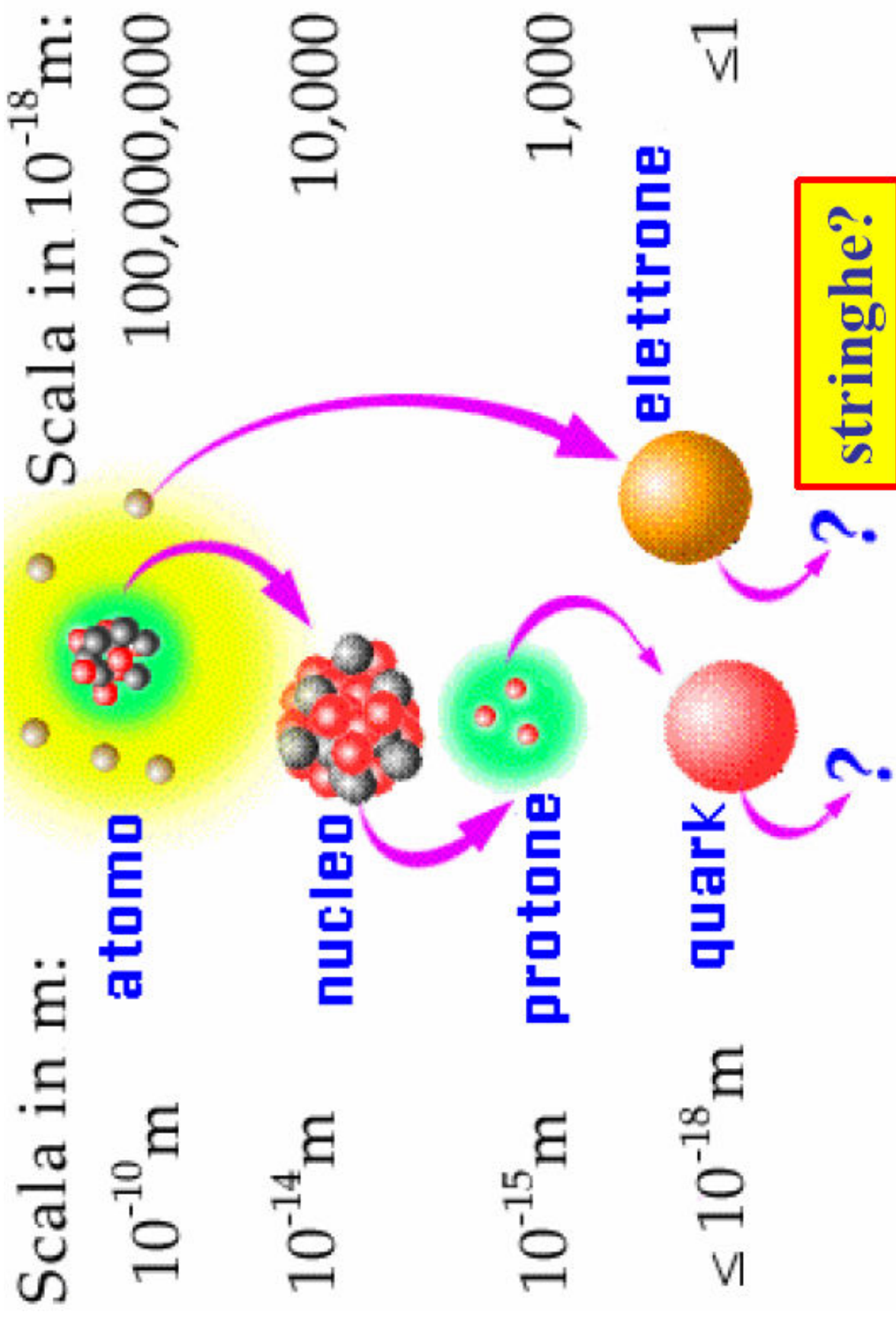


# Cenni di fisica nucleare

G. Giacomelli  
Bologna, marzo 2005

1. Proprietà generali dei nuclei
2. Distribuzione di carica e massa
3. Forze nucleari
4. Modelli nucleari
5. Reazioni nucleari
6. Decadimenti radioattivi
7. Alcuni argomenti di attualità



# 1. Proprietà generali dei nuclei

Nuclei atomici (nuclidi): aggregati di  $\begin{cases} Z \text{ protoni} \\ N \text{ neutroni} \end{cases}$

Numero di massa  $A=Z+N$  (=numero di nucleoni)

Carica elettrica di un nucleo  $Q=Ze$

Isobari nuclidi diversi con stesso  $A$

[ $A=12$ C $_{Z=6}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ]

