



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

Dipartimento di Scienze Fisiche,
Informatiche e Matematiche

Dalla fisica classica alla fisica moderna



- Il successo della fisica classica
- Verso la realtà dell'atomo: Il modello di Rutherford
- Nuovi esperimenti non spiegati:
 - spettri di emissione e assorbimento di gas di atomici
 - effetto fotoelettrico
- Il concetto di fotone
- Il modello atomico quantistico di Bohr
- Dai livelli discreti alle bande di energia dei solidi

Il successo della fisica classica

- La meccanica di Newton
- La forza di gravità svelata



- L'elettromagnetismo di Maxwell&co
- Le onde elettromagnetiche e la natura fisica della luce



Grandezze continue e quantizzate

Una grandezza fisica si dice **continua** se i possibili valori che essa può assumere sono distribuiti in modo continuo in un intervallo di valori. Ad esempio, la velocità di una particella accelerata dalla forza gravitazionale.

Una grandezza fisica si dice **quantizzata** se i possibili valori che essa può assumere sono limitati ad un insieme discrete. Ad esempio, la carica elettrica è quantizzata:

$$Q=Nq$$

In fisica classica ci sono alcuni altri esempi di grandezze quantizzate. Per esempio le frequenze delle onde che si posso eccitare su una corda che vibra mantenendo gli estremi fissati (per esempio, la corda di una chitarra).

Le particelle atomiche

Thomson, 1897
scoperta dell'elettrone



Rutherford, 1911
scoperta del protone

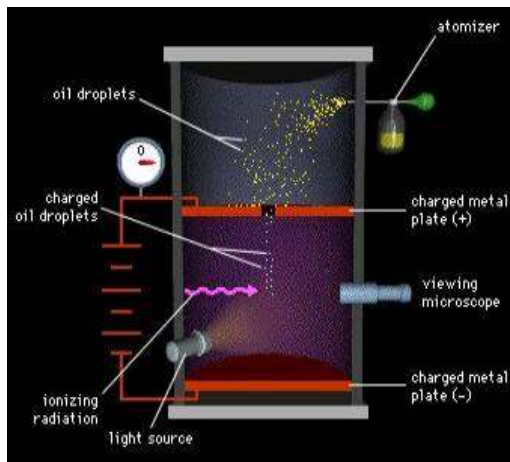
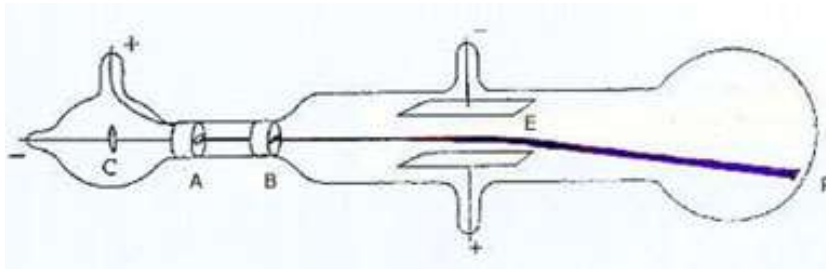


Chadwick, 1932)
scoperta del neutrone



Elettroni: scoperti come raggi catodici nel 1860 da William Crookes

Sono accelerati e deviati dal campo elettrico.



**Thomson nel 1896 determina
il rapporto carica/massa.**

**Millikan nel 1909 ne determina
la carica elettrica**

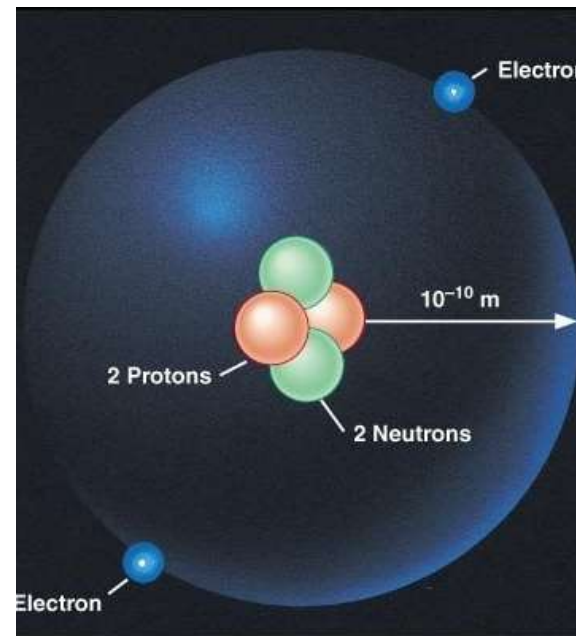
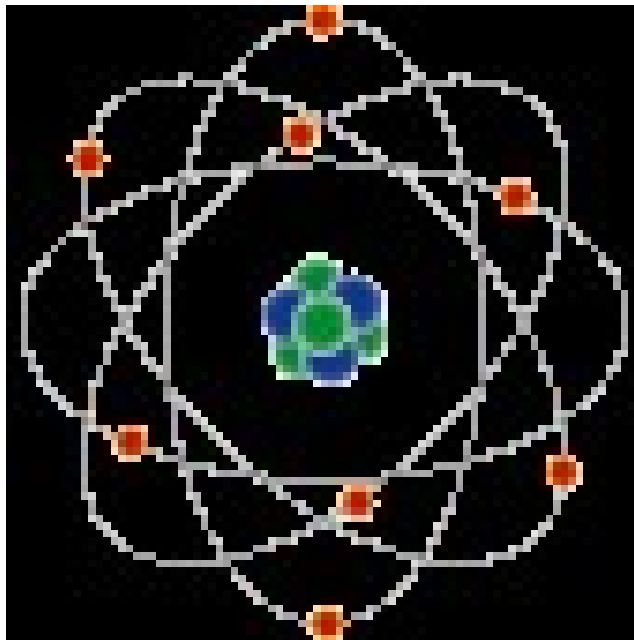


Il modello di Rutherford

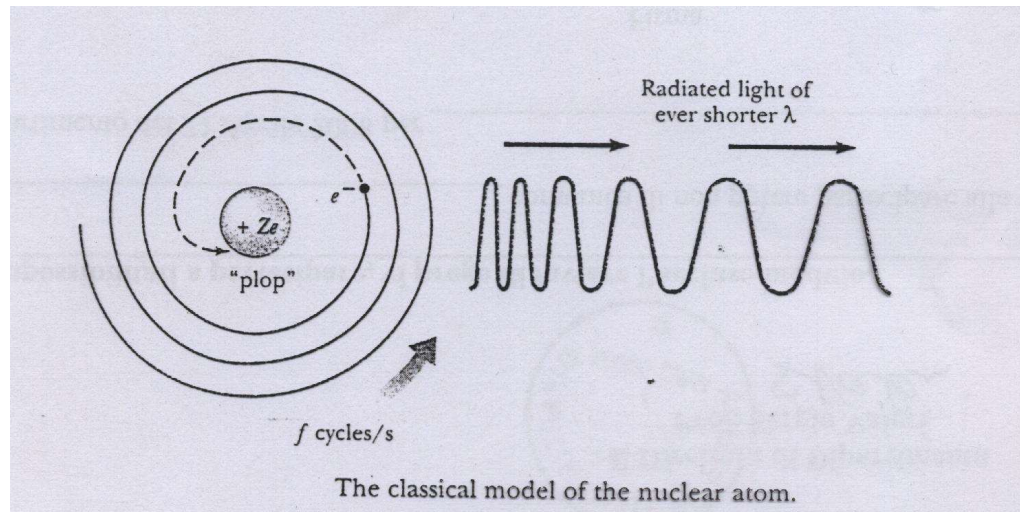
<https://www.youtube.com/watch?v=s4rTK3MkmE8>

Rutherford realizzò un esperimento in cui fasci di nuclei di He venivano focalizzati su una lastra di oro praticamente monoatomica.

