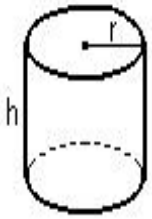
Conduttori, semiconduttori ed isolanti

Possiamo classificare i materiali presenti in natura in base alla conducibilità elettrica che mostrano e quindi all'ostacolo che offrono al passaggio della corrente. Sappiamo che gli isolanti non consentono il passaggio di correnti apprezzabili, i conduttori consentono il passaggio di corrente e i semiconduttori hanno caratteristiche intermedie fra le altre due categorie.

Per esser più precisi dobbiamo introdurre il concetto di resistività. Ricordiamo che un corpo (che supponiamo di forma geometrica regolare, ad esempio un cilindro)



offre una resistenza al passaggio di corrente elettrica che è data dalla seguente formula

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

dove S è la sezione del cilindro, l è la lunghezza e ρ è la resistività del materiale in questione. Per resistività si intende con esattezza la resistenza offerta al passaggio della corrente, misurata fra facce opposte di un cubo il cui volume sia proprio un centimetro cubo: l'unità di misura della resistività è Ωcm. Nella seguente tabella riportiamo l'ordine di grandezza della resistività per isolanti, conduttori e semiconduttori.

	Resistività (Ωcm)
Isolanti	10^{10}-10^{23}
Semiconduttori	10^{3}-10^{8}
Conduttori	10^{-8}-10^{-4}

Facciamo qualche esempio numerico: supponiamo di considerare un cilindro con l = 10 cm, S = 1 cm^2. Se esso è in polietilene (resistività compresa fra 10^{15} e 10^{18}) la resistenza che offre è compresa fra

$$R\min = 10^{15}\frac{10}{1} = 10^{16} = 10 \text{ milioni di miliardi di } \Omega$$

e

$$R\max = 10^{18}\frac{10}{1} = 10^{19} = 10000 \text{ milioni di miliardi di } \Omega$$

Se il cilindro è in rame (resistività $1{,}7*10^{-6}$) la resistenza offerta è

$R = 1{,}7 * 10^{-6} \frac{10}{1} = 1{,}7 * 10^{-5} = 17$ milionesimi di ohm.

Se il cilindro è di silicio (semiconduttore con resistività $2{,}3 * 10^{5}$)

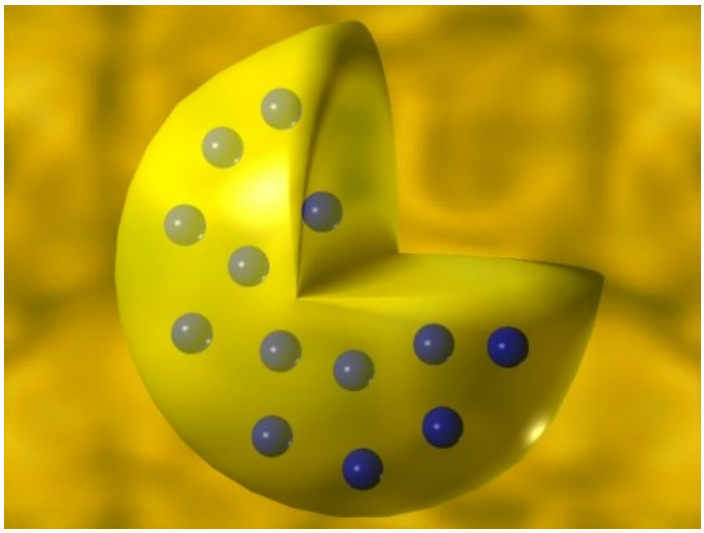
$R = 2{,}3 * 10^{5} \frac{10}{1} = 2{,}3 * 10^{6} = 2{,}3$ milioni di ohm

Tavola delle resistività di alcuni materiali (calcolati a 20 °C)

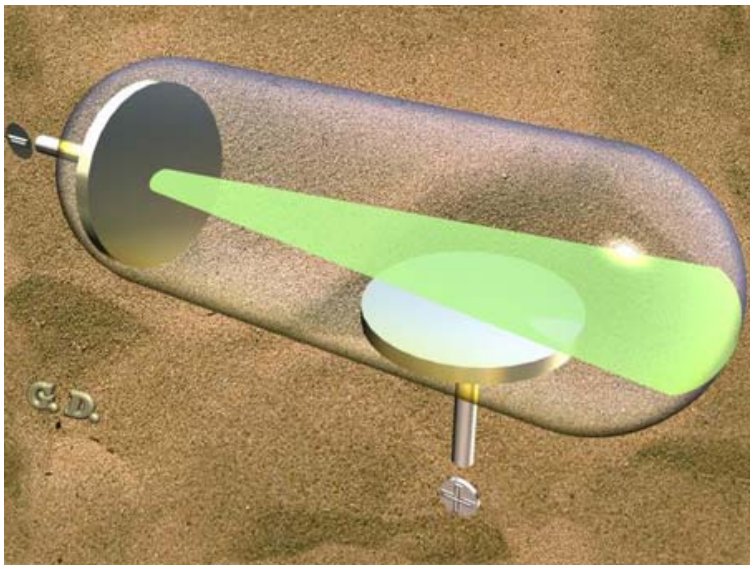
Materiale	**Resistività r (in Ω × mm² / m)**
Argento	0.016
rame	0.017
Oro	0.024
Alluminio	0.028
Tungsteno	0.055
Platino	0.10
Ferro	0.13
Acciaio	0.18
Piombo	0.22
Mercurio	0.94
Costantana (lega 80% Cu, 40% Ni)	0.49
Carbonio	35
Germanio	60×10^{2}
Silicio	2.3×10^{9}
Ambra	5×10^{20}
Vetro	$10^{16} \div 10^{20}$
Mica	$10^{17} \div 10^{21}$
Zolfo	10^{21}
Legno secco	$10^{14} \div 10^{17}$

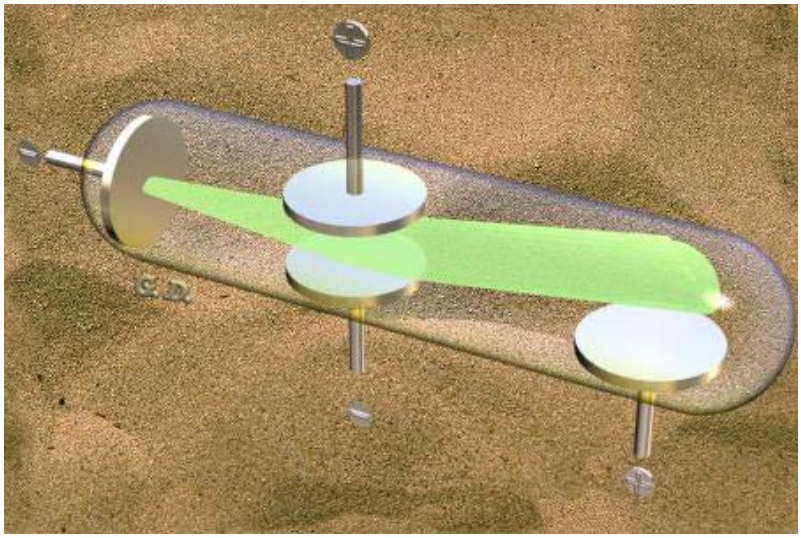
Per comprendere i motivi di tale differenziazione di comportamento occorre fare riferimento alla teoria atomica.

