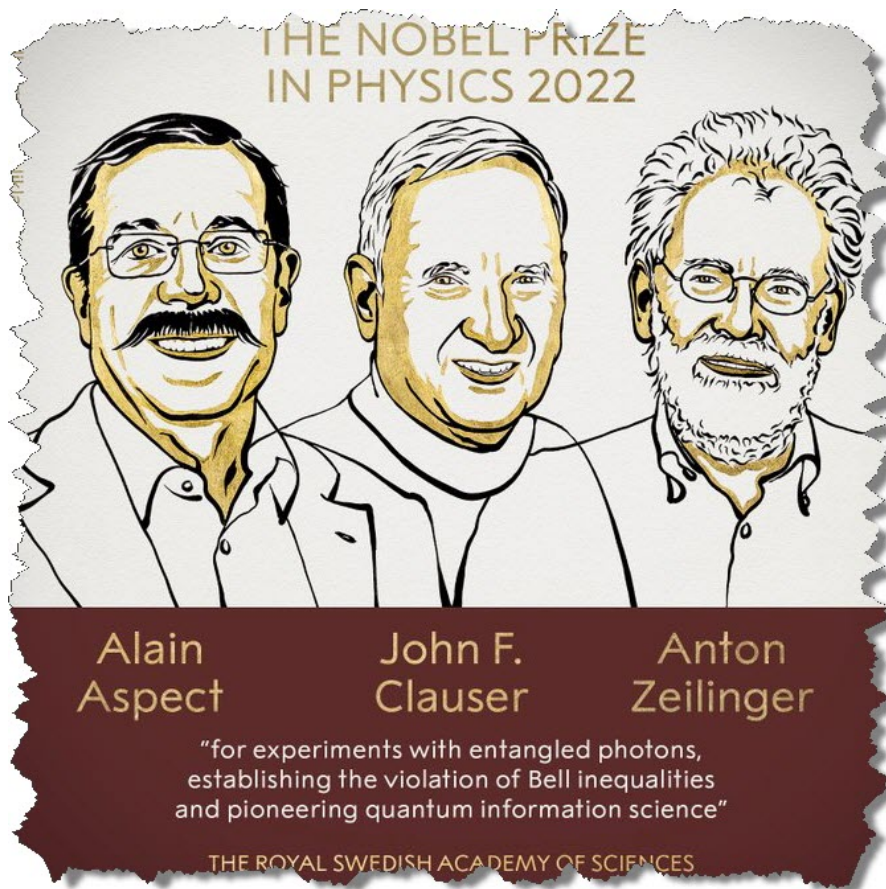


il fisico sperimentale “ingenuo”



I premi Nobel per la fisica non sono tutti uguali e quello del 2022 appartiene alla categoria di quelli speciali perché va a premiare la fase II della Meccanica Quantistica.

Il superpremio sarebbe spettato a John Bell (1928-1990) ma lui è morto improvvisamente quando aveva solo 62 anni. Ha fatto in tempo a vedere l'affermazione delle sue idee ma il premio no; lo si dà solo a fisici in vita e capita spesso che i riconoscimenti arrivino in ritardo (è successo anche ad Einstein).

Così Bell non ha fatto in tempo e il premio, anziché ad un fisico teorico è andata a tre fisici sperimentali, anche se Zeilinger, per gli studi sulla informatica quantistica, il teletrasporto e l'entanglement su sistemi a più di due particelle si colloca a metà strada tra fisica teorica e sperimentale.

I tre vincitori del premio hanno grosso modo la mia età e ciò per un verso mi preoccupa e per l'altro mi consola. Il fatto

che mi preoccupi sta nel trascorrere degli anni e i fisici sanno che “la freccia del tempo” non cambia verso; la consolazione viene dal fatto che dopo aver iniziato ad approfondire la fisica, inclusa la MQ, mi chiedevo spesso se si trattasse di un circolo chiuso e ormai compiuto.

Quando ho iniziato a ragionare di queste cose erano passati una cinquantina d’anni dal completamento della MQ e si aveva la impressione che, rispetto ai fondamenti, fosse rimasto poco da dire. E’ vero c’erano state delle *voci nel deserto*, ma avevano poco credito.

In realtà, in giro per il mondo c’erano dei *fisici coraggiosi* che continuavano a farsi delle domande. Racconta Aspect che, quando incontrò per la prima volta John Bell e gli espose la sua volontà di inventare un esperimento che consentisse di verificare la correttezza delle sue idee, come prima domanda ebbe la richiesta ironica *se avesse un posto di ruolo*.

Lo stesso John Bell, che coltivava certe “insane passioni”, da sempre dedicava alla riflessione sui fondamenti il tempo libero e per il resto faceva i suoi calcoli sugli aspetti di fisica applicata connessi al funzionamento del grande acceleratore di Ginevra. Forse Aspect era la persona giusta visto che si interessò al tema dell’entanglement dopo aver trascorso qualche anno del suo post laurea in Camerun a fare del volontariato sociale e fu in Africa, munito della Bibbia di Claude Cohen-Tannoudji (Quantum Mechanics), che iniziò a farsi delle domande. Un altro dr. Bertlmann.

Con questo premio Nobel si è chiuso un cerchio e, per questa ragione mi sono preso la briga di fare una seconda opera di traduzione. L’articolo che vi presento, scritto per un convegno organizzato da Zeilinger per onorare i 50 anni dalla pubblicazione (nel 1964) dell’articolo di John Bell sull’entanglement ha un duplice pregio:

- riassume il nocciolo delle tematiche delle

diseguaglianze di Bell (e dunque vi consentirà di digerire meglio la trattazione che ne ho dato nel capitolo 0606)

- entra nel merito delle problematiche vere che un fisico sperimentale si pone di fronte alla necessità di verificare la correttezza di una legge

E' stato un lavoraccio perché ho scelto di non riassumere nulla e di lasciare intatto anche tutto l'apparato bibliografico. Alain Aspect

- riepiloga ampiamente tutto il lavoro di Bell;
- racconta gli esperimenti che hanno preceduto i suoi;
- entra in dettaglio sulle problematiche che si è posto e sulla necessità di dare delle risposte agli avversari delle diseguaglianze di Bell pronti ad inventarsi "scappatoie" (loop-hole) di tutti i generi (e se i fotoni, dotati di una intelligenza superiore scoprissero che l'apparato sperimentale non è genuinamente casuale e riuscissero a comunicarsi il da farsi?)
- ci informa su quello che è stato fatto dopo

Una buona occasione per capire cosa voglia dire fare degli esperimenti veri: i fotoni non si trattano uno alla volta ma ne servono milioni al secondo; come si maneggiano le cascate radiative (!?!) in un periodo in cui i laser che servono per eccitare gli atomi di Calcio sono molto primitivi, bisogna distinguere i fotoni sporchi da quelli buoni; bisogna cambiare il funzionamento dell'apparato mentre i fotoni sono in volo e si parla di nanosecondi, ...

Buona lettura: – [Il teorema di Bell – la visione ingenua di un fisico sperimentale di Alain Aspect](#)

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso –
Il [capitolo 0606 Meccanica quantistica II parte](#)

**dai postulati, al Momento
angolare, alla RMN ... fino a
John Bell e all'entanglement**



La apertura del capitolo è dedicata ai 6 postulati che costituiscono la ossatura della intera MQ e vedrete che si leggono con piacere e senza bisogno di appelli né alla fede né a competenze matematiche improponibili. Lo schema della teoria è semplice, accattivante anche se contro intuitivo.

Oltre ad enunciarli ho dedicato molta attenzione ad illustrarne il significato e a sottolinearne i nessi reciproci.

Il paragrafo successivo è interamente dedicato al principio di indeterminazione facendone vedere la dipendenza dalla struttura assiomatica della teoria. Tutte le coppie di operatori che non commutano, cioè tutte le coppie di operatori $\hat{A}$ e $\hat{E}$ e per i quali $\hat{A}\hat{E} - \hat{E}\hat{A}$ risulta diverso da zero sono soggetti ad una indeterminazione quando si cerchi di

determinarne simultaneamente il valore; tale indeterminazione è soggetta ad una medesima legge.

