

Dalla relatività alla quantistica

Questioni di storia del pensiero scientifico

Docente Flavia Marcacci

Bibliografia

- E. Bellone, *Caos e armonia*, UTET, Torino 2004.
- P. A. Giustini, *I trent'anni che rivoluzionarono la fisica (1900-1930)*, Elia, Roma 1975.
- J. Gribbin, *L'avventura della scienza moderna*, Longanesi, Milano 2004.
- M. Ciardi, *Breve storia delle teorie della materia*, Carocci, Roma 2003.
- T. Damour, *Albert Einstein. La rivoluzione della fisica contemporanea*, Einaudi, Torino 2009
- Testi di Einstein, Bohe e Heisenberg tratti da Aa.Vv., *Filosofia della scienza*, Cortina, Milano 2002

L'idea del quanto

Boltzmann: durante una collisione il passaggio di energia cinetica tra le molecole avveniva sempre mediante quantità energetiche ben determinate, ovvero secondo una funzione **discreta**.

Einstein: gli studi sui moti browniani; l'ipotesi del quanto di luce.

La costante di Planck: la radiazione del corpo nero si presenta a “pacchetti di energia”.

Secondo l'ipotesi che sarà qui considerata, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande; essa consiste invece in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza.

Einstein, 1905

1923: lo scienziato Millikan riceve il premio Nobel per aver migliorato con estrema precisazione il valore della costante di Planck. Contro le sue iniziali aspettative, le sue ricerche confermarono l'idea dei quanti.

Ancora Einstein, 1905-6

- Nel 1900-1 Planck non aveva ancora compreso cosa significasse la costante che aveva trovato lavorando sul corpo nero
- Einstein riprende la legge di Wien (costanza del prodotto tra temperatura e lunghezza d'onda nel corpo nero) e cerca di calcolare l'entropia e il numero di stati microscopici possibili in funzione della frequenza di radiazione di un corpo nero.
- Questo numero aumentava esponenzialmente aumentando il volume del corpo nero.
- Questo esponente doveva dare il **numero di corpuscoli luminosi liberi** presenti nella radiazione contenuta nel corpo nero (come le pulci nella scacchiera..., cf. Damour 2009, 148-150).
- Einstein riusciva a dare un valore preciso anche per l'energia posseduta da ognuno di questi "granelli di luce", corrispondente a $E=h\nu$, che Planck aveva trovato sperimentalmente.
- Su questa base Einstein spiegò nel 1905 l'effetto fotoelettrico.
- Nel 1906 inizia a parlare dell'energia associabile alla materia come distribuita ancora in quanti (ad esempio in un oscillatore, come una molla).
- Ma come spiegare gli esperimenti di Young sulla luce (= onda)?

L'atomo di Rutherford

- Elettroni orbitanti attorno ad un nucleo centrale: una sorta di sistema solare in miniatura.
- Problema: il nucleo ha carica positiva, e l'elettrone carica negativa. Perché il primo non collassa sul secondo? Seguendo la fisica classica e le leggi di Maxwell, tale collasso sarebbe dovuto avvenire in pochissimo tempo: l'elettrone avrebbe dovuto precipitare a spirale sul nucleo.

