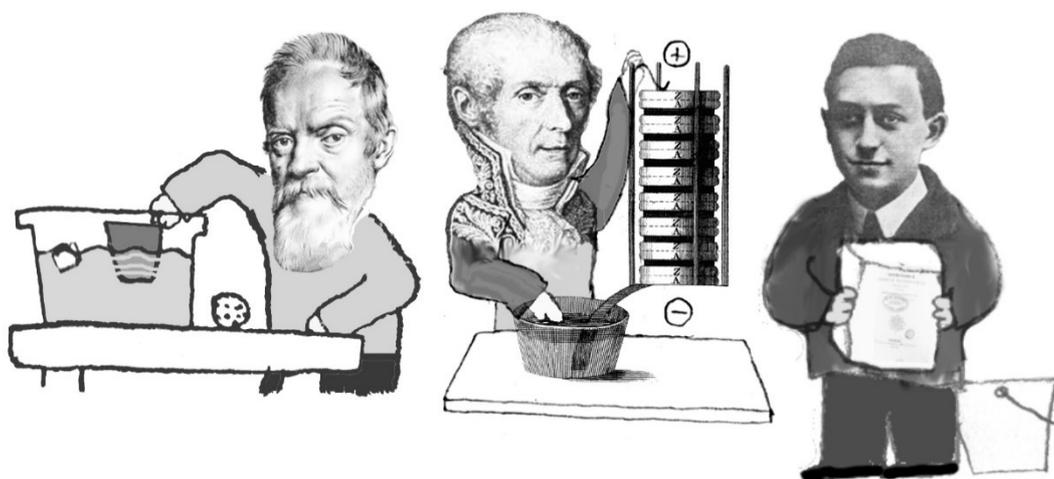


Corso “La Storia della Fisica con Reinventore”

con Antologia ed Esperimenti con materiali semplici
per docenti delle Scuole Superiori e non solo



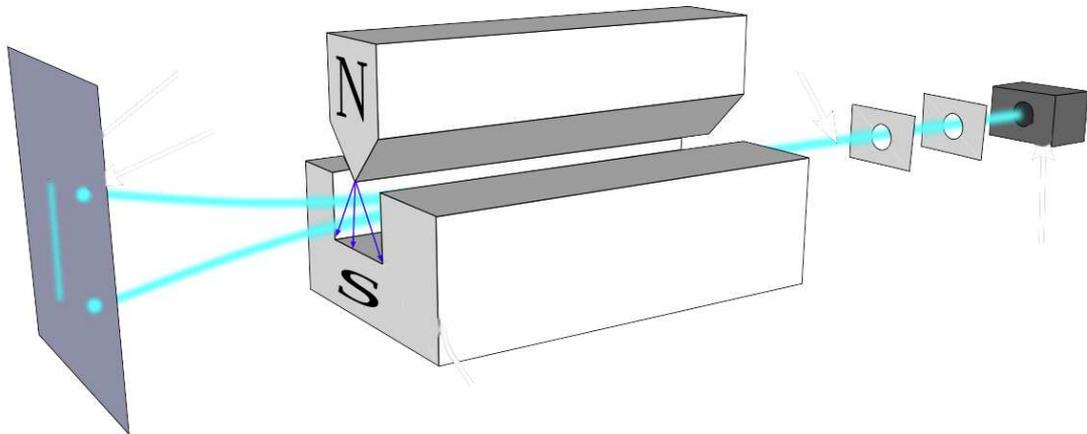
Lezione 8/20

Meccanica Quantistica

Martedì 22 dicembre 2020

A cura del prof. Beniamino Danese
www.reinventore.it

Meccanica Quantistica



Introduzione

Dibattito Storico - Filosofico

pag. 3

Esperimenti

pag. 5

1. Calcite + Led (il principio di sovrapposizione)

1.1 Malus e la polarizzazione - esperimenti

pag. 6

1.2 L'esperimento di Stern-Gerlach nell'insegnamento di Sakurai

pag. 15

1.3 La didattica della fisica e il principio di sovrapposizione

pag. 16

(Michellini-Ghirardi)

2. Elettrone singolo (il principio di indeterminazione)

2.1 Esperimento merli-missiroli-pozzi (1976)

pag. 17

2.2 Cinema Scientifico

pag. 18

2.3 Feynman "l'esperimento più bello"

pag. 19

2.4 Gli esperimenti di Akira Tonomura

pag. 20

3. Esperimenti tratti dal dialogo Einstein – Bohr

3.1 Einstein-Bohr e l'interpretazione di Copenhagen

pag. 21

3.2 Il gatto di Schroedinger

pag. 22

3.3 Il paradosso EPR

pag. 23

4. Landau e la misura ("fondamento e caso limite")

4.1 Lo strumento di misura

pag. 25

4.2 La meccanica classica

pag. 25

"fondamento e caso-limite della meccanica quantistica"

Inoltre:

11 Allegati

26 link

2 prodotti

Introduzione

dibattito storico-filosofico

È ormai quasi un luogo comune parlare delle “implicazioni” o dei “collegamenti” tra meccanica quantistica e filosofia. E certamente, il tema si presta a molti paroloni, molta prolissità, molta confusione (Basti pensare alla famosa “beffa di Sokal”).

Ma soprattutto: perché c'è un “dibattito” con la filosofia? C'è una disciplina (la filosofia) che deve sentirsi minacciata da un'altra disciplina (la fisica) che sta facendo scoperte importanti? (un po' sì, ma non dovrebbe essere così...) Ci sono fisici che pensano che la loro “rivoluzione” in fisica abbia implicazioni in tutte le discipline e in filosofia in particolare? (certo che sì...)

Molti fisici nella prima metà del secolo facevano un po' i filosofi, per esempio:

- Einstein e Planck molto, come abbiamo visto (erano anche stati definiti “i veri filosofi del nostro tempo” da Harnack), Rutherford un po' meno...
- Bohr, e il principio di complementarità, l'interpretazione di Copenhagen, la “realtà”
- Heisenberg, il concetto di “ordine centrale”, il discorso sulla causalità, “fisica e filosofia”

Ci sono quindi dibattiti, guerriccioline, conflitti a volte costruttivi, a volte inconcludenti:

- tra fisica e filosofia, fisici e filosofi, invasioni di campo
- tra fisici pro o contro “l'interpretazione di Copenhagen” (per esempio Bohr vs Einstein)
- tra fisici (Heisenberg: l'osservatore compie la scelta vs Dirac: la natura compie la scelta)
- tra chi decide di occuparsi solo di fisica, o solo di esperimenti, e chi invece si avventura al di là di questi, in altri campi che si sono venuti a chiamare “fondamenti” o “filosofia della fisica” o “storia della fisica”.

C'è quindi quest'area molto vasta fisica-filosofia-fondamenti-paroloni-etc e in questa introduzione segnaliamo alcuni punti di riferimento che abbiamo trovato utili.

- 1) Un “librone” ovvero una **antologia** che raccoglie molti contributi dei fisici su temi filosofici. Si intitola “Quantum Theory and Measurement”. Fonti originali dunque, le opinioni dei protagonisti del dibattito.

LINK 01 - Quantum Theory and Measurement, edited by Wheeler e Zurek (1983) [LINK](#)

- 2) Una “mappa” approfondita delle varie questioni dibattute si può trovare nel lavoro di **Mario Bunge**, un fisico-filosofo argentino morto più che centenario nel febbraio 2020. Del suo lavoro si è ampiamente occupato **Michael R. Matthews**, fondatore della rivista “Science & Education” e presidente della **Teaching Commission** della IUHPS (International Union of the History and Philosophy of Science). In quest'ambito (storia e filosofia della scienza collegate con science teaching) c'è un vasto network di studiosi e associazioni che si raggruppa con l'acronimo **HPS&ST** (History and Philosophy of Science AND Science Teaching).

Qui il link al sito HPS&ST, con molte risorse e links.

LINK 02 - www.hpsst.com/resources.html

Tra le risorse disponibili su questo sito c'è in bella evidenza una introduzione molto istruttiva e leggibile alla vita e opera di Bunge scritta da Matthews.

LINK 03 - [“Mario Bunge: An Introduction to His Life, Work and Achievements”](#)

Tra gli articoli di Bunge, infine, segnalo:

LINK 04 - [“Survey of the Interpretations of Quantum Mechanics” \(AJP 1956\)](#)

LINK 05 - [“Twenty-five centuries of Quantum Physics” \(Science&Education, 2003\)](#)

In generale, Bunge e i vari lavori del vasto network HPS&ST possono offrire molti utili spunti anche solo per un'occhiata veloce sul fronte fisica-filosofia, non solo sulla meccanica quantistica. È un inglese molto chiaro e leggibile.

- 3) E infine, facciamo riferimento a **Stanley L. Jaki**, alle sue Gifford Lectures da cui abbiamo già attinto per Planck e Einstein. C'è una lecture intitolata “I corni della complementarità”. È una introduzione originale e “battagliera” al dibattito, schierata “con” Einstein e Schroedinger e “contro” l'interpretazione di Copenhagen. Vi si possono trovare importanti citazioni e riferimenti.

LINK 06 - [“The Horns of Complementarity” \(1976\)”](#)

E per finire, o meglio per cominciare, un breve richiamo a Erodoto.

Erodoto è il padre della storiografia, il padre della storia (così lo ha definito Cicerone). La storia che Erodoto racconta è quella tra Greci e Persiani.

C'è un risvolto personale: Erodoto è figlio di madre greca e padre persiano. E all'inizio della sua opera scrive:

«Questa è l'esposizione delle ricerche di Erodoto di Alicarnasso, perché gli eventi umani non svaniscano con il tempo e le imprese grandi e meravigliose, compiute sia dai Greci che dai barbari, non restino senza fama; in particolare, per quale causa essi si fecero la guerra.»