Isotopi nuclidi diversi con stesso  $Z$

Isotoni nuclidi diversi con stesso  $N$

Nuclei stabili

Per  $N \leq 20$

$Z = N$

Per  $N > 20$

$N \cong 1.4 Z$

# Nuclei stabili

A	Z	N	Numero nuclei stabili
Pari	Pari	Pari	157
Dispari	Pari	Dispari	53
Dispari	Dispari	Pari	50
Pari	Dispari	Dispari	4
		Totale	264

+ 1500 nuclei instabili

Indip. dalla carica



**Nuclei particolarmente stabili: numeri magici**

N oppure Z = 2, 8, 10, 18

20, 28, 50, 82, 126

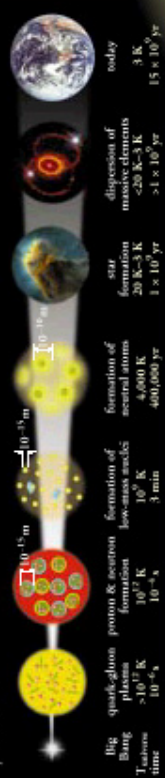
[ Nel modello a shell corrispondono a "shell chiuse",  
situazioni molto stabili ]



# Nuclear Science

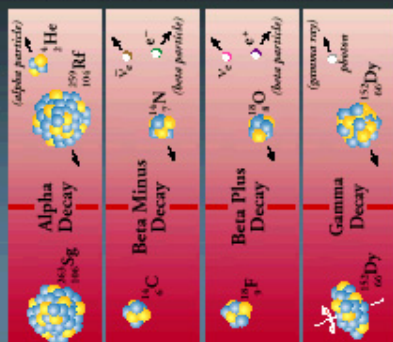
## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-35}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, photons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the universe cooled to about  $10^9$  K, the soup condensed into protons, neutrons, and deuterium. 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. Expanding stars compressed their cores, where massive elements and dispersed them into space. Our earth was formed from supernova debris.



## Radioactivity

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  $\alpha$  particle, an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and an antineutrino (in a beta minus decay) or captures an electron and emits a neutrino (in a beta plus decay). A positron is the same as an electron, but with a positive charge. Antineutrinos are composed of anti-leptons, both alpha and beta decay 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.



## Chart of the Nuclides

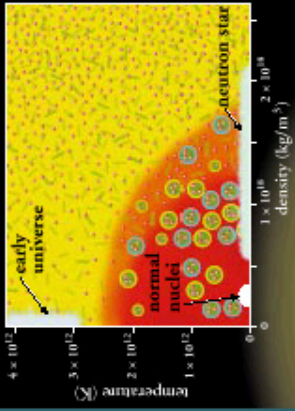
The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (2, 8, 20, 28, 50, 82, and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond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



**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the mass, shape, 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?

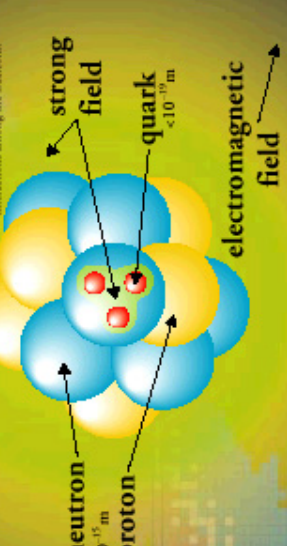
## Phases of Nuclear Matter

Nuclear matter can exist in several phases. When collisions occur inside individual protons and neutrons may evaporate from the nuclear fluid. At sufficiently high temperature or density, a gas of nucleons (and background) forms. At even more extreme conditions, individual nucleons may cease to have meaningful identities, merging into the quark-gluon plasma (yellow background). Many experiments are trying to identify the quark-gluon plasma.



## The Nucleus

At the center of the atom is a nucleus formed from nucleons—protons and neutrons. Each nucleon is made from three quarks held together by their strong interactions, which are mediated by gluons. In turn, the nucleus is held together by the strong interactions between the gluon and quark constituents of neighboring nucleons. Nuclear physicists often use the exchange of meson particles which consist of a quark and an antiquark, such as the pion—to describe interactions among the nucleons.



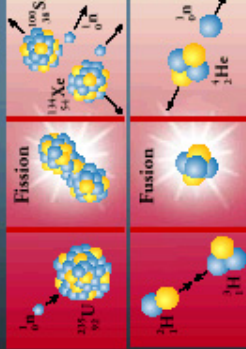
In an atom, electrons range around the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electrons could were drawn to scale, this chart would cover a small town.

## Unstable Nuclei

Stable nuclides 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 extreme nuclear conditions. In an experiment from this chart, scientists created about 2,900 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 1000 more to be discovered with  $Z \leq 112$ .

