

9 Verso l'elettrodinamica quantistica...

9.1 Premessa di *Marco Giliberti*

Dalla fine degli anni '80 del secolo scorso il gruppo di ricerca in didattica della Fisica dell'Università degli Studi di Milano si è occupato principalmente di didattica della fisica moderna. Per quanto riguarda la fisica quantistica esso ha sviluppato (e sta ancora sviluppando) un progetto denominato "Quanta-Mi".

Come introduzione alle idee che hanno dato luogo, appunto a "Quanta-Mi", riassumiamo qui alcune tappe fondamentali che hanno portato all'attuale visione quantistica del mondo e alla costruzione della "migliore teoria" quantistica che abbiamo: l'**elettrodinamica quantistica**.

9.2 Finora in Fisica Classica

Verso la fine del 1800 la fisica era fondata su **due rappresentazioni distinte della realtà**:

1. quella di **materia**, composta di molecole o comunque di particelle **discrete**;
2. e quella dei **campi** di forze **continui**, come il campo elettromagnetico o il campo gravitazionale.

Alcune precise **equazioni differenziali**, come le equazioni di **Newton** o quelle di **Maxwell** governavano la dinamica di materia e radiazione e descrivevano le loro interazioni.

Questa **dicotomia** tra le due rappresentazioni, una data in termini di particelle e l'altra in termini di campi, le prime dotate di un *numero finito di gradi di libertà*, i secondi dotati, invece, di un *numero infinito di gradi di libertà*, è **il motivo principale della profonda crisi** che era destinata a subire la **fisica classica** tra la **fine del 1800** e l'**inizio del 1900**.

9.3 Corpo nero ed effetto fotoelettrico

Dal punto di vista storico il problema emerse con tutta chiarezza a proposito dello spettro della radiazione emessa da un corpo nero; il modello classico di **Rayleigh** e **Jeans** prevedeva, infatti, la cosiddetta **catastrofe ultravioletta**, cioè che, nel caso di equilibrio termodinamico di un campo elettromagnetico contenuto in una cavità finita, l'energia del campo divergesse (tendesse a infinito) al crescere della frequenza.

Questa previsione non solo era in contrasto con i dati sperimentali ma mostrava anche *un'intrinseca inconsistenza del modello*; cioè non solo il modello non era corretto perché non rappresentava i dati sperimentali ma metteva in luce quella che poteva essere (e in realtà è) un'inconsistenza intrinseca della teoria.

La soluzione al problema della spiegazione dello spettro del corpo nero fu trovata da **Planck** nel 1900. Egli ipotizzò che l'energia dei *modi normali* del campo elettromagnetico nella cavità potesse assumere solo **valori discreti proporzionali al valore della frequenza** di ogni modo:

$$E_n = n \cdot h \cdot \nu. \quad h \text{ è la costante di proporzionalità (o di Planck) e vale circa } 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Importante sapere che a volte se ne utilizza una *variante* (si legge acca tagliato): $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Altri fatti sperimentali misero in crisi la concezione classica della radiazione: tipicamente le **leggi dell'effetto fotoelettrico**, che, per essere spiegate, necessitavano anch'esse dell'idea che le interazioni del campo elettromagnetico con la materia fossero date per mezzo di fotoni.

E' con **Einstein** che l'idea di **quanto di luce** cambia *status*: dalla quantizzazione dei modi normali di Planck egli passa all'idea dei quanti come "grumi" di energia. Scrive infatti Einstein nel suo lavoro del 1905 sull'effetto fotoelettrico: "...le osservazioni... vengono facilmente

comprese se ci si rifà all'idea che l'energia della luce sia distribuita nello spazio con discontinuità" [A. Einstein, *Annalen der Physik*, XVII a, 132 (1905)]

Col tempo si cominciò a dire che la radiazione elettromagnetica viene "trasportata" da quanti di energia $h\nu$ (ma è interessante notare che soltanto 26 anni dopo il lavoro di Planck, nel 1926, questi quanti ricevettero un nome: Lewis li chiamò: **fotoni**).

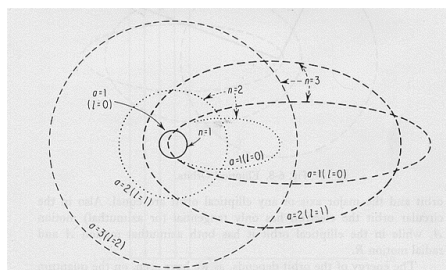
9.5 Ancora il problema della struttura dell'atomo

La scorsa lezione abbiamo visto come la fisica classica si riveli incapace anche di spiegare la **struttura dell'atomo**. In particolare gli **spettri della luce emessa** dagli elementi pongono problemi di difficile (se non impossibile) interpretazione all'interno della teoria classica.

