

Università degli Studi di Salerno
Dipartimento di Fisica «E. Caianiello»

Liceo Scientifico «De Caprariis»
Atripalda (AV)

Seminari di Fisica Moderna

Introduzione alla Meccanica Quantistica

©Prof. Roberto Capone



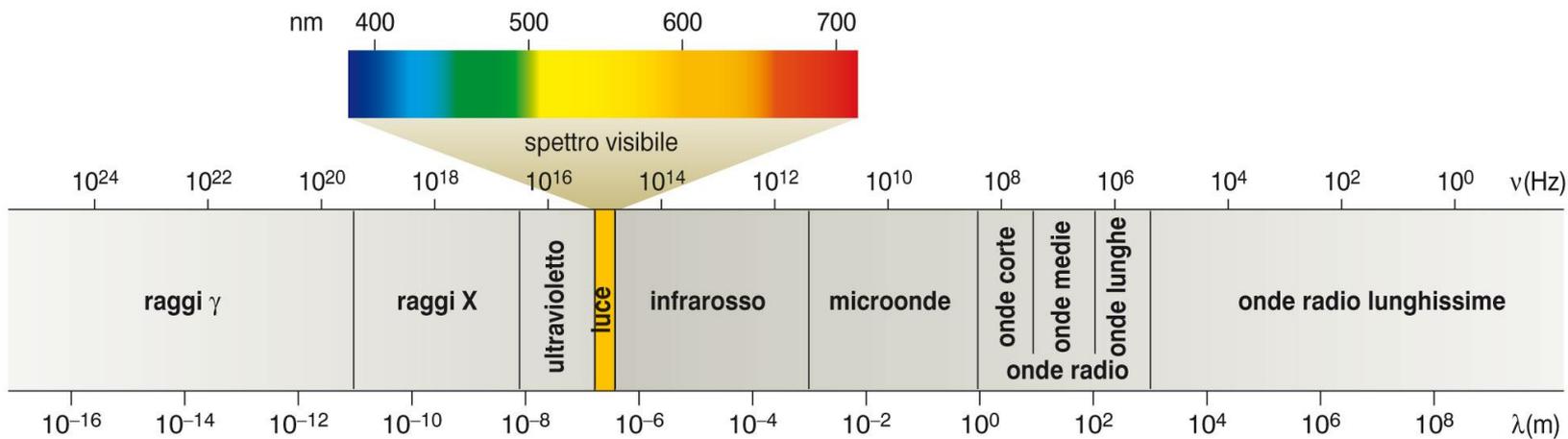
Piano Lauree Scientifiche

La natura della luce

James C. Maxwell (1831-79) dimostrò che tutte le proprietà note della luce erano spiegabili attraverso un insieme di equazioni basate sull'ipotesi che la luce fosse un' **onda elettromagnetica**

La luce è un particolare tipo di onda elettromagnetica (un **campo elettrico** e un **campo magnetico** che oscillano in direzioni perpendicolari) che si crea per rapidissima oscillazione di cariche elettriche.

L'insieme delle onde elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico.



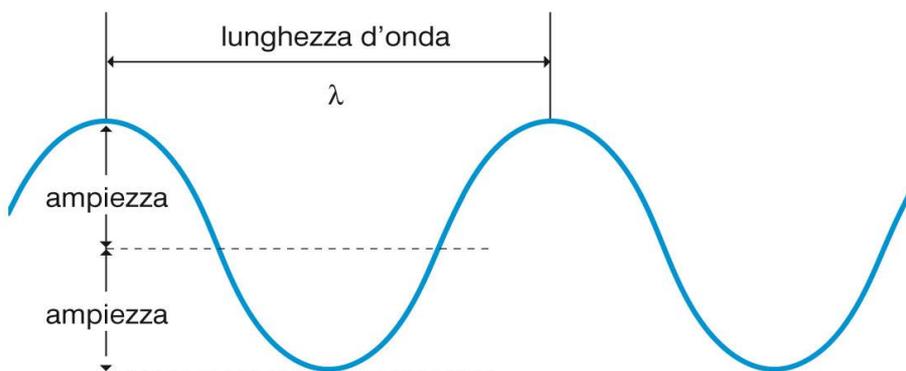
La natura della luce

I parametri che caratterizzano le onde elettromagnetiche sono la velocità, la lunghezza d'onda (λ) e la frequenza (ν).

La **lunghezza d'onda** si esprime in nanometri (nm) o in ångstrom (Å).

La **frequenza** ($\nu = 1/\lambda$) si misura in Hertz (Hz).

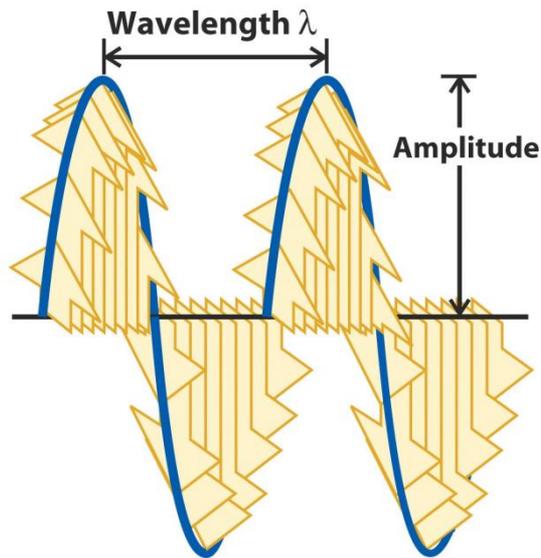
La lunghezza d'onda e la frequenza sono in relazione tra loro.



velocità della luce

$$c = \lambda \cdot \nu$$

La natura della luce



Il campo elettrico della radiazione elettromagnetica oscilla nello spazio e nel tempo.

La figura rappresenta un'istantanea dell'onda elettromagnetica in un dato momento.

La lunghezza della freccia in un punto qualsiasi rappresenta la forza che il campo esercita in quel punto su una particella carica.

Per la luce la velocità (c) nel vuoto è costante: $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ (1072 milioni di km/h)

La natura della luce

I. Newton (1642-1727)

- Inventa il primo telescopio a riflessione
- Fu il primo a dimostrare che la luce bianca è composta dalla somma (in frequenza) di tutti gli altri colori. Egli, infine, avanzò l'ipotesi che la luce fosse composta da particelle da cui nacque la teoria corpuscolare della luce
- *Lectiones opticae* (1669)

Osservazioni sperimentali:

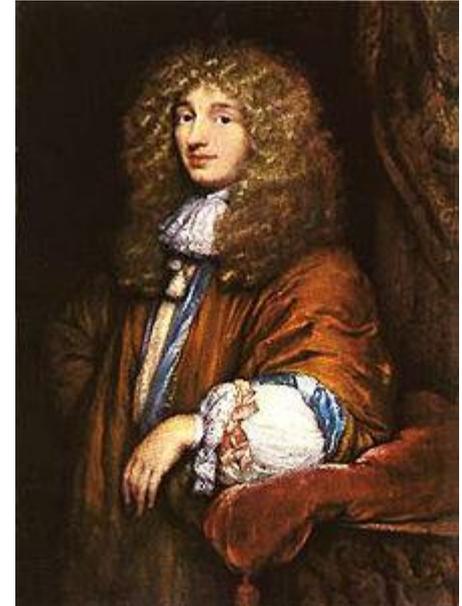
- La luce si propaga in linea retta
- Gli ostacoli bloccano la luce
- I colori sono composti da particelle di natura diversa



La natura della luce

- **C.Huygens (1629-1695)**

- Costruisce il più potente telescopio dell'epoca
- Scopre l'anello di Saturno
- Sostiene la natura ondulatoria della luce
 - Osservazioni sperimentali:
 - Scarse all'epoca
- Principio di Huygens
 - *Traité de la lumière* (1690)
 - Ogni punto del fronte d'onda può essere considerato a sua volta sorgente di un'onda sferica



La natura della luce

onda sinusoidale:
singoli punti oscillano come
oscillatori armonici semplici

Lunghezza d'onda λ

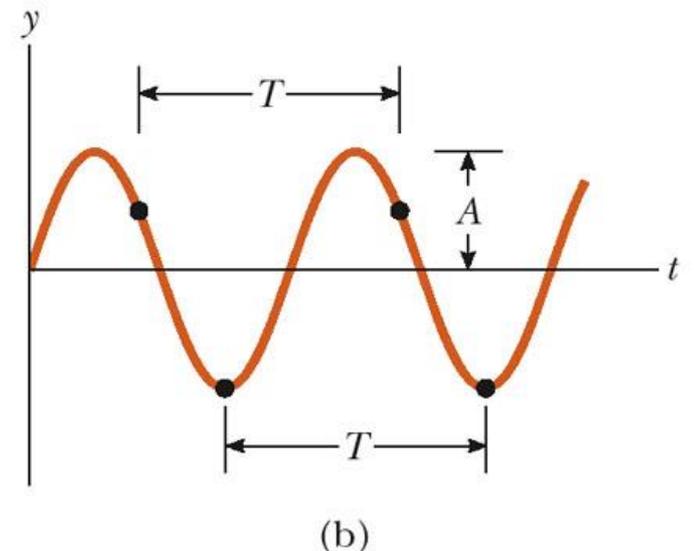
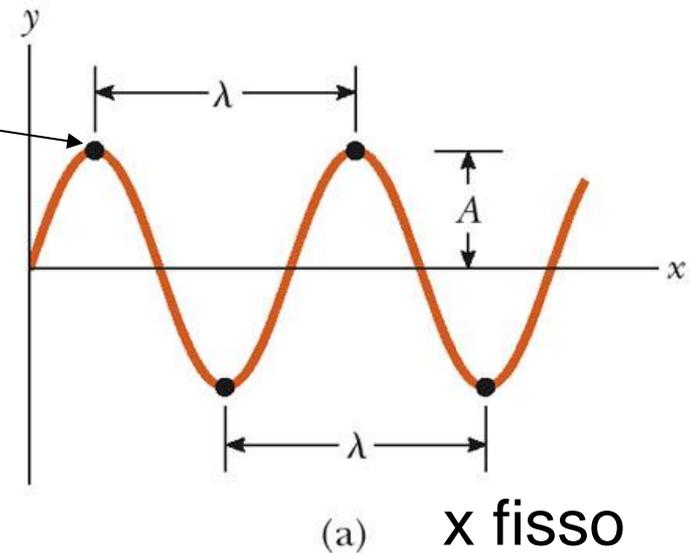
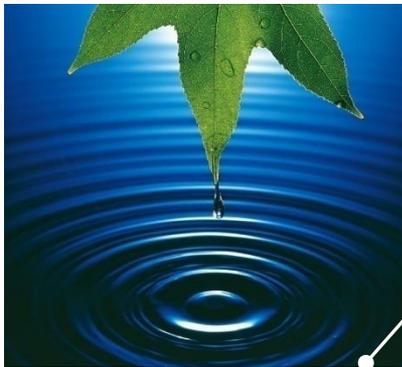
Periodo T

