

# Note di fisica quantistica

Mauro Saita

e-mail: maurosaita@tiscalinet.it

1

*In queste note vengono presentati alcuni dei principali argomenti che hanno caratterizzato la ricerca nel campo della fisica di inizio '900. Le idee e le soluzioni che ne sono scaturite hanno sancito di fatto la nascita della fisica quantistica. Lo scopo di queste note è solamente quello di aiutare lo studente a orientarsi in un campo della fisica che può apparire ostico a molti; in nessun modo questi appunti possono sostituire il libro di testo o qualunque altro manuale che tratti gli argomenti, qui solo accennati.*

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione alla teoria dei quanti</b>	<b>2</b>
1.1	Crisi della fisica classica e nascita della fisica quantistica . . . . .	3
1.2	Radiazione del corpo nero . . . . .	3
1.3	Max Planck e la spiegazione della catastrofe ultravioletta . . . . .	5
1.4	Effetto fotoelettrico . . . . .	7
1.4.1	La spiegazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico . . . . .	9
1.5	Massa e quantità di moto di un fotone . . . . .	10
1.6	Effetto Compton . . . . .	11
1.6.1	Perchè l'effetto Compton non è osservabile con la luce visibile? . . . . .	12
1.7	Interazione tra fotoni e materia . . . . .	13
1.8	Stabilità degli atomi. . . . .	14

---

<sup>1</sup>Nome file .tex: fisica\_quantistica\_2019.tex

## 1 Introduzione alla teoria dei quanti

*“La meccanica quantistica è la descrizione della materia e della luce in tutti i suoi dettagli e, in particolare, di ciò che avviene su scala atomica. Gli oggetti su scala molto piccola non si comportano come nessuna cosa di cui si possa avere diretta esperienza. Non si comportano come onde, né come particelle, né come nuvole, né palle da biliardo, né come pesi attaccati a molle, né come nient’altro abbiate mai visto.*

*Newton pensava che la luce fosse composta di particelle, ma fu poi scoperto che essa si comporta come un’onda. In seguito, tuttavia (all’inizio del ventesimo secolo), fu trovato che in effetti la luce talvolta si comporta da particella. Per fare un altro esempio, una volta si pensava che l’elettrone si comportasse come una particella e si scoprì poi che, sotto molti aspetti, si comporta come un’onda. Cosicché, in realtà, non si comporta in nessuno dei due modi. Ora abbiamo lasciato perdere. Diciamo: “Non è nè l’una nè l’altra cosa”.*

*Fortunatamente c’è uno spiraglio: gli elettroni si comportano esattamente come la luce. Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni, fotoni e così via) è lo stesso per tutti, sono “onde particelle” o qualunque altro nome vi piaccia dar loro. Così ciò che apprendiamo sulle proprietà degli elettroni vale anche per tutte le altre “particelle”, compresi i fotoni della luce.*

[...]

*Proprio perché il comportamento atomico è così diverso dalla comune esperienza, è assai difficile abituarcisi, ed esso appare strano e misterioso a chiunque, sia al principiante, che al fisico ormai sperimentato. Perfino gli esperti non lo capiscono nel modo che essi desidererebbero, ed è assai ragionevole che non ci riescano, poiché tutto quanto riguarda la diretta esperienza e l’intuizione umana, si riferisce a oggetti grandi. Sappiamo come si comportano gli oggetti grandi, ma le cose su piccola scala funzionano, semplicemente, in modo diverso. Perciò dobbiamo imparare a conoscerle in modo astratto e concettuale, e non in relazione alla nostra esperienza diretta.”*

Richard P. Feynman, *La Fisica di Feynman*, Addison-Wesley Publishing Company. 1970. Vol III, Introduzione: pg 1-2.

