

Un approccio fenomenologico alla superconduttività e i processi di apprendimento degli studenti

Marisa Michellini, Alberto Stefanel

Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università Degli studi di Udine, Udine, Italia
marisa.michellini@uniud.it, alberto.stefanel@uniud.it

A phenomenological approach to superconductivity and the learning processes of students

La superconduttività è una parte importante della fisica moderna. La sua trattazione nella scuola si raccorda con quella dell'elettromagnetismo, permettendo un'esplorazione sperimentale finalizzata alla costruzione delle leggi fenomenologiche che la descrivono. Nell'ambito del Model of Educational Reconstruction è stato costruito un percorso didattico in prospettiva verticale dalla esplorazione delle proprietà magnetiche ed elettriche dei materiali, alla costruzione di leggi fenomenologiche che descrivono lo stato superconduttivo. Sperimentazioni di ricerca, condotte con oltre 300 studenti di scuole superiori e monitorate con l'uso di tutorial e questionari pre/post, documentano positivi percorsi di apprendimento, in cui le peculiari proprietà dei superconduttori sono più spesso correlate tra loro in modelli basati sull'elettromagnetismo, piuttosto che restare descrittori separati di fenomenologie.

Parole chiave: Superconduttività, proposta didattica, natura della scienza, apprendimento studenti, scuola secondaria Superiore

Superconductivity is an important part of modern physics. Its discussion in school connects with that of electromagnetism, allowing experimental exploration aimed at the construction of phenomenological laws, describing it. In the framework of the Model of Educational Reconstruction, an educational path in vertical perspective was designed. It pass from the exploration of Magnetic and Electric Properties of Materials, to the construction of phenomenological laws, describing the superconducting state. Research experiments, conducted with more than 300 students from High Schools and monitored with the use of tutorials and pre / post questionnaires, document positive learning paths, in which the peculiar properties of superconductors are more often correlated each Other in models based on electromagnetism, rather than remain separate descriptors of phenomena.

Keywords: Superconductivity, didactic proposal, nature of science, students learning, high school

27

Strategie e metodologie didattiche nell'insegnamento delle discipline

Un approccio fenomenologico alla superconduttività e i processi di apprendimento degli studenti

1. Introduzione

Nelle ricerche in didattica della fisica si possono riconoscere due diversi grandi ambiti: quello delle ricerche focalizzate sui contenuti (Content Based Research); quello delle ricerche focalizzate sui processi di apprendimento degli studenti, in merito ad un definito contenuto (Student Oriented Research). Nel primo ambito si collocano ricerche di natura diversa, come quelle di sviluppo di strumenti e metodi (R&D), quelle per strutturare proposte di percorsi didattici (Meheut, Psillos, 2004) eventualmente integrate con Design Based Research (DBR) (Lijnse, 1995; Anderson, Shattuck, 2012), analisi curriculari e di learning progression (Neumann et al., 2013; Duschl, 2013).

Ricerche empiriche (RE) (Fischer, 2005) sui processi di apprendimento (di Sessa, 2004) si collocano in entrambe i mondi con funzioni diverse, quali l'analisi dei ragionamenti (Viennot, 1996) nella sperimentazione di un modulo di intervento formativo o la strutturazione di strumenti di monitoraggio dell'apprendimento rispettivamente (Vosniadou, 2008)

Le nostre ricerche si collocano nel quadro teorico del Model of Educational Reconstruction (MER- Duit et al., 2005) e si sviluppano secondo linee diverse a seconda degli obiettivi di ricerca specifici.

Per strutturare proposte didattiche il MER richiede una ricostruzione a scopo didattico dei contenuti disciplinari, mentre aspetti di impostazione, strategia e metodi sono oggetto di ricerche che si integrano in modo differenziato. Offrire agli studenti esperienza (apprendimento attivo) dei metodi propri della disciplina nel contesto dei contenuti disciplinari è parte delle ricerche sulla natura della scienza (NOS) che riguardano proposte curriculari.

La superconduttività è parte importante della fisica del XX secolo sia sul piano interpretativo, sia su quello delle applicazioni tecnologiche che essa permette e ad essa sono correlate (Gil, Solbes, 1993; Hake, 2000; Ostermann et al., 1998, 2004). Si raccorda in modo naturale con i curricula di elettromagnetismo delle scuole secondarie superiori (Engestrom et al., 2008; Viola et al., 2008; Taşar, 2009; Greczylo, 2010) e, grazie alla disponibilità di superconduttori ad alta temperatura utilizzabili anche in laboratorio didattico, permette di mostrare come la fisica costruisce interpretazioni a partire da una descrizione fenomenologica, nei contesti in cui manca una teoria coerente come quello della superconduttività (Osterman et al., 1998, 2004; González-Jorge, Domarco, 2004; Michelini, Viola, 2010; Kedzierska et al., 2010). Permette inoltre di affrontare problem solving basati sull'utilizzo di sistemi "ideali" (i superconduttori sono conduttori ideali e diamagneti ideali) in sistemi reali (es elementi superconduttivi inseriti come elementi di un circuito elettrico, piuttosto che ruolo di un superconduttore in un fenomeno dove sono presenti correnti parassite generate per induzione elettromagnetica). Per quanto, come detto, lo stato superconduttivo possa venir inquadrato nella fenomenologia classica dell'elettromagnetismo, la completa comprensione della superconduttività e della sua natura di effetto



quantomeccanico macroscopico richiede un cambiamento del quadro interpretativo (Bown, 2000; González-Jorge, Domarco, 2004; Viola, 2010). La superconduttività, quindi, può costituire un ambito interessante in cui costruire tale cambiamento. Le sue applicazioni tecnologiche, come i treni MAGLEV, o i supermagneti utilizzati ad esempio negli apparati per la NMR o negli acceleratori di particelle, possono essere motivo per affrontare la superconduttività nelle scuole, come ambito privilegiato a partire dalla quale affrontarla, ad esempio in scuole con approccio applicativo, come sono spesso gli ITI (Viola et al., 2008).

