

Insegnare la fisica moderna

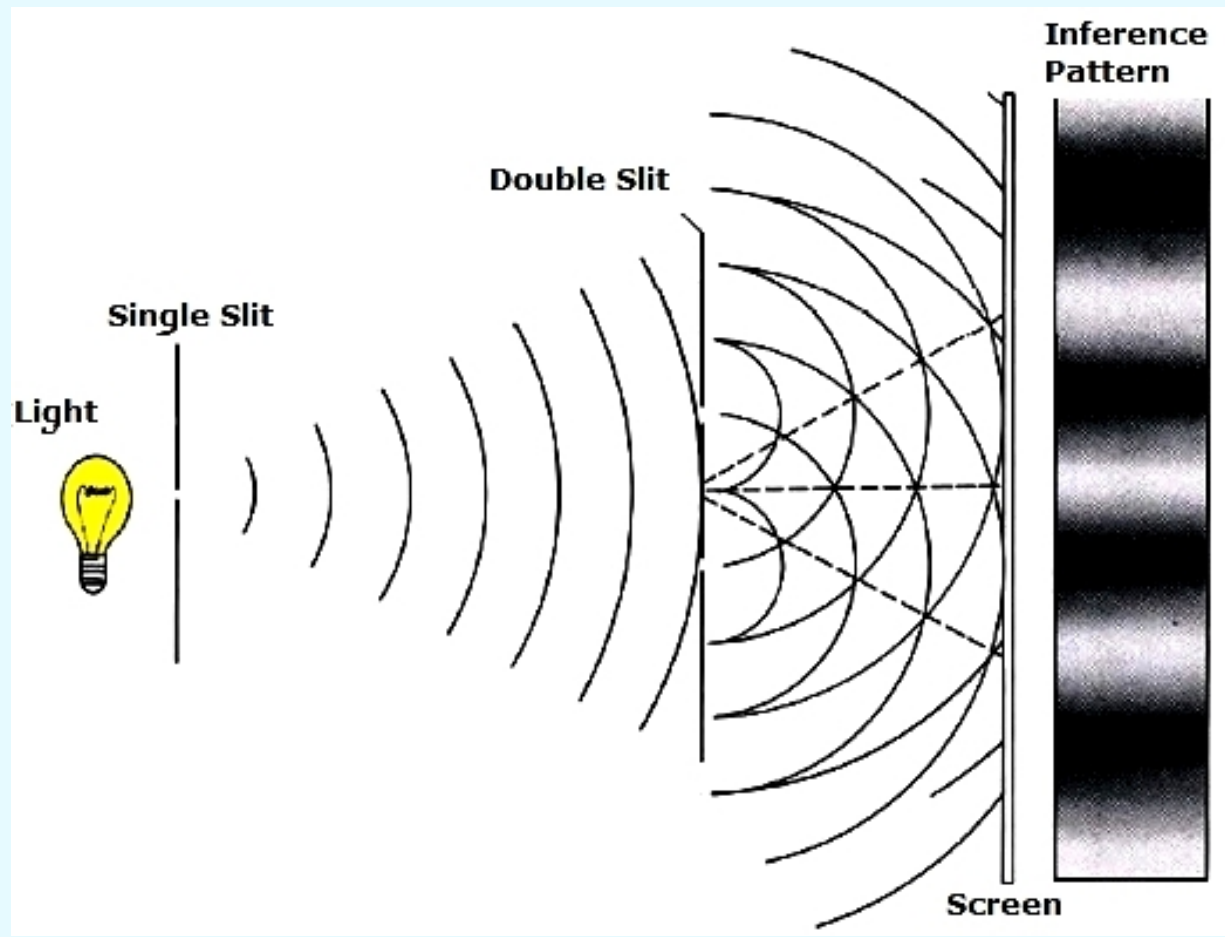
La fisica quantistica - terza puntata

Ancora fotoni - come spiegare l'interferenza?