L'interpretazione dei dati dell'esperimento portò alla conclusione che **l'atomo ha un nucleo molto piccolo di carica positiva** (10^{-5} volte più piccolo della dimensione dell'atomo) che contiene praticamente tutta la massa dell'atomo, e che **questo nucleo è circondato dagli elettroni**.



PROBLEMONE



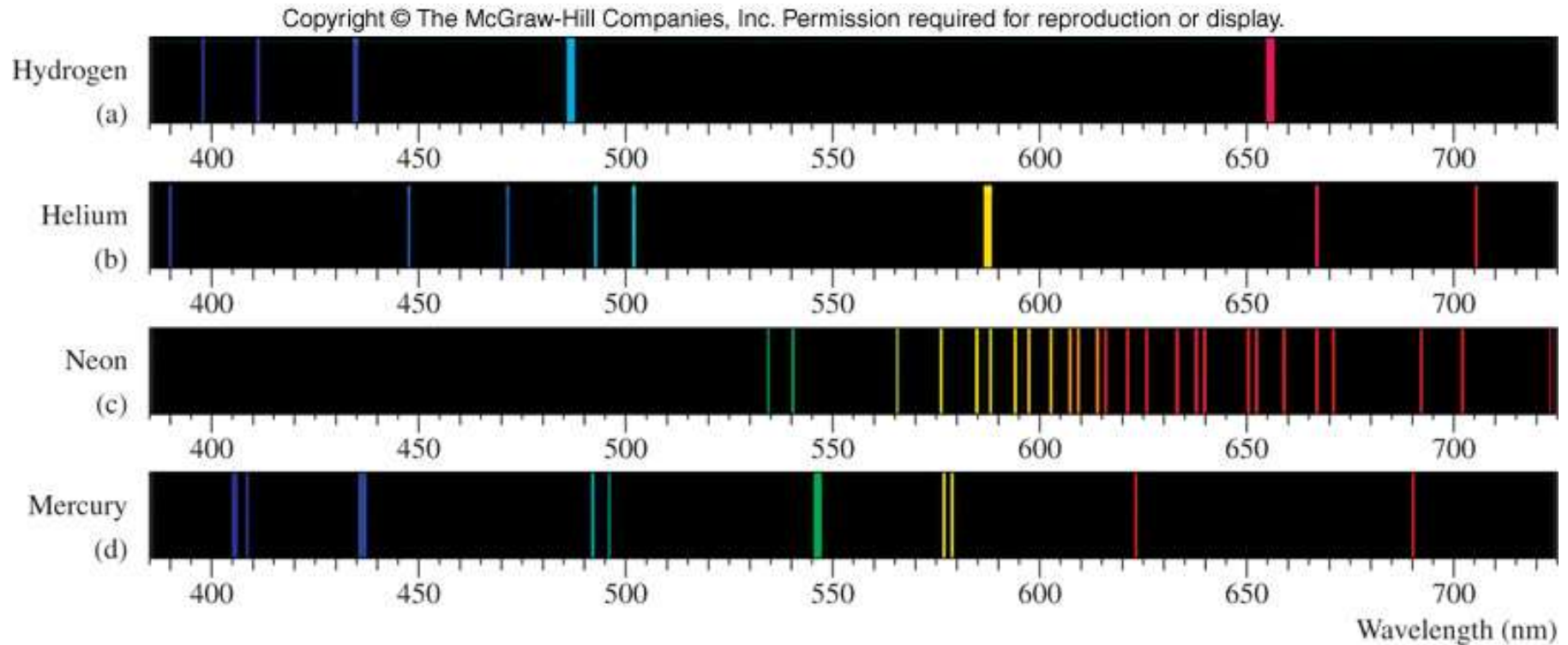
Secondo le leggi della fisica classica gli elettroni sulle loro orbite dovrebbero emettere energia (in quanto cariche accelerate) . Questo comporterebbe una riduzione progressiva del raggio dell'orbita, fino al collasso degli elettroni sul nucleo. Gli atomi quindi non sarebbero stabili, che è ovviamente falso.

Spettroscopia di emissione/assorbimento di gas e solidi

Un gas portato ad alta temperatura emette luce secondo uno spettro a righe (righe luminose su fondo nero). Ogni elemento ha il suo proprio insieme di righe spettrali.

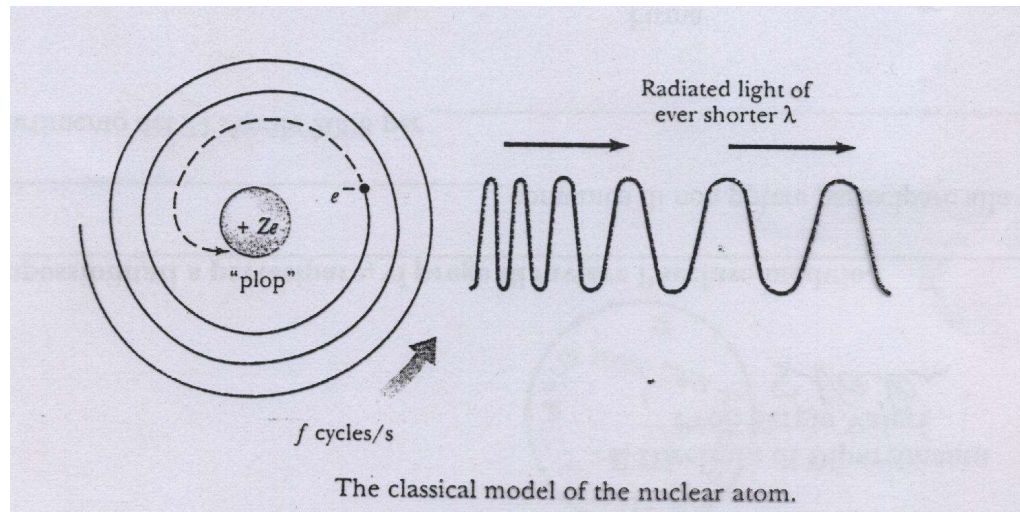
Un solido portato ad alta temperatura emette, invece, luce con spettro continuo.

Esempi di spettri di emissione



Questa è la luce che emette un gas di atomi eccitati.

