

Preambolo Riepilogativo

Gli argomenti trattati nel corso di quest'anno possono essere così brevemente schematizzati:

Elettrostatica

Tra due cariche elettriche si esercita una forza detta elettrostatica (governata dalla legge di Coulomb).

Se in qualche punto dello spazio poniamo delle cariche elettriche ferme, si genera un campo elettrostatico **E**. Diciamo che le sorgenti del campo elettrico sono le cariche elettriche. Collegato al campo elettrico, che è conservativo, c'è l'energia potenziale **U** e il potenziale **V**.

Abbiamo trattato poi il campo elettrico nei conduttori, studiando tra le altre cose la gabbia di Faraday e i condensatori.

Elettrodinamica

Quando cariche elettriche si muovono in modo ordinato lungo una data direzione dello spazio, si ha una corrente elettrica *i*. Abbiamo studiato le condizioni affinché possa sussistere una corrente elettrica; abbiamo parlato dei circuiti elettrici e delle leggi che ne disciplinano il funzionamento (Kirchhoff, Ohm).

Magnetostatica

Se in qualche punto dello spazio poniamo qualche magnete permanente, si genera un campo magnetico **B**. In modo equivalente, se in qualche zona dello spazio c'è una corrente elettrica, si genera un campo magnetico **B**. Le sorgenti effettive del campo magnetico sono solo le correnti, in quanto anche i magneti permanenti, a livello microscopico, possono riguardarsi come delle microcorrenti. Abbiamo visto il campo magnetico generato da una corrente rettilinea, una corrente circolare e una corrente solenoidale. Se si è in presenza di materiali, il campo magnetico assume valori diversi rispetto al vuoto, in taluni casi (materiali ferromagnetici) anche molto superiori.

Infine abbiamo studiato la legge di Lorentz, che riguarda l'effetto di un campo magnetico **B** su una particella carica in movimento.

Campo e onde elettromagnetiche

Abbiamo visto come un campo magnetico variabile genera un campo elettrico variabile e viceversa, un campo elettrico variabile dà origine ad un campo magnetico. Nella stessa regione dello spazio sono presenti due campi uno magnetico e l'altro elettrico i quali non possono essere più considerati indipendentemente ma come due aspetti della stessa realtà che va sotto il nome di *campo elettromagnetico*. Lo scienziato che unificò i fenomeni elettrici con quelli magnetici fu James Clerk Maxwell, il quale elaborò nel 1865 le famose equazioni che prendono il suo nome. La cosa interessante che scoprì Maxwell teoricamente è che il campo elettromagnetico si propaga nello spazio, così come si propagano le onde del mare; il campo elettromagnetico si propaga con una velocità di 300.000 km al secondo; tale velocità era uguale a quella *c* già nota della luce. Da questo fatto nacque l'ipotesi che la luce fosse in realtà un'onda elettromagnetica. E così è: la luce è un'onda elettromagnetica la cui frequenza è compresa tra 400 THz e 750 THz. I nostri occhi sono sensibili alle onde elettromagnetiche di frequenza compresa tra i valori suddetti. Ovviamente, esistono onde elettromagnetiche di varia frequenza e tutte insieme formano lo spettro elettromagnetico: onde radio; microonde, infrarossi, luce visibile, ultravioletti, raggi X e raggi γ .

La luce

La luce è la porzione visibile (ai nostri occhi) dello spettro elettromagnetico; si è visto che essa si propaga in maniera rettilinea, in raggi e fasci, e che la sua velocità è finita, pari a $c = 300.000$ km al secondo; è soggetta ai fenomeni della *riflessione* e della *rifrazione*, governati da leggi geometriche; altri fenomeni studiati sono stati la *diffrazione*, la *diffusione*, la *dispersione* e l'*interferenza*.

Cenni alla Fisica del Primo Novecento

Alla fine dell'800 era tutto chiaro: i fenomeni elettrici, quelli magnetici e quelli luminosi erano 3 aspetti della medesima realtà, denominata campo elettromagnetico.