Frequenza $f = 1/T$

Velocità $v = \lambda / T$

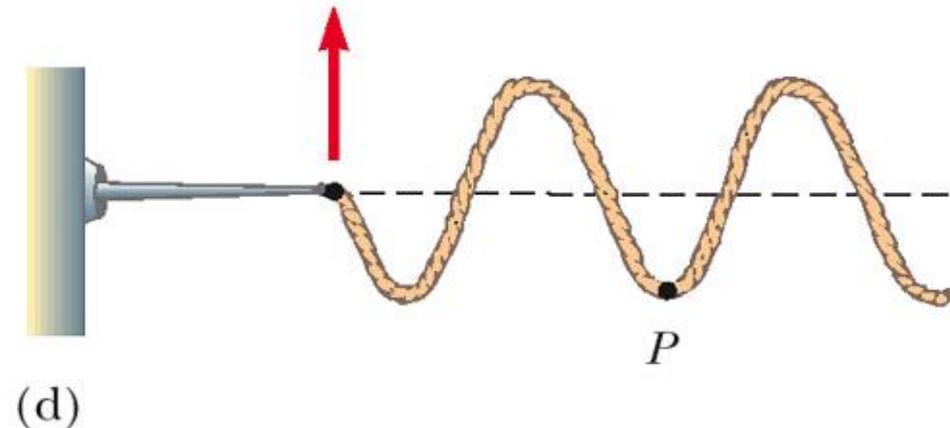
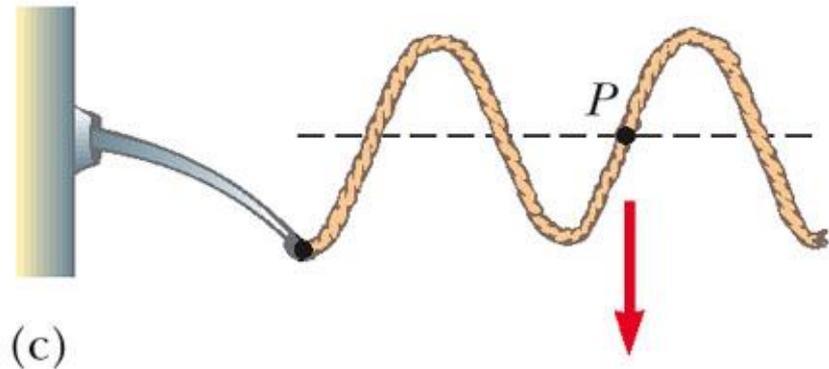
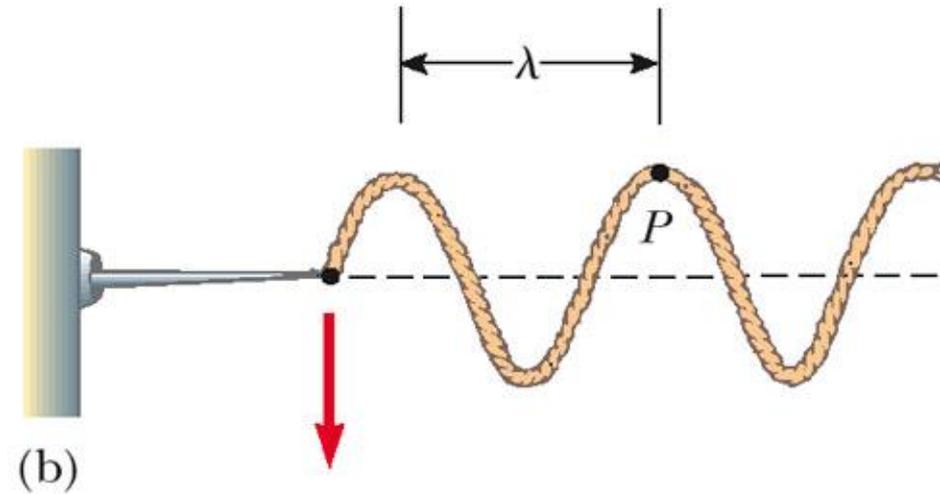
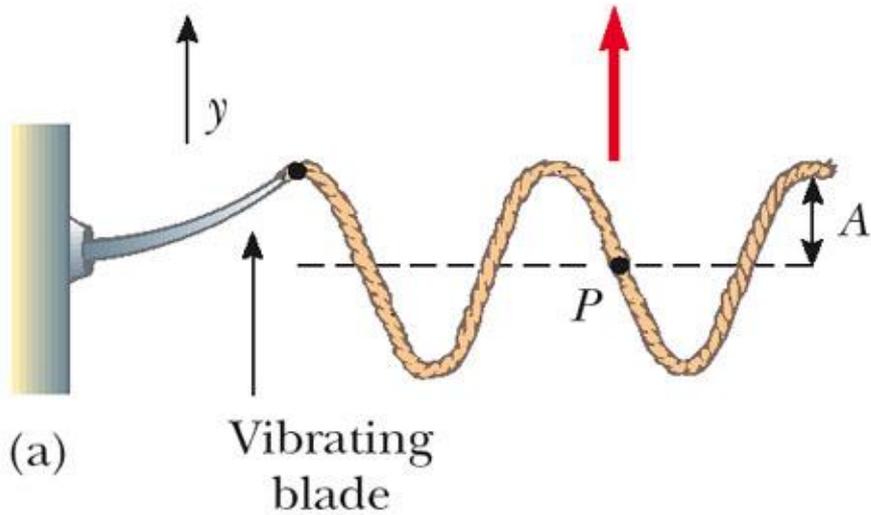
Ampiezza A

cresta



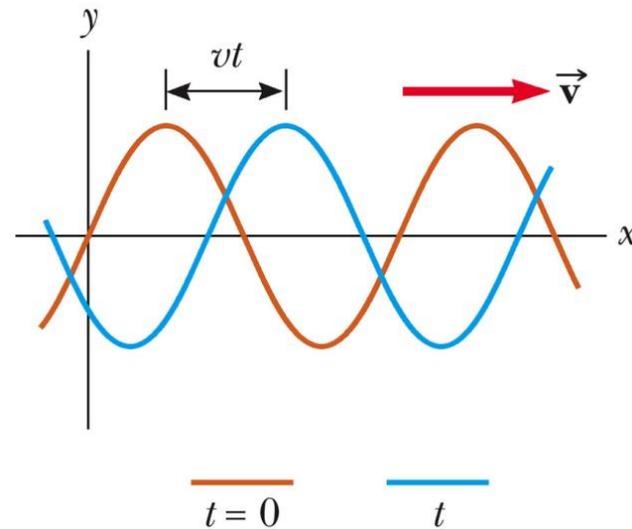
La natura della luce

Produzione di onda sinusoidale



La natura della luce

$$y(x,t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right]$$



La quantità $\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$ viene detta angolo di fase dell'onda

La natura della luce

Principio di sovrapposizione

Se due o più onde che si propagano in un mezzo si combinano in un punto dello spazio, lo spostamento risultante è la somma degli spostamenti dovuti alle singole onde



La natura della luce

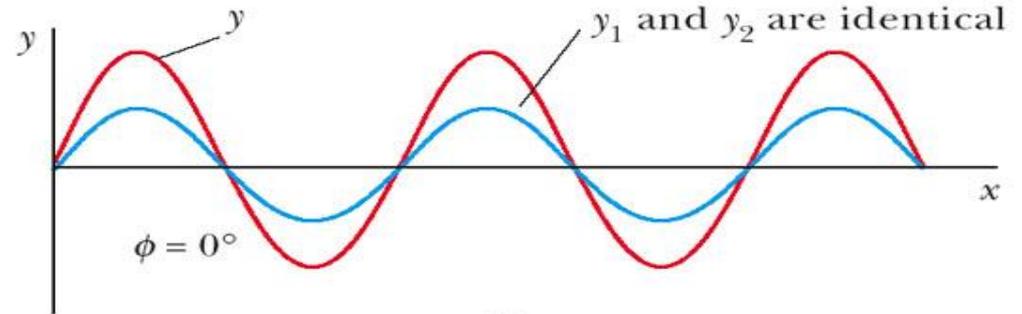
Sovrapposizione di due onde sinusoidali uguali ma con una differenza di fase

interferenza costruttiva

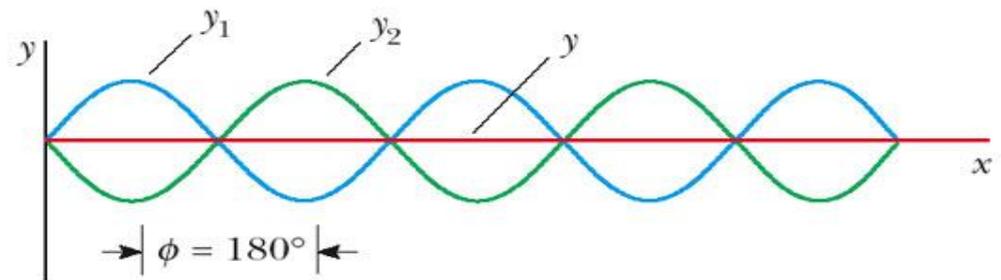


interferenza distruttiva

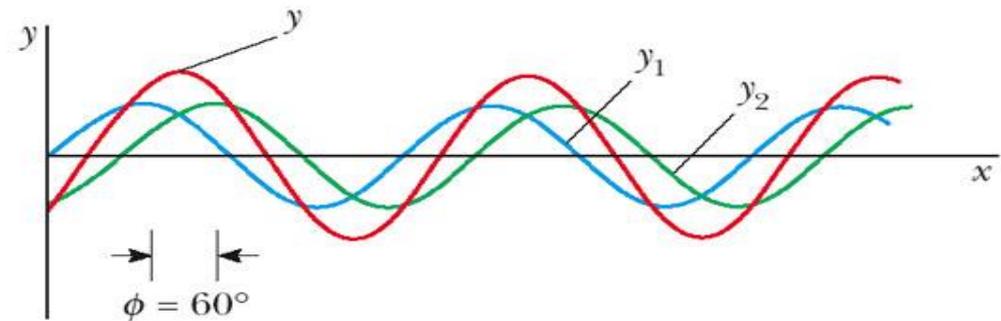
interferenza normale



(a)



(b)



(c)

La natura della luce

Diffrazione e Interferenza della luce:

A. Fresnel (1788-1827)

Per ostacoli opachi estremamente piccoli o fenditure molto strette (paragonabili a λ) il fenomeno della diffrazione si può spiegare con il principio di Huygens

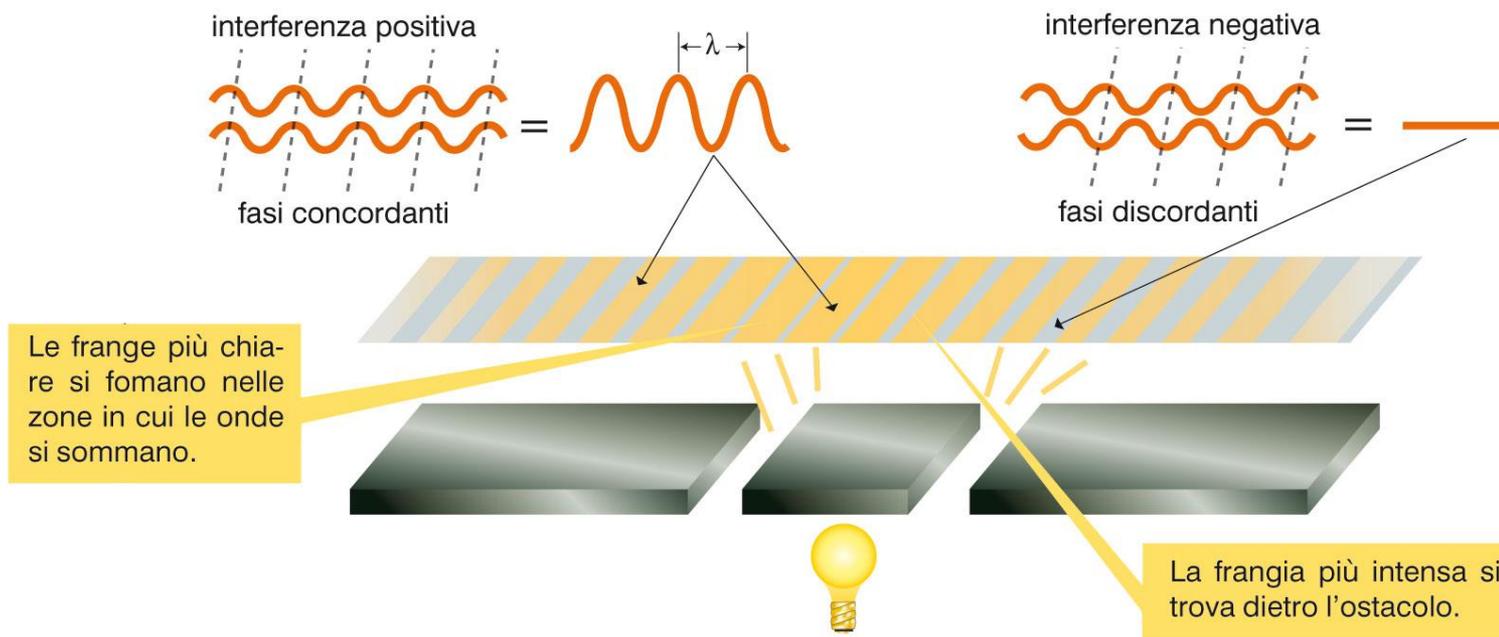
Crisi del modello corpuscolare

- Newton: La luce è composta da particelle (colorate) fine 1600
- Huyghens : La luce è un fenomeno ondulatorio
- Fresnel : Ma è evidente : la luce è costituita da onde ! Inizio 1800
- Einstein: Si vabbè però'... a volte la luce si comporta come costituita da particelle! (eff. fotoelettrico) Inizio 1900

La meccanica quantistica metterà d'accordo i due contendenti
Hanno tutti ragione !!!