Abbiamo già passato in esame i modelli di atomo fino a quello di **Bohr**. Proviamo ad andare avanti un altro po' e vediamo che altre novità vengono introdotte.

9.5.1 La quantizzazione alla Sommerfeld

nel 1913 A. **Sommerfeld** applica la *teoria della relatività* al moto dell'elettrone ed introduce



ulteriori quantizzazioni, oltre quella dei livelli energetici: le orbite elettroniche sono ellittiche con eccentricità determinate e non qualunque (**quantizzazione delle eccentricità**: immagine a sinistra); considerate le orbite su di un piano nello spazio, come devono, non tutti i piani possibili passanti per il nucleo possono contenere orbite, ma solo determinati (**quantizzazione spaziale**:

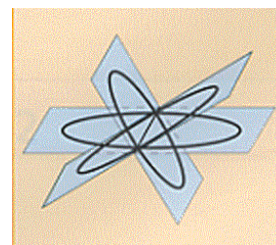


immagine a destra). Con queste correzioni ogni spettro sperimentale è ben spiegato dalla teoria (ricordate che l'atomo di Bohr spiegava solamente lo spettro dell'idrogeno)

9.5.2 L'effetto Compton

Dobbiamo aspettare il 1923 per avere la prova sperimentale che il **quanto** di energia elettromagnetica [il fotone] "trasporta" anche **quantità di moto** (questo potrebbe spiegare perché si è dovuto aspettare il 1926 perché avesse un nome). Come scrive, infatti, Compton nell'articolo che spiega l'effetto che da lui prende il nome: "...essa implica...l'ipotesi che i quanti di radiazione provengono da direzioni definite e sono deviati su direzioni definite. Il supporto sperimentale della teoria indica, in maniera molto convincente, che un quanto di radiazione porta con sé una quantità di moto dotata di direzione, così come porta con sé dell'energia." [A. Compton, *Phys Rev.* XXI, 483 (1923)].

L'esperimento di **Compton** consiste nell'inviare un fascio di raggi X (oppure gamma) su un bersaglio e nell'osservarne la **diffusione**. Il fisico statunitense constatò che radiazione di alta frequenza (fra gli 0,5 ed i 3,5 MeV) che attraversa il bersaglio subisce un aumento di lunghezza d'onda, ossia vira verso il rosso (secondo l'ipotesi dei quanti di luce di Einstein, che poneva l'energia in proporzionalità diretta con la frequenza, perde energia), in misura diversa a seconda dell'angolo di cui viene deflessa la direzione di propagazione. Questo effetto può essere spiegato semplicemente se si pensa ai **fotoni come a particelle** che urtano elasticamente contro gli elettroni presenti negli atomi, **cedendo loro energia**.

9.5.3 Le onde di De Broglie

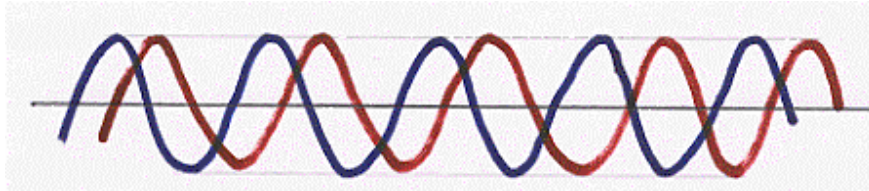
Un cambiamento di prospettiva si ebbe con De Broglie (1924) che propose una soluzione per **limitare la dicotomia tra particelle e campi**. La descrizione che dà Marco Giliberti della proposta di De Broglie è matematicamente troppo complessa quindi, trattandosi di una proposta antecedente gli anni '40, anni in cui si affaccia la teoria cui il *prof. Giliberti* si

riferisce, possiamo chiedere aiuto al solito ottimo Einstein che ha il dono della semplicità! Riprenderemo la trattazione del Prof Giliberti in conclusione di lezione.