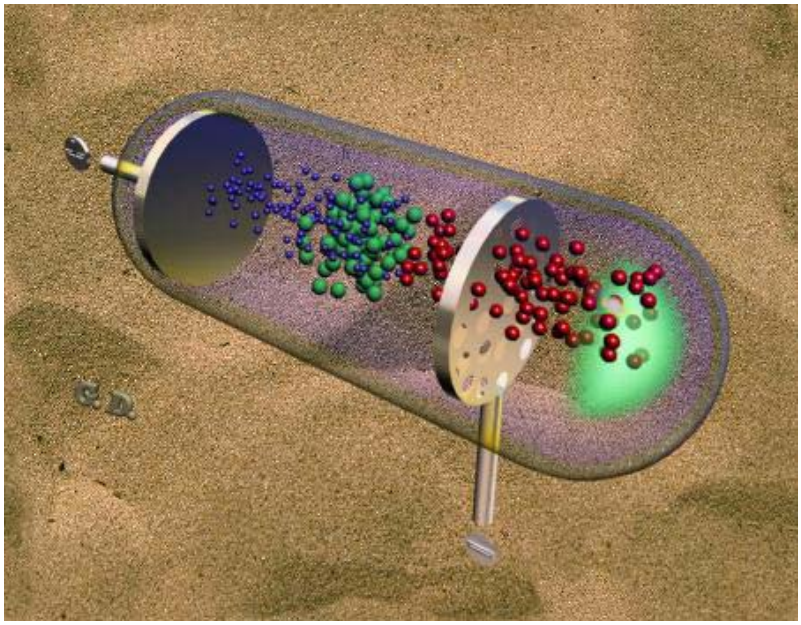
I vari modelli dell'atomo



I modelli interpretativi dell'atomo hanno subito una notevole evoluzione nel corso del tempo. Il modello più semplice è quello rappresentato nella figura precedente (il modello atomico di Thomson) il quale, con esperimenti in cui creava campi magnetici in un tubo a vuoto

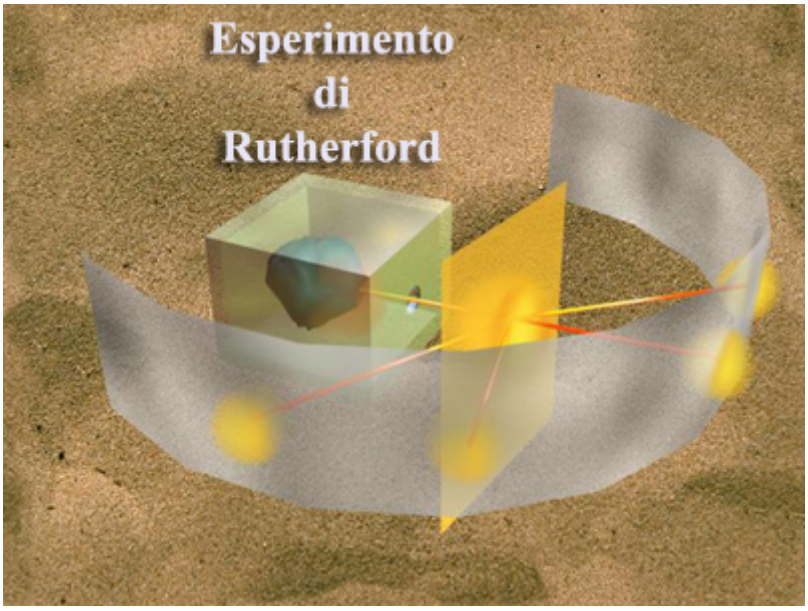




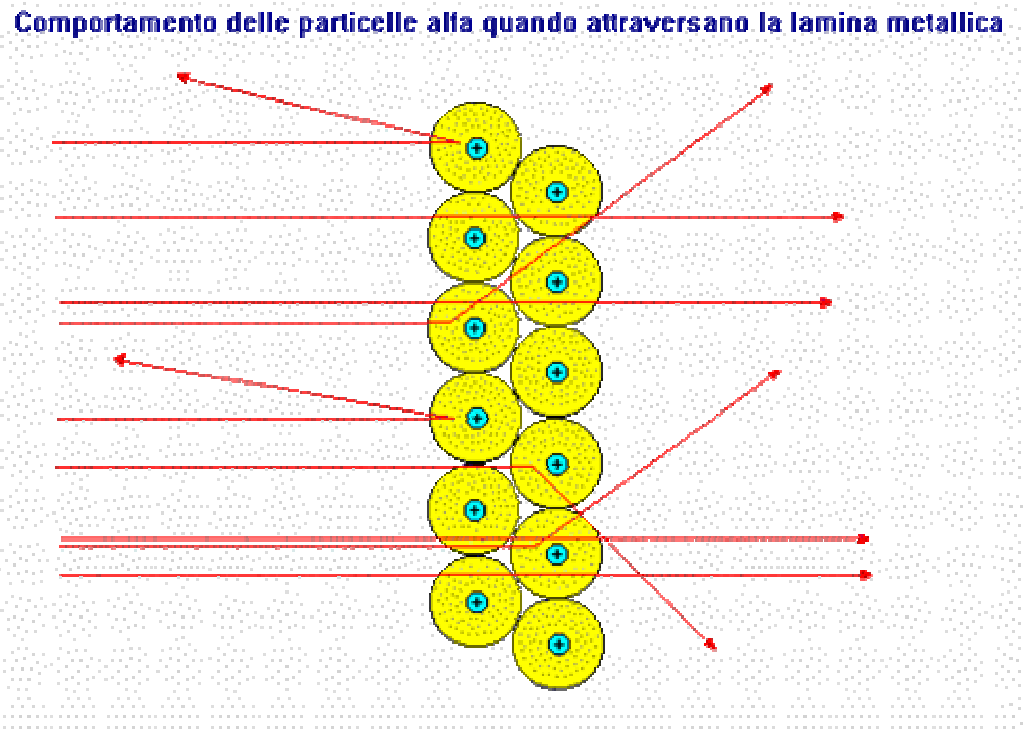


scoprì l'esistenza di particelle cariche negativamente (gli elettroni) e da cui desunse, data la neutralità complessiva dell'atomo, la presenza di cariche positive (i protoni) ma ritenne erroneamente che gli atomi erano costituiti da sfere piene (i nuclei) in cui erano incastonati gli elettroni .