Perché si sono fatti la guerra, Greci e Persiani? Una domanda difficile, e intrigante, per il figlio di una greca e un persiano, che invece li vedeva volersi bene.

È una bellissima domanda, una delle domande che fanno i bambini, e difatti l'ho ripresa da una conferenza del maestro Lorenzoni, che raccontava che era stata una sua giovanissima alunna a notare questo interrogativo.

Ma è una domanda che va bene riguardo ai nostri fisici-filosofi, novelli greci-barbari: perché si sono fatti la guerra? il dibattito? Perché si baruffa sull'interpretazione di Copenhagen? O sul realismo, l'indeterminismo, la non-località?

(“Hanno ragione tutti e due... hanno delle buone ragioni tutt'e due... vediamole...”)

esperimenti

in armonia con il corso cerchiamo di articolare l'esposizione intorno agli esperimenti. Ne abbiamo scelti 4 gruppi:

- 1) esperimenti con la luce e i cristalli di calcite
- 2) esperimenti sulla diffrazione di elettroni
- 3) esperimenti tratti dal dialogo Einstein-Bohr
- 4) Landau e la misura

L'inizio è quindi molto semplice, con esperimenti di ottica ondulatoria (o meglio ottica elettromagnetica): l'introduzione della **polarizzazione**.

Ci sono polarizzatori e cristalli di calcite. Led, luci e riflessi. Polarizzatori orientati.

Consistenti con questi esperimenti ci sono i beam splitter (si tratta sempre di riflessione-rifrazione, cui potrebbero seguire gli interferometri dove i raggi si riuniscono e gli esperimenti a singolo fotone) e poi l'esperimento di Stern-Gerlach (anch'esso un beam splitter in un certo senso).

In questo gruppo di esperimenti prende posto anche il grande lavoro condotto sull'insegnamento della meccanica quantistica da Marisa Michelini, Gian Carlo Ghirardi e il gruppo dell'Università di Udine, con al centro il **principio di sovrapposizione**.

Il secondo esperimento è quello della **diffrazione di elettroni**, magistralmente raccontato da Feynman nelle sue Lectures (nelle sue varianti di esperimento coi proiettili, con le onde, con gli elettroni). L'esperimento fu poi sperimentalmente realizzato da tre fisici italiani e riproposto in un breve documentario.

Questo esperimento illustra il **principio di indeterminazione**. Bunge (e altri) dicono in modo abbastanza convincente che è un teorema, non un principio.

Il terzo gruppo di esperimenti è legato al **dialogo Einstein - Bohr**.

Da lì si sviluppano diverse linee, una è il "gatto di Schroedinger" (con tutti i possibili riferimenti ad oggetti quantistici macroscopici tipo condensati di Bose-Einstein eccetera), un'altra sono i paradossi sulla non-località (anch'essi legati a semplici esperimenti mentali).

E infine una sottolineatura alla natura particolare del legame tra meccanica classica e meccanica quantistica, che non si traduce semplicemente ne "la meccanica quantistica nel limite $\lambda \rightarrow 0$ si riduce alla meccanica classica, un po' come la relatività ristretta diventa meccanica classica al limite $c \rightarrow \infty$ ". No, è più interessante di così.

Su questo argomento prendiamo come guida un testo di Landau, in cui gioca un ruolo importante e generale **lo strumento di misura**, l'apparatus sperimentale, con le sue graduazioni e le sue lancette. Esso diventa il protagonista del "quarto esperimento".

1. Calcite + Led (il principio di sovrapposizione)

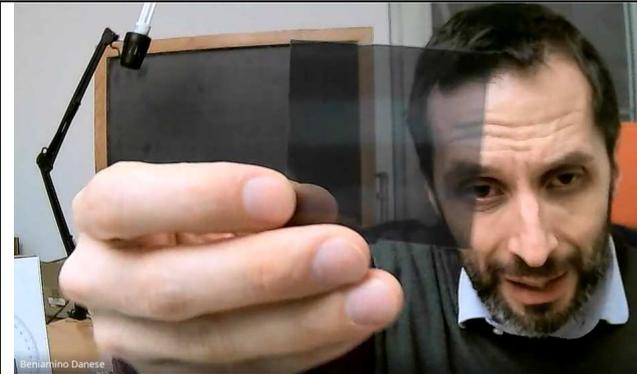
Il grosso di questo capitolo è di “fisica classica” (ottica elettromagnetica). Sono gli esperimenti fatti in diretta nel video, che illustrano la polarizzazione della luce (1.1). È una parte sviluppata in modo abbastanza originale, con polarizzatori e cristalli di calcite.

Viene poi la “fisica quantistica”, impostata principalmente con riferimenti e allegati. Sakurai usa l’analogia con i polarizzatori (1.2), Michellini-Ghirardi e il gruppo di Udine propongono analogie ed esperimenti con i cristalli di calcite (1.3).

Poiché dunque (a) la polarizzazione della luce viene usata in queste due importanti esposizioni della meccanica quantistica, e (b) è un importante fenomeno che illustra l’ottica elettromagnetica, abbiamo ritenuto opportuno eseguire gli esperimenti sulla polarizzazione nel modo più chiaro e completo.

1.1 Malus e la polarizzazione - esperimenti

(1) Presentazione foglio polarizzatore (e cristallo di calcite)

	
<p>foglio polarizzatore</p> <p>i “polarizzatori” sono stati inventati in forma di fogli a basso costo nel 1929 da Edwin Land. Erano già stati sintetizzati nel 1852 come micro-cristalli dal chimico Herapath.</p> <p>ALLEGATO 01 “i polarizzatori, neri come la mezzanotte”</p> <p>Il primo esperimento da effettuarsi con un polarizzatore (cui fa riferimento l’allegato) è quello di due polarizzatori “incrociati” tra due persone (si veda oltre).</p> <p>Prodotto 01 - Polarizzatore</p>	<p>cristallo di calcite</p> <p>Rasmus Bartholin è lo scopritore del fenomeno di <u>birifrangenza</u> attraverso il cristallo di calcite (1669).</p> <p>ALLEGATO 02 “attraverso la calcite si vede doppio”</p> <p>È il primo esperimento da effettuarsi con un cristallo di calcite (si veda oltre). Malus (1810) usa la calcite, non i polarizzatori che ancora non c’erano.</p> <p>Prodotto 02 – Cristallo di Calcite</p>

(2) Apparato sperimentale



C'è una lampada e un vetro in cui si vede il riflesso della lampada.

Il piano di incidenza su cui giacciono il raggio incidente (dalla lampada al vetro) e il raggio riflesso (dal vetro all'occhio o webcam) è mostrato in figura.

Quello che non è mostrato in figura, e che inizialmente si può tacere (ma prima o poi bisognerà dire), è che l'angolo di incidenza non è un angolo qualsiasi: è l'*angolo di Brewster*, nel nostro caso circa 57° .

Per allestire questo esperimento dimostrativo bisogna dunque sapere già il risultato, ovvero, posizionare lampada vetro e osservatore nel modo in cui l'effetto è massimo (l'angolo per il quale l'uso del polarizzatore sopprime completamente il riflesso. Ovvero, la luce riflessa è *completamente polarizzata* all'angolo di Brewster, e solo *parzialmente polarizzata* per altri angoli).

(3) La luce riflessa è polarizzata

Ripetiamo (reinventiamo) la scoperta di Malus. Guardando il riflesso del sole attraverso un cristallo di calcite, Malus si accorse che la luce del riflesso era polarizzata. Contrariamente alla luce del sole, che non è polarizzata.

Fu Malus a introdurre il termine “luce polarizzata”, “polarizzazione della luce”.



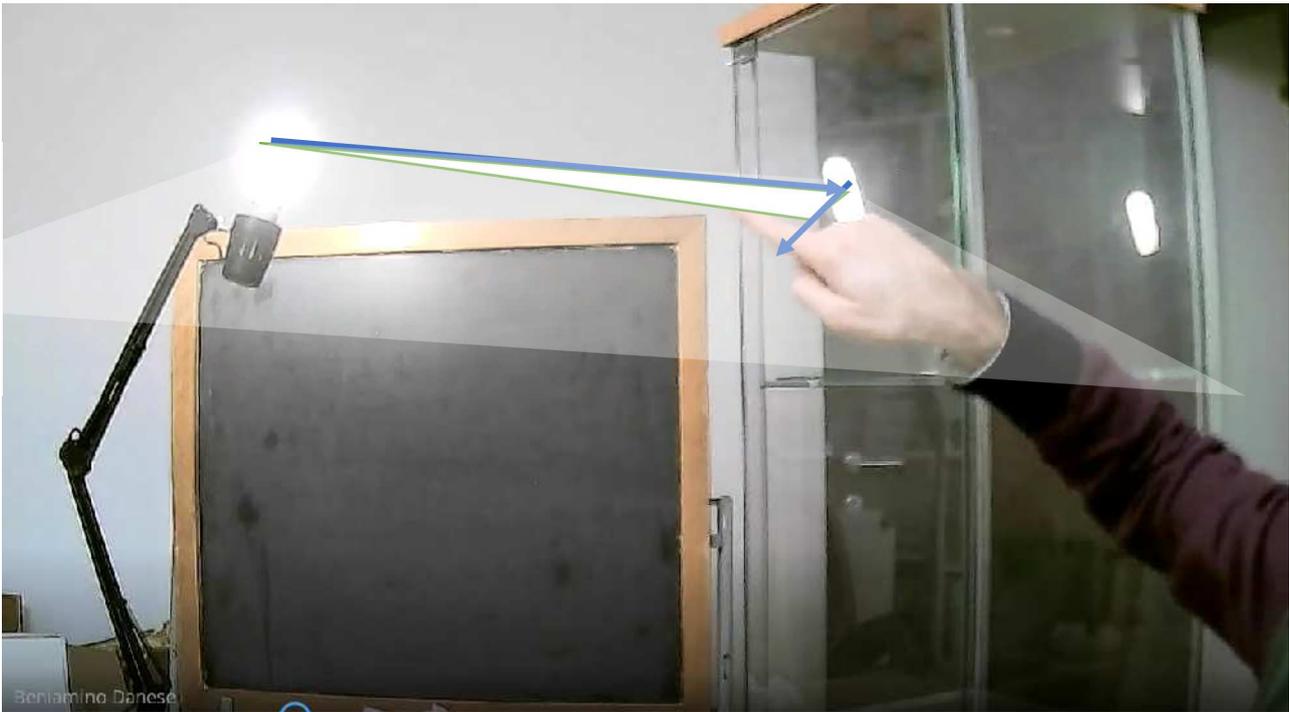
l'intensità
della luce proveniente dalla lampadina
che attraversa il polarizzatore
rimane costante
ruotando il polarizzatore

