

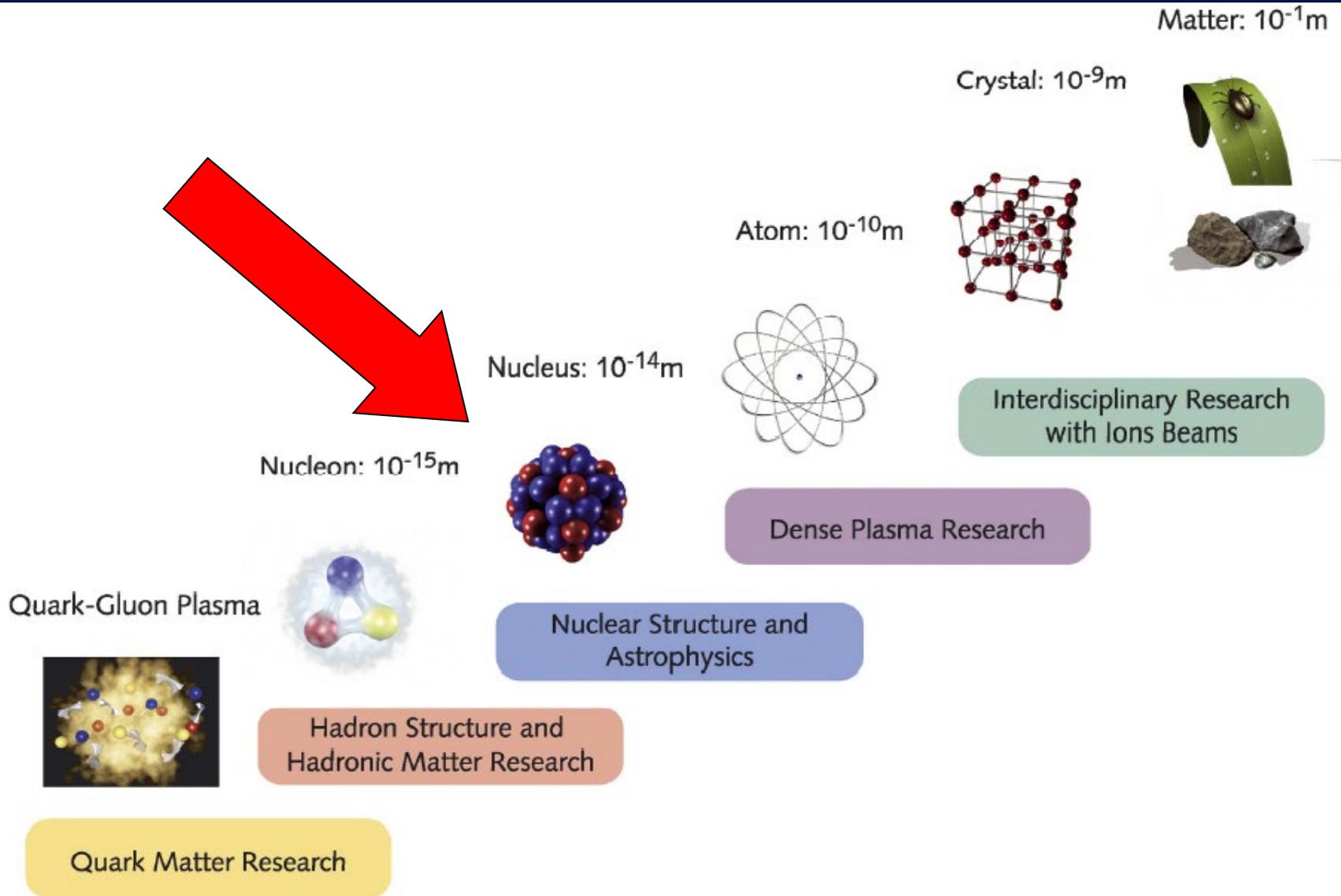
Laurea in scienze ambientali e naturali

Fisica Applicata all'Ambiente

Radioattività

<http://www.ge.infn.it/~prati>

Di cosa ci occupiamo in questa prima parte



Riferimenti Bibliografici

D. Halliday, R. Resnik, J. Walker, *Fondamenti di fisica - fisica moderna*
(Ambrosiana Editrice, copie nella biblioteca DIFI)

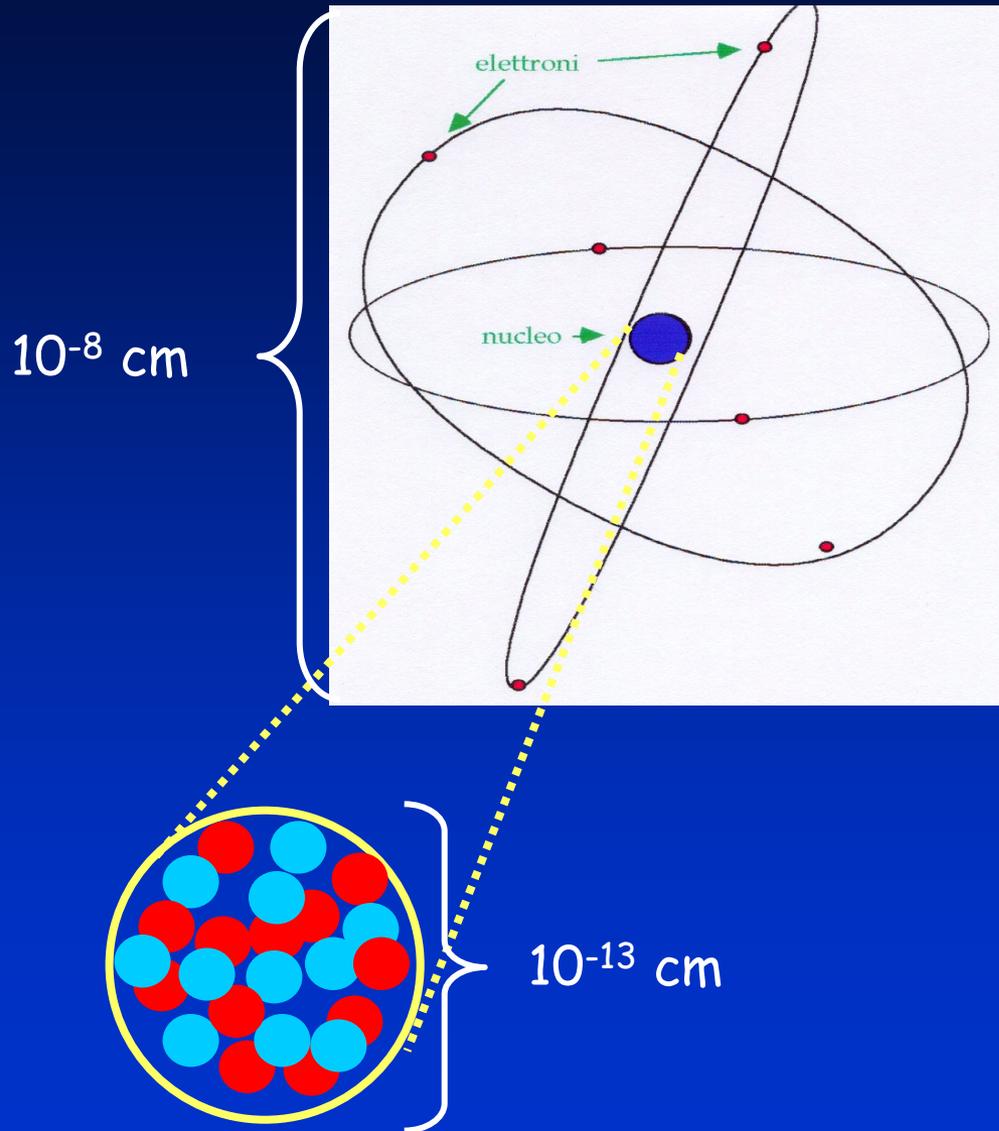
Dlgs 230/95 e Dlgs 241/01

<http://www.ge.infn.it> - link a: segreteria di radioprotezione

Materiale informativo INFN

<http://www.ge.infn.it> - link a: segreteria di radioprotezione

La struttura della materia



Gli elementi chimici sono “costruiti” secondo uno schema «semplice»



.....



.....



e i "mattoni"...

Particella	Massa	Carica elettrica
Neutrone	$1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	—
Protone	$1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$+1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Elettrone	$9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$- 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Alcune conseguenze...

- p e n hanno una massa circa 2000 volte maggiore di quella degli elettroni: la massa di ogni atomo é concentrata nel nucleo
- La dimensione del nucleo é circa 100.000 volte inferiore di quella dell'atomo: la materia che ci circonda é praticamente vuota !
- in ogni atomo protoni ed elettroni sono presenti in ugual numero e quindi la materia é normalmente elettricamente neutra. Un atomo che perde od acquista elettroni si chiama **IONE** e possiede una carica elettrica
- Gli elementi si distinguono anche per la posizione degli elettroni che ruotano intorno al nucleo, in particolare per la distanza dell'orbita dal nucleo.

Alcune definizioni:

NUMERO ATOMICO (Z) = n. di protoni nel nucleo (ma anche di elettroni nell'atomo). Determina le proprietà chimiche di un elemento

PESO ATOMICO (A) = rapporto tra la massa dell'atomo ed $1/12$ di quella dell'atomo di Carbonio-12 (che ha 6 protoni e 6 neutroni) e cioè $1.660 \cdot 10^{-27}$ kg (unità di massa atomica, u)

(nota: in questo caso si dovrebbe parlare più correttamente di Peso atomico relativo per distinguerlo da quello assoluto che è la massa dell'atomo)

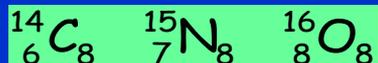
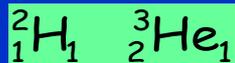
Alcune definizioni

Nuclide: ben definito nucleo costituito da un determinato numero di protoni e di neutroni. Esso viene indicato come:

${}^A_Z X_N$ o spesso più semplicemente ${}^A_Z X$ dove:

- **X** indica l'elemento chimico;
- **Z** : numero atomico dell'elemento = numero di protoni nel nucleo (\equiv numero di elettroni atomici);
- **A** : numero di massa del nucleo, cioè il numero totale di protoni (Z) e neutroni (N) $\rightarrow A=Z+N$.

I protoni ed i neutroni sono chiamati genericamente nucleoni. Ne risulta ovviamente che **$N=A-Z$**



isotoni



isotopi

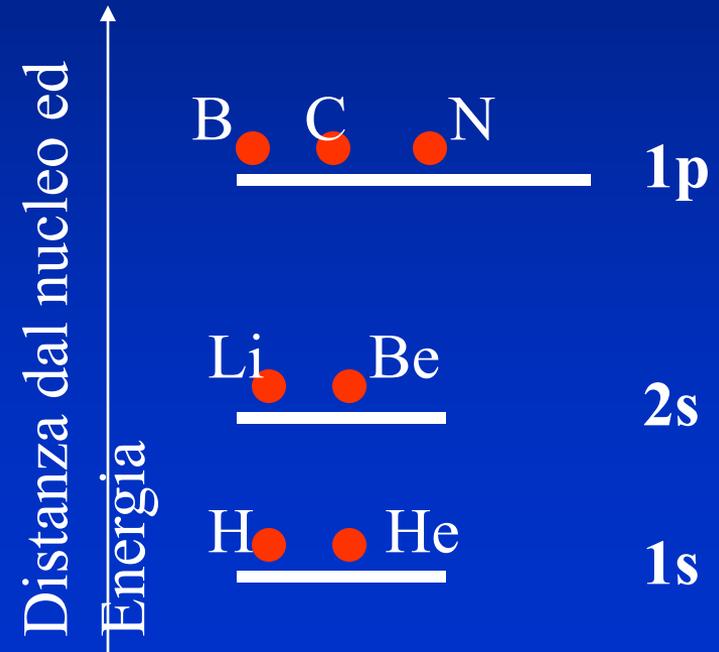


isobari

"Zoologia" degli atomi

Nel 900 si è via via compreso come sono fatti gli atomi, in particolare si è capito che gli elettroni non possono stare in qualunque posizione attorno al nucleo e che solo alcune particolari posizioni, dette orbite o orbitali, sono permesse. Gli orbitali sono individuati con numeri e lettere che ne identificano la forma. Ogni orbitale può ospitare un num. max. di elettroni: 2 per gli orbitali s, 6 per gli orbitali p, etc.)

Z	Elemento	Configurazione elettronica
1	H	$1s^1$
2	He	$1s^2$
3	Li	$1s^2 2s^1$
4	Be	$1s^2 2s^2$
5	B	$1s^2 2s^2 2p^1$
6	C	$1s^2 2s^2 2p^2$
7	N	$1s^2 2s^2 2p^3$



La tavola periodica degli elementi...

1 H 1 Hydrogen 1.008																	18 He 2 Helium 4.003						
2 Li 3 Lithium 6.939 K α 0.0544 ρ 0.534	Be 4 Beryllium 9.012 K α 0.1088 ρ 1.85																	B 5 Boron 10.811 K α 0.1834 ρ 2.34	C 6 Carbon 12.011 K α 0.2774 ρ 2.25	N 7 Nitrogen 14.007 K α 0.3924 ρ 1.83	O 8 Oxygen 15.999 K α 0.5249 ρ 2.07	F 9 Fluorine 18.998 K α 0.6768 ρ 2.33	Ne 10 Neon 20.183 K α 0.8485 ρ 2.69
3 Na 11 Sodium 22.990 K α 1.0410 ρ 0.97	Mg 12 Magnesium 24.312 K α 1.2536 ρ 1.74																	Al 13 Aluminum 26.982 K α 1.4866 ρ 2.69	Si 14 Silicon 28.086 K α 1.7398 ρ 2.33	P 15 Phosphorus 30.974 K α 2.0134 ρ 1.83	S 16 Sulfur 32.064 K α 2.3075 ρ 2.07	Cl 17 Chlorine 35.453 K α 2.6219 ρ 3.12	Ar 18 Argon 39.948 K α 2.9571 ρ 3.12
4 K 19 Potassium 39.102 K α 3.3129 ρ 0.86	Ca 20 Calcium 40.08 K α 3.6905 L α 0.3413 ρ 1.53	Sc 21 Scandium 44.956 K α 4.0892 L α 0.3955 ρ 2.99	Ti 22 Titanium 47.90 K α 4.5089 L α 0.4522 ρ 4.51	V 23 Vanadium 50.942 K α 4.9498 L α 0.5113 ρ 6.10	Cr 24 Chromium 51.996 K α 5.4117 L α 0.5729 ρ 7.19	Mn 25 Manganese 54.938 K α 5.8951 L α 0.6374 ρ 7.43	Fe 26 Iron 55.847 K α 6.3996 L α 0.7048 ρ 7.87	Co 27 Cobalt 58.933 K α 6.9254 L α 0.7763 ρ 8.85	Ni 28 Nickel 58.71 K α 7.4725 L α 0.8515 ρ 8.90	Cu 29 Copper 63.546 K α 8.0413 L α 0.9297 ρ 8.96	Zn 30 Zinc 65.37 K α 8.6313 L α 1.0118 ρ 7.130	Ga 31 Gallium 69.72 K α 9.2429 L α 1.0979 ρ 5.91	Ge 32 Germanium 72.59 K α 9.8762 L α 1.1880 ρ 5.32	As 33 Arsenic 74.922 K α 10.5320 L α 1.2820 ρ 5.72	Se 34 Selenium 78.96 K α 11.2869 L α 1.3751 ρ 4.79	Br 35 Bromine 79.904 K α 11.9089 L α 1.4805 ρ 3.12	Kr 36 Krypton 83.80 K α 12.6329 L α 1.5861 ρ 3.12						
5 Rb 37 Rubidium 85.47 K α 13.3757 L α 1.6942 ρ 1.53	Sr 38 Strontium 87.62 K α 14.1429 L α 1.8066 ρ 2.60	Y 39 Yttrium 88.905 K α 14.9334 L α 1.9226 ρ 4.67	Zr 40 Zirconium 91.22 K α 15.7473 L α 2.0424 ρ 6.50	Nb 41 Niobium 92.906 K α 16.5840 L α 2.1659 ρ 8.57	Mo 42 Molybdenum 95.94 K α 17.4446 L α 2.2932 ρ 10.22	Tc 43 Technetium 99 K α 18.3286 L α 2.4240 ρ 11.46	Ru 44 Ruthenium 101.07 K α 19.2365 L α 2.5586 ρ 12.40	Rh 45 Rhodium 102.905 K α 20.2164 L α 2.6968 ρ 12.44	Pd 46 Palladium 106.4 K α 21.1775 L α 2.8387 ρ 12.02	Ag 47 Silver 107.868 K α 22.1633 L α 2.9844 ρ 10.49	Cd 48 Cadmium 112.40 K α 23.1740 L α 3.1338 ρ 8.65	In 49 Indium 114.82 K α 24.2101 L α 3.2870 ρ 7.31	Sn 50 Tin 118.69 K α 25.2718 L α 3.4440 ρ 7.30	Sb 51 Antimony 121.75 K α 26.3595 L α 3.6048 ρ 6.62	Te 52 Tellurium 127.60 K α 27.4727 L α 3.7694 ρ 6.24	I 53 Iodine 126.904 K α 28.6125 L α 3.9377 ρ 4.94	Xe 54 Xenon 131.30 K α 29.7793 L α 4.1100 ρ 3.82						
6 Cs 55 Caesium 132.905 L α 4.2865 ρ 1.90	Ba 56 Barium 137.34 L α 4.4663 ρ 3.50	La 57 Lanthanum 138.91 L α 4.6510 M α 0.8332 ρ 6.19	Hf 72 Hafnium 178.49 L α 7.8991 M α 1.6446 ρ 13.09	Ta 73 Tantalum 180.948 L α 8.1462 M α 1.7096 ρ 16.60	W 74 Tungsten 183.85 L α 8.3977 M α 1.7744 ρ 19.30	Re 75 Rhenium 186.2 L α 8.6526 M α 1.8425 ρ 21.04	Os 76 Osmium 190.2 L α 8.9119 M α 1.9104 ρ 22.57	Ir 77 Iridium 192.22 L α 9.1752 M α 1.9779 ρ 22.50	Pt 78 Platinum 195.09 L α 9.4424 M α 2.0485 ρ 21.45	Au 79 Gold 196.967 L α 9.7135 M α 2.1205 ρ 19.32	Hg 80 Mercury 200.59 L α 9.9890 M α 2.1953 ρ 13.55	Tl 81 Thallium 204.37 L α 10.2687 M α 2.2683 ρ 11.85	Pb 82 Lead 207.19 L α 10.5517 M α 2.3426 ρ 11.36	Bi 83 Bismuth 208.980 L α 10.8390 M α 2.4197 ρ 9.80	Po 84 Polonium 210 L α 11.1309 ρ 9.32	At 85 Astatine 210 L α 11.4270 ρ 9.32	Rn 86 Radon 222 L α 11.7272 ρ 9.32						
7 Fr 87 Francium 223 L α 12.0315 ρ 5.00	Ra 88 Radium 226 L α 12.3999 ρ 5.00	Ac 89 Actinium 227 L α 12.6522 ρ 10.07																					

