

Le 4 forze fondamentali

Il compito della fisica è spiegare i fenomeni che avvengono, prima sulla terra e poi nell'universo intero con gli studi di astrofisica. Certo centinaia di anni fa la fisica era molto arretrata rispetto ai nostri giorni ed infatti lo studio del cielo e dell'universo non erano importanti come lo sono oggi. Centinaia di anni fa ancora avevamo grandi misteri come ad esempio l'elettromagnetismo, la corrente elettrica, di cosa fosse composta la materia. Non che adesso queste cose siano completamente chiare, però quello che abbiamo scoperto ci è stato estremamente utile per raggiungere l'attuale avanzamento tecnologico. Ora però siamo arrivati a tal punto che per le nuove e più sensazionali scoperte di fisica è necessario guardare verso l'alto. I fisici, in parte anche abili matematici, creano formule matematiche capaci di descrivere e prevedere cosa avviene in determinate situazioni, complesse o meno che siano. Queste formule teorizzate, vengono messe alla prova osservando gli eventi descritti e le previsioni calcolate attraverso le formule. Alcune teorie sono così avanzate e spettacolari che per metterle alla prova è necessario organizzare esperimenti altrettanto spettacolari. Un esempio classico è la teoria della relatività del famosissimo Albert Einstein. Con questa grandiosa teoria ha messo in relazione la velocità, lo spazio, il tempo, la gravità, la massa e l'energia! Riuscire ad unire così tante variabili in poche formule è un risultato che ha quasi dell'incredibile. La teoria della relatività prevedeva che un grande oggetto, come ad esempio il nostro sole, potesse modificare lo spazio ed il tempo. Così gli scienziati durante una eclissi di sole totale, puntarono i loro telescopi verso la stella per vedere se lungo la sua circonferenza i raggi di luce venissero "deviati" dalla deformazione che il sole stesso genera nello spazio-tempo. Così scoprirono che in effetti Einstein aveva ragione, la previsione era corretta! In tantissimi ambiti questa teoria ha dato il meglio di se, però in altri ha fallito: Einstein era ben consapevole che la sua teoria non era completa, anche se comunque si tratta di un'opera d'arte a tutti gli effetti.

Non siamo infatti in grado di spiegare "tutto". Gli ultimi studi astronomici, ci mostrano infatti una cosa inaspettata: la materia e l'energia che conosciamo sarebbero solo una piccola parte della massa e dell'energia totale che costituiscono l'universo. Le nuove forme di materia ed energia che si stanno scoprendo e che per il momento sono avvolte nel mistero (si chiamano appunto materia ed energia oscura) probabilmente faranno cambiare completamente il nostro modo di comprendere l'universo e le cose attorno a noi.

Le quattro forze principali conosciute in fisica sono la **forza gravitazionale**, la **forza elettromagnetica**, la **forza nucleare debole**, la **forza nucleare forte**.

La forza di gravità

La forza di gravità è quella che ci attrae verso il basso. In realtà non solo i pianeti come la terra hanno una forza gravitazionale, ma anche oggetti molto piccoli, come il vostro mouse, delle forbici, una matita. Essendo questi oggetti estremamente piccoli, la forza di gravità che esercitano è talmente debole che non riusciamo a percepirla. Solo esperimenti molto accurati evidenziano tali deboli attrazioni.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = \left(G \frac{m_1}{r^2} \right) m_2$$

G = 9,81 = costante di gravitazione universale

m1 = massa del primo corpo

m2 = massa del secondo corpo

r = distanza tra i due corpi

La forza di gravità è uguale al prodotto della massa dei due corpi in questione diviso il quadrato della loro distanza, il tutto moltiplicato per G che è la costante di gravitazione universale.

Quindi la forza di attrazione gravitazionale tra due corpi aumenta se aumenta la massa dei corpi (direttamente proporzionale alle masse!) mentre diminuisce al diminuire della distanza tra i corpi (inversamente proporzionale alla distanza!).

Un'altra fondamentale caratteristica della gravitazione è che i corpi ad essa soggetti vengono accelerati da essa nello stesso modo, indipendentemente dalla loro massa. Ciò si può verificare semplicemente facendo cadere due corpi diversi da uguale altezza. Se facciamo in modo che l'attrito dell'aria non disturbi troppo l'esperimento, si vedrà che i corpi cadono sul pavimento nello stesso modo. Questa particolarità della forza di gravitazione fu il punto di partenza da cui Einstein elaborò la sua teoria della relatività generale.

La forza gravitazionale fu studiata e descritta "scientificamente" per la prima volta nella storia dell'umanità dal grande fisico e matematico Isaac Newton nella seconda metà del '600. Egli intuì che la forza di gravitazione è universale, cioè ad essa sono sottoposti tutti i corpi che costituiscono l'universo, sia i corpi della nostra esperienza quotidiana qui sulla terra che i corpi celesti, stelle, pianeti, satelliti ecc. La teoria matematica che Newton propose per spiegare la gravità fu il primo esempio di creazione di una teoria unificatrice, cioè che unifica fenomeni che avvengono ovunque nell'universo. Newton riuscì a spiegare con questa teoria come i corpi cadono sulla superficie della terra, come la luna ruota attorno alla terra e come i pianeti ruotano attorno al sole e lo fece con la stessa formula matematica.

Prima di Newton, già da un secolo, era avvenuta la rivoluzione copernicana: si era cioè capito che non è la terra al centro dell'universo, ma che il sole sta al centro e gli altri pianeti gli ruotano attorno seguendo orbite ellittiche. Però nessuno era riuscito a spiegare perché, come un sasso cade verso il basso, la Luna ruota attorno alla terra. Newton diede una spiegazione matematica al modo che hanno i pianeti di girare attorno al sole tramite appunto la sua teoria della gravitazione universale.

La forza elettromagnetica.

La materia è costituita da atomi i quali sono formati da protoni, neutroni ed elettroni. I protoni ed i neutroni, più pesanti (circa 2000 volte più pesanti degli elettroni!), costituiscono il nucleo e

gli elettroni, più leggeri, vi "ruotano" attorno: in realtà non si tratta di vere e proprie orbite ma concettualmente le si può considerare tali per non entrare troppo nel dettaglio.

I protoni trasportano una carica elettrica positiva mentre gli elettroni una carica (di uguale valore) negativa. I neutroni non sono elettricamente carichi. Tra cariche negative e cariche positive si genera una forza di attrazione (immaginate due calamite quando si attraggono) tra cariche dello stesso segno invece risulta una forza repulsiva (due calamite che si respingono).

Gli atomi in stato di quiete sono composti da un numero uguale di cariche positive e negative quindi appaiono stabili e neutri all'osservatore. Per questo motivo, a grandi distanze la forza elettromagnetica è ininfluente, mentre la forza gravitazionale è sempre presente ed è quella che fa muovere i pianeti attorno alle stelle, i satelliti attorno ai pianeti, le stelle dentro le galassie ecc. È la forza gravitazionale che fa muovere l'universo.