Bohr (1885-1962) e l'atomo quantistico

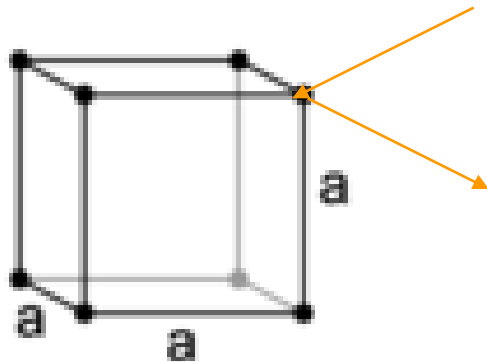
- 1913: lavorando a contatto con Rutherford, Bohr elabora un modello di atomo capace di confermare e predire i risultati che si aveva in laboratorio lavorando con radiazioni e atomi.
- L'idea di fondo era che gli elettroni non sono in grado di emettere in maniera continua radiazioni: se così fosse si avrebbe un avvicinarsi dell'elettrone al nucleo continuo e inarrestabile. Piuttosto l'elettrone si muove su orbite stabilite, e non si sposta di lì fino a quando per qualche ragione il suo stato energetico non cambia: tale cambiamento, inoltre, deve avvenire per "pacchetti di energia" secondo la formula di Planck $h\nu$. In altre parole, quando un elettrone salta da un'orbita all'altra (salto quantico) avviene con emissione (o assorbimento) di un quanto di energia dipendente proprio dalla frequenza della radiazione emessa. Inoltre il salto non può mai avvenire in orbite che sono già "piene": in un atomo le orbite devono essere sempre progressivamente sature e, se satura, un'orbita non può essere ulteriormente riempita.
- In questo modo venivano spiegate le righe spettrali di molti elementi.

La materia come un'onda: Louis De Broglie (1892-1987)

- Come le onde elettromagnetiche possono essere descritte in termini di corpuscoli o particelle (quanti di luce), così le particelle (es. gli elettroni) devono potersi descrivere come onde.
- 1924: De Broglie parte da questa idea connettendo la nota espressione $E=h\nu$, con quella che Einstein dedusse dalla Relatività ($E=mc^2$) e inerente il quanto di luce $E=pc$ (p = quantità di moto mv).

$$p = \frac{h\nu}{c}, \lambda = \frac{c}{\nu} \rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

- Un atomo come una chitarra: ogni orbita è come una corda, capace di emettere un'onda ma costituita da materia (Gribbin 2002, 502). Langevin, supervisore di tesi di De Broglie, si mostrò perplesso di fronte a questa idea: fu Einstein a convincerlo che era una idea seria.
- De Broglie suggerì di verificare se gli elettroni potessero essere **diffratti** dai reticoli cristallini. D'altra parte già si conosceva lo strano comportamento del diamante che, avevano calori specifici estremamente bassi (come se fossero incapaci di reagire a temperature non esageratamente elevate)



Il fotone colpisce l'atomo e si genera un'onda. Così ogni atomo diventa una sorgente di onde sferiche: da ciò si originano le figure di interferenza.

Diffrazione degli elettroni

- Lavorando sui cristalli, G. P. Thomson, C. J. Davisson e L. H. Germer si resero conto che tra una radiazione elettromagnetica e la materia del cristallo può esserci interferenza. Infatti nei cristalli i nuclei degli atomi sono ad una certa distanza e in posizione regolare. Se la lunghezza d'onda del fascio di luce incidente è superiore alla distanza tra due nuclei successivi, allora si osservano figure di interferenza. Queste presentano caratteristiche che rispettano pienamente l'equazione di De Broglie.

Luce e materia si comportano in maniera analoga.

Dualità onda-corpuscolo

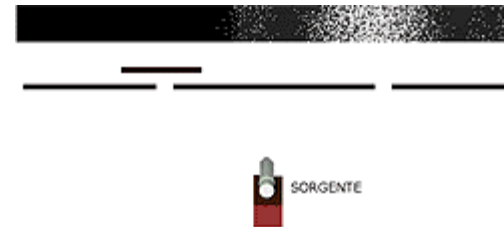
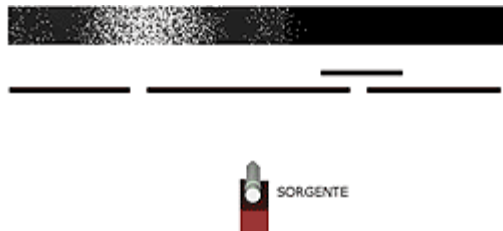
- La luce ha effetti ondulatori (diffrazione) e corpuscolari (effetto fotoelettrico). Gli elettroni sono corpuscoli (in movimento e dotati di carica) che investono i cristalli e originano effetti ondulatori.
- L'equazione di De Broglie non si applica, però, solo agli elettroni: si può applicare a tutti i corpi. Analogamente la costante di Planck. Il fatto che se lavoro con oggetti grandi non noto nulla, dipende solo dal fatto che la quantità di moto del fotone che investe un corpo (es. un'auto, una boccia) in movimento non è abbastanza grande da variare la quantità di moto dell'oggetto.