Relative X-ray intensities

K α = 100
K β = 20
L α = 100
L β = 70
L γ = 10

Key

Symbol: **Ru**

Atomic number: **44**

Atomic weight: **101.07**

Principal lines keV: K α **19.2365**, L α **2.5586**

Density ρ g/cm³: **12.20**

Energy to wavelength conversion

$$\text{Wavelength (\AA)} = 12.3983 \sqrt{\text{Energy (keV)}}$$

Ce 58 Cerium 140.12 L α 4.8403 M α 0.8831 ρ 6.77	Pr 59 Praseodymium 140.907 L α 5.0338 M α 0.9292 ρ 6.77	Nd 60 Neodymium 144.24 L α 5.2305 M α 0.9778 ρ 7.00	Pm 61 Promethium 145 K α 38.7253 M α 5.4326 ρ 7.20	Sm 62 Samarium 150.35 L α 5.6361 M α 1.0809 ρ 7.49	Eu 63 Europium 151.96 L α 5.8458 M α 1.1312 ρ 5.25	Gd 64 Gadolinium 157.25 L α 6.0574 M α 1.1853 ρ 7.86	Tb 65 Terbium 158.924 L α 6.2729 M α 1.2398 ρ 8.25	Dy 66 Dysprosium 162.50 L α 6.4953 M α 1.2928 ρ 8.55	Ho 67 Holmium 164.930 L α 6.7199 M α 1.3476 ρ 8.79	Er 68 Erbium 167.26 L α 6.9488 M α 1.4057 ρ 9.15	Tm 69 Thulium 168.934 L α 7.1799 M α 1.4621 ρ 9.31	Yb 70 Ytterbium 173.04 L α 7.4157 M α 1.5215 ρ 6.96	Lu 71 Lutetium 174.97 L α 7.6556 M α 1.5814 ρ 6.85
Th 90 Thorium 232.038 L α 12.9690 M α 2.9915 ρ 11.66	Pa 91 Protactinium 231 L α 13.2909 M α 3.0777 ρ 15.40	U 92 Uranium 238.03 L α 13.6130 M α 3.1653 ρ 19.07	Np 93 Neptunium 237 L α 13.9444 ρ 20.25	Pu 94 Plutonium 244 L α 14.2788 ρ 19.30	Am 95 Americium 243 L α 14.6174 ρ 13.67	Cm 96 Curium 247 L α 14.9544 ρ 13.51	Bk 97 Berkelium 247 L α 15.3065 ρ 14.08	Cf 98 Californium 251 L α 15.6544 ρ 14.08	Es 99 Einsteinium 254 L α 16.0100 ρ 14.08	Fm 100 Fermium 257 L α 16.3600 ρ 14.08	Md 101 Mendelevium 258 L α 16.7100 ρ 14.08	No 102 Nobelium 259 L α 17.0600 ρ 14.08	Lr 103 Lawrencium 260 L α 17.4100 ρ 14.08

L'altra faccia della medaglia: onde e radiazioni

Nella nostra esperienza quotidiana conosciamo due tipi di "oggetti" diversi:

Corpi dotati di massa

Onde (perturbazioni) che si propagano senza trasportare massa. Sono "energia in movimento"

Entrambi sono in grado di trasportare Energia cioè riescono a compiere lavoro

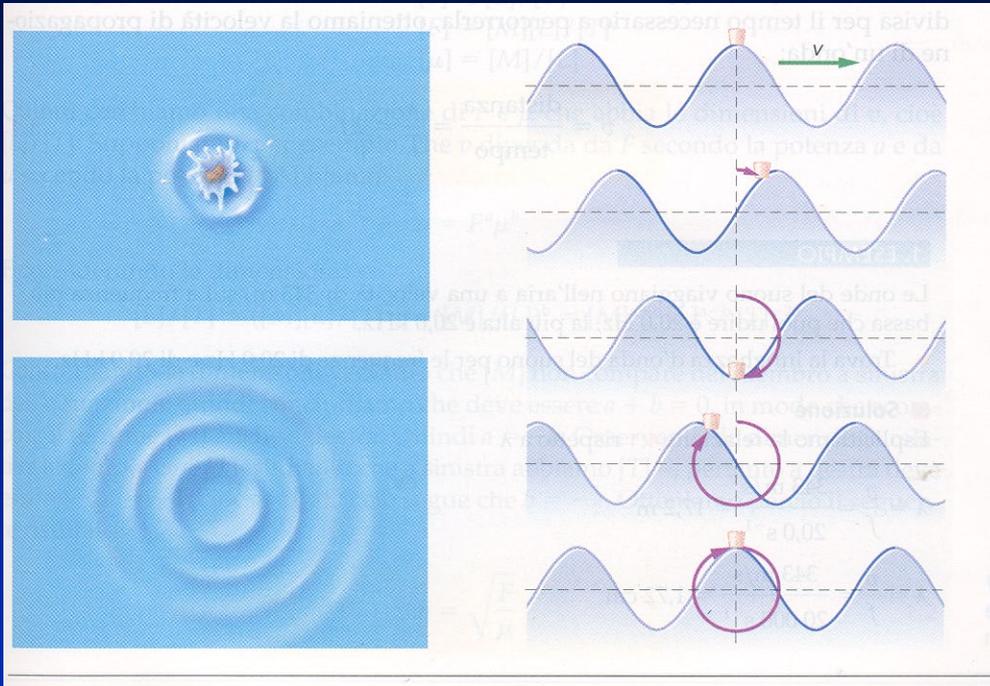
A Livello microscopico:

Corpi con massa \leftrightarrow particelle

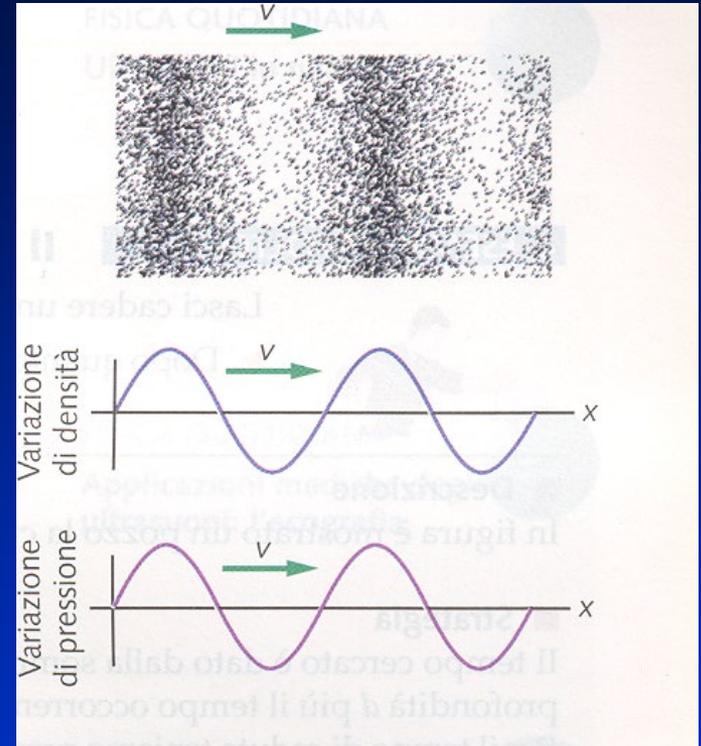
Onde \leftrightarrow radiazioni

Ma $E = mc^2$ cioè
due facce della
stessa medaglia

Le onde che conosciamo



Onde nell'acqua: la perturbazione si sposta ma, dopo il suo passaggio, ogni molecola nel liquido torna nella sua posizione iniziale



Onde acustiche: in un fluido (ad es. nell'aria) si propaga una perturbazione della pressione (cioè la densità dell'aria cambia al passaggio dell'onda)

Parametri caratteristici di un'onda



Velocità di propagazione: v = spazio percorso nell'unità di tempo

Periodo: tempo intercorso tra il passaggio di due massimi (o minimi); $T = \lambda/v$

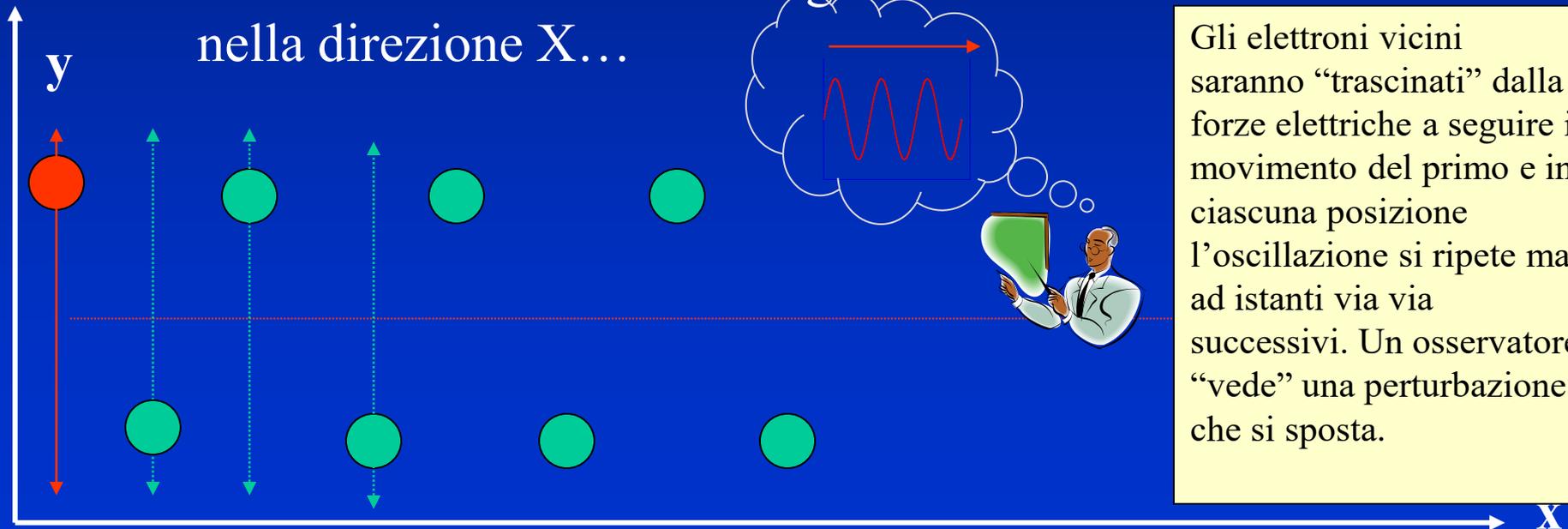
Frequenza: numero di passaggi nell'unità di tempo; $\nu = 1/T = v/\lambda$

Cosa trasporta un'onda?

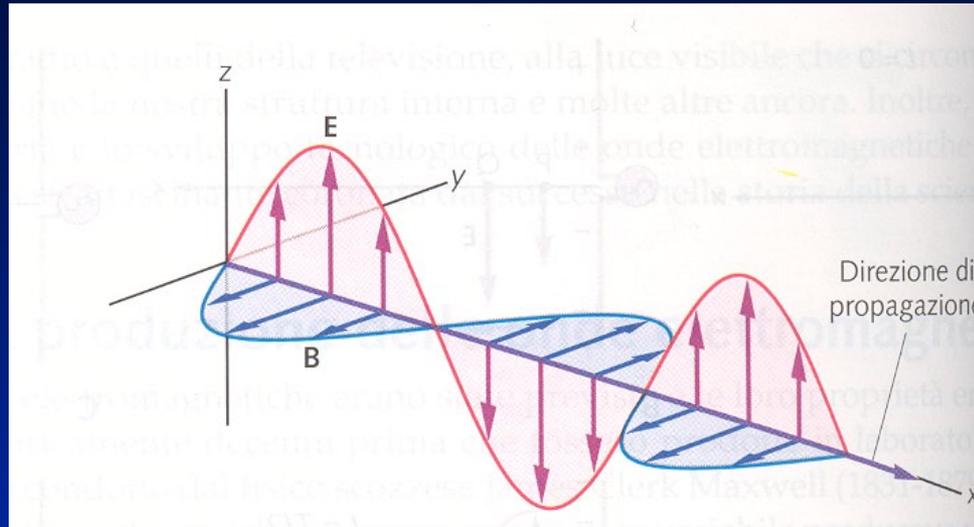
In effetti ogni onda trasmette ("sposta") energia (cioè capacità di compiere lavoro) senza trasportare materia. In altri termini un'onda è una perturbazione (cioè una variazione) dello stato di un sistema che si propaga nello spazio.

Se la perturbazione coinvolge campi (forze) elettrici e magnetici allora si parla di un'onda elettro-magnetica...

Esempio: Supponiamo che un elettrone venga fatto oscillare continuamente lungo Y ma senza muoversi nella direzione X...



Un po' più precisamente..



Le onde elettromagnetiche, indipendentemente dalla loro frequenza, si spostano nel VUOTO tutte con la stessa velocità:

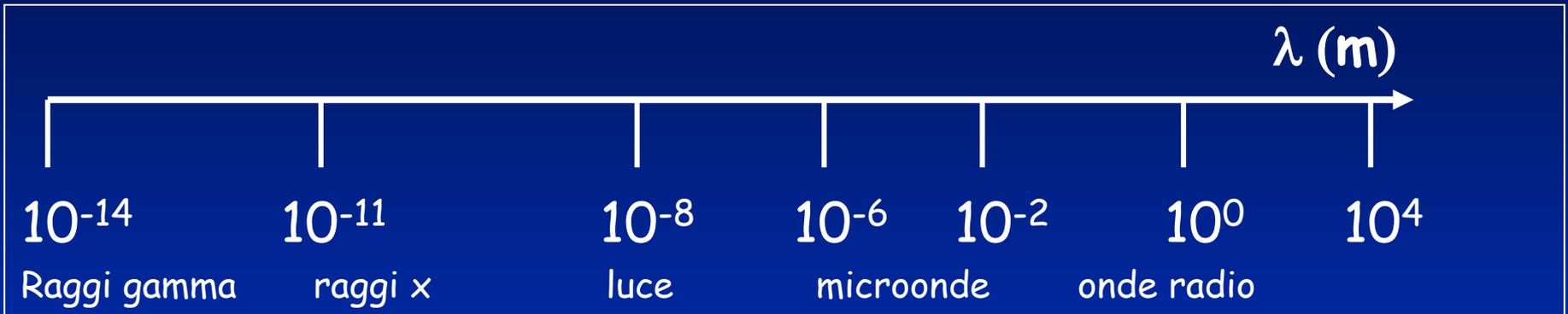
$$v_{o,e} = c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Secondo la teoria della relatività, finora mai smentita, c è la velocità massima che una radiazione od un corpo materiale possono assumere.