## 1.1 Crisi della fisica classica e nascita della fisica quantistica

All'inizio del 1900 l'attenzione dei fisici era rivolta a tutti quei fenomeni che la teoria classica dell'elettromagnetismo non era in grado di interpretare correttamente; tra questi i più importanti erano

1. la radiazione del corpo nero
2. l'effetto fotoelettrico
3. la stabilità e le dimensioni degli atomi

## 1.2 Radiazione del corpo nero

1. *Ogni corpo emette energia.*

Ogni corpo emette, a una ben determinata temperatura, uno spettro continuo di radiazioni (quindi di diversa lunghezza d'onda e frequenza) sotto forma di irraggiamento. Sperimentalmente si è verificato che l'intensità della radiazione emessa dipende sia dalla temperatura del corpo emittente che dalla sua natura (superficie, forma, composizione ...).

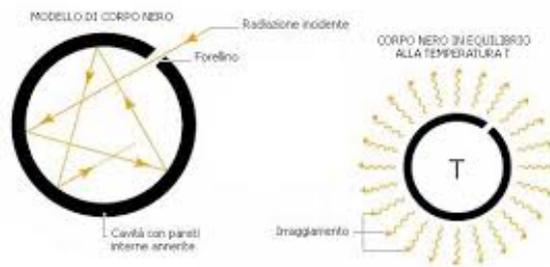
2. *Il corpo nero.*

Alla fine dell'Ottocento i fisici studiarono con attenzione la radiazione elettromagnetica di un particolare sistema detto *corpo nero*

*Un corpo nero ideale è un corpo in grado di assorbire per intero la radiazione elettromagnetica di cui è investito.*

Utilizzando esclusivamente considerazioni termodinamiche si è dimostrato che un corpo nero, ossia un *assorbitore ideale* di radiazione elettromagnetica è anche un *radiatore ideale* che emette radiazione elettromagnetica in corrispondenza di tutte le possibili frequenze dello spettro elettromagnetico.

3. *Esempi di corpo nero.* Una delle migliori realizzazioni sperimentali di corpo nero è rappresentata da una grande cavità con un piccolo foro laterale; un raggio di luce che entra nella cavità, prima di uscire da essa, subisce un grandissimo numero di riflessioni durante le quali la sua energia viene praticamente del tutto assorbita dalle pareti interne della cavità, provocandone un aumento di temperatura. A sua volta il corpo nero emette radiazione elettromagnetica, detta *radiazione del corpo nero*, secondo uno spettro che è indipendente dalla sostanza e dalla forma di cui è costituito del corpo..

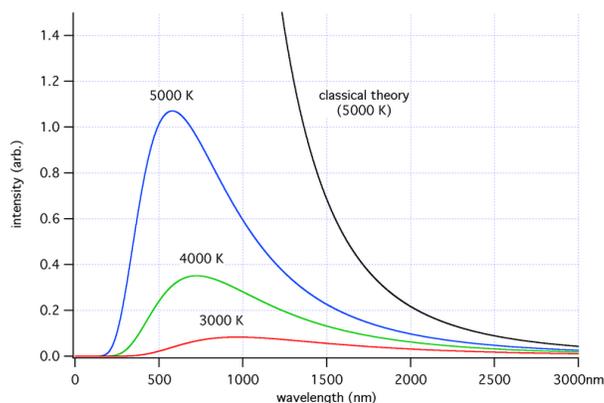


**Figura 1:** Corpo nero.

Un forno a una certa temperatura è un esempio di corpo nero; esso intrappola tutta la radiazione che viene totalmente assorbita e poi riemessa sotto forma di radiazione termica. Altri esempi di corpo nero sono il sole (la cui temperatura superficiale è circa 6000 K) e le stelle. Le stelle brillano di luce propria perché “bruciano”, ossia perché al loro interno avvengono reazioni nucleari che emettono una grande quantità di energia sotto forma di calore e radiazioni. Studiando lo spettro di emissione di una stella si può determinare la sua temperatura superficiale stimandone l'età e prevedendone l'evoluzione.