La nostra proposta didattica sulla superconduttività nella scuola secondaria, affronta questa tematica in prospettiva verticale (Meheut, Psillos, 2004), in termini di ricostruzione in chiave didattica dell'elettromagnetismo e in particolare dello studio delle proprietà magnetiche e di conduzione elettrica dei materiali per giungere, attraverso l'esplorazione della fenomenologia dei superconduttori, alla costruzione di leggi fenomenologiche che descrivono lo stato superconduttivo (Viola, 2010; Michelini, Viola, 2010; Michelini et al., 2013, 2014a).

Nel presente contributo, viene discusso come è stato tradotto operativamente il MER nella costruzione del percorso didattico, discutendo le scelte fatte nella sua costruzione, presentate le metodologie utilizzate negli studi sui processi di apprendimento degli studenti e sintetizzati i principali esiti sul monitoraggio dei percorsi di apprendimento degli studenti.



2. Dall'analisi della struttura dei contenuti alla ricostruzione didattica

Nel MER tre elementi fondamentali concorrono in modo bilanciato alla progettazione e costruzione di un percorso didattico innovativo: l'analisi della struttura dei contenuti in chiave unicamente disciplinare, per individuare i diversi modi concettualmente differenti con cui la disciplina organizza i contenuti in oggetto; il processo di "elementarizzazione", per individuare i concetti fondamentali e le loro reciproche relazioni, ossia i concetti da cui non si può prescindere per una trattazione coerente e consistente del contenuto scelto; la ricostruzione della struttura del contenuto in chiave didattica, che deve tenere in conto delle ricerche sull'insegnamento/apprendimento nell'ambito considerato, di contenuti, modalità e contesti tipicamente utilizzati a scuola per affrontare la tematica. È solo il caso qui di puntualizzare che la prima fase richiede un'approfondita analisi dei riferimenti disciplinari accademici (e non dei testi scolastici), il processo di elementarizzazione si basa su tali riferimenti differenziandosi profondamente dal processo di semplificazione dei contenuti che caratterizza invece i testi scolastici. Nella terza fase, di ricostruzione in chiave didattica dei contenuti, avranno grande importanza sperimentazioni pilota in ambiti educativi diversi per acquisire feedback diretti dagli studenti e dagli insegnanti, per eventuali modifiche, calibrazioni del percorso didattico, come pure contesiti di validazione, del percorso stesso e dei materiali didattici che lo traducono operativamente (tutoriali per gli studenti e per gli insegnanti).

In merito al primo elemento, l'analisi dei contenuti si può sintetizzare in quanto segue. L'interpretazione della superconduttività e in particolare dei processi alla base dell'instaurarsi della transizione di fase superconduttiva richiede un quadro di riferimento completamente quantistico. Essa si basa sulla creazione delle cosiddette coppie di Cooper, processo interpretato coerentemente dalla teoria BCS per i superconduttori del I tipo come condensazione di Bose-Einstein (Bardeen, Cooper, Schrieffer, 1957), ma non ancora completamente compreso

per quelli del II tipo. Mentre un superconduttore del I tipo è un sistema omogeneo al cui interno il campo magnetico è nullo (effetto Meissner) e la resistività è nulla, in un superconduttore del II tipo è previsto uno stato misto che prevede delle zone in cui viene confinato il campo magnetico esterno, i cosiddetti vortici che si comportano come conduttori ordinari e per motivi topologici si dispongono ai vertici di esagoni regolari, circondati da zone in cui il campo magnetico è nullo e la resistenza è nulla, come nel caso dei superconduttori del I tipo (Ginzburg-Landau, 1950; Abrikosov, 2004). Da un punto di vista fenomenologico gli stati superconduttivi si possono inquadrare come esito di un processo di induzione elettromagnetica su un conduttore ideale, ossia «un conduttore ideale [$R=0$] è un superconduttore» (Badia-Majòs, 2006; de Gennes, 1999; Essén, Fiolhais, 2012; Farrell, 1981).

Questo ci ha consentito di focalizzare la trattazione didattica sui caratteri peculiari di un superconduttore: l'essere un conduttore perfetto; il correlare, tramite l'induzione elettromagnetica, tale proprietà con il suo carattere di diamagnete perfetto, cioè di essere un sistema che ha campo magnetico interno nullo, ossia di annullare il campo magnetico al suo interno (effetto Meissner), indipendentemente dalla presenza di un campo magnetico esterno (purché non superiore a un valore massimo). Ciò ha consentito di interpretare i principali effetti di un superconduttore come la levitazione per effetto Meissner, che caratterizza i superconduttori del I tipo e si manifesta in quelli del secondo tipo quando la superconduttività viene creata in assenza di campo magnetico esterno, e la levitazione/sospensione per effetto pinning, che consiste nell'ancoraggio di un magnete a un superconduttore del II tipo dovuto alla presenza sia di un forte effetto Meissner sia di penetrazione del campo magnetico nei vortici. L'analisi di stabilità dei due tipi di levitazione porta alla costruzione di un modello oggettivo dei treni MAGLEV a levitazione magnetica con cui si può comprendere il principio su cui si basa la costruzione di tali treni, nonché vantaggi e limiti nel loro utilizzo.

L'approccio fenomenologico seguito è stato messo a punto con una prospettiva verticale (Meheut, Psillos, 2004). Da un approccio fenomenologico alle proprietà magnetiche della materia e delle interazioni di tipo magnetico utilizzabile sin dalla scuola primaria, si passa per step successivi alla costruzione del campo magnetico come proprietà dello spazio descrivibile formalmente con linee di campo (o di orientazione) e al vettore di magnetizzazione come ente formale che descrive come lo stato di magnetizzazione di un sistema.

Il riconoscimento delle correnti elettriche come sorgenti di campo magnetico, suggerisce che anche il campo magnetico (o più precisamente una sua variazione) possa produrre una corrente, aprendo la strada all'esplorazione dei processi di induzione elettromagnetica. Il ruolo della resistenza in tali processi, come in fenomeni in cui sono rilevanti le correnti parassite porta alla esplorazione di che cosa accade quando il conduttore su cui si induce una corrente ha resistenza nulla (ossia è un superconduttore).

Questo approccio fenomenologico viene anche proposto come occasione per far avere esperienza agli studenti di come la fisica moderna costruisce e utilizza modelli per esplorare fenomenologie non ancora comprese sul piano concettuale, inquadrarle in teorie preesistenti fornendo gli strumenti per nuove esplorazioni sperimentali e teoriche.

