

# Astrofisica Nucleare e Subnucleare

a.a. 2010/2011  
prof. M. Spurio

[maurizio.spurio@unibo.it](mailto:maurizio.spurio@unibo.it)

# Avvertenze...

Le seguenti trasparenze sono utilizzate durante la lezione. **NON** possono quindi essere considerate autoconsistenti, ma necessitano delle spiegazioni, e dei passaggi presentate durante la lezione (sulla tradizionale lavagna). Sono inoltre utili per aiutare lo studente a prendere appunti, per avere sottomano gli argomenti e le relazioni più importanti e per selezionare nel libro consigliato le parti svolte. La frequenza al corso, ancorchè non obbligatoria, è fortemente consigliata.

L'esame è orale. Una domanda verte su un argomento a scelta dello studente.

Iscriversi all'esame (le date sui consueti siti web) è obbligatorio entro 5 giorni dalla data di esame, inviando un mail a [maurizio.spurio@unibo.it](mailto:maurizio.spurio@unibo.it)

# Libro di Testo



•studio

•lettura

<b>1</b>	<b>Introduzione. Note storiche e concetti fondamentali</b> .....
1.1	Introduzione .....
1.2	Notizie storiche. La scoperta delle particelle elementari .....
1.3	Il concetto di atomo. Indivisibilità .....
1.4	Il Modello Standard del Microcosmo. Fermioni e Bosoni fondamentali .....
<b>2</b>	<b>Rivelazione e rivelatori di particelle</b> .....
2.1	Introduzione .....
2.2	Passaggio di particelle cariche nella materia .....
2.2.1	Perdita di energia per ionizzazione e per eccitazione .....
2.2.2	Calcolo "classico" della perdita di energia per ionizzazione .....
2.2.3	Bremsstrahlung (perdita di energia per radiazione) .....
2.3	Interazioni dei fotoni .....
2.3.1	Effetto fotoelettrico .....
2.3.2	Effetto Compton .....
2.3.3	Creazione (produzione) di coppie .....
2.4	Sciami elettromagnetici .....
2.5	Interazioni dei neutroni .....
2.6	Significato qualitativo di una misura di sezione d'urto totale .....
2.7	Tecniche di rivelazione di particelle .....
2.7.1	Caratteristiche generali .....
2.8	Rivelatori a ionizzazione .....
2.9	Contatori a scintillazione .....
2.10	Rivelatori a semiconduttore .....
2.11	Contatori di Čerenkov .....
2.12	La camera a bolle .....
2.13	Calorimetri elettromagnetici e adronici .....

<b>3</b>	<b>Acceleratori di particelle ed esempi di rivelazione</b> .....
3.1	Perchè è necessario utilizzare acceleratori .....
3.2	Acceleratori lineari e circolari .....
3.2.1	Acceleratori lineari .....
3.2.2	Acceleratori circolari .....
3.3	Colliders (o collisionatori) e luminosità .....
3.3.1	Esempio: il complesso di acceleratori del CERN .....
3.4	Conversione di energia in massa .....
3.4.1	Uso degli acceleratori con bersaglio fisso .....
3.4.2	Conservazione del numero Barionico .....
3.5	Produzione di particelle in un fascio secondario .....
3.5.1	Spettrometro a tempo di volo .....
3.6	Camere a bolle esposte a fasci di particelle cariche .....
3.6.1	Alcune leggi di conservazione all'opera .....
3.6.2	La "spirale" di un elettrone .....
3.6.3	Una coppia elettrone-positrone .....
3.6.4	Un "albero" di elettroni e positroni .....
3.6.5	Decadimenti di particelle cariche .....

<b>4</b>	<b>Il paradigma delle interazioni: il caso elettromagnetico</b> .....
4.1	L'interazione elettromagnetica .....
4.1.1	La costante di accoppiamento .....
4.1.2	La teoria quantistica dell'elettromagnetismo .....
4.2	Richiami di meccanica quantistica .....
4.2.1	Equazione di Schrödinger .....
4.2.2	Equazione di Klein-Gordon .....
4.2.3	Equazione di Dirac .....
4.3	Probabilità di transizione in teoria perturbativa .....
4.4	Il propagatore bosonico .....
4.5	Sezioni d'urto, vite medie: teoria ed esperimento .....
4.5.1	Sezione d'urto .....
4.5.2	Decadimento di particelle e vita media .....
4.6	I diagrammi di Feynman .....
4.7	Alcuni processi elettromagnetici .....
4.7.1	Scattering Rutherford da un centro diffusore .....
4.7.2	La reazione $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ .....
4.7.3	Diffusione elastica (scattering Bhabha) .....
4.7.4	Annichilazione $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ .....
4.8	Verifiche di QED .....

<b>5</b>	<b>Primo sguardo alle altre interazioni fondamentali</b> .....
5.1	Introduzione .....
5.2	L'interazione gravitazionale .....
5.3	L'interazione debole .....
5.4	L'interazione forte .....

5.5	Classificazione delle particelle .....
5.5.1	Classificazione secondo la <i>stabilità</i> .....
5.5.2	Classificazione secondo lo <i>spin</i> .....
5.5.3	Classificazione secondo il numero Barionico e Leptonico .....

<b>6</b>	<b>Principi di invarianza e di conservazione</b> .....
6.1	Introduzione .....
6.2	Richiami: principi di invarianza .....
6.2.1	Invarianza in meccanica classica .....
6.2.2	Invarianza in meccanica quantistica .....
6.2.3	Trasformazioni continue: traslazioni e rotazioni .....
6.3	Connessione spin-statistica .....
6.4	Parità .....
6.4.1	Conservazione e violazione della parità .....
6.5	Spin-parità del mesone $\pi$ .....
6.5.1	Parità particella-antiparticella .....

6.6	Comugazione di carica .....
6.6.1	Conservazione di <i>C</i> nei processi elettromagnetici .....
6.7	Inversione temporale .....
6.7.1	Reversibilità nei processi macroscopici .....
6.8	<i>CP</i> e <i>CPT</i> .....
6.9	Carica elettrica e invarianza di gauge .....

<b>7</b>	<b>Interazioni tra adroni a basse energie e il modello statico a quark</b> .....
7.1	Adroni e quark .....
7.1.1	Il modello di Yukawa .....
7.2	Simmetria protone-neutrone: lo spin isotopico .....
7.3	La sezione d'urto per le interazioni forti .....
7.3.1	Libero cammino medio .....
7.4	Collisioni adrone-adrone alle basse energie .....
7.4.1	Gli antibarioni .....
7.4.2	Le risonanze .....
7.5	Formula di Breit-Wigner per le risonanze .....
7.5.1	La risonanza $\Delta^{++}(1232)$ .....
7.5.2	Formazione e produzione di risonanze .....
7.6	Produzione e decadimento di particelle strane .....
7.7	Classificazione degli adroni composti dai quark <i>u, d, s</i> .....
7.8	Il decupletto barionico $J^P = 3/2^+$ .....
7.8.1	Le prime indicazioni per il numero quantico di colore ..
7.9	L'ottetto barionico $J^P = 1/2^+$ .....
7.10	I mesoni pseudoscalari .....
7.11	I mesoni vettoriali .....
7.12	Conservazione di stranezza e isospin .....
7.13	I sei quark .....

7.14	Alcune verifiche del modello statico a quark .....
7.14.1	Decadimenti leptonici dei mesoni vettoriali neutri .....
7.14.2	Produzione di coppie di leptoni .....
7.14.3	Rapporto tra sezioni d'urto totali adrone-adrone ad .....
7.14.4	Momenti magnetici dei barioni .....
7.14.5	Relazioni di massa .....
7.15	La ricerca dei quark liberi e limiti del modello statico .....

<b>8</b>	<b>Caratteristiche delle interazioni deboli e i neutrini</b> .....
8.1	Introduzione .....
8.2	L'ipotesi del neutrino e il decadimento beta .....
8.2.1	Il decadimento $\beta$ dei nuclei e l'energia mancante .....
8.2.2	Il disperato rimedio di Pauli .....
8.2.3	La storia del neutrino (e non solo) .....
8.3	La teoria di Fermi del decadimento $\beta$ .....
8.3.1	Il decadimento del neutrone .....
8.3.2	La costante di Fermi dal decadimento $\beta$ del neutrone ..
8.3.3	La costante $\alpha_W$ dalla teoria di Fermi .....
8.4	Universalità delle interazioni deboli .....
8.4.1	Vita media del muone .....
8.4.2	La regola di Sargent .....
8.4.3	Il triangolo di Puppi .....
8.5	La scoperta del neutrino elettronico .....
8.5.1	Il progetto Poltergeist .....
8.6	Tipi di transizione nel decadimento $\beta$ .....
8.6.1	La sezione d'urto del $\beta$ inverso dal modello di Fermi ...:
8.7	Famiglie di leptoni .....
8.7.1	Fasci di neutrini muonici ed esperimenti .....
8.8	Violazione della parità nel decadimento $\beta$ .....
8.9	La teoria a due componenti del neutrino .....
8.10	Il decadimento dei pioni carichi .....
8.11	Decadimenti delle particelle strane .....
8.12	Universalità dell'interazione debole (II). L'angolo di Cabibbo ..:
8.12.1	Misura dell'angolo di Cabibbo .....
8.13	Interazione debole a corrente neutra .....
8.14	Indicazioni teoriche per nuovi quark .....
8.14.1	Lo strano caso del decadimento dei <i>K</i> neutri .....
8.14.2	Indizi sul quarto quark dalle correnti neutre .....
8.14.3	I sei quark e la matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa .....
8.15	Produzione dei bosoni vettori $W^\pm$ e $Z^0$ .....
8.16	L'interazione V-A delle interazioni deboli .....

<b>9 Scoperte con collisioni positrone – elettrone</b>	.....
9.1 Introduzione	.....
9.2 La scoperta dei quark pesanti e del numero quantico di colore	.....
9.2.1 Sezione d'urto elettrone-positrone	.....
9.2.2 Mesoni con quark $b, \bar{b}$	.....
9.3 Spettroscopia dei mesoni pesanti e stima di $\alpha_S$	.....
9.3.1 Fisica atomica: analogia con $\alpha_{EM}$	.....
9.3.2 La costante di accoppiamento $\alpha_S$	.....
9.3.3 Il "charmonio"	.....
9.4 Il leptone $\tau$	.....
9.5 Esempi di rivelatori al LEP	.....
9.5.1 Eventi in rivelatori $4\pi$ al LEP	.....
9.6 Produzione di getti nella reazione $e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$	.....
9.7 Collisioni $e^+e^-$ a $E_{cm} \sim 91$ GeV. Il bosone $Z^0$	.....
9.8 Misure al LEP	.....
9.9 La costante di accoppiamento forte	.....
9.10 Collisioni $e^+e^-$ per $\sqrt{s} > 100$ GeV al LEP2	.....
9.10.1 Il vertice bosonico triplo	.....
9.10.2 Ricerche del bosone di Higgs	.....
<b>10 Interazioni ad alta energia ed il modello dinamico a quark</b>	.....
10.1 Introduzione	.....
10.2 Collisioni leptone–nucleone ad alta energia	.....
10.3 Diffusione elastica elettrone–protone	.....
10.3.1 Variabili cinematiche	.....
10.3.2 Diffusione alla Rutherford	.....
10.4 Sezione d'urto inelastica $ep$	.....
10.4.1 I partoni nei nucleoni: natura e spin	.....
10.4.2 Carica elettrica dei partoni	.....
10.5 Sezione d'urto per collisioni $\nu_\mu N$ a CC	.....
10.5.1 Confronto coi risultati sperimentali	.....
10.5.2 La sezione d'urto neutrino–nucleone	.....
10.6 Modello dinamico a quark "naive" ed "evoluto"	.....
10.6.1 Dipendenza da $Q^2$ delle funzioni di struttura	.....
10.6.2 Riepilogo dei risultati del DIS	.....
10.7 Collisioni adrone–adrone alle alte energie	.....
10.8 Sezioni d'urto elastiche e totali ad alta energia	.....
10.8.1 Sezioni d'urto differenziali elastiche	.....
10.8.2 Analisi dei risultati delle misure di $\sigma_{tot}$ e $(d\sigma/dt)_{elastico}$	.....
10.8.3 Misure di sezioni d'urto totali	.....
10.9 Collisioni adroniche inelastiche ad alta energia e a basso $p_t$	.....
10.9.1 Distribuzioni in molteplicità carica	.....
10.9.2 Cenni sulle collisioni nucleo–nucleo ad alte energie	.....

<b>11 Il Modello Standard del Microcosmo</b>	.....
11.1 Introduzione	.....
11.2 L'interazione debole	.....
11.2.1 Divergenze nelle WI e il problema dell'unitarietà	.....
11.3 Le teorie di gauge	.....
11.3.1 Scelta del gruppo di simmetria	.....
11.3.2 Invarianza di Gauge	.....
11.3.3 Densità di Lagrangiana della teoria elettrodebole	.....
11.3.4 Rottura spontanea della simmetria. Il meccanismo di Higgs.	.....
11.3.5 I leptoni nel Modello Standard	.....
11.3.6 I quark nel Modello Standard	.....
11.3.7 Le masse dei fermioni	.....
11.4 L'interazione elettrodebole	.....
11.4.1 I parametri dell'Interazione Elettrodebole	.....
11.4.2 Schermatura della carica elettrica in QED	.....
11.4.3 Diagrammi di Feynman di ordine superiore, infiniti e rinormalizzazione in QED	.....
11.5 L'interazione forte	.....
11.5.1 La Cromodinamica Quantistica (QCD)	.....
11.5.2 Schermatura della carica di colore in QCD	.....
11.5.3 Fattori di colore	.....
11.6 Il Modello Standard: Riepilogo	.....
<b>12 Violazione di CP e oscillazioni di particelle</b>	.....
12.1 Il problema dell'asimmetria materia-antimateria	.....
12.2 Il sistema $K^0 - \bar{K}^0$	.....
12.2.1 Sviluppo temporale di un fascio di $K^0$ . Rigenerazione di $K_1^0$ . Oscillazioni in stranezza	.....
12.3 Violazione di CP nel sistema $K^0 - \bar{K}^0$	.....
12.3.1 Il formalismo ed i parametri della violazione di CP	.....
12.3.2 Esperimenti recenti per la misura di $\epsilon'/\epsilon$	.....
12.4 A cosa è dovuta la violazione di CP	.....
12.5 Violazione di CP nel sistema $B^0 - \bar{B}^0$	.....
12.5.1 Misure di violazione di CP con $B^0 - \bar{B}^0$	.....
12.5.2 Prossimi esperimenti per violazione di CP	.....
12.6 Oscillazioni di neutrini	.....
12.6.1 Il caso particolare di oscillazione tra due sapori	.....
12.6.2 Oscillazioni tra tre sapori	.....
12.6.3 Oscillazioni di neutrini nella materia	.....
12.7 Neutrini dal sole e studi sulle oscillazioni	.....
12.8 Oscillazioni dei neutrini atmosferici ed esperimenti	.....
12.8.1 Esperimenti long baseline	.....
12.9 Conseguenze delle oscillazioni dei neutrini	.....

<b>13</b>	<b>Microcosmo e Macrocosmo</b> .....
13.1	La Grande Unificazione .....
13.1.1	Decadimento del protone .....
13.1.2	Monopoli magnetici.....
13.1.3	Cosmologia. Primi attimi dell'universo.....
13.2	Supersimmetria (SUSY) .....
13.3	Supergravità. SUGRA. Supercorde .....
13.4	Modelli composti (compositi) .....
13.5	Particelle, Astrofisica e Cosmologia .....
13.6	La materia oscura .....
13.7	Il Big Bang e l'universo primordiale.....

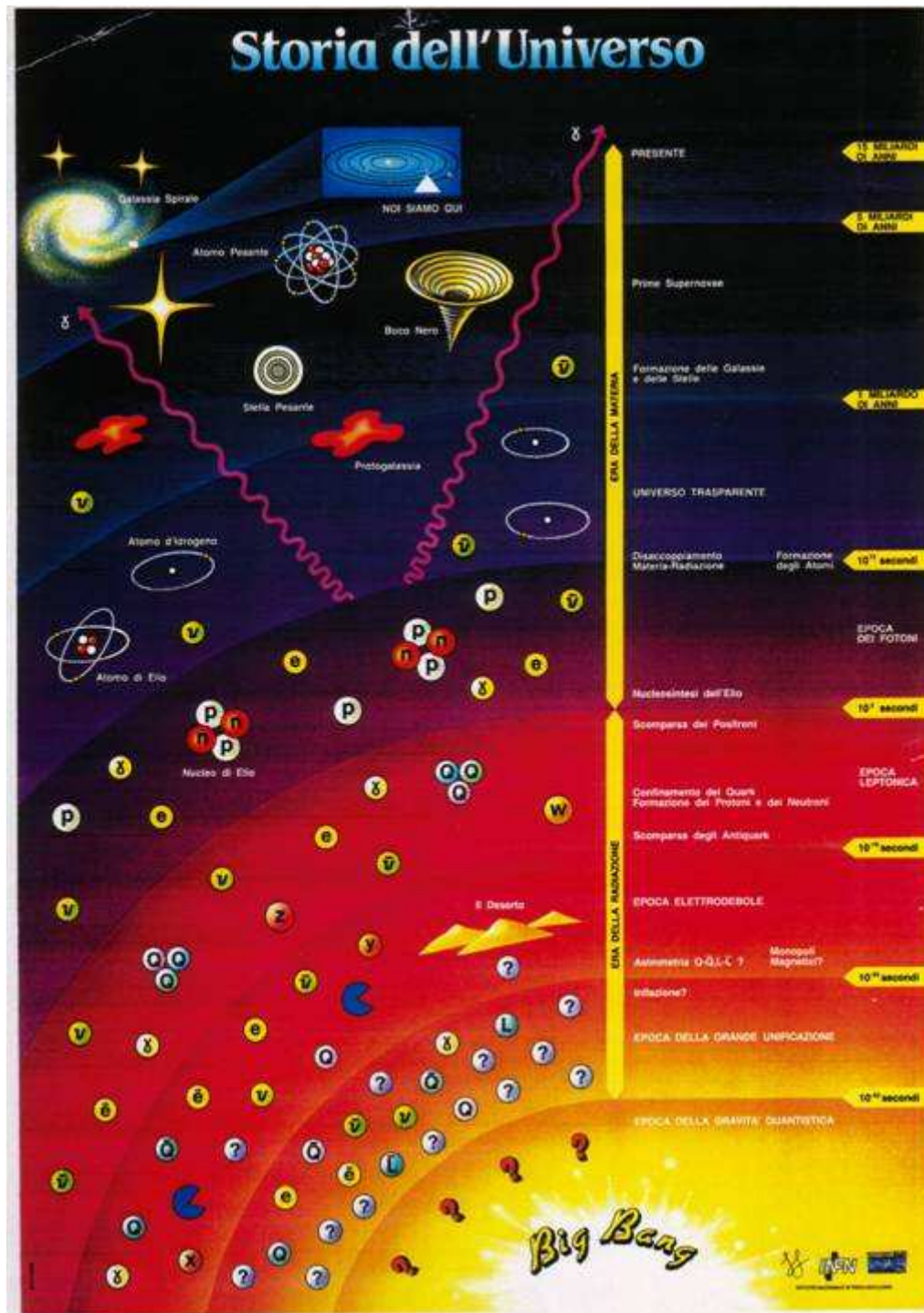
<b>14</b>	<b>Aspetti fondamentali delle interazioni tra nucleoni</b> .....
14.1	Introduzione .....
14.2	Proprietà generali dei nuclei .....
14.2.1	La carta dei nuclidi .....
14.2.2	Energia di legame nucleare .....
14.2.3	Dimensioni dei nuclei .....
14.2.4	Proprietà elettromagnetiche dei nuclei.....
14.3	Modelli nucleari .....
14.3.1	Modello a gas di Fermi .....
14.3.2	Modello a goccia di liquido .....
14.3.3	Il modello a shell .....
14.4	Proprietà dell'interazione nucleone-nucleone .....
14.5	Decadimenti radioattivi e datazione.....
14.5.1	Decadimenti in cascata.....
14.6	Decadimento $\gamma$ .....
14.7	Decadimento $\alpha$ .....
14.8	Decadimento $\beta$ .....
14.9	Reazioni nucleari e fissione.....
14.9.1	Fissione nucleare .....
14.9.2	Reattori nucleari .....
14.10	Fusione Nucleare .....
14.10.1	Fusione nelle stelle.....
14.10.2	Fusione in laboratorio .....

