

Chimica

Marco Militello

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Stati aggregazione della materia	2
1.2	Proprietà della materia	2
1.3	Composizione della materia	2
2	Teoria atomica	4
2.1	Teoria atomica di Dalton	4
2.2	Simbolo atomico, numero atomico e numero di massa	6
2.3	Atomi e molecole	6
3	Stechiometria	8
3.1	Equazioni chimiche	9
3.2	Percentuale in massa dalla formula chimica	10
3.3	Formule empiriche e molecolari	10
3.4	Equazioni chimiche	10
4	Teoria quantistica e spettri atomici	12
4.1	Debolezze modello planetario atomo	12
4.2	Luce	12
4.3	Radiazione di corpo nero e quantizzazione dell'energia	12
4.4	Quantizzazione dell'energia	13
4.5	Effetto fotoelettrico e fotoni	13
4.6	Spettro a righe dell'idrogeno	13
4.7	Dualismo onda particella di materia e energia	14
4.8	Principio di indeterminazione di Heisenberg	14
4.9	Il modello quantomeccanico dell'atomo	14
4.10	Numeri quantici e orbitali	14
4.11	Livelli energetici dell'atomo di idrogeno	15
4.12	Numeri quantici e il principio di esclusione di Pauli	15
4.13	Schermatura ed energia degli orbitali	15
4.14	Penetrazione ed energia dei sottolivelli	15
4.15	Separazione dei livelli in sottolivelli	16

Capitolo 1

Introduzione

La chimica è lo studio della materia, delle sue proprietà, delle trasformazioni subite dalla materia e dell'energia associata a queste trasformazioni

Materia Tutto ciò che ha una massa e un volume

Composizione I tipi e le quantità di sostanze più semplici che costituiscono la materia

Proprietà Le caratteristiche che conferiscono a ciascuna sostanza la sua identità esclusiva

1.1 Stati aggregazione della materia

- Un *solido* ha forma e volumi fissi. I solidi possono essere duri, teneri, rigidi o flessibili
- Un *liquido* si adatta alla forma del recipiente, ma un volume fisso. Un liquido forma una superficie
- Un *gas* si adatta alla forma del recipiente e lo riempie completamente, perciò non forma una superficie

1.2 Proprietà della materia

Proprietà fisiche

Le proprietà che una sostanza presenta di per sé senza trasformarsi in, o interagire con, un'altra sostanza

- colore, temperatura di fusione, densità

Proprietà chimiche

Le proprietà che una sostanza presenta quando si trasforma in, o interagisce con, un'altra sostanza