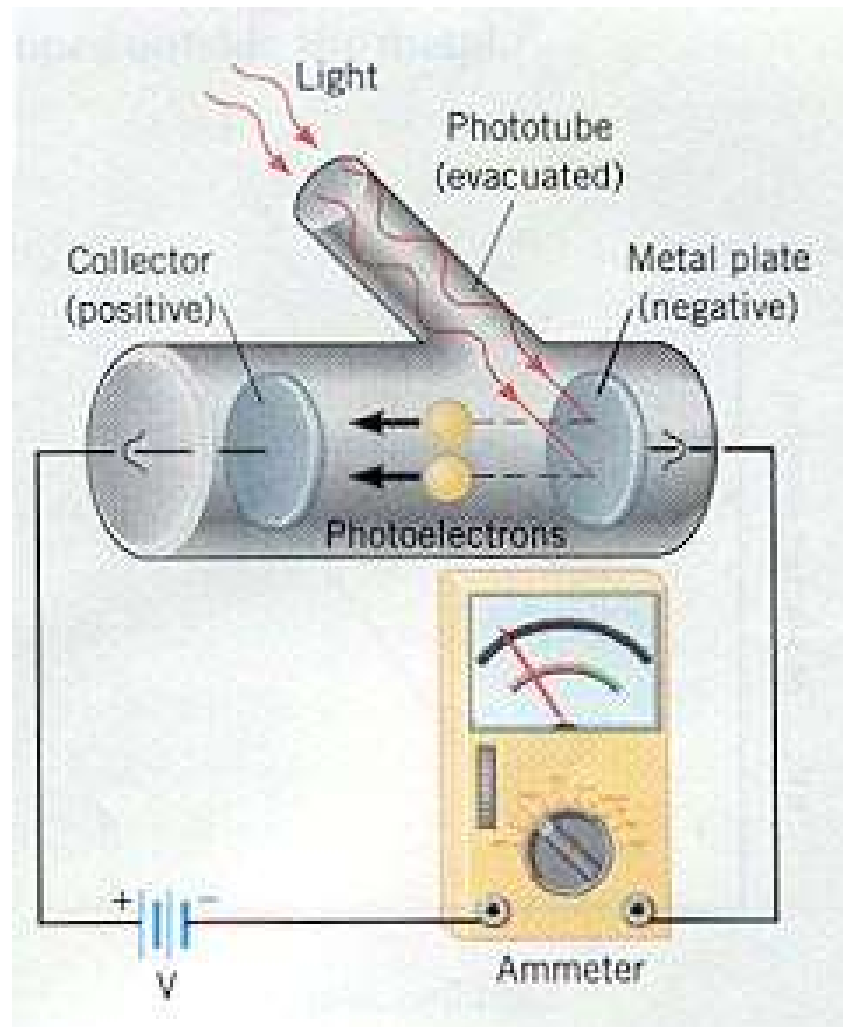
PROBLEMONE



Secondo le leggi della fisica classica gli elettroni sulle loro orbite dovrebbero emettere o assorbire energia in modo continuo. Non si spiega quindi la presenza di righe negli spettri atomici.

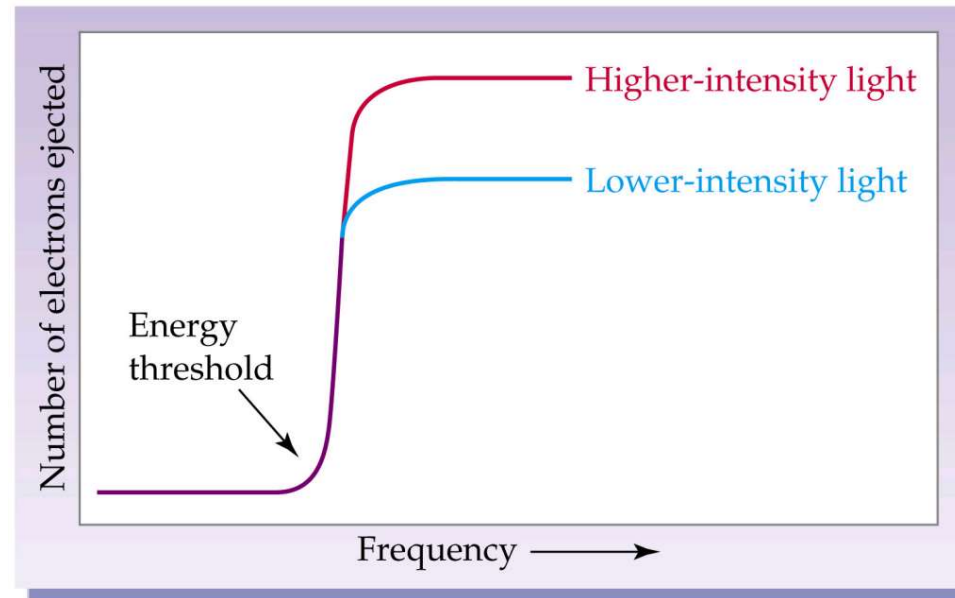
L'effetto fotoelettrico

In certe circostanze una radiazione EM che colpisce un metallo estrae elettroni dal metallo. Questo effetto si chiama **effetto fotoelettrico**.



Gli esperimenti mostrano che:

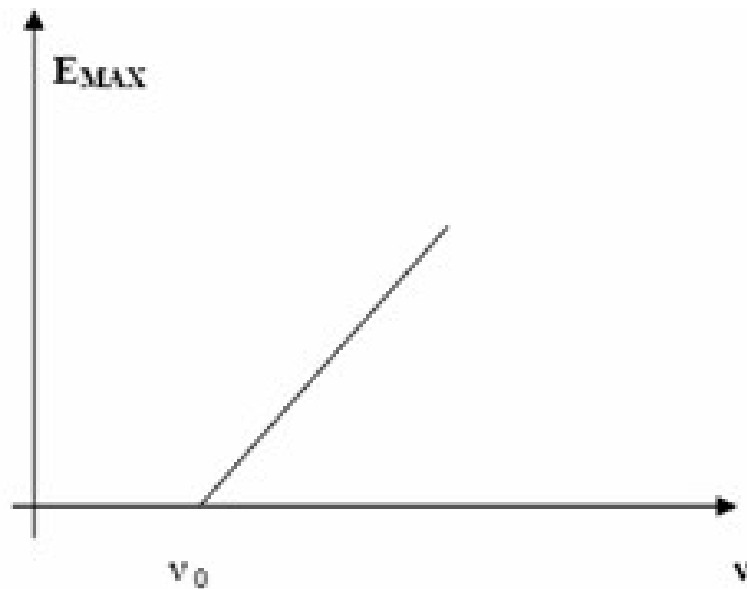
- 1. La frequenza della luce incidente deve essere maggiore di una frequenza di soglia che dipende dal tipo di metallo utilizzato. In caso contrario non si misurano elettroni emessi.**
- 2. Nel caso in cui gli elettroni siano estratti maggiore è l'intensità luminosa maggiore è il numero di elettroni emessi.**



Gli esperimenti mostrano che:

3. La massima energia cinetica degli elettroni estratti dipende dalla frequenza (e NON dalla intensità) della luce incidente.

4. Gli elettroni vengono emessi senza osservabile tempo di ritardo rispetto all'illuminazione, indipendentemente dall'intensità della luce incidente.



La previsione classica

Secondo la teoria classica (Maxwell) le onde EM trasportano energia e questa energia viene assorbita dagli elettroni del metallo quando esso viene illuminato. Maggiore è l'intensità della luce, maggiore è l'energia trasferita agli elettroni. Gli elettroni escono quando accumulano energia sufficiente dalla luce per sfuggire all'atomo a cui appartengono.

Dunque, secondo la teoria classica, un fascio di luce sufficientemente intenso, a qualunque frequenza dovrebbe estrarre elettroni e l'energia cinetica degli elettroni estratti dovrebbe aumentare con l'intensità luminosa.

La nuova fisica



Alcuni «rivoluzionari»: W. Nernst, Einstein, M. Planck, R.A. Millikan e von Laue ad una cena a casa di von Laue nel 1931.

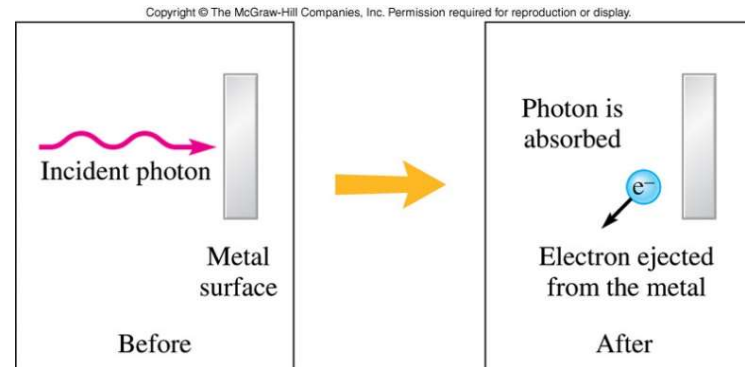
L'ipotesi di Einstein

Einstein propose una teoria “corpuscolare” della luce.