<b>A</b>	<b>Appendici</b> .....
	Appendice 1 Tabella periodica degli elementi .....
	Appendice 2 Le unità di misura naturali in fisica subnucleare .....
	Appendice 3 Richiami di relatività ed EM classico .....
	Appendice 4 Equazione e formalismo di Dirac .....

# Perché Astrofisica Nucleare e Subnucleare?

- **Fenomeni atomici e molecolari:** comprensione dello spettro luminoso del sole
- **Fenomeni nucleari:** comprensione del "funzionamento" del sole e delle stelle;
- La **Fisica nucleare e subnucleare e la Meccanica Quantistica** ci permettono di comprendere la struttura di particolari corpi celesti (stelle a neutroni, pulsar...);
- La **Fisica dei Raggi Cosmici** (protoni e nuclei di alta energia) è strettamente connessa ai meccanismi di accelerazione di oggetti astrofisici galattici o extragalattici;
- **Neutrino astronomia:** identificazione delle sorgenti acceleratrici;
- I neutrini come sonda del funzionamento dell'interno del Sole e come motore dei collassi stellari gravitazionali;
- Il problema della "**dark matter**" è strettamente connessa con quella della nascita e dell'evoluzione di Galassie e di ammassi di Galassie;





- La comprensione del comportamento del "microcosmo" ad energie elevatissime è di fondamentale importanza per la comprensione dei primi attimi di vita dell'Universo dopo il Big Bang;
- Cos'è la "dark energy"? Quali le sue relazioni con la cosmologia?
- .....

*Visione "pittorica" dell'evoluzione (temporale ed energetica) dell'Universo e la sua relazione con i costituenti ultimi della Materia.*

# Physical constant

...sempre a portata di mano

## 1. PHYSICAL CONSTANTS

Table 1.1. Reviewed 2002 by P.J. Mohr and B.N. Taylor (NIST). Based mainly on the "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998" by P.J. Mohr and B.N. Taylor, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **28**, 1713 (1999) and *Rev. Mod. Phys.* **72**, 351 (2000). The last group of constants (beginning with the Fermi coupling constant) comes from the Particle Data Group. The figures in parentheses after the values give the 1-standard-deviation uncertainties in the last digits; the corresponding fractional uncertainties in parts per 10<sup>9</sup> (ppb) are given in the last column. This set of constants (aside from the last group) is recommended for international use by CODATA (the Committee on Data for Science and Technology). The full 1998 CODATA set of constants may be found at <http://physics.nist.gov/constants>

Quantity	Symbol, equation	Value	Uncertainty (ppb)
speed of light in vacuum	$c$	299 792 458 m s <sup>-1</sup>	exact*
Planck constant	$h$	6.626 068 76(52) × 10 <sup>-34</sup> J s	78
Planck constant, reduced	$\hbar = h/2\pi$	1.054 571 596(82) × 10 <sup>-34</sup> J s = 6.582 118 89(26) × 10 <sup>-22</sup> MeV s	78 39
electron charge magnitude	$e$	1.602 176 462(63) × 10 <sup>-19</sup> C = 4.803 204 20(19) × 10 <sup>-10</sup> esu	39, 39
conversion constant	$hc$	197.326 960 2(77) MeV fm	39
conversion constant	$(hc)^2$	0.389 379 292(30) GeV <sup>2</sup> mbarn	78
electron mass	$m_e$	0.510 998 902(21) MeV/c <sup>2</sup> = 9.109 381 88(72) × 10 <sup>-31</sup> kg	40, 79
proton mass	$m_p$	938.271 998(38) MeV/c <sup>2</sup> = 1.672 621 58(13) × 10 <sup>-27</sup> kg = 1.007 276 466 88(13) u = 1836.152 667 5(39) $m_e$	40, 79 0.13, 2.1
deuteron mass	$m_d$	1875.612 762(75) MeV/c <sup>2</sup>	40
unified atomic mass unit (u)	(mass <sup>12</sup> C atom)/12 = (1 g)/(N <sub>A</sub> mol)	931.494 013(37) MeV/c <sup>2</sup> = 1.660 538 73(13) × 10 <sup>-27</sup> kg	40, 79
permittivity of free space	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8.854 187 817 ... × 10 <sup>-12</sup> F m <sup>-1</sup>	exact
permeability of free space	$\mu_0$	4π × 10 <sup>-7</sup> N A <sup>-2</sup> = 12.566 370 614 ... × 10 <sup>-7</sup> N A <sup>-2</sup>	exact
fine-structure constant	$\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	7.297 352 533(27) × 10 <sup>-3</sup> = 1/137.035 999 76(50) <sup>†</sup>	3.7, 3.7
classical electron radius	$r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2.817 940 285(31) × 10 <sup>-15</sup> m	11
(e <sup>-</sup> Compton wavelength)/2π	$\lambda_e = h/m_e c = r_e \alpha^{-1}$	3.861 592 642(28) × 10 <sup>-13</sup> m	7.3
Bohr radius ( $m_{\text{nucleus}} = \infty$ )	$a_\infty = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2 = r_e \alpha^{-2}$	0.529 177 208 3(19) × 10 <sup>-10</sup> m	3.7
wavelength of 1 eV/c particle	$hc/(1 \text{ eV})$	1.239 841 857(49) × 10 <sup>-6</sup> m	39
Rydberg energy	$hcR_\infty = m_e c^4/2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2 = m_e c^2 \alpha^2/2$	13.605 691 72(53) eV	39
Thomson cross section	$\sigma_T = 8\pi r_e^2/3$	0.665 245 854(15) barn	22
Bohr magneton	$\mu_B = eh/2m_e$	5.788 381 749(43) × 10 <sup>-11</sup> MeV T <sup>-1</sup>	7.3
nuclear magneton	$\mu_N = eh/2m_p$	3.152 451 238(24) × 10 <sup>-14</sup> MeV T <sup>-1</sup>	7.6
electron cyclotron freq./field	$\omega_{\text{cycl}}^e/B = e/m_e$	1.758 820 174(71) × 10 <sup>11</sup> rad s <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>	40
proton cyclotron freq./field	$\omega_{\text{cycl}}^p/B = e/m_p$	9.578 834 08(38) × 10 <sup>7</sup> rad s <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>	40
gravitational constant <sup>‡</sup>	$G_N$	6.673(10) × 10 <sup>-11</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = 6.707(10) × 10 <sup>-39</sup> hc (GeV/c <sup>2</sup> ) <sup>-2</sup>	1.5 × 10 <sup>6</sup> 1.5 × 10 <sup>6</sup>
standard gravitational accel.	$g_n$	9.806 65 m s <sup>-2</sup>	exact
Avogadro constant	$N_A$	6.022 141 99(47) × 10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>	79
Boltzmann constant	$k$	1.380 650 3(24) × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup> = 8.617 342(15) × 10 <sup>-5</sup> eV K <sup>-1</sup>	1700 1700
molar volume, ideal gas at STP	$N_A k(273.15 \text{ K})/(101 325 \text{ Pa})$	22.413 996(39) × 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup>	1700
Wien displacement law constant	$b = \lambda_{\text{max}} T$	2.897 768 6(51) × 10 <sup>-3</sup> m K	1700
Stefan-Boltzmann constant	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	5.670 400(40) × 10 <sup>-8</sup> W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>	7000
Fermi coupling constant**	$G_F/(hc)^3$	1.166 39(1) × 10 <sup>-5</sup> GeV <sup>-2</sup>	9000
weak-mixing angle	$\sin^2 \hat{\theta}(M_Z)$ (MS)	0.23113(15) <sup>††</sup>	6.5 × 10 <sup>5</sup>
W <sup>±</sup> boson mass	$m_W$	80.423(39) GeV/c <sup>2</sup>	4.8 × 10 <sup>5</sup>
Z <sup>0</sup> boson mass	$m_Z$	91.1876(21) GeV/c <sup>2</sup>	2.3 × 10 <sup>4</sup>
strong coupling constant	$\alpha_s(m_Z)$	0.1172(20)	1.7 × 10 <sup>7</sup>
$\pi = 3.141 592 653 589 793 238$		$e = 2.718 281 828 459 045 235$	$\gamma = 0.577 215 664 901 532 861$
1 in = 0.0254 m		1 G = 10 <sup>-4</sup> T	1 eV = 1.602 176 462(63) × 10 <sup>-19</sup> J
1 Å = 0.1 nm		1 dyne = 10 <sup>-5</sup> N	1 eV/c <sup>2</sup> = 1.782 661 731(70) × 10 <sup>-36</sup> kg
1 barn = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>		1 erg = 10 <sup>-7</sup> J	2.997 924 58 × 10 <sup>9</sup> esu = 1 C
			1 atmosphere = 760 Torr = 101 325 Pa
kT at 300 K = [38.681 686(67)] <sup>-1</sup> eV			
0 °C = 273.15 K			

\* The meter is the length of the path traveled by light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 of a second.

† At Q<sup>2</sup> = 0. At Q<sup>2</sup> ≈ m<sub>W</sub><sup>2</sup> the value is ~ 1/128.

‡ Absolute lab measurements of G<sub>N</sub> have been made only on scales of about 1 cm to 1 m.

\*\* See the discussion in Sec. 10, "Electroweak model and constraints on new physics."

†† The corresponding sin<sup>2</sup> θ for the effective angle is 0.23143(15).

# Nuclear Science

**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus?" "What combinations of protons and neutrons are possible?" "What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated?" "What is the origin of the nuclei found on Earth?"

**Legend**

- electron ( $e^-$ )
- quark
- gluon field
- photon ( $\gamma$ )
- proton ( $p$ )
- positron ( $e^+$ )
- gluon field
- photon ( $\gamma$ )
- neutron ( $n$ )
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- photon ( $\gamma$ )

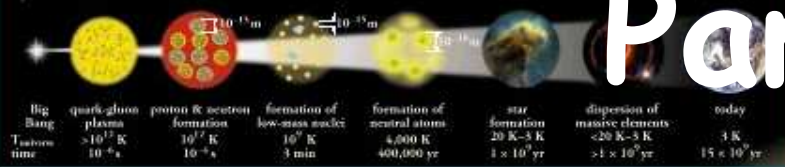
November 14  
December 6  
November 6  
November 14  
November 6  
November 14  
November 6  
November 14  
November 6  
November 14  
November 6

**C**

Atomic Number = Z  
Mass Number = A - Z

## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-12}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe  $T_{univ}$  cooled to about  $10^9$  K, this soup coalesced into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms contracted into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Exploding stars (supernovae) form the most massive elements and disperse them into space. Our solar system formed from supernova debris.



## Phases of Nuclear Matter



## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei far from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclei. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with  $Z \leq 112$ .



# Parte I:

# Fisica Nucleare

## Radioactivity

**Alpha Decay**  
 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$

**Beta Minus Decay**  
 $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \bar{\nu}$

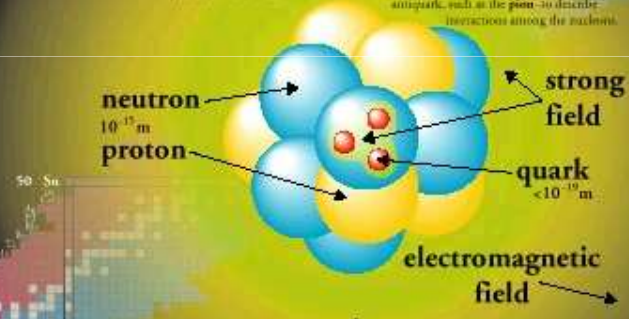
**Beta Plus Decay**  
 $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + e^+ + \nu$

**Gamma Decay**  
 $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + \gamma$

before after

Radioactive decay transforms a nucleus, emitting different particles in alpha decay, the nucleus releases a  $^4\text{He}$  nucleus - an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (for a positron) and neutrino) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the same for the anti-particle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon - a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

## The Nucleus



Nucleons come together to form nuclei when the attractive force of the proton is less than the sum of the masses of the individual nucleons. The "lost mass" appears as kinetic energy of the products ( $E = mc^2$ ). In fission, a massive nucleus splits into two major fragments that usually eject one or more neutrons. In fusion, low mass nuclei combine to form a more massive nucleus plus one or more ejected particles - neutrons, protons, photons, or alpha particles.

## Nuclear Energy

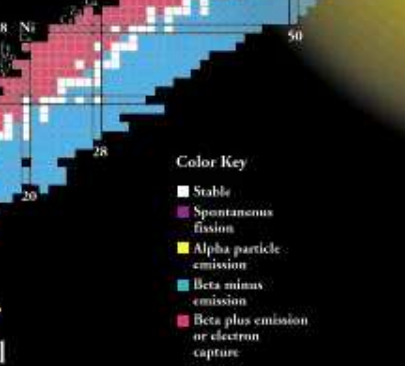
**Fission**  
 $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{141}\text{Ba} + ^{92}\text{Kr} + 3n$

**Fusion**  
 $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$

In the early stages of stellar evolution of our sun and other stars, hydrogen fused to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. Current measurements show the observed solar luminosity rate is about half of what contemporary theory predicts. Ongoing experiments are trying to solve this mystery.

## Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (N or Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



<http://pdg.lbl.gov/cpep.html>

## Applications

**Radioactive Dating**  
Anciently occurring radioactive isotopes such as  $^{14}\text{C}$  are used to date objects that have once lived, such as wood. For example, from a study of carbon found at the site, scientists determined the Neolithic site had been nearly 4,000 years old.

**Space Exploration**  
Scientists used alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactions are used in many areas from cancer investigation to an automobile.

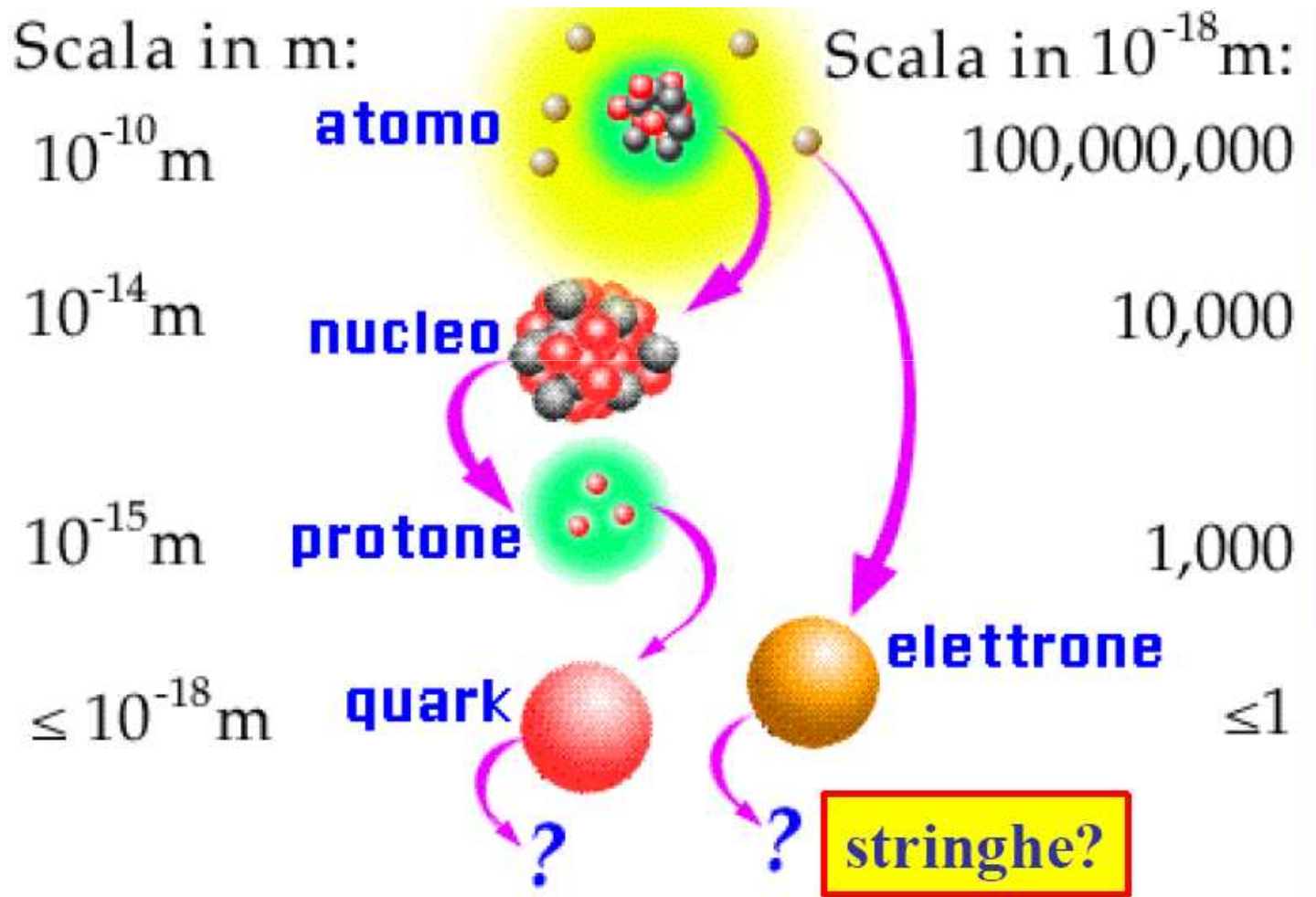
**Nuclear Reactors**  
Nuclear reactors use the fission of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors also make other nuclear applications possible: radioactive waste disposal, this waste is subject of current research.

**Smoke Detectors**  
Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter  $^{241}\text{Am}$  to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

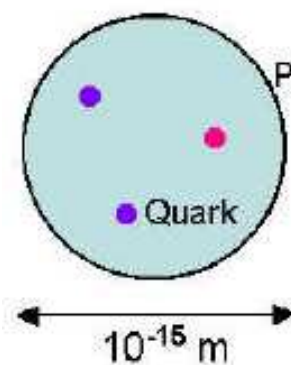
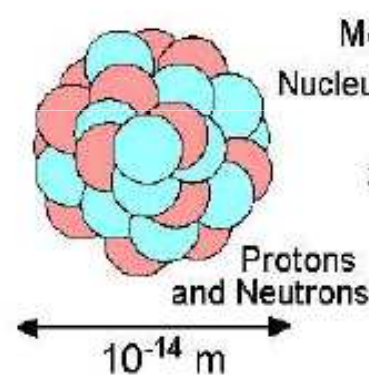
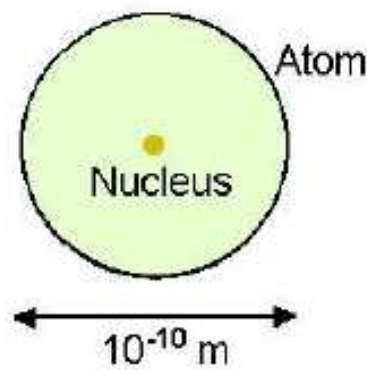
**Nuclear Medicine**  
Radioactive isotopes, such as  $^{131}\text{I}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ , and  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , are commonly used in the diagnosis and therapy of disease. Diagnostic isotopes such as  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  are used in Technetium-99m scintigraphy (Tc-99m scans) to produce images of body systems.