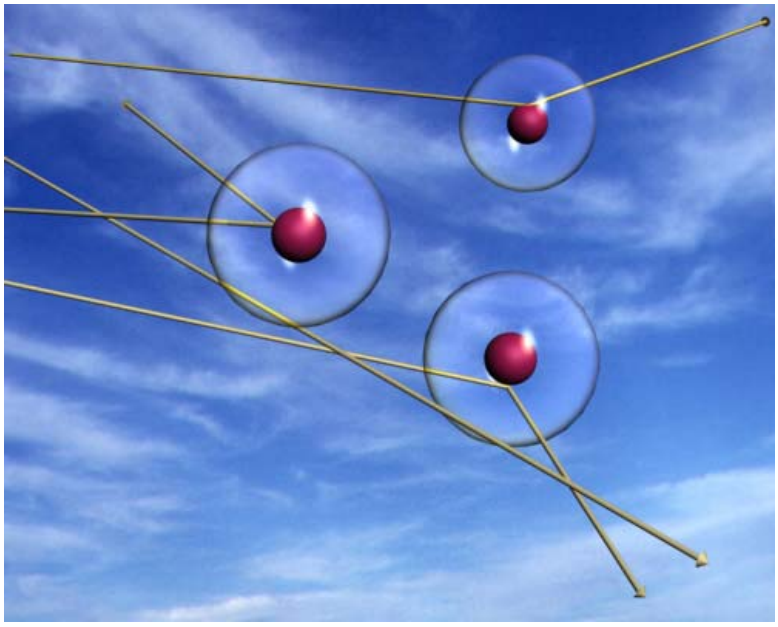
Questo modello non resse ai risultati sperimentali di Rhuterford il quale bombardò con nuclei di elio una lamina di oro



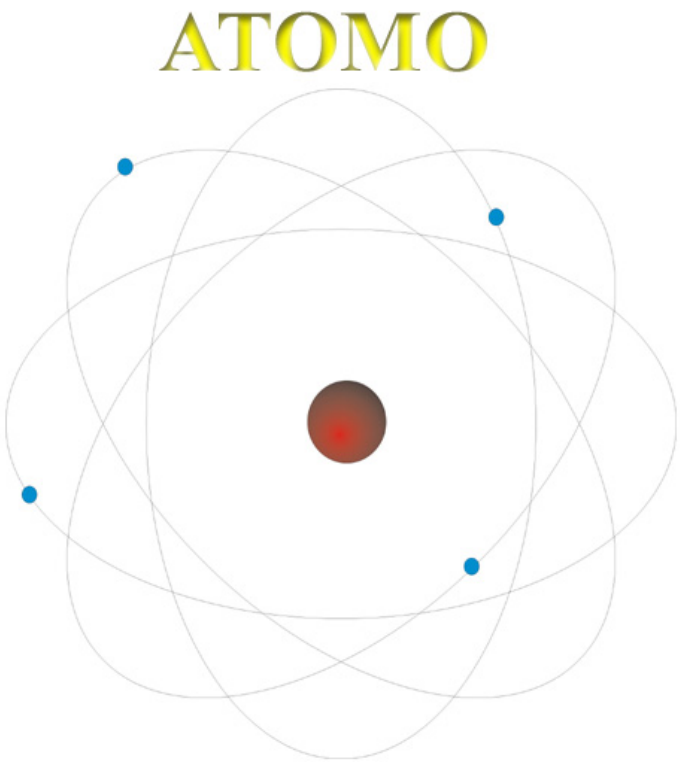
E pose rilevatori di particelle con diverse angolazioni rispetto alla lastra: se il modello atomico di Thomson fosse stato corretto ci si sarebbe aspettati che la totalità delle particelle di elio avrebbe dovuto rimbalzare all'indietro come palline di tennis scagliate contro un muro. Egli rilevò invece che solo una percentuale di tali particelle rimbalzava all'indietro mentre altre venivano deviate secondo vi vari angoli di inclinazione possibili.



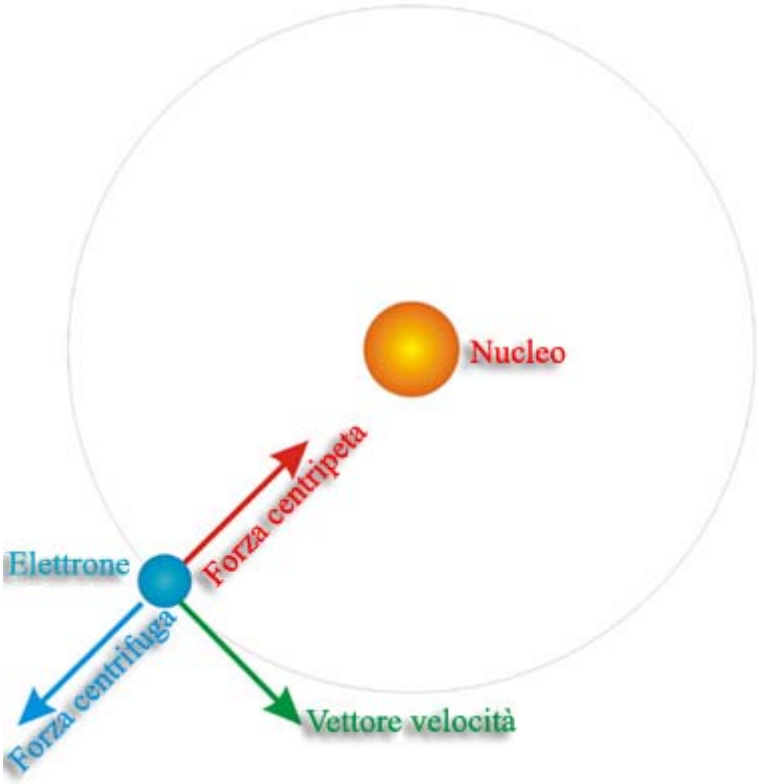
O addirittura attraversavano indisturbati la lamina.



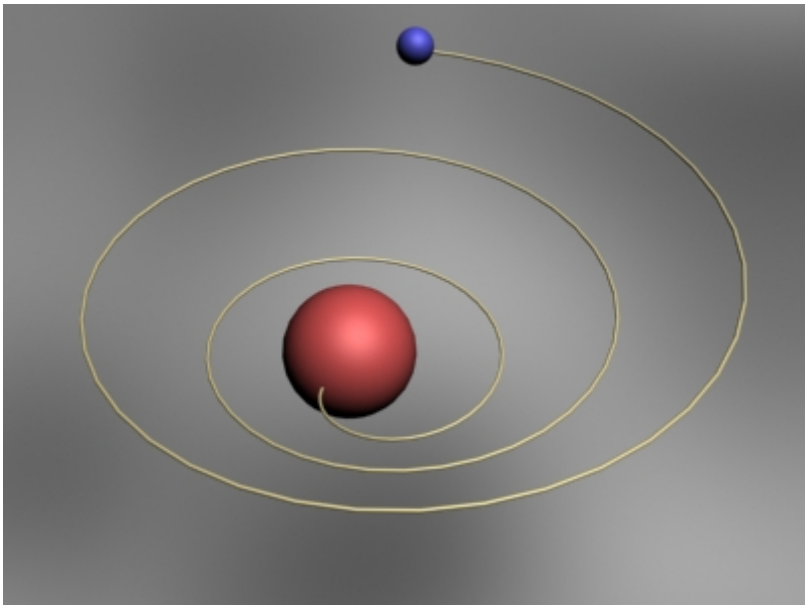
Questo portò ad introdurre un modello planetario dell'atomo, in cui si riconosceva, in armonia con i risultati di Rhuterford, che l'atomo era costituito in gran parte da spazio vuoto, con l maggior parte della massa concentrata in un nucleo e gli elettroni che orbitavano intorno al nucleo come pianeti intorno al sole.