- infiammabilità, corrosività

1.3 Composizione della materia

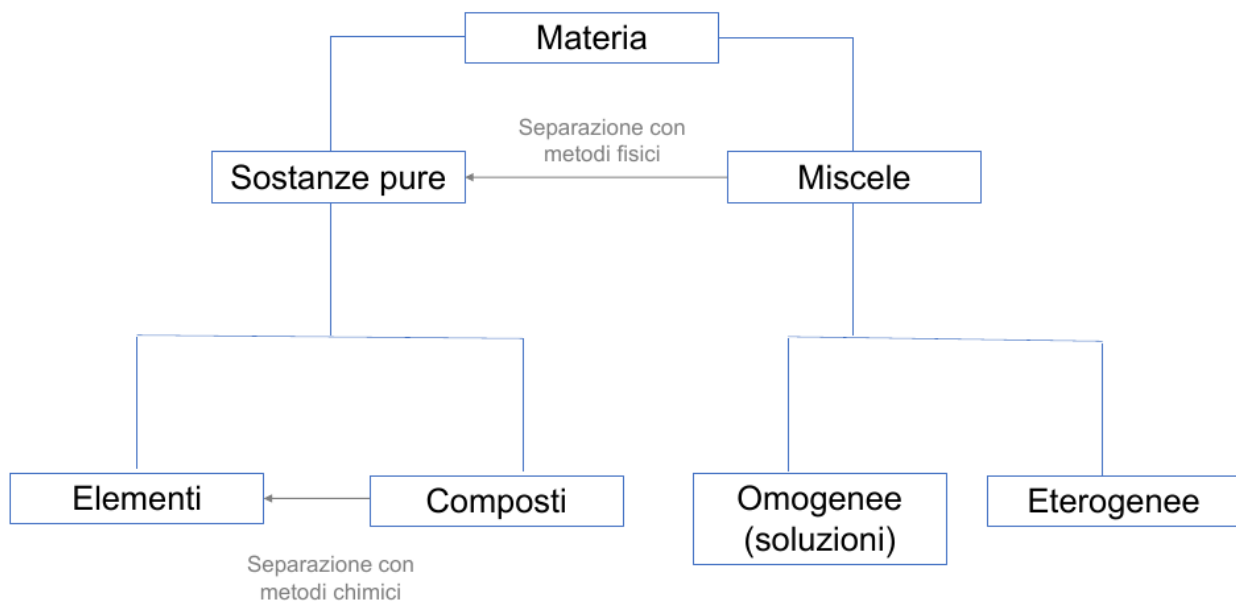
Sostanze pure

Una sostanza che ha proprietà e composizione proprie, che non dipendono dal campione

Le sostanze pure possono essere sostanze elementari (*elementi*) o *composti*. I composti possono essere trasformati in sostanze elementari tramite trasformazioni chimiche

Miscela

Una sostanza che ha una composizione variabile, le cui proprietà dipendono dal campione analizzato
Le miscele possono essere separate nelle sostanze costituenti mediante metodi fisici



Capitolo 2

Teoria atomica

2.1 Teoria atomica di Dalton

1. Tutta la materia è costituita da atomi, piccole particelle indivisibili di un elemento che non possono essere nè create, nè distrutte
2. Gli atomi di un elemento non possono essere convertiti in atomi di un altro elemento
3. Gli atomi di un elemento sono identici nella massa e nelle altre proprietà e sono diversi dagli atomi di qualsiasi altro elemento
4. I composti sono formati dalla combinazione di uno specifico rapporto di atomi differenti

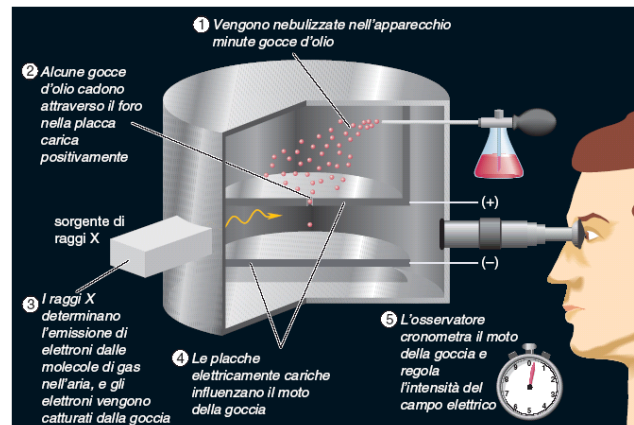
La teoria di Dalton spiega le leggi delle combinazioni chimiche

- Legge della composizione definita
Indipendentemente dalla sua fonte, un particolare composto chimico è costituito dagli stessi elementi negli stessi rapporti in massa
- Legge della conservazione della massa
In base al postulato 3 della legge di Dalton gli atomi, e quindi la loro massa, vengono conservati nelle reazioni chimiche

Scoperta delle particelle sub-atomiche: raggi catodici

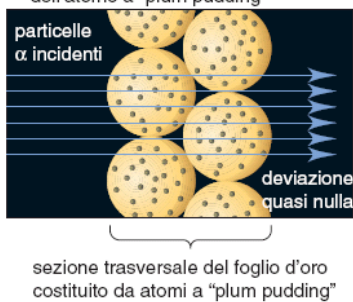
- Il raggio devia in presenza di un campo elettrico o magnetico \Rightarrow Consiste in particelle cariche di cui si determina il rapporto carica/massa
- In presenza di un campo elettrico esterno il raggio devia verso la ricca positiva \Rightarrow Consiste in particelle negative
- Il raggio è identico per ogni catodo \Rightarrow Le particelle fanno parte di tutta la materia