Sembrava così che in fisica fosse rimasto poco altro da scoprire. Ovviamente non era così:

1. Cenni di teoria della relatività ristretta

Dato che ogni fenomeno ondulatorio comportava la variazione delle proprietà di qualche mezzo materiale, ci si chiedeva come facessero le onde elettromagnetiche a propagarsi nel vuoto; si ipotizzò allora l'esistenza dell'*etere cosmico*, un fantomatico mezzo che avrebbe dovuto pervadere l'intero universo e consentire con le variazioni di qualche sua proprietà la propagazione delle onde elettromagnetiche. Nella teoria di Maxwell l'etere venne ad assumere il ruolo di un sistema di riferimento privilegiato rispetto al quale la luce e tutte le radiazioni elettromagnetiche, nel "vuoto", si devono propagare con velocità costante c , anche se probabilmente Maxwell non si pose la domanda a quale sistema di riferimento dovessero riferirsi le coordinate spaziali e temporali delle sue equazioni.

Furono organizzati numerosi esperimenti per verificare l'esistenza dell'etere. Poiché la Terra gira intorno al Sole, essa si dovrebbe muovere rispetto all'etere e la velocità della luce dovrebbe essere diversa nei vari momenti dell'anno, e in generale diversa dal valore c . Diverse esperienze, tra cui le più significative furono quelle dei fisici due americani Michelson e Morley, confermarono però che la velocità della luce aveva lo stesso valore in qualunque periodo dell'anno. Tutte le esperienze erano concordi nel ritenere che la velocità della luce era sempre c rispetto a qualunque sistema di riferimento inerziale.

A questo punto, nel 1905 centouno anni fa, intervenne Einstein con la sua teoria della relatività ristretta, nella quale egli postulò due principi fondamentali:

a) il *principio di relatività*: le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali;

b) il *principio della costanza della velocità della luce*: la velocità della luce è sempre la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali, indipendentemente dalla velocità della sorgente che l'ha emessa.

Riflettiamo sul secondo principio: supponiamo che un treno vada verso Nord a 100 km/h; io sto nel treno e corro nella stessa direzione Nord a 10 km/h; rispetto al suolo mi sto ovviamente muovendo a 110 km/h; per avere la mia velocità rispetto al suolo ho addizionato alla velocità del treno rispetto al suolo la mia velocità rispetto al treno. Abbiamo cioè applicato una semplice legge di composizione delle velocità.

Supponiamo di essere su un'astronave (La "*Star of Universe*") che viaggia rispetto alla Terra a 100.000 km/s; accendo una torcia: il raggio luminoso uscirà da questa, rispetto all'astronave, a 300.000 km/s; rispetto alla Terra il raggio luminoso non avrà però la velocità di 100.000 + 300.000 = 400000 km/s come ci si aspetterebbe, ma ancora la velocità di 300.000 km/s, poiché, come abbiamo detto, la luce ha sempre la velocità di 300.000 km/s in tutti i sistemi di riferimento.

La legge di composizione delle velocità non vale più nella forma consueta.

La teoria della relatività ha mutato profondamente le nozioni di spazio e tempo, che non possono più essere considerati assoluti, nonché quelle di massa ed energia, grandezze che vengono ora concepite come mutuamente convertibili. In particolare, una delle conseguenze della teoria della relatività è che due eventi che sono simultanei in un sistema di riferimento, possono non esserlo rispetto a un altro. Altri effetti sono la dilatazione dei tempi, la contrazione delle lunghezze, l'aumento della massa con la velocità (tutti questi effetti sono significativi solo a velocità, dette relativistiche, paragonabili alla velocità della luce, che è la più elevata in natura).

Due eventi sono simultanei per tutti? Possiamo dire che due eventi sono simultanei quando riceviamo da entrambi e nello stesso istante un segnale che ci porta notizia dell'evento: per esempio, un osservatore può dire che due flash sono scattati simultaneamente quando riceve nello stesso istante i due lampi di luce. Immaginiamo che ci sia un secondo osservatore che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto al primo, spostandosi verso uno dei flash e che si trovi in corrispondenza dell'osservatore 1 nell'istante in cui, secondo l'osservatore 1, sono scattati entrambi i flash; negli istanti successivi, l'osservatore 2 si troverà più vicino a uno dei flash e riceverà prima quel lampo di luce in quanto la luce ha una velocità finita e impiega meno tempo a coprire una distanza minore. Per l'osservatore 2, quindi, i due flash non sono scattati simultaneamente. In questo ragionamento non ha importanza che si considerino i flash in quiete rispetto a un osservatore oppure all'altro, dato che il secondo postulato afferma che la velocità della luce ha lo stesso valore sia che la sorgente sia ferma sia che sia in moto. Due eventi, simultanei per un osservatore, possono non esserlo per un secondo osservatore.