Come detto la ricostruzione dei contenuti deve tenere in conto delle ricerche didattiche relative al tema in esame. Nel caso specifico i riferimenti sono stati dei tre tipi: sull'insegnamento della fisica moderna, sui processi di apprendimento negli ambiti di interesse, nel passaggio macro-micro.

In merito al primo ambito sono state analizzate le ricerche sull'insegnamento della fisica moderna nella scuola (Ostermann, Moreira 2000; Michelini, Santi, Stefanel, 2014c) e più in generale quelle curricolari che indicano la necessità di rinnovare i curricula scolastici con significativi temi di fisica moderna (Hake, 2000). Da esse emerge una comune e forte indicazione dell'importanza di includere tematiche di fisica del '900 nei curricula delle scuole secondarie superiori, per avvicinare i giovani alla fisica attuale, alle sue conquiste e ricadute. Emerge inoltre come gli studenti siano fortemente interessati e coinvolti quando affrontano tematiche di fisica moderna. Il tema specifico della superconduttività è stato scelto, come detto, perché offre interessanti spunti teorico-concettuali e risvolti applicativi, di grande rilevanza non solo in ambito tecnologico/ingegneristico, ma anche medico (aspetto particolarmente sentito dalle ragazze).

Le ricerche sui processi di apprendimento nell'ambito dell'elettromagnetismo e in particolare sull'induzione elettromagnetica (Maloney et al 2001), hanno messo in luce che gli studenti tendono a legare il fenomeno dell'induzione elettromagnetica al solo movimento relativo, piuttosto che alla rapidità con cui cambia il flusso del campo magnetico nel tempo. A tale scopo, sembra emergere un importante uso dei superconduttori, proprio per aggredire tale nodo (González-Jorge H., Domarco). Le ricerche sui ragionamenti degli studenti quando affrontano semplici circuiti elettrici hanno messo in evidenza come gli studenti tendano ad interpretare la conduzione elettrica con modelli meccanici per (McDermott, Shaffer, 1992; Sherwood, Chabai, 2002) o come "salti" di elettroni di orbitali periferici da un atomo all'altro (Wittmann, Steinberg, Redish 2002), *tendono a interpretare* il concetto di resistenza elettrica come opposizione al movimento (Fera, Michelini, Vercellati, 2014) *e trasferiscono tali modelli anche in ambito quantomeccanico* (Zollman, 1999). *Queste difficoltà degli studenti nel costruire modelli coerenti della conduzione, sono tipiche quando essi affrontano il delicato passaggio dalla fenomenologia del macromondo, alla analisi per modelli del micromondo* (Eylon, Ganiel, 1990). *Nella nostra proposta sulla superconduttività abbiamo puntato a sviluppare un approccio che resti al livello di un'analisi macroscopica della superconduttività* (Michelini et al., 2014a), *lasciando a successivi sviluppi la costruzione di coerenti modelli microscopici.*



3. Le domande di ricerca

Il percorso didattico progettato è stato testato e sperimentato in diversi contesti, come presentato nel prossimo paragrafo. Le sperimentazioni di ricerca condotte hanno avuto come principali domande di ricerca

- RQ1. L'apprendimento della superconduttività, è un obiettivo perseguibile nella scuola superiore?
- RQ2 Quali modelli hanno gli studenti di un sistema che ha resistenza elettrica nulla?
- RQ3. Quali modelli essi attivano nell'esplorarne la fenomenologia e quali referenti concettuali utilizzano?
- RQ4. Quali nodi rimangono aperti con un approccio unicamente fenomenologico?

4. I contesti di sperimentazione

Come si è detto, secondo il MER è importante acquisire informazioni sui modi con cui gli studenti ragionano quando affrontano un certo contesto fenomenologico. A questo scopo nella nostra prospettiva di ricerca abbiamo messo a punto laboratori concettuali di esplorazione operativa (CLOE) (Stefanel et al., 2002; Michelini, 2006). Questi sono contesti di apprendimento informale, proposti ad oltre 1500 studenti di diverse scuole e contesti, in cui sono state acquisite informazioni dirette sulle reazioni spontanee degli studenti quando affrontano la fenomenologia della superconduttività, le principali analogie a cui essi fanno riferimento per descrivere effetti e fenomeni a cui essa dà luogo (come ad esempio la levitazione per effetto Meissner o per pinning), i nodi su cui si incentrano le loro principali difficoltà. La principale fonte di dati nei CLOE sulla superconduttività sono state le annotazioni libere prese dal ricercatore che conduce l'esplorazione fenomenologica con gli studenti sia in merito alle reazioni degli studenti, sia riguardo le modifiche suggerite al percorso didattico dall'interazione con gli studenti. Questo ha permesso di arricchire e completare il percorso con proposte sperimentali esplorative suggerite dagli stessi studenti, come ad esempio: l'interazione tra due superconduttori in assenza di campo magnetico, per riconoscere che esso non diventano dei magneti permanenti, o la costruzione di un sandwich formato da un anellino ferromagnetico, un superconduttore, un piccolo magnete, per riconoscere che il campo magnetico non penetra all'interno di un superconduttore (o quantomeno deve avere un valore molto più piccolo di quello prodotto da un magnete). Il percorso didattico nella sua interezza è stato validato in sperimentazioni di ricerca con oltre 300 studenti di scuole secondarie superiori (Michelini, Viola 2010; Michelini et al. 2013; 2014b; Stefanel et al. 2014), come riepilogato in tabella 1.



	Sperim	Classi	Studenti	LS	LT	LC	IP	AS	UD	FGV	NIT	CSIT
Curricolare	15	24	507	242	107	5	57		79	180	108	140
Curricolare - Lab IDIFO	16	44	329	293	85	5	64	20	34	63	173	59
Curricolare - PhD	3	6	60	60								60
Educ. Lab. Masterclass	5	34	196	168	22	41	10		183	13		
Scuola Estiva	7	201	272	92	77	12	0	5	226		46	
Totale	46	309	1364	855	291	63	131	25	522	256	327	259

Tabella 1. Sintesi delle sperimentazioni di ricerca condotte dal 2008 al 2014 in ambito curricolare
a cura di docenti in formazione nei master IDIFO, nell'ambito del progetto di ricerca di dottorandi, in contesti di laboratorio didattico e Masterclass organizzati presso l'università, nell'ambito di scuole estive. Legenda colonne 4-8: LS - liceo scientifico; LT - liceo tecnologico; LC - liceo classico; IP - Istituto professionale; AS - altre scuole; legenda colonne 9-12, sperimentazioni condotte in: UD - Udine; FVG - altri contesti del Friuli Venezia Giulia; NIT: altri ambiti del Nord Italia; CSIT: centro sud Italia.

