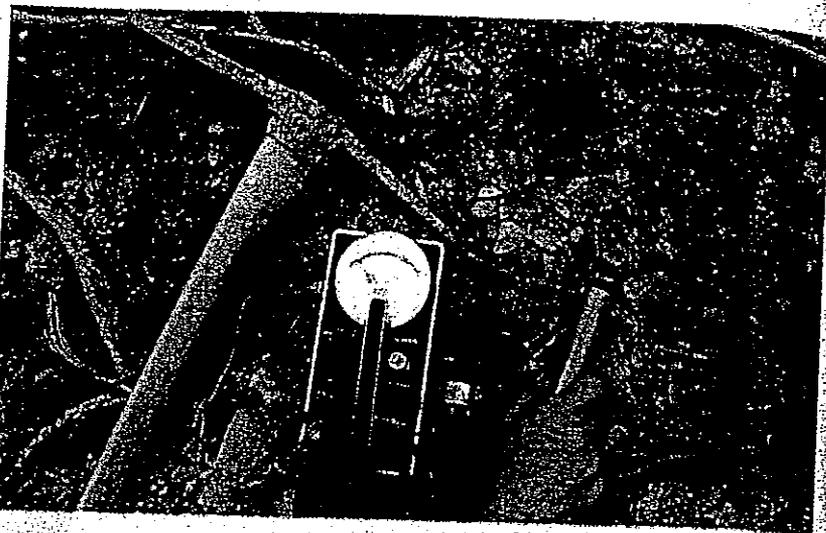


FISICA = ODONTO 1

PROF GUERRISI, pag. 29
€ 1,00

Un geologo alla ricerca di elementi radioattivi (forse uranio) con un contatore Geiger o una camera a scintillazione portatile.



C A P I T O L O

30

FISICA NUCLEARE E RADIOATTIVITÀ

All'inizio del XX secolo gli esperimenti di Rutherford portarono alla convinzione che al centro dell'atomo è concentrata una minuscola massa nucleare. Le ricerche riguardanti la struttura di questo nucleo cominciarono proprio mentre stava sviluppandosi la teoria quantistica, nel tentativo da parte degli scienziati di penetrare la struttura degli atomi e dei suoi elettroni. In questo e nei prossimi capitoli esamineremo brevemente la *fisica nucleare*.

30-1 Struttura e proprietà del nucleo

I fisici di inizio secolo si ponevano l'importante domanda se il nucleo avesse una struttura e di che struttura si trattasse. Il nucleo risulta però un'entità complicata e non è pienamente conosciuto neppure oggi. A partire dagli anni '30 fu però disponibile un modello del nucleo utile ancora adesso. Secondo questo modello il nucleo si può considerare come un aggregato di due tipi di particelle: protoni e neutroni. (Naturalmente non dobbiamo dimenticare che queste «particelle» presentano anche proprietà ondulatorie: è solo per facilità di visualizzazione e di linguaggio che spesso ci riferiamo ad esse come semplicemente a «particelle».) Il nucleo dell'atomo più semplice, quello d'idrogeno, è costituito da un **proton**e. Ha una carica positiva ($+e = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$) e una massa

$$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

Neutrone Il **neutrone**, la cui esistenza fu accertata solo nel 1932 dall'inglese James Chadwick (1891-1974), è elettricamente neutro ($q = 0$), come

suggerisce il nome. La sua massa, quasi identica a quella del protone, è

$$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

Questi due componenti del nucleo, i neutroni e i protoni, vengono detti nel loro insieme **nucleoni**.

Sebbene il nucleo dell'idrogeno consista di un solo protone, i nuclei di tutti gli altri elementi contengono sia neutroni sia protoni. Ai vari tipi di nuclei si dà spesso il nome di **nuclidi**. Il numero di protoni contenuti in un nucleo (o nuclide) è chiamato **numero atomico** e indicato con il simbolo Z . Il numero totale di nucleoni, neutroni più protoni, è indicato col simbolo A e chiamato **numero di massa atomica**. Il nome deriva dal fatto che la massa nucleare è molto prossima alla massa di un nucleone moltiplicata per A . Ad esempio un nuclide che contenga 7 protoni e 8 neutroni è caratterizzato da $Z = 7$ e $A = 15$. Il **numero di neutroni** N è dato da $N = A - Z$.

Per designare un certo nuclide è sufficiente indicare A e Z . Spesso si usa una simbologia di questa forma:



dove X rappresenta il simbolo chimico dell'elemento considerato (appendice F e tavola periodica di controcopertina), A è il numero di massa atomica e Z è il numero atomico. Per esempio ${}^{15}_7\text{N}$ rappresenta il nucleo di azoto che contiene 7 protoni e 8 neutroni per un totale di 15 nucleoni. In un atomo neutro il numero di elettroni che orbitano attorno al nucleo è uguale al numero atomico Z (dato che la carica di un elettrone ha lo stesso valore e il segno opposto a quella di un protone). Le proprietà principali di un atomo e il suo modo di interagire con gli altri atomi sono largamente determinati dal numero di elettroni. Quindi Z stabilisce di che tipo di atomi si tratti: carbonio, ossigeno, oro e via discorrendo. È ridondante specificare sia il simbolo dell'elemento sia il suo numero atomico Z come abbiamo visto sopra. Il nucleo di azoto per esempio deve avere implicitamente $Z = 7$. Per questo il pedice Z a volte non compare e ${}^{15}_7\text{N}$ si scrive spesso semplicemente ${}^{15}\text{N}$; e discorsivamente si pronuncia «azoto quindici».

Dato un certo tipo di atomo (ad esempio carbonio), i suoi nuclei, nonostante posseggano sempre lo stesso numero di protoni, possono contenere un numero differente di neutroni. Per esempio il carbonio ha 6 protoni nel suo nucleo, ma può avere 5, 6, 7, 8, 9 o 10 neutroni. I nuclei contenenti lo stesso numero di protoni ma un diverso numero di neutroni sono chiamati **isotopi**. Così ${}^{11}_6\text{C}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{15}_6\text{C}$, e ${}^{16}_6\text{C}$ sono tutti isotopi del carbonio. Naturalmente gli isotopi di un certo elemento non si presentano tutti con la stessa abbondanza. Per esempio il 98.9% del carbonio che si trova in natura (sulla Terra) è costituito dall'isotopo ${}^{12}_6\text{C}$ e circa l'1.1% dall'isotopo ${}^{13}_6\text{C}$. Queste percentuali sono chiamate **abbondanze naturali**.

Molti degli isotopi la cui presenza non si riscontra in natura possono essere prodotti in laboratorio per mezzo di reazioni nucleari (ne parleremo più avanti). Difatti tutti gli elementi al di là dell'uranio ($Z > 92$) non si trovano in natura e sono prodotti solo artificialmente, come d'altra parte lo sono molti nuclidi con $Z \leq 92$.

La dimensione approssimativa dei nuclei fu stabilita originariamente da Rutherford con gli esperimenti di diffusione di particelle cariche.

*Il valore di massa di ogni elemento indicato nella tavola periodica (controcopertina) è una media calcolata in base all'abbondanza naturale di ciascuno dei suoi isotopi.

Nucleoni

Z e A

Isotopi

Non possiamo naturalmente parlare di una dimensione precisa dei nuclei per via del dualismo onda-particella: la loro estensione spaziale rimane in qualche modo indefinita. Cionondimeno una misura della «dimensione» approssimativa si può ottenere per diffusione degli elettroni veloci sui nuclei. Si è trovato che i nuclei hanno una forma grossolanamente sferica con un raggio che aumenta al crescere di A secondo la formula approssimativa

$$r \approx (1.2 \times 10^{-15} \text{ m})(A^{\frac{1}{3}}). \quad (30-1)$$

Se il volume di una sfera è dato da $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, si nota che il volume del nucleo è proporzionale al numero di nucleoni, $V \propto A$. È ciò che ci aspetteremmo se i nucleoni fossero come palle da biliardo impenetrabili: raddoppiando il numero delle palle si raddoppia il volume totale. Ne consegue che tutti i nuclei hanno circa la stessa densità.

ESEMPIO 30-1. FATE UN CALCOLO Dimensioni nucleari. Stimare il diametro dei seguenti nuclidi: (a) ${}^1_1\text{H}$, (b) ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, (c) ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, (d) ${}^{235}_{92}\text{U}$.

SOLUZIONE (a) Per l'idrogeno $A = 1$, e quindi l'eq. 30-1 dà

$$d = \text{diametro} = 2r \approx 2.4 \times 10^{-15} \text{ m}$$

dato che $A^{\frac{1}{3}} = 1^{\frac{1}{3}} = 1$.

(b) Per il calcio,

$$d = 2r \approx (2.4 \times 10^{-15} \text{ m})(40)^{\frac{1}{3}} = 8.2 \times 10^{-15} \text{ m}.$$

(c) Per il piombo,

$$d \approx (2.4 \times 10^{-15} \text{ m})(208)^{\frac{1}{3}} = 14 \times 10^{-15} \text{ m}.$$

(d) Per l'uranio,

$$d \approx (2.4 \times 10^{-15} \text{ m})(235)^{\frac{1}{3}} = 15 \times 10^{-15} \text{ m}.$$

Un metodo per determinare le masse dei nuclei consiste nel misurare il raggio di curvatura di nuclei veloci che transitano in un campo magnetico, ricorrendo a uno spettrometro come già visto nel paragrafo 20-12. E in effetti, come abbiamo già accennato, l'esistenza dei diversi isotopi di uno stesso elemento fu scoperta mediante l'uso di questo apparecchio. Le masse nucleari vengono indicate in **unità di massa atomica unificata** (u). Questa scala di unità prende come riferimento l'atomo neutro ${}^{12}_6\text{C}$ attribuendogli il valore esatto di 12.000000 u. La massa misurata del neutrone risulta quindi di 1.008665 u, mentre quella del protone è di 1.007276 u e quella dell'atomo d'idrogeno neutro, ${}^1_1\text{H}$ (un protone più un elettrone) è 1.007825 u. Nell'appendice F sono elencate le masse di molti nuclidi. È importante notare che le masse in questa tavola, come consuetudine, si riferiscono all'*atomo neutro*, e non al solo nucleo.

Spesso si indicano le masse ricorrendo all'unità di energia elettronvolt. Lo si può fare perché la massa e l'energia sono correlate tramite l'equazione di Einstein $E = mc^2$ (cap. 26). Se la massa di un atomo neutro ${}^1_1\text{H}$ è $1.67353 \times 10^{-27} \text{ kg}$, ossia 1.007825 u, allora $1.0000 \text{ u} = (1.00000 / 1.007825) \cdot (1.67353 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$; questa massa equivale a un'energia $E = mc^2 = (1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}) \cdot (2.9979 \times 10^8 \text{ m/s})^2 / (1.6022 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 931.5 \text{ MeV}$. Quindi

$$1 \text{ u} = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ = 931.5 \text{ MeV}/c^2.$$

Nella tabella 30-1 sono date le masse di alcune delle particelle più importanti.

➔ RISOLUZIONE DEI PROBLEMI

Le masse sono quelle degli atomi neutri.

TABELLA 30-1
Masse a riposo in kg, unità di massa atomica unificata e MeV/c²

Entità	Massa		
	kg	u	MeV/c ²
Elettrone	9.1094×10^{-31}	0.00054858	0.51100
Protone	1.67262×10^{-27}	1.007276	938.27
atomo ${}^1_1\text{H}$	1.67353×10^{-27}	1.007825	938.78
Neutrone	1.67493×10^{-27}	1.008665	939.57

Così come l'elettrone possiede uno spin e un momento angolare intrinseci, altrettanto presentano il nucleo e i suoi componenti, il protone e il neutrone. Sia il protone sia il neutrone sono particelle a spin semintero. Un nucleo, costituito di protoni e neutroni, è dotato di uno **spin nucleare**, che può essere sia intero sia semintero a seconda che sia composto di un numero pari o dispari di nucleoni. Il *momento angolare nucleare* di un nucleo è dato, come ci si potrebbe aspettare (par. 28-6), da $\sqrt{I(I+1)}\hbar$.

30-2 Energia di legame e forze nucleari

La massa totale di un nucleo stabile è sempre inferiore alla somma delle masse dei suoi nucleoni componenti, come risulta anche dall'esempio che segue.

ESEMPIO 30-2 Massa dello ${}^4_2\text{He}$ a confronto con quella dei suoi componenti. Confrontate la massa di un nucleo ${}^4_2\text{He}$ con quella dei suoi nucleoni componenti.

SOLUZIONE La massa di un atomo neutro ${}^4_2\text{He}$, come si evince dall'appendice F, è 4.002602 u. La massa di due neutroni più due protoni (inclusi due elettroni) è

$$\begin{aligned} 2m_n &= 2.017330 \text{ u} \\ 2m({}^1_1\text{H}) &= \underline{2.015650 \text{ u}} \\ &= 4.032980 \text{ u}. \end{aligned}$$

Quasi sempre abbiamo a che fare con le masse di atomi neutri, vale a dire nuclei con Z elettroni, dato che queste sono le masse misurate. Dobbiamo quindi stare attenti a includere le masse degli elettroni quando facciamo questi confronti, motivo per cui abbiamo usato la massa di ${}^1_1\text{H}$ piuttosto che quella del protone isolato.

Risulta quindi che la massa misurata di ${}^4_2\text{He}$ è $4.032980 \text{ u} - 4.002602 \text{ u} = 0.030378 \text{ u}$ in meno delle masse dei suoi componenti. Come è possibile? Se quattro nucleoni si incontrano a formare ${}^4_2\text{He}$, dove va a finire la massa mancante?

Viene convertita in energia di un altro tipo (come ad esempio radiazione o energia cinetica). La differenza di massa (o di energia) nel caso di ${}^4_2\text{He}$, data in unità di energia, è $(0.030378 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) = 28.30 \text{ MeV}$. Questa differenza è chiamata **energia di legame totale** del nucleo. L'energia di legame totale rappresenta la quantità di energia che bisogna cedere al nucleo per poterne separare tutti i suoi protoni e neutroni componenti. Se la massa del nucleo ${}^4_2\text{He}$ fosse esattamente

➔ RISOLUZIONE DEI PROBLEMI

Tenete conto delle masse degli atomi

Energia di legame

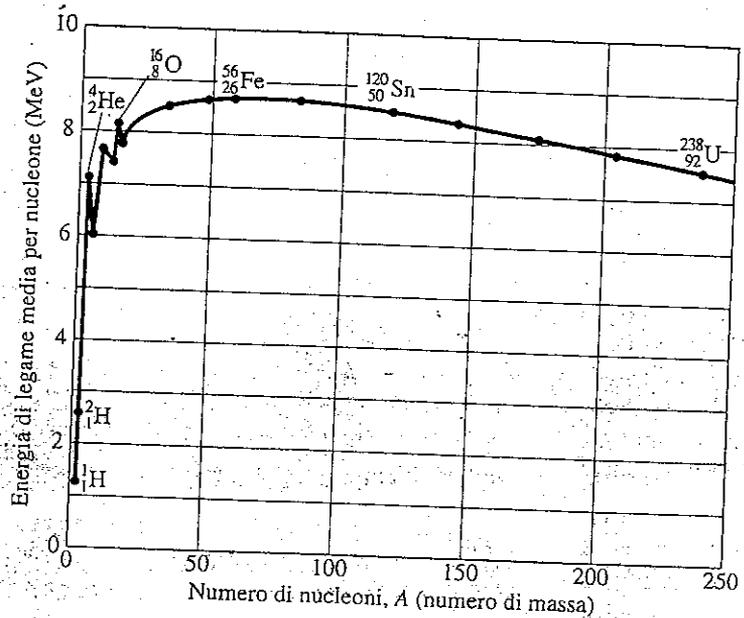


FIGURA 30-1 Energia di legame media per nucleone in funzione del numero di massa A nei nuclei stabili.

uguale alla massa di due neutroni più due protoni, il nucleo si sfalderebbe senza bisogno di alcuna immissione di energia. Per essere stabile la massa del nucleo *deve* essere inferiore a quella dei suoi nucleoni componenti, in modo tale che occorra fornire energia per scioglierlo. Notare che l'energia di legame non è un qualcosa che il nucleo possiede, al contrario è energia che gli «manca» rispetto alla massa totale dei suoi componenti separati.

In un atomo si può confrontare l'energia di legame nucleare con quella degli elettroni. Abbiamo visto nel capitolo 27 che l'energia di legame di un elettrone nell'atomo d'idrogeno è per esempio 13.6 eV. La massa di un atomo ^1_1H è inferiore di 13.6 eV a quella di un singolo protone più un singolo elettrone. Confrontata con la massa totale dell'atomo (938 MeV) è una quantità piccolissima (1 parte su 10^8) e per gli scopi pratici la differenza di massa si può trascurare. Le energie di legame dei nuclei sono dell'ordine di 10^6 volte più grandi delle energie di legame degli elettroni negli atomi.

Energia di legame per nucleone

L'energia di legame media per nucleone è definita come l'energia di legame totale di un nucleo divisa per A , il numero totale di nucleoni. Per l'atomo ^4_2He vale $(28.3 \text{ MeV})/4 = 7.1 \text{ MeV}$. Nella figura 30-1 è riportata l'energia di legame media per nucleone in funzione di A , per i nuclei stabili. La curva inizialmente cresce all'aumentare di A , appiattendosi poi su un valore di circa 8.7 MeV per nucleone in corrispondenza di $A \approx 40$. Al di là dei valori $A \approx 80$ la curva scende lentamente, mostrando che i nuclei più grandi sono trattenuti insieme da un'energia leggermente inferiore di quelli che stanno in mezzo alla tavola periodica. (Più tardi vedremo che queste differenze sono responsabili dell'energia nucleare prodotta nei processi di fissione e fusione.)

