Smith, C. L., & Wenk, L. (2006) Relations among three aspects of first-year college students' epistemologies of science. *Journal of research in science teaching*, 43(8), 747-785
- Smythe W. R. (1989) *Static And Dynamic Electricity*, Taylor & Francis
- Snir, J., Smith, C. L. & Raz, G. (2003) Linking phenomena with competing underlying models: A software tool for introducing students to the particulate model of matter, *Science Education*, 87: 794-830
- Sokoloff, D. R., Laws, P. W. & Thornton, R. K. (2007) RealTime Physics: active learning labs transforming the introductory laboratory. *European Journal of Physics*, 28(3), S83-S94
- Solomonidou C. & Kakana D.-M. (2000) Preschool Children's Conceptions About the Electric Current and the Functioning of Electric Appliances, *European Early Childhood Education Research Journal*, 8(1), 95-111
- Sommerfeld, A. (1928) Zur Elektronentheorie der Metalle auf Grund der Fermischen Statistik. *Zeitschrift für Physik* 47(1-2): 1-32
- Stephens, S-A., McRobbie, C. & Lucas, K. (1999) Model-based reasoning in a year 10 classroom, *Research in Science Education*, 29(2), 189-208

Stocklmayer S. (2010) Teaching direct current theory using a field model, *International Journal of Science Education*, 32,13, 1801-1828

Stocklmayer S. M. & Treagust D. F. (1996) Images of electricity: how do novices and expert model electric current?, *International Journal of Science Education* 18, 2, 163-178

Stoney G. J. (1894) Of the "Electron" or Atom of Electricity, *Philosophical Magazine*, Series 5, Vol.38, pp.418-420

Strauss, A., & Corbin, J. (1990) *Basics of qualitative research: Grounded theory procedures and techniques*. Newbury Park, CA: Sage

Supercomet (2003) online <http://online.supercomet.eu/>

Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2008) Validity issues in mixed methods research: Calling for an integrative framework. *Advances in mixed methods research*, 101-119

Teaching Physics in Europe, Activities, Outcomes & Recommendations of the STEPS TWO Project (2011) Laura Tugulea, Gareth Jones, Jan Naudts (eds), Bucharest: Ars Docendi Publishing House

Testa, I. (2008) *Electric Circuits for Prospective Elementary Teachers*, Doctoral Thesis, University of Udine

Thacker, B. A., Ganiel U. & Boys D. (1999) Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transients in direct current electric circuits, *American Journal Of Physics* 67, 7, S25-S31

Thomson, J. J. (1888) *Applications of Dynamics to Physics and Chemistry*, London: Macmillan

Thomson, J. J. (1895) On the Electrolysis of Gases. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347-352), 244-257

Thomson, J. J. (1897) Cathode Rays. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44(269), 293-316

Tiberghien A., Vince J. & Gaidioz P. (2009) Design-based Research: Case of a teaching sequence on mechanics, *International Journal of Science Education*, 31:17, 2275-2314

TIMMS (2011) online <http://timss.bc.edu/timss2011/international-results-science.html>



Tveita J. (1997) Constructivistic teaching methods helping students to develop particle models in science, The Fourth International Seminar on Misconceptions Research, online [http://www.mlrg.org/proc3pdfs/Tveita\\_KineticParticleModel.pdf](http://www.mlrg.org/proc3pdfs/Tveita_KineticParticleModel.pdf)

Varlamov A., Putti M., Fabbriatore P., Rossi L., Grasso G., Vaglio R., Carelli P. (2012) Cento anni di superconduttività, *Il Nuovo Saggiatore*, 28(1-2), 53-66

Weber, B., Mahapatra, S., Ryu, H., Lee, S., Fuhrer, A., Reusch, T. C. G., ... & Simmons, M. Y. (2012) Ohm's law survives to the atomic scale. *Science*, 335(6064), 64-67

Viard J. & Khantine-Langlois F. (2001) The Concept of Electrical Resistance: How Cassirer's Philosophy, and the Early Developments of Electric Circuit Theory, Allow a Better Understanding of Students' Learning Difficulties, *Science & Education* 10: 267-286

Viennot L. (2001) From electrostatics to electrodynamics: historical and present difficulties, in *Reasoning in Physics. The Part of Common Sense*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 173-189

Viennot L. (2002) Questions sur les mérites du «microscopique» e Superposition des champs électriques, in *Enseigner la physique*, Bruxelles: De Boeck & Larcier, 86-89 e 131-156

Viennot, L. (2003) Relating research in didactics and actual teaching practice: impact and virtues of critical details, In D. Psillos et al. (eds) *Science Education Research in the Knowledge-Based Society*

Volta, A. (1918-29), *Le Opere di Alessandro Volta*, Milano: Ed. Nazionale

von Rhoneck, C. (1984) The introduction of voltage as an independent variable – the importance of preconceptions, cognitive conflict and operating rules, in Duit, R., Jung, W. and von Rhoneck, C. (eds), *Aspects of Understanding Electricity*, Proceedings of the International Workshop, 10-14 September, Ludwigsburg (Schmidt and Klaunig, Kiel, 1985) 275-86

Vosniadou, S. (2008) *International Handbook of research on conceptual change*, Physics Education Handbook series, University of Mariland, New York-London: Routledge

Wells, G. (1999) *Dialogics inquiry*, Cambridge University Press

White B. Y. & Frederiksen J. R. (1998) Inquiry, Modeling, and Metacognition: Making Science Accessible to All Students. *Cognition and Instruction*, 16, 1, 3-118

White, R. T. & Gunstone, R. F. (1992) *Probing Understanding*. Great Britain: Falmer Press

Whittaker, E. T. (1953) *A History of the Theories of Aether and Electricity*, London: T. Nelson

Wightman, T., in collaboration with Green P. and Scott P. (1986) *The construction of meaning and conceptual change in classroom settings: case studies on the particulate nature of matter*. Leeds: Centre for Studies in Science and Mathematics Education - Children's learning in science project.

Wigner, E. P. (1949) Invariance in physical theory. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 93(7), 521-526

Wilson A. H. (1953) *The Theory of Metals*. London: Cambridge University Press

Windschitl, M., Thompson, J. & Braaten, M. (2008) Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science education*, 92(5), 941-967

Wise, M. N. (1979) The mutual embrace of electricity and magnetism. *Science*, 203(4387), 1310-1318

Wittmann M. C., Steinberg R. N. & Redish E. F. (2002) Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous models of conductivity, *American Journal Of Physics* 70, 3, 218-226

Zirbel, E. L. (2004) *Learning, Concept Formation & Conceptual Change*, online <http://cosmos.phy.tufts.edu/~zirbel/ScienceEd/Learning-and-Concept-Formation.pdf>

Zollmann D. (2004) *Energy Band Creator*, online <http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/eband.html>

## XIII. Appendici

1. Dati raccolti con i bambini
2. Dati raccolti con gli studenti di scuola media
3. Dati raccolti con gli studenti di scuola superiore
4. Dati raccolti con gli studenti eccellenti
5. Dati raccolti con gli insegnanti

### **1. Dati raccolti con i bambini**

Le risposte dei bambini (G10) sono distinte da quelle dei ragazzi (G13).

FASE 1.

#### **D1. Qual è il compito della batteria?**

G10) A) Fornire l'energia ai cavi affinché arrivi alla lampadina (11)

G13) A) non rispondono (16). Genera: B) corrente (9), C) elettroni (5), D) elettricità (3), E) energia (1) *Fornire elettroni in grado di trasformare l'energia cinetica in energia luminosa.*

#### **D2. Qual è il compito dei fili?**

G10) A) Trasferire l'energia in modo eventualmente diverso se è diverso il colore dei terminali dei fili (9) confutato: *Il colore non c'entra è il materiale (dei fili) che trasmette l'energia* anche operativamente da 2 bambini B) che fanno lo scambio dei terminali rosso e nero, mostrando che la lampadina si accende nello stesso modo.

G13) A) Il filo serve a far passare il flusso di elettroni (35)

#### **D3. Qual è il compito dell'interruttore?**

G10) A) Chiude l'energia quando passa (6), B) Trasmette l'energia all'altro cavo blu che continua dall'altra parte (5).

G13) A) Chiudere il circuito (35)

**D4. Si accende la lampadina chiudendo il circuito con un filo. Cosa immagini sia diverso dentro al filo quando la lampadina è accesa?**

G10) A) L'energia è collocata in alcune zone (9) o B) è trasmessa: *Le particelle si trasmettono l'energia attraverso impulsi elettrici* (2). L'energia è collocata: A1) dentro ai fili (4), A2) attorno ai fili (3), A3) nell'aria (2). Per giustificare A1 affermano che: *I cavi danno la spinta all'energia per farla arrivare alla lampadina*. Per giustificare A2 affermano che *I fili attraggono l'energia*. Nella categoria A1 l'energia dentro ai fili è immaginata come un insieme di particelle: *Quando la lampadina si accende passano le particelle di energia; quando è spenta non passa niente, non ci sono particelle* afferma Sergio come se le particelle di energia fossero fotoni. *Le particelle sono microscopiche e vanno velocissime* afferma Daniele.

G13) A) Gli elettroni si muovono tra gli atomi (20): *Gli elettroni fanno uno slalom tra gli atomi del filo e Se c'è più spazio tra gli atomi del metallo gli elettroni passano di più, se no passano di meno*. B) Non rispondono (11), C) Il filo è vuoto (4).

**D5. Si usano un filo di rame ed uno di ferro di uguale lunghezza e sezione per chiudere il circuito. Come mai cambiando il materiale del filo cambia la luminosità della lampadina?**

G10) A) la velocità dell'energia (3) *il ferro fa passare meno veloce l'energia*, B) la numerosità delle particelle che trasmettono l'energia (3) *il rame ha più particelle che la trasmettono*; C) non rispondono (3) D) la compattezza del materiale (2) *il ferro è più compatto*

G13) A) la numerosità degli atomi (20) *E' diverso il numero degli atomi*, B) l'interspazio (8) *Nel rame c'è più spazio tra un atomo e l'altro*, C) la numerosità degli elettroni (7) *Nel filo di ferro passano meno elettroni*

**D6. Si usano un bastoncino di plastica o di rame o di alluminio, una matita in legno, la mina di grafite della matita per chiudere il circuito. Come mai la luminosità della lampadina è diversa?**

G10) E' diversa: A) la dispersione di energia (5) *Il legno fa disperdere l'energia perché non è conduttore*, B) l'assorbimento (dell'energia) (3) *Il legno assorbe*, C) non rispondono (2) D) la struttura particellare (1) *Il legno non ha particelle, nella costruzione del ferro sono state aggiunte le particelle*

G13) E' diverso il materiale in ragione di: A) la capacità di trasmettere gli elettroni (14) *Conduttore è il materiale capace di trasmettere gli elettroni*; B) la numerosità degli elettroni (9) *Nel legno ci sono pochi elettroni* C) la libertà degli elettroni (8) *Nel ferro gli elettroni si possono muovere, nella plastica no*; D) il meccanismo di mobilità degli elettroni: aggiramento/salto (3) *Nel metallo gli elettroni passano*

*intorno agli atomi e da un atomo all'altro; E) l'ordine degli atomi e la relativa difficoltà a passare degli elettroni (1) Nella plastica gli atomi sono messi alla rinfusa e quindi gli elettroni fanno più fatica a passare, nel metallo gli atomi sono disposti ordinatamente*

**D7. Si usano fili di ferro con diversa lunghezza e uguale sezione per chiudere il circuito.**

**D7a. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina?**

G10) Col filo corto la lampadina sarà più luminosa (11)

G13) Aumentando la lunghezza del filo la corrente diminuisce (35)

**D7b. Proviamo. Cosa si osserva? Come mai aumentando la lunghezza del filo diminuisce la luminosità della lampadina?**

G10): Per la minor dispersione del filo corto: *Il filo corto mantiene più energia o Siccome ha poco percorso disperde meno l'energia* (11)

G13) Nel filo più lungo: A) l'energia/gli elettroni trovano più ostacoli (24) *Lo slalom che devono fare gli elettroni è maggiore nel filo lungo* (16) *L'energia si disperde nel filo lungo perché incontra più ostacoli* (8) B) le particelle / l'energia si disperdono maggiormente (11) *Più lungo è il percorso più gli elettroni si disperdono nel materiale* (4) *L'energia si disperde nel filo che si scalda* (3). C) non rispondono (3) D) l'interazione tra le particelle è maggiore (1) *Nel filo più lungo ci sono più atomi che attraggono gli elettroni.*

**D8. Si usano fili di ferro con diversa sezione e uguale lunghezza per chiudere il circuito.**

**D8a. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina?**

G10) A) col filo più grosso la lampadina sarà più luminosa (9) B) col filo più piccolo la lampadina sarà più luminosa (2) *Nel filo piccolo la corrente si disperde di meno*

G13) A) la lampadina sarà più luminosa col filo grosso (35) *Il filo più piccolo fa passare meno elettroni come un tubo stretto fa passare poca acqua*

**D8b. Proviamo. Cosa si osserva? Come mai aumentando la sezione del filo aumenta la luminosità della lampadina?**

G10) A) le particelle (7) o B) l'energia (4) si muovono come il flusso di persone o del traffico *Quando la strada è più stretta passano meno auto per volta o Perché nel filo grosso passa più energia alla volta*

G13) A) Le particelle si muovono come l'acqua nei tubi (21), B) La quantità di elettroni che passano nel filo piccolo è di meno (7), C) Nel filo grosso lo spazio disponibile è maggiore (7) *In quello più grosso ci sono più atomi però c'è più spazio*

FASE 2.

**D9. Si usa un circuito con una resistenza variabile. Come mai la luminosità della lampadina varia muovendo il cursore?**

G10) La luminosità della lampadina dipende da: A) la distanza dalla batteria (10) *Più luminosa quando la fonte di energia è più vicina* B) la piegatura del filo *Se il filo è piegato, la corrente non può passare liberamente* (1)

G13) La luminosità della lampadina dipende da: A) dalla lunghezza del filo e quindi dalla sua resistenza (20), B) dalla dispersione degli elettroni (8) *Gli elettroni devono fare più strada e si disperdono*, C) non rispondono (7)

**D10. Si usa un circuito con tre lampadine in parallelo.**

**D10a. Come ti aspetti che sarà la luminosità delle lampadine in parallelo?**

G10) A) La più lontana dalla batteria si illumina di meno perché arriva meno energia (7), B) Si accendono tutte nello stesso modo ma meno di prima perché la batteria alimenta tre lampadine (4)

G13) A) La più vicina alla batteria sarà più luminosa (32), B) Si accendono nello stesso modo (3)

**D10b. Proviamo. Come mai le lampadine in parallelo hanno la stessa luminosità?**

G10) A) per la distribuzione dell'energia nel circuito (5) *L'energia si dispone in modo uguale tra le tre lampadine*, B) per la lunghezza del percorso dell'energia *Il percorso dell'energia ha la stessa lunghezza*, C) non rispondono (2)

G13) A) Per la distribuzione della corrente nel circuito (21) *C'è un flusso uguale di corrente in ogni lampadina*, B) Perché i fili sono paralleli (13), C) Per il principio dei vasi comunicanti (1)

**D10c. Come ti aspetti che cambi la luminosità delle lampadine in parallelo svitandone una?**

G10) A) Si spengono tutte le altre (11)

G13) A) Quelle più lontane dalla batteria aumentano di luminosità perché la batteria non potendo dare energia ad una lampadina la dà alle altre due (18), B) la luminosità resta uguale (17)

**D10d. Proviamo. Come mai le altre lampadine mantengono la stessa luminosità?**

G10) A) Una volta svitata l'energia passa negli altri cavi (8), B) non rispondono (3)

G13) Per l'invarianza della tensione elettrica (4) *La tensione della batteria resta uguale*, B) non rispondono (31)

**D10. Si usa un circuito con tre lampadine in serie.**

**D11a. Come ti aspetti che sarà la luminosità delle lampadine in serie?**

G10) A) La più vicina è più luminosa perché l'energia si disperde (9), B) non rispondono (2)

G13) A) Non rispondono (22) B) La più vicina s'illumina di più (12) C) Dipende da come vanno gli elettroni (1)

**D11b. Proviamo. Come mai la luminosità delle lampadine in serie è uguale tra loro?**

G10) Non rispondono (11)

G13) A) Non rispondono (31), B) Perché la corrente è uguale (3), C) Come in casa tutte le lampadine si accendono nello stesso modo (1)

**D11c. Come mai la luminosità delle lampadine in serie è minore di quella della lampadina nel circuito semplice?**

G10) A) Perché la batteria è quasi scarica (7), confutato operativamente da un bambino che collega la batteria ad un altro circuito mostrando che è carica; B) non rispondono (4)

G13) A) non rispondono (18), B) per la distribuzione della corrente nel circuito (7) *Come in autostrada nel parallelo ci sono tre corsie, qui c'è la coda*, C) per la topologia del circuito (6) *C'è un unico filo, prima le lampadine avevano un filo per ciascuno, per la diversa tensione ai capi delle lampadine* (2) *Non tutte ricevono lo stesso volt*

**D11d. Come ti aspetti che cambi la luminosità delle lampadine in serie svitandone una?**

G10) A) svitando una delle lampadine in serie si spengono tutte le altre (6), B) Dipende da quale svitiamo (4), C) non rispondono (1)

G13) A) Le altre due aumentano di luminosità (13), B) Come nel caso in parallelo la luminosità delle altre resta uguale (12) C) non rispondono (10)

**D11e. Proviamo. Come mai le altre lampadine si spengono?**

G10) Dipende da: A) come sono collegate le lampadine (10) *Perché sono tutte collegate*, B) come passa l'energia (1) *Non passa più l'energia*

G13) A) non rispondono (31) B) la lampadina svitata si comporta come un interruttore aperto (4) *Come se le lampadine fossero interruttori*

**DISEGNI.**

Si chiede di rappresentare l'interno del filo nei due casi posti a confronto in quattro situazioni.

**S1) confronto tra il circuito chiuso e il circuito aperto.**

G10) Quando la lampadina è accesa l'attivazione del filo è rappresentata con segni diversi all'interno (6) e all'esterno (5) del filo. I tipi di simboli utilizzati sono: A) fasci di linee sinusoidali o a zig-zag (4); B) piccoli cerchi o trattini o crocette (3); C) fasci di linee parallele all'asse del filo (2); D) combinazione di A e B (1); E) non classificabile (1). Quando la lampadina è spenta, per rappresentare il cambiamento all'interno del filo, i bambini hanno utilizzato gli stessi simboli, ma con densità minore secondo la modalità di rarefazione (3). Sono presenti anche simboli riconducibili al tipo B (5) oppure l'interno del filo resta vuoto (2)

G13) Tre rappresentazioni dell'interno del filo utilizzano elementi a forma di piccoli cerchi o crocette: A) elementi densi/rarefatti (7); B) elementi mobili/fissi (5); C) presenza/assenza di elementi (3). Un gruppo rappresenta il circuito piuttosto che il suo interno indicando la connessione per lo più con un D) anello (12); in 3 casi la connessione del circuito è rappresentata con un tubo E) non classificabile (8). Le modalità di rappresentazione dell'interno del filo son diverse: o viene rappresentata una sezione del filo (6) o viene fatto un ingrandimento di un pezzo del filo (4)

**S2) confronto tra il filo di rame e il filo di ferro di ugual lunghezza e sezione**

G10) L'interno del filo di rame è descritto utilizzando segni riconducibili ai tipi precedenti: A) (6); B) (2); C) (2); non classificabile (1). Per rappresentare il cambiamento nell'interno del filo passando al ferro, la maggioranza dei bambini riutilizza la rarefazione (10). All'interno di questa modalità un bambino disegna anche l'interruzione dei fasci di linee.

G13) Le rappresentazioni dell'interno del filo contengono ostacoli: A) lontani/vicini (6); B) densi/rarefatti (5); C) grandi/piccoli (1). Per quanto riguarda gli altri disegni: C) Non classificabile (17) D) Rappresentazione del circuito piuttosto che del suo interno (6). Un gruppo di 11 studenti rappresenta con simboli differenti elementi fissi (ostacoli) e mobili all'interno del filo; tra questi 4 indicano le traiettorie degli elementi mobili con uno schema che ricorda la percolazione.

**S3) confronto tra il filo di ferro corto e quello lungo**



G10) I bambini rappresentano l'interno del filo corto riutilizzando i tipi: A) (5); B) (2); C) (2). Viene introdotto un nuovo simbolo: piccoli fulmini (1); non classificabile (1). Per rappresentare il cambiamento nell'interno del filo passando al filo lungo viene riutilizzata la rarefazione (5) e in un caso la concentrazione (1) dei simboli. L'interno del filo è lasciato vuoto (2) oppure vi è una attivazione all'esterno (2); non classificabile (1)

G13) Due rappresentazioni dell'interno del filo: A) ostacoli densi/rarefatti (14); B) elementi mobili meno/più veloci (1). Per quanto riguarda gli altri disegni: C) Non classificabile (11) D) Rappresentazione del circuito piuttosto che del suo interno (9). Uno studente riutilizza la percolazione (1)

#### **S4) confronto tra il filo di ferro sottile e quello grosso**

G10) L'interno del filo grosso è descritto riutilizzando i simboli A) (7); C) (3); piccoli fulmini (1). Per rappresentare l'interno del filo sottile tutti i bambini riutilizzano la rarefazione (11)

G13) Tre rappresentazioni dell'interno del filo: A) ostacoli lontani/vicini (12); elementi mobili B) densi/rarefatti (11); C) presenti/assenti (1). Per quanto riguarda gli altri disegni: C) Non classificabile (8) D) Rappresentazione del circuito piuttosto che del suo interno (3). Un gruppo di studenti riutilizza la percolazione (5).