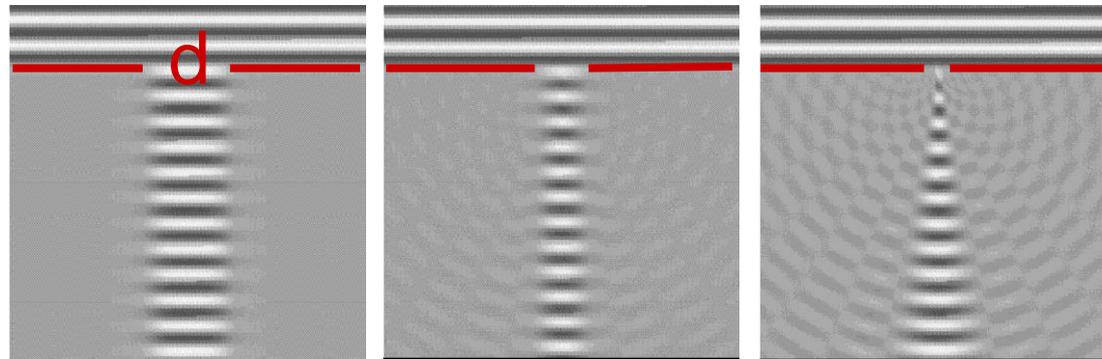
La natura della luce

La **diffrazione** della luce è la caratteristica principale della sua **natura ondulatoria**.

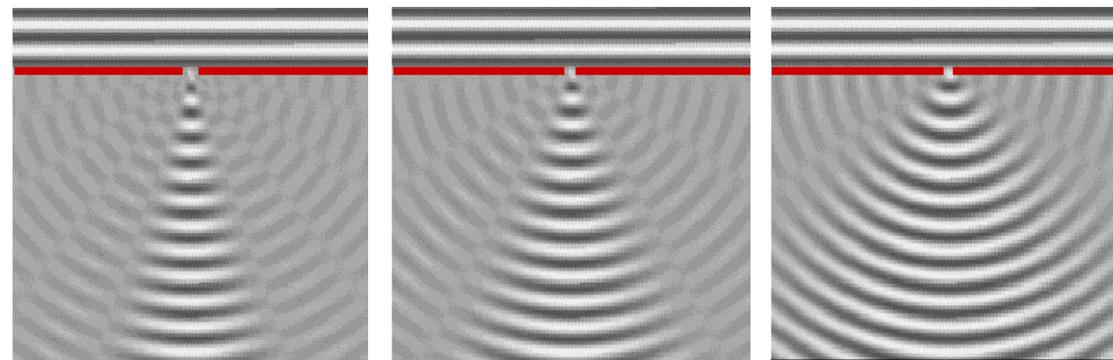


La natura della luce

Vediamo cosa succede quando facciamo passare un'onda (piana) attraverso una fenditura



$$d \gg \lambda$$

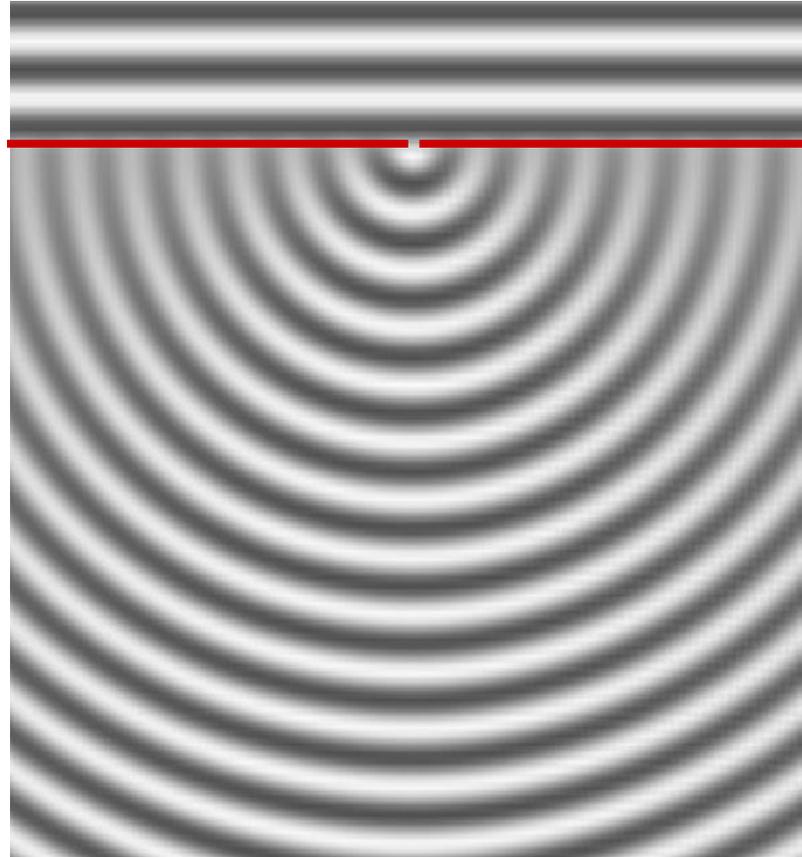


$$d \sim \lambda$$

$$d = \lambda$$

La natura della luce

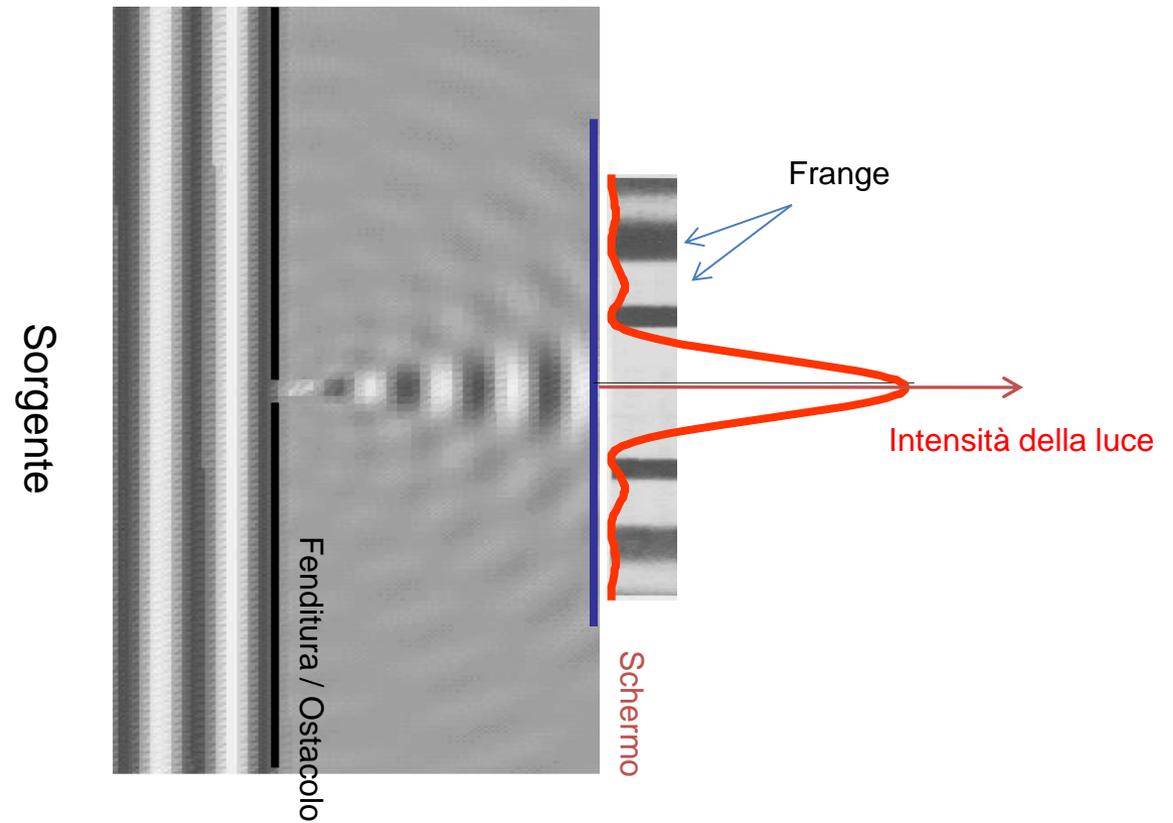
$$d < \lambda$$



Quando $d < \lambda$ la fenditura si comporta come una sorgente puntiforme di onde (principio di Huygens)

La natura della luce

Diffrazione della luce



La fisica dei primi del '900

1900: Max Planck introduce l'idea che l'emissione e l'assorbimento di energia elettromagnetica siano quantizzate, riuscendo così a giustificare teoricamente la legge empirica che descrive la dipendenza dell'energia della radiazione emessa da un corpo nero dalla frequenza

1905: Einstein spiega l'effetto fotoelettrico sulla base dell'ipotesi che l'energia del campo elettromagnetico sia trasportata da quanti di luce (che nel 1926 saranno chiamati fotoni).

1913: Bohr interpreta le linee spettrali dell'atomo di idrogeno, ricorrendo alla quantizzazione del moto orbitale dell'elettrone.

Dalla vecchia teoria dei quanti

1915: Sommerfeld

generalizza i precedenti metodi di quantizzazione, introducendo le cosiddette regole di Bohr-Sommerfeld

1924: Louis de Broglie elabora una teoria delle *onde materiali*, secondo la quale ai corpuscoli materiali possono essere associate proprietà ondulatorie. È il primo passo verso la meccanica quantistica vera e propria.

1925: Heisenberg formula la meccanica delle matrici.

alla nuova meccanica quantistica

Dalla meccanica quantistica

1926: Schrödinger elabora la meccanica ondulatoria, che egli stesso dimostra equivalente, dal punto di vista matematico, alla meccanica delle matrici

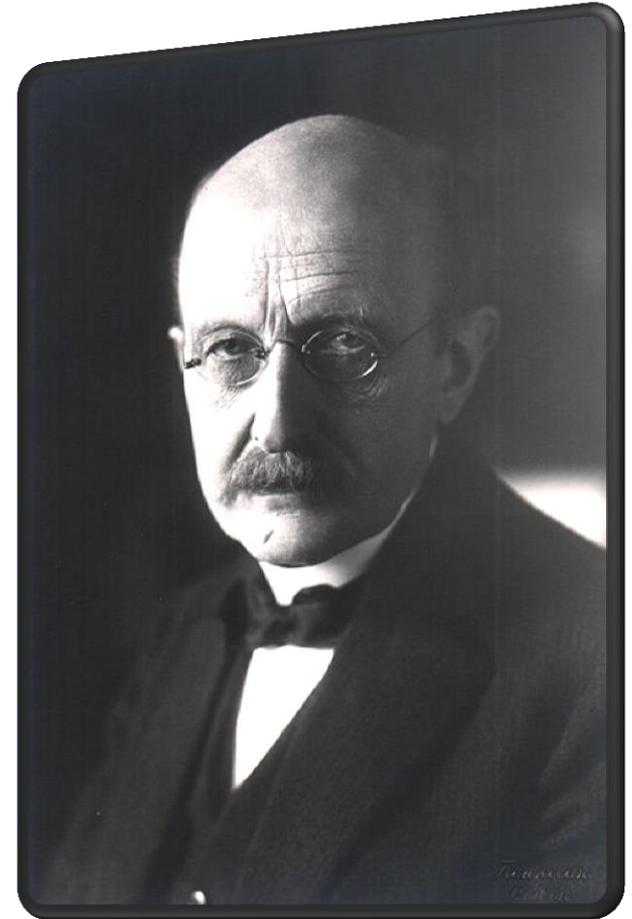
1927: Heisenberg formula il principio di indeterminazione; pochi mesi più tardi prende forma la cosiddetta interpretazione di Copenaghen.

