

# Der Karlsruher Physikkurs



Volume 3

Reazioni  
Onde  
Atomi

---

Traduzione italiana - settembre 2006

Repubblica e Cantone Ticino  
Dipartimento dell'educazione, della cultura e dello sport  
Divisione della scuola / Centro didattico cantonale

Eduard-Job-Stiftung  
für Thermo- und Stoffdynamik  
D - Ahrensburg

Titolo originale dell'opera:

F. Herrmann

**Der Karlsruher Physikkurs**

Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I  
Volume 3

Edizione italiana: settembre 2006

Redazione: Karen Haas, Prof. Friedrich Herrmann, Dr. Matthias Laukenmann,  
Dr. Lorenzo Mingirulli, Dr. Petra Morawietz, Dr. Peter Schmäzle

Traduzione: Paolo Pianezzi

Disegni: F. Herrmann, esclusi 29.1-29.6, 29.8, 30.2, 30.17, 30.18, 31.1-31.5, 31.7, 31.8, 31.12,  
31.21-31.34 (M. Laukenmann) e 30.1 (G. Cox, Forschungszentrum Jülich)

Tabella dei potenziali chimici: G. Job, P. Morawietz

Tabella delle energie di separazione: K. Haas

[www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de)

[www.scuoladecs.ti.ch](http://www.scuoladecs.ti.ch)

# Indice

## REAZIONI

<b>24. Trasformazioni di sostanze e potenziale chimico</b> .....	9
24.1 Quantità di sostanza e intensità della corrente di sostanza .....	9
24.2 Trasformazioni e tasso di trasformazione .....	11
24.3 Il potenziale chimico .....	13
24.4 Potenziale chimico e tasso di trasformazione .....	15
24.5 La resistenza di reazione .....	16
<b>25. Quantità di sostanza ed energia</b> .....	19
25.1 Pompe di reazione .....	19
25.2 Tasso di trasformazione e corrente di energia .....	20
25.3 L'inversione della pompa di reazione .....	21
<b>26. Bilancio termico delle reazioni</b> .....	23
26.1 Produzione di entropia nelle reazioni chimiche .....	23
26.2 Il bilancio entropico delle reazioni chimiche .....	24

## MASSA ED ENERGIA

<b>27. Fisica relativistica</b> .....	29
27.1 Massa uguale energia .....	29
27.2 L'energia ha le caratteristiche della massa .....	29
27.3 La massa ha le caratteristiche dell'energia .....	31

## ONDE SONORE, ONDE ELETTROMAGNETICHE, FOTONI

<b>28. Onde</b> .....	35
28.1 Il portatore delle onde .....	35
28.2 Trasporto di energia in un'onda .....	36
28.3 La velocità delle onde .....	36
28.4 Oscillazioni .....	37
28.5 Onde sinusoidali .....	39
28.6 La relazione tra velocità, frequenza e lunghezza d'onda .....	40
28.7 Onde sonore .....	40
28.8 Onde elettromagnetiche .....	42
28.9 Onde stazionarie - Interferenza .....	44
<b>29. Fotoni</b> .....	51
29.1 Reazioni chimiche con la luce .....	51
29.2 Fotoni .....	52

29.3	La grandezza dei fotoni .....	54
29.4	Energia e quantità di moto dei fotoni .....	54
29.5	Una reazione chimica in dettaglio .....	56
29.6	Fotoni e interferenza .....	56

## LA NUBE ELETTRONICA

<b>30. Atomi</b> .....	61	
30.1	La struttura degli atomi .....	62
30.2	Grandezza e densità della nube elettronica .....	63
30.3	I diversi stati degli atomi .....	65
30.4	L'eccitazione degli atomi con i fotoni .....	66
30.5	Il ritorno allo stato fondamentale .....	67
30.6	Il tempo di dimezzamento degli stati eccitati .....	68
30.7	L'eccitazione degli atomi con gli elettroni .....	69
30.8	I gas come sorgenti di luce .....	70
30.9	Lo spettro dei gas .....	70
30.10	Perché la fiamma fa luce .....	72
<b>31. I solidi</b> .....	75	
31.1	Disposizione degli atomi nei gas, nei liquidi e nei solidi .....	75
31.2	La distribuzione dell'elettronio nei solidi .....	76
31.3	La scala di energia dei solidi .....	77
31.4	Quando la luce colpisce i metalli .....	78
31.5	Quando la luce colpisce dei non-metalli .....	79
31.6	I solidi come sorgenti di luce .....	81
31.7	Come i solidi conducono l'elettricità .....	81
31.8	Come fare di un non-metallo un conduttore di elettricità .....	82
31.9	Il diodo .....	83
31.10	Il transistor .....	85

## IL NUCLEO ATOMICO

<b>32. Nuclei atomici</b> .....	89	
32.1	La struttura dei nuclei atomici .....	89
32.2	Elementi, nuclidi, isotopi .....	90
32.3	L'eccitazione dei nuclei .....	94
32.4	L'energia di separazione .....	95
32.5	Grandezze conservate .....	96
32.6	Particelle e antiparticelle .....	96
32.7	Bilanci della carica .....	97
32.8	La direzione di una reazione .....	98
32.9	Radiazione nucleare .....	100
32.10	Il tasso di trasformazione in una reazione nucleare .....	102
32.11	Il tempo di dimezzamento .....	103
32.12	Il Sole .....	104
32.13	Il reattore nucleare .....	106

<b>Appendice</b> .....	111
Tavola periodica degli elementi .....	111
Tabella dei potenziali chimici e delle entropie molari .....	113
Tabella delle energie di separazione .....	127
<b>Indice analitico</b> .....	133



R e a z i o n i



## 24. Trasformazioni di sostanze e potenziale chimico

Cominciamo da una definizione della chimica: la chimica si occupa delle trasformazioni delle sostanze. Descrive per esempio la reazione tra benzina e diossigeno in anidride carbonica e acqua, cioè la combustione della benzina:

benzina, diossigeno  $\rightarrow$  anidride carbonica, acqua

Questa definizione della chimica è ancora provvisoria, visto che i chimici non si occupano solamente di trasformazioni delle sostanze; d'altro canto ci sono trasformazioni che non riguardano la chimica ma la fisica nucleare. Ma per cominciare può bastare questa definizione.

La chimica e la fisica sono strettamente connesse. In effetti sarebbe ragionevole riunire fisica e chimica in un'unica disciplina nell'ambito delle scienze naturali. Il fatto che fisica e chimica siano due materie diverse, che esse si studino separatamente anche a livello universitario e il fatto che quella del fisico e del chimico siano professioni distinte, dipende piuttosto da considerazioni pratiche: un'unica disciplina fisica-chimica sarebbe semplicemente troppo vasta da padroneggiare per una sola persona.

Molte delle metodologie di lavoro dei fisici e dei chimici sono molto simili. E anche in chimica si può lavorare con gli stessi strumenti teorici usati in fisica: le reazioni chimiche possono essere descritte con l'aiuto di grandezze fisiche e delle relazioni tra queste grandezze. L'area della chimica molto legata alla fisica viene anche detta *chimica fisica*.

Alcune delle grandezze che si usano in chimica fisica ti sono già note: la temperatura, la pressione e l'entropia. Verranno introdotte anche alcune nuove grandezze.

In termologia era stata introdotta una grandezza per misurare la *quantità* di calore: l'entropia  $S$ , tabella 24.1. In elettrologia si ha a che fare con una grandezza che misura la *quantità* di elettricità: la carica elettrica, o elettricità,  $Q$ . In meccanica c'è una grandezza che permette di quantificare il movimento di un corpo: la *quantità* di moto  $p$ .

Allo stesso modo in chimica abbiamo bisogno di una grandezza che ci permetta di misurare la *quantità* di una sostanza. Si chiama *quantità di sostanza* e si abbrevia con  $n$ .

Nelle aree della fisica appena citate avevamo a che fare anche con un'altra grandezza, una grandezza che indica da dove a dove scorre la quantità corrispondente.

Per esempio la differenza di temperatura indica in che direzione scorre l'entropia, cioè dalla temperatura più alta a quella più bassa. Il potenziale elettrico indica in che direzione scorre l'elettricità e dalle velocità dei corpi in moto possiamo dedurre in che direzione scorre la quantità di moto in caso di urto.

Analogamente impareremo a conoscere una grandezza "chimica" che indica in quale direzione si svolge una reazione chimica. Questa grandezza è il *potenziale chimico*, abbreviato con la lettera greca  $\mu$ . Il potenziale chimico indica per esempio se la seguente reazione accade spontaneamente da destra a sinistra o da sinistra a destra:

diossigeno, diazoto  $\rightleftharpoons$  ammoniaca,

cioè se da diossigeno e diazoto si ottiene spontaneamente ammoniaca o se l'ammoniaca si scompone spontaneamente in diossigeno e diazoto.

### 24.1 Quantità di sostanza e intensità della corrente di sostanza

Come suggerito dal suo nome, la quantità di sostanza misura la quantità presente di una certa sostanza. L'unità di misura della quantità di sostanza è la *mole*. Una porzione di sostanza equivalente a 1 mol contiene  $6,022 \cdot 10^{23}$  particelle.

Non è sempre facile stabilire quale sia la particella più piccola di una certa sostanza.

Tabella 24.1. Alcune grandezze della fisica e della chimica

meccanica	$p$ = quantità di moto
elettrologia	$Q$ = carica elettrica (quantità di elettricità)
termologia	$S$ = entropia (quantità di calore)
chimica	$n$ = quantità di sostanza

Spesso le particelle più piccole sono molecole. Così 1 mol di diidrogeno gassoso contiene  $6,022 \cdot 10^{23}$  molecole di  $H_2$ . Per altre sostanze le particelle più piccole sono atomi, ad esempio per l'elio. Una mole di elio è composta da  $6,022 \cdot 10^{23}$  atomi He. Per la maggior parte dei solidi la situazione è più complicata. Un cristallo di sale da cucina dovrebbe essere considerato come un'unica gigantesca molecola. Quindi in questo caso sarebbe il cristallo la particella più piccola. Di solito però si indica come particella più piccola un solo ione  $Na^+$  assieme ad un solo ione  $Cl^-$ . Ma questa "unità NaCl" in effetti non è affatto una molecola in senso stretto. In futuro, quando ci riferiremo a una mole di sale da cucina intenderemo però sempre  $6,022 \cdot 10^{23}$  di queste unità NaCl.

Invece di dire che una sostanza è composta da queste particelle elementari si può anche dire che esiste una quantità minima di questa sostanza, e questa quantità può essere espressa in moli. Chiamiamo questa porzione minima di una sostanza *quantità elementare* di particelle. Vale:

$$6,022 \cdot 10^{23} \text{ particelle} : 1 \text{ mol} \\ 1 \text{ particella} : \frac{1}{6,022 \cdot 10^{23}} \text{ mol}$$

$$= 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ mol}$$

oppure:

quantità elementare di sostanza =  $1,66 \cdot 10^{-24}$  mol.

I chimici misurano la quantità di una sostanza in moli. Ma perché? Perché non fanno come tutte le persone "ragionevoli" e esprimono la quantità di una certa sostanza in chilogrammi o in litri? Perché esprimendo le quantità in moli la chimica diventa molto più semplice. La chimica diventa più facile usando la quantità di sostanza invece della massa o del volume.

Per spiegarlo immaginiamo una discussione tra un musicista, un fisico e un chimico:

*In una provetta si trova della polvere di ferro, in un'altra dello zolfo.*

*Musicista:* Cosa sono, ferro e zolfo?

*Fisico:* Sì, si vede no?

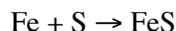
*Musicista:* Ah. C'è più zolfo che ferro, circa il doppio, anche questo si vede.

*Fisico:* Assolutamente no! Prenda in mano le provette, non sente che il ferro è molto più pesante? Prego, osservi la bilancia: 14g di ferro e solo 8 g di zolfo.

*Chimica:* Come scusi? Io la vedo diversamente, guardate qui. (Mescola le due sostanze e le riscalda con un becco Bunsen. La miscela brucia, quindi sta avvenendo una reazione.) Dopo la reazione non restano né ferro né zolfo. Questo prova che c'erano la stessa quantità di ferro e di zolfo. A proposito, erano esattamente  $1/4$  mol ciascuna.

Dal dialogo si capisce come le classificazioni del tipo "di più" o "di meno" dipendono dalla misura della quantità scelta come riferimento.

Per comprendere meglio la discussione tra le tre persone esaminiamo l'equazione di reazione provocata dal chimico:

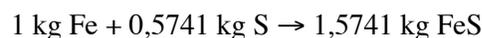


Grazie a questa equazione è molto più facile fare delle affermazioni sul bilancio della reazione, a condizione di misurare le quantità delle sostanze in moli. L'equazione dice che la quantità di sostanza del ferro e dello zolfo sono uguali e che la quantità di sostanza del solfuro di ferro che si ottiene è la stessa di quella del ferro che è stato utilizzato (e quindi anche dello zolfo).

Se in partenza abbiamo 1 mol di ferro, allora:



Per contro, misurando le porzioni delle sostanze in kg, cioè se misuriamo la loro massa, il bilancio è più complicato. Facciamo reagire per esempio 1 kg di ferro. Vengono utilizzati 0,5741 kg di zolfo e si ottengono 1,5741 kg di solfuro di ferro:



Le masse dello zolfo e del solfuro di ferro sono espresse da numeri "strani".

Vogliamo fare un altro esempio per chiarire cosa può esprimere l'equazione di una reazione. Consideriamo la reazione tra diidrogeno e diossigeno che produce acqua. Dal corso di chimica sai che questa reazione è:



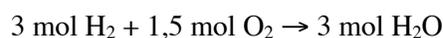
Questa equazione ci dice quali sono le proporzioni tra le quantità delle sostanze coinvolte nella reazione, a condizione di misurarle in moli (e non in kg). Ci dice quindi che:

$$n(H_2) : n(O_2) : n(H_2O) = 2 : 1 : 2$$

L'equazione (1) indica qual è il *rapporto* tra le grandezze  $n(H_2)$ ,  $n(O_2)$  e  $n(H_2O)$ . Quindi l'equazione non vuol dire necessariamente



Potrebbe anche essere



oppure



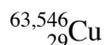
Visto che l'equazione della reazione indica solo quali sono i rapporti tra le quantità di sostanza, ognuna di queste equazioni può essere scritta in infiniti modi diversi. Per esempio l'equazione (1) potrebbe diventare





Tutte e tre le equazioni (1), (2) e (3) dicono la stessa cosa. In generale però, le equazioni di reazione vengono scritte in modo che davanti ai simboli delle sostanze ci siano i più piccoli numeri interi possibili. Nel nostro esempio è l'equazione (1). Chiamiamo *bilanciata* questa forma dell'equazione.

D'ora in poi useremo la grandezza  $n$ , cioè la quantità di sostanza, come misura della quantità di una sostanza. Per la determinazione dei valori della quantità di materia non abbiamo però a disposizione un apparecchio di misurazione come nel caso della massa. (La massa si misura con la bilancia.) Per determinare il valore della quantità di sostanza è necessario prendere un'altra strada: nella tavola periodica è indicata la massa di una mole di ogni elemento chimico. Il numero in alto prima del simbolo dell'elemento è la massa per quantità di sostanza, cioè il quoziente  $m/n$ . È da notare che questo valore non è espresso in kg/mol ma in g/mol. Così ad esempio per il rame:



Quindi per il rame

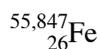
$$m/n = 63,546 \text{ g/mol.}$$

Ciò significa che una mole di rame pesa 63,546 g, in altre parole: una porzione di rame che ha una quantità di materia di 1 mol, pesa 63,546 g.

Per determinare la massa di una mole di un composto chimico basta sommare i valori  $m/n$  delle componenti del composto. Se in una molecola un certo tipo di atomo compare due, tre, ecc. volte, il corrispondente valore  $m/n$  va contato due, tre, ecc. volte.

*Esempio:* qual è la massa di 1 mol di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ?

Nella tavola periodica leggiamo per il ferro



e per l'ossigeno



Quindi la massa di una mole di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  è

$$m = 2 \cdot 55,847 \text{ g} + 3 \cdot 15,999 \text{ g} = 159,7 \text{ g.}$$

Spesso una reazione chimica avviene in modo continuo, per esempio la reazione di combustione nella fiamma di una candela o nella caldaia di un impianto di riscaldamento. Anche la maggior parte delle reazioni nell'industria chimica sono ininterrotte. Per dire a qualcuno la quantità di una certa sostanza prodotta da queste reazioni, non si può dare un valore, visto che la quantità di sostanza dei prodotti della reazione aumenta costantemente. Un modo più ragionevole consiste nell'indicare la quantità di sostanza prodotta per unità di tempo, cioè il numero di moli al secondo prodotte o il numero di moli al secondo che escono dallo spazio dove avviene la reazione.

Chiamiamo questa grandezza *l'intensità della corrente di materia*  $I_n$ . Quindi

$$I_n = \frac{n}{t}$$

L'unità di misura dell'intensità della corrente di materia è mol/s.

### Esercizi

1. Qual è la massa di 1 mol delle seguenti sostanze?

$\text{H}_2\text{O}$  (acqua)

$\text{O}_2$  (diossigeno)

$\text{CO}_2$  (anidride carbonica)

$\text{Ag}_2\text{S}$  (solfuro d'argento)

$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  (nitrato di piombo)

$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  (zucchero di canna)

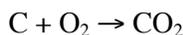
2. Quante moli di zucchero sono contenute in 100 g di caramelle? (Le caramelle sono praticamente zucchero di canna al 100%)

3. Qual è la quantità di sostanza di 1 L d'acqua?

4. Una bombola contiene 12 kg di propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ). Quante moli sono?

## 24.2 Trasformazioni e tasso di trasformazione

Eseguiamo per due volte la combustione del carbonio, secondo la reazione



La prima volta bruciamo una mole di carbonio, quindi



La seconda volta bruciamo 5 moli di carbonio, cioè



Nel secondo caso le quantità di sostanza trasformate sono maggiori. Diciamo che la *trasformazione* della reazione nel secondo caso è cinque volte maggiore che nel primo.

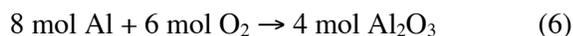
Confrontiamo ora due diverse reazioni: l'ossidazione dell'alluminio



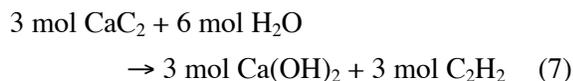
e la formazione di etino e idrossido di calcio a partire da carburo di calcio e acqua



Immaginiamo che nel primo caso vengano ossidate 8 moli di alluminio, cioè



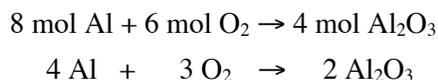
e nel secondo siano prodotte 3 moli di etino



In quale reazione si è trasformato di più? Se confrontiamo i reagenti, allora nella prima reazione si è trasformato di più: in totale reagiscono 14 mol. Nella seconda la quantità totale di reagenti è di 9 mol. Se invece consideriamo le quantità dei prodotti, allora vince la seconda reazione. Nella seconda sono prodotte 6 moli, nella prima solo 4.

Sarebbe utile avere un'unico criterio di misura della trasformazione.

Consideriamo la reazione (6). Sotto l'equazione della reazione con le quantità delle varie sostanze espresse in moli, scriviamo l'equazione bilanciata:



Concentriamoci su una qualsiasi delle sostanze presenti nell'equazione, per esempio l'alluminio. Ora dividiamo la quantità di alluminio trasformata per il numero che appare prima dell'alluminio nella forma bilanciata:

$$\frac{8 \text{ mol}}{4} = 2 \text{ mol}$$

Se facciamo lo stesso per un'altra sostanza coinvolta nella reazione, otteniamo lo stesso risultato. Per il diossigeno:

$$\frac{6 \text{ mol}}{3} = 2 \text{ mol}$$

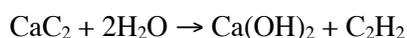
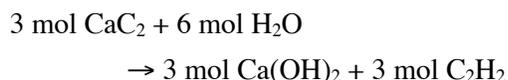
e per l'ossido di alluminio

$$\frac{4 \text{ mol}}{2} = 2 \text{ mol}$$

Definiamo questo risultato, ottenuto in tre modi diversi, la trasformazione della reazione, in simboli  $n(\text{R})$ . Quindi:

$$n(\text{R}) = \frac{\text{quantità di X trasformata}}{\text{numero prima di X nella forma bilanciata}}$$

Qui X sta per una qualsiasi delle sostanze coinvolte nella reazione. Appliciamo questo metodo all'equazione della reazione (7).



Scegliamo i valori dell' $\text{H}_2\text{O}$ . Otteniamo

$$n(\text{R}) = 6 \text{ mol} / 2 = 3 \text{ mol.}$$

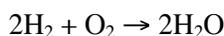
Anche in questo caso otterremo lo stesso risultato scegliendo un'altra delle sostanze coinvolte nella reazione.

Vogliamo ora confrontare tra loro due reazioni che durano nel tempo. Non è più possibile considerare la trasformazione della reazione, visto che aumenta costantemente. Ciò che dobbiamo confrontare è la trasformazione per unità di tempo, cioè il *tasso di trasformazione*  $I_{n(\text{R})}$ .

$$I_{n(\text{R})} = \frac{n(\text{R})}{t}$$

L'unità di misura del tasso di trasformazione è quindi mol/s.

Ipotizziamo che la reazione



si svolga ad un tasso di

$$I_{n(\text{R})} = 0,02 \text{ mol/s.}$$

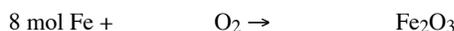
Moltiplichiamo l'equazione in forma bilanciata (in questo caso lo è già) per 0,02 mol/s



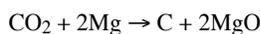
Quindi, ad un tasso di reazione di 0,02 mol/s, ogni secondo 0,04 mol di diidrogeno e 0,02 mol di diossigeno reagiscono e producono 0,04 mol d'acqua.

### Esercizi

1. Completa la seguente equazione e indica la trasformazione della reazione



2. L'anidride carbonica può reagire con il magnesio per produrre carbonio e ossido di magnesio



a) Sono prodotti 4 g di carbonio. Scrivi l'equazione con i valori delle quantità di sostanza coinvolte.

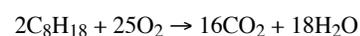
b) Quanti grammi di anidride carbonica e quanti grammi di magnesio reagiscono?

c) Quante molecole di  $\text{CO}_2$  scompaiono?

d) A quanto ammonta la trasformazione della reazione?

3. In una fiamma di metano sono prodotte 0,1 mol d'acqua al secondo. Qual è il tasso di trasformazione?

4. Nel cilindro di un motore d'automobile viene bruciata della benzina. Per semplicità immaginiamo che la benzina sia composta di ottano puro:

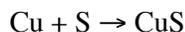


Qual è il tasso di trasformazione se su un tratto di 100 km sono prodotti 10 L d'acqua e l'auto viaggia a 50 km/h?

### 24.3 Il potenziale chimico

Ipotizziamo che le sostanze A1, A2, A3, ... siano in grado di reagire tra loro e produrre le sostanze B1, B2, B3, ... Con "siano in grado" si intende che l'equazione permetta che questa reazione avvenga.

(Ad esempio, la reazione

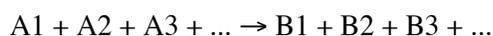


in linea di principio è permessa, mentre per



il bilancio per il rame non è rispettato.)

Quindi abbiamo



Scriviamo nuovamente questa equazione in forma abbreviata



dove si intende



e



Ora, se il bilancio delle varie sostanze non vieta la reazione (8), allora non vieta nemmeno la reazione inversa



Quale tra le reazioni (8) e (9) è quella che avviene? È la combinazione di sostanze A che si trasforma nella combinazione di sostanze B o viceversa? In quale direzione avviene la reazione



da destra verso sinistra o da sinistra verso destra?

C'è una nuova grandezza fisica che ci dà delle indicazioni sulla direzione di una reazione chimica: il *potenziale chimico*  $\mu$ . Ognuna delle due combinazioni di sostanze ha un certo valore di  $\mu$ . Se il potenziale chimico  $\mu(\text{A})$  della combinazione A è maggiore del potenziale chimico  $\mu(\text{B})$  della combinazione B, allora la reazione sarà da sinistra verso destra, da A verso B. Se  $\mu(\text{A})$  è minore di  $\mu(\text{B})$  la reazione sarà da destra verso sinistra. Se  $\mu(\text{A})$  e  $\mu(\text{B})$  sono uguali, la reazione non sarà né verso destra né verso sinistra, non avviene del tutto. Si trova in uno stato di equilibrio dinamico detto *equilibrio chimico*.

**$\mu(\text{A}) > \mu(\text{B})$ : scompare A, viene prodotto B;**

**$\mu(\text{A}) < \mu(\text{B})$ : scompare B, viene prodotto A;**

**$\mu(\text{A}) = \mu(\text{B})$ : nessuna reazione, equilibrio chimico**

In modo un po' meno accurato ma più facile da ricordare, possiamo dire:

**Una reazione chimica avviene spontaneamente dal potenziale chimico più alto verso quello più basso.**

Chiamiamo la differenza  $\mu(\text{A}) - \mu(\text{B})$ , *tensione chimica* della reazione  $\text{A} \rightarrow \text{B}$ . Affinché la reazione  $\text{A} \rightarrow \text{B}$  avvenga, la tensione chimica deve essere maggiore di zero. Possiamo dirlo anche in altro modo:

**La tensione chimica rappresenta la spinta per una reazione.**

L'unità di misura del potenziale chimico è il *gibbs*, abbreviato G, chiamato così in onore di J. W. Gibbs, l'inventore del potenziale chimico.

Ogni sostanza ha un certo potenziale chimico. Occupiamoci dapprima del potenziale chimico delle sostanze pure, quindi non delle loro combinazioni.

Il potenziale chimico delle sostanze pure si può trovare su apposite tabelle. Il potenziale chimico cambia in funzione della temperatura e della pressione della sostanza. Di solito le tabelle indicano il potenziale chimico in *condizioni normali*, cioè alla pressione di 1 bar e alla temperatura di 25°C. La tabella in appendice contiene i valori del potenziale chimico di circa 800 diverse sostanze.

La misurazione del potenziale chimico di una sostanza può essere molto complicata. Più avanti vedremo come procedere. Per ora ci limitiamo semplicemente a leggere i valori sulla tabella.

Qual è il potenziale chimico dell'etanolo? Cerchiamo in corrispondenza della sua formula  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  e troviamo:

$$\mu(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}) = -174,89 \text{ kG}.$$

L'unità di misura kG significa chilogibbs. Per il potenziale chimico dell'acqua cerchiamo sotto  $\text{H}_2\text{O}$ :

$$\mu(\text{H}_2\text{O}) = -237,18 \text{ kG}$$

Con il solo potenziale chimico delle sostanze pure possiamo ancora fare molto. Il nostro problema era di sapere se una certa combinazione di sostanze si può trasformare in un'altra combinazione di sostanze. Quello che ci serve è quindi il potenziale chimico di una combinazione di sostanze.

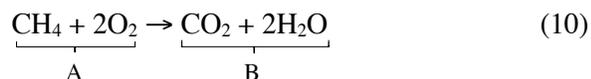
Il potenziale chimico di una combinazione



può essere calcolato facilmente se si conoscono i potenziali chimici delle sostanze A1, A2, A3, ... Vale

$$\mu(\text{A}) = \mu(\text{A1}) + \mu(\text{A2}) + \mu(\text{A3}) + \dots$$

Se in una certa combinazione una sostanza è preceduta da un coefficiente, questo coefficiente viene usato anche nel calcolo del potenziale chimico. Usiamo come esempio la combustione del metano (il componente principale del gas naturale):

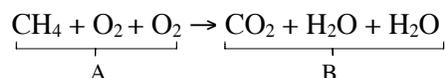


$$\begin{aligned} \mu(\text{A}) &= \mu(\text{CH}_4) + 2\mu(\text{O}_2) \\ &= -50,81 \text{ kG} + 2 \cdot 0 \text{ kG} \\ &= -50,81 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(\text{B}) &= \mu(\text{CO}_2) + 2\mu(\text{H}_2\text{O}) \\ &= -394,36 \text{ kG} + 2(-237,18) \text{ kG} \\ &= -868,72 \text{ kG} \end{aligned}$$

I valori di  $\mu(\text{CH}_4)$ ,  $\mu(\text{O}_2)$ ,  $\mu(\text{CO}_2)$  e  $\mu(\text{H}_2\text{O})$  sono presi dalla tabella.

Il fatto che i coefficienti presenti nell'equazione debbano essere ripresi anche nel calcolo del potenziale chimico della combinazione di sostanze è facilmente spiegabile. L'equazione (10) può essere scritta anche nella forma



Ora calcoliamo i potenziali chimici  $\mu(\text{A})$  e  $\mu(\text{B})$  sommando i potenziali chimici delle sostanze che costituiscono le combinazioni A e B:

$$\begin{aligned} \mu(\text{A}) &= \mu(\text{CH}_4) + \mu(\text{O}_2) + \mu(\text{O}_2) \\ &= \mu(\text{CH}_4) + 2\mu(\text{O}_2) \end{aligned}$$

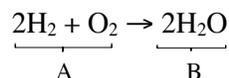
$$\begin{aligned} \mu(\text{B}) &= \mu(\text{CO}_2) + \mu(\text{H}_2\text{O}) + \mu(\text{H}_2\text{O}) \\ &= \mu(\text{CO}_2) + 2\mu(\text{H}_2\text{O}) \end{aligned}$$

e otteniamo lo stesso risultato di prima.

Ora siamo in grado di capire in che direzione può avvenire una reazione. Consideriamo la reazione (10). Sono il metano e il diossigeno che formano anidride carbonica e acqua o è il contrario? Abbiamo stabilito che il potenziale chimico della combinazione di sostanze A è maggiore di quello della combinazione di sostanze B. Quindi la reazione è da A verso B, da sinistra verso destra.

Per abituarci al nuovo metodo, applichiamo ad alcune reazioni di cui sicuramente già conosci la direzione.

#### La reazione ossidrica



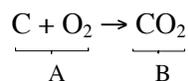
$$\mu(\text{A}) = 2\mu(\text{H}_2) + \mu(\text{O}_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\begin{aligned} \mu(\text{B}) &= 2\mu(\text{H}_2\text{O}) = 2(-237,18) \text{ kG} \\ &= -474,36 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\mu(\text{A}) - \mu(\text{B}) = 474,36 \text{ kG}$$

Come atteso, la tensione chimica è positiva, la reazione avviene da sinistra verso destra, diidrogeno e diossigeno formano acqua.

#### La combustione del carbonio



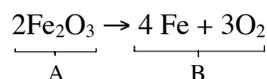
$$\mu(\text{A}) = \mu(\text{C}) + \mu(\text{O}_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(\text{B}) = \mu(\text{CO}_2) = -394,36 \text{ kG}$$

$$\mu(\text{A}) - \mu(\text{B}) = 394,36 \text{ kG}$$

Anche questa reazione va da sinistra verso destra, come ci si aspetta.

#### L'arrugginire del ferro



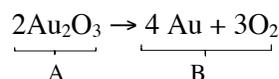
$$\begin{aligned} \mu(\text{A}) &= 2\mu(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 2(-742,24) \text{ kG} \\ &= -1484,48 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\mu(\text{B}) = 4\mu(\text{Fe}) + 3\mu(\text{O}_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(\text{A}) - \mu(\text{B}) = -1484,48 \text{ kG}$$

Il potenziale chimico di A è minore di quello di B, la reazione avviene da destra verso sinistra, il ferro arrugginisce - come sanno tutti.

#### L'oro non si ossida



$$\begin{aligned} \mu(\text{A}) &= 2\mu(\text{Au}_2\text{O}_3) = 2 \cdot 163,30 \text{ kG} \\ &= 326,60 \text{ kG} \end{aligned}$$

$$\mu(\text{B}) = 4\mu(\text{Au}) + 3\mu(\text{O}_2) = 0 \text{ kG}$$

$$\mu(\text{A}) - \mu(\text{B}) = 326,60 \text{ kG}$$

Anche questa reazione va da sinistra verso destra, l'ossido d'oro si decompone spontaneamente, l'oro non "arrugginisce".

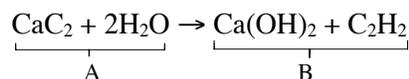
#### Lo zero del potenziale chimico

Nella ricerca dei valori del potenziale chimico avrai notato come il potenziale chimico delle sostanze semplici sia 0 kG. Non è un caso, è stato fissato così. Esattamente come va fissato lo zero del potenziale elettrico, della temperatura e della velocità, così si deve fissare anche lo zero del potenziale chimico. La particolarità del potenziale chimico è che ci sono tanti zeri quanti sono gli elementi.

C'è ancora una cosa di cui tenere conto al momento di fissare lo zero: il potenziale chimico di una sostanza semplice è 0 kG quando la sostanza semplice è nella sua forma più stabile. Nel caso dell'idrogeno per esempio, non è il potenziale chimico  $\mu(\text{H})$  dell'idrogeno atomico, molto instabile, a essere a 0 kG, ma il potenziale  $\mu(\text{H}_2)$  del diidrogeno (molecolare).

La produzione di sostanze con un potenziale chimico elevato a partire da sostanze con un potenziale chimico basso.

Una reazione avviene spontaneamente da un potenziale chimico alto verso uno basso, "scende lungo il pendio" del potenziale. Potremmo erroneamente trarre la seguente conclusione: ogni prodotto di una reazione ha un potenziale chimico inferiore di ogni reagente. L'esempio seguente, la produzione di etino a partire da carburo di calcio e acqua, dimostra che non è così.



$$\begin{aligned}\mu(A) &= \mu(\text{CaC}_2) + 2\mu(\text{H}_2\text{O}) \\ &= -67,78 \text{ kG} + 2(-237,18) \text{ kG} \\ &= -542,14 \text{ kG}\end{aligned}$$

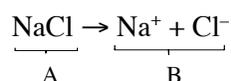
$$\begin{aligned}\mu(B) &= \mu(\text{Ca(OH)}_2) + \mu(\text{C}_2\text{H}_2) \\ &= -896,76 \text{ kG} + 209,20 \text{ kG} \\ &= -687,56 \text{ kG}\end{aligned}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 145,42 \text{ kG}$$

Il potenziale chimico della combinazione di sostanze A è maggiore di quello della combinazione B. Quindi la reazione avviene da sinistra verso destra. Ma uno dei prodotti della reazione, l'etino, ha un potenziale maggiore di entrambi i reagenti. Questo potenziale elevato è compensato dal valore molto basso del potenziale chimico dell'altro prodotto, l'idrossido di calcio.

#### Lo sciogliere come reazione chimica

Anche sciogliere una sostanza in un'altra è una reazione chimica, per esempio sciogliere sale da cucina in acqua:



La tabella in appendice contiene anche i potenziali chimici degli ioni. Quindi possiamo calcolare anche la tensione chimica di un processo di soluzione. Il potenziale chimico di una soluzione di ioni dipende però dalla concentrazione degli ioni. I valori di potenziale che si trovano nella tabella si riferiscono a una soluzione monomolare in acqua. Di conseguenza possiamo stabilire solo se è possibile o meno ottenere una soluzione monomolare in acqua.

Per il nostro processo di soluzione del sale da cucina si ottiene:

$$\mu(A) = \mu(\text{NaCl}) = -384,04 \text{ kG}$$

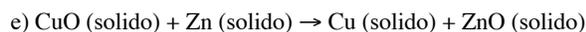
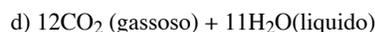
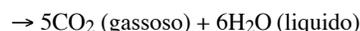
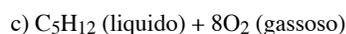
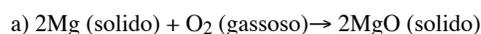
$$\begin{aligned}\mu(B) &= \mu(\text{Na}^+) + \mu(\text{Cl}^-) \\ &= -261,89 \text{ kG} + (-131,26) \text{ kG} \\ &= -393,15 \text{ kG}\end{aligned}$$

$$\mu(A) - \mu(B) = 9,11 \text{ kG}$$

$\mu(A)$  è maggiore di  $\mu(B)$ . Ciò significa che è possibile ottenere una soluzione monomolare di sale da cucina in acqua: 1 mol di sale da cucina per 1 litro di soluzione. Ovviamente possiamo anche sciogliere meno di una mole di sale. Dai valori della tabella non possiamo però sapere se è possibile scioglierne di più.

#### Esercizi

1. Determina la tensione chimica per le seguenti reazioni e indica per ogni reazione se può avvenire o no (in condizioni normali).



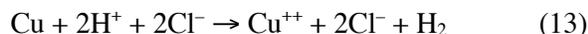
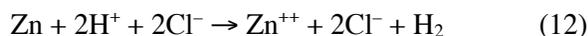
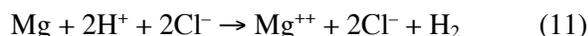
2. Indica delle reazioni di riduzione del CuO. Calcola le tensioni chimiche.

3. Con quali tra le seguenti sostanze si può ottenere una soluzione monomolare in acqua?

$\text{I}_2$ , KOH,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_3$ , AgCl.

## 24.4 Potenziale chimico e tasso di trasformazione

Confrontiamo tre reazioni imparentate tra loro: la soluzione di tre metalli bivalenti in acido cloridrico.



Cominciamo calcolando le tensioni chimiche:

per la (11)  $\mu(A) - \mu(B) = 456,01 \text{ kG}$

per la (12)  $\mu(A) - \mu(B) = 147,03 \text{ kG}$

per la (13)  $\mu(A) - \mu(B) = -65,52 \text{ kG}$

La tensione della prima reazione è grande, quella della seconda è più piccola e quella della terza è negativa.

Eseguiamo le tre reazioni, o piuttosto, tentiamo di eseguirle. Il magnesio reagisce rapidamente con una massiccia produzione di diidrogeno. La reazione dello zinco è molto più lenta, la produzione di diidrogeno molto meno appariscente che con il magnesio. Con il rame non succede nulla.

Possiamo trarne la seguente conclusione:

**Il tasso di trasformazione è maggiore quando la tensione chimica è più grande.**

Questa frase è corretta, ma potrebbe condurre a conclusioni sbagliate, visto che non è ancora completa. In effetti il tasso di trasformazione non dipende solo dalla tensione chimica. Esattamente come la corrente elettrica non dipende solo dalla tensione elettrica e la corrente di entropia non dipende solo dalla differenza di temperatura.

## 24.5 La resistenza di reazione

Spesso una reazione non avviene anche se in effetti dovrebbe - almeno se dipendesse solo dalla tensione chimica. Possiamo mettere sul tavolo un recipiente pieno di benzina senza che bruci. Possiamo mescolare diidrogeno e diossigeno senza che la miscela esploda. "È ovvio che non esplode, prima si deve accendere" dirai tu. Esatto - ma perché le sostanze non reagiscono se non le si accende? Perché la reazione non avviene dal potenziale più alto verso quello più basso?

Ci accorgiamo che non basta la presenza di una spinta per la reazione. È fondamentalmente non è sorprendente. Avremmo potuto prevederlo sin dall'inizio. Dopotutto anche l'aria (di solito) non esce da un pneumatico seppure la pressione all'esterno sia minore di quella all'interno, quindi malgrado la presenza di una spinta. Il pneumatico glielo impedisce, fig. 24.1.

Anche l'elettricità sulla sfera a sinistra in fig. 24.2 non scorre là dove dovrebbe, cioè verso la sfera a destra. La resistenza elettrica dell'aria che si trova tra le sfere glielo impedisce.

Anche il fatto che una reazione chimica non avviene seppure ci sia una tensione chimica, dipende dalla presenza di una resistenza troppo grande. Diciamo che la *resistenza di reazione* è troppo grande e la reazione è *inibita*.

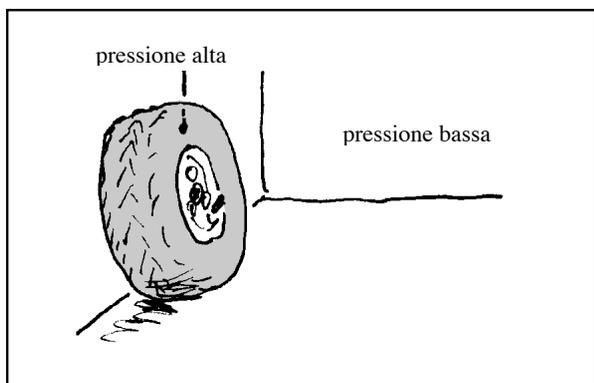


Fig. 24.1. L'aria non scorre da zone a pressione maggiore (dentro il pneumatico) a zone a pressione minore (fuori dal pneumatico).

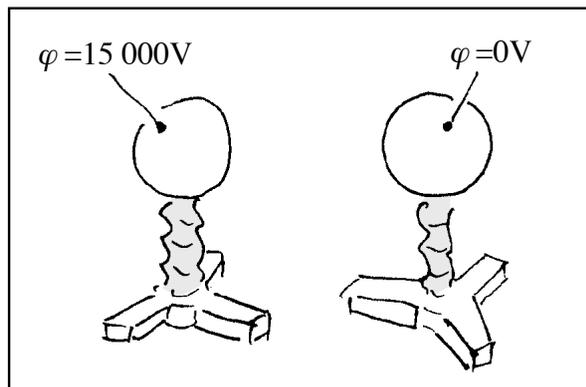


Fig. 24.2. L'elettricità non scorre da punti con il potenziale elettrico maggiore (sfera di sinistra) a punti con il potenziale elettrico minore (sfera di destra).

La resistenza di reazione può essere grande o piccola; può anche essere molto grande o molto piccola. Due reazioni con la stessa tensione chimica possono svolgersi a velocità molto diverse, cioè con tassi di trasformazione molto diversi, - dipende da quanto vale la resistenza di reazione.

**Più è grande la resistenza di reazione, più piccolo sarà il tasso di trasformazione.**

Possiamo descrivere, in modo un po' riduttivo, il lavoro dei chimici dicendo che vogliono far avvenire determinate reazioni e impedire che altre avvengano.

Uno dei metodi per influenzare lo svolgimento di una reazione consiste nel regolare la resistenza di reazione - aumentarla o diminuirla, a seconda delle necessità.

La stessa cosa accade in elettrotecnica. Si costruiscono dei collegamenti con dei conduttori di un materiale che ha poca resistenza e si ostacolano le correnti con dei materiali che conducono male l'elettricità.

Ma da cosa dipende la resistenza di una reazione chimica? Come si può influenzare questa resistenza?

La fig. 24.3a mostra un bicchiere contenente acido cloridrico e, lì accanto, un pezzo di magnesio. Se dipendesse solo dalla tensione chimica le due sostanze dovrebbero reagire tra loro. Ovviamente ciò non avviene, la reazione è inibita. In questo caso è molto facile ridurre la resistenza di reazione: è sufficiente mettere le due sostanze in contatto, cioè gettare il pezzo di magnesio nell'acido, fig. 24.3b, o versare l'acido sul magnesio.

La resistenza di reazione può essere ulteriormente ridotta migliorando il contatto tra i partner della reazione. Per un solido la soluzione è macinarlo prima. Un grosso cristallo di NaCl immerso in acqua si scioglie molto lentamente. La resistenza di reazione è molto grande. Per contro, se maciniamo il cristallo, gettiamo nell'acqua la polvere ottenuta e mescoliamo per bene, allora la resistenza allo sciogliersi

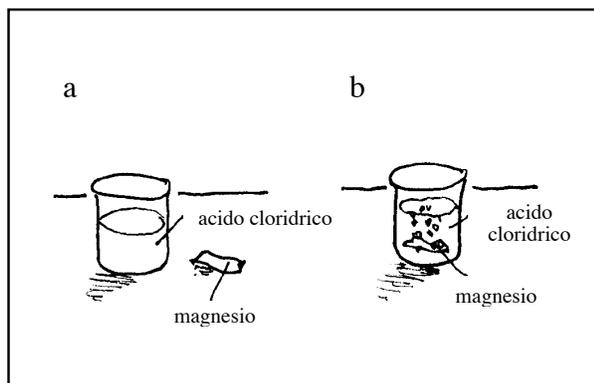


Fig. 24.3. (a) Magnesio e acido cloridrico non reagiscono. La reazione è inibita. (b) Magnesio e acido cloridrico reagiscono.

mento è nettamente ridotta, il tasso di trasformazione è nettamente maggiore.

### Rimestando si diminuisce la resistenza di reazione.

Spesso però anche rimestare non aiuta. La reazione  $\text{Cu} + \text{S} \rightarrow \text{CuS}$ ,

la cui tensione chimica è positiva, non si mette in moto nemmeno rimestando per bene. Ma la si può innescare riscaldando, aumentando la temperatura.

È sufficiente riscaldare i reagenti in un solo punto. Appena la reazione comincia viene prodotta entropia. In questo modo la temperatura attorno a quel punto aumenta e la reazione si innesca. In seguito la reazione continua spontaneamente. Quindi concludiamo:

### L'aumento della temperatura diminuisce la resistenza di reazione.

Di reazioni come questa, cioè reazioni che si innescano solo dopo che i reagenti sono stati riscaldati, ce ne sono molte. La combustione di tutti i combustibili conosciuti - olio da riscaldamento, carbone, benzina, gas naturale, diidrogeno - fa parte di questa classe di reazioni.

Accanto a questo metodo un po' grossolano per diminuire la resistenza di reazione, ce ne sono anche di più eleganti: aggiungiamo alle sostanze che devono reagire un *catalizzatore*. L'effetto del catalizzatore è di far svolgere la reazione. Durante la reazione la sua quantità non cambia. In altre parole: aggiungendo il catalizzatore si innesca la reazione, togliendo il catalizzatore la reazione si ferma.

### Un catalizzatore diminuisce la resistenza di reazione.

Un semplice esempio: la tensione chimica della reazione



è positiva. Quindi, se dipendesse solamente dalla tensione chimica, il perossido di idrogeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  dovrebbe decomporsi spontaneamente in acqua e diossigeno. Ma non lo fa, la reazione è inibita. Ag-

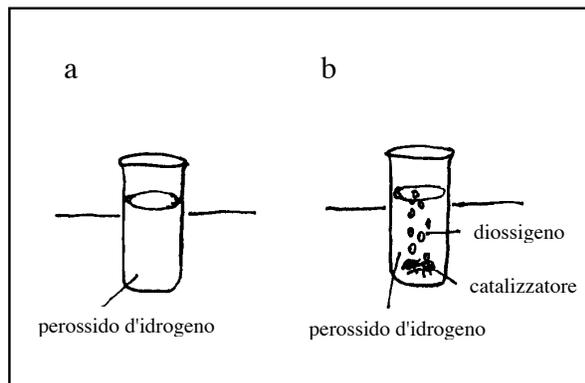
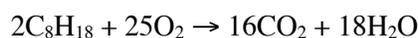


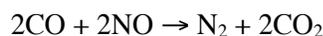
Fig. 24.4. (a) Il perossido di idrogeno non si decompone. (b) Con l'aggiunta di un catalizzatore si innesca la reazione di decomposizione.

giungiamo al contenitore con il perossido di idrogeno un catalizzatore a tre vie (come avviene nelle automobili): si nota immediatamente lo sviluppo di un gas, fig. 24.4. La prova del filo incandescente dimostra che si tratta di diossigeno. Durante questa reazione la quantità di catalizzatore non cambia. La reazione continua fintanto che nel contenitore c'è perossido di idrogeno.

I gas di scarico di un motore a benzina contengono sostanze tossiche per l'ambiente: il monossido di azoto  $\text{NO}$ , il monossido di carbonio  $\text{CO}$  e benzina non combusta. Queste sostanze sono presenti nei gas di scarico in quanto all'interno del motore la combustione non è avvenuta completamente. Se le reazioni si fossero svolte come indicato dalla tensione chimica, nessuna di queste sostanze sarebbe stata prodotta. Di conseguenza si fanno passare i gas di scarico su un catalizzatore. L'effetto è che da un lato i resti di benzina vengono bruciati:



( $\text{C}_8\text{H}_{18}$  è l'ottano, uno dei componenti principali della benzina). Dall'altro il catalizzatore innesca la reazione



che trasforma le sostanze tossiche  $\text{NO}$  e  $\text{CO}$  in  $\text{N}_2$  e  $\text{CO}_2$ , che non sono tossici. (Il  $\text{CO}_2$  ha comunque effetti negativi sull'ambiente: contribuisce al riscaldamento atmosferico.)

I catalizzatori sono particolarmente importanti per le reazioni nei sistemi biologici. In un sistema del genere possono avvenire migliaia di reazioni diverse. E se dipendesse solo dalla tensione chimica tutte queste reazioni si svolgerebbero e in breve tempo l'organismo si trasformerebbe in poco più che anidride carbonica e acqua. Invece la maggior parte di queste reazioni sono inibite, non avvengono spontaneamente. Il loro svolgimento è reso possibile dai catalizzatori, uno per ogni reazione. Questi catalizzatori biologici si chiamano *enzimi*. Quindi lo svolgimento delle reazioni biochimiche è regolato dagli enzimi. Gli enzimi agiscono come un complesso sistema di interruttori chimici.

In questo e nei precedenti paragrafi abbiamo visto come il tasso di trasformazione di una reazione dipenda da due fattori: 1. dalla tensione chimica e 2. dalla resistenza di reazione. Inoltre abbiamo studiato la dipendenza della resistenza di reazione da altri fattori. Queste relazioni sono riassunte in fig. 24.5.

### ***Esercizi***

1. Cita delle reazioni che hanno una grande resistenza anche quando i reagenti sono miscelati bene.
2. Cita delle reazioni che hanno una resistenza molto piccola quando c'è un buon contatto tra i reagenti.
3. Un esplosivo è una sostanza che si decompone spontaneamente in altre sostanze. Il suo potenziale chimico è più alto di quello dei prodotti della decomposizione. Cosa si può dire della resistenza di tale reazione?

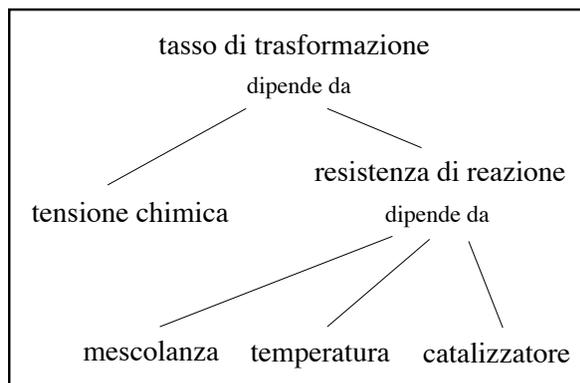


Fig. 24.5. Relazione tra tasso di trasformazione, tensione chimica e resistenza di reazione.

## 25. Quantità di sostanza ed energia

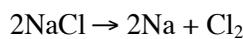
### 25.1 Pompe di reazione

Abbiamo stabilito che "una reazione avviene spontaneamente dal potenziale chimico alto verso quello basso". Spesso però vorremmo che la reazione si svolgesse nell'altro senso. Vorremmo una reazione in modo che il potenziale chimico dei prodotti sia maggiore di quello dei reagenti.

Ad esempio scomporre l'acqua in diidrogeno e diossigeno. La reazione



dovrebbe avvenire da sinistra verso destra, quindi contro la sua spinta naturale. Oppure vorremmo ottenere sodio dal sale da cucina



La reazione è spontanea da destra verso sinistra, noi vorremmo che andasse da sinistra verso destra.

In linea di principio il problema che dobbiamo risolvere non è nuovo: a volte vogliamo che l'aria scorra dalla pressione più bassa a quella più alta, contro la sua spinta naturale. Possiamo farcela usando una pompa, fig. 25.1. Oppure vogliamo trasportare entropia da una temperatura bassa verso una alta. In questo caso usiamo una pompa di calore, fig. 25.2. Quindi, anche per far sì che ci sia una reazione da un potenziale chimico basso verso uno alto abbiamo bisogno di una specie di pompa: una *pompa di reazione*.

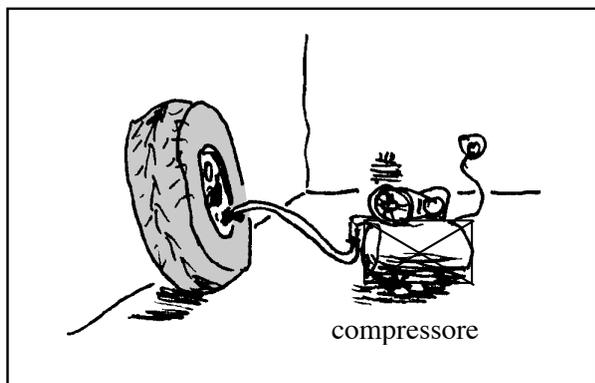


Fig. 25.1. La pompa trasporta aria da punti a pressione più bassa a punti a pressione più alta.

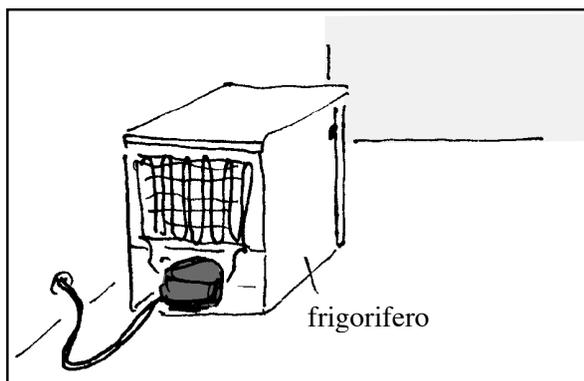


Fig. 25.2. La pompa di calore trasporta entropia da punti a temperatura più bassa a punti a temperatura più alta.

Pompe di questo genere esistono veramente e hanno un ruolo importante nella tecnica chimica. Si chiamano *celle elettrochimiche*.

La fig. 25.3 mostra una cella elettrochimica che permette di scomporre l'acqua, quindi una pompa di reazione per la reazione (1). Il processo di scomposizione di una sostanza con una pompa di reazione del genere si chiama *elettrolisi*.

Affinché la pompa di reazione possa funzionare, essa deve essere allacciata a una sorgente di energia - esattamente come una pompa d'aria o una pompa di calore.

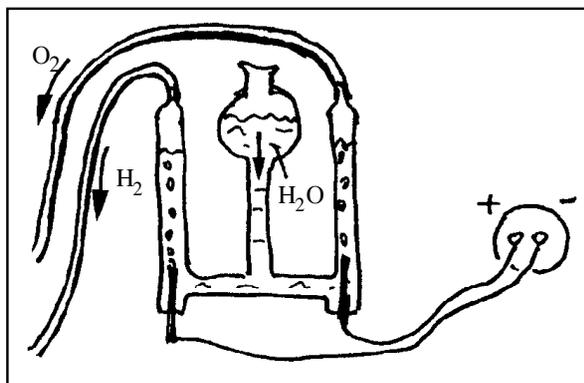


Fig. 25.3. La cella elettrochimica funge da "pompa di reazione".

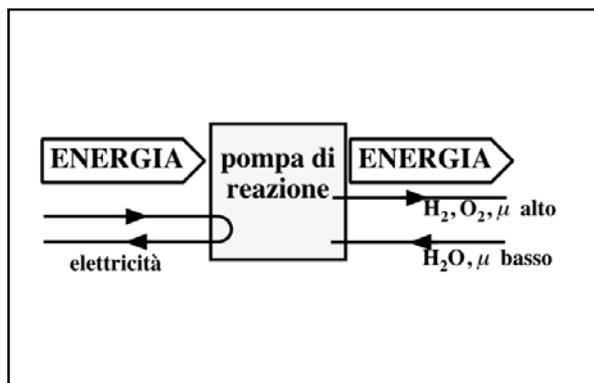


Fig. 25.4. Diagramma di flusso di una pompa di reazione.

## 25.2 Tasso di trasformazione e corrente di energia

In fig. 25.4 è rappresentato il diagramma di flusso dell'energia per la cella elettrochimica di fig. 25.3. Per confronto, in fig. 25.5 c'è il diagramma di flusso per una pompa idraulica e in fig. 25.6 quello per una pompa di calore. Possiamo notare che una pompa di reazione è un trasformatore di energia. Riceve energia con il portatore elettricità e la cede nuovamente con i prodotti della reazione.

L'energia giunge alla cella anche con i reagenti, ma con i prodotti della reazione ne esce di più di quanta ne sia entrata con i reagenti. La differenza è esattamente l'energia presa all'elettricità.

È chiaro che più energia si fornisce alla cella, maggiore sarà la quantità di sostanza trasformata nella cella.

Visto che l'energia che affluisce alla cella poi ne esce nuovamente, possiamo dire anche che più energia scorre *attraverso* la cella, maggiore sarà la trasformazione.

Possiamo anche quantificare questa affermazione. La fig. 25.7a mostra una cella elettrochimica. Attraverso questa cella scorre una corrente di energia di una certa intensità e la reazione nella cella ha un certo tasso di trasformazione. In fig. 25.7b due celle sono collegate in parallelo. Entrambe sono identiche per costruzione a quella in fig. 25.7a. È chiaro che complessivamente nelle due celle scorre una corrente di energia doppia rispetto alla fig. 25.7a e

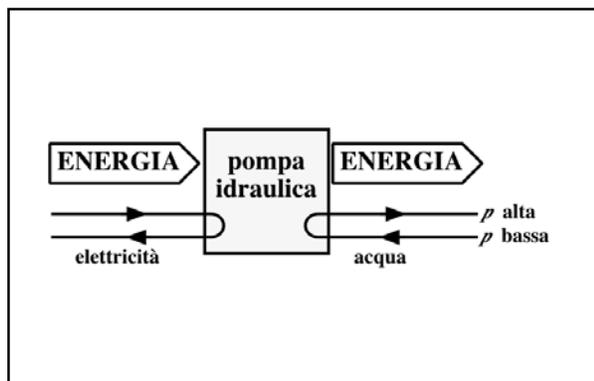


Fig. 25.5. Diagramma di flusso di una pompa idraulica.

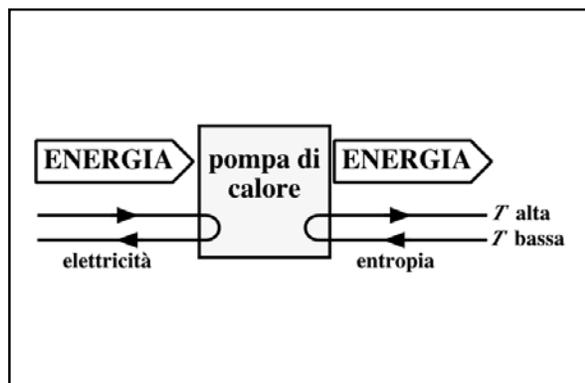


Fig. 25.6. Diagramma di flusso di una pompa di calore.

anche la trasformazione è doppia. Ora immaginiamo le due celle come un'unica grande cella, fig. 25.7c. Dal confronto tra la cella piccola, fig. 25.7a, e quella grande, fig. 25.7c, segue che la trasformazione in una cella è proporzionale all'intensità della corrente di energia che scorre attraverso la cella:

$$P \sim I_{n(R)} \quad (2)$$

Ci manca ancora il coefficiente di proporzionalità. Consideriamo due diverse celle nelle quali si svolgono due diverse reazioni. In una viene scomposta l'acqua, nell'altra si producono diidrogeno e dicloro a partire dall'acido cloridrico. Facciamo in modo che i tassi di reazione nelle due celle siano uguali. Osserviamo che il consumo di energia nelle due celle è diverso. A parità di  $I_{n(R)}$ ,  $P$  è diversa. Quindi il coefficiente di proporzionalità che fa della relazione (2) un'equazione, dipende dal tipo di reazione che avviene nella cella. Se cambia la reazione cambia anche il suo valore.

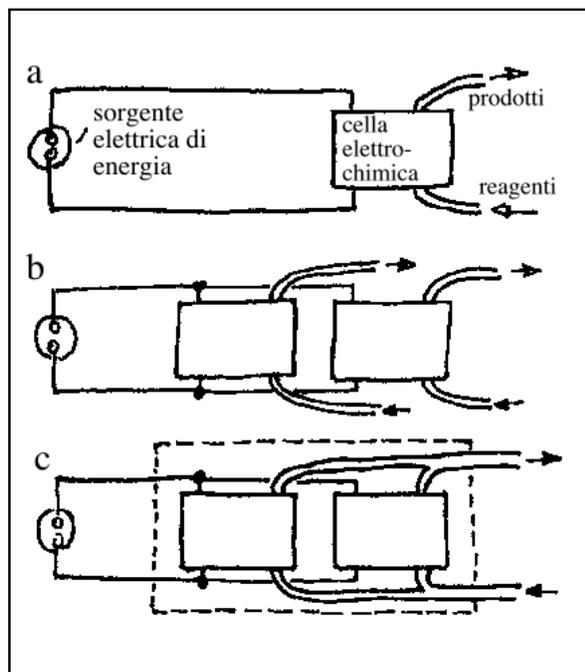


Fig. 25.7. (a) Cella elettrochimica. (b) Con due celle collegate in parallelo il tasso di trasformazione e l'intensità della corrente di energia sono doppi rispetto a una sola cella. (c) Le celle in parallelo rappresentate come un'unica grande cella.

Sappiamo che le reazioni si distinguono per la tensione chimica. In effetti anche la relazione completa tra tasso di trasformazione e intensità della corrente di energia ha la forma:

$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)} \quad (3)$$

e cioè: il coefficiente di proporzionalità è la tensione chimica. Il motivo per cui nell'equazione appare la tensione chimica è il seguente: l'equazione (3) definisce la tensione chimica, e di conseguenza anche il potenziale chimico. Ciò significa che l'equazione può essere usata per misurare il potenziale chimico: si misura l'intensità  $P$  della corrente di energia, il tasso di trasformazione  $I_{n(R)}$  e si divide:

$$(\mu(A) - \mu(B)) = \frac{P}{I_{n(R)}}$$

$\mu(A)$  è il potenziale più alto,  $\mu(B)$  quello più basso.

Se la tensione chimica è nota, l'equazione (3) può essere usata per calcolare quanta energia al secondo viene trasferita - dall'elettricità ai prodotti della reazione - in una cella.

Sostituiamo ora nell'equazione (3)

$$P = \frac{E}{t}$$

e

$$I_{n(R)} = \frac{n(R)}{t}$$

e otteniamo

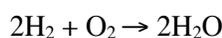
$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R)$$

Questa equazione ci dice quanta energia per mole è necessaria affinché la reazione  $A \rightarrow B$  vada contro la direzione naturale della sua spinta.

### Esempio

Quanta energia ci vuole per scomporre 1 kg d'acqua?

La reazione



deve essere "pompatà" da destra verso sinistra. Per l'acqua

$$m/n = 0,018 \text{ kg/mol}$$

quindi 1 kg d'acqua contiene 55,56 mol. La trasformazione della reazione è di

$$n(R) = n(\text{H}_2\text{O})/2 = 55,56 \text{ mol} / 2 = 27,78 \text{ mol}$$

In precedenza avevamo già calcolato la tensione chimica della reazione

$$\mu(A) - \mu(B) = 474,36 \text{ kG.}$$

Quindi otteniamo

$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R)$$

$$= 474,36 \text{ kG} \cdot 27,78 \text{ mol} = 13178 \text{ kJ} \approx 13 \text{ MJ}$$

Ti ricorderai che avevamo già usato una formula molto simile alla (3) per calcolare quanta energia al secondo viene trasferita dall'elettricità all'entropia in una pompa di calore:

$$P = (T(A) - T(B)) \cdot I_S$$

( $T$  = temperatura assoluta,  $I_S$  = intensità della corrente di entropia).

E conosciamo anche un'altra formula dello stesso tipo: per calcolare l'intensità della corrente di energia trasmessa con un cavo elettrico usiamo

$$P = (\varphi(A) - \varphi(B)) \cdot I$$

( $\varphi$  = potenziale elettrico,  $I$  = intensità della corrente elettrica).