Esperimento di Millikan

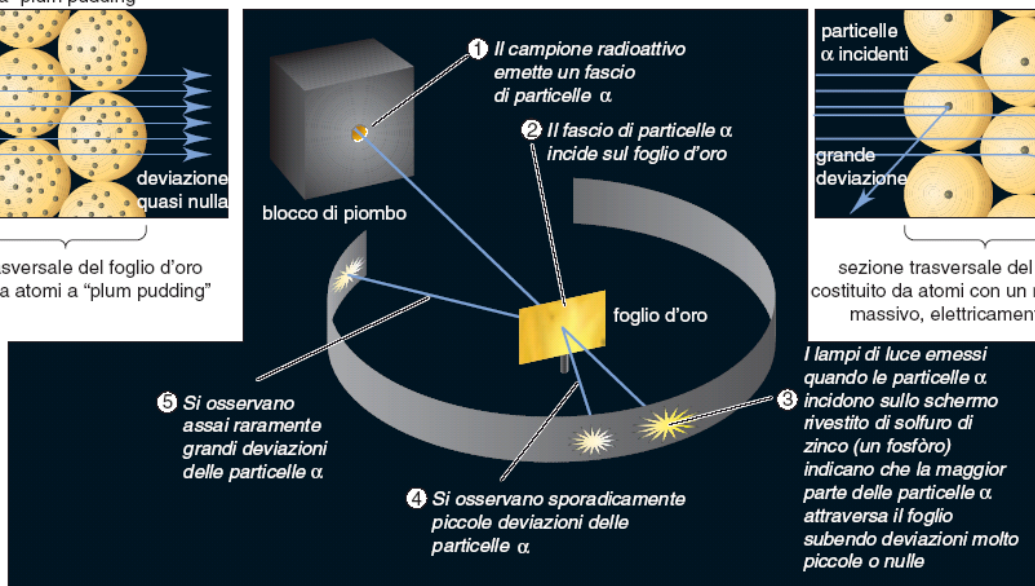


$$\text{massa elettrone} = \left(\frac{\text{massa}}{\text{carica}} \right) \text{carica} = 9.109 \times 10^{-28} g$$

A Ipotesi: il risultato atteso sulla base del modello dell'atomo a "plum pudding"



B Esperimento



C Risultato reale

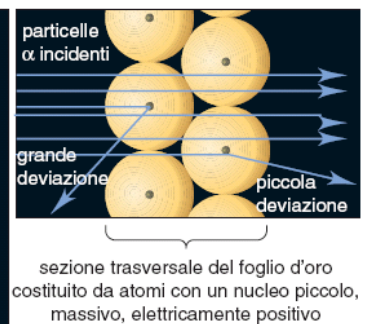
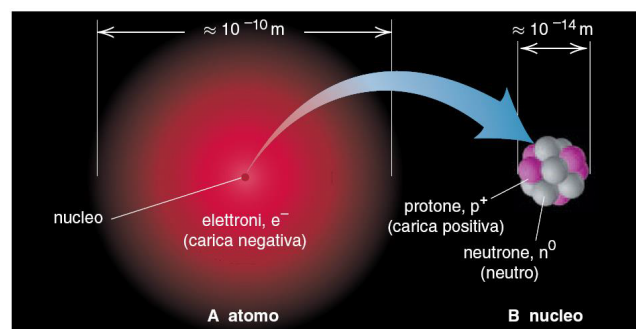


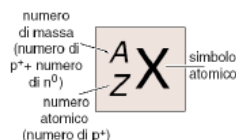
Figura 2.1:



A. Una nuvola di elettroni carichi negativamente, in modo rapido, occupa pressochè tutto il volume atomico e circonda il minuscolo nucleo centrale

- B. Il nucleo contiene pressochè tutta la massa dell'atomo ed è costituito da protoni carichi positivamente e neutroni elettricamente neutri

2.2 Simbolo atomico, numero atomico e numero di massa



X	simbolo atomico dell'elemento
Z	numero atomico (numero di protoni nel nucleo)
A	numero di massa

$$A = Z + N$$

Isotopi

Gli isotopi sono atomi di un elemento con lo stesso numero di protoni, ma con diverso numero di neutroni; gli isotopi hanno lo stesso numero atomico, ma diverso numero di massa