1927: Dirac applica alla meccanica quantistica la relatività ristretta; fa un uso diffuso della teoria degli operatori (nella quale introduce la famosa notazione *bra-ket*)

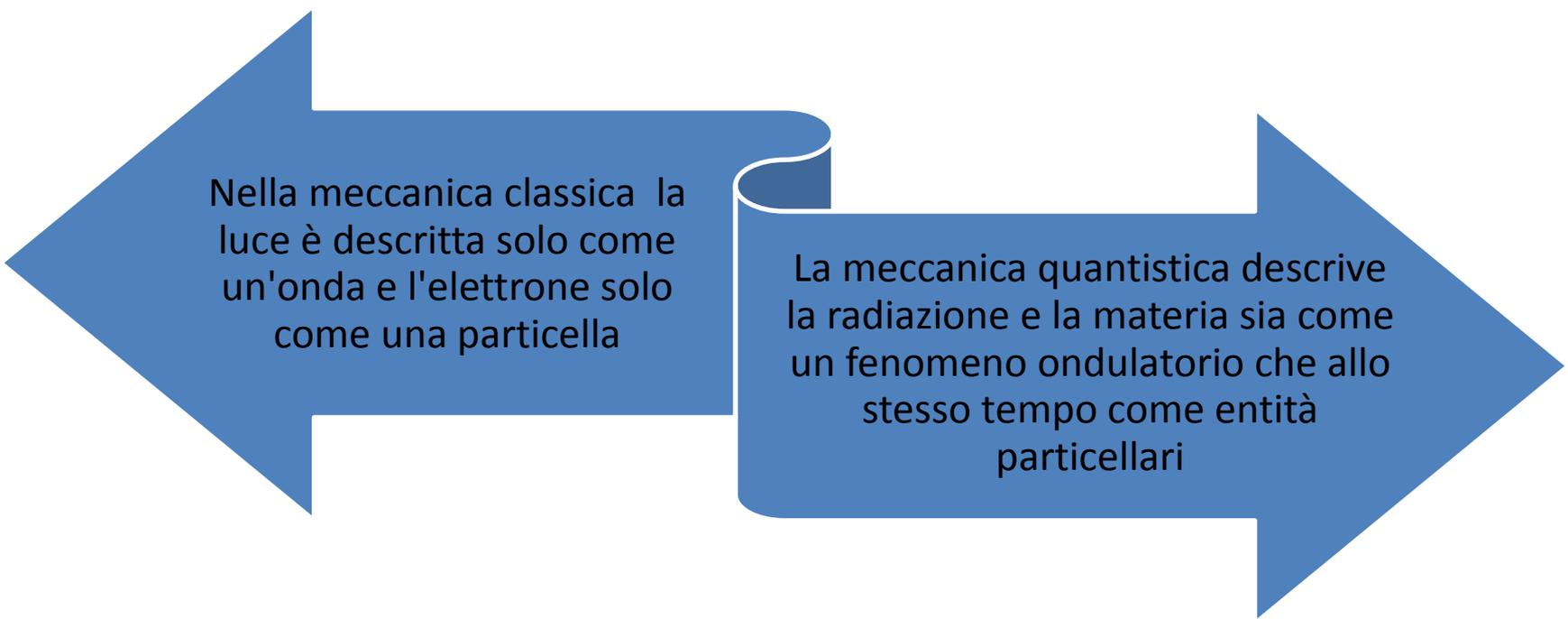
alla teoria del quasi tutto

Perché la meccanica è «quantistica»

Il nome "meccanica quantistica", dato da Max Planck alla teoria agli inizi del 1900, si basa sul fatto che alcune quantità di certi sistemi fisici, come l'energia o il momento angolare, possono variare soltanto di valori discreti, chiamati anche "quanti"



Meccanica quantistica vs classica

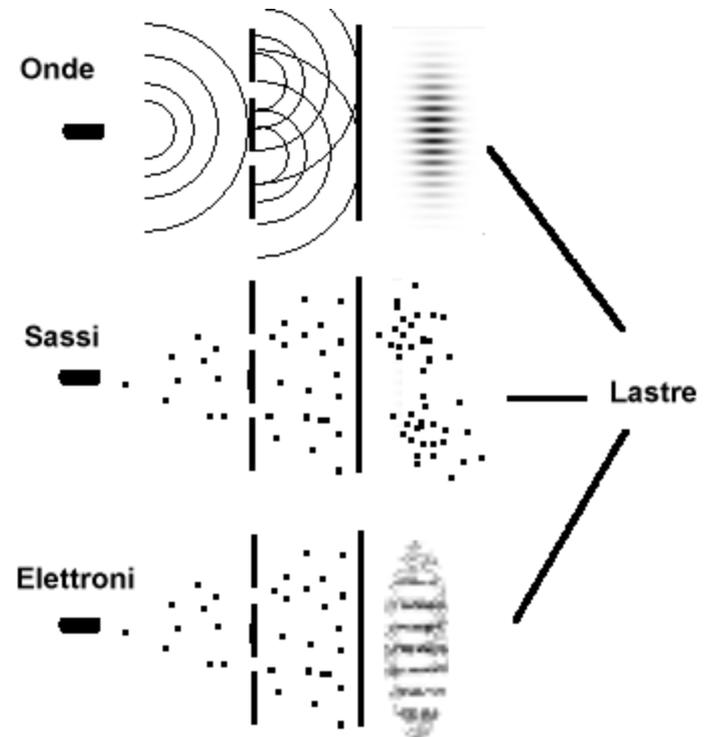


Nella meccanica classica la luce è descritta solo come un'onda e l'elettrone solo come una particella

La meccanica quantistica descrive la radiazione e la materia sia come un fenomeno ondulatorio che allo stesso tempo come entità particellari

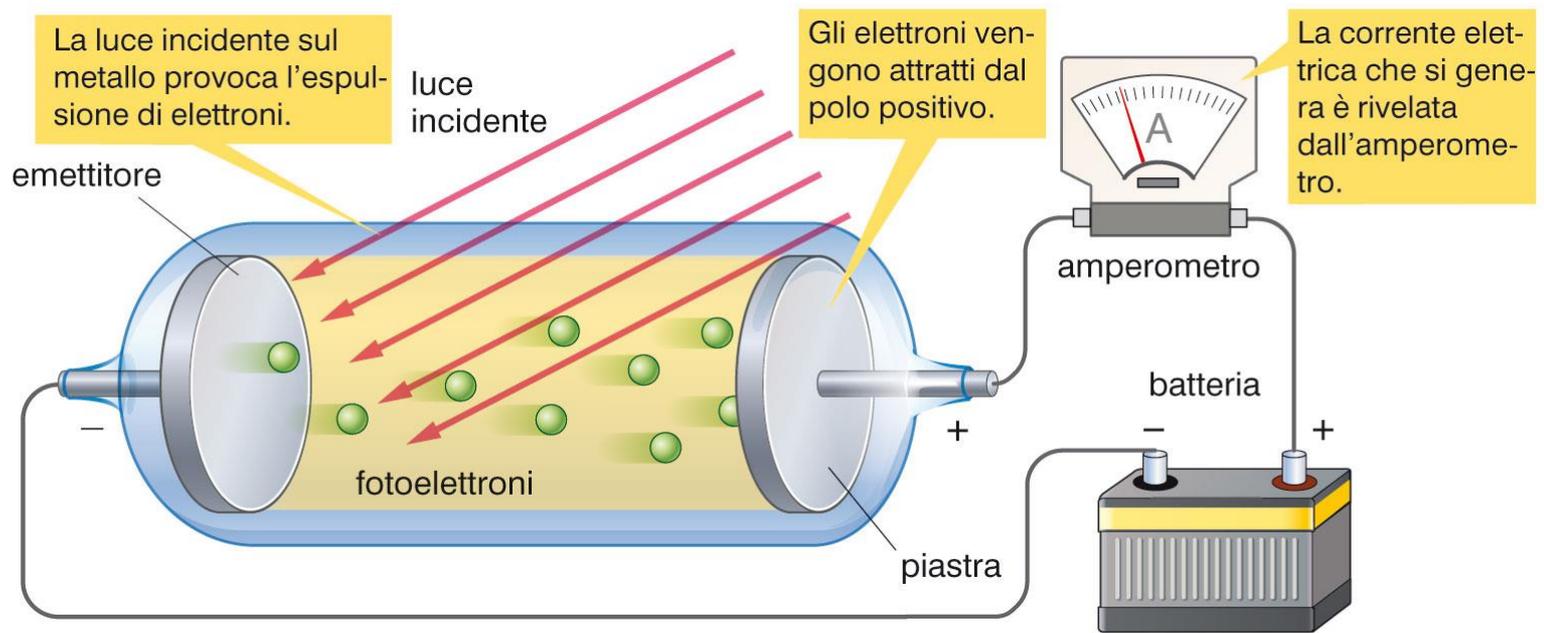
Dualismo onda-particella

Con l'espressione **dualismo onda-particella** (o **dualismo onda-corpuscolo**) ci si riferisce al fatto, espresso all'interno del principio di complementarità, che le particelle elementari, come l'elettrone o il fotone, mostrano una duplice natura, sia corpuscolare sia ondulatoria.



La natura della luce

Secondo la teoria corpuscolare i **fotoni** possono provocare l'espulsione degli elettroni atomici oppure possono venire assorbiti cedendo l'energia che trasportano.



La natura della luce

La **relazione di Planck-Einstein** riassume questo comportamento:

$$E = h \cdot \nu$$

dove

E = energia di un fotone di luce

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (costante di Planck)

ν = frequenza della radiazione elettromagnetica

Ricordando che $\nu = c/\lambda$, la stessa relazione si può scrivere anche:

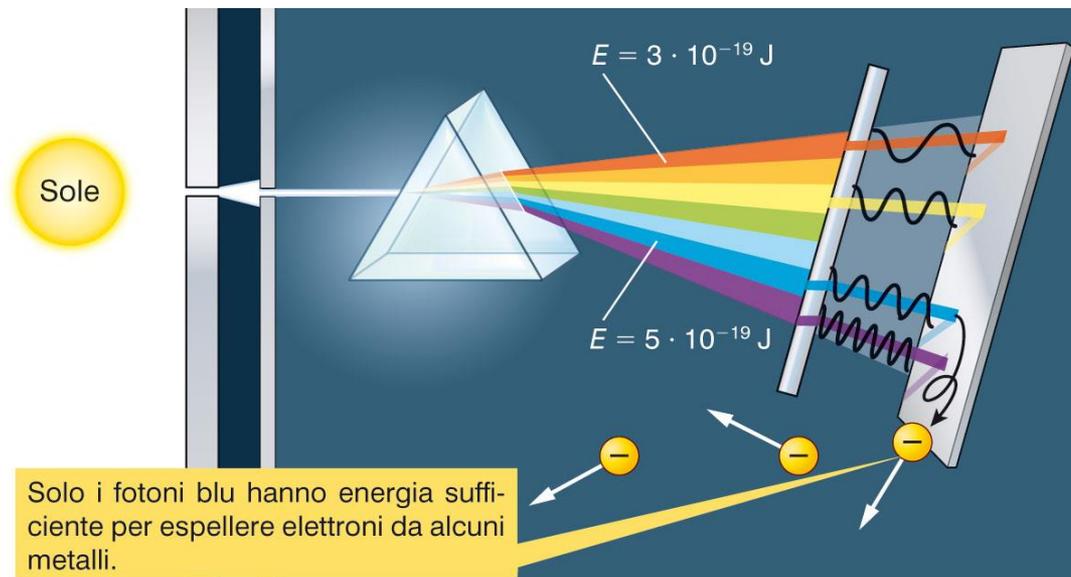
$$E = h \cdot c/\lambda$$

Queste due formule evidenziano i due aspetti della natura della luce, ondulatoria e corpuscolare.

La natura della luce

L'interazione della luce con la materia è la prova che la luce ha anche **natura corpuscolare**.

La propagazione del fascio luminoso è dovuto allo spostamento di un gruppo di pacchetti di energia, detti **quanti di energia** o **fotoni**.