la luce della lampadina NON è polarizzata

l'intensità
della luce proveniente dal riflesso
che attraversa il polarizzatore
cambia
ruotando il polarizzatore

la luce proveniente dal riflesso è polarizzata

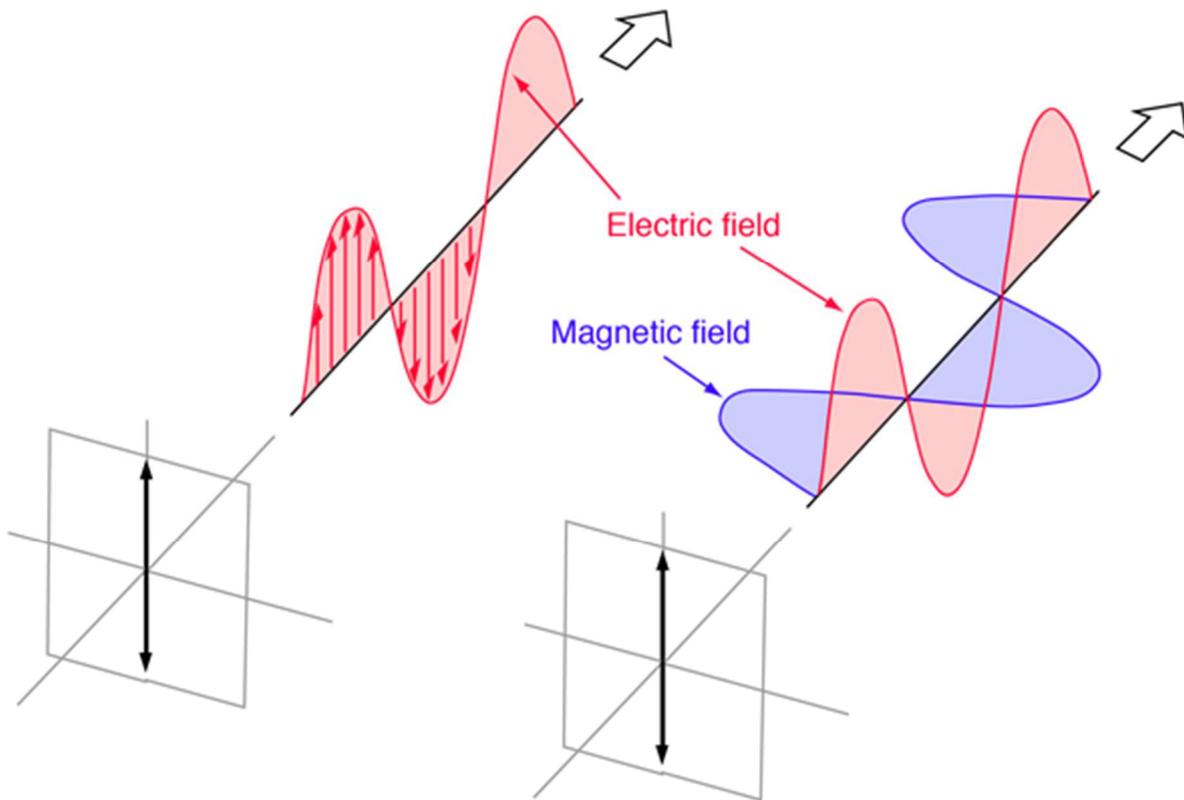
(4) disegnare linee sul polarizzatore



L'esperimento di Malus (la luce del riflesso è polarizzata e ruotando il polarizzatore possiamo sopprimerla) ci permette di "caratterizzare" il polarizzatore.
Quando la luce riflessa è soppressa disegniamo una linea **perpendicolare al piano di incidenza**.

Questa linea rappresenta una delle tante molecole o cristalli lineari che costituiscono il polarizzatore, tutte parallele, e che agiscono come tante "antenne" che assorbono o meno la luce. In questo senso il polarizzatore è un oggetto molto importante per raccontare l'ottica elettromagnetica.

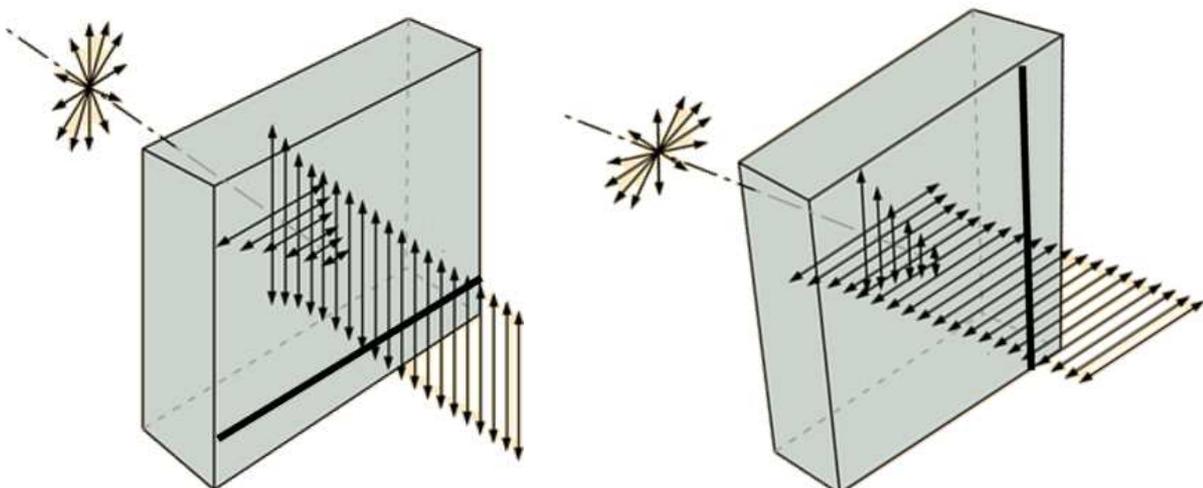
L'ottica elettromagnetica dice che la luce è un'onda elettromagnetica trasversale, ovvero l'oscillazione è del vettore campo elettrico.
 In particolare, un'onda elettromagnetica piana è linearmente polarizzata, il campo elettrico oscilla in una data direzione (verticale in figura).



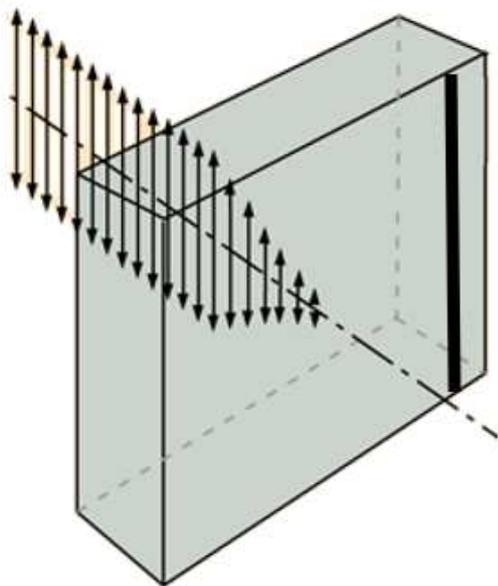
I quadrati nel disegno rappresentano la polarizzazione della luce. La linea in grassetto, insieme alla direzione di propagazione, forma il “piano di polarizzazione” in cui oscilla il campo elettrico (figura rossa).

La linea disegnata sul nostro polarizzatore rappresenta le “antenne” che assorbono la luce, quella che oscilla nella direzione dell'antenna.

Pertanto se un polarizzatore viene attraversato da luce non polarizzata, questa esce dal polarizzatore polarizzata in direzione perpendicolare alla linea disegnata.