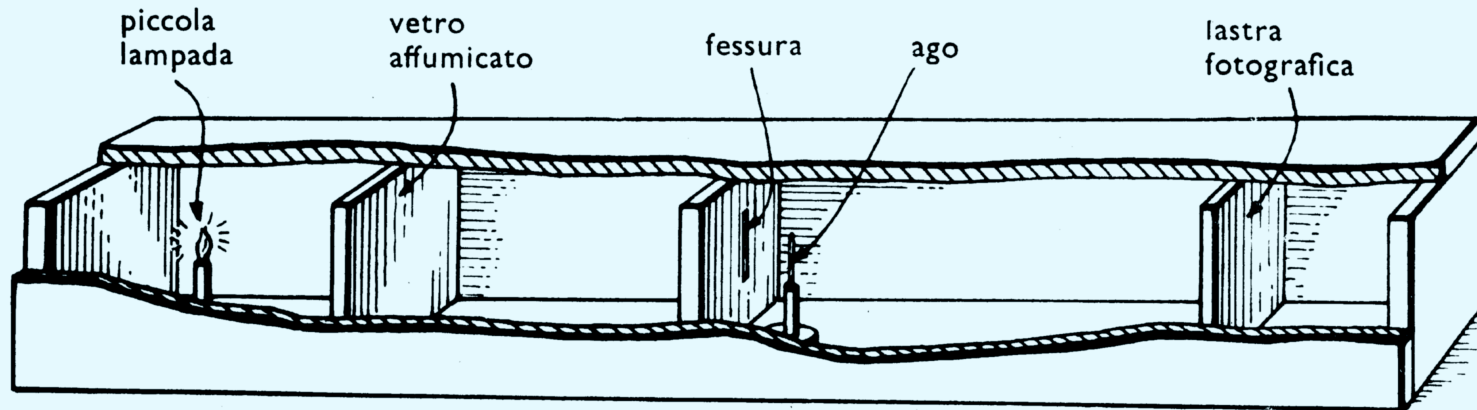
I fotoni faticano a essere accettati, per varie ragioni.

Una è l'*interferenza*, che sembra richiedere l'esistenza di *onde continue*, non di “grani” di energia alla Einstein.

L'esperimento d'interferenza classico è quello di Young (1803).



Nel 1909 Taylor riprodusse l'esperimento con luce di bassissima intensità, su suggerimento di J.J. Thomson (lo scopritore dell'elettrone).



Lo scopo era di confutare l'idea di una distribuzione “granulare” della radiazione e.m.

Taylor concluse che nel suo esperimento si vedevano frange d'interferenza *del tutto normali*, anche se la densità di energia era stimata in 1.6×10^{-16} erg/cm³.

L'esperimento è descritto in una comunicazione alla Cambridge Philosophical Society, ma stranamente il nome di Einstein non compare.

L'energia di un fotone nel visibile è attorno a 3×10^{-12} erg, quindi nell'esperimento di Taylor c'era *un fotone ogni 20 litri*.

Il che è quanto dire che nell'apparato non si trovava *mai più di un fotone per volta*.

(Oggi è facile ripetere l'esperimento di Taylor in modo assai più rapido, usando un fotomoltiplicatore.)

L'interpretazione che ne diamo oggi è che si può avere interferenza da *singoli fotoni*.

Dunque i fotoni hanno un comportamento *corpuscolare* e insieme *ondulatorio*...

Ecco il “dualismo”. Ne ripareremo.

Ancora fotoni - l'effetto Compton

Nella diffusione di raggi γ e X da parte di atomi si osserva (1920 e seg.), accanto a una componente con la stessa lunghezza d'onda della radiazione incidente, anche una componente con *lunghezza d'onda maggiore*.

Ciò è incomprensibile con la teoria classica (tanto per cambiare!).

Infatti: il campo elettrico dell'onda incidente dovrebbe mettere in oscillazione *con la stessa frequenza* gli elettroni dell'atomo.

Questi dovrebbero quindi *irraggiare*, ma ancora *con la stessa frequenza*.

Nel 1923 Debye e Compton avanzano indipendentemente l'interpretazione quantistica: un fotone viene diffuso in modo *anelastico*, cedendo energia a un elettrone (che esce dall'atomo).

Il calcolo (relativistico: [1], pag. 13) porta alla ben nota formula

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \vartheta).$$

La costante $h/mc \simeq 2.4$ pm è detta “lunghezza d'onda Compton” dell'elettrone.

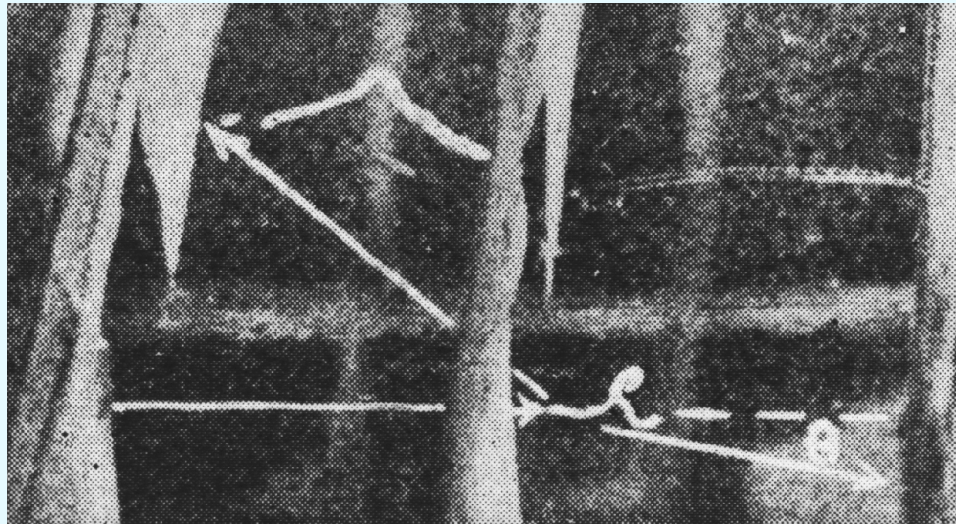
Il piccolo valore numerico spiega perché occorre usare raggi X o γ , affinché $\lambda' - \lambda$ sia misurabile.

