



Alla scoperta della superconduttività

Bertuzzo Enrico, Caldana Vittoria,
Foletto Alessandro, Pretotto Matteo



La superconduttività è sicuramente uno dei fenomeni più affascinanti della fisica, molti però non lo conoscono approfonditamente. Di che cosa si tratta? Com'è stata scoperta? La superconduttività può essere utilizzata in ambiti molto diversi tra loro. Quali sono le sue applicazioni pratiche?





Percorsi per le Competenze Trasversali e per l’Orientamento

I Percorsi per le Competenze Trasversali e per l’Orientamento (P.C.T.O.) hanno recentemente preso il posto dell’alternanza scuola-lavoro (A.S.L.), introdotta con la L.107/2015, nota come “Buona Scuola”. Le finalità sono però rimaste sostanzialmente inalterate; l’obiettivo dichiarato è indirizzare la didattica verso un metodo di apprendimento in sintonia con le esigenze del mondo esterno. Nel fare questo coinvolge anche gli adulti, siano essi insegnanti (tutor interni) o referenti della realtà ospitante (tutor esterni).

È importante sottolineare che i partner educativi esterni non sono obbligatoriamente imprese ed aziende; possono essere, infatti, anche associazioni sportive, enti culturali e istituzionali e ordini professionali. L’obiettivo è quello di sviluppare in modo condiviso alcune esperienze coerenti alle attitudini e alle passioni degli studenti.

I percorsi realizzati durante il P.C.T.O. sono co-progettati, attuati, verificati ed opportunamente valutati sulla base di opportune convenzioni con imprese, associazioni di rappresentanza, con enti pubblici e privati, inclusi quelli del terzo settore, che siano disposti ad accogliere gli studenti per periodi di apprendimento in situazione lavorativa, che non si configurano, però, in rapporto individuale di lavoro (D.Lgs. 15/4/2005, n. 77).

I licei

Da molti anni ormai, il mondo degli istituti tecnico-professionali si è affacciato all’esterno della scuola, investendo tempo ed energie in percorsi formativi che prevedessero collaborazioni con enti ed aziende del territorio. La novità, già presente con l’A.S.L., è l’estensione di questo tipo di formazione anche ai licei, per i quali però l’obiettivo da perseguire è anche quello di orientare gli studenti verso la prosecuzione dei loro studi. Le attività sono obbligatorie per tutti gli studenti e, nel caso dei licei, prevedono attualmente lo svolgimento di un minimo di 90 ore nell’arco del triennio.

Chi è lo Studente RicercAttore?

È innanzitutto uno *Studente* che si affaccia per la prima volta nel mondo della *Ricerca Scientifica* e vi recita un ruolo da *Attore protagonista*.

Fare scienza non significa chiaramente solo studiare modelli matematici preconfezionati da altri, ma “sporcarsi le mani” raccogliendo dati ed elaborandoli al fine di ottenere delle conclusioni che confermino o smentiscano un’ipotesi preliminare di ricerca.

Come spesso accade per un ricercatore scientifico, può succedere che lo studente durante il P.C.T.O. abbia la sensazione di brancolare nel buio, faticosi a comprendere il significato dei dati in suo possesso; ma non è mai solo, lavora in equipe e collabora con altri, discute, dibatte.

Qui si innesta anche l’azione del tutor che deve riuscire a fornire una stampella in caso di necessità, senza intervenire direttamente nelle dinamiche del gruppo orientandone la ricerca; deve fornire stimoli e strumenti affinché gli studenti sviluppino durante il progetto di P.C.T.O. le necessarie competenze d’indagine, risvegliando in loro la curiosità e sostenendone la fiducia di poter capire.

È necessario risvegliare anche la creatività in campo scientifico, cioè aggredire i problemi utilizzando – se necessario – approcci diversi, attivare connessioni nel pensiero, renderlo flessibile ed in grado di adattarsi alle esigenze del progetto di ricerca, formulare ipotesi e validarle alla luce dei dati raccolti.

È chiaro che, per poter ottenere un simile risultato, non ci si può basare su rigidi schematismi, ma si devono stimolare i ragazzi a formulare congetture; e questo non lo si può certo inventare in pochi minuti: è necessario che la didattica venga rimodellata perché i ragazzi si abituino a proporre idee e nuovi punti di vista.

L'evoluzione scientifica sempre più frenetica che permea di sé la società moderna ci spinge a promuovere una cultura scientifica basata sulla ricerca, l'informazione e la conoscenza.

La scuola deve agire per consolidare quanto più possibile le conoscenze scientifiche degli studenti, per consentire loro di orientarsi al meglio in un mondo che cambia così rapidamente.

Per poterci riuscire non si può rinunciare a ricorrere alla Statistica, una disciplina che acquisisce sempre maggiore rilievo vista la necessità di elaborare grandi moli di dati in vari ambiti della scienza, e di "farli parlare" aiutandoci a comprenderne il significato.

Uno degli obiettivi di questo progetto è, pertanto, quello di fornire ai ragazzi quelle basi di statistica necessarie ad orientarsi in ambito scientifico che, però, faticano a trovare spazio nella normale didattica in classe.

Un ricercatore, poi, presenta i risultati della sua ricerca sia scrivendo articoli che rispettino un preciso codice comunicativo sia tenendo conferenze e seminari.

L'attività di ricerca del nostro progetto culmina, quindi, con la stesura di un articolo divulgativo e la presentazione pubblica dei risultati nel corso di alcune conferenze tematiche.

Questo consente ai ragazzi di trovare una modalità comunicativa efficace sia in forma scritta che orale.

In cosa consiste, in sostanza, il nostro progetto di P.C.T.O.?

Come abbiamo visto, gli studenti sono stati impegnati in un *project work* nel quale hanno simulato l'attività di un gruppo di ricerca; hanno analizzato dati provenienti da fonti diverse: sensori presenti in Laboratorio di Fisica, da banche dati open italiane e straniere. Alcuni gruppi hanno potuto beneficiare anche del *know how* e dei materiali resi accessibili dal CERN di Ginevra.