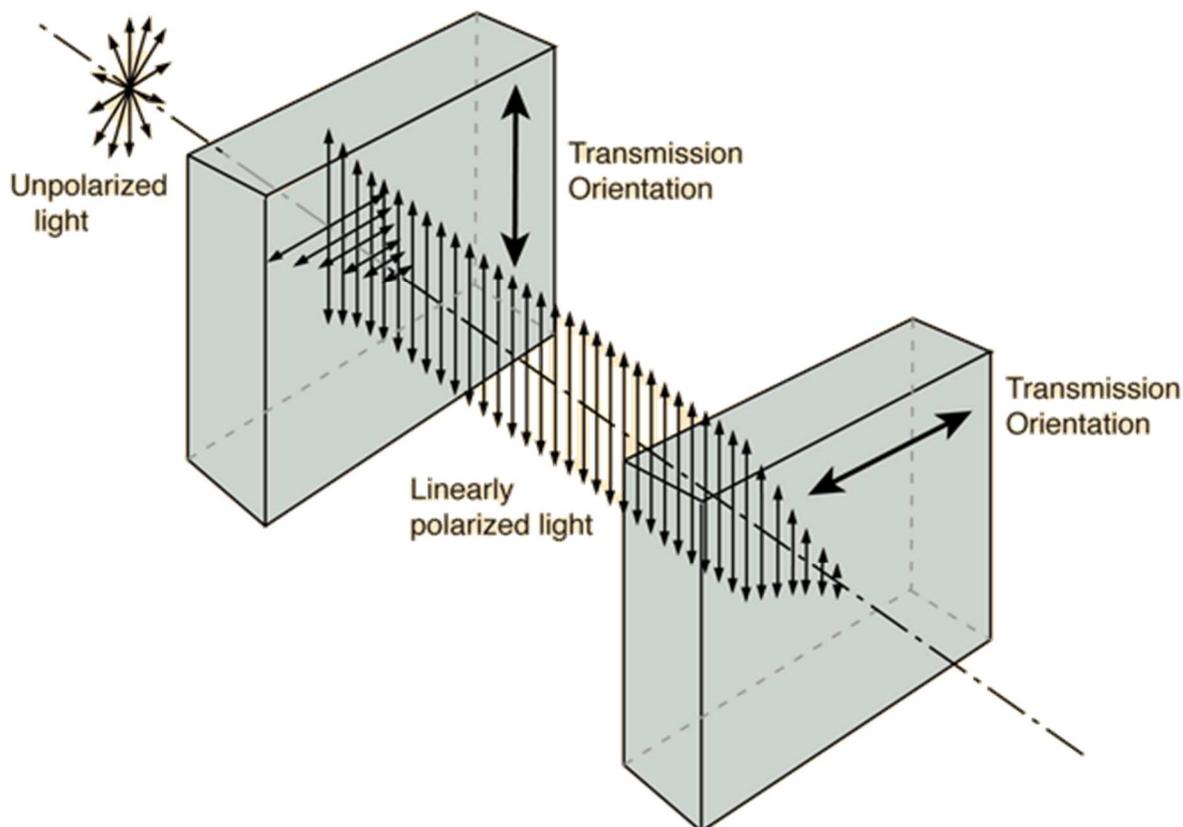
Se il polarizzatore viene attraversato da luce polarizzata, come nel caso del riflesso, si possono ruotare le “antenne” affinché siano parallele al piano di polarizzazione, e così esse assorbono la luce.



All'angolo di Brewster, la luce riflessa è polarizzata perpendicolarmente al piano di incidenza.

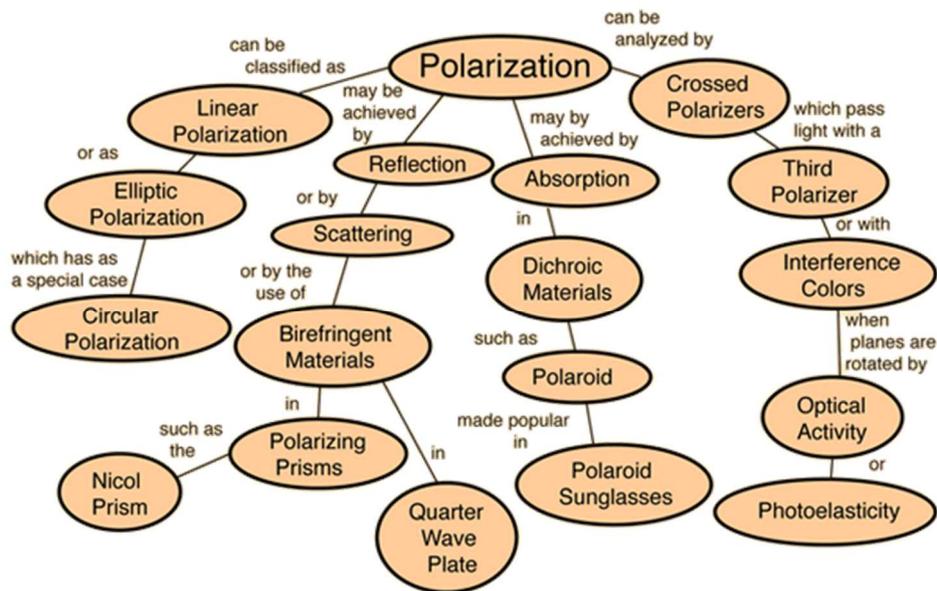
Con le linee disegnate sul polarizzatore si può ripetere l'esperimento dei polarizzatori incrociati, “neri come la mezzanotte”.

Il sito HyperPhysics dell'Università della Georgia fornisce belle illustrazioni (ne abbiamo attinto per le nostre immagini). È indicata la “direzione di trasmissione”, perpendicolare alle nostre “antenne”.



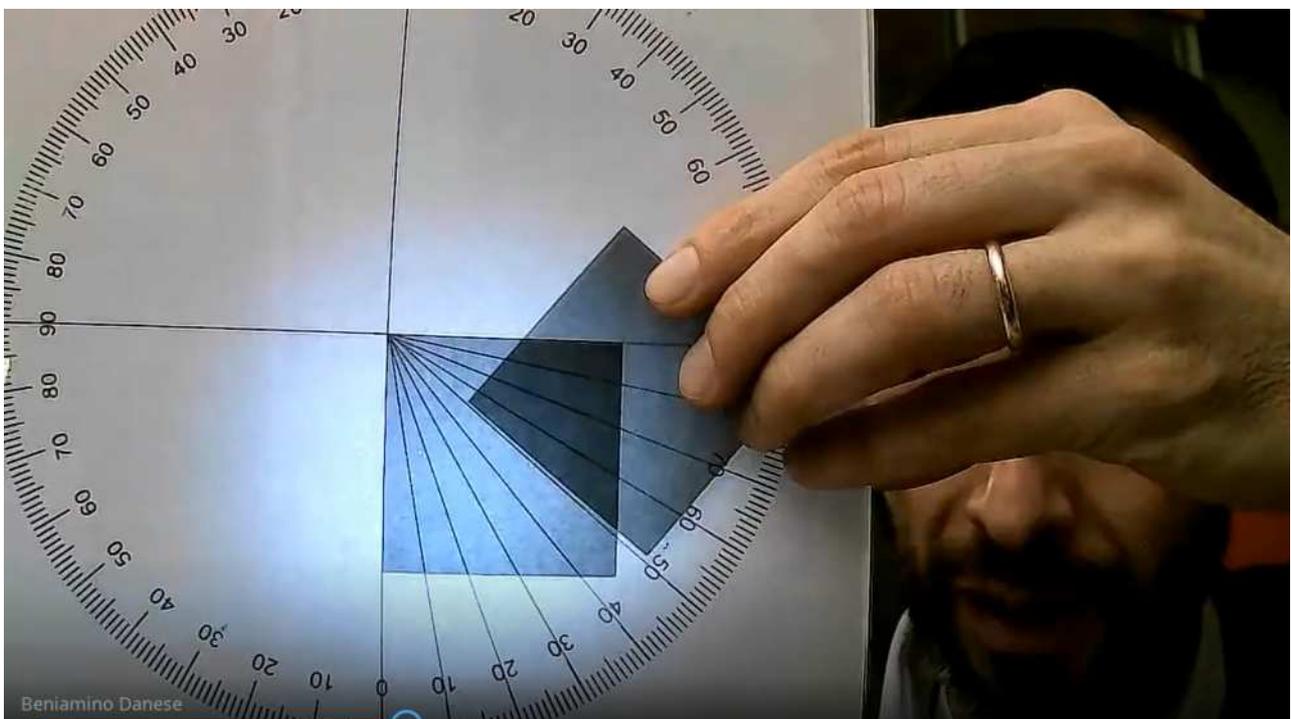
HyperPhysics è un buon sito di riferimento per approfondimenti sulla polarizzazione, come indicato da questa mappa concettuale degli argomenti trattati.

LINK 07 – [HyperPhysics, Polarization Concepts](#)



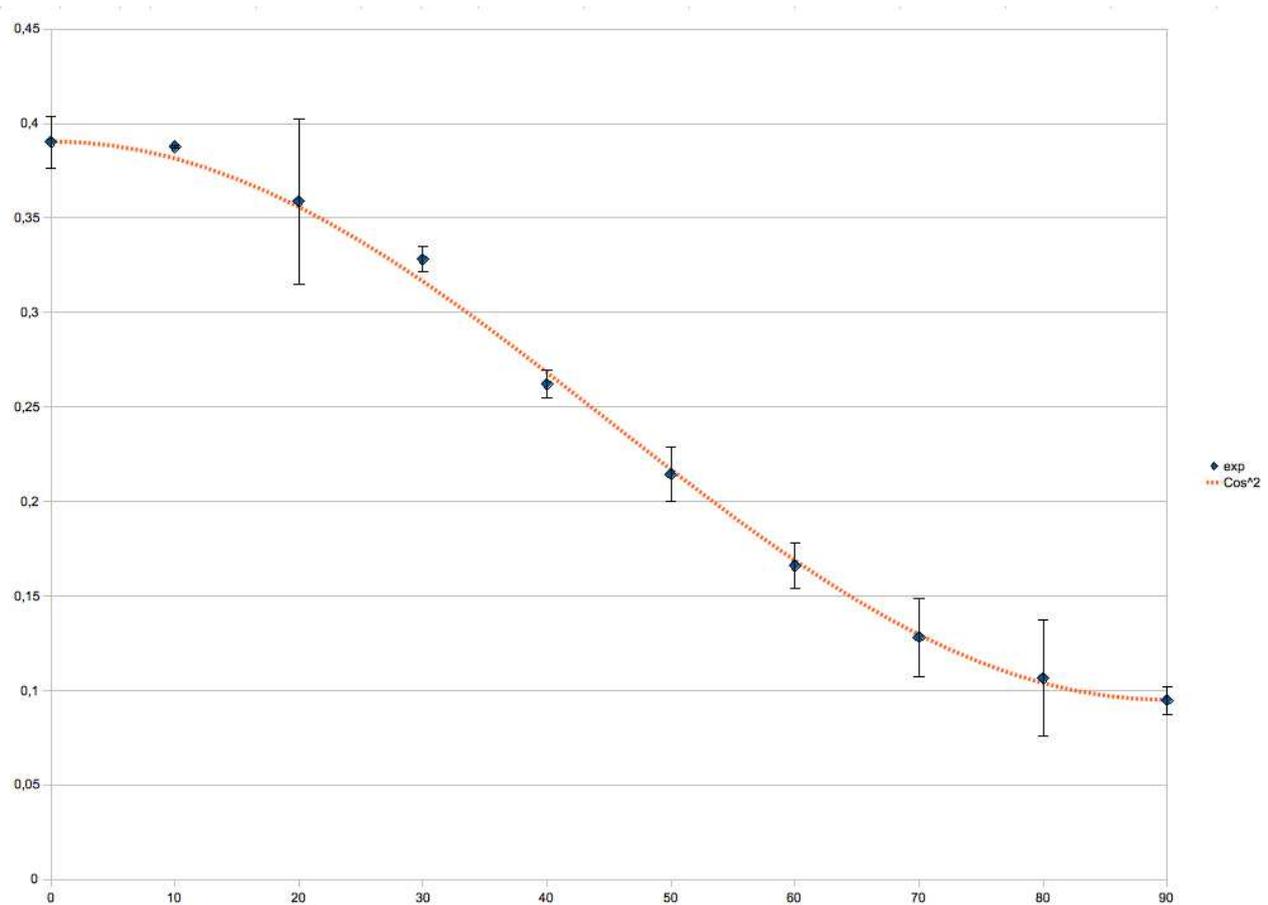
(5) legge di Malus (quantitativa)