**Magnetic Resonance Imaging**  
Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of magnetic interactions involving the magnetic field of a nucleus to study the local environment of protons. This technique accurately maps the structure of biological systems and produces three-dimensional images of the human body.

# 1. Dagli atomi ai quark



# Fisica atomo → nucleo



# La tavola periodica degli elementi

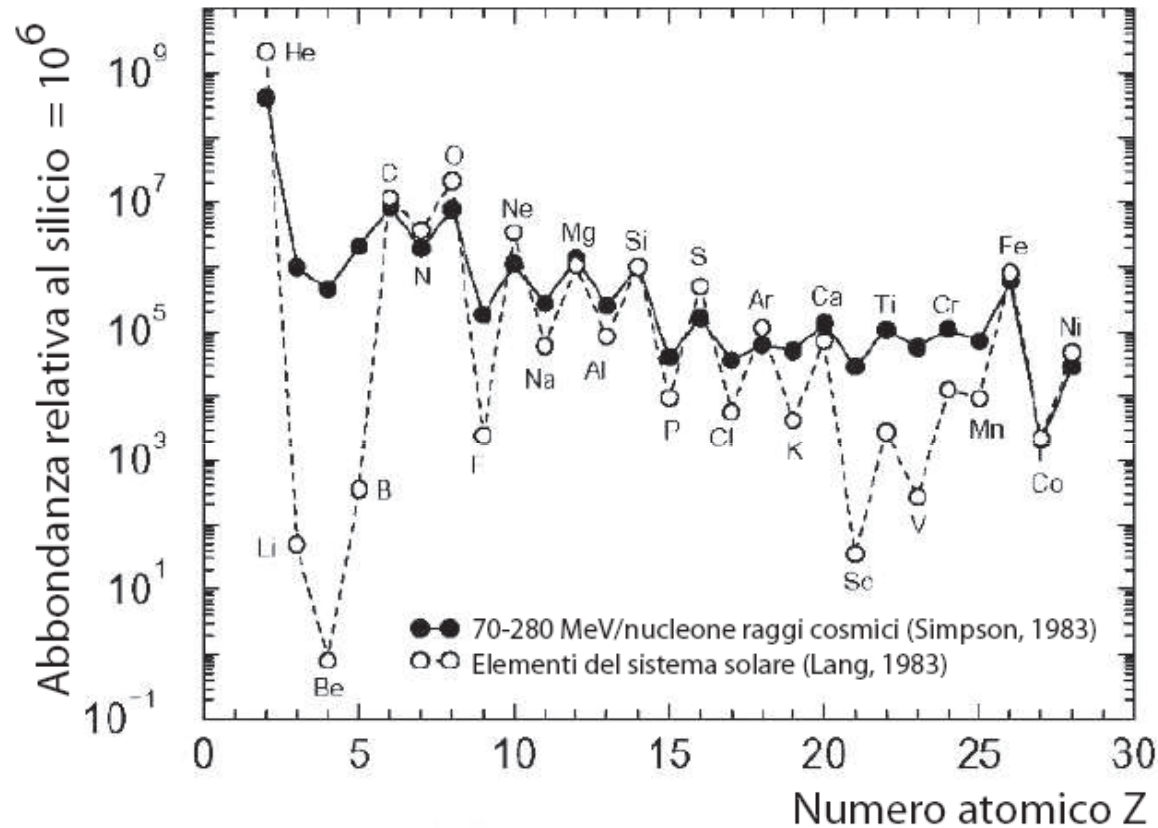
I primi tre elementi si sono formati nel Big Bang. Tutti gli altri elementi vengono formati nelle stelle

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS																	
1 IA																	18 VIIIA
1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.002602
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosph. 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge German. 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybd. 95.94	43 Tc Technet. (97.907215)	44 Ru Ruthen. 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lantha- nides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (208.982415)	85 At Astatine (209.987131)	86 Rn Radon (222.017570)
87 Fr Francium (223.019731)	88 Ra Radium (226.025402)	89-103 Actinides	104 Rf Rutherford. (261.1089)	105 Db Dubnium (262.1144)	106 Sg Seaborg. (263.1186)	107 Bh Bohrium (262.1231)	108 Hs Hassium (265.1306)	109 Mt Meitner. (266.1378)	110	111 (272)	112 (277)						

Lanthanide series	57 La Lanthan. 138.9055	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodym. 140.90765	60 Nd Neodym. 144.24	61 Pm Prometh. (144.912745)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolin. 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dyspros. 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
Actinide series	89 Ac Actinium (227.027747)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactin. 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium (237.048166)	94 Pu Plutonium (244.064197)	95 Am Americ. (243.061372)	96 Cm Curium (247.070346)	97 Bk Berkelium (247.070298)	98 Cf Californ. (251.079579)	99 Es Einstein. (252.08297)	100 Fm Fermium (257.095096)	101 Md Mendelev. (258.098427)	102 No Nobelium (259.1011)	103 Lr Lawrenc. (262.1098)

Elementi "naturali": da H(Z=1) a U(Z=92)

# Abbondanze nucleari nel sistema solare



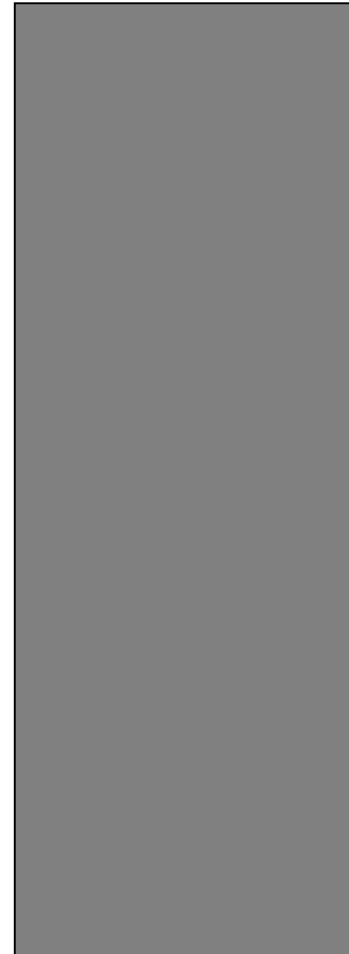
- Abbondanze relative nel sistema solare (normalizzate a Si).
- Generalmente le stesse in tutto il sistema solare
- Deuterio ed elio: fusione nei primi minuti dopo il **big bang**
- Nuclei fino  $^{56}\text{Fe}$ : **stelle**
- Nuclei più pesanti: **supernovae**

→ Nel corso di Fisica  
Cosmica

# Come si è scoperto il nucleo ?

## L'esperimento di Rutherford

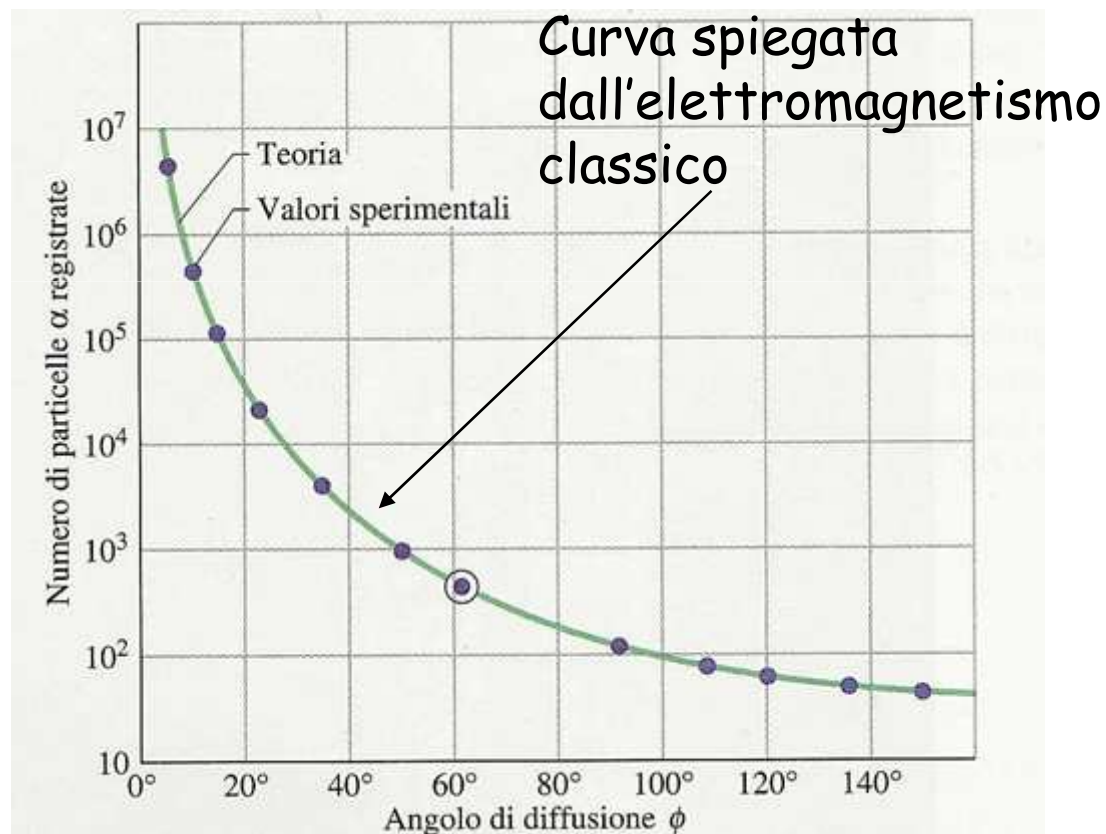
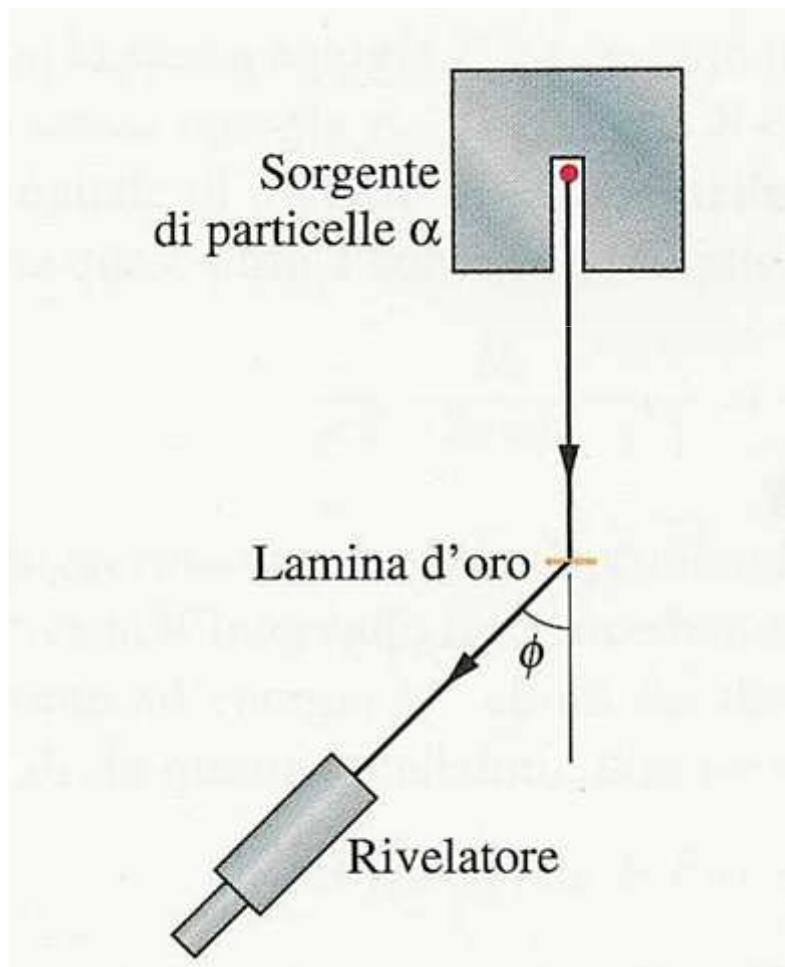
- Nel 1911 Rutherford, studiando la trasmissione di particelle alfa (nuclei di He ) su una sottile lamina di Au, si accorse che venivano deviate anche a grandi angoli ( fino a  $180^\circ$ , ossia all'indietro).
- In quel periodo veniva accettato il modello di Thomson per l'atomo, che presentava gli elettroni annegati in una carica positiva distribuita in tutto il volume dell'atomo.
- Una simile sfera carica non è in grado di deviare significativamente una particella di massa pari a 7300 volte quella dell'elettrone.
- Per ottenere simili deviazioni bisogna ammettere che nell'atomo la carica positiva sia concentrata su dimensioni molto più piccole.







# Scattering di Rutherford (Interazioni Elettromagnetiche)



## 2. Proprietà generali dei nuclei

# Nuclei stabili

$A$	$Z$	$N = A - Z$	Numero di nuclei stabili
pari	pari	pari	157
dispari	pari	dispari	53
dispari	dispari	pari	50
pari	dispari	dispari	4
		Totale	264

Tabella 14.1. Distribuzione in  $A$ ,  $Z$ ,  $N$  dei nuclei stabili.

**Nuclei particolarmente stabili: numeri magici**

$N$  oppure  $Z = 2, 8, 10, 18$

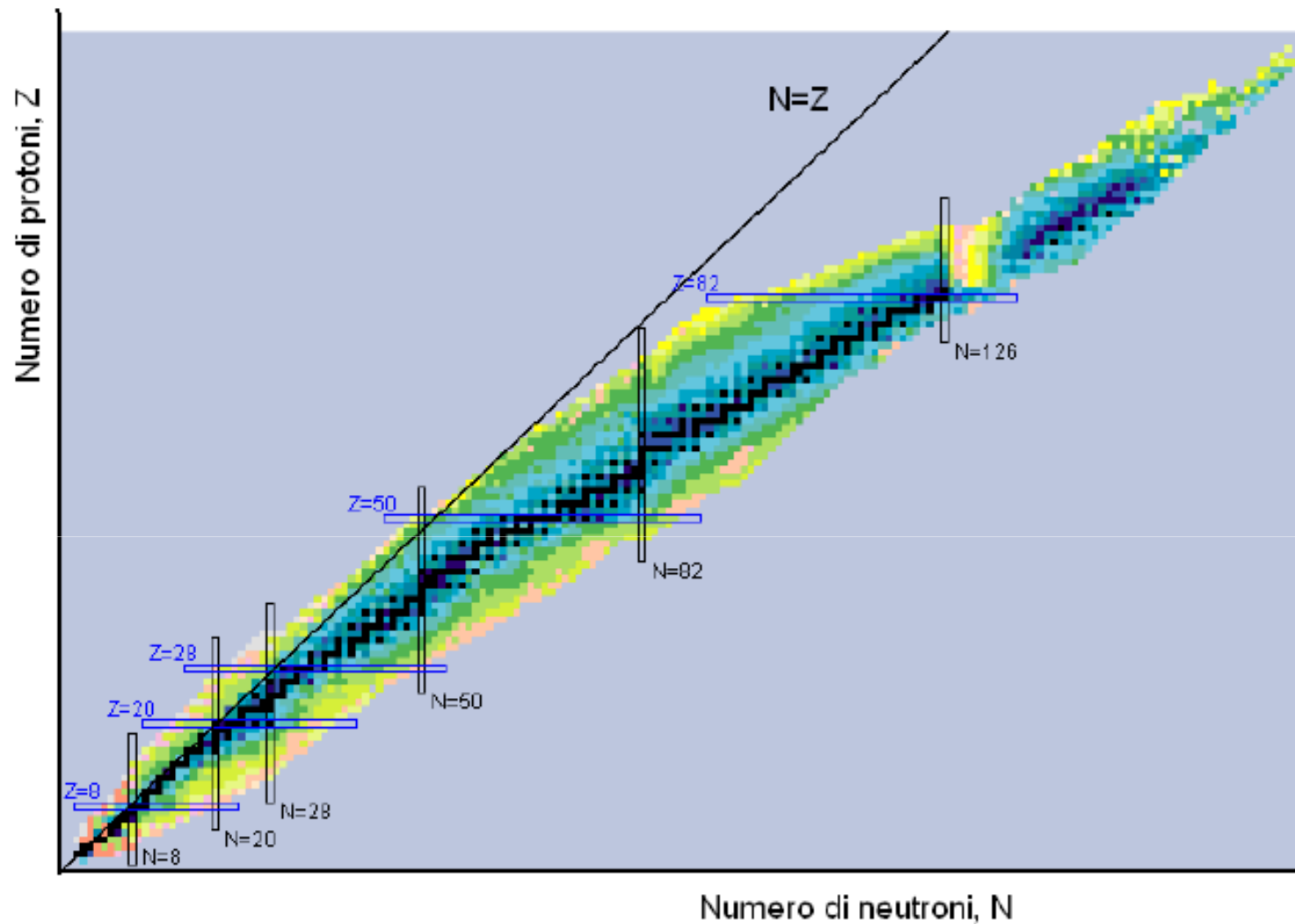
$20, 28, 50, 82, 126$

[ Nel modello a shell corrispondono a "shell chiuse", molto stabili ]

- **Esistono inoltre più di 1500 nuclei instabili**

# Un poco sulle notazioni...

1 1,008 <b>H</b> idrogeno								2 4,003 <b>He</b> elio	
		<i>numero atomico Z</i>							
		<i>numero di massa in u.m.a.</i>							
		<i>simbolo</i>							
		<i>nome dell'elemento</i>							
3 6,941 <b>Li</b> litio	4 9,012 <b>Be</b> berillio	5 10,811 <b>B</b> boro	6 12,011 <b>C</b> carbonio	7 14,007 <b>N</b> azoto	8 15,994 <b>O</b> ossigeno	9 18,998 <b>F</b> fluoro	10 20,180 <b>Ne</b> neon		