Qui si documentano gli esiti di sperimentazioni pilota condotte con 122 studenti di Liceo Scientifico di scuole di Udine, che avevano già affrontato con i propri insegnanti l'induzione elettromagnetica e le proprietà magnetiche dei materiali.


Nella fase di avvio delle sperimentazioni con gli studenti erano stati ricostruiti operativamente i concetti di campo magnetico, della sua rappresentazione a linee di campo e della rappresentazione col vettore di magnetizzazione lo stato di magnetizzazione di un oggetto che manifesta proprietà magnetiche proprie, come un magnete, o indotte dalla presenza di un magnete, come un oggetto ferromagnetico a bassa magnetizzazione residua o tutti gli oggetti para e diamagnetici.

Gli strumenti di monitoraggio utilizzato sono stati: tutorial aperti (fig. 1) costruiti con domande stimolo secondo una metodologia di tipo Inquiry Based Learning (McDermott et al., 2000); pre/post questionari, sulle fenomenologie e i nodi concettuali esplorati nel percorso didattico; note scritte dal ricercatore che monitorava la conduzione dell'attività con gli studenti.

2.10. Secondo te, l'YBCO ha cambiato le sue proprietà?
NON E' PIU' UN PARAMAGNETE, MA SI COMPORTA COME UN
DIAMAGNETE (?)

2.11. Come?
LE LINEE DI B NON ATRAVERSANO PIU' LA SUPERFICIE E' POSSIBILE
VISUALIZZARLO TRAMITE L'ESPERIMENTO CON MAGNETE E FERROMAGNETO

2.12. Disegna nuovamente qui sotto i due oggetti e il campo magnetico risultante, dopo la transizione. Questo è chiamato Effetto Meissner



2.13. Cosa puoi concludere?
LE LINEE DEL CAMPO MAGNETICO B NON ATRAVERSANO LA SUPERFICIE
DI YBCO

L'YBCO è un materiale che, al di sotto di una certa temperatura, detta temperatura critica, acquista delle particolari proprietà elettriche e magnetiche (diamagnetismo perfetto), per le quali viene detto superconduttore.

2.14. Confronta ciò che hai osservato in questo esperimento e negli altri riguardanti materiali diamagnetici (grafite pirolytica): è lo stesso tipo di comportamento? Cosa c'è di uguale e cosa di diverso?
LA GRAFITE PIROLYTICA E' UN DIAMAGNETE IN DIPENDENTE DALLA
T, MA OPpone RESISTENZA



Figura 1. Estratto da un tutorial utilizzato in una sperimentazione di ricerca

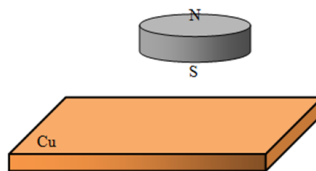
I tutorial hanno permesso di esplorare i percorsi concettuali degli studenti durante l'attività in classe. Qui si considera quanto è emerso dalle analisi degli studenti sull'interazione tra un magnete e un disco di YBCO a temperatura ambiente ($T=T_0$) e alla temperatura dell'azoto liquido ($T=T_{LN}$) e nell'analisi delle proprietà magnetiche di un YBCO alle due diverse temperature per rendere conto della levitazione di un magnete posto sopra un disco di YBCO a $T=T_{LN}$.

Lo stesso questionario proposto come pre/post test ha permesso di documentare quali concezioni hanno gli studenti su un sistema a resistenza nulla, e come queste concezioni sono cambiate in seguito alla sperimentazione condotta. In figura 2 è illustrata una tipica situazione proposta in cui un magnete cade sopra a una lastra di rame, poi sostituita da una lamina la cui resistenza è nulla. Agli studenti viene chiesto di prevedere il comportamento nei due casi dandone una spiegazione.

Come quesito di confronto è stata proposta la situazione di un magnete che cade a velocità costante in un tubo di rame. Agli studenti viene richiesto di interpretare il fenomeno e quindi di analizzare che cosa accadrebbe se il tubo di rame fosse sostituito con un tubo la cui resistenza elettrica è nulla.

Q9. Un magnete a disco, come quello illustrato in figura, viene fatto cadere sopra a una spessa lastra di rame.

9.1 Il moto di caduta del magnete sarà influenzato dalla presenza della lastra di rame? Spiegare.



9.2. Rappresentare in figura i momenti di dipolo magnetico eventualmente presenti nei due sistemi.

9.3. È possibile che per qualche opportuna geometria della lastra di rame e del magnete, ovvero per un opportuno magnete si possa realizzare la situazione in cui il magnete si fermi e resti sospeso sopra alla lastra? Spiegare la risposta.

9.4. Cambierebbe qualche cosa se invece della lastra di rame si ponesse una lastra di resistenza nulla?

Figura 2 – Questo proposto nel pre/post test, in cui agli studenti viene richiesto di prevedere il comportamento di un magnete che cade sopra a una lastra di rame, poi sostituita con un conduttore a resistenza nulla, e spiegare il processo alla base della previsione

34

Le risposte degli studenti sono stati analizzate in base ai criteri della ricerca qualitativa (Erickson, 1998), per individuare le risposte che sottendono modelli qualitativamente differenti sul piano concettuale (Niedderer, 1989; Nersessian, 2007; Windschitl, Thompson, 2004). In particolare sono state distinte: le risposte interpretative per individuare quali elementi dei modelli scientifici esse includono; le risposte di tipo fenomenologico descrittivo, per individuare quali aspetti/concetti vengono inclusi; le risposte naive, che evidenziano tipiche risposte degli studenti note in letteratura o non documentate in precedenza.