Il terzo paragrafo è interamente dedicato alla teoria quantistica del momento angolare una osservabile caratterizzata da una stranezza legata al tema della non commutazione: si tratta di un *vettore* per il quale sono determinabili una componente e il modulo mentre altre due sono libere e da queste *regole* seguono le caratteristiche del secondo e terzo numero quantico dei modelli atomici. Data la importanza del tema ho esplicitamente svolto i calcoli che si basano su una coppia di operatori detti di *shift* perché fanno crescere e decrescere di una stessa quantità i valori del momento angolare ogni volta che si usano.

Il quarto paragrafo tratta di quel particolare momento angolare detto *spin* che, rispetto ai momenti angolari orbitali, presenta il vantaggio di essere collocato in uno spazio di Hilbert a due dimensioni e di essere pertanto comodo da maneggiare.

Lo *spin* viene analizzato seguendo due approcci: una introduzione basata sulla esecuzione di esperimenti ideali alla Stern & Gerlach e una seconda trattazione classica basata sulla costruzione delle cosiddette *matrici di Pauli*, gli operatori introdotti da Wolfgang Pauli subito dopo la scoperta dello *spin* per collocarlo all'interno della struttura teorica della Meccanica Quantistica.

Mentre mi documentavo qua e là, sullo *spin* ho trovato un testo che, seppur a livello elettronico, e non nucleare, si occupava della trattazione quantistica del fenomeno della risonanza degli *spin*, così mi è venuta l'idea di approfondire ed è saltato fuori un ampio paragrafo dedicato ai principi di funzionamento della risonanza magnetica nucleare che, in ossequio al *politicamente corretto* secondo cui la parola nucleare evoca fantasmi, negli *states* hanno iniziato a chiamare MRI *magnetic resonance imaging*.

Mi sono dedicato principalmente agli aspetti fisici di funzionamento fermandomi alla soglia degli algoritmi che consentono di trasformare i segnali elettromagnetici di riassetamento in immagini, ma ne è venuto fuori qualcosa di interessante e che raramente si ritrova in un corso di fisica.

La ultima parte del capitolo è dedicata ad argomenti che, quando mi sono laureato erano considerati cose da *rompisciole*, la discussione su alcuni aspetti strani e inattesi della Meccanica quantistica.

Si tratta di questioni nate intorno alle insoddisfazioni epistemologiche di Einstein che, senza mettere in discussione l'impianto della MQ che aveva contribuito a creare, trovava insoddisfacenti alcune conclusioni che avevano a che fare con il *collasso* della funzione d'onda quando si esegue una misura.

Per alcuni sistemi quantistici, caratterizzati dalla non separabilità, cioè dalla impossibilità di separare il sistema nei suoi singoli componenti, si verificano (a livello di esperimento mentale) fatti che Einstein definiva *sinistri* (o diabolici): la misura su uno dei componenti determinerebbe istantaneamente il valore della stessa grandezza sugli altri componenti del sistema a qualsiasi distanza essi si trovino.

La discussione su queste faccende, innescata da Einstein negli anni 30 del 900 è andata avanti come se quelli che ponevano certe questioni fossero dei *rompiballe* perché l'impianto della MQ era solido e i risultati lo stavano a dimostrare.

Ma tra la fine degli anni 60 e i primi anni 70 un fisico irlandese del CERN che, ufficialmente si occupava di acceleratori, ma nel tempo libero rifletteva sui fondamenti, tirò fuori un teorema del tutto generale (più generale della MQ) che consentiva di sottoporre ad indagine sperimentale l'intera questione.

Una ipotetica teoria *realista*, che bandisse le indeterminazioni attraverso variabili nascoste, che

rispettasse il *principio di località* secondo cui nessuna informazione e interazione si può propagare a velocità superiore alla velocità della luce, avrebbe dovuto rispettare una determinata disequaglianza che invece era disattesa dalla MQ.

Fu così che a partire dagli anni 70 iniziarono una serie di esperimenti di verifica del comportamento di sistemi *entangled*, quelli per i quali si prevedevano i *comportamenti sinistri*.

L'esperimento decisivo fu realizzato da una equipe francese guidata da Alain Aspect. Le insoddisfazioni di Einstein erano malposte. La MQ è intrinsecamente non locale e gli esperimenti le danno ragione.

Degli esiti ne tratterò in un altro capitolo perché questo viaggio verso le 70 cartelle che, per un capitolo sono tante.

Se arriverete sino in fondo vedrete che, questa volta, gli esercizi e i problemi sono davvero pochi. E' stata una scelta consapevole; gli aspetti tecnici lasciamoli agli specialisti e cerchiamo invece di rendere consapevoli le persone del fatto che il mondo, su scala microscopica, presenta aspetti inattesi. Cambia la scala e cambiano le leggi.

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso –
il [capitolo 0606 la meccanica quantistica II parte](#)

i calzini del dr Bertlmann

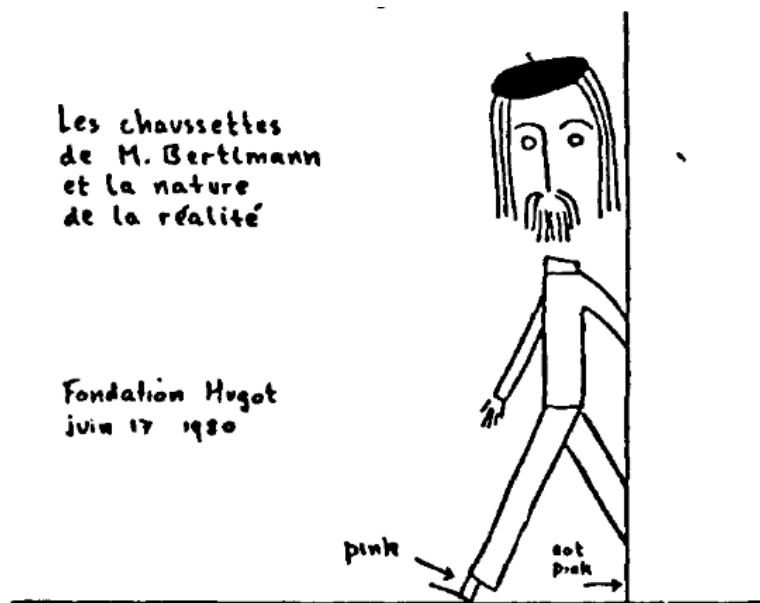


Illustrazione originale dell'articolo

L'articolo I calzini del dr. Bertlmann fa parte della raccolta di articoli di J.S. Bell di taglio epistemologico intitolata *Speakeable and Unspeakeable in Quantum Mechanics*.

Mentre lavoravo al secondo capitolo di MQ, per alleggerire un po' mi sono letto l'articolo di Bell e ho deciso che valesse la pena di tradurlo per renderlo disponibile ad un pubblico italiano più ampio. Detto ... fatto

La storia dei calzini spaiati è vera e fa parte delle bizzarrie del dr. Bertlmann per la serie 1968 e dintorni. Bell utilizza l'argomento per spiegare le correlazioni che hanno una origine nel passato anche se l'esempio rischia di essere vagamente fuorviante, perché le correlazioni quantistiche legate all'entanglement si attualizzano nel presente.

Bell e Bertlmann erano due persone fuori dal comune e basta vederli in questa foto del 1980 al CERN per capire che si trattava di due personaggi oltre che fuori dal comune anche fuori dagli schemi.