### Esercizi

1. Quanta energia ci vuole per ricavare 1 kg di sodio dal sale da cucina?
2. Quanta energia ci vuole per ricavare 2 mol di piombo dal cloruro di piombo?

## 25.3 L'inversione della pompa di reazione

In una pompa di reazione l'energia viene trasferita. L'energia affluisce alla cella con il portatore elettricità e defluisce con i prodotti della reazione. Come ogni altro trasferitore di energia, anche la pompa di reazione ha il suo opposto. Addirittura l'apparecchio che ha questa funzione ti è ben noto. Lo si incontra nelle versioni e con i nomi più disparati: batteria, pila, accumulatore, cella combustibile, ecc.

Tutti questi apparecchi sono delle celle elettrochimiche. Quindi le celle elettrochimiche possono funzionare in due direzioni: sia come "pompa di reazione" - vedi il paragrafo precedente - che come "pompa di elettricità".

In fig. 25.8a e b sono rappresentati i diagrammi di flusso dell'energia per due celle elettrochimiche. Quella in fig. 25.8a lavora come pompa di reazione per la reazione  $B \rightarrow A$ . La cella in fig. 25.8b lavora come pompa di elettricità. In questo caso la reazione va da A verso B, cioè nella direzione naturale; l'elettricità viene trasportata da un potenziale più basso a uno più alto.

Purtroppo i termini tecnici comunemente usati per le pompe di elettricità son molti e molto diversi.

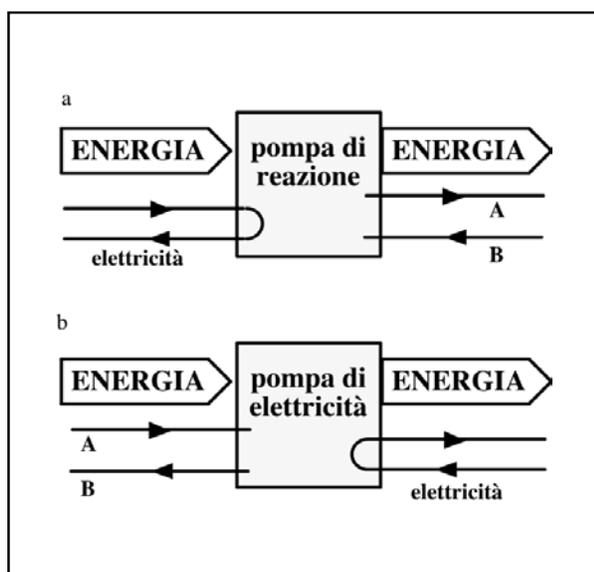


Fig. 25.8. Diagrammi di flusso dell'energia di una pompa di reazione (a) e di una pompa di elettricità (b).

### Cella combustibile

Se l'aggiunta dei reagenti e l'estrazione dei prodotti di reazione dalla cella è continua, la cella viene chiamata cella combustibile. Un esempio è la cella combustibile a idrogeno, dove diidrogeno e diossigeno reagiscono e producono acqua.

Sostanzialmente una cella combustibile funziona come una centrale termica. Riceve la sua energia con la combinazione di sostanze "combustibile + diossigeno" e la cede con l'elettricità. Una cella combustibile ha dei grossi vantaggi rispetto a una centrale termica: ha meno perdite di energia e funziona in modo assolutamente silenzioso. Malgrado ciò le celle combustibili al momento non sono ancora utilizzabili per l'approvvigionamento in energia elettrica: non si possono alimentare con carbone o olio da riscaldamento, cioè i combustibili più comuni.

### Pila, minipila, pila a bottone

In questo caso i reagenti sono già contenuti nella cella e i prodotti della reazione non vengono estratti. Quando i reagenti sono esauriti la pila non serve più a niente.

Spesso queste celle vengono chiamate batterie. Come vedremo fra poco, non è corretto chiamarle così.

### Accumulatore

Un accumulatore è una cella che può essere usata in entrambe le direzioni: come pompa di reazione e come pompa di elettricità. Reagenti e prodotti della reazione restano nell'accumulatore.

Quindi un accumulatore può essere usato come contenitore di energia. Caricandolo di energia si pompa una reazione chimica in direzione opposta a quella della sua spinta naturale, da un potenziale

chimico basso a uno alto. Durante la scarica la reazione avviene dal potenziale alto verso quello basso. Così facendo l'elettricità viene portata da un potenziale elettrico basso verso uno più alto. L'accumulatore più conosciuto è l'accumulatore al piombo delle automobili, la "batteria dell'auto".

### Batterie

Si parla di batteria quando ci sono più celle collegate l'una all'altra. La batteria d'automobile da 12V è composta da 6 celle da 2V allacciate in serie, la pila piatta da 4,5V da 3 celle da 1,5V l'una.

La relazione tra intensità della corrente di energia e tasso di trasformazione nella pompa chimica di elettricità è ovviamente la stessa che in una pompa di reazione, cioè anche in questo caso vale

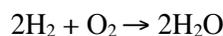
$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)}$$

Ancora una volta  $\mu(A)$  è il potenziale chimico maggiore e  $\mu(B)$  quello minore.  $P$  è l'intensità della corrente di energia che entra nella cella con le sostanze e ne esce nuovamente con l'elettricità. E anche in questo caso vale la relazione tra quantità di energia e quantità di sostanza trasformata:

$$E = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot n(R)$$

### Esempio

Consideriamo la reazione che si svolge in una cella combustibile a idrogeno:



Se viene prodotto 1 kg d'acqua, quanta energia viene fornita dalla cella?

Abbiamo già eseguito questo calcolo nel paragrafo precedente quando cercavamo l'energia necessaria per poter scomporre 1 kg d'acqua. Avevamo ottenuto  $E = 13 \text{ MJ}$ .

### Esercizi

1. In una cella combustibile metano e diossigeno reagiscono in anidride carbonica e acqua. Se il tasso di trasformazione è di una mole al secondo, quanti joule al secondo fornisce la cella?

2. Nell'accumulatore al piombo si svolge la seguente reazione:



verso sinistra durante la carica e verso destra durante la scarica.

a) Quanto vale il tasso di trasformazione se l'accumulatore cede 100 joule al secondo?

b) Durante la carica vengono trasformati 2 kg di solfato di piombo in piombo e ossido di piombo. Quanta energia viene immagazzinata?

## 26. Bilancio termico delle reazioni

### 26.1 Produzione di entropia nelle reazioni chimiche

Vogliamo che la reazione chimica



avvenga in modo ininterrotto. Scegliamo le sostanze in modo che  $\mu(A)$  sia maggiore di  $\mu(B)$ . Sappiamo che da questa reazione possiamo ricavare energia: con la trasformazione della sostanza A nella sostanza B viene ceduta energia. L'intensità della corrente di energia si calcola con:

$$P = (\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)}$$

Con questa energia possiamo fare due cose. Potremmo usarla per pompare qualcos'altro, per esempio elettricità da un potenziale basso a uno alto. Di questo abbiamo discusso diffusamente nel capitolo precedente.

Oppure lasciamo che la reazione continui liberamente, senza pompare o azionare nulla. In questo caso tutta l'energia viene spesa per produrre entropia. Per produrre una corrente di entropia di intensità  $I_{S\text{prodotta}}$  ci vuole una corrente di energia di intensità

$$P = T \cdot I_{S\text{prodotta}}$$

Se tutta l'energia ceduta in una reazione chimica viene usata - o meglio: sprecata - per produrre entropia, allora deve valere:

$$(\mu(A) - \mu(B)) \cdot I_{n(R)} = T \cdot I_{S\text{prodotta}}$$

Questa equazione ci permette di calcolare la quantità di entropia al secondo che viene prodotta:

$$I_{S\text{prodotta}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} I_{n(R)}$$

Sostituiamo

$$I_{S\text{prodotta}} = S_{\text{prodotta}}/t$$

e

$$I_{n(R)} = n(R)/t$$

ottenendo:

$$\frac{S_{\text{prodotta}}}{t} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} \cdot \frac{n(R)}{t}$$

poi moltiplichiamo entrambi i termini per  $t$ :

$$S_{\text{prodotta}} = \frac{\mu(A) - \mu(B)}{T} n(R) \quad (1)$$

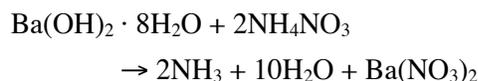
Questa equazione ci dice quanta entropia viene prodotta quando avviene una determinata trasformazione di sostanza  $n(R)$ .

Quando con l'energia non si fa altro che produrre entropia, si dice che la reazione si svolge liberamente.

**In ogni reazione che si svolge liberamente viene prodotta entropia.**

Potremmo essere tentati di trarre la seguente conclusione: in ogni reazione che si svolge liberamente avviene un riscaldamento. Visto che come già sappiamo, quando l'entropia aumenta, aumenta anche la temperatura. Però questa conclusione è sbagliata. Il modo più facile per convincercene è con l'aiuto di un esperimento.

Misceliamo due solidi: idrossido di bario, che contiene parecchia acqua di cristallizzazione, e nitrato d'ammonio. Le sostanze reagiscono e si ottengono gas d'ammoniaca, acqua allo stato liquido e nitrato di bario:



La particolarità di questa reazione è che i prodotti sono molto freddi. Misuriamo la temperatura e constatiamo che è inferiore a 10°C sotto zero. Cos'è successo? Forse che la reazione avviene nella direzione sbagliata, dal potenziale chimico basso verso quello alto? Forse viene annientata entropia? Sarebbe un risultato sensazionale. Vedremo subito che non è il caso.

#### Esercizi

1. Quanta entropia viene prodotta bruciando 1 kg di benzina? (Calcola con l'ottano  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ , uno dei componenti principali della benzina.)

2. Quanta entropia viene prodotta quando 1 kg di ferro arrugginisce?

## 26.2 Il bilancio entropico delle reazioni chimiche

C'è un aspetto importante di cui finora non abbiamo ancora tenuto conto.

Consideriamo la reazione



e ipotizziamo per ora che non venga prodotta entropia (come succede in una cella elettrochimica). Durante la reazione i reagenti scompaiono e appaiono i prodotti.

I reagenti contengono una certa quantità di entropia, e questa entropia deve essere "presa in consegna" dai prodotti. In generale a questa entropia è associata una temperatura diversa nei reagenti che nei prodotti. In certe reazioni la temperatura è più alta, in altre è più bassa.

È come quando si trasferisce una certa quantità d'aria da un recipiente A a un recipiente B, inizialmente vuoto. In generale nel recipiente B l'aria non avrà la stessa pressione che in A, fig. 26.1.

Nella tabella in appendice, l'ultima colonna indica per ogni sostanza il contenuto di entropia a temperatura normale. I valori si riferiscono a 1 mol della sostanza in questione. Quindi la tabella contiene il valore  $S/n$ . Per esempio per l'acqua, dalla tabella leggiamo:

$$S/n = 69,91 \text{ Ct/mol},$$

cioè: 1 mol di acqua a temperatura normale contiene una quantità di entropia di 69,91 carnot.

Per l'anidride carbonica troviamo:

$$S/n = 213,64 \text{ Ct/mol},$$

cioè: 1 mol di anidride carbonica a temperatura normale contiene una quantità di entropia di 213,64 Ct.

Ora abbiamo i mezzi per formulare il bilancio completo per l'entropia in una reazione.

Possono presentarsi tre casi. Per ognuno di questi casi facciamo un esempio. Ogni volta il bilancio è per una trasformazione di 1 mol.

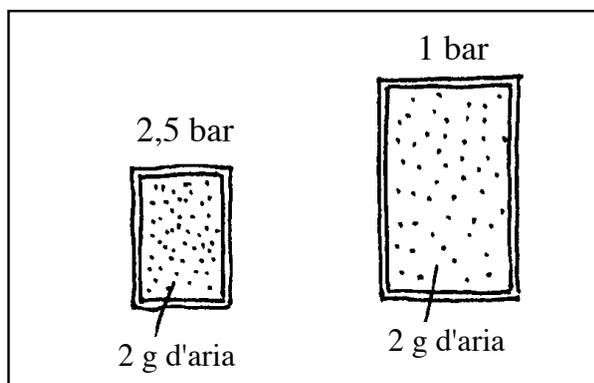
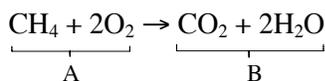


Fig. 26.1. La stessa quantità d'aria in recipienti diversi ha una diversa pressione.

*Primo caso*



Leggiamo dalla tabella quanta entropia hanno i reagenti e i prodotti a temperatura normale:

$$S(\text{A}) = S(\text{CH}_4) + 2S(\text{O}_2)$$

$$= 186,10 \text{ Ct} + 2 \cdot 205,03 \text{ Ct} = 596,16 \text{ Ct}$$

$$S(\text{B}) = S(\text{CO}_2) + 2S(\text{H}_2\text{O})$$

$$= 213,64 \text{ Ct} + 2 \cdot 69,91 \text{ Ct} = 353,46 \text{ Ct}$$

Constatiamo che, alla stessa temperatura, i prodotti hanno meno entropia dei reagenti. Ora, se i reagenti prima della reazione erano a temperatura ambiente, allora i prodotti devono ricevere una quantità di entropia di 596,16 Ct. Di conseguenza la loro temperatura sarà più alta della temperatura ambiente, visto che a temperatura ambiente i prodotti contengono solamente 353,46 Ct. Possiamo anche dire che la quantità di entropia

$$S(\text{A}) - S(\text{B}) = 596,16 \text{ Ct} - 353,46 \text{ Ct} = 242,7 \text{ Ct}$$

è "di troppo".

Ma durante la reazione viene anche prodotta entropia. La calcoliamo grazie all'equazione (1)

$$S_{\text{prodotta}} = \frac{\mu(\text{A}) - \mu(\text{B})}{T} n(\text{R})$$

Per la nostra reazione

$$\mu(\text{A}) - \mu(\text{B}) = 817,91 \text{ kG}$$

Abbiamo detto che

$$n(\text{R}) = 1 \text{ mol}$$

e che

$$T = 298 \text{ K}.$$

Quindi otteniamo

$$S_{\text{prodotta}} = \frac{817,91 \text{ kG}}{298 \text{ K}} \cdot 1 \text{ mol} = 2744,7 \text{ Ct}$$

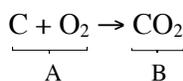
Quindi durante lo svolgimento della reazione vengono prodotti 2744,7 Ct. Questa entropia va aggiunta al resto di entropia calcolato in precedenza. L'entropia totale è

$$S(\text{A}) - S(\text{B}) + S_{\text{prodotta}}$$

$$= 242,7 \text{ Ct} + 2744,7 \text{ Ct} = 2987,4 \text{ Ct}$$

Questa entropia in eccesso causa un forte riscaldamento dei prodotti della reazione.

*Secondo caso*



$$S(A) = S(C) + S(O_2) \\ = 5,74 \text{ Ct} + 205,03 \text{ Ct} = 210,77 \text{ Ct}$$

$$S(B) = 213,64 \text{ Ct}$$

$$S(A) - S(B) = - 2,87 \text{ Ct}$$

Questa volta, a temperatura normale la quantità di entropia dei prodotti è maggiore di quella dei reagenti. Quindi inizialmente non c'è nessun resto di entropia. Se non venisse prodotta entropia i prodotti sarebbero più freddi dei reagenti. Però si deve ancora aggiungere l'entropia prodotta.

Con

$$\mu(A) - \mu(B) = 394,36 \text{ kG}$$

si ottiene

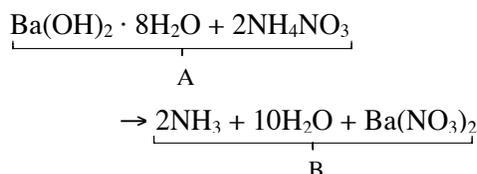
$$S_{\text{prodotta}} = \frac{394,36 \text{ kG}}{298 \text{ K}} \cdot 1 \text{ mol} = 1323,36 \text{ Ct}$$

Il bilancio completo è

$$S(A) - S(B) + S_{\text{prodotta}} \\ = - 2,87 \text{ Ct} + 1323,36 \text{ Ct} = 1320,5 \text{ Ct}$$

Perciò c'è ancora dell'entropia in eccesso e i prodotti sono più caldi dei reagenti.

*Terzo caso*



$$S(A) = S(\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}) + 2S(\text{NH}_4\text{NO}_3) \\ = 426,77 \text{ Ct} + 2 \cdot 151,08 \text{ Ct} = 728,93 \text{ Ct}$$

$$S(B) = 2S(\text{NH}_3) + 10S(\text{H}_2\text{O}) + S(\text{Ba(NO}_3)_2) \\ = 2 \cdot 192,34 \text{ Ct} + 10 \cdot 69,91 \text{ Ct} + 213,80 \text{ Ct} \\ = 1297,58 \text{ Ct}$$

$$S(A) - S(B) = - 568,65 \text{ Ct}$$

A temperatura normale il contenuto di entropia dei prodotti è nettamente maggiore di quello dei reagenti. Senza produzione di entropia i prodotti sarebbero molto più freddi dei reagenti. Controlliamo se questa mancanza di entropia può essere compensata dall'entropia prodotta.

Con

$$\mu(A) - \mu(B) = 38,46 \text{ kG}$$

si ottiene

$$S_{\text{prodotta}} = \frac{38,46 \text{ kG}}{298 \text{ K}} \cdot 1 \text{ mol} = 129,1 \text{ Ct}$$

e per il bilancio complessivo

$$S(A) - S(B) + S_{\text{prodotta}} \\ = - 568,65 \text{ Ct} + 129,1 \text{ Ct} = - 439,55 \text{ Ct}$$

Per portare i prodotti della reazione alla temperatura normale mancano 439,55 Ct. Quindi la temperatura dei prodotti è nettamente al di sotto di quella dei reagenti.

L'ultimo caso che abbiamo appena esaminato è abbastanza raro. Anche quando  $S(A)$  è minore di  $S(B)$  di solito l'entropia prodotta è sufficiente per compensare la differenza  $S(A) - S(B)$  e nel complesso c'è un eccesso di entropia.

Le reazioni per le quali c'è un eccesso di entropia (casi 1 e 2) si chiamano *esotermiche*. Le reazioni per le quali c'è un difetto di entropia che rende impossibile mantenere la temperatura iniziale (caso 3) si chiamano *endotermiche*.

### Esercizi

1. Quando il ferro arrugginisce viene assorbita o ceduta entropia? Quanta ne viene assorbita o ceduta?
2. In una soluzione monomolare di  $\text{CaCl}_2$  in acqua si aggiunge ancora un po' di  $\text{CaCl}_2$  e si rimesta. La soluzione si riscalda o si raffredda?
3. In una soluzione monomolare di  $\text{NaBr}$  in acqua si aggiunge ancora un po' di  $\text{NaBr}$  e si rimesta. La soluzione si riscalda o si raffredda?
4. In una soluzione monomolare di  $\text{KNO}_3$  in acqua si aggiunge ancora un po' di  $\text{KNO}_3$  e si rimesta. La soluzione si riscalda o si raffredda?



Massa ed energia



## 27. Fisica relativistica

### 27.1 Massa uguale energia

La seguente storiella non concorda del tutto con ciò che avvenne in realtà. Malgrado ciò ci può insegnare qualcosa.

Colombo e il suo equipaggio avvistano una nuova terra, sbarcano e constatano che è molto bella e fertile, con molti alberi e fiori. Credono che sia un'isola e la chiamano Florida. Dopo lunghe esplorazioni scoprono però che il sottosuolo di quella terra non sembra contenere ricchezze.

In un secondo viaggio Colombo scopre un'altra terra e anche in questo caso crede che si tratti di un'isola. Sembra sia coperta solo da deserti, non vi cresce nulla. Questa volta però, come scopre abbastanza in fretta, il sottosuolo è molto ricco. A causa dei bei colori delle sue rocce la chiama Colorado.

Alcuni anni più tardi Vespucci si trova nei paraggi della Florida e del Colorado e fa una scoperta sorprendente: entrambe le terre sono sulla stessa isola. Colombo vi era semplicemente sbarcato in due punti diversi.

Così si conclude la storiella. Ti è stata raccontata per chiarirti qualcosa che è avvenuto anche in fisica. È successo spesso di aver scoperto due volte la stessa cosa senza accorgersi che si trattava della stessa cosa. Ci occuperemo ora di uno di questi esempi.

Conosci già le due grandezze fisiche massa ed energia. Una, la massa, era già conosciuta come peso sin dall'antichità. L'altra, l'energia, è stata introdotta attorno al 1850 da Joule, Mayer e Helmholtz. Una cinquantina di anni più tardi, nel 1905, Einstein scoprì che si trattava della stessa grandezza. Massa ed energia sono solo due nomi per la stessa grandezza fisica.

Visto che inizialmente massa ed energia erano considerate grandezze diverse, erano ovviamente state introdotte anche due unità di misura diverse.

Da quando nel 1905 Einstein pubblicò la sua "teoria della relatività" sappiamo che tra massa  $m$  ed energia  $E$  vale la relazione:

$$E = k \cdot m$$

dove

$$k = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$$

è una costante.

Quando nella nostra storiella si è scoperto che Flo-

rida e Colorado erano in effetti la stessa isola, si sono capite due cose:

- Sull'isola prima conosciuta come Colorado si può anche praticare l'agricoltura.

- Sull'isola prima conosciuta come Florida ci sono ricchezze nel sottosuolo.

Quando si è scoperto che massa ed energia sono la stessa grandezza si sono capite due cose:

- La grandezza prima conosciuta come energia deve possedere anche le caratteristiche della massa: l'energia deve avere peso e l'energia deve avere inerzia.

- La grandezza prima conosciuta come massa deve possedere anche le caratteristiche dell'energia. Quindi con la massa si deve poter azionare o riscaldare qualcosa.

Queste sono le affermazioni sorprendenti e quasi incredibili della teoria della relatività. Nei prossimi paragrafi vedremo quali conseguenze hanno e vedremo perché fino al 1905 nessuno ci aveva pensato.

**Massa ed energia sono la stessa grandezza fisica.**

### 27.2 L'energia ha le caratteristiche della massa

Secondo la scoperta di Einstein l'energia ha peso. A quanti joule corrisponde un chilo ce lo dice l'equazione

$$E = k \cdot m$$

Secondo questa affermazione per esempio, fig. 27.1

- una batteria carica deve pesare più di quando è scarica;

- un'auto che va veloce deve pesare più di quando è lenta o di quando sta ferma;

- l'acqua calda in un recipiente pesa più di quando è fredda.

Il perché di solito non si nota si capisce subito calcolando di quanti kg cambia la massa degli oggetti in questione.

Prendiamo l'esempio di una batteria. Scaricandosi cede un'energia di circa 10 kJ. Di quanto si alleggerisce?

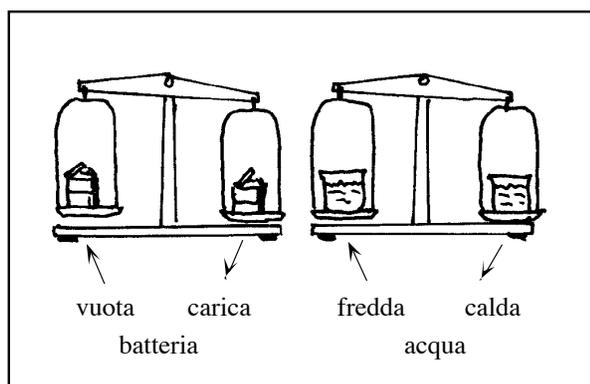


Fig. 27.1. Una batteria carica è più pesante di una vuota, l'acqua calda è più pesante di quella fredda.

Calcoliamo

$$m = \frac{E}{k} = \frac{10 \text{ kJ}}{9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}} = 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ kg}$$

Quindi la massa della batteria diminuisce di un valore inferiore alla massa di un granello di polvere. (Un tipico granello di polvere pesa circa  $10^{-12}$  kg.) Nessuna bilancia è in grado di misurare una tale variazione.

Valori simili si trovano per la differenza di massa tra un'auto veloce e una lenta e tra l'acqua calda e quella fredda.

Ma esiste una situazione dove la variazione di massa è percepibile? Altrimenti l'affermazione non sarebbe nemmeno verificabile. Situazioni del genere esistono: per esempio quando si carica un corpo con moltissima quantità di moto.

Sai che l'energia di un corpo aumenta quando lo si carica di quantità di moto. In fig. 27.2 è rappresentata la relazione tra energia e quantità di moto per un corpo qualsiasi così come è definita dalla teoria della relatività. Visto che massa ed energia sono la stessa cosa, questa è anche la relazione tra massa e quantità di moto. La massa di un corpo fermo, cioè quando non ha ancora quantità di moto, in fig. 27.2 è indicata con  $m_0$ . Quando la quantità di moto aumenta, aumenta anche la massa, il corpo diventa più pesante e ha più inerzia.

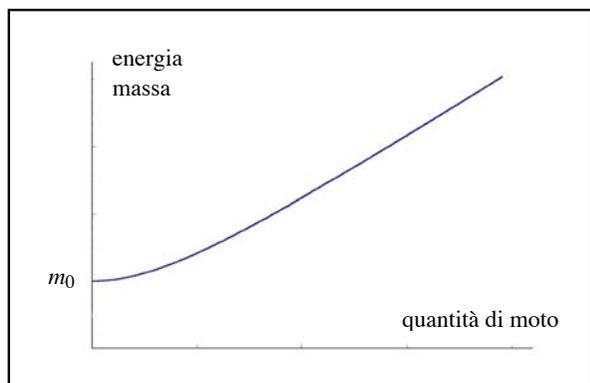


Fig. 27.2. Relazione tra energia e quantità di moto. È allo stesso tempo la relazione tra massa e quantità di moto.

La massa  $m_0$  di un corpo fermo viene detta *massa di riposo*.

Un netto aumento della massa di un corpo avviene in un *acceleratore di particelle*.

Un acceleratore di particelle è un impianto molto grande che funziona come il tubo catodico di un televisore. In un tubo catodico gli elettroni vengono caricati di quantità di moto in modo da formare un fascio.

Anche in un acceleratore di particelle, degli elettroni o altre particelle vengono caricati di quantità di moto. La differenza rispetto al tubo catodico: la quantità di moto data alle particelle è nettamente maggiore. Se due fasci di particelle ottenuti in questo modo sono diretti l'uno contro l'altro, nell'urto si formano nuove particelle. Da reazioni di questo tipo si può imparare molto sulla struttura della materia.

L'accelerazione delle particelle è molto rapida. Immaginiamo invece che si svolga lentamente. Gli elettroni sono caricati di quantità di moto a un ritmo continuo e regolare. Come è logico attendersi, diventano più veloci. Continuando a fornire quantità di moto ci si accorge però che l'aumento di velocità è sempre più piccolo. Alla fine la velocità non cambia più, seppure si continui a trasferire quantità di moto agli elettroni. La fig. 27.3 mostra la relazione tra velocità e quantità di moto.

Cosa impedisce alla velocità di aumentare ulteriormente? La fig. 27.2 ci fornisce la risposta. Caricando le particelle con quantità di moto, la massa aumenta. Così facendo aumenta anche l'inerzia delle particelle, ciò significa che è sempre più difficile cambiare la loro velocità. Alla fine la loro massa è così grande da rendere praticamente impossibile aumentarne ancora la velocità.

La velocità delle particelle si avvicina quindi a un valore impossibile da superare. Questa *velocità limite* è di

$$c = 300\,000 \text{ km/s}$$

È la stessa velocità alla quale si muove la luce. Quindi gli elettroni non possono essere più veloci della luce.

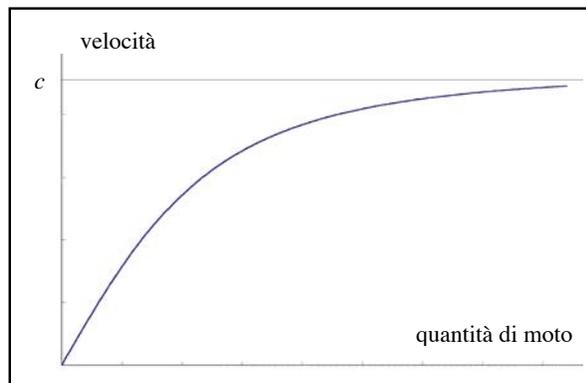


Fig. 27.3. Relazione tra velocità e quantità di moto. Per valori elevati di quantità di moto la velocità di un corpo si avvicina alla velocità limite  $c$ .

La velocità limite ha lo stesso valore anche per tutti gli altri corpi. Anche un'automobile, un aereo o un razzo non possono superare questa velocità. (Ovviamente un'auto o un aereo non raggiungono questa velocità anche per altri motivi.)

**Nessun corpo può muoversi a una velocità superiore alla velocità della luce.**

Tra l'altro, la costante  $k$  nell'equazione

$$E = k \cdot m$$

è il quadrato della velocità limite  $c$ . Quindi l'equazione può essere scritta nella forma

$$E = m \cdot c^2$$

### Esercizi

1. Per accelerare un'automobile fino a 100 km/h ci vuole una quantità di energia di circa 500 kJ. Quanto più pesante diventa l'auto? Contemporaneamente l'auto perde massa perché consuma benzina. Stima se nel complesso diventa più pesante o più leggera.

2. La luce solare che colpisce un metro quadrato (perpendicolare ai raggi del Sole) ogni secondo trasporta un'energia di circa 1000 joule. Quanto pesa la quantità di luce corrispondente? (La luce non ha massa di riposo.) Quanto dovremmo aspettare affinché sul metro quadrato sia caduto 1 grammo di luce?

3. Con la luce che irradia, il Sole emette una quantità di energia di circa  $3,8 \cdot 10^{23}$  J al secondo. Di quanto diventa più leggero?

## 27.3 La massa ha le caratteristiche dell'energia

Se la massa è la stessa cosa dell'energia, con la massa dovremmo poter fare tutte le cose utili per cui usiamo l'energia. Con una sostanza qualsiasi dobbiamo poter azionare veicoli e macchine e dobbiamo poter riscaldare una casa. Questa sostanza non deve essere uno speciale carburante o combustibile, basta che abbia massa - e quella ce l'ha ogni sostanza.

Quindi dovremmo poter usare sabbia come carburante. Vogliamo calcolare quanta sabbia serve per far viaggiare un'automobile.

L'equazione

$$E = k \cdot m$$

ci dice che 1 kg di sabbia (o 1 kg di una qualsiasi altra sostanza) contiene la quantità di energia

$$E = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg} \cdot 1 \text{ kg} = 9 \cdot 10^{16} \text{ J.}$$

Bruciando 1 kg di benzina in un comune motore si ottengono  $4,3 \cdot 10^7$  J. Il chilo di sabbia corrisponde a una quantità di energia due milioni di volte superiore, visto che

$$2\,000\,000 \cdot 4,3 \cdot 10^7 \text{ J} \approx 9 \cdot 10^{16} \text{ J.}$$

È mai possibile? Non abbiamo magari fatto un errore?

Effettivamente il calcolo è esatto. Solo la conclusione che con la sabbia si può muovere un'automobile è sbagliata. Dopotutto, che l'energia non sia sempre utilizzabile per azionare qualcosa è un fatto ben noto.

Un esempio che ti aiuterà sicuramente a capire: per riscaldare una casa non basta avere abbastanza olio combustibile. Ci vuole anche diossigeno per bruciare l'olio combustibile. Se non ci fosse il diossigeno, l'olio combustibile non servirebbe a niente. Non saremmo in grado di trasferire l'energia su un altro portatore - ed è questo il punto. Quindi, oltre all'olio combustibile ci vuole un partner per la reazione.

La stessa cosa vale per le enormi quantità di energia contenute in ogni sostanza per il fatto che hanno massa. Anche per usare questa energia, per trasferirla su un altro portatore, è necessario un partner adatto per la reazione.

Il partner di reazione che ci serve è la cosiddetta *antimateria*. L'antimateria è una forma di materia che in natura non esiste.

Si può produrre dell'antimateria artificialmente, ma ci vuole molta energia: esattamente la quantità di energia corrispondente alla massa dell'antimateria prodotta. Quindi non ci si guadagna niente.

Inoltre è praticamente impossibile conservare l'antimateria più a lungo di una frazione di secondo. Reagisce molto in fretta con la materia.

Si è ipotizzato che certe zone dello spazio, molto lontane da noi, siano fatte di antimateria. Finora comunque queste ipotesi non hanno avuto conferma.



Onde sonore

Onde elettromagnetiche

Fotoni



## 28. Onde

Tutti conoscono le onde dell'acqua, fig. 28.1: una specie di deformazione della superficie dell'acqua che si sposta da sola.

Un'altra manifestazione delle onde è il suono: piccoli spostamenti d'aria che si muovono attraverso l'aria stessa.

Le onde dell'acqua e le onde sonore sono così interessanti da essere motivo sufficiente per occuparsi a fondo delle onde.

Di fatto le onde hanno un significato ancora molto più importante nelle scienze naturali. Molti fenomeni possono essere interpretati con le onde, sebbene a prima vista non si direbbe.

C'è per esempio la vasta categoria delle onde elettromagnetiche. Ne fanno parte le onde usate per la trasmissione radiofonica e televisiva. Inoltre ci sono le "microonde" usate nei forni omonimi. Poi tutta una serie di fenomeni denominati radiazioni: radiazione infrarossa, ultravioletta, Röntgen, gamma e, non da ultimo, la luce. Più avanti vedremo cosa hanno in comune tutti questi tipi di radiazione elettromagnetica. E cercheremo di capire quale sia il mezzo nel quale si muovono queste onde. Confrontando queste onde con le onde dell'acqua: a cosa corrisponde l'acqua e a cosa corrisponde la deformazione dell'acqua?

Capirai che vale la pena di occuparsi di onde.

Nell'elenco dei vari fenomeni legati alle onde avrai notato come alcune onde sono usate per la trasmissione di dati. In natura e nella tecnica, suono, luce e onde radio appaiono come portatori di dati. Ma anche altri tipi di onde o "radiazioni" sono utilizzate

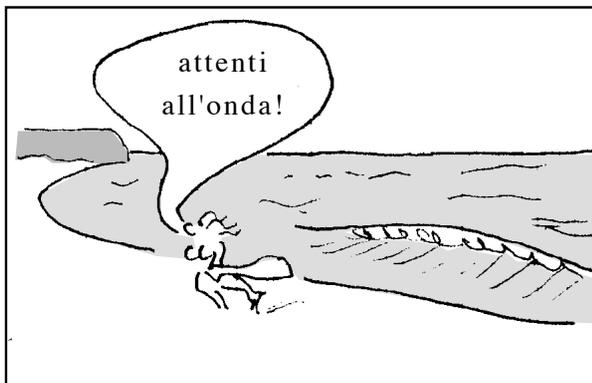


Fig. 28.1. Onda dell'acqua.

come portatori di dati. Forse hai già sentito parlare di videocamere a infrarossi. E sicuramente sai già come i raggi Röntgen (raggi X) sono usati per guardare dentro un corpo umano, cioè per estrarre dati dal corpo di una persona.

### 28.1 Il portatore delle onde

Cominciamo la nostra analisi con un rappresentante delle onde particolarmente semplice: le "onde in una corda".

Una lunga corda viene appoggiata sul pavimento, un'estremità viene mossa verso l'alto con forza e poi subito verso il basso. Dall'estremità che abbiamo mosso parte un'onda. La fig. 28.2 ne mostra 3 "istantanee".

Quindi ciò che chiamiamo onda è la deformazione che si sposta lungo la corda. È ovvio che senza corda non potremmo generare nessuna onda.

Generalizziamo: affinché un'onda possa esistere ci deve essere una struttura nella quale l'onda si sposta. Definiamo questa struttura il portatore dell'onda (nel nostro caso il portatore è la corda). All'inizio il portatore si trova in uno stato normale (la corda è stesa sul pavimento). Una "sorgente", che si trova in un determinato punto, causa una breve variazione dello stato normale (una persona muove un punto della corda su e giù). Questa variazione dello stato normale si muove attraverso il portatore.

Tenendo presente questi aspetti, esaminiamo un secondo tipo di onda: le onde dell'acqua in una bacinella. Il portatore dell'onda è l'acqua. Nello stato

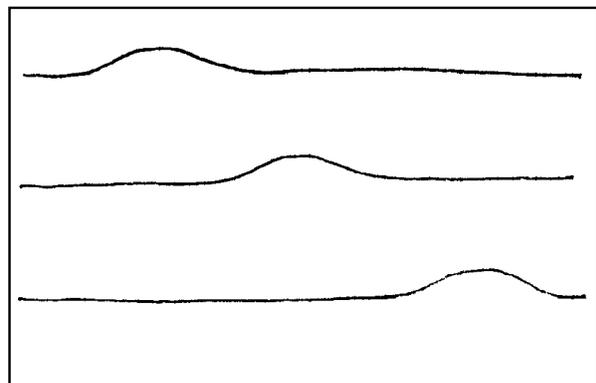


Fig. 28.2. Tre istantanee di un'onda della corda.

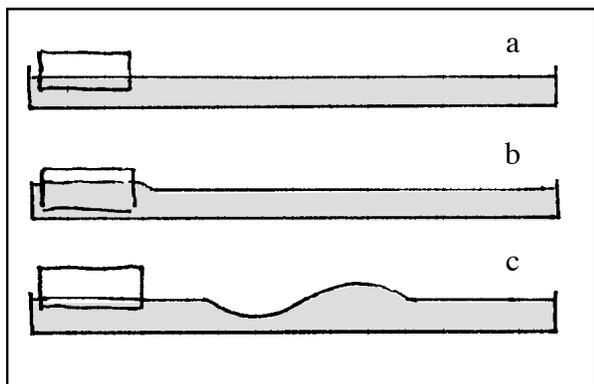


Fig. 28.3. Il corpo galleggiante viene spinto brevemente sott'acqua e poi riportato nella posizione iniziale.

normale la superficie dell'acqua è perfettamente orizzontale, fig. 28.3a. A un'estremità della bacinella spingiamo brevemente sott'acqua un corpo, fig. 28.3b, e poi lo lasciamo andare. In questo modo causiamo una variazione dallo stato normale: sulla superficie si forma una gobba che si allontana dalla sorgente, fig. 28.3c.

La fig. 28.4 mostra un terzo esempio di onda. Il portatore dell'onda è una lunga molla d'acciaio leggermente tesa. La variazione dello stato normale: un'estremità della molla viene spinta brevemente verso destra e poi riportata subito nella posizione iniziale. Anche questa perturbazione dello stato normale si muove autonomamente allontanandosi dalla sorgente.

Riassumiamo:

**Un'onda ha bisogno di un portatore. In un punto, nella sorgente, lo stato normale del portatore viene modificato rapidamente. Questa variazione dallo stato normale si muove da sola allontanandosi dalla sorgente.**

In tutti gli esempi considerati, oltre all'onda si muove anche il suo portatore. Distingui con cura tra questi due movimenti!

A volte il movimento del portatore è perpendicolare alla direzione del moto dell'onda: per esempio nell'onda della corda. Queste onde si dicono *onde trasversali*.

A volte il movimento del portatore è nella stessa direzione di quello dell'onda: per esempio nell'onda della molla. Queste onde si dicono *onde longitudinali*.

A volte il movimento del portatore è più complesso. Per esempio nell'onda dell'acqua il portatore, cioè l'acqua, si muove su una curva chiusa.

E a volte il portatore non si muove affatto, per esempio nelle onde elettromagnetiche.

**Non confondere il movimento dell'onda con il movimento del portatore dell'onda.**

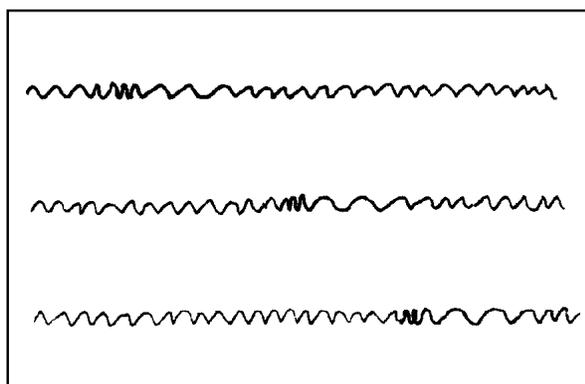


Fig. 28.4. Tre istantanee di un'onda longitudinale in una molla d'acciaio.

## 28.2 Trasporto d'energia in un'onda

Consideriamo un esempio concreto: l'onda dell'acqua, fig. 28.3.

Spingiamo molto, molto lentamente sott'acqua un corpo che galleggia. Il livello dell'acqua si innalza in tutta la bacinella. Per spingerlo sott'acqua ci vuole una certa quantità di energia. Lasciamo poi riemergere il corpo, sempre molto, molto lentamente. Il livello dell'acqua scende di nuovo e noi recuperiamo l'energia che era stata messa nell'acqua in precedenza. In questo processo non si è formata nessuna onda. Ripetiamo l'immersione e riemersione del corpo, questa volta però molto in fretta. Per spingere l'oggetto ci vuole più energia di prima, e non possiamo recuperarla tutta. Una parte dell'energia se ne va con l'onda. L'onda trasporta energia.

Possiamo captare questa energia in un altro punto e usarla per azionare qualcosa. Che un'onda dell'acqua trasporti energia forse lo hai già sperimentato di persona se hai fatto il bagno in mare. Ci sono anche centrali elettriche che sfruttano l'energia delle onde del mare.

Torniamo al nostro esperimento. Se spostiamo rapidamente l'oggetto galleggiante, si forma un'onda con la quale se ne va dell'energia. Se lo spostiamo molto lentamente non si forma (quasi) onda e non va (quasi) persa energia. In altre parole:

**Più è rapida la variazione nel punto dove si trova la sorgente, maggiore sarà l'energia portata via dall'onda.**

## 28.3 La velocità delle onde

Prova a rendere più veloce o più lenta l'onda in una corda muovendo in modi diversi l'estremità della corda. Riuscirai solo a cambiare la forma dell'onda o l'entità della deformazione. Sulla sua velocità non hai nessuna influenza. Non è come quando lanci un sasso. La velocità del sasso dipende dalla quantità di moto che ha ricevuto dalla "sorgente". Ma da cosa dipende la velocità di un'onda?

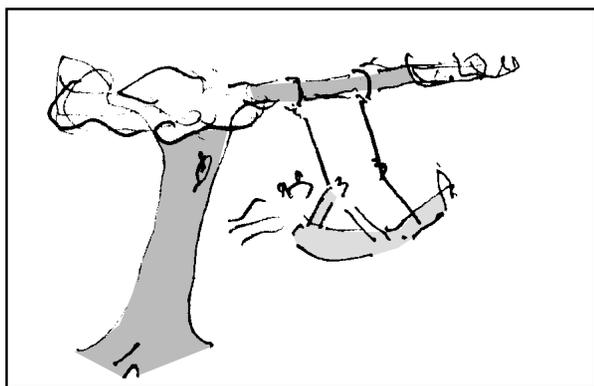


Fig. 28.5. L'altalena con il bambino compie un'oscillazione.

La risposta a questa domanda è abbastanza complicata. Però possiamo darne una versione parziale:

**La velocità di un'onda dipende dal portatore nel quale l'onda si muove.**

Così un'onda sulla superficie dell'acqua ha una velocità diversa che sulla superficie dell'alcol, della benzina o del mercurio. O un'onda in una molla più rigida ha una velocità diversa che in una molla meno rigida. Le onde sonore viaggiano nell'aria a circa 300 m/s e nell'acqua a circa 1480 m/s. (Le onde dell'acqua che abbiamo considerato in precedenza non sono onde sonore. Le onde sonore in acqua si possono però generare facilmente in una piscina: si va sott'acqua e si lancia un urlo.)

La luce si muove nel vuoto (che come vedremo in seguito non è poi così vuoto) a 300 000 km/s, nel vetro solo a 200 000 km/s.

**Esercizio**

Si piazzano molte tessere del domino in posizione verticale l'una accanto all'altra. Se si dà una spinta alla prima tessera, questa cade addosso alla seconda che a sua volta cade addosso alla terza e così via. Quindi si provoca una variazione dello stato delle tessere del domino. Cos'ha in comune con le onde questo processo? E in cosa si differenzia dalle onde?

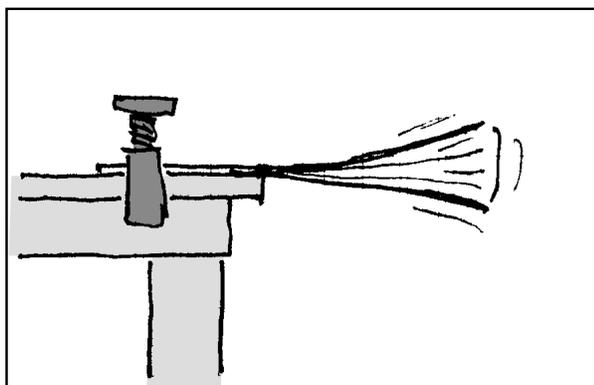


Fig. 28.6. Il righello compie un'oscillazione.

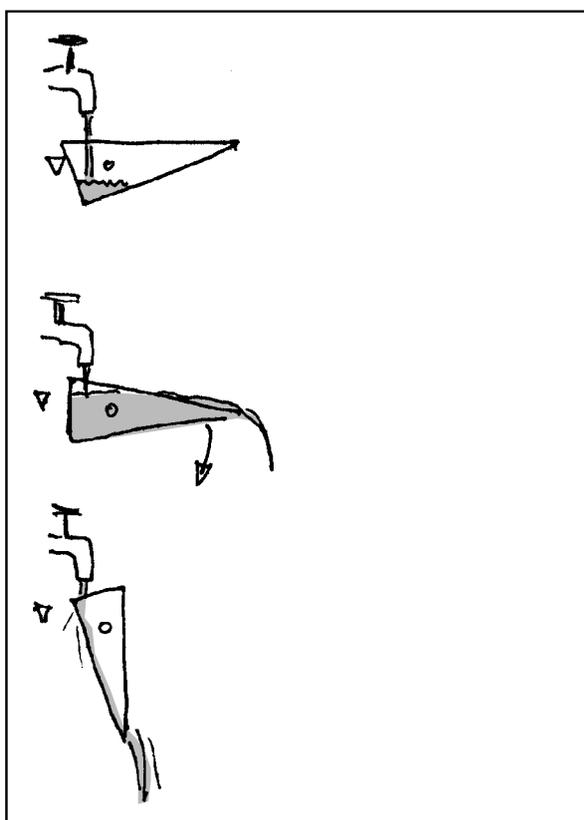


Fig. 28.7. Il contenitore compie un'oscillazione.

## 28.4 Oscillazioni

Prima di proseguire con il tema "onde" dobbiamo compiere una digressione e occuparci di un altro fenomeno: le oscillazioni.

Quando una qualsiasi grandezza fisica cambia il suo valore in modo periodico si parla di oscillazione.

La posizione del bambino in fig. 28.5 cambia in modo periodico, il bambino compie un'oscillazione.

Fissa un'estremità di un righello al tavolo, spingi l'altra estremità verso il basso e lasciala andare. Il righello compie un'oscillazione, fig. 28.6.

La fig. 28.7 mostra un recipiente montato su un perno che gli permette di capovolgersi. Dal rubinetto fuoriesce un flusso continuo e costante d'acqua che riempie il recipiente. Quando l'acqua raggiunge un certo livello, il recipiente si ribalta in avanti e si svuota. Visto che ora è di nuovo vuoto, torna nella posizione iniziale e il processo ricomincia daccapo. Quindi il recipiente compie un'oscillazione.

Rappresentiamo graficamente un'oscillazione. Riportiamo il valore della grandezza che varia periodicamente, in funzione del tempo.

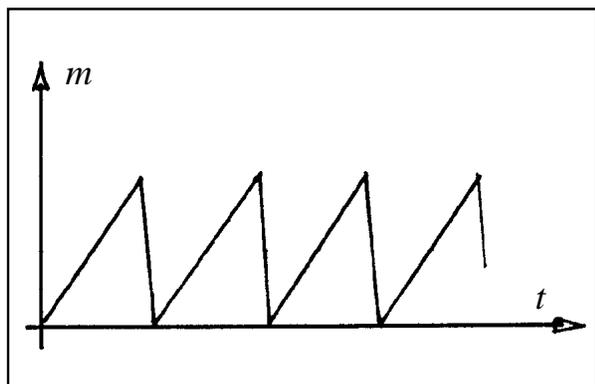


Fig. 28.8. Massa dell'acqua nel contenitore di fig. 28.7 in funzione del tempo.

In fig. 28.8 è rappresentata la massa d'acqua contenuta nel recipiente di fig. 28.7 in funzione del tempo. All'inizio la massa dell'acqua aumenta regolarmente. Appena il recipiente si capovolge la massa d'acqua diminuisce rapidamente, poi ricomincia ad aumentare e così via.

Un tipo di oscillazione particolarmente importante è l'*oscillazione sinusoidale*. In questo caso la grandezza fisica considerata varia seguendo la cosiddetta *funzione sinusoidale*. Ad esempio l'estremità destra del righello in fig. 28.6 compie un'oscillazione sinusoidale. In fig. 28.9 è rappresentata la posizione  $x$  di questa estremità in funzione del tempo.

La definizione della funzione sinusoidale ti verrà insegnata nel corso di matematica. Per i nostri scopi basta sapere che si tratta di un'oscillazione molto regolare, un'oscillazione senza scossoni e senza improvvisi cambiamenti di direzione.

A proposito: i valori della funzione sinusoidale possono essere calcolati con una qualsiasi calcolatrice tascabile.

Il tempo trascorso a partire da quando la struttura oscillante si trova in un qualsiasi stato iniziale fino a quando si ritrova per la prima volta nello stesso stato, si chiama *durata dell'oscillazione*, o *periodo*, e viene abbreviato con la lettera  $T$ .

Se diciamo che per un righello oscillante

$$T = 0,2 \text{ s}$$

intendiamo dire che, partendo dal punto più basso, il righello impiega 0,2 s per muoversi una volta verso l'alto e poi tornare al punto di partenza.

Nel grafico in fig. 28.9 è evidenziata la durata dell'oscillazione.

Spesso, invece della durata dell'oscillazione  $T$ , come misura della rapidità dell'oscillazione si usa la frequenza  $f$ :

$$f = \frac{1}{T}$$

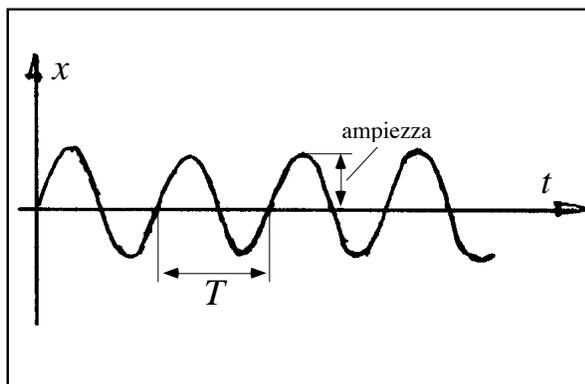


Fig. 28.9. Posizione  $x$  dell'estremità del righello in fig. 28.6 in funzione del tempo.

Il valore di  $f$  rappresenta il numero di oscillazioni al secondo.

Ad esempio, se la durata dell'oscillazione è

$$T = 0,5 \text{ s},$$

allora

$$f = \frac{1}{0,5 \text{ s}} = 2 \text{ /s}$$

e cioè due oscillazioni al secondo. Risultato logico, visto che ogni oscillazione dura esattamente mezzo secondo.

L'unità di misura 1/s, cioè "al secondo" è detta anche Hertz, abbreviata Hz. Quindi nel nostro esempio abbiamo

$$f = 2 \text{ Hz}.$$

L'estensione massima di un'oscillazione sinusoidale è la sua *ampiezza*, fig. 28.9.

### Esercizi

1. Cita degli esempi di processi che coinvolgono un'oscillazione. Quali sono le grandezze che variano periodicamente il loro valore?
2. Negli orologi meccanici è il cosiddetto bilanciere a oscillare e a produrre il tipico rumore "tic-tac". Nel caso in cui a casa vostra ci sia una sveglia meccanica: misura la durata di 10 oscillazioni con un altro orologio che abbia la lancetta dei secondi. Quanto vale la durata dell'oscillazione della sveglia? Quant'è la sua frequenza?
3. Appendi un oggetto a un filo lungo 1,50 m, fallo oscillare e misura la durata dell'oscillazione. Sostituisci l'oggetto con un altro più pesante e misura nuovamente la durata dell'oscillazione. Confronta i risultati ottenuti.

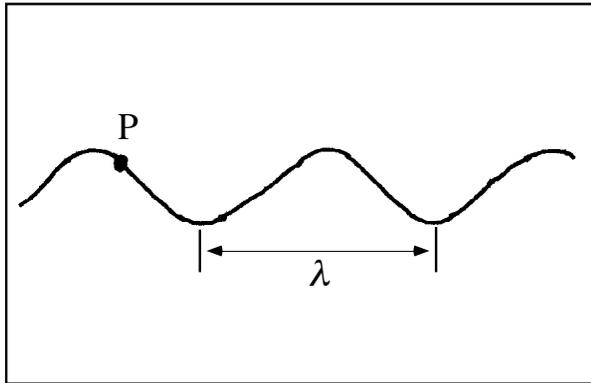


Fig. 28.10. Istantanea di una corda attraversata da un'onda sinusoidale.

## 28.5 Onde sinusoidali

Torniamo alle onde.

Non ci basta più che un'unica onda attraversi uno specchio d'acqua. Vogliamo che il processo di trasporto sia continuo. Cosa possiamo fare? Possiamo fare in modo che partano alcune o molte onde, vale a dire un treno d'onda. Se dalla sorgente deve partire un treno d'onda non è sufficiente che l'oggetto che genera l'onda si muova su e giù una sola volta. Dobbiamo farlo muovere su e giù ripetutamente. La sorgente deve compiere un'oscillazione.

Nei nostri esempi l'emittente ha dovuto compiere un certo movimento affinché partisse un'onda: per l'onda dell'acqua un movimento in su e in giù, per l'onda della molla d'acciaio un movimento in avanti e indietro. Ora, per generare un'onda periodica questo movimento deve essere oscillatorio.

Se la sorgente di un'onda compie un'oscillazione sinusoidale genererà un'onda sinusoidale.

Un'onda sinusoidale in una corda è facilmente riconoscibile. Un'istantanea della corda assume la forma della funzione sinusoidale, fig. 28.10.

Immaginiamo di rappresentare delle istantanee della corda prese in rapida successione, fig. 28.11. La prima immagine mostra un andamento sinusoidale, la seconda anche, la terza pure e così via. Ma le im-

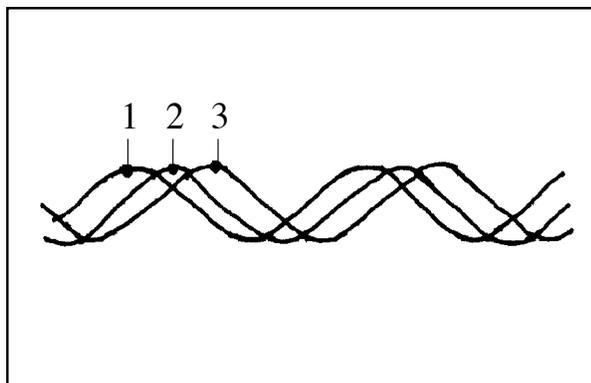


Fig. 28.11. Tre istantanee in rapida sequenza di un'onda sinusoidale.

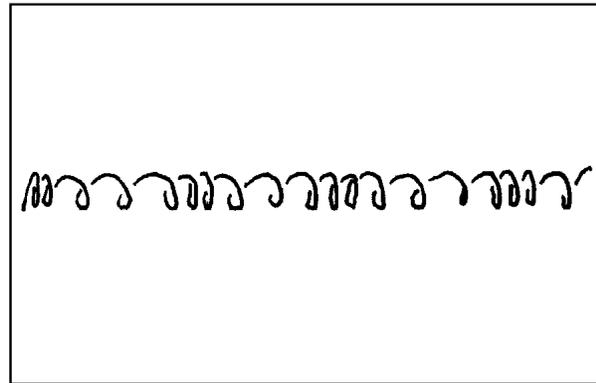


Fig. 28.12. Istantanea di un'onda sinusoidale longitudinale.

magini sono sfasate l'una rispetto all'altra. Quindi tutta la funzione sinusoidale si è spostata verso destra.

Prendiamo ora un'istantanea di un'onda sinusoidale longitudinale, per esempio un'onda sinusoidale in una molla d'acciaio, fig. 28.12. Questa volta non si nota subito un andamento sinusoidale. Ma se misuriamo lo spostamento di ogni punto della molla rispetto alla sua posizione nello stato normale e lo rappresentiamo in funzione della posizione in cui si trova nello stato normale, allora otteniamo nuovamente l'immagine di una funzione sinusoidale.

In fig. 28.10 è evidenziata la distanza tra due "avvallamenti d'onda" consecutivi. Questa distanza è detta *lunghezza d'onda* ed è rappresentata con la lettera greca lambda:  $\lambda$ . Naturalmente anche la distanza tra due "creste d'onda" consecutive è uguale a  $\lambda$ .

Affinché un'onda sinusoidale si muova lungo una corda, l'estremità della corda deve compiere una *oscillazione* sinusoidale. Ma quando in una corda c'è un'onda sinusoidale non è solo la sua estremità a compiere un'oscillazione sinusoidale, ma ogni suo punto. Il punto P in fig. 28.10 compie un'oscillazione sinusoidale su e giù esattamente come il punto P. Però le oscillazioni dei due punti sono sfasate temporalmente.

### Esercizi

1. Rappresenta lo spostamento di un punto su una corda attraversata da un'onda in funzione del tempo. Nello stesso sistema di coordinate, rappresenta anche lo spostamento di un altro punto sulla stessa corda.
2. Le onde dell'acqua visibili in mare o in uno stagno sono a volte quasi sinusoidali. Quali lunghezze d'onda possiamo osservare?

## 28.6 La relazione tra velocità, frequenza e lunghezza d'onda

Esaminiamo come le creste e gli avvallamenti d'onda escono dalla sorgente: per ogni durata dell'oscillazione  $T$ , dalla sorgente provengono esattamente una cresta d'onda completa e un avvallamento d'onda completo: un pezzo d'onda di lunghezza  $\lambda$ . Ciò significa che nel tempo  $T$  tutta l'onda avanza di un tratto  $\lambda$ .

Con questo risultato siamo in grado di calcolare la velocità dell'onda. Visto che la velocità è uguale al tratto percorso diviso per il tempo impiegato, otteniamo

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Sostituiamo la durata dell'oscillazione  $T$  con la frequenza  $f$ . Con  $T = 1/f$  si ottiene

$$v = \lambda \cdot f$$

Un esempio: se un'onda ha la lunghezza d'onda  $\lambda = 2$  m e ogni parte del portatore d'onda oscilla con la frequenza 4 Hz, per la velocità dell'onda otteniamo

$$v = 2 \text{ m} \cdot 4 \text{ Hz} = 2 \text{ m} \cdot 4/\text{s} = 8 \text{ m/s.}$$

### Esercizi

1. La velocità delle onde sonore nell'aria è di circa 300 m/s. Qual è la lunghezza d'onda corrispondente al suono del La di un diapason? Il La di un diapason ha una frequenza di 440 Hz.

2. Le onde radio hanno una velocità

$$v = 300\,000 \text{ km/s}$$

Un emittente trasmette alla frequenza di 98,4 MHz. Qual è la lunghezza d'onda delle onde emesse?

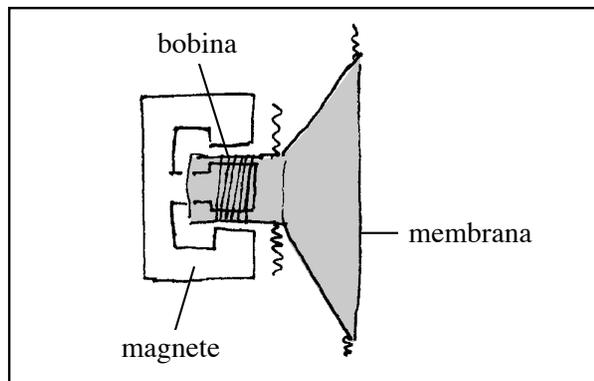


Fig. 28.13. Altoparlante.

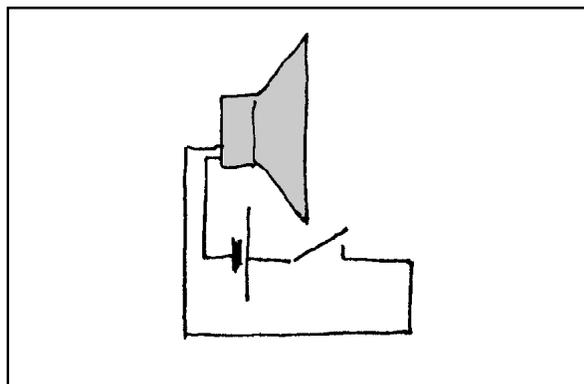


Fig. 28.14. Aprendo e chiudendo l'interruttore si sente un clic.

## 28.7 Onde sonore

Il portatore delle onde sonore è l'aria. Visto che l'aria non si vede, non si possono vedere nemmeno le onde sonore. Che nel caso del suono si tratti di onde nell'aria, si nota chiaramente considerando la generazione del suono in un altoparlante. C'è bisogno di un altoparlante con la "membrana" ben visibile, l'ideale è un altoparlante senza la cassa.

La fig. 28.13 mostra come è fatto un altoparlante. La membrana è montata in modo da potersi muovere perpendicolarmente rispetto all'altoparlante. Sulla parte posteriore della membrana è montata una bobina. La bobina è all'interno di un magnete permanente. Un polo del magnete è sulla faccia esterna della parte interna, l'altro polo è sulla faccia interna della parte esterna. Quando nella bobina scorre una corrente elettrica, la bobina viene spinta dal campo magnetico in avanti o indietro - a seconda della direzione della corrente. La membrana segue il movimento della bobina.

Allacciamo l'altoparlante a una batteria e a un interruttore, fig. 28.14. Se chiudiamo l'interruttore si sente un clic. E se apriamo l'interruttore sentiamo un altro clic. Notiamo anche che accendendo l'interruttore la membrana si sposta in avanti rispetto alla posizione iniziale e che spegnendolo di nuovo la membrana torna nella posizione iniziale.

Lo spostamento rapido della membrana causa uno spostamento altrettanto rapido dell'aria nelle immediate vicinanze della membrana. E questo spostamento parte dall'altoparlante e si allontana. Lo spostamento d'aria in movimento è l'onda sonora.

L'aria si sposta avanti e indietro nella stessa direzione dell'onda sonora. Quindi il suono è un'onda longitudinale.

Un altro semplice esperimento dimostra che il portatore del suono deve essere l'aria, fig. 28.15. Un campanello viene allacciato a una batteria e posto sotto una campana di vetro. Mentre il campanello suona, l'aria viene pompata fuori dalla campana di

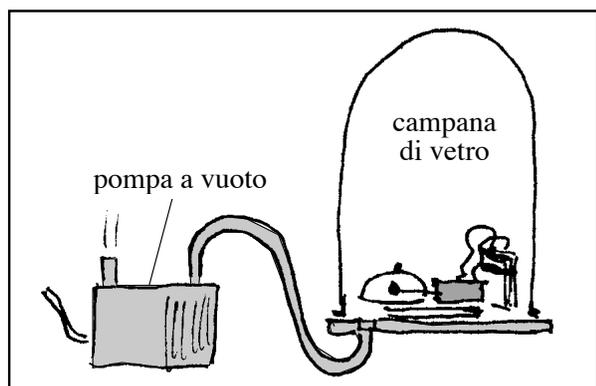


Fig. 28.15. Se nella campana di vetro non c'è più aria, il campanello non si sente (quasi) più.

vetro. Mentre si pompa, il suono diventa sempre più debole, fino a quando non lo sente quasi più. Se facciamo affluire nuovamente l'aria nella campana, il suono del campanello ridiventa udibile.