Einstein *ibidem* pag. 252. *Come possiamo interpretare il fatto che soltanto alcune caratteristiche lunghezze d'onda appaiono negli spettri degli elementi?*

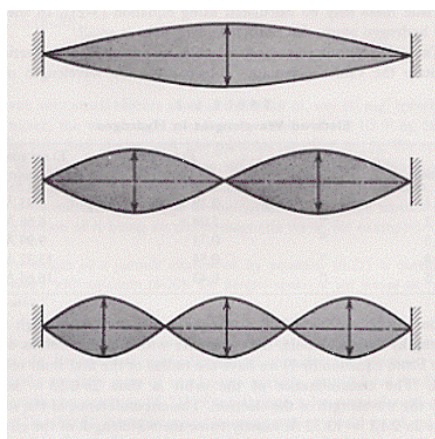
In fisica è avvenuto più volte che progressi essenziali potessero realizzarsi seguendo coerentemente un'**analogia** fra fenomeni in apparenza estranei. Ma se è facile trovare analogie superficiali, che in realtà mancano di significato, non lo è invece scoprire qualche comune tratto fondamentale, nascosto dietro apparenze esterne contrastanti, e costruire su questa base una nuova teoria che si imponga. Questo sì che è veramente lavoro creativo! Lo sviluppo della cosiddetta **meccanica ondulatoria** creata da **De Broglie** e da **Schrödinger** è l'esempio tipico dell'affermarsi di una brillante teoria imperniata su una profonda e fortunata analogia.

Prenderemo le mosse da un esperimento classico che non ha nulla a che fare con la fisica moderna. Impugniamo l'estremità di un lunghissimo tubo di gomma, o di una corda, o di una slinky, e cominciamo a muoverla/o ritmicamente su e giù, ad imprimerle/gli cioè un movimento oscillatorio. Questa oscillazione, come abbiamo potuto già constatare, crea un'onda che si propaga lungo il tubo con una certa velocità. Se immaginiamo che la lunghezza del tubo sia infinita le singole onde, una volta create, proseguiranno il loro infinito viaggio senza interferenza (in tutti i sensi!).



Nel disegno un'onda generica ad un certo istante (in blu) e ad un istante successivo (in rosso)

MA se fissiamo le due estremità del mezzo di propagazione dell'onda, come per esempio accade negli strumenti a corda: fissiamo l'attenzione su una corda di un violino o su un monocordo¹. Cosa avviene ora se ad una delle estremità della corda viene creata un'onda (per esempio mediante un archetto)? L'onda inizia il suo percorso come nell'esempio precedente ma viene riflessa dall'altra estremità fissa. Abbiamo così due onde: una creata dall'oscillazione, l'altra dalla riflessione, le quali camminano in senso opposto e interferiscono l'una con l'altra. Non è difficile determinare l'interferenza (cioè il risultato della somma) delle due onde e identificare l'onda risultante dalla loro sovrapposizione: la cosiddetta onda stazionaria (I due termini "onda" e "stazionaria" sembrano contraddirsi l'un l'altro il perché di questo nome è evidente osservando l'ottima animazione proposta nella pagina web: <http://www.soloclassica.it/ondestazionarie.htm>).



Il moto più semplice di onda stazionaria è il moto di una corda fissa alle due estremità pizzicata al suo centro: si limiterà ad andare "su e giù" come mostra il disegno a fianco (primo caso in alto). La caratteristica di questo moto è che soltanto i due punti terminali (i cosiddetti **nodi**) sono a riposo. Mentre l'onda "staziona" fra i due nodi tutti i punti della corda, esclusi i nodi, raggiungono simultaneamente i massimi (o i minimi) della loro deviazione dalla posizione di equilibrio: ciascun punto effettua oscillazioni sempre della stessa ampiezza e di un'ampiezza leggermente minore/maggiore del punto vicino, di modo che, nel complesso, la corda raggiunge la configurazione in disegno. Nell'istante successivo, tutti i

¹ Strumento da laboratorio inventato forse da Pitagora e in ogni modo certamente esistente ai suoi tempi. Il Monocordo consisteva in una sola corda di budello o di metallo tesa fra 2 **ponti** appoggiati su di una cassa armonica. Un terzo ponte divideva la corda in vari segmenti che costituivano la *scala diatonica*. Tali strumenti furono usati per tutto il Basso Medioevo per l'insegnamento della musica e per accompagnare il canto.

punti della corda, esclusi i nodi, raggiungono simultaneamente i minimi (o i massimi) "dall'altra parte". L'oscillazione supponiamo avvenga nella direzione alto/basso: i massimi saranno i punti disposti nella parte "alto" e i minimi quelli disposti nella parte "basso".

Questa è la varietà più semplice di onda stazionaria: ve ne sono altre: nel disegno sono rappresentate onde con 3 e con 4 nodi. La porzione di curva racchiusa fra due nodi si comporta come descritto sopra; mentre una porzione di corda si trova nei punti di massimo, la porzione vicina si trova nei punti di minimo e così via...