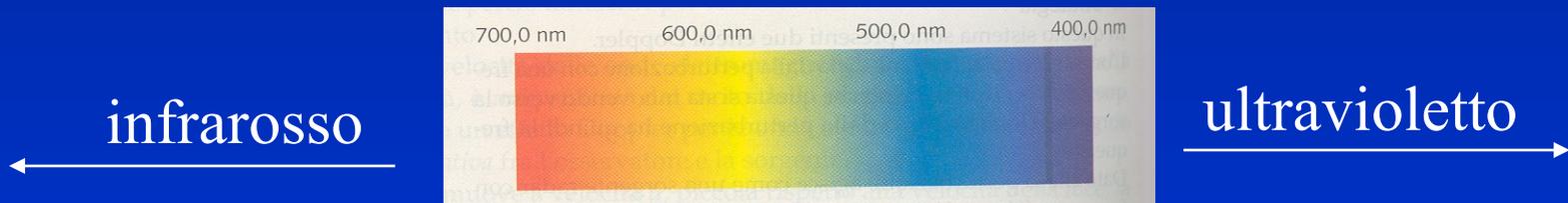
Nella materia $v_{o,e} < c$ e cambia con la densità (g/cm^3) del materiale. Ad esempio in acqua e/o vetro $v_{o,e} \approx 2/3 c$

Le onde (radiazioni) elettromagnetiche

Le onde e.m sono presenti in natura con un enorme variabilità nella lunghezza d'onda λ e, per motivi storico/pratici, vengono chiamate con nomi diversi



Il nostro occhio riesce a percepire solo la piccolissima porzione dello spettro compresa tra (circa) 700 e 400 nm (1 nm = 10^{-9} m)...quella che noi chiamiamo luce



Onde con λ molto piccola (ν molto grande) vengono chiamate "Raggi x" e "Raggi γ ", sono radiazioni con comportamento molto simile a quello delle particelle e si producono, rispettivamente, negli atomi e nei nuclei atomici

Il nucleo atomico: un territorio strano...

Per capire che si tratta di qualcosa di "strano" si può, ad esempio, calcolare la densità della materia nucleare:

$$\text{Densità} = \rho = M/V \quad (\rho_{\text{acqua}} = 1 \text{ g/cm}^3; \rho_{\text{oro}} = 19.32 \text{ g/cm}^3)$$

$$\text{Il nucleo di Au: Massa} \sim A M_{p/n} \sim 197 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \sim 3 \cdot 10^{-22} \text{ g}$$

$$\text{Volume} \sim \frac{4}{3}\pi R_{\text{Au}}^3 \sim \frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot (7.2 \cdot 10^{-13})^3 \sim 1.6 \cdot 10^{-36} \text{ cm}^3$$

Quindi: $\rho_{\text{nucleo}} \sim 3 \cdot 10^{-22} / 1.6 \cdot 10^{-36} \sim 2 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$

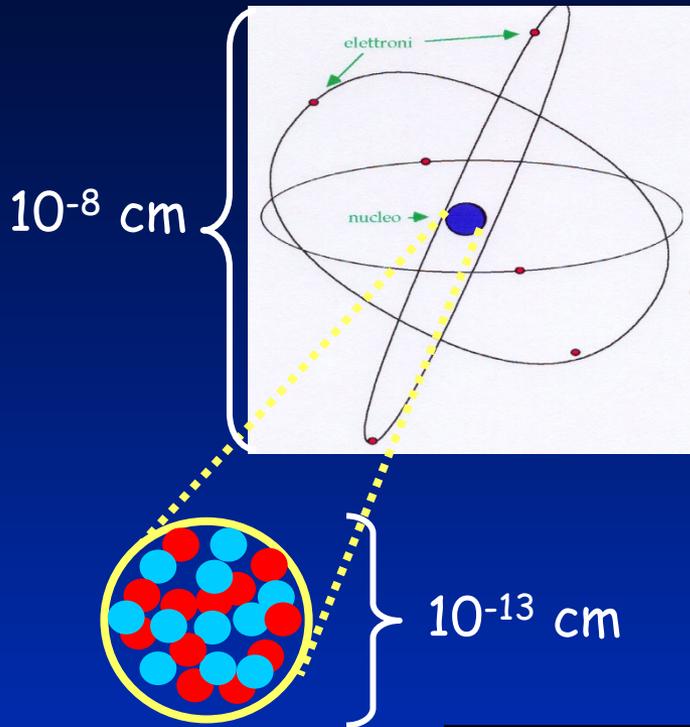
Un valore enorme !!!

Un calcolo più accurato fornisce un risultato molto simile e praticamente costante qualunque sia il nucleo considerato

Nota: $R(A) = R_0 A^{1/3}$ con $R_0 = 1.2 \text{ fm}$ e $A = \text{Peso Atomico}$

$V(A) \propto A - M(A) \propto A \longrightarrow \rho \text{ materia nucleare costante}$

Altre stranezze



Se $V(A) \propto A$ allora protoni e neutroni sostanzialmente si comportano come sfere incompressibili in contatto l'una all'altra \rightarrow evidentemente agisce una forza attrattiva molto piú intensa della repulsione coulombiana.

$$\alpha_F / \alpha_{em} \sim 100$$

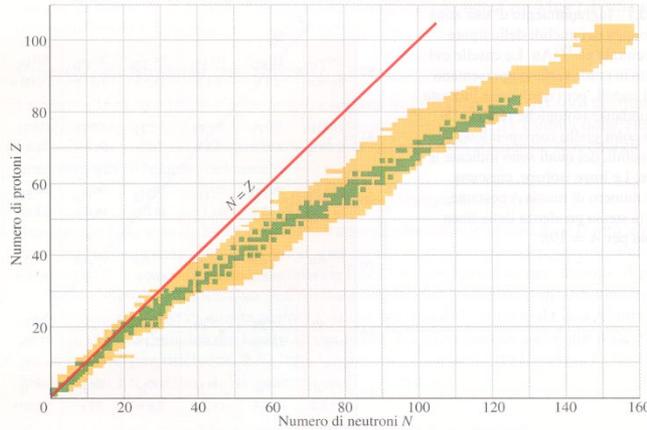
F_N solo di contatto

Intrinseca instabilità

Interazione	Mediatore	Magnitudine relativa	Andamento asintotico	Raggio d'azione
Interazione forte	gluone	10^{38}	r^0	$1.4 \cdot 10^{-15}$ m
Interazione elettromagnetica	fotone	10^{36}	$1/r^2$	∞
Interazione debole	Bosoni Z, W+ e W-	10^{25}	$e^{-Mr/r}$	10^{-18} m
Interazione gravitazionale	gravitone	10^0	$1/r^2$	∞

I nuclei presenti in natura

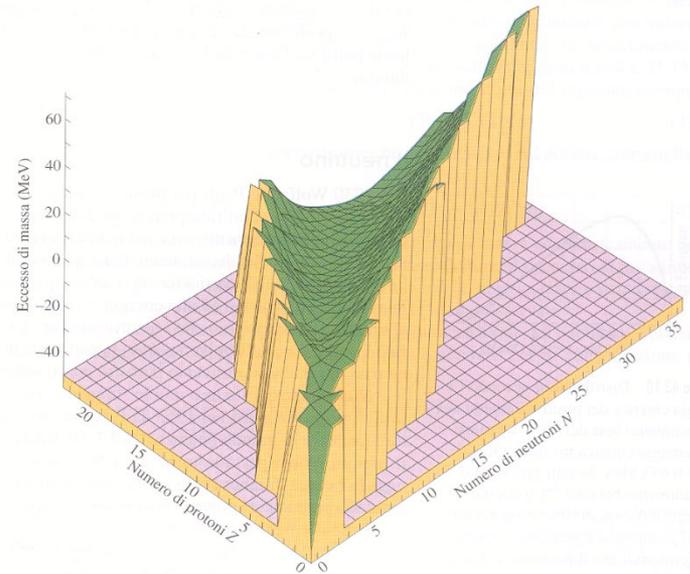
Figura 43.4 Diagramma dei nuclidi noti. Il colore verde identifica la fascia dei nuclidi stabili, mentre il color giallo corrisponde ai nuclidi radioattivi. I nuclidi stabili leggeri hanno praticamente ugual numero di protoni e neutroni, mentre i nuclidi pesanti hanno un eccesso di neutroni sempre più grande. Dal grafico risulta che non esistono nuclei stabili con $Z > 83$ (bismuto).

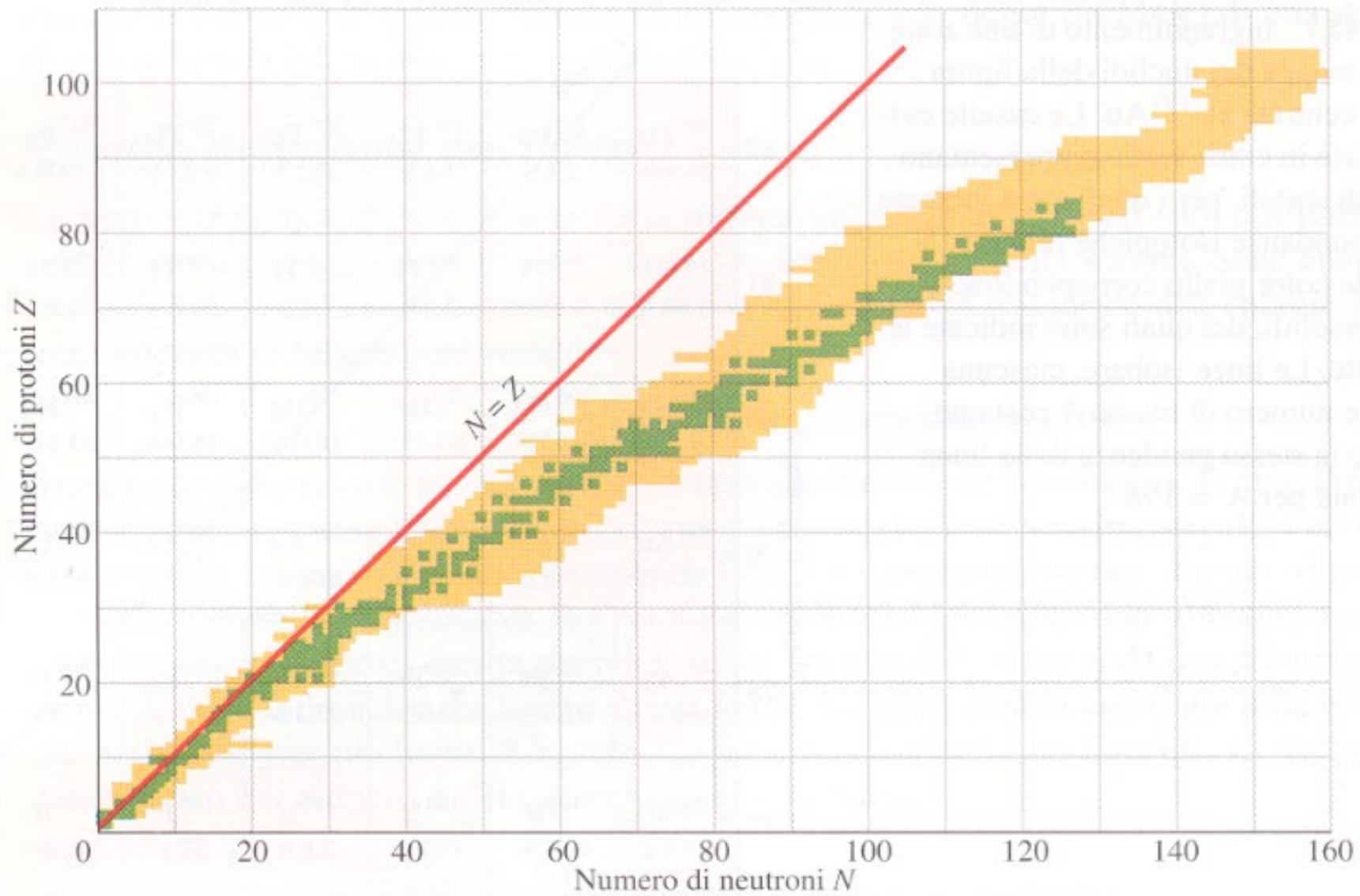


I nuclei in natura, stabili e instabili, mostrano un rapporto N/Z che cresce con $Z \rightarrow$ effetto della saturazione delle forze nucleari

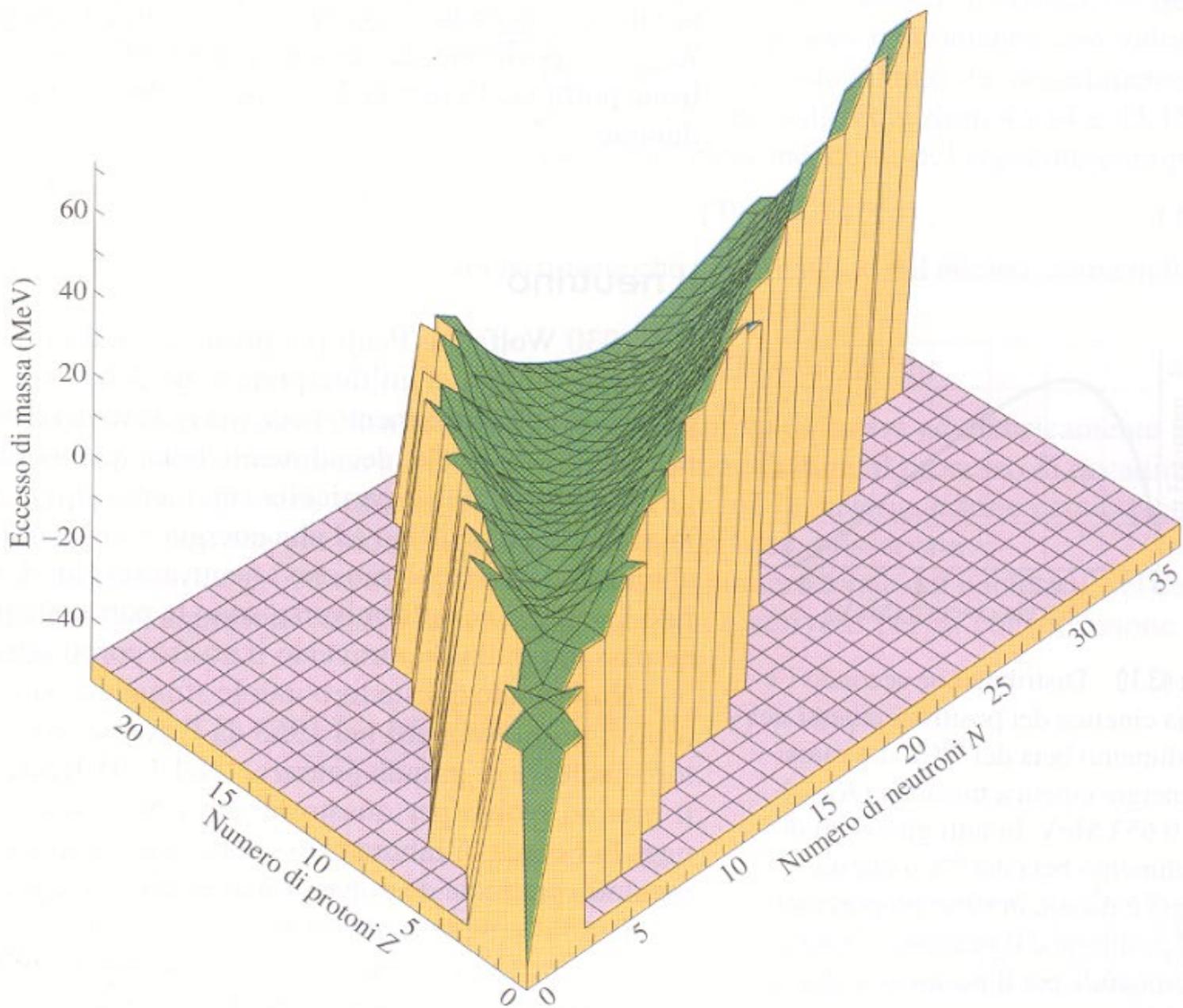
La carta dei nuclidi forma una "valle di stabilità" con al fondo gli isotopi più stabili.