Malgrado l'assenza d'aria il suono è ancora parzialmente udibile perché il suono viene trasportato anche dai solidi: in questo caso dal supporto del campanello.

**Il suono è un'onda longitudinale. Di solito il portatore del suono è l'aria.**

Allacciamo l'altoparlante a una sorgente che periodicamente accende e spegne la tensione. La fig. 28.16 mostra l'andamento della tensione in funzione del tempo. La sorgente di tensione è fatta in modo da poterne regolare la frequenza. Cominciamo con una frequenza molto bassa: 1 Hz. Si sentono due clic al secondo: uno ogni volta che si accende e uno ogni volta che si spegne.

Aumentiamo lentamente la frequenza. I clic giungono sempre più ravvicinati. Quando si arriva a circa 20 Hz il nostro udito non riesce più a percepire i singoli clic distinti l'uno dall'altro. A quel punto ciò che sentiamo è un *suono puro*, una percezione costante e continua.

Il suono che sentiamo è molto grave. Se aumentiamo la frequenza sentiamo un suono più acuto.

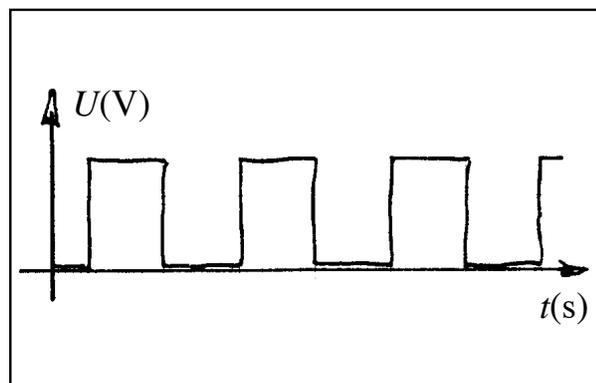


Fig. 28.16. "Tensione a gradino".

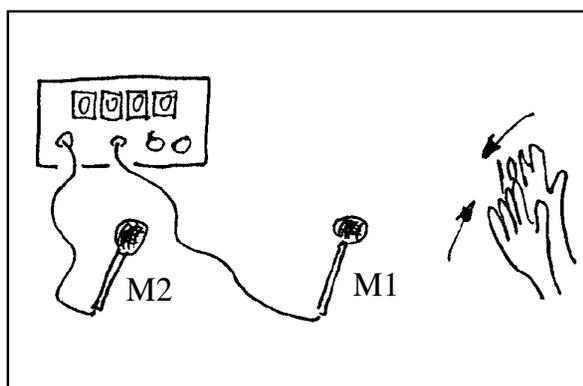


Fig. 28.17. Misurazione della velocità di un'onda sonora.

Ora invece di una "tensione a gradino" applichiamo all'altoparlante una tensione sinusoidale. Cominciamo di nuovo con una frequenza molto bassa. Questa volta però, al di sotto di 20 Hz non sentiamo proprio nulla. I motivi sono due.

Da un lato a frequenze così basse non viene generata nessuna onda. Esattamente come su uno specchio d'acqua non viene generata nessuna onda quando un oggetto viene spinto sott'acqua molto lentamente. Inoltre il nostro udito è sensibile solo a onde di una certa frequenza: circa tra 20 Hz e 20 000 Hz. Invecchiando questo intervallo si riduce notevolmente.

**Il nostro udito è sensibile a onde sinusoidali di frequenza compresa tra 20 Hz e 20 kHz. Più è alta la frequenza, più è acuto il suono.**

Misuriamo la velocità di un'onda sonora, fig. 28.17. L'onda viene generata battendo le mani.

L'onda transita prima dal microfono M1 poi da M2. I microfoni sono collegati a un cronometro elettronico. Quando a M1 giunge un segnale il cronometro parte; quando a M2 giunge un segnale il cronometro si ferma. Quindi il cronometro misura il tempo impiegato dall'onda per andare da M1 a M2.

Calcoliamo la velocità dell'onda dividendo la distanza tra M1 e M2 per l'intervallo di tempo misurato. La misurazione non è molto precisa. Con un procedimento più accurato noteremmo che la velocità del suono dipende dalla temperatura. Otteniamo il valore approssimativo di 300 m/s.

**La velocità del suono nell'aria è di circa 300 m/s.**

### Esercizi

1. Cita alcune sorgenti di onde sonore.
2. Qual è la frequenza di un suono la cui lunghezza d'onda è 2 m?
3. Quali sono le lunghezze d'onda del suono più grave e di quello più acuto che siamo in grado di percepire?

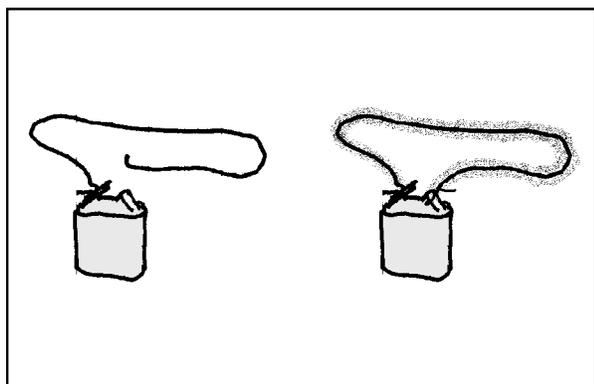


Fig. 28.18. Dintorni di un conduttore elettrico in due situazioni diverse. A sinistra: senza campo magnetico. A destra: con campo magnetico.

4. La velocità del suono aumenta con l'aumentare della temperatura dell'aria. Un'onda sonora sinusoidale passa da una zona di aria fredda a una zona di aria calda. Cosa succede alla sua frequenza e cosa succede alla sua lunghezza d'onda?

5. Durante un temporale vedi un lampo e dopo 10 secondi senti il tuono. A che distanza si trova il temporale?

## 28.8 Onde elettromagnetiche

Vogliamo generare delle onde elettromagnetiche. Per farlo ci rifacciamo al modo per ottenere le altre onde: facciamo in modo che lo stato del portatore subisca una variazione molto rapida. Cominciamo con un filo attraversato da una corrente elettrica. Come sai, il filo è circondato da un campo magnetico. Quindi lo stato dei dintorni del filo subisce un cambiamento: senza corrente non c'è campo magnetico, quando c'è corrente c'è anche il campo, fig. 28.18. Esaminiamo ora il processo di formazione del campo magnetico al rallentatore: aumentiamo lentamente l'intensità della corrente a partire da 0 A. Più la corrente è intensa, più denso è il campo. Se togliamo nuovamente la corrente il campo sparisce. Aumentando l'intensità della corrente nel campo affluisce energia. Diminuendo l'intensità della corrente l'energia torna nel filo e lì produce calore.

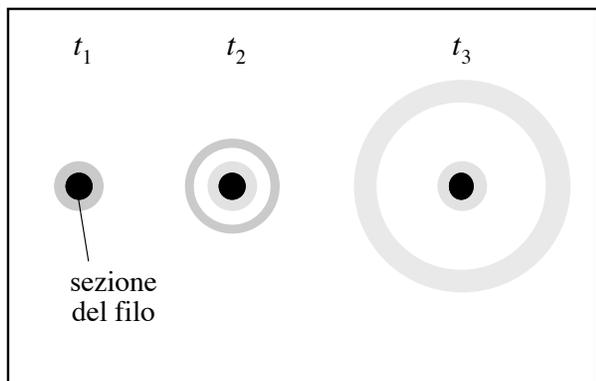


Fig. 28.19. Sezione di un filo in tre istanti diversi. Accendendo rapidamente la corrente elettrica il campo magnetico si allontana dal filo.

Ora pensiamo all'onda: accendiamo la corrente molto rapidamente chiudendo l'interruttore. La variazione di stato dei dintorni del filo è quindi molto rapida e si allontana autonomamente dal filo, fig. 28.19. La variazione di stato è una variazione del campo magnetico. Anche ciò che si allontana è un campo magnetico. Questa onda "elettromagnetica" si allontana durante l'accensione della corrente. Se la corrente scorre con intensità costante non succede niente.

Se spegnamo (rapidamente) la corrente si crea nuovamente una rapida variazione di stato e parte un'altra onda.

Il filo nel quale abbiamo causato le rapide variazioni di corrente funge da antenna emittente.

**Se in un filo si accende e si spegne una corrente elettrica, dal filo parte un'onda elettromagnetica.**

Però non è per niente facile accendere e spegnere rapidamente la corrente in un filo. Se usiamo un comune interruttore il processo è troppo lento per i nostri scopi: appena i contatti si toccano comincia a scorrere una corrente di bassa intensità, intensità che poi aumenta ma "lentamente". Allo stesso modo, aprendo l'interruttore l'intensità della corrente non diminuisce con la rapidità che vorremmo. Un metodo migliore consiste nel produrre una scarica grazie a una tensione molto elevata. In questo caso la variazione dell'intensità della corrente è molto rapida.

In linea di massima potremmo produrre un'onda elettromagnetica anche in un altro modo: prendiamo un magnete permanente e lo muoviamo molto in fretta. Anche così si cambia il campo magnetico. Questo procedimento dà scarsi risultati perché non si riesce a muovere il magnete abbastanza velocemente.

Da cosa possiamo capire se siamo riusciti a produrre un'onda elettromagnetica? Dovremmo avere a disposizione un congegno che reagisca all'arrivo dell'onda: un'antenna ricevente. Il metodo più semplice: accendiamo una radio e la regoliamo sulle onde corte, medie o lunghe (solo la FM non è adatta). Ogni volta che arriva una delle onde generate, si sente un rumore di disturbo, un clic. Possiamo anche visualizzare l'arrivo dell'onda: colleghiamo l'entrata di un oscilloscopio alle due estremità di un filo, fig. 28.20. Il filo forma una bobina con un solo avvolgimento. L'arrivo dell'onda significa un cambiamento del campo magnetico in questa bobina, e ogni variazione del campo magnetico di una bobina causa una tensione ai suoi capi. Questo processo l'avevamo chiamato induzione. Visto che la variazione avviene in tempi molto brevi produce solo un "picco di tensione" altrettanto breve, che però può essere visto sullo schermo dell'oscilloscopio.

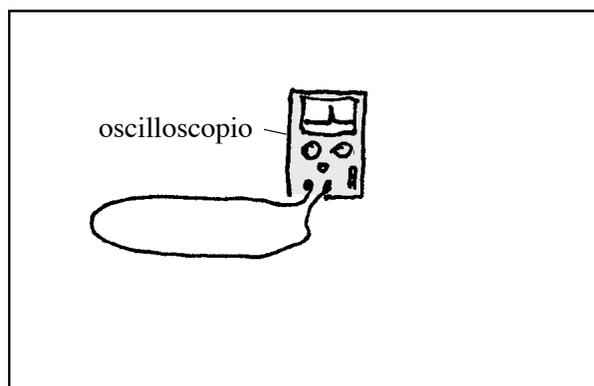


Fig. 28.20. Il filo funge da antenna ricevente. L'onda in arrivo induce una tensione nell'antenna ricevente. La tensione è evidenziata dall'oscilloscopio.

C'è una domanda importante ancora senza risposta: dove viaggia l'onda elettromagnetica? Qual è il suo portatore? Non può essere l'aria: ci sono onde elettromagnetiche anche nello spazio privo di materia. La luce, un'onda elettromagnetica, attraversa senza problemi i 150 milioni di km che separano il Sole dalla Terra, uno spazio praticamente privo d'aria e di altra materia (il guscio d'aria che circonda la Terra ha solo pochi km di spessore).

Possiamo quindi concludere che il cosiddetto spazio vuoto deve contenere qualcosa che fa da portatore delle onde elettromagnetiche. Quando si scoprì che la luce è un'onda, questo qualcosa fu chiamato "etere". Ma all'inizio si pensò che in questo etere la luce fosse un'onda meccanica, un tipo di onda nel quale il portatore si muove - esattamente come nel caso del suono si muove l'aria. Solo molto più tardi ci si rese conto che la variazione di stato del portatore di un'onda elettromagnetica non è una deformazione e che questo portatore ha altre caratteristiche sorprendenti.

Da quel momento gli si diede anche un altro nome, visto che il nome "etere" evocava ormai troppe concezioni rivelatesi errate. Il nuovo nome è: "vuoto".

### Il portatore delle onde elettromagnetiche si chiama "vuoto".

Non si deve interpretare male il nome. "Il vuoto" non è la stessa cosa del "nulla". Dove c'è "il nulla" non c'è nulla, proprio nulla. Per contro in un contenitore vuoto può benissimo esserci ancora qualcosa. In una bottiglia d'aranciata vuota non c'è più aranciata, ma di solito c'è ancora aria. In un distributore automatico di caramelle vuoto non ci sono più caramelle, ma tutto il meccanismo del distributore è ancora lì. E da una pila vuota non si può più estrarre energia, ma la pila è ancora piena di piombo e di acido solforico.

Quando diciamo che in una certa regione dello spazio c'è il vuoto intendiamo dire che lì non c'è materia, ma qualcos'altro c'è: il portatore delle onde elettromagnetiche. Fintanto che nel vuoto non ci sono onde, il vuoto si trova nel suo "stato normale".

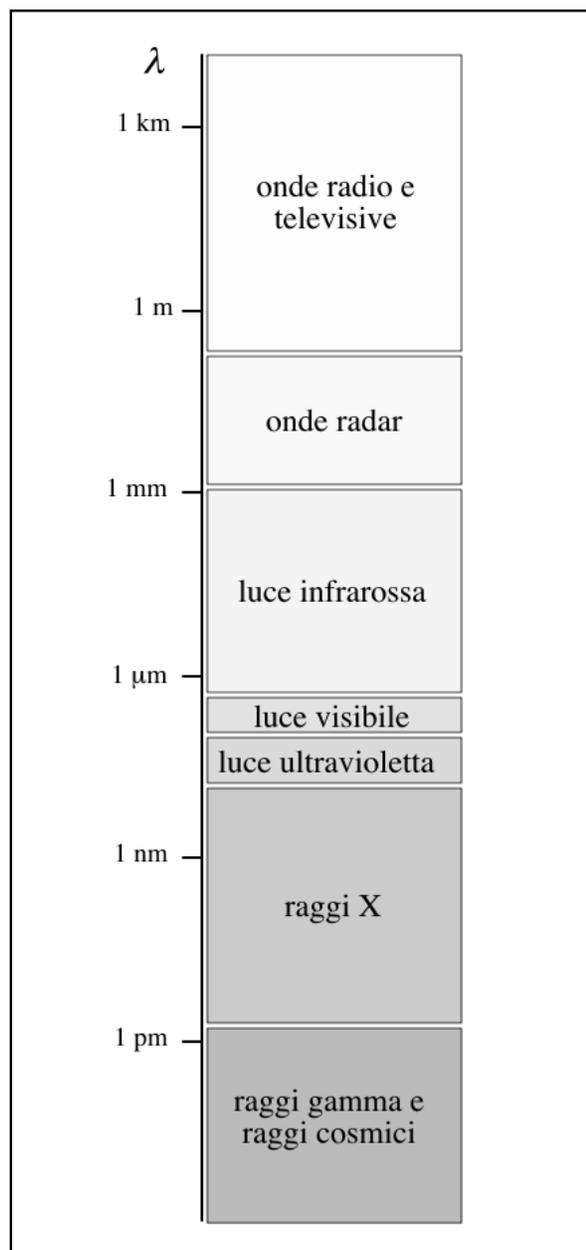


Fig. 28.21. A seconda della lunghezza d'onda le onde elettromagnetiche hanno nomi e applicazioni diverse.

Le onde elettromagnetiche che abbiamo generato erano dei brevi impulsi, esattamente come con l'altoparlante all'inizio avevamo mandato nell'aria dei singoli impulsi sonori. Per produrre un'onda continua dobbiamo accendere e spegnere la corrente elettrica nella nostra antenna emittente in rapida successione. E se vogliamo ottenere un'onda elettromagnetica sinusoidale, dobbiamo far scorrere nel filo una corrente alternata sinusoidale. Però affinché l'antenna emetta un'onda la frequenza deve essere molto alta. I 50 Hz della comune corrente alternata non sono sufficienti.

Già conosci la velocità delle onde elettromagnetiche: nel vuoto è 300 000 km/s.

Le onde elettromagnetiche sono dappertutto e possono avere le lunghezze d'onda più disparate. Da un lato ci sono sorgenti naturali di onde elettromagnetiche di ogni possibile lunghezza d'onda. Dall'altro ci sono molti usi tecnici di onde di varia lunghezza d'onda.

Le lunghezze d'onda delle onde che produciamo o osserviamo vanno dal milionesimo di nanometro fino ai chilometri, fig. 28.21. Malgrado tutte queste onde abbiano la stessa natura e malgrado si differenzino solo per la lunghezza d'onda, i metodi per produrle sono molto diversi. Inoltre, quando onde di lunghezza d'onda molto diversa incontrano la materia, succedono cose molto diverse. È per questo che possono essere applicate ad usi molto diversi tra loro. Ed è anche per questo che sono stati dati loro dei nomi diversi: raggi gamma, raggi X, raggi ultravioletti (o luce ultravioletta), luce ("visibile"), raggi infrarossi (o luce infrarossa, o radiazione termica), microonde, onde radio.

Le applicazioni più importanti possono essere divise in due categorie: le onde elettromagnetiche fungono da portatori di dati o da portatori di energia.

#### *Onde elettromagnetiche come portatori di dati*

Con la luce giungono informazioni su ciò che ci circonda, in breve: dati, ai nostri occhi ma anche alla macchina fotografica o alla videocamera. Le onde radio e le più corte onde televisive, portano dati dall'antenna emittente all'antenna ricevente della radio o del televisore.

Onde ancora più corte vengono usate per la trasmissione di dati ai e dai satelliti. Sono emesse e captate con delle antenne paraboliche. Anche la trasmissione dei programmi radiofonici e televisivi tra le torri per le telecomunicazioni avviene mediante onde elettromagnetiche con queste lunghezze d'onda. E anche il radar lavora con onde di questo tipo.

L'esplorazione dello spazio avviene quasi esclusivamente grazie alle onde elettromagnetiche. Dallo spazio arrivano sulla Terra onde dalle lunghezze d'onda più disparate, dai raggi gamma fino alle onde radio. Ogni radiazione porta dei dati interessanti su pianeti lontani, stelle, galassie, quasar e altri curiosi corpi celesti.

Ma anche per l'esplorazione del microcosmo si usano onde elettromagnetiche. Di particolare importanza sono i raggi X. La maggior parte delle conoscenze che abbiamo sulla struttura della materia, sono state ottenute grazie ai raggi X.

#### *Onde elettromagnetiche come portatori di energia*

Tutte le onde elettromagnetiche portano energia. E spesso è il trasporto di questa energia ciò che ci interessa. Ma a volte è questo trasporto di energia ciò che ci danneggia.

Sicuramente il più importante trasporto di energia mediante onde elettromagnetiche è rappresentato dalla luce solare. È la sorgente di energia degli esseri viventi sulla Terra.

Un altro importante trasporto di energia avviene mediante radiazione infrarossa: un forno caldo cede la sua energia (e la sua entropia) grazie a questo tipo di radiazione. E con la luce infrarossa la Terra cede allo spazio altrettanta energia di quanta ne riceve dal Sole con la luce visibile.

Nel forno a microonde l'energia è trasportata nei cibi da cuocere o da riscaldare con onde di lunghezza d'onda pari a 12 cm. Solitamente il trasporto di energia mediante onde molto corte va evitato: i raggi X e i raggi  $\gamma$  sono pericolosi per la loro capacità di distruggere le molecole negli esseri viventi.

#### *Esercizi*

1. Perché un temporale disturba la ricezione televisiva?
2. Cita diverse sorgenti di onde elettromagnetiche.

## **28.9 Onde stazionarie - Interferenza**

Vogliamo esaminare cosa succede quando due onde si incontrano. C'è un urto tra di loro?

### *1. Due onde singole*

Lo si vede meglio con le onde della corda. Dalle due estremità di una corda posata sul pavimento si fanno partire contemporaneamente due onde, fig. 28.22. Le onde vanno l'una verso l'altra e dal punto di incontro si osserva ancora un'onda per parte. Cos'è successo? Le due onde sono rimbalzate? Si sono riflesse a vicenda?

Modifichiamo leggermente l'esperimento. Da un'estremità facciamo partire un'onda (lateralmente) da un lato della corda, dall'altra estremità un'onda dall'altro lato, fig. 28.23. Le onde che giungono alla fine della corda dopo l'incontro, sono quelle che erano

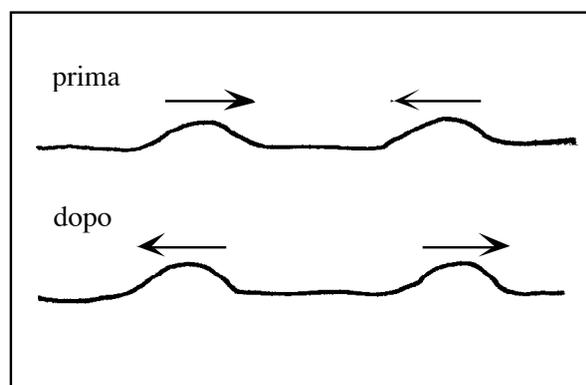


Fig. 28.22. Le onde sono rimbalzate?

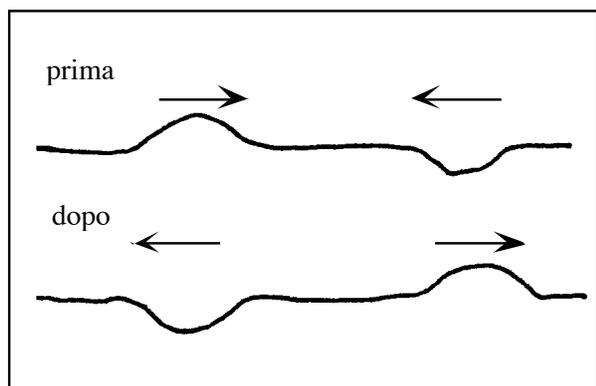


Fig. 28.23. Le onde si attraversano.

partite dall'estremità opposta. Quindi le onde non sono state riflesse, si sono attraversate a vicenda. Nessuna delle onde è stata assolutamente disturbata dall'altra.

Ogni onda attraversa tutta la corda come se l'altra non ci fosse.

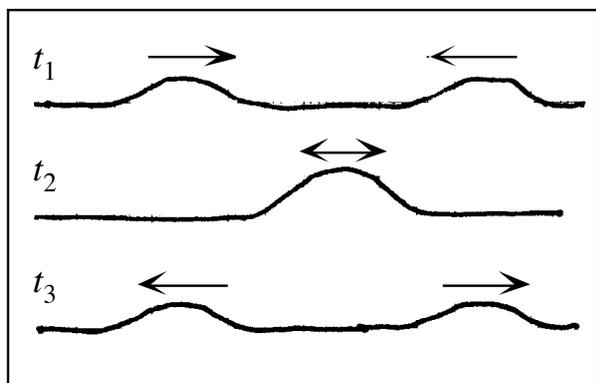
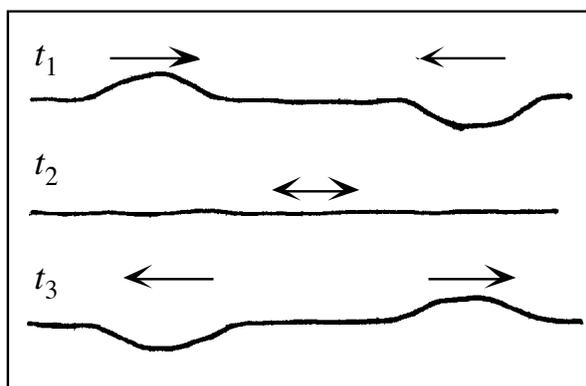
C'è una cosa che durante l'esperimento non si può notare perché succede troppo in fretta.

Nell'istante in cui le onde si incontrano a metà della corda le deviazioni si sommano. Per le onde in fig. 28.22 ciò significa che per un istante a metà della corda c'è un'unica onda con un'ampiezza doppia, fig. 28.24. E per le onde in fig. 28.23 significa che per un istante la corda è perfettamente diritta: le due deviazioni si annullano, fig. 28.25.

Riassumiamo:

### Le onde si attraversano senza disturbarsi.

Come molte altre regole anche questa regola non è sempre valida. Non vale quando la deviazione delle onde è troppo grande. Ad esempio: due onde del mare molto grandi, due onde vicine alla costa e sul punto di rompere, non si attraversano senza disturbarsi. Ma la maggior parte delle onde con cui abbiamo a che fare, anche le onde sonore ed elettromagnetiche, sono così deboli che l'affermazione si può ritenere valida.

Fig. 28.24. Nell'istante  $t_2$  al centro della corda c'è una gobba di ampiezza doppia.Fig. 28.25. Nell'istante  $t_2$  la corda è perfettamente diritta.

### 2. Due onde periodiche

Usiamo nuovamente la corda. Stendiamo sul pavimento e cominciamo a lanciare da ogni estremità delle onde sinusoidali, fig. 28.26. I treni d'onda viaggiano l'uno verso l'altro fino a incontrarsi e poi si attraversano.

Ciò che osserviamo è curioso. Non si nota più un movimento lungo la corda in una direzione o nell'altra. In fig. 28.27 è rappresentato in cinque istanti diversi un tratto di corda percorso dalle onde. La corda ha una forma sinusoidale. Ma l'altezza delle creste e dei cavi d'onda cambia. Però i punti dove la

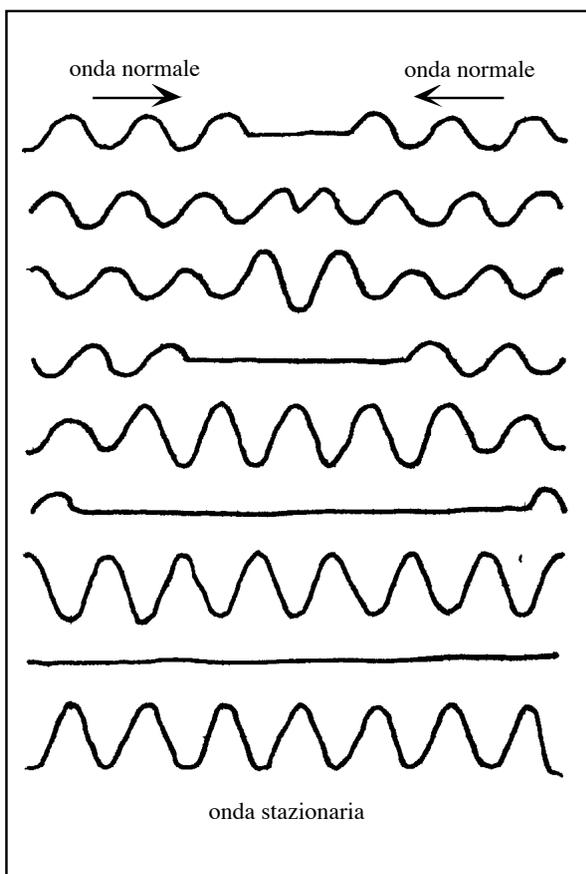


Fig. 28.26. Due onde sinusoidali corrono l'una verso l'altra e si compenetrano. Il processo è rappresentato in 9 istanti diversi.

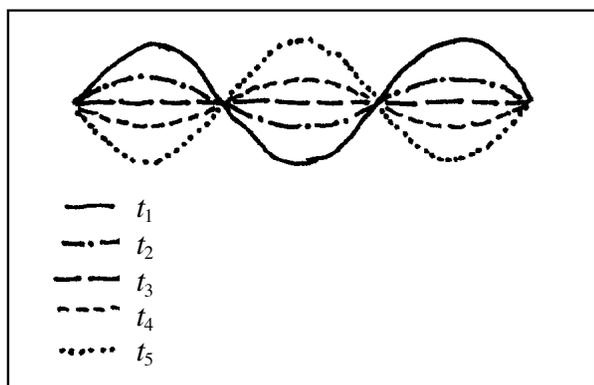


Fig. 28.27. Le diverse tratteggiature rappresentano la forma dell'onda stazionaria in cinque istanti diversi.

corda non è deviata né in una direzione né nell'altra sono sempre gli stessi, non si spostano lungo la corda come succede nel caso di un'onda normale.

Una struttura del genere è detta *onda stazionaria*. I punti dove l'estensione è massima si chiamano *antinodi* o *ventri dell'oscillazione*, i punti della corda che non si muovono sono detti *nodi*.

La fig. 28.28 mostra come si formano i nodi e gli antinodi. L'onda stazionaria è la sovrapposizione di due onde normali che viaggiano in direzioni opposte. Si ottiene la deviazione dell'onda stazionaria sommando le deviazioni delle due onde parziali.

In fig. 28.28 si possono vedere tre istanti diversi, in alto le due onde parziali e in basso l'onda effettiva risultante dall'addizione. Notiamo che negli antinodi l'ampiezza dell'onda stazionaria è doppia rispetto all'ampiezza delle due onde parziali: infatti è il risultato della somma di due deviazioni nella stessa direzione. Nei nodi invece l'ampiezza delle onde parziali è sempre di direzione opposta. Quindi la somma è sempre uguale a zero.

Vediamo anche che la distanza tra due nodi consecutivi è esattamente metà della lunghezza d'onda.

Affinché si formi un'onda stazionaria le ampiezze delle onde che la causano devono essere uguali. Quando le ampiezze non sono uguali si nota comunque un rafforzamento o un indebolimento dell'oscillazione.

Il processo in cui la sovrapposizione di due onde causa in certi punti un rafforzamento e in altri un indebolimento o annullamento dell'oscillazione si chiama *interferenza*. Si dice anche che le due onde interferiscono.

**Quando due onde di ampiezza uguale e con la stessa lunghezza d'onda viaggiano in direzioni opposte, si forma un'onda stazionaria.**

**La distanza tra due nodi è metà della lunghezza d'onda.**

**Il processo di rafforzamento e indebolimento tra due o più onde si chiama interferenza.**

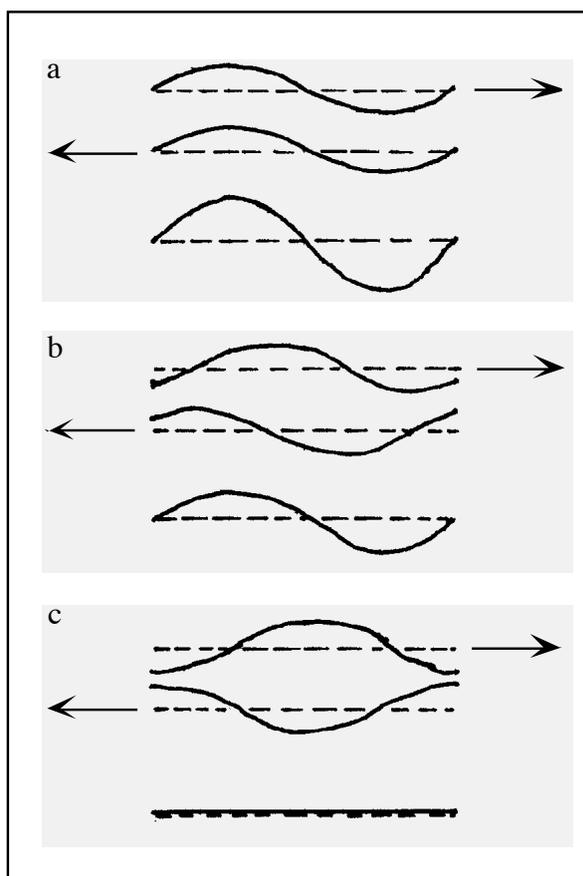


Fig. 28.28. L'onda stazionaria si forma per addizione degli spostamenti di due onde che si muovono in direzioni opposte. Le immagini a, b e c mostrano l'addizione in tre istanti consecutivi.

### 3. La riflessione delle onde

Un metodo comodo per generare onde stazionarie consiste nel far riflettere un'onda sinusoidale. L'onda riflessa si sovrappone all'onda incidente e forma un'onda stazionaria, fig. 28.29. Questo metodo si può usare per esempio con una corda. L'estremità A viene fissata a qualcosa, l'estremità B viene mossa a destra e a sinistra in modo sinusoidale. Da B parte un'onda sinusoidale che è riflessa in A. Risultato: un'onda stazionaria.

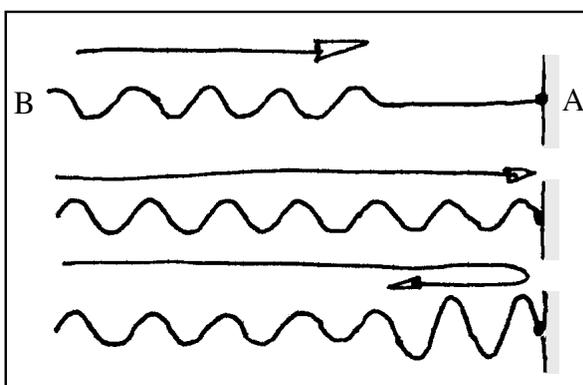


Fig. 28.29. L'onda incidente interferisce con l'onda riflessa.

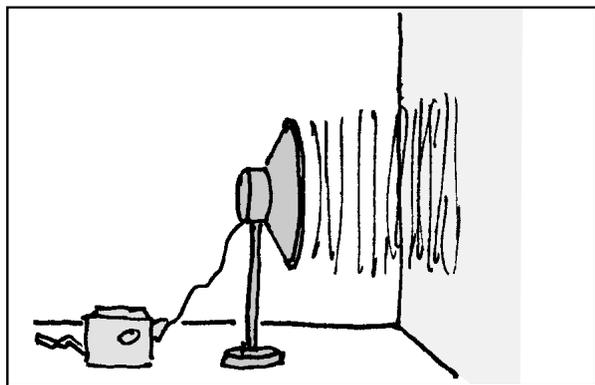


Fig. 28.30. Generazione di onde sonore stazionarie mediante riflessione su una parete.

L'onda stazionaria però si forma in modo netto solo vicino a B, visto che solo lì le due onde parziali hanno la stessa ampiezza. In A l'onda che va verso B è molto più forte di quella che proviene da B, in quanto percorrendo la corda ogni onda perde qualcosa.

Il nostro metodo per generare delle onde stazionarie funziona molto bene anche con le onde sonore, fig. 28.30. L'altoparlante manda un'onda sinusoidale verso la parete. L'onda viene riflessa dalla parete. L'onda riflessa e l'onda incidente interferiscono e si forma un'onda stazionaria.

Muoviamo tra la parete e l'altoparlante un microfono collegato a un oscilloscopio. Sull'oscilloscopio si riconoscono chiaramente i punti di rafforzamento e indebolimento del suono. Mentre l'onda della corda è una struttura unidimensionale, l'onda sonora è tridimensionale. Viaggia in una direzione e si estende anche in entrambe le direzioni perpendicolari. Quindi in questo caso i nodi non sono dei punti, come nel caso della corda, ma dei piani.

Potremmo pensare di generare allo stesso modo delle onde stazionarie con la luce: dovremmo semplicemente mandare luce monocromatica (cioè un'onda luminosa sinusoidale) verso uno specchio. Effettivamente davanti allo specchio si formano dei nodi e degli antinodi, ma visto che la lunghezza d'onda della luce è estremamente piccola, i nodi sono così vicini tra loro da rendere molto difficile la loro osservazione. Più avanti impareremo un trucco che ci permetterà di aumentare la distanza tra i nodi.

#### 4. Onde confinate

Fissiamo nuovamente l'estremità A di una corda. Questa volta teniamo ferma l'estremità B e tendiamo la corda. Durante tutto l'esperimento la corda non tocca mai il pavimento. In questo modo l'attrito è minore rispetto all'esperimento precedente e le onde della corda vengono smorzate molto meno. Ora se generiamo un'onda sinusoidale questa non viene riflessa solo in B: torna indietro e in A viene riflessa una seconda volta. Se le creste d'onda giungono in A al momento giusto si ha amplifica-

zione: l'onda in arrivo da B interferisce con quella appena generata in A e si ha un'amplificazione. Il movimento della corda finisce per formare un'onda stazionaria che in A e in B presenta dei nodi. Affinché ci possa essere un'onda stazionaria del genere, nella lunghezza  $l$  della corda deve starci un numero intero di mezze lunghezze d'onda, fig. 28.31. Quindi deve valere:

$$l = n \cdot \lambda/2 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Visto che a ogni lunghezza d'onda corrisponde una frequenza ben precisa, l'estremità della corda deve essere mossa con una frequenza ben precisa per ottenere una delle possibili onde stazionarie. Questi movimenti sono detti *oscillazioni proprie* della corda. Se l'estremità della corda viene mossa con una frequenza non adatta, il movimento risultante è caotico e non periodico.

Se la lunghezza della corda equivale a  $\lambda/2$ , cioè se  $n = 1$ , si ha l'oscillazione "fondamentale". Se nella corda ci stanno due mezze lunghezze d'onda si ha la "prima armonica", con tre mezze lunghezze d'onda la "seconda armonica" e così via.

Sono queste oscillazioni proprie a generare il suono dalle corde degli strumenti a corda, come il pianoforte, il violino, il violoncello o la chitarra. Con una chitarra o con gli strumenti ad arco, il musicista ha la possibilità di accentuare la nota fondamentale o una delle armoniche superiori.

**Oscillazioni proprie di una corda: la lunghezza della corda equivale a un multiplo intero di metà della lunghezza d'onda.**

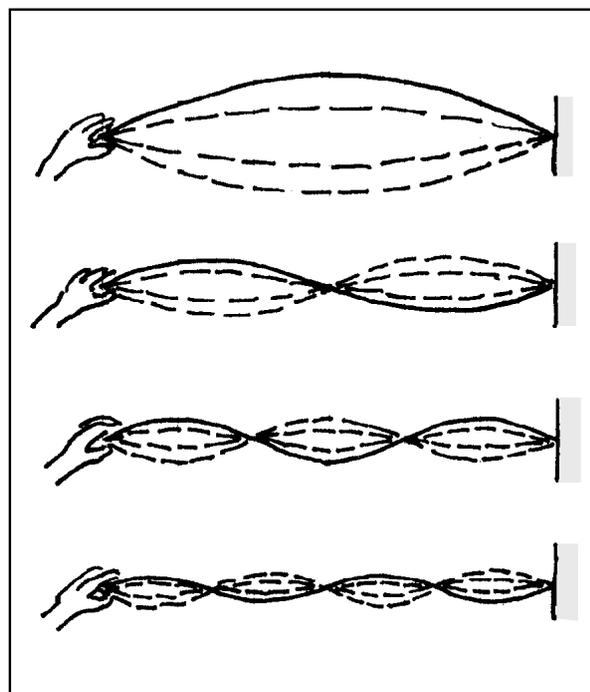


Fig. 28.31. Oscillazioni proprie di una corda: sulla sua lunghezza la corda contiene dei multipli interi di mezza lunghezza d'onda.

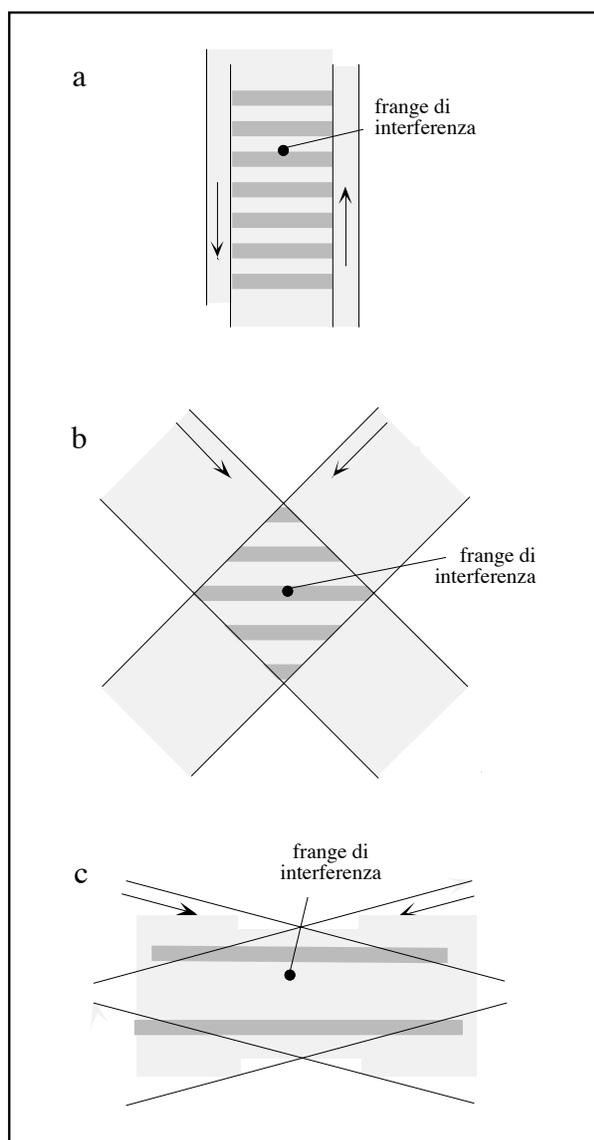


Fig. 28.32. (a) Le onde si muovono in direzioni opposte, le frange di interferenza sono molto vicine. (b) Le onde non hanno più direzioni opposte, le frange di interferenza sono più lontane. (c) Le onde hanno quasi la stessa direzione, le frange di interferenza sono molto lontane l'una dall'altra.

### 5. Onde in direzioni diverse

Veniamo ora al trucco per evidenziare l'interferenza della luce. Lo spieghiamo riferendoci a un'onda bi-dimensionale, per esempio un'onda sulla superficie dell'acqua, perché queste sono più facili da disegnare, fig. 28.32.

La fig. 28.32a mostra due onde che viaggiano in direzioni opposte. Nel disegno l'una proviene dall'alto e l'altra dal basso. I punti di annullamento sono le linee orizzontali.

Ora ruotiamo le direzioni delle onde, una verso destra e l'altra verso sinistra, fig. 28.32b. I punti di annullamento sono sempre le linee orizzontali. Notiamo che la distanza è aumentata.

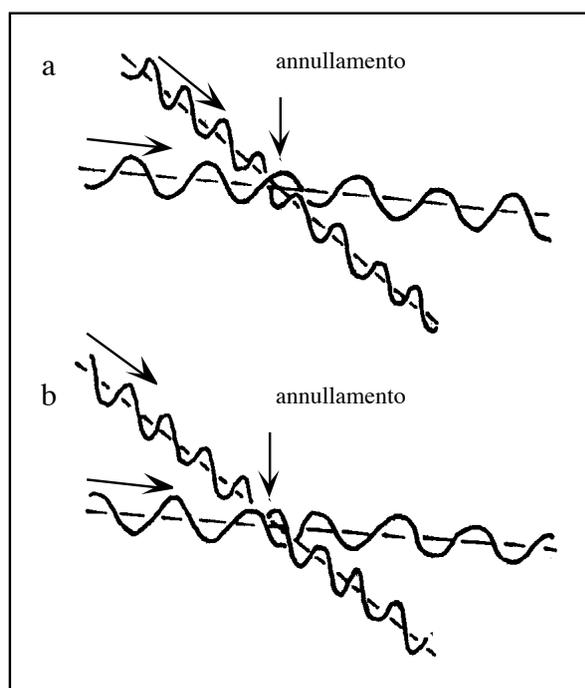


Fig. 28.33. Due "istantanee" di due onde interferenti. In entrambi gli istanti l'annullamento avviene nello stesso punto.

Ruotiamo ancora le onde, fig. 28.32c. I punti di annullamento sono ancora più distanziati.

Infine, se le onde si incontrano con un angolo molto acuto, le linee dove si verifica l'annullamento sono molto distanti tra loro.

La stessa situazione è rappresentata nuovamente in fig. 28.33a. In questo caso le due onde incidenti (in un certo istante) sono rappresentate in sezione e in prospettiva. La fig. 28.33b mostra le stesse onde un istante più tardi: entrambe le onde sono avanzate di mezza lunghezza d'onda. Nel punto di incontro però si annullano ancora.

Torniamo alla luce. Se due onde si incontrano e si intersecano con un angolo molto acuto, l'annullamento avviene su dei piani paralleli alla bisettrice dell'angolo tra i due raggi. I piani sono tanto più distanziati quanto più acuto è l'angolo di incidenza tra i raggi di luce. Possiamo aumentare la distanza tra i piani di annullamento fino a renderli facilmente osservabili.

La fig. 28.34 mostra un esperimento. I due raggi sono generati nel modo seguente: un raggio di luce colpisce con un angolo molto acuto uno specchio diviso in due parti. Le due metà dello specchio formano un angolo molto piccolo. Il raggio di luce colpisce lo specchio in modo che metà del raggio arriva su una metà dello specchio e l'altra metà del raggio sull'altra metà dello specchio. In questo modo le direzioni dei due raggi riflessi saranno sfasate di un angolo molto acuto. I raggi parziali si intersecano e interferiscono.

Visto che l'angolo tra i raggi parziali è molto piccolo i piani di annullamento sono molto distanti tra loro.

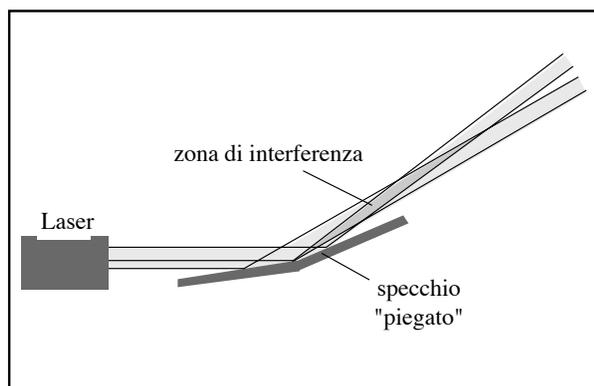


Fig. 28.34. Esperimento di interferenza della luce.

Nella zona di interferenza inseriamo uno schermo bianco (non rappresentato in fig. 28.34). Sullo schermo si vede chiaramente una "figura di interferenza": strisce chiare e scure.

Questo esperimento fu effettuato per la prima volta all'inizio del XIX° secolo. Fu considerato come la dimostrazione inequivocabile che la luce è un'onda.

**La luce interferisce.**

### *Esercizi*

1. Il vento è un'onda? Due "venti" possono intersecarsi senza disturbarsi?

2. Cosa succede quando due onde con la stessa lunghezza d'onda ma con ampiezze diverse si intersecano provenendo da direzioni opposte?

3. Un'estremità di una corda elastica lunga 1 m viene fissata. Muovendo in modo continuo l'estremità libera in su e in giù si può generare un'onda che percorre la corda elastica a una velocità di 6 m/s e che viene riflessa all'altra estremità.

Qual è la lunghezza d'onda massima dell'onda generata affinché si formi un'onda stazionaria?

Con quale frequenza si deve muovere l'estremità libera della corda in modo da generare un'onda stazionaria con due nodi (senza contare i nodi alle estremità)?

Schizza come si muove la corda in questo caso.

4. Cosa succede quando si sovrappongono due onde con la stessa lunghezza d'onda, la stessa ampiezza e che vanno nella stessa direzione?



## 29. Fotoni

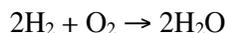
### 29.1 Reazioni chimiche con la luce

Ci sono reazioni chimiche che vedono la luce come uno dei partner coinvolti. Si chiamano *reazioni fotochimiche* (dal greco phos = luce).

Come sai, le reazioni sono descritte da equazioni. Così la reazione di una sostanza A e una sostanza B in una sostanza C si può scrivere



Un esempio concreto è la reazione di diidrogeno e diossigeno a formare acqua, cioè



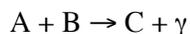
In questa reazione le sostanze diidrogeno e diossigeno scompaiono e appare la sostanza acqua. Ci sono anche reazioni dove la sostanza luce appare o scompare. Facciamo alcuni esempi.

#### *Bastoncini luminescenti*

Nei negozi di accessori per automobili si possono acquistare i cosiddetti bastoncini luminescenti. Un bastoncino luminescente è un tubo di materiale plastico contenente due liquidi A e B inizialmente separati. Se si piega il tubo, la parete che tiene divisi i due liquidi si rompe. Questi si mescolano e cominciano a reagire. Nella reazione, oltre a un liquido C, viene prodotta anche luce.

Quindi un bastoncino luminescente è una sorgente di luce che funziona senza presa elettrica e senza batteria e che può essere usata come luce di segnalazione in caso di incidente o di panne notturna. Anche i pescatori possono usare un bastoncino luminescente fissato al galleggiante per vedere la posizione del galleggiante mentre pescano di notte.

Nelle equazioni di reazione la luce è rappresentata dalla lettera greca  $\gamma$ . Quindi l'equazione della reazione in un bastoncino luminescente è



L'equazione di reazione può essere anche più complicata perché possono essere coinvolte più di due

sole sostanze o perché la reazione può avvenire in più passaggi, con la formazione di sostanze intermedie. Ma a noi interessa il fatto che la luce si comporta come una comune sostanza.

Nel bastoncino luminescente le sostanze A e B sono scelte in modo che non reagiscano immediatamente ma che lo facciano poco a poco. Possono passare diverse ore prima che le sostanze A e B siano esaurite e la reazione si interrompa. Ovviamente la luce viene prodotta solo finché dura la reazione.

#### *L'ozono nell'atmosfera*

L'ozono ( $\text{O}_3$ ) contenuto nell'atmosfera terrestre assorbe la luce ultravioletta di lunghezza d'onda tra 200 e 320 nm proveniente dal Sole. Una conseguenza è che sulla superficie della Terra di luce UV di queste lunghezze d'onda non ne arriva o quasi. È importante in quanto questa luce può distruggere le cellule degli esseri viventi. È la causa principale delle scottature e del cancro della pelle.

**L'ozono dell'atmosfera fa in modo che la luce solare UV con lunghezza d'onda tra 200 e 320 nm non raggiunga la superficie terrestre.**

L'ozono viene prodotto in una reazione tra  $\text{O}_2$  e altra luce: luce UV con lunghezza d'onda tra 150-200 nm.



L'ozono può scomparire solo reagendo con l'ossigeno atomico prodotto nella stessa reazione:



Le equazioni (1) e (2) ci dicono che il tenore di ozono dell'atmosfera è il risultato di un equilibrio dinamico. Secondo l'equazione (1) l'ozono viene prodotto con un tasso di trasformazione costante. Il tasso di trasformazione della reazione inversa (2) dipende da quanto  $\text{O}_3$  e  $\text{O}$  sono già presenti. Si regola in modo tale che la produzione di ozono secondo l'equazione (1) è uguale alla distruzione di ozono secondo l'equazione (2).

Il buco dell'ozono si forma quando la reazione (2) è accelerata da un catalizzatore. Aggiungendo un catalizzatore, inizialmente la reazione (2) si svolge più in fretta, viene distrutto più ozono di quanto ne venga prodotto, l'equilibrio dinamico viene rotto. In questo modo il contenuto di ozono dell'atmosfera diminuisce. Questa diminuzione ha come conseguenza il rallentamento della reazione (2), fino a quando il ritmo di distruzione è nuovamente uguale al ritmo di produzione. L'equilibrio dinamico si instaura nuovamente. Però ora il contenuto di ozono è inferiore a quello iniziale.

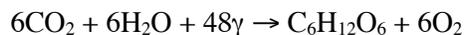
Un catalizzatore che può accelerare la reazione (2) e quindi causare una diminuzione del contenuto di ozono dell'atmosfera è il cloro. Il cloro entra nell'atmosfera soprattutto come componente dei cloro-fluorocarbonati, in breve CFC. Nell'atmosfera i CFC decadono e resta il cloro.

I CFC sono usati come gas di raffreddamento nei frigoriferi e nei congelatori, nelle bombolette spray e nella produzione di schiume isolanti. Negli ultimi decenni la produzione di CFC è aumentata notevolmente e quantità sempre maggiori di queste sostanze sono finite nell'atmosfera. La conseguente diminuzione del tenore di ozono atmosferico causa un aumento della radiazione UV che raggiunge la superficie terrestre, con le conseguenze citate per gli esseri viventi.

### Fotosintesi

La fotosintesi delle piante è una reazione fotochimica di grande importanza per la vita sulla Terra. Con questa reazione le piante producono glucosio (zucchero d'uva,  $C_6H_{12}O_6$ ) e ossigeno ( $O_2$ ) a partire da anidride carbonica ( $CO_2$ ), acqua ( $H_2O$ ) e luce. Le piante usano il glucosio come materiale da costruzione per le loro cellule e come riserva di energia.

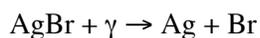
La fotosintesi è una reazione complessa con molti passaggi intermedi. Se ignoriamo i passaggi intermedi, quindi se consideriamo solo i reagenti e i prodotti, l'equazione di reazione è



Le parti della pianta dove avviene la reazione sono verdi. Il motivo è che con la luce verde la fotosintesi praticamente non funziona, mentre con le altre componenti della luce solare funziona bene. Quindi queste altre componenti scompaiono, mentre la luce verde resta.

### La pellicola fotografica

Una pellicola fotografica contiene bromuro d'argento, AgBr. Quando in una macchina fotografica la pellicola viene colpita dalla luce il bromuro d'argento reagisce con la luce e produce argento e bromo:



Quindi in tutti i punti colpiti dalla luce, dopo l'impressione della pellicola c'è argento. Durante lo sviluppo nei punti dove c'è argento il bromuro d'argento reagisce con il liquido di sviluppo. Questa reazione produce altro argento che si unisce all'argento già presente a formare dei piccoli grumi. L'accumulo di questi grumi provoca un assorbimento della luce, la pellicola annerisce. Dove non arriva luce non viene prodotto argento e non si formano i grumi. In quei punti la pellicola resta trasparente.

### Lancette e cifre fosforescenti

Le cifre e le lancette di certi orologi sono visibili anche di notte. La sostanza A che si trova sulle cifre e sulle lancette reagisce in una sostanza B e luce



La reazione si ferma non appena tutta la sostanza A si è trasformata in B e  $\gamma$ . Se non viene aggiunta A, la fosforescenza si esaurisce. In effetti durante la notte la fosforescenza di cifre e lancette si attenua. Ma la notte successiva è di nuovo intensa. Quindi durante il giorno le cifre e le lancette devono essere state rifornite di A. Niente di più facile: la reazione può essere invertita:



Ma quando avviene la reazione (3) e quando la (4)? Se c'è poca luce, quindi al buio, A decade secondo la reazione (3). Quando c'è molta luce, A viene prodotto di nuovo secondo la reazione (4).

Dagli esempi discussi puoi notare che:

**Nelle reazioni fotochimiche la luce si comporta come una sostanza.**

## 29.2 Fotoni

Ogni sostanza è un insieme di parti più piccole, atomi o molecole. Se la luce si comporta come una sostanza ci si deve attendere che esistano anche le parti più piccole di luce, una specie di "atomi di luce". Il seguente esperimento confermerà questa supposizione.

A occhio nudo gli "atomi" di luce non sono visibili, come non lo sono gli atomi delle altre sostanze. Ci serve un apparecchio di misurazione della luce molto sensibile, un cosiddetto fotomoltiplicatore. Il sensore del fotomoltiplicatore reagisce con la luce che lo colpisce, la luce viene assorbita. Su un monitor si può leggere la quantità di luce assorbita per unità di tempo dal fotomoltiplicatore.

Vogliamo analizzare la luce di una comune lampadina. Se rivolgessimo la luce direttamente sul fotomoltiplicatore lo rovineremmo subito. Sarebbe come pesare un elefante con una bilancia da cucina.

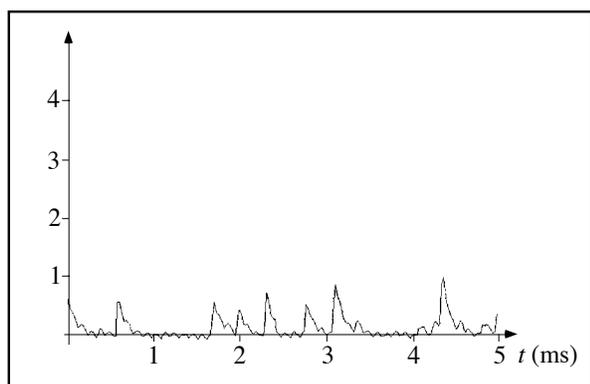


Fig. 29.1. L'apparecchio di misurazione mostra una sequenza irregolare di impulsi consecutivi.

Dobbiamo attenuare l'intensità della luce della lampadina prima che raggiunga il fotomoltiplicatore: lo facciamo con un filtro grigio che lascia passare solo poca luce.

La lampadina è allacciata a un alimentatore regolabile. Aumentiamo lentamente l'intensità della corrente elettrica che attraversa la lampadina fino a quando si accende debolmente. La luce emessa è appena visibile dai nostri occhi. Malgrado il fotomoltiplicatore si trovi dietro il filtro grigio, "vede" la lampadina debolmente accesa dietro il filtro: l'apparecchio di misurazione reagisce.

La fig. 29.1 mostra la misurazione ottenuta con l'apparecchio in un intervallo di 5 ms (5 millesimi di secondo). È sorprendente che il risultato non sia un segnale continuo ma composto da impulsi distinti e irregolari. Tra gli impulsi il segnale è nullo. Quindi il fotomoltiplicatore non "vede" una lampadina che brilla in modo regolare ma dei brevi lampi di luce che si susseguono a intervalli molto brevi ma irregolari. In altre parole: la reazione tra la luce e il sensore del fotomoltiplicatore non avviene in modo continuo ma a "pacchetti". Questi "pacchetti" di luce si chiamano *fotoni*.

Se l'intensità della corrente elettrica attraverso la

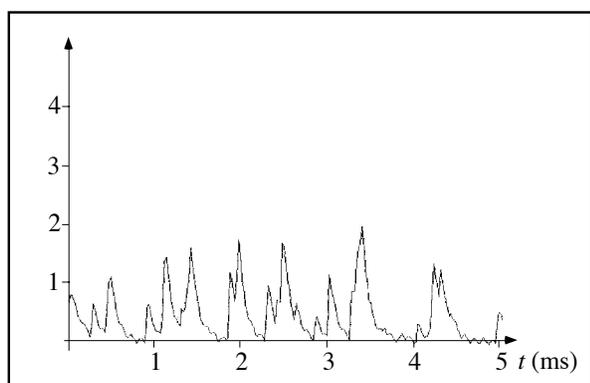


Fig. 29.2. La luce della lampadina è più intensa, l'apparecchio reagisce più spesso.

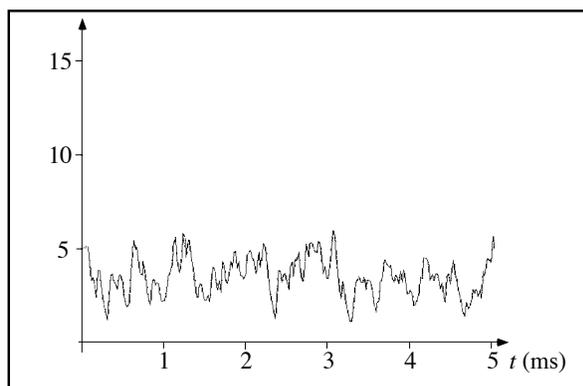


Fig. 29.3. La luce della lampadina è così intensa che i singoli impulsi si fondono in un segnale continuo.

lampadina viene aumentata, cioè se la lampadina si accende più intensamente, gli impulsi si susseguono a intervalli più brevi, fig. 29.2. A volte due fotoni arrivano quasi contemporaneamente, allora il segnale sul monitor appare più forte. Quindi quello che cambia con l'intensità della lampadina è la frequenza con la quale i pacchetti di luce arrivano al fotomoltiplicatore.

### La luce reagisce a pacchetti con le altre sostanze. I pacchetti di luce si chiamano fotoni.

Aumentiamo ancora la luminosità della lampadina. Gli impulsi registrati dall'apparecchio di misurazione sono sempre più vicini tra loro, fino a quando si sovrappongono e si fondono, fig. 29.3. Un ulteriore aumento della luminosità causa un aumento generale del segnale ormai continuo, fig. 29.4. L'apparecchio di misurazione non "vede" più dei singoli lampi ma una luce continua.

Se come sorgente di luce invece di una lampadina usiamo un laser, il risultato è lo stesso. Fintanto che il raggio laser che colpisce il fotomoltiplicatore è molto debole, l'apparecchio misura solo degli impulsi che si susseguono in modo irregolare. Se il raggio laser incidente aumenta di intensità gli impulsi si avvicinano e alla fine si fondono.

Naturalmente i fotoni si muovono alla velocità della luce, cioè a 300 000 km/s nell'aria e nel vuoto.

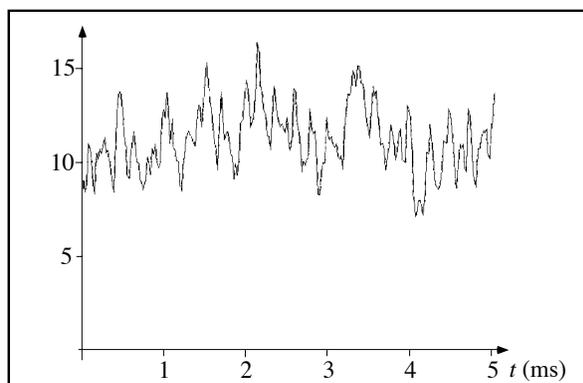


Fig. 29.4. Con luce ancora più intensa il livello del segnale aumenta.

La "scoperta" dei fotoni (detti anche *quanti di luce*) nei primi anni del 20° secolo portò a grandi sconvolgimenti nella fisica. Forse hai già sentito parlare di *fisica quantistica*. La fisica quantistica è il risultato di questi sconvolgimenti ed è la base di buona parte della fisica moderna.

### 29.3 La grandezza dei fotoni

I fotoni non hanno una vera e propria forma. Forma e grandezza dipendono dalla lunghezza d'onda e cambiano lungo il percorso dopo aver lasciato la sorgente di luce.

Così i fotoni del laser da laboratorio sono lunghi circa 10 cm e hanno lo stesso diametro del raggio stesso, cioè circa 5 mm. Quindi per forma e dimensioni sono simili a una matita. In certi laser i fotoni sono molto più lunghi. La lunghezza dei fotoni laser può raggiungere svariati chilometri.

I fotoni della luce solare sono molto più corti. La loro lunghezza è pari circa alla loro lunghezza d'onda, vale a dire circa 600 nm. Il loro diametro è 0,06 mm circa (ma solo se la luce solare non è disturbata da nuvole o nebbia - altrimenti è ancora minore). È circa 100 volte maggiore della lunghezza, quindi i fotoni della luce solare hanno una forma simile a una frittata.

Dal fatto che i fotoni del laser siano abbastanza grandi segue che in un normale raggio laser siano sovrapposti, non sono separati l'uno dall'altro. Ma anche da questa "poltiglia di luce" non è possibile estrarre per assorbimento delle frazioni di pacchetto di luce, solo dei fotoni interi.

Nella luce solare, esattamente come nella luce di una lampadina, i fotoni sono così piccoli da non mescolarsi. Sono separati come lo sono le gocce di pioggia.

Anche se la luce è composta da fotoni, nel nostro occhio la percepiamo come una corrente di luce continua. Questo dipende dalla capacità di risoluzione temporale della nostra retina. La retina è troppo lenta per registrare individualmente i fotoni che la colpiscono a brevissimi intervalli di distanza.