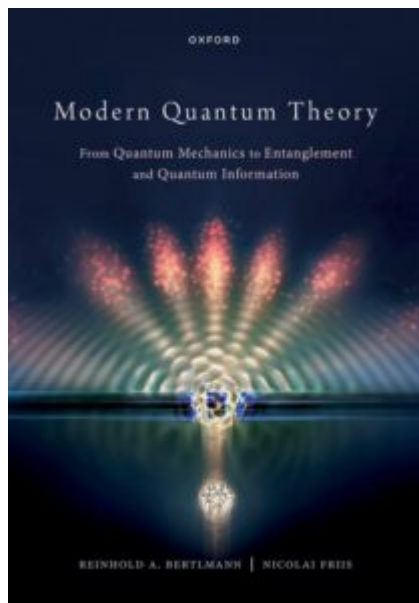


Bertlmann e Bell al CERN nel 1980

Oggi ho ripreso in mano l'articolo di Bell per festeggiare l'acquisto di "Modern Quantum Mechanic – from Quantum Mechanics to Entanglement and Quantum Information" di Bertlmann che utilizzerò per scrivere la parte finale del II capitolo di MQ. Lo pubblicherò nei prossimi giorni in attesa degli ultimi paragrafi (le prove sperimentali della violazione quantistica della località, le applicazioni dell'entanglement alla crittografia, al teletrasporto e alla informatica quantistica).

Oggi ho finito la revisione dell'esistente e già così è un bel malloppone.

Il libro di Bertlmann l'avevo scaricato in pdf come faccio con i testi da selezionare in vista di un acquisto e oggi ho deciso di regalarmi per Natale il cartaceo. Su 1000 pagine ce ne sono ben 700 dedicate agli sviluppi recenti della MQ. Che bello sarebbe stato avere il professor Bertlmann, nella primavera del 68, a tenere il corso di Istituzioni di Fisica Teorica... al posto del professor Prospero che non capiva le nostre domande impertinenti.



Ma che dico? Bertlmann è' un mio coetaneo. E' nato nel 1945 e dunque, ha un anno più di me e nel 68 muoveva i primi passi da studente; il suo dottorato è del 1974 ... e si è sposato con una delle leader del movimento femminista austriaco, Renate. Ha scritto anche un importante testo di tipo critico sulla elettrodinamica quantistica.

Che bello questo ritorno a Vienna; la università di Boltzmann, di Mach e poi del circolo che porta il nome della città. e che ha segnato una svolta nei miei riferimenti culturali generali e poi politici. Questo libro me lo terrò caro.

Segnalo che c'era un errore nel link al primo dei due capitoli di MQ che lo rendeva irraggiungibile. Ho corretto ma lo ripubblico qui [Capitolo 0605](#)

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso – [L'articolo di John Bell – i calzini del dr Bertlmann](#)

**niente paura è solo
Schrödinger in compagnia di**

Hilbert

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi$$

Schrödinger - Heisenberg - Hilbert

Inizialmente avevo pensato che, per sbrigarmela con la meccanica quantistica in un corso di Fisica Generale, sarebbe bastato un solo capitolo ma non è andata così. I capitoli, abbastanza corposi, sono diventati due e probabilmente per dare conto di tutti gli sviluppi più recenti diventeranno tre.

Questo primo capitolo, nella prima parte riprende la parte introduttiva che avevo scritto quando ancora insegnavo (nel 2007). L'idea è quella di fornire un quadro di quella *fase incasinata* iniziata a fine XIX secolo e proseguita sino ai primi due decenni del XX.

Dopo che con gli sviluppi della sintesi maxwelliana dell'elettromagnetismo e con la riduzione della termodinamica classica (con le sue leggi generali piuttosto bizzarre) alla meccanica statistica, nel mondo della scienza si era pensato che, dà lì in poi, si sarebbe trattato solo di applicare l'indagine del mondo fisico a modelli che la riconducessero alle leggi generali già note.

Come sappiamo non è andata così; le nuove scoperte evidenziavano originalità della natura che mal si conciliavano con le leggi note. Per esempio, man mano che si faceva strada (con la scoperta dell'elettrone e con i lavori di Rutherford sulla esistenza di un nucleo atomico) una ipotesi di modello

atomico di tipo planetario, nascevano problemi legati al fatto che le cariche elettriche in moto circolare (e dunque accelerato) avrebbero dovuto emettere onde elettromagnetiche perdendo energia e gli atomi planetari sarebbero collassati in una infinitesima frazione di secondo.

Il primo paragrafo riprende quanto già descritto nel capitolo 4 relativamente a questo procedere a tentoni ogni qual volta un nuovo esperimento portava alla scoperta di una nuova bizzarria; pian piano ci si rende conto che bisogna rovesciare il quadro teorico di riferimento e creare qualcosa che la facesse finita con le ipotesi ad hoc.

Il secondo paragrafo è dedicato alle diverse strade che vennero intraprese per arrivare alla nuova teoria: nuove regole costruite a partire solo da grandezze osservabili (Heisenberg), allargamento alla nuova meccanica di quanto era stato fatto in ottica nel passare dall'ottica geometrica all'ottica fisica facendo riferimento ad alcuni schemi teorici (i principi variazionali sviluppati in *meccanica razionale*) in modo che si potessero applicare al nuovo mondo le leggi e i formalismi matematici delle onde (Schrödinger).

Il secondo approccio si è rivelato più semplice da maneggiare e ancora oggi è quello utilizzato in tutto il mondo per presentare la MQ. Se ne occupa il III paragrafo interamente dedicato alla equazione di Schrödinger: processo euristico che ne giustifica la costruzione, forma matematica e principali caratteristiche (primi cenni agli operatori e significato della funzione di stato Ψ).

Il quarto e quinto paragrafo hanno una impostazione tecnica e riguardano la manipolazione e l'uso della equazione di Schrödinger: scomposizione in dipendenza spaziale e temporale, costruzione delle soluzioni nel caso di una buca di potenziale finita e infinita. Cercando le soluzioni nel caso della buca finita e nella successiva trattazione della barriera di potenziale avrete l'occasione di capire cosa si intendesse in

fisica teorica con lo slogan *giù la testa e calcolate*.

Per un verso avrete la soddisfazione di capire come salta fuori l'*effetto tunnel* (uno degli effetti sbalorditivi della MQ) e per l'altro vedrete come la costruzione delle soluzioni sia una cosa concettualmente abbastanza semplice ma operativamente complessa per il continuo *ricorso a trucchi*, cambi di variabile, costruzione grafica delle soluzioni.

L'ultimo paragrafo tratta esclusivamente dei richiami di matematica necessaria alla trattazione generale della M.Q. di cui si occupa il capitolo successivo.

La MQ, nella sua formulazione generale, ha come protagonisti gli operatori, una generalizzazione del concetto di funzione. Gli operatori (le osservabili) sono oggetti matematici che vengono costruiti in maniera che ad ogni grandezza fisica classica corrisponda un operatore quantistico e sia questo operatore a darci le conoscenze sul mondo fisico; ma, attenzione, esistono anche operatori quantistici che non hanno una grandezza fisica tradizionale corrispondente, per esempio lo spin.

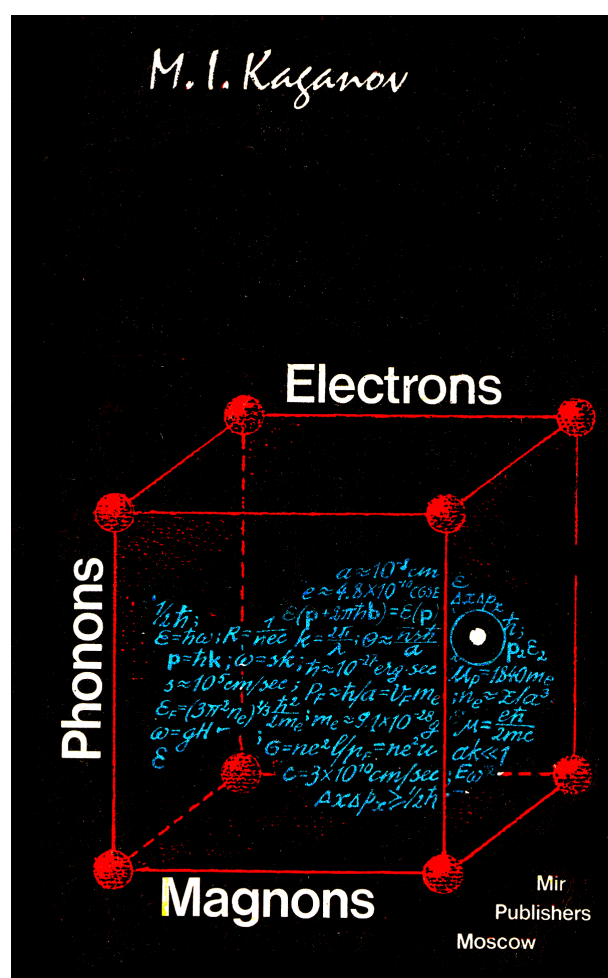
Gli operatori agiscono su oggetti chiamati vettori, che operano nel campo dei numeri complessi e che sono la generalizzazione molto ampia degli ordinari vettori dello spazio a 3 dimensioni.