ESEMPIO 30-3 Energia di legame del ferro. Calcolate l'energia di legame totale e l'energia di legame media per il nucleone nel $^{56}_{26}\text{Fe}$, l'isotopo stabile più comune del ferro.

SOLUZIONE L'atomo $^{56}_{26}\text{Fe}$ possiede 26 protoni e 30 neutroni le cui masse prese separatamente ammontano a

$$(26)(1.007825 \text{ u}) = 26.2035 \text{ u (elettroni compresi)}$$

$$(30)(1.008665 \text{ u}) = 30.2600 \text{ u}$$

$$\text{Totale} = 56.4635 \text{ u.}$$

$$\text{Massa di } {}^{56}_{26}\text{Fe: } -55.9349 \text{ u (Appendice F)}$$

$$\Delta m = 0.5286 \text{ u.}$$

L'energia di legame totale è quindi

$$(0.5286 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) = 492.4 \text{ MeV}$$

e l'energia di legame media per nucleone è

$$\frac{492.4 \text{ MeV}}{56 \text{ nucleoni}} = 8.8 \text{ MeV.}$$

ESEMPIO 30-4 Energia di legame dell'ultimo neutrone. Qual è l'energia di legame del neutrone in più nell'atomo ${}^{13}_6\text{C}$?

SOLUZIONE Confrontiamo la massa di ${}^{13}_6\text{C}$ con quella dell'atomo avente un neutrone in meno, ${}^{12}_6\text{C}$, sommata a quella di un neutrone (appendice F):

$$\text{Massa } {}^{12}_6\text{C} = 12.000000 \text{ u}$$

$$\text{Massa } {}^1_0\text{n} = 1.008665 \text{ u}$$

$$13.008665 \text{ u.}$$

$$\text{Massa di } {}^{13}_6\text{C: } -13.003355 \text{ u}$$

$$\Delta m = 0.005310 \text{ u,}$$

che in energia corrisponde a $(931.5 \text{ MeV/u})(0.005310 \text{ u}) = 4.95 \text{ MeV}$. In altre parole per rimuovere un neutrone dal nucleo di ${}^{13}_6\text{C}$ occorre fornire un'energia di 4.95 MeV.

Possiamo analizzare i nuclei non solo dal punto di vista dell'energia, ma anche dal punto di vista delle forze che li mantengono uniti. Non possiamo aspettarci che un gruppo di protoni e neutroni si saldi spontaneamente, dato che i protoni sono tutti di carica positiva e pertanto si respingono l'un l'altro. E difatti nasce il problema di spiegare come mai un nucleo stia insieme, tenendo presente il fatto che la forza elettrostatica tra i protoni dovrebbe tendere ad allontanarli. Accettato come dato di fatto che i nuclei stabili *stanno* insieme, è chiaro che interviene un'altra forza ad agglomerarli. Dato che questa nuova forza è più intensa della forza elettrostatica (che a sua volta è molto maggiore della forza di gravità a dimensione nucleare) viene chiamata **forza nucleare forte**. La forza nucleare forte è una forza attrattiva che agisce tra tutti i nucleoni, che siano protoni o neutroni. Così i protoni si attraggono l'un l'altro per effetto della forza nucleare, nello stesso tempo in cui si respingono l'un l'altro per effetto della forza elettrostatica. I neutroni, considerato che sono elettricamente neutri, subiscono attrazione per altri neutroni o protoni solo per effetto della forza nucleare.

La forza nucleare risulta essere molto più complicata delle forze gravitazionali ed elettromagnetiche. Una descrizione matematica precisa non è ancor oggi disponibile. Nonostante questo, si sono fatti grandi sforzi per cercare di capire come agisce. Un'importante caratteristica della forza nucleare forte consiste nella sua azione a **corto raggio**: essa si fa sentire soltanto a distanze piccolissime. Questa forza è molto in-

Forza nucleare forte

*Forze a corto raggio
e ad ampio raggio*

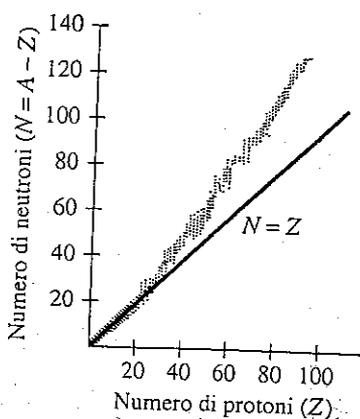


FIGURA 30-2 Numero di neutroni in funzione del numero di protoni per i nuclidi stabili, rappresentati dai punti.

Forza debole

tensa tra due nucleoni che si trovano a distanza di circa 10^{-15} m, ma è praticamente nulla se i due nucleoni sono separati da una distanza maggiore. Le forze elettriche e gravitazionali, che agiscono anche a grandi distanze, sono chiamate invece forze ad **ampio raggio**. La forza nucleare presenta strane bizzarrie. Per esempio se un nuclide contiene troppi o troppo pochi neutroni rispetto al numero di protoni, il legame tra i nucleoni si indebolisce; un nuclide che sotto questo aspetto sia troppo sbilanciato risulta instabile. Come si deduce dalla figura 30-2 i nuclei stabili tendono ad avere lo stesso numero di protoni e di neutroni ($N = Z$) fino al numero di massa $A \approx 30$ o 40 . Più oltre, i nuclei stabili contengono più neutroni che protoni. Ciò non è insensato, dato che al crescere di Z la repulsione elettrostatica aumenta e, per mantenere la situazione stabile, si richiede quindi un maggior numero di neutroni, che esercitano solo attrazione per forza nucleare. Per i valori troppo alti di Z non basta aumentare il numero di neutroni per sopraffare la cresciuta repulsione elettrostatica. Difatti non esistono nuclidi completamente stabili al di là di $Z = 82$.

Quando parliamo di nucleo stabile intendiamo dire che esso rimane legato indefinitamente. Quando invece è instabile? Quando il nucleo si frantuma spontaneamente, fenomeno che prende il nome di decadimento radioattivo. Prima di parlare dell'importante argomento della radioattività (prossimo paragrafo) diremo che esiste un secondo tipo di forza nucleare molto più debole della forza nucleare forte. La si chiama **forza nucleare debole** e ci accorgiamo della sua esistenza solo perché si manifesta in certi tipi di decadimento radioattivo. Queste due forze nucleari, la forte e la debole, assieme alle forze gravitazionali ed elettromagnetiche, costituiscono i quattro tipi conosciuti di forze esistenti in natura (ne ripareremo nel capitolo 32).

30-3 Radioattività

Lo studio della fisica nucleare ha avuto inizio nel 1896. In quell'anno Henri Becquerel (1852-1908) fece un'importante scoperta: nei suoi esperimenti sulla fosforescenza trovò che certi minerali (che contenevano uranio) impressionavano le lastre fotografiche anche quando queste erano protette in modo da escludere la presenza di luce. Era chiaro che il minerale emetteva qualche nuovo tipo di radiazione che, a differenza dei raggi X, si verificava senza alcuno stimolo esterno. Questo fenomeno fu alla fine chiamato **radioattività**.

Poco dopo la scoperta di Becquerel, Marie Curie (1867-1934) e suo marito Pierre Curie (1859-1906) isolarono due elementi prima sconosciuti, che risultavano altamente radioattivi (fig. 30-3). Li chiamarono

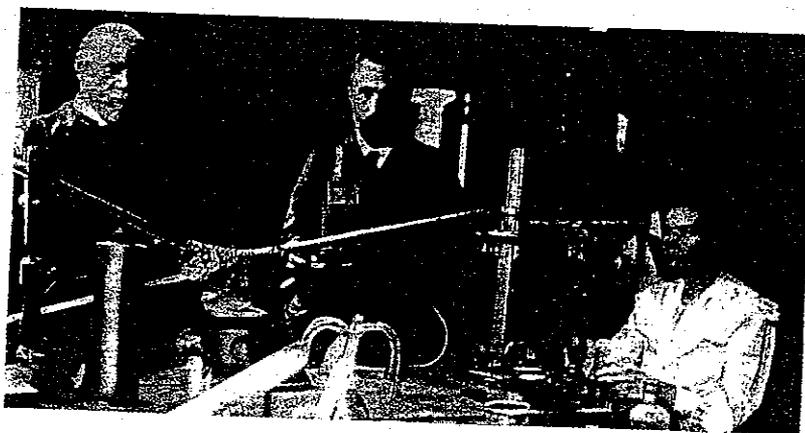


FIGURA 30-3 Marie e Curie nel loro laboratorio (circa 1900), quando scoprirono il radio.

polonio e radio. A questi ne seguirono presto anche altri. Si trovò che in tutti i casi la radioattività non veniva influenzata da alcun trattamento di tipo fisico o chimico per quanto violento, inclusi un forte riscaldamento o raffreddamento e l'azione di potenti reagenti chimici. Era chiaro che l'origine della radioattività doveva trovarsi nella profondità dell'atomo e quindi provenire dal nucleo. Ben presto emerse che la radioattività era il risultato della *disintegrazione* o *decadimento* di un nucleo instabile. Alcuni isotopi non sono stabili sotto l'azione della forza nucleare, e quindi decadono con emissione di alcuni tipi di radiazione o «raggi».

Esistono molti isotopi instabili in natura e la radioattività che essi emanano è chiamata *radioattività naturale*. In laboratorio si possono produrre altri isotopi instabili per mezzo di reazioni nucleari (par. 31-1); si dice quindi che sono prodotti «artificialmente» e si parla di *radioattività artificiale*.

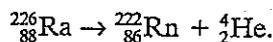
Rutherford e altri cominciarono a studiare la natura dei raggi emessi nella radioattività attorno al 1898. Trovarono che questi raggi possono essere classificati in tre tipi distinti, a seconda del loro potere di penetrazione. Il primo tipo può oltrepassare a stento un foglio di carta. Il secondo tipo è in grado di attraversare uno strato di alluminio di 3 mm. Il terzo è molto più penetrante: può trapassare lastre di piombo di alcuni centimetri ed essere rilevato oltre questa barriera. Chiamarono questi tre tipi di radiazione rispettivamente alfa (α), beta (β) e gamma (γ), dalle prime tre lettere dell'alfabeto greco.

Ciascun tipo di questi raggi ha una carica differente e quindi si incurva in modo diverso attraversando un campo magnetico, come illustrato in figura 30-4; i raggi α sono carichi positivamente, i raggi β hanno carica negativa e i raggi γ sono neutri. Ben presto si trovò anche che i tre tipi di radiazione consistevano in realtà di tre generi di particelle ormai ben noti. I raggi γ sono fotoni di altissima energia, addirittura superiore a quella dei raggi X. I raggi β sono elettroni, identici a quelli che orbitano attorno al nucleo (ma essi si generano all'interno del nucleo stesso). I raggi α (o particelle α) sono semplicemente nuclei dell'atomo di elio, ${}^4_2\text{He}$; una particella α quindi consiste di due protoni e due neutroni legati assieme.

Esaminiamo ora ciascuno di questi tre tipi di radioattività, o decadimenti, in maggior dettaglio.

30-4 Decadimento alfa

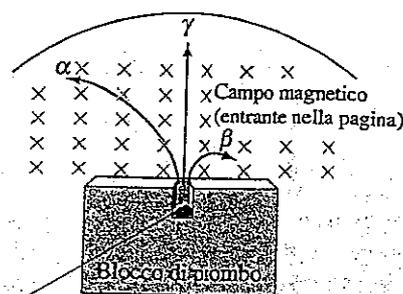
Quando un nucleo emette una particella α (${}^4_2\text{He}$) appare ovvio che il nucleo rimanente debba essere diverso dall'originale: ha infatti perduto due protoni e due neutroni. Il radio ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, ad esempio, è un emettitore α e decade in un nucleo con $Z = 88 - 2 = 86$ e $A = 226 - 4 = 222$. Il nucleo caratterizzato da $Z = 86$ è quello del radon (Rn); si veda l'appendice F o la tavola periodica. Il radio dunque decade in radon con emissione di una particella α e lo si scrive così:



Si osservi la figura 30-5.

È chiaro che nel momento in cui avviene un decadimento α , si forma un nuovo elemento. Il nucleo figlio (${}^{222}_{86}\text{Rn}$ in questo caso) è diverso dal nucleo padre (${}^{226}_{88}\text{Ra}$ in questo caso). Questa trasformazione da un elemento all'altro viene chiamata *trasmutazione*.

Il decadimento α può essere così schematizzato:



Campione radioattivo (radio)

FIGURA 30-4 I raggi alfa e i raggi beta vengono deviati in versi opposti da un campo magnetico, mentre i raggi gamma proseguono indisturbati.

Radiazioni α , β , γ

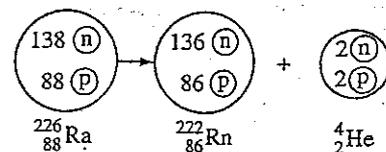


FIGURA 30-5 Decadimento radioattivo del radio in radon con emissione di una particella alfa.

Decadimento α

Nucleo figlio
Nucleo padre
Trasmutazione

dove N rappresenta il padre, N' il figlio, Z e A sono rispettivamente il numero atomico e il numero di massa atomica del padre.

Il decadimento α avviene perché la forza nucleare forte non è in grado di mantenere assieme i nuclei molto grandi. Dato che la forza nucleare forte agisce a corto raggio, si fa sentire solo tra nucleoni molto vicini. La forza elettrostatica invece può agire anche attraverso tutto il nucleo più grande. Per nuclei molto grandi, l'elevato valore di Z si traduce in una forza elettrostatica repulsiva preponderante (legge di Coulomb); essa agisce fra tutti i protoni. La forza nucleare forte, dato che interviene solo tra nucleoni vicini, viene sopraffatta ed è incapace di mantenere il nucleo unito.

Possiamo esprimere l'instabilità in termini di energia (o massa): la massa del nucleo padre è maggiore della massa del nucleo figlio sommato alla massa della particella α . La differenza di massa riappare sotto forma di energia cinetica, di cui è dotata la particella α e il nucleo figlio rinculante. L'energia totale rilasciata prende il nome di **energia di disintegrazione**, Q , del decadimento. Q è definito come

$$Q = (M_p - M_D - m_\alpha)c^2, \quad (30-2)$$

dove M_p , M_D e m_α sono le masse rispettivamente del padre, del figlio e della particella α . Se il padre avesse una massa inferiore alla somma di quelle del figlio e della particella α (di modo che $Q < 0$), il decadimento non avverrebbe, per non violare la legge di conservazione dell'energia.

ESEMPIO 30-5 Energia liberata nel decadimento dell'uranio. Calcolate l'energia di disintegrazione quando $^{232}_{92}\text{U}$ (massa = 232.037131 u) decade in $^{228}_{90}\text{Th}$ (228.028716 u) con emissione di una particella α . Come sempre i valori di massa si riferiscono agli atomi neutri.

SOLUZIONE Dato che la massa di ^4_2He è 4.002602 u (appendice F), la massa totale nello stato finale è

$$228.028716 \text{ u} + 4.002602 \text{ u} = 232.031318 \text{ u}.$$

La massa perduta nel decadimento di $^{232}_{92}\text{U}$ è

$$232.037131 \text{ u} - 232.031318 \text{ u} = 0.005813 \text{ u}.$$

Dato che 1 u = 931.5 MeV, l'energia Q liberata vale

$$Q = (0.005813 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \approx 5.4 \text{ MeV},$$

e quest'energia appare sotto forma di energia cinetica della particella α e del nucleo figlio. In base alla legge di conservazione della quantità di moto si può dimostrare che la particella α in questo decadimento ha un'energia cinetica di circa 5.3 MeV. Di conseguenza il nucleo figlio, che rincula nel verso opposto rispetto alla particella α , possiede un'energia cinetica di circa 0.1 MeV. Si veda il problema 34. ■

Perché, ci potremmo chiedere, i nuclei emettono questa combinazione di quattro nucleoni, chiamati particella α ? Perché non quattro nucleoni qualsiasi, oppure uno solo? La risposta è che la particella α è legata in maniera molto intensa, di modo che la sua massa è significativamente inferiore a quella di quattro nucleoni separati. Come abbiamo visto nell'esempio 30-2 la combinazione di due protoni e due neutroni separati presenta una massa totale di circa 4.032980 u. La massa totale del nucleo di $^{228}_{90}\text{Th}$ sommata a quella di quattro nucleoni separati è di 232.061696 u, maggiore della massa del nucleo padre. Un simile decadimento non potrebbe accadere perché si violerebbe il principio di con-

servazione dell'energia. In modo simile è quasi sempre energeticamente impossibile l'emissione di un singolo nucleone. O meglio, per esprimersi in altro modo, per qualsiasi nuclide in cui ciò si renda possibile (massa del padre > massa del figlio + massa del nucleone), il decadimento avviene così rapidamente dopo la formazione del padre che non siamo in grado di osservare il padre in natura.

Un'applicazione della fisica nucleare si trova in certi tipi di rivelatori di fumo. Questi dispositivi si basano su due principi diversi. Uno di essi impiega luce infrarossa per misurare l'attenuazione della luce in presenza di particelle di fumo. Questo tipo di rivelatore è meno efficace di quelli basati invece sulla ionizzazione dell'aria, indotta da un decadimento radioattivo. Questo genere di rivelatori contiene circa 0.2 mg dell'isotopo dell'americio $^{241}_{95}\text{Am}$, sotto forma di AmO_2 , che è radioattivo. La radiazione ionizza le molecole di azoto e di ossigeno nel volume d'aria compreso tra i due elettrodi polarizzati di segno opposto. L'aria ionizzata che ne risulta consente lo stabilirsi di una debole corrente. Se entra del fumo la radiazione viene assorbita dalle particelle di fumo piuttosto che dalle molecole dell'aria, riducendo così la corrente. La caduta di corrente viene rivelata da un dispositivo elettronico che innesca un allarme. La dose di radiazione che fuoriesce da un rivelatore di fumo all'americio sigillato è molto minore della radioattività naturale di fondo, e si può considerare pertanto innocua. Senza dubbio i rivelatori di fumo contribuiscono a salvare vite e a ridurre i danni agli edifici.