Una caratteristica fondamentale delle cariche elettriche è che, se fatte muovere in modo accelerato (non in moto rettilineo uniforme), esse emettono onde elettromagnetiche. Le onde elettromagnetiche sono le onde radio, tv, telefoni cellulari, microonde, raggi infrarossi, luce visibile dal rosso al violetto, raggi ultravioletti, raggi X raggi gamma ecc... Se faccio oscillare una carica elettrica emetto onde elettromagnetiche che, attraversando lo spazio, possono raggiungere altre cariche elettriche poste a distanza, facendole a loro volta oscillare. Così, inviando particolari impulsi codificati, è possibile trasmettere e poi ricevere l'informazione: così Marconi inventò la radio. (Basandosi sugli esperimenti di trasmissione via radio di Nikola Tesla) Le forze elettromagnetiche sono la causa della forma, della struttura e di tutte le particolari proprietà chimiche dei corpi che ci circondano. Gli atomi, che sono di vario tipo (un centinaio) a seconda di quanti protoni, neutroni ed elettroni (sempre in ugual numero dei protoni) sono fatti, si combinano, grazie alle forze elettriche, in molecole che poi formano tutti i corpi che conosciamo.

Per esempio, un atomo di ossigeno si combina elettricamente con due atomi di idrogeno e formano una molecola di acqua che ha forma, aspetto e proprietà completamente diverse dagli atomi che la compongono. L'ossigeno e l'idrogeno infatti a temperatura ambiente sono dei gas velenosi, che combinati tra loro invece formano la normalissima acqua che noi conosciamo! Addirittura una molecola d'acqua (H₂O) presenta una "polarità", ovvero appare un po' allungata presentando una maggiore carica positiva da un lato ed una maggiore carica negativa dal lato opposto. Per questo motivo, versando molte sostanze (dello zucchero, per esempio) nell'acqua esse si sciolgono, ovvero i loro legami elettrici vengono in qualche modo "allentati", disturbati dalla polarità delle molecole d'acqua, che agiscono come tanti piccoli magnetini in agitazione dentro un barattolo.

La forza nucleare debole.

Di questa forza non diremo tanto, perché fra le quattro, è sicuramente la meno "eclatante". Diremo solo che un neutrone è in effetti la fusione fra un protone ed un elettrone e questo grazie appunto alla forza nucleare debole. Di conseguenza un neutrone però può rompersi e formare un protone ed un elettrone! Questo è ciò che succede nel fenomeno della radioattività naturale. Nuclei di atomi non particolarmente stabili possono così decadere emettendo elettroni (detti anche, in questo caso, raggi beta).

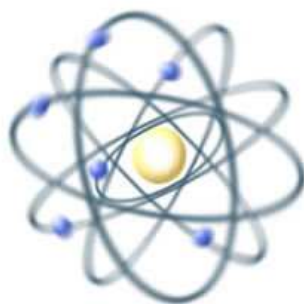
Anni fa, in conclusione, si è dimostrato che **la forza nucleare debole e la forza elettromagnetica in effetti sono facce diverse di una stessa forza**, la forza "elettrodebole". L'aver dimostrato sperimentalmente questo fece guadagnare il premio Nobel al fisico Carlo Rubbia.

La forza nucleare forte.

Nel nucleo degli atomi vi sono protoni e neutroni. Il nucleo ha dimensioni estremamente piccole per cui i protoni, carichi positivamente, si dovrebbero respingere tra di loro in maniera enorme ed in modo tale da non poter effettivamente formare un nucleo. Il nucleo, invece, è un oggetto molto stabile (a parte le eccezioni dovute ai fenomeni radioattivi se viene disturbato) in cui i protoni sono posti a distanze enormemente piccole, **non compatibili con le leggi elettromagnetiche.**

Esso è tenuto assieme dalla forza nucleare forte che, intervenendo quando i protoni sono più vicini di una certa distanza limite, neutralizza le forze elettriche repulsive e fa sì che il nucleo possa restare unito. Si capisce da questo che l'energia nucleare è enorme e quando si libera, come nelle bombe atomiche, nei reattori atomici o nel nucleo delle stelle, gli effetti sono impressionanti.

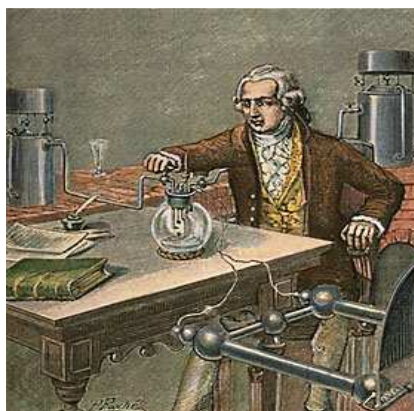
La teoria atomica



Nel 400 ac, Democrito aveva intuito con profonde riflessioni che la materia era costituita da piccolissime particelle indivisibili che battezzò col nome di atomo (atomos in greco vuol dire indivisibile). Questi immaginò di prendere un foglio e di suddividerlo idealmente in piccole parti fino a raggiungere una piccolissima parte che non poteva essere divisa ulteriormente: questa piccolissima particella prese dunque il nome di atomo. Ma Aristotele fu contrario a questa teoria, tanto che venne dimenticata completamente fino al 1800!

Nel 1800 il padre della chimica Lavoisier aveva constatato che la combinazione di due sostanze semplici che chiamò reagenti (esempio idrogeno e ossigeno) dava origine a una nuova sostanza che chiamò prodotto (l'acqua). Lavoisier chiamò le sostanze di partenza reagenti e le sostanze generate dalla loro combinazione, prodotti. Si accorse inoltre che qualsiasi reazione chimica provocasse, il peso dei reagenti era sempre uguale al peso dei prodotti. Da questo dedusse che in qualsiasi reazione chimica nulla si crea e nulla si distrugge, ma semplicemente la materia si trasforma.

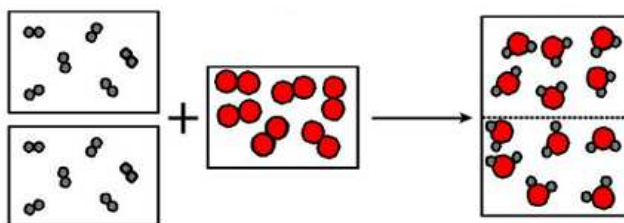
Nulla si crea e nulla si distrugge, ma tutto si trasforma.



Un altro importante chimico di quegli anni fu Proust. Sperimentando diverse reazioni chimiche si accorse che gli elementi si combinavano tra loro sempre con lo stesso rapporto!

Come la legge di Lavoisier più sopra: 2 grammi di rame (Cu) si combinano con 1 grammo di zolfo (S) per ottenere 3 grammi di solfuro di rame (CuS). Il rapporto di combinazione è di 2 a 1. Nell'esempio successivo abbiamo visto che 1 grammo di idrogeno si combina con ben 8 grammi ossigeno per ottenere 9 grammi di acqua. Il rapporto di combinazione in questo caso è di 1 a 8. Proust provò a variare prima la quantità di rame, poi la quantità di zolfo e si accorse immediatamente che con un rapporto diverso da 2:1 i reagenti in eccesso che fossero zolfo o che fossero rame, restavano non combinati.