Tutto ciò avviene in uno spazio astratto, detto spazio di Hilbert e l'ultimo paragrafo del capitolo serve a dare al lettore gli strumenti per comprendere la struttura assiomatica della teoria quantistica di cui si occupa il capitolo 06.

Avrete capito che non è obbligatorio leggere tutto o comunque leggere tutto con lo stesso grado di attenzione relativamente ai dettagli. Tutto dipende dal grado di comprensione che vorrete raggiungere. Questo è il livello di compromesso che mi è sembrato utile e necessario.

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso –
il [capitolo 0605](#)

linguaggio comune –
linguaggio scientifico –
divulgazione



Ogni volta che leggo i testi di fisica della ex URSS resto impressionato dal quanto, tante energie positive, rispetto ad un rapporto razionale con il mondo, siano state gettate dalla finestra insieme alla tanta acqua sporca.

Dello stesso autori potete trovare nel link a fondo pagina un testo dedicato alla natura del magnetismo e un altro sulle quasiparticelle entità a metà strada tra onde e particelle che hanno a che fare con la fisica dei solidi.

Il testo sul magnetismo, alla faccia del divulgativo (la serie si intitola "la scienza per tutti"), va in maggiore profondità di quanto non facciano i testi universitari di "fisica generale" italiani e americani. Credo che lo terrò presente nel rivedere la parte del mio corso sul "magnetismo nella materia".

La introduzione è un po' lunga ma merita di essere letta.

Quando la scienza percepisce il mondo circostante e trasforma "le cose in sé" in cose "per noi", quando domina nuovi campi e trasforma le sue conquiste trasformandole in strumenti quotidiani dell'umanità, svolge anche una funzione aggiuntiva. Cioè, compone un'immagine del mondo che viene modificata da ogni generazione successiva e costituisce una delle caratteristiche più importanti di civiltà.

L'immagine del mondo, cioè, la somma totale delle informazioni dell'umanità sulla natura, è conservato in centinaia di volumi di monografie speciali e in decine di migliaia di articoli su riviste scientifiche. A rigor di termini, questa immagine è nota all'umanità nel suo complesso ma non a una singola persona.

Un uomo, anche con la migliore istruzione possibile, conosce solo i dettagli di un piccolo frammento dell'immagine complessiva e gli bastano informazioni approssimative su tutto ciò va oltre il suo campo speciale.

Le difficoltà nell'ottenere l'immagine di tutto il mondo circostante risulta non solo dalla diversità illimitata di dati ma anche dall'esistenza di lingue specializzate. Queste lingue sono mezzi di comunicazione e di sviluppo di strutture logiche all'interno di domini separati domini; queste lingue sono totalmente prive di significato per uno scienziato che lavora in un ambiente remoto e sono solo approssimativamente comprensibili a chi lavora in un campo adiacente.

La generalizzazione dei risultati scientifici e la composizione dell'immagine del mondo richiedono che le descrizioni debbano essere tradotte da uno specialista di quella lingua in una lingua ordinaria (universale). Ed è qui che si incontra l'ostacolo: i linguaggi specializzati sono molto formalizzati in misura maggiore di qualsiasi linguaggio comune della esperienza quotidiana.

La traduzione è sempre difficile. Questo è particolarmente vero per la traduzione da un ambito scientifico in una lingua in cui il significato di ciascun concetto non è strettamente definito, ma può essere facilmente modificato sotto l'influenza dell'esperienza accumulata dall'utente della lingua. Immagini del mondo create nella mente di persone diverse sono diverse non solo perché le persone hanno digerito quantità ineguali di informazioni ma anche perché queste informazioni sono codificate in lingue diverse.

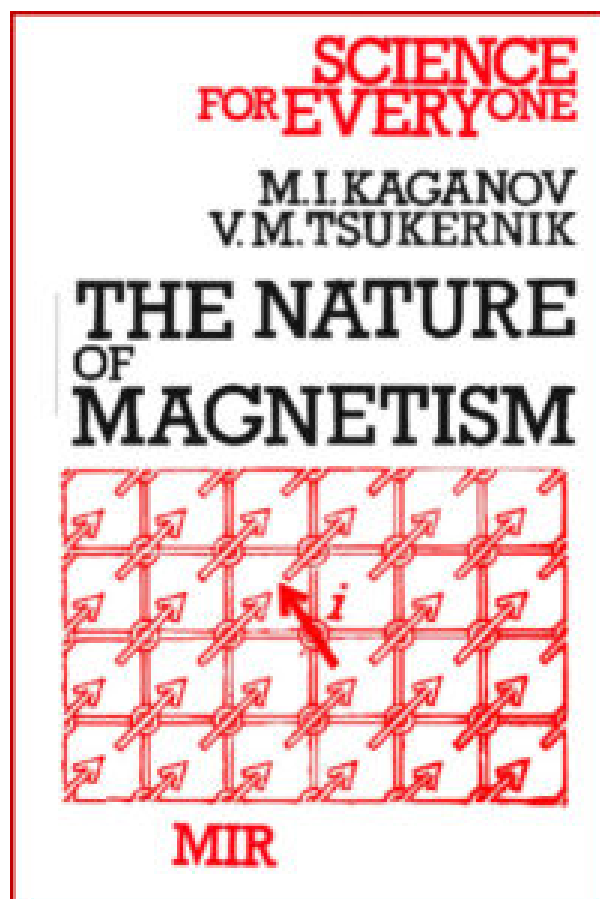
Un biologo costruisce un'immagine del mondo molto diversa da quello di un fisico. L'immagine di un ingegnere è molto più "meccanicistica" di quello di uno specialista in le discipline umanistiche. La letteratura scientifica popolare è un tentativo di tradurre da un linguaggio scientifico rigoroso in un linguaggio meno formale. Sarebbe sbagliato pensare che gli scienziati nel parlare o pensare su temi professionali impieghino sempre e solo una terminologia scientifica rigorosamente formalizzata. Lungi da ciò.

Non è difficile trovare, ascoltando gli argomenti in una

discussione scientifica, o prestando attenzione alla formulazione delle relazioni consegnate ai convegni e seminari, o semplicemente ascoltando gli specialisti parlare in modo informale durante queste conferenze, che ogni branca della scienza genera due linguaggi.

Uno rigoroso e preciso, l'altro molto meno rigoroso.

Questa seconda lingua è una miscela di termini tecnici e parole di tutti i giorni. L'uso ripetuto del linguaggio di tutti i giorni dà a queste parole un significato molto particolare difficile da trovare anche nel miglior dizionario enciclopedico. Ciò che è essenziale, tuttavia, è che l'aggiunta della parte scientifica al significato non sopprime il sapore emotivo della parola.



Non c'è dubbio che le parole di qualsiasi linguaggio umano possiedono un potere magico di messa in moto di catene di immagini associative, stimolanti la mente e stimolanti le emozioni. Questo rende la parola uno strumento molto potente. Questo spiega perché uno scienziato che cerca una soluzione rigorosa utilizzi un modo di colloquiare vivace durante la discussione con gli oppositori del suo punto di vista; non limita il suo linguaggio a un gergo scientifico le cui parole sono precise ma prive di emozione.

La letteratura scientifica popolare familiarizza il lettore con il linguaggio "colloquiale" della scienza.

I termini convenzionali spesso comportano allusioni che sono marginali in un contesto scientifico e quindi possono interferire con la comprensione di una affermazione. La traduzione dal linguaggio scientifico a una lingua convenzionale comporta delle perdite. La precisione viene sacrificata, il che è un prezzo inevitabile della semplificazione.