### 29.4 Energia e quantità di moto dei fotoni

Visto che la luce trasporta energia, anche ogni singolo fotone trasporta energia. Ma la quantità di energia trasportata non è la stessa per tutti i fotoni. Dipende in modo molto semplice dalla frequenza della luce:

$$E_{\text{fotone}} \sim f$$

**L'energia di un fotone è proporzionale alla frequenza della luce.**

La costante di proporzionalità è detta *costante di Planck* (dal nome di Max Planck, lo scopritore dei fotoni) e vale

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Quindi

$$E = h \cdot f \quad (5)$$

Con questa equazione è possibile calcolare l'energia di un fotone se se ne conosce la frequenza.

Spesso però non è la frequenza della luce a essere conosciuta, ma la lunghezza d'onda. La frequenza può essere calcolata a partire dalla lunghezza d'onda. Ricordiamoci la relazione tra lunghezza d'onda  $\lambda$ , frequenza  $f$  e velocità  $c$ :

$$c = \lambda \cdot f$$

da cui si ottiene

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Una frequenza elevata significa una lunghezza d'onda breve e viceversa. Sostituiamo nell'equazione (5) e otteniamo

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Quindi: più è grande la lunghezza d'onda della luce, minore sarà l'energia dei suoi fotoni.

Proviamo a calcolare l'energia dei fotoni di luce rossa ( $\lambda = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ):

$$E_{\text{rosso}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{rosso}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

e di luce blu ( $\lambda = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ):

$$E_{\text{blu}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{blu}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Se rapportate alle quantità di energia con cui abbiamo a che fare nella vita di tutti i giorni, queste energie sono piccolissime. Ma nelle normali condizioni di luce ci sono sempre moltissimi fotoni in gioco. Una pila tascabile produce circa  $10^{15}$  fotoni al secondo. La luce solare che ogni secondo illumina un metro quadrato di superficie terrestre contiene circa  $10^{21}$  fotoni.

Anche la quantità di moto trasportata da un fotone dipende dalla frequenza del tipo di luce corrispondente. Vale la relazione:

$$p = \frac{h}{c} \cdot f$$

o, tradotto in lunghezza d'onda

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

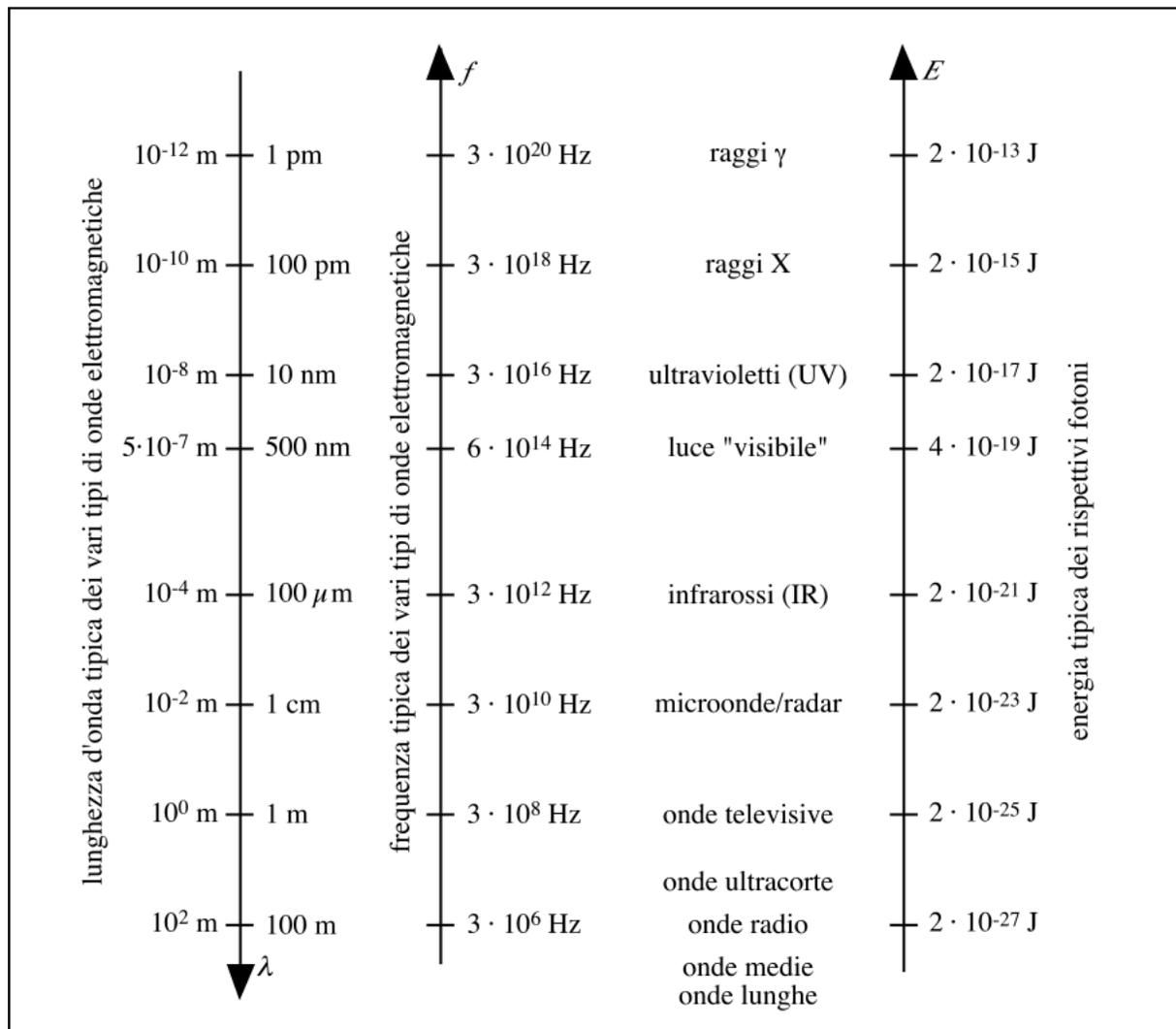


Fig. 29.5. Tavola riassuntiva dei valori tipici di lunghezza d'onda e frequenza dei vari tipi di onde elettromagnetiche ed energia dei rispettivi fotoni.

Quindi la quantità di moto di un fotone di luce rossa è:

$$p_{\text{rosso}} = \frac{h}{\lambda_{\text{rosso}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 8,25 \cdot 10^{-28} \text{ Hy}$$

La quantità di moto di un fotone di luce blu è il doppio, cioè:

$$p_{\text{blu}} = 16,5 \cdot 10^{-28} \text{ Hy}$$

La corrente di quantità di moto che affluisce alla Terra con la luce proveniente dal Sole ha un'intensità di  $3 \cdot 10^8$  huygens al secondo (= 300 milioni di Newton). Quindi la luce solare preme sulla Terra esattamente come un getto d'acqua rivolto su una palla preme sulla palla.

Finora abbiamo parlato solo di luce visibile e di luce UV. Ciò che vale per questi tipi di luce vale anche per tutti gli altri tipi: onde radio, microonde, luce infrarossa, raggi X e raggi gamma. Tutte queste radiazioni non si comportano solo come la luce, ma anche come una sostanza. E anche le relazioni tra la

frequenza delle onde e l'energia e la quantità di moto dei fotoni sono le stesse della luce visibile. In fig. 29.5 trovi un riassunto dei valori tipici di frequenza e lunghezza d'onda per i vari tipi di onda elettromagnetica, così come l'energia dei rispettivi fotoni.

La radiazione  $\gamma$  ha la frequenza più alta e la lunghezza d'onda più corta. Di conseguenza i fotoni dei raggi gamma sono quelli più ricchi di energia. Le onde radio invece hanno una grande lunghezza d'onda e una frequenza bassa. Quindi un fotone radio ha poca energia. Tieni conto che i valori di energia tra i vari tipi di fotone rappresentati nella figura si differenziano spesso di un fattore 100.

### Esercizi

1. a) SWF3 è un canale radiofonico del sud-ovest della Germania che trasmette a 98,4 MHz. Calcola energia e quantità di moto di un "fotone SWF3"

b) Calcola energia e quantità di moto di un fotone di raggi X con la lunghezza d'onda di 150 pm.

c) Confronta i risultati ottenuti in a) e b) con l'energia e la quantità di moto di un fotone di luce visibile.

2. a) Una palla galleggia sullo zampillo di una fontana a getto. Come mai la palla non cade malgrado che dal campo gravitazionale terrestre scorra una corrente di quantità di moto nella palla?

b) Una pallina galleggia su un raggio di luce rivolto verso l'alto. Come mai la pallina non cade malgrado che dal campo gravitazionale terrestre scorra una corrente di quantità di moto nella pallina?

c) Quanti fotoni al secondo devono colpire la pallina dell'esercizio 2.b) se la corrente di quantità di moto dal campo gravitazionale alla pallina ha un'intensità di  $7 \cdot 10^{-11}$  N? (Lunghezza d'onda della luce: 800 nm.)

## 29.5 Una reazione fotochimica in dettaglio

Occupiamoci nel dettaglio della reazione tra luce e bromuro d'argento in una pellicola fotografica.

Quando un raggio di luce, per esempio proveniente dal Sole, colpisce una pellicola fotografica, dopo lo sviluppo nel punto dove la pellicola è stata impressionata c'è una macchia grigia.

Se osserviamo la pellicola al microscopio vediamo che non è un grigio uniforme, ma un insieme di piccoli puntini neri, fig. 29.6. I puntini neri e le zone chiare che li circondano sono troppo vicini per essere separati a occhio nudo. Il miscuglio tra puntini neri e zone chiare viene percepito come grigio.

Come si formano i puntini neri sulla pellicola? Il bromuro d'argento non è distribuito omogeneamente sulla pellicola ma inserito a granelli in una specie di gelatina. A seconda della sensibilità della pellicola, questi granelli hanno un diametro da 0,2 fino a  $2 \mu\text{m}$ . In una pellicola ci sono circa 20 strati di questi granelli.

Dall'equazione della reazione (vedi pag. 52) segue che *un* fotone può lasciarsi dietro solo *un* atomo d'argento e *un* atomo di bromo. L'atomo d'argento si trova in *uno* dei granelli.

Quindi dopo la reazione il granello non contiene più solo molecole di bromuro d'argento ma anche un atomo d'argento. È come se fosse marchiato: qui è arrivata la luce. L'atomo di bromo finisce nella gelatina e da questo momento non ha più nessuna influenza.

**Un fotone marca un granello di bromuro d'argento.**

Ma un unico atomo d'argento per granello è una marcatura così debole da passare inosservata durante lo sviluppo. Solo quando un granello è stato marcato da 10-20 fotoni, cioè quando il granello contiene un numero equivalente di atomi d'argento, la marcatura è sufficiente.

Durante lo sviluppo tutto il bromuro d'argento di un granello reagisce con il liquido di sviluppo, l'ar-

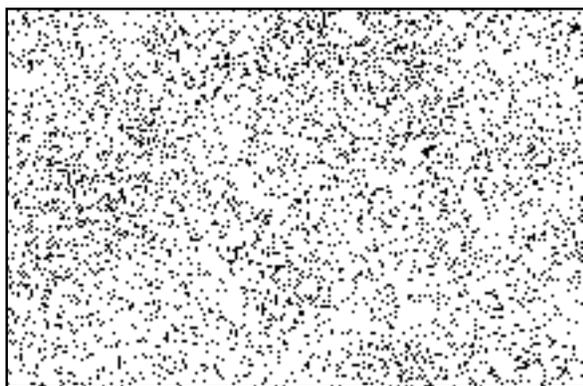


Fig. 29.6. Osservando al microscopio una pellicola impressionata per breve tempo e poi sviluppata, si vedono molti punti neri.

gento e il bromo si separano. L'argento forma un piccolo grumo. Tutti i granelli di bromuro d'argento marcati in modo insufficiente sono poi rimossi dalla pellicola (*fissaggio* della pellicola). Restano solo i grumi d'argento. Al microscopio ognuno di questi grumi appare come un puntino nero.

Come sai i fotoni della luce solare, e ancora di più i fotoni di un laser, hanno un diametro molto maggiore delle dimensioni di un granello di bromuro d'argento di una pellicola. Quando un fotone di luce solare colpisce la pellicola, sono decine di migliaia i granelli con i quali potrebbe reagire. Con un fotone di laser sono addirittura fino a un miliardo. Quindi ogni fotone deve decidere in quale dei granelli a disposizione deve avvenire la reazione. È però impossibile prevedere quale granello sarà scelto da un determinato fotone.

È come con i dadi: non possiamo prevedere quale numero tra 1 e 6 uscirà in un unico lancio. Per contro il risultato di una serie numerosa di lanci può essere previsto con buona precisione: ogni numero uscirà un sesto delle volte.

Allo stesso modo non si può prevedere quale dei granelli in questione sarà marcato da un certo fotone. Ma molti fotoni si attengono alla regola secondo la quale la marcatura dei granelli è distribuita in modo che la tonalità di grigio della pellicola rispecchi fedelmente la distribuzione della luce nel raggio.

**Quando la luce impressiona una pellicola i fotoni distribuiscono la marcatura in modo da rispecchiare la distribuzione della luce.**

## 29.6 Fotoni e interferenza

In un paragrafo precedente si era discusso un esperimento nel quale un raggio laser veniva riflesso da due specchi appena inclinati l'uno rispetto all'altro, fig. 29.7. Così facendo si ottengono due raggi laser che si intersecano formando un angolo molto piccolo. Se si inserisce un foglio di carta nell'area di intersezione dei raggi, si osserva una figura di interferenza.

Questa volta vogliamo sostituire il foglio di carta con una pellicola fotografica. Anche sulla pellicola, dopo, lo sviluppo, si vede la figura di interferenza: delle strisce chiare e scure. Dove sulla pellicola c'è una striscia chiara i due raggi si sono annullati a vicenda, dove c'è una striscia scura si sono amplificati.

Come si forma la figura di interferenza sulla pellicola?

Un fotone marca un granello di bromuro d'argento. Ma un fotone non può certo generare una figura di interferenza, nemmeno se fa parte di due raggi laser che si intersecano. Può solo contribuire a fare in modo che durante lo sviluppo della pellicola in quel punto appaia un puntino nero.

Quindi su una pellicola tenuta per breve tempo nella zona di interferenza dei due raggi di fig. 29.7 non si riconosce nessuna figura di interferenza, fig. 29.8a. Durante la breve esposizione solo pochi granelli sono stati marcati a sufficienza. Di conseguenza durante lo sviluppo appaiono solo pochi puntini neri, apparentemente distribuiti casualmente sulla pellicola.

Con un tempo di esposizione più lungo, cioè con un numero maggiore di fotoni assorbiti, si osserva però che la distribuzione dei puntini neri non è omogenea. In certe aree della pellicola non ci sono puntini neri, che sembrano invece raggruppati in altre parti. Aumentando ulteriormente il tempo di esposizione si nota che i puntini neri sono disposti in modo da formare delle strisce chiare e scure, figg. 29.8b e c.

Quindi i singoli fotoni contribuiscono a formare la figura di interferenza scegliendo, tra tutti i granelli alla loro portata, con maggiore frequenza quelli al posto "giusto". Con "giusto" si intende quei granelli posti nelle zone dove i raggi di luce si amplificano.

**Un fotone da solo non può generare una figura di interferenza su una pellicola. Ma i fotoni distribuiscono la loro marcatura in modo tale che la figura di interferenza si forma comunque.**

Anche questo comportamento dei fotoni si può paragonare a quello dei dadi. Ma questa volta "truc-

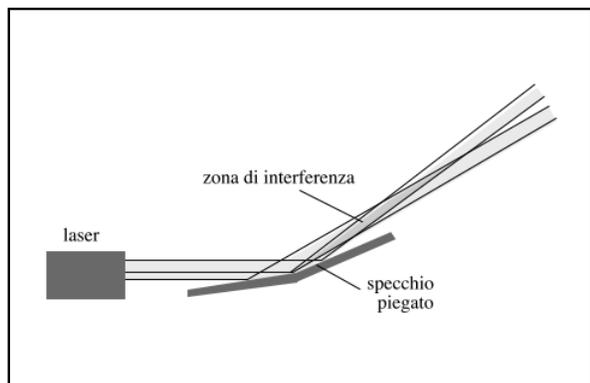


Fig. 29.7. Nelle due parti dello specchio il raggio laser si divide in due raggi che successivamente si intersecano con un angolo piccolissimo.

chiamo" il dado, per esempio aggiungendo un peso su una delle facce. Se lo lanciamo poche volte non possiamo stabilire se il trucco ha avuto effetto. La sequenza ottenuta potrebbe essere la stessa anche senza truccarlo. Solo dopo molti lanci osserviamo che il numero sulla faccia opposta a quella truccata esce più spesso degli altri. Il dado "sente" il peso e si comporta diversamente dal solito.

Torniamo ai fotoni. Se sulla pellicola arriva solo poca luce dai raggi che si intersecano, la pellicola non si differenzia da una colpita dalla luce di un solo raggio. In entrambi i casi ci sono pochi puntini distribuiti senza formare una figura di interferenza. Solo quando il tempo di esposizione è lungo la differenza appare evidente: su una pellicola si osservano delle strisce chiare e scure, sull'altra solo una macchia non strutturata. Quindi i fotoni si distribuiscono diversamente quando provengono da due raggi intersecanti rispetto a quando provengono da un solo raggio.

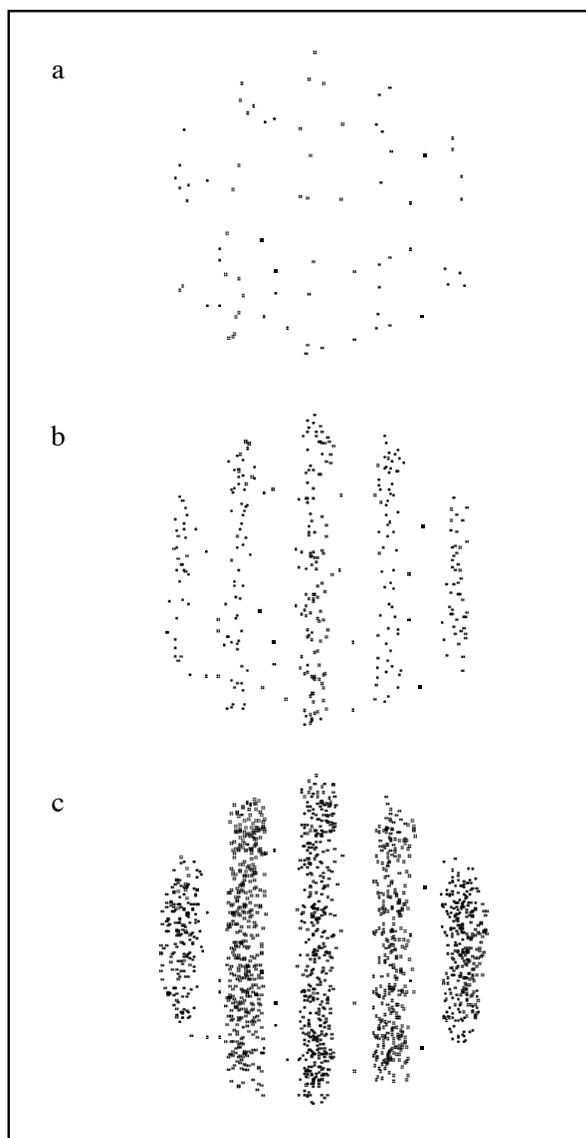


Fig. 29.8. Quando il tempo di esposizione aumenta appare una figura di interferenza.



La nube elettronica



## 30. Atomi

Tutte ciò che ti circonda è fatto di varie sostanze: da cemento, legno, plastica, metallo, vetro, coloranti, colla, aria e molto altro ancora.

La maggior parte delle sostanze sono una miscela di cosiddette sostanze pure. Così, per esempio, l'aria è composta principalmente da azoto e ossigeno, ma contiene anche vapore acqueo, anidride carbonica e vari gas nobili. Si conoscono vari milioni di sostanze pure. E si sa che ce ne sono molte di più di quelle che si conoscono.

Il gran numero di sostanze pure nasce in modo molto semplice.

Ogni porzione di una sostanza pura è composta da piccole particelle uguali tra loro, esattamente come un sacco d'avena è composto da chicchi d'avena.

Tra le sostanze pure c'è un gruppo di sostanze con una caratteristica particolare: i cosiddetti *elementi*. Le particelle più piccole degli elementi sono gli atomi. Ci sono tanti tipi di atomi quanti sono gli elementi.

Se si combinano più atomi si ottiene una *molecola*, la particella fondamentale di una nuova sostanza pura, che però non è più un elemento.

Le molecole possono essere messe assieme in moltissimi modi diversi, esattamente come con pochi tipi di pezzi del Lego si possono costruire molte cose. Così si spiega l'enorme numero di molecole e, di conseguenza, di sostanze pure esistenti.

Nei prossimi paragrafi ci occuperemo degli atomi. Che forma hanno? Come sono fatti al loro interno? Vedremo che si possono deformare e così facendo immagazzinare energia.

Gli atomi sono troppo piccoli per essere visti a occhio nudo, e nemmeno il migliore dei microscopi ottici basta per osservarli. Ci sono però degli apparecchi che sono in grado di farlo: la fig. 30.1 mostra una piccola sezione della superficie di un pezzo di silicio ripreso con un *microscopio elettronico a scansione*. Le piccole gobbe visibili nell'immagine sono gli atomi sulla superficie del silicio.

### *Esercizio*

Quali motivi conosci o puoi trovare nei libri (testi di chimica o dizionari) che giustificano l'esistenza degli atomi?

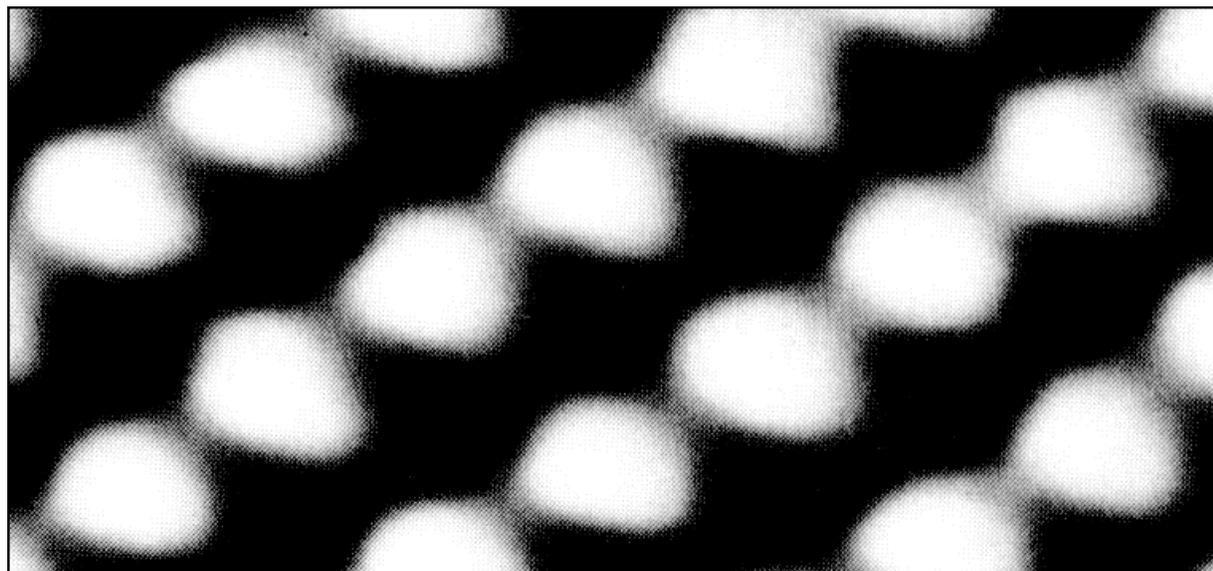


Fig. 30.1. La superficie del silicio ripresa con un microscopio a scansione ad effetto tunnel.

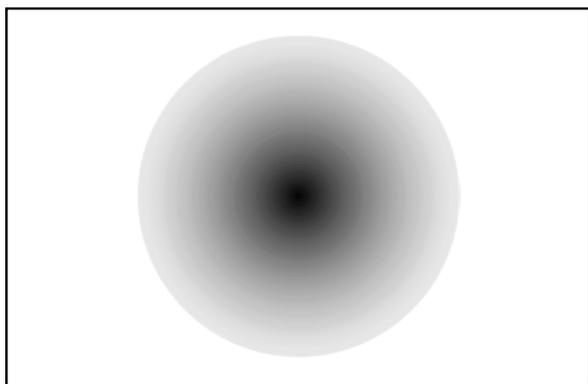


Fig. 30.2. La distribuzione dell'elettronio in un atomo.

### 30.1 La struttura degli atomi

Gli atomi sono sferici. Sono costituiti da un nucleo molto piccolo e pesante e da una nube leggera e relativamente grande.

Il diametro del nucleo è circa 50 000 volte più piccolo del diametro dell'atomo, cioè del diametro della nube elettronica. La massa del nucleo è circa il 99,9% della massa totale dell'atomo. Nucleo e nube sono elettricamente carichi: il nucleo è positivo, la nube è negativa. Il valore delle cariche del nucleo e della nube è uguale. Ciò significa che l'atomo nel suo complesso è elettricamente neutro, la sua carica totale è nulla.

**Gli atomi sono composti da un nucleo piccolo, pesante e di carica positiva e da una nube elettronica grande, leggera e di carica negativa.**

Probabilmente hai già sentito dire che la nube elettronica è fatta di elettroni puntiformi che girano attorno al nucleo. Questa rappresentazione dell'atomo, nata all'inizio del 20° secolo, non corrisponde più alla concezione dell'atomo secondo la fisica moderna.

È meglio immaginarsi che la nube elettronica sia fatta di una sostanza distribuita tutto attorno al nucleo. Chiameremo questa sostanza *elettronio*.

La densità dell'elettronio non è dappertutto la stessa. È massima molto vicino al nucleo e diminuisce man mano che ci si allontana dal nucleo, dapprima molto rapidamente poi sempre più adagio. Quindi il guscio dell'atomo è sferico ma non ha un bordo ben definito, fig. 30.2.

Per certi versi l'elettronio dell'atomo è simile all'atmosfera terrestre: anche l'atmosfera diventa meno densa allontanandosi dalla superficie della Terra e non si può dire esattamente dove finisce.

Come grandezza dell'atomo scegliamo il raggio all'interno del quale si trova il 90% dell'elettronio. Atomi diversi hanno raggi diversi. Il valore tipico per questi raggi è di  $10^{-10}$  m.

**La nube elettronica è composta da elettronio. L'elettronio è distribuito come una sfera attorno al nucleo. La sua densità diminuisce dal nucleo verso l'esterno.**

L'atomo manifesta una proprietà sorprendente quando si tenta di estrarre l'elettronio dalla nube elettronica. Per il momento non ci interessa in che maniera si debba procedere, immaginiamo solo che l'atomo sia così grande da poterci mettere le mani. Quindi - mentalmente - afferriamo una porzione di elettronio e la estraiamo dall'atomo. Otteniamo una certa quantità di elettronio, la posiamo da qualche parte e ripetiamo l'operazione: affondiamo nuovamente le mani nell'atomo, prendiamo una seconda porzione e la estraiamo. A quel punto notiamo con grande sorpresa che la porzione è esattamente identica alla prima. Rifacciamo l'operazione ancora una volta e notiamo che la porzione di elettronio estratto è identica alle due precedenti. Allora facciamo uno sforzo e tentiamo di prenderne di più; e ci riusciamo: abbiamo in mano più elettronio. Però questa volta è esattamente una quantità doppia delle porzioni precedenti. Con uno sforzo ancora maggiore riusciamo a prenderne il triplo, il quadruplo, ecc., ma mai una quantità intermedia. Allora proviamo a estrarre dall'atomo una quantità inferiore di elettronio. Non ci riusciamo. O prendiamo una quantità come quelle ottenute in precedenza o niente.

Quindi dall'atomo si può estrarre solo una ben precisa porzione di elettronio - per così dire una *porzione elementare* - o un suo multiplo. Così come la più piccola porzione di luce e di una sostanza chimica hanno un nome, anche la più piccola porzione di elettronio ne ha uno: si chiama *elettrone*. Queste porzioni elementari si chiamano genericamente *particelle*.

Fino a che l'elettronio viene lasciato nella nube elettronica, non si nota questa sua proprietà di manifestarsi in porzioni elementari. Nella nube forma una sorta di "poltiglia" continua, non si vedono divisioni tra le varie porzioni.

Ecco la scheda segnaletica di un elettrone: ha una massa di  $10^{-30}$  kg, una carica elettrica negativa di  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C e si comporta come un piccolo magnete permanente di intensità ben precisa.

**L'elettrone è una porzione elementare di elettronio. Le porzioni elementari delle sostanze sono dette particelle.**

Come la nube elettronica anche il nucleo dell'atomo è fatta di una sostanza. A differenza della densità dell'elettronio nella nube, la densità della materia nucleare all'interno del nucleo è costante, come la densità dell'acciaio in una sfera d'acciaio.

Anche dal nucleo si possono estrarre solo determinate porzioni. Ma ci sono due tipi di porzione, leggermente diverse tra loro, i cui nomi probabilmente già conosci: *protoni* e *neutroni*.

Tabella 30.1

	massa	carica elettrica	magnete
elettrone	$0,9 \cdot 10^{-30}$ kg	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ C	forte
protone	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ C	debole
neutrone	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	0 C	debole

I protoni e i neutroni hanno una massa molto maggiore di quella dell'elettrone, sono circa 1800 volte più pesanti. La carica del protone ha lo stesso valore di quella dell'elettrone ma segno opposto, vale a dire  $+1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Il neutrone non è carico. Anche i protoni e i neutroni sono magnetici, ma in modo molto molto più debole degli elettroni.

I valori delle grandezze che caratterizzano gli elettroni, i protoni e i neutroni, sono riassunti nella tabella 30.1.

Il nucleo di ogni atomo contiene dei protoni di carica positiva, la nube elettronica è fatta di elettroni di carica negativa. Ma l'atomo è complessivamente neutro. Visto che la carica degli elettroni e dei protoni ha segno opposto ma uguale valore, possiamo concludere che il numero di elettroni nella nube elettronica deve essere uguale a quello dei protoni nel nucleo dell'atomo.

Il numero dei protoni nel nucleo è il criterio che differenzia i vari tipi di atomo: l'atomo di idrogeno ha un protone nel nucleo, l'atomo di elio ne ha due, l'atomo di litio tre e così via. Nella tavola periodica (vedi appendice) gli atomi sono ordinati secondo il numero di protoni nel nucleo, il cosiddetto numero atomico.

### **I nuclei degli atomi contengono un numero di protoni caratteristico per ogni tipo di atomo.**

Elettroni, protoni e neutroni sono magnetici. Per contro, a parte il ferro, praticamente tutte le sostanze che ci circondano non lo sono. E anche il ferro è magnetico solo in circostanze particolari (per esempio i chiodi di ferro di regola non lo sono).

Il motivo è che gli effetti dei magneti si possono compensare. Così in circa un quarto di tutti i tipi di atomo, compresi tutti gli atomi dei gas nobili, gli effetti magnetici degli elettroni si annullano a vicenda. (Gli effetti magnetici dei protoni e dei neutroni sono così piccoli che il loro contributo al magnetismo della materia è trascurabile.) Di conseguenza questi atomi sono magneticamente neutri, così come lo sono le sostanze composte da questi atomi.

Nei restanti tre quarti dei tipi di atomo, i singoli atomi sono magnetici. Ma in genere neanche le sostanze composte da questi tipi di atomo sono magneti-

che: gli atomi si uniscono a formare delle molecole e compensano così i loro effetti magnetici. L'idrogeno ad esempio, i cui atomi hanno un solo elettrone nella nube elettronica e sono quindi magnetici, in natura è in forma molecolare, cioè è fatto di molecole  $H_2$ . Gli effetti magnetici dei due elettroni di ogni molecola si compensano e complessivamente la molecola è magneticamente neutra.

Le molecole nelle quali gli effetti magnetici degli elettroni non si compensano, si uniscono spesso in grossi gruppi di molecole, così che ancora una volta l'effetto magnetico del gruppo di molecole si annulla. Solo in casi particolari, cioè quando gli atomi o le molecole magnetici si ordinano in modo che i loro effetti magnetici non si compensino, si ha una magnetizzazione della sostanza. In natura le sostanze di questo tipo sono molto rare, ma è facile costruirle. I magneti permanenti sono fatti con queste sostanze.

### **Gli effetti magnetici degli elettroni si possono compensare:**

- all'interno della nube elettronica;
- all'interno della molecola;
- all'interno dei gruppi di molecole.

### **Esercizio**

Se si potesse ingigantire un atomo fino a farlo diventare grande come la Terra (diametro della Terra: circa 12 000 km), quale diametro avrebbe il nucleo?

## **30.2 Grandezza e densità della nube elettronica**

La quantità di elettroni nella nube elettronica di un atomo aumenta all'aumentare del numero di protoni. Così la nube elettronica di un atomo di mercurio (numero atomico 80) ha 80 volte più elettroni della nube di un atomo di idrogeno. Sarebbe logico attendersi che un atomo di mercurio sia molto più grande di un atomo di idrogeno. Invece l'atomo di mercurio e quello di idrogeno sono grosso modo grandi uguali.

Questo significa che la densità dell'elettronio in un atomo di mercurio deve essere molto più grande che in un atomo di idrogeno.

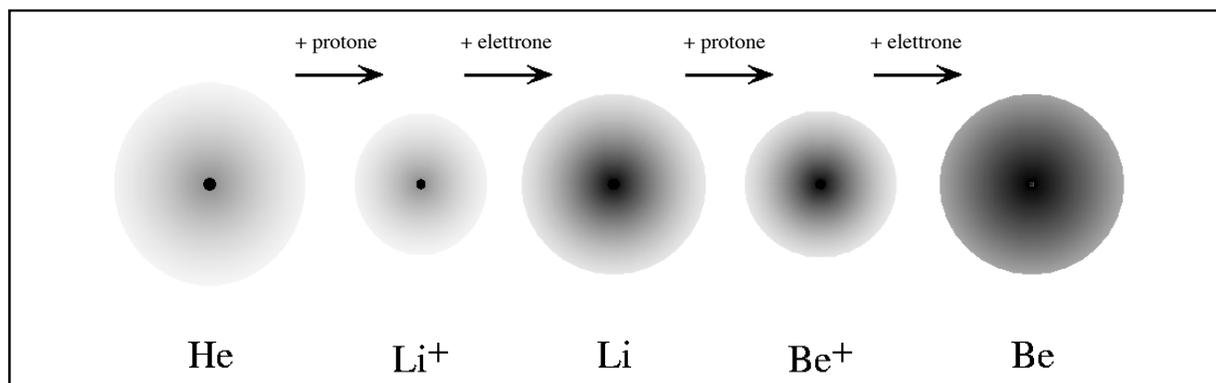


Fig. 30.3. Costruiamo gli atomi pesanti aggiungendo alternativamente un protone e un elettrone. (Vengono aggiunti anche neutroni. I neutroni però non influiscono sulle dimensioni degli atomi e degli ioni.)

Immaginiamo di costruire gli atomi dei vari elementi chimici continuando ad aggiungere elettroni, protoni e neutroni e di chiederci ogni volta come cambino la grandezza e la densità dell'atomo. Visto che i neutroni non hanno nessuna influenza sulle dimensioni dell'atomo, da qui in avanti non ci occuperemo più di loro. Cominciamo dall'atomo di idrogeno, che è composto da un protone nel nucleo e da una porzione elementare di elettrone nella nube elettronica.

Aumentiamo di uno il numero dei protoni e otteniamo un *ione* di elio di carica positiva. Visto che ora ci sono due protoni con la loro carica positiva ad attirare la carica negativa dell'elettrone, l'elettrone si avvicina al nucleo. Quindi l'ione di elio è più piccolo dell'atomo di idrogeno. Ciò significa che nello ione di elio la densità dell'elettrone è maggiore che nell'atomo di idrogeno.

Per ottenere un *atomo* di elio dobbiamo aggiungere un elettrone. In questo modo la nube si gonfia, così come si gonfia un palloncino quando ci si soffia dell'aria. Le due porzioni di elettrone nell'atomo di elio reclamano più spazio dell'unica porzione nello ione di elio: l'atomo di elio è più grande dello ione.

Aggiungendo un altro protone si ottiene uno ione positivo di litio, fig. 30.3, e ancora una volta l'elettrone si restringe. E ancora una volta il completamento della nube elettronica per ottenere un atomo di litio ha lo stesso effetto che con l'elio: la nube elettronica con tre elettroni ha bisogno di più spazio, l'atomo di litio è più grande dello ione di litio.

Durante questa costruzione a tappe degli atomi si manifestano due tendenze opposte: l'aggiunta di un protone causa un rimpicciolimento della nube elettronica mentre l'aggiunta di un elettrone ne causa un ingrossamento.

La fig. 30.4 mostra il raggio dell'atomo in funzione del numero di protoni. Notiamo che a volte vince la tendenza a rimpicciolirsi, a volte quella a ingrandirsi. In ogni caso il raggio della maggior parte degli atomi non si discosta molto dal valore tipico di poco superiore ai  $10^{-10}$  metri. Gli atomi più grandi circa il doppio, i più piccoli circa la metà.

**Il raggio della maggior parte degli atomi si discosta poco da  $10^{-10}$  metri. Per contro, c'è grande differenza tra le densità dell'elettrone nei gusci degli atomi.**

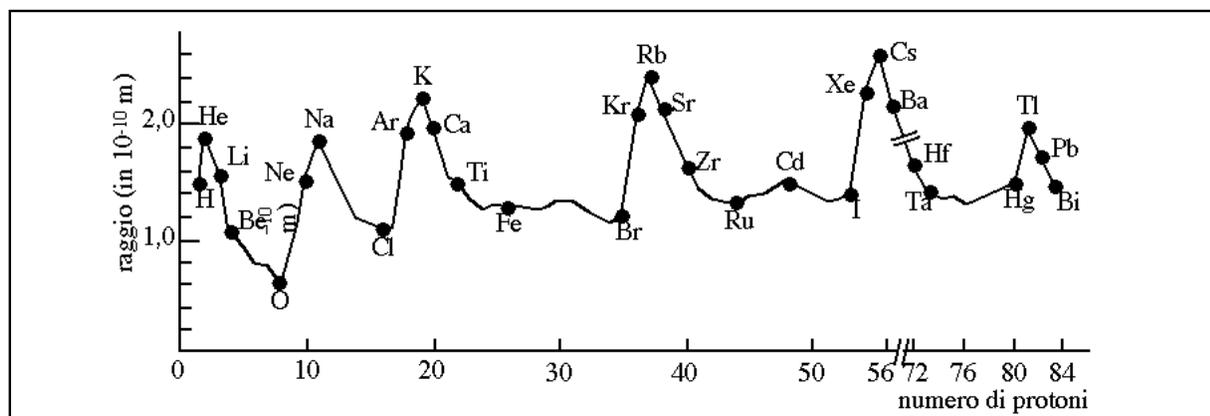


Fig. 30.4. I raggi dei diversi atomi.

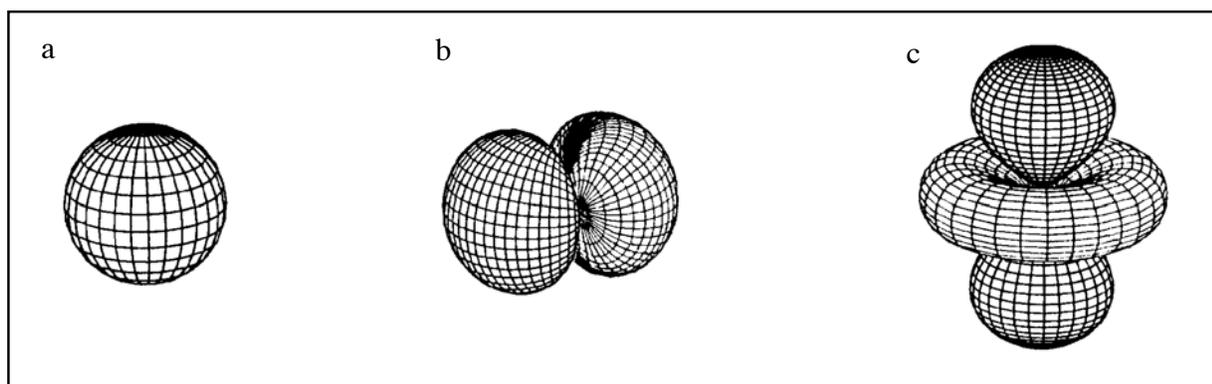


Fig. 30.5. (a) Atomo di idrogeno allo stato fondamentale. (b) e (c) Atomo di idrogeno in due stati eccitati.

### 30.3 I diversi stati degli atomi

Un palloncino gonfio ha una certa forma. Questa forma può essere modificata schiacciando o stiracchiando il palloncino. Ma se lo lasciamo andare ritorna al suo stato originale. Ha la sua forma normale solo se lo lasciamo stare.

Con gli atomi succede qualcosa di simile. Tutto quanto abbiamo detto finora sulla forma e la grandezza degli atomi vale solo se "li lasciamo stare". Nei pressi dell'atomo non ci deve essere nulla che ne può cambiare la forma: né atomi, né campi elettrici o campi magnetici. Se ci sono queste premesse l'atomo ha una forma sferica.

La condizione che non ci siano altri atomi nelle vicinanze è soddisfatta nelle sostanze gassose, visto che gli atomi si trovano a distanze abbastanza grandi l'uno dall'altro. Per ora ci occuperemo di questi atomi liberi. Nei liquidi e nei solidi gli atomi sono molto vicini. Della forma degli atomi in queste sostanze ci occuperemo in un prossimo capitolo.

Quello che serve per una deformazione - in un palloncino come in un atomo - è l'energia.

A un palloncino potremmo fornire questa energia anche senza schiacciarlo: potremmo per esempio lanciargli contro una pallina da tennis. Durante l'impatto la pallina da tennis deforma il palloncino. In questo caso l'energia per la deformazione proviene dalla pallina che nell'impatto viene frenata. Più la pallina è veloce al momento dell'impatto, cioè maggiore è la sua energia, più grande sarà la deformazione del palloncino. Naturalmente il palloncino non resta deformato ma riprende subito la sua forma iniziale facendo rimbalzare la pallina da tennis.

Gli atomi possono essere deformati allo stesso modo: sparandogli contro altre particelle, per esempio fotoni o elettroni.

Però gli atomi si comportano in modo molto curioso. Possono cioè essere "fatti scattare" e assumere determinate forme. Quando un atomo prende una di queste forme dopo l'urto con un'altra particella, inizialmente mantiene questa forma. Solo dopo un

certo tempo torna nello stato non deformato. Alcune delle possibili forme assunte dall'atomo di idrogeno sono rappresentate in fig. 30.5.

Di un atomo che è scattato in una delle posizioni possibili si dice che si trova in uno *stato eccitato*. Lo stato con la nube elettronica non deformata (fig. 30.5a) si chiama *stato fondamentale* dell'atomo. Il processo di deformazione, cioè il passaggio dallo stato fondamentale in uno stato eccitato, si chiama *eccitazione*.

**Gli atomi possono essere deformati. Gli atomi possono mantenere certe deformazioni.**

Quando l'atomo scatta in una di queste forme immagazzina l'energia usata per la deformazione. Visto che l'atomo può mantenere solo alcune di queste deformazioni, può immagazzinare solo determinate quantità di energia. In altre parole: l'energia dell'atomo può assumere solo certi valori. In fig. 30.6 è rappresentata la *scala di energia* di un atomo.

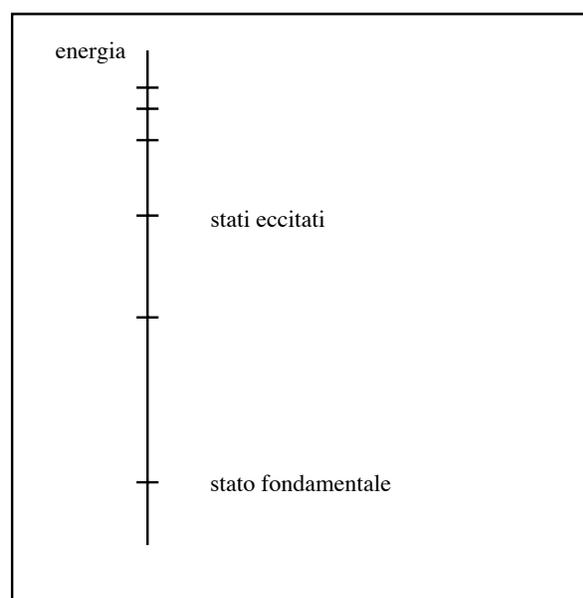


Fig. 30.6. Scala di energia di un atomo: l'energia dell'atomo può assumere solo determinati valori.

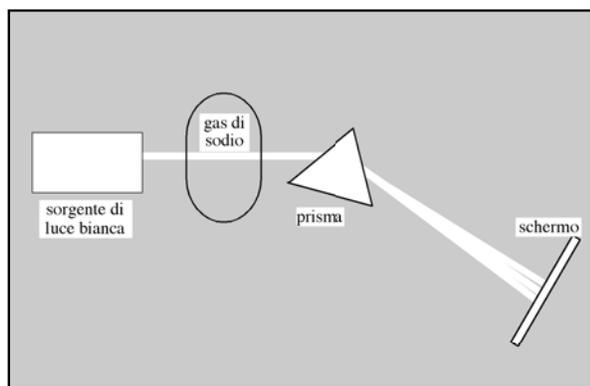


Fig. 30.7. La luce di una lampadina attraversa del gas di sodio e subisce poi una scomposizione spettrale.

Non consideriamo il fatto che un atomo può essere in movimento e quindi che la sua energia può essere variata a piacimento. Ci occupiamo solo di atomi fermi.

L'energia di un atomo ha il valore minimo quando si trova allo stato fondamentale. I valori di energia degli stati eccitati superano il valore minimo della quantità esatta di energia ricevuta con l'eccitazione.

**Un atomo fermo può immagazzinare solo determinate quantità di energia.**

Concretamente, come si fa a eccitare un atomo? In ogni caso lo si deve colpire con altre particelle: fotoni, elettroni, ioni o altri atomi. A seconda della particella usata si osservano delle particolarità.

### 30.4 L'eccitazione degli atomi con i fotoni

Se vogliamo eccitare un atomo con un fotone, l'energia del fotone deve essere esattamente uguale all'energia necessaria affinché l'atomo passi dallo stato fondamentale allo stato eccitato. Se il fotone ha meno energia ovviamente l'atomo non può essere eccitato, visto che l'energia non basta. Ma anche quando il fotone ha più energia l'eccitazione non è possibile.

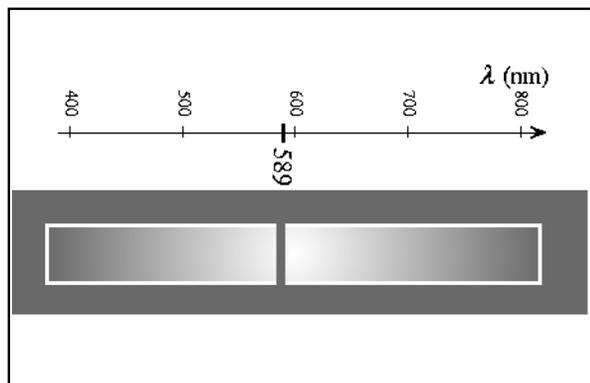


Fig. 30.8. Nello spettro manca la luce di lunghezza d'onda 589 nm.

Descriviamo un esperimento concreto. Come atomo da eccitare scegliamo un atomo di sodio. Con il sodio si riesce a osservare bene cosa succede. Di solito il sodio è allo stato solido, ma riscaldandolo si ottiene facilmente del vapore di sodio.

Per i fotoni usiamo una lampada che emette luce bianca, cioè un miscuglio di tutti i tipi di luce con lunghezza d'onda tra 400 e 800 nm. Visto che l'energia di un fotone dipende dalla sua lunghezza d'onda, in questo modo abbiamo a disposizione un miscuglio di fotoni con energie diverse.

Il raggio di luce della lampada viene diretto sul gas di sodio, fig. 30.7. La stragrande maggioranza dei fotoni non ha l'energia adatta per eccitare gli atomi. Questi fotoni attraversano il gas indisturbati. Solo una piccola frazione dei fotoni ha l'energia giusta, e questi fotoni sono assorbiti dagli atomi. Cedono la loro energia agli atomi a così scompaiono, mentre gli atomi passano al loro stato eccitato.

Nel raggio di luce che ha attraversato il gas mancano i fotoni assorbiti. Ma visto che si tratta di una parte molto piccola della luce, inizialmente non si nota niente. Quindi dobbiamo esaminare più da vicino il raggio dopo l'attraversamento del vapore di sodio: eseguiamo una scomposizione spettrale della luce.

Un prisma devia maggiormente la luce con piccola lunghezza d'onda rispetto a quella con una lunghezza d'onda maggiore. Facciamo in modo che un piccolo raggio di luce che ha attraversato il gas di sodio colpisca un prisma. A grande distanza dietro il prisma montiamo uno schermo bianco. La luce giunge sullo schermo separata in funzione della lunghezza d'onda. Visto che la luce di diversa lunghezza d'onda produce nel nostro occhio diverse percezioni cromatiche, sullo schermo vediamo i colori dell'arcobaleno.

Se osserviamo molto attentamente notiamo che in un certo punto, nella zona del giallo, lo schermo resta scuro, fig. 30.8. Manca la luce di una certa lunghezza d'onda. Manca esattamente quel tipo di luce i cui fotoni sono stati assorbiti dagli atomi di sodio. Con uno *spettrometro* troviamo anche la lunghezza d'onda della luce mancante:  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .

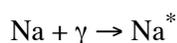
Perciò l'energia dei fotoni assorbiti è

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{589 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Questa è anche la differenza di energia tra lo stato fondamentale e il primo stato eccitato dell'atomo di sodio, fig. 30.9. Mediante assorbimento di un fotone "giallo" un atomo di sodio salta sulla sua scala di energia dal piolo più basso a quello immediatamente sopra di lui.

In un capitolo precedente abbiamo visto che la luce si comporta come una sostanza. Quindi anche l'assorbimento della luce può essere descritto come rea-

zione tra sostanze. Nel caso del nostro esperimento l'equazione di reazione ha la forma:



Espresso a parole: il sodio reagisce con la luce e diventa la sostanza simboleggiata con  $\text{Na}^*$ . Questa sostanza è composta da atomi di sodio nel primo stato eccitato. Il simbolo Na rappresenta il sodio allo stato fondamentale.

I fotoni di energia  $E = 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$  non sono gli unici a essere assorbiti dagli atomi di sodio. Gli atomi di sodio possono essere portati in molti altri stati eccitati. Quindi ci sono altri tipi di fotone che possono venire assorbiti. Le energie di questi fotoni sono maggiori di quelli considerati sopra e le loro lunghezze d'onda minori.

Per esempio, il sodio assorbe anche fotoni con un'energia di  $0,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ , fig. 30.9, che corrisponde a una lunghezza d'onda di 330 nm. Quindi si tratta di luce ultravioletta.

Riassumiamo:

**Fotoni con l'energia giusta possono eccitare gli atomi. Nel processo i fotoni vengono assorbiti.**

Abbiamo visto che gli atomi di sodio lasciano passare indisturbata la maggior parte dei fotoni di luce visibile. Lo stesso vale per tutte le altre sostanze gassose. I loro atomi o molecole assorbono nessuno o pochissimi fotoni visibili. Ciò spiega una proprietà dei gas che ben conosciamo:

**I gas sono trasparenti.**

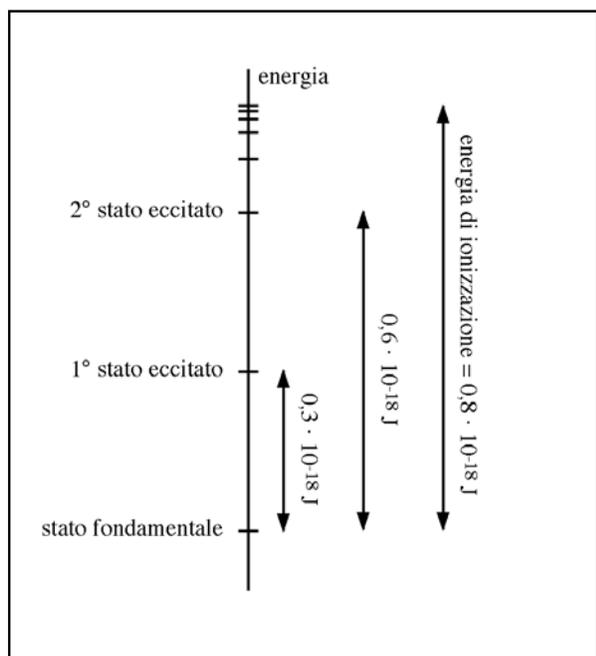
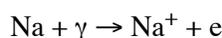


Fig. 30.9. Differenze di energia tra i vari pioli della scala di energia dell'atomo di sodio.

Maggiore è l'energia fornita all'atomo da un fotone, più grande sarà la deformazione. Quando l'energia dei fotoni è molto alta, la nube elettronica può essere deformata a tal punto che una parte di elettrone si stacca dall'atomo. Nel caso del sodio questo succede quando il fotone ha un'energia superiore a  $0,8 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ . Visto che l'elettrone che si stacca ha una carica negativa, la carica elettrica della nube cambia. L'atomo di sodio diventa uno *ione di sodio* di carica positiva. Questo processo si chiama *ionizzazione*. L'energia minima necessaria per ionizzare un atomo si chiama *energia di ionizzazione*, fig. 30.9.

Anche il processo di ionizzazione può essere descritto come reazione:



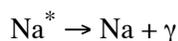
In questo caso  $\text{Na}^+$  indica la sostanza composta da ioni positivi di sodio; "e" è il simbolo dell'elettrone.

### Esercizi

1. Con luce di lunghezza d'onda  $\lambda = 285 \text{ nm}$  gli atomi di sodio possono essere portati dallo stato fondamentale al terzo stato eccitato. Calcola la differenza di energia tra lo stato fondamentale e il terzo stato eccitato.
2. Qual è la lunghezza d'onda massima della luce utilizzabile per ionizzare gli atomi di sodio? Di che tipo di luce si tratta?

## 30.5 Il ritorno allo stato fondamentale

Ogni reazione può avvenire in entrambe le direzioni, anche la reazione tra sodio e luce per dare sodio eccitato. Ciò significa che c'è anche una reazione con l'equazione:



Quando l'atomo di sodio eccitato torna allo stato fondamentale, viene emesso un fotone.

Lo possiamo constatare nell'esperimento descritto nel paragrafo precedente. Se osserviamo attentamente il contenitore del gas di sodio attraversato dal raggio di luce, notiamo un colore giallognolo. Un esame della luce allo spettrometro, mostra che ha la stessa lunghezza d'onda della luce mancante sullo schermo. Quindi gli atomi di sodio cedono l'energia ricevuta con l'assorbimento di un fotone producendo un fotone dello stesso tipo.

Ma l'emissione di questo fotone non avviene solamente nella direzione in cui si stava muovendo il fotone assorbito, avviene in tutte le direzioni, fig. 30.10. Per questo motivo i fotoni che causano l'eccitazione mancano quasi del tutto nel raggio che attraversa il gas.

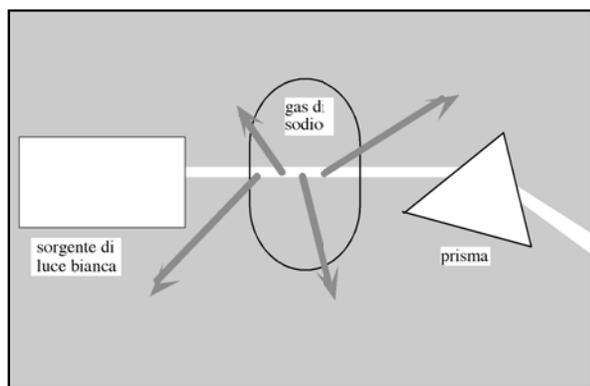


Fig. 30.10. Il sodio eccitato emette in tutte le direzioni.

Dopo l'assorbimento di un fotone "giallo", l'atomo di sodio si trova nello stato eccitato più basso. Se assorbisse un fotone più ricco di energia potrebbe essere portato in uno stato di eccitazione superiore, fig. 30.11a.

In questo caso per tornare allo stato fondamentale l'atomo ha a disposizione diverse possibilità: può scendere direttamente allo stato fondamentale emettendo un fotone che avrà la stessa energia di quello che ha assorbito con l'eccitazione. Ma può anche scendere la scala di energia in diverse tappe emettendo ogni volta un fotone di energia inferiore, fig. 30.11b.

**Un atomo eccitato torna allo stato fondamentale emettendo uno o più fotoni.**

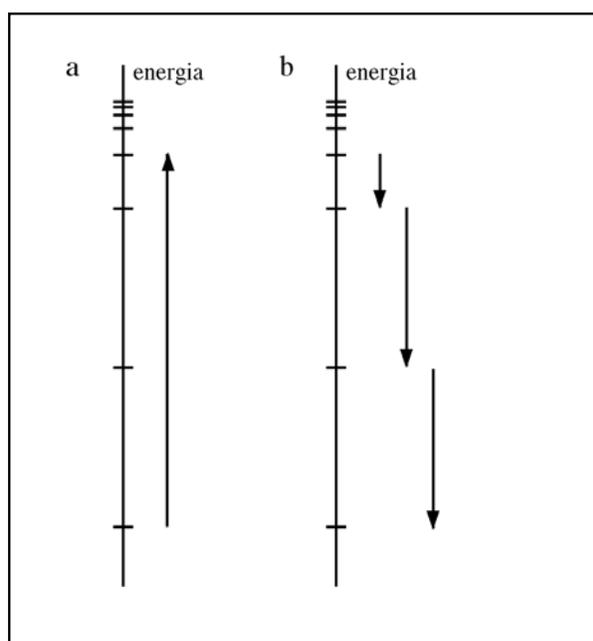


Fig. 30.11. Differenze di energia tra i vari pioli della scala di energia dell'atomo di sodio.

## 30.6 Il tempo di dimezzamento degli stati eccitati

Abbiamo detto che un atomo passa un certo tempo in uno stato eccitato e poi, a un certo momento, torna allo stato fondamentale. Ma quanto tempo resta allo stato eccitato?

Si potrebbe pensare che sia una cosa facile da scoprire: spegniamo la sorgente di luce nell'esperimento in fig.30.7 e vediamo per quanto tempo ancora il gas emette luce gialla. Nei fatti si osserva che non appena si spegne la sorgente di luce anche il gas smette di emettere luce gialla. Dobbiamo concludere che il tempo di permanenza allo stato eccitato è estremamente corto, troppo corto per un'osservazione fatta a questo modo. Con una misurazione più precisa scopriamo che la "durata della vita" dello stato eccitato di un atomo è dell'ordine di grandezza di circa  $10^{-8}$  secondi. Quindi, rispetto agli intervalli di tempo con i quali siamo confrontati nella vita di tutti i giorni, è molto molto breve.

C'è un'altra cosa da dire sulla durata di vita dello stato eccitato. Immaginiamo di eccitare un gran numero di atomi, diciamo 100 000, all'istante  $t_0$ . Potremmo pensare che non appena è trascorsa la durata di vita dello stato eccitato, tutti gli atomi tornano come su comando allo stato fondamentale. Nei fatti gli atomi si comportano in maniera molto diversa.

Se consideriamo un solo atomo, non è possibile prevedere esattamente quando tornerà allo stato fondamentale. Può succedere immediatamente dopo l'eccitazione, ma può anche succedere parecchio tempo dopo. Per contro, si può dire con buona precisione come si comporterà il gruppo di 100 000 atomi. Un certo tempo dopo  $t_0$ , diciamo dopo  $2 \cdot 10^{-8}$  secondi, circa la metà degli atomi, quindi 50 000, è già tornata allo stato fondamentale, gli altri 50 000 non ancora. Dopo altri  $2 \cdot 10^{-8}$  secondi, dei 50 000 atomi che erano ancora eccitati, la metà è tornata allo stato fondamentale, quindi allo stato eccitato ne restano ancora 25 000. Dopo altri  $2 \cdot 10^{-8}$  secondi la metà degli atomi che erano ancora eccitati sono tornati allo stato fondamentale e ne restano 12 500 allo stato eccitato, e così via. In fig. 30.12 è rappresentato il numero di atomi eccitati in funzione del tempo. Si dice che il numero di atomi allo stato eccitato diminuisce *esponenzialmente*.

L'intervallo di tempo necessario affinché il numero di atomi eccitati diminuisca della metà si chiama *tempo di dimezzamento*. Nel caso appena discusso il tempo di dimezzamento sarebbe di  $2 \cdot 10^{-8}$  s.

Torniamo al singolo atomo in uno stato eccitato. Avevamo detto che non è possibile prevedere quando tornerà allo stato fondamentale. Ciò non significa che non siamo in grado di dire nulla della sua transizione allo stato fondamentale. Per esempio possiamo dire: la *probabilità* che l'atomo torni allo stato fondamentale nei prossimi  $2 \cdot 10^{-8}$  secondi è 0,5, cioè 50%.

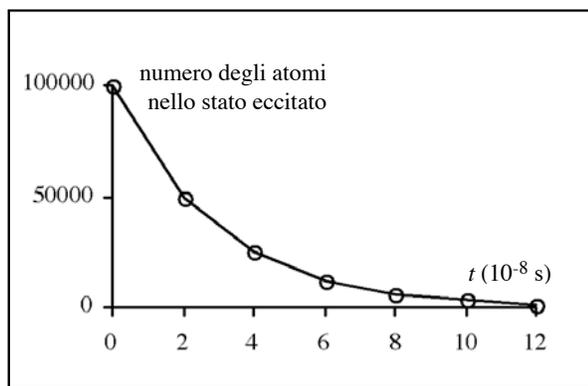


Fig. 30.12. Numero di atomi eccitati in funzione del tempo.

Il valore esatto del tempo di dimezzamento è diverso per ogni tipo di atomo, e per un determinato atomo è diverso per ogni suo possibile stato di eccitazione.  $10^{-8}$  s è un valore tipico dal quale, nella maggior parte dei casi, i tempi di dimezzamento non si discostano molto.

A te un tempo di  $2 \cdot 10^{-8}$  s potrà sembrare troppo breve per essere degno di nota. Ma per i fisici che si occupano di fisica atomica e nucleare, anche tempi molto più brevi sono assolutamente normali. Ed è anche possibile misurarli.

In natura ci sono molti processi nei quali qualcosa diminuisce esponenzialmente. Un esempio è la luce che penetra nell'acqua di un lago. L'acqua assorbe la luce, più è torbida più ne assorbe.

Immaginiamo un lago con l'acqua uniformemente torbida, dove a 1 metro di profondità giunge solo metà della luce. Potremmo ipotizzare che nel metro successivo venga assorbita l'altra metà della luce. Invece constatiamo che a 2 metri di profondità resta un quarto della luce che c'è in superficie, a 3 metri di profondità ne resta un ottavo e così via.

La pressione atmosferica in funzione dell'altitudine è un altro esempio di diminuzione esponenziale. A 5 km di altitudine la pressione atmosferica è metà della pressione sulla superficie terrestre, a 10 km è un quarto, a 15 km un ottavo, ecc.

**Il numero di atomi in uno stato eccitato diminuisce esponenzialmente. Il tempo di dimezzamento ci dice quando il numero di atomi ancora eccitati è diminuito della metà.**

**Il valore tipico del tempo di dimezzamento è  $10^{-8}$  secondi.**

**Non si può prevedere l'istante preciso in cui un atomo emetterà un fotone.**

Non si può prevedere nemmeno se un atomo che si trova in uno stato eccitato superiore tornerà allo stato fondamentale in un colpo solo o se lo farà in varie tappe. Ma anche in questo caso si possono dare delle probabilità. Consideriamo un atomo che si tro-

va nel secondo stato di eccitazione. Ha due possibilità per tornare allo stato fondamentale: direttamente o passando dal primo stato eccitato. Ognuna delle due possibilità si verifica con una probabilità ben precisa, per esempio l'una con il 65% e l'altra con il 35%. (La somma delle due probabilità deve dare il 100%.) Quindi se abbiamo 100 000 atomi eccitati, 65 000 prendono una strada e i restanti 35 000 prendono l'altra.