Tuttavia ci sono fisici che non sono convinti, e cercano una spiegazione alternativa.

Bohr, Kramers e Slater (1924) ipotizzano che su scala microscopica *l'energia non si conservi* (ipotesi brevemente considerata anche da Einstein).

Nel 1925 Compton e Simon realizzano un esperimento che permette di *visualizzare direttamente* (in camera di Wilson) lo scattering del fotone.

Ancora fotoni - l'esperimento di Compton e Simon



Nella figura si vede:

- in basso a sinistra la direzione dei fotoni incidenti
- la direzione del fotone diffuso, verso l'alto a sinistra: è identificato dall'elettrone prodotto per fotoionizzazione
- il ricciolo al centro in basso è la traccia dell'elettrone che il fotone incidente ha estratto dall'atomo
- la direzione iniziale della traccia determina l'angolo θ (che non è quello della formula!)

Le nuove idee: de Broglie e le “onde di materia”

Nella sua tesi di dottorato (1924) Louis de Broglie introduce l'idea che *tutte le particelle* siano associate a un'onda. Per dirlo con le sue parole:

La mia idea essenziale fu di estendere a tutte le particelle la coesistenza di onde e particelle scoperta nel 1905 da Einstein nel caso della luce e dei fotoni.

In termini quantitativi: per un'onda piana

$$\psi(x, t) = A \cos(k x - \omega t)$$

sappiamo da Einstein che per un fotone $E = h\nu = \hbar\omega$, $p = \hbar k$.

Lo stesso deve valere *per ogni particella*; dato che $k = 2\pi/\lambda$, segue

$$p = h/\lambda \quad \lambda = h/p$$

che è appunto la *relazione di de Broglie*.

Una conferma teorica: il modello di Bohr

Il modello di Bohr *si spiega* con l'idea di de Broglie.

Il livello n -mo di Bohr è un'onda *stazionaria*. Nella circonferenza di raggio r_n entrano n periodi dell'onda di materia:

$$2 \pi r_n = n \lambda = n h / p$$

$$r_n p = n \hbar$$

che è proprio la condizione di Bohr.

Però è una spiegazione poco convincente: perché l'onda di de Broglie dovrebbe viaggiare lungo la circonferenza, e non *in tutto lo spazio*?

In realtà l'*equazione di Schrödinger* darà una spiegazione molto più soddisfacente (ma non potremo vederla...).

L'esperimento di Davisson e Germer

Nel 1921 Davisson e Germer iniziano esperimenti in cui elettroni vengono inviati in direzione radente su una superficie metallica (nichel).

L'intenzione è quella di sfruttare la piccolezza degli elettroni per sondare le minime irregolarità della superficie, e studiarne quindi la struttura.

In partenza, niente a che fare con la “nuova meccanica”...

D–G studiavano la dipendenza del numero di elettroni riflessi (diffusi) dall'angolo di diffusione. Nel 1925, dopo un incidente sperimentale che causò la ricristallizzazione della superficie, nel grafico apparvero dei *massimi e minimi* inattesi.

Durante un convegno a Oxford, Davisson ascoltò una lezione di Born, che interpretava i picchi dell'esperimento come effetti di *diffrazione*, a conferma dell'ipotesi di de Broglie.

Tornato in sede, Davisson migliorò l'apparato e riuscì a dare una *prova quantitativa* che si trattava proprio di diffrazione delle onde di de Broglie.

Le nuove idee: Heisenberg e la “meccanica delle matrici”

Nel 1925 Heisenberg pubblica un articolo in cui introduce un'idea rivoluzionaria: che le grandezze meccaniche (posizione, impulso ...) non siano rappresentate da *numeri reali*, ma da oggetti ben più complessi: *matrici* (per di più di ordine infinito).

Subito dopo Born approfondisce l'argomento, e con Jordan formula la relazione di commutazione:

$$qp - pq = i\hbar$$

(si noti l'intervento dell'unità immaginaria) che appare in un articolo col brevissimo titolo “Sulla meccanica quantistica”.

Segue un articolo riassuntivo dei tre autori: “Sulla meccanica quantistica II”.

Le nuove idee: la “meccanica ondulatoria” di Schrödinger

Nel 1926 Schrödinger sviluppa l'idea di de Broglie.