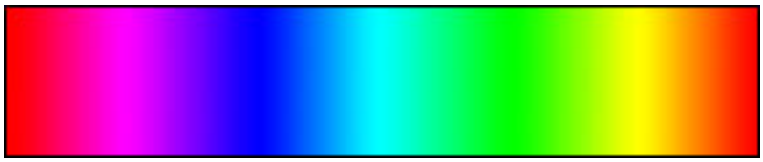
Il legame fra elettroni e nuclei era determinato dall'equilibrio fra forze meccaniche agenti sull'elettrone



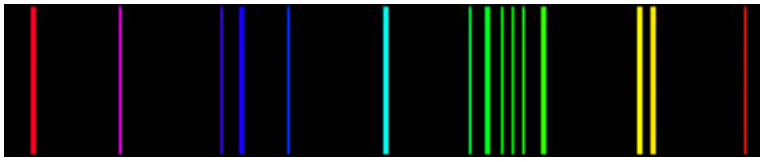
Secondo questa modellizzazione meccanica si riteneva che un elettrone potesse possedere un'energia che potesse variare con continuità, assumere cioè qualunque valore reale possibile (una grandezza che varia con continuità è una grandezza che posso pensare di esprimere con numeri che possono possedere un qualunque numero di cifre dopo la virgola). All'aumentare dell'energia posseduta l'elettrone percorreva orbite con raggio sempre più grande fino a potersi allontanare dall'atomo



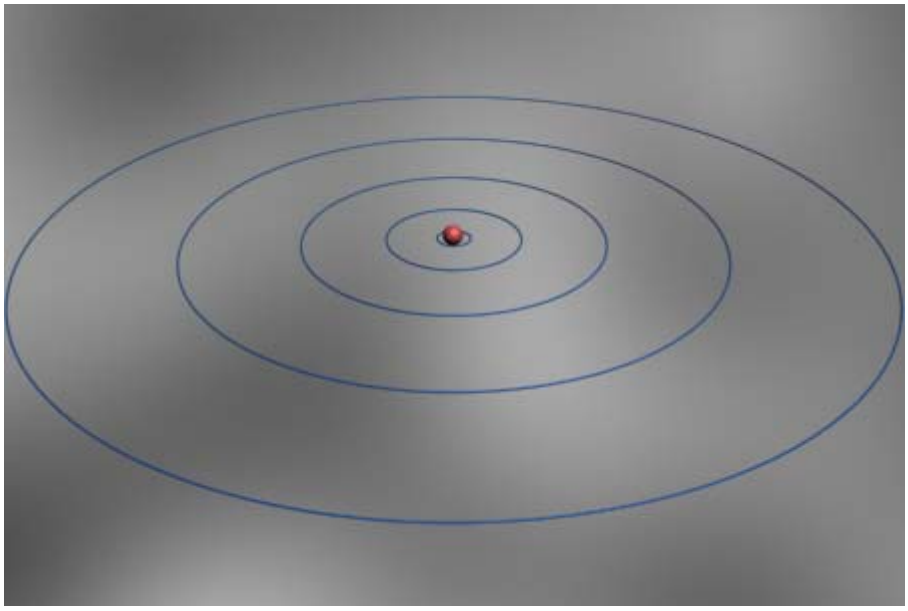
Questo modello non era però in grado di spiegare i risultati che si ottenevano analizzando lo spettro di emissione degli atomi cioè le frequenze delle radiazioni emesse dagli atomi. In una radiazione la frequenza è legata all'energia posseduta dalla radiazione emessa. Se un elettrone poteva variare la propria energia di un valore qualunque ed emettere dunque radiazioni a tutte le frequenze



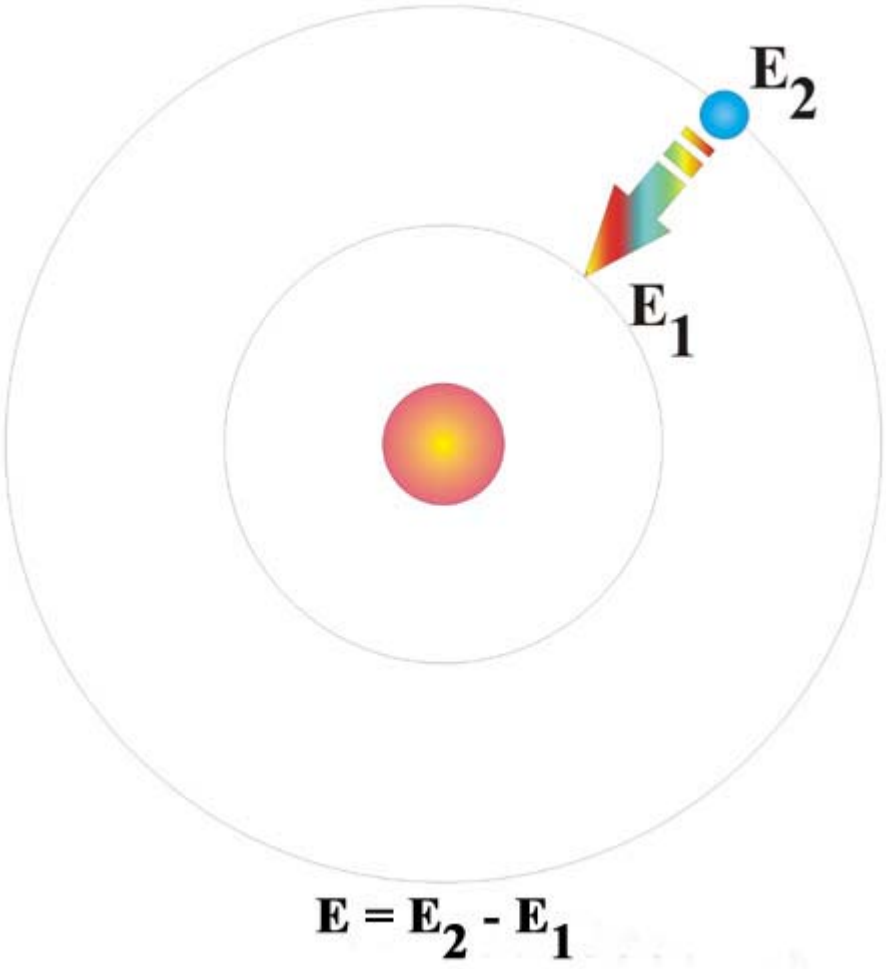
Mentre si notava sperimentalmente che venivano emesse radiazioni soltanto ad alcune frequenze