## 30.7 L'eccitazione degli atomi con gli elettroni

Oltre ai fotoni, per eccitare gli atomi si possono usare anche altre particelle, per esempio elettroni, ioni, protoni, atomi e molecole. Ci occupiamo degli elettroni visto che si usano molto spesso.

Affinché un elettrone possa eccitare un atomo, deve avere - oltre alla sua energia di riposo - la quantità di energia necessaria per l'eccitazione. L'energia di un elettrone è facile da aumentare: basta farlo muovere più in fretta, cioè caricarlo di quantità di moto, in quanto con la quantità di moto riceve anche energia. Caricare un elettrone di quantità di moto e di energia non è difficile.

È sufficiente portare gli elettroni in un campo elettrico. Visto che gli elettroni portano carica elettrica, il campo elettrico li attira. Quantità di moto ed energia dell'elettrone aumentano. Se questi elettroni colpiscono un atomo, l'atomo si deforma e può passare in uno stato eccitato.

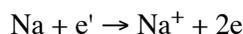
Se l'elettrone ha un'energia maggiore di quella necessaria per l'eccitazione, dopo l'impatto con l'atomo si tiene l'energia eccedente. Quindi questa caratteristica lo distingue dai fotoni. Nell'eccitazione dell'atomo i fotoni scompaiono. Perciò non c'è nessuno che può portare via l'energia in eccesso.

**Gli atomi possono essere eccitati con degli elettroni veloci.**

Anche questo processo può essere descritto con un'equazione. Per esempio: il sodio può reagire con l'elettrone; il simbolo dell'elettrone è "e"; rappresentiamo l'elettrone accelerato e carico di energia con  $e'$ . L'equazione di reazione ha la forma



Se un atomo viene colpito da un elettrone che ha molta energia (e quantità di moto) può deformarsi a tal punto che dalla sua nube elettronica si stacca una porzione di elettrone. L'atomo viene ionizzato:



### 30.8 I gas come sorgenti di luce

Una delle sorgenti di luce artificiale più usate è il *tubo luminescente*.

Il vantaggio principale di queste lampade rispetto alle lampade a incandescenza è il consumo ridotto di energia. Per produrre la stessa quantità di luce una comune lampadina a incandescenza consuma da quattro a cinque volte più energia di un tubo luminescente. Inoltre il tubo luminescente ha una durata molto maggiore.

In una lampadina la luce è prodotta da un filamento metallico che viene reso incandescente da una corrente elettrica. In un tubo luminescente la luce è prodotta da un gas. Con l'aiuto delle nostre conoscenze sull'eccitazione degli atomi siamo in grado di capire in che modo il gas emette luce.

Il gas è in un tubo di vetro sigillato. A ogni estremità del tubo si trova un elettrodo metallico, fig. 30.13. Uno degli elettrodi viene caricato di elettricità negativa, l'altro di elettricità positiva. Inoltre l'elettrodo negativo viene surriscaldato e, come conseguenza, cede elettroni. (Anche le sostanze solide sono composte essenzialmente da elettroni. Se la sostanza viene riscaldata, l'elettrone può essere deformato al punto di cedere degli elettroni.) Visto che gli elettroni hanno carica negativa, sono accelerati dal campo elettrico tra gli elettrodi metallici e attratti verso l'elettrodo positivo.

Lungo il tragitto si scontrano con degli atomi e succedono due cose:

- (1) gli atomi colpiti da elettroni veloci si ionizzano, quindi si formano altri elettroni.
- (2) gli atomi colpiti da elettroni più lenti vengono eccitati.

Gli elettroni supplementari ottenuti nel caso (1) sono a loro volta accelerati dal campo, possono ionizzare altri atomi, ecc. Quindi a partire dagli elettroni liberati dall'elettrodo metallico, nel tubo si producono grandi quantità di elettroni.

In questo modo aumenta anche la frequenza della situazione (2), cioè molti atomi vengono eccitati

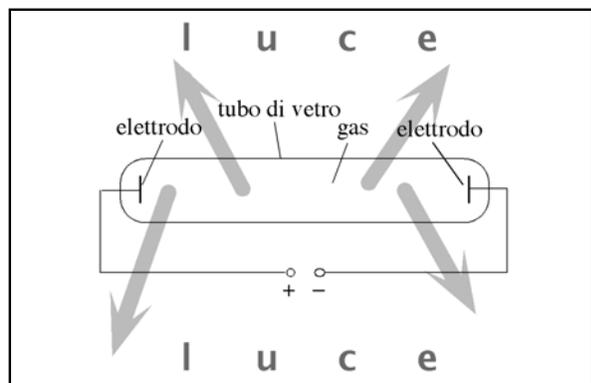
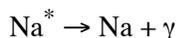


Fig. 30.13. Tubo luminescente.

dagli impatti degli elettroni. Quando tornano allo stato fondamentale questi atomi emettono dei fotoni: il gas emette luce.

**In un tubo luminescente gli atomi vengono eccitati dagli elettroni. Tornando allo stato fondamentale questi atomi emettono fotoni.**

Passaggi pedonali, gallerie e incroci stradali sono spesso illuminati grazie a dei tubi luminescenti che contengono vapori di sodio. La produzione di luce in queste *lampade al sodio* può essere descritta con le reazioni che già conosciamo:



Visto che gli atomi di sodio emettono fotoni "gialli", la luce prodotta dalle lampade al sodio ha un caratteristico colore giallo.

Nel confronto con altri tubi luminescenti le lampade al sodio sono quelle che consumano meno energia. Lo svantaggio di queste lampade è il loro spettro. Visto che emettono luce di una sola lunghezza d'onda, tutti gli oggetti che illuminano appaiono dello stesso colore: tutto sembra più o meno giallo chiaro. Per attenuare questo effetto, spesso nelle lampade al sodio si aggiungono altri gas che emettono luce con un'altra lunghezza d'onda. Così si riesce a migliorare la resa cromatica delle lampade.

*I tubi fluorescenti* sono un tipo di sorgente di luce un po' diverso. Li conosci bene, visto che sono sicuramente utilizzati anche nella tua scuola per illuminare le aule. Anche le lampade a basso consumo di energia sono dei tubi fluorescenti.

In questo caso il gas che viene eccitato con gli elettroni è vapore di mercurio. La differenza di energia tra lo stato fondamentale e il primo stato eccitato è circa  $0,8 \cdot 10^{-18}$  J. I fotoni con questa energia corrispondono alla luce con una lunghezza d'onda di 250 nm. Quindi il gas di mercurio emette luce UV non visibile. La parte interna del tubo di vetro dove si trova il gas è ricoperta di una *sostanza fluorescente* bianca. La luce UV emessa dal mercurio reagisce con la sostanza fluorescente che a sua volta emette la desiderata luce visibile, fig. 30.14.

I tubi fluorescenti consumano leggermente più energia delle lampade al sodio, ma sono molto migliori per quanto attiene alla percezione dei colori.

### 30.9 Lo spettro dei gas

Un tubo luminescente pieno di idrogeno emette luce di colore rosa. Se analizziamo questa luce con uno spettrometro scopriamo che è composta da quattro tipi di luce le cui lunghezze d'onda sono

$$\lambda_1 = 410 \text{ nm (viola),}$$

$$\lambda_2 = 434 \text{ nm (viola),}$$

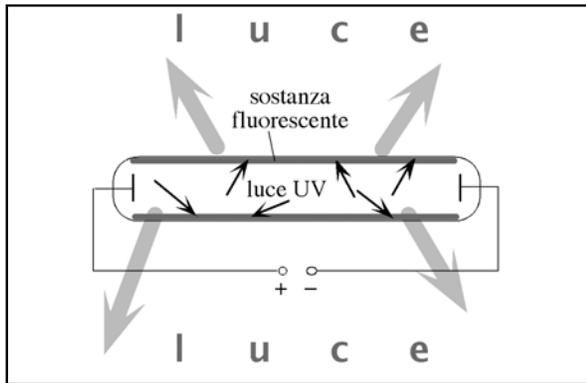


Fig. 30.14. Tubo fluorescente.

$\lambda_3 = 486 \text{ nm}$  (blu) e

$\lambda_4 = 656 \text{ nm}$  (rosso).

Come si ottiene questo miscuglio di luce? L'energia dei rispettivi fotoni è:

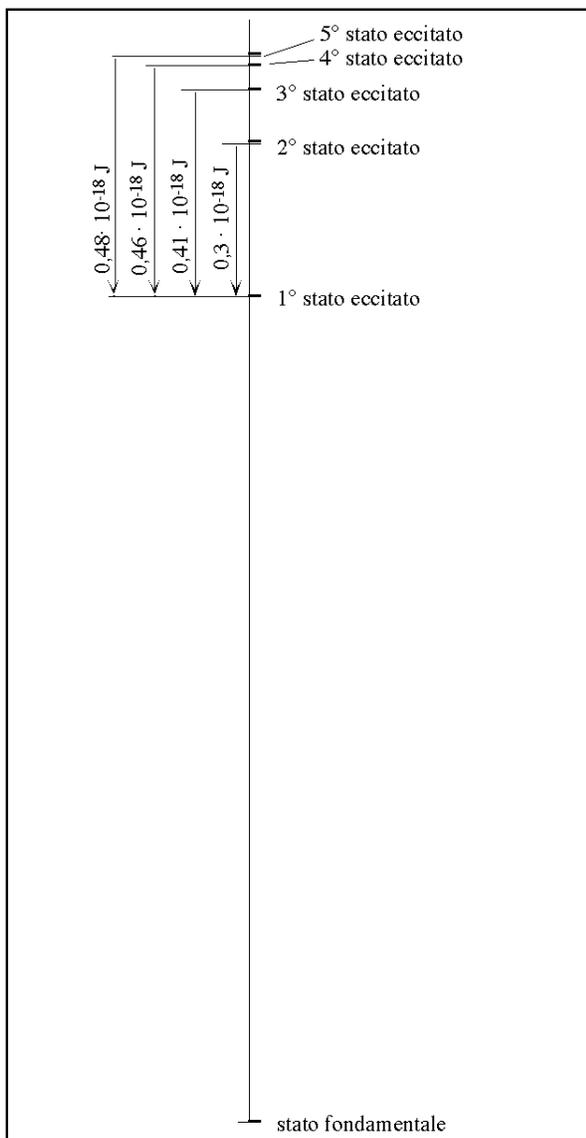


Fig. 30.15. Scala di energia dell'atomo di idrogeno.

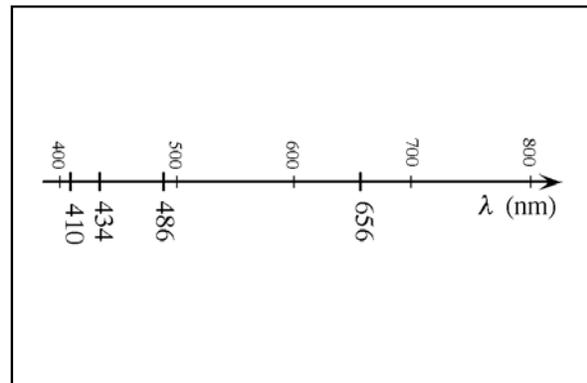


Fig. 30.16. Spettro di emissione dell'idrogeno.

$$E_1 = 0,48 \cdot 10^{-18} \text{ J},$$

$$E_2 = 0,46 \cdot 10^{-18} \text{ J},$$

$$E_3 = 0,41 \cdot 10^{-18} \text{ J e}$$

$$E_4 = 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}.$$

Questi valori di energia si ritrovano anche sulla scala di energia dell'atomo di idrogeno: corrispondono alle differenze di energia tra il primo stato eccitato e gli stati dal secondo al quinto, fig. 30.15.

Quindi nel tubo luminescente gli atomi di idrogeno non sono portati solo al primo stato eccitato ma anche in quelli successivi.

Come abbiamo già visto, per tornare allo stato fondamentale l'atomo ha a disposizione diverse possibilità. Può saltare direttamente allo stato fondamentale oppure può scendere la scala di energia a tappe: per esempio dapprima al primo stato eccitato e poi allo stato fondamentale.

Di conseguenza gli atomi possono emettere molti fotoni diversi e quindi la luce irradiata dal tubo luminescente è un miscuglio di tipi di luce con lunghezze d'onda diverse.

La fig. 30.16 mostra lo *spettro d'emissione* dell'idrogeno. Comunque non è completo: per rappresentare tutto lo spettro della luce emessa dall'idrogeno, la scala delle lunghezze d'onda dovrebbe essere estesa, visto che l'idrogeno emette anche luce infrarossa e ultravioletta.

Conosciamo già lo spettro di emissione del sodio per le lunghezze d'onda tra 400 e 800 nm: in questo intervallo il sodio emette solamente un tipo di luce, fig. 30.17a.

Nel paragrafo precedente abbiamo già spiegato come la maggior parte della luce emessa dal mercurio sia luce UV. Come si vede in fig. 30.17b, il mercurio emette anche luce visibile. Si trova luce di lunghezza d'onda 405 nm, 408 nm, 436 nm (tutte viola), 496 nm (turchese), 546 nm e 578 nm (entrambe gialle). Noi questo miscuglio di luce lo percepiamo come bluverde.

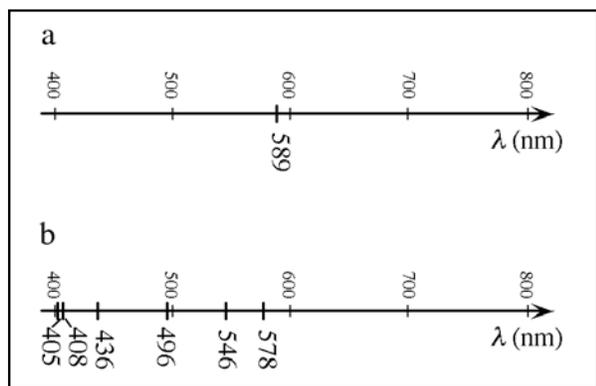


Fig. 30.17. Spettri di emissione del (a) sodio e del (b) mercurio.

La fig. 30.18 mostra lo spettro dei tubi al neon rossi usati nelle insegne pubblicitarie. Per le insegne di altri colori si usano altri gas o miscugli di gas.

Il confronto delle figg. 30.16, 30.17 e 30.18 evidenzia come gli spettri di gas diversi siano facilmente distinguibili. Quindi lo spettro è una caratteristica distintiva, una specie di "impronta digitale" del gas.

**Ogni gas emette luce con lunghezze d'onda ben precise, tipiche per quel gas. Di conseguenza gli spettri dei gas sono facilmente riconoscibili.**

In effetti l'*analisi spettrale* è un metodo molto usato in chimica per identificare le sostanze. Gli atomi della sostanza da esaminare vengono eccitati e la luce emessa analizzata con uno spettrometro.

L'*analisi dello spettro di assorbimento* è un metodo di analisi spettrale leggermente diverso. Si manda luce con un ampio intervallo di lunghezze d'onda attraverso il gas e si osserva con lo spettrometro quali sono le lunghezze d'onda che mancano dallo spettro. Visto che i fotoni assorbiti e quelli emessi dagli atomi sono gli stessi, lo spettro di assorbimento fornisce le stesse informazioni dello spettro di emissione.

L'analisi spettrale ha un ruolo particolarmente importante in astrofisica. Le stelle sono troppo lontane per poterci andare a raccogliere dei campioni di sostanza. Per contro abbiamo accesso alla radiazione elettromagnetica emessa dalle stelle. Così dall'assenza di determinate lunghezze d'onda dalla luce solare visibile, possiamo dedurre la composizione della superficie del Sole: gli atomi dello strato su-

perficiale del Sole assorbono la luce bianca proveniente dall'interno. Quindi si tratta dello spettro di assorbimento della superficie solare.

Tutte le conoscenze sull'evoluzione nel tempo e sulla composizione delle stelle, ci vengono dall'analisi spettroscopica della loro radiazione. Ovviamente non si analizza solo la parte visibile della radiazione ma tutte le lunghezze d'onda, dai raggi gamma alle onde radio.

### 30.10 Perché la fiamma fa luce

Con un apporto d'aria limitato, la fiamma di una candela, di un accendino, di un fuoco di legna o di un becco Bunsen brilla di luce gialla. Se si apre la presa d'aria di un becco Bunsen, la fiamma brucia emettendo un sibilo e perde il colore giallastro, diventa blu pallido simile alla fiamma di un forno a gas. Una fiamma di idrogeno è appena visibile. Ma se si getta sulla fiamma un po' di sodio (anche sale da cucina) o di litio, brilla di un'intensa luce gialla rispettivamente rossa. Cosa causa queste differenze nella luce di una fiamma?

Gli atomi e le molecole dei gas sono in costante movimento ad alta velocità e si urtano in continuazione. In questi urti tra atomi e molecole, i gusci atomici di deformano. Di solito la loro energia non è sufficiente per causare un'eccitazione. Scaldando il gas gli atomi diventano più veloci, la loro energia aumenta. Quando la temperatura supera una certa soglia, cominciano ad avvenire le eccitazioni.

In molti gas (per esempio l'idrogeno o gli altri gas presenti in una fiamma di idrogeno, come ossigeno e azoto) ci vuole molta energia affinché gli atomi e le molecole siano eccitati al punto da emettere fotoni visibili. Nella fiamma non si raggiunge la temperatura necessaria; è per questo motivo che la fiamma di idrogeno non brilla.

Ma l'energia degli atomi e delle molecole della fiamma è sufficiente per portare gli atomi di litio o di sodio al primo stato eccitato. Quindi, se si mette un po' di litio in una fiamma di idrogeno, i suoi atomi passano al primo stato eccitato e, quando tornano allo stato fondamentale, emettono fotoni "rossi": la fiamma fa luce. Allo stesso modo la fiamma diventa gialla quando vi si aggiunge del sale da cucina, cioè del sodio. Analizzando con l'aiuto di uno spettro-

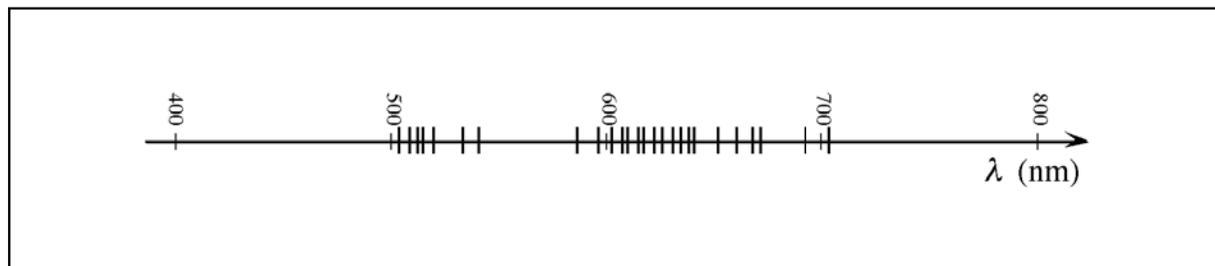
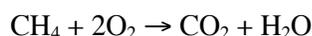


Fig. 30.18. Spettro di emissione del neon.

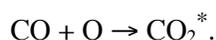
metro la luce emessa, si può dedurre quale sia la sostanza aggiunta alla fiamma.

**Gli atomi e le molecole possono essere eccitati urtandosi con altri atomi e molecole, per esempio in una fiamma.**

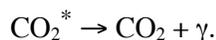
La debole luce bluastra emessa dalla fiamma di un becco Bunsen quando c'è un sufficiente apporto di ossigeno, è causata del passaggio da uno stato eccitato allo stato fondamentale delle molecole di  $\text{CO}_2$ . Ma in questo caso le molecole di  $\text{CO}_2$  non sono eccitate dagli urti con altri atomi o molecole. Nella fiamma di un becco Bunsen gli idrocarburi (prevalentemente metano,  $\text{CH}_4$ ) bruciano e formano anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). La reazione completa



avviene in varie tappe. Una di queste è la combustione del monossido di carbonio:



In questa reazione si forma anidride carbonica in uno stato *eccitato*. Tornando allo stato fondamentale le molecole di  $\text{CO}_2^*$  emettono fotoni:



Sono questi fotoni a dare origine alla fiamma bluastra del becco Bunsen e del forno a gas.

**Nelle reazioni chimiche si possono formare degli atomi o delle molecole eccitati.**

I vermi luminosi producono luce secondo lo stesso principio. Un verme luminoso non emette luce come la emette un pezzo di ferro incandescente, ma perché nel suo addome avvengono delle reazioni chimiche durante le quali si formano delle molecole eccitate che poi emettono dei fotoni visibili.

Se si riduce l'apporto d'aria alla fiamma di un becco Bunsen, non c'è più ossigeno a sufficienza affinché l'ossidazione sia totale. Restano degli atomi di carbonio che si uniscono e formano dei granelli. La fuliggine è fatta proprio di questi granelli. A causa della temperatura elevata i granelli di fuliggine *ardono*, cioè emettono luce.

Quindi la luce giallastra della fiamma di un becco Bunsen con la presa d'aria chiusa, di una candela o di un accendino, non proviene dai gas coinvolti ma dai granelli di fuliggine. Di conseguenza lo spettro della fiamma è simile a quello di una lampadina a incandescenza: la luce emessa è composta da tutte le lunghezze d'onda tra 400 e 800 nm. Nel prossimo capitolo esamineremo l'origine dell'emissione di questa luce.



## 31. I solidi

Prima di occuparci dei solidi riassumiamo le similitudini e le sostanziali differenze nella disposizione degli atomi nei gas, nei liquidi e nei solidi.

### 31.1 Disposizione degli atomi nei gas, nei liquidi e nei solidi

Gli atomi o le molecole di un gas sono in perenne movimento. Così facendo si scontrano in continuazione tra loro, ma la maggior parte del tempo sono ben distanti l'uno dall'altro.

Per contro, nei liquidi e nei solidi gli atomi non sono separati, stanno vicini tra loro come delle palline da tennis in un cesto.

Ci sono due possibilità per ammucciare delle palline da tennis. Si possono disporre in strati ordinati,

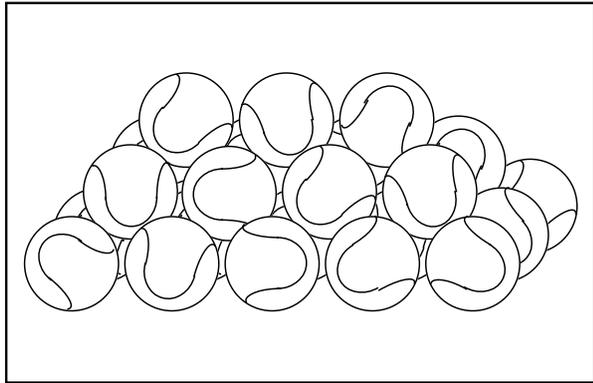


Fig. 31.1. Le palline da tennis possono essere ammucciate ordinatamente...

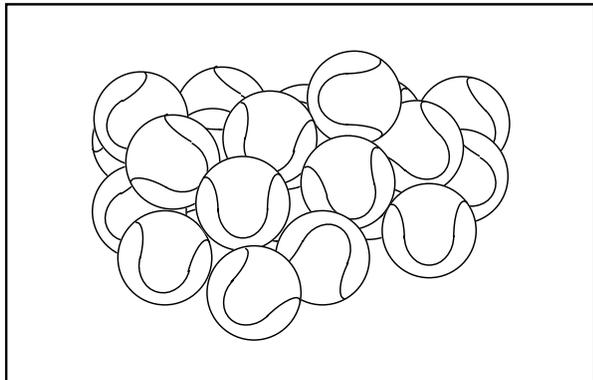


Fig. 31.2. ... o a casaccio.

fig. 31.1, o si possono gettare alla rinfusa l'una accanto all'altra, fig. 31.2. La stessa cosa vale anche per gli atomi nei liquidi e nei solidi.

Di solito nei solidi gli atomi sono disposti ordinatamente. La fig. 31.3 mostra l'esempio di un solido costituito da due tipi di atomo. Una sostanza di questo tipo si chiama *sostanza cristallina*, o *cristallo*. I metalli, la maggior parte delle rocce, i sali, lo zucchero, lo zolfo e il diamante sono cristallini.

Ma ci sono anche dei solidi nei quali la disposizione degli atomi è più vicina a quella delle palline da tennis in fig. 31.2, per esempio il vetro e la maggior parte delle plastiche, fig. 31.4. Si dice che queste sostanze hanno una struttura *amorfa*.

Nei liquidi la struttura amorfa è la regola. Quasi tutti i liquidi sono amorfi, anche il liquido più comune di tutti, l'acqua.

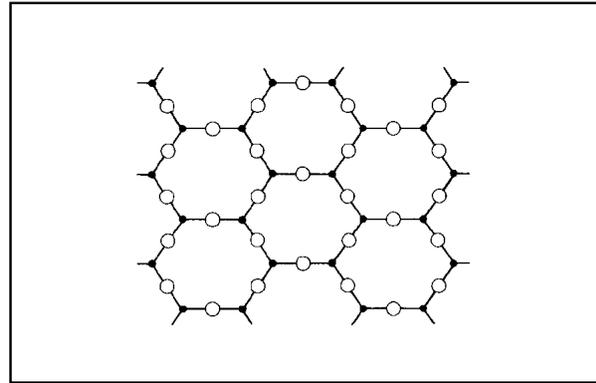


Fig. 31.3. Solido cristallino. I cerchi bianchi e neri segnano la posizione dei due tipi di atomo di cui è composto il cristallo.

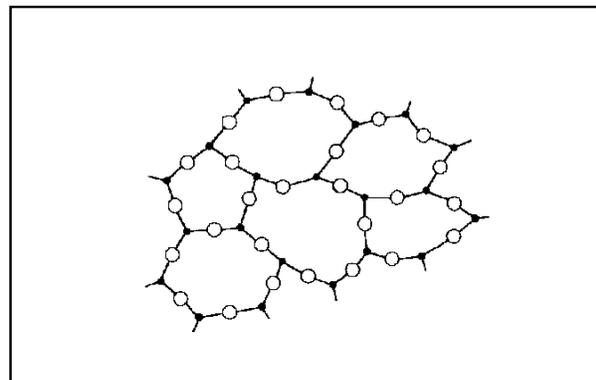


Fig. 31.4. Disposizione degli atomi in una sostanza amorfa.

Tabella 31.1

	distanza tra gli atomi (o molecole)	disposizione degli atomi (o molecole)
gas	grande	movimento disordinato
liquido	piccola	di solito amorfo, raramente cristallino
solido	piccola	cristallino o amorfo

Dei liquidi cristallini sono utilizzati nei *display a cristalli liquidi* delle calcolatrici tascabili o di certi schermi piatti. Forse ne conosci l'abbreviazione *LCD*, dal loro nome in inglese: *liquid crystal display*.

La tabella 31.1 riassume le differenze e le analogie tra la disposizione degli atomi o delle molecole nei gas, nei liquidi e nei solidi.

## 31.2 La distribuzione dell'elettronio nei solidi

La fig. 31.5 mostra come ci si può immaginare l'interno di un solido, in questo caso un cristallo. Le tonalità più scure di grigio corrispondono a una densità maggiore dell'elettronio. Nei punti di maggiore

densità ci sono i nuclei degli atomi. Allontanandosi dal nucleo la densità dell'elettronio dapprima diminuisce - poi si arriva al prossimo nucleo e aumenta di nuovo.

Come negli atomi isolati, gran parte dell'elettronio è nelle vicinanze del nucleo. Ma a differenza della piramide di palline da tennis in fig. 31.1 non ci sono spazi vuoti tra gli atomi. Tutto lo spazio tra i nuclei è riempito di elettronio. Non ci sono nemmeno dei bordi netti tra la fine di un atomo e l'inizio del prossimo. L'elettronio dei singoli atomi si fonde in una sostanza continua.

Anche la fig. 31.6 mostra la distribuzione dell'elettronio in un solido, in particolare in un cristallo di sale da cucina, NaCl. In questo caso la densità dell'elettronio è rappresentata da linee di uguale densità. Più grande è il numero nel disegno, maggiore è la densità dell'elettronio in quel punto. Possiamo paragonare queste linee con le curve di livello di una cartina topografica. Più grande è il numero scritto su una curva di livello, maggiore sarà l'altitudine del punto corrispondente.

In fig. 31.6 si riconoscono quattro aree dove la densità dell'elettronio è particolarmente alta: in alto a sinistra e in basso a destra, vicino ai nuclei di sodio, così come in alto a destra e in basso a sinistra, vicino ai nuclei di cloro. Tra queste aree la densità dell'elettronio è molto bassa, ma comunque non nulla.

**Nei solidi l'elettronio forma una sostanza continua che riempie tutto lo spazio tra i nuclei.**

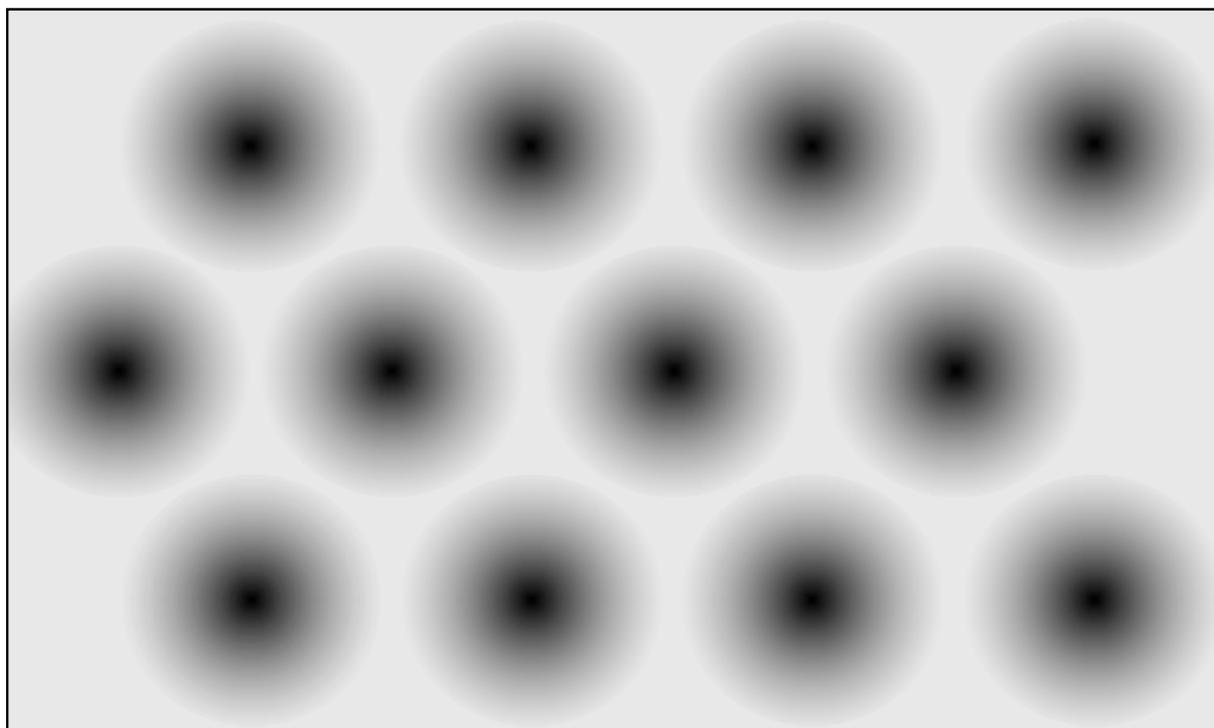


Fig. 31.5. Distribuzione dell'elettronio in un solido.

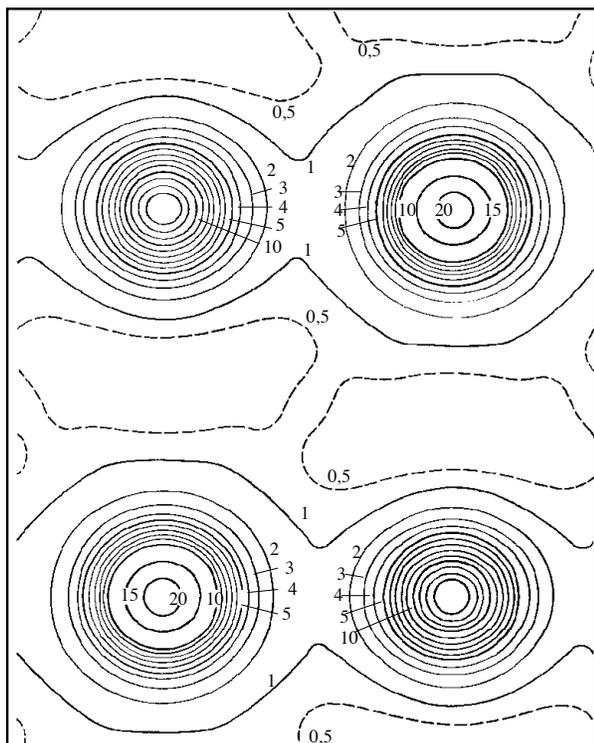


Fig. 31.6. Distribuzione dell'elettronio nel sale da cucina.

In un gas gli atomi possono muoversi quasi liberamente. Si muovono tanto più in fretta quanto più alta è la temperatura del gas.

Invece gli atomi di un solido sono legati a una determinata posizione. Non possono abbandonare il loro posto nel reticolo del cristallo. Malgrado ciò non sono immobili: compiono delle oscillazioni attorno alla loro posizione media, e anche questa oscillazione è tanto più rapida quanto più alta è la temperatura.

### Esercizio

Quanti atomi contiene un cristallo di sale da cucina con lo spigolo lungo 1 millimetro?

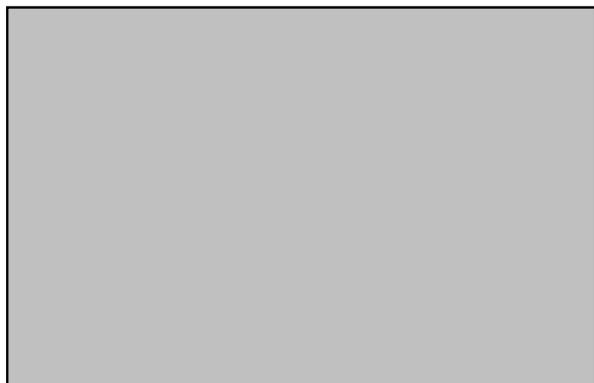


Fig. 31.7. Elettronio in uno stato non deformato...

## 31.3 La scala di energia dei solidi

Abbiamo già visto che l'elettronio nella nube di un atomo può essere deformato e assumere determinate forme. Lo stesso vale per l'elettronio nei solidi.

Esattamente come per l'atomo isolato, per deformazione si intende che l'elettronio viene spostato da un punto a un altro. Quindi la distribuzione dell'elettronio cambia: in un punto la densità dell'elettronio diminuisce e conseguentemente in un altro aumenta.

La fig. 31.7 mostra l'elettronio in uno stato non deformato. Per semplicità l'abbiamo rappresentato in uno stato di densità omogenea. In fig. 31.8 puoi vedere cosa si intende per deformazione: in un punto la densità è diminuita (area chiara), in un altro è aumentata (area scura). Quindi si formano una *rarefazione* e un *addensamento*.

L'elettronio di un solido può assumere molte forme diverse; e le deformazioni non si limitano all'area occupata da un solo atomo, si possono estendere su parecchi atomi.

**In un solido l'elettronio può essere deformato. L'elettronio mantiene per un certo tempo alcune di queste deformazioni.**

Come negli atomi, chiamiamo stato fondamentale lo stato con l'elettronio non deformato. Gli stati con l'elettronio deformato si chiamano stati eccitati.

Visto che a seconda dell'entità della deformazione, per l'eccitazione ci vogliono diverse quantità di energia, anche un solido, esattamente come un atomo, ha la sua scala di energia. Ma c'è una differenza sostanziale tra la scala di energia di un atomo isolato e quella di un solido: mentre i pioli della scala di energia di un atomo sono molto stretti, perché un atomo può immagazzinare solo delle quantità di energia ben precise, i pioli della scala di energia di un solido sono spessi. Sulla scala di energia, i valori di energia che può essere immagazzinata da un solido si estendono e coprono degli intervalli.

Le scale di energia dei solidi si possono raggruppare in due categorie. Tra i due tipi di scala di energia c'è una differenza sostanziale. Nel primo tipo gli stati

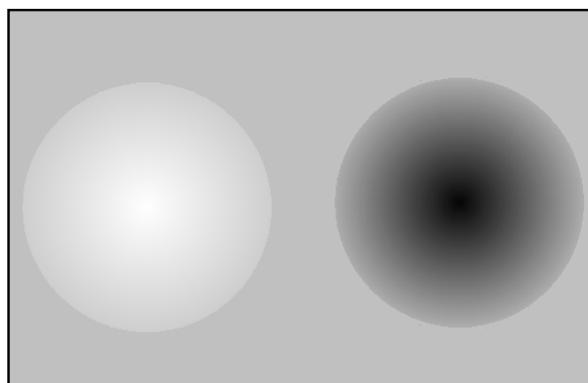


Fig. 31.8. ... e in uno stato deformato (rappresentazione schematica).

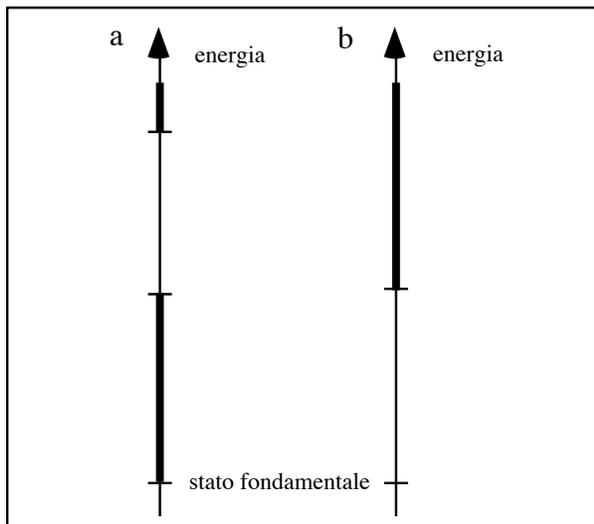


Fig. 31.9. Scala di energia di (a) un metallo e (b) un non-metallo.

eccitati cominciamo immediatamente sopra lo stato fondamentale, fig. 31.9a. Tutti i metalli hanno scale di energia di questo tipo. Quindi, per eccitare l'elettrone in un metallo, bastano piccolissime quantità di energia.

Nel secondo tipo di scala di energia, tra lo stato fondamentale e il primo piolo c'è un *salto energetico*, fig. 31.9b. Questa scala di energia è tipica dei non-metalli. Per loro l'eccitazione è possibile solo a condizione che l'energia di eccitazione sia sufficiente a superare il salto tra lo stato fondamentale e il primo piolo della scala di energia.

### 31.4 Quando la luce colpisce i metalli

Quando la luce colpisce una superficie metallica molto liscia, la maggior parte viene riflessa. Ad esempio: lo strato riflettente di uno specchio è fatto di alluminio. Ma non tutta la luce viene riflessa. Lo si nota bene eseguendo l'esperimento rappresentato in fig. 31.10. Due grandi specchi sono posti a breve distanza l'uno di fronte all'altro. Se guardiamo lo

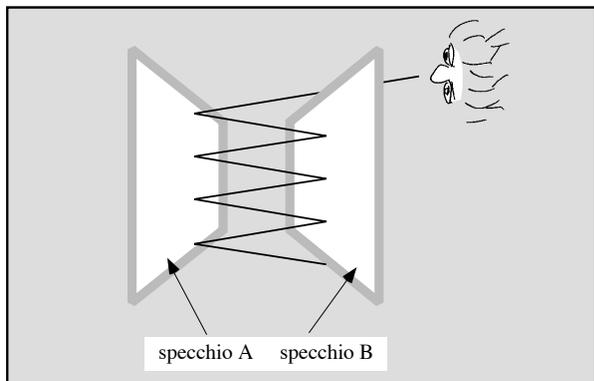


Fig. 31.10. La luce percepita dall'osservatore è stata riflessa parecchie volte tra i due specchi.

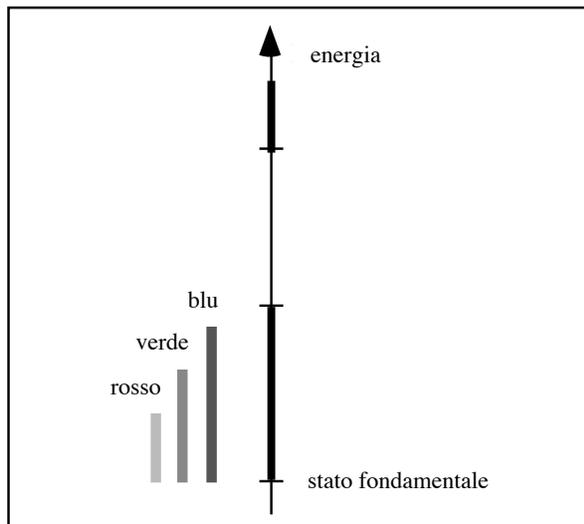


Fig. 31.11. L'energia dei fotoni visibili non è sufficiente per raggiungere il primo piolo della scala di energia di un metallo.

specchio B da sopra il bordo dello specchio A, vediamo un'immagine dello specchio A, dove vediamo un'immagine dello specchio B, dove vediamo un'immagine dello specchio A, ecc. Sembra una specie di corridoio le cui pareti sono formate dai bordi dei due specchi. La luce che sembra provenire dal fondo del corridoio è quella che è stata riflessa molte volte avanti e indietro tra i due specchi. La cosa interessante per noi, è che le parti più lontane del corridoio appaiono più scure, ciò significa che con ogni riflessione va persa un po' di luce. In effetti, in ogni riflessione il 10% circa della luce viene assorbito.

Concludiamo che lo specchio, così come ogni altro metallo, non riflette tutta la luce ma in parte la assorbe. Se non ne viene assorbita di più è perché a causa della riflessione solo poca luce penetra nel metallo.

L'assorbimento della luce nei metalli è coerente con la loro scala di energia, fig. 31.11. Le tre colonne a sinistra della scala di energia corrispondono all'energia dei fotoni di luce rossa, verde e blu. Nessuna delle tre colonne è più alta dell'intervallo tra lo stato fondamentale e il primo piolo, cioè dell'intervallo utile. Vuol dire che i fotoni di luce visibile possono eccitare l'elettrone nel metallo.

#### **I fotoni di luce visibile possono eccitare l'elettrone nei metalli. Nel processo vengono assorbiti.**

Non è per niente difficile fare in modo che il metallo invece del 10% assorba tutta la luce. Basta frantumare il metallo in pezzetti molto piccoli. Ogni polvere metallica assorbe quasi completamente la luce: le polveri metalliche sono nere. Come si può spiegare?

Quando la luce colpisce una polvere metallica non viene riflessa una sola volta ma molte volte - da un granello di polvere al prossimo, fig. 31.12. Dopo la prima riflessione resta il 90% della quantità di luce

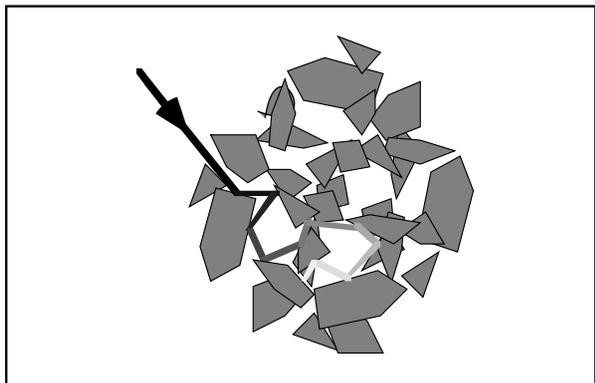


Fig. 31.12. In una polvere metallica la luce viene riflessa parecchie volte.

iniziale, dopo la seconda riflessione ne resta l'81%, dopo la terza il 73%, ecc. Dopo 25 riflessioni resta solo il 7% della luce, dopo 50 volte solo lo 0,5%, cioè quasi niente. Più fine è la polvere metallica, maggiore è il numero di riflessioni e di conseguenza più nera è la polvere. Nella polvere la luce si estingue.

Il fatto che una polvere metallica assorbe la luce è dimostrato anche da un'esperienza che ognuno di noi ha già fatto almeno una volta: se strofiniamo una superficie lucida di alluminio con un lucido per metalli bianchi, il lucido annerisce. La causa dell'annerimento è la polvere di alluminio prodotta dallo strofinamento.

C'è un altro semplice esperimento che mostra come molte riflessioni fanno lentamente sparire tutta la luce. In una scatola di cartone, per esempio una scatola per scarpe, si pratica un piccolo foro, fig. 31.13. Le pareti interne della scatola dovrebbero essere bianche, in modo da assorbire poca luce. Dall'esterno però il foro appare completamente nero. Attraverso il foro nella scatola entra luce. Ma la luce non riesce più a uscire. Ogni volta che colpisce una delle pareti, un po' di luce viene assorbita. Dopo essere rimbalzata alcune volte avanti e indietro per la scatola, non ne resta più.

Tutto il nero che vediamo guardandoci attorno nasce in questo modo, per esempio anche il nero dei

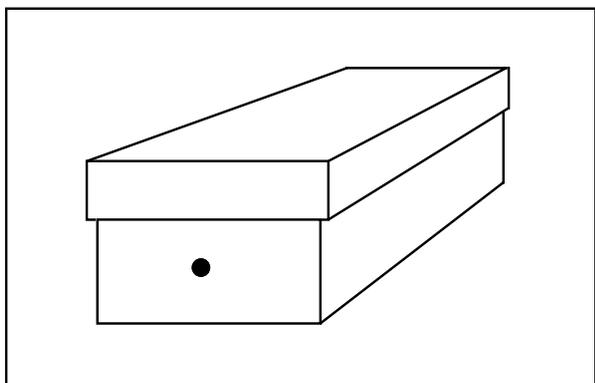


Fig. 31.13. Il foro nella scatola di cartone è nero.

caratteri che stai leggendo. Osservando con attenzione un foglio di carta si nota che ha una superficie ruvida. La luce che la colpisce compie un percorso a zig-zag prima di tornare indietro e arrivare, per esempio, al tuo occhio. Se da qualche parte sulla carta c'è una sostanza che a ogni riflessione assorbe una parte di luce, quel punto apparirà nero.

**Negli oggetti neri la luce scompare nel nulla.**

### 31.5 Quando la luce colpisce dei non-metalli

La fig. 31.14 mostra una scala di energia tipica di molti non-metalli. Le colonne corrispondono ai fotoni di luce visibile. Nessuna delle tre colonne è alta abbastanza per raggiungere il primo piolo della scala di energia. Quindi i fotoni di luce visibile non sono in grado di deformare l'elettronio di queste sostanze. Invece di essere assorbiti attraversano il materiale. Perciò le sostanze con scale di energia di questo tipo sono trasparenti. Alcuni esempi sono il vetro, i sali, lo zucchero, il ghiaccio, la cellulosa (la componente principale della carta), la maggior parte dei minerali (per esempio quarzo e feldspati), i diamanti e le materie plastiche.

Probabilmente ti vengono in mente degli oggetti fatti di queste sostanze che invece di essere trasparenti sono bianchi, come il sale fino, lo zucchero in polvere, la carta o la neve. Tutte queste sostanze o cose sono fatte di pezzetti molto piccoli: granelli o fibre. Più piccole sono le particelle, più intenso è il bianco. Lo zucchero in polvere è più bianco dello zucchero fino.

Ma non sono le particelle a essere bianche. In certi casi (i fiocchi di neve, i granelli di sale, i granelli di

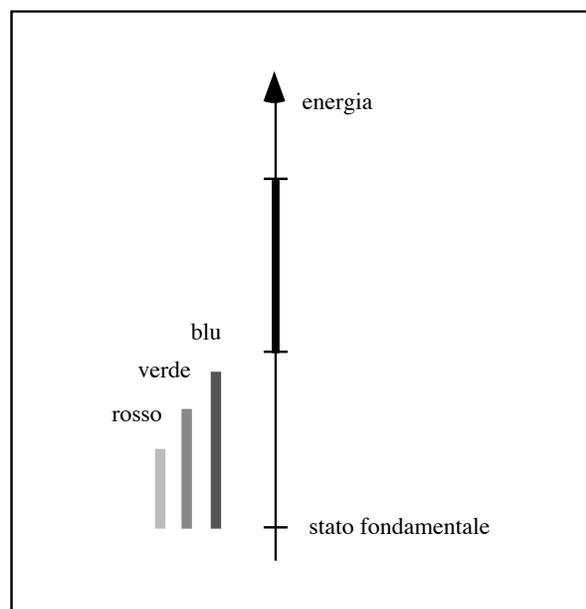


Fig. 31.14. L'energia dei fotoni di luce visibile non è sufficiente per raggiungere il primo piolo della scala di energia di un non-metallo.

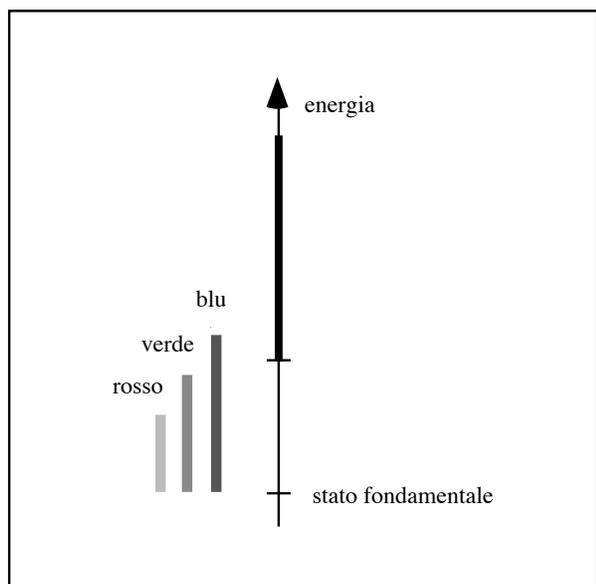


Fig. 31.15. Scala di energia del solfuro di cadmio con accanto l'energia dei fotoni di luce rossa, verde e blu.

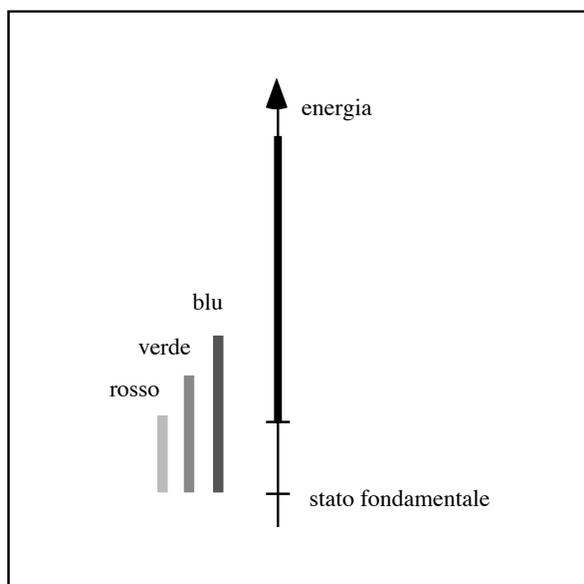


Fig. 31.16. Scala di energia di un semiconduttore.

zucchero, le schegge di vetro) lo si nota a occhio nudo, in altri (la carta) si deve osservare con il microscopio: i singoli granelli e le singole fibre sono trasparenti. Solo quando si accumulano molte particelle trasparenti emerge la percezione cromatica del bianco.

### Gli oggetti bianchi sono fatti di molte particelle trasparenti.

La luce che colpisce uno di questi oggetti non viene assorbita dalle particelle trasparenti, ma viene *rifratta*: la direzione della luce cambia. Dopo svariate rifrazioni consecutive, torna nella direzione da cui era arrivata. Quindi non riesce ad attraversare la sostanza - la sostanza non è trasparente.

Anche il bianco delle nuvole si forma così. In effetti anche una nuvola è composta da molte piccole particelle trasparenti: da goccioline d'acqua.

Ma non tutti i non-metalli sono bianchi o trasparenti. Per esempio ci sono il vetro colorato, la carta colorata, rocce colorate e plastiche colorate. In questi casi la colorazione è causata dall'aggiunta di altre sostanze ai non-metalli trasparenti, sostanze che assorbono la luce visibile con certe lunghezze d'onda.

Ma c'è anche un altro motivo per cui i non-metalli possono essere colorati o addirittura neri: nella scala di energia in fig. 31.15 il salto energetico, cioè la distanza tra lo stato fondamentale e il primo piolo della scala di energia, è minore dell'energia del fotone di luce blu. Il solfuro di cadmio è un esempio di sostanza che ha una scala di energia così. La colonna più alta (quella del fotone di luce blu) sconfina nell'area delle energie permesse. Quindi questa energia è sufficiente per eccitare l'elettrone. Nel processo il fotone viene assorbito.

Tutti gli altri atomi non sono assorbiti. Nella luce che passa indisturbata manca la luce blu, il miscuglio degli altri tipi di luce dà il giallo. Di conseguenza un pezzo di solfuro di cadmio è trasparente e giallo.

Nel silicio, nel germanio e nella grafite, l'intervallo tra lo stato fondamentale e il primo piolo della scala di energia è ancora più piccolo che nel solfuro di cadmio, fig. 31.16. L'energia di tutti i fotoni di luce visibile è sufficiente per superare il salto energetico, con la conseguenza che la luce visibile non riesce a passare. Ciò che non viene riflesso viene assorbito. Visto che rispetto ai metalli, la parte di luce che si disperde nel materiale è maggiore, le superfici lisce non riflettono come uno specchio ma sono di un nero brillante. Queste sostanze si chiamano *semiconduttori*.

Anche i semiconduttori quando polverizzati sono di un colore nero cupo, visto che nella riflessione sui granelli di polvere la luce viene assorbita completamente. La fuliggine è una sostanza di questo tipo. È composta principalmente da particelle di grafite. Tra le altre cose è usata per la produzione del nero per stampanti e per annerire la plastica.

Visto che l'energia dei fotoni di luce infrarossa non basta per raggiungere il primo piolo della scala di energia, i semiconduttori sono trasparenti alla luce infrarossa - al contrario dei metalli.

Il silicio è utilizzato nella produzione di lenti per macchine fotografiche e telecamere a infrarossi. Queste lenti lasciano passare la luce infrarossa e la rifraggono. Invece la luce visibile, che non deve entrare nella macchina fotografica perché finirebbe sulla pellicola, non riesce a passare attraverso la lente.

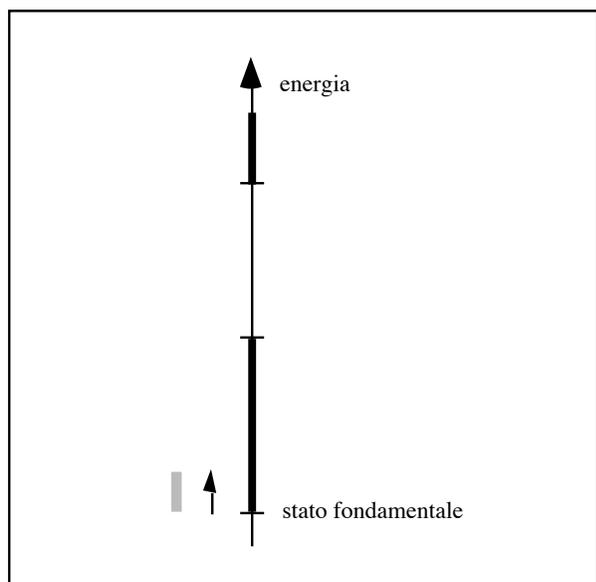


Fig. 31.17. A temperatura normale, nei metalli l'energia di movimento degli atomi basta solamente per piccole deformazioni.

### 31.6 I solidi come sorgenti di luce

La luce di una lampadina proviene da un filamento incandescente di tungsteno, la luce della fiamma di una candela da particelle incandescenti di fuliggine. Come è prodotta questa luce?

In un solido i nuclei si muovono attorno alla loro posizione media nell'elettronio che li circonda. Il loro moto è più veloce quando la temperatura è più alta. Più è rapido il movimento, maggiore è la loro energia.

In un metallo, già a temperatura ambiente l'energia del moto è sufficiente a eccitare l'elettronio. Ma con l'eccitazione l'elettronio riceve solo poca energia. Di conseguenza, anche i fotoni emessi nel ritorno allo stato fondamentale hanno poca energia. Sono fotoni infrarossi, non fotoni di luce visibile, fig. 31.17.

Se si riscalda il metallo il movimento degli atomi diventa più rapido e la loro energia aumenta. La deformazione dell'elettronio è maggiore e nel ritorno allo stato fondamentale i fotoni prodotti hanno più energia, fig. 31.18. A temperature ancora più elevate il metallo diventa incandescente ed emette fotoni di luce visibile.

Anche tutti i non-metalli neri, cioè i semiconduttori, se riscaldati cominciano a emettere luce.

**Se riscaldati a temperatura elevata, i metalli e i semiconduttori possono produrre luce visibile.**

Per i non-metalli trasparenti e incolori è diverso. Il loro salto energetico è così grande che anche a temperatura elevata il loro elettrone non è eccitato, così non possono emettere luce visibile.

**Gli oggetti fatti di un non-metallo trasparente non possono emettere luce visibile.**

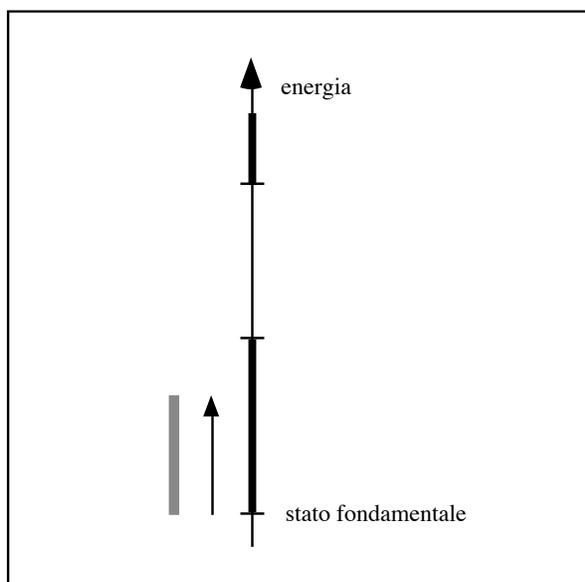


Fig. 31.18. A temperature più elevate l'elettronio viene eccitato maggiormente. Tornando allo stato fondamentale vengono prodotti dei fotoni.

### 31.7 Come i solidi conducono l'elettricità

Come conduttori per l'elettricità si usano dei cavi contenenti dei filamenti metallici - solitamente di rame - circondati da un rivestimento di plastica. Si usa un filamento metallico perché i metalli sono dei buoni conduttori di elettricità, e un rivestimento di plastica perché la plastica (e in generale quasi tutti i non-metalli) non conduce l'elettricità, impedendo così che l'elettricità esca dal conduttore e si disperda nell'ambiente circostante.

L'elettricità è sempre portata da particelle, quella negativa dagli elettroni e quella positiva dai protoni dei nuclei atomici. Se l'elettricità deve scorrere attraverso un filo di rame, l'elettronio oppure i nuclei si devono muovere con lei. Ma i nuclei sono legati alla loro posizione nel reticolo cristallino, non possono muoversi liberamente nel filo di rame. Quindi resta solo l'elettronio.

Si potrebbe immaginare che la corrente elettrica si forma quando l'elettronio di un solido si muove come un blocco compatto e scorre all'interno del solido. Ma l'elettronio è così legato ai nuclei da non poter essere spostato in questo modo.

È una situazione simile a quella del seguente problema: vogliamo spostare un tappeto molto grande e pesante, fig. 31.19. Afferriamo un'estremità del tappeto e tentiamo di trascinarlo sul pavimento. Ma visto che è grande e pesante non riusciamo a muoverlo. Cerchiamo un'altra possibilità. Da una parte formiamo una piega nel tappeto, fig. 31.20. La piega si può spostare facilmente attraverso il tappeto e alla fine tutto il tappeto si è spostato di un piccolo tratto.

L'elettronio in un solido si comporta come il tappeto. L'elettronio non si può spostare tutto in un colpo

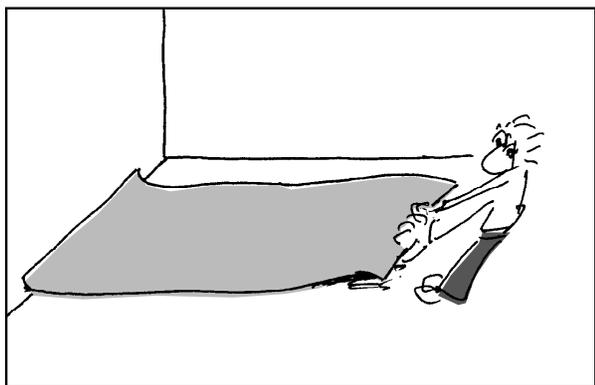


Fig. 31.19. Un modo per spostare il tappeto...

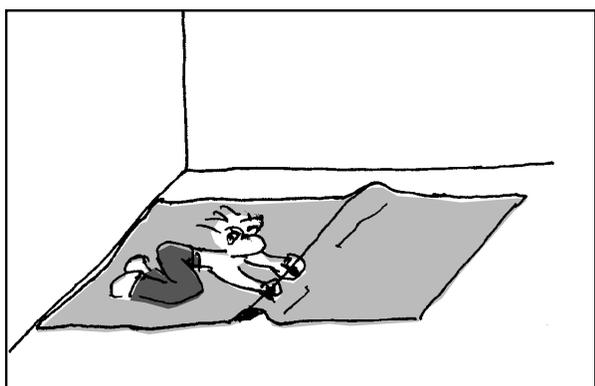


Fig. 31.20. ... e un modo diverso.

solo. Ma delle piccole deformazioni possono essere spostate facilmente attraverso il solido. Quindi un solido diventa un conduttore elettrico se l'elettronio si lascia deformare facilmente.

Se applichiamo una tensione su due lati di un solido, collegando un lato al polo positivo di una batteria e l'altro lato al polo negativo, allora gli addensamenti si spostano verso il polo positivo e le rarefazioni verso il polo negativo, fig. 31.21. Così come spostare una piega nel tappeto risulta in uno spostamento di tutto il tappeto, gli spostamenti degli addensamenti e delle rarefazioni dell'elettronio risultano in un trasporto netto di elettrone.

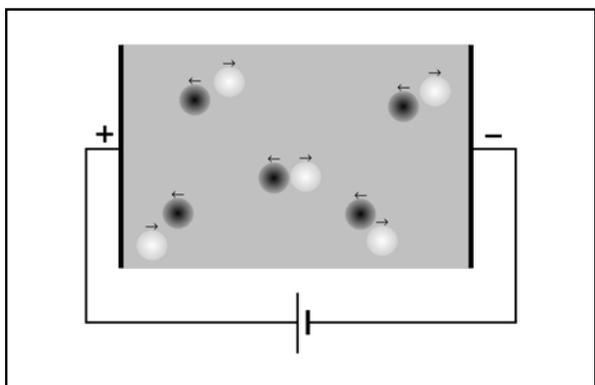


Fig. 31.21. Quando la batteria è collegata, gli addensamenti vanno verso il polo positivo e le rarefazioni verso il polo negativo.