Isobari:

nuclidi diversi con stesso  $A$

Isotopi:

nuclidi diversi con stesso  $Z$

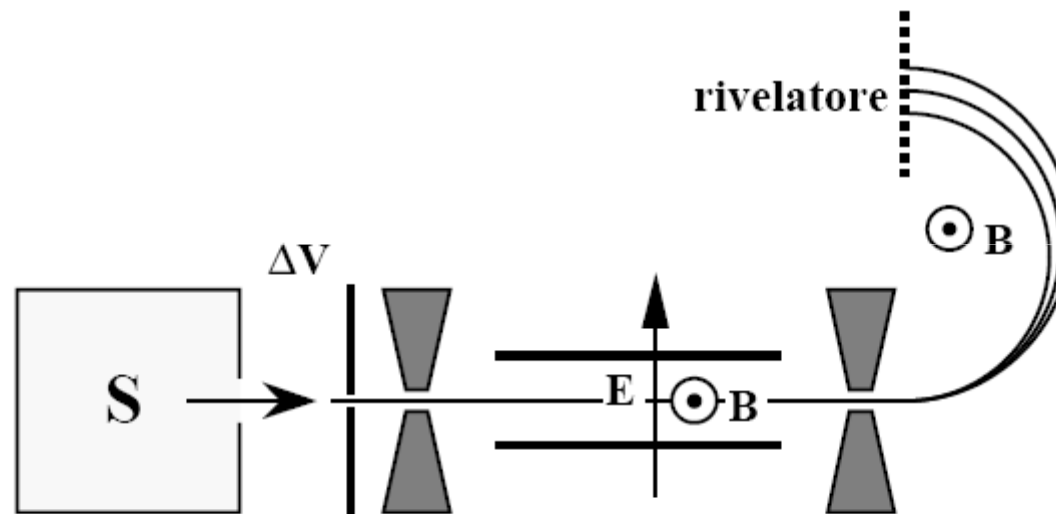
Isotoni:

nuclidi diversi con stesso  $N$

# Spettrometro di massa

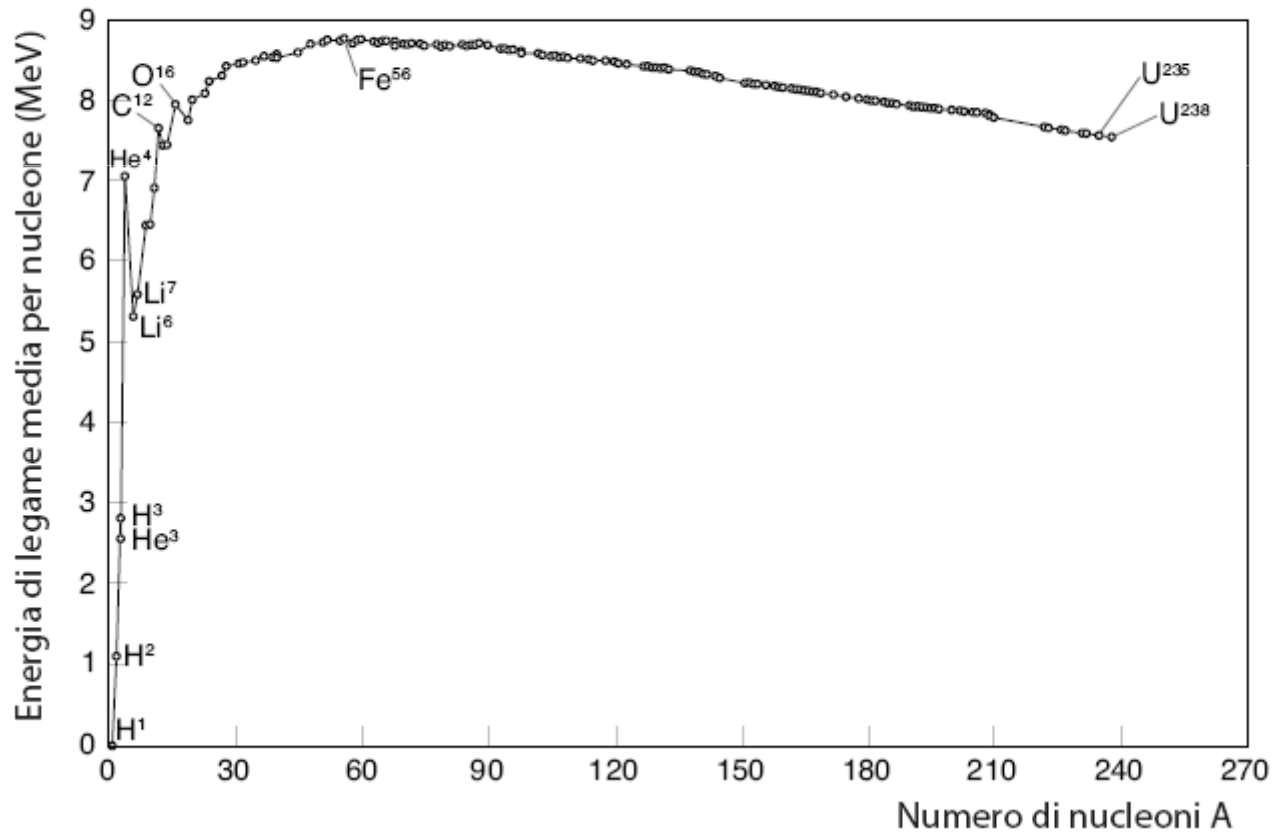
$q$ ,  $B$ ,  $v$  sono noti. Misurando  $r$  si ha:

$$m = \frac{qrB^2}{E}$$



# 3. Energia di legame nucleare

- Differenza fisica atomica e fisica nucleare
- Unità di misura delle masse
- Additività della massa ?

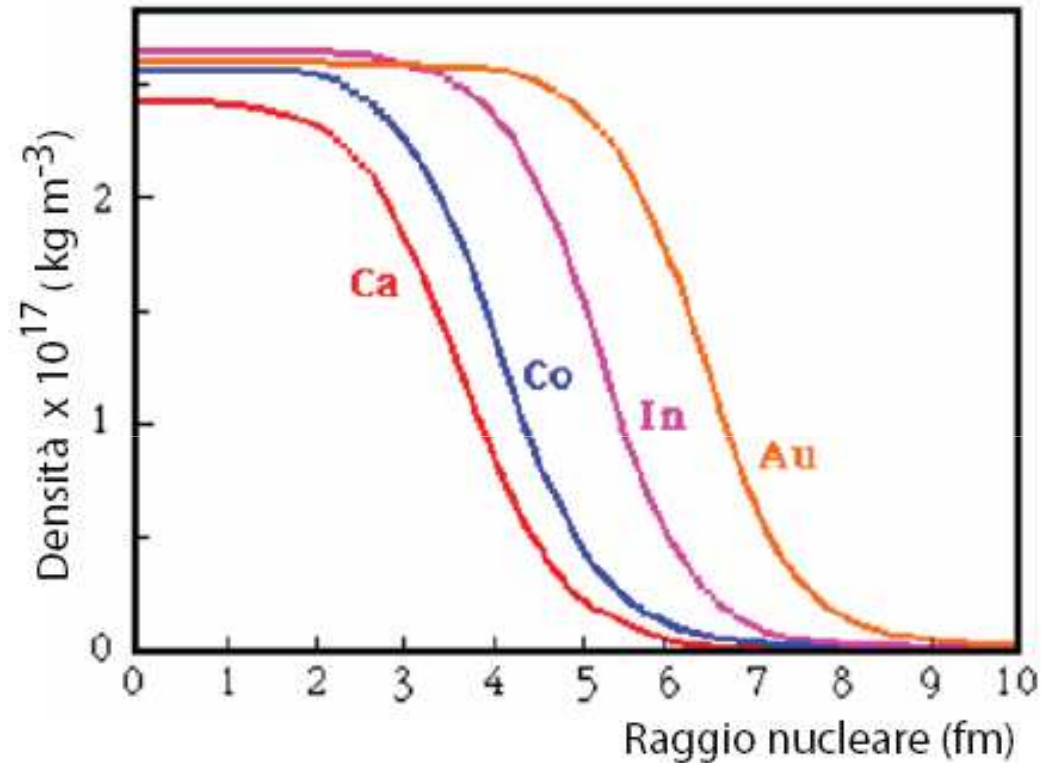




## 4. Dimensioni nucleari

- Come si misura il raggio dei nuclei?
- Il raggio "medio" del nucleo varia secondo la relazione  $R=R_0A^{1/3}$ , dove  $R_0 = 1.2 \cdot 10^{-15}$  m ossia 1.2 fermi ( fm).
- La densità della materia nucleare è elevatissima : dato che:  $V(\text{volume}) \propto A$ , la densità nucleonica vale  $0.14$  nucleoni/ $\text{fm}^3$
- **Esercizio: esprimere la densità dei nuclei in  $\text{kg}/\text{m}^3$**

# Distribuzione di carica dei nuclei

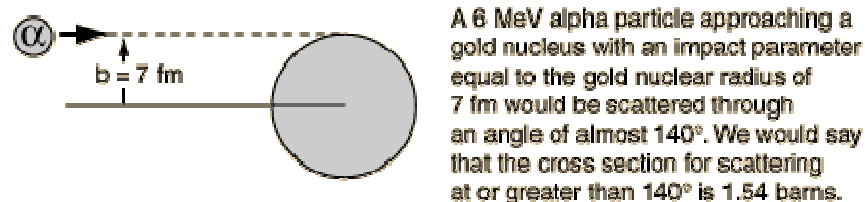
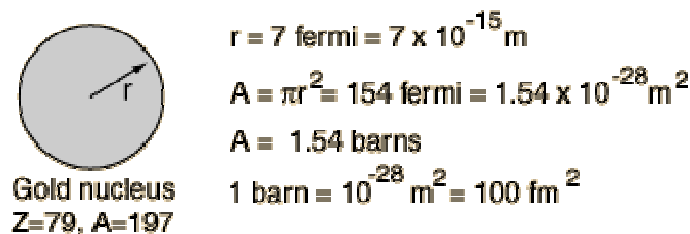
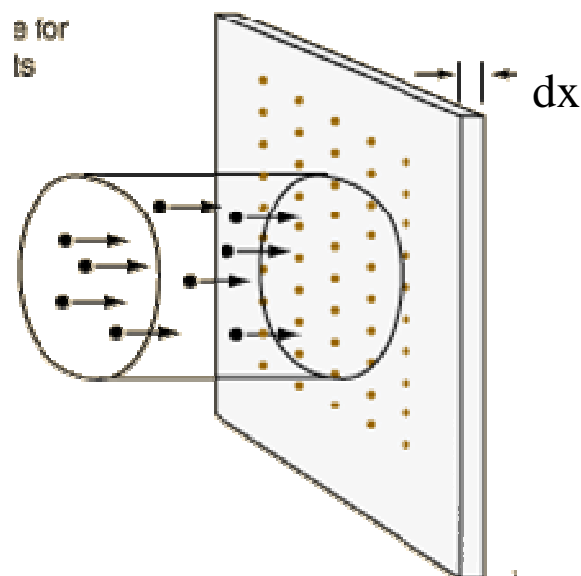


•Distribuzione della carica elettrica nei nuclei misurata tramite urto elastico  $e^- + \text{Nucleo}$

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{(r-R)/t}}$$

$$R = R_0 A^{1/3} \quad R_0 \approx 1.2 \text{ fm}, \quad t \approx 2.5 \text{ fm}$$

# Il concetto di Sezione d'urto



$N = \text{numero particelle incidenti/cm}^2 \text{ s} \quad [\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$   
 $\Delta N = \text{n. di particelle interagenti sui centri diffusori/(cm}^2 \text{ s)} \quad [\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$   
 $dx = \text{spessore del materiale} \quad [\text{cm}]$   
 $N_c = \text{numero centri diffusore/cm}^3 \quad [\text{cm}^{-3}]$

• E' semplice verificare che esiste una costante di proporzionalità  $\sigma$  tale che:

$$[\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}] \quad \Delta N = \sigma N \cdot N_c \cdot dx \quad [\text{cm}^2 (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \text{ cm}^{-3} \text{ cm}]$$

Tale costante di proporzionalità è la sezione d'urto.

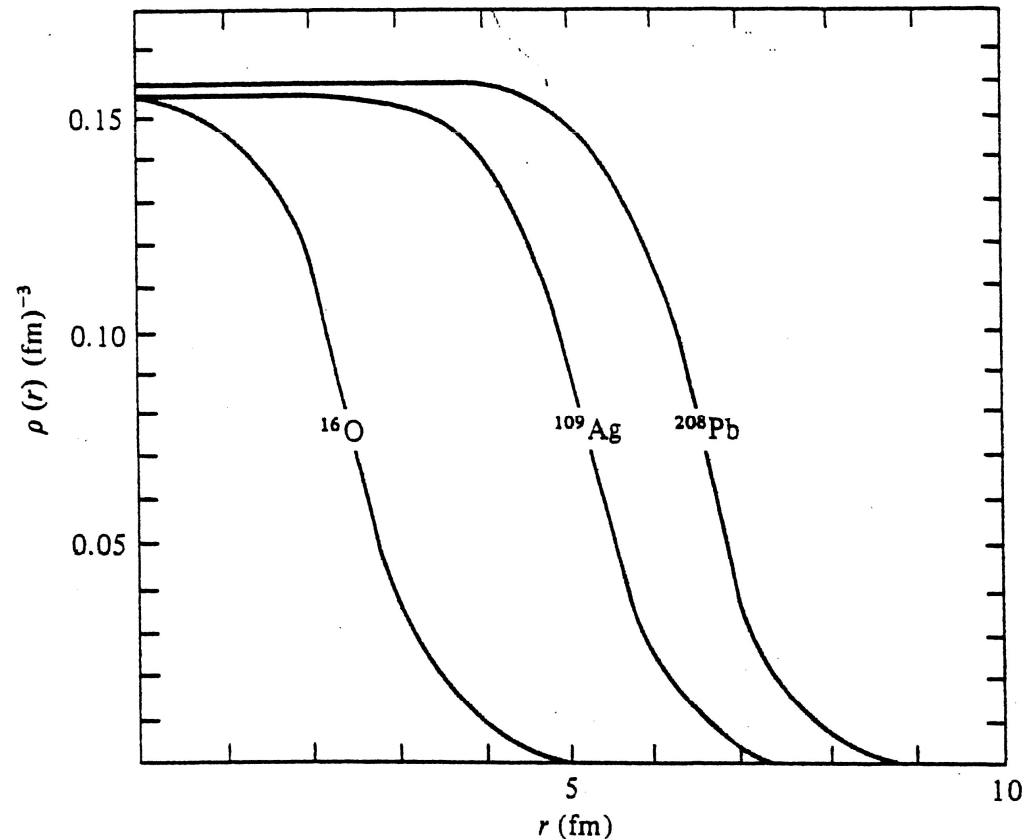
# Dimensioni nucleari misurate in collisioni p(n)-nucleo

- Si tratta di esperimenti di scattering alla Rutherford
- Sostanzialmente, si conferma che la distribuzione di materia nel nucleo è in accordo con la distribuzione di carica elettrica

$$\rho_{\text{Nucleare}} = \frac{\text{NumeroNucleoni}}{\text{volume}} =$$

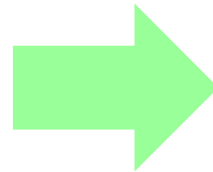
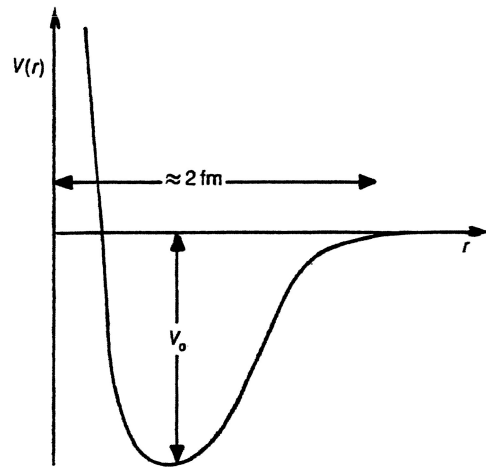
$$\frac{dn}{dv} = \text{cost} = \rho_0 \cong$$

$$\cong 0.17 \quad \text{nucleoni} / \text{fm}^3$$



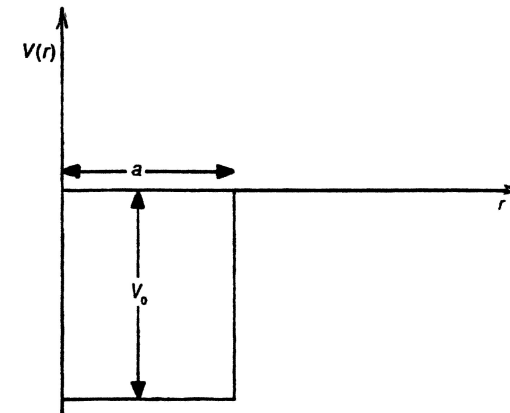
# 5. Forze nucleari. Il potenziale fra due nucleoni

- Fra 2 nucleoni vi e' una forza nucleare attrattiva capace di vincere la repulsione coulombiana



$R_{\text{repulsivo}} \sim 0.3 \text{ fm}$

$V_0 \sim 20 \text{ MeV}$



# Indipendenza della forza nucleare dalla carica elettrica

- Il potenziale nucleare e' lo stesso per pp, pn, nn
- L'indipendenza dalla carica si manifesta nella corrispondenza approssimata di livelli energetici, per esempio

<i>Stato fondamentale</i>	$^{14}\text{C}_6$	$I=-1$	coppia nn
<i>1° stato eccitato</i>	$^{14}\text{N}_7$	0	" np
<i>Stato fondamentale</i>	$^{14}\text{O}_8$	+1	" pp

Come vedremo più avanti, se c'e' una interazione tra particelle deve esserci anche una particella che "media" tra le interazioni...