#### 4. *Radiazione del corpo nero.*

La figura qui sotto mostra, per diverse temperature, le caratteristiche “curve a campana” della radiazione del corpo nero.



**Figura 2:** Spettro della radiazione del corpo nero.

Va notato, in particolare, lo spostarsi del massimo di emissione verso l'ultravioletto al crescere della temperatura. Sperimentalmente si è osservato che

- la radiazione elettromagnetica emessa è *indipendente* dalla natura del corpo (cioè non dipende dal materiale di cui è composto il corpo nero, nè dalla sua forma).

- la radiazione elettromagnetica emessa dipende esclusivamente dalla temperatura del corpo nero.
- con l'aumentare della temperatura aumenta l'energia elettromagnetica emessa.
- con l'aumentare della temperatura il massimo di emissione si sposta verso l'ultravioletto.

Nessuna teoria classica, basandosi su considerazioni termodinamiche e elettromagnetiche riuscì a spiegare la forma di queste curve. Anzi, secondo i fisici *Rayleigh* e *Jeans* la potenza  $P$  della radiazione elettromagnetica doveva essere inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda, secondo la legge seguente

$$P(\lambda, T) = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} \quad (1.1)$$

dove  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K è la costante di Boltzmann e  $T$  è la temperatura in gradi Kelvin del corpo nero. Secondo la teoria classica, per  $\lambda \rightarrow 0$  la potenza  $P$  tende a  $+\infty$  (In figura ??) il grafico.

La contraddizione tra la previsione teorica e i risultati sperimentali viene indicata (per la prima volta dal fisico G. Gamov) con il nome di *catastrofe ultravioletta*. È da questo drammatico conflitto tra teoria e esperienza che nasce la fisica quantistica.

### 1.3 Max Planck e la spiegazione della catastrofe ultravioletta

1.

Il 14 dicembre 1900 Max Planck, durante una riunione della Società Tedesca di Fisica di Berlino, presentò una deduzione della legge della radiazione del corpo nero formulando un'ipotesi che si discostava radicalmente dai principi della fisica classica. A questa data si fa simbolicamente risalire la nascita della fisica quantistica.

Planck ipotizzò che sia l'emissione che l'assorbimento della radiazione elettromagnetica all'interno del corpo nero fossero *quantizzate* ossia, gli scambi di energia tra radiazione e materia, osservati a livello microscopico, non avvengono mediante quantità di energia piccole quanto si vuole e variabili con continuità, bensì mediante quantità discrete, dette *quanti*.

Quindi, secondo Planck *non* è l'energia a essere quantizzata bensì è l'emissione e l'assorbimento di energia che avviene secondo 'piccoli pacchetti di energia' cioè in modo quantizzato. In termini più precisi egli afferma che lo scambio di energia tra radiazione elettromagnetica (luce) e materia avviene secondo multipli interi del prodotto di una costante  $h$  per la frequenza

$$E_n = n h f \quad (1.2)$$

dove  $E_n$  è l'energia scambiata,  $f$  è la frequenza della radiazione elettromagnetica,  $n$  è un multiplo intero positivo e

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (1.3)$$

è la cosiddetta *costante di Planck*. Tale costante è una delle costanti fondamentali della natura (il fisico tedesco riuscì a determinarne il valore della costante con notevole precisione) e il fatto che il valore di  $h$  sia un numero molto piccolo spiega per quale motivo, fino ad allora, l'energia radiante sia sembrata una grandezza variabile con continuità e non per "salti".

Planck, nella sua teoria sulla radiazione di cavità, utilizza l'ipotesi di quantizzazione dell'energia come un artificio di calcolo in grado di risolvere la contraddizione esistente tra le previsioni della fisica classica e i dati sperimentali; in altri termini l'assunzione di Planck ( $E_n = n h f$ ) non è una conseguenza logica di una teoria bensì il tentativo di trovare una formula matematica che fornisse previsioni coerenti con i dati sperimentali allora a disposizione. Sarà successivamente A. Einstein a nobilitare questa ipotesi facendole assumere il valore di una vera e propria realtà fisica.