In ogni modo la lunghezza d'onda λ (distanza fra due creste, o fra il primo zero e il terzo) dipende dalla lunghezza l della corda e dal numero dei nodi: nel primo caso $\lambda=2l$, nel secondo $\lambda=l$ nel terzo caso a $\lambda=\frac{2}{3}l$ in generale è: $\lambda = \frac{2 \cdot l}{n}$ (puoi verificarlo con i casi considerati)

Come il numero dei nodi può essere solo un numero intero, così le lunghezze d'onda "consentite" varieranno in modo discontinuo.

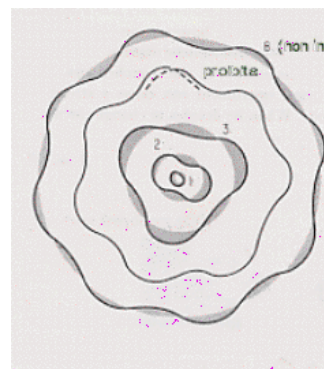
In questa discontinuità ritroviamo caratteristiche essenziali della fisica quantistica...

Ed ecco qui l'**analogia** (duplice): *L'onda stazionaria prodotta da un violinista è assai più complicata di quella analizzata, essendo una mescolanza di lunghezze d'onda diverse, ma la fisica è in grado, partendo da un'onda complessa, di "scomporla" nelle sue componenti elementari. Ricorrendo alla terminologia usata precedentemente potremo dire che la nostra corda oscillante ha un suo **spettro** dato dalle frequenze di queste onde componenti.*

Allo stesso modo di un elemento chimico che emette radiazioni. E come per lo spettro di un elemento così anche per una corda oscillante soltanto alcune lunghezze d'onda sono consentite, tutte le altre essendo interdette.

E come per lo spettro di un elemento anche lo spettro della corda di violino corrisponde esattamente al suono cui corrisponde e a nessun altro!

Abbiamo dunque scoperto qualche somiglianza fra la corda oscillante e l'elemento chimico che emette radiazioni. Per quanto strana possa apparire l'analogia, proviamo a trarne alcune conclusioni e a spingere più oltre il confronto che abbiamo ritenuto di poter azzardare. Eravamo rimasti ad un modello di atomo di tipo "planetario" in cui gli elettroni, che potevano assumere solo determinati livelli energetici, ruotavano attorno ad un nucleo "pesante". L'ipotesi di De Broglie è la seguente (ricordate che stiamo seguendo una trattazione semplificata...): un tale sistema di particelle si comporta come un piccolo strumento acustico nel quale si producano onde stazionarie: ciascun orbita costituisce "una corda" e ciascun elettrone un'onda stazionaria!



Le orbite stazionarie diventano così quelle che "contengono" onde stazionarie (e questo è davvero un primo passo verso la comprensione della struttura dell'atomo)

Che rimpallo continuo! Prima abbiamo visto che la luce (nel propagarsi) presenta un carattere ondulatorio, poi che vi sono fenomeni (d'interazione) in cui rivela natura "corpuscolare". Ora ci troviamo nel caso opposto: c'eravamo assuefatti a considerare gli elettroni come corpuscoli e ora dovremmo ammettere che essi possono "comportarsi come" (dicitura che può portare a misconcetti, attente/i!) onde... Per poter accettare un'ipotesi del genere dovremmo avere il supporto di un esperimento cruciale.

In questo caso l'avete già "visto": gli elettroni, pur inviati uno alla volta, a "passare" in una zona in cui siano presenti sue "fenditure" (in questo caso sono due ostacoli ma il risultato non cambia) presentano un comportamento peculiare dei fenomeni ondulatori: diffrangono e

interferiscono! Quest'esperimento fu realizzato già ai tempi di Einstein...Nel 1927, quattro anni dopo l'originaria proposta di De Broglie, **Davisson** e **Germer** mostrarono direttamente e sperimentalmente gli effetti ondulatori connessi alle particelle materiali in un esperimento di interferenza prodotto dallo *scattering* di elettroni da cristalli

Vi sono altri tipi di prove, che passano per una matematica non banale e per l'utilizzo delle trasformazioni di **Lorentz**, che permettono di asserire l'ipotesi di De Broglie coerente con i dati in nostro possesso e con la teoria "circostante".