È possibile, tuttavia, cercare di ridurre il carico di allusioni inutili che si trascinano dietro il linguaggio di ogni giorno. Prendiamo il termine "decadimento". Un non fisico apprende dall'edizione integrale del "Random House Dictionary of the English Language" (1966) che "decadimento" significa: vi. 1. diminuire in eccellenza, prosperità, salute, ecc.; deteriorare. 2. decomporre; Marcire. 3. (fisico) (di un nucleo radioattivo) trasformarsi spontaneamente in uno solo o più nuclei diversi in un processo in cui vengono emesse particelle, come particelle alfa, dal nucleo, vengono catturati o perduti elettroni o perso, o avviene la fissione.

Un fisico, tuttavia, cercherà di spiegare che il decadimento di un neutrone in un protone, un elettrone, e antineutrino non significa che, prima del decadimento (in parti separate), il neutrone era formato da un protone, elettrone e antineutrino. La parola "decadimento", dice il fisico, qui significa "trasformazione", nonostante tutti lo chiamino "decadimento".

Un altro esempio: urto o "collisione". Lo stesso dizionario afferma: N. 4. l'atto della collisione; arrivando violentemente in contatto; incidente (come per i treni ferroviari o navi). 2. uno scontro; conflitto. 3. (fisico) l'incontro di particelle o corpi in cui ciascuno esercita una forza sull'altro, causando lo scambio di energia o quantità di moto.

Ma nella fisica dello stato solido la collisione elettrone-fonone collisione significa che l'elettrone ha "assorbito" il fonone. Un'analogia comica: una collisione tra lupo e lepre.

Dopo la collisione, il lupo è solo sul campo.

La scienza dà origine a nuovi concetti quasi ogni giorno, quindi è necessario creare nuovi termini costantemente. Parole del linguaggio comune di tutti i giorni sono spesso presi in prestito per produrre questi termini. Al giorno d'oggi è popolare prendere in prestito le parole un ambito molto lontano dalla scienza.

La fisica di particelle elementari, ad esempio, ha incorporato "stranezza", "fascino", "colore" e "gusto". Questa moda potrebbe essere collegata non tanto con l'inventiva sfrenata dei creatori della nuova fisica ma con i loro tentativi di evitare la concomitante introduzione di sostanze indesiderate nei concetti.

L'autore del nome "quark" per la particella subnucleonica (M. Gell-Mann) era molto consapevole (o sentiva intuitivamente) che le allusioni ai quark di Joyce non dovessero influenzare la comprensione delle proprietà dell'(allora) ipotetica sub-particella.

La letteratura scientifica popolare aiuta i non addetti ai lavori a percepire il contenuto scientifico delle parole che sono stati estratti dal linguaggio quotidiano e trasferite in un ambiente sconosciuto.

Ma l'obiettivo principale della letteratura scientifica popolare è, ovviamente, rendere edotti un gran numero dei lettori dei progressi della scienza.

Il libro che stai per leggere leggendo ora è un testo di scienza divulgativa sulla meccanica quantistica dello stato solido. Siamo consapevoli dei numerosi libri divulgativi di scienza dedicati alla fisica dello stato solido. Il presente libro è diverso in quanto è un tentativo di concentrarsi esclusivamente sulla fisica quantistica dello stato solido e di ignorare le applicazioni.

È un libro sui metodi di interpretazione degli effetti

macroscopici, sulla relazione tra fisica dello stato solido e meccanica quantistica, sulla creazione e l'uso di nuovi concetti... Ma ho perseguito anche un altro obiettivo: "sollevare il velo" spiegando come si ottengono certi risultati senza limitare la presentazione ad una dettagliata descrizione dei risultati stessi.

Il lettore sarà il giudice se il tentativo è fallito o è riuscito. Scrivere questo libro è stato un piacere e ho "torturato" i miei amici e parenti, e soprattutto mia moglie, facendoli ascoltare ad alta voce la mia lettura di alcuni passaggi. Loro erano sempre ascoltatori pazienti e meritano la mia più profonda gratitudine.

Questo è l'indice del testo – lo trovate qui [Mir Books | Books from the Soviet Era](#) insieme a una miriade di libri scientifici da quelli divulgativi a quelli tostissimi, tutti scaricabili gratuitamente. Molti di quei libri tra la fine degli anni 60 e la prima metà degli anni 70 hanno accompagnato la mia formazione scientifica

Instead of an Introduction: Languages of Science

Chapter 1. On Physics in General and Quantum Mechanics in Particular

Introduction to the Next Five Chapters: Solid State Physics

Chapter 2. Phonons

Chapter 3. Two Statistics

Chapter 4. Electrons

Chapter 5. Electrons and Phonons

Chapter 6. Magnons

Concluding Remarks

la forza di Lorentz ne
combina di tutti i colori



Il titolo del capitolo “la forza magnetica e le sue applicazioni” va compreso nella sua interezza; descrivere le caratteristiche della forza magnetica è abbastanza semplice, ma sono le svariatissime applicazioni di questa forza a farla da padrone e, non a caso, tra un paragrafo l’altro ci sono ben 27 esercizi abbastanza tosti e svolti in maniera dettagliata.

La forza magnetica nella forma della interazione tra correnti è stata scoperta e studiata da Ampere a inizio 800 nello stesso contesto in cui è nata l'idea di corrente elettrica. Il primo paragrafo è dedicato alla illustrazione di quel contesto storico e agli sviluppi che ne ha fatto l'elettrotecnica con la invenzione degli strumenti di misura a bobina mobile e dei motori a corrente continua. Sul piano delle applicazioni, esemplare il wattmetro, il misuratore della potenza elettrica dove interagiscono magneticamente due bobine una legata alla corrente e l'altra alla d.d.p.

Dopo i doverosi richiami alla storia si passa a questioni in cui il moto delle cariche elettriche si lega strettamente alla fisica moderna e alle sue evoluzioni.

La forza magnetica è di tipo trasversale rispetto al moto delle cariche ed ecco comparire cariche che si muovono su traiettorie circolari. Siamo nei primi decenni del 900 e sulle lastre fotografiche appaiono due particelle che si muovono su due circonferenze tangenti formando un otto. Una è un elettrone e l'altra che, si muove allo stesso modo ma in verso opposto, deve avere carica positiva; siamo in presenza della prima scoperta dell'antimateria.

Le cariche in moto in presenza di campi magnetici possono avere energie anche molto grandi, maggiori di mc^2 e in questo caso i calcoli richiedono l'uso della teoria della relatività perché, man mano che l'energia cresce, quella che aumenta non è più la velocità ma la massa della particella. Alcuni esercizi svolti vi insegnano il da farsi.

Il percorso storico legato al 900 prosegue con la presentazione dettagliata dei lavori di J.J. Thomson che portarono, partendo dai raggi catodici, alla scoperta del carattere granulare della elettricità e alla necessità di ripensare l'intera struttura della materia; tutte cose realizzate usando campi elettrici incrociati con campi magnetici, tubi di vetro, pompe a vuoto e grandi capacità sperimentali.

Il successivo balzo in avanti riguarda la scoperta del primo acceleratore di particelle, il ciclotrone, che sfrutta una strana proprietà delle cariche in moto in un campo magnetico: fanno traiettorie circolari con un raggio sempre più ampio man mano che si fa crescere la loro energia ma, meraviglia delle meraviglie, impiegano sempre lo stesso tempo a fare un giro e così gli impulsi di campo elettrico possono essere dati sempre con lo stesso ritmo almeno finché non si entra nel dominio della relatività.

Quando mi sono iscritto a fisica nel 1965, di fianco all'istituto, era stata appena terminata la costruzione di un grande ciclotrone che ha funzionato sino agli anni 80: ferro,

rame, tanta energia e tante piccole reazioni nucleari che, con pazienza i laureandi leggevano guardando pellicole fotografiche nel *capannino*, una baracca di fianco al *capannone*, dove stava il ciclotrone.