Teoria atomica moderna

1. Tutta la materia è costituita da atomi. L'atomo è la particella più piccola che identifica univocamente un elemento
2. Gli atomi di un elemento non possono trasformarsi negli atomi di un altro elemento in una trasformazione chimica. Elementi possono convertirsi in altri elementi solo in una reazione nucleare
3. Tutti gli atomi di un elemento hanno lo stesso numero di protoni e elettroni che determina il comportamento chimico dell'elemento. Gli isotopi di un elemento differiscono nel numero di neutroni, dunque nel numero di massa. Un campione di elemento viene considerato come se tutti i suoi atomi avessero una massa media
4. i composti sono formati dalla combinazione chimica di due o più elementi in rapporti specifici

Tecniche di separazione fondamentali

Filtrazione: separa i componenti di una miscela sulla base di differenze tra le dimensioni delle particelle. La filtrazione viene usata spesso per separare un solido da un liquido

Cristallizzazione: la separazione è basata sulle differenze di solubilità dei componenti di una miscela

Distillazione: separa i componenti sulla base di differenze di volubilità

Estrazione: la separazione è basata sulle differenze di solubilità in diversi solventi

Cromatografia: la separazione è basata sulle differenze di solubilità in una fase stazionaria

2.3 Atomi e molecole

Una molecola è un'unità strutturale indipendente costituita da uno o più atomi, tenuto insieme da legami chimici (legami covalenti). Una molecola è la più piccola particella di una sostanza che ne mantenga la composizione e le proprietà chimiche. Le molecole sono le unità fondamentali dei composti molecolari

Formule chimiche

In una formula chimica, i simboli degli elementi e i pedici numerici indicano la specie e il numero di ciascun atomo presente nella più piccola unità della sostanza. Esistono più tipi di formule chimiche di una composto

Formula empirica: mostra il numero relativo di atomi in ciascun elemento nel composto. È il tipo più semplice di formula chimica

Formula molecolare: mostra il numero reale di atomi di ciascun elemento in una molecola di composto

Formula di struttura: mostra il numero di atomi e i legami tra di essi, cioè le posizioni reciproche e le connessioni degli atomi nella molecola

Ione: un singolo atomo (ione monoatomico) o un gruppo di atomi (ione poliatomico) legati mediante legami covalenti che ha una carica netta

Catione: ione di carica positiva ($\# \text{ protoni} > \# \text{ elettroni}$)

Anione: ione di carica negativa ($\# \text{ elettroni} > \# \text{ protoni}$)

I composti ionici sono costituiti da ioni, che sono l'unità fondamentale

Capitolo 3

Stechiometria

Studio delle relazioni di massa in chimica

Masse atomiche: le masse relative gli atomi dei diversi elementi si esprimono secondo le loro masse atomiche

$$u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$$

Nella tavola periodica è riportata la massa atomica media pesata per l'abbondanza isotopica

Massa molecolare: la massa molecolare si ottiene sommando le masse atomiche secondo la formula chimica

Per i composti ionici si parla di massa formula perchè i composti ionici non sono costituiti da molecole

Mole

Le trasformazioni chimiche avvengono in seguito a reazioni tra atomi, molecole o ioni; è quindi fondamentale conoscere il numero di atomi presenti nella massa di sostanza sottoposta a reazione.

La **mole** (mol) è la quantità di sostanza che contiene tante entità elementari quante sono gli atomi in 12g di ^{12}C ; il termine entità si riferisce ad atomi, ioni, molecole, unità di formula, elettroni - ogni tipo di particelle

Una mole contiene 6.022×10^{23} entità; si chiama numero di Avogadro e si indica con N_A

Massa molare

La massa molare M di una sostanza è numericamente uguale alla massa di una mole di sue entità espressa in grammi; per gli elementi monoatomici, la massa molare, espressa in grammi per mole, è numericamente uguale alla massa atomica, espressa in unità di massa atomica. La massa atomica si legge sulla tavola periodica

