

29. NUCLEONICA

R. Ho letto che presso il CERN di Ginevra operano due potenti, costosissimi ciclotroni per lo studio delle particelle subatomiche. Ha un senso spendere miliardi per la scienza pura?

D. A chi ritiene folli queste spese si può rispondere come fece Benjamin Franklin a coloro che criticavano le prime mongolfiere ritenendole inutili giocattoli: «A che cosa può servire un bambino appena nato?»

29.1. Interazioni

D. Le forze di attrazione o di repulsione agenti tra due oggetti, siano essi stelle o particelle subatomiche, si classificano in: *interazione forte*, *interazione elettromagnetica*, *interazione debole*, *interazione gravitazionale*.

Il *raggio d'azione* di una interazione è la distanza massima cui questa è influente mentre l'*intensità* definisce i rapporti tra le varie interazioni.

Secondo Werner Heisenberg le interazioni sono dovute a *particelle di scambio* o *di interazione*.

* *Interazione nucleare forte*. E' una forza di attrazione che si manifesta tra i quark; il suo *raggio di azione* è cortissimo, dell'ordine di 10^{-15} m ed è quella avente la maggiore intensità, posta per convenzione uguale a 1. La particella di scambio è il *gluone*.

* *Interazione elettromagnetica*. E' la forza responsabile della struttura atomica; si manifesta tra particelle elettricamente cariche e ad essa si attribuiscono la repulsione tra protoni (e tra elettroni) e l'attrazione tra protoni ed elettroni. E' circa 100 volte più debole dell'interazione forte e il suo raggio d'azione è infinito. La particella di scambio è il *fotone*.

* *Interazione debole*. Si manifesta tra leptoni e quark; il raggio di azione è molto piccolo ($\sim 10^{-18}$ m) e l'intensità relativa all'interazione forte

è $\sim 10^5$. Negli anni Settanta le interazioni elettromagnetiche e deboli sono state unificate (*interazioni elettrodeboli*).

* *Interazione gravitazionale*. E' una forza di attrazione a raggio di azione infinito e intensità relativa all'interazione forte di $\sim 10^{-39}$. La particella di scambio, priva di massa, è il *gravitone*, non ancora osservato. Tra le particelle subatomiche l'interazione gravitazionale è trascurabile.

29.2. Adroni e leptoni

D. Le particelle subatomiche sono molte e si classificano in *adroni* e *leptoni*.

Gli *adroni* sono soggetti all'interazione forte e si classificano a loro volta in *barioni* e *mesoni*, aventi massa rispettivamente superiore e inferiore a quella del protone. I *leptoni* hanno massa inferiore a quella del protone e non sono soggetti all'interazione forte.

Gli adroni sono a loro volta costituiti da tre particelle, non ancora osservate libere, i *quark*, caratterizzati da spin $\frac{1}{2}$ e da *cariche elettriche frazionarie*. Ad ogni quark corrisponde un antiquark.

Esempi. a) Il *protone* è costituito da due quark *u* e un quark *d* e la sua carica elettrica è unitaria

$$u + u + d = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

b) Il *neutrone* è costituito da due quark *d* e un quark *u* ed è elettricamente neutro

$$d + d + u = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 0$$

Tab. 29/1. Adroni.

				$m^{(*)}$	Spin	car. el.	τ (s) ^(**)	antip.
barioni	nucleoni	protone	p^+	1836	$\frac{1}{2}$	+ 1	infinita	p^-
		neutrone	n	1839	$\frac{1}{2}$	0	900	n
	iperoni	lamda	Λ^0	2184	$\frac{1}{2}$	0	$2,6 \cdot 10^{-10}$	Λ^0
		sigma	Σ^+	2327	$\frac{1}{2}$	+1	$8 \cdot 10^{-11}$	Σ^-
			Σ^-	2341	$\frac{1}{2}$	- 1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	Σ^+
			Σ^0	2332	$\frac{1}{2}$	0	$5,8 \cdot 10^{-20}$	Σ^0
			xi	Ξ^-	2585	$\frac{1}{2}$	- 1	$1,6 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^0	2573	$\frac{1}{2}$	0	$2,9 \cdot 10^{-10}$	Ξ^0

		omega	Ω^-	3276	3/2	- 1	$8 \cdot 10^{-11}$	Ω^+
mesoni		pioni	π^+	274	0	+ 1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	π^-
			π^0	264	0	0	$8,7 \cdot 10^{-17}$	π^0
		kaoni	K^+	967	0	+ 1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	K^-
			K^0	974	0	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	K^0

(*) Le masse sono relative a quella dell'elettrone considerata unitaria.

(**) τ , *vita media*, intervallo di tempo in cui il numero iniziale delle particelle si riduce di $1/e$; $e = 2,7182$, base dei logaritmi naturali.

Tab. 29/2. Quark.

			car. el.
down	(inferiore)	d	- 1/3
up	(superiore)	u	2/3
strange o sideways	(strano o laterale)	s	- 1/3
charm	(incantato)	c	2/3
bottom o beauty	(basso o bello)	b	- 1/3
top o truth	(alto o vero)	t	2/3

Tab. 29/3. Leptoni.

		m^(*)	spin	car. el.	τ (s)(**)	antip.
elettrone	e^-	1	1/2	- 1	infinita	e^+
neutrini	ν_e^0	0	1/2	0	infinita	ν_e^0
	ν_μ^0	0	1/2	0	infinita	ν_μ^0
	ν_τ^0	0	1/2	0	infinita	ν_τ^0
muone	μ^-	207	1/2	- 1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	μ^+
tauone	τ^-	3491	1/2	- 1	$3 \cdot 10^{-13}$	τ^+

(*) Le masse sono relative a quella dell'elettrone considerata unitaria.