**2. Dati raccolti con gli studenti di scuola media**

REGIA PERCORSO III MEDIA		ANALISI	
Attività	Domande	Risposte	RQ
1) Si consegnano fili, batteria e lampadina chiedendo di accendere la lampadina	1.1 Come hai fatto per accendere la lampadina?	23/26 descrivono i collegamenti eseguiti tra batteria e lampadina; 3/26 affermano che l'energia si trasferisce dalla batteria alla lampadina	Quali aspetti vengono indicati delle operazioni compiute?
2) Disegno del circuito	1.2a Disegna il circuito.	15/26 indicano la bipolarità di batteria e lampadina; 10/26 non indicano la bipolarità della lampadina; 1/26 non indica la chiusura del circuito	Viene indicata la chiusura del circuito, la bipolarità di batteria e lampadina?
3) Spiega l'accensione	1.2b Spiega come funziona il circuito disegnato	11/26 affermano che tramite i fili l'energia/corrente/elettricità della batteria passa alla	La lampadina accesa suggerisce che circola corrente nel circuito? La spiegazione è in termini di

		lampadina; 4/26 affermano che il circuito funziona perché il rame è buon conduttore di elettricità/ energia; 3/26 descrivono il circuito realizzato; 2/26 utilizzano il modello dello scontro di correnti	flusso o di particelle? Focalizza sul filo, sulla batteria o sulla lampadina?
Si condivide che per accendere la lampadina è necessario chiudere il circuito e che quando la lampadina è accesa la corrente elettrica passa nel circuito. Si pone attenzione al fatto che c'è un filamento all'interno della lampadina			
4) Vario la tensione di alimentazione e guardo la luminosità.	2.1 Aumentando la tensione di alimentazione come cambia la luminosità della lampadina? 2.2 Come spieghi questo cambiamento di luminosità?	15/26 affermano che la luminosità aumenta; 9/26 rispondono che la luminosità cambia; 2/26 che diminuisce.  11/26 scrivono che il cambiamento di luminosità è causato dalla tensione; 9/26 affermano che cambia l'energia; 3/26 che cambia la corrente.	Associa l'aumento di luminosità ad una maggiore corrente o ad altro? Questa impostazione induce il nodo che la batteria produce corrente? Nel caso, come lo superiamo? (per superarlo, a mio avviso, occorrono i fili lungo, sottile, ecc. ossia variare il carico resistivo a V costante)

<p>5) Vario la tensione di alimentazione e guardo la luminosità.</p>	<p>2.3 Si considerano tre situazioni: lampadina poco luminosa, mediamente luminosa, lampadina molto luminosa. Quando la luminosità varia, cosa cambia nel circuito?</p>	<p>energia/elettricità (12/26); tensione (7/26); corrente (4/26)</p>	<p>Quali referenti vengono indicati?</p>
<p>Si condivide che la luminosità della lampadina indica la corrente nel circuito</p>			
<p>6) Riflessione sul livello microscopico</p>	<p>2.4 Immagina di entrare nel filo e disegna ciò che vedi intorno a te. 2.5 Come descrivi cosa accade all'interno del filo?</p>	<p>linee longitudinali che rappresentano fili di rame (6/26); puntini che rappresentano elettroni (4/26); linee ondulate che rappresentano energia (4/26); cerchietti vuoti disposti con regolarità che rappresentano atomi di rame (3/26); omini che corrono nei fili (2/26).  energia/elettricità/corrente passa nei fili (14/26); elettroni/atomi si muovono nel filo (5/26); energia si</p>	<p>Quali simboli sono utilizzati? Quale rappresentazione viene fatta? Quali processi vengono individuati?</p>

		produce/è presente nei fili (4/26)	
7) Sostituisco la lampadina con un altro dispositivo, un resistore ceramico che descrivo come una lampadina che non si accende e inserisco un misuratore di corrente.	<p>3.1 Quale fenomeno osservi quando il circuito è chiuso?</p> <p>3.2 Il passaggio di corrente nel resistore cosa produce nel tempo?</p> <p>3.3 Descrivi ad un compagno l'interno del resistore spiegando ciò che accade nel tempo.</p>	<p>la temperatura aumenta (13/26); non c'è cambio di energia (5/26); il resistore si scalda (2/26); un processo di trasporto di energia (2/26).</p> <p>aumento della temperatura(15/26); aumento/produzione di calore (7/26); nel resistore l'energia si trasforma in calore (2/26).</p> <p>il resistore si scalda/produce calore (7/26); nel resistore si accumula energia (5/26); le particelle elettriche si sfregano contro le pareti e producono calore (1/26); nel resistore l'energia si trasforma in calore</p>	<p>Individua la relazione tra la temperatura e il tempo? Come descrive a livello micro il processo di riscaldamento del resistore?</p>

		(1/26)	
Si condivide che quando passa la corrente il resistore si scalda			
8) Sostituisco il resistore con un altro dispositivo per capire meglio che cosa è la corrente. La cella elettrolitica è costituita da una vaschetta che contiene una soluzione di bicarbonato di sodio al 10% in cui sono immersi due elettrodi metallici che possono essere collegati ad una batteria. Si dispongono due provette rovesciate colme di soluzione sopra agli elettrodi e si chiude il circuito.	<p>4.1 Quale fenomeno osservo nella cella elettrolitica quando il circuito è chiuso?</p> <p>4.2 Il passaggio della corrente nella cella cosa produce nel tempo?</p> <p>4.3 Nello stesso tempo si raccolgono volumi differenti di gas nelle due provette. Saranno gas diversi?</p> <p>4.4 Pensando alla formula chimica dell'acqua, H<sub>2</sub>O. Se i volumi di gas sviluppati sono uno il doppio dell'altro, che gas saranno?</p>	<p>si formano bolle di gas (11/26); si produce gas (4/26); bolle entrano nelle provette (4/26); si formano bolle di aria (3/26), vapore acqueo (2/26); l'acqua inizia a bollire (1/26).</p> <p>gas/bolle/bolle di gas (15/26); calore (5/26); aria/bolle di aria (4/26)</p> <p>no, sono gas uguali (12/26); si, sono gas diversi (11/26); potrebbero derivare dall'acqua (2/26); potrebbero derivare dal bicarbonato (1/26)</p> <p>i gas sviluppati sono idrogeno e ossigeno (10/26)</p>	<p>Individua la relazione tra il volume di gas sviluppato e il tempo? Come descrive a livello microscopico il processo dello sviluppo di gas? Quali gas indica?</p>

<p>Analizzando i due gas si trova che quando passa la corrente si sviluppa:          idrogeno gassoso sopra all'elettrodo negativo          ossigeno sopra all'elettrodo positivo.</p> <p>Le molecole di questi due gas hanno carica elettrica zero. Nella soluzione di bicarbonato di sodio sono presenti ioni idrogeno e ioni ossigeno, con carica elettrica diversa da zero. Gli ioni sono atomi che hanno perso o acquistato elettroni.</p>			
	<p>4.5 Completa la scrittura delle reazioni che avvengono ai due elettrodi:          Elettrodo negativo:  <math>2\text{H}^+ + \underline{\hspace{1cm}} \rightarrow \text{H}_2</math>          Elettrodo positivo  <math>2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + \underline{\hspace{1cm}}</math></p>	<p>5/26 completano correttamente le reazioni, degli altri uno completa correttamente solo la reazione all'elettrodo positivo, mentre i rimanenti inseriscono i simboli H ed O con diverse varianti</p>	<p>Quali elementi vengono inseriti per completare le reazioni di formazione dei gas?</p>
	<p>4.6 Spiega come avviene il passaggio di corrente nella cella</p>	<p>attraverso i fili (17/26);          l'energia si sposta (5/26)</p>	<p>Quali grandezze vengono riportate nelle spiegazioni?</p>
<p>9) Passaggio di corrente nel circuito</p>	<p>4.7 Come pensi avvenga il passaggio di corrente nel circuito pila-fili-lampadina-cella elettrolitica?</p>	<p>elettricità/corrente passa nei fili e/o nella lampadina e/o nella cella (10/26); l'energia della batteria passa attraverso i</p>	<p>Interpreta i fenomeni usando un modello microscopico coerente?</p>

		fili e arriva alla lampadina (6/26); gli elettroni si trasferiscono (1/26)	
10) Si presenta la simulazione Supercomet. La simulazione mostra che in un conduttore metallico esiste un reticolo di ioni positivi che oscillano intorno a posizioni di equilibrio e particelle cariche (elettroni) in moto tra essi. Quando la tensione è zero il moto degli elettroni è disordinato e la corrente è zero. Quando si applica una tensione il moto degli elettroni è ordinato e la corrente è diversa da zero	<p>5.1 Come utilizzi questo modello per spiegare il riscaldamento del resistore percorso dalla corrente?</p> <p>5.2 Come utilizzi questo modello per spiegare perché una lampadina percorsa dalla corrente si illumina?</p>	<p>gli urti fanno innalzare la temperatura/producono calore (14/26); gli atomi si scontrano più frequentemente e quindi l'energia aumenta (3/26)</p> <p>il movimento/gli scontri producono luminosità/calore (8/26); elettroni/atom i raggiungono la lampadina che riceve energia e si illumina (2/26); la vibrazione degli atomi fa muovere gli elettroni nella lampadina (2/26); l'intensità della luce dipende dalla velocità</p>	Quali aspetti del modello utilizza per spiegare i fenomeni osservati?



		degli elettroni (1/26)	
--	--	------------------------	--

3. Dati raccolti con gli studenti di scuola superiore

Regia percorso V liceo scientifico		Analisi	
Attività	Domande	Risposte	RQ
<b>1. Elettrizzazione e campo elettrico</b>			
Strappo del nastro adesivo	<p>1. Taglia due strisce uguali di nastro adesivo ed avvicinale (senza che si tocchino). Non succede nulla. Attacca al tavolo le strisce. Strappale ed avvicinale (senza che si tocchino). Come puoi descrivere il loro comportamento?</p> <p>2. Attacca sul tavolo due strisce di nastro adesivo sovrapposte e poi strappale insieme. Avvicinale senza che si tocchino. Come puoi descrivere il loro comportamento?</p> <p>L'interazione osservata non dipende dalla lunghezza delle strisce o dalla loro disposizione sul tavolo.</p> <p>3.1 Cosa puoi dire sia accaduto alle strisce?</p> <p>3.2 Da cosa dipende la differente interazione osservata tra strisce uguali nei due casi?</p>	<p>si respingono (59%) si respingono perché hanno acquisito la stessa carica (41%)</p> <p>si attraggono (62%) si attraggono perché hanno acquisito carica opposta (34%)</p> <p>si sono caricate/elettrizzate (62%) hanno ricevuto una carica (17%) hanno acquisito cariche nel primo caso opposte, nel secondo uguali (10%) nel primo caso si sono caricate nello stesso modo, nel secondo solo quella a contatto col tavolo (7%)</p> <p>dal differente segno delle</p>	<p>Quali concetti/grandezze sono utilizzati per descrivere il comportamento?</p> <p>L'elettrizzazione è vista come processo?</p> <p>Individua due tipi di stato elettrizzato?</p>

		cariche (31%) dalla presenza/assenza del contatto con il tavolo (14%) dalla diversa elettrizzazione (10%)	
<p>Chiamo elettrizzazione il processo di strappo, strofinio, ... ed elettrizzato lo stato nel quale i corpi si portano in seguito all'elettrizzazione. Corpi trattati nello stesso modo si respingono; corpi trattati in modo diverso si attraggono. Le interazioni osservate si possono spiegare assumendo che: o i corpi non sono elettrizzati; o sono elettrizzati nello stesso modo; oppure sono elettrizzati in modo diverso. Non si osservano altre possibilità. Quindi esistono due tipi di elettrizzazione.</p>			
Strofinio di una gruccia	<p>4. Avvicino una gruccia ad una frangia: non succede niente. Strofino la gruccia con un panno e ripeto. Le strisce della frangia si respingono.</p> <p>4.1 Cosa puoi dire sia accaduto alla gruccia?</p> <p>4.2 Come spieghi il comportamento delle frange?</p>	<p>si è elettrizzata per strofinio (45%) ha acquisito/perso carica (28%) la carica si è ridistribuita tra il panno e la gruccia (21%) si è caricata positivamente o negativamente (7%)</p> <p>assumono la stessa carica e quindi si respingono (45%) si respingono (28%) la carica della gruccia si trasmette anche alle frange (17%) la vicinanza della gruccia causa una ridistribuzione delle cariche anche sulle frange (7%)</p>	<p>Come spiega il fenomeno osservato? Quali grandezze utilizza? Quali processi vengono individuati??</p>

<p>La repulsione tra le frange rivela che lo strofinio elettrizza la gruccia come lo strappo elettrizza il nastro adesivo. Si aziona l'accendino piezoelettrico con un terminale collegato ad una frangia. La repulsione tra le frange rivela che l'accendino elettrizza i corpi collegati ad un suo terminale</p>			
<p>Elettrizzazione per induzione</p>	<p>5. Quando avvicino la gruccia strofinata alla lattina senza toccarla le frange divergono a raggera e quando la allontanano ritornano nella posizione di riposo. Da cosa dipende il comportamento delle frange?</p>	<p>N.R. (45%) l'avvicinamento della gruccia causa una redistribuzione delle cariche della lattina (41%)</p>	<p>Riconosce che ciò che è responsabile dell'elettrizzazione, è mobile negli oggetti metallici e si sposta da un corpo ad un altro?</p>
<p>Ciò che è responsabile dell'elettrizzazione, che chiameremo carica elettrica, è mobile negli oggetti metallici</p>			
<p>Rilevazione del campo elettrico</p>	<p>7. Una gruccia elettrizzata viene avvicinata a diverse lattine disposte intorno ad essa, senza toccarle. Si osserva che le strisce di ogni frangia si respingono. Da quanto hai osservato puoi trarre qualche conclusione sullo spazio intorno ad un oggetto elettrizzato?</p>	<p>N.R. (31%) un oggetto elettrizzato ha un campo elettrico intorno (24%) lo spazio viene influenzato dal corpo elettrizzato (4%) le cariche hanno influenza sullo spazio (4%)</p>	<p>Riconosce il campo come proprietà dello spazio attorno ad un corpo elettrizzato?</p>
<p>Lo spazio attorno ad un corpo elettrizzato viene modificato. Ciò può essere spiegato ammettendo la presenza di una proprietà dello spazio attorno ad un corpo elettrizzato che chiameremo campo elettrico.</p>			
<p>Misura del campo con le placchette (pinze di Maxwell)</p>	<p>8. Disponiamo di due placchette metalliche di cui posso rivelare lo stato elettrizzato utilizzando un dispositivo che mi fornisce una indicazione numerica. Le utilizzo per esplorare lo spazio vicino ad una sfera</p>	<p>dipende dall'orientamento delle placchette (34%) dipende dalla posizione delle placchette (24%) dipende dalla posizione e dall'orientamento delle</p>	<p>Riconosce che le placchette unite in un campo elettrico si elettrizzano in modo diverso?</p>

	<p>elettrizzata. Faccio una misura in una posizione vicino alla sfera. Ripeto la misura nella stessa posizione cambiando l'orientamento delle placchette e ottengo un valore differente. Cosa si può dire sulla proprietà dello spazio che stiamo misurando?</p> <p>9. Disponiamo di due sfere metalliche uguali. Le elettrizzo nello stesso modo e misuro il campo elettrico nel punto medio tra le sfere. Che valore prevedi di ottenere come risultato della misura? Illustra il tuo ragionamento anche con uno schema.</p> <p>10. Disponiamo di due sfere metalliche uguali. Le elettrizzo in modo diverso e misuro il campo nel punto medio tra le sfere. Come spieghi che il risultato della misura è diverso da zero? Illustra il tuo ragionamento anche con uno schema.</p> <p>11. Come rappresenteresti il campo elettrico di una sfera metallica carica? Fai un disegno.</p>	<p>placchette (14%)</p> <p>valore nullo perché hanno la stessa elettrizzazione (41%)</p> <p>nullo perché i campi sono uguali e opposti (31%)</p> <p>N.R. (48%) perché i campi elettrici delle due sfere sono differenti (38%) perché l'elettrizzazione è diversa (14%)</p> <p>segmenti orientati passanti per il centro (34%) archi (24%)</p> <p>segmenti passanti per il centro (14%)</p> <p>segmenti non passanti per il centro (7%)</p>	<p>Come spiega che le misure eseguite cambiando l'orientamento delle placchette danno risultati diversi? Rappresenta i vettori nello schema?</p>
<p>Le placchette poste in un campo elettrico si elettrizzano come le due lattine congiunte e poi separate considerate prima. Misurando lo stato elettrizzato delle placchette il differente segno indica una diversa elettrizzazione. Le misure eseguite cambiando l'orientamento delle placchette indicano il carattere vettoriale del campo elettrico</p>			

2. Carica elettrica come proprietà delle particelle			
Forze su semolino e pastina e in olio	<p>1. Del semolino galleggia in olio di semi in cui sono immerse due lastre metalliche collegate dall'accendino. Azionando l'accendino il semolino si dispone lungo linee ben definite. Come spieghi il fenomeno osservato?</p> <p>2. Chicchi di pastina galleggiano in olio di semi in cui sono immerse due lastre metalliche collegate dall'accendino. I chicchi inizialmente sono orientati in direzioni casuali. Azionando l'accendino ogni chicco ruota e si dispone in una direzione ben definita. Come spieghi il fenomeno osservato?</p>	<p>linee di campo (44%) linee del campo elettrico (22%) linee di forza (19%) il campo elettrico (11%)</p> <p>i chicchi si dispongono nella direzione delle linee di campo/forza (41%) il campo elettrico fa orientare i chicchi (22%) i chicchi sono elettrizzati (19%)</p>	<p>Come spiega il fenomeno osservato? Quali grandezze utilizza? Quali processi vengono individuati? Riconosce che nello spazio interposto tra due corpi elettrizzati in modo diverso è presente un campo elettrico che può esercitare una forza su piccoli corpi in esso posti?</p>
Nello spazio interposto tra due corpi elettrizzati in modo diverso è presente un campo elettrico che può esercitare una forza su piccoli corpi in esso posti			
Esperimento di Millikan	<p>Nell'esperimento di Millikan due lastre metalliche parallele sono elettrizzate in modo diverso. Si spruzzano goccioline di olio elettrizzate tra le due lastre. In assenza di campo elettrico le goccioline cadono per azione della forza di gravità. (Le goccioline</p>	<p>sono direttamente proporzionali (41%) maggiore è la forza, maggiore è la velocità (26%)</p>	<p>Che ipotesi formula sulla forza viscosa? Utilizza la legge di Newton? Come spiega che la velocità limite varia linearmente con</p>

	<p>che cadono si vedono andare verso l'alto del campo visivo perché il microscopio rovescia le immagini). Le goccioline, cadendo nell'aria, raggiungono una velocità limite costante, come le gocce di pioggia. Accendendo il campo, si osserva che la forza elettrica agente sulle goccioline ne fa variare la velocità limite.</p> <p>3.1 Che ipotesi puoi formulare sulla relazione tra velocità limite <math>v</math> e forza elettrica <math>F</math> agente su una gocciolina di massa <math>m</math>?</p>		<p>la forza elettrica?</p>
<p>Ricordando la legge di Newton <math>F=ma</math> e ipotizzando una forza d'attrito proporzionale alla velocità si ottiene che la velocità limite varia linearmente con la forza elettrica.</p>			
<p>Analizzare l'elettrizzazione delle goccioline</p>	<p>4.1 Le velocità limite delle goccioline possono essere dirette verso l'alto o verso il basso. Che indicazione puoi ricavare sullo stato elettrizzato delle goccioline?</p> <p>4.2 Quale tipo di numeri conviene utilizzare per misurare lo stato elettrizzato? Spiega la tua risposta.</p>	<p>N.R. (41%) le goccioline sono elettrizzate in modo diverso (30%) le goccioline sono elettrizzate con segno opposto (7%) modifica il moto (7%) hanno carica diversa (4%)</p> <p>N.R. (56%) molto piccoli (33%) molto grandi (11%)</p>	<p>Riconduce l'elettrizzazione delle goccioline ai due tipi già visti? Riconosce l'utilità dei numeri relativi?</p>
<p>L'elettrizzazione delle goccioline può essere dei due tipi già visti. Quindi per misurarla conviene utilizzare i numeri relativi.</p>			