L'esperimento dei "polarizzatori incrociati" si può realizzare anche in modo quantitativo.



$$I(a) = I_0 \cos^2(a)$$

Si può effettuare la “verifica della legge di Malus” stampando un foglio graduato (per la misura degli angoli) e scattando foto con lo smartphone e usando il “contagocce” in un qualsiasi programma di grafica, che restituisce numeri da 0 a 255.



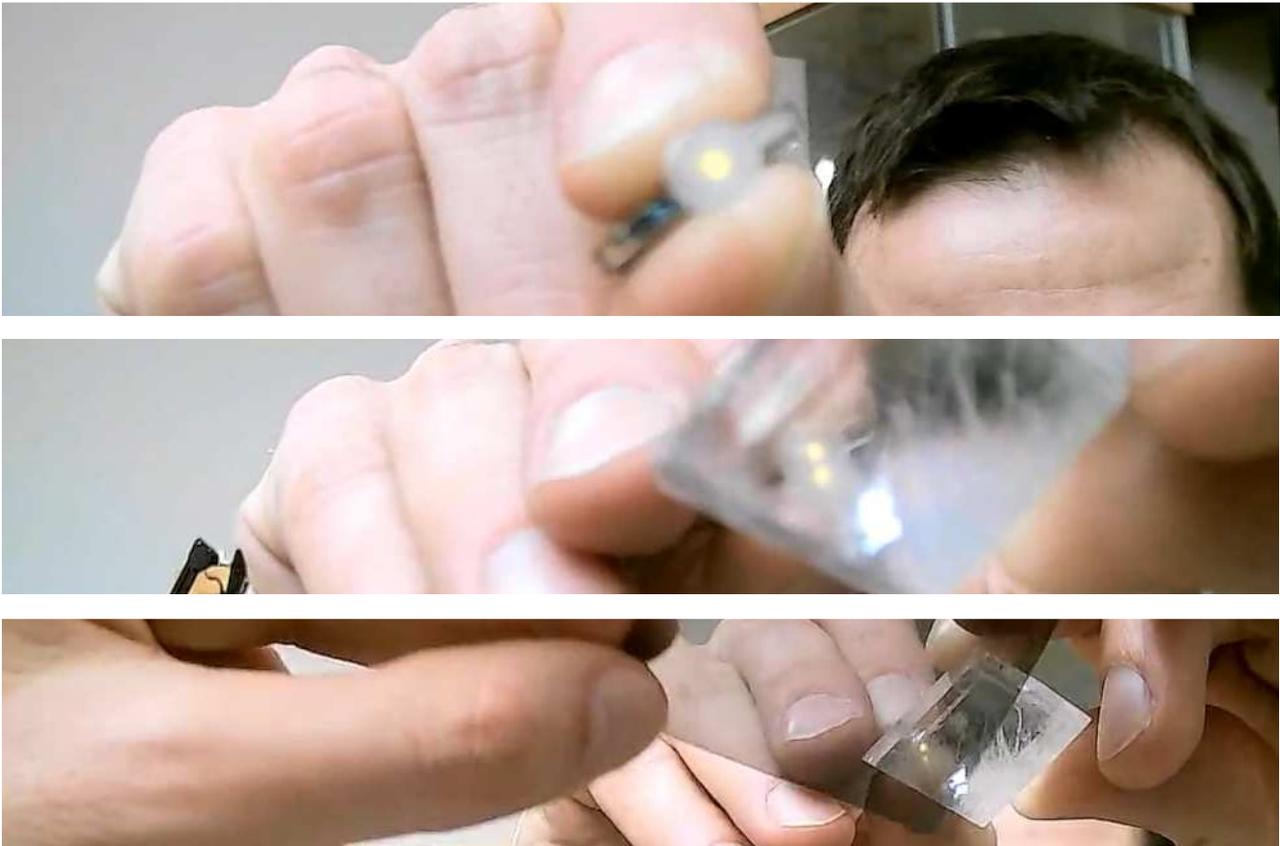
Nella dimostrazione in video, usando come fonte di luce la lampada, l'intensità non è uniforme. È meglio attaccare il foglio alla finestra, e usare il cielo come fonte di luce. Si vedano a questo scopo le foto nell'allegato

ALLEGATO 03 – “Malus e lo Smartphone”.

(6) l'esperimento di Malus con la calcite e un led al posto del sole

Si può avere un'idea di quello che vide Malus guardando un piccolo led luminoso (l'equivalente del sole), fatto passare attraverso un polarizzatore (l'equivalente del riflesso dal vetro), e poi attraverso il cristallo di calcite.

ALLEGATO 04 – “I riflessi sono polarizzati”.



Ruotando il cristallo (o il polarizzatore) si vede una “danza” dei due punti luminosi. Essi ruotano uno intorno all'altro (è il fenomeno della birifrangenza) ma scompaiono e ricompaiono alternatamente ogni 90° di rotazione. E questo indica che i due raggi della birifrangenza hanno polarizzazioni perpendicolari. Non è un effetto facile da scorgere. Certamente Etienne Malus “aveva occhi per vedere”. E aveva occhi per vedere non solo in fisica. Prese parte alla spedizione di Napoleone in Egitto, e documentò gli orrori della guerra nella “Agenda (o Diario) di Malus”, pubblicato postumo dopo la sua morte prematura a soli 37 anni.

1.2 L'esperimento di Stern-Gerlach nell'insegnamento di Sakurai

L'allegato vuole fornire una esposizione al libro di un grande fisico e insegnante. L'insegnante è Jun John Sakurai e il libro è "Meccanica Quantistica Moderna", rimasto incompiuto alla fine del 1982 per l'improvvisa morte dell'autore, e completato dai suoi studenti.

E così l'allegato comincia con la "Presentazione" (di John S. Bell, CERN, sì il Bell della disuguaglianza o teorema di Bell), poi c'è la "Prefazione" (di San Fu Tuan) e un breve "In Memoriam".

C'è poi l'Indice e si comincia con il Capitolo 1, Concetti Fondamentali. Il punto di partenza è un esperimento, l'Esperimento di Stern-Gerlach, e la sua discussione. È una esposizione moderna e originale, "ma" (o "e"), comincia con un esperimento.

Capitolo 1 – Concetti Fondamentali

(intro)

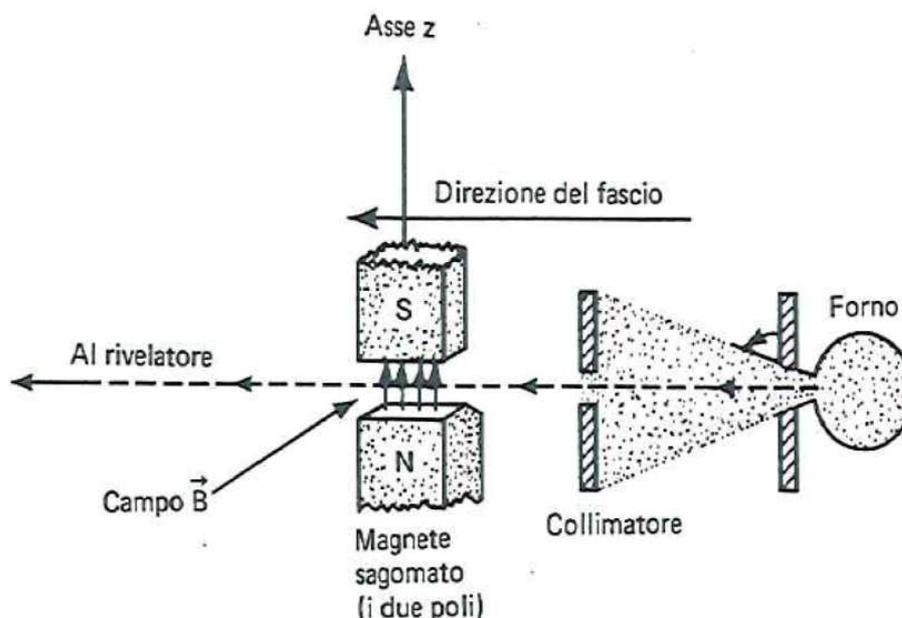
"Il modo più tradizionale per cominciare a studiare la meccanica quantistica è di seguire i suoi sviluppi storici..."

"tuttavia in questo libro non seguiamo il metodo storico ma iniziamo con un esempio che illustra, in modo fondamentale, forse meglio di ogni altro esempio, la inadeguatezza dei concetti classici."