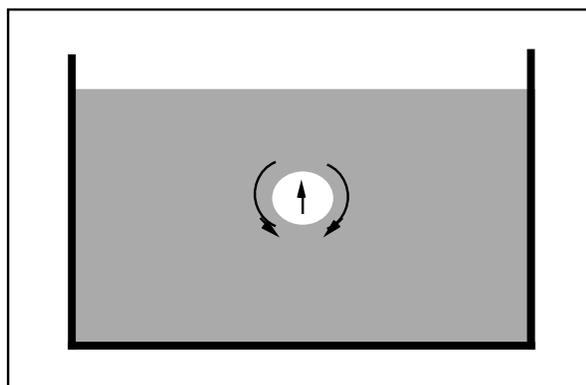


Fig. 31.22. La salita della bolla d'aria coincide con la discesa dell'acqua.

Con gli addensamenti l'elettronio si sposta verso il polo positivo. Ma anche lo spostamento delle rarefazioni verso il polo negativo equivale a uno spostamento dell'elettronio verso il polo positivo. È come quando una bolla d'aria sale dal fondo di un bicchiere pieno d'acqua. Dove all'inizio c'era l'aria, cioè sul fondo del bicchiere, alla fine c'è acqua. Quindi l'acqua si è spostata dall'alto verso il basso, fig. 31.22.

**Il trasporto di elettricità in un solido avviene grazie al movimento delle deformazioni dell'elettronio.**

Come sai, nei metalli l'elettronio si può deformare facilmente, mentre ci vuole relativamente molta energia per eccitare l'elettronio nei non-metalli. Nei metalli l'energia messa a disposizione dell'elettronio dalla batteria a cui è collegato è sufficiente per l'eccitazione. Ciò significa che ci sono deformazioni dell'elettronio che si spostano nel metallo, e assieme alle deformazioni viene trasportata elettricità: i metalli sono buoni conduttori elettrici.

La batteria non riesce invece a eccitare l'elettronio in un non-metallo. Non ci sono deformazioni e non si può trasportare elettricità: i non-metalli non conducono l'elettricità.

### 31.8 Come fare di un non-metallo un conduttore di elettricità

Consideriamo un non-metallo con un salto energetico non troppo grande, per esempio il solfuro di cadmio. I fotoni di luce blu hanno energia a sufficienza per superare il primo piolo della scala di energia. Quando un non-metallo del genere viene illuminato con luce bianca, cioè con luce che contiene anche fotoni di luce blu, l'elettronio viene eccitato e si producono delle deformazioni. Se il cristallo di solfuro di cadmio è inserito in un circuito elettrico, la corrente elettrica può scorrere. Con l'eccitazione il cristallo è diventato conduttore. Appena si smette di illuminare il cristallo, nell'elettronio non vengono più prodotte deformazioni e la conduzione si interrompe.

Le sostanze che diventano conduttori di elettricità quando sono illuminate, si chiamano *fotoconduttori*. Maggiore è la luce che colpisce un fotoconduttore, minore sarà la sua resistenza. I fotoconduttori vengono usati per misurare l'intensità luminosa, per esempio nelle macchine fotografiche.

In un semiconduttore è sufficiente il riscaldamento per eccitare l'elettrone e migliorare la conducibilità. Ora capisci perché si chiamano semiconduttori.

**I non-metalli con un piccolo salto energetico possono essere resi conduttori elettrici mediante illuminazione o riscaldamento.**

C'è ancora un'altra possibilità per aumentare la conducibilità di un non-metallo. Sostituiamo una piccola parte degli atomi del materiale con atomi di un'altra sostanza. Scegliamo questi "atomi estranei" in modo che nella loro nube elettronica abbiano un elettrone in più o uno in meno rispetto agli atomi del solido in cui vengono inseriti.

Per esempio nel germanio inseriamo degli atomi di arsenico. L'elettrone in più di ogni atomo di arsenico si comporta come un addensamento dell'elettrone. Se applichiamo una tensione a due lati del cristallo di germanio, questi addensamenti si spostano in direzione del polo positivo, scorre una corrente elettrica.

Se nel reticolo cristallino inseriamo degli atomi che hanno un elettrone in meno degli atomi di germanio, per esempio degli atomi di gallio, otteniamo delle rarefazioni che, quando la batteria è collegata, si spostano verso il polo negativo.

**Inserendo degli atomi estranei i non-metalli possono essere resi dei conduttori elettrici.**

I componenti elettronici più importanti - diodi e transistor - sono prodotti con germanio o silicio resi conduttori in questo modo. Ci occupiamo di loro nei prossimi due paragrafi.

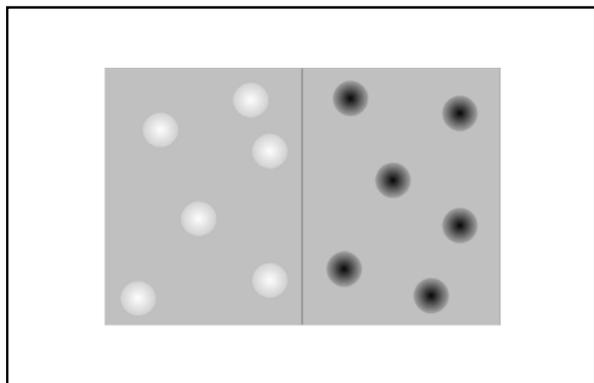


Fig. 31.23. Nella parte sinistra del diodo ci sono delle rarefazioni, nella parte destra degli addensamenti.

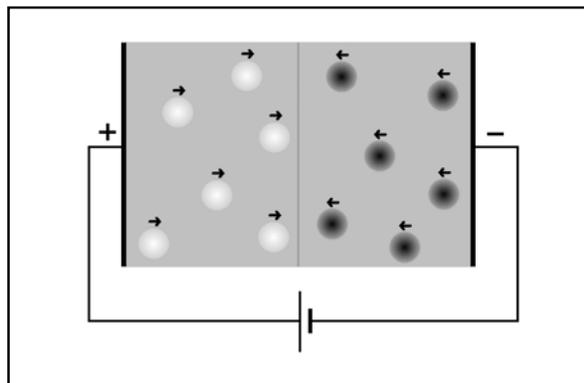


Fig. 31.24. Gli addensamenti e le rarefazioni si muovono verso il centro del diodo.

### 31.9 Il diodo

Un diodo è un componente elettronico con due allacciamenti. Inserito in un circuito, lascia passare la corrente elettrica in una sola direzione. Quindi il diodo è per l'elettricità quello che una valvola di un pneumatico è per l'aria.

Un diodo è fatto di un semiconduttore, di solito germanio o silicio. Inserendo degli atomi estranei, in una parte del materiale si creano degli addensamenti, in un'altra parte delle rarefazioni, fig. 31.23. Le due parti sono allacciate ai collegamenti elettrici del diodo.

Cominciamo collegando il diodo a una batteria in modo che il polo positivo sia dalla parte delle rarefazioni e il polo negativo dalla parte degli addensamenti. Le rarefazioni si spostano verso il polo negativo, quindi verso il centro del diodo, gli addensamenti verso il polo positivo, quindi pure verso il centro del diodo, fig. 31.24. Contemporaneamente il cavo a sinistra rifornisce il diodo di rarefazioni e quello a destra di addensamenti, visto che anche nei fili metallici dei cavi le rarefazioni si muovono verso il polo negativo e gli addensamenti verso quello positivo.

Nel centro del diodo gli addensamenti e le rarefazioni si incontrano e gli addensamenti "cadono" nelle rarefazioni. Addensamenti e rarefazioni si annien-

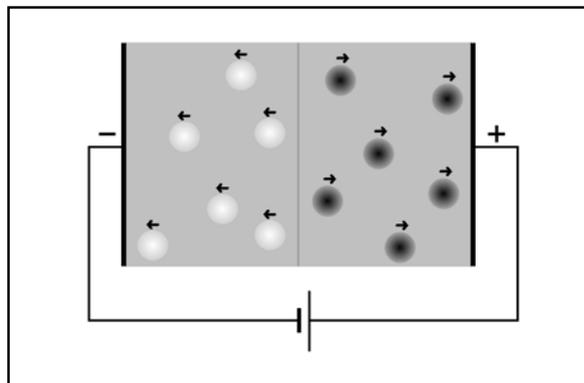


Fig. 31.25. Addensamenti e rarefazioni si muovono dal centro del diodo verso le estremità.

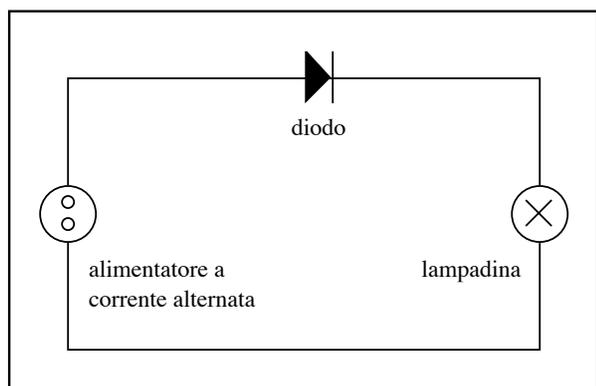


Fig. 31.26. Il diodo raddrizzatore lascia passare la corrente solo in una direzione.

tano a vicenda, e lo fanno con lo stesso ritmo con cui il diodo viene rifornito attraverso i cavi. Quindi, quando è collegato a una batteria, nel diodo scorre una corrente elettrica.

Ora invertiamo il collegamento del diodo alla batteria, cioè allacciamo il polo negativo alla parte contenente le rarefazioni e il polo positivo a quella con gli addensamenti. Le rarefazioni si muovono ancora verso il polo negativo, cioè dal centro del diodo verso sinistra, gli addensamenti vanno in direzione del polo positivo, cioè dal centro verso destra, fig. 31.25. Visto che il centro del diodo non viene rifornito né di rarefazioni né di addensamenti, il processo si interrompe rapidamente. Malgrado sia collegato alla batteria, nel diodo non scorre nessuna corrente elettrica.

Quindi il diodo lascia passare l'elettricità in una direzione ma non nell'altra. Se inseriamo un diodo in un circuito alimentato da una sorgente di tensione alternata, fig. 31.26, non si ottiene una corrente al-

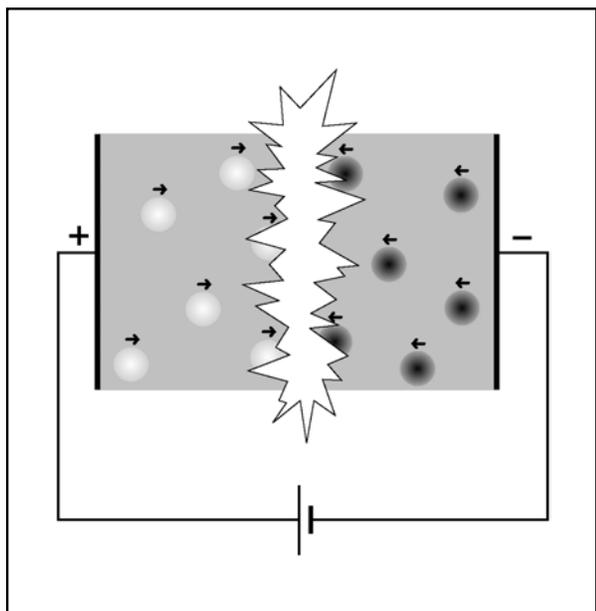


Fig. 31.27. Quando gli addensamenti cadono nelle rarefazioni si formano dei fotoni - il diodo emette luce.

ternata. Il diodo lascia passare la corrente solo in una direzione. La corrente viene *raddrizzata*, il diodo lavora come *diodo raddrizzatore*.

I diodi hanno anche altre caratteristiche interessanti. Quando un diodo è collegato a una batteria come in fig. 31.24, gli addensamenti e le rarefazioni si muovono verso il centro e lì si annientano a vicenda. L'energia che immagazzinavano deve essere ceduta. Ciò avviene grazie alla produzione di fotoni, fig. 31.27. Un diodo che produce luce visibile si chiama *diodo luminoso*.

I diodi luminosi hanno molte applicazioni, ad esempio come indicatore di funzionamento per un'apparecchio elettrico o come sorgente di luce di un tabellone pubblicitario, sul quale può essere usato per comporre delle scritte animate e anche delle vere e proprie immagini.

Se il diodo è collegato a una batteria come mostrato in fig. 31.25, blocca la corrente elettrica. Ma c'è una possibilità per fare in modo che la corrente riesca a passare.

Con l'assorbimento di fotoni, in un solido vengono prodotti addensamenti e rarefazioni. Quindi illuminando il diodo lo si rifornisce degli addensamenti e delle rarefazioni risucchiati dalla batteria. A loro volta si muovono a sinistra e a destra verso i poli e, di conseguenza, il diodo è attraversato da una corrente, fig. 31.28. L'intensità della corrente elettrica dipende dall'illuminazione. Con molta luce la corrente è forte, con poca luce è debole. Se la luce si spegne la corrente non scorre più. Un diodo di questo tipo si chiama *fotodiodo*. I fotodiodi, come i fotoconduttori, sono usati per rilevare e misurare la luce.

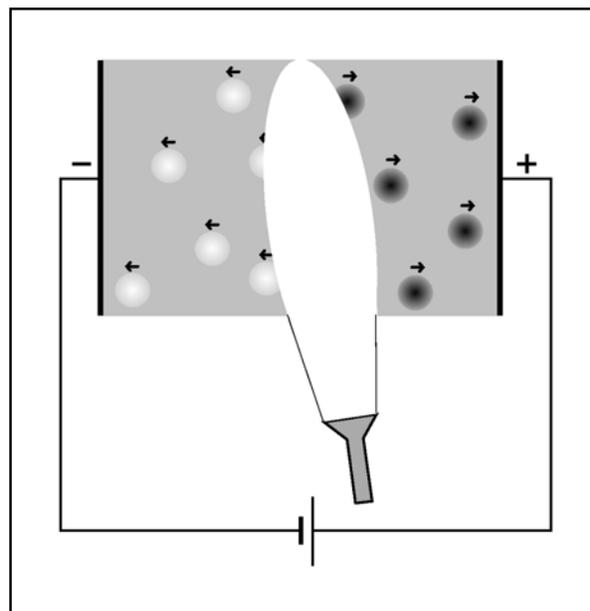


Fig. 31.28. Mentre è illuminato, nel diodo si formano addensamenti e rarefazioni.

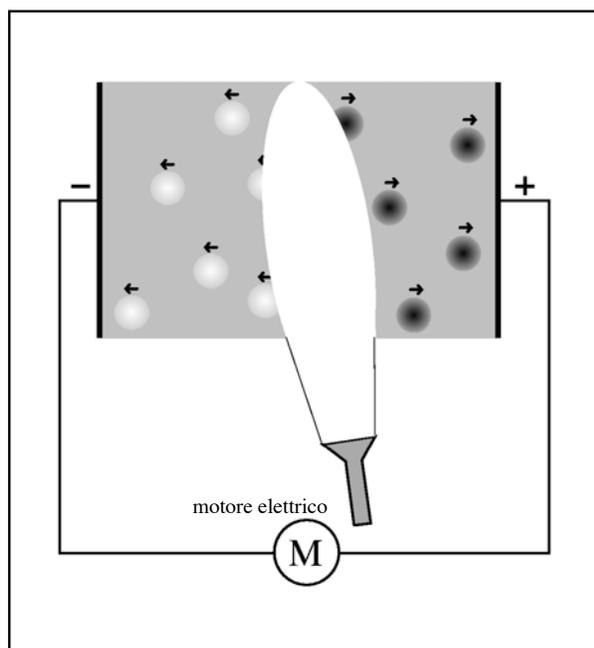


Fig. 31.29. Il diodo lavora come una pompa di elettricità.

Per finire, i diodi possono essere usati come pompa di elettricità.

Invece che a una batteria colleghiamo un fotodiodo a un piccolo motore elettrico, fig. 31.29. Se il diodo è illuminato vengono prodotti addensamenti e rarefazioni. In questo modo gli addensamenti già presenti sono spinti verso destra e le rarefazioni verso sinistra, escono dal diodo e attraversano il motore elettrico. Quindi il diodo pompa elettricità attraverso il circuito.

Il diodo adatto a questo scopo si chiama *fotocellula*.

**I diodi si usano come:**

- valvola per la corrente elettrica (diodo raddrizzatore);
- sorgente di luce (diodo luminoso);
- rilevatore di luce (fotodiodo);
- pompa di elettricità (fotocellula).

### *Esercizio*

Rappresenta l'intensità della corrente elettrica in funzione del tempo per il circuito in fig. 31.26.

## 31.10 Il transistor

Il transistor è un interruttore per la corrente elettrica azionato, cioè aperto e chiuso, elettricamente. Fondamentalmente assolve la stessa funzione di un relais. Ma rispetto al relais ha alcuni vantaggi: primo, è azionato con correnti elettriche molto più deboli; secondo, reagisce molto più in fretta; terzo, è molto più piccolo; quarto, non è un interruttore che

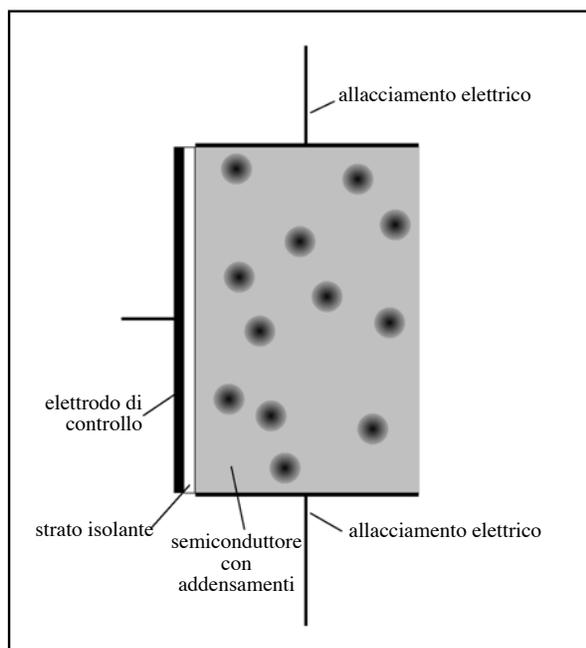


Fig. 31.30. Costruzione di un transistor.

si può solo aprire o chiudere completamente, ma la sua "permeabilità" alla corrente elettrica può essere regolata in vari livelli intermedi.

I transistor sono usati in tutti gli apparecchi elettronici: televisori, videoregistratori, impianti stereo, telefoni, ecc. Ma in particolare i transistor si trovano a milioni in ogni computer.

La fig. 31.30 mostra la struttura di un transistor. La corrente da manovrare viene fatta passare in un semiconduttore che contiene atomi estranei, cioè addensamenti dell'elettronio.

Su un fianco del semiconduttore c'è un sottile strato isolante sormontato da una lamina metallica, l'elettrodo di controllo. Semiconduttore, strato isolante ed elettrodo di controllo formano un condensatore. Il condensatore può essere caricato applicando una tensione tra l'elettrodo di controllo e il semiconduttore: un polo della sorgente di tensione si collega all'elettrodo di controllo, l'altro a uno dei due allacciamenti del semiconduttore.

Se si carica un condensatore, la quantità di elettroni su una piastra aumenta e sull'altra diminuisce.

Se la sorgente di tensione è collegata come mostrato in fig. 31.31, dal semiconduttore vengono estratti degli addensamenti di elettroni. Però il semiconduttore contiene già così pochi addensamenti che la perdita causata dalla carica del condensatore ne influenza fortemente la conducibilità: già applicando una tensione bassa il semiconduttore perde praticamente tutti gli addensamenti e perde la sua capacità di condurre. Attraverso il semiconduttore non passa più corrente elettrica, si comporta come un interruttore aperto.

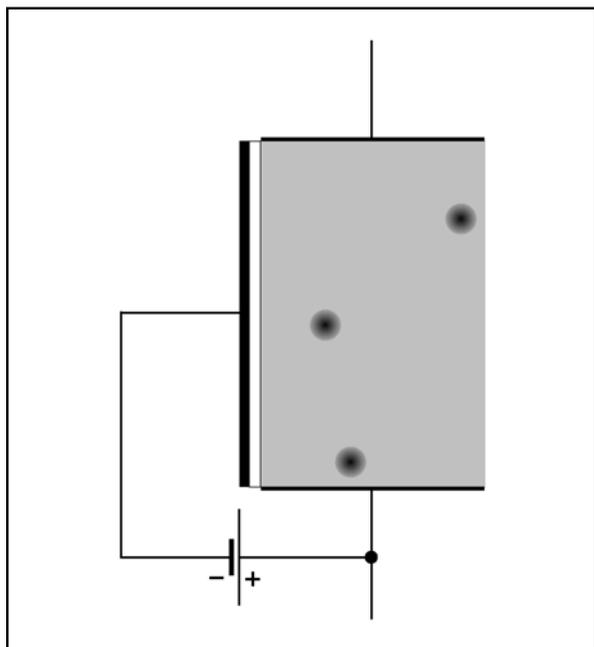


Fig. 31.31. La batteria estrae addensamenti dal semiconduttore.

Se invece si collega il polo negativo della sorgente di tensione al semiconduttore e il polo positivo all'elettrodo di controllo, fig. 31.32, il semiconduttore riceve degli addensamenti supplementari. Conduce molto bene la corrente e si comporta come un interruttore chiuso.

La fig. 31.33 mostra un circuito elettrico completo contenente un transistor. Se il potenziale elettrico dell'elettrodo di controllo è più basso di quello del semiconduttore, il semiconduttore non conduce e la lampadina non si accende, fig. 31.33. Se il potenzia-

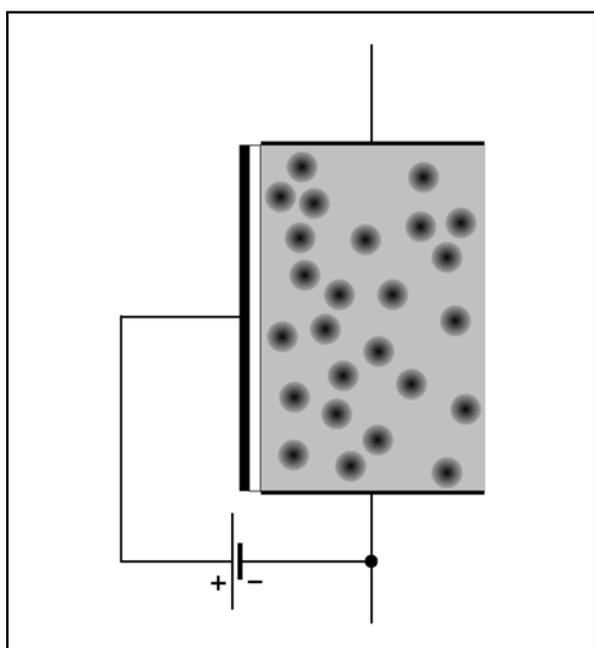


Fig. 31.32. La batteria comprime gli addensamenti nel semiconduttore.

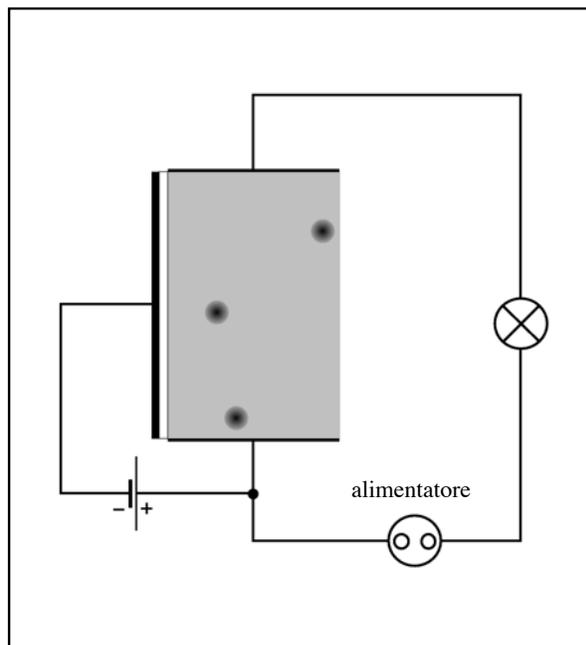


Fig. 31.33. Il circuito con la lampadina è interrotto.

le elettrico dell'elettrodo di controllo è più alto, il semiconduttore conduce e la lampadina si accende, fig. 31.34.

### Esercizio

Ci sono transistor il cui semiconduttore è reso conduttore aumentando le rarefazioni. Come devono essere collegati il transistor e la batteria in modo che il transistor lavori come un interruttore aperto?

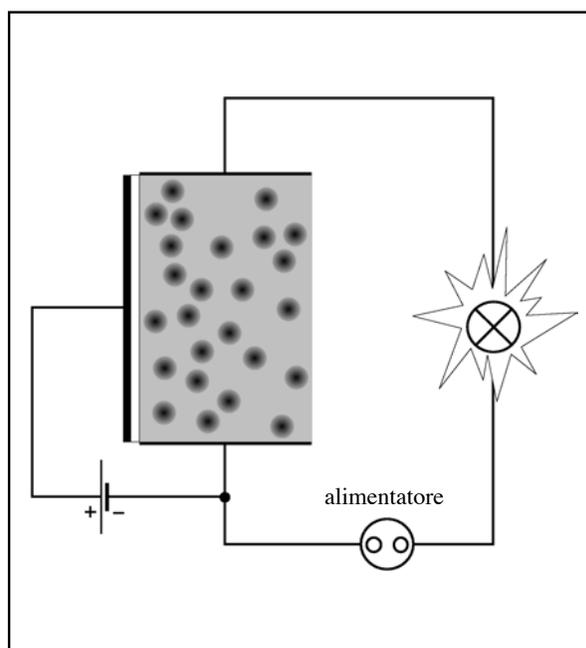


Fig. 31.34. Il circuito con la lampadina è chiuso.

# Il nucleo atomico



## 32. Nuclei atomici

Finora nella nostra trattazione degli atomi ci siamo occupati prevalentemente della nube elettronica. Del nucleo abbiamo parlato solo per spiegare cosa tiene assieme l'elettronio. Però in natura ci sono processi che possono essere capiti solo se si conosce meglio il nucleo atomico: processi nei quali il nucleo atomico cambia. Questi processi si chiamano reazioni nucleari.

Sulla Terra le reazioni nucleari avvengono solo in misura ridotta. Molto più importanti sono le reazioni nucleari che avvengono sul Sole. È grazie a loro che il Sole emette luce e rifornisce la Terra di energia. Ma anche nella tecnica si usano reazioni nucleari, sia per servire che per danneggiare l'umanità: nei reattori nucleari, nei reattori a fusione, nelle bombe atomiche e nelle bombe a idrogeno.

Nello studio della struttura del nucleo incontrerai molte cose che hai già incontrato parlando della struttura della nube elettronica. E potrai applicare molte delle conoscenze apprese nello studio della chimica quando abbiamo descritto le comuni reazioni chimiche.

### 32.1 La struttura dei nuclei atomici

Nella discussione sulla struttura dell'atomo abbiamo già imparato:

Il diametro del nucleo atomico è circa 1/100 000 del diametro dell'atomo. Malgrado ciò nel nucleo c'è praticamente tutta la massa dell'atomo. La massa della nube è circa 1/4000 della massa del nucleo.

Oltre alla massa e alla grandezza c'è un'altra differenza degna di nota tra la nube elettronica e il nucleo.

Ti ricorderai che la densità dell'elettronio diminuisce allontanandosi dal nucleo, così che l'atomo non ha un margine netto - analogamente all'involucro d'aria della Terra. Inoltre abbiamo visto che la nube elettronica degli atomi pesanti e di quelli leggeri non si differenziano tanto per la grandezza quanto per la densità. Un atomo di oro e uno di litio sono grosso modo grandi uguali, ma nell'atomo di oro la densità dell'elettronio è molto più grande.

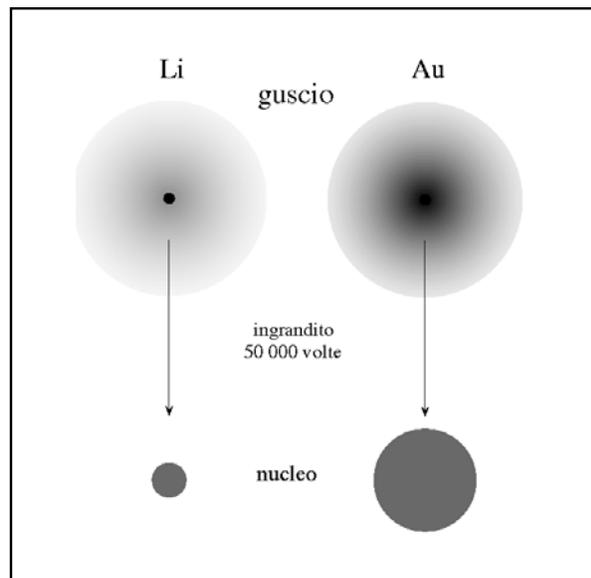


Fig. 32.1. La nube elettronica di oro è grande tanto quanto la nube elettronica di litio, ma è molto più densa. Il nucleo dell'atomo di oro è denso tanto quanto il nucleo dell'atomo di litio, ma è molto più grande.

Con i nuclei atomici è il contrario. La densità nei nuclei atomici è la stessa ovunque - quindi non come nell'atmosfera terrestre ma piuttosto come in una sfera di vetro. Inoltre la densità del materiale nucleare è la stessa per tutti gli atomi. Il nucleo dell'atomo di litio ha la stessa densità del nucleo di oro, in compenso il nucleo dell'atomo di litio e quello di oro si differenziano per la loro grandezza, fig. 32.1.

**In un nucleo atomico la densità è uguale ovunque. Le densità di nuclei diversi sono uguali tra loro.**

Per quanto riguarda la forma, nucleo e nube sono nuovamente molto simili. Anche i nuclei sono grosso modo sferici. Alcuni si discostano leggermente dalla forma sferica: certi sembrano un po' schiacciati, come un mandarino, altri sono un po' allungati, come un kiwi.

La densità si misura in  $\text{g/cm}^3$ . L'acqua, per esempio, ha una densità

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3$$

vale a dire che 1 cm<sup>3</sup> pesa 1 g, o 1 litro pesa 1 kg. Visto che tutta la massa di un atomo è concentrata nel nucleo, ne consegue che la densità del nucleo ha dei valori enormi. La materia nucleare ha una densità

$$\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3.$$

Se potessimo raccogliere 1 cm<sup>3</sup> di materia nucleare, questa sostanza avrebbe una massa di

$$10^{14} \text{ g} = 100\,000\,000 \text{ tonnellate}.$$

Per capire meglio questa sostanza curiosa di cui è fatto il nucleo, facciamo un esperimento già fatto per lo studio della nube elettronica: ci "mettiamo le mani" per estrarne una porzione. Il "metterci le mani" non va preso troppo alla lettera. Le mani non si possono mettere né nel nucleo né nella nube. Però possiamo fare qualcosa che vi corrisponde: sparare una qualche altra particella nel nucleo per fare in modo di catapultarne fuori un po' di materia nucleare. Al momento non ci interessa sapere esattamente come si può fare.

Quindi afferriamo una porzione di nucleo, la estraiamo e guardiamo cos'abbiamo in mano. Non sarai sorpreso di sapere che anche in questo caso, come già con l'elettronio della nube, si possono estrarre solo porzioni intere. Ma una cosa è diversa: ci sono due tipi di porzioni elementari. A volte ci resta in mano qualcosa che ha una carica elettrica positiva, altre volte qualcosa di elettricamente neutro. Se afferriamo con più forza, può succedere di estrarre il doppio della porzione elementare carica, oppure il doppio della porzione elementare neutra, o ancora una porzione equivalente a una porzione elementare carica più una porzione elementare neutra. Puoi immaginare da solo cosa succede se estraiamo porzioni ancora più grandi.

Già sai come si chiamano queste porzioni elementari: quella con carica elettrica positiva si chiama protone, quella neutra si chiama neutrone. Quindi un nucleo contiene un numero intero di porzioni positive e un numero intero, generalmente diverso, di porzioni neutre. In altre parole: un nucleo contiene un certo numero di protoni e un certo numero di neutroni.

Tieni conto che nel nucleo i protoni e i neutroni non sono separati gli uni dagli altri. Se ti immagini la materia di cui sono fatti i protoni come un budino rosso e la materia di cui sono fatti i neutroni come un

budino bianco, il budino nucleare non sarebbe composto da zone rosse e da zone bianche, ma sarebbe tutto rosa.

In tabella 32.1 sono riassunti i valori di massa e carica elettrica dell'elettrone, del protone e del neutrone. Le masse del protone e del neutrone sono quasi uguali. Più avanti scopriremo come questa pur piccola differenza è importante per certe reazioni nucleari. Annotati che entrambe le particelle sono circa 1800 volte più pesanti dell'elettrone.

La carica elettrica dell'elettrone è esattamente uguale a quella del protone ma di segno opposto. Un atomo contiene nella nube tanti elettroni quanti sono i protoni nel nucleo. Di conseguenza la carica elettrica dell'atomo è nulla, complessivamente l'atomo non porta carica elettrica.

### La materia nucleare si può dividere in

- porzioni con carica elettrica positiva e
- porzioni elettricamente neutre.

**Una porzione positiva si chiama protone, una porzione neutra si chiama neutrone.**

### Esercizi

1. In un nucleo A il numero totale di protoni e di neutroni è otto volte maggiore che in un nucleo B. Di che fattore il volume di A è maggiore del volume di B?

Di che fattore il raggio di A è maggiore del raggio di B?

2. Ci sono corpi celesti fatti interamente di materia nucleare, le *stelle di neutroni*. Una tipica stella di neutroni ha un diametro di 10 km. Qual è la sua massa?

## 32.2 Elementi, nuclidi, isotopi

Gli atomi dei diversi elementi chimici si distinguono per il diverso numero di protoni nel loro nucleo. Il numero atomico corrisponde proprio a questo numero di protoni. Fintanto che l'atomo non è ionizzato, il numero atomico corrisponde anche al numero di elettroni.

### Numero atomico = numero di protoni nel nucleo.

Se giudichiamo i nuclei solo dal loro numero di protoni, allora ci sono tanti nuclei quanti sono gli elementi, cioè un centinaio. Però un nucleo atomico con un determinato numero di protoni può contenere più o meno neutroni. Così ci sono nuclei di potassio (cioè nuclei atomici con 19 protoni) con un numero di neutroni tra 16 e 33. Quindi ci sono diversi tipi di potassio, o, come vengono chiamati, diversi *isotopi*. Dal punto di vista chimico i vari isotopi di un elemento sono quasi indistinguibili. Il normale potassio naturale è un miscuglio di vari isotopi. Anche di tutti gli altri elementi esistono diversi isotopi.

**Gli isotopi di un elemento si differenziano per il numero di neutroni presenti nel nucleo.**

Tabella 32.1

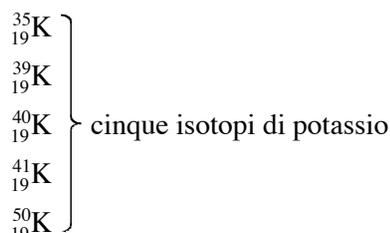
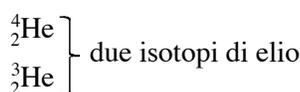
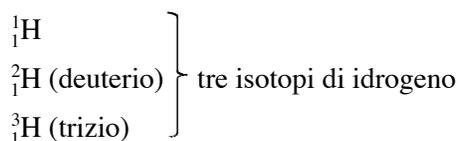
	carica elettrica	massa
protone	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1672,5 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
neutrone	0 C	$1674,8 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
elettrone	$-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

Se si contano individualmente tutti i tipi di ogni elemento chimico non si arriva a circa 100 diverse sostanze, ma a circa 2000. Le 100 sostanze di base della chimica si chiamano, come già sai, elementi. Le 2000 sostanze diverse che si ottengono distinguendo anche il numero di neutroni si chiamano *nuclidi*.

Per indicare un nuclide si usa la seguente notazione:

- il simbolo chimico dell'elemento;
- in alto a sinistra il numero totale di neutroni e protoni, in basso a sinistra il numero atomico, cioè il numero di protoni.

Ecco alcuni esempi di nuclidi rappresentati con questa notazione:



${}^{56}_{26}\text{Fe}$  il più frequente isotopo di ferro

${}^{238}_{92}\text{U}$  il più frequente isotopo di uranio

${}^{239}_{94}\text{Pu}$  isotopo del plutonio, un elemento sintetico

Come puoi vedere i due isotopi pesanti dell'idrogeno hanno addirittura un nome: l'isotopo con un neutrone si chiama deuterio, quello con due neutroni si chiama trizio.

Normalmente quando si analizzano le reazioni nucleari ci si interessa solamente dei nuclei. Quindi appare ragionevole introdurre un simbolo speciale per il nucleo di un nuclide: al simbolo del nuclide si aggiunge una N come indice. Per esempio se il simbolo  ${}^{25}_{19}\text{Mg}$  rappresenta tutto l'atomo di un nuclide di magnesio, con il simbolo  ${}^{25}_{19}\text{Mg}_N$  si intende solo il nucleo di quel nuclide.

Per altri scopi è più adatto un altro modo di rappresentare i nuclidi. Si basa sulla rappresentazione usata in chimica per caratterizzare le molecole.

La formula  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ci dice il contenuto di alluminio e di ossigeno dell'ossido di alluminio. Analogamente possiamo caratterizzare un nuclide indicando il suo contenuto di protoni p e di neutroni n. Gli esempi precedenti tradotti in questa notazione diventano:

$${}^1_1\text{H}_N = p$$

$${}^2_1\text{H}_N = pn$$

$${}^3_1\text{H}_N = pn_2$$

$${}^4_2\text{He}_N = p_2n_2$$

$${}^3_2\text{He}_N = p_2n$$

$${}^{35}_{19}\text{K}_N = p_{19}n_{16}$$

$${}^{39}_{19}\text{K}_N = p_{19}n_{20}$$

$${}^{40}_{19}\text{K}_N = p_{19}n_{21}$$

$${}^{41}_{19}\text{K}_N = p_{19}n_{22}$$

$${}^{50}_{19}\text{K}_N = p_{19}n_{31}$$

$${}^{56}_{26}\text{Fe}_N = p_{26}n_{30}$$

$${}^{238}_{92}\text{U}_N = p_{92}n_{146}$$

$${}^{239}_{94}\text{Pu}_N = p_{94}n_{145}$$

Ma quali sono i nuclidi esistenti? Come abbiamo già detto, in totale ce ne sono circa 2000. Ma ciò non significa che ogni possibile formula corrisponde a un nuclide veramente esistente. Per esempio non esiste il  $pn_3$ , cioè idrogeno con 3 neutroni, così come non esistono l'isotopo di ossigeno  $p_8n_{17}$  o l'isotopo di zinco  $p_{30}n_{50}$ .

Chiedersi quali nuclidi esistano, cioè chiedersi quali sono le possibili combinazioni di materia nucleare p e materia nucleare n, è un po' come chiedersi quali composti di idrogeno e ossigeno ci sono. Quali sono i composti idrogeno-ossigeno nella seguente lista che possono effettivamente esistere?

O, H,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ , HO,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_3\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{O}_2$ ,  $\text{HO}_3$ , ...

Alcuni sono ormai dei vecchi conoscenti: il diidrogeno (idrogeno molecolare,  $\text{H}_2$ ), il diossigeno (ossigeno molecolare,  $\text{O}_2$ ), l'acqua  $\text{H}_2\text{O}$ . Alcune altre sostanze nella lista invece non esistono. Forse conosci già il perossido di idrogeno  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Questa sostanza in effetti c'è, ma non è stabile. Stessa cosa per l' $\text{O}_3$ . E l'idrogeno atomico H è ancora più instabile.

Per i nuclidi è un po' la stessa cosa. La maggior parte delle combinazioni  $p_xn_y$  non esistono proprio. E tra quelle che esistono, i nuclidi stabili rappresentano solo una piccola frazione.

La fig. 32.2 mostra la *carta dei nuclidi*, un diagramma con tutti i nuclidi conosciuti. Il numero di protoni è riportato in orizzontale, quello dei neutroni in verticale. Ogni cerchio rappresenta un nuclide già scoperto o prodotto in laboratorio, ma solo i nuclidi rappresentati con un cerchio nero sono stabili. Quelli corrispondenti ai cerchi bianchi sono instabili, decadono spontaneamente. Per alcuni la durata di vita è molto breve, per altri è molto lunga.

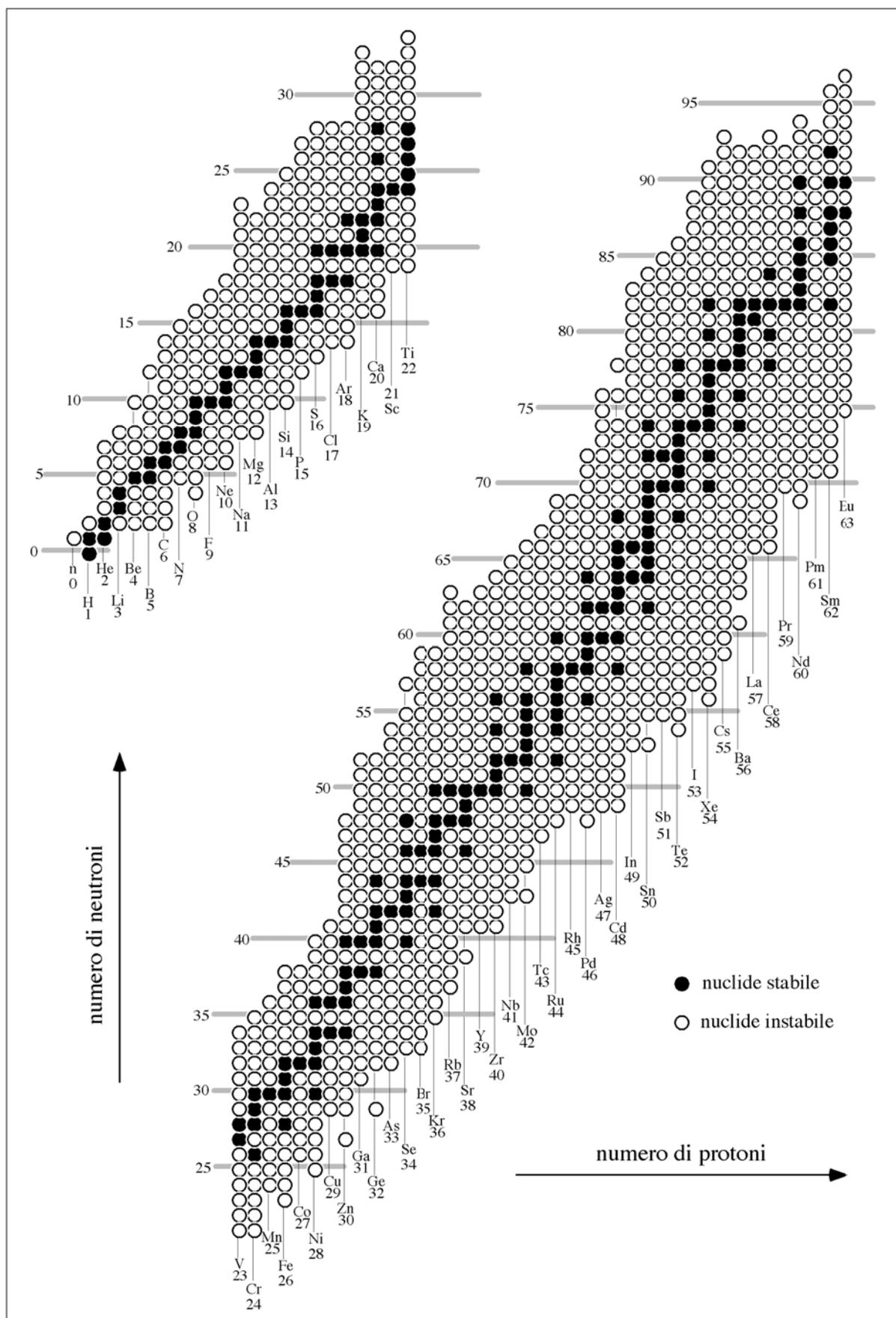


Fig. 32.2. Carta dei nuclidi. (a) Dall'idrogeno all'europio.

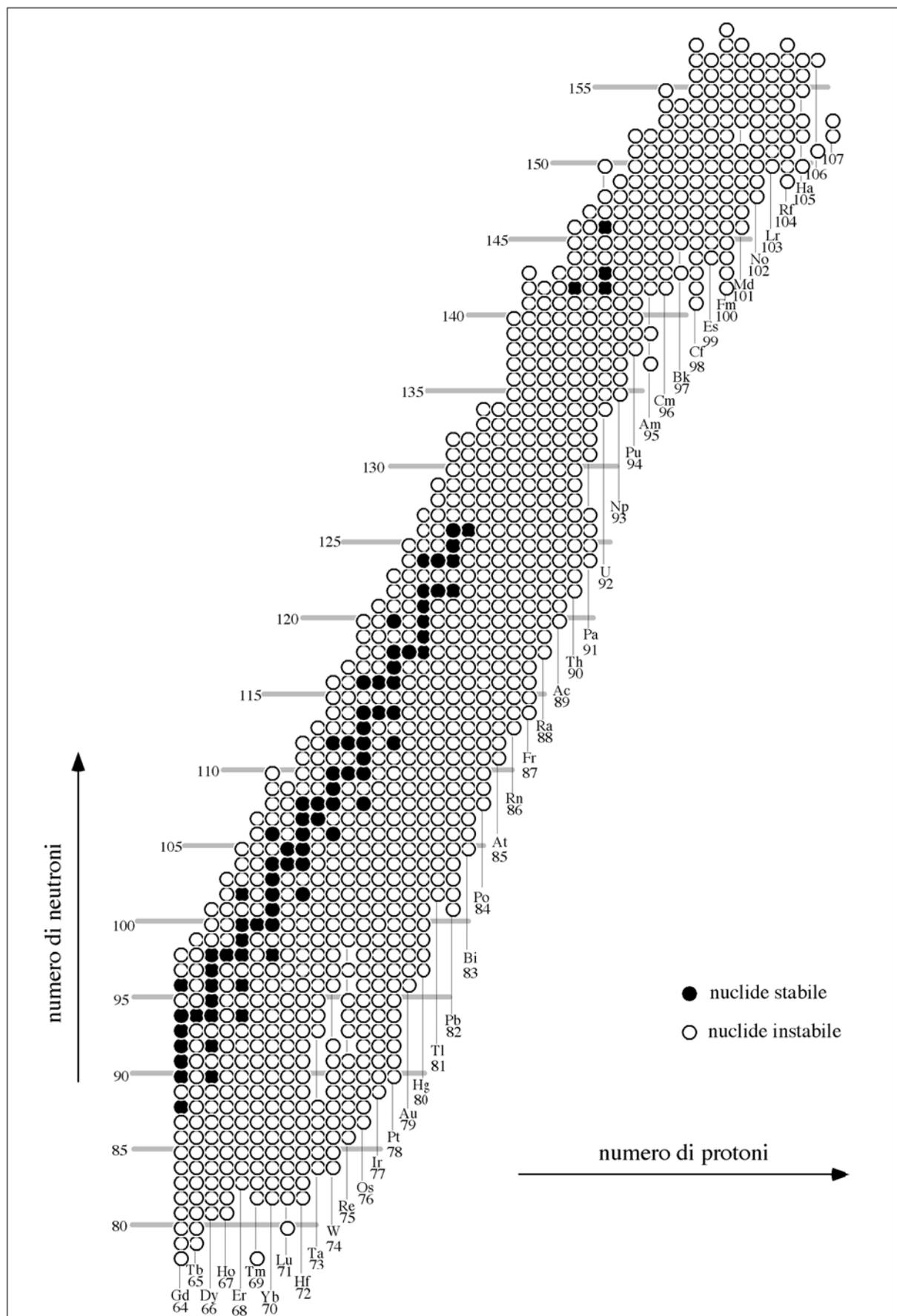


Fig. 32.2. Carta dei nuclidi. (b) Dal gadolinio all'elemento 111.

**Ci sono circa 100 elementi diversi e 2000 nuclidi diversi.**

### Esercizi

1. Scegli sei nuclidi diversi sulla carta dei nuclidi, fig. 32.2, e rappresentali simbolicamente in entrambi i modi descritti nel testo.
2. Formula una regola approssimativa che esprima come deve essere il rapporto tra il numero di protoni e quello dei neutroni negli isotopi esistenti: una regola per gli elementi leggeri (fino a circa 20 protoni) e un'altra per gli elementi più pesanti. Aiutati con la carta dei nuclidi, fig. 32.2.
3. Quanti nuclidi stabili ci sono?
4. Qual è il nuclide stabile più pesante?
5. Quali sono gli isotopi stabili del neon?
6. Qual è l'elemento più leggero che non ha nessun isotopo stabile?
7. Quale elemento ha più isotopi? Quanti sono? Quanti tra loro sono stabili?

## 32.3 L'eccitazione dei nuclei

Come la nube elettronica anche il nucleo si può deformare e, come la nube, anche il nucleo può "scattare" assumendo determinate forme. Le differenze principali: primo, per deformare un nucleo atomico ci vuole circa un milione di volte più energia che per deformare una nube elettronica e secondo, la durata della vita di uno stato eccitato del nucleo è circa un milionesimo della durata di vita di uno stato eccitato della nube elettronica, tabella 32.2.

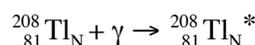
In questo paragrafo avremo spesso a che fare con energie il cui ordine di grandezza è tra  $10^{-12}$  e  $10^{-15}$  joule. Di conseguenza è pratico usare l'abbreviazione "pico" per  $10^{-12}$ :  $10^{-12}$  J = 1 pJ. La fig. 32.3 mostra la scala di energia di un isotopo del tallio.

Anche i metodi per eccitare un nucleo sono sostanzialmente gli stessi che per eccitare una nube elettronica.

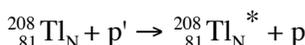
Così un nucleo può essere eccitato per esempio con un fotone. Questi fotoni devono avere l'energia che corrisponde alla transizione dallo stato fondamentale al primo stato eccitato. L'energia non può essere troppo piccola ma nemmeno troppo grande. Come già detto ci vuole molta più energia che per eccitare una nube elettronica. Quindi i fotoni devono essere dei raggi  $\gamma$ . Un esempio di processo del genere è l'eccitazione di un nucleo di tallio:

Tabella 32.2

	valore tipico dell'energia di eccitazione	valore tipico del tempo di dimezzamento
nube elettronica	$10^{-19}$ J	$10^{-8}$ s
nucleo atomico	$10^{-13}$ J = 0,1 pJ	$10^{-14}$ s

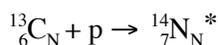


Ma i nuclei si possono eccitare anche con delle particelle che possiedono un'energia di riposo, come elettroni, protoni o neutroni. (Anche questo processo corrisponde al processo simile di eccitazione della nube elettronica.) In questo caso la particella deve portare energia a sufficienza, ma può anche averne di più di quella necessaria per l'eccitazione. La particella può portarsi via l'energia in eccesso dopo aver eccitato il nucleo. Prendiamo ancora come esempio il nucleo di tallio:



dove  $p'$  rappresenta un protone veloce e  $p$  un protone lento.

Anche il terzo metodo che permette di ottenere un nucleo eccitato è analogo a quanto si fa con il gas: durante certe reazioni chimiche i prodotti sono in uno stato eccitato. Un esempio è la fiamma a gas. Analogamente, i prodotti di reazione delle reazioni nucleari sono spesso in uno stato eccitato. Più avanti discuteremo a fondo le reazioni nucleari. Per ora facciamo un esempio: un isotopo di carbonio reagisce con un protone e produce un isotopo eccitato di azoto:



**Come la nube elettronica anche il nucleo atomico può essere eccitato. Nello stato eccitato il nucleo ha una forma diversa rispetto allo stato fondamentale. Con l'eccitazione, nel nucleo viene immagazzinata energia.**

Ti ricorderai che massa ed energia sono la stessa grandezza fisica.

Se misuriamo la grandezza con l'unità kg la chiamiamo massa, se la misuriamo in joule la chiamiamo energia. Ma le unità di misura possono essere convertite facilmente l'una nell'altra. In altre parole: la massa può essere convertita in energia.

La conversione si fa con la formula

$$E = k \cdot m$$

$k = 9 \cdot 10^{16}$  J/kg è il fattore di conversione.

Se forniamo energia a un sistema, diventa più pesante. In molti casi però l'aumento di energia è così

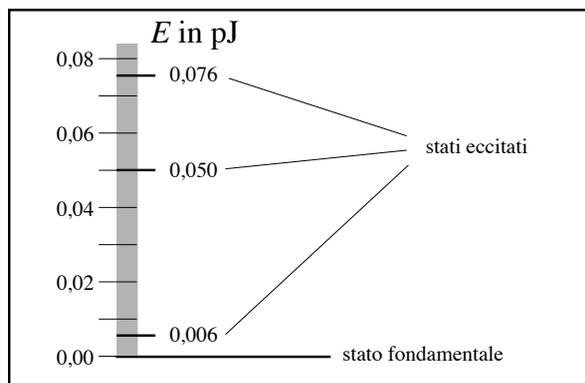


Fig. 32.3. Scala di energia dell'isotopo di tallio  ${}_{81}^{208}\text{Tl}$ .

piccolo in confronto all'energia totale del sistema da rendere impercettibile l'appesantimento. Per esempio la massa di un atomo quando la sua nube elettronica viene eccitata, cambia così poco che praticamente non si nota nulla.

Non è così quando si eccita il nucleo atomico. Prendiamo ad esempio l'eccitazione al secondo stato eccitato dell'isotopo di tallio  $^{208}_{81}\text{Tl}$ , la cui scala di energia è mostrata in fig. 32.3. In questo caso gli si deve fornire un'energia di 0,05 pJ. Convertiamola in kg

$$m = \frac{E}{k} = \frac{0,05 \cdot 10^{-12} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}} = 0,56 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

Paragonata alla massa totale dell'atomo di tallio è ancora molto piccola. Però è già quasi equivalente alla massa di un elettrone ( $0,9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ ).

### Un nucleo eccitato è più pesante.

#### Esercizi

1. La massa di un atomo di tallio è  $350 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Di che frazione della massa totale diventa più pesante nel caso di

- una tipica eccitazione della nube elettronica
- una tipica eccitazione del nucleo atomico.

2. È possibile distinguere con una bilancia la differenza tra la massa di 1 mol di una sostanza nello stato fondamentale e 1 mol della stessa sostanza in uno stato eccitato?

## 32.4 L'energia di separazione

Per separare due magneti uniti ci vuole energia. Quindi i due magneti separati hanno più energia dei due magneti uniti. Visto che massa uguale energia, ciò significa che i due magneti separati sono più pesanti dei due magneti uniti, fig. 32.4. Però l'effetto è così piccolo da non essere verificabile con un esperimento come quello mostrato in fig. 32.4.

Per estrarre un protone da un nucleo ci vuole energia. Quindi il nucleo e il protone uniti hanno meno energia del nucleo e del protone separati. Se da un nucleo di  $^{14}_7\text{N}$  si estrae un protone, si ottiene un nucleo di  $^{13}_6\text{C}$ . Quindi il nucleo di  $^{14}_7\text{N}$  è più leggero del nucleo di  $^{13}_6\text{C}$  e un protone separati, fig. 32.5. In questo caso però l'effetto è nettamente maggiore rispetto all'esempio dei magneti ed è più facilmente dimostrabile.

Naturalmente la stessa cosa vale anche quando dal nucleo si estrae un neutrone: visto che il processo richiede energia, separando nucleo e neutrone il sistema diventa più pesante.

Immaginiamo di scomporre un nucleo togliendo progressivamente tutti i protoni e i neutroni. Per questa scomposizione totale del nucleo di un nuclei-

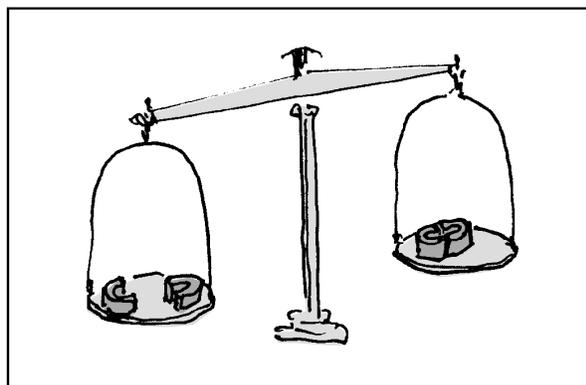


Fig. 32.4. I magneti separati hanno più energia di quelli uniti. Comunque l'effetto è così piccolo da non essere misurabile con una bilancia.

de ci vuole una quantità di energia ben precisa, la cosiddetta *energia di separazione*. Il suo valore è diverso per ogni nuclide. Questa energia ci servirà più avanti per stabilire in quale direzione avviene una reazione nucleare. La tabella in appendice contiene l'energia di separazione per circa 1000 nuclidi.

**Per scomporre un nucleo in protoni e neutroni ci vuole energia, l'energia di separazione. Quindi le particelle che compongono un nucleo sono complessivamente più pesanti del nucleo stesso.**

#### Esercizi

1. L'energia di separazione è grosso modo proporzionale al numero totale di protoni e neutroni. Scegli 5 nuclidi nella tabella in appendice e rappresenta graficamente l'energia di separazione in funzione del numero totale di protoni e neutroni. (Scegli un nuclide per pagina.)

2. Se separiamo un neutrone da un nucleo di  $^{15}_6\text{C}$  otteniamo un nucleo  $^{14}_6\text{C}$ . Togliendo un altro neutrone si ottiene un nucleo  $^{13}_6\text{C}$ , togliendo un terzo neutrone un nucleo  $^{12}_6\text{C}$ , ecc.

Quanta energia ci vuole per togliere un altro neutrone? Rappresenta graficamente questa energia in funzione del numero totale di protoni e neutroni dei rispettivi isotopi di carbonio.

Fai la stessa cosa per gli isotopi dell'elio. Cosa noti?

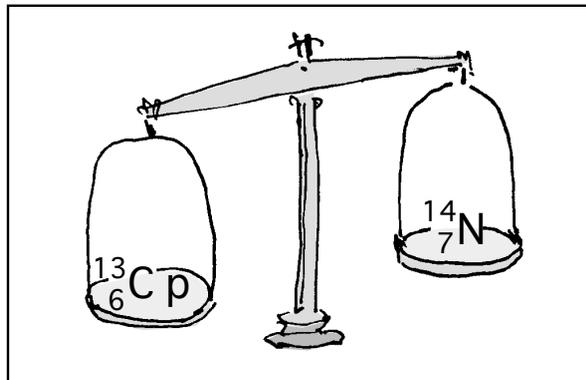


Fig. 32.5. Un nucleo di  $^{14}_7\text{N}$  è più leggero di un nucleo di  $^{13}_6\text{C}$  e un protone.

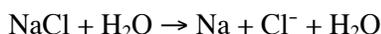
## 32.5 Grandezze conservate

Il nostro obiettivo è prevedere quali sono le reazioni nucleari possibili. In linea di massima il procedimento usato ti è già noto. Sfruttiamo il fatto che in una reazione certe grandezze estensive non possono cambiare il loro valore.

Abbiamo già incontrato alcune di queste grandezze. Sono dette *grandezze conservate*.

Per esempio l'energia è una grandezza conservata. In ogni processo la quantità complessiva di energia deve essere costante. Lo stesso vale per la carica elettrica.

Considera il processo descritto dalla seguente equazione di reazione:

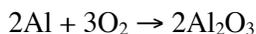


Questa reazione non può avvenire perché viola la conservazione della carica elettrica. I reagenti (a sinistra) sono complessivamente neutri, i prodotti (a destra) portano complessivamente una carica elettrica negativa. Invece la reazione

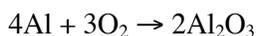


è permessa, il bilancio della carica elettrica è nullo.

Un altro processo vietato è



Qui è un'altra legge di conservazione a essere violata: in una reazione chimica il numero di atomi è una grandezza conservata. E in questo caso il numero di atomi a sinistra e a destra nell'equazione di reazione non è lo stesso. Per contro la reazione



è possibile.

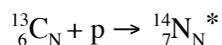
**In una reazione chimica il numero di atomi è una grandezza conservata.**

Quindi: per allestire una reazione chimica usiamo la conservazione della carica elettrica e la conservazione del numero di atomi.

Sulla conservazione del numero degli atomi c'è ancora una cosa da aggiungere: questa legge di conservazione non vale sempre. Abbiamo sottolineato che vale per le "reazioni chimiche". Come vedremo fra poco, nelle reazioni nucleari non è valida. Perciò:

**Alcune leggi di conservazione valgono solo a determinate condizioni.**

Abbiamo già visto un esempio di reazione nucleare:



Come puoi vedere, a sinistra c'è un nucleo di atomo di carbonio, a destra no. Sempre a sinistra c'è anche un protone, cioè il nucleo di un atomo di idrogeno, che a destra non c'è. Per contro a destra c'è un nucleo

di azoto, a sinistra no. Quindi in questa reazione nucleare il numero di atomi non è conservato.

Ci troviamo di fronte a un problema: non abbiamo più una regola per il bilanciamento di un'equazione di reazione. O forse è perché tutte le equazioni di reazione sono permesse? L'esperienza ci insegna che non è così. L'analisi delle reazioni nucleari ci ha insegnato che ci sono delle grandezze, prima sconosciute, che hanno una loro legge di conservazione: la *carica barionica* e la *carica leptonica*. Per ogni nucleo e ogni particella, la carica barionica e la carica leptonica hanno un valore ben preciso. La carica barionica delle particelle a sinistra in un'equazione di reazione deve sempre essere uguale alla carica barionica delle particelle a destra. La stessa cosa vale per la carica leptonica.

**La carica barionica non può essere né prodotta né annientata.**

**La carica leptonica non può essere né prodotta né annientata.**

Prima di poter applicare queste regole alle equazioni delle reazioni nucleari, dobbiamo perfezionare le nostre conoscenze sulle porzioni elementari di un nucleo.

### Esercizio

Quali grandezze estensive conosci? Quali tra loro sono grandezze conservate e quali no?

## 32.6 Particelle e antiparticelle

Finora nella scomposizione di gusci e nuclei atomici abbiamo incontrato tre tipi diversi di materia elementare, cioè tre particelle elementari: gli elettroni, i protoni e i neutroni. Ma oltre a questi tre tipi di particelle se ne sono scoperti alcuni altri. La maggior parte della natura che ci circonda è fatta di elettroni, protoni e neutroni. Le altre particelle sono in prevalenza prodotte artificialmente.

A prima vista l'esistenza di queste nuove particelle sembra complicare le reazioni nucleari. In realtà tutte queste particelle possono essere raggruppate in modo molto sistematico e comprensibile. La tabella 32.3 le elenca con alcune loro proprietà. Vogliamo discutere a fondo il contenuto della tabella.

### Le vecchie conoscenze

Nella colonna più a sinistra c'è il nome delle particelle. Molte di queste particelle sono vecchie conoscenze: il fotone, l'elettrone, il protone e il neutrone.

### Il neutrino

A dire il vero anche il neutrino dovrebbe essere una vecchia conoscenza visto che il mondo ne è pieno. Sono particelle che si aggirano liberamente in grande quantità. Provengono soprattutto dal Sole, dove

Nome, simbolo	energia di riposo	carica		
		elettrica*	barionica	leptonica
fotone $\gamma$	0 pJ	0	0	0
elettrone $e$	0,082 pJ	-1	0	1
antielettrone $\bar{e}$	0,082 pJ	1	0	-1
neutrino $\nu$	0 pJ	0	0	1
antineutrino $\bar{\nu}$	0 pJ	0	0	-1
protone $p$	150,320 pJ	1	1	0
antiprotone $\bar{p}$	150,320 pJ	-1	-1	0
neutrone $n$	150,525 pJ	0	1	0
antineutrone $\bar{n}$	150,525 pJ	0	-1	0

Tabella 32.3

\*in multipli della carica elementare

sono prodotte nella stessa reazione responsabile della produzione della luce che il Sole ci manda. I neutrini si notano così poco perché attraversano quasi indisturbati tutta la materia. Di conseguenza non ci sono quasi reazioni che permettono di provarne la presenza. La maggior parte dei neutrini solari attraversa tutta la Terra senza reagire con nessuna particella o anche solo esserne deviate.