Ragionando su questo capì che i reagenti in questione dovevano essere composti da piccolissime particelle le quali hanno pesi diversi per diversi elementi e che reagiscono con rapporti costanti. Per esempio per formare l'acqua, 1 atomo di ossigeno si lega a 2 atomi di idrogeno, proprio per questo la formula dell'acqua è H_2O infatti H indica l'idrogeno mentre O l'ossigeno. Pesando i reagenti invece, 1 grammo di idrogeno si combina con 8 grammi di ossigeno: questa differenza è dovuta ai diversi pesi degli atomi, che in realtà se potessimo contarli sarebbero sempre in rapporto 1:2.



Il passo successivo verso la teoria atomica avvenne grazie a Dalton, il quale si rese conto che alcuni elementi combinandosi tra di loro potevano dare origine a due o più composti, ad esempio, idrogeno (H) e ossigeno (O) potevano dare origine a due composti diversi: acqua (H_2O) oppure perossido d'idrogeno (H_2O_2).

Quindi, vedendo che i suoi predecessori si erano accorti che i reagenti si combinavano con rapporti costanti e le masse rimanevano invariate, decise di fare un ulteriore esperimento misurando la quantità di reagenti necessaria per formare il perossido d'idrogeno e la quantità necessaria per creare l'acqua, per poi confrontarle. Noi sappiamo bene che il perossido utilizza un atomo di ossigeno in più rispetto all'acqua, ma al tempo di Dalton queste cose non si sapevano. Se ne accorse perché se per formare l'acqua reagivano tra di loro 1 grammo di idrogeno e 8 di ossigeno, nel perossido invece reagivano 1 grammo di idrogeno e ben 16 grammi di ossigeno! Ne dedusse che dovevano per forza legarsi 2 atomi di ossigeno con 2 atomi di idrogeno per giustificare questo necessario aumento di reagente. Quindi riassumendo tutte le ultime teorie riguardo l'argomento, Dalton scrisse i punti principali della sua teoria atomica:

- La materia è formata da particelle indivisibili e indistruttibili, gli atomi.
- Gli elementi sono sostanze pure formati da atomi tutti uguali e con la stessa massa.
- Atomi di elementi diversi (idrogeno, ossigeno, carbonio,...) sono diversi tra di loro, hanno masse diverse e diverse proprietà di legarsi con altri atomi.
- I composti sono sostanze pure, formati dall'unione di due o più atomi diversi che si combinano secondo un rapporto costante (2 atomi di idrogeno si combinano con un atomo di ossigeno per formare una molecola d'acqua H₂O).

Lo sviluppo dei modelli atomici

Per modello atomico si intende un insieme di regole e formule in grado di descrivere il funzionamento di un atomo. Un modello atomico perfetto dovrebbe essere in grado di predire con precisione matematica, tutti i comportamenti che gli atomi da noi conosciuti possono assumere. Leggendo l'articolo **La teoria atomica** vi accorgete come attorno al 1800 gli scienziati avessero solo una vaga idea di cosa potessero essere gli atomi: addirittura li immaginavano come particelle minuscole ed indivisibili.



Effetto elettrostatico

A quel tempo però era già noto un effetto curioso, che potete provare anche voi stessi: se strofinare una penna di plastica oppure un tubetto di vetro con un maglione, vi accorgete che avvicinando il tubetto a dei piccoli pezzetini di carta, li attirerà. Ma com'è possibile? Strofinando si genera una separazione di cariche, positive e negative: ma allora se esistono queste cariche non è vero che l'atomo è indivisibile, ma esistono invece particelle più piccole che possono avere una carica elettrica. Queste particelle sono gli elettroni ed il prossimo passo sarebbe stato quello di dimostrarne l'esistenza.

Verso la fine del 1800 arrivò Thompson con il suo famoso esperimento. Prese un tubo di vetro ed inserì al suo interno due elettrodi: un elettrodo era collegato al polo negativo di una batteria, mentre l'altro era collegato al positivo. Poi mise il tubo sottovuoto, per esaminare cosa succede senza l'interferenza dell'aria. L'effetto fu piuttosto sorprendente per l'epoca: dal catodo partiva una scia di luce verde in direzione dell'anodo, che poi però lo superava ed andava oltre. Per capire cosa fosse questo fascio di luce verde, pensò prima di tutto di mettere nel mezzo del tubo una barriera con una forma particolare.



Notò così che il fascio di luce verde non passava attraverso questa barriera. Poi provò ad avvicinare dei magneti al fascio, e si accorse che esso veniva respinto dal polo negativo di un magnete, mentre veniva attirato dal polo positivo. Da questo si possono trarre interessanti conclusioni:

- il fascio di luce verde è costituito da particelle, poichè non attraversa la barriera
- sono particelle cariche negativamente, poichè vengono respinte dal polo negativo di un magnete ed attratte invece dal positivo

Gli atomi in condizioni standard sono però neutri, quindi significa che oltre all'elettrone esiste anche una particella di carica positiva, ovvero il protone. Venne scoperto poco dopo, modificando l'esperimento del tubo a vuoto di Thompson: venne modificato il catodo, inserendo questa volta un piatto forato ed invece del vuoto venne utilizzato il gas idrogeno. L'idrogeno normalmente è neutro: è composto da un atomo con un protone nel nucleo ed un elettrone esterno, quindi le due cariche si annullano a vicenda. Ma la tensione presente tra positivo e negativo dentro al tubo di vetro, ionizza l'atomo di idrogeno, ovvero gli strappa via il suo elettrone. Rimangono quindi con un atomo di idrogeno ionizzato e quindi positivo vicino al catodo negativo, mentre l'elettrone si allontana verso l'anodo che è positivo.



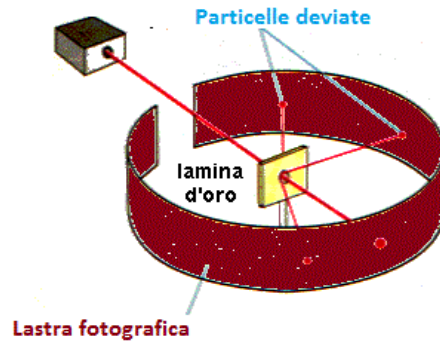
Allora Thompson immaginò l'atomo come una sfera positiva nella quale sono immersi gli elettroni sparpagliati qua e là casualmente. Venne chiamato modello panettone non a caso, visto che gli elettroni ricordano l'uva passa inserita nel panettone (la sfera positiva).

Nel frattempo venne scoperta la radioattività, ovvero la capacità di un elemento di emettere particelle, ad esempio alfa o beta. Allora non era ancora conosciuto il motivo delle emissioni radioattive, ma Rutherford utilizzò queste ultime per studiare la struttura degli atomi.

Mise un elemento radioattivo all'interno di un contenitore in piombo (il piombo ferma le onde alfa) praticando un piccolo foro in modo che i raggi alfa escano in una sola direzione.