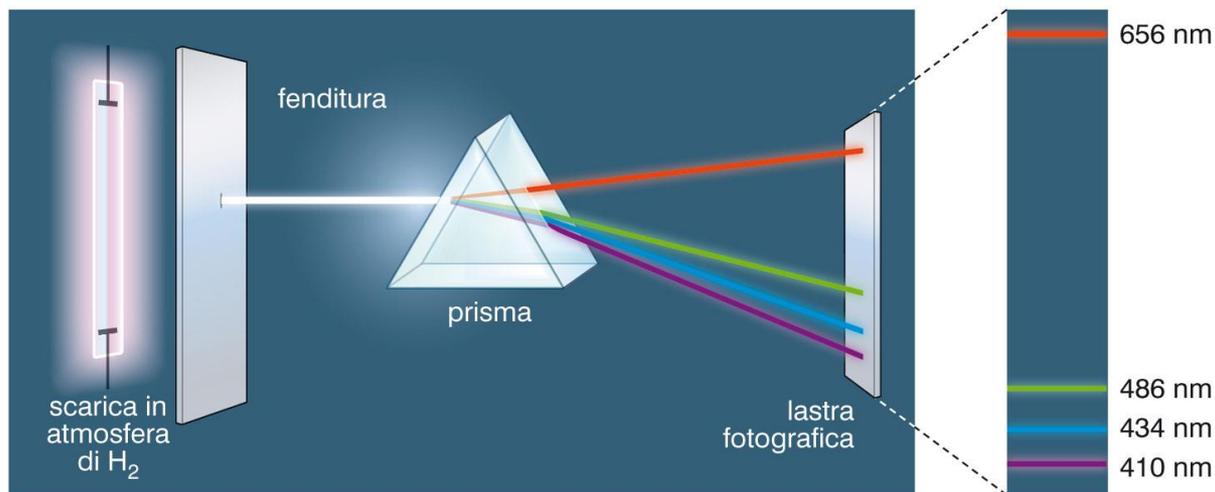
La natura della luce

Lo **spettro continuo** è una serie di colori che si susseguono senza discontinuità, tipico dei solidi e dei liquidi portati all'incandescenza.

Lo **spettro a righe**, tipico dei gas rarefatti sottoposti a scarica elettrica, è formato da righe colorate discontinue (**righe di emissione**).

La natura della luce

La luce emessa dagli atomi non è continua e presenta soltanto alcune frequenze, caratteristiche per ciascun tipo di atomo.



L'emissione di luce dei gas rarefatti si ha in seguito al trasferimento di energia dalla scarica elettrica agli atomi che costituiscono il gas.

Se si fa passare luce bianca attraverso un'ampolla riempita di gas, nello spettro si identificano righe meno brillanti: sono le **righe di assorbimento**.

La natura della luce

Le radiazioni elettromagnetiche assorbite da ciascun tipo di atomo hanno la stessa frequenza di quelle emesse dall'atomo eccitato.

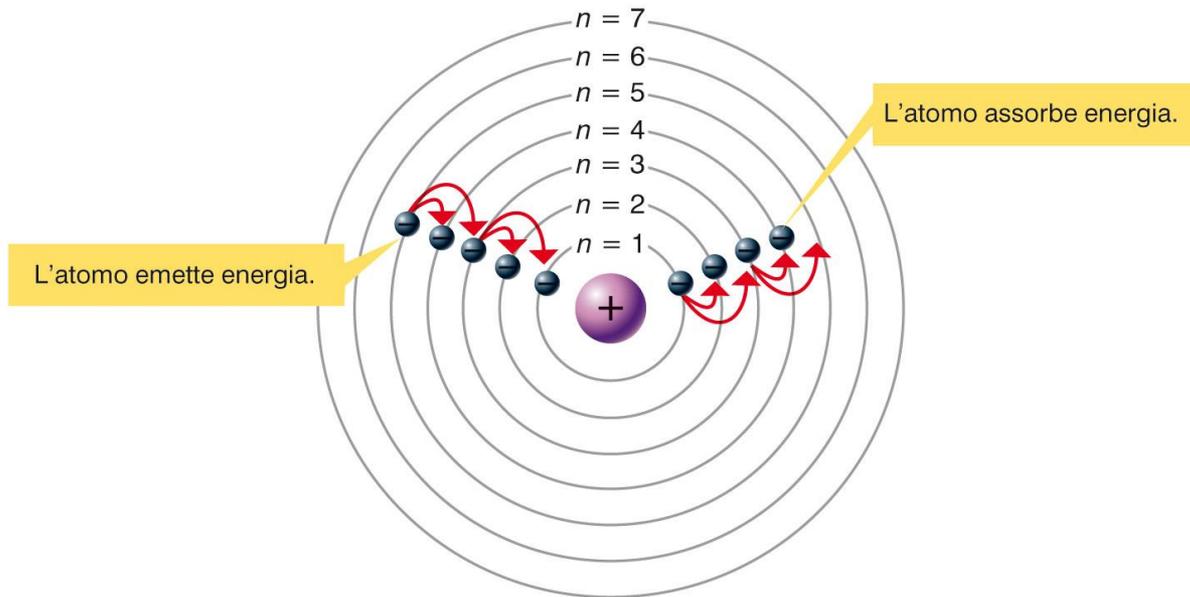
Attraverso i suoi studi **Bohr** spiegò perché soltanto certe radiazioni possono interagire con gli atomi e quale relazione intercorre tra radiazione luminosa e struttura atomica.

Bohr perfezionò il modello di Rutherford e riuscì a spiegare la stabilità degli atomi e l'emissione degli spettri a righe.



Un fotone che viene assorbito da un atomo, cede tutta la sua energia a uno dei suoi elettroni, che passa così a uno stato energetico più elevato.

La natura della luce



Le orbite degli elettroni in un atomo sono **quantizzate**.

La natura della luce

1. L'elettrone percorre solo determinate orbite circolari (**orbite stazionarie**), senza emettere e cedere energia e quindi senza cadere nel nucleo.
2. All'elettrone sono permesse solo certe orbite a cui corrispondono determinati valori di energia (**quantizzata**).
3. Per passare da un'orbita a un'altra a livello energetico superiore, l'elettrone assorbe energia.
4. Per passare da un'orbita a un'altra a contenuto energetico minore, l'elettrone emette un fotone di appropriata frequenza (se appartiene al visibile dello spettro elettromagnetico, appare come riga colorata).
5. L'energia del fotone emesso o assorbito corrisponde alla differenza di energia delle due orbite.

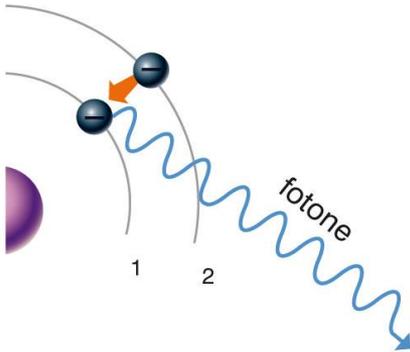
L'atomo di Bohr

Il **numero quantico principale** n indica il livello energetico associato a ogni orbita.

Il livello più basso di energia è detto **stato fondamentale**.

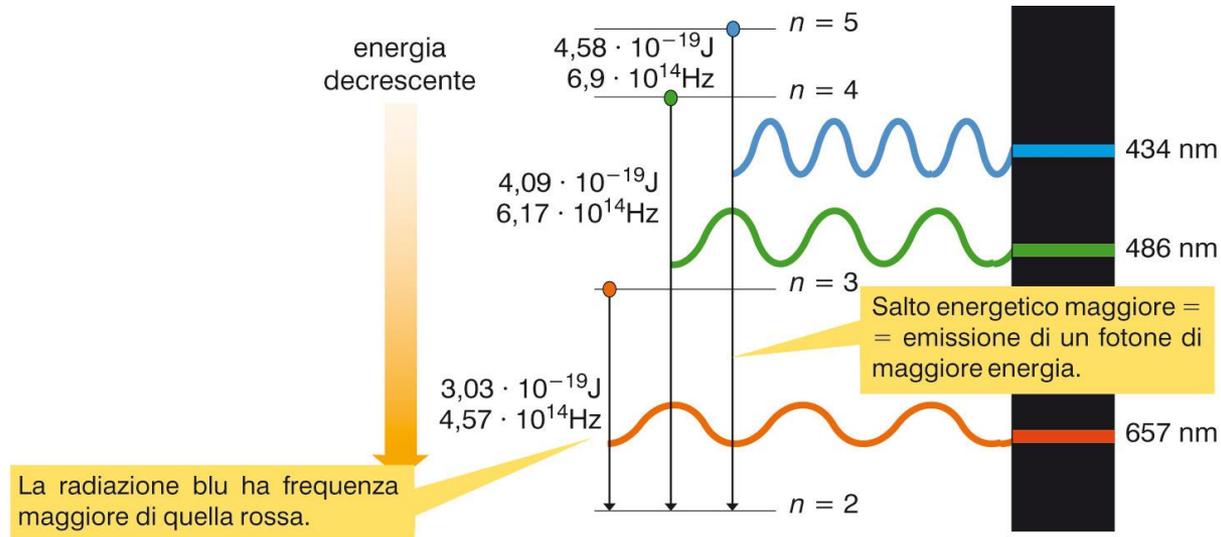
I livelli a energia superiore dello stato fondamentale si chiamano **stati eccitati**.

A ogni salto di orbita si ha una **transizione energetica**, ovvero emissione di energia sotto forma di fotone.



L'atomo di Bohr

Ogni transizione dell'elettrone da uno stato eccitato a un livello energetico inferiore è caratterizzata da una riga nello spettro di emissione.



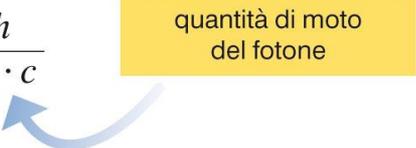
Il modello atomico di Bohr presentò presto tutti i suoi limiti: non era applicabile ad atomi con molti elettroni e non spiegava gli spettri atomici in presenza di un campo magnetico.

L'atomo di De Broglie

De Broglie ipotizzò che la doppia natura ondulatoria e corpuscolare fosse una proprietà universale della materia.

Associò a ogni particella in movimento un'onda.

Il legame tra caratteristiche corpuscolari e ondulatorie si manifesta nella relazione:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{h \cdot c}{m \cdot c^2} = \frac{h}{m \cdot c}$$


quantità di moto del fotone

Si osserva che la quantità di moto dipende dalla lunghezza dell'onda elettromagnetica con cui si propaga.

L'atomo di De Broglie

Le onde associate con l'elettrone, e con qualsiasi corpo in movimento, si chiamano **onde di de Broglie**.

A ogni corpo in movimento è associata quindi una lunghezza d'onda:

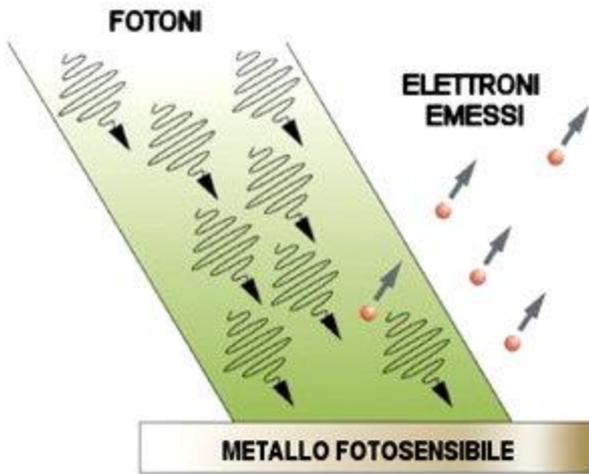
$$\lambda = h/(m \cdot v)$$

La natura della luce

L'interpretazione di alcuni esperimenti compiuti all'inizio del XX secolo, ad esempio l'effetto fotoelettrico, suggerivano una natura corpuscolare della luce, che, d'altra parte, manifestava proprietà chiaramente ondulatorie nel fenomeno della diffrazione.