I ciclotroni sono stati superati quando c'è stato bisogno di energie sempre più grandi, ma ci ha pensato la medicina nucleare a farli tornare di moda: oggi si usano come generatori di proiettili per tutte quelle applicazioni diagnostiche e terapeutiche in cui servono isotopi radioattivi a vita media così breve che occorre fabbricarseli in casa. Se vuoi usare la PET (tomografia ad emissione di positroni) ti serve un ciclotrone.

I ciclotroni nella ricerca sulle particelle e in quella sui costituenti ultimi dell'universo sono stati sostituiti da un'intera famiglia di acceleratori circolari, relativistici e sempre più grandi, i sincrotroni; acceleratori così grandi che i laboratori ormai dentro allo strumento e non viceversa.

Descrivo il più grande oggi esistente quello del CERN con il suo anello di 27 km a 100 m di profondità con i 4 laboratori messi in grandi caverne in 4 punti della circonferenza. I magneti, che devono produrre campi molto intensi, sono messi lungo l'intero anello stanno immersi in elio liquido a 2 kelvin ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$) per poter funzionare in condizioni di superconduttività. Pensate alle complicazioni pratiche ...

Al CERN, attualmente si fanno scontrare protoni e antiprotoni che hanno ormai raggiunto l'energia di una zanzara, ma la zanzara è grande un millimetro e invece i protoni sono mille miliardi di volte più piccoli. Ma la ricerca va avanti ed europei e cinesi pensano al prossimo step con un anello di 100 km che lavorerà ad energie più basse ma utilizzerà elettroni ed antielettroni che consentono di tagliare la materia molto meglio, perché, a differenza dei protoni che sono fatti di quark, gli elettroni sono genuinamente elementari.

Dopo avervi parlato degli acceleratori vi parlo di una macchina molto più semplice, lo spettrografo di massa, sempre basato su campi elettrici e magnetici incrociati che ci ha consentito di misurare le masse atomiche e di scoprire che, quasi tutti gli elementi, hanno uno o più fratelli con le stesse proprietà chimiche ma masse leggermente diverse: gli isotopi.

Infine una scoperta del tardo 800 ma che è diventata importantissima nel 900 per indagare la capacità dei solidi di condurre l'elettricità: l'effetto Hall.

Con questo effetto sempre basato sulle stranezze dei campi magnetici siamo stati in grado, elemento per elemento, di misurare quanti elettroni per ogni atomo vengono messi a disposizione per la conduzione e di scoprire che quella che è stata chiamata *conduzione per buchi* nei semiconduttori (si veda il capitolo 0505) esiste per davvero nella forma di buchi: a muoversi sono in realtà sempre e solo gli elettroni, ma l'effetto globale, che danno è quello di un moto di cariche positive in verso contrario ed è l'effetto Hall a dimostrarlo in maniera inequivocabile.

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso –
il [capitolo 0507](#)

ma il magnetismo esiste o ha bisogno delle correnti?



C'è una novità che scatta da questo post; i capitoli del corso di fisica contengono una introduzione leggibile anche da chi non entrerà nel merito. E la introduzione uscirà sul mio sito man mano che procedo alle revisioni. Ecco la prima.

Lo scopo di questo capitolo è quello di introdurre la grandezza fondamentale che riguarda i fenomeni magnetici e cioè il vettore induzione magnetica .

Il capitolo si apre con una introduzione di carattere storico-fenomenologica come è nella impostazione di questo corso. La parte di tipo fenomenologica riassume i semplici esperimenti (pratici e/o mentali) che, partendo dalla esistenza dei magneti naturali consentono di arrivare a parlare di poli magnetici e di stabilirne nomenclatura e caratteristiche.

E' bene sapere che il magnetismo, in origine, è stato studiato come un fenomeno a sé stante e dunque a fine 700 è stata enunciata una legge basata sull'inverso quadrato della distanza in cui comparivano le masse magnetiche e una costante universale (la permeabilità magnetica) che giocava il ruolo della costante dielettrica ϵ . Quando iniziai a studiare la fisica (negli anni 60 del XX secolo) molti testi continuavano ad introdurre il magnetismo attraverso la *legge di Coulomb magnetica*.

E' solo a inizio 800 che, osservando le interazioni tra correnti elettriche, che se ne studiano le reciprocità e si arriva a studiare il magnetismo come effetto di correnti elettriche o di cariche in moto. Nel primo paragrafo trovate la genesi e cenni all'epilogo.

Nel secondo paragrafo e terzo vengono descritti i fatti sperimentali che consentono di arrivare alla definizione del vettore B e contestualmente dare la legge che descrive la forza magnetica. La definizione non è semplice da digerire perché il campo magnetico presenta problematiche complicate di orientamento e sul piano delle complicazioni matematiche richiede la introduzione del prodotto vettoriale.

Si definisce la unità di misura, una unità dimensionata malamente perché raramente si hanno campi magnetici dell'ordine del Tesla, ma trattandosi di una grandezza derivata è tutta colpa della definizione dell'unità di corrente. Per altro, con lo sviluppo dei superconduttori, e dell'uso che se ne fa nelle apparecchiature di risonanza magnetica, disponiamo finalmente di campi magnetici in aria dell'ordine del Tesla.

Il quarto paragrafo introduce le due leggi fondamentali dell'elettromagnetismo che consentono, dato un sistema di correnti elettriche, di determinare punto per punto nello spazio il valore del vettore induzione magnetica. Si tratta di due leggi strutturalmente diverse: la prima ha natura

integrale e descrive una proprietà complessiva (nello spazio) del campo magnetico; la seconda ha invece natura differenziale e ci dice, in ogni punto dello spazio quale sia il contributo dato al campo magnetico da ogni piccolo elemento di corrente elettrica.

Come si dimostrano? Non si dimostrano; sono vere e basta e, come molte leggi generali della fisica altro non sono che nostre astrazioni che consentono di descrivere i fenomeni fisici in forma del tutto generale.

Attraverso queste leggi vengono stabilite quelle che esprimono il campo magnetico generato da configurazioni semplici di correnti elettriche quali le spire circolari o i solenoidi (termine introdotto da Ampere) che esprime un insieme di spire ravvicinate (gli avvolgimenti che fanno da base al funzionamento di quasi tutte le macchine elettriche).

Nel quinto paragrafo compare una nuova grandezza fisica che sembra messa lì tanto per dire: il momento magnetico una grandezza che viene definita per l'ago magnetico e per la spira circolare percorsa da corrente. Ma perché complicarsi la vita?

La risposta sta nel fatto che, in fisica atomica e nucleare compaiono proprietà degli atomi e delle particelle elementari che richiedono, per essere descritte, proprio il momento magnetico. Ma c'è di più, per le particelle elementari il momento magnetico è una proprietà intrinseca e non ha bisogno di correnti elettriche. E' così perché la natura è fatta così. Dunque impariamo a conoscerlo perché ci servirà...

Rispetto alla versione ho completamente eliminato un paragrafo che avevo scritto riscritto più volte e ogni volta che lo rileggevo mi lasciava insoddisfatto: si trattava di descrivere il magnetismo come elemento non sostanziale, ma figlio del campo elettrico in ambito relativistico. Su questo terreno è inutile cercare di divulgare senza introdurre la sostanza (le

trasformazioni di Lorentz per il campo elettromagnetico). Non è roba da corsi di fisica generale ed è meglio lasciar perdere.

Il capitolo si chiude con una serie di esercizi di calcolo del campo magnetico utilizzando le due leggi fondamentali. Sono tutti problemi che richiedono l'utilizzo dell'analisi matematica, seppur a livello elementare (in particolare dei rudimenti del calcolo integrale).

Si tratta di problemi molto formativi che ho selezionato con cura dalla miniera di proposte di un testo classico russo (Irodov) che è ancora il testo di riferimento in ambito internazionale. Naturalmente le soluzioni dettagliate sono fatte da me. Consiglio questi problemi (sei in tutto) perché aiutano a strutturare le proprie capacità di *problem solving* e perché in qualche caso smentiscono le leggi sui solenoidi spesso presentate come vere quando tali non sono.