Sostanza o accidente, la luce e la materia sono interconnesse. Non aveva torto Newton, non aveva torto Huygens...

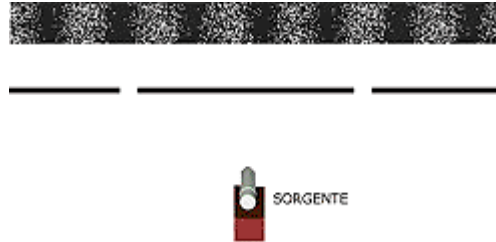
1927: Lewis denomina il quanto di luce "fotone".

L'esperienza dei due fori

- Niente più “traiettoria”, niente più “orbita” ma “orbitali” e “nuvole elettroniche”, ovvero probabilità elettroniche di trovare l’elettrone in un determinato spazio attorno al nucleo. Ad ogni orbitale sono associati dei numeri quantici, in base ai quali calcolare il numero massimo di elettroni che l’orbitale può ospitare.
- Causalità **probabilistica** (indeterminismo quantistico).



Esperimento di Young (1801). La sorgente emette luce (fotoni). Questa è la situazione raccolta sullo schermo chiudendo prima un foro, poi l'altro.



Ripetendo l'esperimento con entrambi i fori aperti si nota una figura di diffrazione. Ciò non si spiegherebbe se la luce fosse interpretata solo in termini corpuscolari.

Ma l'esperimento può essere ripetuto in maniera (quasi)identica sparando elettroni (cioè corpuscoli) anziché luce. Furono Davisson, Thomson e Germer a rilevare tracce di interferenze tra elettroni mentre stavano compiendo altri esperimenti.

- Le zone chiare dello schermo sono zone ad “alta probabilità” di ricevere il colpo dell’elemento emesso. È possibile averne una probabilità?
- Come può una singola particella interagire con entrambe le fessure?
- Come mai la particella ha un comportamento statistico (descritto mediante una funzione d’onda) quando sono aperte entrambe le fessure mentre osservando la singola particella si osserva un qualcosa di effettivamente puntiforme?

La 'terza' rivoluzione scientifica: la teoria dei quanti

- 1925-26: l'idea di discontinuità quantistica *realmente* esistente sembrava ormai aver vinto.
- La teoria dei quanti assunse la sua veste "riassuntiva" grazie all'operato di scienziati come Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger, Dirac.

Quale onda per i corpuscoli?

- Serviva uno strumento matematico per descrivere l'onda associata agli elettroni. Bose e Einstein elaborano una statistica a tale fine (statistica Bose-Einstein).
- 1926, modello di Schrödinger: tratta gli elettroni mediante un'equazione d'onda, connessa all'idea che non si può più trattare in modo deterministico le traiettorie degli elettroni, ma soltanto in modo probabilistico.
- Su linee analoghe si muovono Heisenberg, Born, Jordan e Dirac. Quest'ultimo elabora il formalismo più completo.

La meccanica quantistica

(nell'interpretazione di Copenaghen, Bohr-Heisenberg 1927)

- 1925, Heisenberg: non più le orbite per gli elettroni, ma gli orbitali (ovvero luoghi geometrici che descrivono i moti possibili dell'elettrone)
- 1925, principio di esclusione di Pauli: due elettroni non possono mai occupare lo stesso stato quantico.
- 1927, principio di indeterminazione di Heisenberg.
- 1927, principio di complementarità di Bohr: l'aspetto corpuscolare e ondulatorio della materia non sono mai in contraddizione, perché tali aspetti non si presentano mai insieme.