La luce trasporta energia sotto forma di quanti di energia:

$$E = hf$$

$$h = 6.62607004 \times 10^{-34} \text{ J s}$$
$$= 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV s.}$$



E' attraverso l'interazione fotone-elettrone che si spiega l'effetto fotoelettrico.

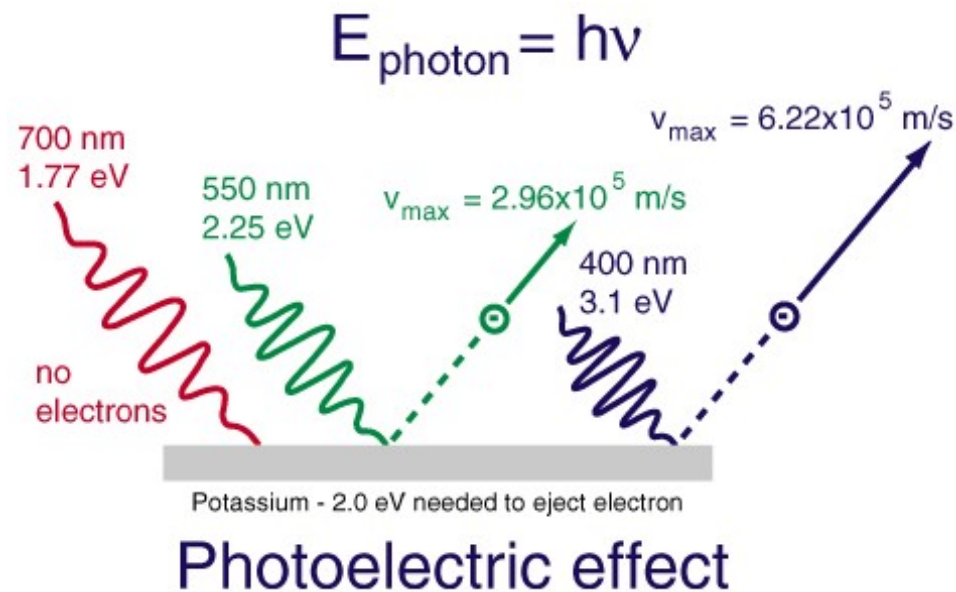
Se il fotone ha energia inferiore a quella richiesta dall'atomo per liberare un elettrone non viene assorbito e l'elettrone non viene emesso.

Se il fotone ha energia uguale o maggiore a quella richiesta dall'atomo per liberare un elettrone, si ha l'emissione di un elettrone a seguito dell'assorbimento del fotone.

La massima energia cinetica dell'elettrone emesso risulta così essere data dalla formula:

$$KE_{\max} = hf - \phi$$

ϕ è detto “**funzione lavoro**” e rappresenta l'energia richiesta per rompere il legame tra l'elettrone e il metallo.



La frequenza di soglia per effetto fotoelettrico risulta quindi legata alla funzione lavoro (o lavoro di estrazione) dalla condizione:

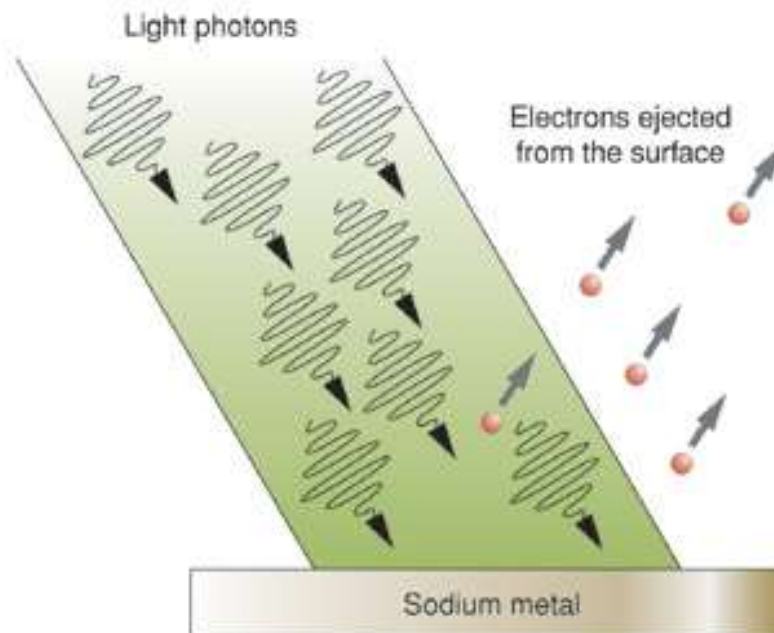
$$hf_{\text{threshold}} - \phi = 0$$

$$f_{\text{threshold}} = \frac{\phi}{h}$$

Nella teoria corpuscolare un fascio di luce più intensa è composto da più fotoni. Se i fotoni hanno la frequenza “giusta”, ogni fotone dà luogo all’emissione di un elettrone.

Maggiore quindi è il numero di fotoni che colpisce il metallo, maggiore sarà la corrente di fotoelettroni.

L’energia cinetica dei fotoelettroni è invece **INDIPENDENTE** dall’intensità della luce incidente.



Mentre nella teoria classica si prevede che debba passare un pò di tempo prima che l'elettrone assorba dalla luce energia sufficiente per sfuggire dal metallo, nella teoria corpuscolare il processo avviene senza alcun ritardo se

$$f > f_{\text{threshold}}$$

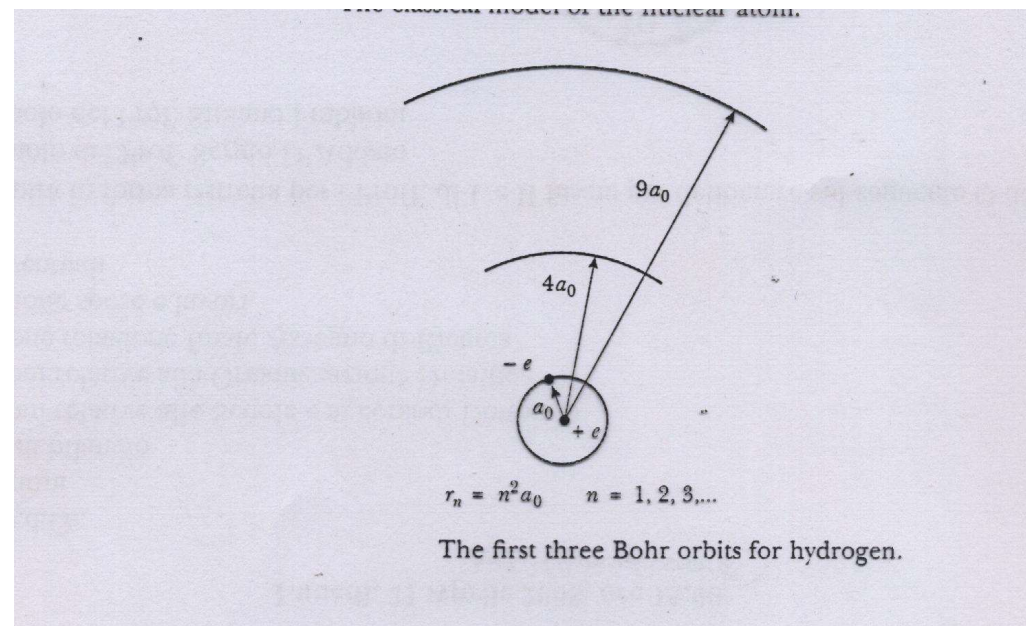
Riassumendo:

<http://www.bing.com/videos/search?q=effetto+fotoelettrico&&view=detail&mid=E01772AE8C6A8674D2C5E01772AE8C6A8674D2C5&FORM=VRDGAR>

Il modello di Bohr per l'atomo di Idrogeno

Gli elettroni si muovono su orbite circolari sotto l'azione della forza elettrica di attrazione dei nuclei, come nel modello di Rutherford.