(**) τ , *vita media*, intervallo di tempo in cui il numero iniziale delle particelle si riduce di $1/e$; $e = 2,7182$, base dei logaritmi naturali.

29.3. Antimateria

D. Le *antiparticelle* sono adroni e leptoni aventi massa e vita media identiche a quelle delle particelle subatomiche corrispondenti.

* Alle particelle dotate di carica elettrica corrispondono antiparticelle aventi la stessa massa ma carica elettrica opposta.

Esempi. All'elettrone e^- , negativo, corrisponde l'elettrone positivo e^+ , l'*antielettrone* o *positrone*; al protone p^+ , positivo, corrisponde l'*antiprotone* p^- .

* Alle particelle elettricamente neutre corrispondono antiparticelle aventi alcune proprietà (come ad esempio il momento angolare) opposte; così ad esempio, al neutrone corrisponde l'*antineutrone*.

Quando una particella incontra un'antiparticella entrambe scompaiono (*annichilazione o annichilimento*) e la loro massa si trasforma in energia.

29.4. Nuclidi stabili e instabili

D. L'esistenza di nuclidi stabili contenenti anche un numero elevato di protoni è dovuta a due fattori: l'interazione forte e, in misura minore, la presenza dei neutroni; un neutrone, incuneato tra due protoni, diminuisce circa quattro volte la loro forza repulsiva. Con l'aumentare del numero atomico, i protoni della periferia del nucleo, diminuendo il raggio d'azione dell'interazione forte, tendono ad essere respinti dagli altri, e i nuclidi diventano meno stabili.

Esempi. a) I nuclidi più stabili e più numerosi contengono un numero pari di protoni e un numero pari di neutroni.

b) Meno numerosi sono i nuclidi stabili aventi numero dei protoni pari e numero di neutroni dispari, o viceversa.

c) Sono soltanto sei i nuclidi stabili contenenti un numero dispari di protoni e di neutroni.

d) I nuclidi più stabili e più abbondanti in natura sono quelli contenenti un numero di protoni o un numero di neutroni uguale a 2 (es. ${}^4_2\text{He}$), 8 (es. ${}^{16}_8\text{O}$), 20 (es. ${}^{39}_{19}\text{K}$, 39 - 19 = 20 neutroni), 28, 50, 82, 126, detti *numeri magici*. Il nuclide più pesante stabile è il bismuto 209, contenente 209 - 83 = 126 neutroni.

e) Il corpo umano contiene tracce di un radioisotopo, lo ione potassio 40, $t_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$ y.

29.5. Decadimento radioattivo

D. I *radionuclidi* sono nuclidi instabili naturali o artificiali che si disintegrano spontaneamente e indipendentemente dallo stato di aggregazione, dalla temperatura, dalla pressione, dalla composizione chimica.

Per *decadimento radioattivo* si intende una «trasformazione nucleare spontanea nella quale vengono emesse radiazioni γ oppure particelle, o

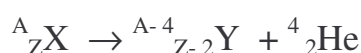
vengono emesse radiazioni X a seguito di cattura di elettroni orbitali» (UNI 7267). I principali meccanismi del decadimento sono quattro: *decadimento α* , *decadimento β^-* , *decadimento β^+* e *cattura K*. Ogni nuclide decade secondo uno solo di questi meccanismi. Le particelle e le radiazioni emesse nel decadimento radioattivo posseggono una notevole energia, prodotta dalla conversione di una piccolissima frazione della massa del radionuclide. Nel decadimento radioattivo, pochi nuclidi naturali e un maggior numero di nuclidi artificiali emettono anche radiazioni elettromagnetiche cortissime e penetranti, le *radiazioni gamma*.

Esempi. Applicazioni di alcuni radioisotopi in medicina: ^{11}C , ^{14}C , ^{32}P , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{42}K , ^{45}Ca (studi sul metabolismo); ^{35}S (ricerche sulle proteine, trattamento delle leucemie), ^{131}I (diagnosi dei tumori alla tiroide); ^{35}P , ^{74}As (localizzazione di tumori al cervello).

Tab. 25/4. Caratteristiche di alcuni isotopi.