(cariche elettriche  $\leftrightarrow$  fotoni)

(forze nucleari  $\leftrightarrow$  mesoni)

# Potenziale fenomenologico nucleone-nucleone

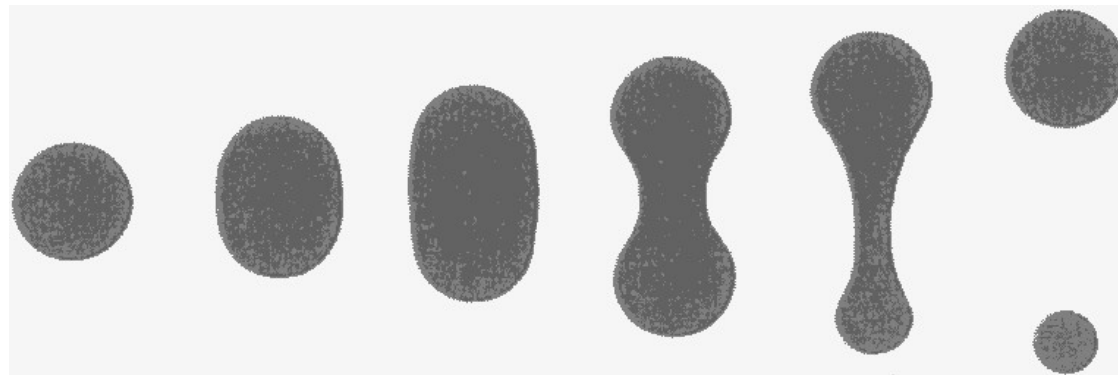
$$V_{NN} = V_C + V_{LS} \vec{L} \cdot \vec{S} + V_\sigma \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 + V_T S_{12} + V_{\sigma p} (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{p})(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{p}) + V_{LL} Q_{12}$$



- La "forza forte" fondamentale è fra quark e non fra nucleoni
- Quella tra nucleoni è solo un'interazione **residua!**
- (Ci sono altre forze residue in natura, ad esempio la **forza di Van der Waals** fra atomi neutri)
- Teoria di Yukawa

## 6. Modelli nucleari.

- L'insieme di p, n si comporta come goccia quantistica





# Formula semiempirica per l'energia di legame nucleare $B(Z, A)$

- L'energia di legame  $BE$  (*Binding Energy*) di un nucleo è misurata tramite lo spettrometro di massa:

$$BE = (Zm_p + Nm_n)c^2 - m_Nc^2 \approx [Zm_p + Nm_n - (m_A - Zm_e)]c^2$$

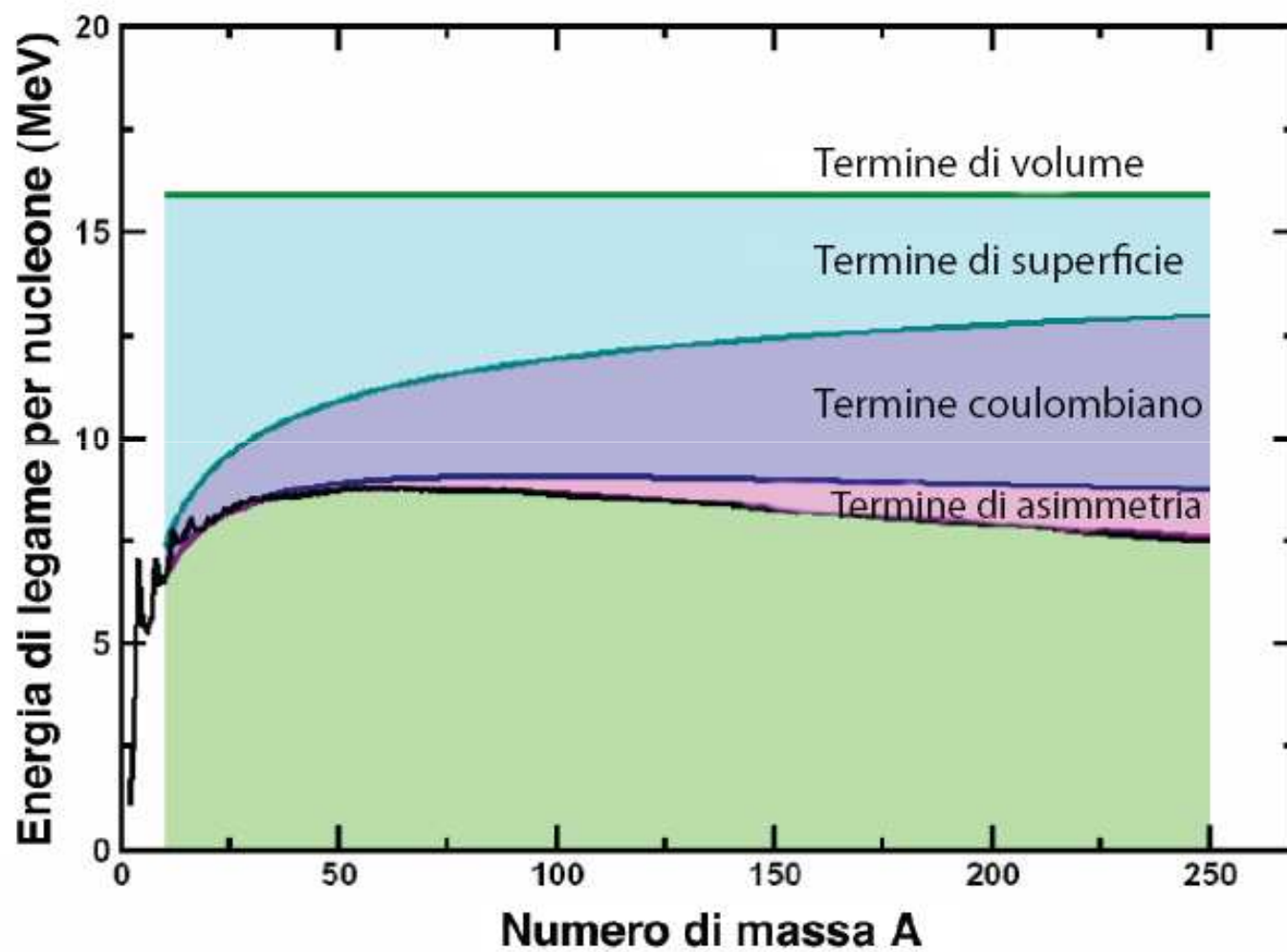
- Il modello a goccia **predice**:

$$BE = a_0A - a_1A^{2/3} - a_2\frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_3\frac{(A - 2Z)^2}{A} \pm \frac{a_4}{A^{1/2}} .$$

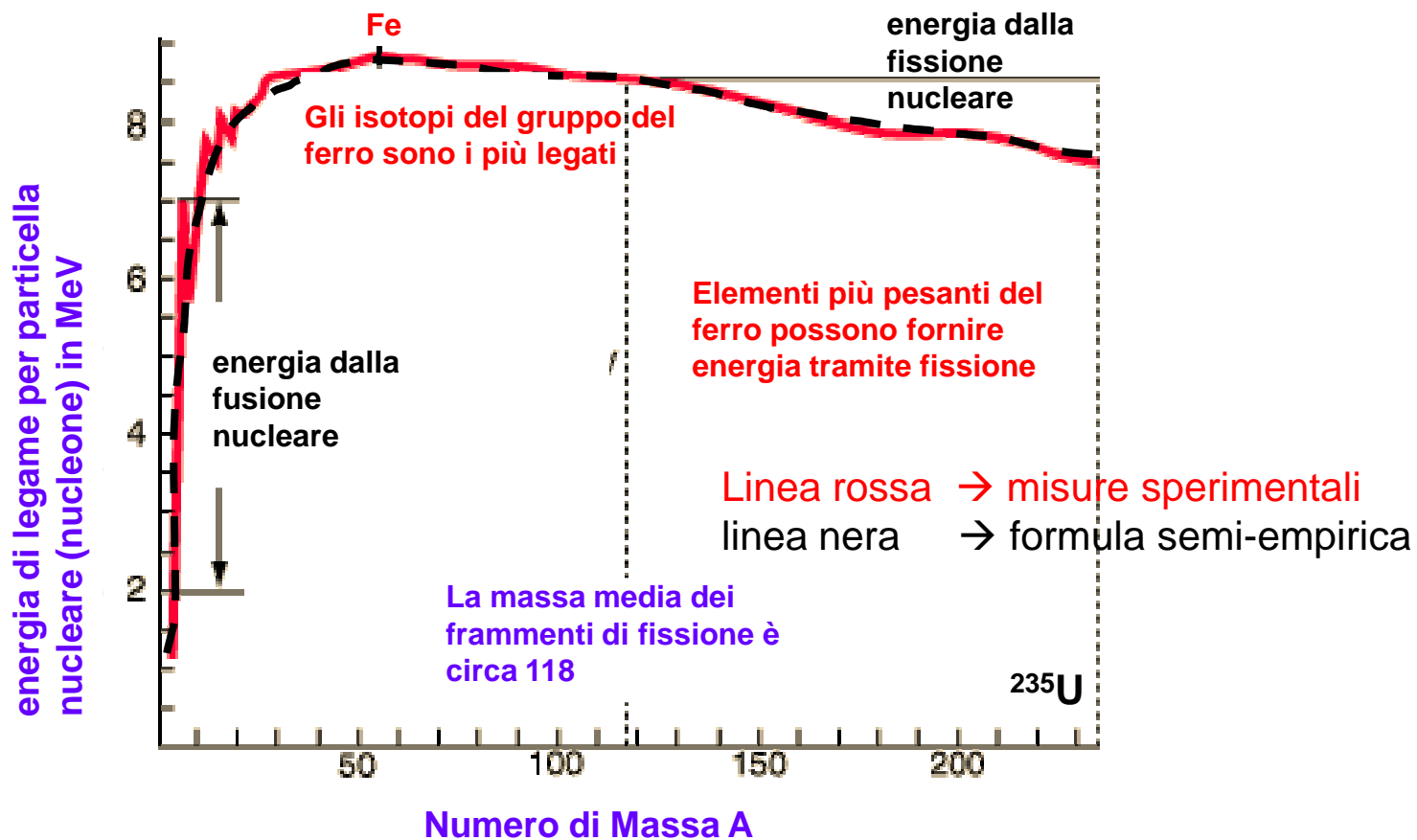
$a_0$	$a_1$	$a_2$ (MeV)	$a_3$	$a_4$
15.6	17.2	0.70	23.3	$\pm 12. , 0.$

**Tabella 14.2.** Valori delle costanti nella formula di Weizsacker. Per  $a_4$  occorre tener conto del fatto che il nucleo sia pari-pari, pari-dispari, o dispari-dispari.

# Contributi a $B/A$



# Energia di legame per nucleone in funzione di A



## 6.2 Il modello del gas di Fermi

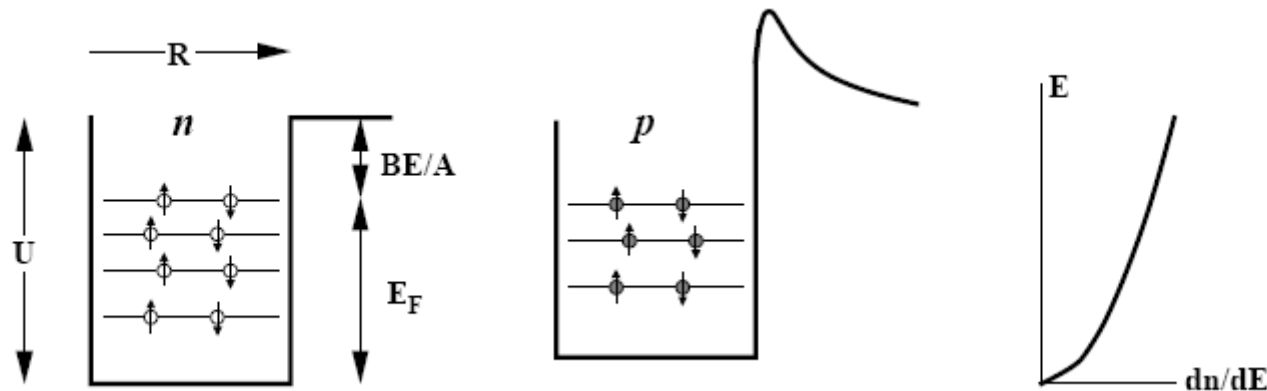
- Modello statistico a particelle indipendenti
- Calcolo del momento e dell'energia di Fermi

$$p_p = p_n \simeq 240 \text{ MeV}/c .$$

$$U = E_F + BE/A \quad ; \quad BE/A \simeq 8 \text{ MeV/nucleone} \rightarrow U = (35 \div 40) \text{ MeV} .$$

- Calcolo dell'energia cinetica media dei nucleoni nel nucleo:

$$\overline{E}_C = \frac{\int (p^2/2m) dn}{\int dn} \simeq 20 \cdot \left[ 1 + \frac{5}{9} \left( \frac{A - 2Z}{A} \right)^2 \right] \text{ MeV} .$$



**Altre applicazioni del gas di Fermi che vedrete sono nel caso nane bianche- stelle di neutroni!**

$$\frac{P}{\rho c^2} \approx \frac{\hbar^2 \rho^{2/3}}{c^2 m_e m_p^{5/3}}$$

## 6.3 Modello a shell

- Il **Modello a Shell** spiega ulteriori fatti sperimentali non descritti dal modello del gas di Fermi
- Nel **modello a shell**, i nucleoni possono muoversi liberamente all'interno del nucleo. Questo è in accordo con l'idea che essi sono soggetti a un potenziale efficace globale creato dalla somma degli altri nucleoni.

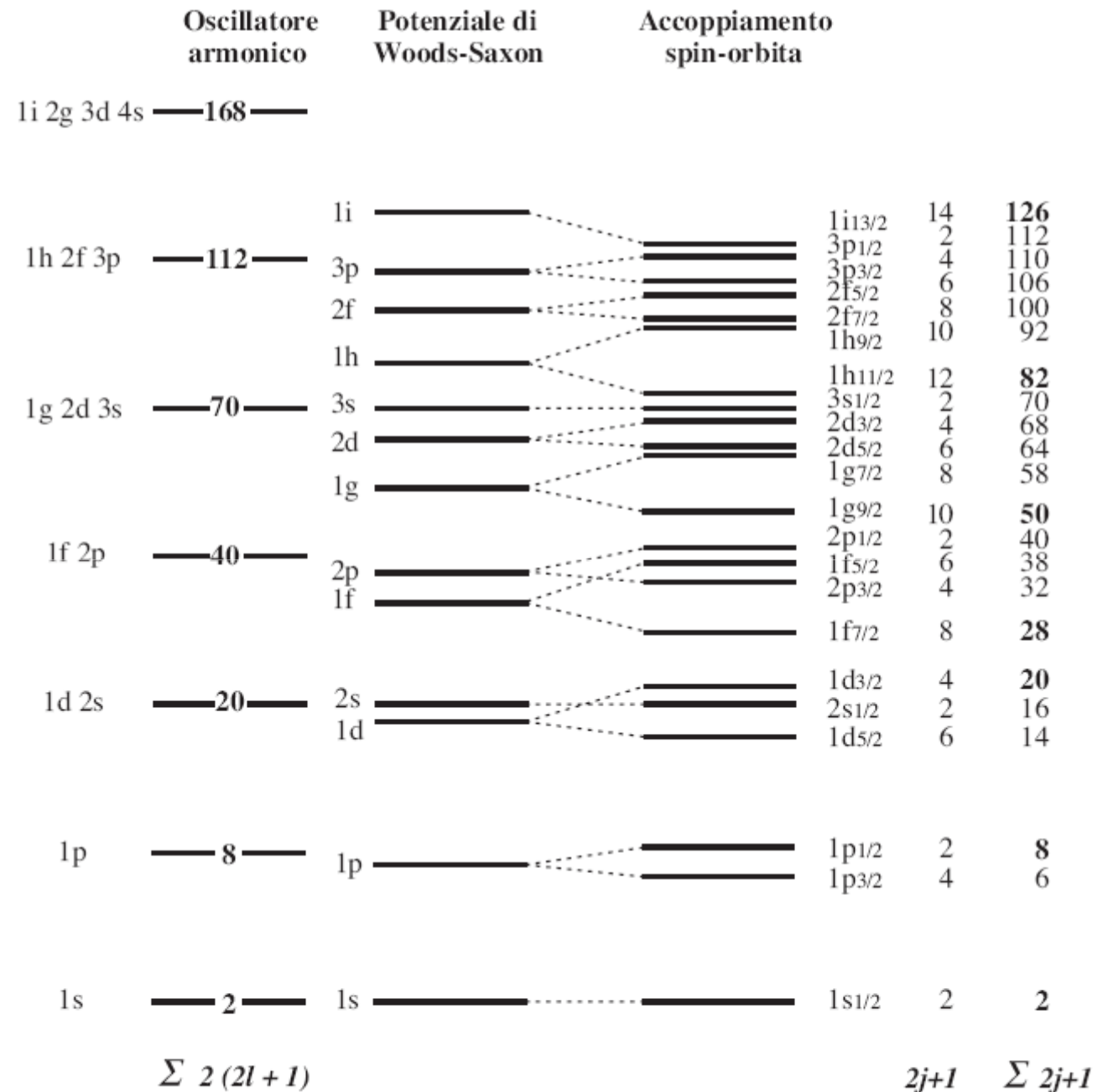
$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + U(r) + \frac{\hbar^2 \ell(\ell + 1)}{2mr^2} \right] u(r) = Eu(r) .$$

- Una possibile scelta è:

$$U_{WS}(r) = -\frac{U_0}{1 + e^{(r-R)/t}}$$

• Numeri "magici" in Fisica Nucleare: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

• Nuclei doppiamente magici: particolarmente legati. Esempi:  
 ${}^4_2\text{He}_2$ ,  ${}^{16}_8\text{O}_8$ , ...  
 ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$



# Verso i quark

• I nucleoni sono dotati di spin e quindi di momento magnetico :  
invece del magnetone di Bohr:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 5.79 \times 10^{-5} \text{ eV/T}$$

si usa il magnetone nucleare.

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3.15 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$$

• Ci aspettiamo che

p spin 1/2, carica +e,  $\mu_s = \mu_N$

n spin 1/2, carica 0,  $\mu_s = 0$

• Si osserva invece:

p  $\mu_s = +2.793 \mu_N$

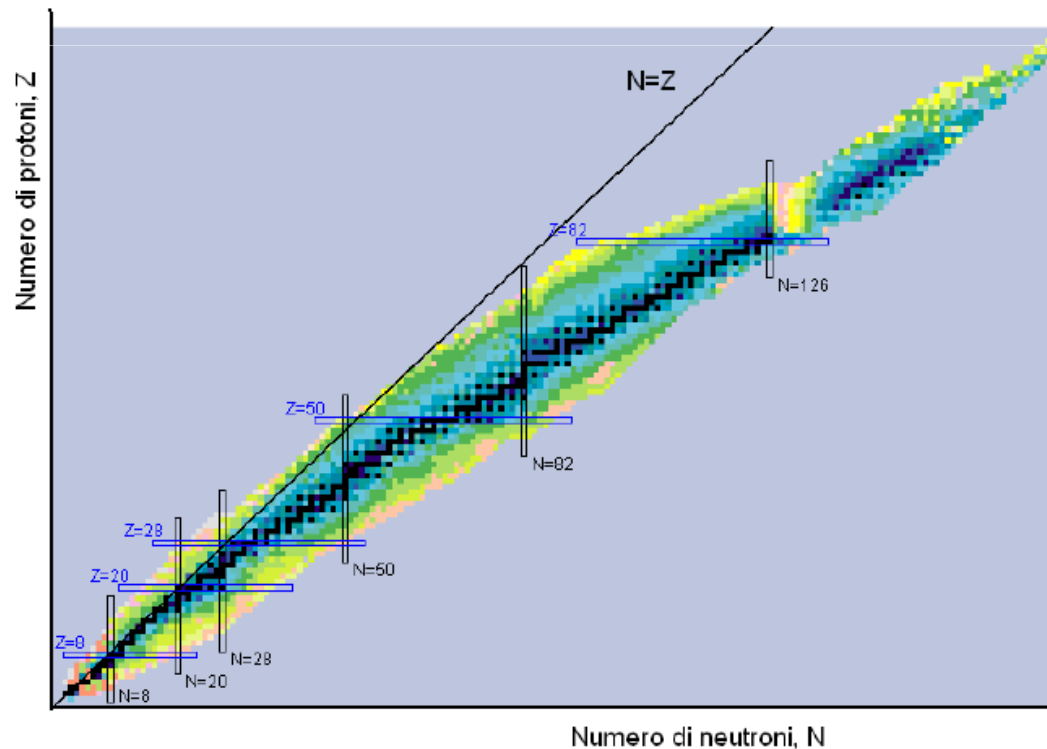
n  $\mu_s = -1.913 \mu_N$

• Protoni e neutroni non sono particelle puntiformi: sono stati legati di  
*quark carichi e gluoni* → vedi fisica subnucleare

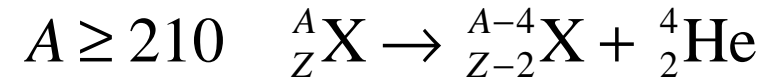


# 7. Decadimenti radioattivi e datazione

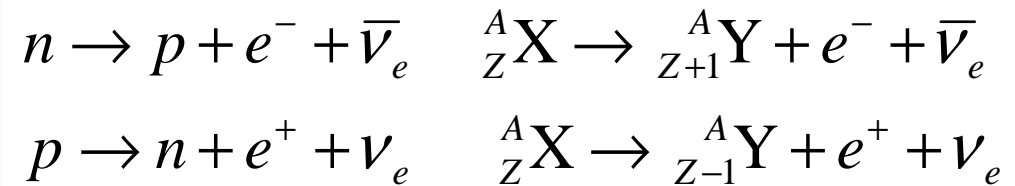
- Oltre 260 sono i nuclidi terrestri **stabili**.
- Vi sono oltre 1500 nuclei instabili [**radioattivi**]
- Radioattività naturale [scoperta da Becquerel nel 1896] e radioattività artificiale
- La radioattività naturale è dovuta ai decadimenti  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$