## 1.4 Effetto fotoelettrico

Nel 1887 Heinrich Hertz scoprì che, in certe circostanze, è possibile estrarre elettroni da una piastra di metallo colpendola con raggi luminosi. L'apparato sperimentale per misurare l'effetto fotoelettrico è quello descritto in figura: è costituito da un anello metallico, detto *anodo*, e una piastra anch'essa di metallo, detta *catodo*.

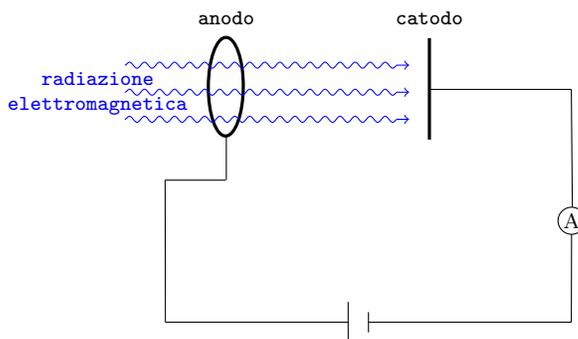


Figura 3

Se si fa incidere una radiazione elettromagnetica sulla piastra e se l'energia della radiazione elettromagnetica supera una certa soglia, detta *lavoro di estrazione*, è possibile strappare elettroni al metallo: questo movimento di cariche genera una corrente che è misurabile mediante l'amperometro. In linea di principio la presenza del generatore non è necessaria; il suo impiego serve unicamente per dirigere dal catodo verso l'anodo gli elettroni estratti, evitando che si disperdano in tutte le direzioni.

Secondo la fisica classica l'energia necessaria per strappare elettroni dal metallo si accumula con il passare del tempo. Si chiama intensità  $I$  della radiazione elettromagnetica la quantità

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta S}$$

ossia la quantità di energia che attraversa la superficie  $\Delta S$  nell'unità di tempo  $\Delta t$ . Quindi, secondo la fisica classica, qualunque sia l'intensità  $I$  della radiazione incidente, dovrebbe essere sempre possibile liberare elettroni dal metallo. Infatti, in corrispondenza di un ben determinato intervallo di tempo  $\Delta t$ , si avrà  $\Delta E = I \Delta t \cdot \Delta S$ .

Gli esperimenti però mostrano una situazione sorprendente: se si colpisce una lastra di metallo con luce monocromatica (ossia onde elettromagnetiche con la stessa frequenza), si osservano i seguenti fatti

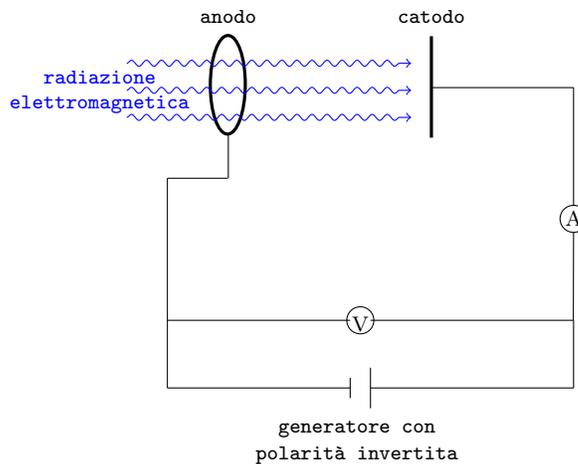
1. Al di sotto di una certa frequenza  $f_0$ , detta *frequenza di soglia*, non si registra passaggio di corrente, cioè non vi è estrazione di elettroni dal metallo, qualunque sia l'intensità della radiazione.
2. Per frequenze  $f > f_0$  si ha passaggio di corrente e l'intensità di corrente cresce al crescere dell'intensità della radiazione.