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando gli strumenti della statistica descrittiva ed hanno consentito loro di scrivere delle relazioni come questa, secondo un protocollo di divulgazione scientifica concordato assieme al nostro partner principale (l'Associazione Nemesis). In questa fase gli studenti hanno anche esercitato un "controllo incrociato" sulle relazioni dei vari gruppi, svolgendo attività di "*blind peer reviewer*", tipica dei comitati di redazione delle riviste scientifiche. L'ultima fase del progetto ha previsto l'esposizione pubblica dei risultati conseguiti, mediante alcune serate di divulgazione aperte alla cittadinanza.

I nostri partner

Ringraziamo innanzitutto l'Associazione Nemesis, che ha tra i suoi obiettivi la diffusione della cultura scientifica nella società civile, con particolare riferimento al mondo della scuola, e che ospita nel suo sito una sezione che raccoglie i lavori preparati dagli studenti.

Un grazie particolare al CERN di Ginevra per aver reso accessibili dati e pubblicazioni, utilizzati dai ragazzi per il percorso di ricerca sulla fisica particellare.

Non meno importante è stato il supporto fornito dal laboratorio Big & Open Data Innovation (<http://bodai.unibs.it/>) dell'Università di Brescia. Nato grazie al supporto di Fondazione Cariplo con l'obiettivo di creare gruppi di lavoro che studiano e sviluppano – attraverso specifici progetti di ricerca – nuovi metodi, tecniche e strumenti per raccolta, gestione e analisi di dati multidisciplinari, merita la nostra gratitudine per averci fornito, tramite il progetto BDsports, il *know how* necessario per sviluppare il progetto.

Un ringraziamento doveroso va infine al Comune di Thiene, che ci ha messo a disposizione gli spazi idonei a tenere le serate in cui i ragazzi hanno potuto mettersi alla prova come divulgatori.

Indice dei contenuti

Introduzione	5
1. Che cos'è la superconduttività	6
1.1 Proprietà elementari	6
1.2 Effetto Meissner-Ochsenfeld	7
1.3 Classificazione Magnetica	8
2. Storia	9
2.1 La scoperta della superconduttività	9
2.2 Altre caratteristiche della superconduttività	9
2.3 La scoperta dei superconduttori ad alta temperatura	10
2.4 La nascita dei fili e dei nastri superconduttori	10
3. Applicazioni pratiche	12
3.1 Ambito medico	12
3.2 Ricerca scientifica	13
3.3 Elevata sensibilità	13
3.4 Sistema dei trasporti	13
4. Analisi dei dati	15
4.1 Google Colaboratory	15
4.2 Temperatura e resistenza	15
4.3 Plot del gradiente	16
4.4 Fit gaussiano	17
4.5 Confronto dei grafici	18

Introduzione

La superconduttività è uno dei fenomeni fisici più affascinanti e curiosi da studiare. Noi studenti del Liceo Corradini l'abbiamo scoperta attraverso un Webinar tenuto da Margherita Boselli e Luca Bottura, docenti e ricercatori del CERN di Ginevra. Durante l'incontro abbiamo potuto comprendere il fenomeno in quasi tutti i suoi aspetti, prima attraverso alcuni esperimenti realizzati allo S'Cool LAB del CERN ed osservati virtualmente, poi attraverso una spiegazione dettagliata, accompagnata da una presentazione PowerPoint.

Che cos'è la superconduttività? Quali sono state le tappe principali che hanno portato alla scoperta del fenomeno? Queste sono le domande principali che ci hanno guidato nella scrittura del nostro articolo, domande a cui proveremo a rispondere nelle prossime pagine.

Il fenomeno della superconduttività è largamente utilizzato nella ricerca scientifica ed ha numerose applicazioni tecnologiche; in queste note ne approfondiremo alcune.

1. Che cos'è la superconduttività?

La superconduttività è un fenomeno fisico che comporta resistenza elettrica nulla ed espulsione del campo magnetico (ne parleremo al paragrafo 1.2). Essa avviene in alcuni materiali al di sotto di una determinata temperatura, detta critica, e al di sotto di un valore critico del campo magnetico. I valori critici, sia della temperatura, sia del campo magnetico sono specifici del materiale. Gli elementi superconduttori sono prevalentemente metalli di transizione e vengono classificati in due tipi in base alle loro proprietà magnetiche.

1.1 Proprietà elementari

Ogni superconduttore ha proprietà specifiche: temperatura critica, calore specifico, campo magnetico critico e densità di corrente critica. Troviamo anche delle proprietà comuni a tutte queste diverse sostanze: la resistenza nulla al di sotto della temperatura critica e la transizione alla fase superconduttrice.

La *resistenza elettrica nulla* dei materiali superconduttori consiste nel continuo passaggio di corrente dopo aver iniettato delle cariche nel materiale, anche senza una differenza di potenziale. Questa proprietà è possibile grazie ad un comportamento superfluido delle Coppie di Cooper, ossia coppie di elettroni che si appaiano grazie ad uno scambio di fononi¹, che determinano poi un'attrazione reciproca tra le due particelle. Queste coppie di elettroni riescono a scorrere nel materiale superconduttore senza dissipare energia, comportandosi così come un superfluido².

La seconda proprietà fondamentale è la *transizione alla fase superconduttrice*. Questa avviene quando la temperatura del campione di materiale superconduttore è portata al di sotto della temperatura critica del materiale, solitamente indicata con T_c . Questo valore varia da materiale a materiale e per i superconduttori convenzionali è mediamente compreso tra i 23K per il Niobio Germanio e i 15mK del Tungsteno. Troviamo poi i superconduttori non-convenzionali, dove le temperature critiche possono essere molto più alte, come nel caso del cuprato di Ittrio e Bario ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), la cui temperatura critica è di circa 92K. Ancora oggi si cerca di scoprire come i superconduttori non convenzionali possano avere temperature critiche così alte dato che la spiegazione basata sull'accoppiamento degli elettroni tramite fononi non può essere applicata anche a questi materiali.