La probabilità in versione non deterministica

Principio di indeterminazione (1927)

- Come fare allora ad osservare il moto di un elettrone se per osservarlo mi serve la luce, ma la luce può deviare la sua **traiettoria**?
- Devo cambiare idea di “traiettoria” ...
- ...e devo ammettere che se voglio conoscere la posizione dell'elettrone, perdo informazione da qualche altra parte (cioè nella quantità di moto).
- Principio di indeterminazione di Heisenberg (1901-1976): certe coppie di proprietà quantistiche (posizione e quantità di moto, energia e tempo) non possono essere conosciute con **precisione** e **contemporaneamente**. Ci sarà sempre un fattore di incertezza, t.c.

$$pq \simeq \hbar, Et \simeq \hbar, (\hbar = \frac{h}{2\pi})$$



- La probabilità diventa lo strumento per descrivere qualcosa di “non deterministico”, diversamente dall’uso che ne veniva fatto in meccanica classica
- La fisica si deve concentrare sulle misure ottenute, e non su quello che avviene prima della misura
- Il processo di misurazione “sceglie” lo stato da osservare

...sembra tutto molto lontano dal materialismo di stampo classico e che la matematica debba (e possa) descrivere precisamente la realtà naturale...

Una probabilità troppo aleatoria... (Damour 2009, 169)

Heisenberg: Poiché è ragionevole includere in una teoria soltanto le grandezze che possono essere osservate, mi è sembrato naturale introdurre solo queste frequenze e ampiezze, per così dire in qualità di rappresentanti delle orbite teoriche.

Einstein Ma Lei non crederà seriamente che in una teoria fisica si possano includere solamente grandezze osservabili...

Heisenberg Io pensavo che fosse stato proprio Lei ad aver fatto di questa idea la base per la Sua teoria della relatività. Lei ha sottolineato che non si poteva parlare di un tempo assoluto, poiché non è possibile osservare questo tempo assoluto. Lei ha detto che solo le indicazioni degli orologi, indipendentemente dal fatto che il sistema di riferimento sia in quiete o in moto, sono determinanti per la misura del tempo

Einstein Può darsi, in effetti, che io abbia utilizzato questa sorta di filosofia, ma resta nondimeno che è assurda. O forse potrei dire in modo più cauto che, da un punto di vista euristico, può essere utile ricordarsi quello che si osserva veramente. Ma sul piano dei principi è del tutto sbagliato voler fondare una teoria unica *è solo la teoria a decidere quel che può essere osservato.*

Equazione di Dirac e antimateria

- L'equazione d'onda di Dirac (1927) sembrava la più completa, capace di riassumere il più ampio numero di tentativi formali. Soltanto che nel risolverla emergevano sempre due soluzioni: una associata all'elettrone, ed un'altra associata a qualcosa che non si capiva cosa fosse.
- 1932-33: C. Anderson studiando i raggi cosmici scopre una particella in tutto simile all'elettrone ma con le proprietà quantistiche opposte (ad es. con carica positiva): la chiamò positrone. Era stata scoperta l'**antimateria**.
- Diveniva chiaro che in condizioni particolare la natura era capace di produrre particelle di questo tipo.

La scoperta del neutrone

- 1932, Chadwick: sulla scia degli studi sulla radiazione del berillio, Chadwick scopre il neutrone, l'elemento mancante dell'atomo e previsto già da Rutherford.
- Era già chiaro che dentro l'atomo doveva essere presente una forza che agiva entro un raggio d'azione molto limitato (dell'ordine di 10^{-13} cm) e che, diversamente dalla forza gravitazionale, magnetica ed elettrica, non agiva secondo la legge dell'inverso del quadrato della distanza. Si tratta della **forza nucleare forte**.

Verso la Q.E.D.