Figura 43.12 Vista parziale, in prospettiva, della valle dei nuclidi, limitata ai nuclidi più leggeri. Il deuterio, il tritio e l'elio giacciono all'estremità più vicina del grafico, con l'elio nel punto più alto. La valle si estende allontanandosi dall'osservatore, ma qui il grafico si interrompe a $Z = 22$ e $N = 35$. I nuclidi con valori di A maggiori, che dovrebbero essere disegnati ben oltre la valle qui visibile, possono decadere nella valle per successive emissioni alfa e per fissione (spaccatura di un nuclide).





ale, in prospetti-
idi, limitata ai
leuterio, il tritio
stremità più
l'elio nel punto
ende allontanan-
na qui il grafico
2 e $N = 35$. I
maggiori, che
gnati ben oltre
ssono decadere
ve emissioni
ccatura di un



Radioattività

La radioattività é un fenomeno nucleare: un nucleo atomico instabile spontaneamente si frantuma per raggiungere una configurazione stabile (o più stabile). Il fenomeno é chiamato

Decadimento radioattivo

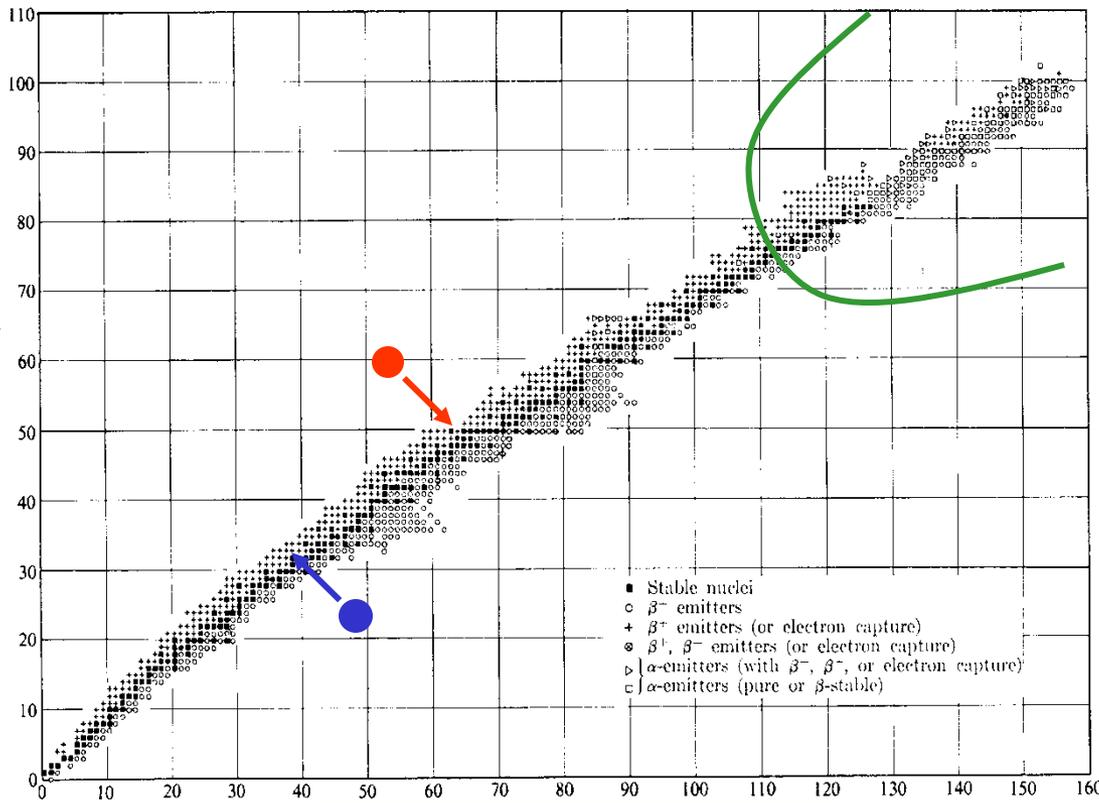
I tipi più comuni di decadimento sono:



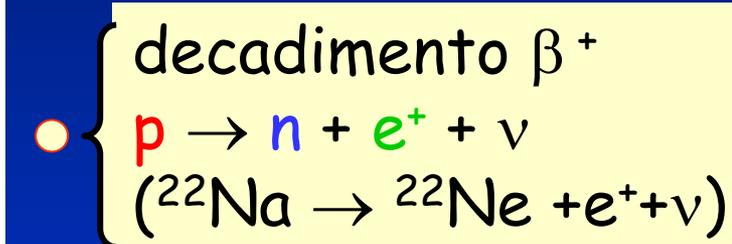
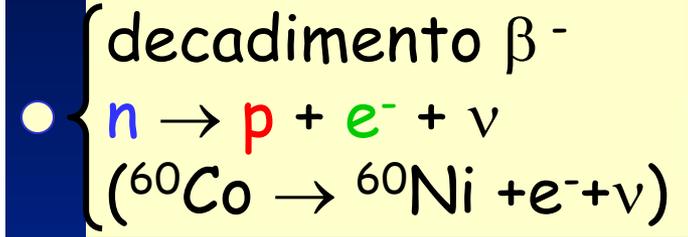
In un nucleo:
N = n. neutroni
Z = n. protoni
A = Z + N

Esempi

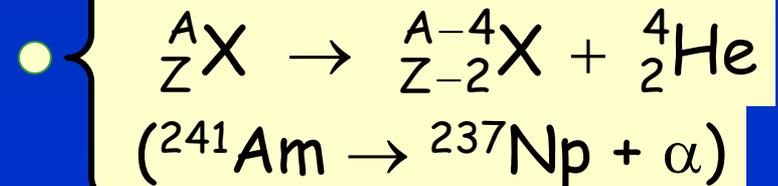
numero di protoni Z



numero di neutroni N



Decadimento α



La legge del decadimento radioattivo

Il decadimento radioattivo è un fenomeno nucleare spontaneo del singolo nucleo, indipendente dallo stato chimico-fisico del materiale ed ha un comportamento statistico: è possibile prevedere solo la probabilità di decadimento o, in altri termini, il numero medio di nuclei che decadono nell'unità di tempo:

$$dN(t) = -\lambda N(t)dt$$

λ = costante di decadimento caratteristica di ogni isotopo radioattivo

Risolvendo: $dN(t)/dt = -\lambda N(t) \rightarrow N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$

L'equazione consente di calcolare il numero di nuclei, $N(t)$, che, all'istante t , non sono ancora decaduti.

Attività e vita media

Attività = numero di decadimenti nell'unità di tempo

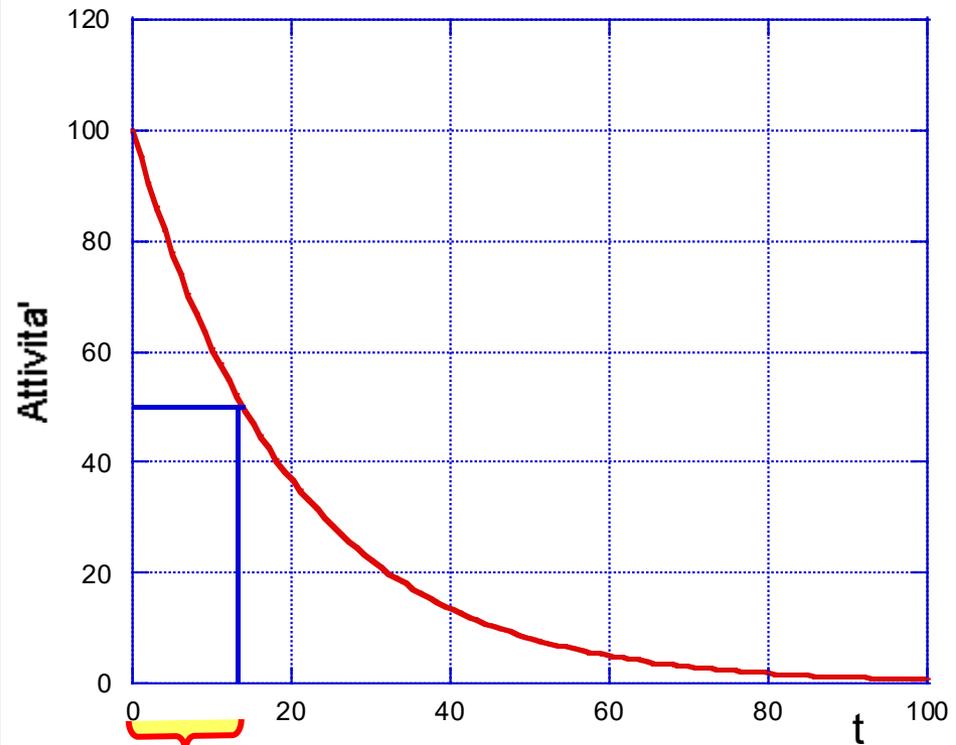
$$a(t) = \left| \frac{dN_p(t)}{dt} \right| = N_0 \lambda \cdot e^{-\lambda t} = N_p(t) \cdot \lambda$$

$$\tau = 1/\lambda$$

rappresenta la vita media

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

rappresenta il tempo di dimezzamento



Qualche passaggio in più

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

$$A(t) = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

quindi $A(0) = \lambda N(0)$ *da cui* $A(t) = A(0) e^{-\lambda t}$

*Si definisce **vita media***, $\tau = \frac{1}{\lambda}$; $[\tau] = \text{s}$

Invece il tempo di dimezzamento, $\tau_{1/2}$ è definito come:

$$\tau_{1/2} / A(\tau_{1/2}) = \frac{1}{2} A(0) = A(0) e^{-\frac{\tau_{1/2}}{\tau}} \rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\frac{\tau_{1/2}}{\tau}}$$

$$\text{da cui: } \ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\frac{\tau_{1/2}}{\tau}} = -\frac{\tau_{1/2}}{\tau} \rightarrow \tau_{1/2} = \tau \ln 2 = \mathbf{0.693 \tau}$$

Unità di misura

L'attività si misura in **Bequerel (Bq)**

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione/secondo}$$

Molto usata tutt'oggi la vecchia unità: il Curie (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ disintegrazioni/secondo}$$

(1 Ci \Leftrightarrow 1 g di Radio 226)

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

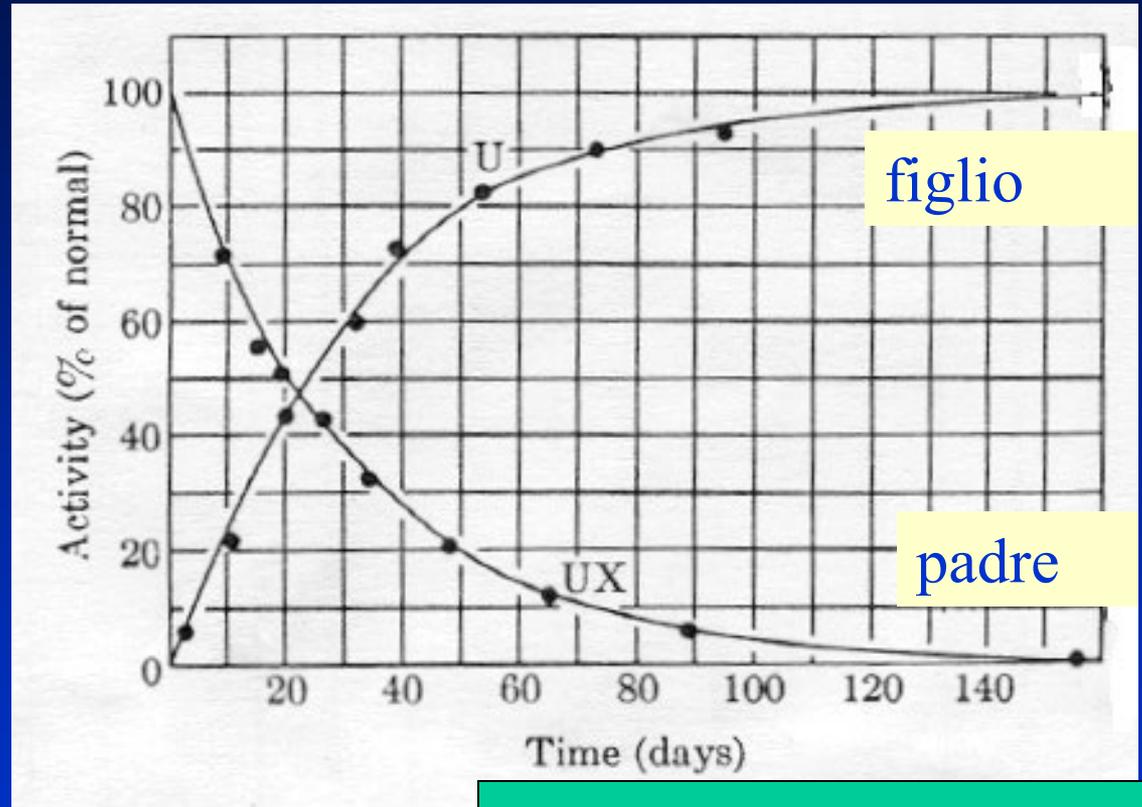
$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 37 \text{ kBq}$$

Catene radioattive

Il decadimento di un nucleo (“padre”) provoca la formazione di un nuovo nucleo (“figlio”), le abbondanze relative sono legate dalle equazioni:

$$N_p(t) = N_p(0)e^{-\lambda t}$$

$$N_f(t) = N_p(0)(1 - e^{-\lambda t})$$



Ma anche il nucleo “figlio” può essere radioattivo

In ogni istante ovviamente: $N_p + N_f = N_p(0)$

Famiglie radioattive

In generale si può pensare ad una sequenza di decadimenti che si conclude con la formazione di un nucleo stabile:



Famiglia
dell'Uranio

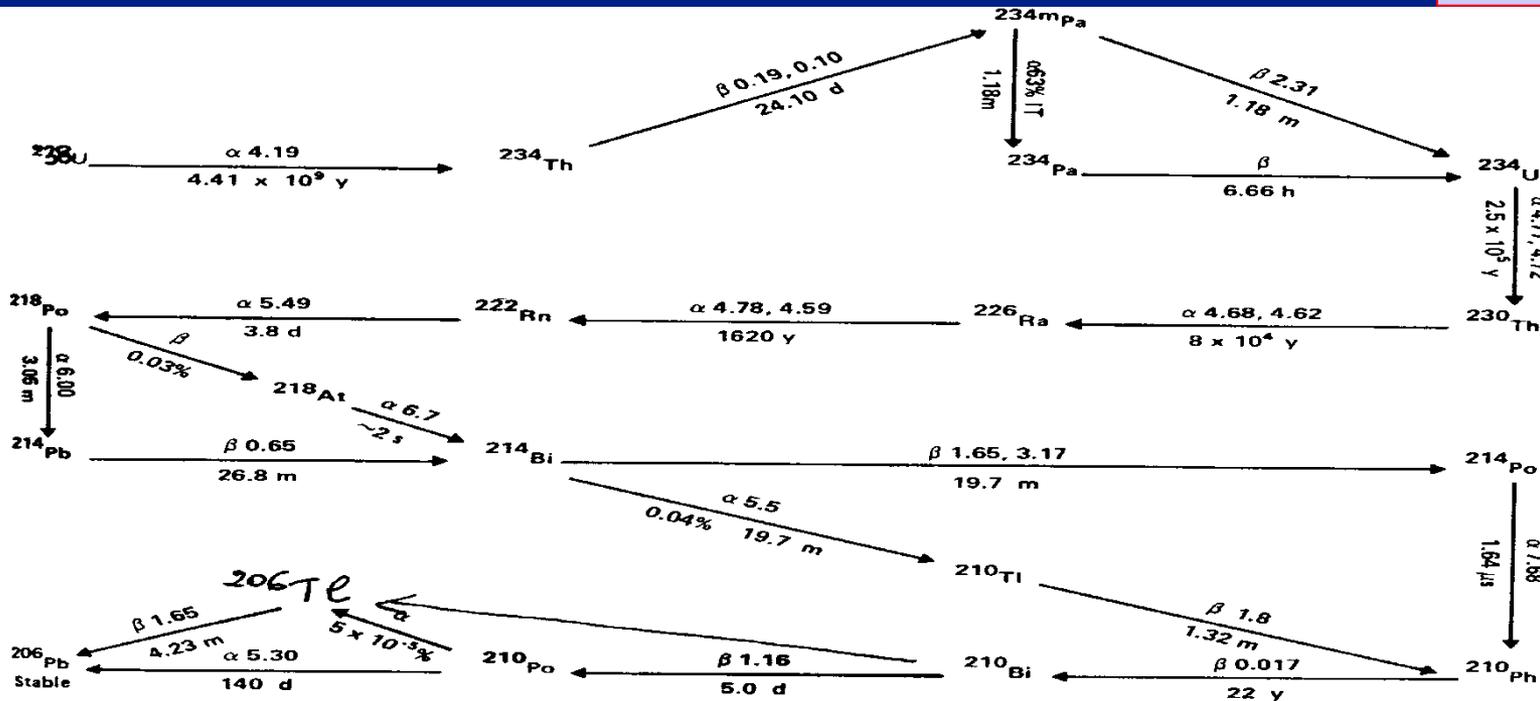
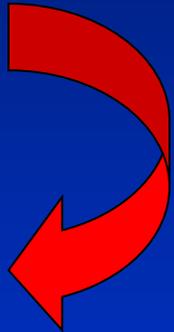


FIGURE A. 3.7.3. Uranium series decay scheme (α and β energies in MeV). (From Klement, A. W., Jr., *Radioactive Fallout, Soils, Plants, Foods, Man, Fowler, E. B., Ed., Elsevier, Amsterdam, 1965, 113. With permission.*)

Equilibrio secolare 1

Un caso importante e' quello in cui: $X1 \rightarrow X2 \rightarrow X3$ stabile.