La dilatazione del tempo. Anche la durata di un fenomeno dipende dal sistema di riferimento dal quale è misurata. Riprendendo l'esempio dei flash, possiamo pensare di misurare l'intervallo di tempo fra la loro accensione: per l'osservatore 1 l'intervallo è pari a zero, perché per lui le due accensioni sono avvenute simultaneamente, mentre l'osservatore 2 misura un certo valore non nullo. La durata di un fenomeno misurata da un sistema di riferimento in quiete rispetto al fenomeno è minore della durata misurata da un sistema di riferimento in movimento: nei sistemi in moto, quindi, il tempo si dilata.

La misura degli intervalli temporali non è più definita in senso assoluto, ma dipende dal sistema di riferimento. Il tempo di una persona che corre rallenta, e rallenta tanto più marcatamente quanto più veloce essa corre. In realtà il fenomeno non è rilevabile nell'esperienza quotidiana; i progressi della tecnologia hanno comunque permesso di verificare questo rallentamento del tempo grazie a due superprecisi orologi atomici identici, posto l'uno a terra e l'altro a bordo di jet militari da oltre 3000 chilometri l'ora o di sonde spaziali. L'esperimento ha confermato l'ipotesi: l'orologio che aveva viaggiato era rimasto indietro rispetto all'altro, seppure di frazioni piccolissime di secondo.

La contrazione delle lunghezze. La misura della lunghezza di un oggetto, quando esso è in movimento rispetto al sistema di riferimento in cui avviene la misura, è minore del valore misurato quando esso è fermo (questo valore si chiama lunghezza propria). Questo fenomeno dipende strettamente dalla dilatazione del tempo.

Quindi la misura della lunghezza di un segmento è diversa a seconda di se viene effettuata in un sistema di riferimento o in un altro in moto rispetto al primo e dunque non ha più il carattere di assoluta che aveva avuto finora.

La massa di un corpo. Nella teoria della relatività bisogna abbandonare il concetto classico di massa come quantità costante. Un corpo che, quando è fermo rispetto al sistema di riferimento in cui avviene la misura, ha una massa m_0 (massa a riposo), quando è in moto con velocità v ha una massa m più grande.

Equivalenza fra massa ed energia. Se a un corpo che si muove a velocità prossima a quella della luce si fornisce energia, la sua velocità aumenterà molto poco, mentre a subire un effettivo incremento sarà la sua massa. Massa ed energia sono quindi interconvertibili, cioè la massa è una forma di energia secondo l'equazione:

$$E = m \cdot c^2.$$

Tale formula evidenzia che un corpo, per il fatto stesso di avere una massa, ha un'energia a riposo pari al prodotto della sua massa per il quadrato della velocità. Essa è sicuramente una delle formule matematiche più famose e molto probabilmente la più famosa in assoluto, ciò grazie alla sua estrema eleganza e semplicità.

Diventa inoltre facile capire come massa ed energia si equivalgano e come siano, per così dire, due facce della stessa medaglia (in sostanza la massa è energia estremamente concentrata). Proprio questa equivalenza tra massa ed energia spiega come concentrando un grosso quantitativo di energia si possa creare della massa e quindi materia e come si possa ottenere un grandissimo quantitativo di energia anche partendo da una piccolissima massa. Per fare un esempio che chiarisca questo concetto, quando lo Space Shuttle decolla di tutto il propellente usato solo all'incirca un grammo diventa energia, tutto il resto si converte semplicemente in fumo e prodotti della combustione. Utilizzando l'energia nucleare la resa aumenta ma in una comune bomba atomica, per esempio, viene convertito in energia solo all'incirca lo 0,5% della massa totale del materiale fissile. Se fosse possibile convertire per intero la massa in energia sicuramente i problemi energetici che tanto oggi fanno discutere sarebbero senza alcun dubbio risolti.

I fondamenti matematici della relatività speciale vennero posti nel 1908 dal matematico tedesco Hermann Minkowski, che introdusse il concetto di uno "spazio-tempo quadridimensionale" nel quale il tempo, cioè la quarta dimensione dello spazio-tempo di Minkowski, è trattato alla stessa stregua delle tre dimensioni dello spazio.