30-5 Decadimento beta

Avviene una trasmutazione di elementi anche in occorrenza di un decadimento β , in cui si ha l'emissione di un elettrone o particella β^- . Per esempio il nucleo $^{14}_6\text{C}$, quando decade, emette un elettrone:



dove e^- è il simbolo dell'elettrone. (Talvolta si usa per l'elettrone il simbolo $^0_{-1}e$, dato che la carica corrisponde a $Z = -1$ e dato che praticamente $A = 0$, non essendo un nucleone e avendo una massa molto piccola.) La particella conosciuta come neutrino, con massa a riposo $m_0 = 0$ e carica $q = 0$, all'inizio non era stata rivelata e soltanto più tardi se ne ipotizzò l'esistenza, come vedremo fra poco in questo paragrafo. Quando viene emesso un elettrone non si ha perdita di nucleoni, per cui il numero totale di nucleoni, A , rimane lo stesso nel nucleo figlio come era nel nucleo padre. Poiché tuttavia è stato emesso un elettrone, la carica del nucleo figlio è diversa da quella del padre. Il nucleo padre aveva $Z = +6$. Nel decadimento il nucleo perde una carica di -1 ; per conservare la carica dunque il nucleo rimasto deve avere una carica positiva in più, per un totale di 7. Di conseguenza il nucleo figlio presenta un valore $Z = 7$, corrispondente all'azoto.

Occorre fare attenzione che l'elettrone emesso nel decadimento β non è un elettrone orbitale. Al contrario quest'elettrone viene creato all'interno del nucleo stesso. Accade infatti che uno dei neutroni si trasforma in un protone e durante questo processo (per conservare la carica) emette un elettrone. Infatti i neutroni liberi effettivamente decadono in questo modo: $n \rightarrow p + e^-$ (più un neutrino). Proprio per questa loro origine nucleare gli elettroni emessi nel decadimento β spesso sono chiamati «particelle β », piuttosto che elettroni, per ricordarci la loro origine. Tuttavia essi sono indistinguibili dai normali elettroni orbitali.

Gli elettroni emessi provengono dal nucleo

ESEMPIO 30-6 Produzione di energia nel decadimento di $^{14}_6\text{C}$. Quanta energia si libera nel decadimento di $^{14}_6\text{C}$ in $^{14}_7\text{N}$ per emissione β ? Si consulti l'appendice F.

SOLUZIONE Le masse date nell'appendice F sono quelle degli atomi neutri, e dobbiamo quindi tenere conto delle masse degli elettroni coinvolti. Si assuma che il nucleo padre abbia 6 elettroni per essere neutro, e che la sua massa sia 14.003242 u. Il figlio, che in questo decadimento è $^{14}_7\text{N}$, non è neutro dato che ha ancora i medesimi sei elettroni che lo circondano mentre il suo nucleo ha una carica di $+7e$. Tuttavia la massa di questo figlio dotato dei suoi sei elettroni più la massa dell'elettrone emesso (per un totale di sette elettroni) è proprio la massa dell'atomo neutro di azoto. La massa totale dunque nello stato finale è

(massa del nucleo di $^{14}_7\text{N}$ + 6 elettroni) + (massa di 1 elettrone),
ed è uguale a

massa dell'atomo neutro $^{14}_7\text{N}$ (inclusi 7 elettroni),

che, come si ricava dall'appendice F, ha una massa di 14.003074 u. Si noti che il neutrino non contribuisce né al bilancio di massa né a quello di carica, dato che ha $m_0 = 0$ e $q = 0$. Di conseguenza la massa dopo il decadimento vale 14.003074 u mentre prima era di 14.003242 u. La differenza di massa è dunque 0.000168 u, che corrisponde a 0.156 MeV ossia 156 keV. ■

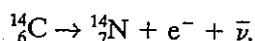
Secondo quest'esempio dovremmo aspettarci che l'elettrone emesso abbia un'energia cinetica di 156 keV. Il nucleo figlio, considerato che la sua massa è molto maggiore di quella di un elettrone, rincula con una velocità bassissima e quindi con bassissima energia cinetica. Difatti misure molto precise indicano che alcune particelle β emesse hanno un'energia cinetica prossima a quella qui calcolata, ma la maggior parte degli elettroni emessi possiede energia cinetica in qualche misura inferiore. In effetti l'energia degli elettroni emessi può assumere qualsiasi valore da 0 fino al valore massimo calcolato. E in tutti i decadimenti β si osserva che l'energia cinetica può assumere questo intervallo di valori.

È come se la legge di conservazione dell'energia fosse violata, e difatti Bohr prese seriamente in considerazione questa possibilità. Alcuni esperimenti accurati indicavano che nemmeno la quantità di moto e il momento angolare sembravano conservarsi. I fisici erano spaventati dalla prospettiva di dover rinunciare a queste leggi che avevano funzionato così bene in tutte le situazioni precedenti. Nel 1930 Wolfgang Pauli propose una soluzione alternativa: forse nel decadimento β oltre all'elettrone interveniva una nuova particella molto difficile da rilevare. Quest'ipotetica particella avrebbe potuto portare con sé l'energia, la quantità di moto e il momento angolare richiesti per mantenere le leggi di conservazione. Le si diede il nome di **neutrino**, su suggerimento del fisico italiano Enrico Fermi (1901-1954; fig. 30-6), che nel 1934 propose una dettagliata teoria del decadimento β . (Fu Fermi a ipotizzare in questa teoria l'esistenza della quarta forza della natura, che chiamiamo forza nucleare debole.) Il neutrino ha carica nulla e sembra avere massa a riposo pari a 0, sebbene non possiamo ancora escludere la possibilità che questa massa sia piccolissima. Se la sua massa è nulla, ci troveremo nello stesso caso del fotone data la sua neutralità e la velocità a cui viaggia pari a quella della luce. Tuttavia il neutrino è molto più difficile da rivelare. Nel 1956 alcuni esperimenti complessi produssero un'ulteriore prova dell'esistenza del neutrino; e da allora la maggior parte dei fisici è concorde nell'accettarne l'esistenza.



FIGURA 30-6 Enrico Fermi. Fermi contribuì significativamente sia allo sviluppo teorico sia a quello sperimentale della fisica, dimostrando un'abilità quasi unica nell'ultimo secolo.

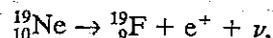
Il simbolo del neutrino è la lettera greca ν , in campo scientifico spesso pronunciata «nu». Una scrittura più corretta del decadimento di ${}^{14}_6\text{C}$ è dunque



Decadimento β^-

La barretta ($\bar{\quad}$) sopra il simbolo del neutrino sta a indicare che si tratta di un «antineutrino». (Non badiamo ora al fatto che qui lo chiamiamo antineutrino piuttosto che semplicemente neutrino; ne ripareremo nel capitolo 32.)

Molti isotopi decadono con emissione di un elettrone. Si tratta sempre di isotopi che hanno troppi neutroni in confronto al numero di protoni. Sono dunque isotopi che stanno al di sopra della curva di stabilità tracciata nella figura 30-2. Che dire però degli isotopi instabili che presentano una carenza di neutroni in rapporto al numero di protoni, quelli cioè che stanno al di sotto della curva di figura 30-2? Essi decadono emettendo un **positrone** invece di un elettrone. Il positrone (chiamato talvolta e^+ o particella β^+) ha la stessa massa dell'elettrone, ma la sua carica positiva vale $+1e$. Considerato che è così simile all'elettrone, salvo che per la carica, il positrone è chiamato l'**antiparticella**[†] dell'elettrone. Un esempio di decadimento β^+ è proposto dal ${}^{19}_{10}\text{Ne}$:



Decadimento β^+ (positrone)

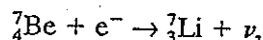
dove e^+ (ossia 0_1e) rappresenta il positrone. (Si noti che la particella ν emessa in questo caso è un neutrino mentre quella emessa nel decadimento β^- era un antineutrino. Questo antielettrone dunque, chiamato positrone, viene emesso insieme a un neutrino, mentre all'elettrone viene associato un antineutrino; lo vedremo nel capitolo 32.)

Possiamo scrivere i decadimenti β^- e β^+ in generale come segue:



dove N rappresenta il nucleo padre e N' il figlio.

Oltre all'emissione β^- e β^+ esiste un terzo tipo di processo, chiamato **cattura elettronica** (CE nell'appendice F); avviene quando un nucleo assorbe uno dei suoi elettroni orbitanti. Un esempio è dato dal ${}^7_4\text{Be}$, che decade in ${}^7_3\text{Li}$. Il processo si scrive



Cattura elettronica

o in generale



Normalmente a essere catturato è un elettrone dello strato più interno (K), nel qual caso si parla di «cattura K ». Nel processo sparisce un elettrone e un protone del nucleo diventa un neutrone; come risultato si ha l'emissione di un neutrino. Sperimentalmente si rivela l'esistenza di questo processo riscontrando l'esistenza di raggi X emessi (dovuti agli elettroni che vanno a riempire lo stato lasciato vuoto) dell'energia esattamente prevista.

Cattura K

Nel decadimento β è la forza nucleare debole a svolgere il ruolo cruciale. Il neutrino ha la caratteristica unica di interagire con la materia solo attraverso forze deboli, motivo per cui è così difficile da rilevare.

[†]La tratteremo nel capitolo 32. Brevemente, l'antiparticella ha la stessa massa della corrispondente particella, ma carica opposta.

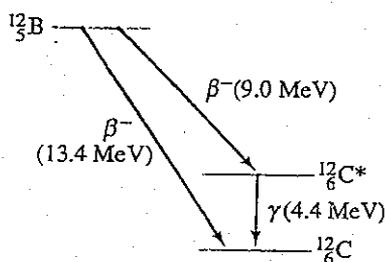


FIGURA 30-7 Diagramma dei livelli di energia in cui si vede come $^{12}_5\text{B}$ può decadere allo stato fondamentale di $^{12}_6\text{C}$ per decadimento β (energia totale liberata = 13.4 MeV), oppure con un decadimento β a uno stato eccitato di $^{12}_6\text{C}$ (indicato da*), con successivo decadimento allo stato fondamentale ed emissione di un raggio γ da 4.4 MeV.

30-6 Decadimento gamma

I raggi gamma sono fotoni di altissima energia. Il decadimento di un nucleo con emissione di un raggio γ è molto simile all'emissione di fotoni da parte di atomi eccitati. Così come succede per un atomo, il nucleo stesso può trovarsi in uno stato eccitato. Quando decade a uno stato di energia inferiore, o allo stato fondamentale, emette un fotone. I livelli ammessi di energia per un nucleo sono molto più distanziati di quelli di un atomo: nell'ordine di grandezza dei keV o MeV, a confronto dei pochi eV tipici degli elettroni in un atomo. Di conseguenza i fotoni emessi hanno energie che vanno da pochi keV a diversi MeV. Per un certo tipo di decadimento i raggi γ posseggono sempre la stessa energia. Dato che i raggi γ non portano carica, non si hanno trasmutazioni di elementi in conseguenza di un decadimento γ .

Come può un nucleo trovarsi in uno stato eccitato? Può accadere in conseguenza di un urto violento con un'altra particella. Più comunemente il nucleo che resta dopo un precedente decadimento radioattivo può trovarsi in uno stato eccitato. Un tipico esempio è mostrato nel diagramma dei livelli di energia di figura 30-7. Il nucleo $^{12}_5\text{B}$ può decadere con emissione β direttamente allo stato fondamentale di $^{12}_6\text{C}$; oppure sempre per decadimento β può pervenire allo stato eccitato di $^{12}_6\text{C}$, che a sua volta decade allo stato fondamentale con l'emissione di un raggio γ di 4.4 MeV.

Possiamo scrivere il decadimento γ come segue:



In alcuni casi il nucleo può restare allo stato eccitato per un certo intervallo di tempo prima di emettere il raggio γ . Si dice che il nucleo si trova in uno **stato metastabile** ed è chiamato **isomero**.

Un nucleo eccitato può talvolta ritornare allo stato fondamentale attraverso un differente processo noto con il nome di **conversione interna**, senza emissione di raggi γ . In questo processo il nucleo eccitato interagisce con uno degli elettroni orbitali e lo espelle dall'atomo con la stessa energia cinetica (meno l'energia di legame dell'elettrone) che avrebbe avuto il raggio γ emesso.

Che differenza c'è, potreste chiedere, tra un raggio γ e un raggio X? Entrambi sono radiazioni elettromagnetiche (fotoni) e, sebbene i raggi γ normalmente abbiano energia superiore a quella dei raggi X, i loro intervalli di energia si sovrappongono in una certa misura. Non c'è differenza intrinseca. Usiamo il termine raggi X quando il fotone viene prodotto da un'interazione elettrone-atomo, mentre parliamo di raggi γ se il fotone viene prodotto da un processo nucleare.

30-7 Conservazione del numero nucleonico e altre leggi di conservazione

In tutti e tre i tipi di decadimento radioattivo le classiche leggi di conservazione sono rispettate. Si conservano dunque l'energia, la quantità di moto, il momento angolare e la carica elettrica. Queste quantità sono sempre le stesse sia prima sia dopo il decadimento. Emerge tuttavia una nuova legge di conservazione, la **legge di conservazione del numero nucleonico**. In base a questa legge il numero totale di nucleoni (A) rimane costante in qualsiasi processo, sebbene un nucleone possa tra-

sformarsi da un tipo all'altro (protoni in neutroni o viceversa). Questa legge è valida in tutti e tre i tipi di decadimento. Nella tabella 30-2 sono elencati in sintesi i decadimenti α , β e γ .

30-8 Tempo di dimezzamento e frequenza di decadimento

Un campione macroscopico di qualsiasi isotopo radioattivo consiste di un grandissimo numero di nuclei radioattivi. Questi nuclei non decadono tutti simultaneamente. Decadono piuttosto uno alla volta lungo un certo periodo di tempo. Si tratta di un processo casuale: non possiamo prevedere esattamente quando un dato nucleo decadrà. Possiamo tuttavia determinare, su base statistica, quanti nuclei approssimativamente in un campione decadranno in un dato periodo di tempo, assumendo che ciascun nucleo abbia la stessa probabilità di decadere in ogni istante della sua esistenza.

Il numero di decadimenti ΔN che avviene in un breve intervallo di tempo Δt è dunque proporzionale a Δt e al numero totale N dei nuclei radioattivi presenti:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (30-3)$$

In questa equazione λ è una costante di proporzionalità che prende il nome di **costante di decadimento**, e che assume valori diversi per i vari isotopi. Quanto maggiore è λ tanto più elevata è la frequenza di decadimento e tanto più radioattivo noi definiamo quell'isotopo. Il numero di decadimenti che avviene nel breve intervallo di tempo Δt è indicato con ΔN perché ciascun decadimento corrisponde alla diminuzione di una unità nel numero N dei nuclei presenti. Il decadimento radioattivo potrebbe definirsi un processo a «colpi singoli», come illustrato nella figura 30-8. Quando un certo nucleo padre decade nel suo figlio, non può ripetere il processo. Il segno meno che compare nell'eq. 30-3 sta ad indicare che N va diminuendo.

Possiamo risolvere l'eq. 30-3 rispetto a N (mediante qualche passaggio di analisi matematica) ottenendo il risultato

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (30-4)$$

dove N_0 è il numero di nuclei presenti all'istante $t = 0$, e N rappresenta il loro numero dopo un tempo t . Il simbolo e rappresenta la base dei logaritmi naturali (già incontrata nei paragrafi 19-7 e 21-11), che vale $e = 2.718 \dots$. E così il numero dei nuclei padre di un campione decresce

TABELLA 30-2 I tre tipi di decadimento radioattivo

Decadimento α:	${}^A_Z N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} N' + {}^4_2 \text{He}$
Decadimento β^-:	${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z+1} N' + e^- + \bar{\nu}$
	${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z-1} N' + e^+ + \nu$
	${}^A_Z N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} N' + \nu$ [CE] [†]
Decadimento γ:	${}^A_Z N^* \rightarrow {}^A_Z N + \gamma$

*Indica uno stato eccitato del nucleo.
†Cattura elettronica.

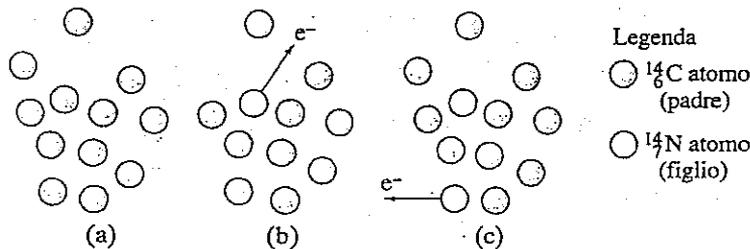


FIGURA 30-8 I nuclidi radioattivi decadono uno alla volta. Di conseguenza il numero di nuclei padre in un campione continua a diminuire. Quando un nucleo di ${}^{14}_6\text{C}$ emette un elettrone si trasforma in un nucleo di ${}^{14}_7\text{N}$.