Per gli elementi molari e per i composti, è necessario conoscere la formula per determinare la massa molare m : massa(g) n : numero di moli (mol) M : massa molare ($\frac{\text{g}}{\text{mol}}$) N_A : numero di Avogadro
 N : numero di entità

$$\begin{aligned} n &= \frac{m}{M} & m &= nM \\ n &= \frac{N}{N_A} & N &= nN_A \end{aligned}$$

Per un elemento Massa elemento \xrightarrow{M} Quantità di massa $\xrightarrow{\text{numero di Avogadro}}$ atomi elementi

Per un composto Massa composto \xrightarrow{M} Quantità di composto $\xrightarrow{\text{numero di Avogadro}}$ Molecole di composto

Percentuale in massa della formula chimica

$$\%A = \frac{m_A}{m_{totale}} \times 100$$

La percentuale in massa può anche essere utilizzata per calcolare la massa di un particolare elemento in una data massa di composto

Formule empiriche

La formula empirica è la formula più semplice di un composto che sia in accordo con le analisi elementari. Mostra i numeri di moli interi più piccoli e dà il numero di atomi relativo di ogni elemento

Formula molecolare

La formula molecolare mostra il numero reale di atomi di ciascun elemento in una molecola di composto. La formula molecolare è un multiplo secondo un numero intero della formula empirica

3.1 Equazioni chimiche

Un'equazione chimica è un enunciato in formula che esprime le identità e quantità delle sostanze che partecipano a una trasformazione chimica o fisica

Una freccia indica la trasformazione dei reagenti nei prodotti; i reagenti si scrivono a sinistra, mentre i prodotti a destra

L'equazione deve essere bilanciata: lo stesso numero e tipo di atomi deve comparire nei due membri dell'equazione

Bilanciare un'equazione chimica

- traduzione dell'enunciato
- bilanciare gli atomi usando i coefficienti stechiometrici: le formule non possono essere modificate
- correggere i coefficienti se necessario
- verificare che l'equazione sia bilanciata
- specificare lo stato fisico

Calcoli stechiometrici

I coefficienti in un'equazione chimica bilanciata rappresentano i numeri relativi di particelle di reagenti e prodotti e i relativi numeri di moli. Poiché le moli sono correlate alla massa, l'equazione può essere utilizzata per calcolare masse di reagenti e/o prodotti coinvolti in una data reazione; i rapporti molari derivanti dall'equazione bilanciata rappresentano i fattori di conversione

Reazioni in sequenza

Le reazioni avvengono spesso in sequenza: il prodotto di una reazione diventa il reagente della successiva; la reazione complessiva è la somma delle varie reazioni. Ogni sostanza che si forma in una reazione ed è utilizzata in quella successiva può essere eliminata

Reagenti limitanti

Un reagente può limitare la quantità di prodotto che si forma. Il reagente limitante sarà completamente consumato nella reazione, mentre parte del reagente che non è limitante (eccesso) rimarrà inalterata alla fine della reazione

Resa

Resa teorica: quantità di prodotto calcolata utilizzando i rapporti molari dell'equazione bilanciata

Resa effettiva: quantità di prodotto ottenuta nella realtà

$$\text{Resa percentuale} = \frac{\text{resa effettiva}}{\text{resa teorica}} \times 100$$

3.2 Percentuale in massa dalla formula chimica

$$\%A = \frac{m_A}{m_{tot}} \times 100$$

La percentuale in massa può anche essere utilizzata per calcolare la massa di un particolare elemento in una data massa di composto

3.3 Formule empiriche e molecolari

La formula empirica è la formula più semplice di un composto che sia in accordo con le analisi elementari. Mostra i numeri di moli interi più piccoli e dà il numero di atomi relativo di ogni elemento

Esempio. *La formula empirica del perossido di idrogeno è HO*

La formula molecolare mostra il numero reale di atomi di ciascun elemento in una molecola di composto

Esempio. *La formula molecolare del perossido di idrogeno è H₂O₂*

Determinare la formula molecolare

La formula molecolare mostra il numero reale di atomi di ciascun elemento in 1 mole di composto. La formula molecolare è un multiplo intero della formula empirica

$$\frac{\text{massa molecolare (g/mol)}}{\text{massa della formula empirica (g/mol)}} = \text{multiplo intero}$$

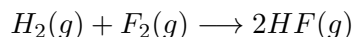
Si possono avere diversi composti che hanno la stessa formula molecolare, ma con proprietà

Esempio. *Etanolo e Dimetiletere*

3.4 Equazioni chimiche

Un'equazione chimica è un enunciato in formule che esprime le identità e le quantità delle sostanze che partecipano a una trasformazione chimica o fisica

Esempio.