9.5.4 Onde di probabilità

Einstein, *ibidem*, pag. 259: *Ricordiamo che in base alle leggi della meccanica classica, ove si conoscano posizione e velocità di un punto materiale e inoltre le forze agenti su di esso, è possibile [conoscerne il passato e] predirne il percorso futuro. In meccanica classica l'affermazione "in un determinato istante il punto materiale possiede posizione e velocità determinate" ha un significato preciso. Se questa affermazione venisse a perdere il proprio significato cadrebbe anche il ragionamento inerente la predizione del futuro del punto stesso.*

Al principio del XIX secolo gli scienziati tendevano a ridurre tutta la fisica a forze semplici agenti su particelle materiali dotate ad ogni istante, di posizione e velocità determinate. Ricordiamo come abbiamo presentato il moto, discutendo di meccanica all'inizio del nostro viaggio nel regno dei problemi fisici. Su una traiettoria data abbiamo segnato dei punti corrispondenti alle esatte posizioni del corpo in taluni istanti, dopo di che abbiamo tracciato dei vettori tangenti indicanti direzione e grandezza della velocità. Ciò è altrettanto semplice quanto convincente. Non è però possibile valerci dello stesso procedimento per i quanti elementari di materia o elettroni o per i quanti di energia o fotoni. Non possiamo rappresentare il percorso di un fotone o di un elettrone allo stesso modo con il quale raffiguriamo il moto in fisica classica.

L'esperimento di interferenza degli elettroni lo prova chiaramente: come fanno gli elettroni "mandati ad uno ad uno" a posizionarsi secondo il disegno delle frange d'interferenza che avete visto nel filmato? Che traiettoria hanno seguito? Che ne sanno gli elettroni "successivi" che gli elettroni "precedenti" hanno seguito o meno una certa traiettoria?

*Tentiamo dunque un'altra via. Immaginiamo di ripetere molte volte lo stesso procedimento elementare: uno dopo l'altro degli elettroni vengono lanciati in direzione dei forellini. La ripetizione dell'esperimento si verifica sempre nelle stesse condizioni: tutti gli elettroni hanno la stessa velocità e sono tutti diretti verso i forellini. L'unico modo per trattare questa situazione è un **metodo statistico**.*

Con un tal metodo non avrà più senso chiedersi: qual è la velocità di ogni particella in un dato istante? Per conto è lecito domandare: quante stimiamo essere le particelle aventi una velocità compresa fra trecento e trecentotrenta metri al secondo? Dobbiamo insomma disinteressarci degli individui, cercando invece di calcolare i valori medi caratterizzanti l'intero aggregato.

*Applicando il metodo statistico non possiamo predire l'esatto comportamento di un individuo facente parte di una moltitudine. Possiamo soltanto predire la **probabilità** che esso si comporti in un determinato modo. Se le statistiche ci dicono che un terzo delle particelle gassose possiede velocità comprese fra 300 e 330 metri al secondo ciò significa che ripetendo le nostre osservazioni su molte particelle otterremo realmente tale media, altrimenti detto che la probabilità di trovare una particella la cui velocità sia compresa entro suddetti limiti è uguale ad un terzo.*

In un primo momento, alla domanda su come conciliare gli esperimenti che attribuivano sia caratteristiche ondulatorie sia caratteristiche particellari a fotoni e elettroni, si rispose che non di *onde vere e proprie* si tratta ma di *onde di probabilità*. A me quest'ipotesi non convince per niente. Tale ipotesi conduceva, comunque, a previsioni e calcoli corretti grazie al contributo di **Schrödinger** (fisico e matematico austriaco: 1887-1961) che trattò

matematicamente le onde di De Broglie nell' equazione che porta il suo nome e che riporto per mera curiosità e per mostrarvi come la matematica cresca di difficoltà:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{8\pi^2 m}{h^2} \cdot V(x, y, z, t) \psi = \frac{4\pi^2 m}{h} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Schrödinger propose appunto che l'elettrone non fosse una particella che seguiva delle orbite, seppur ondulatorie, intorno ad un nucleo, ma piuttosto **nuvole di probabilità** intorno al nucleo stesso.

L'equazione di Schrödinger è **non relativistica** il che può sembrare strano, infatti già De Broglie aveva ricavato le sue relazioni imponendo l'invarianza per trasformazioni di Lorentz di alcune caratteristiche dell'onda; per di più i **fotoni**, essendo quanti di luce, hanno massa zero e non ammettono una descrizione non relativistica e, quindi, non sono descrivibili dall'equazione di Schrödinger.