Si ispira da un lato alla relazione tra l'ottica *ondulatoria* e l'approssimazione dell'ottica *geometrica*, dall'altro alla formulazione di Hamilton–Jacobi della *meccanica analitica*.

Arriva a scrivere un'equazione per l'onda di materia di de Broglie in presenza di un campo di forze: quella che da allora è universalmente nota come l'*equazione di Schrödinger*.

Schr. pubblica sull'argomento, nello stesso anno, ben 4 lavori.

Nell'ultimo mostra come trattare problemi in cui lo stato del sistema non è stazionario, ma *dipendente dal tempo*.

Questo lavoro è di grande importanza perché nella nuova equazione la funzione d'onda è generalmente *complessa*.

L'equivalenza delle due meccaniche

Sempre nello stesso 1926 Schr. pubblica un altro articolo dal titolo

“Sulla relazione della meccanica quantistica di Heisenberg–Born–Jordan con la mia”

in cui dimostra che la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria sono formulazioni matematicamente *equivalenti* (isomorfe) di *una stessa teoria fisica*.

Una formulazione più generale e profonda dell'equivalenza verrà data l'anno seguente da Dirac.

In modo matematicamente più rigoroso, la m.q. verrà poi riformulata da von Neumann nel suo libro “I fondamenti matematici della meccanica quantistica” (1932).

A questo punto la storia si dirama

Da un lato, la m.q. ormai stabilita come teoria fisica, viene applicata a una quantità di problemi.

Possiamo dire che è nata la “fisica quantistica”.

Dall'altro inizia una discussione, ancora non conclusa, sull'*interpretazione* della nuova teoria.

Questa discussione non ha alcun riflesso sulle applicazioni, mentre ha importanti conseguenze sul piano didattico.

Perciò faremo solo (assai a malincuore) un velocissimo cenno al primo tema, mentre discuteremo un po' il secondo.

Applicazioni e successi della fisica quantistica

A partire da subito, tutti i maggiori fisici teorici si dedicano ad applicare la m.q. ai numerosi problemi aperti (alcuni dei quali ho descritto in precedenza).

Facciamo un sommario elenco:

1. Struttura e proprietà degli atomi.
2. Formazione e struttura delle molecole: il legame chimico.
3. La fisica dei solidi.
4. La quantizzazione del campo e.m.: l'elettrodinamica quantistica (QED).

Struttura e proprietà degli atomi

Perché gli atomi dei diversi elementi sono così diversi tra loro, per proprietà fisiche e chimiche?

La risposta arriva molto presto per certi aspetti, mentre richiede tempo per questioni più complesse.

In tutti i casi sono cruciali nuove scoperte:

- lo spin e il momento magnetico dell'elettrone (Pauli 1924, Uhlenbeck e Goudsmit 1925)
- il principio di Pauli (1925) e la sua formulazione quantistica corretta (antisimmetria della funzione d'onda).

Formazione e struttura delle molecole: il legame chimico

Come sono tenuti insieme gli atomi a formare molecole?

Perché esistono molecole con proprietà fisiche e chimiche molto diverse?

L'applicazione della m.q. alle molecole dimostra che tutti i tipi di *legame chimico*, le diverse *valenze* degli elementi, le varie *molecole* che possono formarsi

a) sono *completamente spiegabili* in base a questa teoria,

b) dipendono praticamente solo dalle *forze elettrostatiche* tra elettroni e nuclei.

In un certo senso (ma sarebbe questione da discutere molto più a fondo) si realizza una *riduzione della chimica alla fisica*.

La fisica dei solidi

Avevamo visto alcuni problemi posti dallo stato solido della materia.

Tutti (e altri di cui non ho parlato) vengono nel tempo risolti dall'applicazione della m.q.

Vale la pena di sottolineare in particolare la comprensione dei *semiconduttori*, che aprirà la strada a uno sviluppo — di cui non si vede ancora la fine — in materia di elettronica sempre più *miniaturizzata* e *veloce*, con conseguenti *applicazioni* che ormai pervadono la vita di tutti i giorni.

(Lascio a voi l'elenco.)

Va detto invece che sul piano teorico la fisica quantistica dello stato solido richiede la formulazione delle *statistiche quantistiche*: in particolare la *statistica di Fermi–Dirac* (1926) che si applica agli elettroni.

Una rassegna un po' più approfondita apparirà in [2].

La quantizzazione del campo e.m.: l'elettrodinamica quantistica (QED)

Lo sviluppo della m.q. porta nuova luce sulla natura dei fotoni.

Non è possibile qui approfondire: rimando a [1], seconda parte.

La soluzione è data dall'applicazione della m.q. allo stesso campo e.m. (Dirac 1927) con successivi contributi e sviluppi di Pauli, Wigner, Jordan, Heisenberg, Fermi e altri.