Una freccia indica la trasformazione dei reagenti nei prodotti; i reagenti si scrivono a sinistra, i prodotti si scrivono a destra

L'equazione deve essere bilanciata: lo stesso numero e tipo di atomi deve comparire nei due membri dell'equazione

Per bilanciare un'equazione chimica bisogna seguire i seguenti passaggi

1. traduzione dell'enunciato
2. bilanciare gli atomi usando i coefficienti stechiometrici: le formule non possono essere modificate

3. correggere i coefficienti se necessario
4. verificare che l'equazione sia bilanciata
5. specificare lo stato fisico: solido (s), liquido puro (l), sostanza gassosa (g), ione o molecola in soluzione acquosa (aq)

I coefficienti in un'equazione chimica bilanciata rappresentano i numeri relativi di particelle di reagenti e prodotti e i relativi numeri di moli; poiché le moli sono correlate alla massa, l'equazione può essere utilizzata per calcolare masse di reagenti e/o prodotti coinvolti in una data reazione. I rapporti molari derivanti dall'equazione bilanciata rappresentano i fattori di conversione

Reazioni in sequenza

Le reazioni avvengono spesso in sequenza: il prodotto di una reazione diventa il reagente della successiva. la reazione complessiva (reazione netta) è la somma delle varie reazioni. Ogni sostanza che si forma in una reazione ed è utilizzata in quella successiva può essere eliminata

Capitolo 4

Teoria quantistica e spettri atomici

Gli atomi sono costituiti da nuclei estremamente piccoli come sede della quasi totalità della massa dell'atomo e di tutte le cariche positive; gli elettroni nel loro moto intorno al nucleo contribuiscono a dare volume all'atomo

4.1 Debolezze modello planetario atomo

Un nucleo e un elettrone si attraggono reciprocamente e quindi, affinché rimangano separati, l'energia cinetica degli elettroni deve bilanciare l'energia potenziale di attrazione nucleo-elettrone. Le leggi della fisica classica avevano stabilito che una particella negativa in moto in una traiettoria curva attorno ad una particella positiva doveva emettere radiazione e quindi perdere energia: quindi l'elettrone dovrebbe cadere sul nucleo con una traiettoria a spirale. Inoltre con questo modello non è possibile trattare gli atomi multi-elettronici (repulsione elettronica) e la formazione reversibile di legami chimici tra atomi. Per spiegare il comportamento degli elettroni nell'atomo dobbiamo abbandonare i concetti della fisica classica e introdurre i concetti della fisica quantistica. La comprensione del comportamento degli elettroni dell'atomo è derivato dall'analisi della luce emessa o assorbita dalle sostanze

4.2 Luce

La luce visibile è un tipo di radiazione elettromagnetica, detta anche energia radiante. Le proprietà ondulatorie delle radiazioni elettromagnetiche sono descritte da tre variabili

- frequenza (ν): cicli al secondo
- lunghezza d'onda (λ): distanza percorsa dall'onda in un ciclo
- ampiezza: l'altezza di massimo e la profondità di un minimo

La velocità della radiazione elettromagnetica è una costante

$$c = \nu\lambda = 3.00 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Fenomeno importante che riguarda le onde è la formazione di figure di interferenza

4.3 Radiazione di corpo nero e quantizzazione dell'energia

Un corpo solido emette luce visibile quando viene riscaldato a circa 1000 K. Questa radiazione è chiamata radiazione di corpo nero.