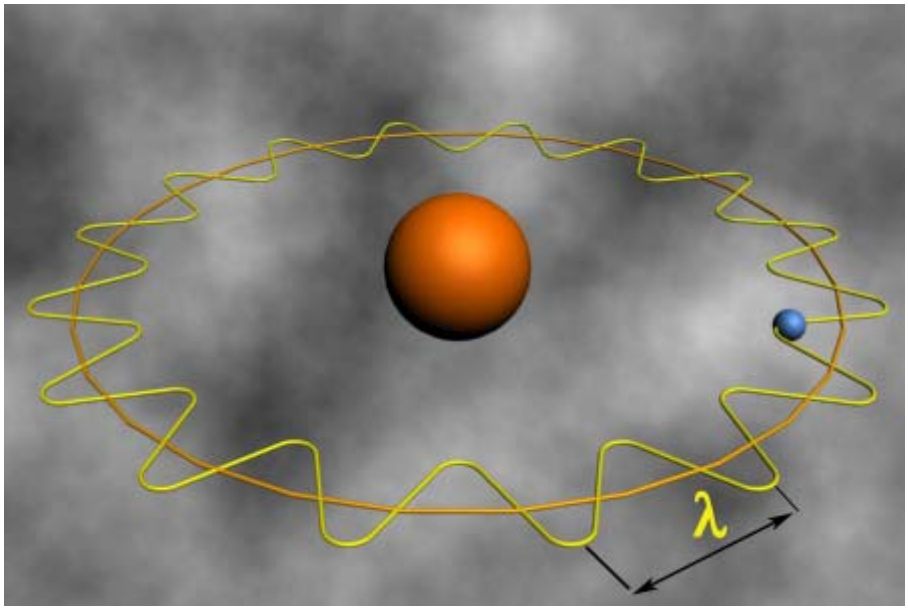
Il fisico Niels Bohr ne dedusse che l'energia posseduta dall'atomo dovesse essere allora una grandezza quantizzata, una grandezza cioè che non poteva assumere tutti i valori possibili, ma che variasse a scatti, detti quanti di energia. Di conseguenza anche le orbite percorse non potevano essere tutte quelle immaginabili ma il oro raggio doveva variare a scatti, di multipli di una quantità minima.



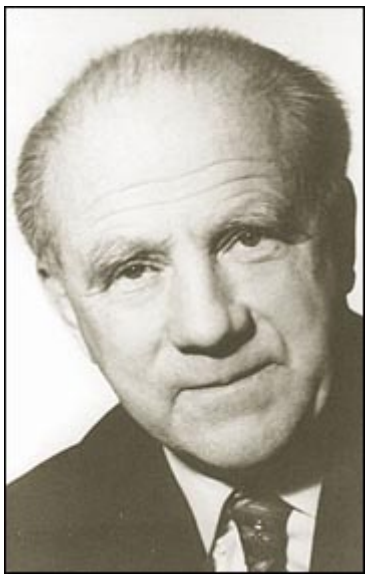
Un elettrone poteva passare da un'orbita all'altra soltanto cedendo o acquistando una quantità di energia pari alla differenza fra le energie corrispondenti alla due orbite.



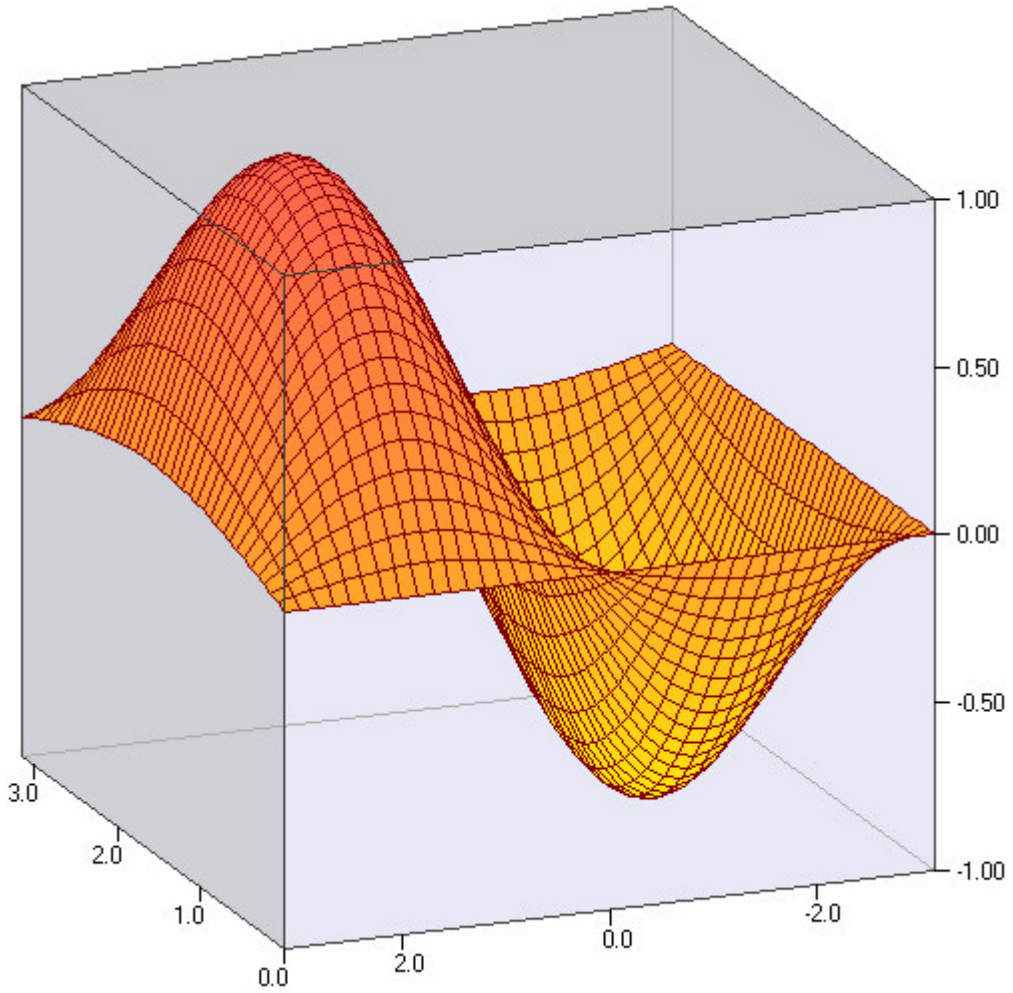
Il modello di Bohr resse a lungo sia pur con correzioni di dettaglio come quella di De Broglie, che consentivano una maggiore aderenza ai risultati sperimentali.