Non tutte le orbite sono però stabili: solo su certi stati di fissata energia e raggio, chiamati **stati stazionari**. Negli stati stazionari sono quantizzati l'energia e il raggio dell'orbita.



L'elettrone può passare da uno stato stazionario ad un altro assorbendo o emettendo energia pari alla differenza di energia tra gli stati stazionari di arrivo e partenza.

La condizione di quantizzazione di Bohr che identifica gli stati stazionari è la seguente:

$$mv_n 2\pi r_n = nh$$

n è un intero positivo e h è una costante universale introdotta da Planck: $h=6.63 \times 10^{-34}$ Js

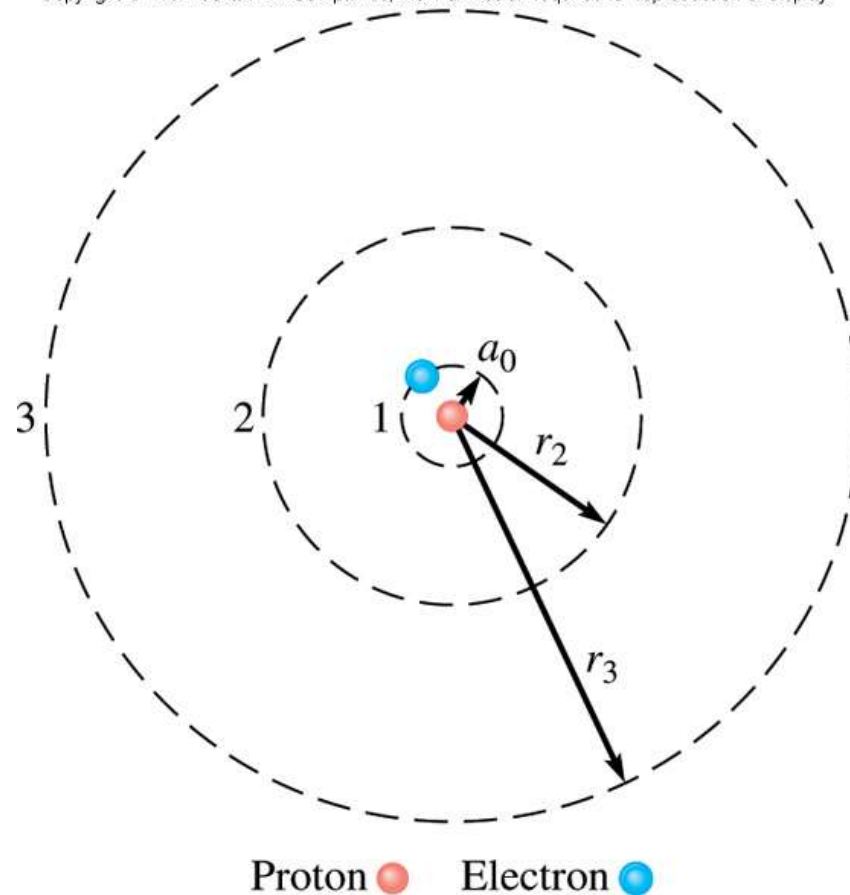
I raggi delle orbite stazionarie per l'elettrone dell'atomo di Idrogeno sono:

$$r_n = a_0 n^2$$

$$a_0 = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m (0,53 \AA)}$$

a_0 è chiamato *raggio di Bohr*.

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Le energie degli stati stazionari sono:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

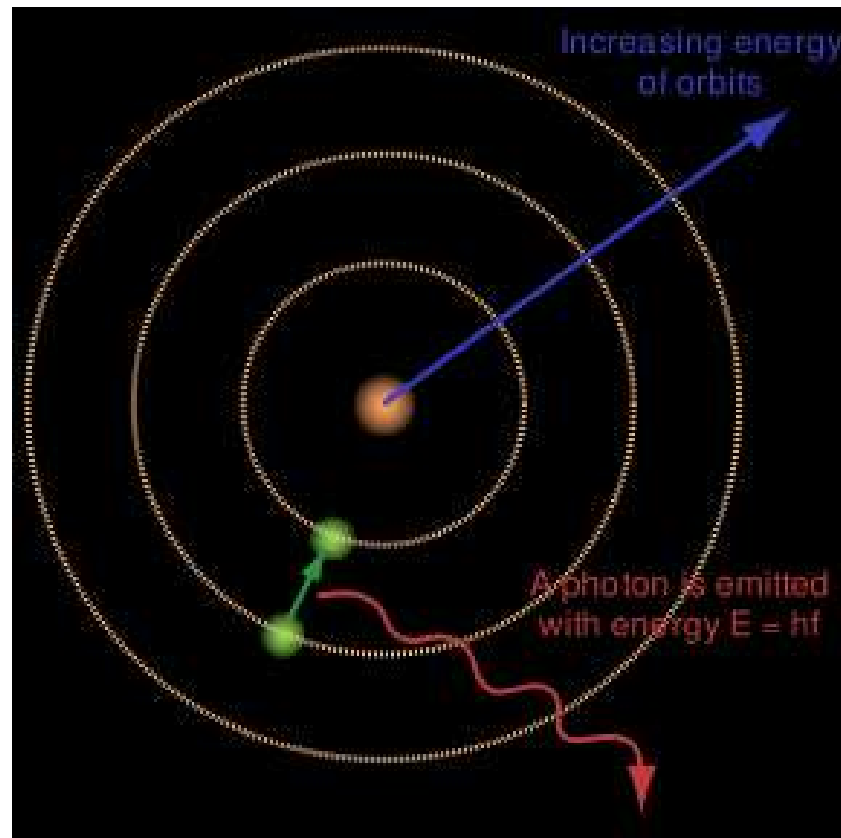
$$E_1 = -13.6eV$$

dove E_1 è **l'energia dello stato fondamentale** dell'atomo di Idrogeno, la più bassa possibile.

Se $n > 1$ l'elettrone è in uno stato eccitato. L'intero n è detto **numero quantico principale**.