In merito ai quesiti del questionario qui considerati si è visto come cambia l'analisi degli studenti dal caso con $R \neq 0$ a quello con $R=0$.

Un'analisi statistica (test χ^2 -Yates) della distribuzione delle risposte prima e dopo la sperimentazione fornisce un quadro dei principali cambiamenti nelle concezioni degli studenti.

5. Gli esiti delle sperimentazioni di ricerca

Dall'analisi dei tutorial utilizzati dai ragazzi durante le sperimentazioni, si possono individuare i diversi modelli con cui gli studenti rappresentano e concettualizzano i superconduttori e nello specifico la levitazione per effetto Meissner. Se ne fornisce qui solo un esempio, rimandando a precedenti lavori una discussione più completa, per quanto riferita a campioni più piccoli (Viola, 2010; Michelini, Santi, Stefanel, 2014; Michelini, Stefanel, Vanacore, 2014).

Alla richiesta di disegnare il campo magnetico risultante, prodotto da un magnete posto sopra a un disco di YBCO a temperatura ambiente, tutti gli studenti hanno raffigurato con modalità di fatto analoghe, il campo prodotto dal magnete che penetra all'interno del disco di YBCO. Le illustrazioni degli studenti si dividono in tre grandi categorie, esemplificate nella parte inferiore di figura 3. La prima categoria (cat. A), che include le rappresentazioni della maggior parte degli studenti (61%), è ben illustrata la deformazione subita dalle linee del campo magnetico a causa dell'annullamento del campo all'interno dell'YBCO, specificata

anche nella spiegazione della raffigurazione fatta (54%). La categoria B) include le rappresentazioni in cui quest'ultimo aspetto è pure presente, come esito però del campo magnetico prodotto dall'YBCO stesso. Tale categoria include il 15% del campione. Infine, nella categoria C), che include il 24% del campione, vi è di nuovo la rappresentazione del campo magnetico sia del magnete sia dell'YBCO), ma si evidenzia come gli studenti stiano utilizzando in modo spontaneo un modello in cui il superconduttore si comporta come un magnete immagine del magnete induttore, modello utilizzato in letteratura per analizzare la stabilità della levitazione (Arkadiev 1947). Solo nelle raffigurazioni del gruppo C9 compaiono rappresentazioni in cui il campo penetra nell'YBCO a $T=T_{LN}$ (7%).

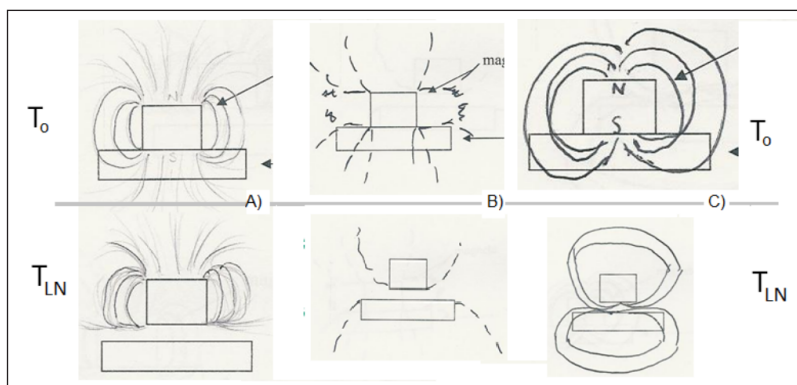


Figura 3. Rappresentazioni degli studenti del campo magnetico risultante di un magnete (il rettangolo più piccolo in alto) in presenza di un disco di YBCO (il rettangolo più largo e basso posto in basso nelle diverse rappresentazioni) a temperatura ambiente (T_0) e alla temperatura dell'azoto liquido (T_{LN}), in cui è evidente l'annullamento del campo magnetico all'interno del superconduttore.

Queste raffigurazioni documentano l'acquisizione da parte della maggior parte degli studenti della peculiare caratteristica di schermare il campo magnetico esterno. Al tempo stesso mettono in luce come la tendenza di molti studenti (Cat. B e C) sia quella di ricondurre la fenomenologia della levitazione a quella più familiare della repulsione tra due magneti con i poli omologhi affacciati. Come noto, tale repulsione non avviene quando i magneti sono liberi, ma si ha solo se i magneti sono vincolati a muoversi unicamente lungo il loro asse, ponendoli ad esempio in un tubicino di plastica e su due vagoncini posti su rotaia.

Il cambiamento concettuale degli studenti in seguito alla sperimentazione, come si è detto è stato documentato con uno stesso questionario proposto prima e dopo la sperimentazione. Nella figura 4 sono riportate le distribuzioni delle categorie di risposte date dagli studenti al primo quesito (come cade il magnete sulla lastra di rame?). Nel pre-test (80%) prevale la risposta di tipo D ("sì, ma solo molto poco, poiché il Cu è diamagnetico") che riconduce l'interazione magnete-lastra all'interazione tra un magnete e un oggetto diamagnetico (quale effettivamente la lastra di rame è). In tale modello prevale una visione statica o quasistatica dell'interazione in cui nessun ruolo ha la dinamica del fenomeno. Nel pre-test compare anche l'idea che il magnete possa essere attratto dalla lastra per il fatto che quest'ultima è un buon conduttore (C - "Il rame è un buon conduttore e attrae il magnete"), che ovviamente attiverebbe la possibilità di creazione di energia. Una piccola frazione infine (6%) elude il quesito.