Z		A	uma	abb. %	$t_{1/2}$	decad.
1	H	1	1,007 825	100		
		2	2,014 102	0,015		
		3	3,016 050		12,3 a	β^-
12	C	10	10,016 858		19,2 s	β^+
		11	11,011 433		20,4 min	β^+ K
		12	12,000 000	98,89		
		13	13,003 355	1,11		
		14	14,003 242		5730 a	β^-
88	Ra	223	223,018 50		11,2 d	α γ
		226	226,025 41		1620 a	α γ
		228	228,031 14		6,7 a	β^-

* *Decadimento α* . Si denominano *particelle α* gli elioni He^{2+} , cioè nuclei di elio (^4_2He). Il decadimento α è caratteristico dei radionuclidi pesanti, aventi $Z > 82$ e $A > 200$. Anzichè espellere protoni e neutroni il radionuclide emette nuclei di elio caratterizzati da grande stabilità. Il risultato è una *diminuzione del numero atomico di 2 unità* e una *diminuzione del numero di massa di 4 unità*. Nel decadimento α , un radionuclide X si trasforma in un isotopo Y dell'elemento che lo precede di due caselle nella tavola periodica



Le particelle α posseggono alta velocità ed energia ma, per le loro grosse dimensioni, sono poco penetranti: urtando atomi sottraggono loro elettroni, ionizzandoli.

Esempio. Il numero atomico del radio è $Z = 88$. Il radio 226, radionuclide naturale, emettendo un nucleo di elio, si trasforma in un isotopo dell'elemento avente $Z = 88 - 2 = 86$ (il rado) e precisamente nel rado 222 ($A = 226 - 4$)



Stabilisca quale elemento si forma nel decadimento α : a) dell'uranio 238. b) del polonio 210.

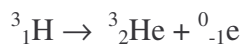
R. a) Torio. b) Piombo.

D. * Decadimento β^- . Il termine *particella β^-* , o semplicemente *particella β^-* , è sinonimo di *elettrone* (e^- , oppure e , oppure ${}^0_{-1}e$). Il decadimento β^- è caratteristico di radionuclidi aventi un alto rapporto tra neutroni e protoni: il risultato è *l'aumento del numero atomico di 1 unità* mentre il *numero di massa non cambia*. Nel decadimento β^- , da un radionuclide X si forma un isotopo Y dell'elemento che si trova nella casella successiva della tavola periodica, quindi un nuclide Y isobaro di X



Vengono emessi elettroni, più veloci e penetranti delle radiazioni α , e neutrini elettronici.

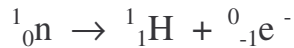
Esempi. a) L'idrogeno 3 (trizio) decade secondo lo schema



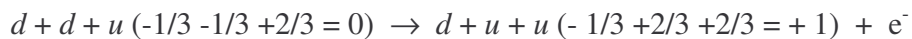
Come si vede, si forma elio 3, isobaro dell'idrogeno 3.

b) L'unico isotopo stabile dello iodio esistente in natura è lo iodio 127; in diagnostica e in terapia si usa lo iodio 131 (decadimento β^- ; $t_{1/2} = 8$ d); somministrato al paziente, si concentra nella tiroide e può essere misurato con adatti strumenti (*scintigrafia*).

L'emissione di un elettrone da un nucleo che non ne contiene è dovuta alla trasformazione di un neutrone in un protone



(ecco perchè il numero atomico del prodotto aumenta di una unità), dovuta a sua volta alla trasformazione di un un quark d in quark u



Stabilisca quale elemento si forma nel decadimento β^- : a) Del sodio 24. b) Del bromo 82.



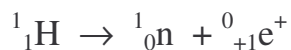
D. *Decadimento β^+ . Il termine *particella β^+* è sinonimo di elettrone positivo, o *positrone* (e^+ oppure ${}^0_{+1}e$). Il decadimento β^+ è caratteristico dei radionuclidi artificiali aventi un basso rapporto tra neutroni e protoni. Il risultato è la *diminuzione del numero atomico di 1 unità* mentre il *numero di massa non cambia*. Nel decadimento β^+ , da un radionuclide X si forma un isotopo Y dell'elemento che si trova nella casella precedente della tavola periodica



Esempio. Il carbonio 10 subisce il decadimento β^+ e si forma boro 10



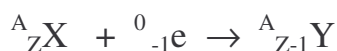
L'emissione di un positrone da un nucleo è dovuta alla trasformazione di un protone in un neutrone



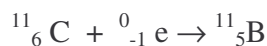
Stabilisca quale elemento si forma nel decadimento β^+ : a) Del sodio 22 e b) Dell'ossigeno 15.

R. a) Neo. b) Azoto.

D. * *Cattura K.* E' un fenomeno tipico degli elementi artificiali ed avviene quando un protone del nucleo di un atomo può acquistare un elettrone dal livello energetico più vicino, diventando un neutrone. Il risultato è la *diminuzione del numero atomico di 1 unità*, mentre il *numero di massa non varia*. Da un elemento X si forma un isotopo dell' elemento Y che si trova nella casella precedente nella tavola periodica



Esempio. Il carbonio 11 può catturare uno dei suoi sei elettroni diventando boro 11

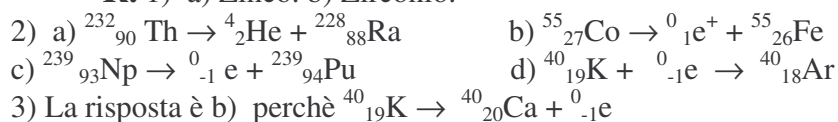


1) Stabilisca quale elemento si forma per cattura elettronica nel: a) gallio 65; b) potassio 40.