Si spiegano tutti i fenomeni relativi all'interazione fra *radiazione* e.m. e *particelle cariche*, a cominciare dall'unificazione dei tre processi già considerati da Einstein nel 1917:

- emissione spontanea
- assorbimento
- emissione indotta (o stimolata).

Una delle conseguenze pratiche della QED, e in particolare di quella che verrà poi chiamata “ottica quantistica”, è l'invenzione del *laser* (Schawlow e Townes, 1958).

Sull'impiego pratico e tecnologico del laser è inutile insistere.

Sul piano teorico, la QED diede luogo a gravi difficoltà (le cosiddette “divergenze ultraviolette”) che ebbero una prima soluzione in lavori indipendenti di Feynman, Schwinger e Tomonaga (1946-49).

Di quello che è venuto dopo (QFT, teoria quantistica dei campi, ecc.) non è il caso di parlare.

Questioni d'interpretazione

La discussione su come vada interpretata la nuova meccanica si apre subito.

- Come va inteso il “dualismo onda-corpuscolo”?
- Le onde di de Broglie–Schrödinger sono “reali” come per es. le onde e.m.? Oppure?
- Qual è il significato del “principio d'indeterminazione” (Heisenberg 1927)?
- Come va interpretata la “regola di Born”, secondo cui la conoscenza della funzione d'onda fornisce solo la *probabilità* dei possibili risultati di una misura di qualsiasi osservabile?

Sul problema dell'interpretazione della m.q. i fisici teorici si dividono grosso modo in *due fronti*, con una serie di sfumature e differenze.

Da un lato ci sono i *realisti*: de Broglie, Schrödinger, in sostanza anche Einstein.

Per loro le onde di materia sono *reali*, le particelle sono *concentrazioni*, grumi di queste onde.

Una posizione opposta, da molti punti di vista, è quella di altri, la maggioranza, a cominciare da Bohr, Heisenberg, Born, Pauli.

Questi fanno propria una visione *positivista* (quando non *idealista*): “non ha senso parlare di ciò che non si può osservare”; “è l'atto di misura che crea la grandezza osservata”...

La posizione ora descritta viene generalmente indicata come *interpretazione di Copenhagen* (sede della scuola di Bohr).

Visioni ancor più estreme sono quelle di von Neumann, Wigner, Wheeler, i quali riconducono l'atto della misura all'intervento di un osservatore *co-sciente*.

È famosa in proposito la battuta di John Bell (che semplifico un po'):

forse il processo di misura quantistica è divenuto possibile solo quando sono apparsi osservatori in possesso di un dottorato di ricerca?

Non è qui possibile dar conto in modo sensato né dei problemi, né delle posizioni dei singoli studiosi.

Un'esposizione ampia e piuttosto completa si trova in [3], soprattutto il cap. 6.

Non possiamo esimerci ...

Ricordate infatti le IN:

L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo.

E il Sy:

- *Dualismo onda-particella. Limiti di validità della descrizione classica.*
- *Diffrazione/Interferenza degli elettroni.*
- *Il principio di indeterminazione.*

Dovete dunque aspettarvi che questi argomenti saranno materia della seconda prova di Fisica...

La Conferenza Solvay 1927

Fu la terza delle Conferenze Solvay. Parteciparono 29 fisici, 17 dei quali erano o sarebbero stati premi Nobel.

Il tema era: *Elettroni e fotoni*; presiedeva Lorentz.

La discussione nella Conferenza fu centrata proprio sull'interpretazione della m.q., con memorabili battaglie fra Bohr e Einstein.