- Per frequenze  $f > f_0$  l'estrazione di elettroni dal metallo avviene istantaneamente anche per valori bassi dell'intensità luminosa, cioè non si registra alcun ritardo rispetto a intensità superiori.

Quindi estrarre elettroni colpendo una piastra metallica con onde elettromagnetiche è possibile soltanto se la frequenza della luce incidente supera un certo valore di soglia e ciò avviene indipendentemente dall'intensità luminosa. L'emissione di elettroni avviene senza alcun ritardo, contraddicendo così un'altra previsione della fisica classica secondo la quale accumulare energia richiede tempo.

Energia cinetica dell'elettrone.

Secondo la teoria classica, l'energia cinetica  $K = \frac{1}{2}mv^2$  dell'elettrone estratto dal catodo dipende dall'intensità  $I$  della radiazione elettromagnetica; al crescere di  $I$  dovrebbe crescere con continuità l'energia  $K$  dell'elettrone. Per mostrare che le cose non stanno così occorre modificare l'apparato sperimentale della figura (3) nel seguente modo: il generatore di tensione continua utilizzato in questo caso è regolabile e ha la polarità invertita rispetto a prima; inoltre è stato inserito un voltmetro per misurare la differenza di potenziale esistente tra anodo e catodo.



**Figura 4**

Avendo collegato l'anodo al polo negativo del generatore, gli elettroni estratti dal catodo vengono rallentati. Se  $\Delta V$  è la differenza di potenziale fornita dal generatore gli elettroni vengono decelerati da un'energia

$$E_{frenante} = \Delta V \cdot e \tag{1.4}$$

Quindi per determinare l'energia cinetica posseduta dall'elettrone che ha lasciato il catodo basta determinare la differenza di potenziale  $\Delta V_0$  in corrispondenza della quale l'amperometro non registra più alcun passaggio di corrente; l'energia cinetica dell'elettrone eguaglia l'energia frenante

$$K = E_{frenante} = \Delta V_0 \cdot e \tag{1.5}$$

$\Delta V_0$  è detto *potenziale di arresto*. Si verifica allora che al variare dell'intensità della radiazione il valore del potenziale d'arresto non cambia, mentre per valori crescenti della frequenza della radiazione incidente si osserva che il valore  $\Delta V$  aumenta e di conseguenza aumenta l'energia cinetica degli elettroni.

#### 1.4.1 La spiegazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico

Gli esperimenti sull'effetto fotoelettrico mostrano che *non è possibile accumulare energia con continuità sugli elettroni*.

Secondo la spiegazione di Einstein l'energia di un fascio di luce si propaga secondo piccoli 'pacchetti di energia' detti *fotoni* o *quanti*. L'energia di un fotone (quanto) di luce è proporzionale alla frequenza secondo l'uguaglianza

$$E = h f \quad (1.6)$$

Il quanto di energia può essere trasferito completamente all'elettrone che si trova sulla lastra metallica. Se  $E$  è maggiore del lavoro  $W$  di estrazione dell'elettrone (la grandezza  $W$  è una costante caratteristica del materiale, indipendente dalla frequenza  $f$ ) allora l'elettrone si allontanerà dal metallo con energia cinetica  $E_k = E - W$ , ovvero

$$E_k = h f - W \quad (1.7)$$

Inoltre, dalla teoria classica dell'elettromagnetismo, è noto che un'onda elettromagnetica si propaga nel vuoto con velocità

$$c = f \lambda \quad (1.8)$$

dove  $f$  e  $\lambda$  sono rispettivamente la frequenza e la lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica. Allora, sostituendo in (1.6)  $f = \frac{c}{\lambda}$  si ottiene

$$E = \frac{h c}{\lambda} \quad (1.9)$$

Dalle uguaglianze (1.2) e (1.9) segue immediatamente che l'energia di un quanto di luce è direttamente proporzionale alla sua frequenza e inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda.