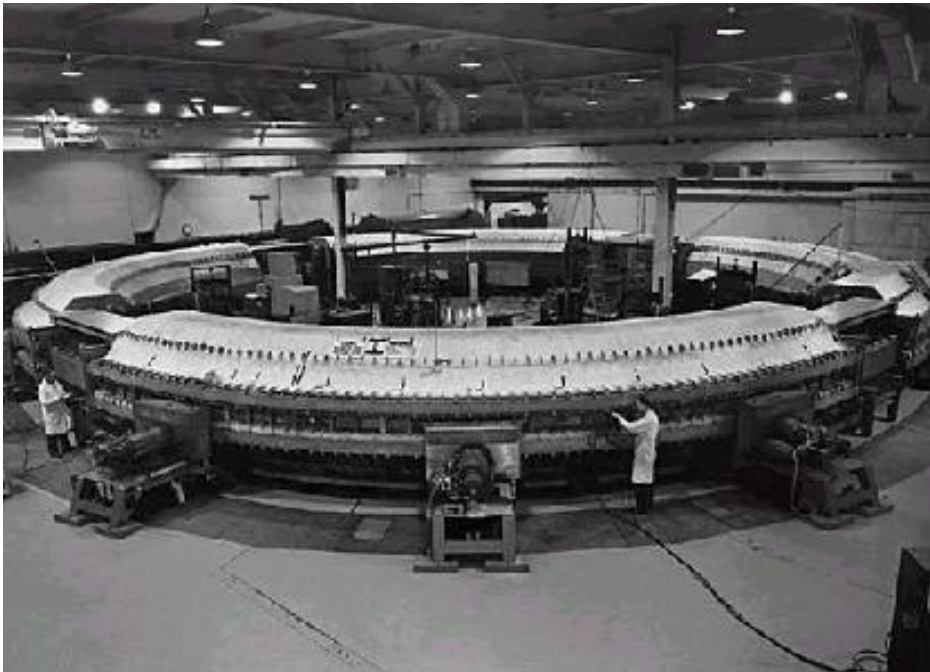
- 1933, Fermi individua il neutrino, una particella neutra capace di comparire in certi processi radioattivi. Il neutrino sarà rilevato solo a metà degli anni '50, ma aveva fatto aprire gli occhi su un'altra forza ancora, la forza nucleare debole: questa, sempre attiva entro un breve raggio d'azione, consentiva il decadimento radioattivo.
- Anni '40, Elettrodinamica quantistica: elaborata indipendentemente da Tomonaga (1906-1979), Schwinger (1918-1994) e Feynman (1918-1988). Nobel nel 1965.
- La repulsione tra cariche elettriche dello stesso segno è causata da uno scambio di fotoni: dopo lo scambio, le particelle deflettono. Anche le forze nucleari forte e debole possono essere rappresentate mediante lo scambio di fotoni. Resta fuori la forza gravitazionale, per il quale si cerca tuttora un modello basato sui presunti gravitoni.
- Ma cosa dà massa a queste particelle? Alla ricerca del bosone di Higgs

Forze	Mediatori	Coinvolge:
forti	8 gluoni	Quark
elettromagnetiche	Fotoni	Quark, elettroni
deboli	Bosoni W^+ , W^- e Z	quark, elettroni, neutrini
gravitazionali	gravitoni	quark, elettroni, neutrini

I mediatori di queste forze vengono chiamati *Bosoni di gauge*. Teorie ancora in fase di conferma: teoria delle stringhe (dopo il modello standard).

In giallo le forze unificate dal Modello standard

Acceleratori di particelle



Un protosincrotrone

Il Cosmotron, costruito presso il Brookhaven National Laboratory dello stato di New York, fu il primo acceleratore di particelle a superare la barriera di 1 GeV (1 miliardo di elettronvolt). Costruito nel 1952, ha accelerato protoni fino a energie di circa 3 GeV. Il suo magnete anulare aveva un diametro interno di 18 m e pesava circa 2000 t.

(da

<http://scienzapertutti.inf.infn.it/concorso/anti/page25.html>
Inoltre cf. <http://www.akisrx.com/pet/pet5.htm>)