<p>Analizzare l'elettrizzazione delle goccioline</p>	<p>5. Nell'esperimento di Millikan le forze che lo stesso campo elettrico esercita su goccioline della stessa massa elettrizzate in modo diverso possono avere intensità differente. Come spieghi questo fenomeno?</p>	<p>perché sono elettrizzate diversamente/casualmente (41%) è diversa la loro distanza dalla sorgente/posizione nel campo (33%)</p>	<p>Riconduce la forza elettrica esercitata dal campo all'elettrizzazione delle goccioline?</p>
<p>La forza elettrica esercitata dal campo dipende dall'elettrizzazione delle goccioline.</p>			
<p>Esprimere la forza agente sulle goccioline</p>	<p>6. Chiamando <math>Q</math> la proprietà fisica che descrive quantitativamente lo stato elettrizzato, quale ipotesi puoi formulare sulla relazione matematica tra la forza elettrica <math>F</math> e il campo <math>E</math>? Spiega il tuo ragionamento.</p>	<p>N.R. (41%) <math>E=F/Q</math> (30%) maggiore è il campo, maggiore è la forza elettrica (26%) <math>F=QE</math> (4%)</p>	<p>Individua la relazione tra la forza e il campo?</p>
<p>La forza che il campo elettrico esercita su un corpo elettrizzato vale <math>F=QE</math>. Poiché sappiamo che l'elettrizzazione di un corpo è dovuta alla carica elettrica, <math>Q</math> rappresenta il valore della carica elettrica di un corpo elettrizzato</p>			
<p>Giustificare la quantizzazione della carica</p>	<p>7. Nell'esperimento di Millikan le forze (gravitazionale ed elettrica) agenti su una gocciolina di olio elettrizzata ferma si possono equilibrare regolando il campo elettrico. Eseguendo numerose prove, la misura (in unità arbitrarie) della forza equilibrante esercitata dallo stesso campo elettrico su una stessa gocciolina elettrizzata in modo differente si raggruppano intorno ai seguenti valori: <math>70 \pm 1</math>; <math>21 \pm 1</math>; <math>-34 \pm 1</math>; <math>56 \pm 1</math>; <math>-13 \pm 1</math>. In base a questi</p>	<p>N.R. (59%) sono tutti multipli di 7 (30%) sono tutti multipli di una certa quantità (7%)</p>	<p>Come spiega che la carica elettrica delle goccioline è sempre proporzionale allo stesso valore?</p>



	dati, che ipotesi puoi formulare sulla misura di Q?		
Tenendo conto degli errori sulle misure, Q è sempre proporzionale al valore 7 secondo multipli interi positivi o negativi			
Interpretare la quantizzazione della carica	<p>8. Millikan (1909) ottenne che il valore Q della carica delle goccioline elettrizzate era sempre proporzionale allo stesso valore che in unità di misura moderne è <math>-1,6 \cdot 10^{-19}</math>.</p> <p>8.1 Alla luce dell'esistenza dell'elettrone, come puoi interpretare lo stato elettrizzato delle goccioline?</p> <p>8.2 Alla luce dell'esistenza dell'elettrone, come spieghi che lo stato elettrizzato dei corpi si presenta in due tipi differenti?</p>	<p>N.R. (44%) è dovuto al movimento/spostamento degli elettroni (19%) è direttamente proporzionale alla quantità di elettroni (15%) cedendo o acquistando elettroni si caricano in maniera proporzionale alla carica dell'elettrone (7%)</p> <p>N.R. (52%) secondo la perdita o l'acquisizione di elettroni (26%) dipende dal passaggio/spostamento degli elettroni (7%) secondo l'eccesso o il difetto di elettroni rispetto allo stato neutro (7%) l'atomo ionizzandosi può avere una carica positiva o negativa (7%)</p>	<p>Come interpreta lo stato elettrizzato? Utilizza categorie macro o micro? Come spiega i due tipi di elettrizzazione? Considera due tipi di carica o uno solo? Come differenzia il ruolo del protone da quello dell'elettrone nei fenomeni di elettrizzazione?</p>
Lo stato elettrizzato delle goccioline è dovuto alla presenza/difetto su esse di un numero intero di elettroni ciascuno avente la stessa			

<p>carica invariabile. Ciò spiega i due tipi differenti di elettrizzazione dei corpi. Non è possibile che i corpi elettrizzati positivamente abbiano un eccesso di protoni in quanto il protone non è mobile nei corpi.</p>			
<p><b>3. La carica come sorgente del campo</b></p>			
<p>Individuare la carica come sorgente del campo elettrico</p>	<p>1. Sulla base di tutti i fenomeni finora osservati, quale ipotesi puoi formulare sullo stato elettrizzato dei corpi dal punto di vista microscopico?</p> <p>2. L'ipotesi che hai formulato ti consente di spiegare la repulsione tra le frange della lattina o, in generale, tra corpi elettrizzati nello stesso modo? Come?</p> <p>3. L'ipotesi che hai formulato ti consente di spiegare il processo di elettrizzazione dei corpi per contatto? Come?</p> <p>4. L'ipotesi che hai formulato ti consente di spiegare il processo di elettrizzazione dei corpi per strofinio? Come?</p> <p>5. L'ipotesi che hai formulato ti consente di spiegare il processo di elettrizzazione dei corpi per induzione? Come?</p>	<p>i corpi si elettrizzano in seguito al trasferimento di elettroni (33%) i corpi elettrizzati hanno un difetto o eccesso di elettroni (25%) dipende dalla distribuzione degli elettroni nei corpi (13%) in un corpo elettrizzato gli elettroni sono più concentrati (4%)</p> <p>c'è una repulsione tra cariche uguali (46%) perché le cariche si distribuiscono in modo simmetrico/uguale (13%) perché gli elettroni avendo la stessa carica si respingono (8%)</p> <p>c'è un passaggio/scambio di elettroni nel contatto (67%) in base alla redistribuzione delle</p>	<p>Quale ipotesi formula per spiegare lo stato elettrizzato dei corpi? Utilizza categorie macro o micro? Quali aspetti utilizza per spiegare i processi osservati? La spiegazione è coerente?</p>

		<p>cariche (13%) gli elettroni passano tra corpi a contatto (8%) con il contatto si ridistribuiscono gli elettroni (4%)</p> <p>N.R. (42%) avviene un passaggio di elettroni con lo strofinio (38%) gli elettroni si elettrizzano (8%)</p> <p>c'è un passaggio non permanente di elettroni (29%) c'è una diversa distribuzione delle cariche/elettroni (29%) il campo elettrico del corpo elettrizzato influenza l'altro corpo (8%) le cariche di un corpo attraggono quelle dell'altro corpo (8%)</p>	
<p>Tutti i fenomeni finora osservati possono essere interpretati sulla base dell'ipotesi che: 1) la carica elettrica di un corpo è dovuta ad un eccesso/difetto di elettroni sul corpo rispetto allo stato in cui non è elettrizzato; 2) i processi di elettrizzazione sono dovuti allo spostamento di carica elettrica presente nei corpi e mobile in essi (induzione) o tra i corpi (contatto e strofinio); 3) la carica elettrica è sorgente del campo elettrico nel senso che al regione di spazio attorno ad un corpo con eccesso/difetto di carica diventa sede di un campo elettrico</p>			

<p>Misura del campo di un corpo non elettrizzato</p>	<p>6. Misuriamo il campo elettrico di un corpo non elettrizzato.</p> <p>6.1 Il risultato nullo della misura è in accordo con l'ipotesi che hai formulato? Spiega la tua risposta.</p> <p>6.2 Il risultato nullo della misura quale indicazione fornisce sulla carica elettrica del corpo?</p> <p>6.3 Da ciò puoi concludere che non esistono particelle cariche nel corpo? Spiega la tua risposta.</p>	<p>un corpo non elettrizzato non ha carica che genera un campo (25%) N.R. (21%) le cariche si equilibrano (4%) un corpo non elettrizzato ha carica nulla (13%) un corpo non elettrizzato non ha campo (8%) un corpo non elettrizzato non presenta movimento di elettroni (8%) in un corpo non elettrizzato non vi è redistribuzione delle cariche (8%)</p> <p>la carica è nulla perché protoni ed elettroni si equivalgono in numero (38%) ha carica nulla (17%) il corpo è neutro (17%) non ha carica elettrica (8%)</p> <p>elettroni e protoni sono in numero uguale (42%) le particelle sono in equilibrio (29%) elettroni e protoni sono in</p>	<p>Riconosce che la carica complessiva di un corpo non elettrizzato è zero? Come lo spiega?</p>
--	--	---	---

		numero uguale ed hanno una particolare disposizione (13%) le particelle ci sono ma non sono cariche (4%)	
La carica complessiva di un corpo non elettrizzato è zero. Le conoscenze sulla struttura della materia indicano che in un corpo non elettrizzato la carica totale delle particelle di carica negativa è uguale in valore assoluto alla carica totale delle particelle di carica positiva.			
Elettrizzazione di una lattina per induzione	7. Avvicinando una gruccia elettrizzata ad una lattina si osserva che le frange poste sul lato opposto si separano. Il processo di elettrizzazione della lattina per induzione cosa indica sulle particelle cariche al suo interno?	particelle cariche si muovono all'interno del corpo (25%) particelle cariche si sono ridistribuite (25%) particelle si elettrizzano/polarizzano (8%) è stato modificato lo stato di equilibrio (8%)	Riconosce che esistono particelle cariche relativamente libere di muoversi nella lattina?
Abbiamo visto che esistono particelle cariche relativamente liberi di muoversi nei corpi metallici. L'effetto termoionico indica che queste particelle sono elettroni. Li chiameremo elettroni di conduzione			
Individuare l'azione del campo elettrico sugli elettroni di conduzione di un metallo	8.1 Quale può essere l'origine degli elettroni di conduzione in un metallo? 8.2 Se un corpo metallico non elettrizzato viene inserito in una regione di spazio dove è presente un campo elettrico costante E, che cosa ti aspetti che accada agli elettroni di conduzione in esso?	N.R. (63%) natura chimica dei metalli (29%) gli elettroni dei metalli sono diversi dagli altri elettroni (8%)  N.R. (42%) si ridistribuiscono diversamente (21%) sono attratti	A cosa riconduce la presenza degli elettroni di conduzione in un metallo? Riconduce il moto degli elettroni di conduzione alle forze

		o respinti (21%) si muovono per cercare l'equilibrio (4%) si muovono (4%) si muovono nella direzione del campo (4%) si spostano per reazione al campo (4%)	esercitate?
<p>La teoria del legame metallico indica che gli elettroni di conduzione sono gli elettroni dei gusci atomici più esterni. Quando gli atomi si uniscono per formare il reticolo metallico, questi elettroni sono liberi di muoversi in tutto il corpo metallico. Un campo elettrico applicato al metallo esercita una forza sugli elettroni di conduzione del metallo che di conseguenza si metteranno in movimento. Il moto è condizionato dalle forze esercitate dagli altri elementi della struttura del metallo.</p>			
<p><b>4. Tensione e corrente elettrica</b></p>			
Definire il potenziale elettrico a partire dal lavoro	1. Si dispone di due elettroscopi carichi con il pendolino interposto fermo. Utilizzando una sfera metallica con manico isolato si sposta la carica da un elettroscopio ad un altro. Di conseguenza il pendolino oscilla. Come interpreti il fenomeno osservato utilizzando il concetto fisico di lavoro?	si compie lavoro per trasferire la carica/gli elettroni (38%) avviene uno spostamento di carica/elettroni (23%) lo spostamento di carica produce lavoro (12%) il lavoro compiuto causa uno squilibrio di carica (4%) il pendolino compie lavoro trasportando le cariche (4%) il lavoro dipende dalla carica che viene spostata (4%)	Come spiega lo spostamento di carica nel circuito? Utilizza il concetto di lavoro?
<p>La spinta per lo spostamento di carica nel circuito visualizzato dall'oscillazione del pendolino è il lavoro <math>W</math> compiuto dall'agente per</p>			

spostare la carica Q. Descriviamo quantitativamente tale spinta introducendo il concetto di tensione $V=W/Q$ , lavoro compiuto per unità di carica trasferita.			
Giustificare la relazione tra tensione e campo elettrico	2. Abbiamo visto che l'esperimento di Millikan indica che il campo elettrico esercita una forza di intensità $F=QE$ sul pendolino che trasporta una carica Q. Tenendo presente la definizione di tensione elettrica ed indicando con d la distanza di oscillazione del pendolino, quale relazione esprime l'intensità del campo E in dipendenza della tensione V e della distanza d? Spiega il ragionamento effettuato.	ragionamento basato sulle formule, $E=V/d$ (85%)	Con quale ragionamento giustifica la relazione $E=V/d$ ?
L'intensità del campo può essere descritta dalla relazione $E=V/d$			
Batteria come generatore di campo elettrico	3. Una batteria è un oggetto in cui per tempi relativamente lunghi un agente di tipo chimico separa (a circuito aperto) e mantiene (a circuito chiuso) sui terminali della batteria un eccesso di carica rispettivamente positiva e negativa. Come puoi giustificare la tensione elettrica differente da zero tra i due terminali della batteria?	N.R. (42%) per la diversa carica sui terminali (27%) per l'azione di un agente chimico (19%) perché la tensione dipende dalla carica elettrica (8%) per la diversa intensità di carica nella batteria (4%)	Riconosce che i due terminali della batteria sono due corpi mantenuti in uno stato di differente elettrizzazione? Riconosce che tra essi si stabilisce un campo elettrico? Collega la tensione al campo?
I due terminali della batteria sono due corpi mantenuti in uno stato di differente elettrizzazione. Di conseguenza tra essi si stabilisce un			

<p>campo elettrico, come già visto con l'accendino piezoelettrico. La tensione della batteria è legata al campo tra i suoi elettrodi posti a distanza <math>d</math> dalla relazione <math>V=Ed</math> già stabilita.</p>			
<p>Accensione della lampadina</p>	<p>4. Collegando due fili metallici ai terminali di una batteria si misura (a circuito aperto) tra i capi dei fili la stessa tensione che c'è tra i terminali. Allungando o accorciando i fili si misura tra i loro capi la stessa tensione. Si consegnano fili batterie e lampadine e si chiede di accendere la lampadina.</p>	<p>c'è un passaggio di elettroni (42%) cariche opposte producono la luce come le scintille (15%) c'è un flusso di energia elettrica (15%) le cariche della batteria sono trasferite dai fili conduttori e generano energia nella lampadina (4%) avviene un passaggio di carica e di energia (4%)</p>	
<p>Interpretazione fisica</p>	<p>Il filamento della lampadina è costituito da un corpo metallico. Abbiamo giustificato la presenza di elettroni relativamente liberi di muoversi nell'intero volume di un corpo metallico. Questi vengono chiamati elettroni di conduzione per distinguerli da altri elettroni localizzati vicino agli atomi del metallo.</p> <p>5.1 Da quali grandezze fisiche può dipendere il moto di un elettrone di conduzione nel filamento della lampadina?</p>	<p>Carica (31%) tensione (27%) corrente (12%) lavoro (8%) carica ed energia (4%) campo elettrico (4%)</p> <p>inesistente/nullo/statico (38%) libero di vagare nel metallo (31%) non ordinato/caotico (8%)</p> <p>moto uniforme/velocità costante (27%) moto in una</p>	<p>Quali grandezze rilevanti per il moto di un elettrone di conduzione individua? Quali concetti utilizza per descrivere il moto nelle differenti condizioni? Quali processi individua?</p>



	<p>5.2 Come descrivi il moto di un elettrone di conduzione nel filamento quando la lampadina è spenta?</p> <p>5.3 Come descrivi il moto di un elettrone di conduzione nel filamento quando la lampadina è accesa?</p>	<p>direzione determinata (12%) ordinato (4%) ha velocità proporzionale alla forza elettrica (4%) dovuto al campo elettrico della batteria (4%)</p>	
<p>I fili trasferiscono la tensione elettrica e quindi il campo elettrico al filamento della lampadina. Di conseguenza gli elettroni di conduzione del filamento subiscono l'influenza del campo elettrico. Quando la lampadina è spenta il moto degli elettroni di conduzione è disordinato; quando è accesa si sovrappone un moto ordinato a velocità costante detto di deriva. Gli elettroni di conduzione acquistano una velocità di deriva costante a seguito delle interazioni con gli ioni reticolari.</p>			
<p>Determinare una espressione per la velocità di deriva</p>	<p>6. Un movimento ordinato di particelle cariche che attraversano una superficie <math>S</math> perpendicolare alla loro velocità <math>v_d</math> in un tempo <math>t</math> trasportando una carica <math>Q</math> costituisce una corrente elettrica di intensità <math>I=Q/t</math> e di densità <math>J=I/S</math>. Se <math>n</math> indica la concentrazione (numero/volume) degli elettroni di conduzione nel filo ed <math>e</math> la carica dell'elettrone, quale relazione consente di esprimere la densità di corrente <math>J</math> in dipendenza di <math>n</math> e <math>v_d</math>? Spiega il ragionamento effettuato.</p>	<p>N.R. (62%) ragionamento basato sulle formule (38%)</p>	<p>Collega la densità di corrente alle grandezze <math>n</math> e <math>v_d</math>?</p>
<p>La densità di corrente risulta <math>J=env_d</math></p>			

<p>Calcolare la velocità di deriva utilizzando le conoscenze strutturali</p>	<p>7. Misure di corrente in punti diversi dei fili che collegano batteria e lampadina mostrano che la corrente è uguale in ogni punto.</p> <p>7.1 Quale conclusione puoi trarre sulla velocità di deriva degli elettroni all'interno del filo? Spiega il tuo ragionamento.</p> <p>7.2 Un campo elettrico costante esercita una forza costante su una particella carica. Una particella soggetta ad una forza costante ha una accelerazione costante. Come spieghi che, invece, gli elettroni di conduzione hanno una velocità (di deriva) costante, come le goccioline di Millikan?</p> <p>8. Sapendo che la densità del rame <math>d_{Cu} = 8.92 \text{ kg/dm}^3</math> (<math>T=300 \text{ K}</math>) e che la massa atomica del rame <math>M_{Cu}=63.5 \text{ g/mole}</math>, puoi dare una stima della concentrazione degli elettroni di conduzione nel rame? Scrivi il risultato del calcolo ed il ragionamento che hai utilizzato.</p> <p>9. Utilizzando il risultato precedente puoi dare una stima della velocità di deriva degli elettroni di conduzione in un filo di rame di sezione <math>S=1 \text{ mm}^2</math> percorso dalla corrente <math>I=1</math></p>	<p>N.R. (42%) velocità di deriva costante (23%) velocità di deriva costante, comune a tutti gli elettroni (15%) costante in un campo costante (15%)</p> <p>N.R. (92%) raggiungono subito la velocità limite (8%)</p> <p>N.R. (100%)</p> <p>N.R. (100%)</p>	<p>Come spiega che la velocità di deriva degli elettroni all'interno del filo è costante?</p> <p>Riconosce l'interazione tra gli elettroni di conduzione e il reticolo ionico?</p> <p>Determina la concentrazione degli elettroni di conduzione nel rame?</p> <p>Determina il valore numerico della velocità di deriva?</p>
--	--	--	---

	Ampere. Scrivi il risultato del calcolo illustrando il ragionamento svolto.		
La velocità di deriva è costante in un filo conduttore di sezione costante. Nell'esempio proposto è dell'ordine di 0,1 mm/s.			
<b>5. Resistenza e resistività</b>			
Misure I e V di un filo	1. Si chiude un generatore su un filo di kanthal teso su un supporto isolante. Facendo variare la tensione del generatore si misura la corrente. Esegui le misure di I e V relative al filo e costruisci il relativo grafico. Come interpreti l'andamento dei dati nel grafico?	proporzionalità diretta tra le due grandezze (66%) all'aumentare della tensione aumenta la corrente (21%) la corrente è direttamente proporzionale alla tensione (10%) la tensione è direttamente proporzionale alla corrente (3%)	Come spiega la relazione di proporzionalità diretta tra tensione e corrente?
Il grafico mostra una relazione di proporzionalità diretta tra tensione e corrente			
Resistenza di un filo conduttore	2. Si ripete cambiando il filo. In che cosa il grafico della corrente I in dipendenza dalla tensione V è differente dal precedente? 3. Il reciproco del coefficiente angolare della retta interpolante il grafico I(V) descrive una proprietà che cambia cambiando il filo. Che cosa descrive secondo te questa proprietà?	cambia il coefficiente angolare della retta (66%) il coefficiente angolare aumenta (28%) cambia il coefficiente angolare della retta che comunque descrive una relazione lineare (3%)  la resistenza (62%) la conducibilità (14%) la resistenza al passaggio di corrente (10%) la	A cosa attribuisce la variazione di pendenza della retta interpolante? Quale proprietà individua? La riferisce al filo o al materiale del filo?

		capacità di un materiale di condurre (7%)	
Al variare del filo varia la pendenza della retta grafico della relazione tra tensione e corrente. Il rapporto $R=V/I$ esprime la resistenza del filo.			
Misure di corrente e tensione con fili di diversa lunghezza e sezione	<p>4. Si usano fili di kanthal con diversa lunghezza e uguale sezione per chiudere il circuito e accendere la lampadina. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina aumentando la lunghezza dei fili? Spiega il motivo della tua previsione</p> <p>5. Prova. Come ti spieghi che aumentando la lunghezza del filo diminuisce la luminosità della lampadina?</p> <p>6. Si usano fili di kanthal con diversa sezione e uguale lunghezza per chiudere il circuito. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina aumentando la sezione dei fili? Spiega il motivo della tua previsione</p> <p>7. Prova. Come ti spieghi che aumentando la sezione aumenta la luminosità della lampadina?</p> <p>8. Partendo dall'osservazione della differente luminosità della lampadina, quale relazione</p>	<p>la luminosità diminuisce perché l'intensità del campo è minore nel filo lungo (55%) aumentando la lunghezza del filo diminuisce la luminosità (24%) la luminosità diminuisce perché l'intensità della forza è minore nel filo lungo (21%)</p> <p>perché l'intensità del campo è inversamente proporzionale alla lunghezza (38%) perché diminuisce l'intensità del campo elettrico (31%) perché diminuisce la forza esercitata dal campo (17%) se la lunghezza aumenta il flusso di elettroni è minore (3%) perché diminuisce la conduttanza (3%)</p>	<p>La previsione è in accordo con quanto osservato? Utilizza nella previsione concetti macro o micro? Come spiega che la resistenza di un filo è proporzionale alla lunghezza e inversamente proporzionale alla sezione del filo?</p>

	<p>matematica potrebbe esprimere la corrente <math>I</math> in dipendenza delle grandezze <math>V</math> (tensione), <math>A</math>(sezione), <math>L</math>(lunghezza)? Spiega il ragionamento effettuato.</p>	<p>maggiore luminosità perché passano più elettroni nello stesso intervallo di tempo (28%)  maggior luminosità perché aumenta il flusso di elettroni (28%) la luminosità aumenta perché passano più elettroni in una sezione maggiore (21%) la luminosità aumenta (17%) la luminosità aumenta perché più elettroni sentono il campo (3%)  la luminosità aumenta perché è come avere tanti fili accostati (3%)</p> <p>passano più elettroni nello stesso intervallo di tempo (45%)  aumenta il flusso di elettroni (34%)  aumenta il numero di elettroni passanti in quell'istante (3%)  il campo è più intenso (3%)  passa più energia (3%)</p>	
--	---	---	--