Successivamente ha posto una lamina d'oro poco distante dal foro ed una pellicola fotografica tutto attorno. I raggi alfa escono dal foro e si dirigono verso la lamina d'oro: se colpiscono

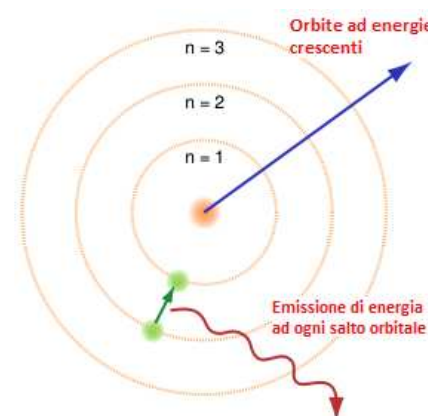
successivamente la lastra fotografica lasciano un segno indelebile del loro passaggio. A questo punto è molto interessante quello che succede: buona parte dei raggi attraversano indisturbati la lamina d'oro e colpiscono direttamente la lastra fotografica; una minima parte invece raggiunge la lastra fotografica subendo una leggera variazione di traiettoria, ed infine una parte infinitesimale cioè 1 su 10000 non attraversa la lamina d'oro e rimbalza indietro.



A questo punto Rutherford dovette interpretare questi dati ed utilizzarli per correggere il modello a panettone di Thompson. Prima di tutto si può intuire che non si tratta di una sfera piena nella quale sono immersi gli elettroni, poiché buona parte dei raggi riescono a passare. La parte di raggi che invece viene deviata pur passando, probabilmente colpisce di striscio quella parte dell'atomo "piena" che riesce a respingere completamente una infinitesima parte dei raggi. Visto che la percentuale di raggi respinta è molto molto bassa, significa che la parte consistente e solida dell'atomo è molto piccola. Da questo Rutherford dedusse che gli atomi erano composti da un nucleo centrale piccolissimo e solido, mentre gli elettroni ruotano attorno ad esso: una specie di sistema solare in miniatura!

Ma l'atomo di Rutherford appartiene ovviamente alla "fisica classica" ovvero segue le leggi fisiche che venivano considerate universali prima della nascita della fisica quantistica. In pratica l'elettrone ruota attorno al nucleo come un pianeta orbita attorno al sole e più l'elettrone si avvicina al nucleo e più la sua velocità deve aumentare per mantenersi in orbita. Ma secondo le leggi dell'elettromagnetismo, un elettrone (e quindi una carica elettrica) che si sposta, genera delle onde elettromagnetiche (luce, oppure onde radio) consumando quindi energia. Se l'elettrone consuma energia significa che "frena" come l'attrito con l'aria frena un paracadute e quindi in questo modello atomico tutti gli elettroni in realtà sono destinati a cadere verso il nucleo, poiché rallentando non hanno più una velocità sufficiente a mantenerli in orbita. Tuttavia questo in natura non succede, quindi significa che il modello di Rutherford è sbagliato.

Nel frattempo Planck lavorando sullo studio delle emissioni di un corpo nero, si accorse di una cosa a dir poco eccezionale. Un corpo nero è un metallo riscaldato a diverse temperature: sappiamo benissimo che se scaldiamo un pezzo di ferro esso diventerà rosso e più sarà caldo più il rosso sarà vivo fino a diventare bianco, poi verso l'azzurro per le temperature più estreme. Planck studiò la frequenza e l'energia dei colori emessi, ma non riusciva a scrivere una formula capace di prevedere tutti i colori che un metallo può assumere, dalle basse alle altissime temperature. Applicò due formule differenti, una che si dimostrava corretta solo alle alte temperature, l'altra che si dimostrò corretta solo alle basse temperature. Infine il colpo di genio: il problema non era la formula, ma il fatto che il calore e l'energia emessa sottoforma di radiazione luminosa vanno considerate in "pacchetti" ben definiti e non suddivisibili! La cosa era assurda e lo stesso Planck per molto tempo non volle accettarla ed anzi, preferiva cercare altre formule ed altre soluzioni, ma non ci riuscì. Chiamò questo pacchetto di energia "quanto" dando così vita alla fisica quantistica. Per farvi capire quanto sia incredibile la scoperta del quanto, devo farvi un esempio nella fisica classica. Immaginate un'auto che percorre un chilometro: percorrendolo essa attraverserà tutte le posizioni possibili dal punto iniziale al punto di arrivo, mentre voi la vedete fluidamente attraversare il percorso. Nella fisica quantistica non succede questo! Se l'automobile fosse un elettrone lo vedreste spostarsi "di scatto" da un punto ad un altro, tralasciando i punti intermedi: ad esempio se il percorso da A verso B è molto breve, esso può essere o in A oppure in B, ma non nei punti intermedi, come se i punti intermedi proprio non esistessero. Stessa cosa vale per gli scambi energetici: un elettrone può assorbire 1 2 o 3 quanti di energia, ma non 0.9 quanti di energia. Scaldando una pentola noi non ce ne accorgiamo (gli effetti quantistici non sono visibili nel mondo macroscopico) ma in quel preciso istante stiamo trasferendo quantità enormi di quanti energetici dal fuoco alla pentola. Se la nostra pentola fosse piccolissima -una pentola quantistica- basterebbe un quanto di energia per farla bollire, quindi la pentola può bollire se noi decidiamo di trasferirle questo quanto, oppure restare fredda se decidiamo di non trasferirlo, ma di certo non potrà mai essere tiepida!

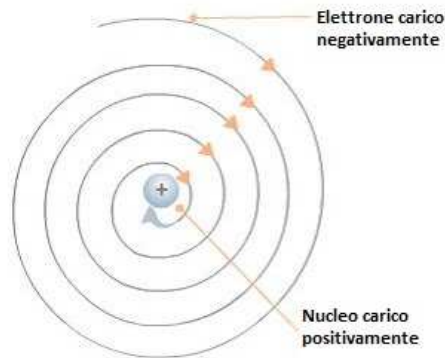


Compare sulla scena scientifica un giovane ragazzo, Niels Bohr (il danese d'oro!), il quale apporta sostanziali modifiche al modello atomico precedente rendendolo molto più stabile. Esso esamina le emissioni elettromagnetiche dell'atomo di idrogeno quando stimolato chimicamente. Egli nota che l'idrogeno emette una serie particolare e ben definita di onde luminose. Studiando il valore energetico delle emissioni si accorse queste sono "quantizzate" esattamente come le emissioni energetiche del corpo nero di Planck! Questo significa che gli elettroni possono presentare solo "livelli di energia" ben definiti. Da questo Bohr dedusse che l'atomo di idrogeno può avere solo orbite ben definite e che ogni orbita ha un particolare livello energetico. Secondo la sua teoria, fornendo sufficiente energia all'elettrone

di un atomo di idrogeno (uno o più quanti di energia), esso può saltare verso una orbita superiore assorbendo l'energia ricevuta, per poi ritornare dopo un certo tempo alla sua orbita originaria rilasciando però l'energia assorbita precedentemente, sottoforma di onda elettromagnetica (in questo caso luce, quanti di luce). Ecco perchè ad esempio i diodi led, le piccole luci che lampeggiano negli apparecchi elettronici, se alimentati riescono ad emettere luce: la corrente elettrica fa spostare gli elettroni dalla loro orbita, ma quando essi ritornano nello stato iniziale, emettono un quanto di luce (sì, anche la luce è quantizzata in pacchetti!). Ad ogni orbita elettronica corrisponde una tonalità luminosa differente tanto da raggiungere anche lo spettro luminoso del non visibile, come infrarossi oppure ultravioletti.