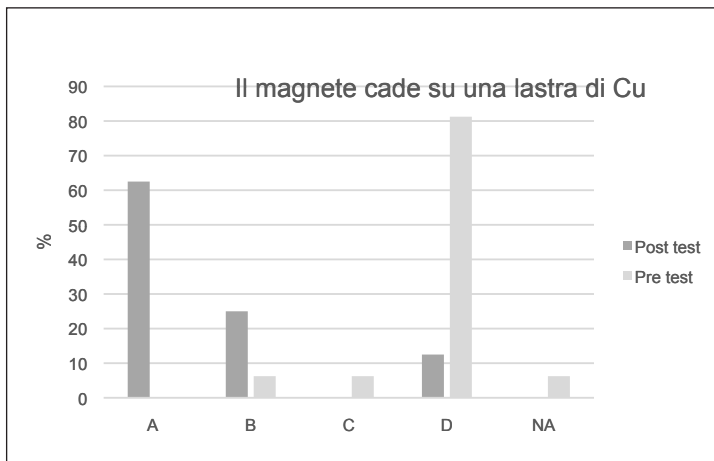


Figura 4. Distribuzione delle risposte al quesito di fig. 2 (magnete che cade sopra a una lastra conduttrice) nel pre-test e nel post test



Nel post test predominano risposte di tipo A (63% «Rallentata a causa delle correnti indotte»; «Correnti indotte che respingono il magnete»), in cui è esplicito il modello interpretativo del processo basato sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Anche le risposte di tipo B, già presenti seppure marginalmente nel pre-test, hanno un certo nel test finale (25% - B - “moto attutito” [cade come su un cuscino]), evidenziando come una fascia non trascurabile di studenti resta ad un livello di descrizione fenomenologica di ciò che osservano. Nel post-test infine si rileva la presenza di un residuo 13% di risposte della categoria D) che come si è detto caratterizza gli studenti in ingresso. Per tale frazione di studenti la sperimentazione non pare abbia inciso in modo significativo, almeno sull'aspetto qui considerato. La distribuzione delle risposte in ingresso e quella in uscita sono significativamente diverse ($\chi^2=21,87>16,75$, $P<0.005$; $\chi^2(\text{Yates})=44,6>16,5$, $P<0.005$).

Nella figura 5 sono riportate le distribuzioni di categorie di risposte alla richiesta se cambierebbe qualche cosa facendo cadere il magnete su una lastra di resistenza nulla. Anche in questo caso le distribuzioni sono significativamente diverse ($\chi^2=24,5>14,86$, $P<0.005$; $\chi^2(\text{Yates})=56,5>14,86$, $P<0.005$). Nel pre-test, ha predominato l'atteggiamento (63%) di eludere il quesito evidentemente non usuale, piuttosto che arrischiare una risposta. Compaiono comunque tipiche risposte in cui gli studenti dimostrano l'idea che un oggetto con resistenza elettrica nulla aumenti l'effetto repulsivo previsto per un conduttore ordinario (“Il fenomeno della repulsione sarebbe più forte”). Oppure vi è chi suppone che un conduttore con resistenza nulla non influenzi per nulla la caduta del magnete (31% cat C: “Sì, perché non respingerebbe il magnete così non diminuirebbe la sua velocità”). Tale categoria è presente anche nel test finale, in cui prevale invece nettamente la risposta A (81% - “Rimarrebbe sospeso/leviterebbe”, nel 25% dei casi aggiungendo che l'YBCO è un “diamagnete perfetto”). Le risposte mostrano che la sperimentazione ha attivato un positivo percorso di apprendimento, per quanto le risposte evidenzino che gli studenti, restino sul piano descrittivo, seppure richiesti di superare tale dimensione per passare al piano interpretativo.

In merito al quesito del magnete che cade in un tubo di rame, gli studenti hanno evidenziato un'idea iniziale legata alla presenza della resistenza elettrica nel tubo a volte collegata al suo ruolo nell'effetto Joule, a volte, come da letteratura, in cui “il conduttore, avendo una resistenza, agisce sul magnete rallen-

tandone la caduta”. Nel post-test predominano risposte che legano il moto a regime del magnete, all’instaurarsi di correnti elettriche indotte costanti. Nel grafico di figura 6 sono riportate le distribuzioni delle categorie di risposte date al quesito in cui il magnete cade in un tubo a resistenza nulla.

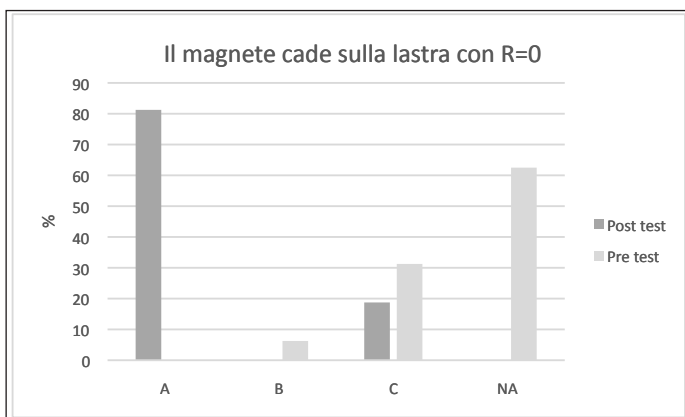


Figura 5. Distribuzione delle risposte al quesito in cui il magnete che cade sopra a una lastra di resistenza nulla



Anche in questo caso prevale nel pre-test l’atteggiamento elusivo (50%) accompagnato da risposte di tipo D (Caduta libera “non c’è nulla che si oppone alla caduta”) o da un marginale 6% che sostiene che “Non ci sono correnti indotte” (cat. C.). Nel post-test i ragionamenti più frequenti sono correlati all’assenza di effetto Joule (38% A: “rimane sospeso/intrappolato (no dissipazione)” ; 31% B: “No effetto Joule”).

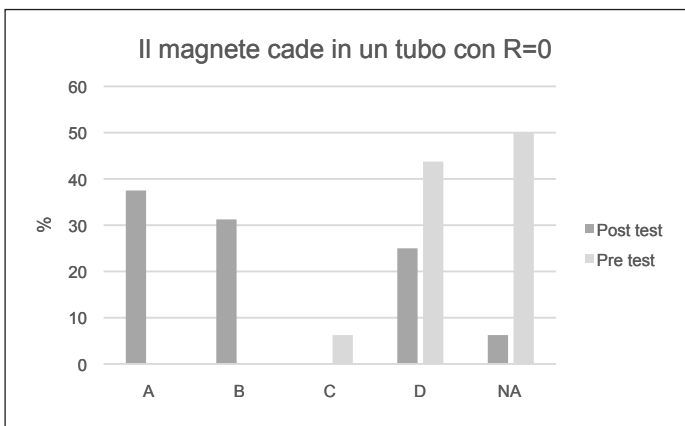


Figura 6. Distribuzione delle risposte al quesito in cui il magnete cade all’interno di un tubo a resistenza nulla

Anche in questo caso c’è un evidente guadagno concettuale degli studenti, per quanto sia meno marcato l’effetto della sperimentazione (le distribuzioni sono significativamente diverse $\chi^2=18,15>16,75$, $P<0.005$; $\chi^2(\text{Yates})=66>16,75$, $P<0.005$).