## 1.5 Massa e quantità di moto di un fotone

Un fotone è una ‘particella’ che differisce per molti aspetti dalle particelle comuni.

1. Dall’uguaglianza massa-energia

$$E = m_o \gamma c^2 = m_o \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2 \quad (1.10)$$

si ricava:

$$E \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m_o c^2 \quad (1.11)$$

Essendo la velocità del fotone pari a  $c$ , da (1.11) si ottiene:  $m_o c^2 = 0$ , ossia  $m_o = 0$ . Quindi *la massa a riposo del fotone è nulla* anche se non ha molto senso parlare di un fotone a riposo in quanto tutti gli osservatori (inerziali) lo vedono muoversi a velocità  $c$ .

2. Dalle uguaglianze  $E = h f$  e  $E = m c^2$  (con  $m = m_o \gamma$ )

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h f}{c^2} \quad (1.12)$$

La grandezza  $\frac{h f}{c^2}$  rappresenta la *massa dinamica del fotone*.

3. *Quantità di moto del fotone.*

$$P_{\text{fotone}} = m c = \frac{h f}{c^2} c = \frac{h f}{c} \quad (1.13)$$

e ricordando che  $c = f \lambda$ , si può anche scrivere:

$$P_{\text{fotone}} = \frac{h}{\lambda} \quad (1.14)$$

La quantità di moto del fotone è direttamente proporzionale alla frequenza e alla sua energia.

## 1.6 Effetto Compton

### 1. L' esperimento.

Nel 1923 il fisico americano Arthur Compton (1892-1962) fece esperimenti sulla diffusione dei raggi  $X$  nella grafite: fece incidere un fascio coerente di raggi  $X$  su un blocco di grafite e osservò che la lunghezza d'onda della radiazione diffusa dalla grafite cambiava in funzione dell'angolo di diffusione. La radiazione che attraversa la grafite senza subire deviazione conserva la stessa lunghezza d'onda mentre quella che subisce deviazione possiede una lunghezza d'onda maggiore.

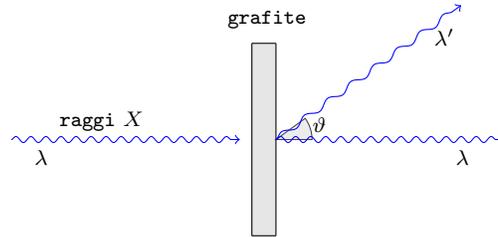


Figura 5: Effetto Compton.

### 2. Urto fotone-elettrone.

Gli elettroni del blocco di grafite sono debolmente legati ai loro atomi, l'energia necessaria per strappare gli elettroni dagli atomi è, di solito, pari a qualche eV mentre quella di un fotone è (per una lunghezza d'onda di  $\lambda = 7,11 \cdot 10^{-11}$  m) è circa  $17,4 \cdot 10^3$  eV. Pertanto gli elettroni della grafite si possono pensare liberi; essi inoltre, possiedono velocità trascurabile rispetto a quella del fotone. Pertanto, se si adotta il modello corpuscolare per la radiazione elettromagnetica si può spiegare l'effetto Compton mediante *urti elastici* tra i fotoni dei raggi  $X$  e gli elettroni della grafite. In termini qualitativi la situazione si può spiegare così: il fotone, che si muove con velocità  $c$ , urta un elettrone dell'atomo di grafite che è approssimativamente fermo e debolmente legato agli atomi del blocco. Durante l'urto parte dell'energia posseduta dal fotone si trasmette all'elettrone sotto forma di energia cinetica (l'energia necessaria per strappare gli elettroni agli atomi è trascurabile) e di conseguenza, dopo l'urto, il fotone possiede un'energia minore rispetto a quella posseduta all'inizio. Quindi, secondo l'ipotesi di Planck e la teoria dei fotoni di Einstein, la frequenza del fotone diminuisce mentre aumenta la sua lunghezza d'onda.