		$I=VA/L$ (59%) $I=kVA/L$ (19%)	
La resistenza di un filo è proporzionale alla lunghezza e inversamente proporzionale alla sezione del filo			
Resistività di diversi materiali	<p>9. Si usano un filo di rame ed uno di kanthal di uguale lunghezza e sezione per chiudere il circuito e accendere la lampadina. Come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina cambiando il materiale dei fili? Spiega il motivo della tua previsione</p> <p>10. Prova. Come ti spieghi che la luminosità della lampadina è diversa? Rispondi indicando cosa immagini sia diverso dentro i fili.</p>	<p>più luminosa col rame perché il rame ha maggiore conducibilità (55%) la luminosità cambia al variare della conducibilità del materiale (28%) più luminosa col rame (7%) la luminosità cambia al variare del materiale (7%) più luminosa col rame perché il rame ha minore resistenza (3%)</p> <p>la conducibilità (31%) la quantità di elettroni liberi (21%) il flusso di elettroni (21%) la libertà di movimento degli elettroni (14%) la struttura chimica (14%)</p>	<p>La previsione è in accordo con quanto osservato? Utilizza nella previsione concetti macro o micro? La resistività è vista come proprietà del materiale?</p>
La costante di proporzionalità della relazione precedente dipende dal materiale del filo. La chiameremo conducibilità elettrica			
Scrivere la legge di Ohm utilizzando le grandezze	11. I fenomeni osservati indicano che un filo metallico guida al suo interno il campo	$J=V/L$ (24%) $J=EL$ (21%) $J=\sigma Ed/L$ (3%)	Come spiega che la velocità di deriva è

densità di corrente e campo elettrico	elettrico generato da una batteria. La costante di proporzionalità che compare in 8 si indica con $\sigma$ (conducibilità elettrica di un materiale). Ricordando la relazione già stabilita tra campo e tensione elettrica, quale relazione matematica, analoga a quella ricavata in 8, potrebbe esprimere la densità di corrente $J$ in dipendenza del campo elettrico $E$ ? Spiega il ragionamento effettuato.		proporzionale al campo elettrico?
<p><math>J=\sigma E</math> dove la conducibilità <math>\sigma</math> è il reciproco della resistività. Questa relazione indica che la velocità di deriva è proporzionale al campo elettrico.</p>			
<p><b>6. Dal riscaldamento del resistore alla struttura della materia</b></p>			
Riscaldamento resistore ceramico	1. Un resistore ceramico è costituito da un filo metallico con una certa resistività elettrica indipendente dalla tensione elettrica che viene applicata, racchiuso in un involucro ceramico. Si chiude un resistore ceramico su una batteria e si esamina il grafico temperatura $T$ in funzione del tempo $t$ tracciato dal termocrono. Il grafico mostra che un resistore si scalda quando viene percorso dalla corrente elettrica. Come spieghi il riscaldamento del resistore percorso	il riscaldamento è causato dal passaggio di corrente (39%) energia si trasforma in calore (39%) la batteria trasferisce energia al resistore (9%) energia viene trasmessa al resistore (4%) aumenta l'energia interna del resistore (4%) gli atomi si muovono di più e la temperatura aumenta (4%)	Quale ipotesi formula per spiegare il riscaldamento del resistore? Utilizza categorie macro o micro? Quali aspetti utilizza per spiegare il processo osservato?

	dalla corrente?		
Il riscaldamento segnala un aumento di energia interna del resistore percorso dalla corrente. Ciò indica un processo di trasferimento di energia agli ioni reticolari dovuto al moto ordinato degli elettroni di conduzione sotto la spinta del campo elettrico della batteria			
Riscaldamento di resistori differenti	2. La pendenza della retta interpolante $\Delta T/\Delta t$ si chiama ritmo di riscaldamento del resistore. Alimenta con la stessa tensione resistori differenti. Si osserva che il ritmo di riscaldamento è differente. Come spieghi questa differenza?	dipende dalla conducibilità del materiale (48%) la resistività è differente (30%) la resistenza è differente (9%) dipende dal materiale del resistore (9%) dipende dalla corrente (1%)	A cosa attribuisce la variazione di pendenza della retta interpolante? Quali processi individua?
I processi di interazione tra ioni reticolari ed elettroni di conduzione in resistori differenti sono differenti			
Descrivere il riscaldamento con le opportune grandezze fisiche	3. Esegui il grafico che esprime il ritmo di riscaldamento del resistore in dipendenza del prodotto I·V essendo I la corrente nel resistore e V la tensione ai suoi capi. Come interpreti l'andamento dei dati nel grafico?	proporzionalità diretta (70%) andamento lineare (17%) la temperatura aumenta col flusso di elettroni e con il tempo (4%) all'aumentare di IV aumenta il ritmo di riscaldamento (4%) corrente e tensione sono proporzionali (4%)	Come spiega che il ritmo del riscaldamento del resistore è proporzionale al prodotto I·V?
L'andamento dei dati nel grafico indica che il ritmo del riscaldamento del resistore $\Delta T/\Delta t$ è proporzionale al prodotto I·V			
Interpretare il riscaldamento del resistore	4. Determiniamo mediante una misura che la tensione V ai capi del resistore è uguale alla tensione della batteria. Tenendo presente la definizione di corrente elettrica e la relazione	N.R. / N.C. (78%) lavoro (9%) è pari all'incremento della temperatura (9%) QV (4%)	Individua la grandezza IVt come energia fornita dalla batteria? Riconduce tale energia



	<p>tra tensione elettrica e lavoro:</p> <p>4.1 Come interpreti la grandezza <math>IVt</math> riferita alla batteria, essendo <math>I</math> la corrente nel circuito e <math>t</math> l'intervallo di tempo?</p> <p>4.2 Quale relazione puoi istituire tra l'aumento di energia interna del resistore e la grandezza <math>IVt</math> riferita alla batteria? Come la spieghi dal punto di vista della fisica?</p>	<p>N.R. (78%) l'energia interna cresce con <math>IVt</math> (9%) energia passa dalla batteria al resistore (9%) energia proveniente dalla batteria viene trasferita dai fili al resistore dove aumenta l'energia interna (4%)</p>	<p>all'aumento di energia interna del resistore? Riconosce che si tratta di un caso di conservazione dell'energia?</p>
<p>La grandezza <math>IVt</math> è l'energia trasferita dalla batteria al resistore. La termodinamica indica che l'energia interna del resistore <math>U</math> è proporzionale alla sua temperatura, ossia <math>U=CT</math>. Quindi l'aumento di energia interna del resistore è <math>\Delta U=C\Delta T</math> essendo <math>C</math> la capacità termica del resistore. Il grafico indica che <math>IVt=C\Delta T</math>: ciò significa che l'energia fornita dalla batteria si trasferisce al resistore.</p>			
<p>Differenziare corrente ed energia</p>	<p>5. Abbiamo visto che un circuito elettrico può essere utilizzato per trasferire energia, per esempio dalla batteria al resistore. Indica almeno due aspetti che differenziano il flusso di corrente elettrica dal flusso di energia.</p> <p>6. Ti sembra corretto affermare che la corrente elettrica si consuma? Spiega la tua risposta</p> <p>7. Ti sembra corretto affermare che l'energia elettrica si consuma? Spiega la tua risposta.</p>	<p>il flusso di corrente è dovuto allo spostamento di elettroni (61%) il flusso di corrente implica un circuito chiuso, il flusso di energia no (30%)</p> <p>no, perché la corrente è un flusso di elettroni (39%) no, perché il circuito è chiuso (9%) no, perché la corrente è un flusso di energia (9%) può disperdersi (4%) no (4%) si,</p>	<p>Quanti aspetti individua? Gli aspetti individuati hanno carattere macro o micro? Quali aspetti dei processi utilizza nelle spiegazioni?</p>

		<p>perché si trasforma (4%)</p> <p>no, perché si trasforma (30%)</p> <p>no, per il principio di conservazione (22%)</p> <p>si, perché può disperdersi (17%)</p> <p>no, perché si trasferisce e si trasforma (9%)</p> <p>si, perché l'energia si esaurisce (9%)</p>	
<p>Il flusso di corrente è bidirezionale, il flusso di energia è monodirezionale. La corrente è uno spostamento di particelle cariche; l'energia è associata ad un processo di interazione. La corrente elettrica non si consuma in quanto le particelle non si creano né si distruggono (alle energie considerate). L'energia si trasferisce e i dati indicano che obbedisce ad un principio di conservazione: l'energia fornita dalla batteria IVt è uguale all'aumento di energia interna <math>C\Delta T</math> del resistore.</p>			
<p>Utilizzare la simulazione Supercomet per spiegare i fenomeni</p>	<p>8. Osserva la simulazione Supercomet che rappresenta il moto degli elettroni di conduzione in un reticolo ordinato di ioni positivi che oscillano intorno alle loro posizioni di equilibrio. In assenza di tensione elettrica applicata ai capi del filo il moto degli elettroni è disordinato e il loro spostamento in media è nullo. Il moto disordinato indica che in assenza di tensione della batteria il campo elettrico è nullo.</p>	<p>all'aumentare della temperatura aumenta il numero di collisioni e le oscillazioni degli atomi (35%)</p> <p>il moto ordinato produce il riscaldamento (30%)</p> <p>il campo elettrico aumenta l'energia degli elettroni (13%)</p> <p>il moto ordinato in presenza del campo elettrico trasferisce energia (4%)</p>	<p>Quali aspetti del modello utilizza per spiegare i fenomeni osservati?</p>

	<p>Applicando una tensione elettrica ai capi del filo al moto disordinato degli elettroni si sovrappone un moto ordinato da sinistra a destra o da destra a sinistra. La velocità (costante) di questo moto ordinato è la velocità di deriva.</p> <p>8.1 Come utilizzi questo modello per spiegare il riscaldamento del resistore percorso dalla corrente?</p> <p>8.2 Come utilizzi questo modello per spiegare perché una lampadina percorsa dalla corrente si illumina?</p>	<p>la corrente fa oscillare gli atomi, viene trasferita energia e quindi la lampadina si illumina (30%) il moto ordinato in presenza del campo elettrico trasferisce energia (9%) gli urti elettroni-ioni generano calore che rende incandescente il filamento (4%) il moto ordinato produce il riscaldamento (4%)</p>	
<p>In assenza di campo elettrico della batteria gli urti tra gli elettroni di conduzione e gli ioni reticolari non trasferiscono energia in quanto l'energia cinetica di un elettrone prima dell'urto è mediamente uguale all'energia cinetica dopo l'urto. In presenza di campo elettrico della batteria gli urti tra elettroni di conduzione e ioni reticolari trasferiscono energia al reticolo in quanto ogni elettrone viene accelerato dal campo elettrico e quindi prima di un urto ha una energia cinetica in media maggiore di quella dopo l'urto. Questo difetto di energia si trasferisce al reticolo.</p> <p>La lampadina si illumina poiché l'aumento di energia interna del filamento dovuto al meccanismo microscopico già visto lo rende incandescente.</p>			
<p><b>7. Dipendenza della resistività dalla temperatura</b></p>			
<p>Misura di resistività in dipendenza dalla temperatura</p>	<p>1. Se immergiamo una bobina di filo di rame smaltato percorsa dalla corrente in azoto liquido, come ti aspetti che cambi la</p>	<p>la luminosità aumenta perché diminuiscono gli urti con gli ioni e aumenta la corrente (52%) la</p>	<p>La previsione è in accordo con quanto osservato? Utilizza</p>

	<p>luminosità della lampadina quando la temperatura del filo si abbassa? Spiega il motivo della tua previsione</p> <p>2. Proviamo. Come ti spieghi che la luminosità della lampadina è cambiata? Rispondi indicando cosa immagini sia diverso dentro al filo al variare della temperatura.</p> <p>□3. Osserva ancora la simulazione Supercomet. Aumentando la temperatura del filo, le oscillazioni degli ioni positivi intorno alle posizioni di equilibrio aumentano in ampiezza. Spiega come questo modello interpreta l'andamento osservato della resistività del rame con la temperatura.</p>	<p>luminosità aumenta perché gli elettroni vanno più veloci (14%) la luminosità aumenta perché diminuiscono le oscillazioni degli ioni e aumenta il cammino libero medio degli elettroni (14%) la luminosità si abbassa (7%) la luminosità si abbassa perché il movimento degli elettroni diminuisce (7%) la luminosità aumenta perché diminuiscono gli urti tra gli elettroni (3%)</p> <p>gli ioni oscillano di meno, ci sono meno urti e la corrente aumenta (41%) diminuiscono gli urti tra elettroni e ioni (28%) diminuiscono gli urti tra elettroni e ioni e quindi diminuisce la resistività (10%) il movimento degli elettroni cambia con la temperatura (3%)</p>	<p>nella previsione concetti macro o micro? Utilizza nella spiegazione concetti macro o micro?</p> <p>Quali aspetti della simulazione vengono utilizzati per interpretare l'andamento osservato della resistività del rame con la temperatura?</p> <p>La spiegazione è coerente?</p>
--	--	---	--

		<p>diminuiscono gli urti tra gli elettroni (3%) diminuisce l'oscillazione degli ioni e quindi gli elettroni sono più veloci (3%)</p> <p>la resistività aumenta con l'aumento della temperatura (52%) la resistività diminuisce con la temperatura perché diminuiscono gli urti elettroni-ioni (41%) la resistività diminuisce perché passa un minor numero di elettroni (3%) la resistività diminuisce con l'aumentare della temperatura (3%)</p>	
<p>Al variare della temperatura varia l'ampiezza di oscillazione degli ioni reticolari e quindi la relativa difficoltà per il passaggio degli elettroni di conduzione sotto la spinta del campo della batteria</p>			
<p>Limiti della simulazione Supercomet</p>	<p>4. E' corretto il rapporto tra le dimensioni delle particelle cariche come rappresentato nella simulazione? Spiega la tua risposta</p> <p>5. E' corretto il rapporto tra le velocità del moto disordinato e la velocità di deriva delle</p>	<p>no (21%) no, perché gli elettroni sono più piccoli (17%) no, la rappresentazione non è in scala (17%) no, è una rappresentazione arbitraria</p>	<p>Quali aspetti individua come limiti della simulazione Supercomet?</p>

	<p>particelle con carica negativa come rappresentato nella simulazione? Spiega la tua risposta</p> <p>6. Esistono materiali, come i semiconduttori, per i quali il modello qui considerato non fornisce previsioni corrette: infatti la resistività di un semiconduttore può diminuire al crescere della temperatura. Cosa indica questo fenomeno?</p>	<p>(14%) si (7%) no, è una rappresentazione convenzionale (3%) no, perché la massa dell'elettrone è circa 1/1800 della massa del protone (3%) no, perché non è rappresentabile realisticamente (3%)</p> <p>no (31%) no, perché la velocità del moto disordinato è diversa dalla velocità di deriva (7%) le due velocità hanno un andamento diverso con la temperatura (3%) no, è una rappresentazione qualitativa (3%)</p> <p>il modello degli urti non è valido (17%) il semiconduttore si comporta in modo diverso (17%) nei semiconduttori l'oscillazione degli ioni potrebbe essere</p>	
--	--	---	--

		<p>minore (3%) il semiconduttore non è un metallo (3%) è necessario un modello diverso (3%) nei semiconduttori gli elettroni non hanno la libertà che hanno nei conduttori (3%) il modello non può essere applicato a materiali con strutture differenti dai metalli (3%)</p>	
<p>E' noto che la massa del protone è circa 2000 volte quella dell'elettrone: ciò indica che la massa atomica e quindi le dimensioni atomiche sono molto maggiori di quelle elettroniche, in disaccordo con quanto mostra la simulazione.</p> <p>La velocità del moto disordinato può essere stimata usando la teoria cinetica dei gas e risulta (in condizioni ordinarie) circa 8 ordini di grandezza maggiore della velocità di deriva, in disaccordo con quanto mostra la simulazione.</p> <p>Il modello classico non può essere utilizzato per spiegare l'andamento della resistività di un semiconduttore: è necessaria una nuova fisica.</p>			
<p><b>8. Misura della carica elementare</b></p>			
<p>Osservare la conducibilità di soluzioni acquose</p>	<p>1. Si utilizza una vaschetta con acqua di rubinetto, una batteria, una lampadina e due elettrodi di rame. Si chiude il circuito immergendo gli elettrodi nell'acqua evitando che gli elettrodi si tocchino. La lampadina resta spenta indicando un passaggio di</p>	<p>l'acqua sciogliendo il sale ha messo in circolo elettroni di conduzione (32%) l'acqua ha disciolto i cristalli di sale liberando ioni di conduzione (28%) l'acqua si lega con il</p>	<p>A cosa attribuisce la mutata conducibilità della soluzione? Utilizza il concetto di ione? Giustifica la presenza di ioni in</p>

	<p>corrente non rivelabile: quindi la conduttività dell'acqua è molto bassa. Si immergono gli elettrodi nel sale: non passa corrente. Si prende un cucchiaino di sale da cucina e lo si getta nell'acqua. Con una bacchetta di vetro o di plastica, si mescola la soluzione. Mano a mano che il cristallo si scioglie, si vede la luminosità della lampadina aumentare.</p> <p>1.1 Cosa ha prodotto un aumento della conducibilità della soluzione?</p>	<p>cloruro di sodio formando un reticolo in cui passa corrente (16%) la soluzione conduce elettricità (12%) gli ioni positivi e negativi del sale favoriscono il passaggio di corrente (8%) le interazioni tra molecole d'acqua e ioni Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> aumentano la conducibilità (4%)</p>	<p>soluzione?</p>
<p>Una soluzione salina conduce la corrente elettrica. Ciò può essere interpretato ammettendo la presenza di ioni in soluzione che si comportano come portatori di carica elettrica relativamente liberi di muoversi sotto l'azione del campo elettrico della batteria. Gli ioni sono atomi che hanno perso o acquistato elettroni acquistando di conseguenza una carica elettrica positiva o negativa.</p>			
<p>Osservare la conducibilità di acqua pura e con bicarbonato di sodio</p>	<p>2. Hai a disposizione una vaschetta di acqua pura in cui immersi due elettrodi collegati ad un generatore. Se l'acqua è pura l'amperometro non indica passaggio di corrente. Come spieghi il risultato di questa misura? Rispondi facendo riferimento alla struttura microscopica dell'acqua.</p> <p>3. Sciogliendo del bicarbonato di sodio l'amperometro indica passaggio di corrente elettrica. Come spieghi il risultato di questa</p>	<p>l'acqua pura non è un conduttore (64%) l'acqua pura è un isolante (12%) l'acqua pura è un cattivo conduttore (8%) i legami tra molecole d'acqua non conducono elettricità (8%)</p> <p>sciogliendo il bicarbonato si liberano elettroni di conduzione (28%) la soluzione è un</p>	<p>Riconosce che l'acqua pura è un cattivo conduttore? Collega questa proprietà alla struttura microscopica dell'acqua?</p> <p>Individua il ruolo del bicarbonato nella soluzione?</p>