In questo caso posso scrivere 3 equazioni:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1(t)$$

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

$$dN_3(t)/dt = \lambda_2 N_2(t)$$

Che hanno soluzione (se $N_2(0) = N_3(0) = 0$):

$$N_1(t) = N_1(0)e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = [\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)]N_1(0)[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

$$N_3(t) = N_1(0)\{1 + [\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)]e^{-\lambda_2 t} - [\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)]e^{-\lambda_1 t}\}$$

Equilibrio secolare 2

Se ora supponiamo che $\lambda_1 \ll \lambda_2$, possiamo semplificare:

$$N_2(t) \approx (\lambda_1/\lambda_2)N_1(0)e^{-\lambda_1 t} = \lambda_1/\lambda_2 N_1(t)$$

$$N_3(t) \approx N_1(0)[1 - e^{-\lambda_1 t}]$$

La relazione importante è la prima che dice: $A_1(t) = A_2(t)$ cioè che i due nuclei sono in Equilibrio secolare.

Il risultato è valido per una generica famiglia radioattiva:

se $\lambda_i \ll \lambda_{i+1}, \lambda_{i+2}, \dots, \lambda_{N-1}$ allora $A_i(t) = A_{i+1}(t) = \dots = A_{N-1}(t)$

Se l'i-esimo nucleo è il capostipite, allora tutta la famiglia è in equilibrio secolare e misurando l'attività di uno qualunque dei membri si conosce quella di tutti gli altri.

Esercizi

- 1) L'attività di una sorgente viene misurata due volte per un tempo di misura di 30 minuti a distanza di 24 ore. Si sono ricavati i valori: $C_1 = 15670$, $C_2 = 8965$. Calcolare il tempo di dimezzamento dell'isotopo.
- 2) Per misurare la vita media del ^{147}Sm si è usata una sorgente di 1.000 ± 0.001 g e sono stati misurati $A = 680 \pm 4$ decadimenti al secondo. Calcolare la vita media dell'isotopo.
- 3) Trovare la variazione oraria di massa di una sorgente di 38 MBq di ^{210}Po .



Il Decadimento alfa

Il decadimento alfa consiste nell'emissione, per effetto tunnel, di un nucleo di He (comunemente detto “**particella**” alfa per la sua elevata energia di legame) da un nucleo



La conservazione di energia e momento, nel caso di nucleo padre in riposo, consente di scrivere:

$$0 = \mathbf{p}_\alpha + \mathbf{p}_F$$

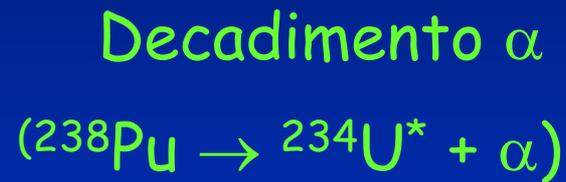
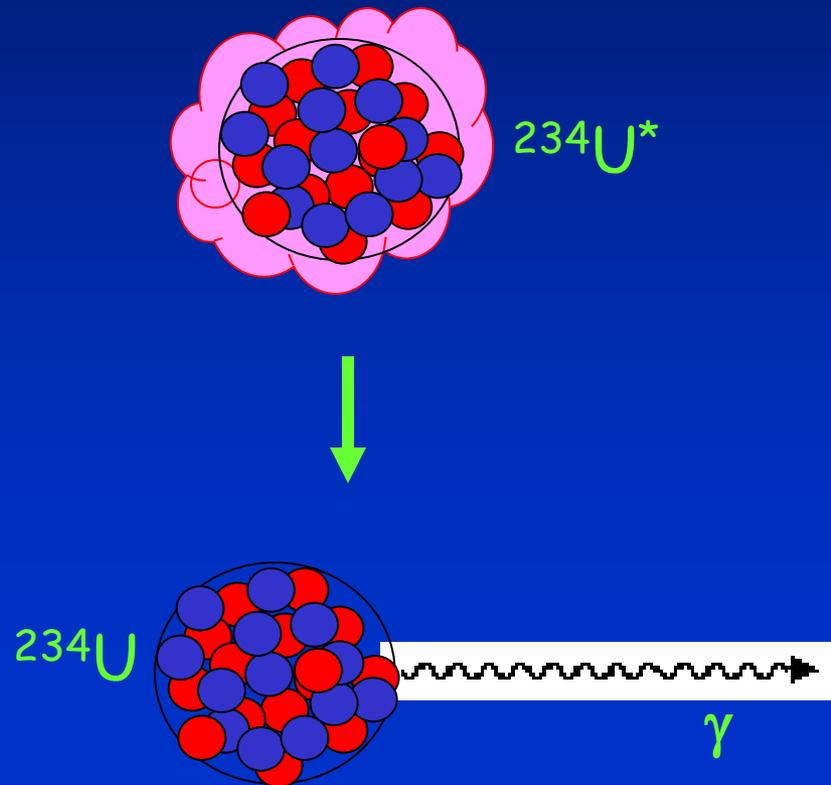
$$T_\alpha + T_F = \Delta E = M_i - M_f$$

Si calcola facilmente che: $T_\alpha = \Delta E [M_F / (M_F + M_\alpha)] \approx \Delta E$

Cioè sostanzialmente tutta l'energia liberata dal processo viene acquisita come energia cinetica dalla particella α che ha quindi spettro energetico discreto

Diseccitazione elettromagnetica

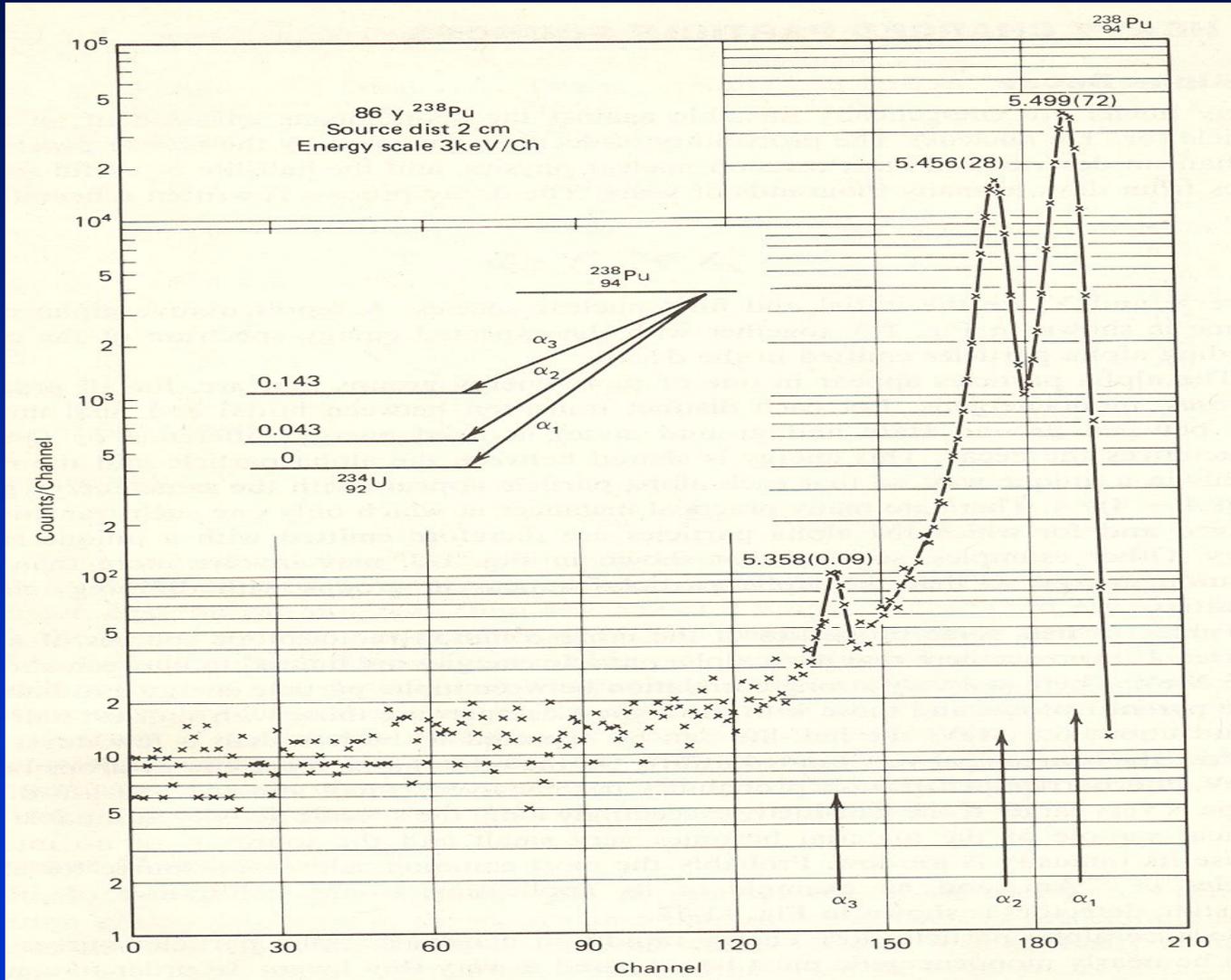
Talvolta il nucleo "figlio" viene creato in un stato eccitato, cioè con un surplus di energia. Il nucleo figlio allora si diseccita emettendo radiazione elettromagnetica (cioè un fotone o raggio gamma)



Emissione γ



Spettro α



Decadimenti α

Abbondanza relativa
di ogni α emessa

TABLE 1-3 Common Alpha-Emitting Radioisotope Sources

Source	Half-Life	Alpha Particle Kinetic Energy (with Uncertainty) in MeV		Percent Branching
¹⁴⁸ Gd	93 y	3.182787	± 0.000024	100
²³² Th	1.4 × 10 ¹⁰ y	4.012	± 0.005	77
		3.953	± 0.008	23
²³⁸ U	4.5 × 10 ⁹ y	4.196	± 0.004	77
		4.149	± 0.005	23
²³⁵ U	7.1 × 10 ⁸ y	4.598	± 0.002	4.6
		4.401	± 0.002	56
		4.374	± 0.002	6
		4.365	± 0.002	12
		4.219	± 0.002	6
²³⁶ U	2.4 × 10 ⁷ y	4.494	± 0.003	74
		4.445	± 0.005	26
²³⁰ Th	7.7 × 10 ⁴ y	4.6875	± 0.0015	76.3
		4.6210	± 0.0015	23.4
²³⁴ U	2.5 × 10 ⁵ y	4.7739	± 0.0009	72
		4.7220	± 0.0009	28
²³¹ Pa	3.2 × 10 ⁴ y	5.0590	± 0.0008	11
		5.0297	± 0.0008	20
		5.0141	± 0.0008	25.4
		4.9517	± 0.0008	22.8
²³⁹ Pu	2.4 × 10 ⁴ y	5.1554	± 0.0007	73.3
		5.1429	± 0.0008	15.1
		5.1046	± 0.0008	11.5
²⁴⁰ Pu	6.5 × 10 ³ y	5.16830	± 0.00015	76
		5.12382	± 0.00023	24
²⁴³ Am	7.4 × 10 ³ y	5.2754	± 0.0010	87.4
		5.2335	± 0.0010	11
²¹⁰ Po	138 d	5.30451	± 0.00007	99 +
²⁴¹ Am	433 d	5.48574	± 0.00012	85.2
		5.44298	± 0.00013	12.8
²³⁸ Pu	88 y	5.49921	± 0.00020	71.1
		5.4565	± 0.0004	28.7
²⁴⁴ Cm	18 y	5.80496	± 0.00005	76.4
		5.762835	± 0.000030	23.6
²⁴³ Cm	30 y	6.067	± 0.003	1.5
		5.992	± 0.002	5.7
		5.7847	± 0.0009	73.2
		5.7415	± 0.0009	11.5
²⁴² Cm	163 d	6.11292	± 0.00008	74
		6.06963	± 0.00012	26
^{254m} Es	276 d	6.4288	± 0.0015	93
²⁵³ Es	20.5 d	6.63273	± 0.00005	90
		6.5916	± 0.0002	6.6

Data from Rytz.³

In fisica nucleare
e quindi in radioattività,
si usa il sistema $c=1$

Massa ed energia hanno la
stessa unità di misura

$$(E = mc^2)$$

e l'unità
naturale è

l'elettronvolt (eV)

ed i suoi multipli

(keV, MeV)

Il Decadimento β

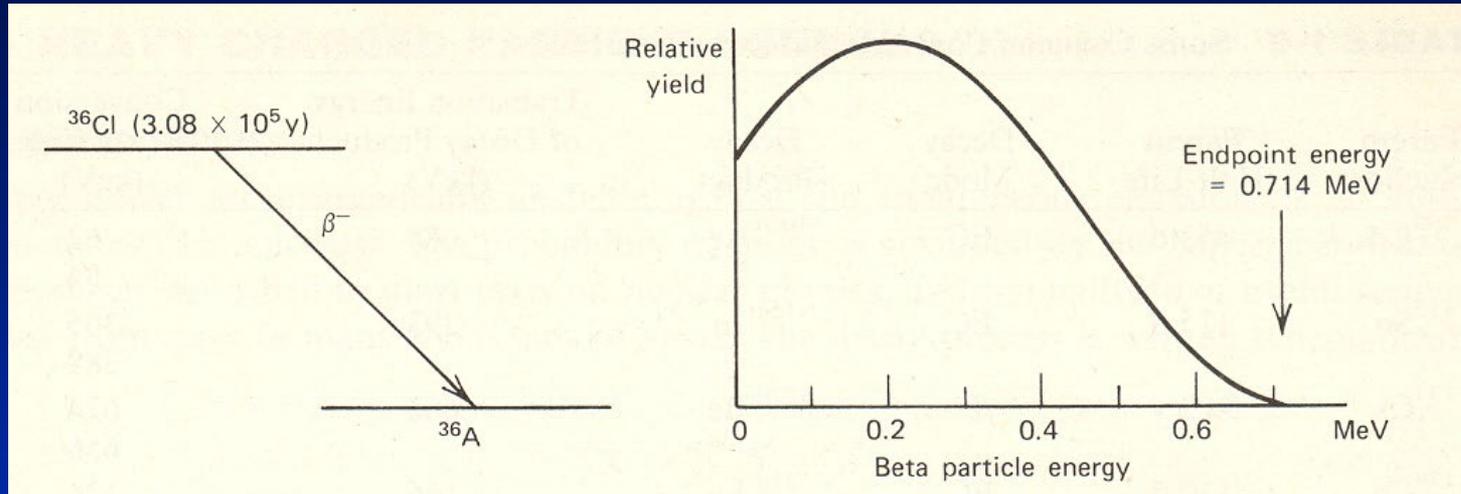
Nel decadimento beta (negativo o positivo) il nucleo emette un elettrone (o un positrone) accompagnato da un antineutrino (o un neutrino). Il processo in realtà consiste nel decadimento di un neutrone (*protone*) in un elettrone (*positrone*) + neutrone (*protone*) + antineutrino (*neutrino*).