Legge del decadimento radioattivo

642
¹²₃B
 3 tipi
 attivo

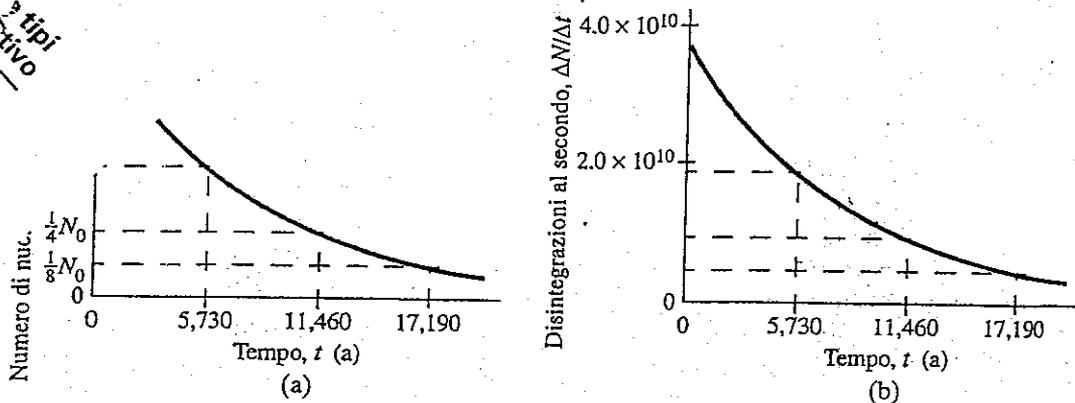


FIGURA 30-9 (a) Il numero N di nuclei padre in un certo campione di $^{14}_6\text{C}$ decresce esponenzialmente. (b) Il numero di disintegrazioni al secondo diminuisce pure esponenzialmente. Il tempo di dimezzamento del $^{14}_6\text{C}$ è di 5730 anni, il che vuol dire che il numero dei nuclei padre, N , e la frequenza di decadimento, $\Delta N/\Delta t$, si dimezzano ogni 5730 anni.

esponenzialmente col tempo, come si vede nella figura 30-9a per il decadimento di $^{14}_6\text{C}$. La (30-4) è chiamata **legge del decadimento radioattivo**.

Attività

Il numero di disintegrazioni al secondo, $\Delta N/\Delta t$ è chiamato **attività** del campione. Dato che $\Delta N/\Delta t$ è proporzionale a N (eq. 30-3), anche l'attività decresce esponenzialmente col tempo secondo la stessa costante di proporzionalità (fig. 30-9b). L'attività all'istante t è data da

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t}, \quad (30-5)$$

dove $(\Delta N/\Delta t)_0$ rappresenta l'attività all'istante $t = 0$.

Tempo di dimezzamento

La frequenza di decadimento di un certo isotopo viene spesso indicata specificando il suo «tempo di dimezzamento» piuttosto che la costante di decadimento. Il **tempo di dimezzamento** di un isotopo, detto anche *semiperiodo* o *emivita*, viene definito come il tempo necessario perché decada metà del numero originario di isotopi presenti in un certo campione. Per esempio il semiperiodo di $^{14}_6\text{C}$ è di 5730 anni. Se in un certo momento un pezzo di legno fossile contiene poniamo 1.00×10^{22} nuclei di $^{14}_6\text{C}$, 5730 anni più tardi conterrà 0.50×10^{22} di questi nuclei. Dopo altri 5730 anni i nuclei presenti saranno 0.25×10^{22} , e via dicendo. Lo si vede sul grafico di figura 30-9a. Dato che la frequenza di decadimento $\Delta N/\Delta t$ è proporzionale a N , anch'essa decresce di un fattore 2 ogni semiperiodo (fig. 30-9b).

I tempi di dimezzamento degli isotopi radioattivi conosciuti variano approssimativamente da 10^{-22} s fino a 10^{28} s (circa 10^{21} anni). Nell'appendice F sono dati i tempi di dimezzamento di molti isotopi. Dovrebbe essere chiaro che il tempo di dimezzamento, qui indicato con $T_{1/2}$, è in relazione inversa con la costante di decadimento. Quanto più lungo è il semiperiodo di un isotopo tanto più lentamente esso decade e quindi tanto minore è la costante λ . Al contrario gli isotopi molto attivi (λ è elevato) presentano emivite cortissime. L'esatta relazione tra il tempo di dimezzamento e la costante di decadimento è

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (30-6)$$

La possiamo ricavare partendo dall'eq. 30-4. All'istante $t = 0$, $N = N_0 e^0 = N_0$. All'istante $t = T_{1/2}$, $N = N_0/2$ per definizione di $T_{1/2}$ (restano metà dei nuclei padre). Dalla (30-4) abbiamo quindi al tempo $t = T_{1/2}$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \text{ossia} \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}},$$

di modo che

$$e^{\lambda T_{1/2}} = 2.$$

Prendiamo i logaritmi naturali di entrambi i membri [si ricordi che «ln» e «e» sono operazioni inverse, ossia $\ln(e^x) = x$] ottenendo

$$\ln(e^{\lambda T_{1/2}}) = \ln 2,$$

e quindi

$$\lambda T_{1/2} = 0.693 \quad \text{e} \quad T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda},$$

che coincide con l'eq. 30-6. Il prossimo paragrafo è dedicato a esempi di calcolo in cui compare $T_{1/2}$.

30-9 Calcolo delle frequenze di decadimento e dei tempi di dimezzamento

Consideriamo alcuni esempi che illustrano cosa possiamo determinare di una sostanza radioattiva quando conosciamo il tempo di dimezzamento.

ESEMPIO 30-7 **Attività di un campione.** L'isotopo $^{14}_6\text{C}$ presenta un tempo di dimezzamento di 5730 anni. Se in un certo istante un campione contiene 1.00×10^{22} nuclei di carbonio 14, qual è l'attività del campione?

SOLUZIONE Calcoliamo dapprima la costante di decadimento λ con l'eq. 30-6, ottenendo

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{(5730 \text{ a})(3.156 \times 10^7 \text{ s/a})} = 3.83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1},$$

tenendo presente che il numero di secondi in un anno è $(60)(60)(24)(365.25) = 3.156 \times 10^7$. Dall'eq. 30-3 sappiamo che l'attività, ossia la frequenza di decadimento, è (ignoriamo il segno meno)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N}{\Delta t} &= \lambda N = (3.83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1})(1.00 \times 10^{22}) \\ &= 3.83 \times 10^{10} \text{ disintegrazioni/s.} \end{aligned}$$

(L'unità «disintegrazioni/s» è spesso scritta semplicemente come s^{-1} , dato che «disintegrazioni» non rappresenta una grandezza ma si riferisce solo a un numero.) Si noti che il grafico di figura 30-9b parte da questo valore, corrispondente al numero originale di nuclei presenti $N = 1.0 \times 10^{22}$ nella figura 30-9a. ■

ESEMPIO 30-8 **Un campione di $^{13}_7\text{N}$ radioattivo.** In un laboratorio sono presenti $1.49 \mu\text{g}$ di $^{13}_7\text{N}$, che presenta un semiperiodo di 10.0 min (600 s). (a) Quanti nuclei sono presenti inizialmente? (b) Qual è l'attività iniziale? (c) Qual è l'attività dopo 1.00 h? (d) Quanto tempo deve passare perché l'attività scenda a un valore inferiore a 1.00 s^{-1} ?

SOLUZIONE (a) Dato che il numero di massa atomica è 13, significa che 13.0 g contengono 6.02×10^{23} nuclei (pari al numero di Avogadro). Dato che noi abbiamo soltanto 1.49×10^{-6} g, il numero di nuclei, N_0 , presenti inizialmente è dato dal rapporto

$$\frac{N_0}{1.49 \times 10^{-6} \text{ g}} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{13.0 \text{ g}},$$

S O M M A R I O

La fisica nucleare è lo studio dei nuclei atomici. I nuclei contengono **protoni** e **neutroni**, che sono nel loro insieme chiamati **nucleoni**. Il numero totale di nucleoni, A , è il **numero di massa atomica**. Il numero di protoni, Z , è il **numero atomico**. Il numero di neutroni è quindi pari ad $A - Z$. Gli **isotopi** sono nuclei aventi lo stesso valore Z ma diverso numero di neutroni. Per un elemento X un isotopo avente determinati Z e A viene rappresentato dal simbolo



Il raggio nucleare è proporzionale ad $A^{1/3}$, ciò che indica che tutti i nuclei hanno circa la stessa densità. Le masse nucleari vengono espresse in **unità di massa atomica unificata** (u), dove la massa del ${}^{12}_6\text{C}$ (inclusi i suoi 6 elettroni) si definisce massa esattamente uguale a 12 u, che in termini di energia equivalente ($E = mc^2$) equivale a

$$1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2 = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

La massa di un nucleo stabile è minore della somma delle masse dei suoi nucleoni costituenti. La differenza di massa (moltiplicata per c^2) corrisponde all'**energia di legame totale**. Essa rappresenta l'energia necessaria per spezzare il nucleo nei suoi nucleoni componenti. L'**energia di legame per nucleone** vale in media circa 8 MeV per nucleone, ed è massima per i nuclei di dimensione intermedia.

I nuclei instabili subiscono un **decadimento radioattivo**; si trasformano in altri nuclei ed emettono particelle α , β , o γ . La particella α è un nucleo di ${}^4_2\text{He}$; la particella β è un elettrone o un positrone; il raggio γ è un fotone di alta energia.

Nel decadimento β viene emesso anche un **neutrino**. La trasformazione di un nucleo padre in un nucleo figlio viene chiamata **trasmutazione** dell'elemento. Il decadimento radioattivo avviene spontaneamente solo quando la massa a riposo dei prodotti è inferiore alla massa del nucleo padre. La perdita di massa si converte in energia cinetica dei prodotti.

I nuclei sono trattenuti insieme dalla **forza nucleare forte**. La **forza nucleare debole** si rende evidente nel decadimento β . Queste due forze, assieme a quella gravitazionale e a quella elettromagnetica, rappresentano le quattro forze fondamentali della natura. In tutti i decadimenti si conservano la carica elettrica, la quantità di moto, il momento angolare e la massa-energia, oltre che il **numero nucleonico**.

Il decadimento radioattivo è un processo statistico. Per un dato tipo di nucleo radioattivo il numero di nuclei che decadono (ΔN) in un intervallo di tempo Δt è proporzionale al numero N e ai nuclei padre presenti:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t.$$

La costante di proporzionalità λ è chiamata costante di decadimento ed è caratteristica di ogni tipo di nucleo. Il numero N di nuclei rimasti dopo un tempo t diminuisce esponenzialmente:

$$N \propto e^{-\lambda t},$$

come anche l'attività, $\Delta N/\Delta t$. Il tempo di dimezzamento, detto anche semiperiodo o emivita, $T_{1/2}$, è il tempo richiesto perché decadano metà dei nuclei di un campione radioattivo. È legato alla costante di decadimento dalla relazione $T_{1/2} = 0.693/\lambda$.

Q U E S I T I

1. Cosa hanno in comune i diversi isotopi di un dato elemento? E in che cosa differiscono?
2. Che elementi sono quelli rappresentati qui da una X : (a) ${}^{232}_{92}\text{X}$; (b) ${}^{18}_9\text{X}$; (c) ${}^1_1\text{X}$; (d) ${}^{82}_{38}\text{X}$; (e) ${}^{247}_{97}\text{X}$?
3. Quanti protoni e quanti neutroni sono presenti in ciascun isotopo del quesito 2?
4. Perché le masse atomiche di molti elementi (si veda la tavola periodica) non sono prossime a un numero intero?
5. Come possiamo sapere che esiste una forza nucleare forte?
6. Che somiglianze e che differenze ci sono tra la forza nucleare forte e la forza elettrostatica?
7. Quale prova sperimentale concernente la radioattività dimostra che questa è un processo nucleare?
8. L'isotopo ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ è piuttosto inusuale in quanto può decadere sia per emissione γ sia per emissione β^- sia per emissione β^+ . Quali sono i nuclidi che risultano in ciascun caso?
9. Quanti neutroni contiene il nucleo in cui decade lo ${}^{238}_{92}\text{U}$?
10. Descrivete in quanti più modi possibili la differenza tra i raggi α , β , e γ .
11. Quale elemento si forma in seguito al decadimento radioattivo di (a) ${}^{24}_{11}\text{Na}$ (β^-); (b) ${}^{22}_{11}\text{Na}$ (β^+); (c) ${}^{210}_{84}\text{Po}$ (α)?
12. Quale elemento si forma in seguito al decadimento di (a) ${}^{32}_{15}\text{P}$ (β^-); (b) ${}^{35}_{16}\text{S}$ (β^-); (c) ${}^{211}_{83}\text{Bi}$ (α)?

13. Sostituite i punti interrogativi nei seguenti processi di decadimento:

- (a) ${}^{45}_{20}\text{Ca} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$
 (b) ${}^{58}_{29}\text{Cu} \rightarrow ? + \gamma$
 (c) ${}^{46}_{24}\text{Cr} \rightarrow {}^{46}_{23}\text{V} + ?$
 (d) ${}^{234}_{94}\text{Pu} \rightarrow ? + \alpha$
 (e) ${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + ?$

14. Subito dopo che un nucleo di ${}^{238}_{92}\text{U}$ è decaduto in ${}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$, il nucleo figlio di torio ha ancora 92 elettroni attorno a sé. Dato che normalmente il torio possiede 90 elettroni, cosa supponete che succeda dei due elettroni in più?

15. Quando un nucleo subisce decadimento β che cosa succede ai livelli di energia degli elettroni atomici? Che sorte subiscono probabilmente questi elettroni a seguito del decadimento?

16. Le particelle α provenienti da un nuclide emettitore α sono monoenergetiche; cioè hanno tutte la stessa energia cinetica. Le particelle β invece provenienti da un nuclide emettitore β presentano uno spettro di energie. Spiegate la differenza tra i due casi.

17. Gli isotopi che subiscono il fenomeno di cattura elettronica giacciono generalmente al di sopra o al di sotto della curva di stabilità di figura 30-2?

18. L'idrogeno o il deuterio possono emettere una particella α ?

19. Perché molti isotopi radioattivi prodotti artificialmente sono rari in natura?

20. Un isotopo presenta un tempo di dimezzamento di un mese. Dopo due mesi un certo campione di questo isotopo sarà completamente decaduto? In caso negativo quanto ne rimane?

21. Spiegate l'assenza di emettitori β^+ nella serie di decadimento radioattivo di figura 30-10.

22. La datazione al ${}^{14}\text{C}$ può servire per misurare l'età di antichi muri in pietra o lapidi?

23. Che assunzioni si fanno quando si impiega il metodo di datazione al carbonio? Quali elementi pensate che possano influenzare queste assunzioni?

24. Descrivete come la curva di energia potenziale di una particella α in un nucleo emettitore α differisce da quella di un nucleo stabile.

PROBLEMI

PARAGRAFO 30-1

- (I) Quant'è la massa a riposo di una particella α in MeV/c^2 ?
- (I) Il mesone π ha una massa di $139 \text{ MeV}/c^2$. Quanto vale in unità di massa atomica?
- (I) Qual è il raggio approssimativo di una particella α (${}^4_2\text{He}$)?
- (I) Di che percentuale il raggio dell'isotopo ${}^{14}_6\text{C}$ è maggiore di quello del suo omologo ${}^{12}_6\text{C}$?
- (II) (a) Che frazione della massa dell'atomo d'idrogeno appartiene al nucleo? (b) Che frazione del volume dell'atomo d'idrogeno è occupata dal nucleo? (c) Che densità ha la materia nucleare? Confrontatela con quella dell'acqua.
- (II) (a) Qual è il raggio approssimativo di un nucleo ${}^{65}_{29}\text{Cu}$? (b) Qual è all'incirca il valore di A per un nucleo di raggio $3.7 \times 10^{-15} \text{ m}$?
- (II) Quanta energia deve possedere una particella α per arrivare giusto giusto a «toccare» la superficie di un nucleo di ${}^{238}_{92}\text{U}$?
- (II) Se una particella α viene liberata da ferma in prossimità della superficie di un nucleo di ${}^{243}_{95}\text{Am}$, quale dovrebbe essere la sua energia cinetica dopo l'allontanamento?
- (II) Quale nucleo stabile ha un raggio approssimativamente pari alla metà del nucleo di uranio? [Suggerimento: trovate A e poi Z usando l'appendice F.]

PARAGRAFO 30-2

- (I) Stimate l'energia di legame totale per il ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, in base alla figura 30-1.

11. (I) Dalla figura 30-1 ricavate una stima dell'energia totale di legame di (a) ${}^{238}_{92}\text{U}$ e (b) ${}^{84}_{36}\text{Kr}$.

12. (II) A partire dai dati riportati nell'appendice F calcolate l'energia di legame di ${}^2_1\text{H}$ (deuterio).

13. (II) Calcolate l'energia di legame per nucleone di un nucleo di ${}^{14}_7\text{N}$.

14. (II) Calcolate l'energia di legame totale e l'energia di legame per nucleone di ${}^7_3\text{Li}$. Si veda l'appendice F.

15. (II) Calcolate l'energia di legame in un elettrone in un nucleo di ${}^{12}_6\text{C}$. [Suggerimento: confrontate la massa di ${}^{12}_6\text{C}$ con quella di ${}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$; vedi appendice F.]

16. (II) Confrontate l'energia di legame di un neutrone nel ${}^{23}_{11}\text{Na}$ con quella nel ${}^{24}_{11}\text{Na}$.

17. (II) Quanta energia si richiede per rimuovere (a) un protone e (b) un neutrone dal nucleo di ${}^{16}_8\text{O}$? Spiegate la differenza tra le risposte.

18. (II) (a) Dimostrate che il nucleo di ${}^8_4\text{Be}$ (massa = 8.005305 u) è instabile nei confronti del decadimento di due particelle α . (b) Il nucleo ${}^{12}_6\text{C}$ è stabile nei confronti del decadimento in tre particelle α ? Spiegate perché o perché no.