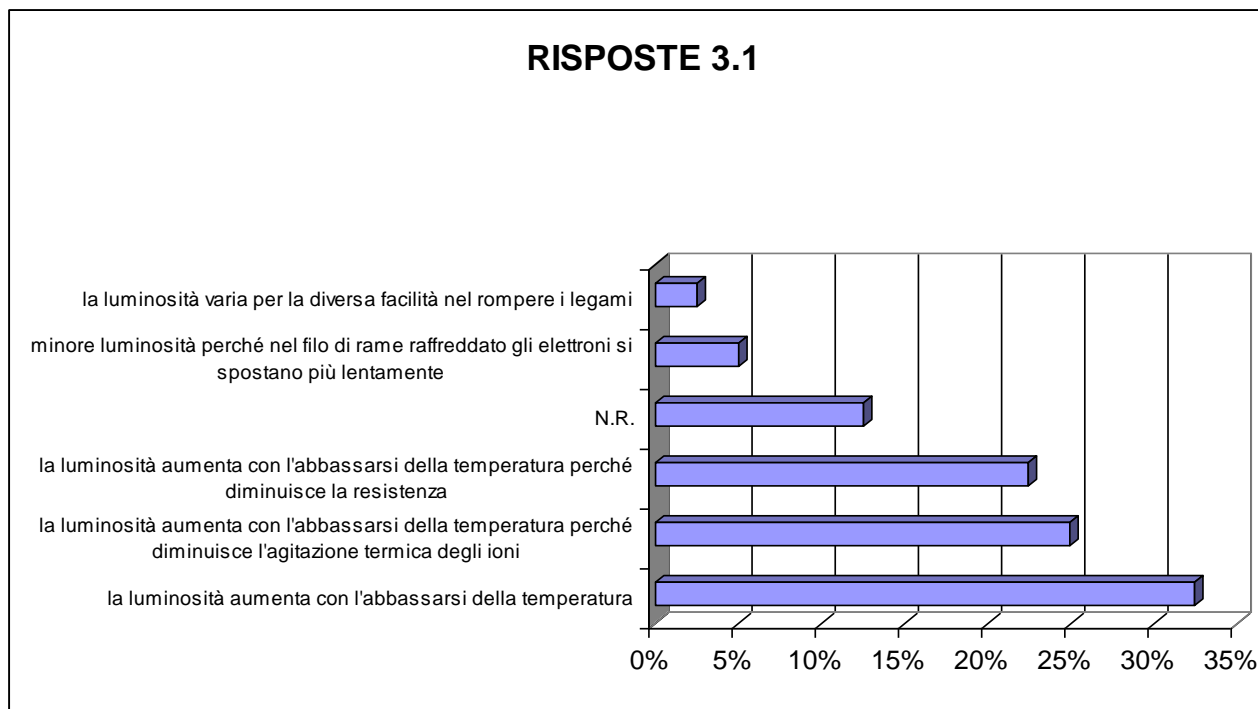
	misura?	conduttore (24%) il sodio favorisce il passaggio di elettroni (20%) il bicarbonato libera ioni che conducono l'elettricità (16%) il bicarbonato permette il passaggio di corrente (8%)	
<p>L'acqua pura ha una conducibilità inferiore alla sensibilità dello strumento. Il bicarbonato dà luogo ad una debole conduzione in quanto origina la presenza di ioni in soluzione.</p> <p>La cella elettrolitica è costituita da una vaschetta che contiene una soluzione di bicarbonato di sodio al 10% in cui sono immersi due elettrodi metallici che possono essere collegati ad una batteria. Si dispongono due provette rovesciate colme di soluzione sopra agli elettrodi e si chiude il circuito. Si osserva lo sviluppo di gas sopra agli elettrodi.</p>			
Elettrolisi del bicarbonato di sodio	4. Misura in funzione del tempo il volume di gas sviluppato agli elettrodi. Come interpreti la differenza tra i volumi di gas sviluppato nello stesso tempo nelle provette sopra i due elettrodi?	N. R. (48%) in un elettrodo passano più elettroni, nell'altro meno (40%) un elettrodo è positivo e l'altro negativo (12%)	Individua la relazione tra i volumi? La riconduce alla formula chimica dell'acqua?
<p>Analizzando i due gas si trova che quando passa la corrente si sviluppa:</p> <p>idrogeno sopra all'elettrodo negativo</p> <p>ossigeno sopra all'elettrodo positivo.</p> <p>Le molecole di questi due gas hanno carica elettrica zero.</p>			
Scrivere le reazioni di produzione dei gas	5. Quale reazione puoi ipotizzare all'elettrodo negativo per descrivere lo sviluppo di idrogeno gassoso? Rispondi indicando anche la	l'idrogeno proviene dall'acqua (28%) l'acqua si combina col bicarbonato per formare	Riconosce la partecipazione degli elettroni alle reazioni

	provenienza dei diversi elementi coinvolti nella reazione.	idrogeno (4%) gli elettroni rompono i legami dell'acqua generando idrogeno (4%)	di formazione dei gas?
<p>Le reazioni di produzione dei gas coinvolgono gli elettroni:</p> $2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2$ $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{e}$ <p>La partecipazione degli elettroni alle reazioni di produzione dei gas può essere spiegata ammettendo che elettroni vengono scambiati tra gli elettrodi della cella ed il circuito. Ciò conferma che la corrente è un flusso di elettroni messi in moto dalla batteria.</p>			
Misura della carica elementare	6. Il numero di elettroni che attraversano una sezione del filo in un secondo può essere contato in due modi diversi: a) utilizzando l'indicazione dell'amperometro e dell'orologio; b) utilizzando la misura del volume di idrogeno sviluppato, nota la sua densità alla temperatura dell'esperimento. Collegando queste due misure ottieni il valore della carica elementare espresso in Coulomb. Riporta il valore ottenuto spiegando il ragionamento effettuato.	N. R. (100%)	Collega i due diversi modi di calcolare il flusso di elettroni nel circuito? Perviene ad una formula per il valore della carica elementare? Calcola il risultato richiesto?
<p>Sia <math>t</math> il tempo di funzionamento della cella misurato a partire dalla chiusura del circuito. Se <math>I</math> è la corrente nel circuito, allora <math>Q=It</math> è la carica che ha attraversato il circuito. Se <math>N</math> è il numero di elettroni contenuto in tale carica, allora la carica dell'elettrone risulta <math>e=Q/N</math>. La reazione già scritta per l'elettrodo negativo indica che per ogni atomo di gas idrogeno, un elettrone ha attraversato il circuito. Quindi <math>N</math> è pari al numero di atomi di gas idrogeno che si calcola conoscendo la massa di un atomo di idrogeno <math>m_H</math>, la densità dell'idrogeno nelle</p>			

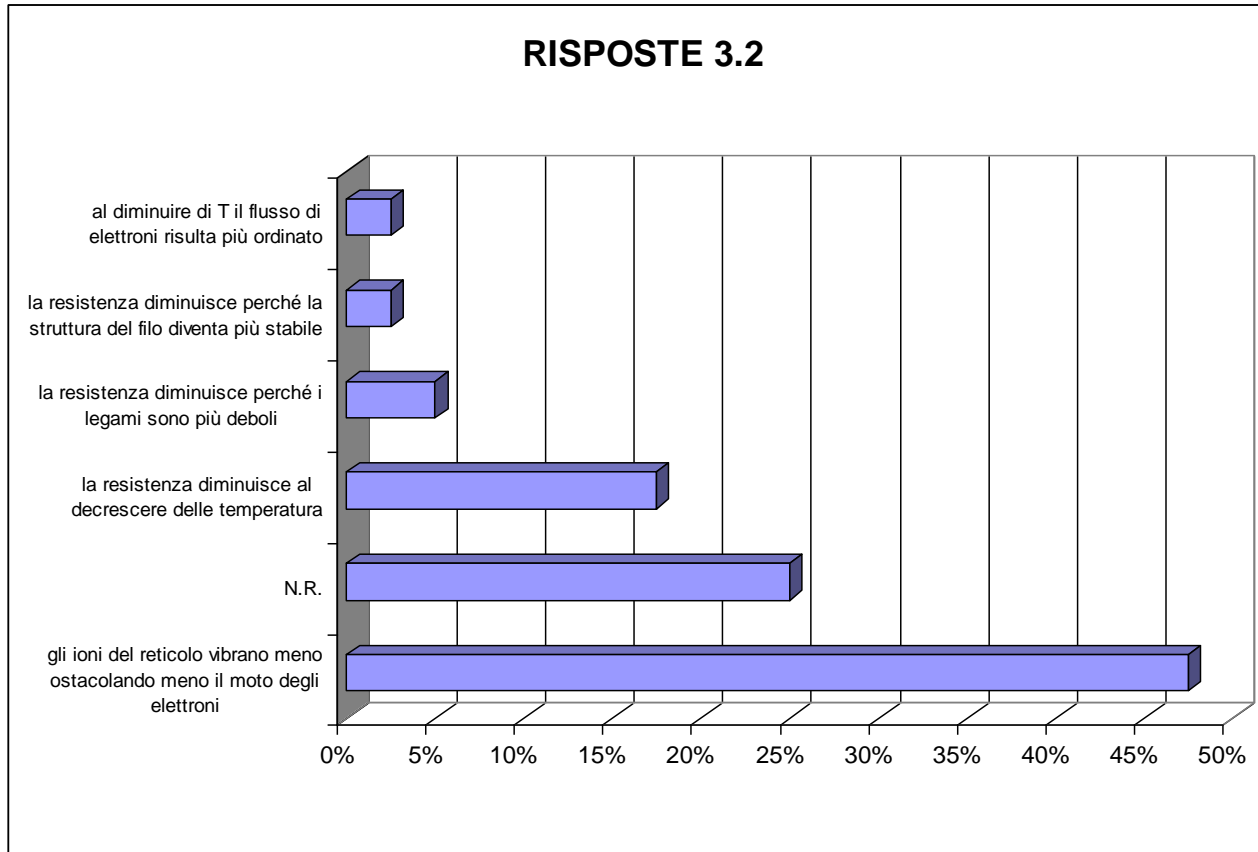
condizioni dell'esperimento  $d$  ed il volume di gas idrogeno sviluppato  $V$ . Risulta  $N=dV/m_H$

**4. Dati raccolti con gli studenti eccellenti**

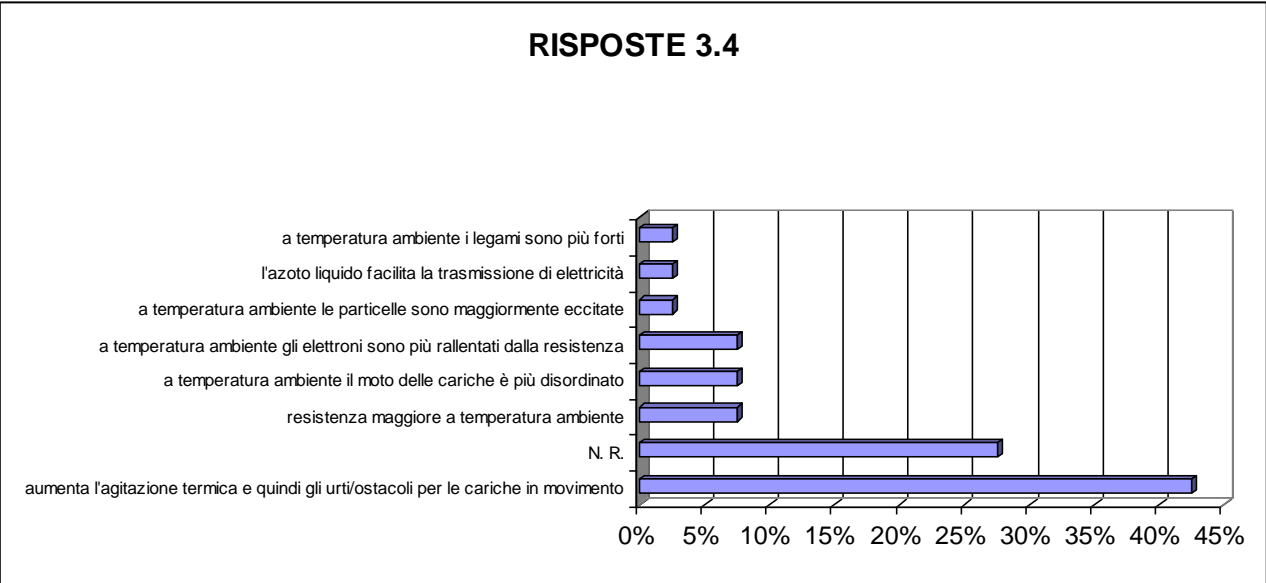
3.1 Se immergiamo una bobina di filo di rame smaltato percorsa dalla corrente in azoto liquido, come ti aspetti che cambi la luminosità della lampadina quando la temperatura del filo si abbassa? Spiega il motivo della tua previsione



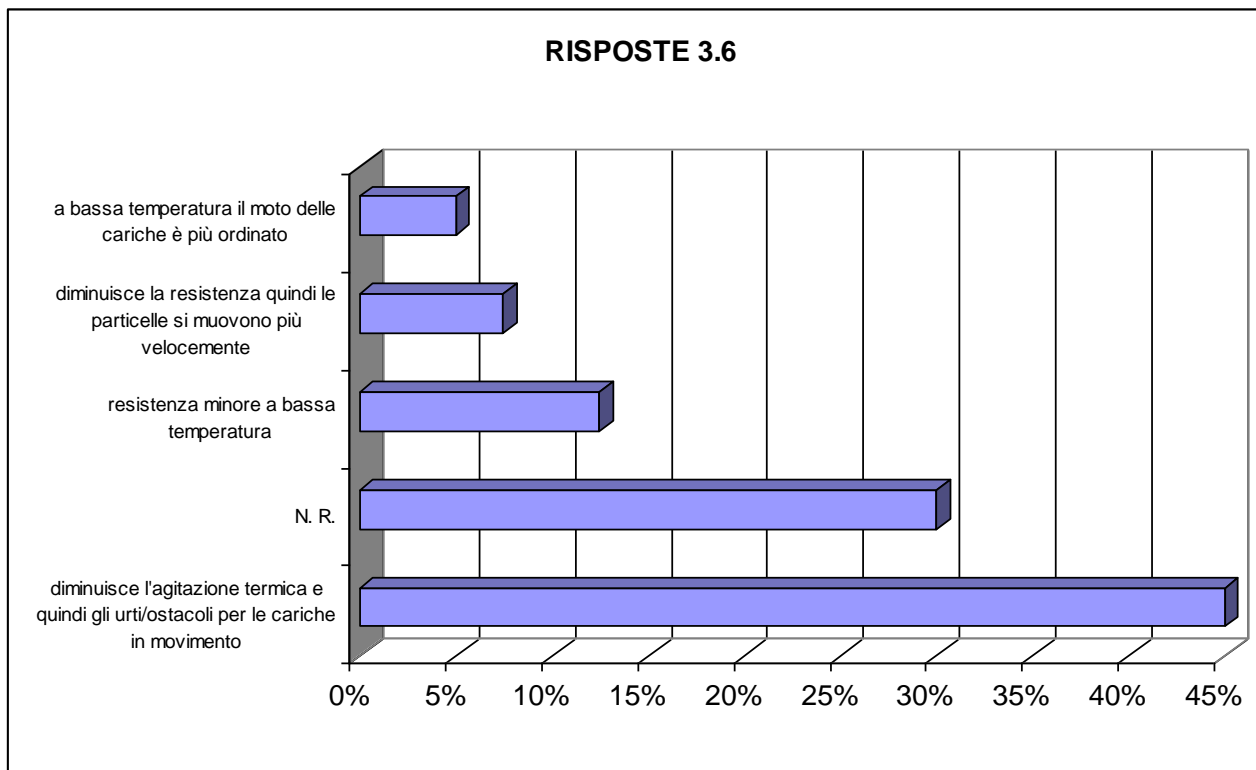
3.2 Proviamo. Come ti spieghi che la luminosità della lampadina è cambiata? Rispondi indicando cosa immagini sia diverso dentro al filo al variare della temperatura



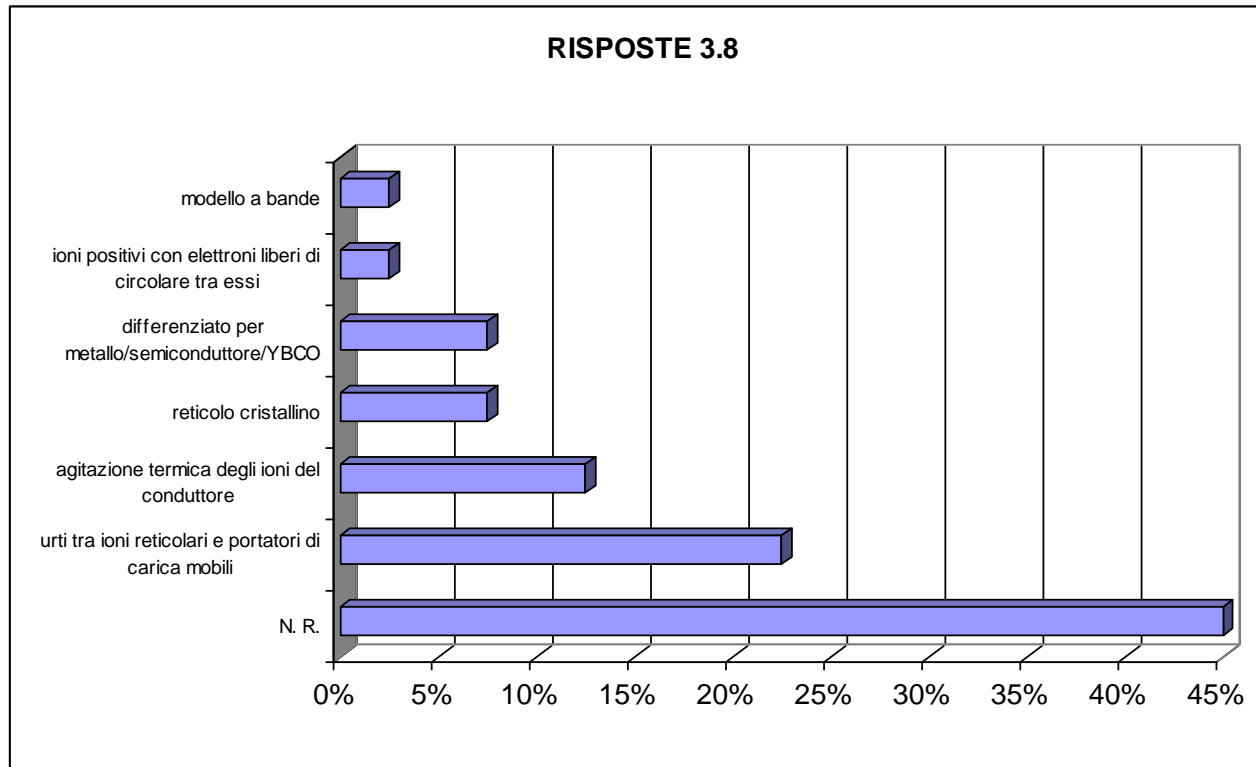
3.4 Rappresenta l'interno del filo di rame a temperatura ambiente



3.6 Rappresenta l'interno del filo di rame a bassa temperatura

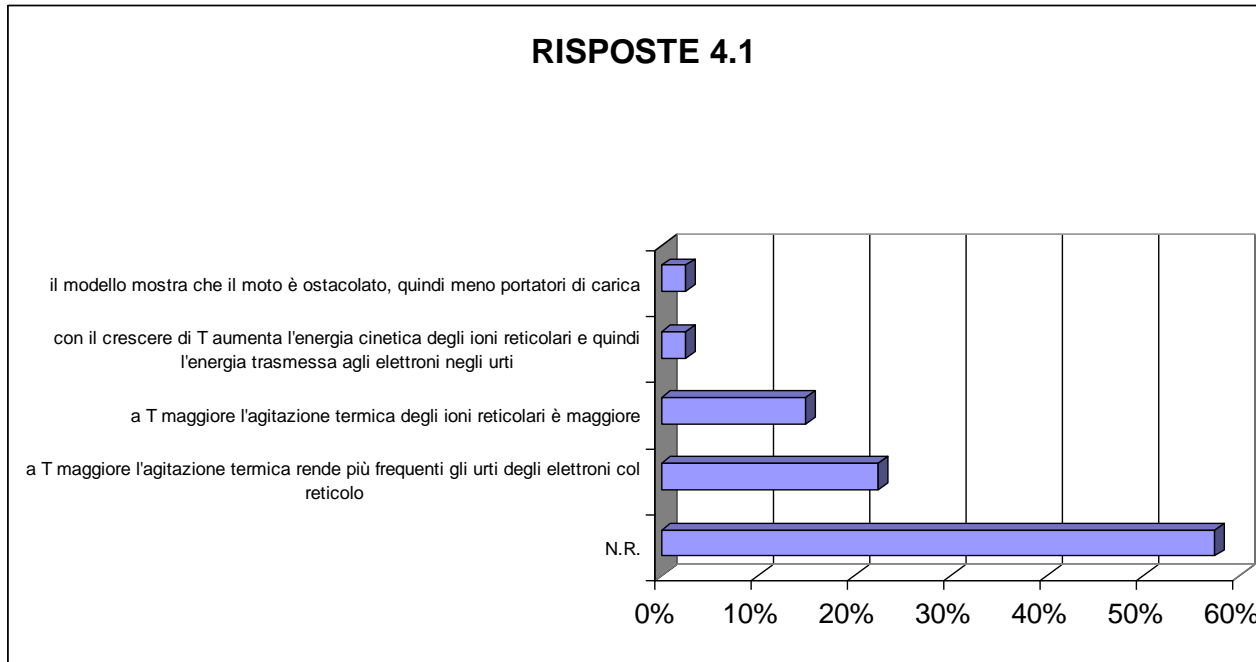


3.8 Quale modello microscopico del processo di conduzione nei solidi utilizzeresti per spiegare l'andamento della resistenza elettrica con la temperatura rappresentato nei grafici?