Il motivo di tale *stranezza* risiede nel fatto che, tentando di impostare un'equazione relativistica, a Schrödinger, in calcoli "non tornavano"! Il motivo per cui non gli tornavano questi calcoli è che non aveva tenuto conto dello **spin** dell'elettrone...

9.6 Il principio di indeterminazione

Elementi caratteristici della fisica quantistica sono, oltre alla modellizzazione dei fenomeni fisici in forma discreta e non continua, anche l'**abbandono del determinismo** in favore del **calcolo delle probabilità** e quindi, per esempio, l'abbandono del concetto di traiettoria e di determinazione delle condizioni iniziali (indispensabile per la risoluzione delle equazioni differenziali, ricordate?). In particolare, immagino abbiate sentito parlare del principio di indeterminazione di **Heisenberg**:

*non è possibile conoscere **simultaneamente** posizione e quantità di moto di un dato oggetto con precisione arbitraria,*

È una delle chiavi di volta della meccanica quantistica e venne formulato nel 1927.

Il principio di indeterminazione viene a volte spiegato erroneamente, sostenendo che la **misura** della posizione **disturba** necessariamente il momento lineare della particella e lo stesso Heisenberg diede inizialmente questa interpretazione. In realtà il disturbo non gioca nessun ruolo, in quanto il principio è valido anche quando la posizione viene misurata in un sistema e il momento viene misurato in una copia identica del primo sistema. È più accurato dire che in meccanica quantistica le particelle hanno alcune proprietà tipiche delle onde, non sono quindi oggetti puntiformi, e **non possiedono** una **ben definita coppia posizione-quantità di moto**.

Si consideri la seguente analogia: supponiamo di avere un segnale che varia nel tempo, come un'onda sonora, e che si vogliono sapere le **frequenze esatte** che compongono il segnale in un dato momento. Questo risulta essere impossibile: infatti per poter determinare le frequenze accuratamente, è necessario campionare il segnale per un intervallo temporale e si perde quindi la precisione sul tempo. (In altre parole, un suono non può avere sia un tempo preciso, come in un breve impulso, che una frequenza precisa, come in un tono puro continuo). Il tempo e la frequenza dell'onda nel tempo, sono analoghi alla posizione e al momento dell'onda nello spazio. Il principio viene abitualmente reso con la formula

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

in cui Δx è l'errore sulla posizione e Δp quello sulla quantità di moto.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg ci porta a lambire un argomento che approfondiremo nella prossima lezione e che costituisce un'ulteriore cesura con la fisica classica: il concetto di **misura**.

Nelle formulazioni moderne della meccanica quantistica il principio non è più tale ma è un **teorema** facilmente derivabile dai postulati.

Cioè la meccanica quantistica è stata sistematizzata, come già lo era stata la meccanica newtoniana, in un sistema logico deduttivo. Vi è però un grande problema, in parte ancora aperto: infatti i postulati della meccanica quantistica sono postulati matematici che consentono la costruzione di teoremi, a loro volta strumenti di calcolo, mediante i quali si riescono a predire i risultati degli esperimenti e quindi fornire una modellizzazione matematica dei fenomeni corrispondenti. Quel che manca, o almeno è oggetto di dispute e contrasti, nella migliore tradizione delle comunità scientifiche, è un'interpretazione del significato di tali regole di calcolo, cioè una visione del mondo corrispondente: un'epistemologia! Vi sembrerà assurdo ma è così: i fisici sanno prevedere e riprodurre fenomeni di cui però non hanno ancora trovato una spiegazione condivisa!

Vediamo le linee guida di una delle proposte interpretative esistenti:

9.7 Premessa concettuale alla proposta di Milano - Marco Giliberti

"Lo scienziato ha una grande esperienza di ignoranza, dubbio, incertezza, e questa esperienza, secondo me è basilare...Dobbiamo riconoscere la nostra ignoranza e lasciare molto spazio per il dubbio" - R. Feynman

Presupposti

L'introduzione storica della sezione precedente si è fermata a considerare gli sviluppi della teoria dei quanti raggiunti negli anni '30-'40 del secolo scorso. Da quegli anni fino ad oggi, molti progressi sono stati fatti nella conoscenza della fisica quantistica.

Tuttavia, riteniamo che sia poco fondata una presentazione che ponga la meccanica quantistica come teoria di riferimento, in qualche modo come teoria fondamentale; visto che proprio negli anni in cui veniva formulata, se ne cercava il superamento (e proprio da parte degli stessi fisici che la stavano costruendo!) per arrivare ad una teoria completa anche per il campo elettromagnetico.