Da questo momento in poi il modello atomico inizia ad essere modificato e completato secondo la nascente meccanica quantistica, per cui vi rimando all'articolo **l'atomo quantistico**.

L'Atomo quantistico



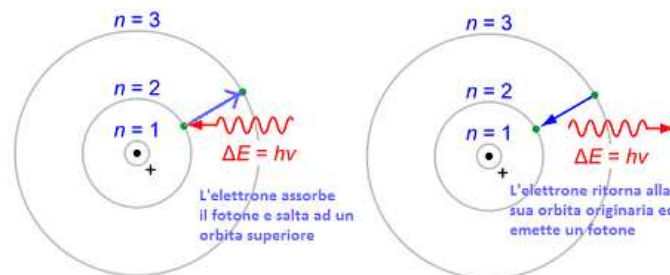
Instabilità del modello atomico di Rutherford

Il modello di Bohr, (accennato nell'articolo **Modelli atomici**) ha il grande vantaggio non solo di dare una spiegazione del perché gli elettroni non collassino verso il nucleo (come invece accade nel modello di Rutherford), ma anche di spiegare quelle "strane" righe presenti nello studio della radiazione dei corpi incandescenti. Un corpo se riscaldato emette un insieme di radiazioni elettromagnetiche ovvero luce visibile o non visibile (dagli ultravioletti agli infrarossi):



Anche un gas reso incandescente (in questo caso l'idrogeno), emette energia solo su alcune frequenze. Lo stesso gas esposto ad una luce con tutte le frequenze, ne assorbe le stesse frequenze che è in grado di emettere quando riscaldato. Uno spettro di assorbimento (righe in alto) è quindi il negativo dello spettro di emissione (righe in basso). Da cosa dipendono queste linee? Bohr doveva spiegare tramite il suo modello anche gli spettri di emissione ed assorbimento. Intuì che se gli elettroni si trovano su orbite ben definite, possono ruotare all'infinito senza assorbire e senza emettere energia. Ma quando vengono colpiti da una radiazione luminosa essi ne assorbono determinate lunghezze d'onda, saltando ad orbite superiori: ecco perchè mancano delle linee nello spettro, perchè vengono assorbite dagli elettroni per saltare ad orbite più elevate! Quando però gli elettroni ritornano nella loro orbita naturale, emettono l'energia precedentemente assorbita, ed ecco che compaiono le linee dello spettro di emissione.

Grazie a questa spiegazione, accettata inizialmente con scetticismo dalla comunità scientifica, Bohr riuscì ad impostare le basi dei successivi modelli atomici quantistici. I particolari e ben definiti livelli di energia delle orbite infatti, sono misurabili in "quanti di energia" e per questo a tutti gli effetti nasce con Bohr la concezione dell'atomo quantistico. Ogni elemento in natura ha il suo particolare spettro di emissione/assorbimento, in quanto gli atomi di diversi elementi hanno diversi elettroni in diverse orbite. Studiando lo spettro di emissione delle stelle ad esempio, è stato possibile determinare di quali elementi esse sono composte.



La luce come tutte le radiazioni elettromagnetiche è formata da tante piccolissime particelle chiamate fotoni. I fotoni sono particelle prive di massa che si muovono ad altissima velocità. La loro velocità è di circa 300.000 Km/sec, con movimento ondulatorio.

$$E_{\text{fotone}} = h \cdot \nu$$

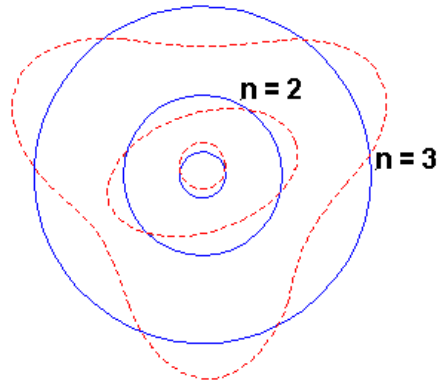
L'energia di un fotone è uguale ad h ovvero la costante di Planck moltiplicata per ν che è la **frequenza** dell'onda luminosa relativa. La frequenza indica il numero di oscillazioni del fotone al secondo.

De Broglie aveva constatato che l'elettrone si comporta, come potete leggere nell'articolo **Le radiazioni elettromagnetiche**, sia da particella che da onda. Questa teoria prende il nome di "Teoria dualistica dell'elettrone". Secondo De Broglie, come le radiazioni elettromagnetiche hanno una doppia natura, ondulatoria e corpuscolare, così gli elettroni hanno a loro volta una doppia natura, corpuscolare e ondulatoria. Ad un elettrone, come a tutti i corpi in movimento, può essere associata una lunghezza d'onda:

$$\lambda = m / (h \cdot v)$$

la lunghezza d'onda di un elettrone è uguale alla massa dell'elettrone stesso diviso la costante di Planck per la velocità dell'elettrone.

Schrödinger scopre successivamente che l'equazione della funzione d'onda (Ψ , si legge "psi") descrive esattamente, in termini matematici, il comportamento ondulatorio dell'elettrone mentre orbita attorno ad un atomo. Grazie a questa scoperta gli viene assegnato il Premio Nobel nel 1933.

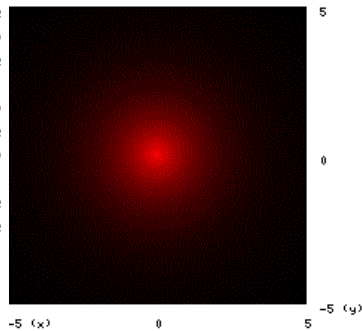


Blu = Orbite di Bohr **Rosso** = Orbite De Broglie

Quindi riassumendo, un elettrone ruota attorno al nucleo atomico lungo un'orbita sinusoidale compiendo comunque complete rivoluzioni attorno ad esso. Sembra chiaro ora il motivo per cui le orbite elettroniche hanno livelli energetici ben stabiliti: l'elettrone deve compiere un numero preciso di oscillazioni in modo che possa completarle tutte lungo la circonferenza di un'orbita! Se l'orbita fosse più bassa non sarebbe possibile eseguire tutte le oscillazioni ed una sinusoide sarebbe interrotta, pertanto l'elettrone si troverebbe in una posizione instabile. Da questo se ne deduce che l'elettrone può avere solo **orbite** nelle quali, in base alla velocità orbitale v e la formula sopra indicata, possano essere contenute **un numero intero** di lunghezze d'onda λ .

Per quanto riguarda oggetti macroscopici in movimento, la luce non modifica la velocità e la posizione di tali sistemi perché la loro lunghezza d'onda è piccolissima rispetto alla lunghezza d'onda dei fotoni. Nel caso degli elettroni invece, la luce interferisce con essi modificando continuamente sia la loro velocità che la loro posizione (la luce fa agitare gli elettroni spostandoli). Heisenberg da questo si accorse che è possibile sapere la posizione di un elettrone ma non la sua velocità, poiché una volta misurata la posizione, il raggio che abbiamo utilizzato per compiere la misurazione ha modificato la sua velocità. Allo stesso tempo se noi misuriamo la velocità di un elettrone, non possiamo saperne la posizione poiché è stata modificata durante la misura della velocità. Heisenberg concluse dicendo che non è possibile misurare contemporaneamente sia la velocità che la posizione di un elettrone. Maggiore è la precisione di una delle due misure, maggiore sarà l'indeterminazione delle altre: questo viene perciò definito **Principio di Indeterminazione di Heisenberg**.