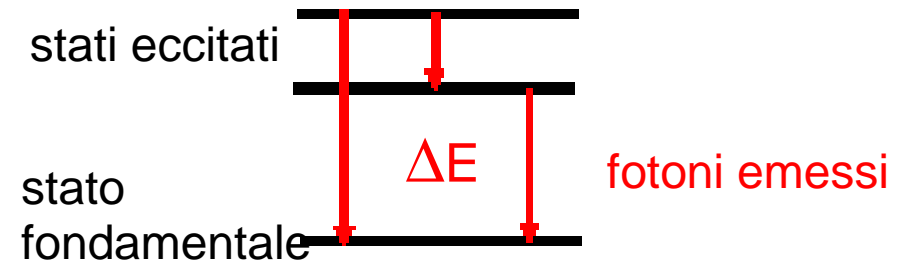
**Decadimento  $\alpha$ :**  
viene emesso un nucleo  ${}^4_2\text{He}$

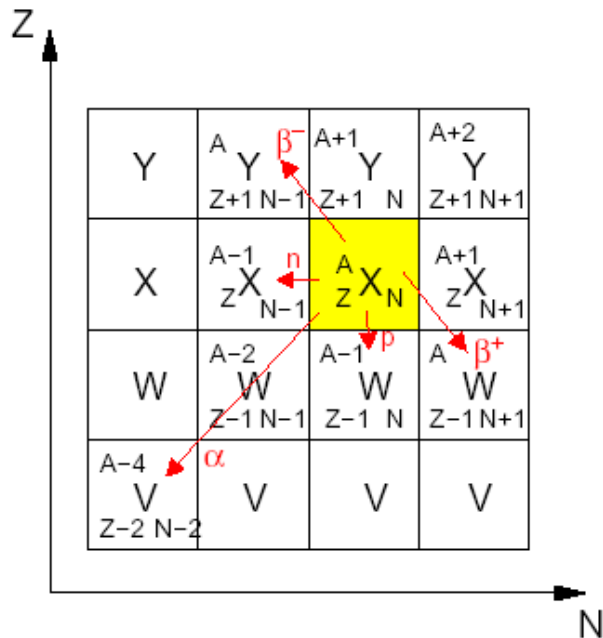
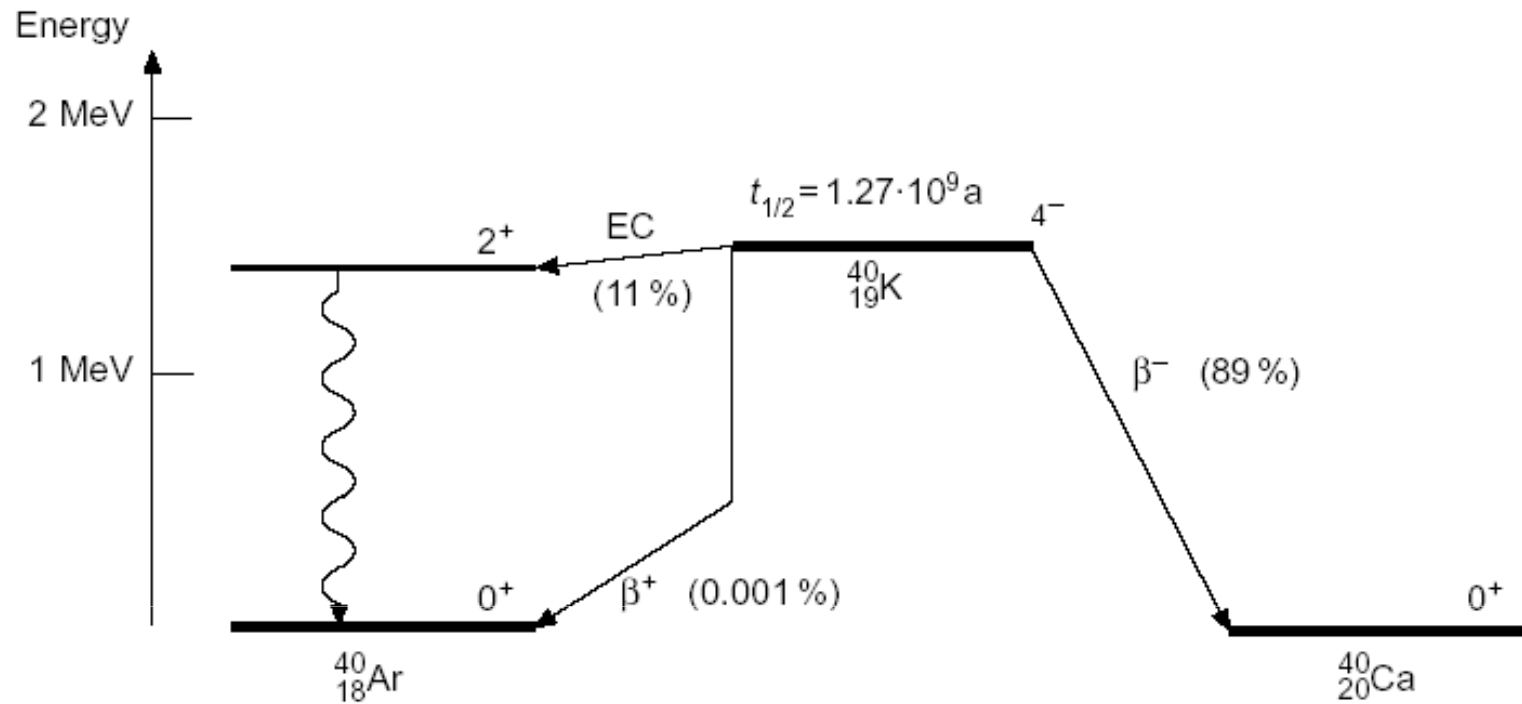


**Decadimento  $\beta$ :** sono prodotti  
un elettrone  $e^-$   
o un positrone  $e^+$



**Decadimento  $\gamma$ :** nuclei aventi  
stati eccitati possono  
decadere emettendo un  $\gamma$





## Esempio: decadimenti del $^{40}\text{K}$

**Nota:** è il decadimento che ci disturba nella misura dei neutrini astrofisici nei telescopi per neutrini sottomarini → **Fisica Cosmica**

# La legge del decadimento: descrizione del fenomeno

- La probabilità che un nucleo decada nell'intervallo di tempo  $dt$  è  $\lambda dt$

$$P(\Delta t) = \frac{\Delta t}{\tau}$$

- Nel caso di un gran numero  $N$  di particelle identiche, il numero di quelle che decadono nell'intervallo  $\Delta t$  è :

$$NP(\Delta t) = \frac{N \Delta t}{\tau} = -\Delta t \frac{dN}{dt} \quad \longrightarrow \quad \frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} .$$

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

# Vita media e tempo di dimezzamento

La (4.45) esprime la *legge del decadimento radioattivo*. Poiché:

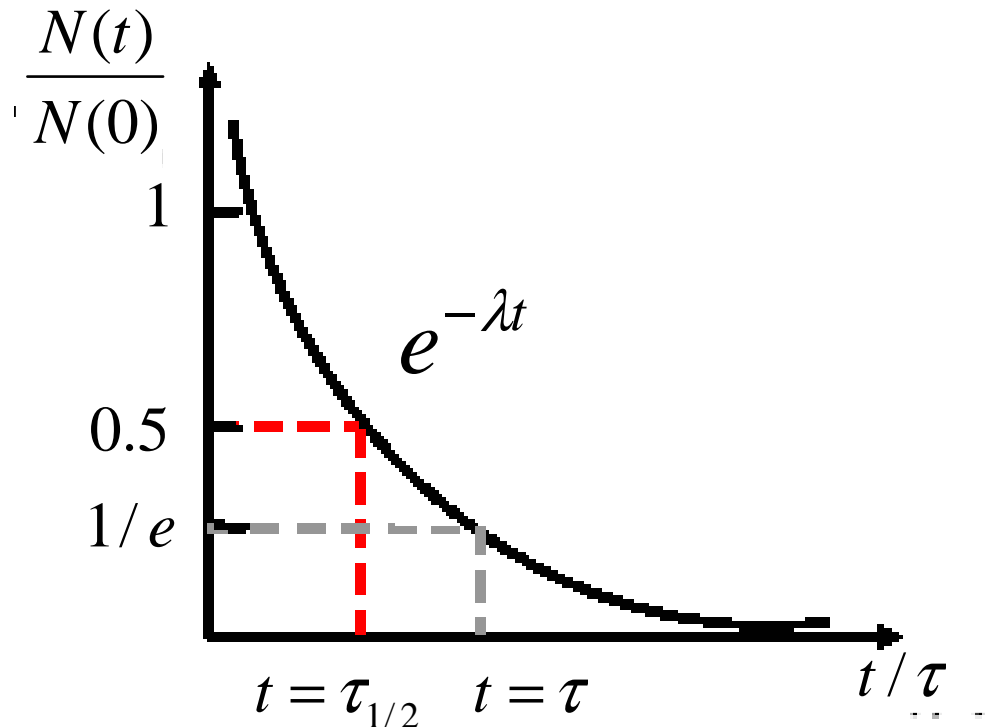
$$\frac{\int t \cdot N(t) dt}{\int N(t) dt} = \tau$$

la costante  $\tau$  viene chiamata la *vita media* della particella:

• Il tempo di dimezzamento  $\tau_{1/2}$  è il tempo dopo il quale il 50% dei nuclei sono decaduti

$$\frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\lambda t}$$
$$\frac{N(0)}{2} = N(0) e^{-\lambda \tau_{1/2}}$$

$$\Rightarrow \tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.693 \tau$$



# Attività ed unità di misura della Radioattività

- L'attività  $A(t)$  al tempo  $t$  è il numero di decadimenti per unità di tempo

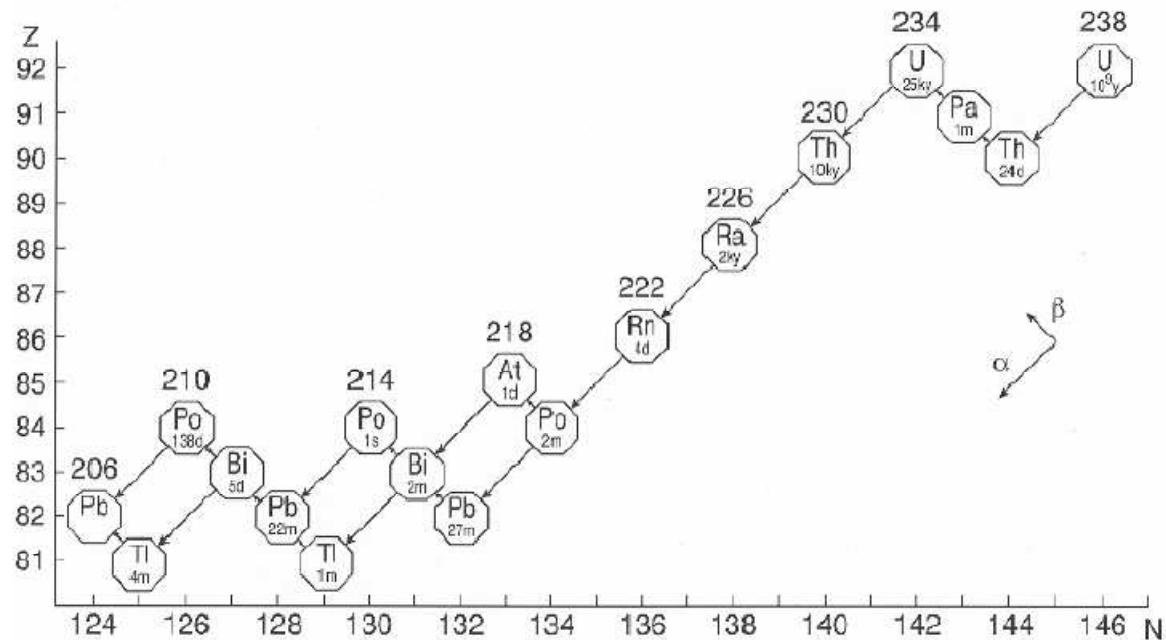
$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t}$$

- Unità della radioattività: sono definite come il numero di decadimenti per unità di tempo
- Becquerel (Bq)    1 Bq = 1 decadimento per secondo
- Curie (Ci)        1 Ci =  $3.7 \times 10^{10}$  decadimenti per secondo

- Il valore di  $\lambda$  è *determinabile sperimentalmente*. Tuttavia, questo è il *parametro correlato con la teoria*. La teoria quantistica delle interazioni deboli dovrà PREDIRE il valore di  $\lambda$  per i decadimenti radiattivi! → vedi *Fisica Subnucleare*

# Radioattività naturale

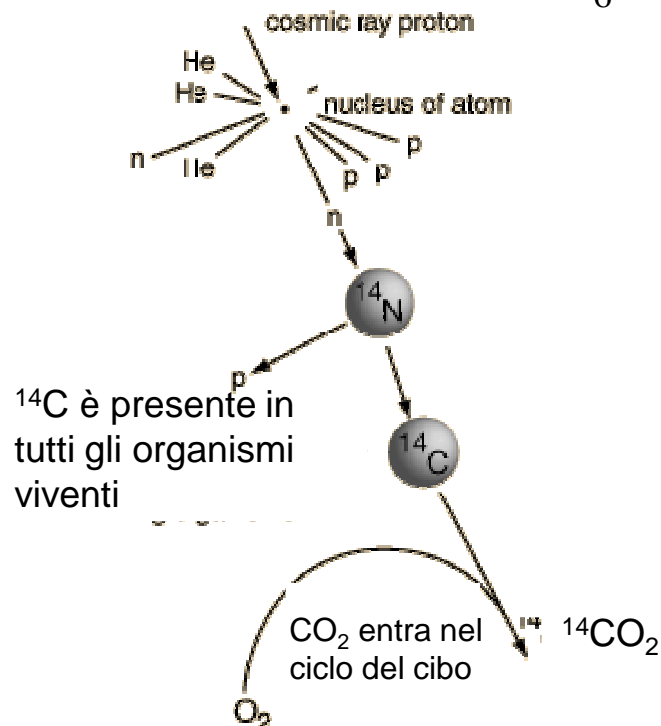
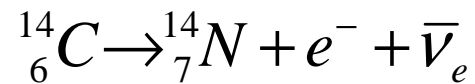
Series Name	Type	Final Nucleus (stable)	Longest-Lived Nucleus	$\tau_{1/2}$ (years)
Thorium	4n	$^{208}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}$	$1.41 \times 10^{10}$
Neptunium	4n+1	$^{209}\text{Bi}$	$^{237}\text{Np}$	$2.14 \times 10^6$
Uranium	4n+2	$^{206}\text{Pb}$	$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$
Actinium	4n+3	$^{207}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$



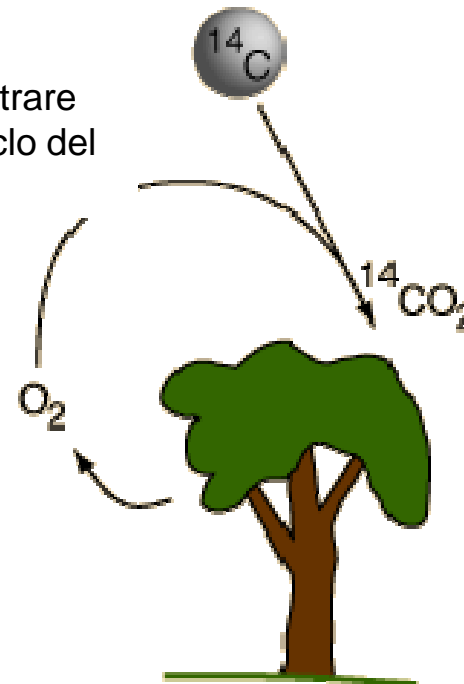
**Figura 14.8.** Catena di decadimenti dell'isotopo  $^{238}\text{U}$  dell'uranio. Le frecce verso il basso a sinistra indicano decadimenti  $\alpha$ , con variazione di  $-2$  nello  $Z$ ; le frecce verso l'alto indicano decadimenti  $\beta$ , con variazione di  $+1$  in  $Z$ . Il tempo di dimezzamento è indicato entro il riquadro di ciascun elemento (d=giorni, m=mesi, y=anni).

# Datazione col radio-carbonio

- Per datare campioni "di epoca storica" di materia organica si usa il  $^{14}\text{C}$
- Il  $^{14}\text{C}$  è continuamente prodotto nell'atmosfera terrestre dai RC
- Il rate di produzione di  $^{14}\text{C}$  è approssimativamente costante
- Il carbonio negli organismi viventi è continuamente scambiato col carbonio atmosferico. All'equilibrio ~ 1 atomo di  $^{14}\text{C}$  per  $10^{12}$  atomi di altri isotopi del carbonio (98.9%  $^{12}\text{C}$ , 1.1%  $^{13}\text{C}$ )
- Negli animali/vegetali morti il  $^{14}\text{C}$  non viene più assorbito e decade:

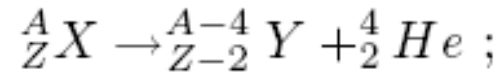


$\text{CO}_2$  fa entrare  $^{14}\text{C}$  nel ciclo del cibo





## 8. Decadimento $\alpha$



- La particella alfa ( $\alpha$ ) ha una grande energia di legame
- La particella  $\alpha$  è legata all'interno del nucleo in una buca di potenziale molto grande e da un potenziale esterno che simula la repulsione coulombiana tra la carica dell'alfa ed il resto del nucleo.
- La particella  $\alpha$  si muove avanti e indietro nella buca, sino a che ha l'occasione (*tunnelling*) di oltrepassare la barriera di potenziale.
- La probabilità è molto bassa  $\rightarrow$  tempi di dimezzamento molto lunghi,  $O(10^9\text{y})$ , come per l' $U^{238}$ .
- Questo tempo di dimezzamento dipende dall'energia  $Q$  della particella alfa, energia pari alla differenza di massa tra il nucleo "padre" ed il nucleo "figlio" .
- Ad esempio:  $U^{238}$  ha  $Q=4.27$  MeV;  $U^{228}$  ha  $Q=6.81$  MeV, con tempo di dimezzamento pari a 550 s !
- Le particelle alfa emesse dai nuclei ( pesanti, transuranici ) hanno energie di alcuni MeV, da 4 a 9 circa.