Come abbiamo detto tale teoria esiste nell'ambito generale della teoria quantistica dei campi, si chiama **elettrodinamica quantistica** e, nella sua formulazione "definitiva" risale alla metà degli anni '40 del secolo passato. Essa è da *tutti* ritenuta la migliore teoria mai sviluppata dall'uomo (a detta del prof. Giliberti: in realtà non so se vi siano ancora altre proposte: uno dei grandi pregi della Teoria dei Campi è di unificare Meccanica Quantistica e Relatività, e scusate se è poco!), anche se negli anni '70 è stata inglobata in una teoria più ampia: il cosiddetto "**modello standard**" principalmente dovuto a Glashow, Weinberg e Salam, vincitori del **nobel per la fisica** nel 1979 "per i loro contributi alla teoria unificata dell'interazione debole ed elettromagnetica tra le particelle elementari" che però non ne altera gli aspetti epistemologici fondamentali. Perciò noi riteniamo che essa debba essere presa come teoria di riferimento per l'insegnamento della fisica quantistica (magari auspicando anche qualche breve *excursus* nella fisica del modello standard...).

La **meccanica quantistica** è l'*adattamento del mondo newtoniano delle particelle puntiformi ai fenomeni quantistici* mentre la **teoria quantistica dei campi** è l'*evoluzione della teoria dei Campi Classica per rendere conto della quantizzazione*.

L'oggetto primario di quest'ultima teoria è il **campo**, non le particelle, e gli aspetti statistici e "particellari" della fisica quantistica sono principalmente concentrati nella descrizione delle

interazioni. Come dice il fisico Freeman Dyson (1923 Fisico e matematico statunitense di origine britannica) **"noi siamo campi piuttosto che particelle"**.

Quadro concettuale

Gli argomenti presentati in questo corso si inseriscono nel quadro concettuale che viene qui di seguito descritto sommariamente.

La descrizione dei sistemi fisici viene data in termini di **campo** che diventa il concetto chiave. "Questo punto di vista ... forma il dogma centrale della Teoria Quantistica dei campi: la realtà fondamentale è un insieme di campi ... tutto il resto è derivato come conseguenza" (Steven Weinberg² (fisico statunitense nato nel maggio del 1933).

DEF Nella nostra proposta il **campo** e' *semplicemente* una regione dello spazio nella quale ad ogni istante di tempo e' possibile attribuire delle proprietà punto per punto.

Le variazioni di queste proprietà (aumento, diminuzione ecc.) si propagano nello spazio all'interno del campo in termini ondulatori.

ES1 un **campo di temperatura** e' una regione dello spazio nella quale e' possibile definire la temperatura punto per punto. Se accendo e spendo una stufetta la temperatura cambia: prima vicino alla stufetta poi più in là... e così si crea **un'onda di temperatura**.

ES2 Un **campo elettronico** e' una zona nella quale e' possibile definire una densità di carica, di massa ecc. con un rapporto carica/massa preciso e fissato. La propagazione del fascio elettronico obbedisce ad una equazione delle onde ma la sua interazione con un rivelatore e' sempre locale (e' quantizzata e diciamo così che *il campo interagisce tramite un elettrone per volta*). Nell'esperimento della doppia fenditura e' il campo a incidere contro le due fenditure e ad interferire con se stesso, in modo del tutto simile a come abbiamo visto interferire le onde elettromagnetiche o dell'acqua.

Sullo schermo, poi si vedono le frange così che non ci accorgiamo dei singoli elettroni se il fascio e' ad *alta intensità* mentre invece se e' a bassissima intensità compare un elettrone per volta. La **probabilità** che il campo interagisca col rivelatore tramite un elettrone in una certa zona è poi proporzionale all'intensità' del campo in quella zona... ed ecco come si formano le frange chiare e scure un elettrone per volta...

A **livello macroscopico** i sistemi fisici sono descritti in termini continui per mezzo di campi di pressione, di temperatura, di densità ecc. che soddisfano precise **leggi fenomenologiche** come quelle della termodinamica e della fluidodinamica.

Le **interazioni** tra questi sistemi, con scambi di quantità di moto, di energia, di momento angolare ecc. vengono descritti per mezzo di altri campi che sono **campi di forza**, come il campo elettromagnetico e quello gravitazionale. In tale contesto parliamo di continui materiali e di continui dei campi di forza.

Se passiamo ad una descrizione più raffinata dei sistemi fisici, ci accorgiamo che le **leggi fenomenologiche si spiegano molto bene in termini di interazioni elementari locali ed universali**: eventi nello spazio-tempo nei quali si ha lo **scambio quantizzato** di alcune grandezze (carica elettrica, massa, momento angolare ecc.).