PARAGRAFI DA 30-3 A 30-7

19. (I) Il ${}^{60}_{27}\text{Co}$ in uno stato eccitato emette raggi γ di energia 1.33 MeV quando decade allo stato fondamentale. Qual è la massa (in u) dell'atomo eccitato di cobalto?

20. (I) Quanta energia si libera quando il trizio, ${}^3_1\text{H}$, decade con emissione β^- ?

21. (I) Qual è l'energia cinetica massima di un elettrone emesso nel decadimento β di un neutrone libero?

22. (I) Dimostrate che il decadimento ${}^1_6\text{C} \rightarrow {}^{10}_3\text{B} + p$ è impossibile perché altrimenti l'energia non verrebbe conservata.
23. (II) ${}^{22}_{11}\text{Na}$ è radioattivo. È un emettitore β^- o β^+ ? Scrivete la reazione di decadimento e stimete l'energia cinetica massima dei raggi β emessi.
24. (II) Date il risultato di un calcolo che dimostri se questi decadimenti sono possibili:
 (a) ${}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{235}_{92}\text{U} + n$; (b) ${}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + n$;
 (c) ${}^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + n$.
25. (II) Un nucleo di ${}^{232}_{92}\text{U}$ emette una particella α con energia cinetica pari a 5.32 MeV. Qual è il nucleo finale e quant'è la massa atomica approssimativa (in u) dell'atomo finale?
26. (II) Quando ${}^{23}_{10}\text{Ne}$ (massa = 22.9945 u) decade in ${}^{23}_{11}\text{Na}$ (massa = 22.9898 u) qual è l'energia cinetica massima dell'elettrone emesso? Qual è la sua minima energia? A quanto ammonta l'energia del neutrino nei due casi?
27. (II) Il nuclide di ${}^{32}_{15}\text{P}$ decade emettendo un elettrone di energia cinetica massima 1.71 MeV. (a) Qual è il nucleo figlio? (b) Che massa atomica ha (in u)?
28. (II) L'isotopo ${}^{218}_{84}\text{Po}$ può decadere sia α sia β^- . Quant'è l'energia liberata nei due casi? La massa del ${}^{218}_{84}\text{Po}$ è 218.008965 u.
29. (II) Quanta energia si libera nella cattura elettronica del berillio: ${}^7_4\text{Be} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu$?
30. (II) Quant'è l'energia di una particella α emessa nel decadimento ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + \alpha$?
31. (III) La particella α emessa quando ${}^{238}_{92}\text{U}$ decade ha un'energia cinetica di 4.20 MeV. Calcolate l'energia cinetica di rinculo del nucleo figlio e l'energia di disintegrazione.
32. (III) Dimostrate che quando un nucleo decade con emissione β^+ l'energia totale liberata è uguale a
- $$(M_p - M_D - 2m_e)c^2,$$
- dove M_p e M_D sono le masse degli atomi (neutri) del padre e del figlio, e m_e rappresenta la massa dell'elettrone o del positrone.
33. (III) A partire dal risultato del problema 32 determinate l'energia cinetica massima delle particelle β^+ emesse quando il ${}^1_6\text{C}$ decade in ${}^1_5\text{B}$. Quant'è l'energia massima che può avere il neutrino? Qual è la sua minima energia?
34. (III) Nel decadimento α di un nucleo, ad esempio ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, dimostrare che il nucleo porta via una frazione dell'energia totale disponibile pari a $1/(1 + A_D/4)$, in cui A_D rappresenta il numero di massa del nucleo figlio. [Suggerimento: servirsi dei principi di conservazione della quantità di moto e dell'energia percentuale dell'energia disponibile si approssimativamente la particella α nel ?

PARAGRAFI DAL 30-8 AL 30-11

35. (I) Una sostanza radioattiva presenta 1280 disintegrazioni al minuto in un certo istante, e 6 h più tardi se ne contano 320. Qual è il suo tempo di dimezzamento?
36. (I) Cercate il tempo di dimezzamento di ${}^{238}_{92}\text{U}$ nell'appendice F e poi determinate la sua costante di decadimento.
37. (I) La costante di decadimento di un certo nucleo è $5.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Quant'è il suo tempo di dimezzamento?
38. (I) Qual è l'attività di un campione di ${}^{14}_6\text{C}$ che contenga 4.1×10^{20} nuclei?
39. (I) Dopo 3.0 anni che frazione rimane di un campione di ${}^{68}_{32}\text{Ge}$, che ha un semiperiodo di circa 9 mesi?
40. (I) Quanti nuclei di ${}^{238}_{92}\text{U}$ rimangono in una roccia se la sua attività fa registrare 275 disintegrazioni al secondo?
41. (II) Che frazione di un campione rimane dopo (a) esattamente 4 semiperiodi, (b) esattamente 4.5 semiperiodi?
42. (II) In una serie di decadimenti il nuclide ${}^{235}_{92}\text{U}$ diventa ${}^{207}_{82}\text{Pb}$. In questa serie quante particelle α e β^- sono state emesse?
43. (II) L'isotopo dello iodio ${}^{131}_{53}\text{I}$ è usato in medicina per la diagnosi delle funzioni tiroidee. Se un paziente ne ingerisce 532 μg , stabilite l'attività (a) immediatamente, (b) 1.0 h più tardi quando si esegue l'esame sulla tiroide e (c) 6 mesi più tardi. Si veda l'appendice F.
44. (II) Il ${}^{124}_{55}\text{Cs}$ ha un'emivita di 30.8 s. (a) In un campione inizialmente di 7.8 μg quanti nuclei sono presenti? (b) Quanti ve ne sono 2.0 min dopo? (c) Che attività ha in quell'istante? (d) Quanto tempo deve passare perché l'attività scenda a un valore inferiore a 1 s^{-1} ?
45. (II) Calcolate l'attività di un campione puro di ${}^{32}_{15}\text{P}$ di massa 4.7 μg ($T_{1/2} = 1.23 \times 10^6 \text{ s}$).
46. (II) L'attività di un campione di ${}^{35}_{16}\text{S}$ ($T_{1/2} = 7.56 \times 10^6 \text{ s}$) è di 3.55×10^5 disintegrazioni al secondo. Che massa ha il campione?
47. (II) Un campione di ${}^{233}_{92}\text{U}$ ($T_{1/2} = 1.59 \times 10^5 \text{ a}$) contiene 6.50×10^{19} nuclei. (a) Qual è la costante di decadimento? (a) Approssimativamente quante disintegrazioni avverranno ogni minuto?
48. (II) L'attività di un campione diminuisce di un fattore 10 in 9.6 min. Qual è il suo semiperiodo?
49. (II) Un campione da 135 g di carbonio puro contiene 1.3 parti ogni 10^{12} (atomi) di ${}^{14}_6\text{C}$. Quante disintegrazioni avvengono ogni secondo?
50. (II) Un nuclide radioattivo produce 2880 decadimenti al minuto in un certo istante, mentre 1.6 ore

più tardi ne genera 820. Calcolate il tempo di dimezzamento del nuclide.

51. (II) Un campione di $^{40}_{19}\text{K}$ sta decadendo in ragione di 8.70×10^2 disintegrazioni al secondo. Che massa ha il campione?
52. (II) L'isotopo del rubidio $^{87}_{37}\text{Rb}$, un emettitore β con semiperiodo di 4.75×10^{10} anni, è impiegato per determinare l'età di rocce e fossili. Le rocce che includono fossili di animali preistorici presentano un rapporto tra $^{87}_{38}\text{Sr}$ e $^{87}_{37}\text{Rb}$ di 0.0160. Ipotizzando la totale assenza di $^{87}_{38}\text{Sr}$ al momento della formazione rocciosa, calcolate l'età di questi fossili. [Suggerimento: usare l'eq. 30-3.]
53. (II) Dalla figura 30-10 calcolate le frequenze di decadimento relative per l'emissione α di $^{218}_{84}\text{Po}$ e $^{214}_{84}\text{Po}$.
54. (II) Il ^7_4Be decade con semiperiodo di circa 53 giorni. Viene prodotto nell'alta atmosfera e scende

lentamente sulla superficie terrestre. Se si trova che una foglia presenta 350 disintegrazioni al secondo di ^7_4Be , quanto dobbiamo aspettare perché diminuisca a 10 disintegrazioni al secondo? Stimare la massa iniziale di ^7_4Be sulla foglia.

55. (II) Se l'attività misurata di un campione scende dell'1.050 % rispetto all'attività originaria in 4.00 h, che isotopo radioattivo del piombo si sta generando nella reazione?
56. (III) In una clava preistorica si misura un contenuto di 170 g di carbonio è un'attività di 5.0 s^{-1} . Determinate la sua età assumendo che negli alberi viventi il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ sia di circa 1.3×10^{-12} .
57. (III) All'istante $t = 0$ un campione puro di nuclei radioattivi contiene N_0 nuclei, aventi costante di decadimento λ . Scrivete una formula che esprime il numero di nuclei figli, N_D , in funzione del tempo; si assuma che all'istante $t = 0$ sia $N_D = 0$.

PROBLEMI GENERALI

58. Dimostrate che il raggio dei nuclei più grandi (ad esempio $^{238}_{92}\text{U}$) è solo 6 volte maggiore di quello dei più piccoli (^1_1H).

59. (a) Stabilite la densità della materia nucleare in kg/m^3 e dimostrate che è praticamente la stessa per tutti i nuclei. (b) Quale sarebbe il raggio della Terra se avesse la stessa densità di nuclei pur mantenendo la sua reale massa? (c) Quale sarebbe il raggio di un nucleo $^{238}_{92}\text{U}$ se avesse la densità della Terra?

60. Ricorrendo al principio di indeterminazione stimare l'energia cinetica di un nucleone, per esempio nel ferro, a partire dalla dimensione del nucleo. Si ignorino le correzioni relativistiche. [Suggerimento: una particella può avere un valore di energia pari almeno alla sua incertezza.]

61. Quanta energia di rinculo riceve il nucleo di $^{40}_{19}\text{K}$ quando emette un raggio γ da 1.46 MeV?

62. Un antico attrezzo ligneo contiene solo il 10% di nuclei $^{14}_6\text{C}$ rispetto a un campione di legno fresco. Quant'è vecchio l'attrezzo?

63. L'isotopo ^3_1H dell'idrogeno, chiamato trizio (perché contiene tre nucleoni), ha un tempo di dimezzamento di 12.33 anni. Può essere utile per valutare l'età di oggetti fino a circa 100 anni. Si genera nell'alta atmosfera per effetto dei raggi cosmici e viene trascinato a terra dalla pioggia. Come esempio di applicazione si determini approssimativamente l'età di una bottiglia di vino sapendo che la sua radiazione ^3_1H è circa 1/10 di quella del vino nuovo.

64. Una stella a neutroni è costituita da neutroni con densità approssimativamente simile a quella nucleare. Stimare per una stella a neutroni del diame-

tro di 10 km (a) il suo numero di massa, (b) la sua massa (kg) e (c) l'accelerazione di gravità sulla sua superficie.

65. Le recenti teorie sulle particelle elementari (par. 32-11) insinuano il dubbio che il protone possa essere instabile, con tempo di dimezzamento $\geq 10^{32}$ anni. Quanto dovrete aspettare per vedere decadere un protone del vostro corpo, supposto che sia costituito da acqua?

66. Quando si dispone una massa d'acqua vicino a una sorgente intensa di neutroni questi possono rallentare per collisione con le molecole d'acqua e alla fine essere catturati da un nucleo di idrogeno per formare l'isotopo stabile chiamato deuterio, ^2_1H , emettendo un raggio γ . Che energia ha questo raggio γ ?

67. Quanto tempo deve passare (in semiperiodi) perché un campione radioattivo veda diminuire la propria attività all'1.00 % di quella originaria?

68. Se l'isotopo del potassio $^{40}_{19}\text{K}$ in un litro di latte presenta 50 disintegrazioni al secondo, stimare il contenuto di $^{40}_{19}\text{K}$ e del normale $^{39}_{19}\text{K}$ in un litro di latte. Si ricorra all'appendice F.

69. Le serie di decadimenti, come quella mostrata nella figura 30-10, possono essere classificate in quattro famiglie, a seconda che i numeri di massa abbiano la forma $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$, $4n + 3$, dove n è un numero intero. Giustificate quest'affermazione e dimostrate che per un nuclide di qualsiasi famiglia tutti i suoi figli apparterranno alla stessa famiglia.

70. Lo stronzio 90 è un prodotto della fissione nucleare dell'uranio sia nei reattori sia nelle bombe atomiche. Con un'occhiata alla tavola periodica

- stabilite a quale altro elemento potrebbe somigliare dal punto di vista chimico, e spiegate perché potrebbe essere pericoloso per ingestione. Esso contiene troppi neutroni e decade con emivita di circa 29 anni. Quanto dovremo aspettare perché tutto lo $^{90}_{38}\text{Sr}$ presente sulla superficie terrestre diventi l'1% del suo livello attuale, assumendo che non ne venga immesso del nuovo? Scrivete la reazione di decadimento, compreso il nucleo figlio. Il figlio è radioattivo? In tal caso scrivete la sua reazione di decadimento. Proseguite lo schema dei decadimenti finché si raggiunge un nucleo stabile.
71. Il nuclide $^{191}_{76}\text{Os}$ decade β^- con energia di 0.14 MeV, accompagnata da raggi γ di energia 0.042 MeV e 0.129 MeV. (a) Qual è il nucleo figlio? (b) Tracciate un diagramma dei livelli di energia che mosiri gli stati fondamentali del padre e del figlio e gli stati eccitati del figlio. A quale degli stati del figlio avviene il decadimento β^- di $^{191}_{76}\text{Os}$?
72. Tramite il principio di indeterminazione spiegate perché è improbabile trovare elettroni nel nucleo. Si tenga presente la relatività. [Vedere il suggerimento al problema 60.]
73. Stimare l'energia di legame totale del rame e valutate quindi l'energia, in joule, necessaria per suddividere una monetina di rame da 3 g in tutti i suoi nucleoni componenti.
74. Al posto di indicare le masse atomiche di nuclidi come nell'appendice F, alcune tabelle elencano l'eccesso di massa, Δ , definito come $\Delta = M - A$, dove A è il numero atomico e M è la massa in unità u. Determinate l'eccesso di massa, in u e in MeV/c^2 , per (a) ^4_2He ; (b) $^{12}_6\text{C}$; (c) $^{107}_{47}\text{Ag}$; (d) $^{235}_{92}\text{U}$. (e) Dopo aver esaminato l'appendice F siete in grado di esprimere una regola generale sul segno di Δ in funzione di Z e di A ?
75. (a) Un campione da 100 g di carbonio naturale contiene la normale frazione di $^{14}_6\text{C}$. Quanto tempo deve passare mediamente perché rimanga soltanto un nucleo di $^{14}_6\text{C}$? (b) Come cambia la risposta in (a) se il campione è di 200 g? Che cosa ci suggerisce questo risultato riguardo i limiti del metodo di datazione al carbonio?
76. Se la massa del protone fosse un po' più vicina a quella del neutrone, la seguente reazione sarebbe possibile anche con basse energie di collisione:
- $$e^- + p \rightarrow n + \nu$$
- Perché sarebbe catastrofica questa situazione? Di che percentuale dovrebbe accrescersi la massa del protone per rendere possibile questa reazione?

Le radiazioni ionizzanti

1 IL FENOMENO DI IONIZZAZIONE. CLASSIFICAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Alla propagazione di un'onda elettromagnetica è associata una propagazione di energia (capitolo 10, paragrafo 1). L'energia convogliata da un'onda elettromagnetica viaggia «impacchettata» in quantità piccolissime e indivisibili come se l'onda fosse costituita da uno sciame di corpuscoli. Questi, in realtà, sono solo dei «granuli di energia», privi di massa e di carica elettrica, cui si dà il nome di *quanti di energia* o *fotoni*. L'energia E di un fotone è proporzionale alla frequenza ν della radiazione elettromagnetica cui esso è associato secondo la relazione

$$E = h\nu \quad (11.1)$$

essendo h una costante, chiamata *costante di Planck*, il cui valore è di $6,626 \cdot 10^{-34}$ joule secondi.

Con il termine generico di *radiazione* si designa l'insieme dei granuli di energia emessi da un corpo sia sotto forma di onde elettromagnetiche (radiazione luminosa, radiazione ultravioletta, raggi X, ecc.) sia sotto forma di vere e proprie particelle materiali (radiazione corpuscolare: elettroni, neutroni, protoni, particelle α , ecc.). Questa energia può essere parzialmente o totalmente assorbita, riflessa o diffusa da un altro sistema fisico. In conformità con la definizione data per le onde elastiche (capitolo 10, paragrafo 3) l'*intensità* della radiazione che investe la superficie di un corpo esprime *la quantità di energia che incide nell'unità di tempo sull'unità di superficie*.

Il fatto che non siamo direttamente sensibili a radiazioni come i raggi X o i neutroni non significa che tali radiazioni attraversino la materia senza lasciar traccia. Esse, al contrario, cedono ai tessuti irradiati tutta o parte dell'energia trasportata, la quale, benché debole di per sé, determina effetti fisici, chimici e biologici di grandissima importanza. Questi effetti sono strettamente connessi con il fenomeno di *ionizzazione* cui radiazioni come quelle citate danno luogo nell'attraversare la materia. Tale fenomeno consiste nel fatto che, per l'azione di un agente, detto *ionizzante*, gli atomi della materia acquistano o perdono elettroni, assumendo carica elettrica negativa o positiva; essi cessano così di essere un tutto elettricamente neutro e si trasformano in *ioni*. Le *radiazioni ionizzanti*, cioè le radiazioni che, attraversando la materia, sono in grado di ionizzare gli atomi delle molecole che incontrano sul loro percorso, possono essere distinte in due grandi categorie: le *radiazioni elettromagnetiche di alta frequenza* (radiazione ultravioletta,

raggi X e raggi γ) ed i corpuscoli subatomici di energia sufficientemente elevata (elettroni, protoni, neutroni, particelle α).