Oggi i principi della relatività speciale sono incorporati e verificati nel funzionamento degli acceleratori di particelle.

*Per una maggiore comprensione si riporta il seguente brano tratto dal libro **Tempo – Guida per viaggiatori** di Clifford A. Pickover*

Per Newton spazio e tempo erano assoluti. Lo spazio era una metrica fissa, infinita, immobile, rispetto alla quale si potevano misurare i movimenti assoluti. Newton credeva pure che l'Universo fosse pervaso da un tempo assoluto, unico, che poteva venir simbolizzato da un orologio immaginario, perso da qualche parte nello spazio. Einstein cambiò tutto questo con le sue teorie della relatività. Ebbe a scrivere: "Newton, perdonami!"

Il principale contributo di Einstein allo studio del tempo si ebbe quando egli rivoluzionò la fisica con la teoria della relatività speciale (o ristretta), che mostrava come il tempo cambi con il moto. Oggi gli scienziati non concepiscono problemi riguardanti il tempo o il moto come questioni "assolute", questioni con una sola risposta corretta possibile. Siccome il tempo è relativo alla velocità con cui ci si muove, non potrà mai esistere un orologio al centro dell'Universo su cui ciascuno possa regolare il suo. L'intera durata di una vita umana è un breve batter di ciglia di un alieno che viaggia quasi alla velocità della luce. La meccanica newtoniana è così diventata un caso speciale della teoria della relatività. E la relatività finirà col diventare a sua volta una sottoteoria di una nuova scienza più omnicomprensiva, più esplicativa delle fondamenta della fabbrica dell'Universo. (Il termine "relatività" deriva dal fatto che le apparenze del mondo dipendono dal nostro stato di moto: sono "relative".)

La teoria delle relatività era detta ristretta poiché riguardava quello che succedeva a sistemi in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.

Successivamente, Einstein estese le sue analisi ai sistemi in moto accelerato, delineando la teoria della relatività generale.

2. Cenni di relatività generale

La relatività ristretta, cioè il postulato dell'invarianza delle leggi fisiche nei sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme, nacque da problemi di elettrodinamica. Einstein procedette poi nella sua ricerca, approfondendo in particolare le conseguenze dell'indipendenza dal sistema di riferimento per la gravità. Ne derivò una spiegazione geometrica della gravità stessa, più nota come teoria della relatività generale, per la quale Einstein fece ricorso ai formalismi matematici e alle geometrie non euclidee sviluppati dai matematici dell'800. Per usare una espressione del fisico J. A. Wheeler, la causa della caduta di una pietra non è dovuta a una misteriosa "forza di gravità", che agisce a distanza dal centro della Terra. Il moto della pietra che cade è determinato dalla geometria dello spazio e del tempo nel punto in cui si trova la pietra. In breve, lo spazio-tempo controlla la

massa, dettandole il moto. Mentre, a sua volta, la massa controlla lo spazio-tempo, determinandone la curvatura. La relatività generale introduce correzioni alla teoria newtoniana della gravità, specie là dove lo spazio euclideo di quest'ultima è "incurvato" a causa della presenza di grandi masse. È quindi lo strumento teorico principale per la trattazione dei fenomeni astrofisici e della cosmologia.

Uno dei primi successi della relatività generale fu rappresentato dalla spiegazione che essa seppe dare del problema dell'orbita di Mercurio. Dopo che si sono presi in considerazione gli effetti delle perturbazioni di tutti gli altri pianeti sull'orbita di Mercurio rimane ancora inspiegabile, secondo la teoria classica della gravitazione di Newton, uno spostamento della direzione del suo perielio (cioè il punto di maggior vicinanza al Sole) di 43 arc/s per secolo; tale spostamento ha costituito un rompicapo per gli astronomi della fine del sec. XIX. La relatività generale spiega lo spostamento del perielio di Mercurio come un effetto naturale del moto di Mercurio nello spazio-tempo curvo attorno al Sole. Recenti misure radar del moto di Mercurio hanno confermato questo accordo con una precisione di circa lo 0,5%.

Ancora più impressione fecero le scoperte di due nuovi fenomeni inaspettati, che erano stati previsti solo dalla teoria di Einstein. Innanzitutto, Einstein aveva previsto che un intenso campo gravitazionale avrebbe dovuto rallentare le vibrazioni di un atomo. Nel 1925 W.S. Adams, studiando la luce emessa dalle nane bianche, trovò uno spostamento verso il rosso, che risultava perfettamente in accordo con la teoria della relatività generale.