Scientists first synthesized Element 112 in a particle accelerator experiment. They identified it by observing its characteristic alpha particle decay chain.

## Nuclear Energy



In the early stages of nuclear evolution of our sun and other stars, hydrogen fuses 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 neutrino rate is about half of what contemporary theory predicts. Ongoing experiments are trying to solve this mystery.

## Applications

### Space Exploration

Scientists used alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. They used nuclear reactions to heat and melt the rocks, and used alpha particles to analyze the composition of the rocks.

### Radioactive Dating

Radioactive isotopes such as  $^{14}\text{C}$  and  $^{238}\text{U}$  are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of artifacts at the site, researchers used radiocarbon dating to determine that the site was occupied about 10,000 years ago.

### Nuclear Medicine

Radioactive isotopes such as  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  and  $^{18}\text{F}$  are used to study the structure and function of organs and tissues. Technetium-99m ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) is a gamma emitter used in diagnostic imaging.

### Nuclear Reactors

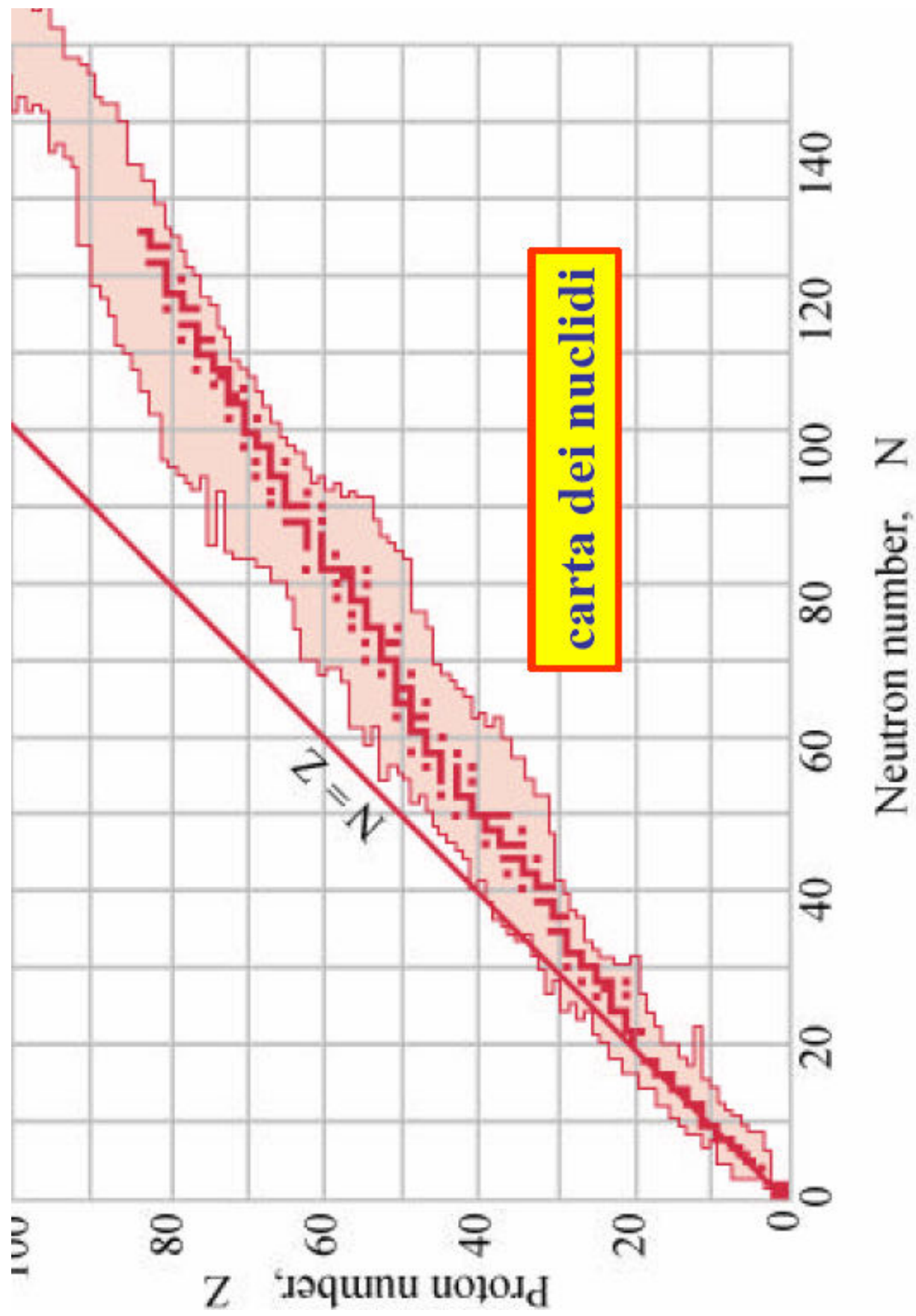
Nuclear reactors use the fission of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  to produce electric power. Reactors and their associated applications are used in many areas, including the production of isotopes for medical and industrial use.