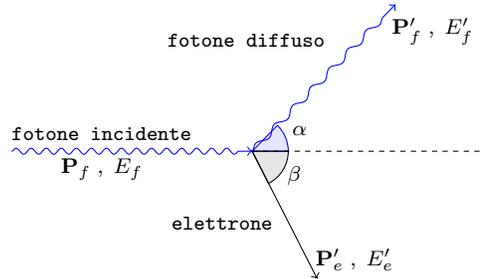
Per determinare la variazione  $\Delta\lambda$  di lunghezza d'onda si utilizza il principio di conservazione della quantità di moto e quello di conservazione dell'energia. Indicando, prima dell'urto, la quantità di moto e l'energia con le lettere  $\mathbf{P}$ ,  $E$  e dopo l'urto con le medesime lettere accentate si ottiene

*principio di conservazione della quantità di moto:*

$$\mathbf{P}_{\text{fotone}} + \mathbf{P}_{\text{elettrone}} = \mathbf{P}'_{\text{fotone}} + \mathbf{P}'_{\text{elettrone}}$$

*principio di conservazione dell'energia:*

$$E_{\text{fotone}} + E_{\text{elettrone}} = E'_{\text{fotone}} + E'_{\text{elettrone}}$$



**Figura 6:** Un fotone urta contro un elettrone inizialmente in quiete. Energia e quantità di moto si conservano.

Con calcoli semplici ma un po' laboriosi, dalle due leggi di conservazione si ricava:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \alpha) \quad (1.15)$$

dove  $\lambda, \lambda'$  sono le lunghezze d'onda dei fotoni di raggi  $X$  prima e dopo l'urto. Dall'uguaglianza (1.15) si deduce immediatamente che la differenza di lunghezza d'onda dipende unicamente dall'angolo di dispersione  $\alpha$ .

### 1.6.1 Perché l'effetto Compton non è osservabile con la luce visibile?

Se si fa incidere un raggio di luce monocromatica su un blocco di grafite, la lunghezza d'onda del fotone diffuso è uguale a quella del fotone incidente, cioè non si osservano raggi diffusi di lunghezza d'onda maggiore rispetto alla lunghezza d'onda del raggio incidente.

Questo fatto si può spiegare così: durante l'urto tra il fotone (in moto) e l'elettrone (in quiete) non vi è trasferimento di quantità di moto dal fotone all'elettrone. Infatti nell'ipotesi che si tratti di un urto elastico ideale il trasferimento di quantità di moto dal fotone all'elettrone è tanto maggiore quanto più il rapporto tra le due masse si avvicina al rapporto  $1 \div 1$ .

Per un fotone di lunghezza d'onda  $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7}$  m la sua energia è circa 2,5 eV

$$E_{\text{fotone}} = h \frac{c}{\lambda} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \left( \frac{1}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} \right) \sim 2,5 \text{ eV}$$

mentre quella dell'elettrone è

$$E_{\text{elettrone}} = m_e c^2 = (9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \left( \frac{1}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} \right) = 5,12 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

il rapporto tra le due energie fornisce il rapporto tra la massa (dinamica) del fotone e quella dell'elettrone:

$$\frac{m_{\text{fotone}}}{m_{\text{elettrone}}} = \frac{1}{204\,800}$$

Pertanto la massa del fotone risulta essere più di 200 000 volte minore di quella dell'elettrone; con un rapporto così sfavorevole non vi è scambio di quantità di moto tra fotone e elettrone.

## 1.7 Interazione tra fotoni e materia

Effetto fotoelettrico e effetto Compton sono fenomeni di interazione tra radiazione elettromagnetica (fotoni) e materia. Nel caso dell'effetto fotoelettrico il fotone viene assorbito e cede tutta la sua energia all'elettrone con cui interagisce. Questo fenomeno si verifica più facilmente con elettroni strettamente legati all'atomo mentre è quasi impossibile con elettroni quasi liberi (cioè con elettroni che occupano le orbite più esterne dell'atomo).