(1.1)

L'esperimento di Stern-Gerlach: descrizione dell'esperimento – esperimenti di Stern-Gerlach sequenziali – analogia con la polarizzazione della luce.

È bene ricordare – come è scritto nella Prefazione – che "Quest'opera è destinata a studenti che abbiano già studiato meccanica quantistica, non certo a dei principianti". Tuttavia questo primo capitolo, per la sua chiarezza cristallina, è raccomandabile a chiunque.



ALLEGATO 05 – "L'esperimento di Stern-Gerlach" (da Meccanica Quantistica Moderna).

1.3 La didattica della fisica e il principio di sovrapposizione

Sul tema annoso della “didattica della meccanica quantistica alle scuole superiori” alcune pagine notevoli sono state scritte in italiano.

Notevole sotto molti punti di vista: teorico, didattico, di formazione degli insegnanti, con scuole estive per gli studenti appassionati.

È un lavoro cominciato all’Università di Udine da GianCarlo Ghirardi e Marisa Michelini, e proseguito negli anni da quest’ultima e il suo gruppo di ricerca (tra le molte persone almeno una da citare è Alberto Stefanel).

La migliore introduzione a questo lavoro si trova nel ricordo di GianCarlo Ghirardi scritto da Marisa Michelini su La Fisica Nella Scuola (AIF) nel 2018.

Tra parentesi, Marisa Michelini è la figura più importante della didattica della fisica in Italia, responsabile del gruppo di ricerca in didattica della fisica più numeroso e attivo (all’Università di Udine: “l’Unità di Ricerca in Didattica della Fisica” e il “Centro Laboratorio per la Didattica della Fisica”). Attivo su molti fronti, tra cui: l’insegnamento della meccanica quantistica, i dottorati, le scuole estive per studenti delle superiori, la formazione degli insegnanti della primaria, l’insegnamento con esperimenti...

Il testo è molto sintetico ma ricchissimo di informazioni, e anche di umanità.

(si trova in allegato o direttamente in link per chi è socio AIF)

ALLEGATO 06 – “In ricordo di GianCarlo Ghirardi” (Michelini, LFnS, 2018)

LINK 08 – <https://www.aif.it/articolo-rivista/in-ricordo-di-giancarlo-ghirardi/>

Tra i testi di G.C. Ghirardi citati:

LINK 09 – “[Un’occhiata alle carte di Dio](#)” (1997) (anteprima su Google Books)

LINK 10 – “[Symmetry Principles in Quantum Physics](#)” (1970) (consultazione su Archive.org)

Per i contributi specificamente didattici, la produzione è molto ampia. Si veda:

ALLEGATO 07 – “Avvicinarsi alla teoria della fisica quantistica” (Michelini-Stefanel 2004)

LINK 11 – [sito web](#)

LINK 12 – “[La meccanica quantistica nella scuola secondaria](#)” (Slides, Michelini, 2011)

LINK 13 – “[modulo di formazione insegnanti](#)” (sito con schede, bibliografia...)

Per un quadro degli esperimenti con i cristalli di calcite:

LINK 14 – “[La polarizzazione della luce](#)” (libricino PDF)

http://www.fisica.uniud.it/URDF/interreg/quanto/schede_stu/schede_stu_it.htm

2. Elettrone singolo (il principio di indeterminazione)

2.1 Esperimento Merli-Missiroli-Pozzi

L'esperimento di INTERFERENZA DI ELETTRONI SINGOLI è nato negli anni 20 del Novecento come esperimento "mentale" per illustrare un effetto sorprendente della fisica quantistica (l'apparente "doppio" comportamento onda-particella dell'elettrone) e per molto tempo è stato ritenuto di impossibile realizzazione per via di difficoltà tecniche.

Nel 1974 tre ricercatori italiani, Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi, superarono quelle difficoltà tecniche e lo realizzarono, utilizzando un microscopio elettronico opportunamente modificato.

Pubblicarono il primo resoconto su una rivista internazionale e ne raccontarono la realizzazione nel filmato "Interferenza di elettroni" (1976).

LINK 15 – [Film "Interferenza di elettroni"](#)

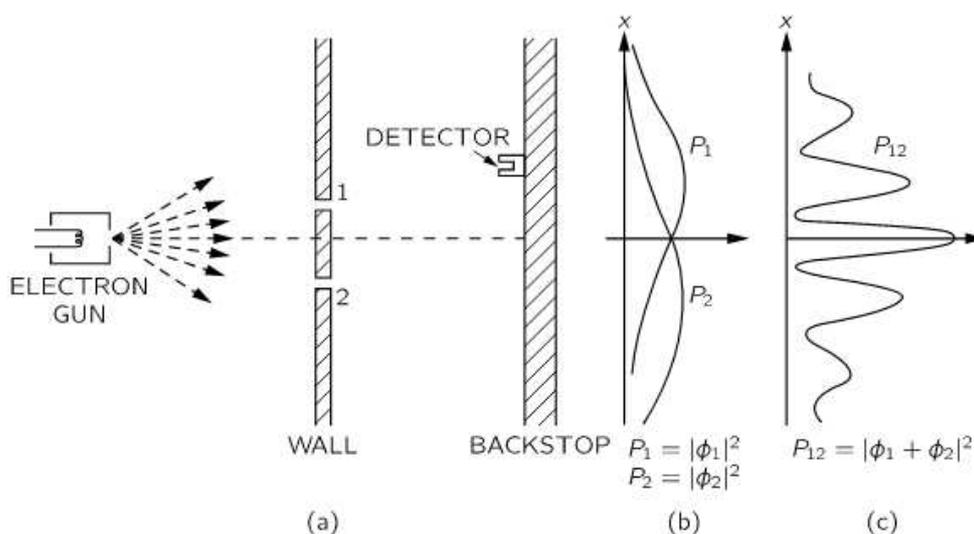
Sull'impresa è online anche un sito dedicato, bellissimo.

LINK 16 – Sito ["L'esperimento più bello della fisica"](#)

Ci sono anche brevi clip, interviste, articoli dell'epoca, inquadramento storico.

Un breve articolo in PDF, pubblicato anni dopo dagli autori su "Il nuovo saggatore" fornisce un riassunto della vicenda dell' "esperimento più bello della fisica".

LINK 17 – ["L'esperimento di interferenza degli elettroni singoli"](#) (Il nuovo saggatore, 2003)



2.2 Cinema Scientifico

Poiché il documentario “Interferenza di Elettroni” vinse anche un premio come film-documentario scientifico, è opportuna almeno una parola sul “Cinema Scientifico”, questa forma d’arte e insegnamento.

Queste lezioni sono anche una “mappa”, forniscono “indicazioni”. C’è molto su questo argomento, c’è molto su internet. Ma a volte per trovare bisogna già sapere cosa si cerca, e per questo mi sembra importante una indicazione.

Per molti anni si è tenuto a Milano e in altre città d’Italia un festival di divulgazione scientifica, un festival di cinema scientifico. Si intitolava “Vedere la Scienza”, ed era diretto da un professore di storia della scienza, Pasquale Tucci dell’Osservatorio Astronomico di Brera.

Il festival era gratuito e aperto alle scuole. Andai anch’io nel 2002, una volta.

Oggi è difficile trovarne traccia in internet, ma ci aiuta la Wayback Machine di Archive.org

LINK 18 – [Sito “Vedere la Scienza 2012” su WayBack Machine](#)

LINK 19 – risultati per brera.unimi.it/film su Wayback Machine 2007-2016

Ci sono anni di programmazione del festival, in cui ci sono film e cortometraggi. Si possono individuare titoli su argomenti che interessano, che si possono poi cercare online. Non sempre i menu a tendina funzionano, ma con un po’ di pazienza ce la si fa.

Anche “Aula di Scienze” di Zanichelli propone film e documentari. Ci mancherebbe. È un “genere letterario” importantissimo, che piace moltissimo agli studenti. E non solo.

In un articolo del 2011, nel presentare film, documentari, e corti scientifici, la biologa e divulgatrice Lisa Vozza fa riferimento alla sua esperienza di giurata nella rassegna di “Vedere la Scienza”.

LINK 20 – Sito [“Aula di Scienze” \(Zanichelli\)](#)

Una delle prime raccolte-antologie di video scientifici online, degna anch’essa di citazione, era il Vega Science Trust, che riprenderemo nel capitolo 2.4. Il tempo al passato fa capire che anche questa iniziativa ha avuto oltre all’inizio anche una fine. È ancora online, ma non viene più aggiornata.

2.3 Feynman “l’esperimento più bello”

L’esperimento di “interferenza di elettroni” è stato giudicato “il più bello della fisica” in un sondaggio tra i lettori della rivista “Physics World” nel 2002.

Sembra che fosse il più bello anche per Richard Feynman (non sono riuscito a trovare la citazione esatta). Di certo lo definì “nel cuore della fisica”. E lo usò nelle sue celebri lezioni degli anni 60, all’inizio del corso del III anno, meccanica quantistica. Ci costruì sopra il primo capitolo:

Capitolo 1: Comportamento Quantistico.

- 1.1 Meccanica Atomica
- 1.2 Un esperimento coi proiettili
- 1.3 Un esperimento con le onde
- 1.4 Un esperimento con gli elettroni
- 1.5 L’interferenza degli elettroni-onde
- 1.6 Guardare gli elettroni
- 1.7 Il principio di indeterminazione

In inglese, oggi le Feynman Lectures sono online al seguente link:

LINK 21 – Sito [Feynman Lectures on Physics](#)

Il sito contiene anche molte foto, risorse, appunti, organizzati lezione per lezione.

Feynman usa un linguaggio forse un po’ iperbolico, per presentare l’esperimento:

In this chapter we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the *only* mystery. We cannot make the mystery go away by “explaining” how it works. We will just *tell* you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics.