2) Completate le seguenti reazioni di decadimento: a) ${}^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^4_2\text{He} + ?$ b) ${}^{55}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^0_{-1}e + ?$ c) ${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^0_{-1}e + ?$ d) ${}^{40}_{19}\text{K} + {}^0_{-1}e \rightarrow ?$

3) Stabilisca quale tipo di decadimento avviene quando il potassio 40 diventa calcio 40: a) Decadimento α . b) Decadimento β . c) Decadimento β^+ . d) Cattura K. e) Fissione.

R. 1) a) Zinco. b) Zirconio.



29.6. Emivita

D. L'*emivita*, o *tempo di dimezzamento* o *semiperiodo di trasformazione* ($t_{1/2}$) è il «tempo necessario affinché un radionuclide, decadendo, riduca a metà la propria attività» (UNI 7267).

Esempio. Uno dei prodotti delle esplosioni nucleari è lo stronzio 90, avente $t_{1/2} = 28$ y, molto pericoloso perchè, essendo simile al calcio, attraverso la catena alimentare si insedia nelle ossa dell'uomo e dei vertebrati; il ricambio delle cellule ossee è un processo lento per cui il radioisotopo può rimanere nel corpo di una persona contaminata per un lungo periodo della sua vita. Infatti, la sua attività si riduce alla metà

dopo ventotto giorni, alla metà della metà (25 %) dopo $28 + 28 = 56$ y, alla metà della metà della metà (12,5 %) dopo $56 + 28 = 84$ y, ecc., come si vede nella tab. 25/5.

Tab. 25/5. Decadimento dello stronzio 90.

		100/2	50/2	25/2	12,5/2	6,25/2	3,12/2	1,56/2
attività	100 %	50 %	25 %	12,5 %	6,25 %	3,12 %	1,56 %	0,78 %
			28 + 28	56 + 28	84 + 28	112 + 28	140 + 28	168 + 28
anni	0	28	56	84	112	140	168	196

Il decadimento radioattivo è una reazione di ordine 1 e la sua equazione cinetica è

$$\lg \frac{n_0}{n} = 0,301 \frac{t}{t_{1/2}}$$

dove n è il numero di radionuclidi presenti al tempo t e n_0 il numero di radionuclidi presenti al tempo 0 .

R. Come si giunge a questa equazione?

D. Partendo dall'equazione cinetica delle reazioni di ordine 1, sostituendo alle concentrazioni il numero dei nuclidi o le loro masse

$$k = \frac{2,303}{t} \lg \frac{[A]_0}{[A]_t} \quad \text{Quando } t = t_{1/2} \quad k = \frac{2,303}{t_{1/2}} \lg \frac{100}{50} \quad \text{per cui}$$

$$\frac{2,303}{t_{1/2}} \lg 2 = \frac{2,303}{t} \lg \frac{n_0}{n} \quad \text{da cui} \quad \lg \frac{n_0}{n} = 0,301 \frac{t}{t_{1/2}}$$

Vi sono nuclidi, quali ad esempio i transuranici, dall'emivita brevissima (dell'ordine dei millesimi di secondo). Eppure un cronista, nel dare la notizia della scoperta dell'elemento 112, il 22.2.1996 scriveva: «...difficilmente potrà essere prodotto su scala industriale a causa della

complessità del metodo di produzione». Per altri elementi l'emivita è dell'ordine di secondi, minuti, ore, giorni, secoli, millenni.

Esempi. a) Il tempo di dimezzamento del berillio 7 è di 54 d, quello del berillio 8 è brevissimo (10^{-16} s) mentre il berillio 9 è stabile. Il tempo di dimezzamento del berillio 10 è molto lungo, $2,7 \cdot 10^6$ y.

b) Il tempo di dimezzamento del torio 232 è lunghissimo, $1,4 \cdot 10^{10}$ y, e ciò spiega perchè lo si trova «ancora» nella crosta terrestre, impegnato a decadere da quasi cinque miliardi di anni.

In un recipiente si trovano 200 mg di zinco 63 ($t_{1/2} = 38$ min). Si vuole calcolare la quantità del radioisotopo dopo un giorno.

$$\lg \frac{n_0}{n} = \frac{0,3 t}{t_{1/2}} \qquad \lg \frac{200}{n} = \frac{0,3 (24 \text{ h} \times 60) \text{ min}}{38 \text{ min}} = 11,4$$

$$\lg 200 - \lg n = 11,4 \quad - \lg n = 11,4 - \lg 200 = 11,4 - 2,3 = 9,1$$

antlg 9,1 \approx 8 mg

Quanto più lungo è il tempo di dimezzamento di un radionuclide, tanto più è difficile risolvere il problema della sua conservazione in condizioni di sicurezza.

R. I famosi depositi delle scorie radioattive delle centrali nucleari!
Per una sostanza radioattiva, emivita e vita media sono sinonimi?

D. No. La *vita media* (τ) di un radioisotopo è l'intervallo di tempo necessario affinché il numero iniziale di particelle si riduca a $1/e$, dove $e = 2,7182$, base dei logaritmi naturali. $\tau = t_{1/2} / \ln 2$.

29.7. Datazione

D. Negli organismi viventi è presente in tracce il radioisotopo ^{14}C ($t_{1/2} = 5730$ y) il quale, dopo la morte dell'organismo, inizia a decadere non verificandosi più scambi di carbonio tra l'organismo e il diossido di carbonio atmosferico, la cui percentuale nell'aria si mantiene pressochè

costante nel tempo. Su questo principio è basato un metodo (approssimato) di datazione dei fossili.