Le radiazioni ionizzanti sono emesse da varie sorgenti, alcune delle quali esistono in natura mentre altre sono artificiali, cioè create dall'uomo. Il Sole è una sorgente naturale di radiazioni ultraviolette le quali possono anche essere prodotte artificialmente da lampade speciali. L'atmosfera terrestre costituisce una sorta di schermo per la radiazione ultravioletta solare che ne viene in gran parte assorbita. Un'altra importante radiazione ionizzante naturale è la *radiazione cosmica* la quale quando giunge sull'atmosfera, provenendo dagli spazi interstellari, è costituita principalmente da protoni e da elio ionizzato (*radiazione primaria*). La radiazione cosmica primaria, attraversando l'atmosfera, vi provoca complesse interazioni che danno luogo a un gran numero di particelle e di raggi γ . Parte della *radiazione secondaria* così prodotta è assorbita dall'atmosfera stessa; l'altra parte giunge sino al livello del mare e può, sia pure in piccola misura, penetrare profondamente nel sottosuolo e nei mari.

Sorgenti naturali di radiazioni sono le rocce contenenti *sostanze radioattive* come l'uranio e il torio. Questi corpi emettono sia radiazioni elettromagnetiche, sotto forma di raggi γ , sia radiazioni di tipo corpuscolare, sotto forma di *particelle α* e di *particelle β* : le prime sono nuclei di elio di elevata energia, le seconde sono costituite da elettroni anch'essi di elevata energia.

Sono artificiali tutte le principali sorgenti di raggi X i quali si originano per frenamento degli elettroni nella materia. Importantissime sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti sono le *macchine acceleratrici di particelle* (ad esempio i *sincrotroni*) ed i *reattori nucleari* costruiti a scopo di ricerca o per la produzione di energia termica da utilizzare come tale o da convertire in energia meccanica o energia elettrica. Opportuni sistemi di schermatura hanno il compito di proteggere il personale e l'ambiente esterno dagli effetti delle radiazioni che queste macchine emettono copiosamente. Particolare attenzione viene rivolta ai raggi γ ed ai neutroni che sono le radiazioni più pericolose. In queste macchine, inoltre, vi è produzione di notevoli quantità di *scorie radioattive* che derivano dal combustibile nucleare esaurito ed il cui smaltimento, insieme con la sicurezza degli impianti, costituisce il problema più preoccupante legato alla produzione di energia nucleare.

2 LA IONIZZAZIONE PRODOTTA DAI VARI TIPI DI RADIAZIONE. L'ELETTRONVOLT. IONIZZAZIONE SPECIFICA

Il meccanismo che determina la ionizzazione è differente a seconda che la radiazione sia costituita da corpuscoli dotati di carica elettrica (elettroni, particelle α , protoni, ecc.) oppure da particelle prive di carica (neutroni) o, infine, da raggi X e γ . Il confronto fra gli effetti prodotti da questi diversi tipi di radiazione si può più correttamente effettuare se si attribuisce ad una particella o ad un fotone la stessa quantità di energia. A tal fine si adopera come unità di misura l'*elettronvolt* (simbolo: eV), unità molto usata in fisica atomica e nucleare, pari all'energia acquisita da un elettrone, o da altro corpuscolo avente la stessa carica, quando passi attraverso la differenza di

prodotto nel processo di ionizzazione può essere catturato da una molecola d'acqua neutra che si trasforma in uno ione negativo $(\text{H}_2\text{O})^-$. Anche questo ione è instabile, e si scinde spontaneamente in uno ione negativo $(\text{OH})^-$ e un radicale H·. Attraverso una serie di processi fisico-chimici si ha così la formazione di due radicali H· e $\text{OH}\cdot$; questi, reagendo fra loro e con le molecole d'acqua, danno luogo a produzione di idrogeno ed ossigeno gassosi nonché di acqua ossigenata (H_2O_2), la cui presenza in un tessuto può avere conseguenze assai gravi dal momento che questa sostanza esercita un'energica azione ossidante sulle molecole organiche. Anche i radicali liberi, e l'idrogeno e l'ossigeno prodotti dalle reazioni cui essi danno luogo, possono agire sui costituenti biochimici delle cellule. Alla *fase fisico-chimica* (produzione di radicali liberi) segue dunque una *fase chimica* (reazioni dirette o indirette con le molecole organiche) la quale determina alterazioni più o meno profonde nei costituenti essenziali delle cellule (*fase biologica*).

4. I DANNI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

La fase biologica, che consegue alle fasi fisica, chimico-fisica e chimica, consiste nell'alterazione della struttura di un certo numero di molecole organiche. Tale modificazione porta ad alterazioni delle corrispondenti funzioni le quali possono tradursi in un danno biologico irreversibile.

È bene mettere in rilievo il fatto che *l'azione biologica delle radiazioni ionizzanti non può essere ridotta ad una pura questione energetica* dal momento che le energie in gioco sono assai piccole. Facciamo un esempio. Supponiamo che una persona, esposta a radiazioni ionizzanti, abbia assorbito in breve tempo una dose di 10^3 rad; in accordo con la definizione che di questa unità dosimetrica daremo, ciò vuol dire che 1 g di tessuto ha assorbito un'energia di 10^5 erg = 10^{-2} J e quindi di $(10^{-2}/4,19)$ cal $\cong 2 \cdot 10^{-3}$ cal. L'assorbimento di tale quantità di energia determina un innalzamento termico

$$\Delta t = \frac{Q}{m c} \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

dal momento che è $m = 1$ g e che al calore specifico dei tessuti si può attribuire lo stesso valore che compete all'acqua ($c = 1$ cal/g \cdot $^\circ\text{C}$). Dal punto di vista energetico nei tessuti si è determinata una variazione inapprezzabile; basti pensare che nel corso di una giornata nella temperatura corporea si hanno variazioni ben più grandi (anche di 1°C). Tuttavia l'esperienza dimostra che la persona in questione muore. La spiegazione sta nel fatto che l'energia ceduta dalla radiazione, in se stessa molto piccola, non viene distribuita uniformemente nel tessuto; quantità relativamente grandi vengono cedute casualmente a singoli atomi e questo può distruggere molecole biologiche di importanza critica: si dà così origine, nella materia organica, ad una catena di trasformazioni tanto profonde da determinare, in un tempo relativamente breve, la morte.

Si usa generalmente distinguere fra *danni biologici somatici* e *danni genetici*. Fra i danni somatici ve ne sono molti per i quali è probabile l'esistenza di una *soglia* nel senso che per una dose di radiazioni inferiore a un certo valore il danno biologico è tanto piccolo che *potrebbe* essere riparato dai tessuti. Molti esperti escludono l'esistenza di una soglia per qualsiasi

una molecola
Anche questo
tivo (OH)⁻ e
si ha così la
e con le mo-
geno gassosi
to può avere
cita un'ener-
ali liberi, e
luogo, pos-
ico-chimica
reazioni di-
alterazioni
biologia).

NTI

sica e chi-
o di mole-
rispondenti
bile.

radiazioni
ca dal mo-
esempio.
bia assor-
zione che
uto ha as-
 $\approx 2 \cdot 10^{-3}$
alzamento

può attri-
punto di
rezzabile;
rporea si
ienza di-
fatto che
viene di-
vengono
cole bio-
anica, ad
empo re-

anni ge-
le l'esi-
ore a un
riparato
qualsiasi

tipo di danno biologico e ritengono che piccole dosi, assorbite in breve tempo o acquisite gradualmente in un lungo periodo, possano causare l'insorgenza del cancro dopo un periodo latente di molti anni durante i quali non si manifesta alcun sintomo. Essi assumono che l'effetto delle radiazioni, come causa d'insorgenza dei tumori, sia *sempre* proporzionale alla dose assorbita, anche se la dose è molto piccola (*effetto lineare*).

Se per taluni danni somatici è probabile l'esistenza di una soglia, è *sicuro che per i danni genetici non esiste alcuna soglia*. Questo significa che, irraggiando un individuo, vi è sempre una certa probabilità di alterare un elemento chiave cosicché *non esiste una dose così piccola da non essere pericolosa*. La molecola del DNA (acido desossiribonucleico), che costituisce l'elemento base dei cromosomi, è particolarmente sensibile all'azione delle radiazioni. Alterazioni nella struttura del DNA indotte da radiazioni ionizzanti possono causare mutazioni genetiche suscettibili di trasmettersi da una generazione all'altra. Pertanto, mentre i danni somatici si manifestano direttamente nelle persone irradiate, con un ritardo più o meno lungo, i danni genetici possono manifestarsi anche nei loro discendenti.

5 I RAGGI X

La scoperta dei raggi X fu fatta per caso nel 1895 dal tedesco Wilhelm Conrad Röntgen nel corso di una serie di esperienze che egli stava conducendo con tubi di scarica mediante i quali studiava il passaggio della corrente nei gas rarefatti. Egli notò che se il tubo usato era reso otticamente opaco, uno schermo fluorescente, posto nelle vicinanze, risultava illuminato. Il Röntgen attribuì il fenomeno ad una radiazione sconosciuta che perciò indicò con il nome di «raggi X». Il fenomeno non poteva essere attribuito a elettroni, o ad altre particelle dotate di carica, non essendo tali corpuscoli in grado di attraversare le pareti del tubo. Se ne ebbe una conferma successivamente quando si poté provare che effettivamente i raggi X non sono associati a cariche elettriche, dal momento che non sono deflessi né da campi elettrici né da campi magnetici. Altre esperienze hanno provato senza ombra di dubbio che i raggi X non sono altro che onde elettromagnetiche di frequenza maggiore (lunghezza d'onda minore) di quella che compete alle radiazioni ultraviolette.

Un apparato per la produzione di raggi X è schematicamente mostrato in fig. 11.1. In un'ampolla di vetro, in cui è fatto un vuoto spinto, vi è un *catodo* metallico C che, riscaldato da un filamento percorso da corrente elettrica, emette elettroni (*effetto termoionico*). Se fra il catodo e l'elettrodo A, detto comunemente *anticatodo*, vi è una differenza di potenziale sufficientemente alta, gli elettroni emessi dal catodo vengono accelerati e colpiscono l'anticatodo, producendo così i raggi X.

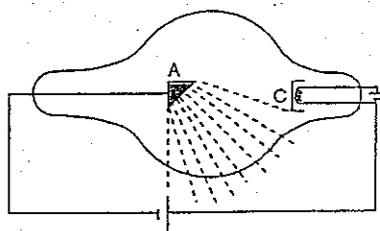


Figura 11.1

temente grande, dell'ordine dei chilovolt (kV), gli elettroni, accelerati dal campo elettrico, colpiscono l'anticatodo metallico con energia cinetica molto elevata; l'interazione degli elettroni con gli atomi costituenti l'anticatodo determina l'emissione di raggi X in varie direzioni. Poiché per quasi tutte le applicazioni si richiede un fascetto di raggi X *collimato*, cioè di direzione e sezione ben definite, si utilizza il fascetto emergente da una sottile *finestra* praticata in uno spesso involucro di piombo che circonda il tubo a vuoto ed assorbe le radiazioni diffuse in tutte le altre direzioni. Inoltre, per evitare l'eccessivo riscaldamento dell'anticatodo derivante dalla elevata quantità di energia trasferitavi dagli elettroni, bisogna che esso sia opportunamente raffreddato.

Ricerche spettroscopiche sistematiche hanno mostrato che uno spettro di raggi X consta di due parti: una componente continua, costituita da una larga banda di lunghezze d'onda (*spettro bianco*), ed uno spettro di righe sovrapposte al fondo continuo. Le lunghezze d'onda delle righe, ciascuna delle quali corrisponde ad una componente monocromatica, sono caratteristiche del materiale usato per il bersaglio: lo spettro a righe è chiamato perciò *spettro Röntgen caratteristico*.

Il meccanismo di emissione della radiazione facente parte dello spettro caratteristico dei raggi X può essere così qualitativamente spiegato. L'interazione fra uno dei velocissimi elettroni che giungono sul bersaglio ed un atomo dell'anticatodo può determinare una ionizzazione «in profondità» dell'atomo con perdita di uno degli elettroni più interni. Questo fa sì che si crei una «lacuna» nel corrispondente livello, di energia E ; di conseguenza un elettrone appartenente ad un livello più esterno, di energia $E' > E$, andrà ad occupare la lacuna creata dall'elettrone espulso cedendo l'energia ($E' - E$) in eccesso sotto forma di un fotone. L'energia $h\nu$ del fotone emesso è dunque pari all'energia ($E' - E$) perduta dall'elettrone che va ad occupare il livello più interno così che la frequenza della radiazione emessa è

$$\nu = \frac{E' - E}{h} \quad (11.2)$$

La radiazione X corrispondente allo spettro bianco deriva da «urti» degli elettroni con gli atomi dell'anticatodo in conseguenza dei quali gli elettroni vengono rallentati per cessione agli atomi di quantità diverse di energia; queste vengono successivamente riemesse sotto forma di quanti le cui frequenze sono distribuite con continuità in un intervallo molto ampio (*radiazione di frenamento*).

I raggi X, nell'attraversare la materia, interagiscono con essa dando luogo a ionizzazione e ad altri fenomeni (*effetto Compton*, ecc.). Poiché questi fenomeni implicano cessione di energia da parte della radiazione, l'intensità di un fascio di raggi X, cioè l'energia da esso convogliata nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie del mezzo attraversato, si va progressivamente attenuando. Possiamo dire, in termini equivalenti, che vi è un fenomeno di *assorbimento* dei raggi X quando essi attraversano la materia. Se I_0 è l'intensità di un fascio collimato di raggi X che incida sulla superficie di un corpo qualsiasi, all'interno di questo l'intensità I del fascio diminuisce al crescere della lunghezza x del percorso compiuto con la legge

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (11.3)$$

nella quale e è la base dei logaritmi naturali ($e = 2,718 \dots$) e la grandezza μ , che prende il nome di *coefficiente di assorbimento dei raggi X*, dipende soprattutto dalla natura del materiale assorbente².

Dalla (11.3) si deduce che, a parità di intensità I_0 del fascio incidente e di percorso x compiuto, l'intensità del fascio nel mezzo attraversato è tanto più piccola, e quindi l'attenuazione tanto maggiore, quanto più elevato è il valore di μ . Questo, d'altra parte, risulta tanto più grande quanto più elevata è la densità del mezzo attraversato e quanto maggiore è il numero di elettroni presenti negli atomi che costituiscono il mezzo stesso.

Il fatto che i raggi X possano compiere, malgrado la progressiva attenuazione, percorsi piuttosto lunghi nel corpo umano, e che la radiazione venga diversamente assorbita dai tessuti che lo costituiscono (ossa, muscoli, tessuti adiposi, ecc.), spiega il largo impiego che dei raggi X si fa in diagnostica. Se un fascio collimato di raggi X attraversa il corpo umano, la radiazione, diversamente assorbita dai tessuti attraversati, dà luogo su di una pellicola fotografica sensibile ai raggi X ad un'immagine radiologica costituita da ombre più o meno intense. Quando si opera in queste condizioni si dice che si esegue una *radiografia*; l'immagine ottenuta è *negativa* nel senso che le zone più oscure si hanno lì dove l'intensità dei raggi X è maggiore e si riferiscono ai tessuti che hanno determinato una minore attenuazione, mentre le zone più chiare corrispondono ai tessuti che hanno determinato un maggiore assorbimento. Se il fascio collimato dai raggi X, dopo di aver attraversato i tessuti, si fa giungere su di uno schermo fluorescente, la luce da questo emessa è più intensa lì dove l'intensità della radiazione incidente è maggiore, e viceversa; l'immagine radiologica ottenuta in queste condizioni (*radioscopia*) è un'immagine *positiva* nel senso che risultano più chiare le zone che si riferiscono a minore attenuazione, più oscure quelle corrispondenti ad assorbimento maggiore.

La *tomografia assiale computerizzata* (TAC) è un moderno metodo di indagine con i raggi X che si avvale di tecniche del tutto diverse da quelle radiologiche tradizionali. Un fascio di radiazioni, molto sottile e ben collimato, attraversa sezioni piane trasversali del corpo del paziente senza che vi siano effetti di sovrapposizione degli strati contigui. L'intensità della radiazione emergente, determinata punto per punto da rivelatori di alta sensibilità, viene elaborata da un calcolatore secondo metodi matematici particolari. Ciò consente di ricostruire la morfologia dello strato attraversato dalla radiazione e di ottenere immagini di elevato contrasto ma di risoluzione spaziale relativamente limitata. La TAC, che è una metodologia sostanzialmente «non invasiva» ed espone a dosi di radiazioni piuttosto basse, rende preziosi servizi soprattutto nella diagnostica del sistema nervoso centrale, degli organi addominali e dell'apparato urogenitale.

L'assorbimento dei raggi X e dei raggi γ da parte dei tessuti irradiati, con conseguenti modificazioni morfologiche e funzionali (paragrafi 3 e 4), è normalmente dannoso ma può essere utilmente impiegato nella terapia dei tumori dal momento che le cellule cancerose, che si riproducono rapidamente, sono molto vulnerabili alle radiazioni X e γ ; spesso alla *terapia radiativa* si ricorre in combinazione con l'intervento chirurgico.

² Le considerazioni svolte per i raggi X e la relazione (11.3) si possono estendere a qualsiasi radiazione elettromagnetica che attraversi un mezzo materiale.