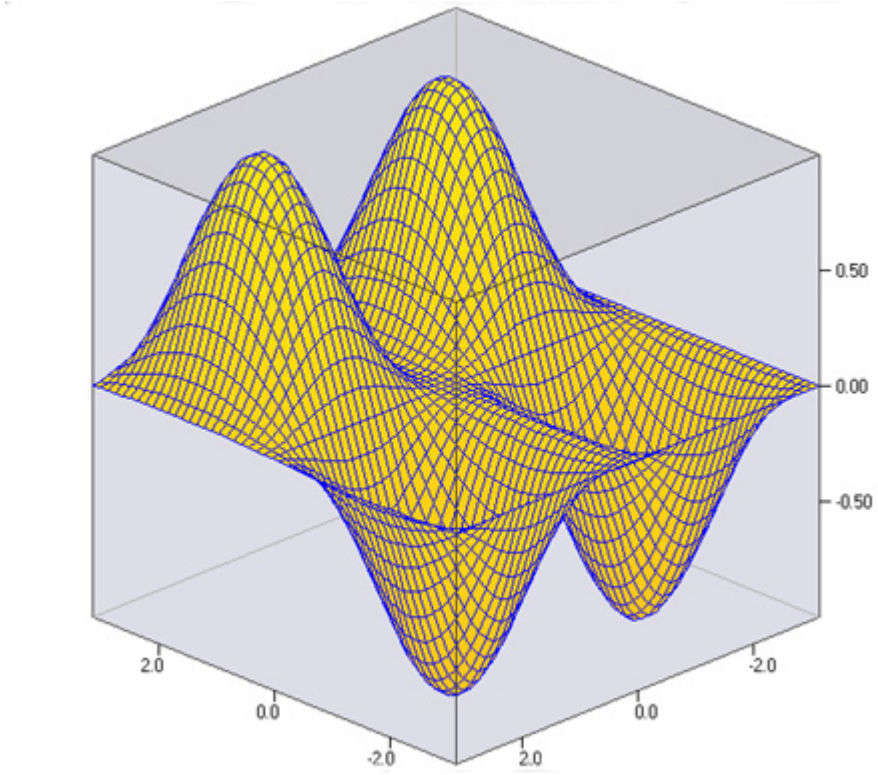


La vera rivoluzione fu data dal principio di indeterminazione di Heisenberg

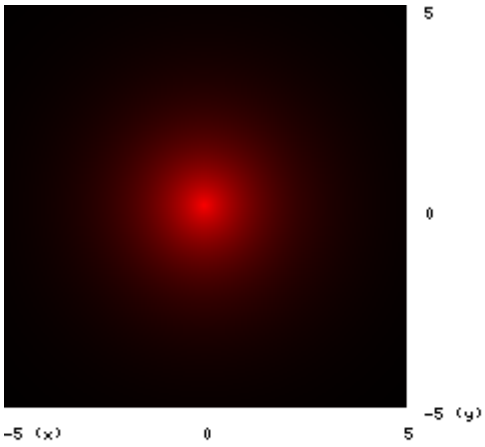


Egli dimostrò in sostanza che non è possibile determinare contemporaneamente posizione e velocità di un elettrone nello spazio. Da ciò deriva che parlare di orbite percorse dall'elettrone è un non senso., perché il concetto di orbita presuppone la capacità di determinare con precisione il moto di un corpo. Andava introdotto, allora, un nuovo modello di interpretazione degli atomi, in cui si rinunciava a determinare con precisione assoluta il moto degli elettroni e ci si accontentava di darne una descrizione probabilistica: invece di determinarne la traiettoria ci si accontentava di determinare zone dello spazio intorno al nucleo in cui l'elettrone potrebbe trovarsi con sufficiente probabilità, gli orbitali. Questi orbitali venivano determinati mediante strumenti matematici molto sofisticati, detti funzione d'onda

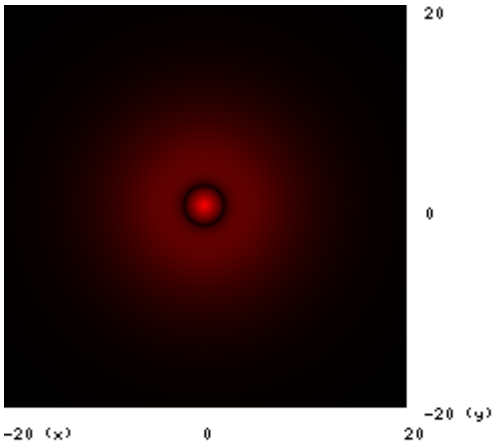




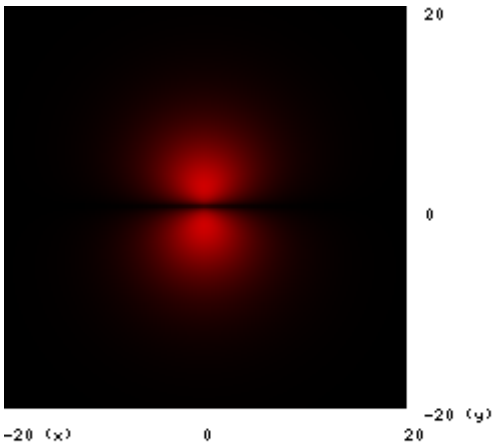
Si hanno diversi tipi di orbitali



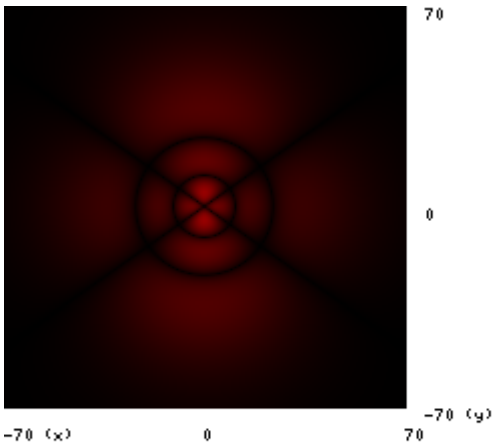
numero quantico principale n = 1
numero quantico azimutale l = 0
numero quantico magnetico m = 0



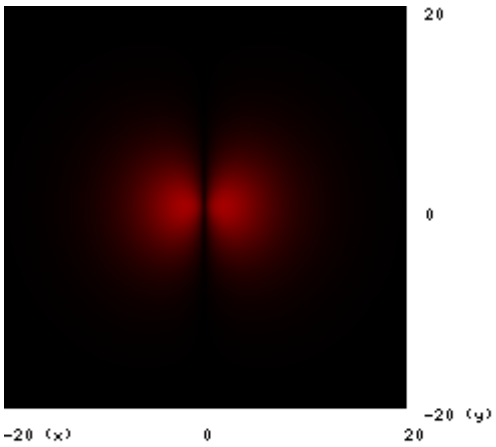
numero quantico principale n = 2
numero quantico azimutale l = 0
numero quantico magnetico m = 0



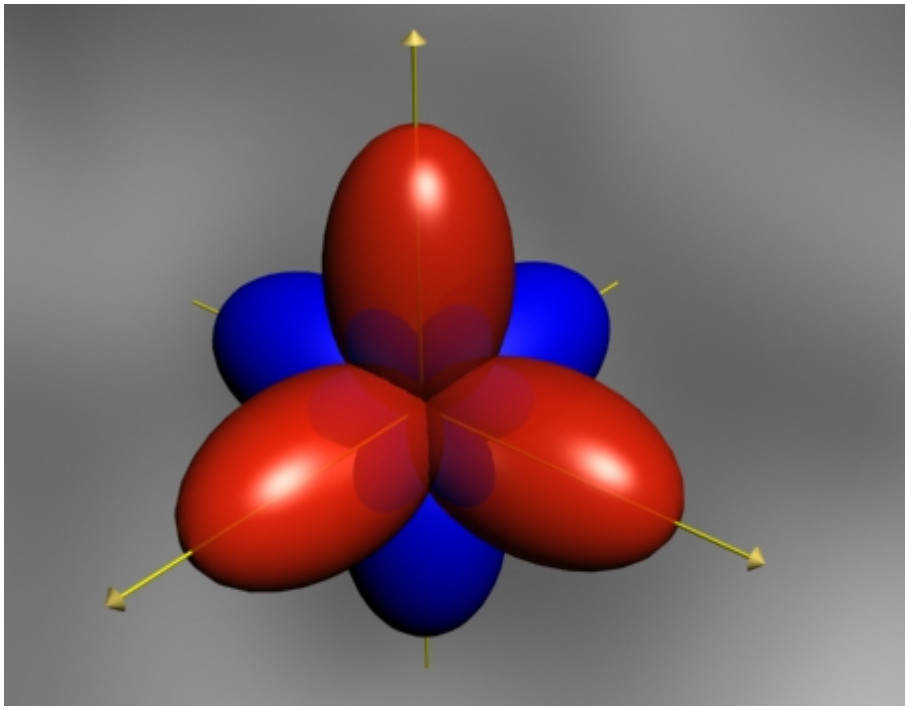
numero quantico principale n = 2
numero quantico azimutale l = 1
numero quantico magnetico m = 0