Esempio. Si voglia calcolare approssimativamente l'età di un legno fossile la cui radioattività dovuta al carbonio 14 risulta il 70 % di quella di un campione vivente.

$$t = \frac{t_{1/2} \lg n_0/n}{0,3} = \frac{\lg 100/70 \times 5730 \text{ a}}{0,3} = 2960 \text{ y}$$

29.8. Reazioni nucleari

D. * Nelle *reazioni chimiche*, che avvengono alla periferia degli atomi, non cambiano il numero atomico e il numero di massa degli elementi coinvolti, le variazioni dell'energia sono dell'ordine di 200÷4200 kJ/ mol e le variazioni della massa trascurabili. In una reazione chimica un elemento non può trasformarsi in un altro, e ciò spiega i tentativi, destinati all'insuccesso, degli alchimisti di produrre metalli preziosi da metalli comuni. Non per questo si deve giudicare con sufficienza il loro lavoro. Inseguendo il loro disegno, produrre l'oro dai «metalli vili», gli alchimisti hanno scoperto il fosforo, l'arsenico, il bismuto, l'indaco e prodotto gli acidi solforico, cloridrico, nitrico, acetico, l'acqua regia, il metanolo, il fenolo, l'etere etilico, la biacca, l'ammonio solfato, il sodio solfato ed altre sostanze. Un aneddoto. L'alchimista Aurelio Augurelli, nel 1522 inviò al papa Leone X un suo libro sull'arte di fabbricare l'oro. Ne ricevette in cambio un sacco con la scritta: «A chi è capace di produrre l'oro manca soltanto un sacco per riporvelo».

* Nelle *reazioni nucleari* viene coinvolto il nucleo atomico: variano il numero atomico, o il numero di massa, o entrambi, e le variazioni di energia sono notevolmente più alte, a cui corrispondono variazioni di massa non trascurabili. Per questo motivo sono realizzabili soltanto nei *reattori nucleari*, durante le *esplosioni nucleari* e con gli *acceleratori di particelle*. Nelle reazioni nucleari, la somma dei numeri di massa (e dei numeri atomici) dei reagenti è uguale alla somma dei numeri di massa (e dei numeri atomici) dei prodotti. L'energia assorbita o prodotta si calcola

per differenza tra le masse nuclidiche dei reagenti e le masse nuclidiche dei prodotti.

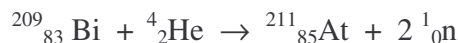
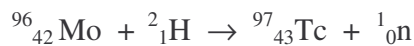
Esempi, a) Sono reazioni nucleari spontanee i processi di decadimento dei radioisotopi già visti.

b) Sono reazioni nucleari indotte artificialmente le reazioni di *fissione* e di *fusione* (ne parleremo più avanti) realizzate per produrre energia, isotopi radioattivi da isotopi stabili, elementi artificiali, bombe nucleari.

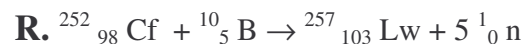
29.9. Elementi artificiali

D. Gli *elementi artificiali* sono elementi di cui nessun isotopo esiste in natura. Sono *tecnezio* (${}_{43}\text{Tc}$), *promezio* (${}_{61}\text{Pm}$), *astato* (${}_{85}\text{At}$) e gli *elementi transuranici*. Si ottengono «bombardando» i nuclei di elementi naturali o artificiali con «proiettili» di varia natura, quali *neutroni* (${}^1_0\text{n}$) *protoni* H^+ (nuclei di idrogeno ${}^1_1\text{H}$), *deuteroni* D^+ (nuclei di deuterio, ${}^2_1\text{H}$), *trizion* T^+ (nuclei di trizio ${}^3_1\text{H}$) *particelle α* (nuclei di elio ${}^4_2\text{He}$), *ioni di elementi leggeri* (B, C, N, O).

Esempi. Un isotopo del tecnezio e un isotopo dell'astato furono ottenuti bombardando un isotopo del molibdeno con deuteroni e un isotopo del bismuto con particelle α



Il laurenzio 257 fu prodotto bombardando il californio 252 con nuclei di boro 10. Scriva la reazione nucleare.



29.10. Energia di coesione del nucleo atomico

D. L'*energia di coesione del nucleo atomico* è l'energia, elevatissima, necessaria per separare i nucleoni di un atomo, equivalente all'energia liberata nella formazione di un nucleo di quell'atomo. La massa reale di un nuclide è sempre inferiore alla massa teorica ricavata sommando le masse dei protoni, degli elettroni e i dei neutroni che lo compongono; la

differenza tra la massa teorica e la massa reale si chiama *difetto di massa* ed è la misura dell'energia di coesione, calcolabile con l'equazione di Einstein, $E = m \cdot c^2$.