Le “Feynman Lectures on Physics” sono state tradotte anche in italiano, negli anni 70, in un’edizione un po’ bizzarra, bilingue, testo italiano e testo inglese a fronte.

ALLEGATO 08 – “Comportamento Quantistico” (dalle Lezioni di Feynman, vol. III, 1964)

2.4 Gli esperimenti di Akira Tonomura

E per finire la rassegna sull'esperimento "Interferenza di Elettroni" o "Diffrazione di Elettroni" che dir si voglia (ma naturalmente se si dice diffrazione l'interferenza è incorporata, sottointesa), vanno ricordati anche gli esperimenti di Akira Tonomura.

Egli con il suo gruppo alla Hitachi ripeté (e proseguì) gli esperimenti di Merli, Missiroli e Pozzi, una quindicina d'anni dopo. Ci fu anche un piccolo incidente sulla priorità, sul quale si può leggere una "review" su *Physics in Perspective*.

LINK 22 – [The Merli-Missiroli-Pozzi Two-Slit Electron Interference Experiment](#) (di Rodolfo Rosa)

In ogni caso al di là dell'incidente sulla priorità (che è senza dubbio spiacevole... "perché si sono fatti la guerra?"...) anche Tonomura era un grande fisico, ricercatore e divulgatore.

Il suo campo di ricerca era la "microscopia elettronica" o "olografia elettronica" e il suo risultato più importante fu la verifica sperimentale dell'effetto Aharonov-Bohm, un altro esperimento caratteristico della meccanica quantistica. Era il Senior Chief Research Scientist del laboratorio di ricerca avanzata dell'Hitachi, grande azienda produttrice di tecnologia, e produttrice di microscopi elettronici tra i più performanti al mondo.

L'analisi dell'effetto Aharonov-Bohm gli fu possibile perché Tonomura usava i microscopi elettronici in modo da riuscire a "vedere" le linee di forza dei campi magnetici microscopici. E non c'è dubbio che questa proprietà sia importantissima per la tecnologia (Hard disk miniaturizzati).

In un "Friday Evening Discourse" del 1994 (sì, sponsorizzato da Hitachi) Tonomura fece una bellissima lezione con esperimenti in cui partì dalla limatura di ferro, così cara a Faraday e suo punto di partenza per descrivere i campi magnetici, e arrivò a descrivere il modo di usare le onde di elettroni come piccolissima "limatura di ferro" da usare al microscopio per "disegnare" o "vedere" i campi magnetici microscopici.

Il video della lezione è disponibile sul sito del Vega Science Trust, iniziativa voluta dal chimico e nobel Harold Kroto, interrotta nel 2002 ma ancora online.

LINK 23 – [Electron Waves Unveil the Microcosmos](#)

Sullo stesso argomento si può sfogliare il suo libro divulgativo dal titolo simile (1998).

LINK 24 – ["The Quantum World Unveiled By Electron Waves"](#) (anteprima Google Books)

Su Tonomura si può consultare il libro "In memory of Akira Tonomura, physicist and electron microscopy" (2014) con molti contributi che lo ricordano come fisico e microscopista.

La vicenda è utile perché ci permette di mettere in prospettiva il legame della meccanica quantistica con la tecnologia più avanzata.

In particolare il microscopio elettronico. Fu inventato nei primi anni 30 in Germania, da Ernst Ruska (premio Nobel) con il campo di ricerca dell' "ottica elettronica" (i fasci di elettroni si possono trattare come fasci di luce, e si possono costruire lenti, etc). Ruska aveva un fratello biologo, Helmut, che individuò subito la significativa applicazione del microscopio elettronico per "vedere i VIRUS". E la storia prosegue fino al giorno d'oggi, in cui il microscopio elettronico ha grande importanza, insieme ad altri tipi di microscopia, per studiare i dispositivi tecnologici miniaturizzati.

3. Esperimenti tratti dal dialogo Einstein – Bohr

3.1 Einstein-Bohr e l'interpretazione di Copenhagen

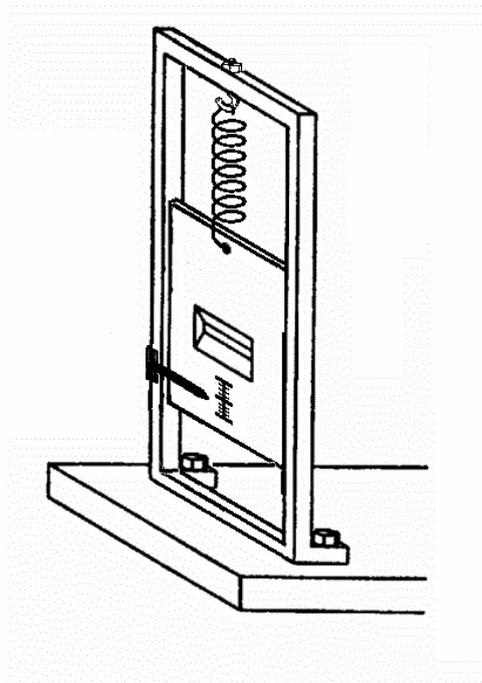
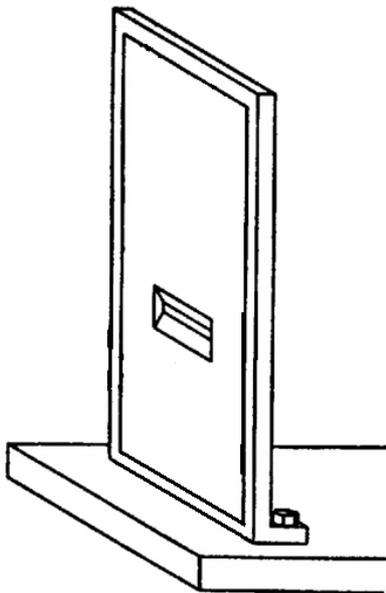
La domanda-sfida di Einstein al suo biografo Pais è nota: “Ma lei pensa davvero che la luna esiste solo quando la guarda?”

È uno dei campi su cui Einstein e Bohr dibattono. Nel resoconto storico più caratteristico, una volta tramontati Einstein e Schroedinger, l'interpretazione di Copenhagen è rimasta vittoriosa. È andata veramente così?

Oppure: c'è l'immagine di questi due fisici-filosofi che dibattono, è come se fossero eternamente incastrati in un problema senza soluzione? O hanno ragione tutti e due, come una cosa “complementare” e di più non si può sapere?

Quello che per noi è importante qui, oltre a ricordare due pubblicazioni già segnalate, è notare come anche questo “dialogo” ruotava intorno ad esperimenti. Esperimenti veri e anche “esperimenti mentali”.

Bohr descriveva l'intera faccenda come semi-seria. Per esempio il seguente esperimento. Va bene, misuriamo la posizione di un fotone con una fenditura (il fotone passa di lì) e così facendo perdiamo l'informazione sulla sua velocità o quantità di moto. Ma se sospendiamo con molle la fenditura, in modo da misurare come viene urtata e quindi ricavare informazioni sulla velocità? Tipicamente Einstein proponeva un esperimento e Bohr ci pensava sopra...



Le due pubblicazioni segnalate sono il grande librone-antologia di Wheeler (“Quantum Theory and Measurement”, LINK 01) e l'articolo “I corni della complementarità” di Stanley L. Jaki, link 06.

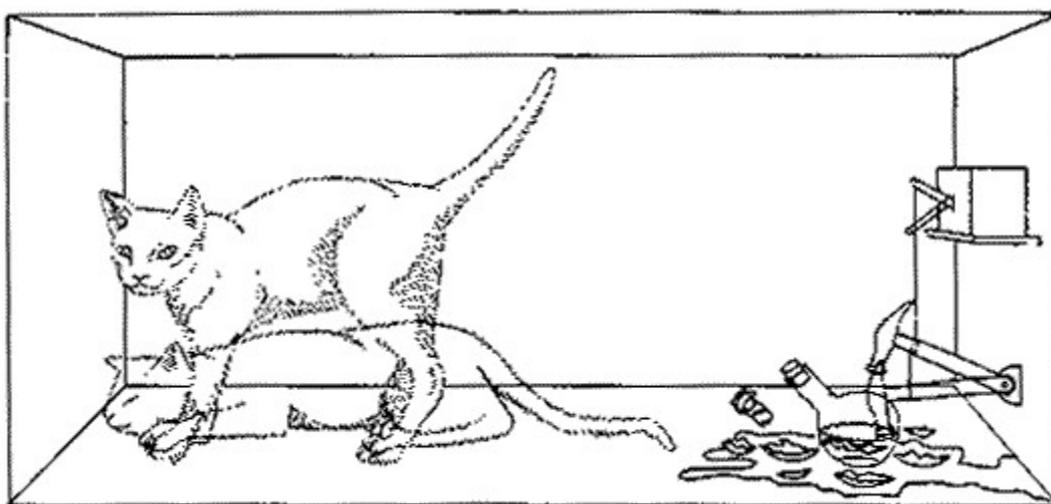
3.2 Il gatto di Schroedinger

Il dialogo Einstein-Bohr, a colpi di vignette con esperimenti mentali e i rispettivi esercizi-soluzioni ci introducono alla più celebre di queste, di cui costituiscono lo sfondo.

La vignetta-esperimento è quella del “Gatto di Schroedinger”.

In “Quantum Theory and Measurement” si può trovare il testo (traduzione inglese) dell’articolo originale di Schroedinger del 1935 “La situazione al presente in meccanica quantistica” (v. pag. 157).

“One can even set up quite ridiculous cases. A cat is penned up in a steel chamber, along with the following diabolical device...”



In “I corni della complementarità” (pag. 305-6) si può trovare il testo di una lettera di commento di Einstein a Schroedinger, illuminante, cui segue una breve discussione, altrettanto illuminante.