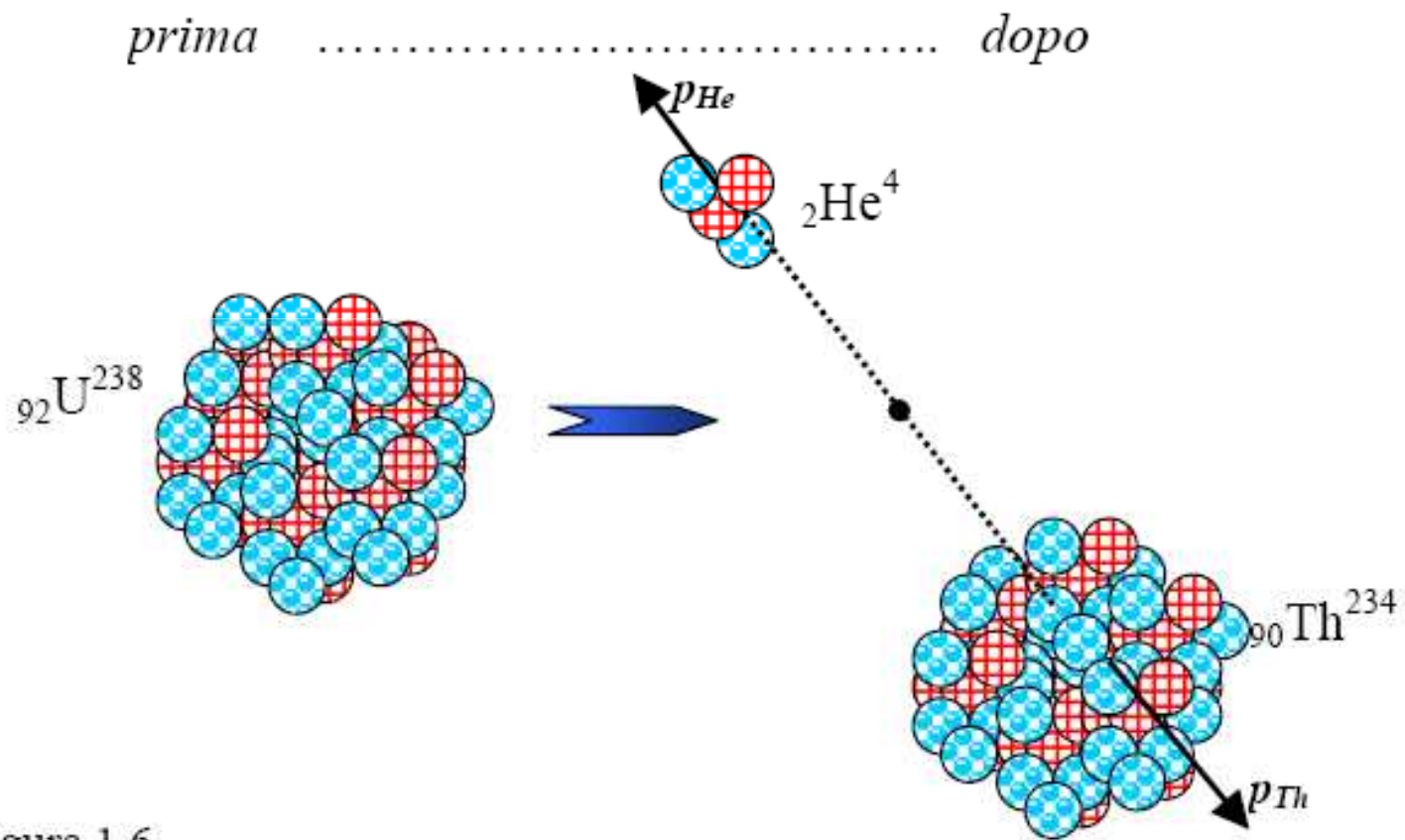
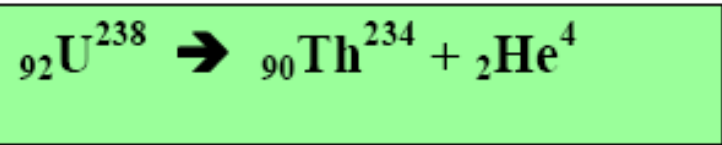
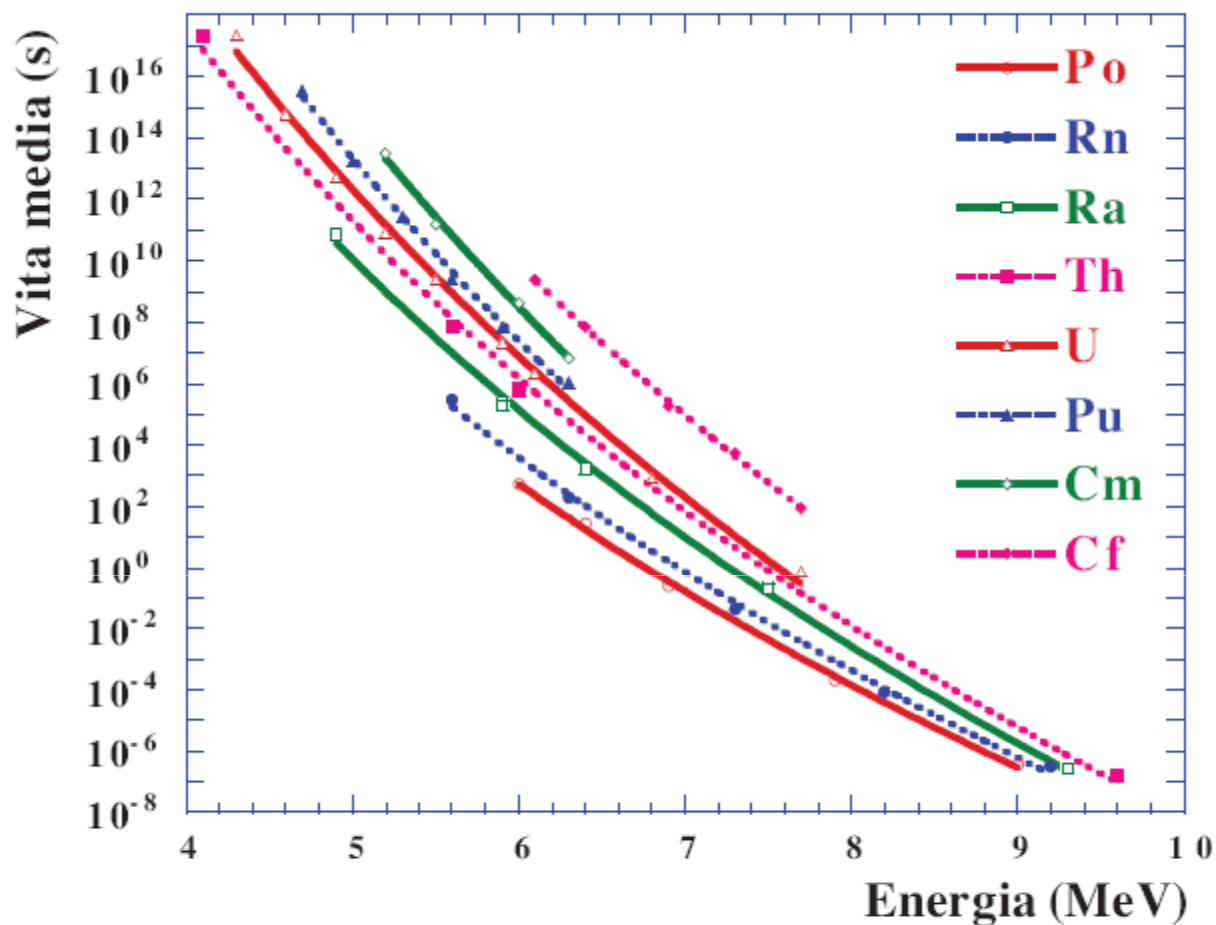
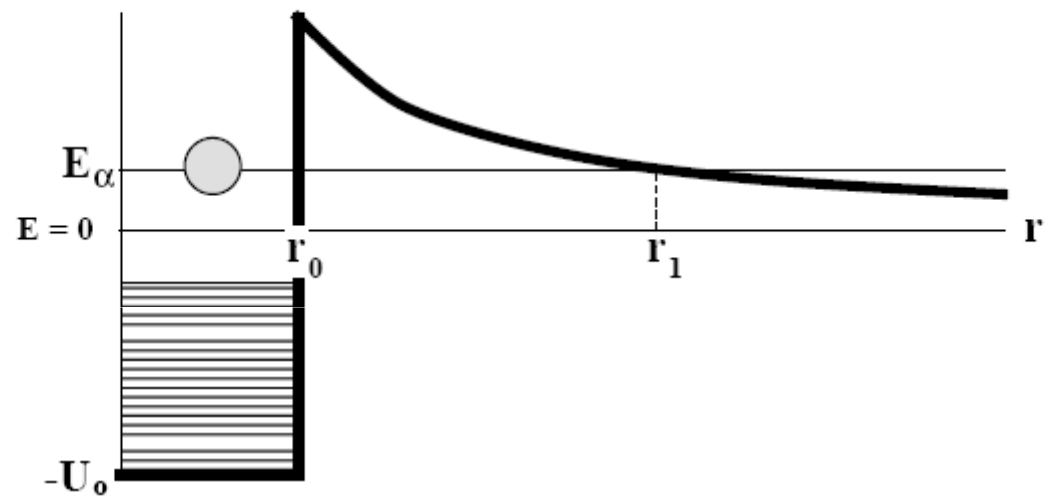


Figura 1.6



**Figura 14.9.** Vita media  $\tau$  nel decadimento  $\alpha$  in funzione dell'energia della particella  $\alpha$  emessa.  $\tau$  varia per oltre 20 ordini di grandezza, dai microsecondi a miliardi di anni, a causa della forte dipendenza dal  $E_\alpha$  nell'effetto tunnel. Vi è inoltre una piccola dipendenza dallo  $Z$  del nucleo.

$$\log_{10}(1/\tau) = a - bZE_\alpha^{-1/2} ;$$



**Figura 14.10.** Spiegazione delle grandezze caratteristiche nel modello di Gamow per il decadimento  $\alpha$  ed utilizzate nel testo.

# Decadimento $\beta$



▪ L'emissione  $\beta$  è dovuta alle interazioni deboli, che tratteremo in dettaglio in seguito (fisica subnucleare)

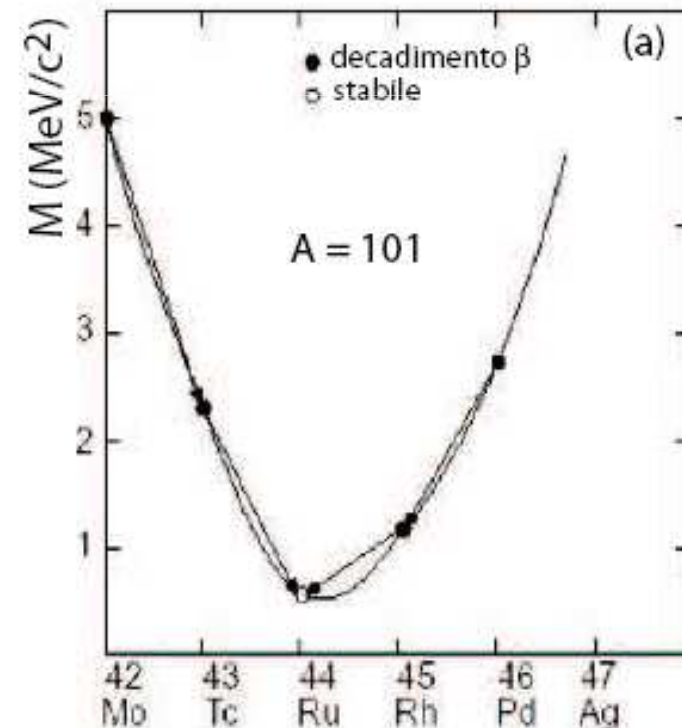
▪ Masse nucleari in funzione di  $Z$  per  $A$  costante  $\rightarrow$  parabola di massa per  $A$  dispari. Per  $A$  pari le masse dei nuclei pari-pari e dispari-dispari si trovano su due parabole spostate verticalmente (di  $2a_p/A^{1/2}$ )

$$M(A, Z) = Nm_n + Zm_p - BE(Z, A) = (b_0 + b_1A \pm a_4/A^{1/2}) - b_2Z + b_3Z^2 \quad (14.37)$$

# Decadimento $\beta$ - nuclei di massa dispari

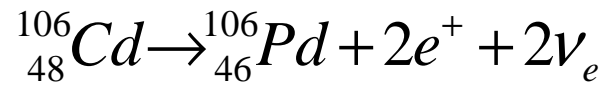
reazione	$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$	$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e$
condizione	$M(A, Z) > M(A, Z + 1)$	$M(A, Z) > M(A, Z - 1) + 2m_e$
esempio	${}^{101}_{42}\text{Mo} \rightarrow {}^{101}_{43}\text{Tc} + e^{-} + \bar{\nu}_e$	${}^{101}_{45}\text{Rh} \rightarrow {}^{101}_{44}\text{Ru} + e^{+} + \nu_e$

- La massa del neutrino elettronico è così piccola ( $\ll eV/c^2$ ) che può essere trascurata.
- La reazione del decadimento  $\beta^+$  è **possibile solo all'interno di un nucleo, perchè la massa a riposo del neutrone è maggiore di quella del protone.**



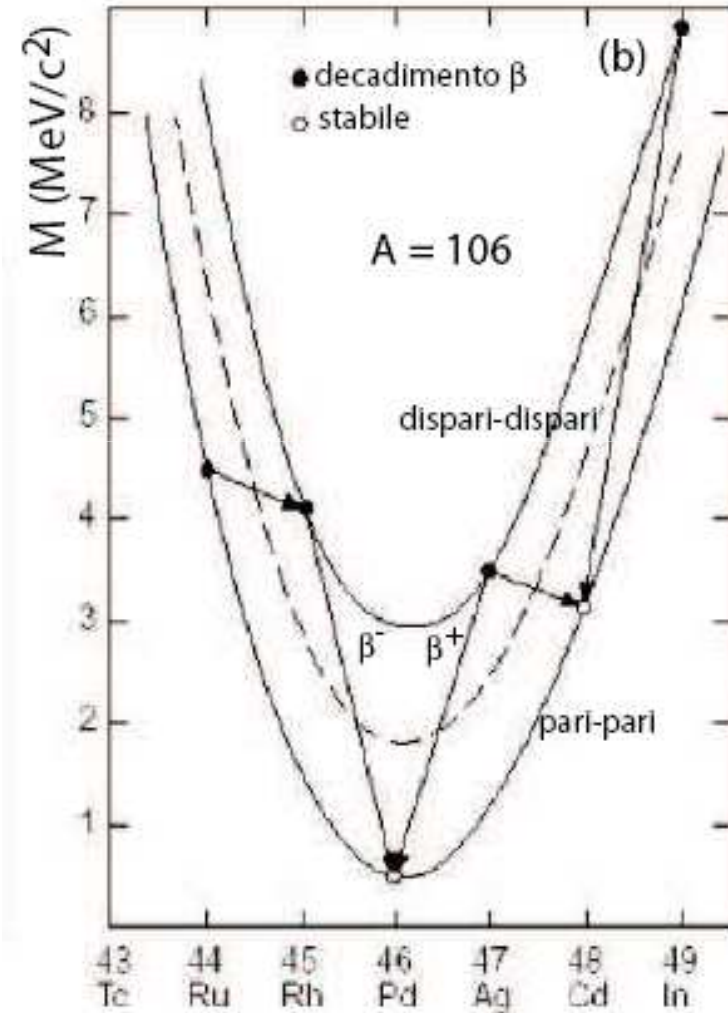
# Decadimento $\beta$ - nuclei di massa pari

• Talvolta c'è più di un nucleo pari-pari  $\beta$  stabile. Ad esempio, nel caso di  $A=106$ , ci sono  $^{106}_{46}\text{Pd}$  e  $^{106}_{48}\text{Cd}$ . Il primo è genuinamente stabile, poiché è nel minimo della parabola. L'isotopo Cd potrebbe invece decadere via **doppio decadimento  $\beta$** :

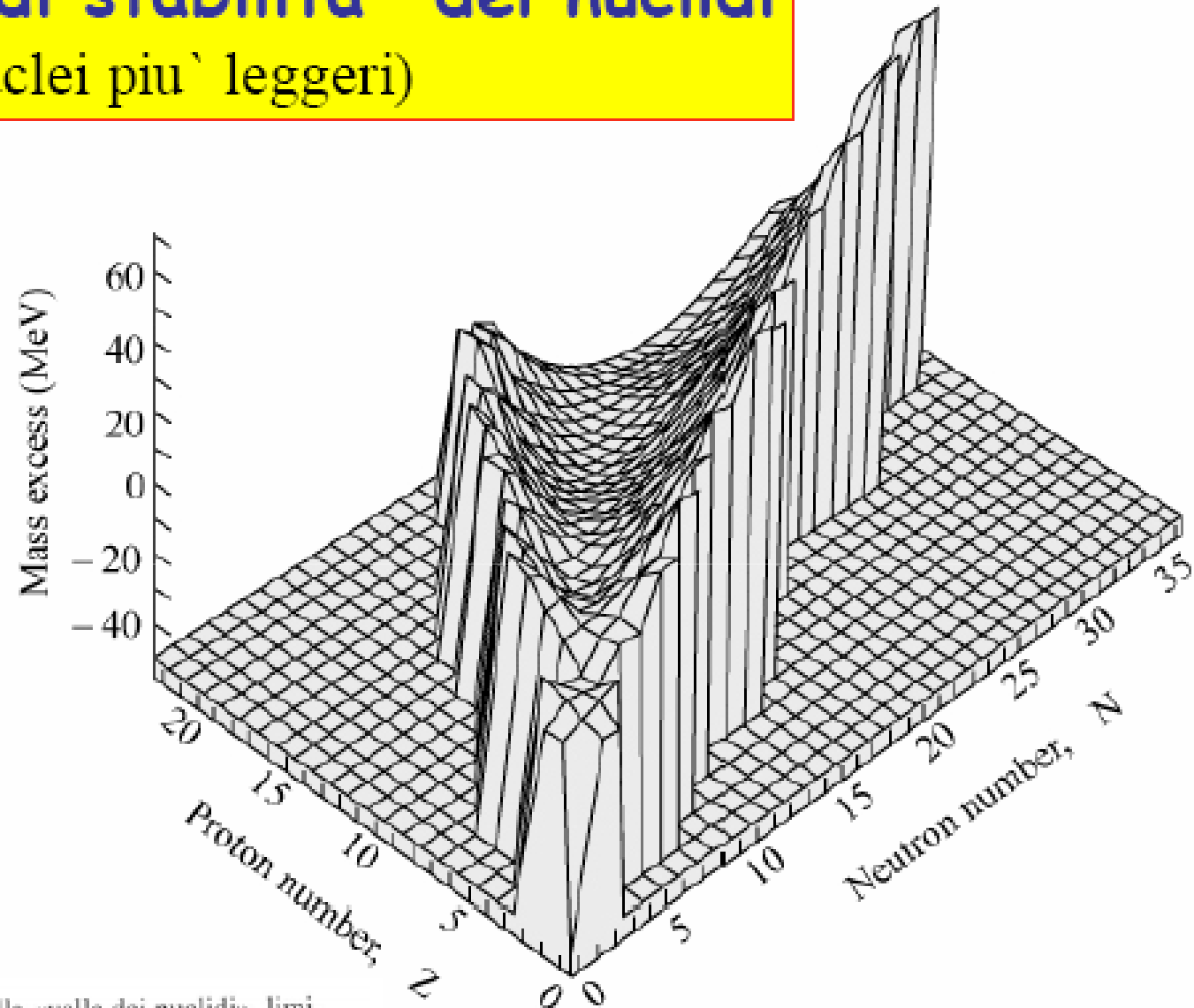


La probabilità di tale processo è così piccola che  $^{106}_{48}\text{Cd}$  può essere considerato stabile.