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso –
il [capitolo 0506](#)

elettrotecnica ma con gli occhi del fisico

Per un certo tempo la industria automobilistica ha pensato anche di utilizzarle per l'auto ibrida (Toyota e Honda) dove la batteria ha solo una funzione di tampone per il recupero energetico; ma ormai ci si sta orientando su quelle al litio data la maggiore efficienza (in termini di capacità elettrica) come sulla Fiat Panda che possiedo.

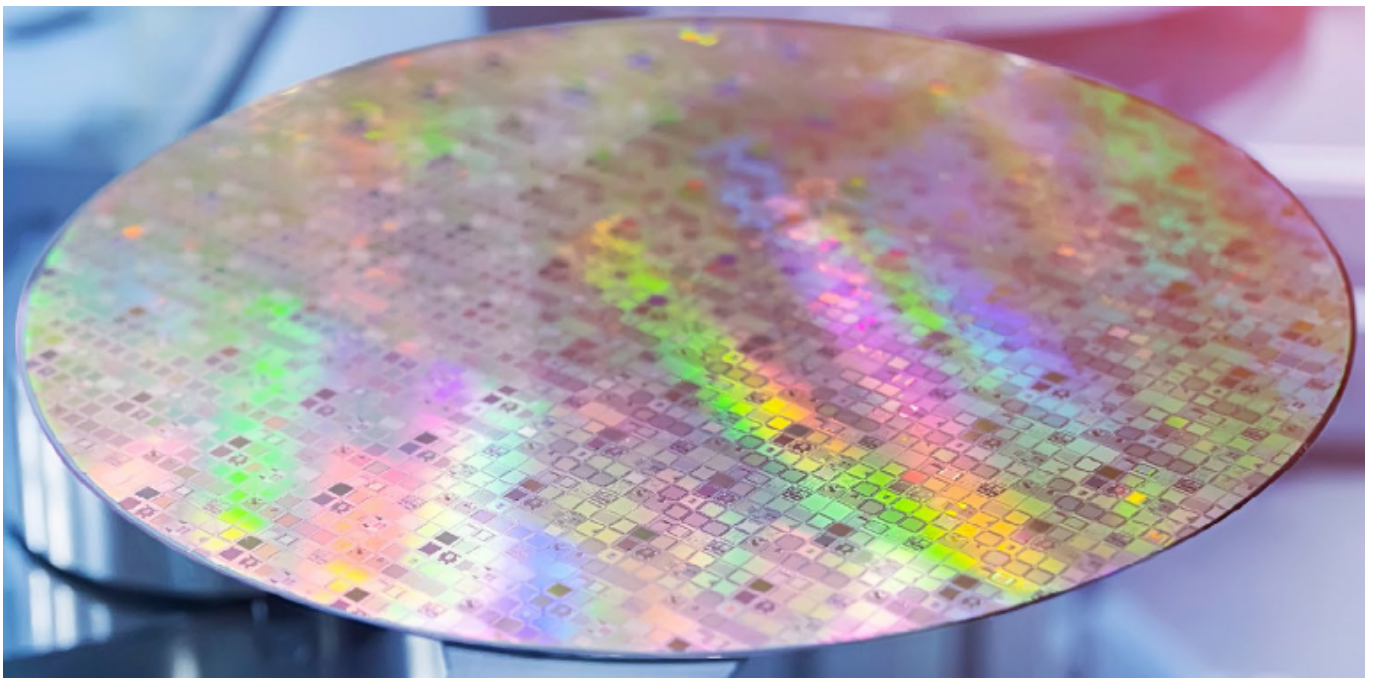
Sia per le batterie al Ni Metal Idruro, sia per quelle alle Litio ho dato una panoramica fornendo in primo luogo le reazioni di ossidoriduzione che le fanno funzionare.

Dopo i primi due paragrafi viene la parte di elettrotecnica: collegamento delle resistenze, reti, reostati e potenziometri, strumenti di misura, shunt, potenza elettrica, fenomeni transitori di carica e scarica dei condensatori... ovviamente con una caterva di esercizi. In questa parte non ho messo cose nuove limitandomi a rileggere il tutto.

Vi segnalo però, da leggere con attenzione, l'ultimo paragrafo dedicato alla sicurezza negli impianti elettrici perché si tratta di una faccenda importante e, anche se non ve ne frega nulla della fisica, è bene che siate informati sulle spine tripolari, sul cacciavite cercafasce, sulla importanza dell'interruttore differenziale, sui valori di pericolosità delle correnti elettriche. Avrei potuto insegnarvi qualche trucco da usare quando il salvavita fa le bizze per colpa di malfunzionamenti di qualche elettrodomestico, ma ho pensato che era meglio non rischiare di fare qualche danno.

Il [corso di fisica](#) – le news e [gli aggiornamenti](#) del corso –
il [capitolo 0505](#)

La corrente elettrica – la conduzione – metalli e semiconduttori



Ogni anno, nel mondo si vendono più di 1'000 miliardi di chip (140 per ogni abitante della terra); stanno cambiando gli equilibri mondiali per effetto della civiltà del silicio: non solo per effetto della microelettronica e questo da solo basterebbe, ma anche per tutte le problematiche legate alla questione energetica e al fotovoltaico. In termini di miniaturizzazione nei chip i singoli componenti hanno raggiunto la dimensione di qualche nanometro (pari alle dimensioni di qualche atomo) e dunque anche l'insegnamento della fisica generale si deve dare una mossa se non vogliamo costruire una *civiltà di zombie* che camminano con in mano uno smartphone sempre più evoluto, ma hanno un livello di consapevolezza sempre più basso.

Ecco a voi la nuova versione del capitolo 4 della V parte: mi sono fatto una semplice domanda. Ha senso continuare a presentare le correnti elettriche come se non vivessimo ormai nella civiltà del silicio e dei semiconduttori? Così il capitolo che, in origine parlava solo della corrente elettrica e della legge di Ohm è stato quasi integralmente riscritto.

Ho conservato alcune delle cose che consideravo e considero degli elementi di forza:

- la attenzione al fatto che alcuni elementi che diamo per scontati o per ovvi, tali non sono; parlo della comprensione che la elettricità, storicamente nata come insieme di mondi separati, era una cosa unitaria il cui carattere unitario era da dimostrare attraverso esperimenti in cui si evidenziassero che le diverse forme di elettricità (comune, chimica, termoelettrica, magnetica, animale, ...) potevano produrre gli stessi fenomeni; parlo anche del fatto che una legge importante come la legge di Ohm è nata quando non esistevano generatori affidabili e non esistevano gli strumenti di misura con cui la presentiamo oggi e dunque Ohm utilizzò come generatori di corrente delle coppie bimetalliche e come misuratori del passaggio di corrente degli aghi magnetici
- la sottolineatura del fatto che la nozione di corrente elettrica è stata elaborata prima che si potesse iniziare a parlare di cariche in moto e con Ampere la corrente ha un carattere primigenio
- il fatto che la differenza di potenziale (legata al carattere conservativo della forza elettrica), la forza elettromotrice (legata necessariamente a campi diversi dal campo elettrostatico) e la caduta di tensione sono cose concettualmente diverse diverse anche se si misurano tutte in volt
- la necessità di utilizzare principi riduzionistici con cui, attraverso modelli, si dà una interpretazione

microscopica di eventi macroscopici; ma nel farlo, non bisogna affezionarsi troppo a tali modelli sia perché hanno natura provvisoria, sia perché, spesso, non spiegano molte altre cose, la cui esistenza non va nascosta sotto il tappeto. Per esempio il modello della conduzione nei solidi, basato su un gas di elettroni in moto disordinato, spiega alcune cose relativamente al comportamento dei metalli, ma incontra difficoltà su altri fronti e non spiega, banalmente, come mai questo gas di elettroni ceda al reticolo cristallino solo la energia del moto ordinato, parte infinitesima di quella del suo moto disordinato anche se, in base al modello, il gas e il reticolo cristallino presentano temperatura molte diverse.