In ogni caso, per citare ancora Jaki, *“la prospettiva storica e la saggezza restano sempre uno o due passi indietro rispetto allo sviluppo effettivo”* e in questo caso lo sviluppo effettivo ha portato, dagli anni 30 ad oggi, alla realizzazione di “oggetti macroscopici e quantistici” che vengono chiamati “gatti di Schroedinger”. L’esempio famoso sono i “condensati di Bose-Einstein”.

Penso si possa dire che il successo della “interpretazione di Copenhagen” sia dovuto anche alla personalità di Bohr e alla sua grandezza di insegnante. Come ricorda Gamow (che fu suo studente) con emozione in “Trent’anni che sconvolsero la fisica”, mentre Einstein “lavorava da solo” o con un assistente, Bohr aveva fondato una vera e propria scuola, ed era affollata, aiutava moltissimi studenti da tutto il mondo.

In allegato dunque il famoso testo divulgativo di Gamow, “Trent’anni che sconvolsero la fisica”, molto leggibile, pieno di disegni umoristici. Il ricordo di Bohr è alle pagine 55-66.

ALLEGATO 9 – “Trent’anni che sconvolsero la fisica”

3.3 Il paradosso EPR

L'articolo di Schrodinger del 1935 "La situazione al presente in meccanica quantistica" è una discussione di un articolo di Einstein Podolski e Rosen dello stesso anno, "Può la descrizione quantomeccanica della realtà fisica essere considerata completa?" (entrambi gli articoli si possono trovare nel pdf del libro-antologia di Wheeler già citato, allegato 01).

L'articolo di Einstein Podolski e Rosen contiene (p.140) la descrizione di un esperimento mentale (tipo quelli del dialogo Einstein-Bohr già mostrati) che è noto come Paradosso EPR o Esperimento EPR (dal nome dei tre autori). In sintesi romanzata è questo:

Immaginate la generazione di una coppia di particelle interagenti, per esempio fotoni polarizzati, che volino in direzioni opposte alle estremità dell'universo, e quindi non possono più interagire.

Una misura su uno dei due fotoni (per esempio tipo esperimento di Stern-Gerlach orizzontale) automaticamente metterebbe a conoscenza l'autore della misura dello stato dell'altro fotone dall'altra parte dell'universo.

L'atto di misura provocherebbe il collasso della funzione d'onda del fotone dall'altra parte dell'universo, quindi a una velocità superiore a quella della luce.

Contemporaneamente un altro osservatore dall'altra parte dell'universo potrebbe star misurando un'altra caratteristica del fotone (per esempio tipo esperimento Stern-Gerlach verticale). Allora di quel fotone sarebbero conosciute con precisione due grandezze incompatibili, cosa preclusa dalle relazioni di indeterminazione?

L'esperimento (che nel 1935 è ancora "mentale") è giustamente famoso perché prevede, o mette in luce, alcune proprietà molto caratteristiche della meccanica quantistica, l'entanglement e la non-località.

Gli sviluppi di questa linea comprendono le "disuguaglianze di Bell" o "teorema di Bell" (1964) dal nome del già citato fisico nordirlandese John S. Bell.

Nei primi anni 80 il fisico francese Alain Aspect pubblicò il resoconto degli esperimenti di verifica sperimentale. È interessante sapere che Aspect era relativamente giovane (35 anni) e gli esperimenti pubblicati facevano parte delle sue ricerche per il dottorato. Possiamo leggere la storia in una breve conferenza-retrospettiva di sulla "Polarizzazione in Francia" (da Malus ad Aspect) (un bel modo di fare storia della scienza secondo me)

ALLEGATO 10 – Bart Kahr "Polarisation in France" (2017)

Biographical accounts of Aspect invariably emphasize his national service for three years (1972-1974) in Cameroon, during which he studied the new quantum mechanics textbook of Claude Cohen-Tannoudji et al. in order to fill gaps in his training that emphasized classical physics. Aspect appreciated this book because it was "... neutral with respect to the foundations [of quantum mechanics]. No brainwashing...".

As a PhD student at the Université d'Orsay from 1975-1983, unburdened by prejudice, Aspect decided to use polarized, entangled photons to put the philosophical foundations of quantum mechanics to the test.

[...]

The predictions of quantum mechanics, which turn out to be consistent with the Law of Malus, were shown by Aspect to hold firm, while Bell's inequalities were falsified. A deviation from the predictions

of quantum theory would imply a more linear relation between the transmission of a photon and the angle between polarizers, than is the traditional cosine-squared relationship. Malus can rest in peace but in the absence of classical ideas of locality. Here is somehow connected to there, and in this story, then is somehow connected to now.

Il risultato degli esperimenti è dunque che la teoria, la formulazione matematica, è corretta. Mentre è sull'interpretazione che ci sono le discussioni (fino ai confini dell'universo!). Ma perché si sono fatti la guerra?

Non rimane che aggiungere un link al libro di testo di Cohen-Tannoudij et al:

LINK 25 – [Quantum Mechanics](#)

4. Landau e la misura

Se si vogliono individuare i grandi fisici del novecento che furono anche grandi insegnanti nel senso che intorno a loro ebbero una vera scuola, sicuramente ci sono Arnold Sommerfeld e Niels Bohr. Ma non può mancare Lev Landau.

Ancora oggi il suo “Corso di Fisica Teorica” in dieci volumi (alcuni volumoni, altri libricini) è un banco di prova imprescindibile per il futuro fisico teorico.

La grandezza dell’opera certo spaventa, ed è giusto che sia così. E in molti punti la matematica è così avanzata che viene da dire: questo mi è incomprensibile.

Ma in molte discussioni di Landau, anche brevi, si possono incontrare a braccetto semplicità, chiarezza e profondità in un modo che ci fa dire: “adesso mi è tutto chiaro” e “quest’uomo è un filosofo”.

Due esempi in questione sono nel capitolo 1 del suo “Meccanica Quantistica” (terzo volume del suo corso).

[LINK 26](#) – [Meccanica Quantistica – Teoria non relativistica](#)

[ALLEGATO 11](#) – paragrafi 1.6 e 1.7

4.1 Lo strumento di misura

Si veda il paragrafo 1.7

Ritorniamo al processo di misura le cui proprietà sono state qualitativamente esaminate nel §1, e vediamo in che modo queste proprietà siano legate con l'apparato matematico della meccanica quantistica.

Consideriamo un sistema costituito da due parti: lo strumento classico e l'elettrone (considerato come oggetto quantistico). Il processo di misura consiste nel fatto che queste due parti entrano in interazione, e in seguito a questa lo strumento passa dal suo stato iniziale ad un altro stato; e da questa variazione noi possiamo giudicare lo stato dell'elettrone. Gli stati dello strumento si distinguono per i valori di una grandezza fisica (o di più grandezze) che lo caratterizzano, ossia per le “indicazioni dello strumento”. Indichiamo convenzionalmente con g questa grandezza e con g_n i suoi autovalori; essendo lo strumento classico, gli autovalori assumono, in generale, un insieme continuo di valori, ma noi supporremo che lo spettro sia discreto, esclusivamente allo scopo di semplificare le formule che seguono...

[...]

4.2 “La meccanica classica: fondamento e caso-limite della meccanica quantistica”

Si veda sempre il paragrafo 1.7:

Ora entrano in scena la “natura classica” dello strumento e il duplice ruolo della meccanica classica quale caso limite e, al tempo stesso, quale fondamento della meccanica quantistica. Come è stato già indicato, dato il carattere classico dello strumento, la grandezza g “indicazione dello strumento” ha un valore determinato in ogni istante. Questo fatto ci permette di affermare che lo stato del sistema strumento + elettrone sarà descritto, in realtà dopo la misura, non dall'intera somma (7,2), bensì solamente da un termine corrispondente alla “indicazione” g_n dello strumento.

[...]

Noi vediamo che il processo di misura presenta in meccanica quantistica un duplice aspetto: il suo ruolo rispetto al passato e al futuro è diverso. Rispetto al passato, la misura verifica le probabilità dei diversi risultati possibili che si possono prevedere partendo dallo stato creato dalla misura precedente. Rispetto al futuro, essa crea un nuovo stato (vedi anche par.44). Il processo di misura è quindi, per sua natura, profondamente irreversibile. Questa irreversibilità ha un'importanza fondamentale. Come vedremo più avanti (vedi par.18), le equazioni fondamentali della meccanica quantistica godono di per sé di simmetria rispetto al cambiamento di segno del tempo; sotto questo aspetto, la meccanica quantistica non differisce dalla meccanica classica. L'irreversibilità del processo di misura introduce però nei fenomeni quantistici un'inequivalenza fisica delle due direzioni del tempo, cioè porta ad una differenziazione tra futuro e passato.

Il ruolo della meccanica classica come “caso limite” della meccanica quantistica è discusso nel paragrafo 1.6, “limite classico”.

E così, dopo 22 link e 13 allegati, è conclusa questa dispensa che accompagna il video dell'ottava lezione. Per riassumere: approfondimenti e collegamenti si possono raggruppare in questo modo:

- 1) Libri di testo (Landau, Feynman, Sakurai, Cohen-Tannoudij)
- 2) Articoli originali (principalmente nella raccolta curata da Wheeler)
- 3) Progetti didattici: “avvicinarsi alla teoria della fisica quantistica”, HyperPhysics
- 4) Il genere letterario del “film-documentario scientifico”
- 5) Il genere letterario, molto utile per la storia della scienza, dell'obituario (o “In memoriam”, “in ricordo”)
- 6) Testi divulgativi: sono stati citati “Trent'anni che sconvolsero la fisica” (Gamow) e “Un'occhiata alle carte di Dio” (Ghirardi)
- 7) approfondimenti con filosofia: l'opera di Bunge – Matthews - HPS&ST, una conferenza di Jaki, l'antologia di Wheeler con testi e commenti.