Dal punto di vista magnetico la transizione di un materiale alla fase superconduttrice è resa possibile dal fatto che, in assenza di campo magnetico, la fase superconduttrice ha una energia

¹ Fononi: i fononi sono la controparte quantistica di quello che in meccanica classica è noto come sviluppo in modi normali, ovvero la scomposizione delle vibrazioni in "vibrazioni elementari", dette modi normali.

² Superfluido: materiale nello stato di superfluidità, caratterizzato dall'assenza di viscosità, dall'assenza di entropia e dalla conducibilità termica infinita. Può scorrere infinitamente senza attrito.

libera³ minore di quella che caratterizza la fase normale⁴. All'aumentare del campo magnetico vi sarà però un valore del campo per cui le due energie libere si eguagliano; al di sopra di tale valore la fase normale diventa fase stabile, nella quale il materiale può essere considerato superconduttore. Una temperatura più alta ed un campo magnetico più intenso producono una riduzione del numero delle coppie di Cooper, quindi un aumento della lunghezza di penetrazione di London⁵, che diventa infinita alla transizione di fase.

1.2 Effetto Meissner-Ochsenfeld

L'effetto Meissner-Ochsenfeld è una proprietà dei superconduttori scoperta da Walther Meissner e Robert Ochsenfeld nel 1933. Come hanno fatto? Nel loro esperimento hanno raffreddato alcuni campioni di stagno e piombo in presenza di un campo magnetico esterno fino a raggiungere la temperatura di transizione allo stato superconduttivo. Dopo la transizione hanno notato che il valore del campo esterno aumentava. Poiché il flusso magnetico è conservato da un superconduttore, ne dedussero che questo aumento doveva essere dovuto alla riduzione di quello interno al campione. Dunque, quando un superconduttore viene immerso in un campo magnetico di intensità inferiore ad un certo valore critico, esso manifesta un diamagnetismo⁶ perfetto. Il diamagnetismo dovuto a quest'effetto è alla base della levitazione magnetica dei superconduttori.



Fig. 1 - Levitazione magnetica di un materiale superconduttore

³ Energia libera: massima quantità di lavoro, non dovuto all'espansione meccanica, che può essere estratta da un sistema chiuso (un sistema che scambia calore e lavoro con l'esterno, ma non materia). Il suo valore determina la spontaneità delle reazioni chimiche.

⁴ Fase normale: fase non superconduttrice di un materiale.

⁵ Lunghezza di Penetrazione di London: la distanza per cui il campo magnetico penetra nel superconduttore.

⁶ Diamagnetismo: condizione per cui il materiale presenta una magnetizzazione con verso opposto a quella del campo magnetico, espellendo quest'ultimo dal suo interno.

1.3 Classificazione magnetica

I superconduttori si possono classificare in base alle loro proprietà magnetiche in due tipi.

Quelli del primo tipo, solitamente metalli e alcune leghe metalliche, presentano una temperatura critica molto bassa ed un'espulsione completa del campo magnetico dovuta a correnti superficiali indotte. Queste correnti hanno intensità tale da generare fenomeni magnetici uguali e opposti al campo esterno, ottenendo così un campo magnetico interno al superconduttore teoricamente nullo. La superconduzione di tipo uno si ritiene possibile grazie ai comportamenti superfluidi delle coppie di Cooper, che fanno scorrere gli elettroni nel materiale senza alcuna perdita di energia.

I superconduttori del secondo tipo presentano temperature critiche molto più alte e sono caratterizzati dalla presenza di due valori critici per il campo magnetico. Oltre ad un primo valore del campo di intensità B_{1c} , per il quale il materiale diventa superconduttore, il materiale è penetrato da linee di flusso del campo magnetico distribuite ordinatamente al suo interno in un reticolo esagonale. Per questi materiali, all'aumentare dell'intensità del campo magnetico, il numero di linee di flusso aumenta, fino a portare alla distruzione della superconduttività ad un'intensità B_{2c} , normalmente molto più alta rispetto ai valori di campo critico dei superconduttori di primo tipo. La superconduzione di tipo 2 è analoga a quella di tipo 1, e si realizza in conduttori detti "ad alta temperatura". Quando la temperatura si eleva a valori prossimi a quella di transizione alla conduzione classica, tali superconduttori, pur conservando una condizione di superconduzione, presentano una resistenza al flusso magnetico estremamente piccola ma rilevabile, che aumenta mano a mano che ci si avvicina alla temperatura di transizione stessa. Si ritiene che questa minima resistenza sia dovuta all'induzione di una condizione di "vorticosità" del superfluido che produrrebbe un effetto simile ad un debole "attrito". Questa vorticosità sarebbe causata da una minima e parziale penetrazione del campo magnetico all'interno del superconduttore.

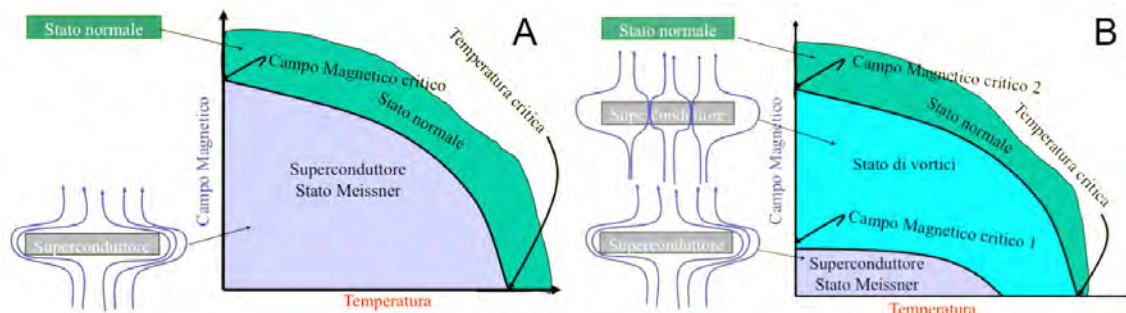
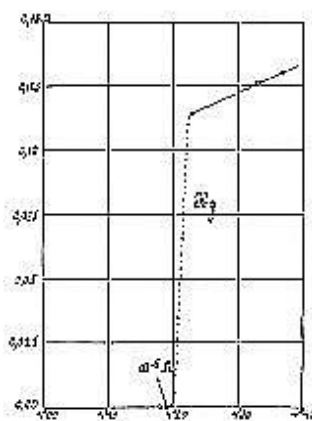