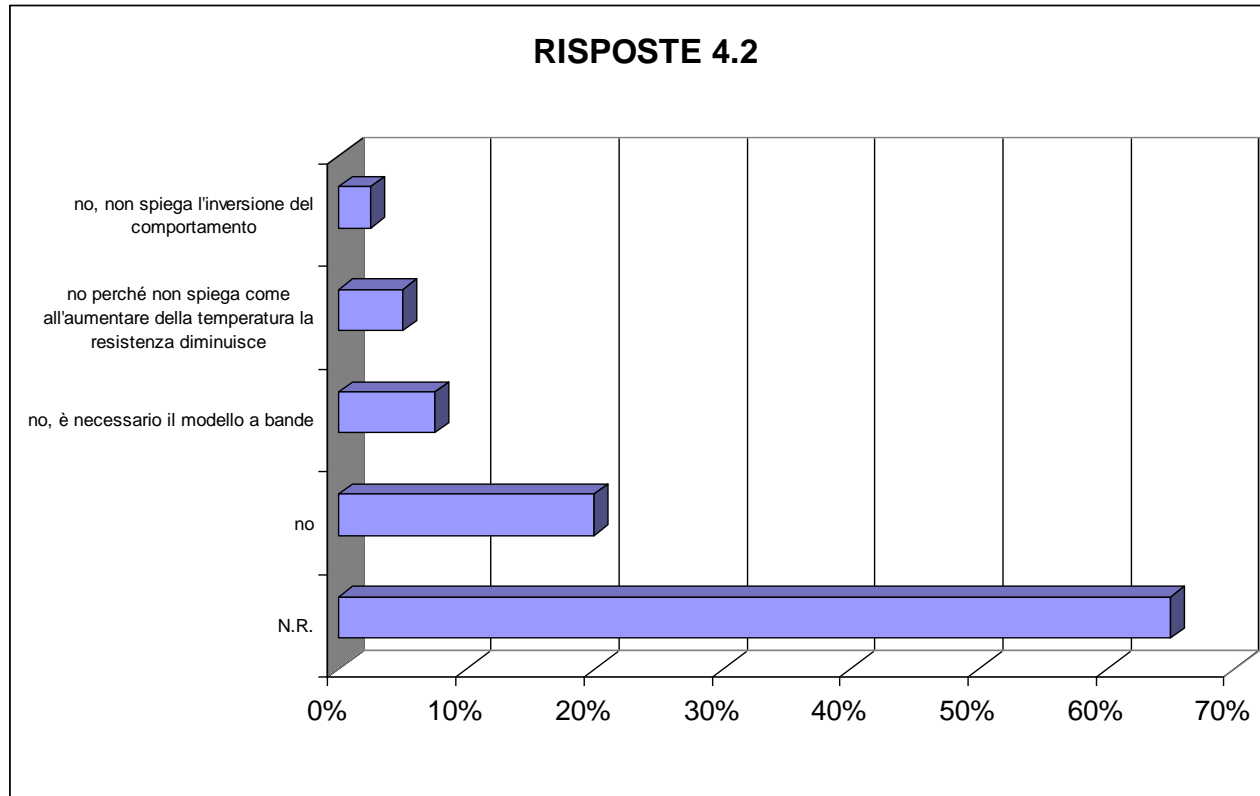


4.1 Spiega come il modello rappresentato nella simulazione Supercomet interpreta l'andamento osservato delle resistenza del rame con la temperatura

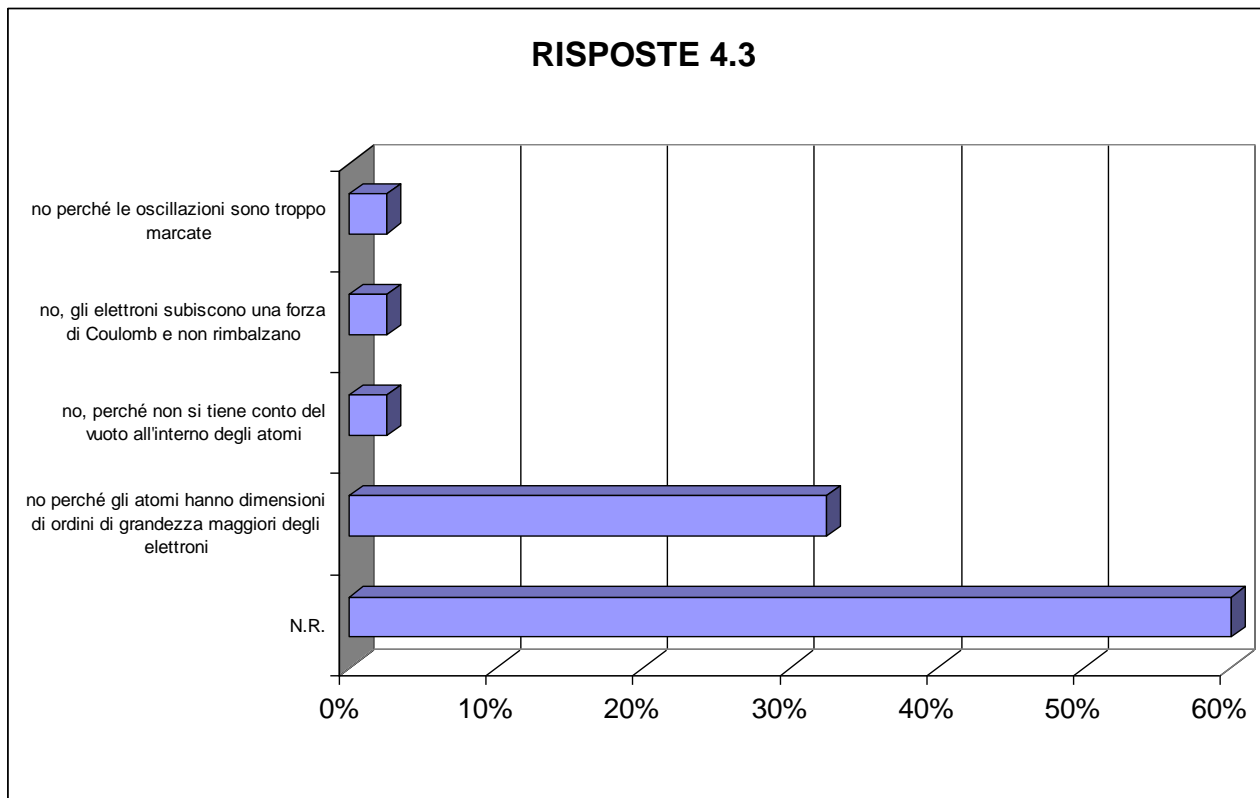




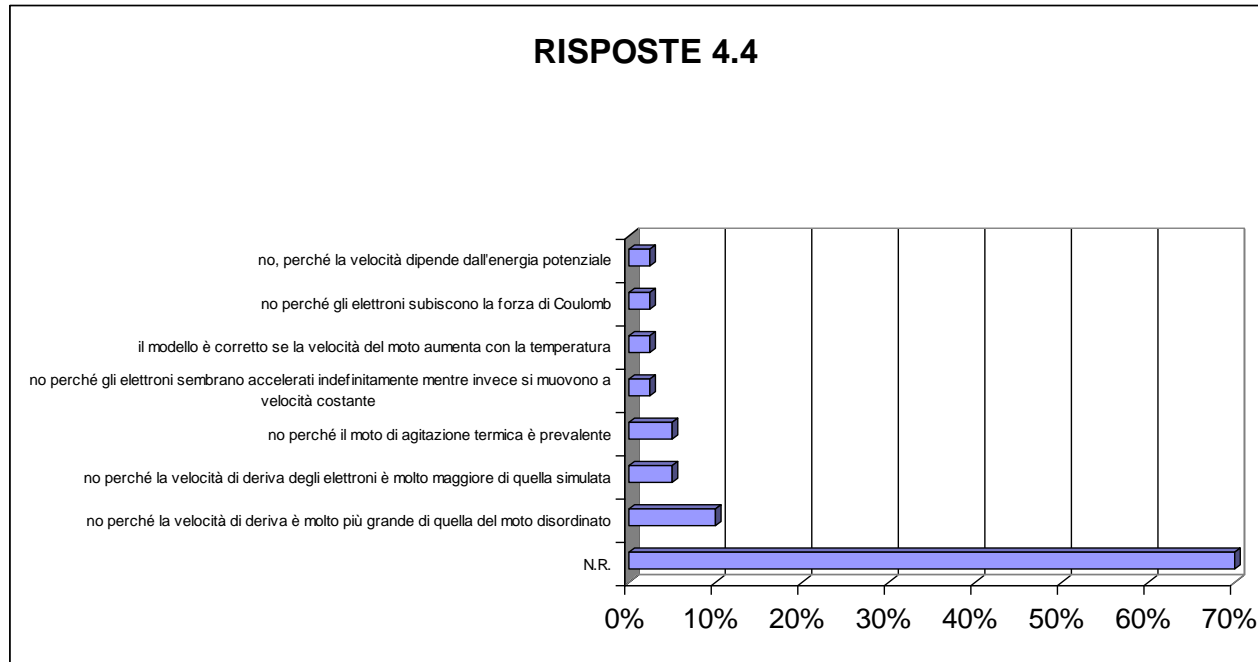
4.2 Puoi utilizzare il modello rappresentato nella simulazione Supercomet per spiegare la diminuzione della resistenza al crescere della temperatura osservata per il Ge P con  $T > 286$  K? Spiega la tua risposta



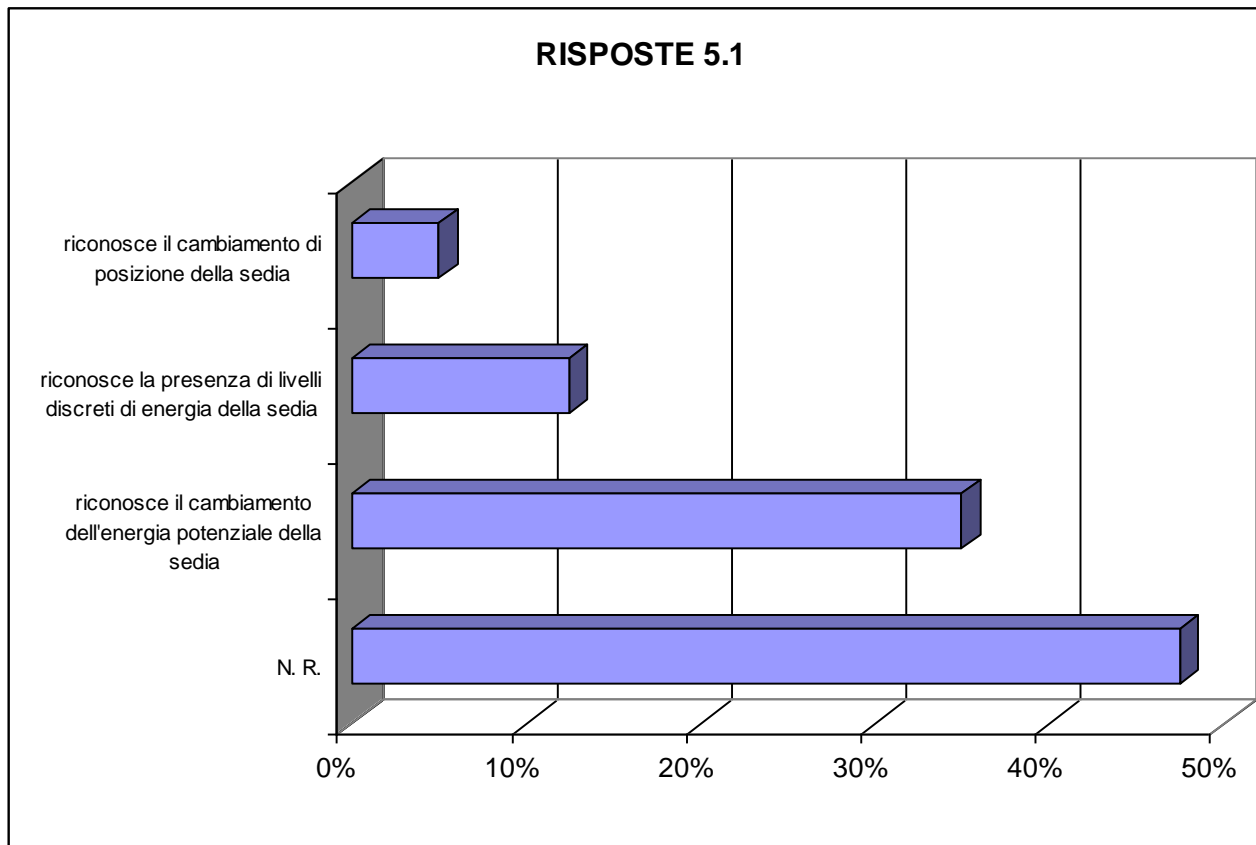
4.3 E' corretto il rapporto tra le dimensioni della particelle cariche come rappresentato nella simulazione? Spiega la tua risposta



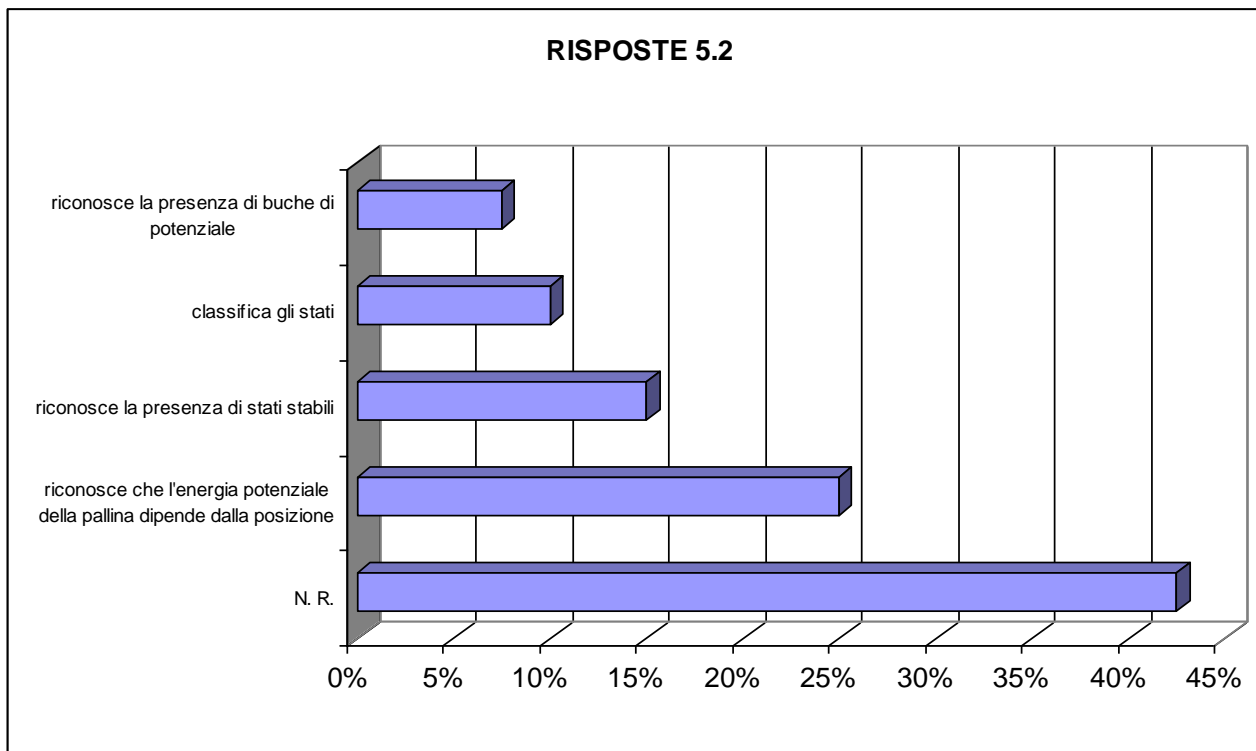
4.4 E' corretto il rapporto tra le velocità del moto disordinato e la velocità di deriva della cariche negative come rappresentato nella simulazione? Spiega la tua risposta



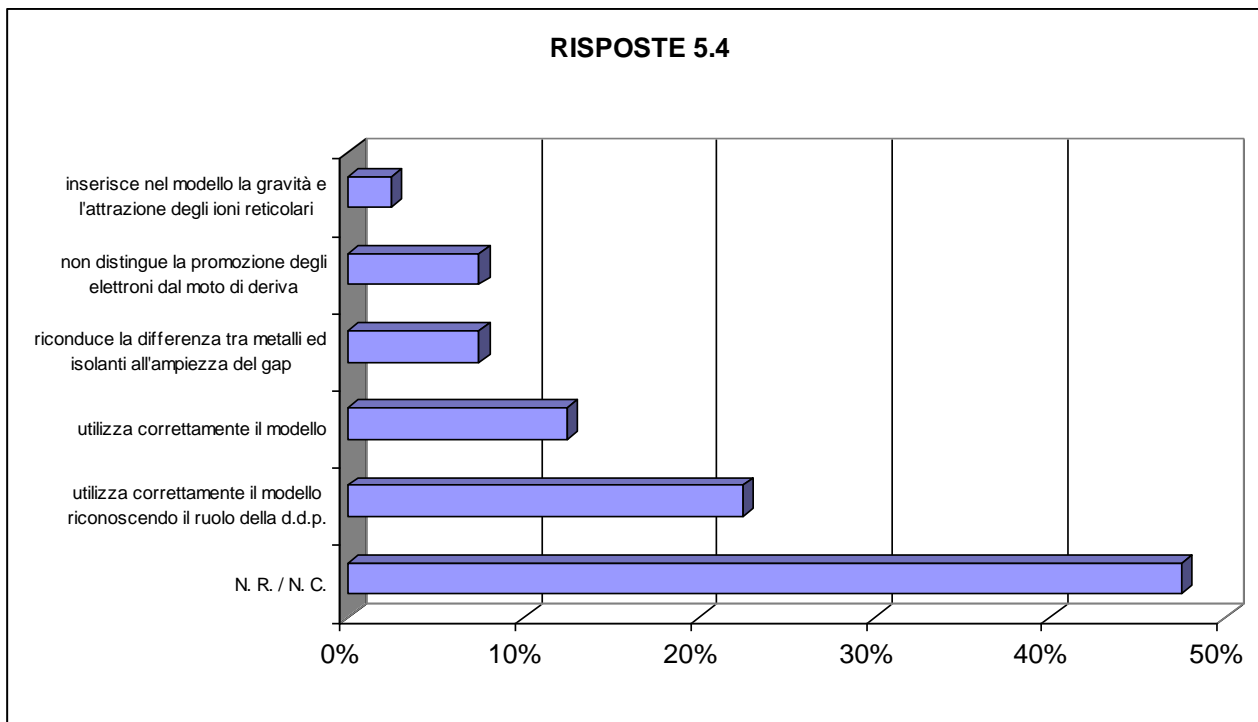
5.1 Prendi una sedia: quali sono gli stati che può assumere? Descrivila in termini di energia potenziale  $U$  rispetto al pavimento



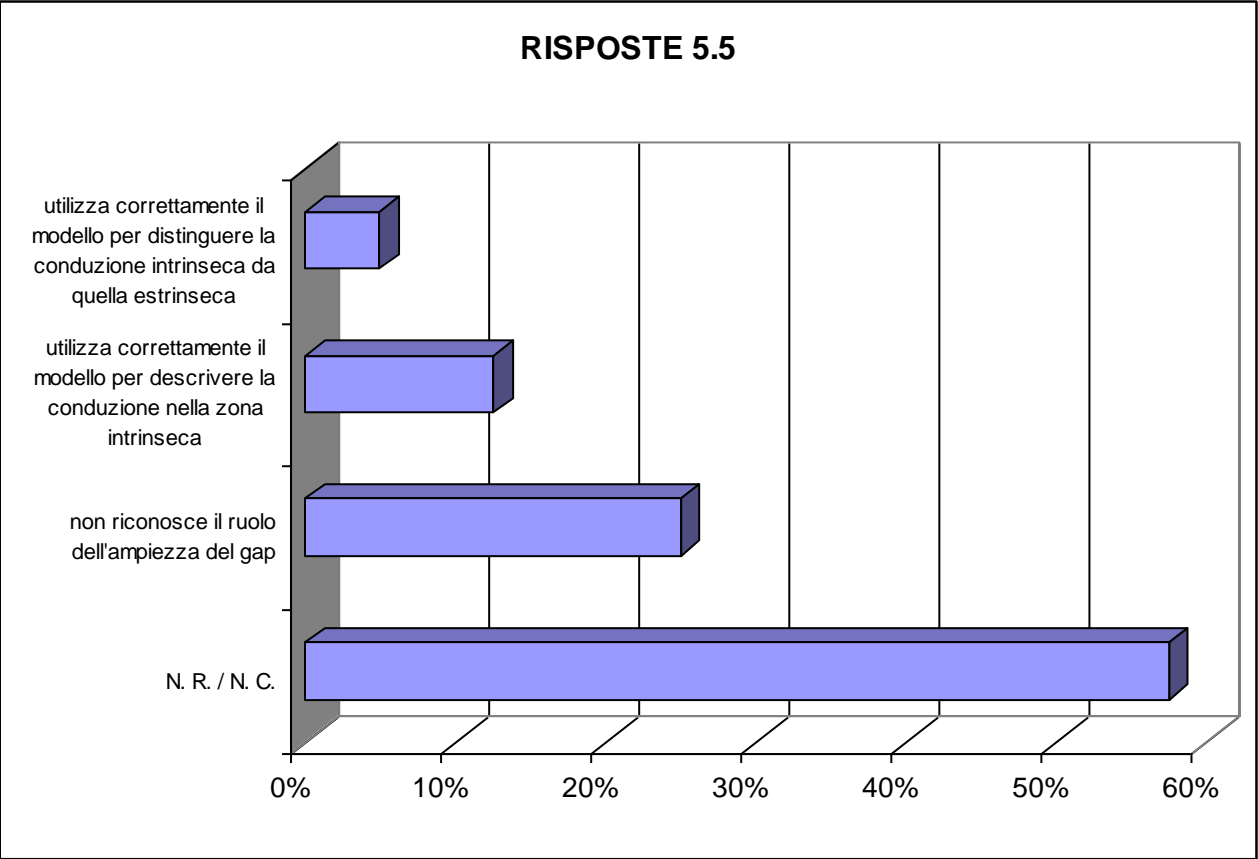
5.2 Quali sono gli stati che la pallina può assumere? Classificali in base alla sua energia distinguendo i casi  $E > 0$ ,  $E < 0$



5.4 Come utilizzeresti il modello a bande di energia per spiegare la conduzione elettrica nei metalli?



5.5 Come utilizzeresti il modello a bande di energia per spiegare la conduzione elettrica nei semiconduttori?





### 5. Dati raccolti con gli insegnanti

Si riportano per ogni domanda le risposte dei corsisti a sinistra e quelle di Loughran, Berry & Mulhall a destra, relativamente ai punti A-H.