Grazie ai neutrini possiamo imparare qualcosa sulle reazioni che si svolgono nelle profondità del Sole. Ma, visto che i neutrini sono così poco inclini a reagire, gli esperimenti per la misurazione dei neutrini sono molto laboriosi. Gli apparecchi di rilevazione devono essere molto grandi per fare in modo che la probabilità per un neutrino di rimanervi impigliato non sia troppo piccola. Inoltre questi esperimenti devono essere schermati da tutte le particelle prodotte in una qualsiasi reazione nucleare o provenienti dallo spazio. Perciò questi esperimenti si compiono nelle profondità della Terra: in gallerie o miniere.

L'esistenza dei neutrini venne ipotizzata in un periodo quando questi esperimenti così impegnativi non erano ancora concepibili. Come fu possibile? Avvenne grazie a un metodo che in fisica microscopica si è rivelato spesso molto redditizio: si analizza una certa reazione e si scopre che una certa legge di conservazione, della cui validità si è convinti, sembra essere violata. Nel caso del neutrino ci si rese conto che in una determinata reazione l'energia non era conservata. Si concluse che una particella ancora sconosciuta doveva aver preso parte alla reazione.

**I neutrini reagiscono molto poco con altre particelle.**

### Antiparticelle

La tabella elenca altre quattro particelle. I nomi di tutte queste particelle cominciano con il prefisso

"anti": l'antielettrone, l'antineutrino, l'antiprotone e l'antineutrone. Ti puoi convincere facilmente che sono molto simili alle particelle con lo stesso nome senza il prefisso: hanno gli stessi identici valori, con la sola eccezione del segno delle tre cariche. Così il protone ha carica elettrica positiva e carica barionica positiva, l'antiprotone ha carica elettrica negativa e carica barionica negativa.

Si dice che l'antiprotone è l'*antiparticella* del protone e che il protone è l'*antiparticella* dell'antiprotone. Quindi particella e antiparticella formano una coppia di partner molto simili.

**Le particelle e le antiparticelle si distinguono per il segno delle cariche elettrica, barionica e leptonica.**

**L'elettrone e il neutrino, così come le loro antiparticelle, portano una carica leptonica.**

**Il protone e il neutrone, così come le loro antiparticelle, portano una carica barionica.**

**Il fotone non ha nessuna antiparticella.**

## 32.7 Bilanci della carica

Ora siamo in grado di allestire una reazione nucleare. Cominciamo con degli esempi molto semplici.

Esiste la reazione

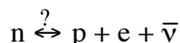


che vede la trasformazione di un neutrone in un protone e un elettrone? Stiliamo il bilancio per la carica elettrica, barionica e leptonica

	n	$\xrightarrow{?}$	p + e
carica elettrica	0		1 + (-1)
carica barionica	1		1 + 0
carica leptonica	0		0 + 1

La carica elettrica dei reagenti e dei prodotti è la stessa, cioè zero. Quindi la carica elettrica è conservata. Anche la carica barionica ha lo stesso valore a sinistra e a destra, vale a dire 1. Invece nella reazione la carica leptonica non è conservata: a sinistra è zero e a destra uno. Quindi la reazione non può avvenire, né in una direzione né nell'altra.

Però la reazione può essere aggiustata facilmente inserendo un antineutrino a destra:

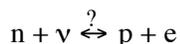


Questa volta il bilancio è soddisfatto:

	n	$\overset{?}{\leftrightarrow}$	p + e + $\bar{\nu}$
carica elettrica	0		1 + (-1) + 0
carica barionica	1		1 + 0 + 0
carica leptonica	0		0 + 1 + (-1)

Ora anche la carica leptonica a sinistra e a destra è uguale, cioè nulla. Questa reazione avviene veramente: un neutrone libero decade spontaneamente in un protone, un elettrone e un antineutrino.

L'equazione (1) può essere resa possibile anche aggiungendo un neutrino a sinistra:



Anche questa reazione è possibile, come dimostra la tabella dei bilanci:

	n + $\nu$	$\overset{?}{\leftrightarrow}$	p + e
carica elettrica	0 + 0		1 + (-1)
carica barionica	1 + 0		1 + 0
carica leptonica	0 + 1		0 + 1

### Esercizio

Scrivi un'equazione che descrive la reazione tra un protone e un antiprotone. Ci sono varie possibilità.

## 32.8 La direzione di una reazione

Una domanda importante è ancora senza risposta: in quale direzione avviene la reazione che abbiamo descritto?

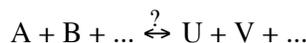
La risposta si trova applicando nuovamente una legge di conservazione. Finora non abbiamo ancora considerato la conservazione dell'energia. Naturalmente in una reazione anche il bilancio energetico deve essere equilibrato. L'energia dei reagenti e dei prodotti deve essere uguale. Ma se confrontiamo le energie di riposo delle particelle a sinistra e a destra dell'equazione di reazione, non ci capiterà mai di trovarle uguali. Comunque le energie di riposo non devono necessariamente essere uguali.

Se i nuclei o le particelle iniziali sono fermi, allora l'energia iniziale è la somma delle energie di riposo di quelle particelle. L'energia di riposo complessiva delle particelle prodotte non può sicuramente essere maggiore di quella delle particelle iniziali, però può benissimo essere inferiore. In questo caso resta un po' dell'energia delle particelle iniziali. Questa eccedenza di energia può sempre essere collocata: basta cederla alle particelle prodotte facendole muovere velocemente. Più veloci sono le particelle prodotte, maggiore sarà la loro eccedenza di energia rispetto all'energia di riposo. Quindi: una reazione nucleare si svolge in modo che l'energia dei nuclei e delle particelle coinvolte diminuisca.

Di conseguenza per decidere in quale direzione avviene una reazione si deve confrontare l'energia di riposo totale della parte sinistra con quella della parte destra. La reazione avviene dall'energia a riposo maggiore verso quella minore.

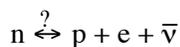
**Una reazione nucleare in cui le particelle iniziali sono ferme, avviene sempre nella direzione che vede diminuire l'energia di riposo.**

Ora possiamo prendere i nostri strumenti e metterci al lavoro. Vogliamo scoprire in quale direzione si svolge una reazione



*I neutroni sono stabili?*

La reazione



è possibile se consideriamo i bilanci della carica elettrica, di quella barionica e di quella leptonica. Di questo abbiamo già discusso in precedenza. Manca ancora il bilancio energetico. Aggiungiamolo alla tabella con i bilanci delle cariche: la somma delle energie di riposo della parte sinistra e la somma delle energie di riposo della parte destra. Possiamo leggere le energie di riposo dalla tabella 32.3.

	n	$\overset{?}{\leftrightarrow}$	p + e + $\bar{\nu}$
carica elet.	0		1 + (-1) + 0
carica bar.	1		1 + 0 + 0
carica lept.	0		0 + 1 + (-1)
E di riposo	n 150,525		p 150,320 e 0,082
somma	150,525		150,402
$\Delta E$			0,123 pJ

L'energia di riposo del neutrone è maggiore di quelle di protone, elettrone e antineutrino messe assieme. Perciò la reazione si svolge da sinistra verso destra. Sottraiamo il totale minore da quello maggiore e otteniamo:

$$\Delta E = 150,525 \text{ pJ} - 150,402 \text{ pJ} = 0,123 \text{ pJ}$$

Infatti si osserva che i neutroni liberi, cioè neutroni non legati in un nucleo, decadono spontaneamente. I neutroni possono essere prodotti artificialmente, ma decadono in pochi minuti, se conservati con cura. Di fatto la loro durata di vita è solitamente assai più breve, visto che reagiscono alquanto volentieri e si legano molto in fretta ai nuclei degli atomi che incontrano.

*I protoni sono stabili?*

Sai già che i protoni non decadono. Vogliamo verificare che il nostro strumento di fisica nucleare confermi questo risultato. Stando ai bilanci delle cariche la seguente reazione sarebbe permessa:

$$p \rightarrow n + \bar{e} + \nu$$

Stiliamo i bilanci e inseriamoli in una tabella:

	p	$\leftrightarrow$	n + $\bar{e}$ + $\nu$
carica elet.	1		0 + 1 + 0
carica bar.	1		1 + 0 + 0
carica lept.	0		0 + (-1) + 1
E di riposo	p 150,320		n 150,525 $\bar{e}$ 0,082
somma	150,320		150,607
$\Delta E$			0,287 pJ

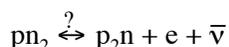
L'energia di riposo del protone è minore di quelle di neutrone, antielettrone e neutrino messe assieme. Quindi la reazione si può svolgere solo da destra verso sinistra: il protone non può decadere.

*Il trizio è stabile?*

Proviamo con il decadimento in un nucleo di elio, un elettrone e un antineutrino:



Per una questione di leggibilità, da ora in avanti nella tabella scriveremo sempre l'equazione di reazione usando l'altra notazione:



I bilanci delle cariche sono a posto.

	pn <sub>2</sub>	$\leftrightarrow$	p <sub>2</sub> n + e + $\bar{\nu}$
carica elet.	1		2 + (-1) + 0
carica bar.	3		3 + 0 + 0
carica lept.	0		0 + 1 + (-1)
E di riposo	p 150,320		p 2 · 150,320
particelle	n 2 · 150,525		n 150,525 e 0,082
-E <sub>S</sub>	1,36		1,24
somma	450,01		450,007
$\Delta E$			0,003 pJ

Calcoliamo l'energia di riposo di un nucleo sottraendo l'energia di separazione dalla somma delle energie di riposo delle particelle che lo compongono.

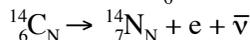
E<sub>S</sub>(pn<sub>2</sub>) e E<sub>S</sub>(p<sub>2</sub>n) sono state lette nella tabella in appendice. La somma a sinistra è maggiore della somma a destra, quindi la reazione può svolgersi da sinistra verso destra.

Effettivamente il trizio è instabile. L'acqua contiene piccolissime quantità di trizio. Questo trizio decade secondo la reazione appena analizzata. In 1 kg d'acqua decadono circa 45 nuclei di trizio al minuto. Ma come è possibile che l'acqua contenga trizio? Tutto il trizio che per una ragione o per l'altra a un certo punto è finito nell'acqua, non dovrebbe già essere decaduto da tempo?

Non c'è solo il trizio che decade, c'è anche quello che viene prodotto in continuazione in una reazione con i cosiddetti *raggi cosmici*. La Terra è bombardata da una corrente ininterrotta di particelle ad altissima energia - prevalentemente protoni e nuclei di elio. Nell'atmosfera queste particelle causano innumerevoli reazioni nucleari. In questo modo vengono prodotti molti nuclidi instabili.

*Il decadimento del <sup>14</sup><sub>6</sub>C*

I raggi cosmici producono anche l'isotopo instabile del carbonio <sup>14</sup><sub>6</sub>C. Decade nella reazione



o, nell'altra notazione



D'ora in poi nel bilancio energetico non scriveremo più quei contributi che nel calcolo finiscono comunque per annullarsi: le energie di riposo delle particelle che nell'equazione compaiono sia a destra che a sinistra. Quindi nel caso dell'equazione (2) tralascieremo:

- 6 protoni e
- 7 neutroni.

La tabella dei bilanci è:

	p <sub>6</sub> n <sub>8</sub>	$\rightarrow$	p <sub>7</sub> n <sub>7</sub> + e + $\bar{\nu}$
carica elet.	6		7 + (-1) + 0
carica bar.	14		14 + 0 + 0
carica lept.	0		0 + 1 + (-1)
E di riposo	n 150,525		p 150,320
particelle			e 0,082
-E <sub>S</sub>	-16,87		-16,77
somma	133,655		133,632
$\Delta E$			0,023 pJ

La somma a sinistra è maggiore di quella a destra, la reazione può avvenire.

### Il decadimento dell'uranio

Gli isotopi dell'uranio possono decadere in molti modi diversi. Scegliamo come esempio una delle molte possibilità di decadimento dell'isotopo di uranio  $^{235}_{92}\text{U}$ , il decadimento in bario e cripton:

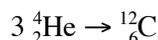


	$p_{92}n_{143}$	$\rightarrow$	$p_{56}n_{85} + p_{36}n_{56} + 2n$
carica elet.	92		56 + 36 + 0
carica bar.	235		141 + 92 + 2
carica lept.	0		0 + 0 + 0
$E$ di riposo particelle			
$-E_S$	-285,80		-188,09 - 129,78
somma	-285,80		-317,87
$\Delta E$			32,07 pJ

Questa reazione è una delle tante sfruttate nei reattori nucleari per ottenere energia.

### La sintesi del carbonio

Analizziamo una reazione che si svolge nelle stelle e che è responsabile della produzione di carbonio nell'universo:



	$3p_2n_2$	$\rightarrow$	$p_6n_6$
carica elet.	$3 \cdot 2$		6
carica bar.	$3 \cdot 4$		12
carica lept.	0		0
$E$ di riposo particelle			
$-E_S$	$-3 \cdot 4,53$		-14,77
somma	-13,59		-14,77
$\Delta E$			1,18 pJ

Sulla Terra la reazione non avviene per colpa dell'alta resistenza di reazione. Questa resistenza può essere diminuita con i metodi classici in chimica: aumentando la temperatura o utilizzando un catalizzatore. Visto che si tratta di una reazione nucleare, la temperatura necessaria affinché avvenga è estremamente elevata: deve essere superiore ai 100 milioni di Kelvin. Nelle stelle questa temperatura viene raggiunta.

### Esercizi

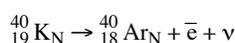
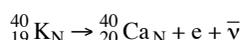
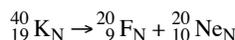
1. Verifica se il deuterio può decadere nei modi seguenti:

$$pn \rightarrow p + n$$

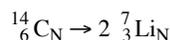
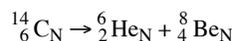
$$pn \rightarrow 2p + e + \bar{\nu}$$

$$pn \rightarrow 2n + \bar{e} + \nu$$

2. L'isotopo di potassio  $^{40}_{19}\text{K}$  è instabile. Quali tra le seguenti reazioni rappresentano un decadimento possibile?



3. Verifica se le reazioni sono possibili:



4. Nel Sole, quattro protoni reagiscono e formano un nucleo di  $^4_2\text{He}$ . Quali altre particelle si formano? Stila il bilancio energetico della reazione.

## 32.9 Radiazione nucleare

Se ci prefiggessimo di determinare la stabilità o meno di un certo nuclide, dovremmo studiare tutte le possibilità di decadimento. Ci accorgeremmo che per molti nuclidi le possibilità sono numerose.

Ma spesso la semplice osservazione ci mostra che il nuclide è stabile. Non decade, malgrado che il bilancio delle cariche e dell'energia lo permetterebbe. Il motivo è che la resistenza di reazione è troppo alta - un fenomeno che già conosciamo dalla chimica.

E osserviamo anche un'altra cosa: la maggior parte delle reazioni che effettivamente avvengono si possono raggruppare in poche categorie. Ora ci occuperemo proprio di queste categorie. Queste reazioni tipiche hanno in comune la presenza di una particella molto piccola tra i prodotti della reazione: un elettrone, un antielettrone, un neutrino o un nucleo di  $^4_2\text{He}$ .

**Nelle reazioni nucleari più frequenti, tra i prodotti della reazione c'è una particella piccola.**

### Produzione di un elettrone

Ne è un esempio il decadimento dell'isotopo di carbonio  $^{14}_6\text{C}$  che abbiamo già discusso nel paragrafo precedente, vedi equazione (2).

### Produzione di un antielettrone

Un'altra categoria di reazioni vede la produzione di un antielettrone. Il potassio  $^{40}_{19}\text{K}$  può decadere secondo la seguente reazione:



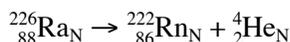
Verifichiamo se la reazione è permessa:

		$P_{19}n_{21}$	$\rightarrow$	$P_{18}n_{22} + \bar{e} + \nu$
carica elet.		19		18 + 1 + 0
carica bar.		40		40 + 0 + 0
carica lept.		0		0 + 1 + (-1)
$E$ di riposo particelle	p	150,320	n	150,525
			$\bar{e}$	0,082
$-E_S$		-54,72		-55,08
somma		95,600		95,527
$\Delta E$				0,073 pJ

La somma a sinistra è maggiore della somma a destra, quindi la reazione è permessa.

### Produzione di un nucleo di ${}^4_2\text{He}$

Un esempio di reazione di questo tipo è il decadimento dell'isotopo del radio  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  in un isotopo di radon e in un nucleo dell'isotopo di elio  ${}^4_2\text{He}$ :



		$P_{88}n_{138}$	$\rightarrow$	$P_{86}n_{136} + P_2n_2$
carica elet.		88		86 + 2
carica bar.		226		222 + 4
carica lept.		0		0 + 0
$E$ di riposo particelle				
$-E_S$		-277,43		-273,68 - 4,53
somma		-277,43		-278,21
$\Delta E$				0,78 pJ

Nella maggior parte delle reazioni nucleari le quantità coinvolte sono piccolissime. Il tasso di trasformazione della reazione è molto, molto basso - se confrontato con quello di una tipica reazione chimica. Di solito si formano delle quantità così piccole di prodotti di reazione che nemmeno la bilancia più sensibile le può misurare. Potremmo concludere che sia molto difficile stabilire se sia avvenuta una reazione nucleare. Invece lo svolgimento di una reazione nucleare si fa spesso notare in maniera molto evidente. Se uno dei prodotti della reazione è una particella leggera, questa si porterà via quasi tutta l'energia in eccesso  $\Delta E$ . Si muoverà a velocità molto alta e la sua presenza potrà essere rilevata in innumerevoli modi diversi.

Mentre per dimostrare che è avvenuta una reazione chimica con metodi chimici, il numero di molecole coinvolte deve essere almeno un miliardo, le reazioni nucleari citate sopra possono essere riconosciute anche quando è un solo nucleo a decadere.

In che modo si scoprì che nel nucleo avvengono delle reazioni? Osservando che certe sostanze emette-

vano una "radiazione" sconosciuta: delle particelle non identificate che si muovevano molto velocemente. Queste sostanze furono dette *radioattive*. Visto che le particelle sono prodotte nelle reazioni nucleari, questa radiazione è chiamata *radiazione nucleare*. Spesso si parla anche di "radiazione radioattiva". Ma a dire la verità è la sostanza a essere radioattiva, non la radiazione.

Dapprima furono identificati solo tre tipi di radiazione nucleare, distinguibili per la diversa carica elettrica. (La carica elettrica delle particelle è facilmente osservabile.) Prima di sapere esattamente di cosa si trattasse, a queste tre radiazioni venne dato un nome: le particelle che in seguito saranno identificate come nuclei di elio furono chiamate raggi  $\alpha$ , gli elettroni veloci furono chiamati raggi  $\beta$ . Inoltre in molte reazioni, cioè quando i prodotti di reazione si trovano in uno stato eccitato, venivano emessi dei fotoni ad alta energia. Questi fotoni furono chiamati raggi  $\gamma$ .

I nomi raggio  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  si usano ancora oggi, anche se ormai sappiamo che si tratta di semplici prodotti di una reazione e che ci sono molti altri prodotti di reazione che non hanno ricevuto un nome.

**Mentre per appurare lo svolgersi di una reazione chimica con metodi chimici ci vogliono molte particelle, in una reazione nucleare si riesce spesso a comprovare il decadimento di un solo nucleo.**

Abbiamo detto che nella maggior parte dei decadimenti di nuclidi instabili uno dei prodotti della reazione è un elettrone, un antielettrone o un nucleo di elio. La fig. 32.6 è una versione molto semplificata della carta dei nuclidi in fig. 32.2.

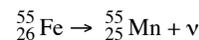
A intensità troppo elevate la radiazione nucleare è molto pericolosa per esseri umani e altri organismi. Per questo motivo la manipolazione di materiale radioattivo sottostà a norme di sicurezza molto restrittive. Ma anche nel nostro ambiente naturale ci sono delle sostanze radioattive, quindi siamo sempre esposti a piccole dosi di radiazione nucleare.

### Esercizi

1. Quale tra le particelle  $e$ ,  $\bar{e}$  o  ${}^4_2\text{He}$  viene prodotta nel decadimento di:

- ${}^{61}_{29}\text{Cu}$
- ${}^{66}_{29}\text{Cu}$
- ${}^{228}_{90}\text{Th}$

2. Dimostra che nella reazione



il bilancio delle cariche è a posto. Tieni conto che nella reazione non c'è il simbolo dei nuclei ma quello degli atomi interi, nube elettronica compresa. In effetti la reazione avviene davvero. Descrivi a parole cosa succede. Stila il bilancio energetico.

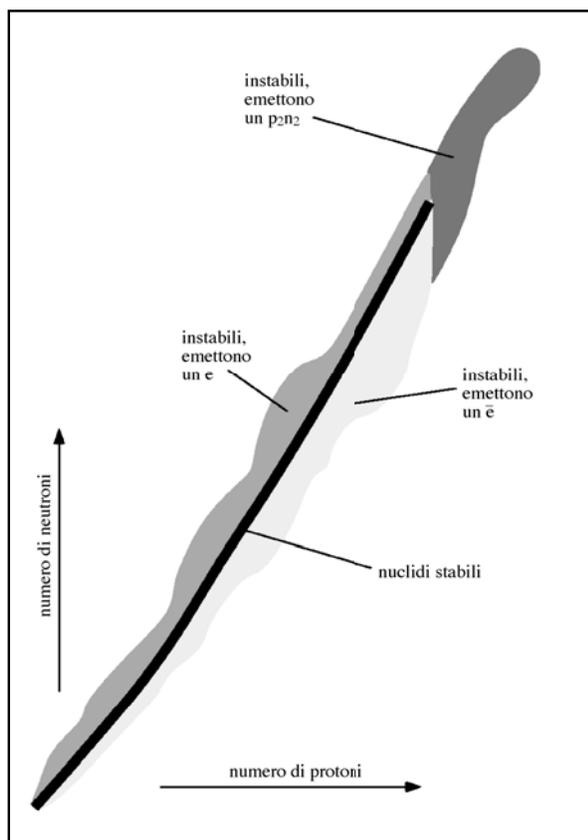


Fig. 32.6. Carta dei nuclidi molto semplificata.

3. (a) Consideriamo la reazione di decadimento di un nuclide instabile A in cui vengono prodotti un nuclide B e un elettrone:

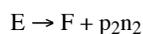


Dove si trova il nuclide A nella carta dei nuclidi? Dove si trova A rispetto a B?

(b) Dove si trovano i nuclidi C e D che appaiono nella reazione di decadimento:



(c) Dove si trovano i nuclidi E e F che appaiono nella reazione di decadimento:



### 32.10 Il tasso di trasformazione in una reazione nucleare

Nella vita di tutti i giorni non ci accorgiamo nemmeno dell'esistenza delle reazioni nucleari perché in generale sono reazioni che si svolgono molto lentamente. La grandezza che ci dice quanto in fretta si svolge una reazione è il *tasso di trasformazione*

$$\text{tasso di trasformazione} = \frac{\text{trasformazione}}{\text{intervallo di tempo}}$$

o in simboli

$$I_n = \frac{n}{t}$$

La trasformazione  $n$  di una reazione è una misura della quantità che viene trasformata. Nelle reazioni chimiche la sua unità di misura è la mole, e il tasso di trasformazione è in mol/s.

Nelle reazioni nucleari i tassi di trasformazione sono così piccoli che anche i prefissi nano, pico o femto non bastano più. Quindi la trasformazione non viene più espressa in mol ma in numero di reazioni elementari, cioè il numero di nuclei che sono decaduti o che sono stati prodotti.

Notoriamente 1 mol corrisponde a  $6 \cdot 10^{23}$  particelle o "quantità elementari":

$$1 \text{ mol} = 6 \cdot 10^{23} \text{ quantità elementari}$$

Di conseguenza il tasso di trasformazione si misura in quantità elementari al secondo:

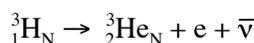
$$1 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23} \frac{\text{quantità elementari}}{\text{s}}$$

All'unità di misura "quantità elementari al secondo" è stato dato un nome: Becquerel, abbreviato Bq. Quindi:

$$1 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23} \text{ Bq}$$

#### Esempio

Come abbiamo già avuto modo di dire, una piccola frazione dell'idrogeno dell'acqua è un isotopo di idrogeno, il trizio. Il trizio decade secondo la reazione:



Il tasso di trasformazione in un metro cubo d'acqua è di circa

$$I_n = 750 \text{ Bq.}$$

Per confronto consideriamo una reazione chimica ritenuta lenta: l'arrugginire di un'automobile.

Ipotizziamo che si formi 1 mol di ruggine all'anno. Quindi otteniamo:

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ anno}} = \frac{1 \text{ mol}}{32 \cdot 10^6 \text{ s}} = \frac{1}{32 \cdot 10^6} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{s}} \\ &= \frac{1}{32 \cdot 10^6} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ Bq} = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ Bq} \end{aligned}$$

Il confronto mostra una differenza caratteristica tra le reazioni chimiche e le reazioni nucleari: il tasso di trasformazione della maggior parte delle reazioni nucleari con cui abbiamo a che fare è nettamente più piccolo del tasso di trasformazione di una tipica reazione chimica. La quantità dei vari elementi chimici presenti sulla Terra cambiano molto poco a causa di reazioni nucleari.

### Il tasso di trasformazione di una tipica reazione nucleare è nettamente più piccolo di quello di una tipica reazione chimica.

Spesso vorremmo accelerare una reazione chimica, cioè aumentare il suo tasso di trasformazione. Possiamo riuscirci in due modi:

- aumentando la temperatura;
- aggiungendo un catalizzatore (una sostanza la cui quantità rimane costante durante la reazione).

La stessa cosa vale per le reazioni nucleari. Possiamo aumentare il tasso di trasformazione aumentando la temperatura o servendoci di un catalizzatore.

Affinché l'aumento del tasso di trasformazione sia sensibile, la temperatura va aumentata di molti milioni di Kelvin. Condizioni del genere si possono trovare nel Sole e in altre stelle. In effetti la produzione di energia nel Sole e nelle altre stelle avviene grazie a delle reazioni nucleari. Il *reattore a fusione* è un altro esempio di aumento del tasso di trasformazione mediante aumento della temperatura. È un tipo di impianto che si trova ancora in fase di sviluppo ma che un giorno dovrebbe servire a produrre energia elettrica.

L'accelerazione di una reazione mediante un catalizzatore è il principio alla base dei reattori nucleari. Il ruolo di catalizzatore è assunto dai neutroni.

Più avanti ci occuperemo ancora di questi processi: delle reazioni nucleari in un reattore nucleare e nel Sole.

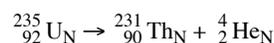
### Le reazioni nucleari, come le reazioni chimiche, si possono accelerare:

- aumentando la temperatura;
- utilizzando un catalizzatore.

### Esercizi

1. L'uranio naturale contiene il 99,28% dell'isotopo  $^{238}_{92}\text{U}$  e lo 0,72% dell'isotopo  $^{235}_{92}\text{U}$ . Quante moli dell'isotopo  $^{235}_{92}\text{U}$  ci sono in 1 kg di uranio?

L'isotopo  $^{235}_{92}\text{U}$  è usato nei reattori nucleari per la produzione di energia. Quando si trova ancora nel reattore decade spontaneamente secondo la reazione:



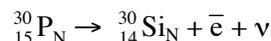
In questa reazione il tasso di trasformazione per 1 kg di miscuglio naturale di isotopi di uranio è

$$I_n = 5,76 \cdot 10^5 \text{ Bq}$$

Converti il tasso di trasformazione in mol/s. Quanto tempo ci vuole prima che l'1% dell'uranio  $^{235}_{92}\text{U}$  sia decaduto?

## 32.11 Il tempo di dimezzamento

L'isotopo di fosforo  $^{30}_{15}\text{P}$  è instabile. Decade secondo



Consideriamo un solo nucleo di questo isotopo di fosforo. Può decadere e lo farà, ma quando? La domanda ha la stessa risposta di un'altra domanda che ci eravamo già posti e alla quale avevamo già risposto: non si sa esattamente quando avverrà la reazione. Ciò non vuol dire che regni il puro arbitrio. Infatti la probabilità che il nucleo decada entro un certo intervallo di tempo è ben definita. In questo caso la probabilità che il nucleo decada in un intervallo di 2,5 minuti è del 50%. È come se ogni 2,5 minuti il nucleo lanciasse una moneta. A seconda che sia uscito testa o croce, nei 2,5 minuti successivi decadrà o non lo farà.

Se il nucleo può decadere in vari modi - e per molti nuclei è proprio così - "lancerà i dadi" anche per decidere in che modo dovrà decadere.

Consideriamo ora un gran numero di nuclei di fosforo  $^{30}_{15}\text{P}$ , diciamo un milione. Sappiamo che dopo 2,5 minuti ne resterà solo la metà, l'altra metà sarà decaduta. In altre parole dopo 2,5 minuti resteranno circa 500 000 nuclei di fosforo. Dopo altri 2,5 minuti saranno solo 250 000, dopo ulteriori 2,5 minuti 125 000, ecc., fig. 32.7.

Di conseguenza il numero di nuclei di silicio, o di antielettroni o di neutrini, aumenta. Dopo 2,5 minuti ce ne saranno 500 000, dopo 5 minuti 750 000, dopo 7,5 minuti 875 000, ecc., fig. 32.8.

Come già in precedenza chiamiamo *tempo di dimezzamento*  $T_{1/2}$  l'intervallo di tempo necessario affinché la quantità della sostanza reagente diminuisca della metà. Quindi per il nostro isotopo di fosforo  $T_{1/2} = 2,5$  minuti.

### Il tempo di dimezzamento è l'intervallo di tempo durante il quale decade metà della quantità di una sostanza.

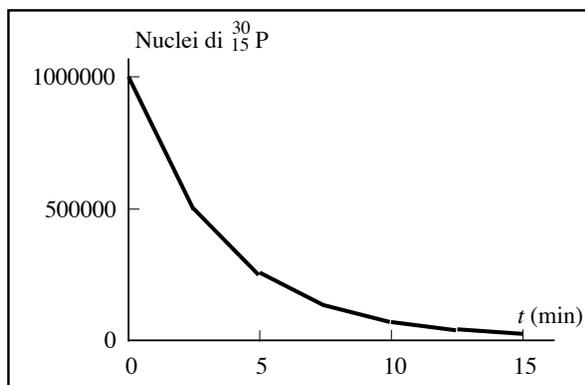


Fig. 32.7. Il numero di nuclei di  $^{30}_{15}\text{P}$  diminuisce della metà in ogni intervallo di 2,5 minuti.

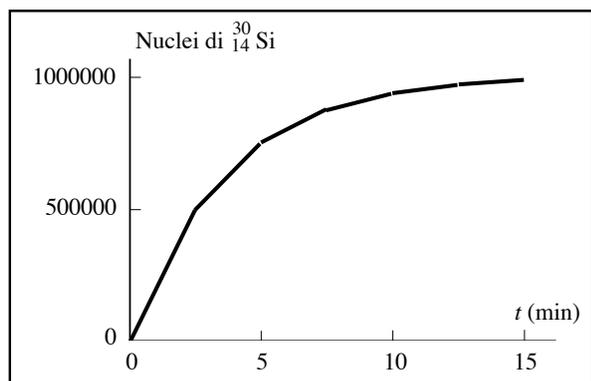


Fig. 32.8. Il numero di nuclei di  $^{30}_{14}\text{Si}$  aumenta.

### Esercizi

1. Un nuclide instabile ha un tempo di dimezzamento di 5 minuti. Dopo 20 minuti quanti nuclei restano dei 400 000 iniziali?
2. La quantità di un nuclide con un tempo di dimezzamento di 2 anni è diminuita da  $8 \cdot 10^8$  a  $1 \cdot 10^8$ . Quanti anni sono trascorsi?
3. In 4 mesi la quantità di un nuclide si è ridotta a 1/16. Quanto vale il tempo di dimezzamento?
4. Un nuclide A decade con un tempo di dimezzamento di 2 giorni in un nuclide B (e due particelle veloci) che a sua volta decade in un nuclide C con un tempo di dimezzamento di 120 anni. All'istante  $t_0$  c'è solo A. Qual è la composizione percentuale del miscuglio di nuclei A, B e C agli istanti

$$t_0 = 0 \text{ anni}$$

$$t_1 = 2 \text{ anni}$$

$$t_2 = 1\,000\,000 \text{ anni?}$$

5. Come sai la quantità di una sostanza i cui nuclei sono instabili diminuisce della metà mentre trascorre il tempo di dimezzamento. Nello stesso intervallo, di che fattore diminuisce il tasso di trasformazione?

## 32.12 Il Sole

Il Sole "funziona" grazie alle reazioni nucleari. Diciendo funziona intendiamo: l'energia che riceviamo dal Sole è fornita dalle reazioni nucleari.

Il Sole è una stella. Nell'universo ci sono innumerevoli altre stelle fatte esattamente come il Sole e nelle quali avvengono gli stessi processi. Noi vediamo il Sole molto più grande delle altre stelle solo perché è molto più vicino.

Per renderci conto della grandezza, della massa, della temperatura e della composizione del Sole, confrontiamolo con la Terra. I dati principali sono riassunti nella tabella 32.4. La distribuzione della densità nel Sole è di particolare interesse. Come mostrato in fig. 32.9, la densità da metà raggio in fuori è

Tabella 32.4

	Terra	Sole
massa	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
raggio	6000 km	700 000 km
densità		
al centro	17 g/cm <sup>3</sup>	100 g/cm <sup>3</sup>
in superficie	3 g/cm <sup>3</sup>	0,0001 g/cm <sup>3</sup>
temperatura		
al centro	6000 K	15 000 000 K
in superficie	300 K	6000 K
composizione (le percentuali si riferiscono alla massa)	35% Fe 30% O 15% Si 13% Mg 7% altro	75% H 23% He 2% altro

molto bassa. Il 90% della massa è racchiuso entro metà raggio. Potremmo quasi dire che in realtà il Sole è grande la metà di quanto sembra.

Inoltre puoi notare che il Sole è composto quasi interamente da idrogeno ed elio.

### Il Sole è composto quasi interamente da idrogeno ed elio.

Il Sole emette luce e, con la luce, energia. La corrente di energia che lascia il Sole in questo modo è molto grande. La sua intensità è

$$P = 2 \cdot 10^{17} \text{ W.}$$

Dove prende questa energia? All'interno del Sole si svolgono delle reazioni nucleari. L'idrogeno si trasforma in elio secondo la reazione:



Verifichiamo i bilanci della reazione:

	4p	→ p <sub>2</sub> n <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> + 2ν <sup>-</sup>
carica elet.	4 · 1	2 + 2 · 1 + 0
carica bar.	4 · 1	4 + 0 + 0
carica lept.	0	0 + 2 · (-1) + 2 · 1
E di riposo particelle	p 2 · 150,320	n 2 · 150,525 e <sup>-</sup> 2 · 0,082
-E <sub>S</sub>	0	-4,53
somma	300,640	296,684
ΔE		3,956 pJ

Per ogni trasformazione elementare c'è un eccesso di  $\Delta E = 3,956 \text{ pJ}$ . Con questa energia, durante la reazione viene prodotta entropia: la temperatura aumenta.

In condizioni normali - cioè in condizioni che noi terrestri definiamo normali - la reazione di sintesi dell'elio non avviene: la resistenza di reazione è troppo elevata. Nel Sole la reazione si avvia solo perché la temperatura è molto alta. In effetti avviene solo al centro del Sole, dove la temperatura raggiun-

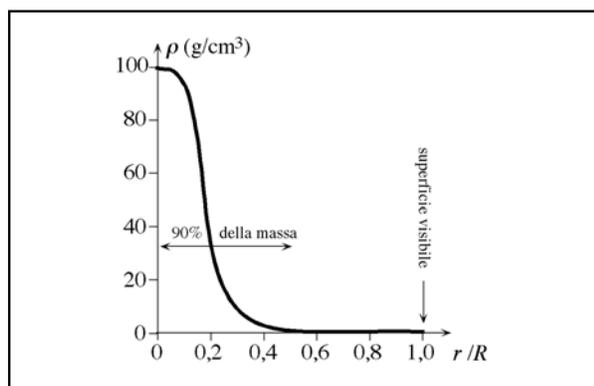


Fig. 32.9. Densità del Sole in funzione della distanza dal centro. La distanza  $r$  è espressa in raggi solari  $R$ . Notiamo che la stragrande maggioranza della massa solare è racchiusa entro metà del raggio, cioè all'interno di  $r/R = 0,5$ .

ge i 15 milioni di Kelvin. Per noi abitanti della Terra è una temperatura enorme. Ma per le reazioni nucleari non è molto elevata. Lo dimostra il fatto che anche a 15 000 000 K questa reazione si svolge ancora abbastanza lentamente. Il tasso di trasformazione di 1 litro di materia solare al centro del Sole, cioè dove fa più caldo, è di soli

$$I_n = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Bq}$$

= 2,5 · 10<sup>9</sup> trasformazioni elementari al secondo.

Confrontalo con l'arrugginimento di un'auto, per il quale avevamo ottenuto  $2 \cdot 10^{16}$  Bq.

È confortante sapere che, mentre un'auto arrugginisce totalmente in pochi decenni, il Sole "funziona" già da 5 miliardi di anni e ha ancora "carburante" (cioè idrogeno) a sufficienza per splendere altrettanto a lungo.

A causa del tasso di trasformazione così basso, anche la quantità di energia fornita ogni secondo da un litro di Sole non è molto alta. L'intensità della corrente di energia si ottiene moltiplicando il tasso di trasformazione  $I_n$  (in Becquerel) per l'energia ceduta in ogni trasformazione elementare, vale a dire per 3,956 pJ:

$$P = 2,5 \cdot 10^9 \cdot 3,956 \text{ pJ/s}$$

$$= 2,5 \cdot 10^9 \cdot 3,956 \cdot 10^{-12} \text{ J/s} = 0,01 \text{ W}$$

Quindi la corrente di energia che esce da ogni litro di Sole grazie alle reazioni nucleari vale 0,01 W.

Confrontiamola con un altro fornitore di energia a noi noto.

Una normale fiamma con un volume di 1 litro produce circa 1000 W, cioè 100 000 volte più di 1 litro di Sole.

Il fatto che complessivamente il Sole ceda così tanta energia dipende dal grande volume del reattore "Sole".

C'è ancora una questione da chiarire: com'è possibile che al centro del Sole la temperatura sia così alta malgrado la reazione si svolge così lentamente?

Che sia possibile generare temperature elevate anche quando il tasso di trasformazione è basso, lo dimostrano anche dei fenomeni che avvengono sulla Terra, per esempio in una balla di fieno. Immaginiamo che il fieno sia appena stato imballato. Nel fieno fresco avviene una reazione molto lenta nella quale viene prodotta pochissima entropia. Quindi la balla di fieno si riscalda molto lentamente. Visto che il centro della balla è ben isolato dall'esterno, lì la temperatura ha un forte aumento. Comunque a un certo punto l'aumento di temperatura si interrompe. A causa della temperatura elevata, dal centro della balla scorre una corrente di entropia verso l'esterno. Quindi la temperatura continuerà ad aumentare fino a quando l'entropia in deflusso sarà equivalente a quella prodotta: si instaura un equilibrio dinamico. La temperatura raggiunta al centro è tanto più alta quanto più lunga è la strada che l'entropia deve percorrere per raggiungere l'esterno. In una balla molto grande può arrivare a valori così elevati che la balla si incendia. Perciò di tanto in tanto è meglio misurare la temperatura al centro della balla di fieno.

È proprio questo effetto balla di fieno a essere responsabile della temperatura elevata all'interno del Sole, e si capisce anche perché la temperatura al centro del Sole possa raggiungere valori così alti. Visto che il Sole è molto grande, lo è anche la strada da percorrere tra la zona centrale dove avviene la reazione e la superficie: svariate centinaia di migliaia di km. Affinché l'entropia riesca a superare questa distanza la differenza di temperatura deve essere di qualche milione di Kelvin.

**Nel Sole, con una reazione nucleare vengono prodotti dei nuclei di elio a partire da nuclei di idrogeno. Malgrado la temperatura elevata il tasso di trasformazione della reazione è molto basso. L'energia in eccesso viene trasportata con l'entropia dalla zona di reazione fino all'esterno. Affinché sia mantenuto l'equilibrio dinamico per l'entropia, l'interno del Sole deve essere molto più caldo dell'esterno.**

### Esercizi

1. Quanta energia viene ceduta dal Sole nella produzione di 1 mol di elio? Confronta con l'energia ceduta nella normale combustione (cioè nella reazione con l'ossigeno) di 1 mol di idrogeno.
2. Ogni corpo umano produce calore: cede energia ed entropia. Stima quanta energia viene ceduta da "1 litro di corpo umano". Confronta con l'energia ceduta da 1 litro di Sole.
3. Nello spazio una stella come il Sole si forma spontaneamente a partire da idrogeno distribuito omogeneamente ma con una densità bassissima. Cerca di descrivere il processo di formazione della stella.

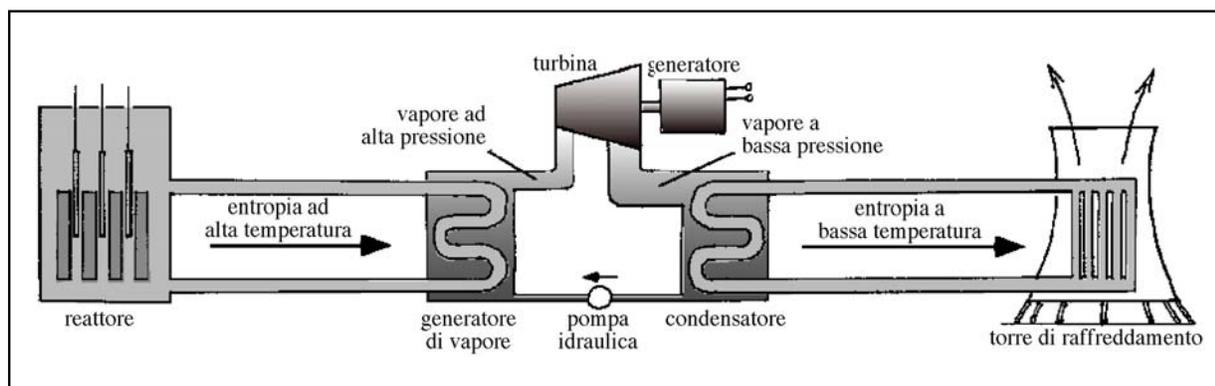


Fig. 32.10. Schema di una centrale nucleare.

### 32.13 Il reattore nucleare

#### La centrale nucleare

La fig. 32.10 è una rappresentazione schematica di una centrale nucleare.

Il funzionamento di una centrale nucleare è molto simile a quello di una centrale a carbone. In entrambe viene prodotto del vapore ad alta pressione e temperatura elevata. In questo modo dell'entropia è portata ad alta temperatura. Nella centrale a carbone l'entropia è prodotta nella caldaia dove viene bruciato il carbone. Nella centrale nucleare la produzione di entropia avviene nel *reattore nucleare*. In questo caso l'energia necessaria è fornita da una reazione nucleare.

L'entropia è trasportata per convezione dal reattore al *generatore di vapore* grazie all'acqua del circuito primario. (Il circuito primario funziona come un impianto di riscaldamento centrale: anche in un impianto del genere l'entropia è trasportata con l'acqua e per convezione da un punto - la caldaia - a un altro - il calorifero.)

Nel generatore di vapore l'acqua del circuito secondario viene trasformata in vapore ad alta pressione - circa 50 bar - e alta temperatura - circa 270° C. Con il vapore si aziona una turbina. All'uscita dalla turbina il vapore ha una pressione di 70 mbar e una temperatura di 40° C. Nel *condensatore* il vapore cede la sua entropia all'acqua del circuito di raffreddamento. Poi l'acqua di raffreddamento disperde per convezione questa entropia nell'ambiente circostante: a un fiume che scorre nei paraggi grazie a un altro scambiatore di calore, oppure all'aria nella torre di raffreddamento.

#### Le reazioni nucleari

Occupiamoci ora delle reazioni che si svolgono nel reattore nucleare. Il nuclide responsabile della produzione di energia è l'isotopo di uranio  $^{235}_{92}\text{U}$ . Nell'uranio naturale è contenuto solo nella misura dello 0,7%. Il restante 99,3% è  $^{238}_{92}\text{U}$ . Per essere usato in un reattore nucleare, l'uranio viene arricchito fino a contenere il 3% di  $^{235}_{92}\text{U}$ .

Il nucleo di  $^{235}_{92}\text{U}$  è instabile e può decadere in due altri nuclidi, per esempio così:



o così:



oppure così:

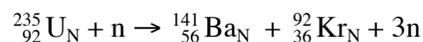


o in molti altri modi diversi.

Puoi notare che, oltre ai due grossi nuclidi, nella reazione sono prodotti anche due neutroni. Vedremo subito che questo è importante.

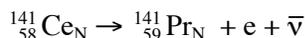
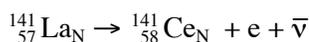
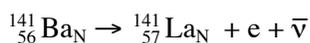
Inizialmente tutte queste reazioni hanno una grande resistenza. Il loro tasso di trasformazione è così piccolo da renderle inadatte alla produzione di energia.

Ma la reazione può essere accelerata con un catalizzatore. E la cosa interessante è che come catalizzatore si possono usare dei neutroni, cioè proprio la sostanza prodotta spontaneamente nella reazione. Le reazioni che producono da sole il catalizzatore che le accelera, sono dette reazioni *autocatalitiche*. Per evidenziare il ruolo del catalizzatore possiamo aggiungere un neutrone a sinistra nell'equazione di reazione. Naturalmente poi a destra c'è un neutrone in più. Così si ottiene per esempio:



L'uranio reagisce con *un* neutrone e ne risulta una produzione di *tre* neutroni.

Il decadimento in due nuclidi pesanti più qualche neutrone è solo il primo passo della reazione. In effetti non solo i neutroni prodotti reagiscono a loro volta, ma anche i nuclidi ottenuti sono instabili. Decadono in una serie di *reazioni consecutive*, nelle quali vengono sempre prodotte delle particelle leggere: elettroni o nuclei di  $^4_2\text{He}$ . Prendiamo come esempio il nucleo di  $^{141}_{56}\text{Ba}$  prodotto dal decadimento dell'uranio:



Il nucleo di  ${}^{141}_{56}\text{Ba}$  decade dapprima in un nucleo instabile di  ${}^{141}_{57}\text{La}$ , che a sua volta decade in un nucleo instabile di  ${}^{141}_{58}\text{Ce}$ , che poi decade in un nucleo  ${}^{141}_{59}\text{Pr}$ , quest'ultimo stabile.

Tutte queste reazioni contribuiscono alla produzione di energia, anche se in misura molto diversa. Il 95% circa dell'energia ceduta, è quella prodotta nel decadimento dell'uranio catalizzato dai neutroni, le altre reazioni contribuiscono solo nella misura del 5%.

Malgrado il contributo ridotto al bilancio energetico del reattore, le reazioni consecutive hanno molta importanza nel funzionamento di un reattore: sono il motivo per cui un reattore necessita di misure di sicurezza molto costose.

**In un reattore nucleare i nuclei di  ${}^{235}_{92}\text{U}$  decadono in due nuclidi grosso modo grandi uguali e alcuni neutroni. La reazione è catalizzata dai neutroni (autocatalisi). Tutti i nuclidi prodotti sono instabili e decadono a loro volta.**

### La gestione del reattore

Ricordiamoci come si controlla la combustione in una centrale a carbone: si

esattamente come per un bruciatore a olio combustibile, per una stufa a carbone o per il fuoco nel caminetto di casa. Se si vuole accelerare la reazione si aggiunge più combustibile e più ossigeno, se si vuole diminuire il tasso di trasformazione si toglie combustibile e si riduce l'apporto di ossigeno.

Visto che nel reattore nucleare la reazione è autocatalitica, si può procedere diversamente: il reattore viene rifornito di "combustibile" una volta all'anno, cioè si immette l'uranio necessario affinché funzioni per un anno intero. Il tasso di trasformazione può essere modificato influenzando la quantità del catalizzatore - cioè dei neutroni. Si diminuisce la concentrazione di neutroni nel reattore, inserendo delle *sbarre di regolazione* nell'area dove avviene la reazione. Le sbarre di regolazione sono fatte di un materiale che assorbe i neutroni, cioè che reagisce particolarmente bene con i neutroni.

### Le misure di sicurezza

Durante la fissione catalitica dell'uranio vengono prodotti moltissimi nuclidi diversi; tutti sono instabili e reagiscono a loro volta. Ma le reazioni consecutive non sono accelerate da un catalizzatore.

Ognuna possiede una velocità caratteristica: alcune sono molto veloci, altre molto lente.

Abbiamo già detto che nelle reazioni consecutive accanto a un nuclide pesante viene sempre prodotta anche una particella leggera: un elettrone o un nucleo di  ${}^4_2\text{He}$ . Sappiamo anche che in questo caso quasi tutta l'energia in eccesso viene portata via proprio dalla particella leggera. Ciò significa che i prodotti del decadimento dell'uranio sono radioattivi. A causa dell'elevato tasso di trasformazione nel reattore, la radiazione nucleare emessa dai prodotti della reazione è molto intensa e pericolosa.

Da qui nasce uno dei problemi nella gestione di un reattore. I prodotti del decadimento dell'uranio non possono essere dispersi nell'ambiente. Impedirlo non sarebbe difficile, se non fosse per un altro problema: la produzione di energia in un reattore non può essere interrotta di colpo. Con le sbarre di regolazione si riesce a fermare rapidamente la reazione di decadimento dell'uranio, ma non si ha nessuna influenza sulle reazioni consecutive. Le reazioni consecutive continuano e si spengono solo poco a poco. La tabella 32.5 mostra come la produzione di energia continui anche dopo l'interruzione della fissione dell'uranio.

A regime normale una grossa centrale produce circa 1000 MW. Se la si spegne, dopo un giorno produce ancora lo 0,7% di 1000 MW, vale a dire 7 MW. Quindi si deve assicurare l'estrazione dell'energia dal reattore fino a qualche giorno dopo lo spegnimento. Altrimenti il reattore potrebbe surriscaldarsi al punto da fondere il contenitore.

I sistemi di sicurezza delle centrali nucleari devono essere predisposti per poter disperdere il calore prodotto anche in caso d'emergenza, in modo da ridurre al minimo il rischio di fusione del contenitore del reattore. Se ciò dovesse succedere comunque, altre barriere di sicurezza devono impedire che le sostanze radioattive finiscano per disperdersi nell'ambiente.

**A causa delle reazioni consecutive dei prodotti del decadimento dell'uranio, un reattore necessita di costosi sistemi di sicurezza, in quanto**

**- i prodotti di reazione dell'uranio sono radioattivi e non devono disperdersi nell'ambiente;**

**- la produzione di energia delle reazioni consecutive**

Tabella 32.5

Tempo dopo lo spegnimento	Produzione di energia (rispetto al regime normale)
5 secondi	5%
1 minuto	4%
10 minuti	3%
1 ora	1%
1 giorno	0,7%
2 giorni	0,5%

### Le scorie radioattive

Quando una volta all'anno il reattore viene caricato di nuovo uranio, prima si devono togliere i prodotti di reazione dell'anno precedente. Questi prodotti di reazione sono un miscuglio di molti diversi nuclidi. Molti dei nuclidi sono instabili e i loro tempi di dimezzamento sono assai diversi.

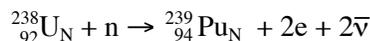
Naturalmente per estrarre i prodotti della reazione non si può aspettare che tutti i nuclidi si siano trasformati in nuclidi stabili, visto che alcuni hanno un tempo di dimezzamento di anni, altri di decenni, altri ancora di secoli o millenni.

Quindi i prodotti di reazione estratti dal reattore sono ancora radioattivi e lo restano per lungo tempo. Devono essere stoccati in depositi dai quali non possano sfuggire e contaminare il ciclo biologico.

### Il plutonio

Il decadimento dell'uranio e dei suoi prodotti è la reazione più frequente e importante che avviene in un reattore. Ma avvengono anche reazioni di un altro tipo: reazioni di sintesi.

L'uranio  $^{238}_{92}\text{U}$  reagisce con i neutroni a formare nuclidi più pesanti, tra i quali il plutonio è particolarmente importante. Il plutonio è un elemento che non appare in natura. Nel reattore il nuclide  $^{239}_{94}\text{Pu}$  appare nella reazione



Quindi le scorie radioattive contengono anche plutonio. Il plutonio  $^{239}_{94}\text{Pu}$  è radioattivo, decade con un tempo di dimezzamento di 2400 anni emettendo nuclei di elio.

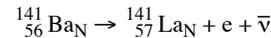
Come il decadimento dell'uranio  $^{238}_{92}\text{U}$  anche quello del plutonio  $^{239}_{94}\text{Pu}$  è catalizzato dai neutroni. Ciò significa che anche il  $^{239}_{94}\text{Pu}$  potrebbe essere usato come combustibile nel reattore. Prima però dovrebbe essere separato dalle altre sostanze di scarto, e questo crea un altro problema. Con il plutonio si possono costruire con relativa facilità delle bombe atomiche.

### Esercizi

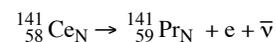
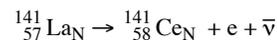
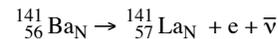
1. Confronta la produzione di energia nella reazione di decadimento dell'uranio



con l'energia prodotta nella reazione consecutiva



2. Consideriamo le reazioni consecutive che dal  $^{141}_{56}\text{Ba}$  producono dapprima  $^{141}_{57}\text{La}$ , poi  $^{141}_{58}\text{Ce}$  e infine  $^{141}_{59}\text{Pr}$ :



I tempi di dimezzamento dei tre nuclidi instabili sono:

$$T_{1/2} (^{141}_{56}\text{Ba}) = 18 \text{ minuti}$$

$$T_{1/2} (^{141}_{57}\text{La}) = 4 \text{ ore}$$

$$T_{1/2} (^{141}_{58}\text{Ce}) = 32 \text{ giorni}$$

Cominciamo all'istante  $t_0$  con una certa quantità di  $^{141}_{56}\text{Ba}$ . Fai una stima grossolana ("molto", "medio", "poco", "molto poco") delle quantità di Ba, La, Ce e Pr

- dopo 30 secondi
- dopo 18 minuti
- dopo 5 giorni
- dopo 1 anno.





**Gruppi principali**

<b>I</b>	<b>H</b> 1 1.0	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>
<b>1</b>	<b>Li</b> 3 6.9	<b>Be</b> 4 9.0	<b>B</b> 5 10.8	<b>C</b> 6 12.0	<b>N</b> 7 14.0	<b>O</b> 8 16.0	<b>F</b> 9 19.0	<b>Ne</b> 10 20.2
<b>2</b>	<b>Na</b> 11 23.0	<b>Mg</b> 12 24.3	<b>Al</b> 13 27.0	<b>Si</b> 14 28.1	<b>P</b> 15 31.0	<b>S</b> 16 32.1	<b>Cl</b> 17 35.5	<b>Ar</b> 18 39.9
<b>3</b>	<b>K</b> 19 39.1	<b>Ca</b> 20 40.1	<b>Ga</b> 31 69.7	<b>Ge</b> 32 72.6	<b>As</b> 33 74.9	<b>Se</b> 34 79.0	<b>Br</b> 35 79.9	<b>Kr</b> 36 83.8
<b>4</b>	<b>Rb</b> 37 85.5	<b>Sr</b> 38 87.6	<b>In</b> 49 114.8	<b>Sn</b> 50 118.7	<b>Sb</b> 51 121.8	<b>Te</b> 52 127.6	<b>I</b> 53 126.9	<b>Xe</b> 54 131.3
<b>5</b>	<b>Cs</b> 55 132.9	<b>Ba</b> 56 137.3	<b>Tl</b> 81 204.4	<b>Pb</b> 82 207.2	<b>Bi</b> 83 209.0	<b>Po</b> 84 209	<b>At</b> 85 210	<b>Rn</b> 86 222
<b>6</b>	<b>Fr</b> 87 223	<b>Ra</b> 88 226						
<b>7</b>								

**C** ← Abbreviazione  
 6 ← 12.0 ← Massa/quantità di sostanza in g/mol  
 ↑ Numero atomico

**Gruppi secondari**

<b>III A</b>	<b>IV A</b>	<b>V A</b>	<b>VI A</b>	<b>VII A</b>	<b>VIII A</b>	<b>VIII A</b>	<b>IX A</b>	<b>X A</b>	<b>II A</b>
<b>Sc</b> 21 45.0	<b>Ti</b> 22 47.9	<b>V</b> 23 50.9	<b>Cr</b> 24 52.0	<b>Mn</b> 25 54.9	<b>Fe</b> 26 55.8	<b>Co</b> 27 58.9	<b>Ni</b> 28 58.7	<b>Cu</b> 29 63.5	<b>Zn</b> 30 65.4
<b>Y</b> 39 88.9	<b>Zr</b> 40 91.2	<b>Nb</b> 41 92.9	<b>Mo</b> 42 95.9	<b>Ru</b> 44 101.1	<b>Rh</b> 45 102.9	<b>Pd</b> 46 106.4	<b>Ag</b> 47 107.9	<b>Au</b> 79 197.0	<b>Cd</b> 48 112.4
<b>La</b> 57 138.9	<b>Hf</b> 72 178.5	<b>Ta</b> 73 180.9	<b>W</b> 74 183.9	<b>Re</b> 75 186.2	<b>Os</b> 76 190.2	<b>Ir</b> 77 192.2	<b>Pt</b> 78 195.1	<b>Hg</b> 80 200.6	<b>Pb</b> 82 207.2
<b>Ac</b> 89 227	<b>Ku</b> 104 261	<b>Ha</b> 105 262							

**Lantanidi**

<b>Ce</b> 58 140.1	<b>Pr</b> 59 140.9	<b>Nd</b> 60 144.2	<b>Pm</b> 61 145	<b>Sm</b> 62 150.4	<b>Eu</b> 63 152.0	<b>Gd</b> 64 157.3	<b>Tb</b> 65 158.9	<b>Dy</b> 66 162.5	<b>Ho</b> 67 164.9	<b>Er</b> 68 167.3	<b>Tm</b> 69 168.9	<b>Yb</b> 70 173.0	<b>Lu</b> 71 175.0
<b>Th</b> 90 232	<b>Pa</b> 91 231	<b>U</b> 92 238	<b>Np</b> 93 237	<b>Pu</b> 94 244	<b>Am</b> 95 243	<b>Cm</b> 96 247	<b>Bk</b> 97 247	<b>Cf</b> 98 251	<b>Es</b> 99 254	<b>Fm</b> 100 257	<b>Md</b> 101 258	<b>No</b> 102 259	<b>Lr</b> 103 260



# Appendice

## Tabella dei potenziali chimici e delle entropie molari

I valori nella tabella valgono per sostanze a condizioni normali, cioè per una temperatura di 25 °C e una pressione di 1 bar. Per le sostanze in soluzione i valori si riferiscono a soluzioni monomolari: un litro di soluzione contiene 1 mol della sostanza.

Per alcune sostanze in soluzione i valori di entropia molare sono negativi. Così ad esempio per il  $\text{Ca}^{++}$  si trova:  $S/n = -55,23 \text{ Ct/mol}$ . Naturalmente non esistono entropie negative. Questo valore è solo il risultato di un artificio nella procedura di calcolo. In soluzione acquosa gli ioni sono circondati da un cosiddetto strato idratato: attorno a ogni ione si accumula un certo numero di molecole d'acqua. Ione e strato idratato formano una specie di grossa molecola. Quindi in una soluzione, per esempio di  $\text{CaCl}_2$ , avviene la seguente reazione:



Il  $\text{CaCl}_2$  si trasforma in ioni  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Cl}^-$  e l'acqua "normale" va a finire negli strati idratati. Normalmente la reazione si scrive semplicemente:



in altre parole in entrambi i termini dell'equazione si tralascia l'acqua. Per ottenere il giusto bilancio dell'entropia, si aggiunge l'entropia ceduta nella formazione dello strato idratato all'entropia degli ioni. Quindi, nella tabella, in corrispondenza di  $\text{Ca}^{++}$  si trova l'entropia molare



e in corrispondenza di  $\text{Cl}^-$  si trova l'entropia molare



Prendendo questi valori possiamo usare l'equazione di reazione semplificata per stilare il bilancio dell'entropia.

Visto che l'entropia molare dell'acqua normale è molto maggiore di quella dell'acqua negli strati idratati, può succedere che l'entropia molare complessiva riferita a uno ione risulti negativa.