Effetto fotoelettrico

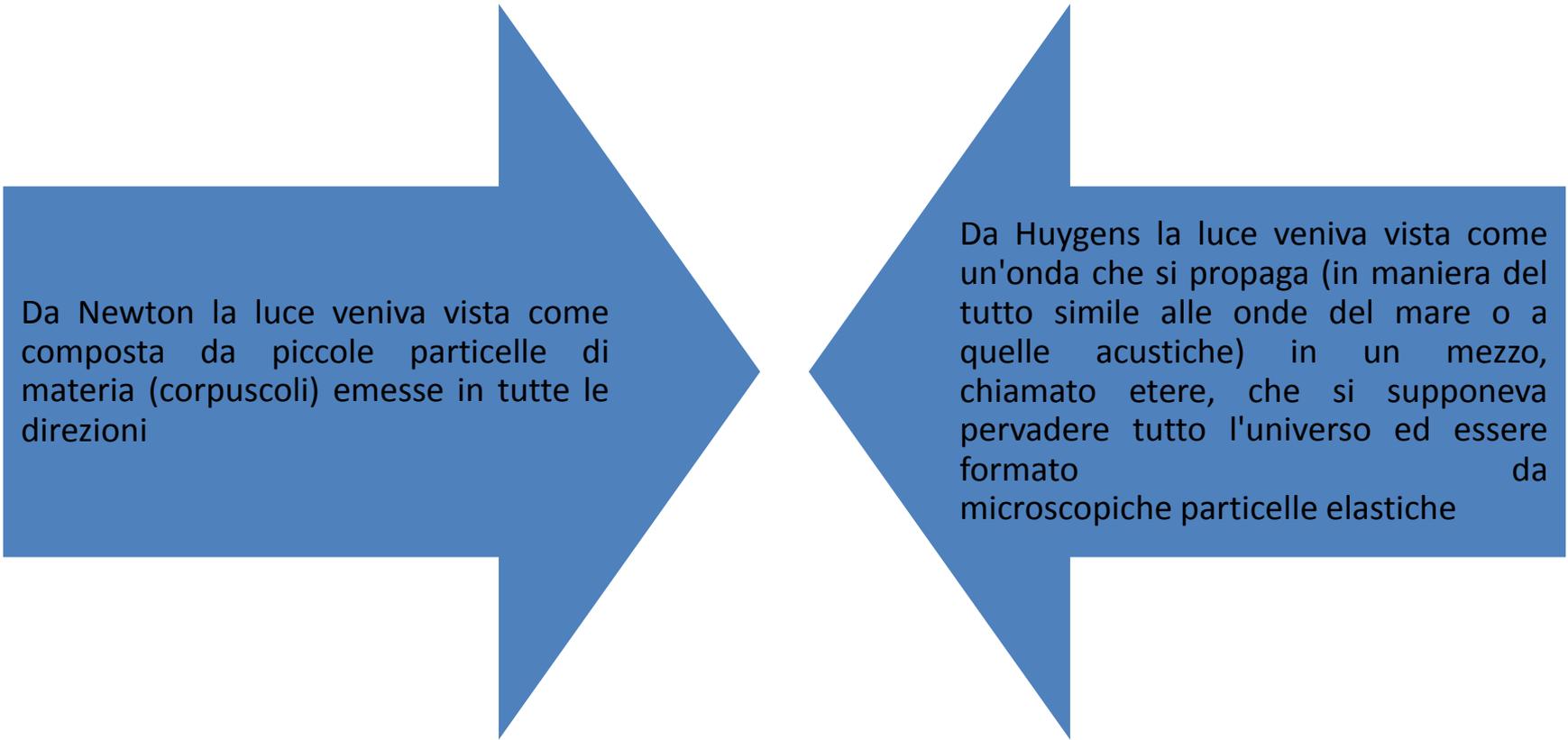


All'epoca la luce era considerata un'onda:

la forza di espulsione degli elettroni sarebbe dovuta dipendere solo dall'intensità della luce e non dalla sua frequenza, quindi non c'era ragione di pensare che luci rosse, verdi o blu avrebbero dovuto avere effetti diversi. Al contrario una debole luce rossa o una debole luce verde avrebbero dovuto espellere gli elettroni con meno forza di una **intensa luce rossa** o di una **intensa luce verde**. **Ma questo non accadeva!**

Al variare dell'intensità cambiava soltanto il numero degli elettroni espulsi, ma la velocità di espulsione degli elettroni rimaneva esattamente la stessa!

Newton vs Huygens



Da Newton la luce veniva vista come composta da piccole particelle di materia (corpuscoli) emesse in tutte le direzioni

Da Huygens la luce veniva vista come un'onda che si propaga (in maniera del tutto simile alle onde del mare o a quelle acustiche) in un mezzo, chiamato etere, che si supposeva pervadere tutto l'universo ed essere formato da microscopiche particelle elastiche

Einstein e l'effetto fotoelettrico

Einstein, riprendendo la teoria di Planck, sostenne che l'effetto fotoelettrico evidenzia la natura quantistica della luce.

Nella radiazione elettromagnetica l'energia non è distribuita in modo uniforme sull'intero fronte dell'onda ma concentrata in singoli quanti (pacchetti discreti) di energia, i fotoni, e ogni fotone interagisce singolarmente con un elettrone, al quale cede la sua energia.

$$E=h\nu$$

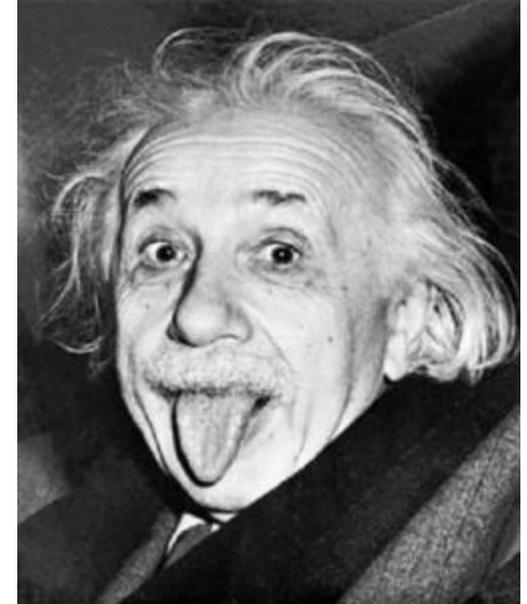
Affinché si verifichi è necessario che il fotone abbia un'energia sufficiente a rompere il legame elettrico che tiene legato l'elettrone all'atomo. Questa "soglia minima" di energia del fotone si determina in base alla relazione di Einstein:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot (c/\lambda)$$

L'elettrone può uscire dal metallo solo se l'energia del fotone è almeno uguale al "lavoro di estrazione" ($h \cdot \nu \geq W_e$). Esiste, pertanto, una "soglia minima" di estrazione per ogni metallo, che fa riferimento o alla lunghezza d'onda o alla frequenza del fotone incidente e, quindi, alla sua energia " $h \cdot \nu$ ", la quale coincide con il "lavoro di estrazione" (W_e).

Einstein e l'effetto fotoelettrico

L'ipotesi quantistica di Einstein non fu accettata per diversi anni da una parte importante della comunità scientifica, tra cui Hendrik Lorentz, Max Planck e Robert Millikan (vincitori del Premio Nobel per la fisica, rispettivamente, nel 1902, 1918 e 1923), secondo i quali la reale esistenza dei fotoni era un'ipotesi inaccettabile, considerato che nei fenomeni di interferenza le radiazioni elettromagnetiche si comportano come onde. L'iniziale scetticismo di questi grandi scienziati dell'epoca non deve sorprendere dato che perfino Max Planck, che per primo ipotizzò l'esistenza dei quanti (anche se con riferimento agli atomi, che emettono e assorbono "pacchetti di energia"), ritenne, per diversi anni, che i quanti fossero un semplice artificio matematico e non un reale fenomeno fisico. Ma successivamente lo stesso Robert Millikan dimostrò sperimentalmente l'ipotesi di Einstein sull'energia del fotone, e quindi dell'elettrone emesso, che dipende soltanto dalla frequenza della radiazione, e nel 1916 effettuò uno studio sugli elettroni emessi dal sodio che contraddiceva la classica teoria ondulatoria di Maxwell



Dio non gioca a dadi

Einstein stesso tentò in tutti i modi, elaborando sofisticati esperimenti mentali, di contrastare questa visione dualistica della realtà fisica, in particolare il probabilismo insito nella teoria quantistica, che precludeva l'idea, tipica della fisica classica, del determinismo assoluto (celebre la sua frase "*Dio non gioca ai dadi*"). Si dovette però arrendere all'evidenza dei fatti sperimentali e alla potenza predittiva della meccanica quantistica nel mondo microscopico, cui indirettamente diede comunque contributi notevoli.

Heisenberg

La relazione fra la natura ondulatoria e quella corpuscolare delle particelle è formulata nel principio di indeterminazione di Heisenberg

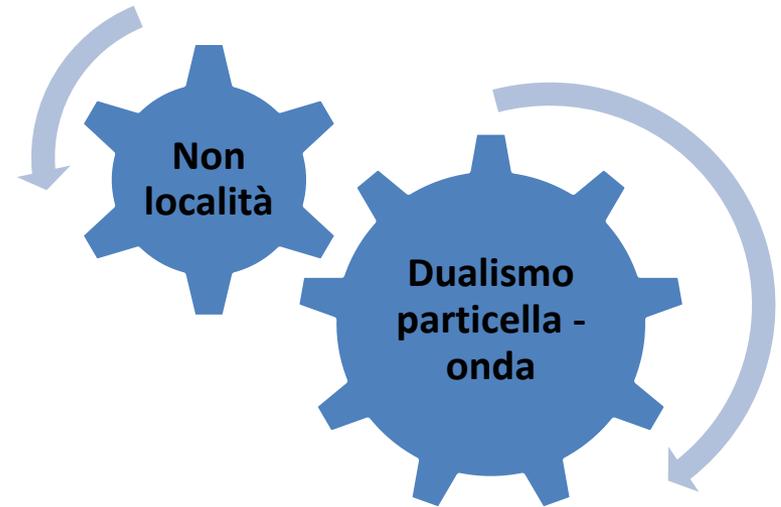
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Non è possibile misurare simultaneamente con precisione assoluta coppie di grandezze osservabili associate (per es. posizione e quantità di moto di una particella), perché le condizioni che rendono più precisa la determinazione dell'una aumentano le incertezze nella determinazione dell'altra.

Nel caso di una particella il prodotto delle due incertezze deve essere superiore o uguale alla costante di Planck

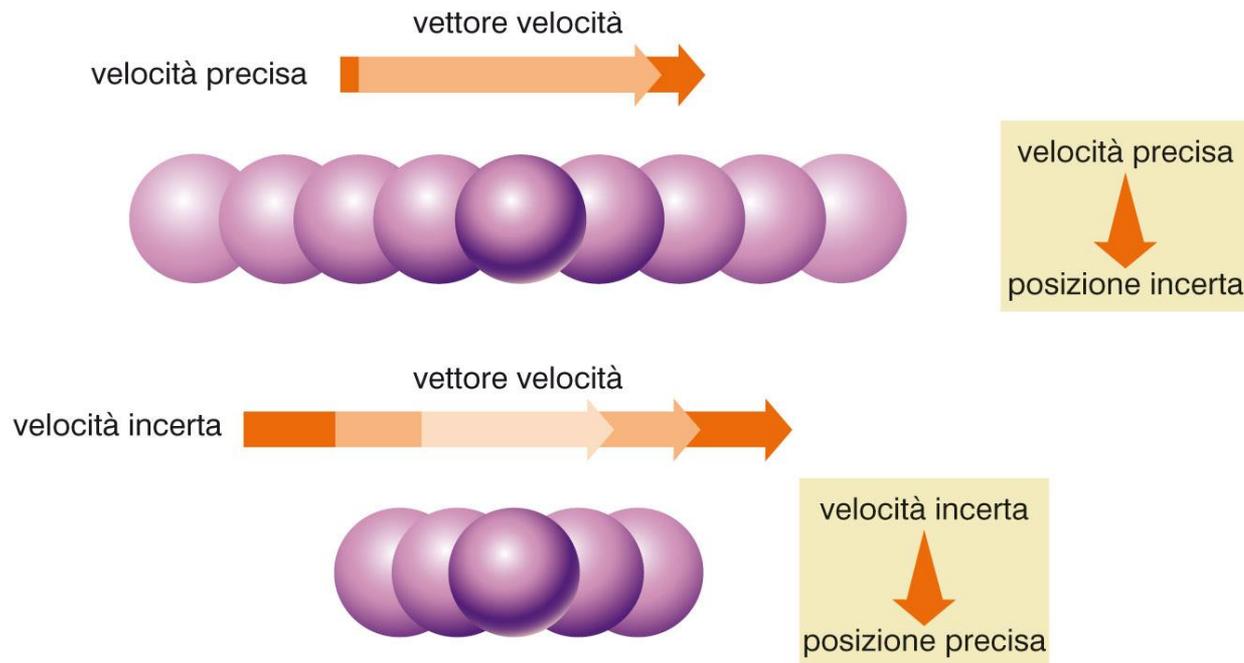
Il principio di indeterminazione

« Nell'ambito della realtà le cui connessioni sono formulate dalla teoria quantistica, le leggi naturali non conducono quindi ad una completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo; l'accadere (all'interno delle frequenze determinate per mezzo delle connessioni) è piuttosto rimesso al gioco del caso »



Il principio di indeterminazione

Il **principio di indeterminazione di Heisenberg** afferma che non è possibile conoscere a ogni istante, contemporaneamente, la posizione e la velocità di un elettrone.