Ma perché succede questo? Possiamo seguire e sapere in qualsiasi momento la posizione e la velocità di un pianeta che orbita intorno al sole applicando le leggi della fisica classica perché lo osserviamo tramite la luce, i cui fotoni hanno delle lunghezze d'onda molto più grandi rispetto ai pianeti. Anche per osservare l'elettrone che ruota attorno all'atomo di idrogeno utilizziamo particolari onde elettromagnetiche (funzionamento del microscopio elettronico), ma le lunghezze d'onda di questi fotoni sono molto simili a quelle dell'elettrone perciò esso ne subisce le interferenze, come se venisse colpito e spostato dalla luce.



Se non possiamo misurare la posizione e la velocità dell'elettrone non possiamo più parlare di orbita dell'elettrone ma dobbiamo parlare in questo caso di orbitale. L'orbitale è una "mappa" che indica la probabilità di trovare un elettrone in un dato punto di spazio attorno al nucleo dell'atomo. Ci sono alcuni punti dove è molto probabile trovare un elettrone che sta orbitando attorno al nucleo, altri dove invece è praticamente rarissimo.

Nel frattempo nel 1930 viene scoperto anche il Neutrone, per cui il modello atomico ormai è davvero completo: i neutroni ed i protoni (in variabili quantità) formano il nucleo, mentre gli elettroni (solitamente tanti quanti i protoni nel nucleo), ruotano attorno al nucleo centrale.

Approfondimento

Entrando nel dettaglio, si può precisare che inizialmente l'atomo di Bohr non spiegava perfettamente tutte le righe spettrali emesse dai vari elementi: alcune righe spettrali se ingrandite mostravano altre righe interne aggiuntive ed in più in alcuni casi comparivano righe del tutto non attese dal suo modello matematico. Un atomo disponeva di un **numero quantico principale n**, il quale indicava in poche parole l'orbita in cui si trovava un elettrone, ma questo

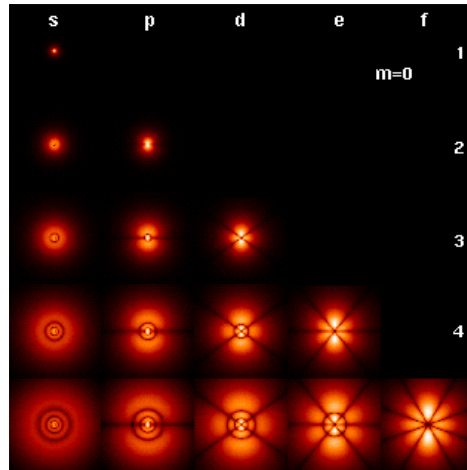
non bastava a giustificare le righe spettrali aggiuntive. Grazie al supporto di altri studiosi, quali Sommerfeld e Pauli, vennero aggiunti molti altri parametri alla struttura atomica. Il **principio di esclusione di Pauli** ad esempio, dice che due elettroni non possono occupare la stessa orbita almeno che non abbiano uno spin diverso. Quindi man mano che aumenta il numero di elettroni, essi devono occupare orbite via via più elevate. Si è stabilito quindi che un elettrone possiede una proprietà chiamata **spin** che può essere di due differenti valori: nello stesso orbitale possono coesistere due elettroni solo se questi hanno spin diverso!

Inoltre, viene introdotto il **numero quantico orbitale l** il quale corrisponde al momento angolare dell'elettrone. Per ogni valore di n quindi, il numero quantico orbitale assume in ordine crescente tutti i valori interi compresi tra 0 e $n-1$. Venne poi introdotto il **numero quantico magnetico m**, il quale può variare per tutti i valori da $-l$ ad l . Quindi per ogni numero quantico principale n, possono esserci $2(2l+1)$ stati dell'elettrone!

Riassumendo le varie proprietà sono:

- numero quantico principale n
- numero quantico orbitale l
- numero quantico magnetico ml
- numero quantico di spin ms

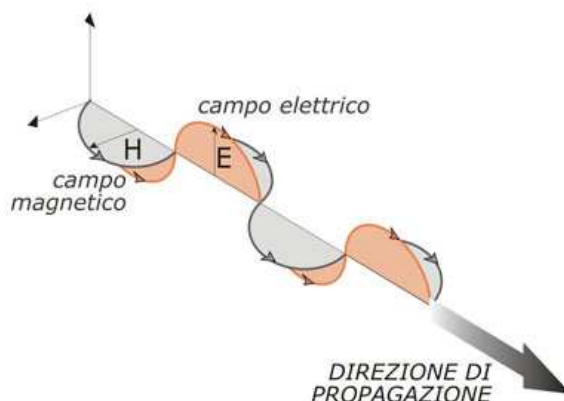
Ecco per esempio gli orbitali per tutti gli stati elettronici dell'atomo di idrogeno:



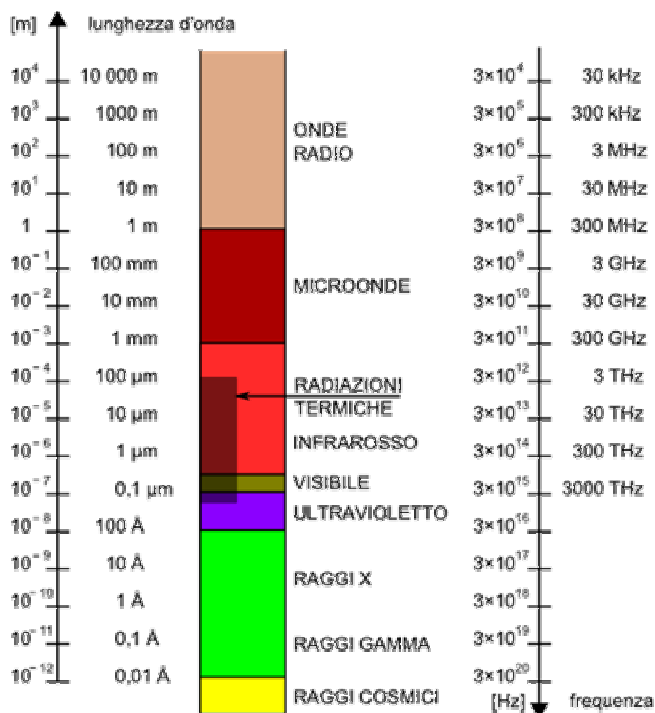
le lettere s, p, d, f, indicano i vari stati per valori crescenti di numero quantico orbitale, ovvero 0,1,2,3. Valori superiori per esempio con numero quantico orbitale 4 sono ammessi dalle formule matematiche ma **non sono mai stati scoperti atomi con questi valori**.