Il colore e l'intensità della luce variano al variare della temperatura. Il colore è correlato alla lunghezza d'onda e alla frequenza, mentre la temperatura è correlata all'energia. L'energia è perciò correlata alla lunghezza d'onda e alla frequenza:

$$E = nh\nu$$

dove n è un numero positivo e h è la costante di Planck che vale $6.626 \times 10^{-34} Js$

4.4 Quantizzazione dell'energia

Ogni oggetto (inclusi gli atomi) può emettere o assorbire determinate quantità di energia. L'energia è quantizzata: esiste solo in quantità fisse invece di essere continua. Ogni quantità fissa di energia è detta quanto. Un atomo può cambiare il suo stato energetico solo mediante l'assorbimento o l'emissione di quanti di energia

$$\Delta E = nh\nu$$

con $h\nu$ energia di quanto

Noi non ci accorgiamo che l'energia è quantizzata perché la costante di Planck è molto piccola e quindi la quantizzazione dell'energia non impatta il mondo macroscopico, ma diventa rilevante a livello atomico

4.5 Effetto fotoelettrico e fotoni

La luce incidente che impatta su una superficie metallica causa l'emissione di elettroni. Una frequenza minima della luce, diversa per ogni metallo è necessaria per avere emissione di elettroni. Per spiegare l'effetto fotoelettrico, Einstein assunse che la radiazione elettromagnetica si comportasse come un fascio di pacchetti di energia, che chiamò fotoni.

$$E = h\nu \quad \text{energia fotone}$$

Gli elettroni vengono emessi dal metallo solo se i fotoni hanno energia (e quindi frequenza) sufficiente a vincere le forze attrattive che tengono l'elettrone al metallo

4.6 Spettro a righe dell'idrogeno

Analisi spettrale di una radiazione policromatica (contenente diverse lunghezze d'onda)

Tre serie di righe spettrali per l'atomo di idrogeno

Equazione di Rydberg

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

con R_H costante di Rydberg che vale $1.096776 \times 10^7 m^{-1}$; per la serie visibile $n_1 = 2$ e $n_2 = 3, 4, 5, \dots$

Modello di Bohr atomo di idrogeno

Il modello atomico di Bohr è basato su 3 postulati:

1. L'atomo di idrogeno ha soltanto certi livelli energetici permessi (stati stazionari) a ognuno dei quali è associata un'orbita circolare fissa dell'elettrone attorno al nucleo
2. L'atomo non irraggia energia mentre è in uno dei suoi stati stazionari
3. L'atomo compie una transizione in un altro stato stazionario soltanto assorbendo o emettendo un fotone la cui energia è uguale alla differenza di energia dei due stati ($\Delta E = h\nu$)

Quando l'elettrone dell'atomo di idrogeno H si trova nella prima orbita, l'atomo è nello stato fondamentale, il livello energetico più basso. Quando l'elettrone è in una qualsiasi orbita con $n > 1$ l'atomo è in uno stato eccitato

4.7 Dualismo onda particella di materia e energia

Materia ed energia sono forme alternative della stessa entità

$$E = mc^2$$

Tutta la materia mostra proprietà sia delle particelle che delle onde. Gli elettroni si muovono di moto ondulatorio e possono avere soltanto certi valori permessi di frequenze ed energie. Anche la materia ha natura ondulatoria, e la lunghezza d'onda di de Broglie per una qualsiasi particella è data da

$$\lambda = \frac{h}{mu}$$

con m massa e u velocità

4.8 Principio di indeterminazione di Heisenberg

Non è possibile conoscere simultaneamente posizione esatta e quantità di moto esatta di una particella

$$\Delta x \cdot m\Delta u \geq \frac{h}{4\pi}$$

Maggiore è l'accuratezza con cui conosciamo la velocità, minore è l'accuratezza con cui conosciamo la posizione e viceversa

4.9 Il modello quantomeccanico dell'atomo

La materia-onda associata all'elettrone si muove nello spazio attorno al nucleo da cui è continuamente influenzata. L'elettrone è descritto da una funzione d'onda. L'equazione d'onda di Schrodinger ci permette di calcolare i livelli energetici permessi per gli elettroni in un atomo. Il quadrato della funzione d'onda dà la densità di probabilità, una misura della probabilità di trovare un elettrone con una particolare energia in una particolare regione dell'atomo