• I nuclei dispari-dispari per  $A > 14$  non sono mai stabili, poiché essi hanno sempre un vicino pari-pari più fortemente legato. I nuclei leggeri  $^2_1\text{H}$ ,  $^6_3\text{Li}$ ,  $^{10}_5\text{B}$ ,  $^{14}_7\text{N}$  sono stabili, poiché l'aumento dell'energia di asimmetria supererebbe la diminuzione dell'energia di accoppiamento.



# Valle di stabilita` dei nuclidi (per i nuclei piu` leggeri)



**FIGURA 50.11** Vista parziale della «valle dei nuclidi», limitata ai nuclidi più leggeri. Le altezze sono proporzionali all'eccesso di massa, definito come  $(m - A)c^2$ , ove  $m$  è la massa atomica in unità u.



# Decadimento $\gamma$



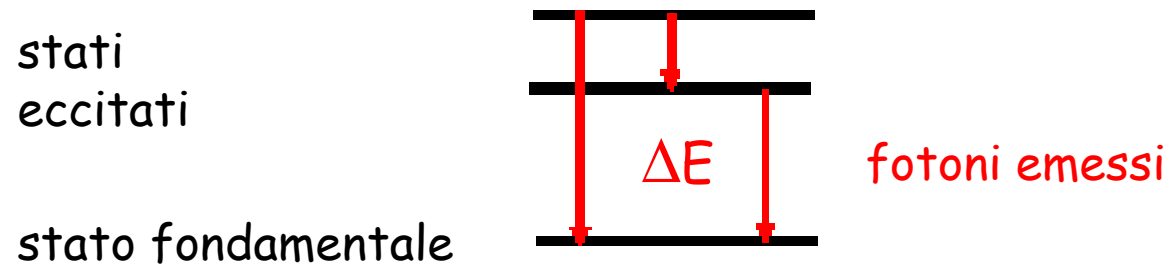
• La trattazione delle transizioni radiative nei nuclei è generalmente simile a quella per gli atomi, eccetto che

Atomo  $E_\gamma \sim \text{eV}$   $\lambda \sim 10^8 \text{ fm}$   $\Gamma \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$   
Solo le transizioni di dipolo sono importanti

Nuclei  $E_\gamma \sim \text{MeV}$   $\lambda \sim 10^2 \text{ fm}$   $\Gamma \sim 10^{16} \text{ s}^{-1}$   
Sono importanti anche transizioni di ordine superiore. Il moto collettivo di molti p porta a rate di transizione maggiori

Due tipi di transizioni:

- **Transizioni elettriche (E):** sono dovute a una carica oscillante che causa un'oscillazione del campo elettrico esterno
- **Transizioni magnetiche (M):** sono dovute a una corrente o un momento magnetico variabile che causano un campo magnetico variabile

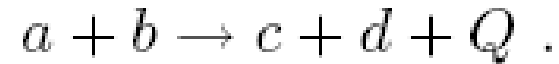


	$\Delta E$	$\lambda$	
Atomo	$\approx 10 \text{ eV}$	$\approx 10^{-7} \text{ m}$	ottico
	$\approx 10 \text{ keV}$	$\approx 10^{-10} \text{ m}$	raggi X
Nucleo	$\approx \text{MeV}$	$\approx 10^{-12} \text{ m}$	raggi $\gamma$

L

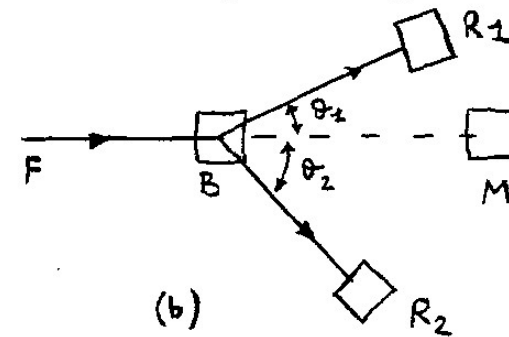
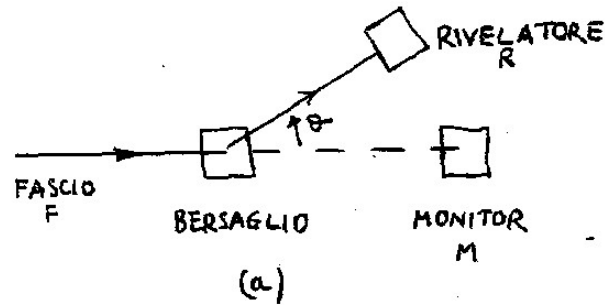
K

## 9. Reazioni nucleari



- Reazione nucleare stimolata cedendo al nucleo energia tramite una particella incidente.
- Si possono anche avere processi di diffusione in cui  $a=b$  : se le loro energie cinetiche sono uguali, abbiamo una diffusione elastica.
- Si possono avere non solo reazioni endotermiche, ma anche esotermiche
- Prima reazione: Rutherford 1919  ${}^4\text{He}_2 + {}^{14}\text{N}_7 \rightarrow {}^{17}\text{O}_8 + {}^1\text{H}_1$   
 $Q = -1.19 \text{ MeV}.$

- Schema sperimentale in laboratorio



- Reazioni Esotermiche : forniscono energia spesso
- Endotermiche: occorre fornire energia a+b c+d

**Esercizio 1.** Reazione chimica  $\text{Na} + \text{Cl} \rightarrow \text{NaCl}$  ; energia liberata per mole di  $\text{NaCl} = 9.8 \times 10^4$  cal. Calcolare energia liberata per 1 molecola

$$E = 9.8 \times 10^4 \frac{\text{cal}}{\text{mole}} \times \frac{1 \text{ mole}}{6 \times 10^{23} \text{ molecole}} \times 4.18 \frac{\text{Joule}}{\text{cal}} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}} \cong 4.3 \text{ eV / molecola}$$

- **Esercizio.** 2 protoni sono sparati uno contro l'altro con uguale velocità'. Calcolare l'energia cinetica necessaria per farli arrivare a 1fm con  $E_{cin} = E_{pot.}$ . A quale temperatura di un oggetto caldo corrisponde l'emissione di un protone di quella energia cinetica?

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = \frac{1}{2} 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \frac{(1.6 \times 10^{-19} C)^2}{10^{-15} m} \cong$$

$$\cong 1.13 \times 10^{-13} \frac{J}{1.6 \times 10^{-19} eV} \cong 0.71 MeV$$

Questa energia cinetica corrisponde a

$$T = \frac{2 \langle E_{cin} \rangle}{3 K} = \frac{2 \cdot 1.13 \times 10^{-13}}{3 \cdot 1.38 \times 10^{-23}} \cong 5.5 \times 10^9 K$$

$$[T(^{\circ}K) = \frac{\langle E_{cin} \rangle}{8.617 \times 10^{-5} eV/^{\circ}K} = 11605 E_{cin}(eV)]$$

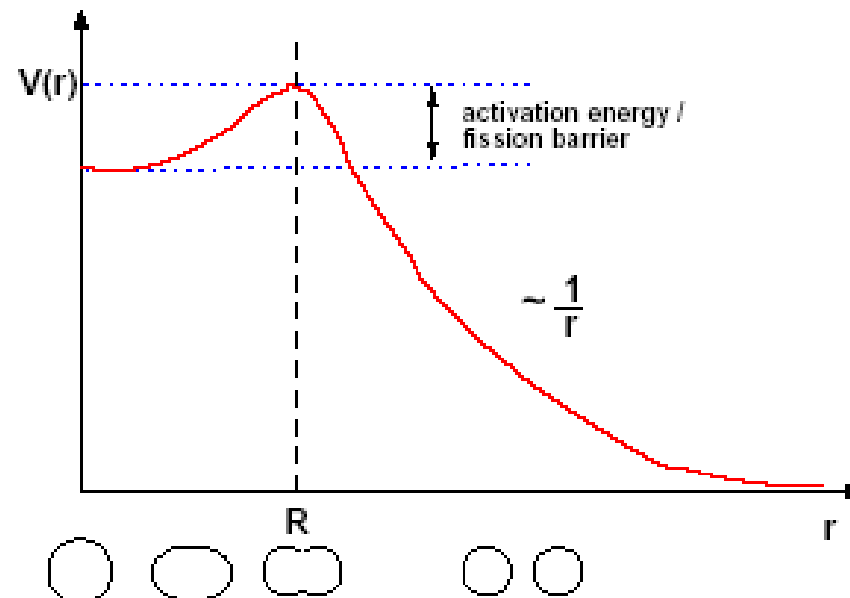


# Fissione spontanea



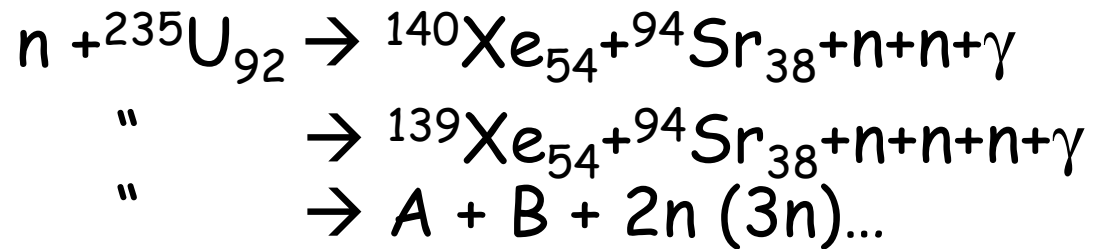
- Per nuclei più pesanti del ferro, EB diminuisce al crescere della massa. Un nucleo con  $Z > 60$  può perciò, in linea di principio, **suddividersi in due nuclei più leggeri**.
- **Barriera di potenziale** → reazioni molto improbabili.
- Probabilità di fissione spontanea significativa → **isotopi dell'uranio**.

- L'altezza della barriera per fissione determina la probabilità di fissione spontanea
- Nella fissione vengono prodotti neutroni ed energia (gamma)



# Fissione nucleare

• E' possibile indurre artificialmente la fissione nucleare bombardando particolari nuclei (ad es.  $^{235}\text{U}$ ) con neutroni:

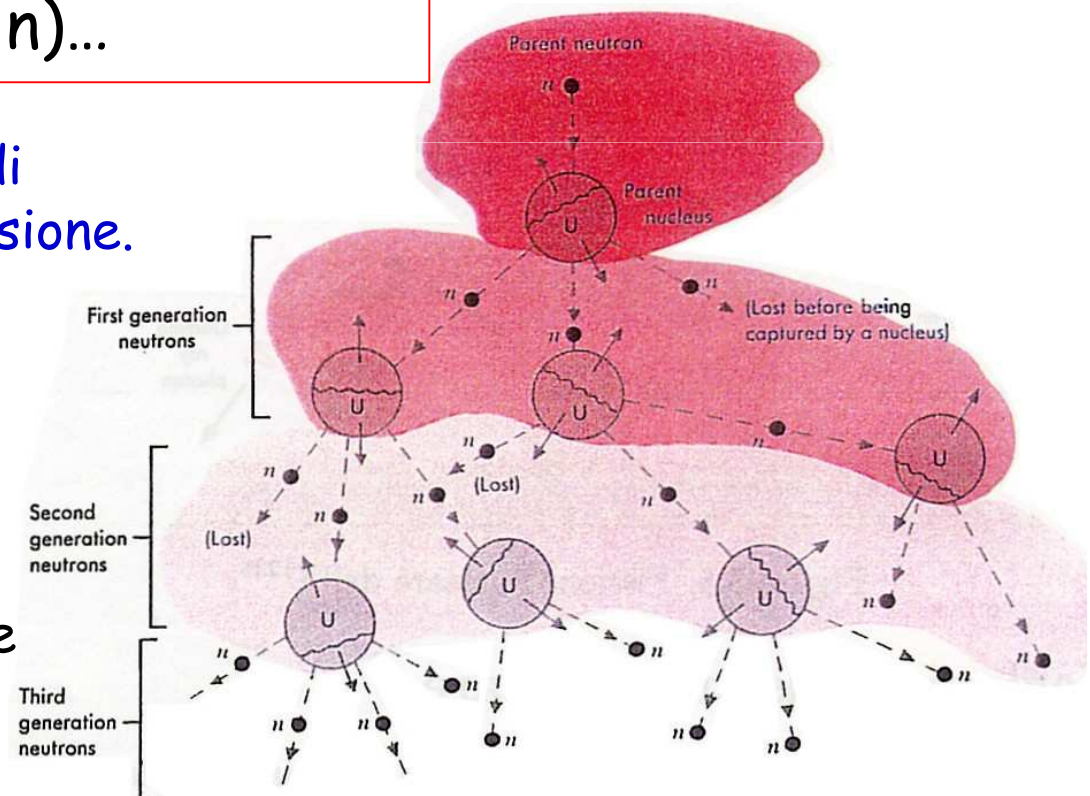


• Sono liberati circa 200 MeV di energia per ogni reazione di fissione.

Reazioni a catena

Esplosiva  $\rightarrow$  bomba a fissione

Controllata  $\rightarrow$  reattore nucleare



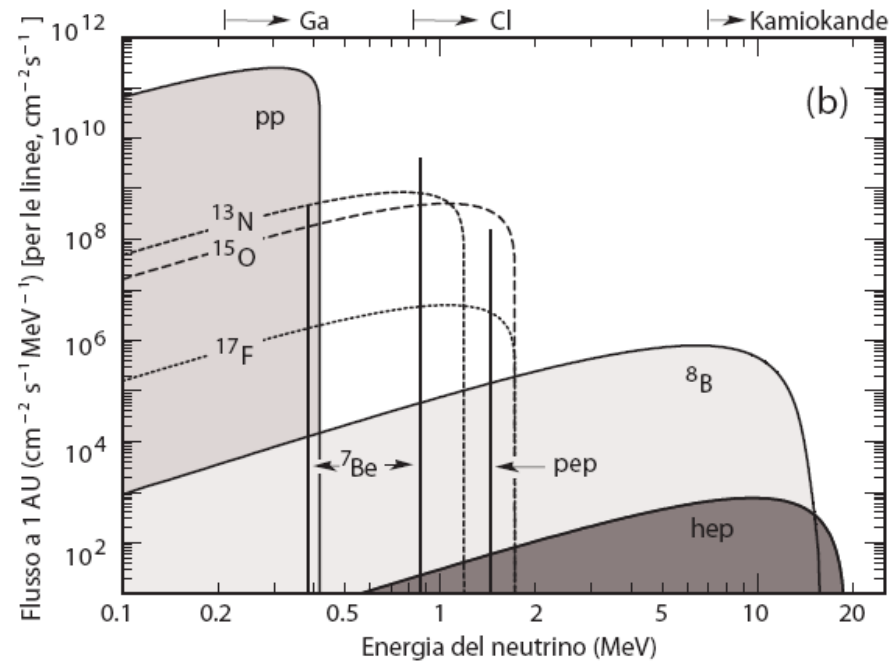
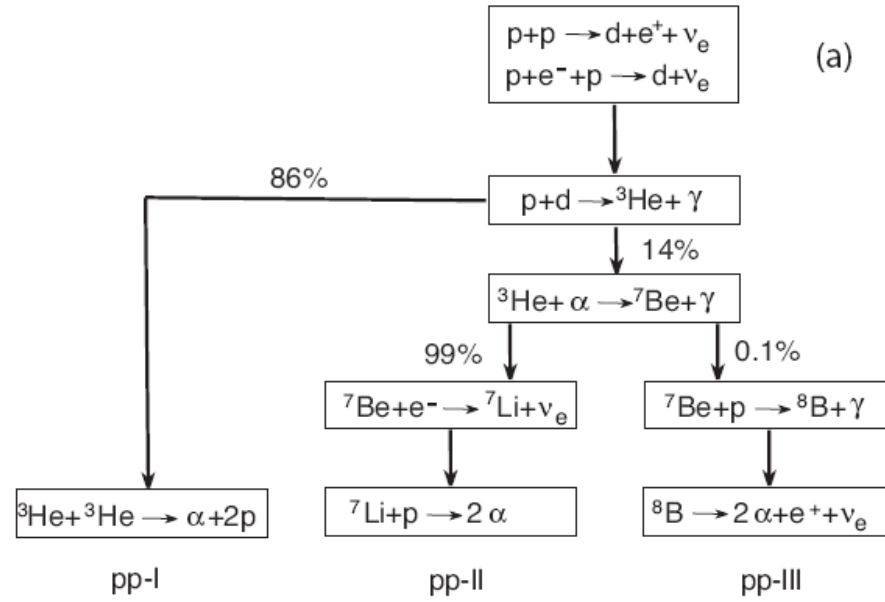


22 ottobre 1934: la prima rudimentale fissione nucleare della storia era stata realizzata da un gruppo di fisici italiani guidati da Enrico Fermi (i cosiddetti "ragazzi di via Panisperna") mentre bombardavano dell'uranio con neutroni rallentati per mezzo di paraffina. Il gruppo di fisici però non si accorse di ciò che era avvenuto ma ritenne invece di aver prodotto degli elementi transuranici. Alla fine di Dicembre 1938, due chimici nucleari tedeschi, Otto Hahn e suo giovane assistente Fritz Straßmann, furono i primi a realizzare che un nucleo di uranio 235, colpito quando assorbe un neutrone si rompe in due o più frammenti ed ha luogo così la fissione del nucleo. A questo punto per i chimici e fisici nucleari di tutto il mondo fu chiaro che si poteva usare questo processo, costruendo dei reattori che contenessero la reazione, per produrre energia o degli ordigni nucleari (la prima bomba atomica esploderà nel 1945).

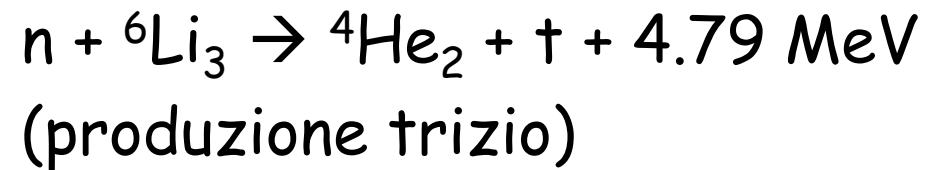
- I frammenti di fissione sono sempre elementi altamente radioattivi: prima di raggiungere la stabilità, vanno incontro a decadimenti beta e gamma successivi, con tempi di dimezzamento anche molto lunghi
- Problema delle scorie dei reattori nucleari

# Fusione nucleare

- La **fusione** è il processo nucleare che alimenta il sole e le stelle consistente nell'unione di due atomi leggeri in uno più pesante.
- In questo tipo di reazione il nuovo nucleo costituito ha massa totale minore della somma delle masse reagenti con conseguente liberazione di alta energia che conferisce al processo caratteristiche fortemente esotermiche.
- Fusione tra due nuclei avviene se questi sono sufficientemente vicini (forza nucleare forte predomina sulla repulsione coulombiana).
- L'energia necessaria per superare la repulsione coulombiana può essere fornita alle particelle portandole in condizioni di altissima pressione (altissima temperatura e/o altissima densità).
- La fusione nucleare, nei processi terrestri, è usata in forma incontrollata per le bombe ad idrogeno. Si sta cercando di realizzarla in forma controllata nei reattori a fusione, ancora sperimentali.



1a reazione al centro del sole  
reazione successive



Molto interessante il sito:

<http://www.fusione.enea.it/>

ITER: quando energia da fusione?

# Argomenti trattati nel libro in:

- Cap. 1 (Introduzione)
- Cap. 4 (Legge decadimento radiattiva)
- Cap. 14 (Interazioni tra nucleoni)