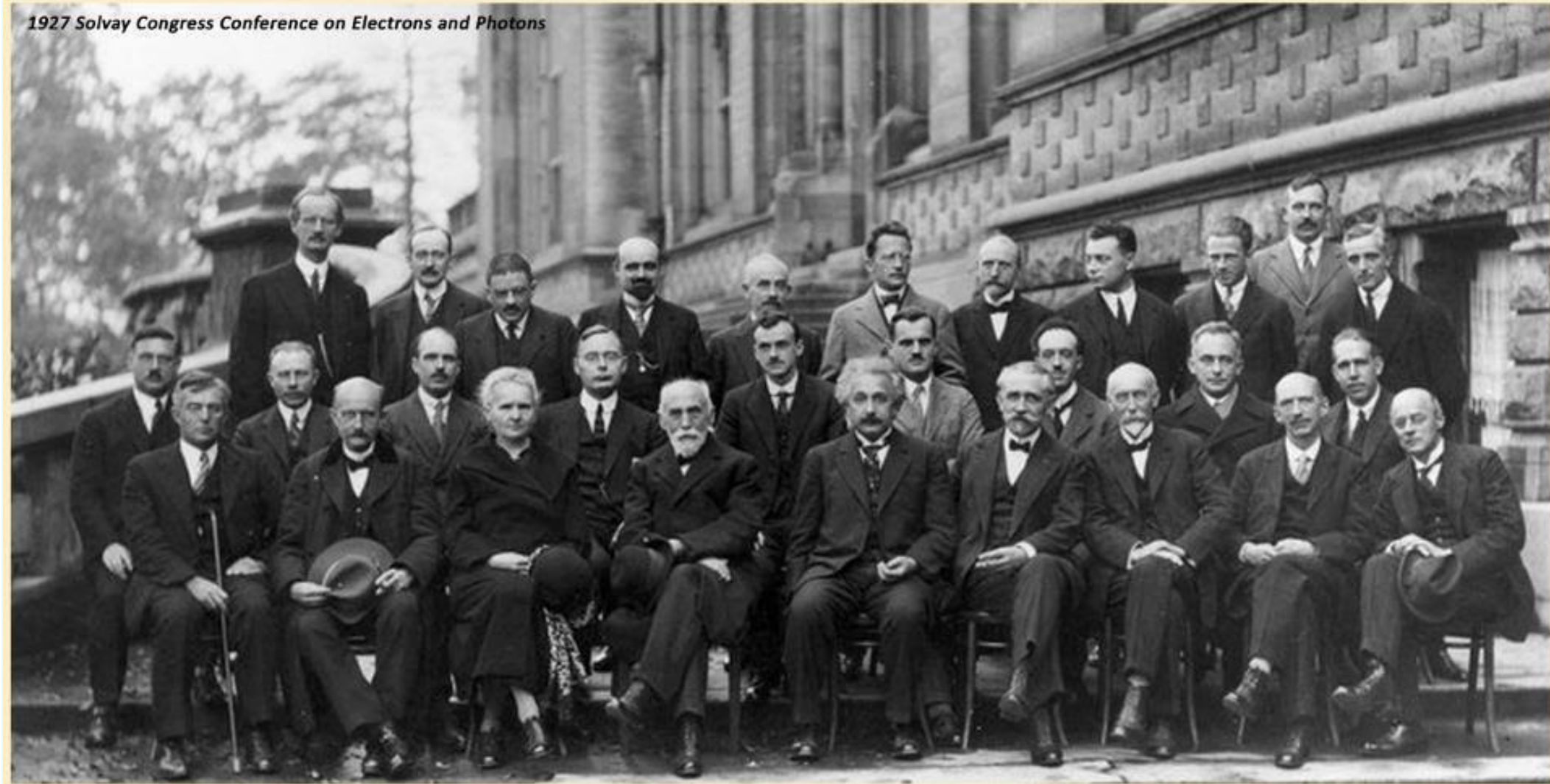
E. non accettava la visione positivista (o *strumentalista*) di Bohr–Heisenberg, e produceva continue proposte di esperimenti ideali volti a confutare il PdI.

Bohr il giorno dopo smontava gli argomenti di Einstein...

Alla fine l'interpretazione di Copenhagen risultò vincente.

E oggi? Dopo quasi 90 anni?

1927 Solvay Congress Conference on Electrons and Photons



A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. De Donder, E. Schrödinger, J.E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin;
P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr;
Langmuir, M. Planck, M. Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson

E oggi? Dopo quasi 90 anni?

La risposta è che (purtroppo) non è possibile parlarne.

Basta però dare un'occhiata per es. all'indice di [3] per capire che molte cose sono successe: nuove idee, nuovi dibattiti, nuovi esperimenti...

Al tempo stesso sarebbe *inutile* parlarne, visto che IN e Sy *ignorano tutto ciò*: propongono una visione che sarebbe apparsa semplicistica e acritica già ai partecipanti di quella Conferenza del 1927.

Difficile spiegare come mai questo accada.

Di sicuro tutta la pubblicistica didattica (libri di testo compresi) con rare e inascoltate eccezioni, sta sulla stessa linea.

Non può essere solo una scelta di semplicità, perché *non è più semplice* proporre idee *superate* e in certi casi errate o quanto meno *di parte* (in senso filosofico).

Che fare?

L'unica soluzione che mi sento di proporre è di *limitare il danno*.

Parliamo dei due temi che sembrano stare a cuore a chi decide, cercando almeno di darne una presentazione accettabile.

Ci occuperemo dunque:

- a)* del “dualismo onda corpuscolo”
- b)* del “principio d'indeterminazione”.

L'approccio che sto per proporre è assai vicino a quello tenuto da Feynman in *QED* [4] e seguito anche in [5]. Per il PdI può interessare anche la lettura di [6].

Il famigerato “dualismo”

Per un certo periodo di tempo bisognava essere bravi: per poter dire se la luce consisteva di onde o di particelle, occorreva sapere quale esperimento si stesse analizzando.