Conclusioni

Nel riferimento teorico del Model of Educational Reconstruction di Duit è stato progettato, messo a punto un percorso sulla superconduttività nella scuola secondaria, che propone un approccio fenomenologico operativo. Esso è stato sperimentato sia in contesti informali, sia in classe in contesti formali con diverse centinaia di studenti in contesti molto diversi. Dall'analisi egli strumenti di monitoraggio (tutoriale e pre/post test oltre che annotazioni libere di ricercatori/osservatori) sono emerse positive piste di ragionamento degli studenti, in merito alle caratteristiche dei superconduttori di diamagneti perfetti, ovvero di conduttori perfetti e il ruolo che gioca l'induzione elettromagnetica nel rendere conto dello stato superconduttivo.

Una visione locale della fenomenologia attiva solo parziali connessioni tra le proprietà tipiche dei superconduttori che non consente di superare i modelli iniziali in cui si estendono ai superconduttori proprietà analoghe a quelle di materiali ordinari. Il guadagnare una visione globale, che fa riconoscere le peculiarità dei superconduttori, richiede un utilizzo consapevole di referenti concettuali, come sono state le linee del campo magnetico per molti studenti, in grado di dare una descrizione unificata dell'intera fenomenologia, piuttosto che il vettore di magnetizzazione usato da pochi (RQ3).

Nello specifico delle domande di ricerca che ci si era posti, le sperimentazioni condotte mostrano che un approccio alla superconduttività nella scuola secondaria è non solo fattibile (RQ1), ma anche attiva importanti passi concettuali nella comprensione del ruolo dell'induzione elettromagnetica nell'insorgere di correnti parassite e del ruolo che esse hanno per esempio quando un magnete cade sopra o all'internodi un conduttore. Come tale comportamento venga profondamente modificato quando il magnete cade su o all'interno di un materiale superconduttore è l'aspetto su cui si sono incentrati i principali cambiamenti nelle concezioni degli studenti. Dal confronto di ciò che accade nella stessa situazione con un conduttore di rame e un conduttore con $r=0$, la maggioranza degli studenti è passata dall'idea che un conduttore con $r=0$ non può influenzare la caduta del magnete (RQ2), a modelli basati su una forte interazione repulsiva, dovuta alle correnti indotte permanenti, le proprietà diamagnetiche del SC, l'assenza dell'effetto Joule (RQ3).

Nella rappresentazione del campo all'esterno e all'interno dei sistemi, le rappresentazioni del campo intorno e all'interno di un SC sono in accordo con le caratteristiche $B_{\text{interno}}=0$ (oltre il 90%) (RQ3), essendo superata l'idea che un SC non influenza il campo esterno (modello emerso già nella esplorazione iniziale di oggetti para/diamagnetici come oggetti trasparenti a B) (RQ2).

I principali nodi che sono restati aperti per una parte significativa di studenti (tra il 40 e 60%) sono il passare dal modello fenomenologico-descrittivo a quello interpretativo e il connettere con sistematicità le proprietà elettriche e magnetiche dei superconduttori.