Poiché le informazioni sul moto dell'elettrone possono essere solo di tipo probabilistico, con la meccanica quantistica il concetto di orbita di un elettrone è superato e inadeguato.

Schrödinger

Le onde che si propagano con l'elettrone in moto nell'atomo possono essere descritte da una funzione matematica proposta da Schrödinger nel 1926: è **l'equazione d'onda di Schrödinger**.

- è un'equazione fondamentale che determina l'evoluzione temporale dello stato di un sistema, ad esempio di una particella, di un atomo o di una molecola.
- Si tratta di una equazione differenziale alle derivate parziali lineare che ha come incognita la funzione d'onda, introdotta basandosi sull'ipotesi di de Broglie, secondo la quale anche le particelle che costituiscono la materia, come l'elettrone, hanno un comportamento ondulatorio. Secondo l'interpretazione di Copenaghen il modulo quadro della funzione d'onda ha il significato di probabilità di trovare una particella in una determinata configurazione.

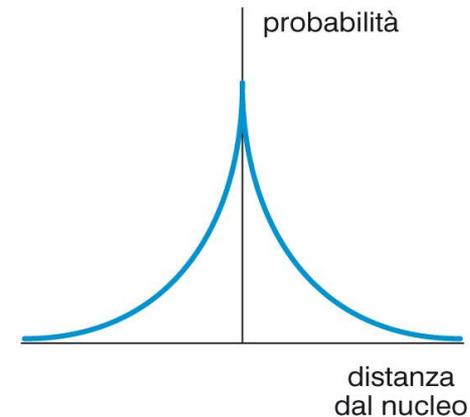
Schrödinger

L'equazione d'onda di Schrödinger fornisce informazioni sulla probabilità di trovare l'elettrone in un punto particolare dello spazio intorno al nucleo.



Ricorda

ψ^2 grande = alta probabilità di trovare l'elettrone;
 ψ^2 piccolo = bassa probabilità di trovare l'elettrone.



La funzione d'onda contiene tre numeri interi, detti **numeri quantici** (n , l e m) che definiscono lo stato quantico dell'elettrone e ne specificano il valore di una proprietà.

L'**orbitale** è una funzione d'onda elettronica caratterizzata da una particolare terna di valori di n , l e m .

Schrödinger

Il numero quantico principale n ($n = 1, 2, 3, \dots, 7$) definisce il livello energetico dell'elettrone che è proporzionale alla distanza dal nucleo.

Il numero quantico secondario l ($l = 0, 1, \dots, n-1$) determina le caratteristiche geometriche dell'orbitale (sottolivello energetico).

valori di l	0	1	2	3
lettera	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>

Il numero quantico magnetico m ($m = -l, 0, +l$) definisce quanti orbitali della stessa forma, ma con orientazione diversa, possono coesistere in un sottolivello.

Il numero quantico di spin m_s ($m_s = \pm \frac{1}{2}$) indica il valore di spin che può essere assunto dall'elettrone.

Schrödinger

n	Numeri quantici		Tipo di orbitali	Numero massimo di elettroni per tipo di orbitale
	l da 0 a $(n-1)$	m $(-l, 0, +l)$		
4	3	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	4f	14
	2	-2 -1 0 +1 +2	4d	10
	1	-1 0 +1	4p	6
	0	0	4s	2
3	2	-2 -1 0 +1 +2	3d	10
	1	-1 0 +1	3p	6
	0	0	3s	2
2	1	-1 0 +1	2p	6
	0	0	2s	2
1	0	0	1s	2

Schrödinger

La scoperta del quarto numero quantico, portò Pauli a enunciare il **principio di esclusione**, secondo il quale in un orbitale possono essere presenti al massimo due elettroni con spin opposto o antiparallelo.

$$\uparrow + 1/2 \quad \downarrow - 1/2$$

Lo spazio intorno al nucleo entro il quale si ha una certa probabilità di trovare l'elettrone, si chiama **superficie di contorno**.

La forma delle superfici di contorno e i volumi da esse racchiusi variano da un orbitale all'altro:

- la forma è determinata dal numero quantico secondario l ;
- il volume dipende dal numero quantico principale n .

Come si rappresenta un sistema fisico

La **funzione d'onda** rappresenta uno stato fisico del sistema quantistico. È spesso una funzione complessa delle coordinate spaziali e del tempo e il suo significato è quello di ampiezza di probabilità. Il suo modulo quadro quindi rappresenta la densità di probabilità dello stato sulle posizioni.

Un **orbitale atomico** è una funzione d'onda ψ che descrive il comportamento di un elettrone in un atomo. In base al principio di indeterminazione di Heisenberg non è possibile conoscere simultaneamente posizione e quantità di moto di una particella infinitesima come l'elettrone. Le funzioni d'onda descrivono quindi il comportamento dell'elettrone in senso probabilistico

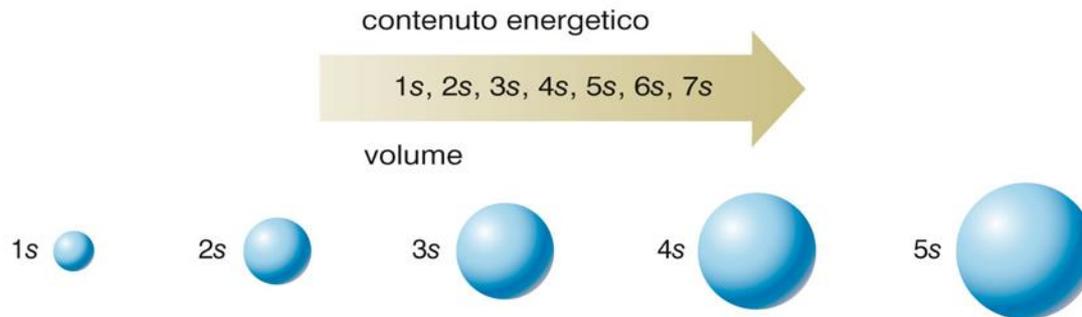
Dall'orbitale alla forma dell'atomo

Lo spazio intorno al nucleo entro il quale si ha una certa probabilità di trovare l'elettrone, si chiama **superficie di contorno**.

La forma delle superfici di contorno e i volumi da esse racchiusi variano da un orbitale all'altro:

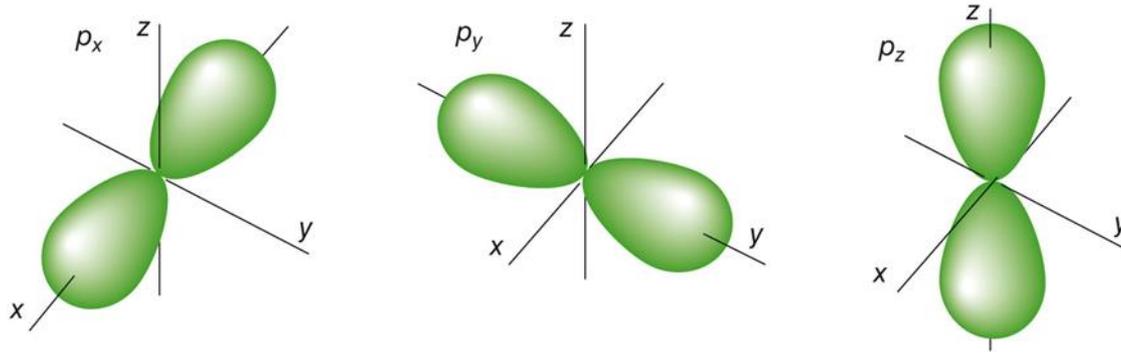
- la forma è determinata dal numero quantico secondario l ;
- il volume dipende dal numero quantico principale n .

La superficie di contorno degli orbitali s è una sfera il cui volume aumenta all'aumentare del numero quantico principale n