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
<b>Ag</b>	argento, gass.	245,68	172,89	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	liq.	- 1483,14	99,28
Ag	solido	0,00	42,55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha$ , solido	- 1581,88	50,94
Ag <sup>+</sup>	sol.ac.	77,12	72,68	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ , solido	- 1563,94	52,51
AgBr	solido	- 96,90	107,11	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	solido	- 3100,13	239,32
AgCl	solido	- 109,80	96,23	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	solido	- 4622,57	469,03
AgI	solido	- 66,19	115,48	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	andalusite, solido	- 2597,43	93,22
AgNO <sub>2</sub>	solido	19,08	128,20	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	cianite, solido	- 2596,17	83,81
AgNO <sub>3</sub>	solido	- 33,47	140,92	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> · 2H <sub>2</sub> O	sillimanite, solido	- 2625,88	96,19
AgN <sub>3</sub>	solido	376,14	104,18	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	halloysite, solido	- 3759,32	203,34
Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	solido	- 436,81	167,36	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	caolinite, solido	- 3778,15	202,92
Ag <sub>2</sub> O	solido	- 11,21	121,34	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	solido	- 196,23	88,95
Ag <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	solido	27,61	117,15	Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	mullite, solido	- 6441,94	274,89
Ag <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	121,34	100,42	<b>Ar</b>	argon, gass.	0,00	154,73
Ag <sub>2</sub> S	ortoromb., solido	- 40,67	144,01	Ar	sol.ac.	16,32	59,41
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	solido	- 618,48	200,41	<b>As</b>	arsenico, gass.	261,08	174,10
<b>Al</b>	alluminio, gass.	285,77	164,45	As	grigio, metall., solido	0,00	35,15
Al	liq.	6,61	35,23	AsCl <sub>3</sub>	gass.	- 248,95	327,06
Al	solido	0,00	28,32	AsCl <sub>3</sub>	liq.	- 259,41	216,31
Al <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 485,34-	321,75	AsF <sub>3</sub>	liq.	- 909,14	181,21
AlBr <sub>3</sub>	solido	- 505,01	184,10	AsI <sub>3</sub>	solido	- 59,41	213,05
Al(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	liq.	- 10,04	209,41	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	monoclinico, solido	- 577,02	117,15
AlCl <sub>3</sub>	gass.	- 570,05	314,29	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	solido	- 782,41	105,44
AlCl <sub>3</sub>	solido	- 630,06	109,29	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	solido	- 168,62	163,59
AlF <sub>3</sub>	gass.	- 1192,75	276,77	As <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	cubico, solido	- 1152,52	214,22
AlF <sub>3</sub>	solido	- 1431,15	66,48	<b>Au</b>	oro, gass.	326,36	180,39
AlI <sub>3</sub>	solido	- 300,83	158,99	Au	solido	0,00	47,40
AlN	solido	- 287,02	20,17	Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	163,30	125,00
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	solido	- 2203,88	467,77	<b>B</b>	boro, gass.	511,67	153,34
AlO(OH)	bohmite, solido	- 912,95	48,45	B	liq.	19,35	14,78
AlO(OH)	$\alpha$ -diasporo, solido	- 920,48	35,27	B	solido	0,00	5,87
Al(OH) <sub>3</sub>	idrargillite, solido	- 1143,91	70,12	BBr <sub>3</sub>	gass.	- 232,46	324,13
AlPO <sub>4</sub>	berlinite, solido	- 1601,22	90,79	BBr <sub>3</sub>	liq.	- 238,49	229,70
Al <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub>	gass.	- 1220,47	489,53	B(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	gass.	- 35,98	314,64

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
BCl <sub>3</sub>	gass.	- 387,98	290,07	BeCl <sub>2</sub>	$\alpha$ , solido	- 446,26	82,68
BCl <sub>3</sub>	liq.	- 387,44	206,27	BeF <sub>2</sub>	gass.	- 800,54	227,44
BF <sub>3</sub>	gass.	- 1120,35	254,01	BeF <sub>2</sub>	solido	- 979,38	53,35
BN	solido	- 228,45	14,81	Be(OH) <sub>2</sub>	gass.	- 625,37	247,69
BO <sub>2</sub> H	monoclinico, solido	- 723,41	37,66	Be(OH) <sub>2</sub>	$\alpha$ , solido	- 814,51	49,37
BO <sub>2</sub> H	ortoromb., solido	- 721,74	50,21	<b>Bi</b>	bismuto, gass.	168,20	186,90
BO <sub>3</sub> H <sub>3</sub>	gass.	- 928,43	295,14	Bi	solido	0,00	56,74
BO <sub>3</sub> H <sub>3</sub>	solido	- 969,01	88,83	BiClO	solido	- 322,17	120,50
B <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	gass.	- 460,66	357,31	BiCl <sub>3</sub>	solido	- 315,06	176,98
B <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	liq.	- 464,84	262,34	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 493,71	151,46
B <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	gass.	- 1410,43	317,15	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	solido	- 140,58	200,41
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	gass.	- 822,58	283,67	<b>Br</b>	bromo, gass.	82,43	174,91
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	liq.	- 1180,37	78,40	Br <sup>-</sup>	sol.ac.	- 103,97	82,42
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 1193,70	53,97	BrCl	gass.	- 0,96	239,99
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	amorfo	- 1182,40	77,82	BrF	gass.	- 109,16	228,86
B <sub>3</sub> N <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	liq.	- 392,79	199,58	BrF <sub>3</sub>	gass.	- 229,45	292,42
B <sub>4</sub> C	solido	- 71,13	27,11	BrF <sub>3</sub>	liq.	- 240,58	178,24
<b>Ba</b>	bario, gass.	144,77	170,28	BrF <sub>5</sub>	gass.	- 350,62	320,08
Ba	solido	0,00	66,94	BrF <sub>5</sub>	liq.	- 351,87	225,10
Ba <sup>++</sup>	sol.ac.	- 560,66	12,55	BrH	gass.	- 53,43	198,59
BaCO <sub>3</sub>	witherite, solido	- 1138,88	112,13	Br <sub>2</sub>	gass.	3,14	245,35
BaCl <sub>2</sub>	solido	- 810,86	125,52	Br <sub>2</sub>	liq.	0,00	152,23
BaF <sub>2</sub>	solido	- 1148,51	96,23	<b>C</b>	carbonio, gass.	669,58	157,99
BaI <sub>2</sub>	solido	- 598,00	167,40	C	diamante, solido	2,90	2,38
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	solido	- 794,96	213,80	C	grafite, solido	0,00	5,74
BaO	solido	- 528,44	70,29	CBr <sub>4</sub>	gass.	66,94	357,94
Ba(OH) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	solido	- 2793,24	426,77	CBr <sub>4</sub>	monoclinico, solido	47,70	212,55
BaS	solido	- 456,06	78,24	CCl <sub>2</sub> O	cloruro di carbonile, gass.	- 204,60	283,42
BaSO <sub>4</sub>	solido	- 1353,11	132,21	CCl <sub>4</sub>	gass.	- 60,63	309,74
<b>Be</b>	berillio, gass.	289,66	136,17	CCl <sub>4</sub>	liq.	- 65,27	216,40
Be	liq.	9,96	16,54	CF <sub>4</sub>	gass.	- 878,64	261,50
Be	solido	0,00	9,54	CH	gass.	560,75	182,92
BeCl <sub>2</sub>	gass.	- 366,10	251,04	CHCl <sub>3</sub>	cloroformio, gass.	- 70,41	295,51

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
CH <sub>2</sub>	gass.	371,87	181,04	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	acido acetico, liq.	- 389,95	159,83
CH <sub>2</sub>	polietilene, solido	4,40	25,34	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	acido acetico, sol.ac.	- 396,56	178,66
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	diclorometano, gass.	- 68,97	270,18	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	cloruro di etile, gass.	- 60,46	275,89
CH <sub>2</sub> O	formaldeide, gass.	- 112,97	218,66	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	cloruro di etile, liq.	- 59,41	190,79
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	acido formico, gass.	- 350,03	251,60	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N	acido aminoacetico, solido	- 367,02	109,20
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	acido formico, liq.	- 359,57	129,00	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	etano, gass.	- 32,62	229,50
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	acido formico, sol.ac.	- 372,38	163,18	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	dimetiletere, gass.	- 114,07	266,60
CH <sub>3</sub>	gass.	147,92	194,05	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	etanolo, gass.	- 168,57	282,00
CH <sub>3</sub> Br	bromometano, gass.	- 25,94	246,27	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	etanolo, liq.	- 174,89	160,67
CH <sub>3</sub> Cl	clorometano, gass.	- 62,95	234,26	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	glicole etilenico, liq.	- 327,07	179,50
CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	nitrometano, gass.	- 6,92	275,00	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	propadiene, gass.	202,38	234,90
CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	nitrometano, liq.	- 14,55	171,90	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	propino, gass.	194,16	248,10
CH <sub>3</sub> NO <sub>3</sub>	nitrato di metile, liq.	- 40,52	217,00	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	propilene, gass.	74,66	226,90
CH <sub>4</sub>	metano, gass.	- 50,81	186,10	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	ciclopropano, gass.	104,11	237,90
CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	urea, solido	- 196,82	104,60	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	propanone, acetone, gass.	- 151,82	294,90
CH <sub>4</sub> O	metanolo, gass.	- 162,52	239,70	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	propanona, acetone, liq.	- 154,83	200,00
CH <sub>4</sub> O	metanolo, liq.	- 166,34	126,70	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	propano, gass.	- 23,43	269,90
CO	gass.	- 137,15	197,56	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	butene-(1), gass.	72,03	307,40
CO <sub>2</sub>	gass.	- 394,36	213,64	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	etilestere di ac. acet., liq.	- 323,19	259,00
CO <sub>2</sub>	sol.ac.	- 386,00	113,00	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	butano, gass.	- 15,62	310,00
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ione carbonato, sol.ac.	- 527,90	- 56,90	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2-metilpropano, gass.	- 17,92	294,60
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	sol.ac.	- 586,85	91,21	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	ciclopentano, gass.	38,67	292,90
CS	gass.	184,10	210,46	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	ciclopentano, liq.	36,49	204,10
CS <sub>2</sub>	gass.	66,91	237,79	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	pentano, gass.	- 8,11	348,40
CS <sub>2</sub>	liq.	65,27	151,34	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	pentano, liq.	- 9,21	262,70
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	dicloroetano, gass.	198,41	271,96	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	clorobenzolo, liq.	93,65	194,10
C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	tetracloroetilene, gass.	21,56	343,31	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	nitrobenzolo, liq.	141,62	224,30
C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub>	esacloroetano, gass.	- 50,00	397,77	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	benzolo, gass.	129,73	269,20
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	etino, acetilene, gass.	209,20	200,83	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	cicloesano, gass.	31,75	298,20
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	etano, etilene, gass.	68,12	219,45	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	cicloesano, liq.	26,83	204,10
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	acetaldeide, gass.	- 132,92	264,20	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	esano, gass.	0,30	386,80
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	epossietano, gass.	- 11,84	243,70	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	esano, liq.	- 4,26	296,00
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	acido acetico, gass.	- 378,95	282,50	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	metilbenzolo, toluolo, gass.	122,39	319,70

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	metilbenzolo, toluolo, liq.	110,61	219,00	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$\beta$ , solido	- 3899,49	235,98
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	ottano, gass.	17,44	463,70	<b>Cd</b>	cadmio, gass.	77,45	167,64
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	ottano, liq.	6,41	361,20	Cd	solido	0,00	51,76
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	zucchero di canna, solido	- 1543,52	360,00	Cd <sup>++</sup>	sol.ac.	- 77,58-	73,22
<b>Ca</b>	calcio, gass.	145,53	154,78	CdBr <sub>2</sub>	solido	- 296,31	137,24
Ca	liq.	8,19	50,65	CdCO <sub>3</sub>	solido	- 669,44	92,47
Ca	$\alpha$ , solido	0,00	41,55	CdCl <sub>2</sub>	solido	- 343,97	115,27
Ca	$\beta$ , solido	0,22	42,47	CdF <sub>2</sub>	solido	- 647,68	77,40
Ca <sup>++</sup>	sol.ac.	- 553,04-	55,23	CdI <sub>2</sub>	solido	- 201,38	161,08
CaBr <sub>2</sub>	solido	- 656,05	129,70	CdO	solido	- 228,45	54,81
CaCO <sub>3</sub>	aragonite, solido	- 1127,71	88,70	CdS	solido	- 156,48	64,85
CaCO <sub>3</sub>	calcite, solido	- 1128,76	92,88	CdSO <sub>4</sub>	solido	- 822,78	123,04
CaC <sub>2</sub>	solido	- 67,78	70,29	CdSO <sub>4</sub> · 8/3 H <sub>2</sub> O	solido	- 1457,98	229,70
CaCl	gass.	- 130,96	241,42	<b>Cl</b>	cloro, gass.	105,03	165,10
CaCl <sub>2</sub>	gass.	- 479,18	289,95	Cl <sup>-</sup>	sol.ac.	- 131,26	56,48
CaCl <sub>2</sub>	liq.	- 732,16	123,88	ClF	gass.	- 55,94	217,78
CaCl <sub>2</sub>	solido	- 750,19	113,80	ClF <sub>3</sub>	gass.	- 123,01	281,50
CaCrO <sub>4</sub>	solido	- 1277,38	133,89	ClF <sub>5</sub>	gass.	- 146,77	310,62
CaF <sub>2</sub>	gass.	- 793,27	273,68	ClH	gass.	- 95,30	186,79
CaF <sub>2</sub>	solido	- 1161,90	68,87	ClO <sub>2</sub>	gass.	120,50	256,73
CaH <sub>2</sub>	solido	- 149,79	41,84	Cl <sub>2</sub>	gass.	0,00	222,97
CaI <sub>2</sub>	solido	- 529,69	142,26	Cl <sub>2</sub>	sol.ac.	6,90	121,34
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	solido	- 741,99	193,30	<b>Co</b>	cobalto, gass.	380,33	179,41
CaO	solido	- 604,17	39,75	Co	$\alpha$ , esagonale, solido	0,00	30,04
Ca(OH) <sub>2</sub>	solido	- 896,76	76,15	Co	$\beta$ , cub. a facce centr., solido	0,25	30,71
CaPO <sub>4</sub> H	solido	- 1679,88	87,86	Co <sup>++</sup>	sol.ac.	- 54,39-	112,97
CaS	solido	- 477,39	56,48	Co <sup>+++</sup>	sol.ac.	133,89-	305,43
CaSO <sub>4</sub>	anidrite, solido	- 1320,30	98,32	CoCl <sub>2</sub>	solido	- 269,87	109,16
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	gesso, solido	- 1795,73	193,97	CoF <sub>2</sub>	solido	- 647,26	81,96
CaSiO <sub>3</sub>	$\alpha$ -wollastonite, solido	- 1495,36	87,45	CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	solido	- 1032,61	134,72
CaSiO <sub>3</sub>	$\beta$ -wollastonite, solido	- 1498,71	82,01	CoO	solido	- 214,22	52,97
Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	solido	- 368,61	104,60	CoSO <sub>4</sub>	solido	- 782,41	117,99
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$\alpha$ , solido	- 3889,86	241,00	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	solido	- 774,04	102,51

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
<b>Cr</b>	cromo, gass.	351,87	174,39	CuS	solido	- 53,56	66,53
Cr	solido	0,00	23,77	CuSO <sub>4</sub>	solido	- 661,91	108,78
CrCl <sub>2</sub>	solido	- 356,06	115,31	CuSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	solido	- 918,22	146,02
CrCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	cloruro di cromile, liq.	- 510,87	221,75	CuSO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O	solido	- 1400,18	221,33
CrCl <sub>3</sub>	solido	- 486,18	123,01	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	solido	- 1880,06	300,41
CrF <sub>3</sub>	solido	- 1087,84	93,89	Cu <sub>2</sub> O	solido	- 146,02	93,14
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 1058,13	81,17	Cu <sub>2</sub> S	$\alpha$ , solido	- 86,19	120,92
<b>Cs</b>	cesio, gass.	49,72	175,49	<b>F</b>	fluoro, gass.	61,92	158,64
Cs	liq.	0,03	92,07	F <sup>-</sup>	sol.ac.	- 278,82-	13,81
Cs	solido	0,00	85,15	FH	gass.	- 273,22	173,67
Cs <sup>+</sup>	sol.ac.	- 282,04	133,05	FH	sol.ac.	- 296,85	88,70
CsBr	solido	- 383,25	121,34	F <sub>2</sub>	gass.	0,00	202,67
CsCl	gass.	- 257,85	255,96	F <sub>2</sub> O	gass.	- 4,60	247,32
CsCl	solido	- 414,37	101,18	<b>Fe</b>	gass.	370,70	180,38
CsClO <sub>4</sub>	solido	- 306,60	175,27	Fe	liq.	11,05	34,29
CsF	gass.	- 373,35	243,09	Fe	$\alpha$ , solido	0,00	27,28
CsF	solido	- 525,39	88,28	Fe <sup>++</sup>	sol.ac.	- 78,87-	137,65
CsH	gass.	101,67	214,43	Fe <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 4,60-	315,89
CsI	solido	- 333,46	129,70	FeCO <sub>3</sub>	siderite, solido	- 666,72	92,88
<b>Cu</b>	rame, gass.	298,61	166,27	Fe(CO) <sub>5</sub>	liq.	- 705,42	338,07
Cu	liq.	8,37	36,25	FeCl <sub>2</sub>	gass.	- 159,62	287,48
Cu	solido	0,00	33,11	FeCl <sub>2</sub>	solido	- 302,34	117,95
Cu <sup>+</sup>	sol.ac.	50,00	40,58	FeCl <sub>3</sub>	gass.	- 247,87	344,10
Cu <sup>++</sup>	sol.ac.	65,52-	99,58	FeCl <sub>3</sub>	solido	- 334,05	142,26
CuBr	solido	- 100,83	96,11	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	solido	- 1343,90	146,02
CuCO <sub>3</sub> · Cu(OH) <sub>2</sub>	malachite, solido	- 893,70	186,19	FeO	gass.	217,66	241,84
CuCl	gass.	63,50	237,09	FeO	solido	- 245,14	57,49
CuCl	solido	- 119,87	86,19	Fe(OH) <sub>2</sub>	gass.	- 306,63	282,75
CuCl <sub>2</sub>	solido	- 175,73	108,07	Fe(OH) <sub>2</sub>	solido	- 492,03	87,86
CuI	solido	- 69,45	96,65	Fe(OH) <sub>3</sub>	solido	- 705,56	104,60
CuN <sub>3</sub>	solido	344,76	100,42	FeS	pirrotina, solido	- 100,42	60,29
CuO	gass.	216,93	234,60	FeSO <sub>4</sub>	solido	- 820,90	107,53
CuO	solido	- 129,70	42,63	FeS <sub>2</sub>	pirite, solido	- 166,94	52,93
Cu(OH) <sub>2</sub>	solido	- 372,74	108,37				

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ematite, solido	- 742,24	87,40	<b>He</b>	elio, gass.	0,00	126,04
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	solido	- 2263,05	307,52	He	sol.ac.	19,25	55,65
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	fayalite, solido	-1379,05	145,18	<b>Hg</b>	mercurio, gass.	31,85	174,85
Fe <sub>3</sub> C	cementite, solido	20,08	104,60	Hg	liq.	0,00	76,02
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	magnetite, solido	- 1015,46	146,44	Hg <sup>++</sup>	sol.ac.	164,43-	32,22
<b>Ga</b>	gallio, gass.	238,91	168,95	HgBr <sub>2</sub>	solido	- 153,13	171,54
Ga	solido	0,00	40,88	HgCl <sub>2</sub>	solido	- 178,66	146,02
Ga <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 158,99-	330,54	HgI <sub>2</sub>	rosso, solido	- 101,67	179,91
GaBr <sub>3</sub>	solido	- 359,82	179,91	HgO	rosso, solido	- 58,56	70,29
GaCl <sub>3</sub>	solido	- 454,80	142,26	HgO	giallo, solido	- 58,43	71,13
GaF <sub>3</sub>	solido	- 1085,33	83,68	HgS	rosso, solido	- 50,63	82,42
Ga(OH) <sub>3</sub>	solido	- 831,36	100,42	HgS	nero, solido	- 47,70	88,28
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	rombico, solido	- 998,30	84,98	Hg <sub>2</sub> <sup>++</sup>	sol.ac.	153,55	84,52
<b>Ge</b>	germanio, gass.	335,98	167,79	Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	solido	- 181,08	217,57
Ge	solido	0,00	31,09	Hg <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	solido	- 468,19	179,91
GeBr <sub>4</sub>	liq.	- 331,37	280,75	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	solido	- 210,78	192,46
GeCl <sub>4</sub>	gass.	- 457,31	347,61	Hg <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	solido	- 111,00	233,47
GeCl <sub>4</sub>	liq.	- 462,33	245,60	Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	solido	- 625,88	200,66
GeH <sub>4</sub>	gass.	113,39	217,02	<b>Hf</b>	hafnio, gass.	576,56	186,78
GeI <sub>4</sub>	solido	- 144,35	271,12	Hf	solido	0,00	43,56
GeO	marrone, solido	- 237,23	50,21	HfCl <sub>4</sub>	solido	- 901,32	190,79
GeO <sub>2</sub>	esagonale, solido	- 497,06	55,27	HfF <sub>4</sub>	monoclinico, solido	- 1830,50	112,97
GeS	solido	- 71,55	71,13	HfO <sub>2</sub>	solido	- 1027,17	59,33
<b>H</b>	idrogeno, gass.	203,26	114,60	<b>I</b>	iodio, gass.	70,28	180,68
H <sup>+</sup>	sol.ac.	0,00	0,00	I <sup>-</sup>	sol.ac.	- 51,59	111,29
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	} vedi sotto	{	CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	ICl	gass.	- 5,44	247,44
HCl				solido	- 22,34	167,36	
H <sub>2</sub>	gass.	0,00	130,57	IF	gass.	- 118,49	236,06
H <sub>2</sub> O	sol.ac.	18,00	49,00	IF <sub>7</sub>	gass.	- 818,39	346,44
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	} vedi sotto	{	CO <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	IH	gass.	1,72	206,48
H <sub>2</sub> O				gass.	19,36	260,58	
:				I <sub>2</sub>	liq.	3,32	150,36
				I <sub>2</sub>	solido	0,00	116,14

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
I <sub>2</sub>	sol.ac.	16,40	137,24	KNO <sub>2</sub>	solido	- 306,60	152,09
<b>In</b>	indio, gass.	208,74	173,68	KNO <sub>3</sub>	solido	- 393,13	132,93
In	solido	0,00	57,82	KOH	gass.	- 235,46	244,35
In <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 106,27	150,62	KOH	liq.	- 317,87	98,40
InBr	solido	- 169,03	112,97	KOH	solido	- 379,05	79,29
InI	solido	- 120,50	129,70	KSO <sub>4</sub> H	solido	- 1031,36	138,07
In(OH) <sub>3</sub>	solido	- 761,49	104,60	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	liq.	- 1049,44	170,37
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 830,73	104,18	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	solido	- 1064,59	155,52
In <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	solido	- 2439,27	271,96	K <sub>2</sub> O	solido	- 322,11	94,14
<b>Ir</b>	iridio, gass.	617,98	193,47	K <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	solido	- 429,79	112,97
Ir	solido	0,00	35,48	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	solido	- 1295,78	200,12
IrF <sub>6</sub>	solido	- 461,66	247,69	K <sub>2</sub> PtCl <sub>6</sub>	solido	- 1109,18	333,88
<b>K</b>	potassio, gass.	61,17	160,23	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	solido	- 1316,37	175,73
K	liq.	0,26	71,45	<b>Kr</b>	cripton, gass.	0,00	163,97
K	solido	0,00	55,81	Kr	sol.ac.	15,06	61,50
K <sup>+</sup>	sol.ac.	- 283,26	102,51	<b>La</b>	lantanio, gass.	330,54	182,30
KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	solido	- 2235,47	204,60	La	solido	0,00	57,32
KBF <sub>4</sub>	solido	- 1785,00	133,89	La <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 723,41-	184,10
KBr	solido	- 379,20	96,44	<b>Li</b>	litio, gass.	128,04	138,67
KBrO <sub>3</sub>	solido	- 243,51	149,16	Li	liq.	0,93	33,94
KCl	gass.	- 233,41	238,99	Li	solido	0,00	29,10
KCL	liq.	- 395,11	86,65	Li <sup>+</sup>	sol.ac.	- 293,80	14,23
KCl	solido	- 408,32	82,68	LiCl	gass.	- 217,26	212,81
KClO <sub>3</sub>	solido	- 289,91	142,97	LiCl	solido	- 384,03	59,30
KClO <sub>4</sub>	solido	- 304,18	151,04	LiF	gass.	- 361,57	200,16
KF	gass.	- 344,80	226,50	LiF	solido	- 588,67	35,66
KF	solido	- 533,13	66,57	LiH	gass.	117,84	170,80
KF <sub>2</sub> H	solido	- 852,41	104,27	LiH	solido	- 68,46	20,04
KI	gass.	- 165,90	258,17	LiI	gass.	- 134,22	232,12
KI	solido	- 322,29	104,35	LiI	solido	- 269,66	85,77
KIO <sub>3</sub>	solido	- 425,51	151,46	LiOH	gass.	- 252,42	217,57
KH	solido	- 34,04	50,21	LiOH	solido	- 438,73	42,78
KMnO <sub>4</sub>	solido	- 713,79	171,71	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	solido	- 1132,44	90,37

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	liq.	- 1105,55	127,29	Mn(OH) <sub>2</sub>	amorfo	- 615,05	99,16
Li <sub>2</sub> O	gass.	- 187,31	229,00	MnS	verde, solido	- 218,40	78,24
Li <sub>2</sub> O	solido	- 562,11	37,89	MnSO <sub>4</sub>	solido	- 957,42	112,13
<b>Mg</b>	magnesio, gass.	113,07	148,55	MnSiO <sub>3</sub>	solido	- 1240,56	89,12
Mg	liq.	6,10	42,51	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 881,15	110,46
Mg	solido	0,00	32,69	Mn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	solido	- 1632,18	163,18
Mg <sup>++</sup>	sol.ac.	- 456,01-	117,99	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	solido	- 1283,23	155,64
MgCO <sub>3</sub>	solido	- 1029,26	65,69	<b>Mo</b>	molibdeno, gass.	612,54	181,84
MgCl <sub>2</sub>	gass.	- 398,80	276,91	Mo	solido	0,00	28,66
MgCl <sub>2</sub>	liq.	- 563,96	129,49	Mo(CO) <sub>6</sub>	solido	- 877,80	325,93
MgCl <sub>2</sub>	solido	- 592,12	89,63	MoF <sub>6</sub>	liq.	- 1473,10	259,66
MgF <sub>2</sub>	gass.	- 731,50	258,30	MoO <sub>2</sub>	solido	- 533,04	46,28
MgF <sub>2</sub>	solido	- 1071,12	57,24	MoO <sub>3</sub>	solido	- 668,02	77,74
MgI <sub>2</sub>	solido	- 358,15	129,70	MoS <sub>2</sub>	solido	- 225,94	62,59
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	solido	- 588,40	164,01	<b>N</b>	azoto, gass.	455,58	153,19
MgO	gass.	- 21,48	221,29	NFO	gass.	- 51,04	247,99
MgO	liq.	- 502,46	50,35	NF <sub>3</sub>	gass.	- 83,26	260,62
MgO	solido	- 568,96	26,94	NH <sub>3</sub>	gass.	- 16,48	192,34
Mg(OH) <sub>2</sub>	gass.	- 542,06	273,63	NH <sub>3</sub>	sol.ac.	- 26,57	111,29
Mg(OH) <sub>2</sub>	solido	- 833,69	63,18	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	sol.ac.	- 79,37	113,39
MgS	solido	- 341,72	46,02	NH <sub>4</sub> Cl	$\alpha$ , solido	- 203,19	94,98
MgSO <sub>4</sub>	solido	- 1147,51	91,40	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	solido	- 184,01	151,08
MgSiO <sub>3</sub>	liq.	- 1415,39	92,52	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	solido	- 1214,35	151,90
MgSiO <sub>3</sub>	solido	- 1462,07	67,77	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	solido	- 899,90	220,30
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	liq.	- 2003,19	123,04	NO	gass.	86,57	210,65
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	solido	- 2057,93	95,14	NOCl	cloruro di nitrosile, gass.	66,11	261,63
<b>Mn</b>	manganese, gass.	238,49	173,59	NO <sub>2</sub>	gass.	51,30	239,95
Mn	$\alpha$ , solido	0,00	32,01	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	sol.ac.	- 37,24	140,16
Mn <sup>++</sup>	sol.ac.	- 228,03-	73,64	NO <sub>2</sub> H	cis, gass.	- 42,97	248,66
MnCO <sub>3</sub>	solido	- 816,72	85,77	NO <sub>2</sub> H	trans, gass.	- 45,27	249,12
MnCl <sub>2</sub>	solido	- 440,53	118,24	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	sol.ac.	- 111,34	146,44
MnO	solido	- 362,92	59,71	NO <sub>3</sub> H	gass.	- 74,77	266,27
MnO <sub>2</sub>	solido	- 465,18	53,05	NO <sub>3</sub> H	liq.	- 80,79	155,60

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
N <sub>2</sub>	gass.	0,00	191,50	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	liq.	- 2227,72	438,69
<b>Na</b>	sodio, gass.	77,30	153,61	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	solido	- 2230,07	372,38
Na	liq.	0,50	57,85	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	solido	- 1467,38	113,85
Na	solido	0,00	51,45	Na <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	solido	- 2324,25	164,05
Na <sup>+</sup>	sol.ac.	- 261,89	58,99	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	solido	- 3114,10	238,00
NaBH <sub>4</sub>	solido	- 127,11	101,39	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	solido	- 1787,16	173,64
NaBr	gass.	- 177,78	241,12	<b>Nb</b>	niobio, gass.	681,16	186,15
NaBr	solido	- 349,26	86,82	Nb	solido	0,00	36,40
NaCO <sub>3</sub> H	Na-idrogencarb., solido	- 851,86	102,09	NbBr <sub>5</sub>	solido	- 510,45	259,41
NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	Na-acetato, solido	- 608,84	123,10	NbC	solido	- 136,82	35,40
NaCl	gass.	- 201,32	229,70	NbCl <sub>3</sub>	solido	- 518,82	146,44
NaCl	liq.	- 365,68	95,06	NbCl <sub>3</sub> O	solido	- 782,41	142,26
NaCl	solido	- 384,04	72,13	NbCl <sub>4</sub>	solido	- 606,68	184,10
NaClO <sub>4</sub>	solido	- 254,32	142,26	NbCl <sub>5</sub>	solido	- 683,25	210,46
NaF	gass.	- 309,74	217,50	NbF <sub>5</sub>	solido	- 1699,12	160,25
NaF	solido	- 545,09	51,21	NbN	solido	- 205,85	34,52
NaI	solido	- 284,57	98,32	NbO	solido	- 378,65	48,12
NaNO <sub>3</sub>	solido	- 365,89	116,32	NbO <sub>2</sub>	solido	- 740,57	54,52
NaOH	gass.	- 215,93	236,40	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	solido	- 1766,07	137,24
NaOH	liq.	- 375,13	74,17	<b>Ne</b>	neon, gass.	0,00	146,22
NaOH	solido	- 380,19	64,43	Ne	sol.ac.	19,25	66,11
NaSO <sub>4</sub> H	Na-idrogenolf., solido	- 992,86	112,97	<b>Ni</b>	nicel, gass.	384,51	182,08
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	liq.	- 1031,88	155,39	Ni	solido	0,00	29,87
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	solido	- 1048,08	138,78	Ni <sup>++</sup>	sol.ac.	- 45,61-	128,87
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10 H <sub>2</sub> O	solido	- 3428,20	564,00	NiCO <sub>3</sub>	solido	- 605,83	87,90
Na <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	gass.	- 565,94	325,52	Ni(CO) <sub>4</sub>	gass.	- 587,27	410,45
Na <sub>2</sub> O	solido	- 379,11	75,04	Ni(CO) <sub>4</sub>	liq.	- 588,27	313,38
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	solido	- 449,66	94,81	NiCl <sub>2</sub>	solido	- 259,06	97,65
Na <sub>2</sub> S	solido	- 361,36	97,91	NiF <sub>2</sub>	solido	- 604,17	73,60
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	solido	- 1002,07	146,02	NiO	solido	- 211,71	37,99
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	tenardite, solido	- 1269,35	149,62	Ni(OH) <sub>2</sub>	solido	- 447,27	87,86
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	solido	- 3647,40	592,04	NiS	solido	- 79,50	52,97
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 1028,01	154,81	NiSO <sub>4</sub>	solido	- 759,81	92,05

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
Ni <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	solido	- 197,07	133,89	PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	solido	- 1119,22	110,50
<b>O</b>	ossigeno, gass.	231,75	160,95	PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	sol.ac.	- 1142,65	158,16
OH <sup>-</sup>	sol.ac.	-157,29-	10,75	P <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	gass.	- 2084,94	345,60
OH <sub>2</sub>	acqua, gass.	- 228,59	188,72	P <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	gass.	- 2669,85	403,76
OH <sub>2</sub>	liq.	- 237,18	69,91	P <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	esagonale, solido	- 2697,84	228,86
OH <sub>2</sub>	solido	- 236,59	44,77	<b>Pb</b>	piombo, gass.	161,92	175,26
OH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	ione ossonio, sol.ac.	- 237,18	69,91	Pb	liq.	2,22	71,72
O <sub>2</sub>	gass.	0,00	205,03	Pb	solido	0,00	64,81
O <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	gass.	- 105,60	232,63	Pb <sup>++</sup>	sol.ac.	- 24,39	10,46
O <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	liq.	- 120,42	109,62	PbBr <sub>2</sub>	solido	- 261,92	161,50
O <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	sol.ac.	- 134,10	143,93	PbCO <sub>3</sub>	solido	- 625,51	130,96
O <sub>3</sub>	gass.	163,18	238,82	PbCl <sub>2</sub>	solido	- 314,13	135,98
<b>Os</b>	osmio, gass.	744,75	192,46	PbCl <sub>4</sub>	gass.	- 276,20	384,51
Os	solido	0,00	32,64	PbF <sub>2</sub>	solido	- 617,14	110,46
OsO <sub>4</sub>	giallo, solido	- 305,01	149,93	PbI <sub>2</sub>	solido	- 173,64	174,85
OsO <sub>4</sub>	bianco, solido	- 303,76	167,78	Pb(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	monoclino, solido	624,67	148,11
<b>P</b>	fosforo, gass.	280,02	163,09	Pb(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	ortoromb., solido	622,16	149,37
P	liq.	0,09	42,89	PbO	gass.	26,36	239,94
P	rosso, solido	- 12,13	22,80	PbO	liq.	- 171,19	85,96
P	bianco, solido	0,00	41,09	PbO	giallo, solido	- 187,90	68,70
PBr <sub>3</sub>	liq.	- 175,73	240,16	PbO	rosso, solido	- 188,95	66,53
PCl <sub>3</sub>	gass.	- 267,78	311,67	PbO <sub>2</sub>	solido	- 217,36	68,62
PCl <sub>3</sub>	liq.	- 272,38	217,15	Pb(OH) <sub>2</sub>	solido	- 421,07	88,00
PCl <sub>3</sub> O	gass.	- 514,32	325,39	PbS	solido	- 98,74	91,21
PCl <sub>3</sub> O	liq.	- 520,91	222,46	PbSO <sub>4</sub>	solido	- 813,20	148,57
PCl <sub>5</sub>	gass.	- 305,01	364,47	PbSiO <sub>3</sub>	solido	- 1062,15	109,62
PF <sub>3</sub>	gass.	- 897,47	273,13	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	solido	- 601,24	211,29
PF <sub>5</sub>	gass.	- 1520,72	300,70	<b>Pd</b>	palladio, gass.	339,74	166,94
PH <sub>3</sub>	gass.	13,39	210,12	Pd	solido	0,00	37,57
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	sol.ac.	- 1018,80-	221,75	Pd <sup>++</sup>	sol.ac.	176,56-	117,15
PO <sub>4</sub> H <sup>--</sup>	sol.ac.	- 1089,26-	33,47	PdCl <sub>2</sub>	solido	- 125,10	104,60
PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup>	sol.ac.	- 1130,39	90,37	PdI <sub>2</sub>	solido	- 62,76	150,62
PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	liq.	- 1118,43	146,44	PdS	solido	- 66,94	46,02

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
PdS <sub>2</sub>	solido	- 74,48	79,50	SO <sub>3</sub>	$\beta$ , solido	- 368,99	52,30
<b>Pt</b>	platino, gass.	520,49	192,30	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	sol.ac.	- 486,60	- 29,29
Pt	solido	0,00	41,63	SO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	sol.ac.	- 527,81	139,75
PtS	solido	- 76,15	55,06	SO <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	sol.ac.	- 537,90	232,21
PtS <sub>2</sub>	solido	- 99,58	74,68	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	sol.ac.	- 744,63	20,08
<b>Rb</b>	rubidio, gass.	55,86	169,99	SO <sub>4</sub> H <sup>-</sup>	sol.ac.	- 756,01	131,80
Rb	solido	0,00	69,45	SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	gass.	- 656,09	289,11
Rb <sup>+</sup>	sol.ac.	- 282,21	124,26	SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	liq.	- 690,06	156,90
RbBr	solido	- 378,15	108,28	S <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	gass.	- 31,80	331,37
RbI	solido	- 325,52	118,03	<b>Sb</b>	antimonio, gass.	222,17	180,16
<b>Re</b>	renio, gass.	724,67	188,83	Sb	solido	0,00	45,69
Re	solido	0,00	36,86	SbBr <sub>3</sub>	solido	- 239,32	207,11
ReCl <sub>3</sub>	solido	- 188,28	123,85	SbCl <sub>3</sub>	gass.	- 301,25	337,69
ReO <sub>2</sub>	solido	- 368,19	72,80	SbCl <sub>3</sub>	solido	- 323,72	184,10
Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	solido	- 1066,08	207,11	SbCl <sub>5</sub>	gass.	- 334,34	401,83
<b>Rh</b>	rodio, gass.	510,87	185,70	SbCl <sub>5</sub>	liq.	- 350,20	301,25
Rh	solido	0,00	31,51	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ortoromb., solido	- 626,55	123,01
<b>Ru</b>	rutenio, gass.	595,80	186,40	Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	solido	- 795,80	127,19
Ru	solido	0,00	28,53	Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	solido	- 829,27	125,10
RuO <sub>4</sub>	gass.	- 139,75	289,95	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	nero, solido	- 173,64	182,00
RuO <sub>4</sub>	liq.	- 152,30	183,26	Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	solido	- 55,23	234,30
RuO <sub>4</sub>	solido	- 152,30	146,44	Sb <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	cubico, solido	- 1268,17	220,92
<b>S</b>	zolfo, gass.	238,28	167,71	<b>Sc</b>	scandio, gass.	336,06	174,68
S	liq.	0,39	35,31	Sc	solido	0,00	34,64
S	rombico, solido	0,00	32,07	ScF <sub>3</sub>	solido	- 1555,61	92,05
S	monoclinico, solido	0,04	32,75	Sc(OH) <sub>3</sub>	solido	- 1233,44	100,42
S <sup>2-</sup>	sol.ac.	85,77	- 14,64	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 1819,41	77,40
SF <sub>6</sub>	gass.	- 1105,41	291,71	<b>Se</b>	selenio, gass.	187,07	176,61
SH <sub>2</sub>	gass.	- 33,56	205,69	Se	esagonale, nero, solido	0,00	42,44
SH <sub>2</sub>	sol.ac.	- 27,87	121,34	SeF <sub>6</sub>	gass.	- 1016,71	313,76
SO	gass.	- 19,84	221,84	SeH <sub>2</sub>	gass.	15,90	218,91
SO <sub>2</sub>	gass.	- 300,19	248,11	SeO	gass.	26,82	233,89
SO <sub>3</sub>	gass.	- 371,08	256,65	<b>Si</b>	silicio, gass.	411,29	167,86

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
Si	liq.	40,83	44,46	SnS	solido	- 98,32	76,99
Si	solido	0,00	18,83	<b>Sr</b>	stronzio, gass.	110,04	164,54
SiBr <sub>4</sub>	gass.	- 431,79	377,77	Sr	solido	0,00	54,39
SiBr <sub>4</sub>	liq.	- 443,92	277,82	Sr <sup>++</sup>	sol.ac.	- 557,31-	39,33
SiC	$\alpha$ , esagonale, solido	- 60,25	16,48	SrCO <sub>3</sub>	stronzianite, solido	- 1137,63	97,49
SiC	$\beta$ , cubico, solido	- 62,76	16,61	SrCl <sub>2</sub>	solido	- 781,15	117,15
SiCl <sub>4</sub>	gass.	- 617,01	330,62	SrO	solido	- 559,82	54,39
SiCl <sub>4</sub>	liq.	- 619,90	239,74	SrSO <sub>4</sub>	solido	- 1334,28	121,75
SiF <sub>4</sub>	gass.	- 1572,68	282,38	<b>Te</b>	tellurio, gass.	157,11	182,63
SiH <sub>4</sub>	gass.	56,90	204,51	Te	solido	0,00	49,71
SiO	gass.	- 126,36	211,50	TeO <sub>2</sub>	solido	- 270,29	79,50
SiO <sub>2</sub>	gass.	- 306,93	228,86	<b>Ti</b>	titanio, gass.	425,09	180,19
SiO <sub>2</sub>	liq.	- 850,21	47,93	Ti	solido	0,00	30,63
SiO <sub>2</sub>	$\alpha$ -cristobalite, solido	- 853,67	50,05	TiBr <sub>3</sub>	solido	- 523,84	176,56
SiO <sub>2</sub>	$\beta$ -cristobalite, solido	- 854,54	43,40	TiBr <sub>4</sub>	solido	- 589,53	243,51
SiO <sub>2</sub>	$\alpha$ -quarzo, solido	- 856,67	41,84	TiC	solido	- 180,75	24,23
SiO <sub>2</sub>	$\beta$ -quarzo, solido	- 856,48	41,46	TiCl <sub>2</sub>	solido	- 464,42	87,45
SiO <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	solido	- 1092,44	133,89	TiCl <sub>3</sub>	solido	- 653,54	139,75
SiO <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	solido	- 1333,02	192,46	TiCl <sub>4</sub>	liq.	- 737,22	252,34
Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> H <sub>2</sub>	solido	- 1943,47	192,46	TiF <sub>4</sub>	amorfo	- 1559,38	133,97
Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> H <sub>6</sub>	solido	- 2425,88	330,54	TiH <sub>2</sub>	solido	- 80,33	29,71
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	solido	- 642,66	101,25	TiI <sub>4</sub>	solido	- 371,54	249,37
<b>Sn</b>	stagno, gass.	267,36	206,03	TiN	solido	- 309,62	30,25
Sn	$\alpha$ , grigio, solido	0,13	44,14	TiO	$\alpha$ , solido	- 494,97	34,77
Sn	$\beta$ , bianco, solido	0,00	51,55	TiO <sub>2</sub>	anatasio, solido	- 884,50	49,92
SnBr <sub>4</sub>	gass.	- 331,37	411,83	TiO <sub>2</sub>	rutile, solido	- 889,52	50,33
SnBr <sub>4</sub>	solido	- 350,20	264,43	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 1434,28	78,78
SnCl <sub>4</sub>	gass.	- 432,21	365,68	<b>Tl</b>	tallio, gass.	147,44	180,85
SnCl <sub>4</sub>	liq.	- 440,16	258,57	Tl	solido	0,00	64,18
SnH <sub>4</sub>	gass.	188,28	227,57	Tl <sup>+</sup>	sol.ac.	- 32,38	125,52
SnO	solido	- 256,90	56,48	Tl <sup>+++</sup>	sol.ac.	214,64-	192,46
SnO <sub>2</sub>	solido	- 519,65	52,30	TlBr	solido	- 167,36	120,50
Sn(OH) <sub>2</sub>	gefällt	- 491,62	154,81	TlCl	solido	- 184,93	111,25

Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol	Formula	Nome, fase	$\mu$ in kG	$S/n$ in Ct/mol
TII	solido	- 125,39	127,61	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	solido	- 1139,30	98,32
TINO <sub>3</sub>	solido	- 152,46	160,67	V <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	$\alpha$ , solido	- 1318,38	102,51
TIOH	solido	- 195,76	87,40	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	solido	- 1419,63	130,96
Tl <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	solido	- 614,63	155,23	<b>W</b>	tungsteno, gass.	807,09	173,84
Tl <sub>2</sub> O	solido	- 147,28	125,52	W	liq.	43,07	45,70
Tl <sub>2</sub> S	solido	- 93,72	150,62	W	solido	0,00	32,64
Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	solido	- 830,48	230,54	WCl <sub>6</sub>	$\alpha$ , solido	- 455,65	238,49
<b>U</b>	uranio, gass.	478,82	198,52	WF <sub>6</sub>	gass.	- 1632,18	340,95
U	solido	0,00	50,33	WF <sub>6</sub>	liq.	- 1631,47	251,46
U <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 520,49-	125,52	WO <sub>2</sub>	solido	- 533,92	50,54
U <sup>++++</sup>	sol.ac.	- 579,07-	326,35	WO <sub>3</sub>	solido	- 764,08	75,90
UBr <sub>4</sub>	solido	- 788,68	242,67	<b>Xe</b>	xenon, gass.	0,00	169,57
UC <sub>2</sub>	solido	- 175,73	58,58	Xe	sol.ac.	13,39	65,69
UCl <sub>4</sub>	solido	- 962,32	198,32	<b>Zn</b>	zinco, gass.	95,18	160,87
UCl <sub>6</sub>	solido	- 1010,44	285,77	Zn	solido	0,00	41,63
UF <sub>4</sub>	solido	- 1761,46	151,04	Zn <sup>++</sup>	sol.ac.	- 147,03-	112,13
UF <sub>6</sub>	solido	- 2033,42	227,82	ZnBr <sub>2</sub>	solido	- 312,13	138,49
UI <sub>4</sub>	solido	- 527,60	271,96	ZnCO <sub>3</sub>	solido	- 731,57	82,42
UN	solido	- 313,80	75,31	ZnCl <sub>2</sub>	solido	- 369,43	111,46
UO <sub>2</sub>	solido	- 1075,29	77,82	ZnF <sub>2</sub>	solido	- 713,37	73,68
UO <sub>3</sub>	solido	- 1184,07	98,62	ZnI <sub>2</sub>	solido	- 208,95	161,08
<b>V</b>	vanadio, gass.	453,21	182,19	ZnO	solido	- 318,32	43,64
V	solido	0,00	28,91	Zn(OH) <sub>2</sub>	solido	- 555,13	81,59
V <sup>++</sup>	sol.ac.	- 217,57-	129,70	ZnS	blenda di zinco, solido	- 201,29	57,74
V <sup>+++</sup>	sol.ac.	- 242,25-	230,12	ZnSO <sub>4</sub>	solido	- 874,46	119,66
VCl <sub>2</sub>	solido	- 405,85	97,07	<b>Zr</b>	zirconio, gass.	566,51	181,25
VCl <sub>3</sub>	solido	- 511,28	130,96	Zr	solido	0,00	38,99
VCl <sub>3</sub> O	liq.	- 668,60	244,35	ZrC	solido	- 199,58	32,17
VCl <sub>4</sub>	liq.	- 503,75	255,22	ZrCl <sub>4</sub>	solido	- 889,94	181,59
VF <sub>5</sub>	liq.	- 1373,19	175,73	ZrF <sub>4</sub>	$\beta$ , monoclino, solido	- 1810,00	104,60
VN	solido	- 191,21	37,28	ZrH <sub>2</sub>	solido	- 128,87	35,02
VO	solido	- 404,17	38,91	ZrN	solido	- 336,39	38,87
VSO <sub>4</sub>	solido	- 1169,85	108,78	ZrO <sub>2</sub>	$\alpha$ , monoclino, solido	- 1042,82	50,38

## **Tabella delle energie di separazione**

$Z$  = numero di protoni

$N$  = numero di neutroni

$E_S$  (pJ) = energia di separazione

	Z	N	$E_S$ (pJ)		Z	N	$E_S$ (pJ)		Z	N	$E_S$ (pJ)		Z	N	$E_S$ (pJ)		
H	1	0	0.00	Ne	10	7	18.09	Ar	18	16	44.66	Ti	22	21	57.55		
		1	0.36			8	21.17			17	45.75			22	60.16		
		2	1.36			9	23.04			18	47.78			23	61.68		
He	2	1	1.24		10	25.74	19		49.15	19	47.88		24	63.80	24	21	57.55
		2	4.53		11	26.82	20		50.80	17	43.91		25	65.22	22	22	60.16
		3	4.39		12	28.48	21		51.78	18	45.75		26	67.08	23	23	62.54
		4	4.69		13	29.31	22		53.08	19	47.78		27	68.39	24	24	64.62
Li	3	2	4.22		14	30.74	23		54.01	20	49.15		28	70.14	25	25	66.31
		3	5.13		15	31.42	24		55.28	21	50.80		29	71.16	26	26	68.16
		4	6.29		16	32.45	25		58.47	22	51.78		30	72.41	27	27	69.66
		5	6.61		17	33.01	26		59.81	23	53.08		31	73.28	28	28	71.43
Be	4	3	6.02		18	34.44	19		35.75	18	46.70		32	78.27	29	29	72.60
		4	9.05		19	36.04	20		37.28	19	49.14		30	79.94	30	30	75.94
		5	9.32		20	37.28	21		38.79	20	50.55		31	81.61	31	31	79.94
		6	10.41		21	39.71	22		40.15	21	52.45		32	83.28	32	32	83.28
B	5	3	6.05	22	41.23	22	41.23	22	53.50	33	84.95	33	33	84.95			
		4	9.02	23	42.01	23	42.01	23	55.08	34	86.62	34	34	86.62			
		5	10.37	24	43.48	24	43.48	24	56.06	35	88.29	35	35	88.29			
		6	12.21	25	44.95	25	44.95	25	57.57	36	89.96	36	36	89.96			
C	6	3	6.25	26	46.02	26	46.02	26	59.81	37	91.63	37	37	91.63			
		4	9.71	27	47.50	27	47.50	27	61.37	38	93.30	38	38	93.30			
		5	11.77	28	49.00	28	49.00	28	63.06	39	94.97	39	39	94.97			
		6	14.77	29	50.71	29	50.71	29	64.77	40	96.64	40	40	96.64			
N	7	5	11.86	30	52.44	30	52.44	30	66.53	41	98.31	41	41	98.31			
		6	15.08	31	54.29	31	54.29	31	68.33	42	100.00	42	42	100.00			
		7	16.77	32	56.26	32	56.26	32	70.18	43	101.71	43	43	101.71			
		8	18.50	33	58.35	33	58.35	33	72.14	44	103.44	44	44	103.44			
O	8	6	15.82	34	60.56	34	60.56	34	74.21	45	105.19	45	45	105.19			
		7	17.94	35	62.90	35	62.90	35	76.39	46	106.96	46	46	106.96			
		8	20.45	36	65.37	36	65.37	36	78.68	47	108.75	47	47	108.75			
		9	21.11	37	67.88	37	67.88	37	81.08	48	110.56	48	48	110.56			
F	9	8	20.54	38	70.53	38	70.53	38	83.59	49	112.39	49	49	112.39			
		9	22.01	39	73.32	39	73.32	39	86.21	50	114.24	50	50	114.24			
		10	23.68	40	76.25	40	76.25	40	88.94	51	116.11	51	51	116.11			
		11	24.74	41	79.32	41	79.32	41	91.78	52	118.00	52	52	118.00			

	Z	N	$E_S$ (pJ)												
Co	27	27	74.14	Ge	32	34	91.21	Rb	37	45	113.61	Nb	41	48	122.87
		28	76.39			35	92.67			46	115.36			49	124.49
		29	78.01			36	94.65			47	116.76			50	126.42
		30	79.83			37	95.97			48	118.44			51	127.61
		31	81.21			38	97.81			49	119.83			52	128.91
		32	82.88			39	99.00			50	121.42			53	130.25
		33	84.08			40	100.72			51	122.39			54	131.61
		34	85.57			41	101.81			52	123.54			55	132.72
Ni	28	27	74.88	42	103.45	53	124.46	56	129.78	Mo	42	48	123.96		
		28	77.54	43	104.49	54	125.39	49	125.58						
		29	79.18	44	106.00	55	126.32	50	127.61						
		30	81.14	45	106.97	56	127.50	51	128.91						
		31	82.58	46	108.37	57	128.34	52	130.46						
		32	84.41	47	109.29	58	129.86	53	131.64						
		33	85.66	48	110.78	59	131.42	54	133.10						
		34	87.36	49	112.26	60	133.00	55	134.20						
Cu	29	30	81.69	50	113.72	Sr	38	43	111.43	Tc	43	51	129.65		
		31	83.30	51	115.21			44	113.45			52	131.24		
		32	85.18	52	116.70			45	114.87			53	132.50		
		33	86.60	53	118.19			46	116.78			54	134.02		
		34	88.34	54	119.68			47	118.15			55	135.19		
		35	89.61	55	121.17			48	119.99			56	136.62		
		36	91.20	56	122.66			49	121.34			57	137.71		
		37	92.33	57	124.15			50	123.12			Ru	44	50	129.27
38	93.79	58	125.64	51	124.14	51	130.70								
39	94.80	59	128.13	52	125.39	52	132.42								
Zn	30	31	84.15	60	130.62	53	126.32	53	133.72						
		32	86.21	61	132.11	54	127.50	54	135.35						
		33	87.67	62	133.60	55	128.34	55	136.54						
		34	89.58	63	135.09	56	129.86	56	138.09						
		35	90.85	64	136.58	57	131.42	57	139.18						
		36	92.63	65	138.07	58	133.00	58	140.66						
		37	93.76	66	139.56	59	134.58	59	141.66						
		38	95.39	67	141.05	60	136.17	60	143.09						
Ga	31	33	88.30	68	142.54	Y	39	45	115.63	Rh	45	53	134.41		
		34	90.21	69	144.03			46	117.50			54	136.08		
		35	91.67	70	145.52			47	119.02			55	137.39		
		36	93.47	71	147.01			48	120.92			56	138.97		
		37	94.80	72	148.50			49	122.41			57	140.17		
		38	96.45	73	150.00			50	124.25			58	141.66		
		39	97.67	74	151.49			51	125.35			59	142.78		
		40	99.17	75	152.98			52	126.62			60	144.22		
Ge	32	34	91.21	76	154.47	Zr	40	47	120.20	61	145.27				
		35	92.67	77	155.96			48	122.18	62	145.39				
		36	94.65	78	157.45			49	123.67	63	146.26				
		37	95.97	79	158.94			50	125.59	Kr	36	39	102.77		
		38	97.81	80	160.43			51	126.74			40	104.82		
		39	99.00	81	161.92			52	128.13			41	106.31		
		40	100.72	82	163.41			53	129.21			42	108.23		
		41	101.81	83	164.90			54	130.52			43	109.57		
42	103.45	84	166.39	55	131.56										
43	104.49	85	167.88	56	132.82										
44	106.00	86	169.37												

	Z	N	$E_S$ (pJ)		Z	N	$E_S$ (pJ)		Z	N	$E_S$ (pJ)		Z	N	$E_S$ (pJ)				
Pd	46	53	135.42		67	159.51		73	171.61	Pr	59	79	184.38						
		54	137.20		68	161.01		74	173.15			80	185.95						
		55	138.53		69	162.05		75	174.26			81	187.22						
		56	140.22		70	163.51		76	175.74			82	188.72						
		57	141.44		71	164.49		77	176.80			83	189.66						
		58	143.04		72	165.91		78	178.23			84	190.83						
		59	144.18		73	166.86		79	179.26			85	191.76						
		60	145.71		74	168.22		80	180.63										
		61	146.76		75	169.14		81	181.67			Nd	60	79	185.37				
		62	148.24		76	170.45		82	182.95					80	187.05				
		63	149.22		77	171.34		83	183.59					81	188.30				
		64	150.63											82	189.88				
		65	151.55		Sb	51	67	160.30	Cs					55	75	175.13	83	190.86	
		66	152.90				68	161.83								76	176.62	84	192.11
							69	162.95								77	177.77	85	193.03
							70	164.43								78	179.21	86	194.25
Ag	47	56	140.89		71	165.52		79	180.31	87	195.09								
		57	142.23		72	166.96		80	181.73	88	196.27								
		58	143.84		73	168.00		81	182.81	89	197.08								
		59	145.11		74	169.39		82	184.14	90	198.26								
		60	146.64		75	170.39		83	184.84	91	199.11								
		61	147.80		76	171.73				92	200.28								
		62	149.28					Ba	56	71	170.47	Pm	61	81	188.97				
		63	150.37							72	172.20			82	190.57				
64	151.78		Te	52	65	158.42				73	173.43			83	191.61				
65	152.82				66	160.12				74	175.08			84	192.88				
Cd	48	56	141.92		67	161.33		75	176.28	85	193.88								
		57	143.28		68	162.98		76	177.85	86	195.11								
		58	145.02		69	164.14		77	179.00	87	196.06								
		59	146.29		70	165.71		78	180.52	88	197.22								
		60	147.94		71	166.83		79	181.63	89	198.12								
		61	149.12		72	168.34		80	183.09										
		62	150.70		73	169.39		81	184.20	Sm	62	80	188.51						
		63	151.82		74	170.85		82	185.58			81	189.89						
		64	153.33		75	171.86		83	186.33			82	191.57						
		65	154.38		76	173.26		84	187.37			83	192.66						
					77	174.24		85	188.09	84	194.00								
					78	175.59				85	195.02								
			79	176.54		La	57	78	181.32	86	196.33								
			80	177.83				79	182.51	87	197.27								
			81	178.77				80	183.98	88	198.55								
								81	185.17	89	199.44								
In	49	61	149.95		71	167.70		82	186.58	90	200.77								
		62	151.56		72	169.23		83	187.41	91	201.71								
		63	152.79		73	170.38		84	188.49	92	202.98								
		64	154.30		74	171.84		85	189.30	93	203.91								
		65	155.47		75	172.94													
		66	156.91		76	174.35		Ce	58	75	177.95	Eu	63	85	195.71				
		67	158.00		77	175.39				76	179.61			86	197.03				
		68	159.41		78	176.77				77	180.87			87	198.06				
			79	177.78		78	182.46			88	199.33								
			80	179.22		79	183.65	89	200.34										
Sn	50	59	147.92					80	185.21	90	201.71								
		60	149.73					81	186.41	91	202.74								
		61	151.04		Xe	54	67	162.92		82	187.88			92	204.05				
		62	152.77				68	164.70		83	188.75	93	205.06						
		63	154.01				69	165.95		84	189.90	94	206.26						
		64	155.66				70	167.63		85	190.73								
		65	156.87				71	168.84		86	191.83								
		66	158.40				72	170.45		87	192.59								

	Z	N	$E_S$ (pJ)																
Gd	64	85	196.69	Tm	69	97	215.93	Re	75	107	233.23	Hg	80	113	244.54				
		86	198.09			98	217.33			108	234.58			114	246.01				
		87	199.13			99	218.42			109	235.62			115	247.11				
		88	200.51			100	219.71			110	236.85			116	248.53				
		89	201.51			101	220.77			111	237.84			117	249.62				
		90	202.93			102	221.97			112	239.02			118	250.98				
		91	203.96			103	222.97			113	239.96			119	252.05				
		92	205.33			Yb	70			96	215.76			114	241.09	120	253.33		
		93	206.35							97	216.89			121	254.33	122	255.57		
		94	207.62							98	218.34			123	256.53	124	257.73		
		95	208.57							99	219.44			125	258.64	Tl	81	119	252.81
		96	209.77							100	220.80			106	232.97			120	254.13
		97	210.67							101	221.86			107	234.09			121	255.23
		Tb	65							91	204.81			102	223.14			108	235.50
92	206.22			103	224.16			109	236.56	123	257.55								
93	207.30			104	225.36			110	237.89	124	258.76								
94	208.60			105	226.29			111	238.90	125	259.80								
95	209.63			106	227.39			112	240.18	127	261.51								
96	210.86			107	228.28			113	241.13	Pb	82	119	253.70						
97	211.86			108	229.37			114	242.37			120	255.10						
Dy	66			87	200.66			102	223.93			115	243.30	121	256.21				
				88	202.15	103	225.01	116	244.51			122	257.55						
				89	203.25	104	226.24	117	245.40			123	258.63						
				90	204.76	105	227.25	118	246.54			124	259.92						
				91	205.88	106	228.38	Ir	77			111	239.60	125	261.00				
				92	207.33	107	229.34					112	240.91	126	262.18				
				93	208.42	Hf	72					99	220.98	113	241.93	127	262.81		
		94	209.79	100	222.43							114	243.22	128	263.65				
		95	210.83	101	223.55							115	244.22	129	264.26				
		96	212.14	102	224.93							116	245.46	130	265.08				
		97	213.15	103	226.01							117	246.43	Bi	83	123	259.20		
		98	214.37	104	227.31							118	247.59			124	260.49		
		99	215.29	105	228.34					Pt	78	109	237.94			125	261.60		
		100	216.42	106	229.56							110	239.40			126	262.79		
Ho	67	95	211.67	107	230.54							111	240.48			127	263.53		
		96	213.02	108	231.72							112	241.90			128	264.35		
		97	214.08	109	232.63							113	242.93			129	265.05		
		98	215.37	110	233.71							114	244.32			Po	84	122	258.78
		99	216.37	111	234.56			115	245.33			123	259.90						
		100	217.54	116	246.67			116	246.67			124	261.25						
		Er	68	92	208.96	117	247.64	117	247.64			125	262.36						
				93	210.12	118	248.91	118	248.91			126	263.59						
				94	211.60	119	249.85	119	249.85			127	264.32						
				95	212.70	120	251.06	120	251.06			At	85					123	260.33
				96	214.12	121	251.95	121	251.95					124	261.68				
				97	215.18	122	253.12	122	253.12					125	262.83				
				98	216.54	W	74	104	228.99	Au	79			115	246.14			126	264.07
				99	217.57			105	230.10					116	247.48			127	264.88
100	218.82			106	231.44			117	248.55					128	265.84				
101	219.78			107	232.52			118	249.84					130	267.58				
102	220.94			108	233.81			119	250.88										
103	221.85			109	234.80			120	252.10										
104	222.95			110	235.99			121	253.10										
				111	236.91														



## Indice analitico

- acceleratore di particelle 30
- accumulatore 22
- altoparlante 40
- ampiezza 38
- analisi spettrale 72
- antimateria 31
- antiparticelle 97 e segg.
- armoniche 47
- atomo 61 e segg.
  - nucleo dell' 89 e segg.
  - raggio dell' 64
- autocatalisi 107
  
- batteria 22
- buco nell'ozono 52
  
- carica barionica 96
- carica leptonica 96
- catalizzatore 17, 103
- cella combustibile 22
- cella elettrochimica 19
- centrale nucleare 106 e segg.
- cifre fosforescenti 52
- condensatore 106
- costante di Planck 54
  
- deuterio 91
- diodo 83
- diodo luminoso 84
- diodo raddrizzatore 84
- display a cristalli liquidi 76
  
- eccitazione 65 e segg., 94
- elemento 90
- elettrolisi 19
- elettrone 62 e segg.
- elettronio 62 e segg.
- endotermica 25
- energia 20 e segg., 29 e segg., 65 e segg., 94 e segg.
  - conduttore di 65 e segg., 77 e segg.
  - dei fotoni 54
  - di separazione 95 e segg., 127
- entropia 23 e segg., 113
- enzima 17
- equilibrio chimico 13
- esotermica 25
- etere 43
  
- fiamme 72 e segg.
  
- forma normale 11
- fotoconduttori 83
- fotodiodo 84
- fotomoltiplicatore 52
- fotoni 51 e segg.
  - quantità di moto dei 54
- fotosintesi 52
- frequenza 38, 54
- funzione sinusoidale 38
  
- generatore di vapore 106
- grandezze conservate 96
  
- intensità della corrente di materia 9 e segg.
- interferenza 44 e segg., 56 e segg.
- ionizzazione 67
- isotopo 90
  
- LCD 76
- luce infrarossa 44, 55
- luce ultravioletta 44, 55
- lunghezza d'onda 39, 54
  
- magnetismo 63
- massa di riposo 30
- metalli 78
- microonde 44, 55
- microscopio elettronico a scansione 61
- mole 9 e segg.
  
- neutrino 96 e segg.
- neutrone 62, 90 e segg.
- non-metalli 79
- nube elettronica 61 e segg.
- nuclidi 91
  - carta dei 92, 93
- numero atomico 63, 90
  
- onde 35 e segg.
  - elettromagnetiche 42 e segg.
  - longitudinali 36
  - radio 44, 55
  - sonore 40
  - sinusoidali 39
  - stazionarie 44
  - trasversali 36

oscillazioni 37  
- durata delle 38  
- fondamentali 47  
- proprie 47  
- sinusoidali 38

pellicola fotografica 52, 56  
plutonio 108  
pompa di reazione 19  
portatore dell'onda 36  
potenziale chimico 13 e segg., 113  
- zero del 15  
probabilità 68  
protoni 62, 90 e segg.

quanti di luce 54  
quantità di sostanza 9 e segg.  
quantità elementare 10

radar 44, 55  
radiazione nucleare 100  
radioattivo 101  
raggi cosmici 99  
raggi gamma 44, 55, 94  
raggi X (Röntgen) 44, 55  
reattore a fusione 103  
reattore nucleare 106 e segg.  
reazione fotochimica 51 e segg.  
resistenza di reazione 16 e segg., 104, 106  
riflessione 46

salto energetico 78  
sbarre di regolazione 107  
scorie radioattive 108  
semiconduttori 80 e segg.  
Sole 103, 104 e segg.  
soluzione 15  
sostanze amorfe 75  
sostanze cristalline 75  
spettro 70  
- di assorbimento 72  
- di emissione 71  
spettrometro 66  
stato eccitato 65 e segg., 94 e segg.  
stato fondamentale 36, 65 e segg., 94  
stella di neutroni 90  
strumenti a corda 47  
suono puro 41

tavola periodica 111  
tempo di dimezzamento 68 e segg., 103  
tensione chimica 13  
teoria della relatività 29 e segg.  
transistor 85 e segg.  
trasformazione 11 e segg.  
- tasso di 11 e segg., 102 e segg.  
trizio 91, 99  
tubo fluorescente 70  
tubo luminescente 70

uranio 100, 106 e segg.

velocità limite 30  
vuoto 43