Fig. 2 - Transizione del mercurio allo stato superconduttore

2. Storia

2.1 La scoperta della superconduttività

La storia dei superconduttori inizia cento anni fa, precisamente l'8 aprile 1911, quando il fisico olandese Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926) osservò che la resistenza elettrica di un campione di mercurio si annullava improvvisamente alla temperatura di 4,2 K (-269 °C). Onnes era stato il primo a produrre, nel suo laboratorio di *Leiden*, l'elio liquido grazie al quale è riuscito a studiare il comportamento elettrico dei materiali a bassissime temperature. L'elio liquido è infatti l'unico elemento che rimane liquido fino a temperature prossime allo zero assoluto (-273,15°C). Onnes intendeva verificare sperimentalmente che, avvicinandosi allo zero assoluto, la resistenza elettrica dei metalli diminuisce fino a stabilizzarsi a un valore residuo che dipende dal grado di purezza del materiale. Esperimenti effettuati con il platino avevano confermato tale ipotesi e Onnes decise di usare un campione di mercurio facile da purificare mediante distillazione allo stato liquido (solidifica a -39 °C). Questa scelta si rivelò decisiva e, in occasione della cerimonia di assegnazione del premio Nobel nel 1913, egli affermò: «Il mercurio, alla temperatura di 4,2 K, entra in un nuovo stato che, a causa delle straordinarie caratteristiche elettriche, può essere chiamato stato superconduttivo».



Graf. 3 - Transizione allo stato superconduttore del mercurio

2.2 Altre caratteristiche scoperte sulla superconduttività

L'assenza di resistenza elettrica non è però l'unica caratteristica di un superconduttore. Circa venti anni dopo la scoperta di Onnes, i fisici tedeschi Walther Meissner (1882-1974) e Robert Ochsenfeld (1901-1993), scoprirono che i superconduttori oltre a essere dei conduttori perfetti sono anche dei perfetti materiali diamagnetici, in grado di espellere il flusso magnetico dal loro interno quando vengono raffreddati al di sotto della temperatura critica.

Era la conferma che la superconduttività rappresentava un nuovo stato della materia. Si dovette attendere il 1957 per avere una teoria microscopica in grado di spiegare il fenomeno

della superconduttività. L'ipotesi geniale alla base della teoria BCS, dalle iniziali dei tre fisici americani John Bardeen (1908-1991), Leon N. Cooper (1930-...) e John R. Schrieffer (1931-...), prevede che, per valori di temperatura inferiori a quella critica, gli elettroni formino delle coppie, dette «coppie di Cooper», in grado di viaggiare nel materiale senza dissipare energia.

L'accoppiamento di due elettroni, vietato dalla repulsione coulombiana che è prevalente a temperatura ambiente, avviene tramite la loro interazione con gli atomi del reticolo. Al passaggio del primo elettrone si ha una deformazione del reticolo circostante e un conseguente eccesso di carica positiva che tende ad attrarre un altro elettrone nella stessa regione creando un moto correlato tra i due elettroni. L'inquadramento teorico del fenomeno ha dato un notevole impulso alla ricerca di nuovi materiali superconduttori che sorprendentemente si rivelarono più numerosi di quanto si potesse immaginare.

Dalla loro scoperta, infatti, la superconduttività è stata osservata in oltre cinquanta elementi della tabella periodica e in migliaia di leghe e composti metallici.

2.3 La scoperta dei superconduttori ad alta temperatura

Nel 1986 Karl A. Müller e Johannes G. Bednorz dei laboratori IBM di Zurigo scoprirono un composto ceramico a base di ossidi di rame, bario e lantanio in grado di esibire lo stato superconduttivo a una temperatura mai osservata prima, circa 35 K. Tale scoperta spalancava un nuovo orizzonte alla ricerca di nuovi superconduttori, quello degli ossidi ceramici. Pochi mesi dopo, Paul Chu dell'Università di Houston sostituendo il lantanio con l'ittrio nel composto di Bednorz e Müller, ottenne un nuovo materiale denominato YBCO, che spostava il confine della superconduttività alla temperatura di 92 K: erano nati i superconduttori ad alta temperatura, HTS (acronimo di *High Temperature Superconductors*). Da allora i superconduttori tradizionali sono chiamati LTS (acronimo di *Low Temperature Superconductors*). Negli anni successivi, il valore di temperatura critica venne innalzato fino all'attuale record di 135 K di un composto a base di mercurio e tallio. I superconduttori HTS hanno il grande vantaggio di utilizzare come refrigerante l'azoto liquido (77 K), una sostanza facile da produrre, abbondante in natura, economica e già utilizzata in diversi processi industriali.

2.4 La nascita dei fili e dei nastri superconduttori

Per progettare e realizzare apparecchiature o dispositivi superconduttori compatti e ad alta efficienza, è tuttavia necessario disporre di materiali superconduttori sotto forma di fili e cavi flessibili in grado di trasportare densità di correnti elettriche elevate e resistere alle notevoli sollecitazioni elettromagnetiche. I fili superconduttori sono generalmente dei compositi costituiti da sottili filamenti superconduttori incorporati in matrici metalliche al fine di aumentare la stabilità elettrica e termica (Fig. 4). Il primo filo superconduttore commerciale, prodotto all'inizio degli anni sessanta, ha permesso lo sviluppo dei primi elettromagneti superconduttori. I materiali superconduttori più utilizzati a livello industriale rimangono ancora quelli LTS, a bassa temperatura critica. In particolare la lega NbTi ($T_c=9,8$ K) e il composto