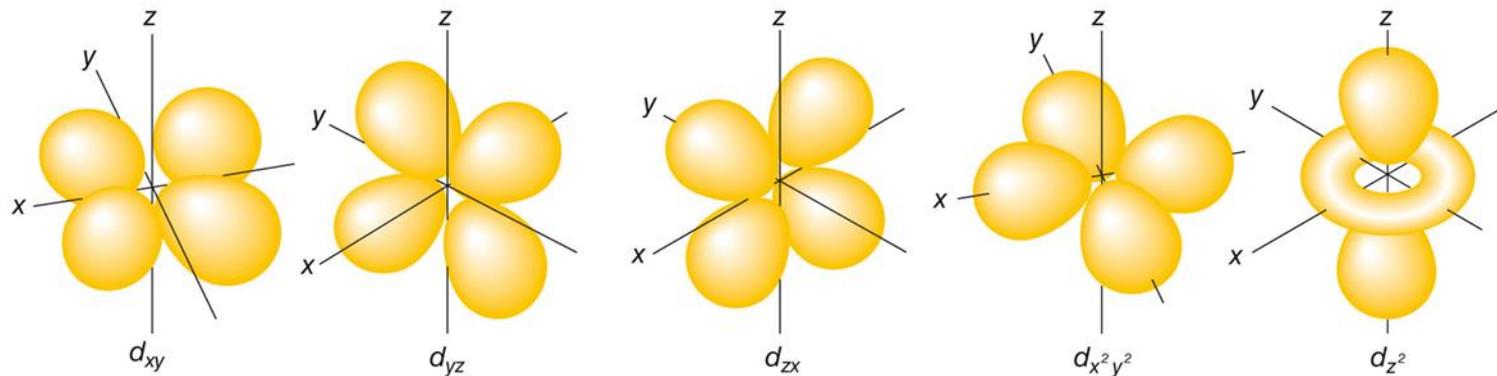


Dall'orbitale alla forma dell'atomo

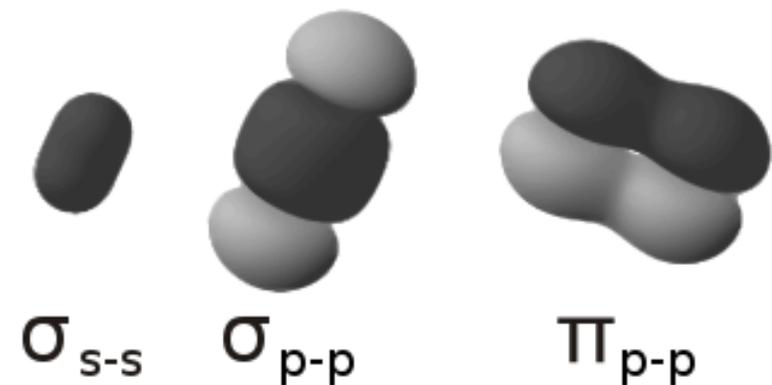
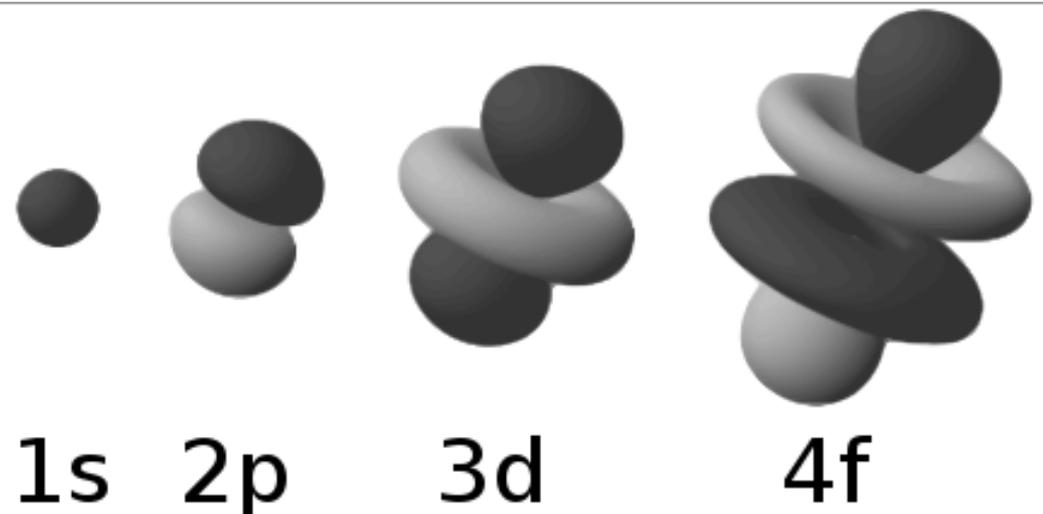
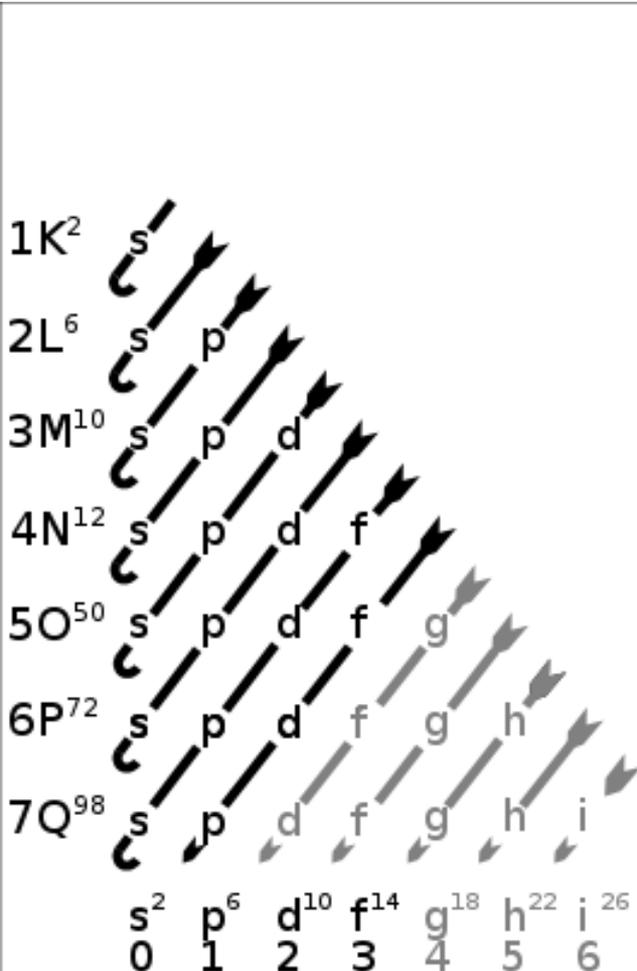
La superficie di contorno degli orbitali p è un doppio lobo che si espande lungo gli assi x , y e z



La superficie di contorno degli orbitali d è a quattro lobi.



Dall'orbitale alla forma dell'atomo



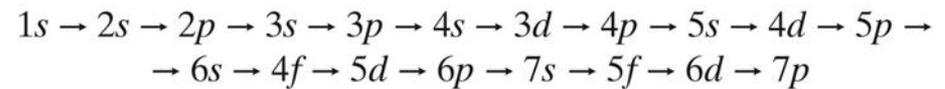
1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ²	3p ⁶	4s ²	3d ¹⁰	4p ⁶	5s ²	4d ¹⁰	5p ⁶	6s ²	4f ¹⁴	5d ¹⁰	6p ⁶	7s ²	5f ¹⁴	6d ¹⁰	7p ⁶
2	4	10	12	18	20	30	36	38	48	54	56	70	80	86	88	102	112	118

Configurazione degli atomi

Per scrivere la configurazione elettronica di un atomo si applica il **principio di Aufbau**.

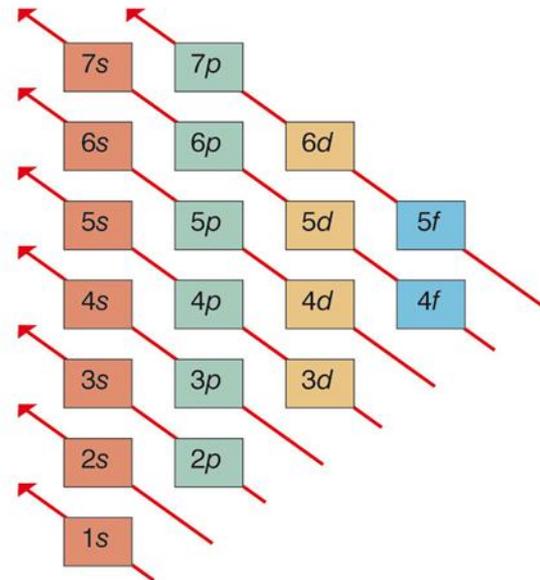
Il numero atomico Z dell'elemento indica il numero di elettroni da sistemare.

La successione degli orbitali in cui sistemare gli elettroni in ordine di energia crescente è:



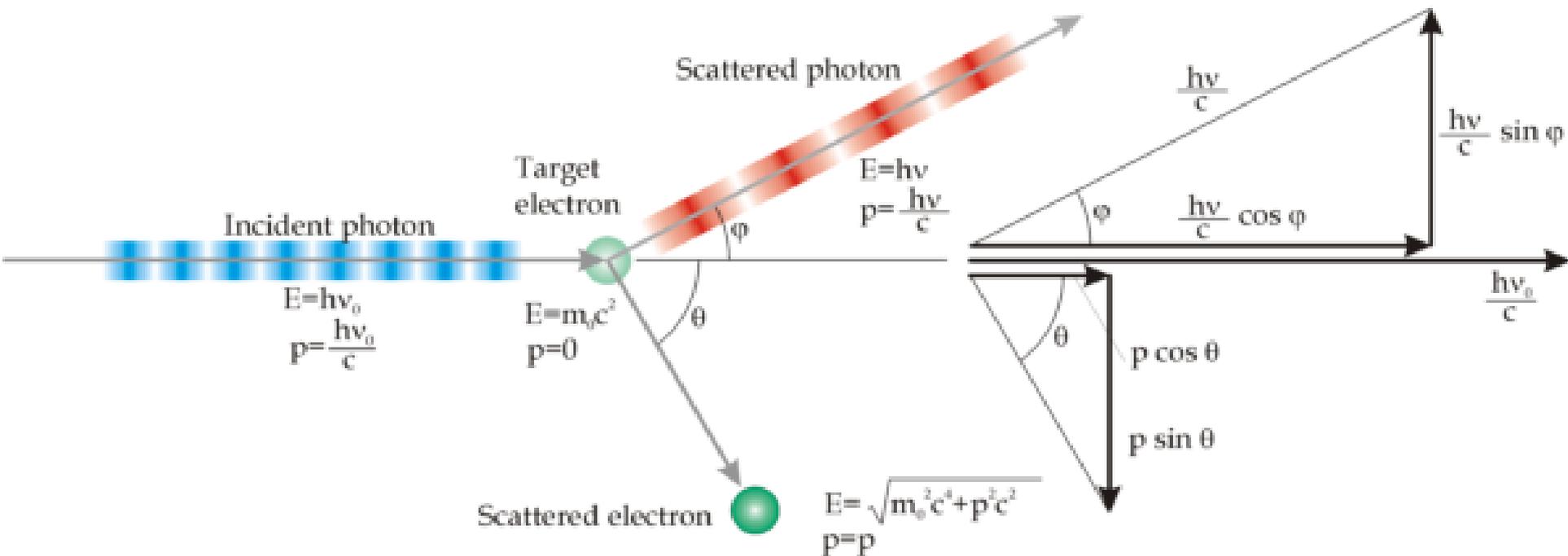
La somma degli esponenti che compaiono nella configurazione elettronica deve corrispondere al numero Z .

Gli elettroni occupano prima gli orbitali a energia più bassa, poi quelli a energia più elevata.



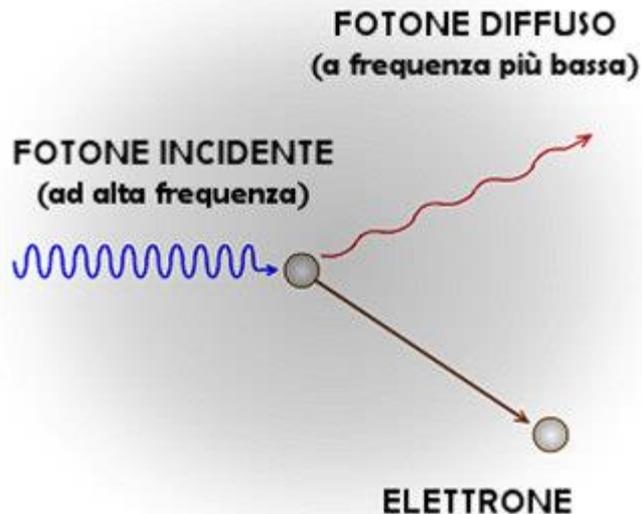
Compton

Nel 1923 **Arthur Holly Compton** fece un esperimento inviando un fascio monocromatico di raggi X su un blocco di grafite e misurò la direzione e l'intensità dei raggi X uscenti.

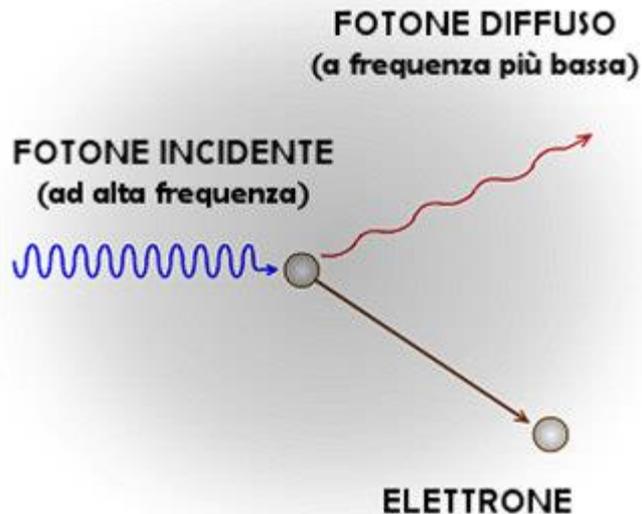


Compton

L'esperimento evidenziò che la radiazione uscente veniva deviata in tutte le direzioni e che la frequenza dell'energia in uscita era molto più piccola di quella del fascio in entrata. La logica spiegazione di tali riscontri era che i singoli fotoni urtassero contro gli elettroni della materia e, colpendoli, fossero deviati e perdessero essi stessi energia; in pratica si comportavano come **palle da biliardo** che ne colpivano altre.



Compton



Nel 1923 pubblicò i risultati dei suoi esperimenti (effetto Compton) che confermavano in modo indiscutibile l'ipotesi di Einstein: la radiazione elettromagnetica è costituita da quanti (fotoni) che interagendo con gli elettroni si comportano come singole particelle. Per la scoperta dell'effetto omonimo Arthur Compton ricevette il premio Nobel nel 1927.

Applicazioni

- il laser,
- il microscopio elettronico
- la risonanza magnetica nucleare;
- molti calcoli di chimica computazionale si basano su questa teoria;
- La superconduttività e la semiconduttività.

La crittografia quantistica

Molti sforzi sono stati fatti per sviluppare una crittografia quantistica, che garantirebbe una trasmissione sicurissima dell'informazione in quanto l'informazione non potrebbe essere intercettata senza essere modificata.



Si utilizza questo principio per realizzare un cifrario perfetto del tipo One Time Pad, senza il problema di dover scambiare la chiave (anche se lunga quanto il messaggio) necessariamente su un canale sicuro. La prima rete a crittografia quantistica funzionante è [Qnet](#)

Microscopio elettronico

Il **microscopio elettronico** è un tipo di microscopio che non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni ma un fascio di elettroni. Fu inventato dai tedeschi Ernst Ruska e Max Knoll nel 1931.

Il microscopio elettronico utilizza un fascio di elettroni e non di fotoni, come un microscopio ottico, in quanto i fotoni che compongono un raggio di luce possiedono una lunghezza d'onda di gran lunga maggiore rispetto a quella degli elettroni: dato che il potere di risoluzione di un microscopio è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione che utilizza, usando elettroni si raggiunge una risoluzione parecchi ordini di grandezza superiore

Risonanza magnetica nucleare

- La **Risonanza Magnetica Nucleare (RMN** o, raramente, RNM), in inglese *Nuclear Magnetic Resonance (NMR)*, è una tecnica di indagine sulla materia basata sulla misura della precessione dello spin di protoni o di altri nuclei dotati di momento magnetico quando sono sottoposti ad un campo magnetico.