Nel caso dell'effetto Compton invece il fenomeno si verifica quando l'energia del fotone è molto maggiore dell'energia di legame dell'elettrone e ciò si verifica con gli elettroni quasi liberi (quelli delle orbite più esterne). Quando un fotone urta un elettrone fortemente legato all'atomo, nella formula  $\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \alpha)$  bisogna sostituire alla massa  $m_e$  dell'elettrone, quella molto più grande dell'atomo. Il risultato che ne segue è una variazione di lunghezza d'onda  $\lambda' - \lambda$  prossima a zero. In altre parole, in questo caso la radiazione diffusa ha la stessa lunghezza d'onda della radiazione incidente.

## 1.8 Stabilità degli atomi.

1. L'atomo di E. Rutherford. Il modello atomico a sistema solare. Bombardando un foglio d'oro con particelle  $\alpha$  (particelle cariche positivamente, nuclei di  ${}^4_2\text{He}$  formati da due protoni e due neutroni) si accorse che la maggior parte delle particelle attraversava il foglio senza subire alcuna deflessione, come se gli atomi dell'oro fossero costituiti prevalentemente da spazio vuoto. Inoltre alcune particelle  $\alpha$  venivano respinte indietro. In seguito a questi risultati sorprendenti Rutherford propose per l'atomo un modello simile al sistema solare: gli elettroni, molto leggeri e di carica negativa, orbitano attorno a un piccolissimo "nucleo" positivo nel quale è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo.

2. Le previsioni della fisica classica.

L'atomo di idrogeno è il più leggero tra tutti gli elementi: è costituito da un protone in cui è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo e da un elettrone che gli orbita intorno<sup>2</sup>. L'elettrone possiede accelerazione in quanto descrive un'orbita non rettilinea. Poiché una qualunque carica accelerata emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, l'elettrone mentre percorre la sua orbita deve emettere energia. Ciò determina una diminuzione di energia cinetica e di conseguenza di velocità. Pertanto l'elettrone dovrebbe collassare sul suo nucleo in circa  $10^{-9}$  secondi!

La fisica classica, ancora una volta, non riesce a predire i risultati degli esperimenti: l'atomo di idrogeno è stabile mentre la teoria classica deduce il contrario.

3. Il modello dell'atomo di idrogeno secondo Bhor.

- (a) L'elettrone può orbitare solo lungo orbite ben definite, ciò significa che i raggi delle orbite non possono cambiare in modo continuo. Il raggio della prima orbita quantistica dell'elettrone, diciamo l'orbita *I*, è 0,53 *Amstrong*, il raggio dell'orbita *II* è 4 volte più grande, quello dell'orbita *III* è 9 volte più grande e così via. I raggi crescono come i quadrati dei numeri naturali.
- (b) L'energia cinetica dell'elettrone che si muove su una delle orbite permesse è costante.
- (c) È possibile calcolare l'energia posseduta dall'elettrone in corrispondenza di ogni orbita: esso avrà energia minima sull'orbita *I*, man mano che ci si sposta su orbite più esterne, da *I* a *II* a *III* eccetera, l'energia assume valori via via crescenti. Inoltre la differenza tra due livelli energetici adiacenti diventa sempre minore.
- (d) L'atomo di idrogeno emette radiazione quando il suo elettrone si sposta da un'orbita a quella immediatamente inferiore. Per esempio se l'idrogeno allo stato gassoso viene attraversato da corrente elettrica l'elettrone che si trova sull'orbita *I* si trasferisce sulle orbite superiori. Dopo alcuni giri stazionari l'elettrone cade di nuovo nell'orbita immediatamente inferiore; durante questo "trasferimento", da un'orbita superiore a una inferiore, l'elettrone perde energia e l'energia perduta diventa radiazione.

---

<sup>2</sup>la massa del protone è circa 1840 più grande di quella dell'elettrone