6 GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA DOSIMETRICHE

Abbiamo visto che le radiazioni ionizzanti, nell'attraversare i tessuti organici, possono determinare seri danni (paragrafi 3 e 4). Studi sistematici sugli effetti delle radiazioni hanno consentito, nel corso degli ultimi decenni, di modificare e di precisare gli obiettivi della *radioprotezione* cioè della disciplina che si occupa della riduzione dei rischi sanitari da radiazioni ionizzanti nella realizzazione di attività che siano giustificate dai benefici che ne derivano alla società (produzione di energia nucleare, radiodiagnostica, radioterapia, ecc.). Alla base della radioprotezione vi è la *dosimetria* la quale si occupa dei problemi relativi alla misurazione della quantità di radiazione che raggiunge un tessuto, dell'energia che, in conseguenza dell'irradiazione, il materiale assorbe e degli effetti che l'assorbimento può determinare. Le grandezze dosimetriche principali sono la *dose di esposizione*, la *dose di assorbimento* e la *dose biologica equivalente*.

La dose di esposizione viene presa in considerazione solo per le radiazioni X e γ con energie sino a 3 MeV e non per gli altri tipi di radiazione. Essa definisce *la quantità di radiazione che investe un tessuto attraverso la misurazione dell'effetto prodotto dalla radiazione nell'unità di volume di aria secca, in condizioni normali, convenzionalmente sostituita al tessuto irradiato*; l'effetto è costituito dalle cariche elettriche portate dagli ioni prodotti dalle particelle secondarie (elettroni) liberate dalla radiazione. L'unità di misura è il *roentgen* (simbolo: R), definito come *la quantità di radiazione X o γ che, attraversando aria secca a 0°C ed alla pressione normale, produce, mediante l'emissione corpuscolare generata dalla radiazione, un numero di ioni con una carica complessiva di $3,33 \cdot 10^{10}$ C per ogni cm³ di aria*. Poiché 1 cm³ di aria in condizioni normali corrisponde alla massa di $1,29 \cdot 10^{-3}$ g = $1,29 \cdot 10^{-6}$ kg, è anche $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$. Molto usato è un sottomultiplo del roentgen, il *milliroentgen* (mR), pari a 10^{-3} R.

La dose di esposizione è evidentemente una grandezza che dipende solo dall'intensità e dal tipo di radiazione. Essa non ci dice nulla su quanto accadrebbe in un materiale diverso dall'aria posto nello stesso punto, quindi non ci segnala in che misura la radiazione verrebbe assorbita da un tessuto e quali ne sarebbero gli effetti. In campo biologico l'interesse è rivolto soprattutto verso la quantità di energia radiante che in un determinato punto del campo di radiazione è assorbita da una data massa del materiale irradiato e sugli effetti che tale assorbimento può determinare.

La dose di assorbimento definisce *la quantità di energia assorbita per unità di massa di tessuto* ed, a differenza della dose di esposizione, viene usata per tutti i tipi di radiazioni ionizzanti. Essa viene misurata in *rad* e in *gray*. Il rad («radiation absorbed dose») corrisponde all'assorbimento di *100 erg in un grammo di materia*:

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}},$$

e, poiché è $1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$ ed $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$, è anche:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \frac{\text{J}}{\text{kg}}.$$

Il gray (simbolo: Gy), è l'unità di misura della dose di assorbimento nel sistema SI, quindi è

$$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 100 \text{ rad}.$$

Accanto al rad è molto usato il sottomultiplo *millirad* (mrad), corrispondente a 10^{-3} rad. L'esperienza dimostra che 1 R di fotoni X e γ determina in un tessuto molle un assorbimento di circa 1 rad.

La dose assorbita si riferisce ad un effetto fisico, cioè alla cessione di energia a un materiale. Tuttavia gli effetti biologici dipendono anche dall'energia e dal tipo di radiazione che attraversa la materia, cosicché *radiazioni diverse non producono, a parità di energia assorbita dal tessuto per unità di massa, il medesimo effetto*. Per tener conto di ciò, ci si riferisce alla *dose biologica equivalente* definita come *la dose assorbita moltiplicata per un fattore, chiamato efficacia biologica relativa (EBR), il quale valuta l'effetto prodotto dalla radiazione considerata rapportandolo a quello determinato da una radiazione di riferimento*; come radiazione di confronto si assumono i fotoni X da 200 keV ai quali si assegna convenzionalmente una EBR eguale a 1. Nella tabella 11.1 sono riportati i valori della EBR per alcuni tipi di radiazione. Come si vede, le particelle α causano, a parità di dose assorbita, danni biologici ben più grandi di quelli prodotti da raggi γ e da particelle β ; fortunatamente, per la loro scarsa capacità di penetrazione, i loro effetti sono limitati allo strato superficiale del tessuto irradiato. Molto più pericolosi sono i neutroni in quanto che il danno biologico da essi determinato, oltre ad essere elevato (EBR compresa fra 2 e 10), interessa il tessuto in profondità.

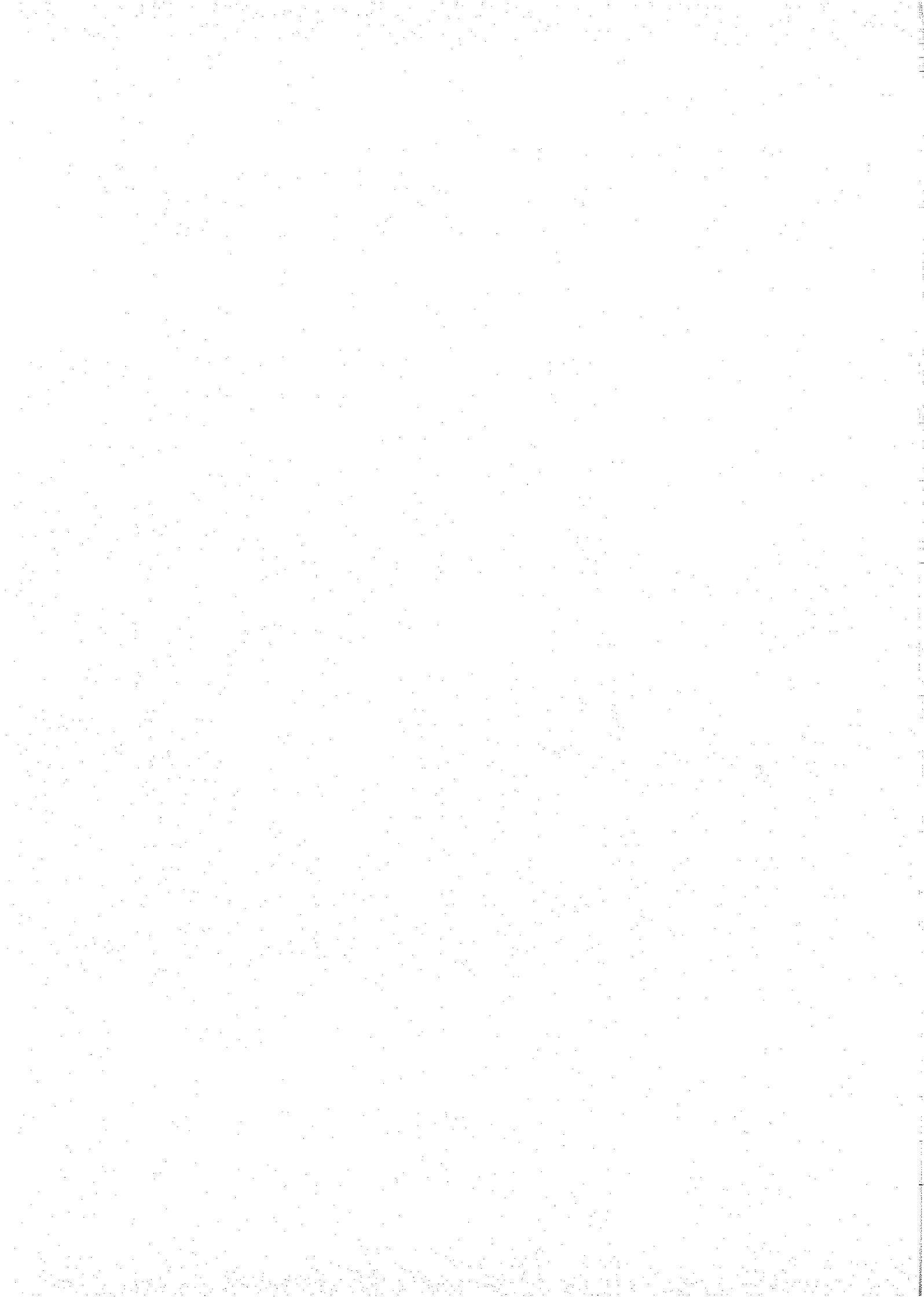
TABELLA 11.1 Valori della EBR per vari tipi di radiazione

Radiazione	EBR
Raggi γ da 1 ÷ 4 MeV	0,6 ÷ 0,7
Particelle β	1
Particelle da 1 ÷ 10 MeV	2
Neutroni	2 ÷ 10
Raggi α	10 ÷ 20

Moltiplicando la dose assorbita, misurata in rad, per il fattore corrispondente alla EBR della radiazione considerata si ottiene la dose biologica equivalente espressa in *rem*. Per quel che è stato detto, 1 rem di radiazione di qualsiasi tipo determina lo stesso danno biologico, che è quello prodotto da 1 rad di raggi X da 200 keV. Nei vari paesi gli organi preposti alla protezione

dalle radiazioni stabiliscono la *dose massima ammessa (DMA)* per le persone più esposte e per la popolazione in generale. Attualmente, in Italia, la dose ammessa per ciascuna persona professionalmente esposta è di 5 rem/anno. Per la popolazione in generale la DMA è alquanto più bassa.

Ricordiamo infine che, in aggiunta alle dosi di radiazioni X assorbite in occasione di esami radiologici, ogni persona assorbe una *dose di fondo* che deriva da sorgenti radioattive naturali; in Italia essa è, mediamente, di 120 mrem (millirem) per anno.



IL LASER

PRINCIPI FISICI

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

CLASSIFICAZIONE DELLESORGENTI LASER

APPLICAZIONI IN CAMPO MEDICO

LASER

L A S E R
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

sfrutta un fenomeno scoperto nel 1917 da
Albert Einstein, la cosiddetta
EMISSIONE STIMOLATA di radiazione

1954

MASER: "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

1960

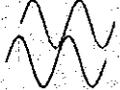
LASER: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

1964

Prime applicazioni in medicina

Luce: radiazione elettromagnetica nella regione del visibile

La luce può essere considerata come un insieme di corpuscoli, detti **FOTONI**, ciascuno dei quali porta un "pacchetto d'onda"



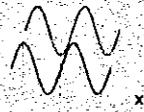
ONDE IN FASE

La luce può essere considerata come un insieme di corpuscoli, detti FOTONI, ciascuno dei quali porta un "pacchetto d'onda"

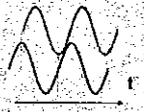


ONDE FUORI FASE

COERENZA



COERENZA SPAZIALE:
onde in fase nello spazio



COERENZA TEMPORALE:
onde in fase nel tempo

LUCE NATURALE

lunghezza d'onda (nanometri)	Tipi di radiazione	spettro della luce
6.000	raggi coerenti	
0,1	raggi X	
100	raggi ultravioletti A - B - C	
400		
	luce visibile	
800		
	raggi infrarossi vicini, medi lontani	
12.000		



LUCE NATURALE

NON COERENTE: le radiazioni vengono emesse disordinatamente nello spazio.

MULTIFREQUENZA: ogni tipo di luce è un insieme di lunghezze d'onda.

DIVERGENTE: le onde emesse dalla sorgente luminosa si diffondono a 360°

ESTESA: non focalizzata

LUCE LASER

COERENTE: il modo di trasmissione è perfettamente ordinato.

MONOCROMATICA: è formata da una sola lunghezza d'onda quindi è di un colore solo.

COLLIMATA: i fasci di luce emessa dalla sorgente laser sono paralleli all'infinito.

BRILLANTE: focalizza in un punto infinitesimale, con elevata energia.

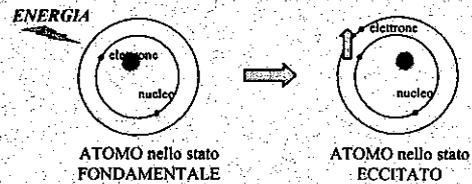
Principi di funzionamento del LASER

Interazione onde elettromagnetiche / materia

Assorbimento
Emissione

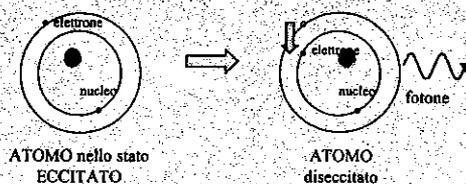
Sorgenti di luce - Assorbimento -Eccitazione

Se si fornisce energia all'atomo, un elettrone può "transire" da un'orbita vicina al nucleo ad un'orbita più lontana. L'atomo diventa ECCITATO



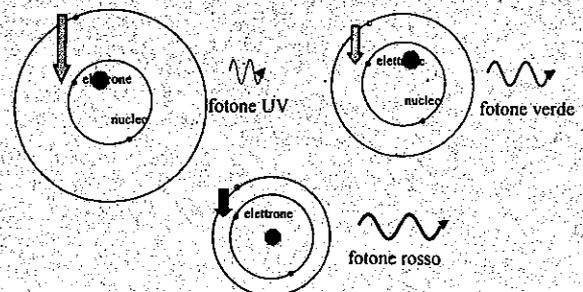
Sorgenti di luce - Emissione

Quando l'elettrone torna nella sua orbita originaria, l'atomo emette un fotone. Esso ha un'energia pari alla differenza di energia fra l'atomo e l'atomo eccitato.



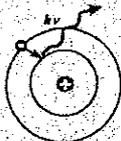
Il fotone ha un'energia ben precisa, e quindi anche una lunghezza d'onda, cioè un colore, ben determinato.

Sorgenti di luce - Emissione



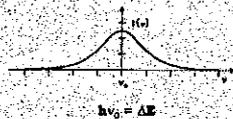
Il fotone ha un'energia ben precisa, e quindi anche una lunghezza d'onda, cioè un colore, ben determinato.

Processo di emissione spontanea di un fotone

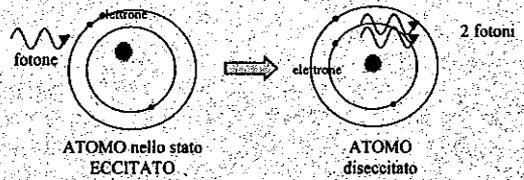


L'atomo nel livello eccitato emette un fotone e si porta nel livello inferiore.

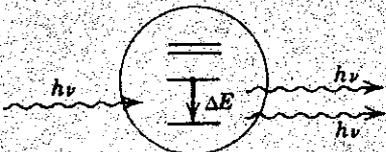
Il processo avviene spontaneamente. La direzione del fotone è casuale e la sua frequenza è distribuita in una banda spettrale di larghezza dell'ordine di 100 MHz.



Emissione stimolata: il LASER

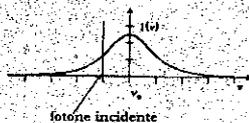


Processo di emissione stimolata



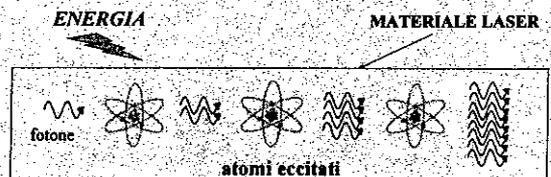
L'atomo nel livello eccitato emette un fotone identico al fotone incidente e si porta nel livello inferiore.

Il processo è stimolato dal fotone incidente. La direzione e la frequenza del fotone emesso sono identiche a quelle del fotone incidente.



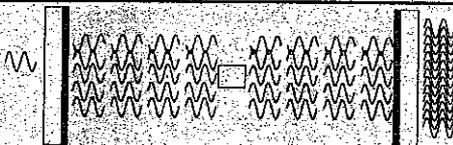
Amplificazione Laser

In un materiale, i fotoni emessi da un atomo possono servire per eccitare un atomo vicino, che quindi emetterà il doppio dei fotoni.



Amplificazione Laser

In un laser, un materiale che contiene gli atomi da eccitare viene messo tra due specchi che riflettono i fotoni emessi. Questi, tornando sul materiale, causeranno l'emissione stimolata di altri atomi.



In questo modo si ottiene una moltiplicazione a valanga dei fotoni, cioè una **AMPLIFICAZIONE** della luce. Una parte di questi fotoni verrà fatta uscire dagli specchi, e sarà la **RADIAZIONE LASER**.

Proprietà dei laser

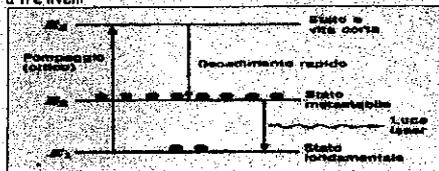
I fotoni emessi hanno tutti la stessa lunghezza d'onda (**MONOCROMATICITÀ**), vengono emessi tutti con la stessa fase (**COERENZA**), e in una stessa direzione (**DIREZIONALITÀ**).

Un fascio laser ha un colore ben preciso, si propaga in linea retta ed è molto energetico e concentrato.