²Sue le seguenti frasi:

«Lo sforzo di capire l'universo è tra le pochissime cose che innalzano la vita umana al di sopra del livello di una farsa, conferendole un po' della dignità di una tragedia.»

"Osservando la natura, nel passato, l'impressione di essere dinanzi ad un progetto doveva essere enorme. La Terra è un luogo così confortevole e piacevole, e tutte le cose funzionano così bene. Tuttavia, man mano che apprendiamo più cose sull'universo, esso non sembra più un luogo così amichevole, e noi risuliamo essere i vincitori in una lotteria cosmica."

E', infatti, nella dinamica che nasce il **concetto di quanto** che, a seconda del tipo di interazione considerato, prende nomi differenti: così si hanno gli atomi, che sono i quanti della chimica, i nucleoni che sono i quanti della fisica nucleare e le particelle elementari che sono i quanti della fisica delle alte energie.

L'ente centrale della descrizione è, ripetiamo, **il campo**; parlare di quanti è solo un modo efficace per descrivere certe caratteristiche della dinamica dei sistemi. In modo pittoresco possiamo dire che **i quanti nascono e muoiono nelle interazioni obbedendo a regole che dipendono dalla dinamica del campo di cui essi sono il quanto**.

Si hanno così: il **fotone**, che è il quanto del campo elettromagnetico, l'**elettrone**, che è il quanto del campo elettronico, il **protone**, che è il quanto del campo protonico, e così via.

Non stupisce, a questo punto, che ci siano degli **aspetti statistici**, nella descrizione delle interazioni, che sono, però, regolati da leggi generali comuni a tutti i sistemi; di questo tipo sono, per esempio, i **principi di conservazione**.

Per taluni aspetti questa distinzione somiglia a quella sulla natura del calore, che non è un fluido che fluisce da un corpo ad un altro ma è, in certo senso, solo una modalità di scambio di energia.

Nelle **interazioni** la struttura quantistica diventa evidente, al contrario, per i **campi liberi** essa è nascosta. Quest'ultima è, però, una situazione limite ideale; infatti tutti i campi, perché se ne possa fare un'analisi fisica, devono poter interagire e questo significa che devono essere accoppiati tra loro tramite campi "di forza".

Non tutti i campi hanno, però, lo stesso "status" epistemologico; alla luce delle nostre conoscenze attuali, infatti, alcuni **campi** appaiono più "**fondamentali**" o "elementari" di altri.

Per esempio il campo elettromagnetico e il campo elettronico sono campi fondamentali, mentre il campo protonico non lo è, nel senso che la dinamica delle interazioni del campo protonico può essere spiegata in termini di campi di quark e di gluoni; ma la dinamica, diciamo, del campo elettronico, non è riducibile, per quanto ne sappiamo ora, a quella di altri campi più elementari. Sono tali campi elementari che, nella nostra visione del mondo, costituiscono l'universo fisico.

E, in un certo senso, tutta l'evoluzione della fisica si può rileggere in termini di continue unificazioni di campi che prima erano pensati separati o di riduzioni a campi sempre più "elementari".

Abbiamo, così, una sorta di **stratificazione della realtà**: alla base ci sono i campi fondamentali, l'interazione di questi genera materia che, ad un livello di descrizione meno fine ci appare costituire altri campi meno fondamentali, che a loro volta interagiscono e generano sistemi descritti da campi ancora diversi e così via.

Per esempio i campi fondamentali dei quark e dei gluoni interagiscono a dare i campi protonico e neutronico, questi interagiscono con i campi di forza nucleari a dare i campi nucleari. Questi ultimi si "combinano" con il campo elettromagnetico a dare i campi atomici che, tramite le forze di Van der Waals, costituiscono la materia che cade direttamente sotto i nostri sensi ecc. E' in questo modo che **differenze quantitative** (per es. nelle energie) **generano aspetti qualitativi**.

Il sogno di tutta la Fisica è poter ricondurre tutta la realtà nota ad un principio unico. Così le forze elettriche e magnetiche appaiono manifestazioni dello stesso campo elettromagnetico che a sua volta è manifestazione "a bassa energia" del campo elettrodebole.

La situazione attuale è che, nonostante i suoi cento anni di vita, la rivoluzione operata dalla fisica quantistica non appartiene ancora al patrimonio culturale del cittadino medio e neppure plasma la visione del mondo "collettiva" della maggior parte delle persone di cultura.