1) Che cosa si vuole che gli studenti apprendano		
A	Per avere corrente elettrica ci deve essere una differenza di potenziale (7/13), per avere corrente elettrica il circuito deve essere chiuso (5/13), vedere il circuito come un tutt'uno (1/13)	Un circuito contiene i seguenti elementi: a) una fonte di energia (ad esempio la batteria); b) qualcosa che ha bisogno di questa energia, vale a dire un utilizzatore; c) fili che collegano i due terminali dell'utilizzatore ai due terminali della batteria.
B	Le particelle cariche relativamente mobili non vengono aggiunte ai conduttori (5/13), differenza fra materiali conduttori e non conduttori in termini di particelle cariche relativamente mobili (4/13), convenzione di segno per la corrente (2/13), struttura atomica della materia (2/13)	Tutte le sostanze contengono particelle cariche. In alcune sostanze queste particelle cariche sono relativamente mobili e possono dar luogo ad una corrente. I portatori di carica mobili sono negativi nei metalli (elettroni) ma in altri casi (ad esempio nelle soluzioni) possono essere ioni sia positivi che negativi. Un flusso di particelle con carica negativa in una direzione è equivalente ad un flusso di particelle cariche positivamente in direzione opposta. Quando si misura la corrente, la carica dei portatori è importante. L'intensità della corrente in un determinato punto nel circuito è la carica netta che si muove in un direzione passando quel punto in un secondo. La carica viene misurata in Coulomb. La corrente è la stessa in tutti i punti di un circuito in serie.
C	Campo elettrico come responsabile del trasporto di energia (5/13), che il moto delle cariche è dovuto ad un campo elettrico (3/13), N.R. (2/13), che il campo elettrico in un conduttore è causato dal	L'azione della batteria sulla carica è analoga al sollevamento di un oggetto in un campo gravitazionale. Indipendentemente dalla corrente, la batteria fornisce sempre la stessa quantità di

	mantenimento di una tensione ai suoi capi (2/13), campo come concetto globale e non locale (1/13)	energia potenziale per unità di carica che la attraversa. Il numero di Volt scritto sulla batteria ci dice quanta energia essa fornisce al circuito quando 1 Coulomb di carica passa attraverso la batteria, ossia $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / \text{C}$
D	Il significato della terminologia utilizzata (4/13), visione del circuito in termini di energia (3/13), che l'energia in gioco è associata alla corrente (3/13), che l'energia è associata al campo elettrico (1/13), distinzione tra elementi attivi e passivi (1/13), distinzione tra energia che viene trasferita e corrente che ritorna (1/13)	Una corrente elettrica comporta non solo un flusso di carica in un circuito chiuso ma anche un trasferimento di energia dalla batteria all'utilizzatore (ad esempio una lampadina). L'utilizzatore converte questa energia in forme quali calore e luce che sono utili nella nostra vita quotidiana. Il trasferimento di energia dalla batteria all'utilizzatore può non essere del 100% perché una certa quantità di energia è trasformata in calore nei cavi di collegamento. Quando la corrente percorre un elemento si ha una caduta di potenziale ai suoi capi (d.d.p.) La differenza di energia potenziale di una carica di 1 C che fluisce tra due punti di un circuito è la d.d.p. tra i due punti. La d.d.p. tra due punti di un filo metallico è molto piccola. L'energia è conservata, vale a dire la somma di tutte le d.d.p. che si misurano ai capi degli elementi di una maglia chiusa del circuito vale zero.
E	Funzionamento della batteria in termini di campo (5/13), legame tra campo e corrente (2/13), a circuito aperto la batteria influisce solo potenzialmente sul circuito (1/13), il campo è sempre presente, la corrente è presente solo quando chiudo il circuito	Una batteria genera un campo elettrico all'interno di ogni elemento del circuito che presenta una differenza di potenziale ai suoi capi. Il campo elettrico in ciascun elemento spinge contemporaneamente tutte le particelle cariche mobili in esso.

	<p>(1/13), il campo elettrico si instaura solo a circuito chiuso (1/13), corrente elettrica come flusso ordinato di cariche (1/13), che spendendo energia può essere creato e mantenuto un campo elettrico anche in mezzi conduttori che verranno così attraversati da corrente se chiusi in un circuito (1/13), identificare le condizioni per la corrente (1/13)</p>	<p>Quando queste particelle cariche vengono spinte, sperimentano una sorta di attrito, in quanto interagiscono con altre particelle cariche relativamente fisse nel componente. Ciò provoca un riscaldamento del componente. L'energia associata a questo riscaldamento è l'energia potenziale che le particelle cedono quando vengono spinte dal campo elettrico attraverso il componente. Se vi è una differenza di potenziale tra due punti di un circuito, si può dedurre che è presente un campo elettrico. Per un dato utilizzatore, maggiore è la differenza di potenziale ai capi, maggiore è il campo elettrico (e quindi maggiore è la spinta sulle particelle cariche).</p>
F	<p>Visione globale e non locale del circuito (5/13), N.R. (3/13), differenze tra parallelo e serie (3/13), gli stessi elementi si possono comportare in modo diverso in seguito a modifiche nel circuito (2/13)</p>	<p>Per una data batteria, l'intensità della corrente elettrica dipende dal numero e dalla tipologia di elementi del circuito (ossia dalla resistenza totale al movimento di carica). Quando vi è un singolo utilizzatore nel circuito, l'energia potenziale per Coulomb ceduta all'utilizzatore (vale a dire la differenza di potenziale) è uguale all'energia potenziale per Coulomb fornita dalla batteria. Se viene aggiunto un altro utilizzatore in serie, l'energia potenziale per Coulomb ceduta a ciascun utilizzatore dipende anche da come sia difficile spostare le particelle cariche negli utilizzatori (vale a dire dalle loro resistenze): elementi con una resistenza elevata avranno una maggiore differenza di potenziale.</p>

G	<p>Legame tra energia e d.d.p. (4/13), N.R. (3/13), che l'energia è una caratteristica del sistema (1/13), l'uso del voltmetro per la misura indiretta dell'energia impegnata (1/13), principio di funzionamento del voltmetro (1/13), definizione operativa dell'eV (1/13), che un voltmetro misura la differenza di potenziale tra due punti di un circuito (1/13), che lo spostamento di carica in un circuito richiede energia e il voltmetro è in grado di misurarla (1/13)</p>	<p>Quando vi è un flusso netto di carica tra due punti di un circuito, vi è una caduta di energia potenziale tra questi due punti. Un voltmetro ha una resistenza molto alta in modo che quando opera consente solo ad una piccola corrente di passare attraverso di esso senza far variare di molto la corrente che passa tra i due punti.</p>
H	<p>Legame tra potenza e luminosità (7/13), concetto di potenza elettrica (3/13), il fenomeno dipende anche dal tempo (1/13), legame tra corrente e luminosità (1/13), N.R. (1/13)</p>	<p>Quando una corrente attraversa il filamento di una lampadina, il filamento può diventare molto caldo perché è fatto con un filo di resistenza elevata. Se il filamento raggiunge una temperatura sufficientemente alta, inizia a brillare. L'energia relativa al riscaldamento e alla emissione di luce deriva dalla caduta di energia potenziale ai capi del filamento percorso dalla corrente. Più caldo è il filamento, maggiore è la sua luminosità e più veloce il trasferimento di energia al filamento. Il tasso temporale di trasferimento dell'energia al filamento è chiamato potenza della lampadina. La potenza indicata sulla lampadina indica la potenza necessaria per fornire la luminosità ottimale.</p>

2) Perché è importante per gli studenti conoscere questo argomento

A	<p>Per comprendere il funzionamento dei circuiti (5/13), per capire</p>	<p>Questo è un presupposto essenziale per la comprensione dei</p>
---	---	---

	quando può aversi passaggio di corrente elettrica (3/13), per aspetti pratici e di sicurezza (3/13), per riconoscere un circuito e cosa significa chiuderlo (2/13)	modelli scientifici dei circuiti elettrici.
B	Per avere un modello microscopico del passaggio della corrente all'interno del filo (4/13), per comprendere il motivo dell'utilizzo di materiali conduttori nei circuiti elettrici (3/13), perché non pensino che le cariche vengono immesse nel circuito dal generatore di tensione (2/13), per collegare la resistenza alle caratteristiche fisiche del materiale (1/13), per capire che il circuito chiuso serve a trasportare le particelle cariche (1/13), per capire che la corrente non è dovuta solo al movimento di elettroni (1/13), per collegare la corrente alla sezione del conduttore (1/13)	Il significato di corrente nel linguaggio quotidiano è spesso vago e confuso con la tensione. Capire il significato scientifico della corrente elettrica è importante per cogliere il senso dei modelli che gli scienziati usano per spiegare i circuiti elettrici. L'idea che particelle cariche sono presenti in tutte le sostanze e possono essere mobili, è importante per capire perché alcune sostanze conducono e altre no, e che persino i cosiddetti isolanti possono condurre se c'è un campo elettrico sufficientemente forte. Queste idee sono anche importanti nel contribuire a spiegare perché alcune sostanze hanno una maggiore resistenza alla corrente elettrica rispetto altre. Comprendere che le particelle cariche sono già negli elementi del circuito è un fattore importante per capire perché corrente è (virtualmente) istantanea quando un interruttore è acceso, e aiuta a contrastare la percezione comune che le batterie sono sorgenti di carica.
C	Per capire che l'energia è associata alla presenza del campo elettrico nel circuito (5/13), N.R. (3/13), per comprendere che è la presenza di un campo elettrico a produrre una corrente (3/13), per aspetti pratici e di sicurezza (1/13), per prevedere le correnti in	Comprendere il ruolo della batteria nel circuito come sorgente di una quantità fissa di energia per Coulomb è essenziale per prevedere e spiegare il comportamento del circuito.

	resistenze diverse in parallelo (1/13)	
D	Per comprendere che anche i fenomeni elettrici nei circuiti sono regolati dalla legge di conservazione dell'energia (5/13), per distinguere i ruoli dei diversi componenti nel circuito (2/13), N.R. (2/13), per capire il verso della corrente (1/13), per giustificare che la corrente è dovuta al campo elettrico (1/13), per comprendere che è il campo elettrico che trasporta l'energia, non la carica (1/13), per capire i nessi di causa/effetto che caratterizzano il circuito (1/13)	I circuiti elettrici svolgono un ruolo importante nella nostra vita quotidiana. È facile trascurare il fatto che il loro scopo principale è quello di trasformare energia: questo spiega perché le batterie si “scaricano”. Sia dal punto di vista scientifico che ambientale, è importante capire che l'energia che trasformiamo in un circuito elettrico non è creata ma trasferita.
E	Perché capiscano il ruolo del campo nel passaggio della corrente (5/13), per capire la necessità della chiusura del circuito (3/13), per avere una alternativa alla analogia idraulica (1/13), per capire cosa avviene all'interno del conduttore cui è applicata una d.d.p. (1/13), per capire che la batteria non è una sorgente di corrente ma di ddp (1/13), per chiarire che il campo elettrico è correlato alla d.d.p. a prescindere dalla corrente (1/13), N.R. (1/13)	Gli scienziati utilizzano spesso l'idea di campo per spiegare l'azione a distanza, vale a dire come un oggetto può influenzare un altro quando i due oggetti non sono in contatto. In particolare, l'idea del campo elettrico aiuta a spiegare come la batteria può influenzare simultaneamente tutte le particelle cariche mobili in un circuito. L'idea di campo aiuta anche a spiegare perché l'energia si trasforma all'interno di una resistenza/lampadina quando la corrente scorre all'interno di essa. Aiuta anche a spiegare perché l'energia ceduta ad un resistore cambia quando un altro resistore è collegato in serie ad esso. Capire il collegamento tra campo elettrico e differenza di potenziale è importante se si vuole che gli studenti diano un senso alle spiegazioni nei libri di testo in base alle quali la differenza di potenziale è la causa della corrente

		elettrica.
F	Per pensare ai circuiti come sistemi di elementi interconnessi (10/13), per le applicazioni pratiche (1/13), per poter prevedere correttamente il comportamento di un circuito quando subisce modifiche (1/13), N.R. (1/13)	Queste idee sono importanti per prevedere e spiegare la tensione e la corrente nelle diverse parti di un circuito.
G	Per comprendere il significato fisico del grandezza misurata dal voltmetro (3/13), per comprendere il legame tra d.d.p. ed energia (3/13), per avere una visione di tipo energetico dei fenomeni elettrici (2/13), N.R. (2/13), perché sono le differenze di tensione tra i diversi punti del circuito la causa prima del funzionamento del circuito (1/13), per conoscere una unità di misura dell'energia molto usata nell'ambito della fisica moderna (1/13), per fare misure e previsioni quantitative sul sistema (1/13)	Misuratori elettrici, come amperometri e voltmetri perturbano il circuito su cui si esegue la misurazione. Questi effetti sono di solito molto piccoli perché, rispetto al resto del circuito, l'amperometro ha una resistenza molto piccola mentre il voltmetro ha una resistenza molto alta.
H	N.R. (3/13), per comprendere la conservazione dell'energia nei fenomeni correlati ai circuiti elettrici (2/13), per comprendere che maggiore potenza implica consumare più energia nello stesso intervallo di tempo (2/13), come introduzione ai concetti riguardanti le onde elettromagnetiche (1/13), perché il processo di trasformazione di energia è parte della loro esperienza quotidiana (1/13), per distinguere tra potenza ed energia (1/13), per associare la luminosità alla potenza (1/13), per chiarire cosa è la potenza (1/13), per fare misure e previsioni quantitative sul sistema (1/13)	Il pensiero degli studenti in merito ai circuiti elettrici tende a concentrarsi principalmente sulla corrente. Considerando i fattori che influenzano la luminosità di una lampadina, possono ipotizzare la necessità di considerare il tasso di trasferimento dell'energia, una grandezza importante in molte applicazioni di uso quotidiano riguardanti i circuiti elettrici. Pensare alla luminosità di una lampadina può aiutare gli studenti a capire che l'energia non è "consumata" in un circuito, (come molti tendono a credere), e rafforzare l'idea che i circuiti elettrici sono importanti per la loro capacità di trasformare energia in

	forme utili.
--	--------------

3) Quali altre informazioni si hanno su questo argomento (che non si propone agli studenti di conoscere)		
A	Struttura del generatore in termini di resistenza interna, trasformazione di energia, ricaricabilità, tensione continua/alternata (6/13), N.R. (2/13), nel circuito la corrente è continua (1/13), legame tra d.d.p., corrente ed energia trasportata (1/13), resistenza del conduttore tra batteria e carico (1/13), fenomeni transitori (1/13), scarica tra i capi molto vicini di un circuito aperto (1/13)	La carica può oltrepassare un isolante se l'energia fornita dalla batteria è sufficientemente alta. La corrente nei circuiti può non essere continua (ad esempio in quelli contenenti condensatori). Il legame tra la resistenza e la quantità di energia disponibile a ciascun elemento del circuito non è discusso a favore delle più fondamentali idee di carica e flusso di energia.
B	Relazione tra densità di corrente e velocità di deriva (5/13), struttura della materia (3/13), dipendenza della resistività con la temperatura (2/13), esistenza di materiali non ohmici (1/13), la questione se siano le cariche positive a muoversi o quelle negative (1/13), N.R. (1/13)	Il flusso di carica comporta interazioni tra le particelle cariche nel circuito. La corrente in un filo è proporzionale alla velocità di deriva media delle particelle cariche libere e alla concentrazione di queste particelle, (numero per unità di volume). Così, in un dato filo, maggiore è la corrente, più grande è la velocità di deriva delle particelle cariche. In un componente (ad esempio una lampadina) se il filo è collegato, le particelle cariche possono avere una velocità di deriva piccola ma, se la concentrazione di particelle cariche è sufficiente, si può ancora avere una corrente rilevante. La corrente alternata non viene trattata.
C	N.R. (4/13), struttura interna del generatore (3/13), densità di energia del campo elettrico (2/13), legge di Joule per la potenza	Non vengono trattati la resistenza interna della batteria e la chimica delle reazioni nella batteria, il motivo per cui una



	(2/13), trattazione quantitativa del campo elettrico (1/13), legge di Ohm in forma istantanea e locale $E=\rho J$ (1/13)	batteria fornisce una quantità fissa di energia per Coulomb, e perché questo valore dipende sulle sostanze chimiche in essa contenute. Meglio evitare in questa fase il termine f.e.m.
D	Effetto Joule (5/13), N.R. (3/13), forma locale della legge di Joule, $w= E \cdot J$ , vettore di Poynting (1/13), aspetti transitori connessi all'apertura ed alla chiusura di un circuito (1/13), comportamenti non ideali dell'utilizzatore (1/13), convenzioni di segno per la corrente (1/13), processi chimico-fisici con i quali le batterie sono in grado di fornire energia (1/13)	In una trattazione più approfondita sarebbe opportuno introdurre: che l'energia viene trasferita dalla batteria all'utilizzatore utente tramite campi elettromagnetici presenti in tutto il circuito; il rapporto tra lavoro e variazioni di energia; il potenziale; la dissipazione di energia in cavi di collegamento molto lunghi, ad esempio nei fili di una linea di trasmissione da una centrale elettrica, che può essere significativa.
E	N.R. (3/13), concetti di resistenza e rigidità dielettrica (3/13), equazioni di Maxwell (2/13), fenomeni transitori come la carica del condensatore (1/13), legge di Ohm (1/13), scarica elettrica nei gas (1/13), tipo di campo della batteria e come viene generato (1/13), differenza di potenziale come spinta del passaggio di cariche (1/13)	L'intensità del campo elettrico è diversa in componenti differenti del circuito. In un filo di sezione uniforme, l'intensità del campo elettrico è uguale alla differenza di potenziale tra i capi del filo diviso la lunghezza del filo. Quando un interruttore viene chiuso, occorre un intervallo di tempo piccolo ma finito affinché il campo raggiunga una configurazione di equilibrio nel circuito.  La conclusione che, per due dati punti in un circuito, una maggiore differenza di potenziale causa una maggiore spinta, e quindi una corrente maggiore, non è sempre vera; ad esempio, in presenza di discontinuità nel circuito quali diodo o condensatore. Non pare necessario trattare in una fase introduttiva la convenzione sul verso del campo elettrico.

F	N.R. (4/13), velocità di propagazione delle variazioni del campo (2/13), aspetti transitori (2/13), le caratteristiche di ogni componente del circuito (1/13), correnti parassite (1/13), fenomeni di risonanza (1/13), differenza tra inserzione degli strumenti voltmetrici e amperometrici a monte o a valle (1/13), leggi di Kirchhoff (1/13)	
G	N.R. (4/13), struttura del voltmetro (2/13), l'utilizzo del voltmetro come strumento di misura altera la struttura del circuito elettrico (2/13), come si collega un voltmetro a differenza di un amperometro convenzione per il potenziale all'infinito (1/13), legame matematico tra d.d.p. ed energia (1/13), caratteristiche dei superconduttori (1/13), descrizione dei sistemi in cui l'eV è utilizzato come unità di misura (1/13), galvanometro a bobina mobile (1/13)	
H	Principio su cui si basa l'emissione di luce in una lampadina (3/13), la differenziazione delle lampadine in base alla potenza dissipata (1/13), legge Joule per la potenza (1/13), spettro di corpo nero (1/13), la relazione tra corrente e luminosità tipica della lampadina (1/13), leggi che riguardano l'irraggiamento (1/13), come si misura la potenza; potenza in corrente alternata (1/13), efficienza luminosa (1/13), andamento non ohmico della resistenza della lampadina con la temperatura (1/13)	La resistenza di una lampadina aumenta con la temperatura.