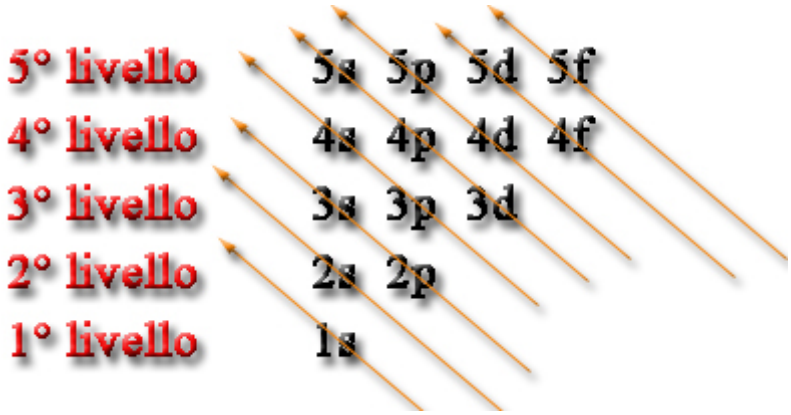
numero quantico principale n = 5
numero quantico azimutale l = 2
numero quantico magnetico m = 0



numero quantico principale n = 2
numero quantico azimutale l = 1
numero quantico magnetico m = 1

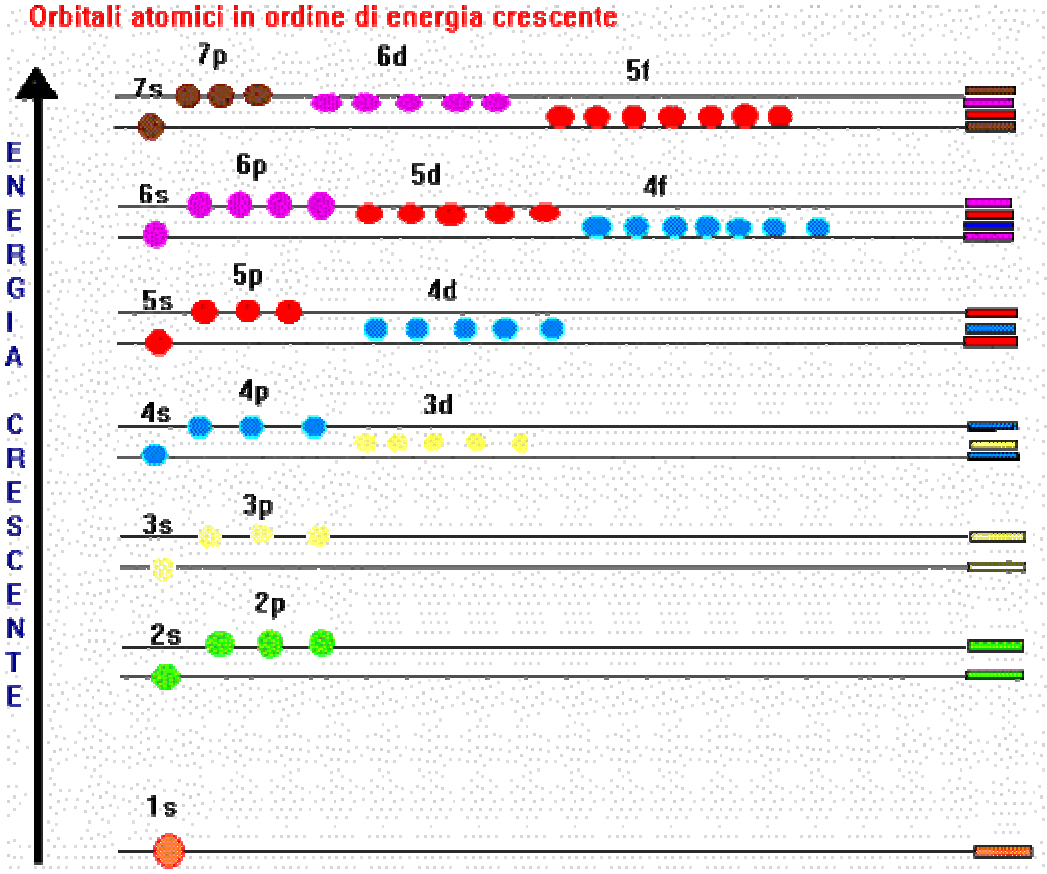


Gli elettroni di un atomo occupano i vari orbitali a partire da quelli con minore energia



Livelli e bande di energia

Quello che ci interessa ora ribadire è la natura quantizzata dell'energia posseduta da un elettrone



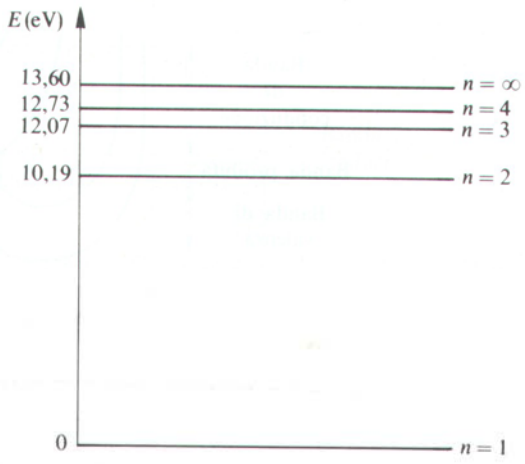


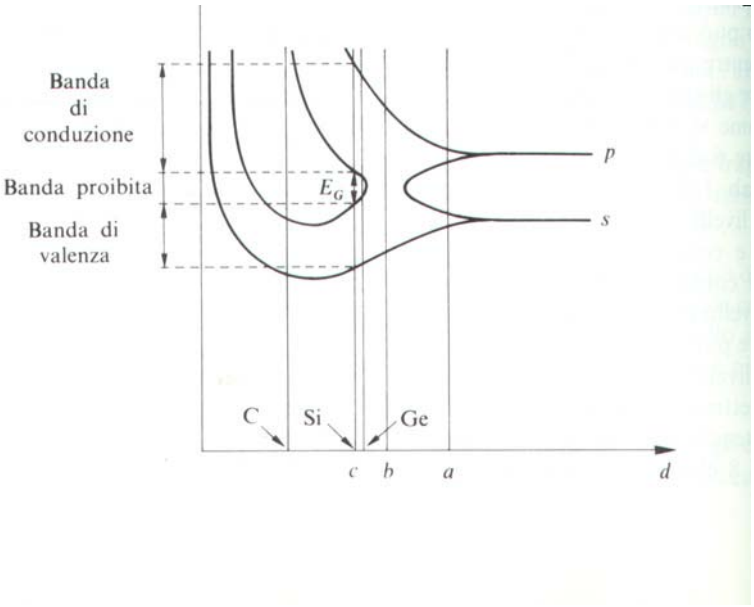
FIG. 1.4
I quattro livelli energetici inferiori permessi per l'atomo di idrogeno (n = 1, 2, 3, 4) e il livello di ionizzazione (n = ∞).