Riferimenti bibliografici

- Anderson T., Shattuck J. (2012). Design Based Research. *American Educ. Res.*, 41 (1), pp. 16-25.
- Abrikosov A. A. (2004). Nobel Lecture: Type-II superconductors and the vortex lattice. *Rev. Mod. Phys.*, 76, 975.
- Arkadiev V. (1947). A floating magnet. *Nature*, 160, pp. 330.
- Badia-Majòs A. (2006). Understanding stable levitation of superconductors from intermediate electromagnetics. *Am. J. Phys.* 74, pp. 1136-1142.
- Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J. R. (1957). Theory of superconductivity. *Phys. Rev.* 108, pp. 1175-1204.
- Brown, R. (2000). Demonstrating the Meissner Effect. *The Physics teacher*, 38 (3) S. 168.
- de Gennes P. G. (1999). *Superconductivity of Metals and Alloys* (Perseus Books, Reading, MA), pp. 4-7.
- Duit R., Gropengießer H., Kattmann U. (2005). Toward science education research: The MER. In H. E. Fisher (Ed.), *Developing Standard in RSE* (pp. 1-9). London: Taylor and Francis.
- Duschl R. A., Schweingruber H. A., Shouse A. W. (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8*. Washington, DC: National Academies Press.
- Engstrom V., Michelin M., Peeters W., Karbowaski A., Karwasz G. (2008). *Supercomet - Superconductivity made easy, in Frontiers of Physics Education* (Rajka Jurdana-Sepic et al. eds.), Rijeka: Zlatni.
- Erickson F. (1998). Qualitative research methods for Sci. Educ. In B. J. Fraser, Tobin K. G. (Ed.), *Int. Handbook of Science Education* (pp. 1155-1174, part 2). Dordrecht: Kluwer.
- Essén H., Fiolhais N. (2012) *A.J.P.*, 80 (2), pp. 164-169.
- Eylon B. S., Ganiel U. (1990). Macro-micro relationship: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, 12, 1, pp. 79-94.
- Farrell W. E. (1981). Classical derivation of the London equations. *Phys. Rev. Lett.* 47, pp. 1863-1866.
- Fera G., Michellini M., Vercellati S. (2014). Reasoning and models of talented students on electrical transport in solids. In F. Tasar (ed.), *Proceedings of The WCPE 2012* (pp. 155-162). Pegem Akademiel.
- Fischer H.E., Klemm K., Leutner D., Sumfleth E., Tiemann R., Wirth J. (2005). Framework for Empirical Research on Science Teaching and Learning. *Journal of Science Teacher Education*, 16 (4), pp. 309-349.
- Galili I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *IJSE*, 17 (3), pp. 371-387.
- Gil, D. P., Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics. *IJSE*, 15, pp. 255-260.
- Ginzburg V. L. and Landau L. D., (1950). On the theory of superconductivity. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 20, pp. 1064-1082.
- González-Jorge H., Domarco G. (2004). Superconducting cylinders aid in an understanding of current induction. *Phys. Educ.* 39, pp. 234.
- Greczylo T., Bouquet F., Ireson G., Michellini M., Engstrom V. (2010). High-Tech Kit. *Il Nuovo Cimento C* (33) 3, pp. 221-229.
- Hake R.R. (2000). Is it Finally Time to Implement Curriculums? *AAPT Announcer* 30(4), p. 103.
- Kedzierska E., Esquembre F., Konicek L., Peeters W., Stefanel A., Farstad V. S. (2010). MOSEM 2 project: Integration of data acquisition, modelling, simulation and animation for learning electromagnetism and superconductivity. *Il Nuovo Cimento*, 33 C, (3) pp. 64-74.
- Lijnse P. L. (1995). Developmental research as a way to an empirically based "didactical structure of science. *Science Education*, 79, pp. 189-199.
- Meheut M., Psillos D. (2004). Teaching-learning sequences. *IJSE*, 26 (5), pp. 515-535.
- 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. *Am. J. Phys.* 60, pp. 994-1003.
- McDermott L. C., Shaffer P. S., Costantiniou C. P. (2000). Preparing teachers to teach physics and physical science by inquiry. *Phys. Educ.* 35 (6), pp. 411-416.
- Maloney D. P., O’Kuma T. L., Hieggelke C. J., Heuvelen A. V. (2001). Surveyings students’ conceptual knowledge of electricity and magnetism. *Phys. Educ. Res., Am. J. Phys., Suppl.* 69 (7), pp. S12-S23.
- Michelini M. (2006). The Learning Challenge: A Bridge Between Everyday Experience And Scientific Knowledge. In Planinsic G, Mohoric A (eds), *Informal Learning And Public Understanding Of Physics* (pp. 18-39). Ljubijana (SLO): Girep book.
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2013). Concetti e modelli di studenti di scuola secondaria sulla superconduttività. *La Fisica nella scuola*, XLVI, 1 suppl., pp. 108-122.
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2014a). Basic concept of superconductivity: a path for high school. In Burra G. S., Michelini M., Santi L. (eds), *Frontiers of Fundamental Physics and Physics Education Research* (pp. 453-460). Springer: Cham.
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2014c). Teaching modern physics in secondary school, Proceedings FFP14, Marseille 2014, Marseille 2014, 15-18 July 2014, Aix Marseille University (AMU) Saint-Charles Campus, Marseille, France, E. Kajfasz, T. Masson and R. Triay (eds) http://pos.sissa.it/archive/conferences/224/231/FFP14_231.pdf
- Michelini M., Stefanel A., Vanacore A. (2014b). Exploration of students’ ideas about superconductivity. In L. Dvořák, V. Koudelkova eds., *Active learning* (pp. 541-551). Prague: Matfyzpress publisher.
- Michelini M., Viola R. (2010). Un percorso hand-on sulla superconduttività con gli studenti della scuola estiva di fisica moderna a Udine. *La Fisica nella Scuola*, XLIII, sup. 4, pp. 155-160.
- Nersessian N. J. (2007). Mental Modeling in Conceptual Change. In S. Vosniadou (ed.), *International Handbook of Conceptual Change* (pp. 391-416). London: Routledge.
- Neumann K., Viering T., Boone W. J., Fischer H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50 (2), pp. 162-188.
- Niedderer H. (1989). Qualitative and quantitative methods of investigating alternative frameworks of students. *Paper presented to the AAPT-AAAS meeting*.
- Ostermann F., Ferreira L.M., Cavalcanti C.J.H. (1998). Tópicos de física contemporânea no ensino médio: um texto para professores sobre supercondutividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 20, pp. 270-288.
- Ostermann F., Moreira M.A. (2000). Física Contemporânea em la escuela secundaria: una experiencia en el aula. *Revista de Enseñanza de las Ciencias*, 3 (2), 18, pp. 391-404.
- Ostermann F., Moreira M.A. (2004). Updating the physics curriculum in high schools. *Revista de Enseñanza de las Ciencias*, 3 (2), pp. 190-201.
- Perkins D.N., Grotzer T.A. (2000). Models and moves: Focusing on dimensions of causal complexity to achieve deeper scientific understanding. *AERA Conference*, New Orleans, LA.
- Sherwood B. A., Chabay R. W. (2002). *A unified treatment of electrostatics and circuits*. Center for Innovation in Learning & Dept. of Physics, at: <http://www4.ncsu.edu/~rwhchabay/mi/circuit.pdf>.
- Stefanel A., Moschetta C., Michelini M. (2002). Cognitive Labs in an informal context to develop formal thinking in children. In M. Michelini, M. Cobal (eds), *Developing Formal Thinking in Physics* (pp. 276-283). Udine: Forum.
- Stefanel A., Michelini M., Santi L. (2014). High school students analyzing the phenomenology of superconductivity and constructing model of the Meissner effect. In F. Tasar (ed.), *Proceedings of The WCPE 2012* (pp. 1253-1266). Pegem Akademi.
- Taşar M.F. (2009). *In The International History, Philosophy*, South Bend, IN.
- Viennot L. (1996). *Raisonnement en physique: la part du sens commun*. De Boeck Supérieur.
- Viola R. (2010). *Innovazione didattica nella Scuola Secondaria: una proposta curricolare sulla superconduttività*, unpublished PhD Thesis, University of Udine, pp. 171-173.
- Viola R., Michelini M., Santi L., Corni F. (2008). The secondary school experimentation of Supercomet in Italy. In Rajka Jurdana-Sepic et al. (eds), *Frontiers of Physics Education*

- (pp. 190-196). Rijeka: Zlatni.
- Vosniadou (2008). *International handbook of research on conceptual change*. New York: Routledge.
- Windschitl M.A., Thompson J.J. (2004). Using scientific models to frame inquiry. *Paper presented at AERA*, San Diego, CA.
- 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, pp. 218-226.
- Zollmann D. (Eds) (1999). *Research on Teaching and Learning Quantum Mechanics*, papers presented at the Annual meetings NARST, published at www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst/