La verifica della seconda previsione di Einstein fu ancora più sensazionale. La sua teoria prevedeva che un campo gravitazionale avrebbe dovuto incurvare i raggi luminosi; Einstein aveva calcolato che un raggio di luce che sfiorasse la superficie del sole sarebbe stato incurvato rispetto a una linea retta di 1,75 secondi di arco (vedi la figura). Come si poteva verificare questo asserto? Se fosse stato possibile osservare le stelle lontane ma molto prossime al bordo del disco solare, durante un'eclissi di sole, e confrontare le loro posizioni con quelle che esse stesse avevano quando il sole non si trovava in prossimità del percorso dei loro raggi di luce, qualsiasi spostamento dovuto alla curvatura della luce avrebbe dovuto essere visibile. Einstein aveva pubblicato la sua memoria sulla relatività generale nel 1915, ma la verifica dovette attendere fino alla fine della prima guerra mondiale. Nel 1919 la Royal Astronomical Society inglese organizzò una spedizione per effettuare tale verifica, assistendo a un'eclissi totale che era visibile dall'isola di Principe, un isolotto portoghese al largo delle coste occidentali dell'Africa. Le stelle mostrarono effettivamente un cambiamento di posizione. Ancora una volta i fatti avevano dato ragione ad Einstein.

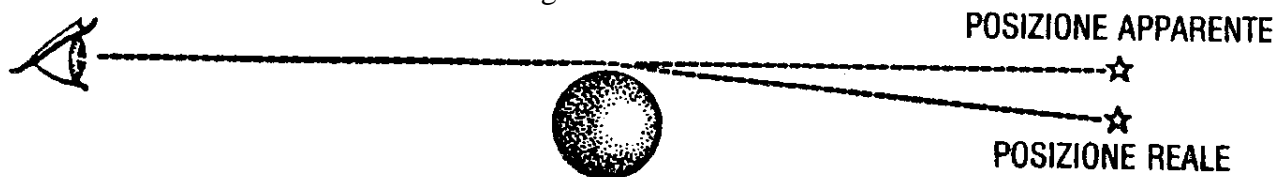
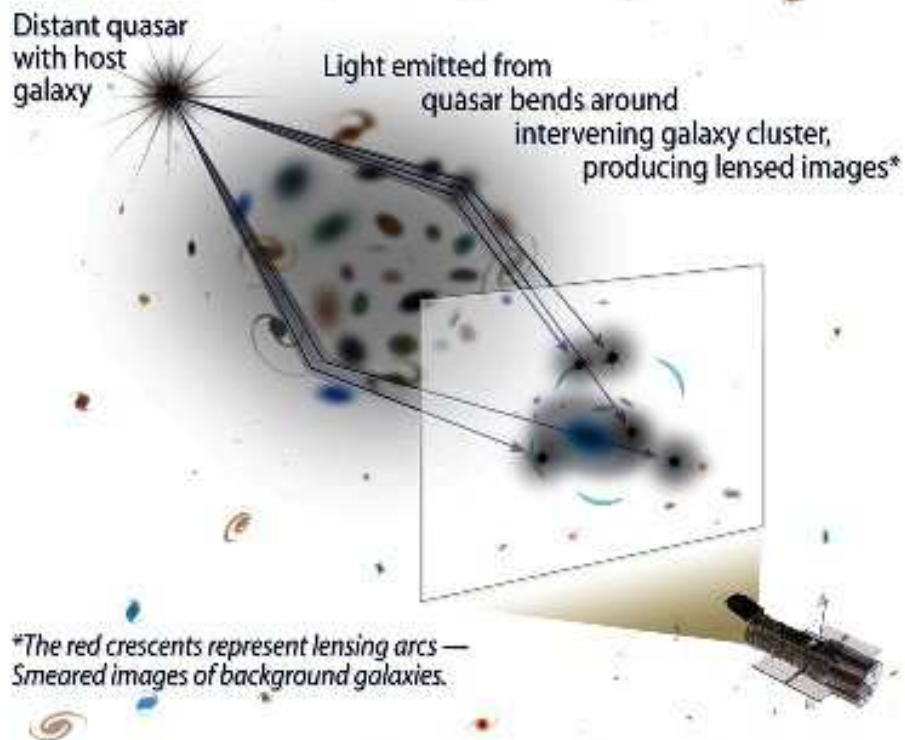