Questo stato di cose confuso prese il nome di "dualismo onda-corpuscolo", e qualcuno inventò la battuta che la luce era fatta di onde il lunedì, mercoledì e venerdì, di particelle il martedì, giovedì e sabato; la domenica, ci si pensava sopra!

Questo è [4], lez. I.

La posizione di Feynman è che i fotoni *sono particelle* e nient'altro.

Però non particelle come quelle della fisica macroscopica: particelle particolari, particelle *quantistiche*.

Il punto cruciale è la scoperta che il moto di una particella non può essere descritto, come dice la meccanica classica, con una traiettoria: gli esperimenti alla Young–Taylor dimostrano che una particella emessa da una sorgente e raccolta da un rivelatore “usa” allo stesso tempo tutti i percorsi possibili, ciascuno con una certa ampiezza. Queste ampiezze debbono essere sommate, e gli esperimenti d'interferenza ci mostrano che nella somma è importante tener conto della relazione di fase: dunque le ampiezze non sono semplici numeri reali [sono numeri complessi, aggiungo qui].

Questo sono io: [5], pag. 11.

Va anche detto che un tale comportamento *non è esclusivo dei fotoni*.

Abbiamo già visto che si può avere diffrazione con *elettroni*, e in anni più recenti effetti simili sono stati verificati con *neutroni* e perfino con molecole di *fullerene* (C_{60}) [7].

Il “principio” d'indeterminazione (PdI)

Questo principio viene tradizionalmente interpretato come conseguenza di un'ineliminabile *influenza* dell'osservatore sull'oggetto osservato.

L'osservazione produce una *perturbazione* la cui grandezza non può essere resa piccola a piacere.

Rimando a [6] per la citazione di un serie di brani di Bohr e di Heisenberg.

Ed ecco il solito Feynman [5], lez. II:

Vorrei mettere il PdI nel suo contesto storico. All'epoca in cui le idee rivoluzionarie della f.q. cominciavano a sorgere, si cercava ancora di comprenderle in termini delle vecchie idee (come per es. “la luce va in linea retta”). Ma a un certo punto le vecchie idee non funzionavano più, e venne quindi creato un avviso, che diceva in sostanza: “le tue idee all'antica non servono a niente quando ...”. Ma se vi liberate di quelle vecchie idee, e usate invece quelle che sto spiegando in queste lezioni — che bisogna sommare le frecce per tutti i modi in cui un evento può accadere — non c'è alcun bisogno del PdI!

Le “frecce” di F. sono le ampiezze (n. complessi) di cui si è già detto.

Tradotto nel linguaggio della m.q., quello che F. sta dicendo è che il PdI è un *teorema* della teoria, segue dagli assiomi, e quindi non ha alcun bisogno di una spiegazione o di una giustificazione indipendente.

Per questo motivo oggi si preferisce tra l'altro parlare di *relazioni* d'indeterminazione, anziché di principio.

In tale contesto (che H. conosceva benissimo) gli argomenti basati su perturbazioni prodotte dalla misura, e simili, acquistano solo il ruolo di rendere *plausibile* il risultato, dimostrare che fa parte di un complesso teorico *coerente e in accordo coi fatti*.

Chiariamo meglio.

Bohr scrive: “*non si può conoscere nello stesso tempo l'impulso e la posizione di un oggetto atomico*”.

Sembra dunque che la limitazione stia nel “conoscere”.

Ma da un punto di vista più moderno, le cose stanno diversamente.

Tornando al concetto di stato, nella meccanica classica questo si riassume nella specificazione dei valori delle posizioni e delle velocità di tutte le parti che costituiscono il sistema. Una volta che queste siano date a un certo istante (insieme con la legge di tutte le forze agenti) è possibile prevedere lo stato a qualunque tempo successivo (e anche precedente). [...]

In modo precisamente parallelo, anche la m.q. ha un suo concetto di stato: quello che in una versione più popolare è noto come funzione d'onda, e in forma più sofisticata è un raggio unitario nello spazio di Hilbert del sistema. Data la funzione d'onda a certo istante, l'equazione di Schrödinger la determina a tutti gli altri istanti. In questo senso, anche la m.q. è deterministica.

Si vede però che i due stati (classico e quantistico) sono completamente diversi: vengono specificati in modo diverso, con strutture matematiche differenti. In particolare, non esiste nello stato quantistico qualcosa che corrisponda alla posizione classica, e neppure alla velocità (o alla q. di moto).

(Questa lunga citazione è presa da [6].)

Esistono beninteso le *osservabili* posizione e velocità, ma a queste non corrispondono *valori* ben determinati: la conoscenza dello stato permette solo di calcolare i *possibili* valori delle osservabili con le relative *probabilità*, quali si potrebbero ottenere all'atto di una misura.