intermetallico Nb_3Sn ($T_c=18$ K). Sono in grado di trasportare densità di correnti elettriche elevate (maggiori di 10^4 A/mm²) ed hanno caratteristiche idonee per la realizzazione di elettromagneti per apparecchiature a risonanza magnetica (RM), acceleratori di particelle e impianti per la fusione nucleare. Negli ultimi anni una significativa attività di sviluppo internazionale ha consentito di mettere a punto processi idonei alla fabbricazione dei materiali ceramici ad alta temperatura sotto forma di fili e/o nastri composti con matrice metallica. I composti HTS più interessanti per le applicazioni sono ossidi a base di Bi-Sr-Ca-Cu (BSCCO), con matrice d'argento nelle varianti stechiometriche «2223» ($T_c=110$ K) e «2212» ($T_c=85$ K) e l' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO, $T_c=92$ K) depositato sotto forma di film sottile su nastri metallici. Accanto ad essi, sta dimostrando buone potenzialità il boruro di magnesio (MgB_2), la cui temperatura critica (40 K) risulta intermedia rispetto ai materiali LTS e HTS.



Fig. 4 - Fili di materiale superconduttore in matrici metalliche di forma diversa (CERN CRYOGENICS)

3. Applicazioni pratiche

Quali applicazioni hanno i superconduttori nella vita quotidiana?

3.1 Ambito medico

Un esempio di applicazione di questo tipo riguarda i sistemi clinici di risonanza magnetica nucleare, che necessitano di grandi toroidi di fili in materiale superconduttore. Il macchinario per la risonanza magnetica è un apparecchio cui si ricorre nell'ambito della diagnostica per immagini, il suo utilizzo è piuttosto recente e risale agli anni Ottanta del Novecento. La risonanza magnetica si basa sull'applicazione di un campo magnetico di elevata intensità e onde di radiofrequenza al distretto corporeo di interesse. Può essere utile in ambito oncologico, cardiologico, neurologico o neurochirurgico, ortopedico o traumatologico, e gastroenterologico. Sfruttando processi biochimici, mediante l'emissione di onde di radiofrequenza, il macchinario acquisisce immagini del corpo umano in tre dimensioni in alta risoluzione. La sua esecuzione può richiedere la somministrazione in vena di un mezzo di contrasto paramagnetico (spesso si tratta del gadolinio, un metallo delle terre rare): ha la funzione di rendere più nitide le immagini elaborate dall'apparecchio. Questa tecnica ha, però, delle contraddizioni perché può provocare gravi effetti collaterali (per esempio in caso di reazione allergica).

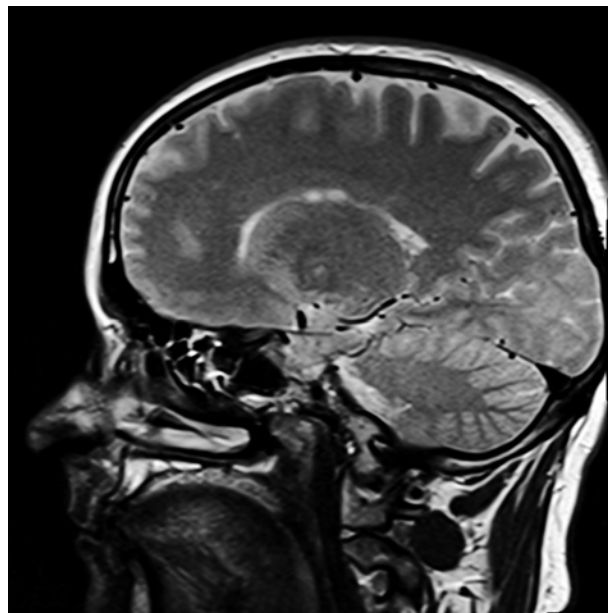


Fig. 5 - Risonanza magnetica cerebrale

3.2 Ricerca scientifica

I superconduttori vengono usati in condizioni sperimentali su grande scala in macchine come gli acceleratori di particelle del CERN di Ginevra. Sono stati utilizzati dapprima nei cavi conduttori del LEP (Large Electron-Positron Collider) e attualmente nell'LHC (Large Hadron Collider) per generare campi magnetici molto intensi.

L'adozione dei superconduttori nella realizzazione di questi acceleratori di particelle ha portato diversi vantaggi. Si è ridotta la dimensione delle parti di cui sono composti, si è abbassata la dispersione ohmica, e si sono ottenute altissime densità di corrente e di campo magnetico necessarie per gli esperimenti, adottando in tal caso sia superconduttori che supermagneti.

I potenziali sviluppi sono da ritenersi enormi in campi quali l'accumulazione e la trasmissione di corrente, i motori elettrici e la realizzazione di campi magnetici molto intensi.

3.3 Elevata sensibilità

La superconduzione è controllabile e ben gestibile solo con correnti continue, poiché le correnti variabili o alternate inducono nei campi magnetici ampie variazioni alle quali lo stato di superconduzione è particolarmente sensibile.

L'estrema sensibilità dei superconduttori viene sfruttata nella realizzazione di dispositivi capaci di misurare valori infinitesimi del campo magnetico.

Questa loro caratteristica viene impiegata anche nei rivelatori di particelle: sono infatti in grado di indicare piccolissimi cambiamenti di temperatura causati dall'interazione con la particella da rivelare.

Attraversando il rivelatore, la particella gli cede energia, causando un aumento di temperatura.

Tramite la misura della variazione di resistenza del rivelatore, che viene mantenuto in prossimità della temperatura critica, è possibile captare quando una particella attraversa il sensore e ricostruire la traiettoria.

3.4 Sistema dei trasporti

È possibile utilizzare i superconduttori anche nel sistema dei trasporti? Sì, i superconduttori trovano impiego anche in questo settore. Consentono di raggiungere velocità assai elevate, diminuire i tempi di percorrenza di diverse tratte, risparmiare energia e ridurre l'impatto ambientale.