4) Difficoltà/limitazioni collegate all'insegnamento dell'argomento		
A	N.R. (3/13), la corrente elettrica "non si vede" (2/13), la batteria come generatore non di corrente ma di d.d.p. (2/13), concetto di potenziale (2/13), necessità dell'utilizzatore (1/13), mancanza di un modello concreto di circuito (1/13), la convenzione sul segno della corrente (1/13), cos'è che genera il moto delle cariche (1/13)	Stiamo parlando di qualcosa che non può essere visto, e facciamo affidamento su misuratori per sapere cosa accade in un circuito.
B	Rendere evidente che ci sono delle particelle cariche mobili (5/13), l'idea che la corrente sia un fluido (2/13), il concetto di flusso netto (2/13), N.R. (2/13), il modello microscopico dello studente (1/13), la direzione della corrente (1/13)	Nessun modello spiega esaurientemente il comportamento di un circuito elettrico. Il flusso d'acqua nei tubi è spesso usato come analogia, ma la validità di questa analogia appare limitata per gli studenti perché la loro esperienza del flusso d'acqua tende ad essere limitata al rubinetto domestico che non è un circuito chiuso
C	Concetto di campo (7/13), capire che l'energia è trasportata dal campo elettrico (4/13), idea dell'energia dissipata nell'utilizzatore (1/13), mancanza di evidenza del passaggio di corrente e del trasporto di energia (1/13)	L'energia è un concetto molto astratto, l'energia potenziale ancora di più. L'azione di una batteria è complessa, sicché è spesso conveniente trattarla come una "scatola nera" che fornisce un potenziale elettrico al circuito. Tuttavia, è importante sottolineare che un agente chimico separa le particelle cariche all'interno della batteria, che la d.d.p. è legata alla natura delle sostanze chimiche, e che la batteria fornisce una quantità fissa di energia per ogni coulomb che la attraversa, indipendentemente dalla corrente. Una difficoltà con la spiegazione del tipo scatola nera è che gli studenti

		<p>possono pensare che le particelle cariche trasportano l'energia potenziale nello stesso modo in cui i carrelli ferroviari trasportano il carbone. Questo è un problema perché gli studenti possono quindi pensare che la differenza di potenziale causa la corrente. Comprendere il concetto di differenza di potenziale è reso più difficile dall'uso nei libri di testo, spesso incoerente, dei termini "tensione" e "caduta di tensione" (invece di differenza di potenziale).</p>
D	<p>Vedere la conservazione dell'energia e le sue trasformazioni (5/13), concetto di energia (4/13), l'utilizzatore viene visto come un elemento che consuma energia fino a quando nella batteria non ne rimane più (2/13), concetto di campo (1/13), N.R. (1/13)</p>	
E	<p>Vedere l'esistenza del campo elettrico all'interno del conduttore (10/13), correlare la corrente al campo elettrico (2/13), correlare il campo elettrico alla batteria (1/13)</p>	<p>L'idea di campo è molto astratta. Il campo all'interno di un filo conduttore è determinato non solo dalla batteria ma anche dalle cariche sia fisse che mobili nel circuito presenti sia sui fili che sugli altri componenti. La fisica spesso tratta la differenza di potenziale come "causa" della corrente. Questo è legato all'idea che la differenza di potenziale è strettamente legata al concetto di campo nel senso che l'esistenza di uno implica l'esistenza dell'altro. Alcuni insegnanti cercano di evitare di usare l'idea di differenza di potenziale a questo livello: ciò causa difficoltà se si tenta di spiegare la causa della corrente elettrica e perché differenti quantità di energia sono trasferite</p>

		in differenti componenti circuitali
F	Mancanza dell'idea di sistema elettrico (4/13), N.R. (2/13), distribuzione delle correnti nei componenti del circuito (1/13), mancanza di esperienza concreta con circuiti reali (1/13), andare oltre la semplice interpretazione algebrica delle equazioni (1/13), difficoltà nel definire le modifiche che si possono apportare agli elementi di un circuito (1/13), trattazione di circuiti complessi formati da nodi e maglie (1/13), affrontare funzioni di più variabili (1/13), concetto di campo (1/13)	Queste idee sono complesse da capire. Spiegarle coinvolge diversi processi e modelli. E' facile ridurre le spiegazioni a manipolazioni matematiche della legge di Ohm $V = IR$ , ma questo non promuove la comprensione concettuale
G	Collegare una misura di tensione a un'energia (3/13), confusione tra potenziale ed energia a causa della scelta della quantità unitaria di carica (1/13), non percepire che l'inserimento di un nuovo elemento nel circuito può variarne le caratteristiche (1/13), comprensione del significato fisico della differenza di potenziale (1/13), collegare l'energia trasportata alla luminosità di una lampadina (1/13), interpretazione microscopica del fenomeno (1/13), comprensione del potenziale (1/13), inserimento in parallelo del voltmetro (1/13), relazioni tra energia e altre grandezze in elettromagnetismo (1/13), confusione con l'energia cinetica delle cariche che si muovono nel circuito (1/13), N.R. (1/13)	È facile interpretare la lettura di un voltmetro come "tensione". Questo può essere fonte di confusione per gli studenti perché al termine tensione è attribuito un significato diversi da docenti diversi e dagli autori dei libri di testo (ad esempio, per indicare il potenziale, la differenza di potenziale, la f.e.m.). È importante sottolineare che la lettura di un voltmetro collegato ad una batteria: 1) a circuito aperto misura l'energia per coulomb che la batteria può fornire, 2) a circuito chiuso misura l'energia per coulomb effettivamente utilizzata dal circuito.
H	N.R. (2/13), distinguere energia e potenza (2/13), rendere chiaro il concetto di velocità di trasferimento dell'energia a livello	L'utilizzo delle lampadine come misuratori di corrente nella parte iniziale della sequenza può portare gli studenti a pensare

	<p>microscopico (2/13), non percepire che anche a regime si tratta di un equilibrio dinamico dipendente dal tempo (1/13), utilizzo di lampadine di potenza diversa (1/13), associare il concetto di onda alla propagazione della luce (1/13), lo studente può pensare che la luminosità dipenda dalla carica invece che dall'energia (1/13), distinguere potenza e flusso luminoso (1/13), misurare la luminosità (1/13), idea che la corrente sia consumata nell'utilizzatore (1/13)</p>	<p>che la loro luminosità dipende solo dalla corrente in esse, piuttosto che dalla potenza; quindi è importante riprendere la questione in una fase successiva</p>
--	---	--

5) Conoscenze riguardo alle concezioni degli studenti che possono influenzare l'insegnamento dell'argomento		
A	<p>Analogie idrauliche (4/13), natura e proprietà fisiche dei portatori di carica (3/13), confusione tra corrente, energia, tensione (2/13), idea di corrente consumata (2/13), corrente elettrica come causa della tensione (1/13), circuito aperto o chiuso interpretato in termini del linguaggio comune (1/13)</p>	<p>Gli studenti spesso pensano che basta collegare un solo filo tra batteria e lampadina (modello unipolare). Gli studenti spesso non riconoscono che una lampadina ha due terminali. Altre idee alternative sono: il modello dello scontro di correnti e il modello della consumazione della corrente.</p>
B	<p>Le cariche vengono create dalla batteria (5/13), corrente vista come un fluido (2/13), corrente vista come grandezza esterna alla materia che attraversa (1/13), l'idea che senza corrente non ci sia carica (1/13), non si vede muovere nulla nei fili del circuito (1/13), corrente sempre dovuta al moto degli elettroni (1/13), N.R. (1/13)</p>	<p>Gli studenti tendono a pensare che la batteria è sorgente di particelle cariche (che vengono descritte come elettricità/tensione/volt). A meno che non sia incoraggiato, gli studenti non tendono a istituire collegamenti tra i diversi argomenti che hanno studiato, così essi non collegano l'idea di energia elettrica con le loro conoscenze di chimica. In particolare hanno difficoltà nel collegare l'idea macroscopica di corrente con l'idea microscopica degli elettroni. Il concetto di carica netta è difficile. Una carica netta pari a zero spesso</p>

		viene interpretata come la non esistenza di particelle cariche. Gli studenti si rendono conto che corrente comporta un flusso di particelle cariche, ma non lo riconducono alla definizione della intensità di corrente. Così, in questa fase, è meglio usare C/s come unità di corrente (anziché Ampere) per aiutare a rafforzare il concetto che la corrente si riferisce all'intensità del flusso di particelle cariche.
C	Batteria come generatore di cariche/corrente (3/13), visioni locali e non generali (2/13), origine dell'energia nel circuito (2/13), la non associazione del campo elettrico alla batteria (2/13), gli studenti pensano che l'energia la trasportino le cariche (1/13), concetto di campo elettrico visto come una complicazione inutile (1/13), concetto di campo e di propagazione delle sue variazioni (1/13), visione unipolare della corrente nel circuito (1/13)	Il pensiero degli studenti sui circuiti elettrici tende a concentrarsi sulla corrente, piuttosto che sulla tensione. L'espressione quotidiana "caricare la batteria" tende a rafforzare l'idea sbagliata che le batterie sono accumulatori di carica. E' una buona idea parlare di energia fornita dalla batteria in termini di J/C invece che di Volt per aiutare a rafforzare l'idea della batteria come fornitore di energia. Così una batteria da 1,5 V può essere indicata come una batteria da 1,5 joule/coulomb. Analogamente per la differenza di potenziale.
D	Confusione tra potenza ed energia (3/13), batteria vista come generatore di cariche/corrente (2/13), visione dell'utilizzatore che dissipa/produce energia (2/13), gli studenti non vedono il trasferimento di energia dalla batteria all'utilizzatore (1/13), energia vista come sostanza (1/13), percezione di aspetti contraddittori tra corrente che "circola" ed energia trasferita	

	(1/13), confusione tra energia e potenziale (1/13), visione unipolare della corrente nel circuito (1/13), N.R. (1/13)	
E	Gli studenti vedono la batteria come sorgente della corrente (3/13), N.R. (2/13), pensare la corrente indipendente dal campo elettrico (2/13), modello fluidodinamico di circuito (1/13), gli studenti non pensano all'esistenza del campo elettrico (1/13), gli studenti ragionano in termini di forza e non di campo (1/13), gli studenti pensano che il campo elettrico all'interno di un tratto di materiale conduttore che costituisce un circuito aperto possa produrre della corrente elettrica solo in quel tratto di circuito (1/13), confusione tra campo elettrico, differenza di potenziale e corrente (1/13), visione locale e non globale di ciò che avviene all'interno del circuito (1/13)	L'idea del campo è più facilmente accessibile se riferita al campo gravitazionale che appare più vicina all'esperienza degli studenti. Pertanto, tale riferimento è utile se gli studenti hanno già un po' di comprensione del campo gravitazionale e dell'energia potenziale gravitazionale. L'idea di campo è utile quando si spiega agli studenti che, se le particelle cariche trasportano energia nel circuito, come fanno a "sapere" quanta energia va data ad ogni resistore del circuito? Gli studenti spesso pensano alla differenza di potenziale come effetto della corrente piuttosto che come causa. Il collegamento tra la differenza di potenziale e il campo elettrico aiuta a esplicitare questa causalità rendendola comprensibile.
F	Visione locale (8/13), difficoltà matematiche (1/13), gli studenti pensano che una variazione a valle non possa provocare variazioni a monte (1/13), difficoltà nel tener conto di una variazione simultanea di più variabili (1/13), gli studenti pensano che gli strumenti di misura non perturbino il sistema (1/13), N.R. (1/13)	Gli studenti tendono a pensare localmente e non globalmente, ossia che una modifica influisce solo sulla parte del circuito in cui è stata effettuata. Gli studenti tendono a pensare che la corrente in un circuito resta la stessa anche quando vengono apportate modifiche a parti del circuito.
G	N.R. (2/13), confondere energia e potenziale (2/13), confondere carica con corrente (1/13), confondere voltmetro e amperometro (1/13), confondere energia, d.d.p. e corrente (1/13), difficoltà nel	Gli studenti alla prima esperienza di misurazione tendono a ritenere che il processo di misura non influenzi affatto il sistema. Così gli studenti tendono a pensare che amperometri e



	collegare il concetto di tensione con quello di energia (1/13), associazione rigida tra strumento di misura e quantità misurata (1/13), difficoltà nella comprensione della risposta globale degli elementi del circuito (1/13), pensare che il voltmetro misura qualcosa in un punto solo (1/13), gli studenti non associano un significato fisico alla differenza di potenziale elettrico (1/13), problemi legati al segno della d.d.p. (1/13)	voltmetri sono dispositivi passivi che non influenzano il circuito. E' una buona idea descrivere la lettura del voltmetro (vale a dire la differenza di potenziale) in termini di $J/C$ piuttosto che di volt perché è facile per gli studenti dimenticare che $1 V = 1 J / C$
H	Gli studenti confondono le grandezze potenza ed energia e quindi non tengono conto della variabile tempo (5/13), N.R. (2/13), visione stazionaria dei fenomeni elettrici (2/13), gli studenti vedono la luminosità di una lampadina come caratteristica intrinseca indipendente dal modo in cui è collegata al circuito elettrico (2/13), gli studenti pensano che la corrente sia persa man mano che attraversa il circuito (1/13), idea che la corrente sia consumata nell'utilizzatore (1/13)	Molti studenti credono intuitivamente che "qualcosa" si "dissipa" in un circuito, e tendono a considerare questo "qualcosa" come la corrente. L'introduzione delle idee sulla luminosità delle lampadine aiuta ad affrontare questa concezione e ad aumentare negli studenti la consapevolezza che l'energia e la corrente sono concetti distinti ma collegati.

6) Altri fattori che influenzano l'insegnamento dell'argomento

A	Uso del linguaggio comune, ad es. "ricarico la batteria" come se si mettessero dentro le cariche (3/13), pericoli derivanti dai cortocircuiti (2/13), gli apparecchi elettrici sono collegati alla presa di rete con un filo apparentemente unico (1/13), mancanza di raccordo tra concetti teorici e applicazioni pratiche (1/13), padronanza dell'elettrostatica (1/13), attività in laboratorio sui	Il termine elettricità è utilizzato nella vita quotidiana per significare corrente/tensione/carica/energia e quindi è meglio non utilizzato. Molti studenti (soprattutto le ragazze) non hanno molta esperienza pratica con i circuiti elettrici. Le ragazze in particolare sono spesso riluttanti a provare a collegare gli elementi dei circuiti e a dire quello che pensano per paura di
---	--	---

	<p>circuiti elettrici (1/13), curiosità degli studenti verso gli aspetti applicativi (1/13), presunzione di conoscenza dell'argomento legata all'uso pratico dei concetti (1/13), astrattezza delle grandezze fisiche coinvolte (1/13), N.R. (1/13)</p>	<p>sbagliare.</p>
B	<p>N.R. (4/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (2/13), analogia idraulica (2/13), idea che la resistenza dipenda dalla tensione (1/13), "consumazione" nell'utilizzatore (1/13), modello dell'atomo che ha in mente lo studente appreso negli studi ad es. di chimica (1/13), distinzione tra conduttori e isolanti (1/13), formalizzazione matematica (1/13)</p>	<p>Gli studenti hanno bisogno di avere qualche nozione sulla struttura particellare della materia e ciò implica la necessità di rivisitare l'argomento. In particolare, hanno bisogno di acquisire familiarità con l'idea di carica, che la carica può essere positiva o negativa e che gli oggetti con la stessa carica si respingono mentre quelli con carica opposta si attraggono. Questa è un'opportunità per collegare diverse aree del curriculum scientifico, ad esempio la struttura della materia, reazioni chimiche, il legame metallico, ecc.</p>
C	<p>N.R. (6/13), difficoltà nella comprensione del concetto di campo (3/13), linguaggio comune: la corrente che esce dalla presa (2/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (1/13), batteria come fornitore di corrente (1/13)</p>	<p>Molte di queste idee possono essere presentate utilizzando metafore/modelli/analogie. In ogni caso è importante chiarire somiglianze e differenze tra metafora/modello/analogia ed il fenomeno in esame. E' utile che gli studenti abbiano già incontrato le idee di energia potenziale gravitazionale e di campo gravitazionale.</p>
D	<p>N.R. (7/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (1/13), relazione tra corrente ed energia (1/13), presenza di differenti forme di energia (1/13), provenienza dell'energia della batteria (1/13), corrente come trasporto di materia (1/13), gli</p>	

	studenti pensano che la corrente trasporta l'energia (1/13)	
E	N.R. (5/13), comprensione da parte degli studenti del concetto di campo (2/13), correlazione tra d.d.p. e corrente (1/13), lo spostamento delle cariche non associato ad una forza (1/13), differenza tra l'uso di una batteria e il collegamento alla rete in corrente alternata (1/13), mancanza di collegamento tra la visione macroscopica e quella microscopica (1/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (1/13), analogie gravitazionali (1/13)	Il rapporto tra campo elettrico e differenza di potenziale è spesso non esplicitato quando si insegnano i circuiti elettrici.
F	N.R. (6/13), abitudine a risolvere i circuiti come esercizi matematici (2/13), tendenza a privilegiare la corrente nella descrizione del circuito (1/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (1/13), chiarimento delle grandezze fisiche coinvolte (1/13), capacità resistenza induttanza degli elementi dei circuiti (1/13), disposizione circuitale in serie ed in parallelo (1/13)	Gli approcci qualitativi, piuttosto che quantitativi, aiutano lo studente a focalizzare l'attenzione sulla comprensione dei concetti. Così, sembra meglio in questa fase evitare di utilizzare formule.
G	N.R. (6/13), gli studenti percepiscono l'energia solo attraverso i suoi effetti macroscopici (1/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (1/13), suscitare interesse proponendo la comprensione del principio di funzionamento di strumenti di uso comune (1/13), legame tra luminosità di una lampadina ed energia trasportata dalla corrente (1/13), il voltmetro è visto come quella cosa che misura i volt (1/13), spostamento della carica come	

	fenomeno che richiede energia (1/13), dubbi sul collegamento in serie o in parallelo del voltmetro (1/13)	
H	N.R. (7/13), quando si acquista una lampada la potenza viene comunicata come una caratteristica indipendente dalla condizione di funzionamento (1/13), si vedono solo gli effetti e le grandezze sono intangibili (1/13), interpretazione del funzionamento di lampadine la cui luminosità aumenta un certo tempo dopo l'accensione (1/13), aver visto che la luminosità dipende dalla d.d.p. della batteria (1/13), non tutti i laboratori sono forniti di Wattmetro (1/13), aver chiarito la distinzione tra una grandezza e la sua variazione (1/13)	È importante concentrarsi sul ragionamento qualitativo per contribuire a promuovere la comprensione concettuale.

7) Procedure di insegnamento e motivi specifici per l'utilizzo di queste in relazione all'argomento		
A	Osservare un circuito semplice per esplorare apertura e chiusura (8/13), usare il multimetro per distinguere i collegamenti in serie e parallelo (2/13), usare simulazioni per chiarire nodi concettuali (1/13), N. R. (2/13)	Dare agli studenti batteria, lampadine e fili conduttori chiedendo di accendere la lampadina. Questo compito contribuisce a stabilire le condizioni necessarie per la corrente. Gli studenti vanno incoraggiati a seguire il percorso della corrente anche nel filamento della lampadina.
B	N.R. (5/13), misura sperimentale di resistenza (1/13), confrontare conduzione in solidi ed in soluzioni elettrolitiche (1/13), mostrare gli effetti della chiusura di un circuito (1/13), realizzare lo stesso circuito con fili di materiale diverso (1/13), costruire la pila (1/13), tester analogico per evidenziare il verso della corrente (1/13),	L'analogia idrodinamica o altre analogie come The Bicycle Chain Analogy oppure la Rope Model sono utili per differenziare tra energia e corrente.

	progettare circuiti in serie e parallelo in analogia ai fili di differente lunghezze e sezione (1/13), formalizzazione matematica della corrente (1/13)	
C	Lezione frontale/dialogica (6/13), N.R. (2/13), introdurre esemplificazioni di energia trasportata per es. da campi elettromagnetici o nel riscaldamento (2/13), analogia idraulica (1/13), sperimentazione per mostrare che all'energia associata alla corrente corrisponde un riscaldamento (1/13), chiudendo la pila su una resistenza paragonabile alla resistenza interna, osservare il riscaldamento della pila (1/13)	L'analogia gravitazionale è utile per lo sviluppo di idee su campo, differenza di potenziale e sulla costanza dell'energia per unità di carica fornita dalla batteria.
D	N.R. (5/13), osservare/misurare luminosità/riscaldamento di utilizzatori semplici (4/13), mostrare gli effetti della corrente in relazione alla misura dell'amperometro (2/13), mostrare sperimentalmente che un utilizzatore non è in grado di fornire energia ad un altro utilizzatore (1/13), chiudendo la pila su una resistenza paragonabile alla resistenza interna, osservare il riscaldamento della pila (1/13)	
E	Lezione frontale (3/13), mostrare sperimentalmente la necessità del circuito chiuso (3/13), mostrare che, a batteria collegata, i componenti del circuito trasferiscono in ogni punto del circuito la tensione da essa imposta (3/13), N.R. (2/13), studio approfondito di modello di batteria (1/13), sperimentare il passaggio di cariche di breve durata tra due corpi a diverso potenziale (1/13)	Il gioco di ruolo Jelly Bean è utile per sviluppare l'idea di energia per Coulomb. Uno studente rappresenta una particella carica che attraversando la batteria raccoglie un numero fisso di fagioli che rappresentano l'energia. Quando lo studente attraversa una resistenza cede alcuni fagioli. Se lo studente porta un Coulomb di carica e

		un fagiolo rappresenta un Joule di energia, allora il numero di fagioli dato alla resistenza rappresenta la differenza di potenziale ai suoi capi.
F	Osservare un circuito semplice in cui modifico gli elementi ad es. aggiungere resistenza in parallelo, cambiare lampadine (9/13), misurare le differenze in tensione e corrente tra serie e parallelo (2/13), N.R. (2/13)	Chiedere agli studenti di prevedere cosa accadrà alla luminosità di una lampadina, poi mostrare ciò che accade e chiedere di spiegare le loro osservazioni (ciclo POE) nelle seguenti situazioni: sostituzione della batteria con una di diversa tensione; collegamento in serie di una lampadina identica; con la seconda lampadina ancora collegata, si inserisce una batteria nel circuito.
G	N.R. (7/13), collegare attraverso analisi dimensionale d.d.p. ed energia alla forza necessaria al movimento delle cariche (1/13), luminosità/riscaldamento per mostrare la correlazione tra tensione ed energia (1/13), analogia tra energia potenziale gravitazionale ed energia potenziale elettrica (1/13), circuito con d.d.p variabile voltmetro e lampadina per chiarire legame tra d.d.p. ed energia trasportata (1/13), prevedere i risultati ottenibili ai capi di determinati elementi del circuito e andare a verificare attraverso l'uso dello strumento di misura (1/13), mettere più lampadine in parallelo e misurare col voltmetro la d.d.p. ai capi di ognuna ordinando le lampadine per luminosità e per misura della d.d.p. e correlando le 2 serie (1/13)	Dare agli studenti la possibilità di misurare differenze di potenziale e correnti nei seguenti circuiti: un circuito con una batteria ed una lampadina; un circuito con due batterie uguali in serie e una lampadina; un circuito con due batterie uguali in serie e due lampadine uguali. La differenza di potenziale dovrebbe essere misurata: ai capi di ogni batteria e di ogni lampadina quando il circuito è aperto e quando il circuito è chiuso; tra due punti dei fili del circuito quando il circuito è chiuso. Gli studenti dovrebbero spiegare le misure in termini di $J/C$ e $C/s$ .

H	<p>N.R. (6/13), confrontare due circuiti uguali ma con lampadine di potenza diversa osservando quale batteria si scarica prima (1/13), discutere la diversa luminosità in tre lampadine, di cui una in serie al parallelo delle altre due (1/13), mostrare la variazione di luminosità di una lampadina in un circuito con tensione fissa e potenziometro (1/13), discutere l'intensità luminosa delle lampadine in serie ed in parallelo (1/13), mostrare che lampadine con potenze nominali diverse si illuminano in maniera diversa (1/13), collegare la lampadina ad una dinamo e correlare la velocità di rotazione della dinamo alla luminosità (1/13), misurare il prodotto tensione corrente in corrispondenza alla luminosità della lampadina (1/13)</p>	<p>Chiedere agli studenti di prevedere quale sarà più luminosa, tra una lampadina di potenza 40 W e una di 75 W quando sono collegate alla presa di rete (ciclo POE). Poi chiedere di prevedere quale sarà più luminosa quando sono collegate in serie. Ciò può essere usato per mostrare che la potenza nominale di una lampadina indica la potenza necessaria per la luminosità ottimale.</p> <p>Utilizzare le lampadine come misuratori di corrente può portare gli studenti a credere che la luminosità di una lampadina dipende solo dalla corrente. Appare necessario collegare la luminosità alla potenza.</p>
---	---	---