Onde elettromagnetiche

Come spiegato nell'articolo **Le forze fondamentali**, una carica elettrica che si sposta accelerando nel vuoto (ad esempio un elettrone) emette onde elettromagnetiche. Le onde elettromagnetiche sono quindi successioni di impulsi, generati da cariche elettriche che accelerano, trasmessi attraverso qualsiasi mezzo, anche nel vuoto dello spazio. Immaginate che il vostro elettrone sia il classico sasso gettato nel lago, esso genererà delle onde sull'acqua che si espandono concentriche allontanandosi dal sasso. Come la superficie del lago varia di altezza generando le onde, lo spazio stesso invece varia le sue proprietà elettriche e magnetiche, trasportando quindi l'onda elettromagnetica per lunghe distanze. Quando il campo magnetico diminuisce, il campo elettrico aumenta, per poi tornare a diminuire mentre aumenta nuovamente il campo magnetico: questa accoppiata continua nello spazio fino all'esaurirsi dell'onda elettromagnetica:



Queste variazioni quindi producono delle 'perturbazioni' elettromagnetiche che si propagano nel tempo e nello spazio secondo le leggi sviluppate da Maxwell intorno al 1860. Le onde elettromagnetiche sono classificate in termini di lunghezza d'onda e frequenza: la frequenza è il numero totale di oscillazioni che il campo elettrico/ magnetico hanno in un secondo, mentre la lunghezza d'onda dipende dalla frequenza diviso la velocità di propagazione ($\lambda = f / \nu$). La velocità di propagazione è pari alla velocità della luce! Infatti la luce stessa è composta da onde elettromagnetiche, il cui colore stesso dipende dalla frequenza. In poche parole le proprietà di un'onda elettromagnetica dipendono dalla sua frequenza: a frequenze basse abbiamo le onde radio, salendo di frequenza raggiungiamo le microonde che ci scaldano il pranzo, salendo ancora di frequenza raggiungiamo la luce visibile e via dicendo:



All'aumentare della frequenza aumenta anche l'energia posseduta dall'onda stessa. Quando un'onda colpisce un materiale (ad esempio la luce del sole con i pannelli fotovoltaici) il suo contenuto energetico, se sufficientemente elevato, può interagire con il materiale stesso spostandone ad esempio gli elettroni, creando così corrente elettrica!

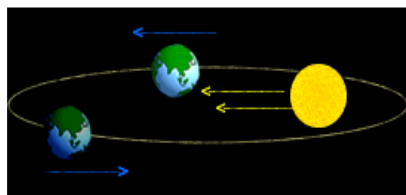
Le onde radio invece, reagiscono con gli elettroni del metallo di un'antenna, generando un piccolo flusso elettrico che può essere amplificato e mandato ad un altoparlante, per ricavarne la canzone che qualcuno ha trasmesso per noi.

L'energia posseduta dai raggi gamma e dai raggi X per esempio, è tale da interferire con la

struttura atomica dei materiali che attraversano, cioè provocano la deviazione di elettroni dalla loro orbita con la conseguente formazione di ioni. Tali radiazioni ionizzanti hanno quindi un elevato potere di penetrazione. Pur avendo analoghe proprietà e generando analoghi effetti sui materiali, queste due radiazioni differiscono nel metodo di generazione: i raggi X possono essere prodotti da macchine, i raggi gamma invece sono il risultato di emissioni radioattive.

La teoria della relatività

La teoria della relatività nasce nei primi del 900, un periodo di profondi cambiamenti scientifici. Fino ad allora si pensava che le onde elettromagnetiche (luce, onde radio, ecc) viaggiassero attraverso lo spazio sfruttando l'etere, ovvero qualcosa di sconosciuto che permea il tutto. Anche al giorno d'oggi molte persone parlano ancora di etere, ma si tratta più spesso di appassionati piuttosto che veri esperti di fisica. Si cerca di ricorrere all'etere per poter parlare di energia infinita, di antigravità, ed altre stranezze (di cui si sente molto parlare ma non se ne ha mai l'evidenza in alcun esperimento).



Nel 1887, in un esperimento di Albert Michelson e Edward Morley, venne dimostrato che in effetti la teoria dell'etere non è il giusto metodo per spiegare la propagazione delle onde elettromagnetiche. I due fisici misurarono la velocità della luce di due raggi perpendicolari tra loro, quindi che formano un angolo di 90 gradi. Come sappiamo la terra ruota su se stessa ed attorno al sole. Se un raggio di luce punta verso la

direzione in cui la terra sta viaggiando ruotando attorno al sole, e la terra si sposta dentro l'etere che è relativamente fermo ed immobile, poiché permea il tutto, significa che la velocità della luce la percepiamo rallentata poiché l'etere è fermo mentre la terra si muove ad alta velocità. Un po' come se vi affiancate ad un'automobile a 100 chilometri l'ora, vi sembrerà relativamente ferma. Invece, dalle misurazioni, si è scoperto che tutto questo non avviene. In poche parole la velocità della luce è costante da qualsiasi sistema di riferimento la si osservi, che sia un oggetto in moto o meno. E questa cosa è risultata assolutamente assurda, poiché va contro ad ogni concetto fisico fino ad allora riconosciuto.

Per fare un altro esempio, immaginate di correre affiancando un fascio di luce. La luce viaggia a 300.000 km al secondo, e voi state correndo a 200.000 km al secondo: se misurate la velocità della luce mentre la state affiancando, la fisica suggerisce che la misurazione sarebbe di $300.000 - 200.000 = 100.000$ km al secondo. Invece la velocità misurata sarebbe sempre 300.000! Com'è possibile? Lorentz e George Fitzgerald ebbero un'idea: se la misurazione della velocità rimane costante, significa che varia qualche altro parametro. Il parametro della velocità di qualsiasi corpo, si calcola dividendo lo spazio percorso per il tempo impiegato ($V = S/T$ velocità uguale a spazio diviso tempo). Se V rimane costante significa che a cambiare sono S oppure T , il tempo! Quindi a man mano che un oggetto accelera, si contrae il suo spazio (come se diminuisse di dimensione) ed il suo tempo rallenta!

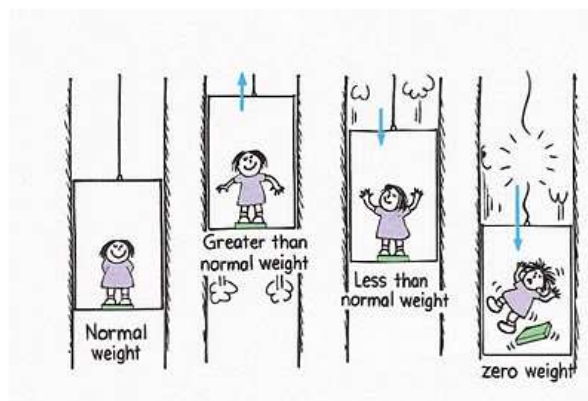
Einstein già nel 1905 aggiunse che se non si è in grado di accertare quando ci si muove o meno nello spazio, l'etere non è necessario per spiegare il fenomeno delle onde elettromagnetiche. Così, si dovette abbandonare l'idea che il tempo fosse una grandezza universale, gli orologi quindi non scandivano i secondi in egual modo ovunque. Due orologi scandiscono i secondi in modo uguale solamente se essi si muovono alla stessa velocità: più un orologio accelera o rallenta rispetto all'altro, più il tempo per loro due scorre in modo diverso. E' come se, viaggiando in autostrada, gli orologi di una Porsche ai 150km/h, di una Panda ai 100km/h e di un autocarro che viaggia a 70km/h segnassero il tempo in modo diverso. La Porsche viaggerebbe nel futuro, poiché il tempo dentro l'abitacolo scorre più lentamente rispetto agli altri: quindi il pilota della Porsche vedrebbe la gente muoversi in modo accelerato ed innaturale. Tutto questo accade veramente, solo che con differenze di velocità così piccole, noi non riusciamo ad accorgercene. I satelliti in orbita attorno alla terra ad esempio, che ci sorvolano a circa 8 km al secondo, viaggiano nel tempo in modo molto più sensibile, tanto che da terra siamo costretti a fare delle correzioni altrimenti i satelliti GPS invierebbero segnali non corretti ed i nostri navigatori sbaglierebbero di molto la posizione sulla mappa.