Il modello di Bohr

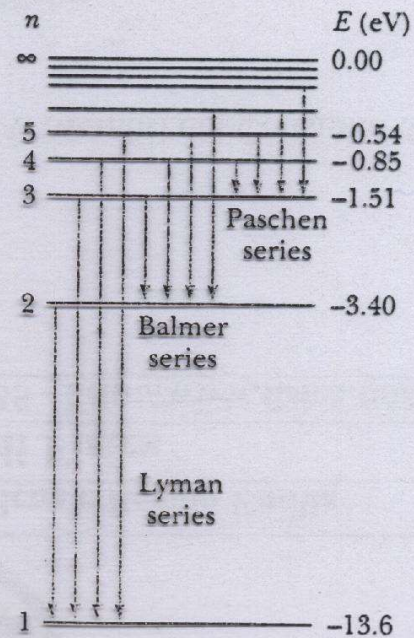
<http://www.raiscuola.rai.it/articoli/atomo-il-modello-di-bohr-la-scienza-per-concetti/9100/default.aspx>



Spiegazione degli spettri di assorbimento ed emissione dell'Idrogeno

Some Spectral Series for the Hydrogen Atom

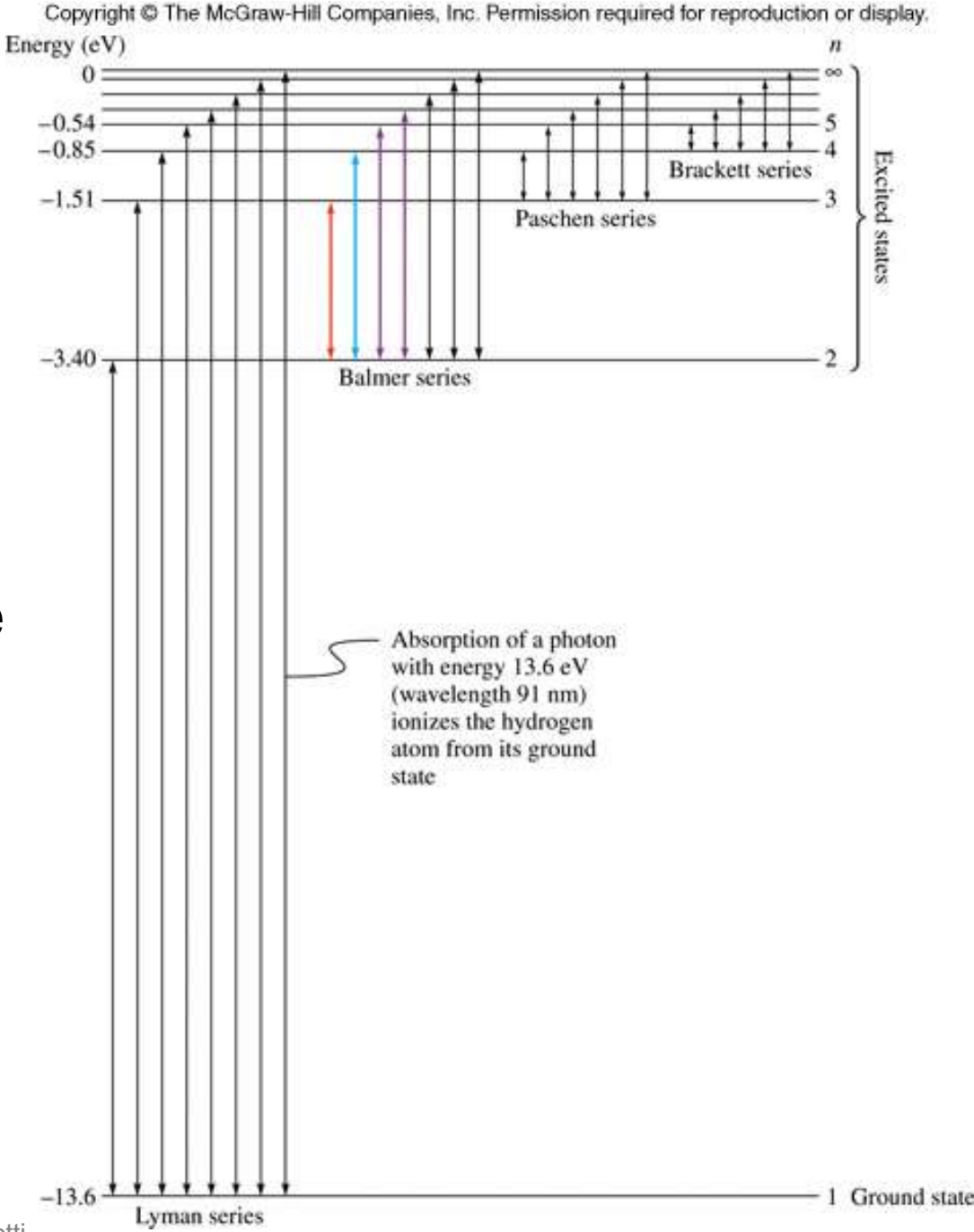
Lyman Series (uv)	$n_f = 1$	$n_i = 2, 3, 4 \dots$
Balmer Series (vis-uv)	$n_f = 2$	$n_i = 3, 4, 5 \dots$
Paschen Series (IR)	$n_f = 3$	$n_i = 4, 5, 6 \dots$
Brackett Series (IR)	$n_f = 4$	$n_i = 5, 6, 7 \dots$
Pfund Series (IR)	$n_f = 5$	$n_i = 6, 7, 8 \dots$



An energy level diagram for hydrogen. In such diagrams the discrete allowed energies are plotted on the vertical axis. Nothing is plotted on the horizontal axis, but the horizontal extent of the diagram is made large enough to show allowed transitions. Note that the quantum numbers are given on the left.



Distribuzione dei livelli energetici dell'elettrone nell'atomo di Idrogeno.



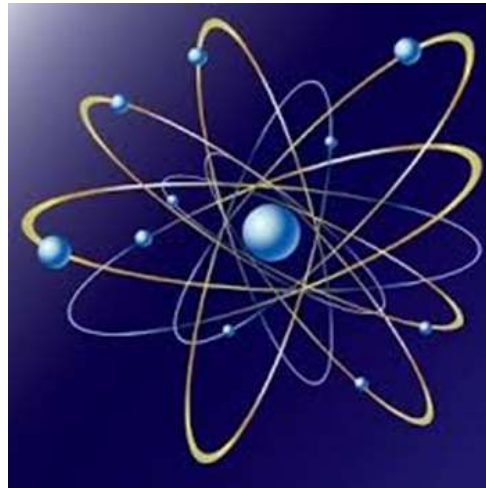
Energie permesse nei solidi

Un atomo isolato può emettere soltanto fotoni di energia E corrispondente alla differenza di energia tra due diversi livelli atomici (spettro a righe).

Quando due atomi interagiscono i livelli energetici atomici si differenziano.

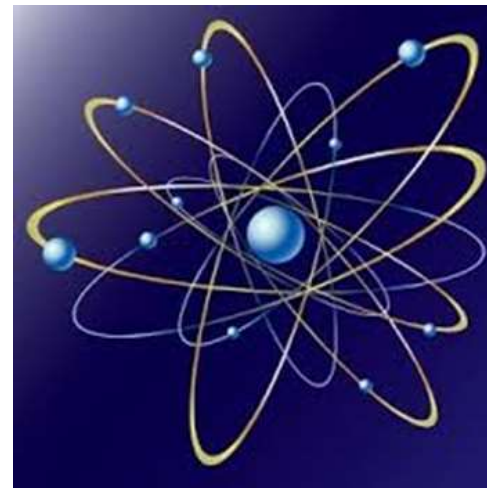
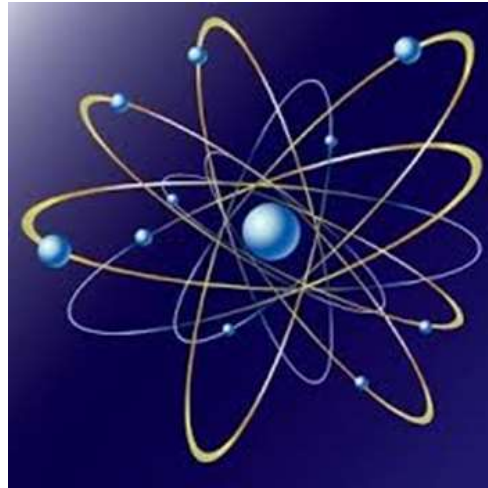
UN ATOMO