Tab. 25/6. Massa di alcune particelle.

		uma			uma
elettrone	e^-	0,000 548 6	prozio	^1_1H	1,007 83
positrone	e^+	0,000 548 6	deuterio	^2_1H	2,014 10
protone	p	1,007 28	carbonio 12	$^{12}_6\text{C}$	12,000 00
neutrone	n	1,008 67	azoto 14	$^{14}_7\text{N}$	14,003 07

Esempio. Se fosse possibile «costruire» un atomo di azoto 14 ($^{14}_7\text{N}$) unendo 7 protoni, 7 elettroni e 7 neutroni la sua massa dovrebbe risultare:

$$(7 \times 1,007 28) + (7 \times 0,000 548 6) + (7 \times 1,008 67) = 14,115 49 \text{ uma.}$$

Viceversa, la massa di un atomo di azoto 14 è inferiore (14,003 07 uma) per cui il difetto di massa è $14,115 49 - 14,003 07 = 0,112 42$ uma, equivalente all'energia sviluppata nella «creazione» di un nucleo di azoto 14, ovvero energia necessaria per separare le tre particelle che lo costituiscono.

In nucleonica l'energia si esprime anche in *megaelettronvolt* (MeV); si ricorda che $1 \text{ J} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 6,24 \cdot 10^{12} \text{ MeV}$.

Esempio. Vogliamo calcolare l'energia di coesione, in J e in MeV, dell'atomo di azoto 14 dell'esempio precedente. Le ricordo che $1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$0,112 \text{ uma} \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,86 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

$$E = m \cdot c^2 = 1,86 \cdot 10^{-28} \text{ kg} (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,67 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$1,67 \cdot 10^{-11} \text{ J} \times 6,24 \cdot 10^{12} = 104,3 \text{ MeV}$$

Nella «creazione» di un nucleo di azoto 14 si liberano 104,3 MeV; occorrono 104,3 MeV separare le particelle che lo costituiscono.

29.11. Energia di coesione di un nucleone

D. Non è possibile calcolare l'energia media di coesione di un singolo nucleone dividendo l'energia di coesione totale per il numero dei nucleoni. Infatti, con l'aumentare del numero di massa, l'energia di

coesione media di un singolo nucleone aumenta rapidamente, raggiunge un massimo per i nuclidi con numero di massa intorno a 56 e poi decresce lentamente.

* Per gli elementi *leggeri* l'energia di coesione di un singolo nucleone *aumenta* fortemente con l'aumentare del numero di massa. Gli elementi più leggeri (H, He, Li, ecc.), per la bassa energia di coesione dei loro nucleoni, sono atti alla *fusione nucleare*.

* Per gli elementi *pesanti* l'energia di coesione *diminuisce* con l'aumentare del numero di massa. Gli elementi più pesanti (U, Np, Pu, ecc.) per la bassa energia di coesione dei loro nucleoni, possono subire la *fissione nucleare*).

29.12. Fissione nucleare

D. La *fissione nucleare* è la «rottura di un nucleo atomico pesante, per effetto della interazione di neutroni lenti o veloci, in due o più frammenti, accompagnata da emissione di neutroni e raggi γ » (UNI 7267).

Nel decadimento radioattivo, i prodotti sono piccoli nuclei o particelle subatomiche; nella fissione sono nuclei relativamente grossi.

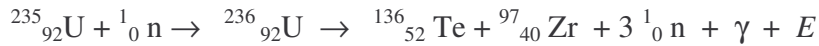
I nuclei che possono subire la fissione (*nuclei fissili*) sono pochi: torio, protoattinio, uranio e transuranici. La reazione di fissione è fortemente esoergica, i prodotti sono diversi e i neutroni emessi sono in numero maggiore di quelli necessari per iniziarla.

La fissione dell'uranio 235 inizia con la cattura di un neutrone; poi l'uranio 236 si spezza in due frammenti *A* e *B* aventi in genere numeri di massa compresi tra 70 e 170 e numeri atomici compresi tra 30 (zinco) e 65 (terbio).



dove 2,5 n è il numero medio di neutroni liberati (in alcune fissioni sono 2, in altre 3) ed *E* l'energia prodotta (energia cinetica di *A* e *B*, dei neutroni emessi, della radiazione γ , dei decadimenti radioattivi di *A* e *B*).

a) Due esempi di fissione dell'uranio 235:



b) L'energia prodotta nella esplosione delle bombe nucleari si misura in *ton di TNT* (t_{TNT}) energia sviluppata nella esplosione di 1 t di tritolo, equivalente a $4,2 \cdot 10^6$ kJ. La prima bomba a fissione di Alamogordo (1945) era di 20 kt_{TNT} ; la prima bomba H a fusione di Bikini (1952) era di 10 Mt_{TNT} (l'equivalente di dieci milioni di tonnellate di tritolo).

Saprebbe calcolare quanti neutroni si liberano quando l'uranio 235 assorbe un neutrone formando bario 142 e cripto 91?



D. Nella fissione:

* Quando la massa del materiale fissile è piccola, i neutroni emessi vengono assorbiti da altri materiali non fissili e si disperdono all'esterno;

* Quando la massa del materiale fissile supera un determinato valore, detto *massa critica*, la reazione nucleare si *autosostiene* ed avviene una *reazione nucleare a catena*. Se incontrollata, il risultato è una esplosione nucleare ossia la liberazione, in un intervallo dell'ordine del trilionesimo di secondo, di enormi quantità di energia. La fissione può essere controllata nei *reattori nucleari*, schermando il materiale fissile con sostanze capaci di assorbire neutroni, come boro e cadmio. Intorno al *nocciolo* del reattore circola acqua che assorbe il calore prodotto e lo trasferisce in uno scambiatore di calore in cui si produce vapore, con il quale si alimentano le turbine di una centrale termoelettrica.