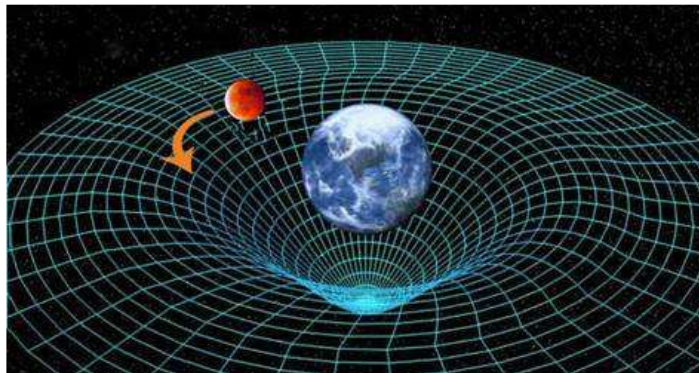
Nel lontano 1972, un gruppo di scienziati si preparava a lanciare in orbita dei satelliti con i quali studiare gli effetti della teoria della relatività sfruttando le elevatissime velocità raggiungibili nello spazio: vennero però anticipati dall'esperimento denominato "Hafele-Keating" per ricordare i suoi geniali ideatori. Se è vero che più ci si avvicina alla velocità della luce più il tempo si dilata, allora è sufficiente sincronizzare degli orologi atomici (ad altissima precisione) lasciandone uno a terra e posizionando invece l'altro su di un aereo in volo per un giorno intero. L'orologio in viaggio a bordo dell'aereo ad alta velocità subirà una dilatazione temporale e quindi quando verrà confrontato con l'orologio rimasto a terra, sarà riscontrabile un ritardo. In questo esperimento, fecero molto di più: equipaggiarono due aerei con orologi atomici e li fecero volare attorno al globo per 3 giorni consecutivi, un aereo verso est mentre l'altro verso ovest. I risultati ottenuti confrontando questi con l'orologio rimasto a terra, furono sorprendenti. L'orologio che ha viaggiato verso est, è risultato in ritardo di circa 0.06 milionesimi di secondo; mentre quello che ha viaggiato verso ovest di 0.27 milionesimi di secondo. Ma qualcosa non torna, se gli aerei viaggiavano alla stessa velocità, non dovrebbero ottenere la stessa dilatazione dello spazio tempo? Non dovete dimenticare di considerare che l'aereo diretto verso ovest viaggiava alla velocità di crociera sommata a quella di rotazione terrestre; mentre nel caso dell'aereo diretto ad est, alla sua velocità di crociera va sottratta quella di rotazione della terra, dove era posizionato il terzo orologio! Questo spalanca una porta del tutto nuova poiché se consideriamo la terra in movimento mentre ruota attorno al sole, ed il sole stesso in movimento poiché si sposta nella nostra galassia, tutto l'universo è suddiviso in "sacche temporali" dove il tempo scorre in base alla velocità a cui si muove quel sistema rispetto a noi o ad altri sistemi.

La teoria della relatività stravolse in quegli anni due importanti realtà della fisica di quel tempo: il fatto che l'etere fosse il riferimento come quiete assoluta, ed il fatto che, secondo la gravità di Newton, aggiungendo una massa in un sistema gravitazionale, tutti i corpi reagiscono istantaneamente alla nuova forza indipendentemente dalla distanza a cui si trovano. Questo

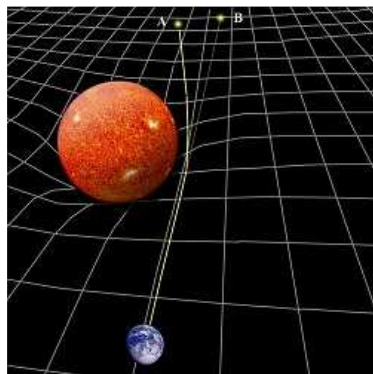
significa che il "segnale" del cambiamento avvenuto si trasmette a velocità superiori di quella della luce che come sappiamo la teoria della relatività indica come la velocità massima possibile.



Einstein si rese conto di queste difficoltà e si mise subito al lavoro per trovare delle spiegazioni accettabili dalla comunità scientifica. Immaginò così un uomo all'interno di una cabina da ascensore (a quel tempo non erano di moda le astronavi...). Se l'uomo è in piedi e percepisce una certa forza di gravità, può significare due cose: o si trova sulla terra e la gravità della terra lo attira verso il basso, oppure si trova dentro un ascensore nello spazio, il quale viene accelerato da un potente razzo, così che l'accelerazione lo spinga verso il basso dandogli l'illusione di gravità. Non ha modo in realtà di sapere quale delle due sia la spiegazione corretta del fenomeno. Quindi c'è una certa equivalenza tra la gravità e l'accelerazione! Sembrano la stessa forza, non possono essere distinte. Applicando questa idea alla gravità terrestre però, funzionerebbe solo se la terra fosse piatta: quando una mela cade sulla testa di Newton, si può dire che la mela è caduta verso il basso oppure che la terra e Newton hanno accelerato verso l'alto. Ma visto che la terra è sferica, com'è possibile che tutte le forze partano dal centro della terra puntando in direzioni sempre diverse in base a dove ci troviamo? L'accelerazione al polo nord è esattamente opposta all'accelerazione di gravità del polo sud. Qui Einstein ebbe il suo più grande colpo di genio.



Ne dedusse che la massa della terra distorce lo spazio tempo, e quindi genera una accelerazione verso il centro di se stessa: ma cosa significa distorcere lo spazio tempo? Immaginate di tendere una tovaglia dai suoi quattro angoli e posizionare una palla in centro: la palla incurva la tovaglia verso il basso e qualsiasi oggetto sulla tovaglia cadrebbe scivolando verso la palla.



Maggiore la massa della palla, maggiore l'accelerazione con cui i pezzi le cadono contro, poiché la tovaglia si inclinerebbe maggiormente, formando un vero e proprio cono verso il basso. La nuova teoria dello "spazio curvo" venne chiamata **relatività generale**, per distinguerla dalla precedente **relatività ristretta** che non prendeva in considerazione la gravità.

La prova che la relatività generale era corretta fu dimostrata in modo eclatante nel 1919 quando durante un'eclissi di sole totale, i telescopi rilevarono che effettivamente la luce di una stella che giungeva a noi passando nei pressi del sole, veniva distorta dalla deformazione spazio-temporale causata dalla massa del nostro sole stesso!