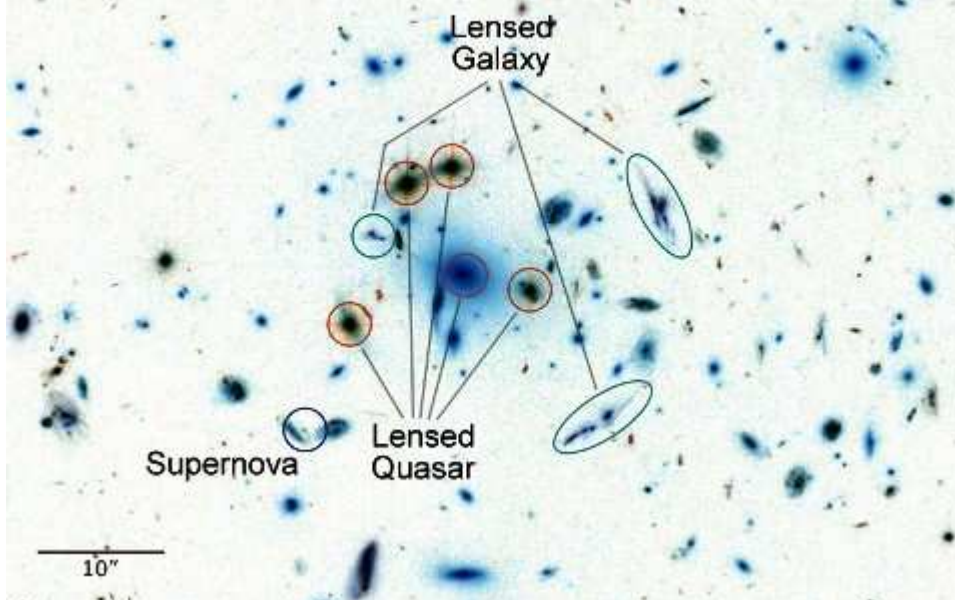
Figura Curvatura delle onde luminose per effetto della gravitazione, postulata da Einstein nella teoria della relatività generale.

In base allo stesso principio, se una stella si trovasse esattamente dietro a un'altra, la luce di quella più lontana si incurverebbe in prossimità della stella più vicina, in modo tale che quella più lontana risulterebbe ingrandita. La stella più vicina fungerebbe da *lente gravitazionale*. Lenti gravitazionali vengono scoperte molto spesso: è sufficiente dare un'occhiata al sito di Hubble, il telescopio spaziale in orbita, per vederne diverse. Si riportano le immagini dell'ultima scoperta (le foto sono in negativo per una maggiore qualità di stampa):

Gravitational Lensing Splits Quasar Light into Five Images



Galaxy Cluster SDSS J1004+4112
HST ACS/WFC



3. Cenni di meccanica quantistica

Alla fine dell'800 era ormai chiaro che la luce fosse un fenomeno rigorosamente ondulatorio, come comprovato dalle equazioni di Maxwell, che avevano unificato tutti i fenomeni elettrici, magnetici e luminosi.

1. Ma c'era più di un fenomeno fisico che sfuggiva a questa interpretazione. Uno di questi era *la radiazione di corpo nero*. Il corpo nero in fisica è una cavità fatta di pareti perfettamente isolanti e dotata di una fessura di dimensioni opportune. Portando il corpo nero ad una data temperatura, questo emette uno spettro di radiazioni elettromagnetiche di frequenze assegnate. L'entità di queste radiazioni era nota sperimentalmente. Volendo interpretare tale fenomeno con la teoria ondulatoria della radiazione si giungeva a risultati teorici in netto contrasto con la realtà. C'era qualcosa che non andava nella teoria ondulatoria della luce e della radiazione elettromagnetica in generale.

Il fisico tedesco Max Planck affrontò il problema supponendo che l'energia elettromagnetica venisse emessa dal corpo nero non in maniera continua, ma in maniera discreta; suppose cioè che l'energia venisse emessa o assorbita in maniera quantizzata (tale concetto non ci è nuovo: ricordiamo la quantizzazione della carica elettrica). Planck ipotizzò che un'onda elettromagnetica di lunghezza viene trasmessa in *quanti di energia*, di valore:

$$E = h \cdot f$$

dove E è l'energia del quanto, f la frequenza dell'onda e h la costante di Planck.