Livelli energetici degli elettroni attorno al nucleo

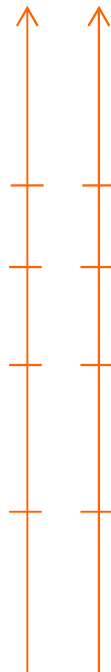


Principio di Pauli

DUE ATOMI



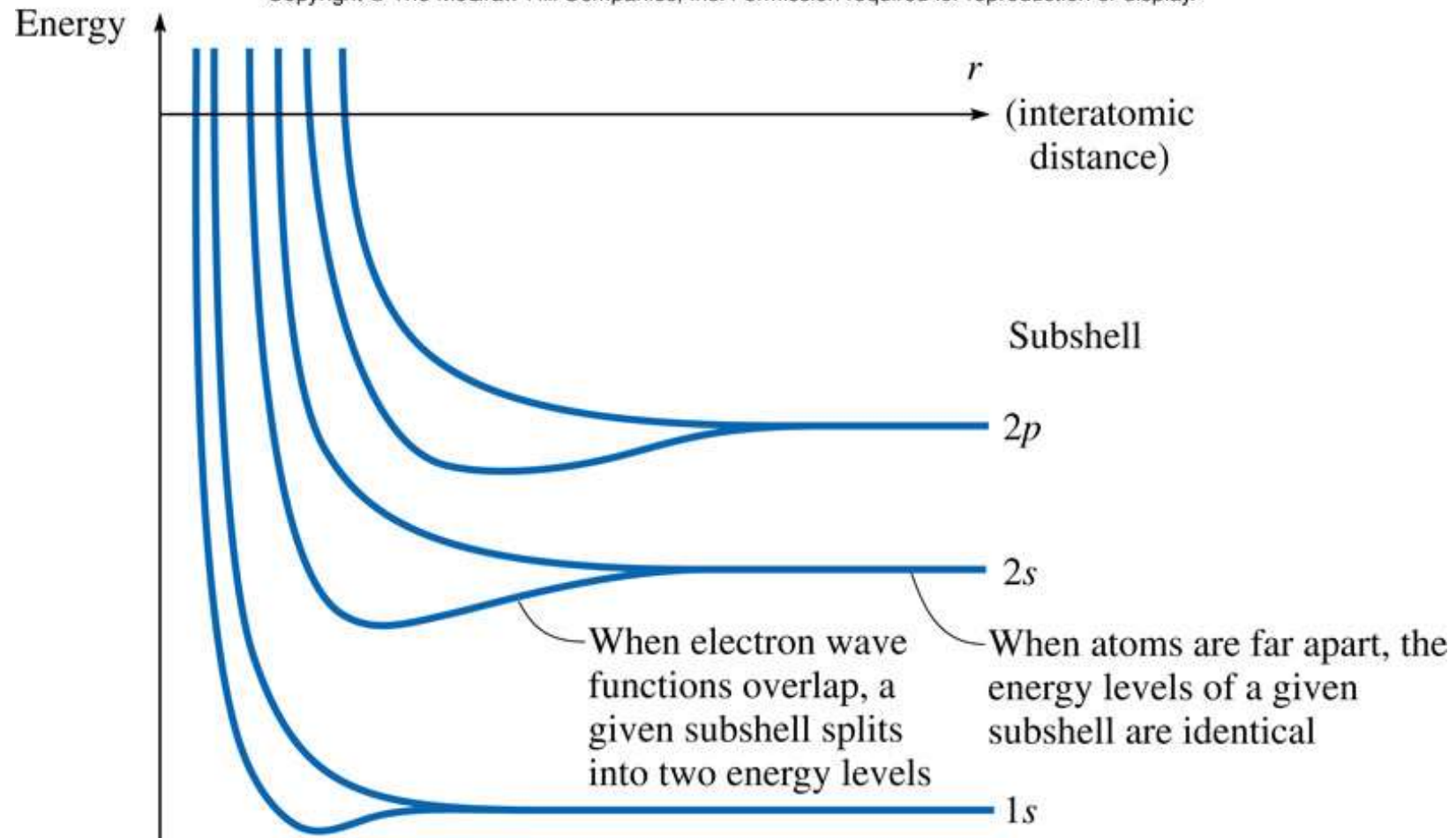
**Non interagenti:
livelli atomici
doppiamente degeneri**



**Interagenti:
separazione dei livelli
atomici**

**Nota: lo sdoppiamento dei livelli
degli stati elettronici più esterni
è maggiore.**

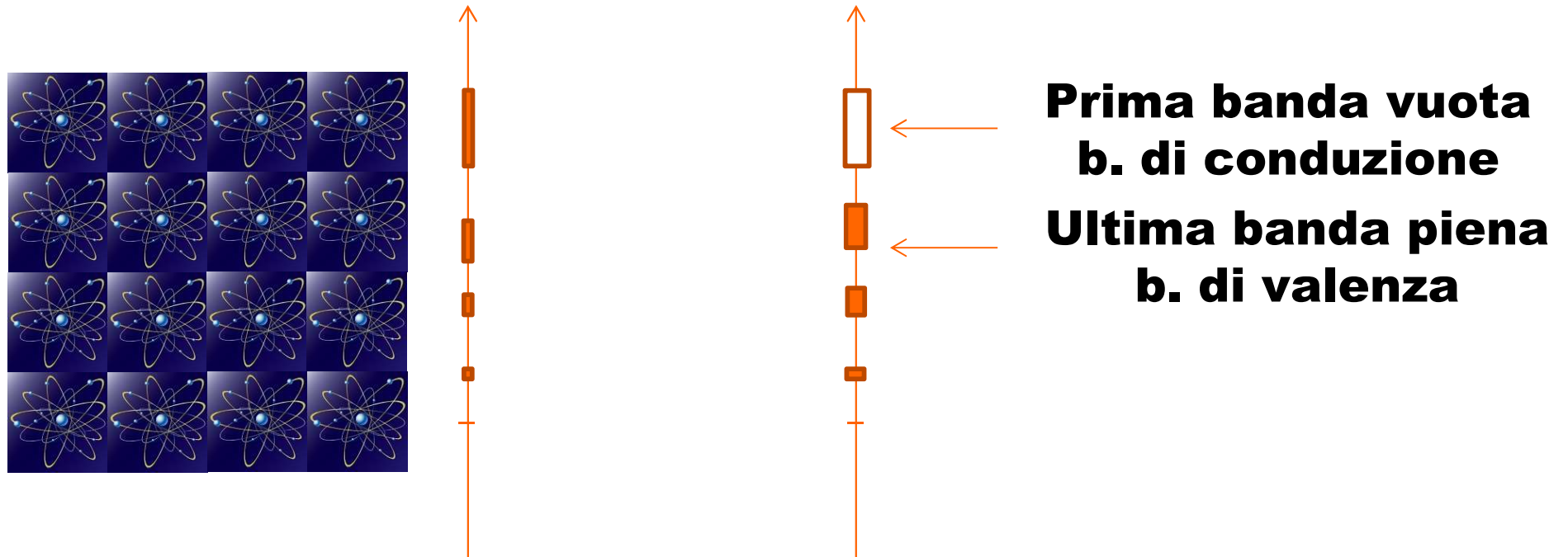




TANTI ATOMI

(solido cristallino: 10^{23} elettroni da sistemare)