Principi di funzionamento del LASER

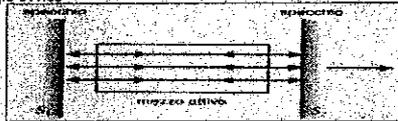
Amplificatori di luce

Laser a tre livelli



Inversione di popolazione tramite emissione da stato metastabile $\tau \sim 10^{-3}s$

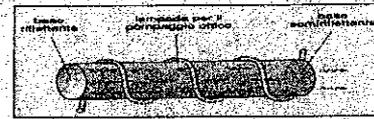
Pompaggio ottico



Principi di funzionamento del LASER

Amplificatori di luce

LASER a Rubino

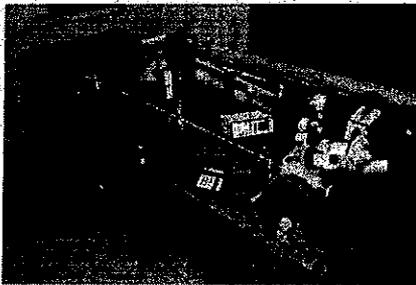


Pompaggio ottico tramite lampada a mercurio

Le radiazioni con direzione non assiale escono dalla superficie laterale del cristallo

La radiazione assiale compie un lungo percorso nel cristallo causando emissione stimolata

Laser



Classificazioni delle sorgenti LASER secondo la norma CEI 76-2

LEA: limite di emissione accettabile

livelli di radiazione emergenti da un sistema LASER

Classe	Caratteristiche radiazione	Precauzioni
1	Intrinsecamente sicuri	
2	Frequenza radiazione 400-700nm (visibile), bassa potenza	Evitare di guardare nel fascio
3A	Potenza di uscita non inferiore a 5mW	Evitare di guardare nel fascio ne' osservare direttamente con strumenti ottici
	Radiazione visibile e non visibile che non superano i 500mW di potenza	Evitare la visione diretta del fascio, è consentita mediante la radiazione diffusa
	Radiazione che supera i 500mW di potenza	Pericolosi anche per riflessione diffusa. Possibilità di danni a carico degli occhi e della pelle

applicazioni dei laser

Il laser in medicina



odontoiatria



chirurgia generale



medicina estetica



oftalmologia

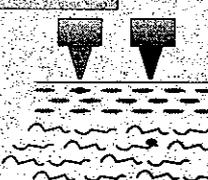
Il laser in medicina

Può essere concentrato molto precisamente per colpire solo le zone d'interesse

Trasmette calore alle cellule da cui la radiazione viene assorbita. Ad alta energia le vaporizza, e taglia i tessuti o distrugge le cellule. A bassa energia le fa coagulare (sangue)

Può essere trasportato con fibre ottiche e raggiungere zone interne senza tagliare i tessuti sovrastanti

La radiazione laser agisce solo sul tipo di cellula che assorbe quella determinata lunghezza d'onda



Proprietà di assorbimento delle bio-molecole

- Molecole (cromofori) con assorbimento nell'UV
- Molecole con assorbimento nel VISIBILE
- Molecole con assorbimento nell'IR

Proprietà di assorbimento delle bio-molecole

Molecole con assorbimento nel VISIBILE

Derivati tetrapirrollici

Tetrapirrolli macrociclici proto-eme (complesso Fe-Protoporfirina IX) costituisce il gruppo prostetico di <ul style="list-style-type: none"> • Emoglobina • Mioglobina • Catalasi • Citocromo 	Tetrapirrolli lineari acidi biliari sono una classe eterogenea di composti diversi per grado di ossidazione e di polimerizzazione, con varie bande di assorbimento distribuite nell'UV e nel visibile.
--	--

Proprietà di assorbimento delle bio-molecole

Molecole con assorbimento nel VISIBILE

Flavine:

assorbono nella regione del blu

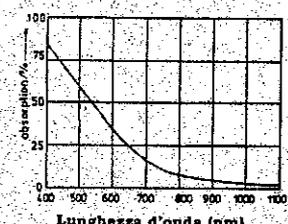
- riboflavina (vitamina B2): massimo a 445 nm
- derivati con attività di coenzima (FMN e FAD) massimo a 445 - 465 nm

Proprietà di assorbimento delle bio-molecole

Molecole con assorbimento nel VISIBILE

Melanina
 Sostanza prodotta dall'attività tirosinasi.

Lo spettro di assorbimento è **non strutturato** su tutto l'intervallo dall'UV al rosso.

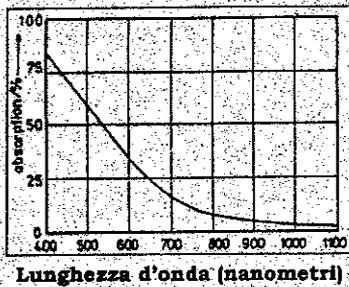


Proprietà di assorbimento delle bio-molecole

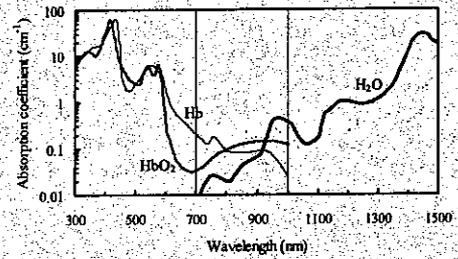
Molecole con assorbimento nell'IR

- Acqua
- Melanina

Spettro di assorbimento della melanina



Spettri di assorbimento dell'emoglobina e dell'acqua



Coefficiente di assorbimento

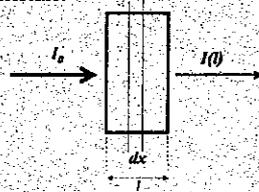
Il **coefficiente di assorbimento** μ_a è definito dalla relazione:

$$-dI = \mu_a I dx$$

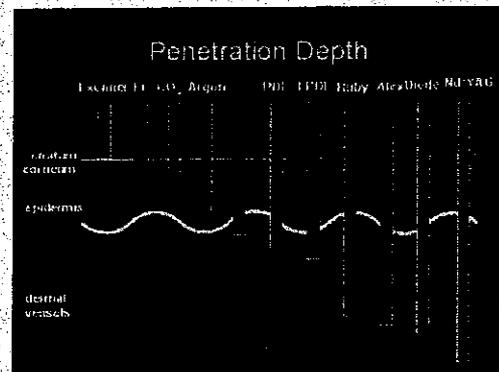
- dI = decremento infinitesimo di intensità che un fascio di radiazione di intensità I subisce nell'attraversare uno spessore infinitesimo dx di materiale.

Legge di Lambert-Beer

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu_a x)$$



Profondità di penetrazione ottica dei vari tipi di laser



Interazioni fototermiche

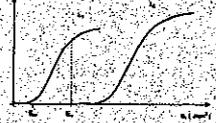
Interazioni fotomeccaniche

Fotoablazione

Ablazione laser è la rimozione di tessuto attraverso irraggiamento laser. Soglia: in tessuti abbastanza omogenei, l'ablazione è caratterizzata da una soglia, che rappresenta il livello d'irraggiamento minimo al di sopra del quale si produce la rimozione. La soglia è generalmente espressa tramite la fluensa laser (J/cm^2).

Il fenomeno di rimozione di tessuto è descritto dalle curve di rate che:
 • rappresentano la velocità di scavo
 • mettono in relazione la quantità di tessuto rimosso per ogni impulso laser (o alternativamente la profondità di scavo) con la fluensa laser.

Dopo il superamento del valore di soglia della fluensa E_0 , la profondità di scavo cresce quasi linearmente con la fluensa fino a raggiungere un limite di saturazione in corrispondenza di E_1 .



Quantità di tessuto abitato da un singolo impulso (h g/pulse) in funzione della fluensa (E_0, E_1).

La fluensa è il prodotto del raggio e l'intensità. In alcuni di assorbimento sono diversi e da eventuali effetti di scattering derivati alla formazione di plasma.

Canali di ablazione

La fotoablazione avviene attraverso vari canali, in dipendenza delle condizioni e dei parametri d'irraggiamento, come pure al complesso delle proprietà ottiche, termiche, meccaniche e chimiche del tessuto.

Canali di ablazione

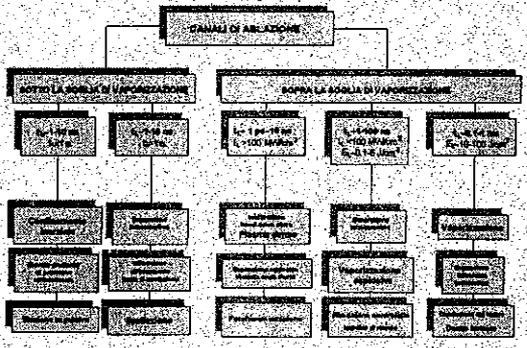


Diagramma dei canali che inducono ablazione di tessuto per irraggiamento laser

Confinamento inerziale

Se la durata dell'impulso laser è minore del tempo di rilassamento elastico

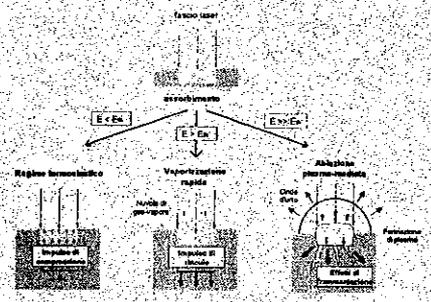
$$t_{laser} < t_{elastico}$$

la pressione continua ad aumentare durante l'irraggiamento (l'effetto di rilassamento interviene solo a tempi successivi).

Questa condizione è detta di **confinamento inerziale**, e si realizza tipicamente con impulsi di durata minore di 10 ns.

E' particolarmente importante poiché dà luogo a **gradienti di pressione relativamente alti** in corrispondenza della superficie.

Canali di ablazione



(E_0 = fluensa di soglia per l'ablazione)

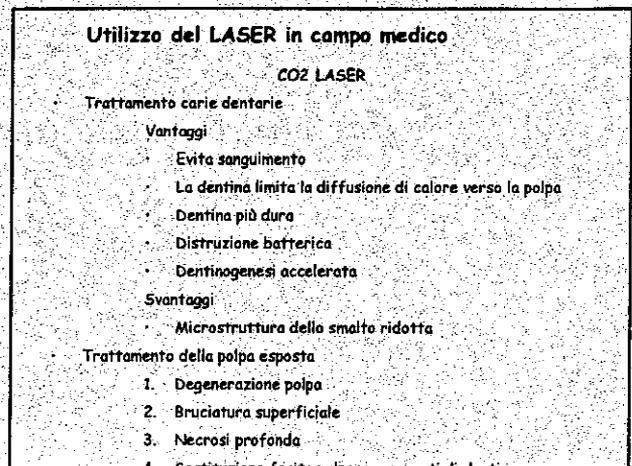
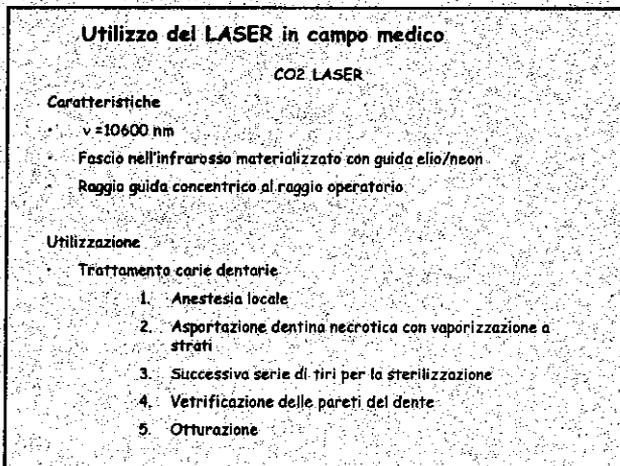
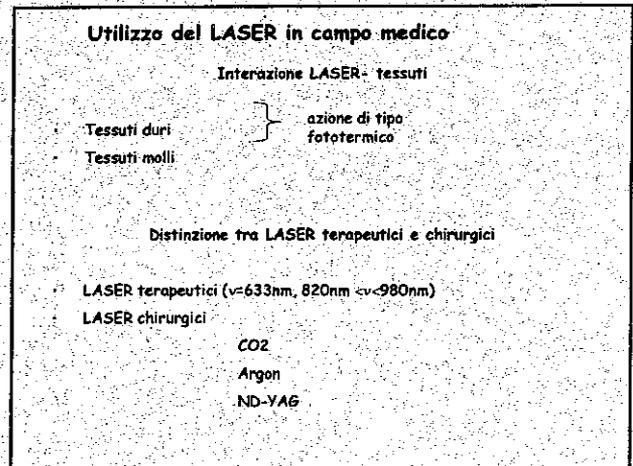
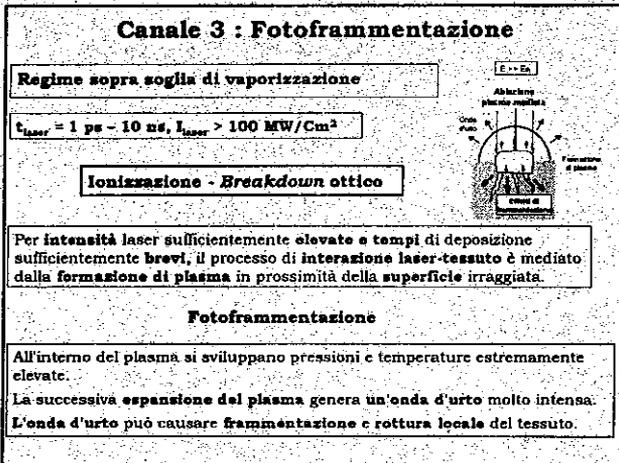
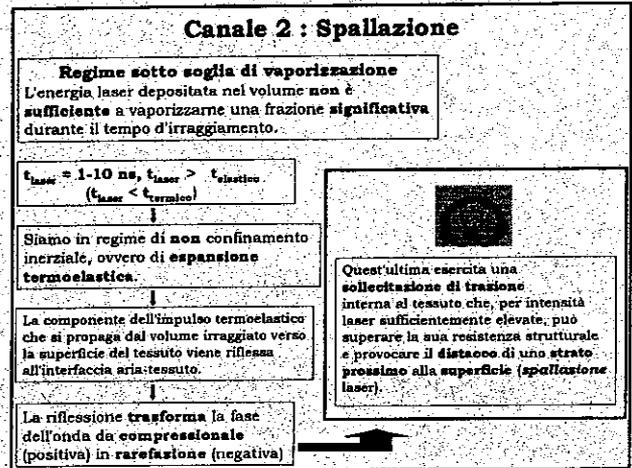
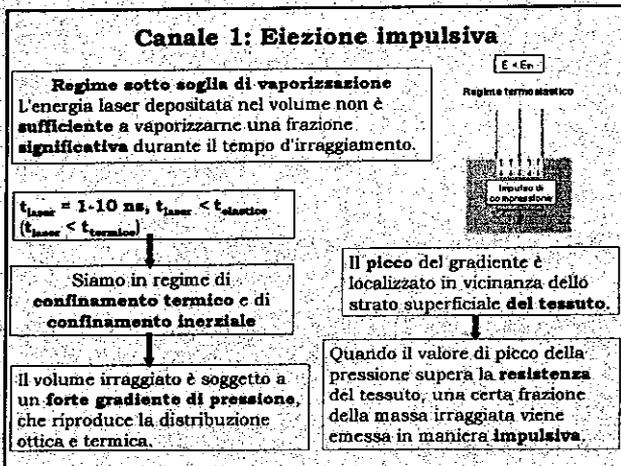
Canali di ablazione

Ruolo dell'acqua

Il processo ablativo è fortemente dipendente dalla presenza di acqua. (L'energia per innalzare la temperatura dell'acqua a 100°C è circa 2500 J/cm³).

E' utile classificare i processi ablativi nei due regimi:

- regime sotto soglia di vaporizzazione
- regime sopra soglia di vaporizzazione



Utilizzo del LASER in campo medico

CO2 LASER

Chirurgia tumorale

1. Vaporizzazione
2. Cerchi concentrici

Vantaggi

- Campo operatorio sterile
- Assenza di sanguinamento
- Notevole precisione
- Penetrazione debole
- Retrazione tessuti sani limitata

ARGON LASER

Caratteristiche

- $\lambda = 488/514,5 \text{ nm}$
- Lunchezza d'onda (luce blu-verde) assorbita da emoglobina e pigmenti

Utilizzo del LASER in campo medico

ARGON LASER

Utilizzazioni

Sbiancamento

1. Copertura delle arcate dentali con membrane protettive
2. Applicazione sostanza sbiancante in forma gel (perossido di idrogeno)
3. Attivazione LASER
4. Innesco reazione sbiancante

Vantaggi

- Indolore, veloce
- Sbiancamento di 5-6 tonalità
- Sbiancante atossico
- Non danneggia smalto e tessuti adiacenti

Svantaggi

- Non si può applicare sulle protesi

Utilizzo del LASER in campo medico

ARGON LASER

Utilizzazioni

Riduzione batteri

1. Deidratazione del materiale all'interno della tasca
2. Rimozione
3. Effetto desensibilizzante

Trattamento carie

1. Vaporizzazione
2. Luce non assorbita da dentina, assenza di danni termici

Polimerizzazione dei compositi

1. Adatto per materiali che impiegano la luce fotopolimerizzante

Utilizzo del LASER in campo medico

ND-YAG LASER

Caratteristiche

- Granato di Neodimio Ittrio Alluminio
- $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- Opera nell'infrarosso, LASER guida elio-neon
- Potenza P=3W
- Energia pulsata a 1/10000s, assenza di reazione nervosa (no anestesia)

Utilizzazioni

Trattamento carie

1. Vaporizzazione
 2. Rimozione da 8 a 10 μm delle carie
 3. Polpa intaccata solo per 8 μm
 4. Azione sigillante
- Sterilizzazione di cavità e fessure

Utilizzo del LASER in campo medico

ND-YAG LASER

Vantaggi

- Smalto meno attaccabile dalle carie
- Incremento di temperatura della polpa minore che con il turbotrapano
- Temperature che garantiscono la sterilità

Svantaggi

- In chirurgia dei tessuti molli penetra profondamente