In breve, e per esprimersi secondo Kuhn [8]: quello classico e quello quantistico sono due diversi *paradigmi*.

Entrambi hanno un proprio *vocabolario* e delle *regole interpretative* per connettere i termini teorici coi dati sperimentali.

Ma *non sono mutuamente traducibili*, e gli sforzi parafilosofici per costruire una traduzione sono destinati a produrre soltanto *equivoci*.

Ma in concreto?

Secondo il Sy alla f.q. andrebbero dedicate circa 30 ore (teoriche).

Che cosa ci si può far entrare?

Buona parte, penso più di metà, andranno alle basi storiche, ai fenomeni principali e alla loro spiegazione.

Che cosa dire su dualismo e PdI?

Il dualismo

Si potrebbe cominciare rinforzando l'esistenza dei fotoni col *fotomoltiplicatore*, come in [5].

Non so se si possa seguire integralmente la traccia di [5]: temo ci vorrebbe troppo tempo.

Altra via: in [1], partendo da pag. 21, l'interferometro di Mach–Zehnder è abbastanza semplice da spiegare (più di quello di Michelson).

Potendo anche l'interferometro stellare (sempre di Michelson) a pag. 23-24.

Dall'interferometro di M–Z si conclude che il fotone “porta con sé un'informazione relativa alla sua fase”: è questo il “comportamento ondulatorio” come lo vede Feynman.

Il “principio” d'indeterminazione

Dopo il racconto delle idee di Bohr e Heisenberg, dello sforzo di Einstein di contrastarli (Solvay 1927), si potrebbe asserire che il PdI è *un teorema* della m.q.

Come è un teorema la legge delle aree nella gravitazione newtoniana, anche se Keplero l'aveva scoperto dalle osservazioni.

Per cui oggi si dice piuttosto “relazioni d'indeterminazione” (plurale, perché ce ne sono diverse).

Passare poi alle due definizioni di *stato*, classico e quantistico.

Nello stato q. *non ci sono* posizione, velocità, traiettoria, se non come “osservabili” di cui non si possono dare previsioni determinate, ma solo probabilità.

Perché? Perché sì: la teoria è *fatta così*, e non ha senso cercare di darne “vere spiegazioni”...

Essenziale è che la teoria *funziona* in modo perfetto, che ha spiegato un sacco di cose, permesso sviluppi tecnologici impensabili...

Questo *non è strumentalismo*: abbiamo davanti un mondo *a una scala nuova*, dobbiamo essere preparati al fatto che le nostre categorie mentali, nate dall'esperienza *macroscopica*, possano non funzionare a scala atomica.

(Come per altro verso non funzionano a scala *cosmologica*.)

Ecco perché trattare solo alcuni problemi d'interpretazione, senza avere un minimo quadro dei risultati della f.q., è una pesante distorsione: non si può fare *neppure filosofia* su di un “mondo di carta”.

Commenti “inter nos”

1. Il discorso sulle nuove categorie mentali penso sia meno indigesto ai ragazzi di quanto lo sia a degli adulti acculturati.

Per loro tutto è nuovo, e sono pronti ad accogliere idee diverse, a visitare un “mondo strano”.

Bisogna solo evitare che si adattino a *parlarne senza conoscerlo*: cosa che nella scuola sono abituati a fare, per tante ragioni.

2. La (pessima) tradizione didattica sulla “fisica moderna” non è filosoficamente neutra: tende a privilegiare il “mondo delle idee” (che a mio giudizio è proprio e solo un mondo di carta) sul mondo *reale e materiale*.

Spinge a fare una *fisica di chiacchiere*: è questo che dobbiamo evitare in tutti i modi!

Più facile a dire che a fare, però...

[1] Sull'esperimento di Taylor, sull'effetto Compton, in generale sul concetto di fotone:

<http://www.sagredo.eu/articoli/fotoni.pdf>

[2] Sulla m.q. applicata alla fisica dei solidi:

<http://www.sagredo.eu/articoli/solidi.pdf>

(in corso di pubblicazione).

[3] G.C. Ghirardi: *Un'occhiata alle carte di Dio* (Il Saggiatore 1997).

[4] R.P. Feynman: *QED* (trad. ital. Adelphi 1989).

[5] Sulla m.q. “alla Feynman”:

<http://www.sagredo.eu/fq/fq21p3.pdf>

(le figure sono in [fq21f3a.pdf](#), [fq21f3b.pdf](#), [fq21f3c.pdf](#)).

[6] Sul principio d'indeterminazione:

<http://www.sagredo.eu/candela/candel81.pdf>

[7] Comportamento “ondulatorio” del fullerene:

<http://www.univie.ac.at/qfp/research/matterwave/c60/>

[8] T.S. Kuhn: *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (trad. ital. Einaudi 1969).