Come per il decadimento α si possono scrivere le equazioni della conservazione del momento e dell'energia, il processo però in questo caso è a “ 3 corpi”, quindi:

$$M_i - M_f = \Delta E = T_F + T_\beta + T_\nu \quad \mathbf{p}_F + \mathbf{p}_\beta + \mathbf{p}_\nu = \mathbf{0}$$

L'energia liberata dal processo si distribuisce come energia cinetica di elettrone (positrone) e neutrino che sono molto più leggeri del nucleo figlio. **Entrambe le particelle possono essere emesse con un'energia compresa tra 0 e ΔE**

La forma dello spettro β



Gli elettroni emessi dai decadimenti beta hanno **spettro energetico continuo** con una forma che dipende da diversi parametri nucleari. Lo spettro presenta solitamente una forma a campana rovesciata e termina in corrispondenza dell'energia ΔE (“testa” o “**endpoint**” dello spettro) che ne rappresenta la caratteristica principale.

Decadimenti beta puri

Sono molto pochi i decadimenti β che “terminano” allo stato fondamentale del nucleo figlio e vengono chiamati “beta puri”.



Quasi sempre il nucleo figlio viene formato in uno stato eccitato e il decadimento β e' accompagnato da una diseccitazione γ (pronta o ritardata)

TABLE 1-1 Some “Pure” Beta-Minus Sources

Nuclide	Half-Life	Endpoint Energy (MeV)
^3H	12.26 y	0.0186
^{14}C	5730 y	0.156
^{32}P	14.28 d	1.710
^{33}P	24.4 d	0.248
^{35}S	87.9 d	0.167
^{36}Cl	3.08×10^5 y	0.714
^{45}Ca	165 d	0.252
^{63}Ni	92 y	0.067
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	27.7 y/64 h	0.546/2.27
^{99}Tc	2.12×10^5 y	0.292
^{147}Pm	2.62 y	0.224
^{204}Tl	3.81 y	0.766

Data from Lederer and Shirley.¹

Le energie dei γ emessi sono **sempre monocromatiche** e corrispondono ai salti energetici tra i livelli nucleari

Interazione radiazione - materia

Le particelle emesse nei decadimenti radioattivi appartengono alla categoria delle radiazioni ionizzanti termine con cui vengono comprese tutte le particelle, gli ioni e le radiazioni elettromagnetiche (X e γ) in grado di ionizzare un atomo.

Ionizzare un atomo significa strappare uno o più elettroni dalla loro orbita intorno al nucleo: l'atomo non è più "neutro" ma diventa carico positivamente e si chiama "ione". Il comportamento chimico dello ione è diverso da quello di un atomo neutro e questo altera il materiale (*ad es. una cellula*) di cui lo ione fa parte.

Ci sono modi diversi per ionizzare un atomo: in tutti i casi si tratta di "colpire" l'atomo con un proiettile, quello che cambia è la natura del proiettile (o, più correttamente, della radiazione)

"Zoologia" delle radiazioni ionizzanti

Le radiazioni in grado di ionizzare un atomo sono molte ma raggruppabili in tre categorie:

- 1) Particelle con carica elettrica (elettroni, protoni, ioni in genere)
- 2) Particelle senza carica elettrica (neutroni)
- 3) Radiazione elettromagnetica (raggi X, raggi gamma)

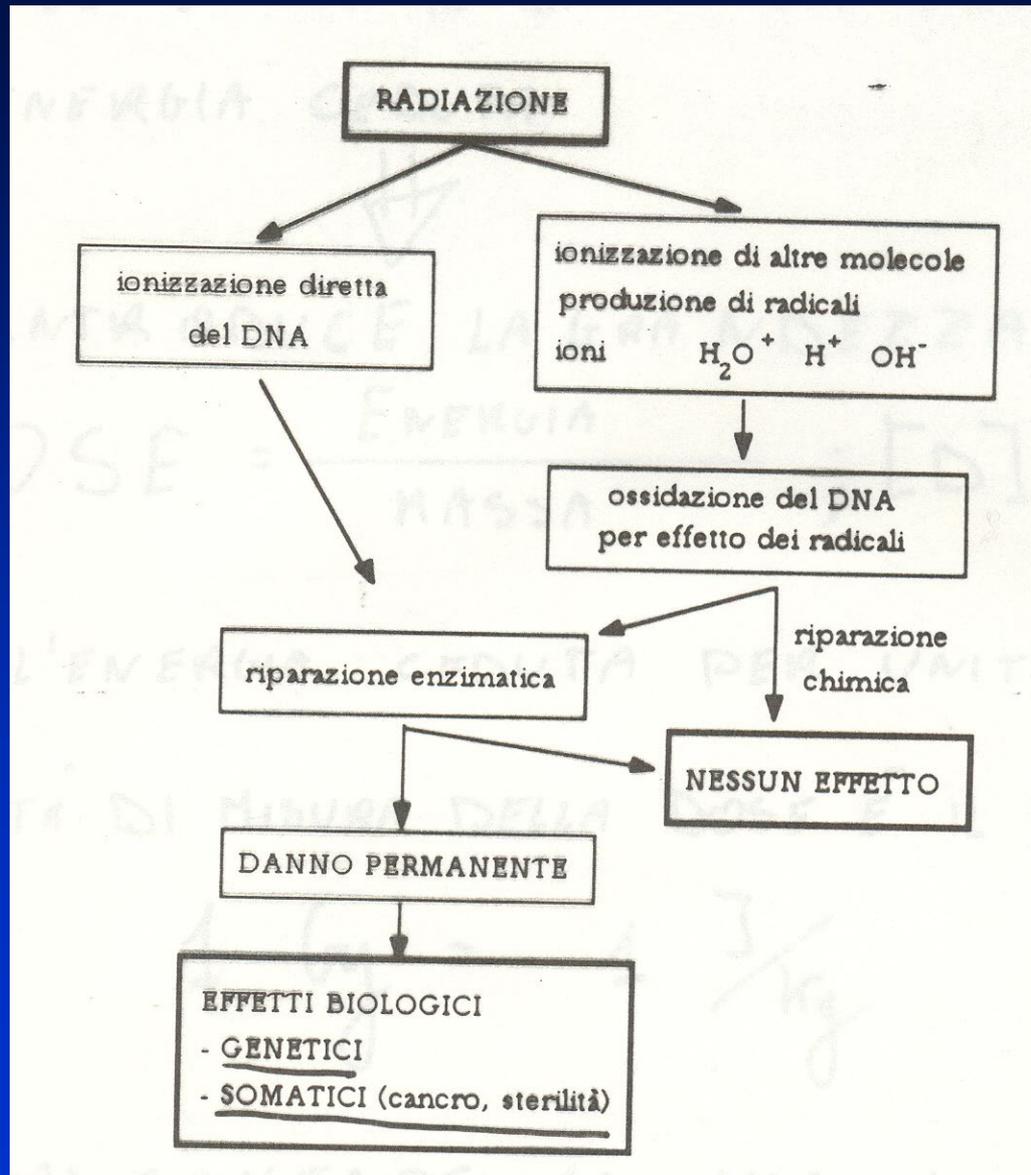
Per ciascuna categoria vanno studiati i diversi meccanismi di interazione con la materia (non discutiamo qui il caso dei neutroni)

Effetti biologici delle radiazioni

In tutti i casi discussi (e anche per i neutroni) l'interazione della radiazione (corpuscolare o elettromagnetica) provoca la ionizzazione di elettroni atomici che vengono “strappati” dagli atomi: a loro volta, dissipando la loro energia cinetica iniziale, questi ionizzano altri elettroni (detti secondari). Il passaggio della radiazione nella materia produce quindi un certo numero di ioni che, con un comportamento chimico alterato, modificano la struttura del materiale in cui si trovano. **Se il “materiale” è una cellula il suo funzionamento può essere compromesso fino alla sua eventuale distruzione.** Il danno subito dal materiale (biologico e non) a livello macroscopico dipende sostanzialmente da due fattori: **il numero di ioni prodotti e la loro densità spaziale**. Questi, a loro volta, dipendono dall'energia ceduta dalla radiazione incidente al materiale e dal meccanismo di interazione che concentra l'energia dissipata in volumi più o meno grandi.

In sostanza il danno è funzione del tipo di particella/radiazione e della sua energia cinetica  in una misura di radioattività ambientale queste sono le informazioni da ottenere.

Meccanismo del danno



La DOSE

Il danno biologico si identifica (in prima approssimazione) con una grandezza che si chiama

DOSE = D = energia dissipata da radiazioni ionizzanti per unità di massa

e si misura in Gray:

1Gray = 1 Gy = 1 Joule per chilogrammo.

In passato si usava un'unità di misura diversa (che molto spesso ancora compare su tabelle e strumenti) e cioè il rad: **1 rad = 0.01 Gy**

La dose equivalente

L'effetto dei diversi meccanismi di perdita di energia di radiazione diverse viene tenuto conto introducendo un fattore peso adimensionale, il **fattore di qualità(Q)** che moltiplica la dose e definisce una nuova grandezza:

$$\text{Dose Equivalente} = DE = D \times Q$$

e si misura in **Sievert**

1 Sv = 1 Joule per chilogrammo

Prima si usava, per misurare DE, il rem: **1 rem = 0.01 Sv.**

Il fattore di Qualità

3.1 Dosimetric Units

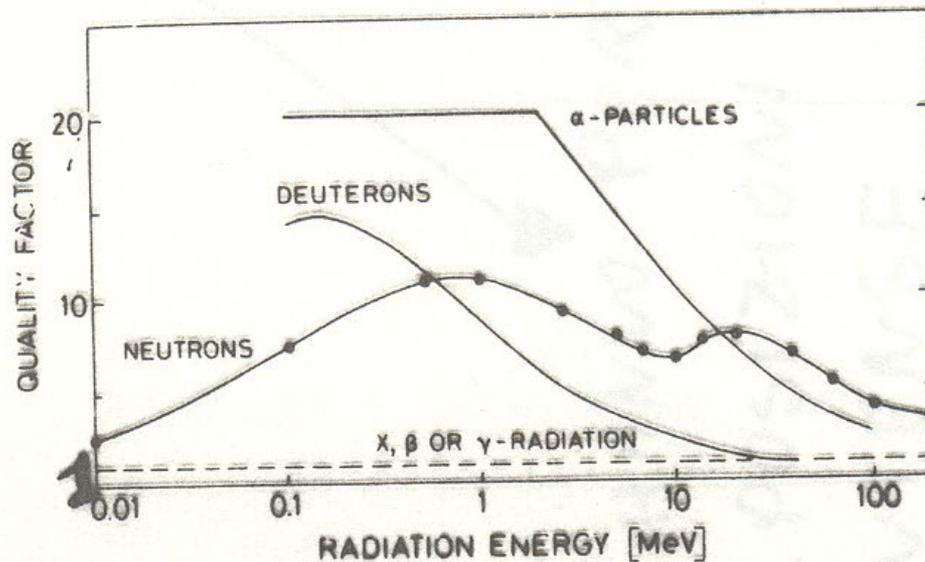
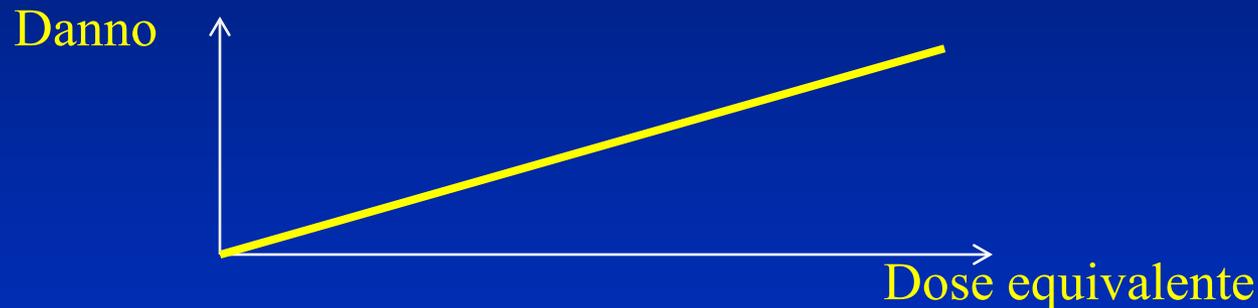


Fig. 3.1. Quality factor for different radiations as a function of energy (from Myers [3.2])

Attenzione: per raggi X, raggi gamma ed elettroni $Q=1$ quindi $DE=D$: Dose e Dose Equivalente coincidono. Invece Q è maggiore di 1 per neutroni (fino a 20), alfa, protoni e altri ioni

La dosimetria

Le conoscenze attuali portano a ritenere che il danno aumenti linearmente con l'intensità della radiazione che investe un organismo senza alcuna soglia minima:



Sono inoltre (abbastanza) noti i livelli di DE letali (> 2 Sv) e, nel caso di esposizioni prolungate a piccole dosi, le DE che consentono di mantenere il rischio di patologie gravi entro limiti ritenuti accettabili (sostanzialmente una probabilità di 10^{-4} e 10^{-6} eventi gravi per Sv rispettivamente per la popolazione e l'esposizione professionale)

Legislazione

La legge italiana (DLgs 101/20), tra le varie cose, fissa i limiti di DE che non devono essere superati:

Limiti di dose:

Popolazione: $DE < 1 \text{ mSv/anno}$

Categoria B: $DE < 6 \text{ mSv/anno}$

Lavoratori esposti

Categoria A: $DE < 100 \text{ mSv in 5 anni}$
 $DE < 20 \text{ mSv/anno}$

Per garantire il rispetto dei limiti, l'attività dei singoli isotopi nelle matrici ambientali (aria, acqua, piante, suolo) ed alimentari deve a sua volta essere contenuta entro valori (**limiti secondari e derivati**) calcolabili a partire dai limiti di dose e dalle specifiche condizioni di esposizione.

Sorgenti di radiazioni

sorgenti naturali (raggi cosmici, radionuclidi cosmogenici, radionuclidi primordiali);

sorgenti naturali modificate dalla tecnologia (materiale da costruzione, viaggi in aereo ad alta quota, combustione del carbon fossile, ecc.);

sorgenti di alcuni prodotti di consumo (orologi luminescenti, apparecchi televisivi, protesi dentarie, vetri per lenti, ecc.);

sorgenti impiegate in medicina (tubi a raggi X, acceleratori, radioisotopi per diagnostica, radiofarmaci, ecc.);

sorgenti di ricadute di bombe atomiche (fallout);

sorgenti associate con la produzione di energia nucleare (estrazione e ritrattamento del combustibile, rilasci delle centrali, ri-processamento del combustibile, rifiuti, incidenti ecc.);

sorgenti presenti sui luoghi di lavoro.

Nelle categorie sopra elencate si identificano radionuclidi che danno luogo ad irradiazione esterna ed altri che originano invece irradiazione interna.

Le serie radioattive naturali

Gli elementi radioattivi naturali sono quasi sempre membri di una delle tre catene o serie radioattiva seguenti:

- **serie del Torio** ($4n$; $n=58$)
- **serie dell'Uranio** ($4n+2$; $n=59$)
- **serie dell'Uranio** ($4n+3$; $n=58$)

Il numero di massa di ogni elemento della serie può essere espresso dalla formula che contraddistingue la serie con n intero variabile.

Manca la serie ($4n+1$) come serie radioattiva naturale, detta serie del Neptunio: infatti l'elemento a vita media più lunga di questa serie è il che ha un tempo di dimezzamento di $2.6 \cdot 10^6$ anni: poichè si ritiene che tutte questa serie radioattive si siano formate contemporaneamente all'atto della formazione della terra, cioè circa $5 \cdot 10^9$ anni fa, si comprende perchè sia ormai ampiamente estinto.