Planck continuava a credere però che l'energia fosse una grandezza variabile con continuità e solo nell'emissione essa diventasse quantizzata. È un po' come il latte: esso può variare con continuità, ma quando lo acquistiamo esso è disponibile solo in multipli di $\frac{1}{2}$ litro (o $\frac{3}{4}$, nel caso del latte Parmalat-Berna[®] a sole 0,90 €).

2. Un altro fenomeno di difficile interpretazione era l'*effetto fotoelettrico*, che consiste nell'emissione di elettroni da parte dei metalli quando questi vengono irradiati dalla luce. Anche in questo caso, usando le teorie correnti, non si riusciva a dare una spiegazione di quello che accadeva sperimentalmente. Einstein (sempre lui) suppose che l'energia stessa era quantizzata non solo quando veniva emessa, ma sempre. Ai quanti di energia diede il nome di *fotoni*. Ricordiamo per inciso che Einstein ha vinto il premio Nobel per la Fisica non per la teoria della relatività bensì per l'interpretazione dell'effetto fotoelettrico.

Quindi la luce si propaga sotto forma di piccolissimi pacchetti indivisibili, (*fotoni*), che si comportano come particelle, ma mantiene anche un carattere ondulatorio. Quando un'onda elettromagnetica viene emessa, assorbita, trasmessa, essa esiste solo sotto forma di *fotoni*. Ecco quindi che alla radiazione elettromagnetica (e quindi alla luce) si ridava un carattere corpuscolare, come aveva ipotizzato Newton più di 3 secoli prima. Precisiamo che i fotoni non hanno massa.

3. Successivi esperimenti (effetto Compton) confermarono la natura *fotonica* delle radiazioni elettromagnetiche. Emergeva sempre più il fatto che il fotone si comportava a tutti gli effetti, come una particella. Ricordiamo che il nome stesso fotone venne attribuito da Compton per la prima volta nel 1928.

4. Cenni sui modelli atomici

In questi anni si andavano formulando i vari modelli che spiegavano la natura dell'atomo.

Il primo modello atomico fu quello di Thomson, in cui elettroni, neutroni e protoni erano posti, senza distinzione di posizione, nel volume dell'atomo.

Successivamente venne introdotto il modello di Rutherford, secondo il quale l'atomo era suddiviso in un nucleo concentrato, composto da protoni e neutroni, e da elettroni che ruotavano attorno ad esso descrivendo delle orbite, secondo uno schema che ricalcava il sistema solare.

Tale modello presentava talune contraddizioni, inspiegabili con le teorie classiche della meccanica e dell'elettromagnetismo.

Intervenire a questo punto il fisico danese Niels Bohr, che utilizzò la recente teoria dei quanti, ipotizzando che l'energia degli elettroni non variasse con continuità, ma in modo quantizzato, come quella dei fotoni da poco scoperti. L'energia degli elettroni non può assumere qualsiasi valore energetico, ma soltanto determinati *livelli energetici*.

Il modello di Bohr fu confermato sperimentalmente, anche se Bohr non spiegava il perché delle sue ipotesi. Esse funzionavano e questo, per il momento, bastava.

5. Abbiamo detto che la luce, che è un'onda, si comporta in certi casi come se fosse una particella. Altri esperimenti portarono nel 1924 lo scienziato francese Louis De Broglie ad affermare un'altra cosa rivoluzionaria: in certi casi le particelle subatomiche elementari si comportano come se fossero onde, la cui frequenza può essere determinata dalla stessa relazione di Planck.

$$f = \frac{E}{h}$$

Il cerchio era chiuso: le radiazioni elettromagnetiche sono onde che in certi casi si comportano come particelle; le particelle subatomiche, che sono particelle dotate di massa, in certi casi si comportano come onde. Si parla di **DUALISMO ONDA-PARTICELLA**.