L'uranio naturale contiene il 99,28 % di uranio 238 e soltanto lo 0,72 % di uranio 235. L'uranio 238 contiene un numero pari di protoni ($Z = 92$) e un numero pari di neutroni ($N = 238 - 92 = 146$); è radioattivo ma non fissile. L'uranio 235 contiene un numero dispari di neutroni ($N = 235 - 92 = 143$) ed è radioattivo e fissile. Nei reattori nucleari si usa *uranio*

arricchito, uranio naturale in cui, attraverso processi lenti e costosi, viene aumentata la percentuale di U 235.

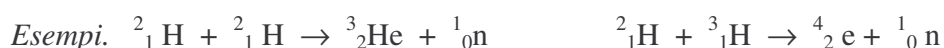
Il nucleo dell'uranio 235 subisce la fissione soltanto se colpito con neutroni lenti, che hanno cioè perso energia per gli urti contro materiali più leggeri dell'uranio detti *moderatori*. Agiscono la moderatori l'acqua, l'acqua pesante, la grafite e altri.

R. Sarà possibile produrre energia senza ricorrere ai processi di fissione nucleare?

D. Non esistono, al momento, alternative al nucleare. Come ha scritto, controcorrente, il fisico Michelangelo Fazio, «... siamo disposti a modificare, mediante grossi sacrifici, il livello di benessere raggiunto nella nostra società? [...]. E' inutile, se pretendiamo di consumare come consumiamo, promuovere referendum o organizzare cortei [...] sbandierando ipotetiche energie alternative che, se anche adeguatamente sfruttate, potranno fornire sì e no un 5 % in più dell'attuale elevatissimo fabbisogno energetico. Non basta dire no al nucleare, no al carbone, no al petrolio, diciamo no ai consumi [...]».

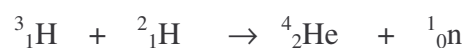
29.13. Fusione nucleare

D. La *fusione nucleare* è la «reazione tra due nuclei leggeri che porta alla produzione di almeno una specie chimica nucleare più pesante di uno qualsiasi dei nuclei iniziali» (UNI 7267).



Per realizzare la fusione nucleare occorre portare i reagenti ad altissima temperatura. Gli studi per produzione di energia mediante la fusione nucleare sono tuttora in corso.

Esempi. a) Vogliamo calcolare l'energia, in kilocalorie, prodotta nella reazione di fusione



$$m \text{ (uma)} \quad 3,016 \ 050 \quad 2,014 \ 102 \quad 4,002 \ 603 \quad 1,008 \ 665$$

$$(3,016 \ 050 + 2,014 \ 102) - (4,002 \ 603 + 1,008 \ 665) = 0,019 \text{ uma} \times 932 = 17,7 \text{ MeV}$$

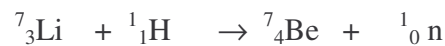
La massa dei prodotti è *inferiore* alla massa dei reagenti: 0,019 uma di massa si convertono in energia quindi si sviluppano $(0,019 \text{ uma} \times 932) = 17,7 \text{ MeV}$. Nella formazione di *un atomo* di elio 4 si sviluppano

$$17,7 \cdot 10^6 \text{ eV} \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

Nella formazione di *una mole* di elio 4 (poco più di 4 g) si sviluppano

$$2,8 \cdot 10^{-15} \text{ J} \times 6 \cdot 10^{23} = 1,7 \cdot 10^9 \text{ kJ} \times 0,24 = 4 \cdot 10^8 \text{ kcal (400 milioni di kilocalorie)}$$

b) Vogliamo ora calcolare l'energia, in kilojoule, prodotta nella seguente reazione di fusione nucleare



$$\overline{m \text{ (uma)} \quad 7,016 \ 004 \quad 1,007 \ 825 \quad 7,016 \ 930 \quad 1,008 \ 67}$$

$$(7,016 \ 004 + 1,007 \ 825) - (7,016 \ 930 + 1,008 \ 67) = 0,001 \ 77 \text{ uma}$$

La massa dei reagenti è *superiore* a quella dei prodotti per cui la reazione *non produce* energia bensì parte dell'energia dei reagenti «crea» 0,001 77 uma di materia.

29.14. Dosimetria

D. Per *dosimetria* si intende l'insieme dei metodi fisici, chimici e biologici atti a misurare l'intensità e gli effetti delle radiazioni ionizzanti su un mezzo irradiato, in particolare su un organismo vivente.

I danni da radiazioni sono dovuti soprattutto alla scissione delle molecole dell'acqua dei tessuti viventi in radicali liberi.

* *Attività*. E' il numero dei decadimenti radioattivi che avvengono in una sostanza radioattiva nell'unità di tempo. L'unità di misura SI è il *becquerel* (Bq), attività di una sostanza radioattiva che subisce un decadimento al secondo; $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. Una unità non SI è il *curie* (Ci); $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$.

* *Concentrazione radioattiva*. E' il rapporto tra l'attività e la massa (o il volume) del mezzo in cui si trova il radionuclide. Le unità di misura SI sono il *becquerel al kilogrammo* (Bq/kg) e il *becquerel al metro cubo* (Bq/m³).