Un campo che ne fa già largo uso è quello dei treni a levitazione magnetica (MagLev). Essi consentono di risolvere il problema dell'attrito fra ruote e rotaie, tipico dei treni convenzionali. Grazie ai magneti superconduttori, i MagLev risultano sospesi in aria sopra i binari e levitano in una guida a forma di U che sostanzialmente avvolge i veicoli, evitando deragliamenti. Installati

nelle pareti laterali della guida ci sono gli avvolgimenti metallici responsabili della propulsione, della levitazione e dell'orientamento del mezzo. Il moto è causato da forze magnetiche attrattive e repulsive simultanee che si vengono a creare tra le bobine di propulsione e i superconduttori magnetici installati a bordo del treno (Fig. 6). Facendo passare una corrente elettrica alternata attraverso le bobine installate su entrambi i lati della guida, si genera la forza magnetica necessaria per la propulsione. Su entrambi i lati della guida sono installate anche le bobine per la levitazione e l'orientamento. Quando un treno MagLev transita ad alta velocità, i superconduttori magnetici installati a bordo del mezzo inducono la formazione di corrente elettrica nelle bobine di levitazione e orientamento, facendoli diventare elettromagneti. Questo genera forze attrattive e repulsive che di fatto sollevano il treno e lo fanno levitare ad un'altezza costante.

Propulsione

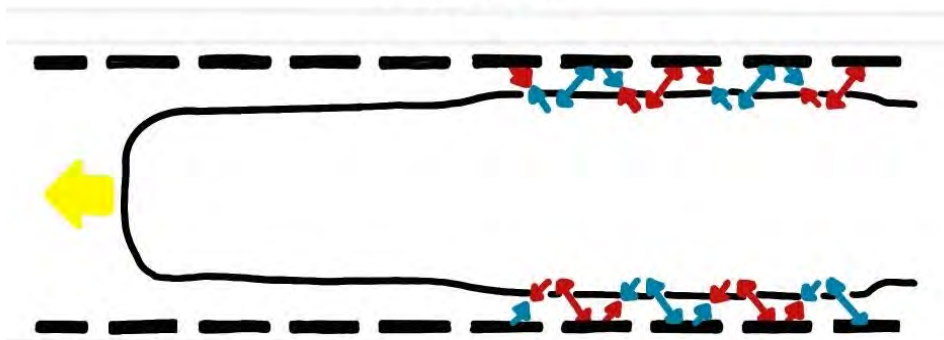


Fig. 6 - Propulsione nel treno a levitazione magnetica



Fig. 7 -Treno a levitazione magnetica

4. Analisi dei dati

Durante l'incontro svolto in collaborazione con il CERN ci è stato proposto anche un laboratorio di analisi di dati. Abbiamo analizzato due serie di dati ricavati dalla ricercatrice Margherita Boselli riguardo la resistenza di un superconduttore al variare della temperatura. La prima serie, denominata *cooling*, è stata misurata partendo da temperatura ambiente, 296.625 K, e scendendo fino a 4.455 K. La seconda, invece, è stata misurata a partire da una temperatura di 4.477 K ed arrivando a 292.543 K ed è chiamata *heating*.

Abbiamo poi utilizzato Google Colaboratory per analizzare i dati e tracciare dei grafici.

4.1 Google Colaboratory

Il servizio Google Colaboratory permette di analizzare dati e creare grafici utilizzando il linguaggio di programmazione Python. Questa piattaforma permette di scrivere parti di codice e testo in modo veloce e senza il bisogno di scaricare alcun software (Fig. 8).

Per iniziare il nostro lavoro di analisi dei dati abbiamo importato alcune librerie di Python (numpy, scipy, math, matplotlib.pyplot, pandas, os, matplotlib.widgets) e abbiamo allegato a Colab due file contenenti le serie di dati da analizzare. Poi abbiamo iniziato la costruzione di grafici.

↳ Analisi transizione stato normale - stato superconduttore

Per prima cosa importiamo tutte le librerie di Python che ci serviranno per lavorare.

```
[1] import numpy as np
import scipy
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from matplotlib.widgets import Cursor
import os

[2] heat='heating.dat'

[3] cool='Cooling.dat'

[4] h=np.genfromtxt(heat, skip_header=1, usecols=(0,1), names=('t','r'))
c=np.genfromtxt(cool, skip_header=1, usecols=(0,1), names=('t','r'))
```

Fig. 8 - Schermata di Google Colaboratory, importazione delle librerie e inserimento dei dati.

4.2 Temperatura e resistenza

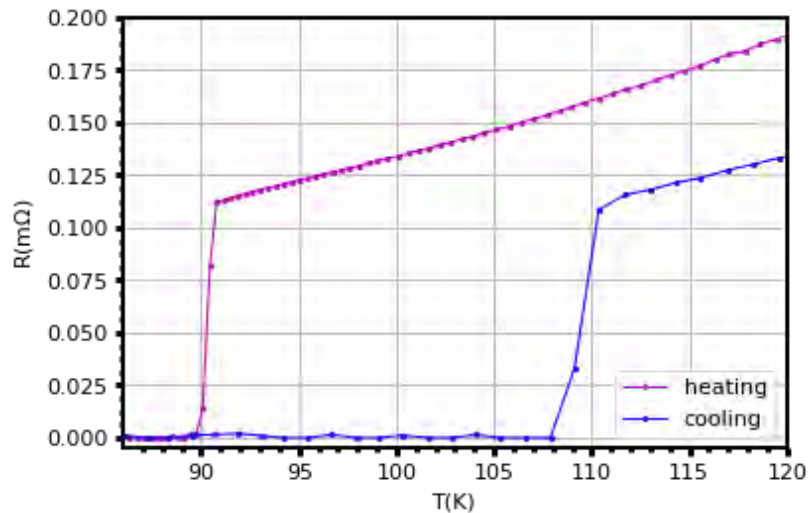
Grazie all'utilizzo di alcune funzioni della libreria matplotlib.pyplot abbiamo creato un grafico che rappresenta la resistenza di un superconduttore al variare della sua resistenza (Graf. 9).