La serie dell'Uranio

THE URANIUM SERIES

Radioactive species	Nuclide	Type of disintegration	Half-life	Disintegration constant, sec ⁻¹	Particle energy, Mev
Uranium I (UI)	⁹² U ²³⁸	α	4.50 × 10 ⁹ y	4.88 × 10 ⁻¹⁸	4.20
Uranium X ₁ (UX ₁)	⁹⁰ Th ²³⁴	β	24.1 d	3.33 × 10 ⁻⁷	0.19
Uranium X ₂ (UX ₂)	⁹¹ Pa ²³⁴	β	1.18 m	9.77 × 10 ⁻³	2.32
Uranium Z (UZ)	⁹¹ Pa ²³⁴	β	6.7 h	2.88 × 10 ⁻⁵	1.13
Uranium II (UII)	⁹² U ²³⁴	α	2.50 × 10 ⁵ y	8.80 × 10 ⁻¹⁴	4.768
Ionium (Io)	⁹⁰ Th ²³⁰	α	8.0 × 10 ⁴ y	2.75 × 10 ⁻¹³	4.68 m
Radium (Ra)	⁸⁸ Ra ²²⁶	α	1620 y	1.36 × 10 ⁻¹¹	4.777 m
Ra Emanation (Rn)	⁸⁶ Em ²²²	α	3.82 d	2.10 × 10 ⁻⁶	5.486
Radium A (RaA)	⁸⁴ Po ²¹⁸	α, β	3.05 m	3.78 × 10 ⁻³	α: 5.998 β: ?
Radium B (RaB)	⁸² Pb ²¹⁴	β	26.8 m	4.31 × 10 ⁻⁴	0.7
Astatine-218 (At ²¹⁸)	⁸⁵ At ²¹⁸	α	1.5-2.0 s	0.4	6.63
Radium C (RaC)	⁸³ Bi ²¹⁴	α, β	19.7 m	5.86 × 10 ⁻⁴	α: 5.51 m β: 3.17
Radium C' (RaC')	⁸⁴ Po ²¹⁴	α	1.64 × 10 ⁻⁴ s	4.23 × 10 ³	7.683
Radium C'' (RaC'')	⁸¹ Tl ²¹⁰	β	1.32 m	8.75 × 10 ⁻⁴	1.9
Radium D (RaD)	⁸² Pb ²¹⁰	β	19.4 y	1.13 × 10 ⁻⁹	0.017
Radium E (RaE)	⁸³ Bi ²¹⁰	β	5.0 d	1.60 × 10 ⁻⁶	1.155
Radium F (RaF)	⁸⁴ Po ²¹⁰	α	138.3 d	5.80 × 10 ⁻⁸	5.300
Thallium-206 (Tl ²⁰⁶)	⁸¹ Tl ²⁰⁶	β	4.2 m	2.75 × 10 ⁻³	1.51
Radium G (RaG)	⁸² Pb ²⁰⁶	Stable			

²²²Rn:
gassoso

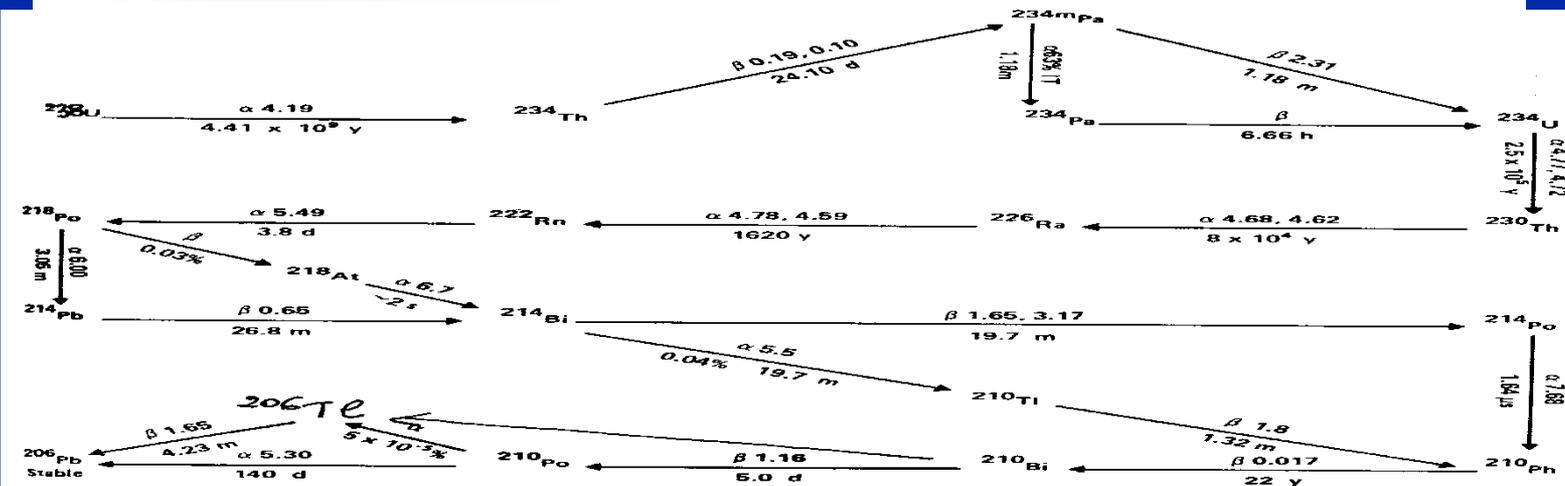
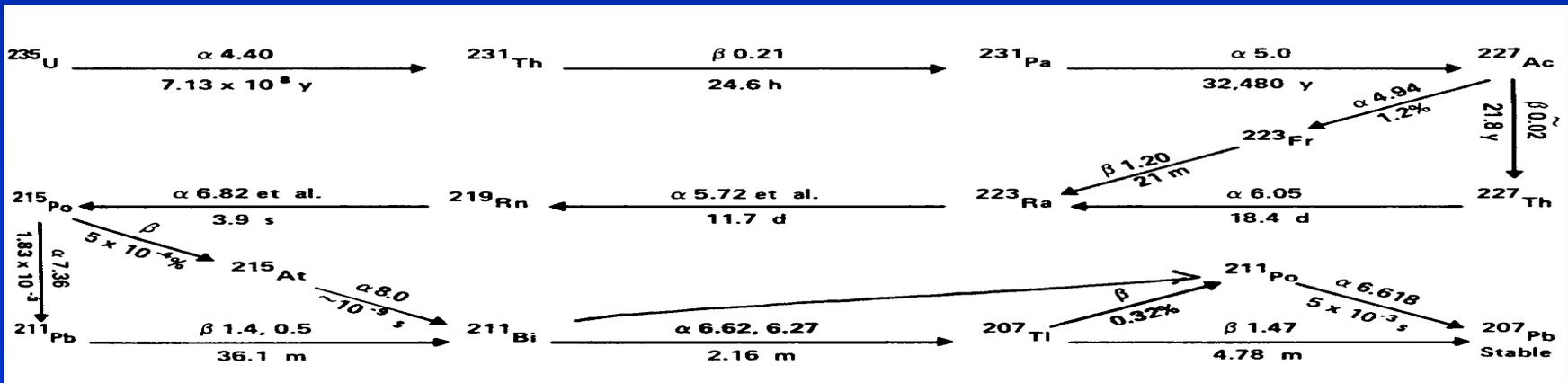


FIGURE A. 3.7.3. Uranium series decay scheme (α and β energies in MeV). (From Klement, A. W., Jr., *Radioactive Fallout, Soils, Plants, Foods, Man, Fowling*, E. B., Ed., Elsevier, Amsterdam, 1965, 113. With permission.)

La serie dell'Attinio

THE ACTINIUM SERIES

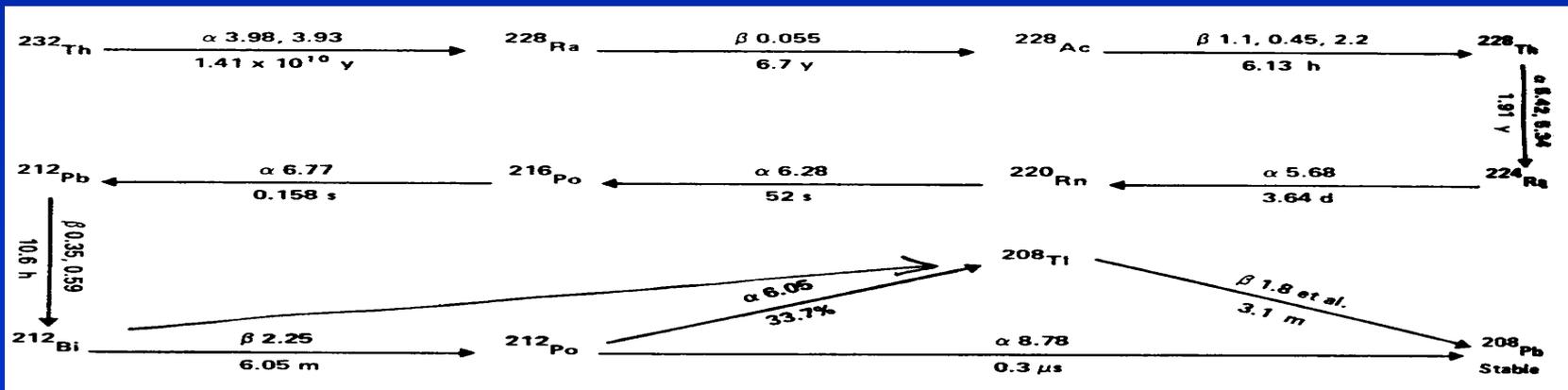
Radioactive species	Nuclide	Type of disintegration	Half-life	Disintegration constant, sec^{-1}	Particle energy, Mev
Actinouranium (AcU)	${}_{92}\text{U}^{235}$	α	$7.10 \times 10^8 \text{ y}$	3.09×10^{-17}	4.559 m
Uranium Y (UY)	${}_{90}\text{Th}^{231}$	β	25.6 h	7.51×10^{-6}	0.30
Protoactinium (Pa)	${}_{91}\text{Pa}^{231}$	α	$3.43 \times 10^4 \text{ y}$	6.40×10^{-13}	5.046 m
Actinium (Ac)	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	α, β	21.6 y	1.02×10^{-9}	$\alpha: 4.94$ $\beta: 0.046$
Radioactinium (RdAc)	${}_{90}\text{Th}^{227}$	α	18.17 d	4.41×10^{-7}	6.03 m
Actinium K (AcK)	${}_{87}\text{Fr}^{223}$	α, β	22 m	5.25×10^{-4}	$\beta: 1.2$ $\alpha: 5.34$
Actinium X (AcX)	${}_{88}\text{Ra}^{223}$	α	11.68 d	6.87×10^{-7}	5.864
Astatine-219	${}_{85}\text{At}^{219}$	α, β	0.9 m	1.26×10^{-2}	$\alpha: 6.27$
Ac Emanation (An)	${}_{86}\text{Em}^{219}$	α	3.92 s	0.177	6.810 m
Bismuth-215	${}_{83}\text{Bi}^{215}$	α, β^-	8 m	1.44×10^{-3}	?
Actinium A (AcA)	${}_{84}\text{Po}^{215}$	α, β^-	$1.83 \times 10^{-3} \text{ s}$	3.79×10^2	$\alpha: 7.37$
Actinium B (AcB)	${}_{82}\text{Pb}^{211}$	β	36.1 m	3.20×10^{-4}	1.39
Astatine-215	${}_{85}\text{At}^{215}$	α	10^{-4} s	7×10^2	8.00
Actinium C (AcC)	${}_{83}\text{Bi}^{211}$	α, β^-	2.15 m	5.28×10^{-3}	$\alpha: 6.617 \text{ m}$
Actinium C' (AcC')	${}_{84}\text{Po}^{211}$	α	0.52 s	1.33	7.442 m
Actinium C'' (AcC'')	${}_{81}\text{Tl}^{207}$	β	4.79 m	2.41×10^{-3}	1.44
Actinium D (AcD)	${}_{82}\text{Pb}^{207}$	Stable			



La serie del Torio

THE THORIUM SERIES

Radioactive species	Nuclide	Type of disintegration	Half-life	Disintegration constant, sec^{-1}	Particle energy, Mev
Thorium (Th)	${}_{90}\text{Th}^{232}$	α	1.39×10^{10} y	1.58×10^{-18}	4.007
Mesothorium1 (MsTh1)	${}_{88}\text{Ra}^{228}$	β	6.7 y	3.28×10^{-9}	0.04
Mesothorium2 (MsTh2)	${}_{80}\text{Ac}^{228}$	β	6.13 h	3.14×10^{-5}	2.18
Radiothorium (RdTh)	${}_{90}\text{Th}^{228}$	α	1.910 y	1.15×10^{-8}	5.423 m
Thorium X (ThX)	${}_{88}\text{Ra}^{224}$	α	3.64 d	2.20×10^{-6}	5.681 m
Th Emanation (Tn)	${}_{86}\text{Em}^{220}$	α	51.5 s	1.34×10^{-2}	6.280
Thorium A (ThA)	${}_{84}\text{Po}^{216}$	α, β	0.16 s	4.33	6.774
Thorium B (ThB)	${}_{82}\text{Pb}^{212}$	β	10.6 h	1.82×10^{-5}	0.58
Astatine-216 (At^{216})	${}_{85}\text{At}^{216}$	α	3×10^{-4} s	2.3×10^3	7.79
Thorium C (ThC)	${}_{83}\text{Bi}^{212}$	α, β	60.5 m	1.91×10^{-4}	α : 6.086 m β : 2.25
Thorium C' (ThC')	${}_{84}\text{Po}^{212}$	α	3.0×10^{-7} s	2.31×10^6	8.780
Thorium C'' (ThC'')	${}_{81}\text{Tl}^{208}$	β	3.10 m	3.73×10^{-3}	1.79
Thorium D (ThD)	${}_{82}\text{Pb}^{208}$	Stable			



Altri isotopi naturali con $\tau > 10^9$ y

TABLE 12—Non-series primordial radionuclides

Radionuclide	Half-Life	Isotopic Abundance	Elemental Abundance in Crustal Rock	Concentration in Crustal Rock
	(years)	(percent)	(ppm)	(pCV/g)
Potassium-40	1.26×10^9	0.0118	2.09×10^4	17
Vanadium-50	6×10^{16}	0.25	135	4×10^{-7}
Rubidium-87	4.8×10^{10}	27.85	90	2
Cadmium-113	$> 1.3 \times 10^{15}$	12.26	0.2	$< 6 \times 10^{-8}$
Indium-115	6×10^{14}	95.77	0.1	5×10^{-7}
Tellurium-123	1.2×10^{12}	0.87	0.002*	4×10^{-8}
Lanthanum-138	1.12×10^{11}	0.089	30	6×10^{-4}
Cerium-142	$> 5 \times 10^{10}$	11.07	60	$< 3 \times 10^{-7}$
Neodymium-144	1.4×10^{15}	23.87	28	7×10^{-8}
Samarium-147	1.05×10^{11}	15.07	6.0	0.02
Gadolinium-152	1.1×10^{14}	0.20	5.4	2×10^{-7}
Hafnium-174	2.0×10^{16}	0.163	3	5×10^{-9}
Lutecium-176	2.2×10^{10}	2.60	0.50	0.001
Rhenium-187	4.3×10^{10}	62.93	0.001*	3×10^{-8}
Platinum-190	6.9×10^{11}	0.0127	0.005*	2×10^{-9}
Platinum-192	1×10^{16}	0.78	0.005*	7×10^{-8}
Bismuth-209	$> 2 \times 10^{19}$	100	0.17	$< 1 \times 10^{-10}$

* Not given by Taylor (1964); value from Mason (1958).