4.10 Numeri quantici e orbitali

La soluzione dell'equazione di Schrodinger per l'atomo di idrogeno dà luogo a un set di funzioni d'onda chiamate orbitali. Un orbitale atomico è specificato da 3 numeri quantici

- Il numero quantico principale (n) è un intero positivo. Il valore di n indica la dimensione relativa dell'orbitale e, conseguentemente, la sua distanza relativa dal nucleo
- Il numero quantico del momento angolare (l) è un numero intero compreso tra 0 e (n-1). Il valore di l indica la forma dell'orbitale
- Il numero quantico magnetico (m_l) è un numero intero compreso tra -l e +l. Il valore di m indica l'orientazione dell'orbitale

Numeri quantici per gli orbitali atomici

valore di l	0	1	2	3
lettera usata per rappresentare orbitale	s	p	d	f

Le lettere usate per rappresentare gli orbitali derivano dalle caratteristiche delle linee spettrali

- s: sharp
- p: principal
- d: diffuse
- f: fundamental

Gli orbitali 1s, 2s e 3s

Per ogni orbitale ns il numero di picchi è uguale a n, dove l'intensità dei picchi aumenta allontanandosi dal nucleo. Per ogni orbitale ns il numero di n è uguale a n-1. All'aumentare di n la densità elettronica diventa più diffusa: vi è una maggiore probabilità di trovare l'elettrone più lontano dal nucleo

4.11 Livelli energetici dell'atomo di idrogeno

Per l'atomo di idrogeno l'energia degli orbitali dipende solo dal numero quantico principale n. L'energia ha la stessa espressione dedotta dall'analisi degli spettri dell'atomo di idrogeno

nome	simbolo	valori permessi	proprietà
principale	n	interi positivi (1,2,3,...)	energia (dimensione) dell'orbitale
momento angolare	l	interi da 0 a n-1	Forma dell'orbitale
magnetico	m_l	interi da -l a +l	orientazione dell'orbitale
spin	m_s	$+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$	direzione orientata dello spin dell'elettrone

4.12 Numeri quantici e il principio di esclusione di Pauli

Ogni elettrone in un atomo è descritto da un insieme di 4 numeri quantici. I primi 3 numeri quantici descrivono l'orbitale, il quarto lo spin dell'elettrone

Principio di esclusione di Pauli: in un atomo non possono esistere 2 elettroni aventi lo stesso insieme di numeri quantici. Un orbitale può contenere al massimo due elettroni e questi devono avere spin antiparallelo

Fattori che influenzano l'energia degli orbitali atomici

Le energie degli orbitali sono influenzate da

- carica nucleare Z
- schermatura da parte degli altri elettroni
- forma dell'orbitale (influenza energia dei sottolivelli)

Una carica nucleare maggiore aumenta l'interazione nucleo-elettrone e abbassa l'energia di un sottolivello. La schermatura da parte degli elettroni riduce la carica nucleare a una carica nucleare effettiva Z_{eff} (carica nucleare a cui l'elettrone è effettivamente soggetto)

4.13 Schermatura ed energia degli orbitali

Gli elettroni nello stesso livello di schermo reciprocamente. Gli elettroni in orbitali interni schermano gli elettroni esterni più efficacemente. Maggiore è la distanza dal nucleo di un elettrone, minore è la Z_{eff} per quell'elettrone

4.14 Penetrazione ed energia dei sottolivelli

La forma dell'orbitale fa sì che gli elettroni in alcuni orbitali "penetrino" più vicino al nucleo. La penetrazione aumenta l'attrazione nucleare e diminuisce la schermatura. Il sottolivello 2s è più stabile del 2p perché penetra più vicino al nucleo

4.15 Separazione dei livelli in sottolivelli

Ogni livello energetico è separato in sottolivelli di diversa energia. La separazione è causata dall'effetto della penetrazione e della schermatura. Per un dato valore di n , minore è il valore di l , più bassa è l'energia dei sottolivelli:

$$s < p < d < f$$

Le energie relative dei sottolivelli aumentano all'aumentare del numero quantico principale n ($1 < 2 < 3, \dots$) e all'aumentare del momento angolare l ($s < p < d < f$). All'aumentare di n , le energie dei sottolivelli di avvicinano.