Abbiamo utilizzato il seguente codice:

```
plt.plot(h['t'],h['r'],'-m')
plt.plot(c['t'],c['r'],'-b')
```

```
plt.xlabel('Temperature (K)')
plt.ylabel('Resistance ( $\Omega$ )')
plt.title('Temperature v Resistance (Heating)')
plt.show()
```

La funzione “plt.plot()” permette di individuare punti sul piano e tracciare grafici. All’interno delle parentesi è necessario inserire due variabili x e y. In questo caso abbiamo inserito h[‘t’] e h[‘r’] ovvero due array⁷ che raccolgono i diversi valori della temperatura e della resistenze misurati dalla ricercatrice. Inoltre abbiamo colorato i due grafici di blu (‘-b’) e di rosa (‘-m’).



Graf. 9 - Resistenza al variare della temperatura in un superconduttore

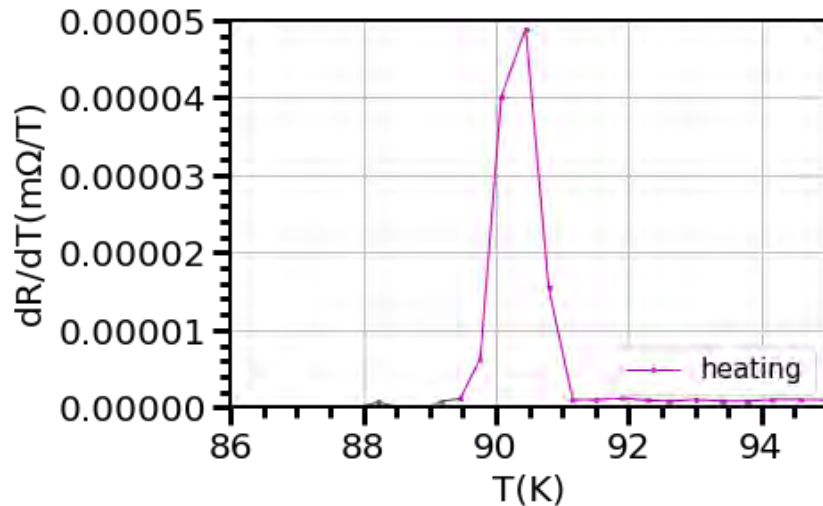
La linea azzurra rappresenta la serie di dati *heating*, ovvero quelli misurati da temperatura ambiente fino a temperatura di 4.455 K, la linea blu invece indica la serie *cooling*. Dal grafico si può notare che a temperature molto basse la resistenza è quasi nulla (vi sono però alcune imprecisioni dovute agli strumenti di misura utilizzati).

4.3 Plot del gradiente

Come si può notare, il grafico 9 non ha pendenza costante ad ogni temperatura. Per visualizzare meglio le caratteristiche di questa curva è possibile studiare come cambia la pendenza.

Il Graf. 10 riguarda la serie di dati “heating” e rappresenta la variazione della pendenza della curva (asse y) al variare della temperatura (asse x). Per ottenere questo tipo di rappresentazione si può utilizzare la funzione “gradient()” della libreria numpy di Python. Possiamo quindi applicare questa funzione ai dati riguardanti la resistenza del superconduttore con la seguente istruzione: np.gradient(h[‘r’]). Infine possiamo tracciare il grafico utilizzando funzioni analoghe a quelle riportate nel paragrafo precedente.

⁷ Gli array in informatica sono delle strutture che raccolgono dati. Essi possono essere paragonati ad un insieme di cassette ordinate che contengono dati omogenei ed identificati da una loro posizione.



Graf. 10 - Variazione di pendenza della curva al variare della temperatura.

4.4 Fit gaussiano

Per proseguire l'analisi dei dati abbiamo realizzato un Fit Gaussiano. Per creare un fit, però, abbiamo dovuto fare un'interpolazione dei dati. Interpolare i dati significa individuare nuovi punti del piano cartesiano utilizzando un'opportuna funzione $y = f(x)$. Abbiamo quindi aggiunto altri punti utilizzando una specifica funzione di Python, "interpolate()", appartenente alla libreria "scipy" con il seguente codice:

```
fh=scipy.interpolate(h['t'],np.gradient(h['r']))
```

Successivamente abbiamo realizzato un fit gaussiano (Graf. 3) con la funzione optimize della libreria "scipy".

Abbiamo quindi definito una funzione $f(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2c^2}}$ con il seguente codice:

```
def gauss(x,a,b,c):
    y=a*np.exp(-0.5*np.power((x-b)/c,2))
    return y
```

Questa funzione, partendo da quattro valori (a, b, c, x), restituisce un valore y che equivale a

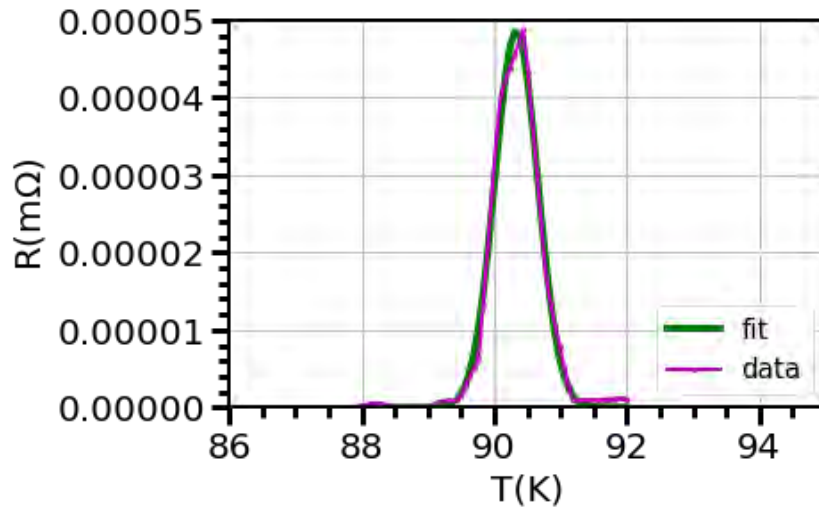
$$y = f(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2c^2}}$$

Infine abbiamo tracciato il grafico con il seguente codice:

```
from scipy.optimize import curve_fit
temp=np.linspace(88,92,60)
par1,par2=curve_fit(gauss, temp, fh(temp), p0=[10e-5,90,1])
plot=plt.subplot(111)
cursor = Cursor(plot, useblit=True, color='blue')
plt.plot(temp,gauss(temp,par1[0],par1[1],par1[2]),color='g', Label='fit')
plt.plot(temp,fh(temp),marker='o',color='m', label='data')
prop_plot2('lower right', 'T(K)', 'R(m\Omega)')
```

Così facendo abbiamo ottenuto un grafico (Graf. 11) che rappresenta la distribuzione delle temperature di transizione all'interno del campione.