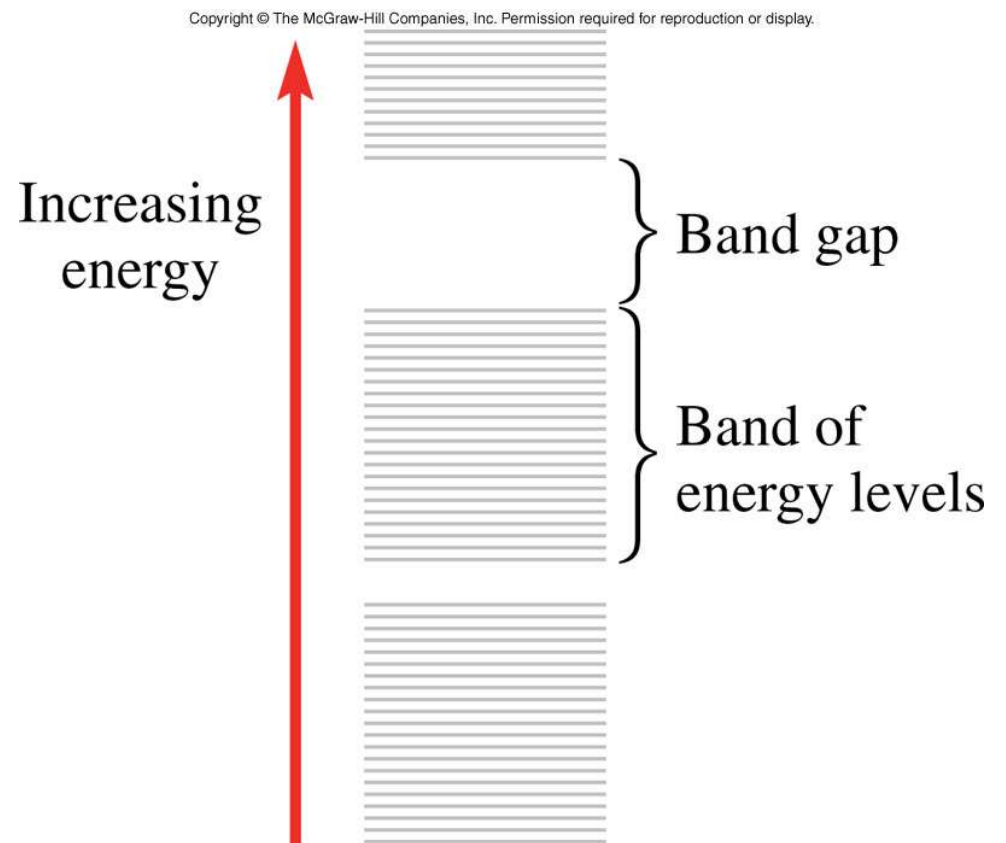
STRUTTURA A BANDE



Bande di energia permesse e vietate

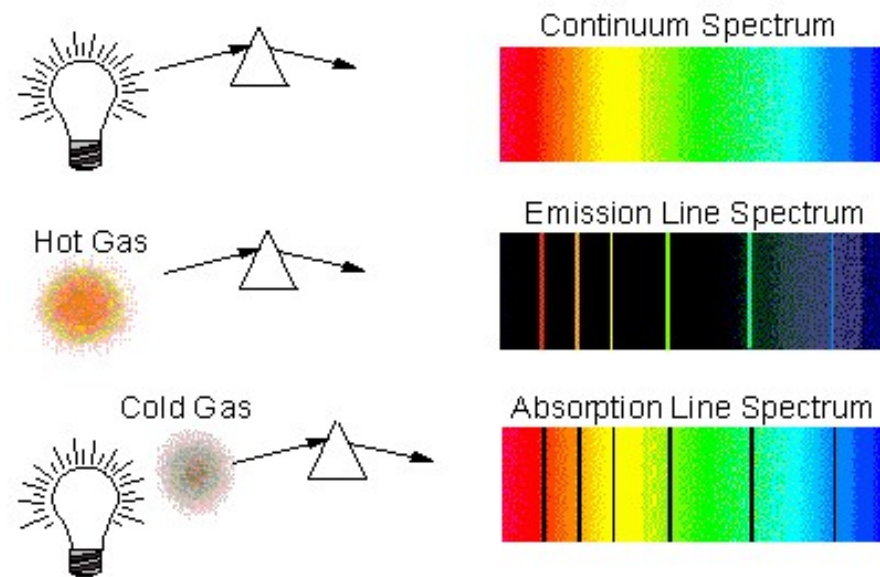
**Gli elettroni nelle bande più alte (elettroni più esterni dell'atomo)
sono mobili**

In un solido, a motivo dell'interazione tra un grande numero N di atomi, i livelli atomici diventano **bande** di N energie molto vicine in valore, tanto da essere considerabili come **un continuo di energie**. Se due bande successive non si sovrappongono si formano dei **gap** di energia, cioè degli intervalli di energie non permesse agli elettroni.



Gli spettri continui dei solidi

Un atomo isolato emette uno spettro discreto di righe. La luce emessa corrisponde a fotoni di energia pari alla differenza di energia tra due livelli atomici.



Un solido emette uno spettro continuo a causa delle transizioni elettroniche tra stati della stessa banda o di bande diverse.

Un materiale è un **conduttore** se l'ultima banda piena a $T=0$ lo è solo parzialmente, oppure se l'ultima banda piena si sovrappone alla prima vuota.

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Gap

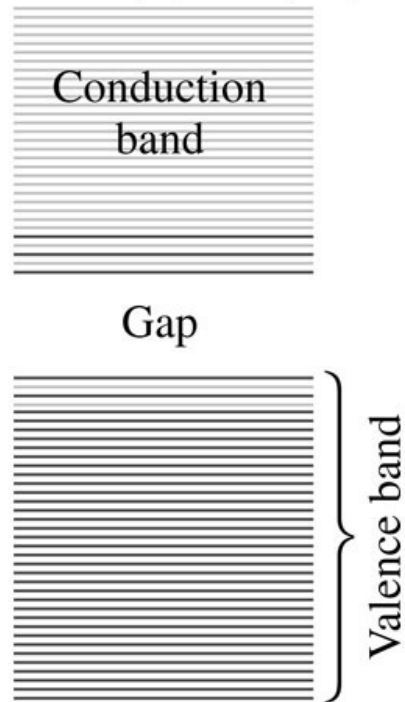


Conductor

(a)

Se invece gli elettroni del material riempiono completamente le bande in cui sono collocati, il materiale può essere o un **semiconduttore** o un **isolante**.

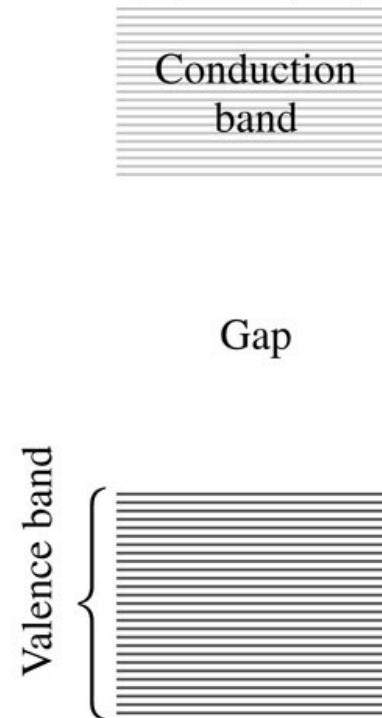
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Semiconductor

(b)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Insulator

(c)