* *Esposizione o dose di esposizione (D_e)*. E' il rapporto tra la carica *Q* degli ioni e la massa *m* dell'aria secca (c.n.) in cui vengono prodotti da una radiazione ionizzante

$$D_e = \frac{Q}{m} \quad \text{L'unità SI è il coulomb al kilogrammo di aria (C/kg aria)}$$

Una unità non SI è il *roentgen* (R); 1 R = 2,58·10⁻⁴ C/kg aria.

* *Dose assorbita (D)*. E' la frazione dell'energia di una radiazione ionizzante assorbita attraversando la materia.

$$D = \frac{E}{m} \quad \text{L'unità SI è il joule al kilogrammo o gray (Gy).}$$

Una unità non SI è il *rad* (*radiation adsorbed dose*), sottomultiplo dei gray; 1 rad = 10⁻² Gy.

La dose assorbita aumenta con l'aumentare del numero atomico degli elementi presenti nel mezzo attraversato.

Esempio. La dose assorbita delle ossa (contenenti calcio) è superiore a quella assorbita dal tessuto muscolare, contenente elementi più leggeri quali C, H, O, N.

* *Equivalente di dose o dose assorbita equivalente, o dose biologica efficace (D_b)*. Dosi uguali di radiazioni assorbite aventi diversa frequenza producono effetti biologici diversi. La dose biologica efficace è correlata al danno potenziale prodotto dalla radiazione e si calcola applicando la formula

$$D_b = f D$$

dove f è detto *fattore di qualità*, valore convenzionale che tiene conto del danno biologico prodotto dalla dose assorbita. I valori di f sono periodicamente aggiornati dalla Commissione internazionale per la protezione delle radiazioni (ICRP). Per le radiazioni X o γ di qualsiasi frequenza che attraversano un substrato biologico, $f = 1$, per cui la dose biologica efficace coincide con la dose assorbita. L'unità SI della dose biologica efficace è ancora il joule al chilogrammo, in questo caso chiamato *sievert* (Sv), con i suoi sottomultipli *centisievert* o *rem* (*roentgen equivalent man*, $1 \text{ cSv} = 1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$), *millisievert* ($1 \text{ mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$) e *microsievert* ($1 \text{ }\mu\text{Sv} = 10^{-6} \text{ Sv}$).

Esempi. a) *Dose biologica efficace in alcuni esami clinici* (mSv): radiografia del ginocchio, 0,002; radiografia della mano, 0,004; radiografia del torace e mammografia, 0,1; urografia, 3; TAC del torace, 5; angiocardigrafia, 21-23.

b) *Valori medi della dose biologica efficace nella vita quotidiana* (mSv all'anno), calcolati dalla ICRP: orologio al quarzo, 0,005; televisore a colori, 0,01; raggi cosmici a livello del mare, 0,4; inalazione o ingestione di sostanze radioattive, 1,6.

c) Si è stimato che, nei primi 30 anni di vita, una persona riceva radiazioni da varie sorgenti: $\approx 3 \text{ rem}$ dai radioisotopi naturali (es. uranio, rado); 3-5 rem dagli esami diagnostici e nelle radioterapie; $0,1 \div 0,15 \text{ rem}$ dalle esplosioni nucleari e dalle applicazioni industriali delle radiazioni, per un totale di $6 \div 8 \text{ rem}$, a cui sembra si possano aggiungere ancora 5 rem senza rischi. (*DMA*, dose minima ammissibile per tutto il corpo).

d) Vi sono organi e tessuti più o meno sensibili alle radiazioni ionizzanti; le loro DMA, riferite ad una persona adulta nel corso dell'attività lavorativa, espresse in rem all'anno, sono: per gonadi e midollo osseo, 5; per pelle, ossa, tiroide, 30; per mani, avambracci, piedi, caviglie, 75; per altri organi, 15.

Tab. 25./7. Fonti di radiazioni (in Europa).

48,8 %	<i>rado</i> (*)
15,3 %	<i>radioisotopi</i> usati in diagnostica
14,0 %	<i>uranio</i> del suolo
11,2 %	radioisotopi ingeriti con gli <i>alimenti</i>
9,6 %	<i>raggi gamma</i> e <i>raggi cosmici</i>
0,3 %	<i>fallout</i>
0,8 %	<i>altre fonti</i>

(*) Quasi la metà delle radiazioni di origine naturale da cui siamo, volenti o nolenti, bombardati, è dovuta a tre isotopi di questo gas nobile, ^{219}Rn , ^{220}Rn e ^{222}Rn , aventi tempi di dimezzamento rispettivamente di 3,92 s, 54,5 s e 3,825 d. Il rado, gas prodotto del decadimento di elementi radioattivi naturali e a sua volta radioattivo, è presente nel terreno e nei materiali da costruzione come tufo, granito, pozzolana, cementi pozzolanici. Nelle abitazioni, essendo pesante, tende ad accumularsi nei piani bassi. Si riscontra in percentuale diversa secondo le regioni; in Lazio, Campania, Lombardia e Friuli i valori della concentrazione radioattiva dovuta al rado sono 90÷120 Bq/m³ mentre in Lucania, Marche e Liguria sono 20÷40 Bq/m³. Dal 1989 è in corso una mappatura di tutto il territorio nazionale.