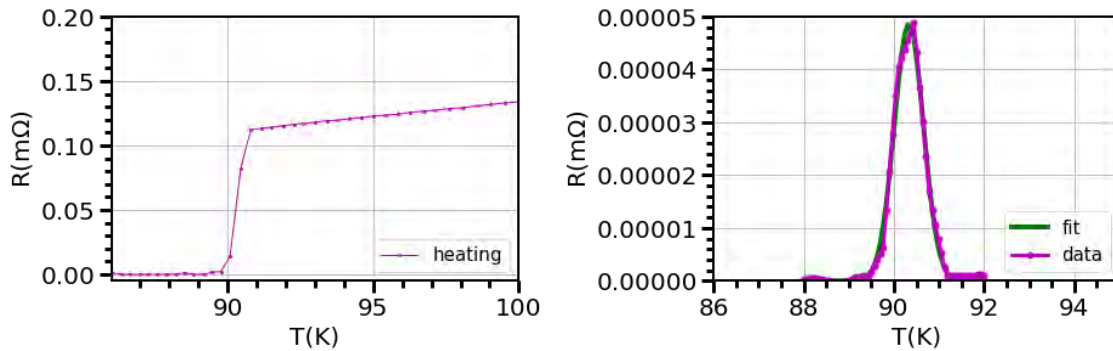
Dalla lettura del grafico il fit realizzato sembra preciso. Avendo più dati a disposizione si potrebbe però studiare la curva in modo più approfondito. Per verificare la probabilità che la curva sia costruita correttamente si può utilizzare il test statistico di chi-quadro.



Graf. 11 - Fit e dati

4.5 Confronto dei grafici

Confrontando i due grafici tracciati (Graf. 12) si può notare che il picco della curva a campana corrisponde ad una temperatura di circa 90K. A questa determinata temperatura corrisponde anche il picco caratteristico del primo grafico. La temperatura di transizione del superconduttore studiato si trova quindi circa a 90K. Inoltre si può notare che il picco del primo grafico non è verticale quindi si ottiene una curva a campana nel secondo grafico.



Graf. 12 - Grafici a confronto

Acknowledgements

This paper is inspired by a webinar carried out at CERN S'Cool Lab. We thank CERN for giving us the opportunity to discover such an interesting argument.

Riferimenti bibliografici e sitografia

- [1] S. Borra, A. Di Ciaccio, *Statistica. Metodologie per le scienze economiche e sociali*, Mc Graw-Hill, Milano (2008)
- [2] P. Newbold, W.L. Carlson, B. Thorne, *Statistica*, 2° ed., Pearson Italia, Milano (2010)
- [3] Wikipedia, *Superconduttività*
<https://it.wikipedia.org/wiki/Superconduttivit%C3%A0>
- [4] Daniele Di Gioacchino, *Percorso divulgativo: Il fenomeno della Superconduttività*
<https://scienzapertutti.infn.it/percorsi-divulgativi-list/701-il-fenomeno-della-superconduttivita>
- [5] Wikipedia, *Superfluidità*
<https://it.wikipedia.org/wiki/Superfluidit%C3%A0>
- [6] Wikipedia, *Effetto Meissner-Ochsenfeld*
https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Meissner-Ochsenfeld
- [7] Wikipedia, *Lunghezza di penetrazione di London*
https://it.wikipedia.org/wiki/Lunghezza_di_penetrazione_di_London
- [8] Superconduttori, Applicazioni della Superconduttività
http://oberon.roma1.infn.it/lezioni/laboratorio_specialistico_astrofisica/pdf/lezione7.PDF
- [9] Politecnico di Milano, *Superconduttori*
[https://www.fisi.polimi.it/sites/default/files/seminari_attach/Superconduttori%20\(lezione%20per%20liceali\).pdf](https://www.fisi.polimi.it/sites/default/files/seminari_attach/Superconduttori%20(lezione%20per%20liceali).pdf)
- [10] Humanitas Research Hospital, *Macchinario per la risonanza magnetica*
<https://www.humanitas.it/enciclopedia/strumenti-medici/macchinario-per-la-risonanza-magnetica/>
- [11] Research Italy, *Un nuovo cavo superconduttore dai laboratori ENEA*, (2016)
<https://www.researchitaly.it/successi/dai-laboratori-enea-un-nuovo-cavo-superconduttore-1/>
- [12] Indico CERN: Summer Program - Italian High School Students - Superconductivity 2
<https://indico.cern.ch/event/1043195/>

Image credits

<https://pixabay.com/it/>

<http://scienzapertutti.infn.it/>

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8c/Magnetic_Levitation_Experiment%2C_Science_Gallery_Dublin%2C_Ireland.jpg/640px-Magnetic_Levitation_Experiment%2C_Science_Gallery_Dublin%2C_Ireland.jpg



Gruppo formato da: Bertuzzo Enrico, Caldana Vittoria, Foletto Alessandro, Pretotto Matteo

Tutor scolastico: Lorenzo Meneghini

Progetto realizzato in collaborazione con l'Associazione Nemesis

Tutor Aziendale: dott.ssa Borriero Sonia

Editing in collaborazione con l'Associazione Nemesis