3

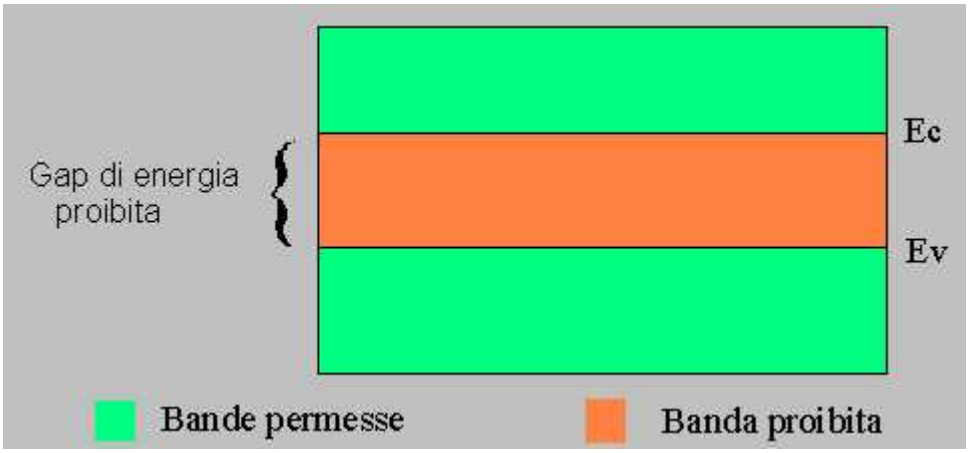
Ad un elettrone sono dunque permessi soltanto certi livelli di energia, ad esempio 10,19 elettronvolt oppure 12,047 elettronvolt ma non, per esempio, 10,21 oppure 11,4589 elettronvolt. Dunque la sua energia non può assumere tutti i valori immaginabili.

Questa situazione è vera, però, soltanto se l'atomo è isolato, molto distante dagli altri atomi. Se l'atomo è inserito in un reticolo cristallino, le interazioni elettriche fra gli elettroni di un atomo e

quelli dell'atomo successivo complicano le cose e fanno moltiplicare i livelli energetici possibili. Analizziamo la seguente figura



In essa poniamo sull'asse delle ascisse la distanza d interatomica cioè la distanza reciproca fra i vari nuclei del reticolo, e sull'asse delle ordinate l'energia posseduta dagli elettroni. Vediamo che se d è molto grande , cioè gli atomi sono molto distanti l'uno dall'altro, vi sono pochi livelli energetici, ma via via che avviciniamo gli atomi fra loro, i livelli si moltiplicano tanto da dar luogo a vere e proprie bande , cioè intervalli all'interno dei quali è permesso all'energia di assumere un qualsiasi valore.
Dalla figura si vede anche che si creano bande di valori di energia che un elettrone non può possedere. In definitiva, per atomi inseriti in un reticolo cristallino, la situazione è la seguente

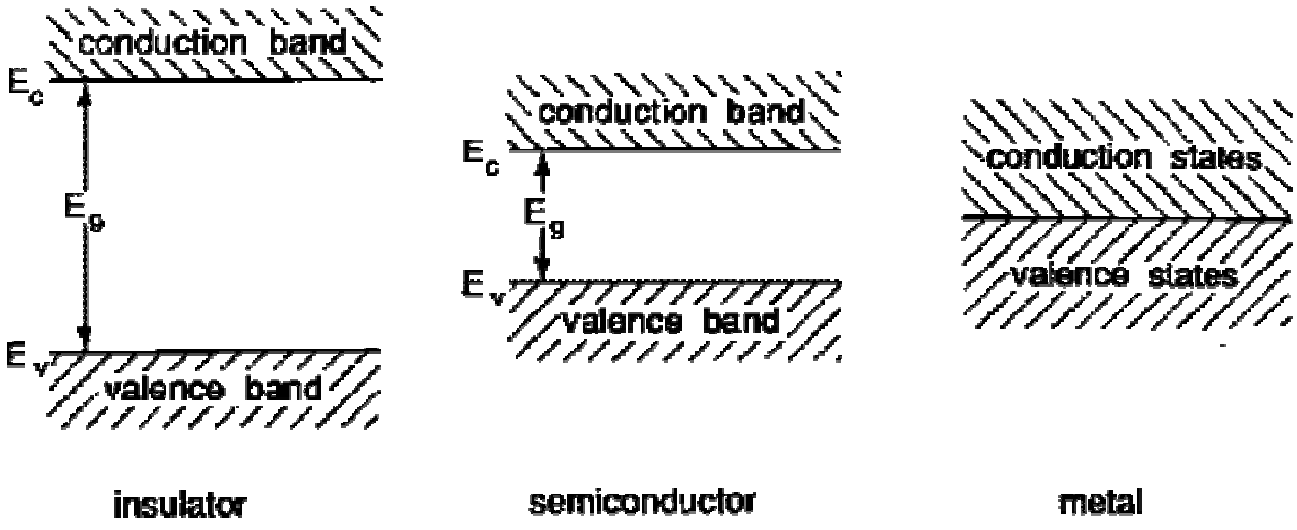


Abbiamo tre possibili bande di energia:

- la banda di valenza, è un insieme di valori di energia che possiede un elettrone vincolato all'atomo,
- la banda proibita o gap costituita da un insieme di valori di energia che un elettrone non può possedere

- la banda di conduzione. Un elettrone che acquista una tale energia abbandona l'atomo e diventa libero.

Scopriamo anche, dalla figura precedente, che l'ampiezza della banda proibita dipende dalla distanza interatomica e che essa è molto grande negli isolanti, ha un valore minore nei semiconduttori, è praticamente inesistente nei conduttori



Proprio l'ampiezza della banda proibita consente di spiegare il diverso comportamento di isolanti, conduttori e semiconduttori.

Negli isolanti, data l'ampiezza del gap, diventa molto difficile, improbabile statisticamente, che un elettrone diventi libero, per cui la popolazione di elettroni d liberi in un materiale isolante è molto piccola, da cui l'impossibilità di avere correnti significative.

Nei semiconduttori, il numero di elettroni liberi è superiore a quello presente negli isolanti poiché il gap da saltare è inferiore.

I conduttori sono ricchissimi di elettroni liberi poiché non esiste una banda proibita da dover superare.

Per avere un'idea più precisa, diciamo che in un metro cubo di materiale isolante troverete da 1 milione a dieci milioni di elettroni liberi mentre in un buon conduttore troverete 10^{28} elettroni liberi cioè 10 miliardi di miliardi di miliardi di elettroni liberi.

Nel silicio abbiamo 10^{16} elettroni liberi per metro cubo cioè dieci milioni di miliardi di elettroni liberi.