Dunque l'impianto generale è rimasto ma, come accennavo in premessa, ho deciso che era ora di incominciare a parlare seriamente della conduzione nei solidi (metalli, semiconduttori e dielettrici). Parlarne era importante per poter trattare almeno a livello introduttivo dei semiconduttori; ma per trattare della conduzione nei solidi occorre introdurre questioni come livelli energetici discreti, numeri quantici e modifiche ai livelli energetici quando gli atomi si avvicinano e si dispongono secondo strutture regolari, come accade nei solidi cristallini in cui si presentano le cosiddette bande.

Ho fatto, ovviamente, delle scelte di compromesso e, senza entrare troppo nei dettagli di tipo tecnico che richiedono conoscenze, sia fisiche, sia matematiche di tipo superiore. Per questa ragione ho lasciato perdere faccende come i livelli di Fermi e la statistica da cui quel concetto deriva. Per la stessa ragione non sono entrato troppo in dettaglio sulle leggi quantitative che riguardano la conduzione nei semiconduttori.

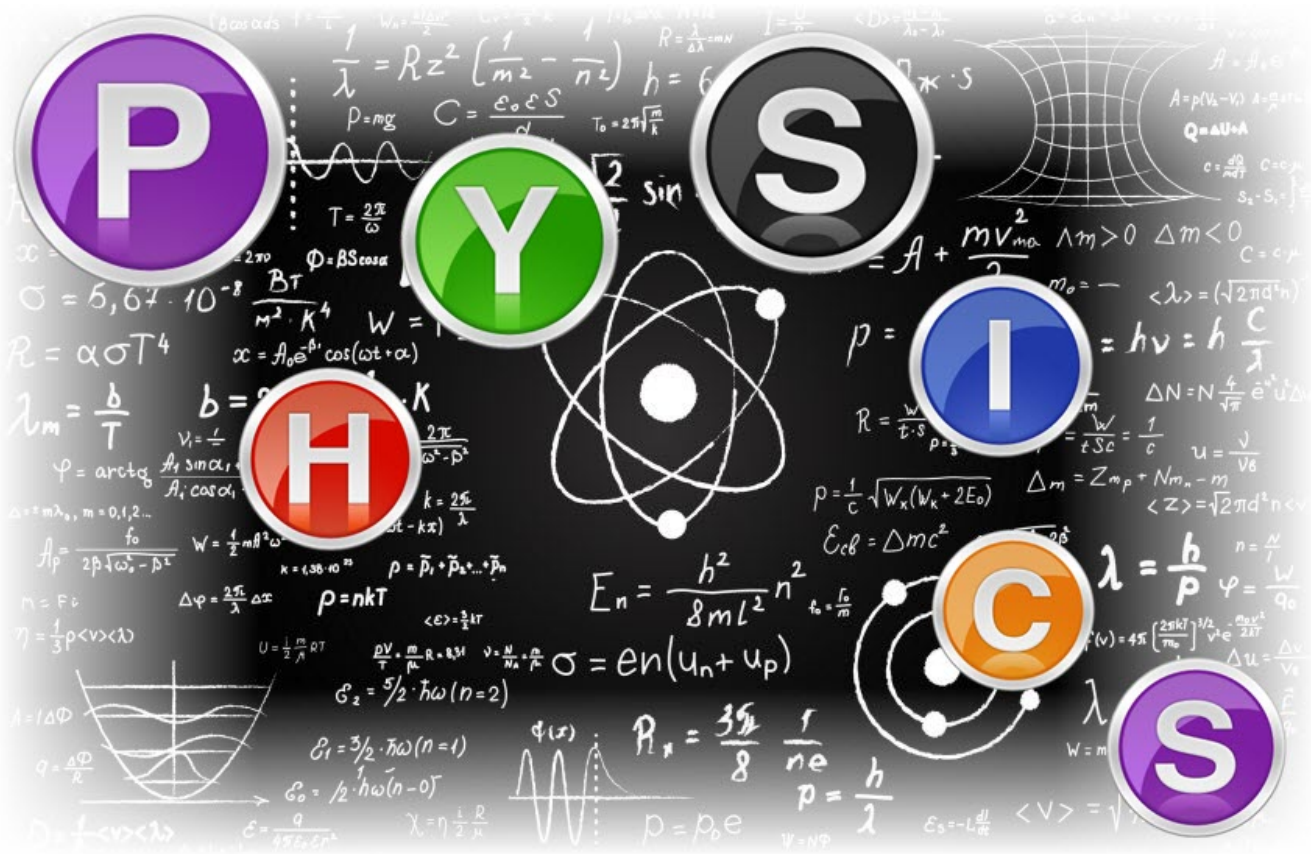
Così le spiegazioni sul funzionamento delle giunzioni da cui nascono i diodi e i transistor sono date in maniera

semiquantitativa, ma intanto ci sono e dunque troverete un po' di cose sugli elementi bipolari (diodi raddrizzatori, zener, led, ...) e tripolari (transistor) su cui si basa la moderna microelettronica (naturalmente ci sono anche le celle fotovoltaiche).

Alla fine siamo passati da circa 40 a 70 cartelle, ma non sentitevi obbligati a leggere tutti i paragrafi e soprattutto a leggere le cose in maniera sequenziale. Sul piano applicativo ho scelto, per quanto riguarda le parti nuove di introdurre molto poco perché si tratta di un corso di fisica generale e non di elettronica o di fisica dei solidi.

La pagina del [corso di fisica](#) – Il link al [capitolo 0504](#)

si ricomincia con la fisica



Il lavoro è incominciato a luglio; è stata molto difficoltoso all'inizio perché ho iniziato proponendomi di completare le parti mancanti e in particolare la Meccanica Quantistica con gli annessi e connessi relativi alla evoluzione e agli sbocchi di questa disciplina.

C'era tanto da studiare sia perché la mia formazione non è quella di un teorico (ho fatto l'indirizzo applicativo elettronico-cibernetico), sia perché ci sono risultati molto importanti (teorici e sperimentali) che datano a partire dagli anni 80, almeno 10 anni dopo la mia laurea.

Prima ho dovuto ristudiare quanto avevo già studiato nel 68 (esame di Istituzioni di Fisica Teorica); ho acquistato sia testi storici come il Messiah, sia più recenti ad impronta classica e poi mi sono buttato su cose più recenti ed è impressionante come sia cambiato negli USA il modo di insegnare la Meccanica Quantistica.

Ho lavorato sulle problematiche connesse all'entanglement sino ad ottobre e mi sono fermato dopo la disuguaglianza di Bell e

la variante CHSH. Comunque sono pronti due nuovi capitoli 0605 (nuova meccanica che introduce alla teoria assiomatica e ai suoi strumenti matematici) e 0606 (meccanica quantistica, trattazione assiomatica, momento angolare, spin, entanglement, ...). Restano da scrivere le parti sugli esperimenti e i problemi aperti dall'entanglement quantistico (teletrasporto e crittografia) ma non ci vorrà molto perché mi sono già chiarito le idee e ho già studiato.

Da ottobre ho ripreso in mano la quinta parte e i primi tre capitoli che rendo disponibili insieme a questo post sono stati prevalentemente di sistemazione e limatura (migliorata la parte sul campo come gradiente del potenziale e rivista con accesso diretto alle fonti, la parte sull'esperimento di Millikan).

Molto più impegnativo il lavoro su 0504 (corrente continua) che pubblicherò nei prossimi giorni perché ho deciso di affrontare il tema della conduzione nei solidi. Questione ardua, perché per trattarne a fondo, bisognerebbe trattare della statistica di Fermi Dirac. Ho usato una linea di compromesso (sottolineando i limiti dei modelli classici di inizio 900) e rinviando le questioni più tecniche alla VI parte quando affronterò anche la teoria dei laser.

Comunque il capitolo è quasi raddoppiato con tutte le problematiche relative alla conduzione nei semiconduttori inclusi diodi e transistor. Ho tolto di mezzo alcune parti relative alle leggi sulla conduzione nei gas perché datate e poco meritevoli di studio (oggi vanno studiati i plasmi).

Vai alla pagina di [segnalazione degli aggiornamenti](#) – Vai al [corso di Fisica Generale](#)

Buona lettura, buono studio e vi terrò informati.