6. Qualche anno dopo Erwin Schroedinger approfondì tali concetti dando origine alla meccanica ondulatoria. Utilizzando le considerazioni di De Broglie sul fatto che all'elettrone fosse associata un'onda, Schroedinger ricavò le ipotesi che Bohr aveva posto senza alcuna dimostrazione per il suo modello atomico. Trattando l'elettrone come una particella a cui è associata un'onda, Schroedinger dimostrò che l'energia dell'elettrone doveva essere quantizzata, come aveva affermato Bohr qualche anno prima.

Inoltre nel 1926 Schroedinger formulò una famosa equazione (*equazione di Schroedinger*) che riusciva a legare le proprietà ondulatorie con quelle corpuscolari dell'elettrone nell'atomo di idrogeno.

La soluzione di quest'equazione è una funzione Ψ che prende il nome di *funzione d'onda*.

7. A tale funzione d'onda il fisico Max Born diede un'interpretazione probabilistica. Il suo quadrato, Ψ^2 , rappresenta la probabilità che l'elettrone si trova in un certo posto.

Apparve così un aspetto imprevisto della meccanica quantistica: non era possibile sapere con certezza la posizione esatta di un elettrone, ma si poteva predire solo la probabilità di trovarlo in un posto piuttosto che in un altro. È per questo che quando si parla della disposizione degli elettroni attorno ad un atomo, si usa il concetto di *orbitale* (zona dello spazio in cui è probabile trovare l'elettrone) piuttosto che quello di orbita (relativo al modello di Rutherford).

8. Tale aspetto venne ulteriormente confermato dal famoso **principio di indeterminazione di Heisenberg**, secondo il quale è impossibile misurare contemporaneamente la velocità v e la posizione s di una particella. Se ad esempio si vuole misurare la posizione di un elettrone, lo si deve in qualche modo "illuminare" per vederlo, al limite con un solo fotone. Ma l'intervento di questo fotone fa variare l'energia dell'elettrone e va ad alterare la sua velocità in modo imprevedibile. Quindi se si conosce la posizione non è possibile conoscere con esattezza la velocità, e viceversa. Esiste quindi un limite alla precisione con la quale possiamo misurare contemporaneamente la posizione e la velocità di una qualunque particella. Ad esempio, se la particella è un elettrone e la velocità è nota con una incertezza di ± 1 cm/s, la sua posizione non potrà essere determinata con una precisione maggiore di 7 cm. Ma un elettrone ha un diametro che è diecimila miliardi di volte più piccolo.

9. Conclusioni filosofiche

Il principio di indeterminazione, con la sua enunciazione dell'esistenza di limiti alle osservazioni e alle misurazioni, fa parte dell'attuale punto di vista scientifico sulla natura della realtà fisica, con varie implicazioni per la filosofia in generale.

Secondo la meccanica quantistica, non è possibile conoscere con certezza la posizione degli elettroni in un atomo o determinarne contemporaneamente la velocità. La meccanica quantistica sostituisce ad un'impostazione deterministica della scienza (secondo la quale è possibile conoscere tutto con certezza assoluta, istante per istante) un'impostazione statistico-probabilistica del mondo subatomico (secondo la quale si possono conoscere solo le probabilità che le cose vadano in un certo modo).

Per taluni questo provoca una crisi delle certezze ed un certo pessimismo riguardo la possibilità di conoscere pienamente la natura. Schroedinger, che contribuì a fondare la meccanica quantistica, non accettò mai l'impostazione probabilistica; lo stesso fece Einstein, che dal canto suo se ne uscì con l'affermazione rimasta famosa: "Dio non gioca a dadi!", con la quale rifiutava l'aspetto statistico-probabilistica della meccanica quantistica.

Di fatto però, bisogna dire che la meccanica quantistica funziona: gran parte della tecnologia elettronica di consumo (e ne consumiamo in quantità) che ci circonda (telefonini, lettori mp3, astronavi, ecc.) sfrutta numerosi effetti descritti con successo in questa teoria.

Conclusioni. Pur dimostrandosi nel tempo estremamente accurata, la relatività generale è una teoria classica, cioè una teoria del continuo, in quanto sviluppata senza tener conto della meccanica quantistica, e dunque contiene al suo interno i semi della propria inadeguatezza, così come la fisica quantistica, pur potendo includere la relatività ristretta, non tiene conto degli aspetti della relatività generale.

fonti:

La Fisica di Asimov – Mondadori

Bobbio-Gatti – Elettromagnetismo

Wikipedia – Enciclopedia on-line

Sito Internet dell'Hubble Space Telescope