dec β^- con

$E_\gamma = 1460$ keV

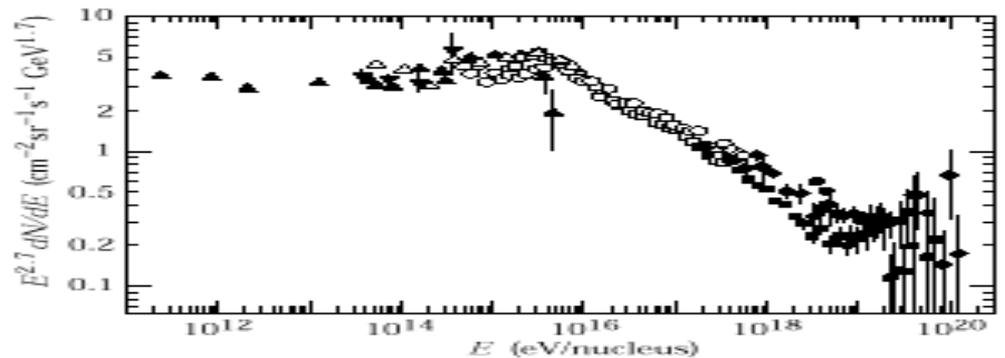
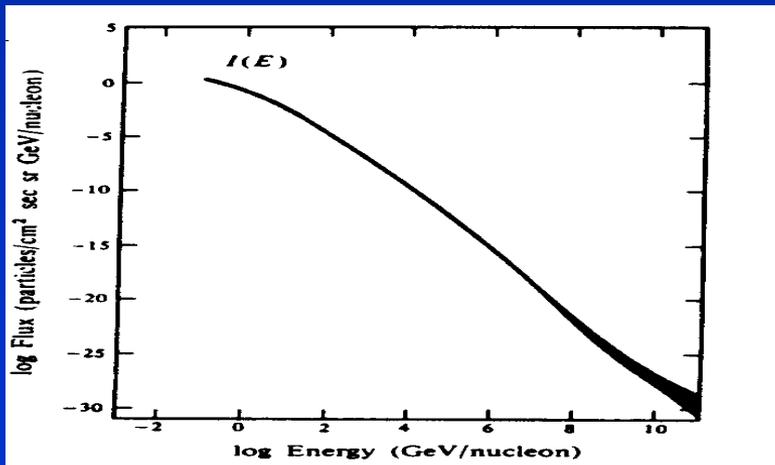
TABLE 13—Nuclides undergoing spontaneous fission as an alternative to decay α

Radionuclide	Half-Life for Decay	Half-Life for Spontaneous Fission
	(years)	(years)
Th-230	8.0×10^4	$\geq 1.5 \times 10^{17}$
Th-232	1.41×10^{10}	$> 1 \times 10^{21}$
Pa-231	3.25×10^4	1.1×10^{18} *
U-234	2.47×10^5	2×10^{16}
U-235	7.1×10^8	1.9×10^{17}
U-238	4.51×10^9	6.5×10^{15}

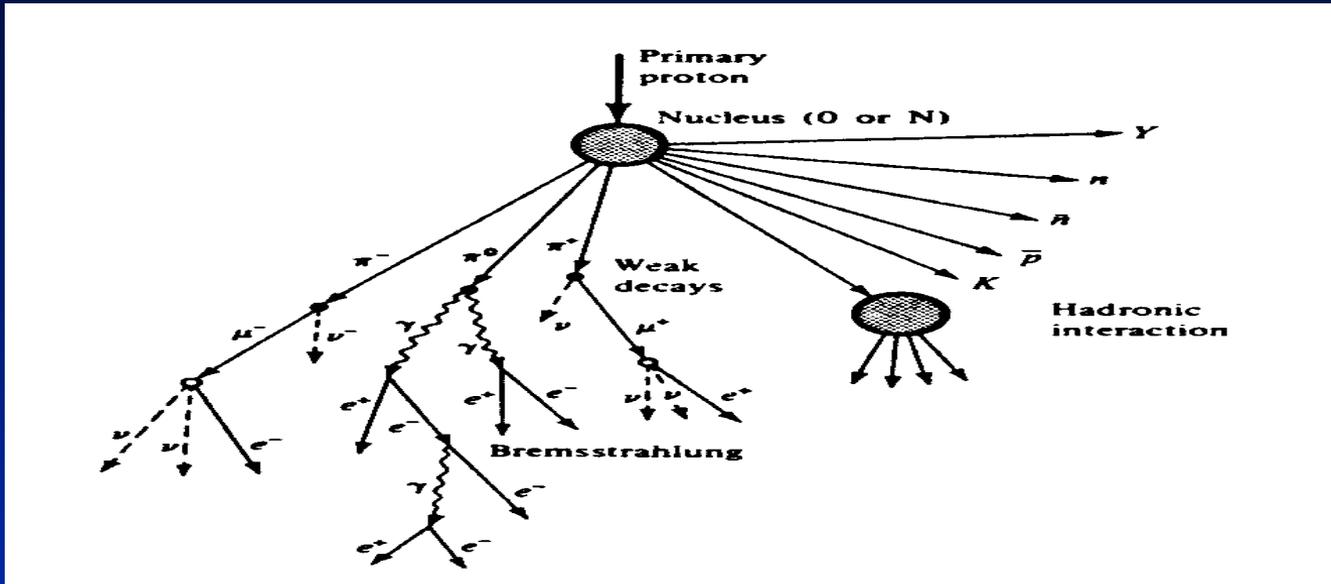
* Segrè (1952).

I raggi cosmici

Non è ancora certo se la maggior parte delle particelle che compongono i raggi cosmici abbia origine galattica o extra-galattica. In figura è riportato lo spettro della componente primaria di raggi cosmici misurato. L'energia più alta riportata in figura è pari a 10^{11} GeV (cioè 10^{20} eV, ossia 10 Joule !), ma sono stati osservati raggi cosmici con energia di 10^{12} e 10^{13} GeV. La potenza totale posseduta dai raggi cosmici nella nostra galassia è nell'ordine di 10^{49} erg/anno = 10^{52} GeV/anno (10^{35} Watt).

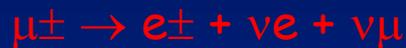


Raggi cosmici secondari



Un protone altamente energetico interagisce nell'atmosfera e genera secondari che a loro volta, interagiscono e generano altre particelle: si ha un processo a cascata. I pioni carichi hanno una elevata probabilità di colpire un nucleo e di generare altri pioni secondari. I pioni neutri, che hanno una vita media più corta ($\tau = 10^{-16}$ s, $\lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ cm), generalmente decadono in due γ : I γ producono cascate elettromagnetiche. I pioni carichi che non interagiscono con la materia decadono trasformandosi in altre particelle, "mesoni μ " o muoni con un tempo di dimezzamento pari a 10^{-8} sec: $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$ ($\tau = 10^{-8}$ s, $\lambda = 7.8$ m).

I μ non interagiscono con la materia nucleare, hanno una massa di 105.7 MeV ed un tempo di dimezzamento di 10^{-6} sec e $\lambda_1 \approx 700$ m): possono con buona probabilità attraversare l'atmosfera senza decadere, e se la loro energia è abbastanza grande non solo giungono sulla superficie terrestre, ma penetrano considerevolmente sotto la crosta terrestre. Il muone decadendo si trasforma in elettrone:



il decadimento avviene con più alta probabilità (anzi quasi esclusivamente) quando ha perso tutta la sua energia cinetica e si è arrestato. I μ sono al minimo di ionizzazione ($dE/dx \approx 2\text{MeV}/\text{cm}^2/\text{g}$)

TABLE 1—The composition of cosmic rays $(\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ near solar maximum at 64° North geomagnetic latitude in terms of flux density versus atmospheric depth

Atm. Depth (g/cm^2)	Altitude ^a (km)	Muons	Electrons	Protons	Charged Pions	Neutrons
20	26.7	2.11×10^{-3}	4.33	7.12×10^{-3}	1.74×10^{-3}	8.02
50	20.8	6.64×10^{-3}	5.07	6.30×10^{-3}	4.78×10^{-3}	1.09×10
100	16.3	1.01×10^{-1}	3.94	4.56×10^{-1}	6.88×10^{-3}	1.06×10
150	13.7	1.13×10^{-1}	2.74	3.21×10^{-1}	6.92×10^{-3}	7.91
200	11.9	1.11×10^{-1}	1.82	2.21×10^{-1}	5.93×10^{-3}	5.86
250	10.5	1.03×10^{-1}	1.19	1.49×10^{-1}	4.70×10^{-3}	4.19
300	9.31	9.34×10^{-2}	7.71×10^{-1}	1.00×10^{-1}	3.60×10^{-3}	2.94
350	8.26	8.33×10^{-2}	4.00×10^{-1}	6.67×10^{-2}	2.68×10^{-3}	2.04
400	7.33	7.16×10^{-2}	3.19×10^{-1}	4.40×10^{-2}	1.89×10^{-3}	1.38
450	6.50	6.31×10^{-2}	2.08×10^{-1}	2.90×10^{-2}	1.34×10^{-3}	9.33×10^{-1}
500	5.73	5.56×10^{-2}	1.36×10^{-1}	1.90×10^{-2}	9.46×10^{-4}	6.27×10^{-1}
550	5.02	4.92×10^{-2}	9.04×10^{-2}	1.24×10^{-2}	6.57×10^{-4}	4.18×10^{-1}
600	4.35	4.31×10^{-2}	5.89×10^{-2}	8.10×10^{-3}	4.46×10^{-4}	2.75×10^{-1}
650	3.75	3.84×10^{-2}	4.00×10^{-2}	6.23×10^{-3}	3.04×10^{-4}	1.81×10^{-1}
700	3.17	3.44×10^{-2}	2.77×10^{-2}	3.35×10^{-3}	2.05×10^{-4}	1.19×10^{-1}
750	2.62	3.10×10^{-2}	1.95×10^{-2}	2.13×10^{-3}	1.38×10^{-4}	7.72×10^{-2}
800	2.10	2.81×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.36×10^{-3}	9.22×10^{-5}	5.02×10^{-2}
850	1.62	2.56×10^{-2}	1.05×10^{-2}	8.67×10^{-4}	6.14×10^{-5}	3.25×10^{-2}
900	1.15	2.34×10^{-2}	8.07×10^{-3}	5.55×10^{-4}	4.07×10^{-5}	2.10×10^{-2}
950	0.71	2.15×10^{-2}	6.36×10^{-3}	3.56×10^{-4}	2.69×10^{-5}	1.35×10^{-2}
1033	0.00	1.90×10^{-2}	4.55×10^{-3}	1.71×10^{-4}	1.34×10^{-5}	6.46×10^{-3}

^a Mean altitude of given pressure level according to U. S. Standard Atmosphere



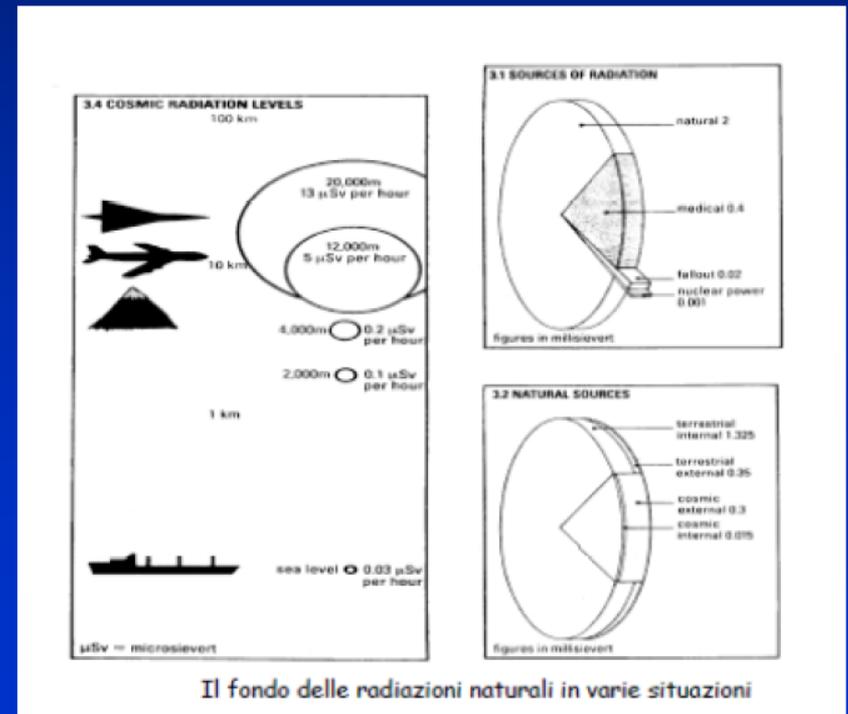
Sorgenti di radiazioni

La più importante fonte di esposizione per gli esseri umani è certamente il fondo naturale, il cui contributo medio (che varia comunque considerevolmente da luogo a luogo) vale **2.4 mSv/anno**.

La seconda sorgente di irradiazione della popolazione per ordine di importanza è costituita dalle applicazioni mediche (diagnostica e terapia). A parte le dosi ricevute dai pazienti sottoposti a radioterapia, un contributo notevole all'equivalente di dose globale deriva, specie nei paesi industrializzati, dalle pratiche radiografiche.

Tab. 8.1. Equivalenti annuali di dose efficace dovuti al fondo naturale nelle aree «normali» (dati tratti da UNSCEAR88).

Sorgente	Equivalente di dose efficace (mSv/anno)		
	Irradiazione esterna	Irradiazione interna	Totale
Raggi cosmici			
Componente dirett. ionizz.	0.30		0.30
Neutroni	0.055		0.055
Radionuclidi cosmogenici		0.015	0.015
Radionuclidi primordiali			
K-40	0.15	0.18	0.33
Rb-87		0.006	0.006
U-238 (serie)	0.10	1.24	1.34
Th-232 (serie)	0.16	0.18	0.34
TOTALE (arrotondato)	0.8	1.6	2.4



Sorgenti di radiazioni

Tab. 8.II. Dosi ricevute nei più comuni esami radiografici in vari organi protezionisticamente significativi, secondo calcoli per un fantoccio antropomorfo da 70 kg (dati tratti da ICPR82b).

Esame	Dose nell'organo (mGy)					Mammella
	Tiroide	Midollo osseo attivo	Polmone	Gonadi ♂ [*] ♀		
Torace	0.065	0.04 (0.03)	0.19 (0.20)	-	-	0.14
Cranio	2.22	0.31	0.02	-	-	-
Rachide cervicale	4.04	0.11	0.14	-	-	-
Costole	1.54	0.49 (0.42)	3.24 (2.96)	-	0.004	4.11
Spalla (una proiezione)	0.58	0.06	0.39 (0.27)	-	-	0.77
Rachide dorsale	0.75	0.43 (0.32)	2.63 (2.65)	-	0.006	2.76
Colecistogramma	0.01	0.66	1.76	-	0.06	-
Rachide lombare	0.003	1.26	1.33	0.07	4.05	-
Porzione sup. tratto G-I	0.07	1.17 (1.14)	5.32 (4.76)	0.004	0.45	0.53
Rene, uretere, vescica	-	0.48	0.12	0.16	2.12	-
Clisma	0.002	2.98	0.48	0.58	7.87	-
Rachide lombosacrale	-	2.24	0.35	0.43	6.40	-
Pielografia intravenosa	-	1.16	0.35	0.49	6.36	-
Bacino	-	0.27	0.011	0.57	1.48	-
Anca (una proiezione)	-	0.17	-	3.68	0.78	-
Rachide in toto (chiroprassi)	2.71	0.35	1.49 (1.17)	0.10	1.00	2.34
Mammografia						
(1) Xeroradiografia	-	(-)	(-)	-	-	7.66
(2) Pellicola-schermo	-	(-)	(-)	-	-	2.12

(-) Trascurabile rispetto agli altri organi.

I dati tra parentesi si riferiscono alla donna se diversi da quelli per l'uomo.

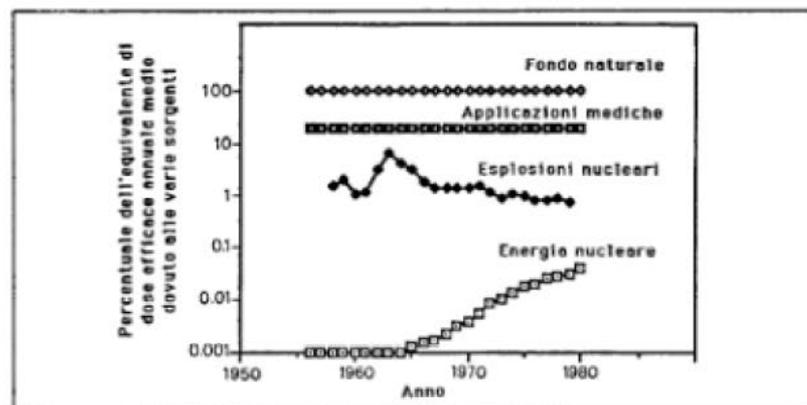


Figura 8.1. Andamento nel tempo dell'equivalente di dose efficace annuale dovuto alle più importanti sorgenti di radiazioni cui è esposta la popolazione mondiale avendo posto uguale a 100 l'esposizione media alle sorgenti naturali (sulla base dei dati UNSCEAR82).