### 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 triggers the alarm.

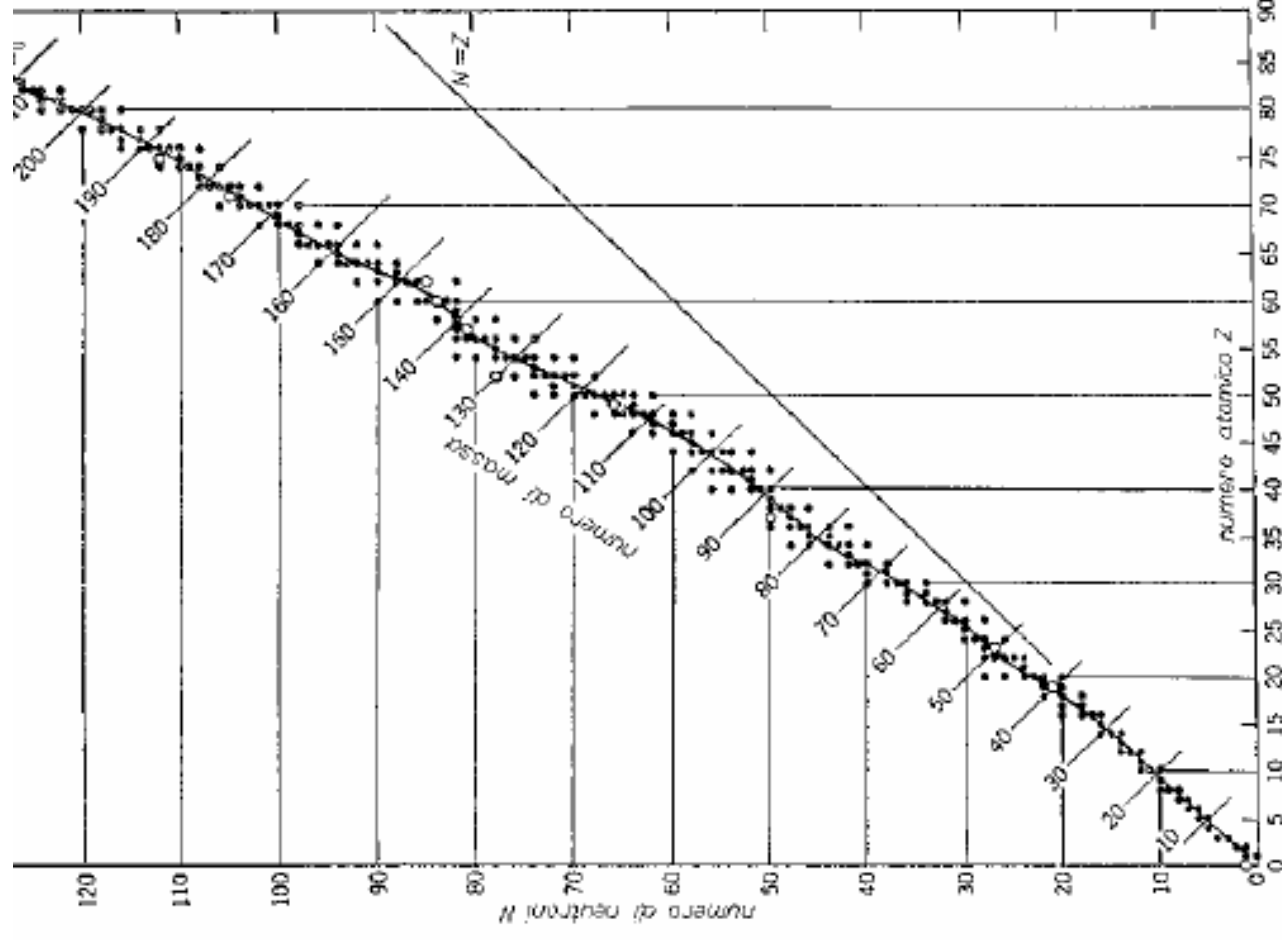
### Magnetic Resonance Imaging

Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of nuclear magnetic resonance. This technique accurately shows structural images of the human body.



La distribuzione degli isotopi naturali indica che solo gli elementi leggeri hanno ugual numero di protoni e neutroni; al crescere del peso atomico gli isotopi hanno un numero di neutroni maggiore del numero di protoni.

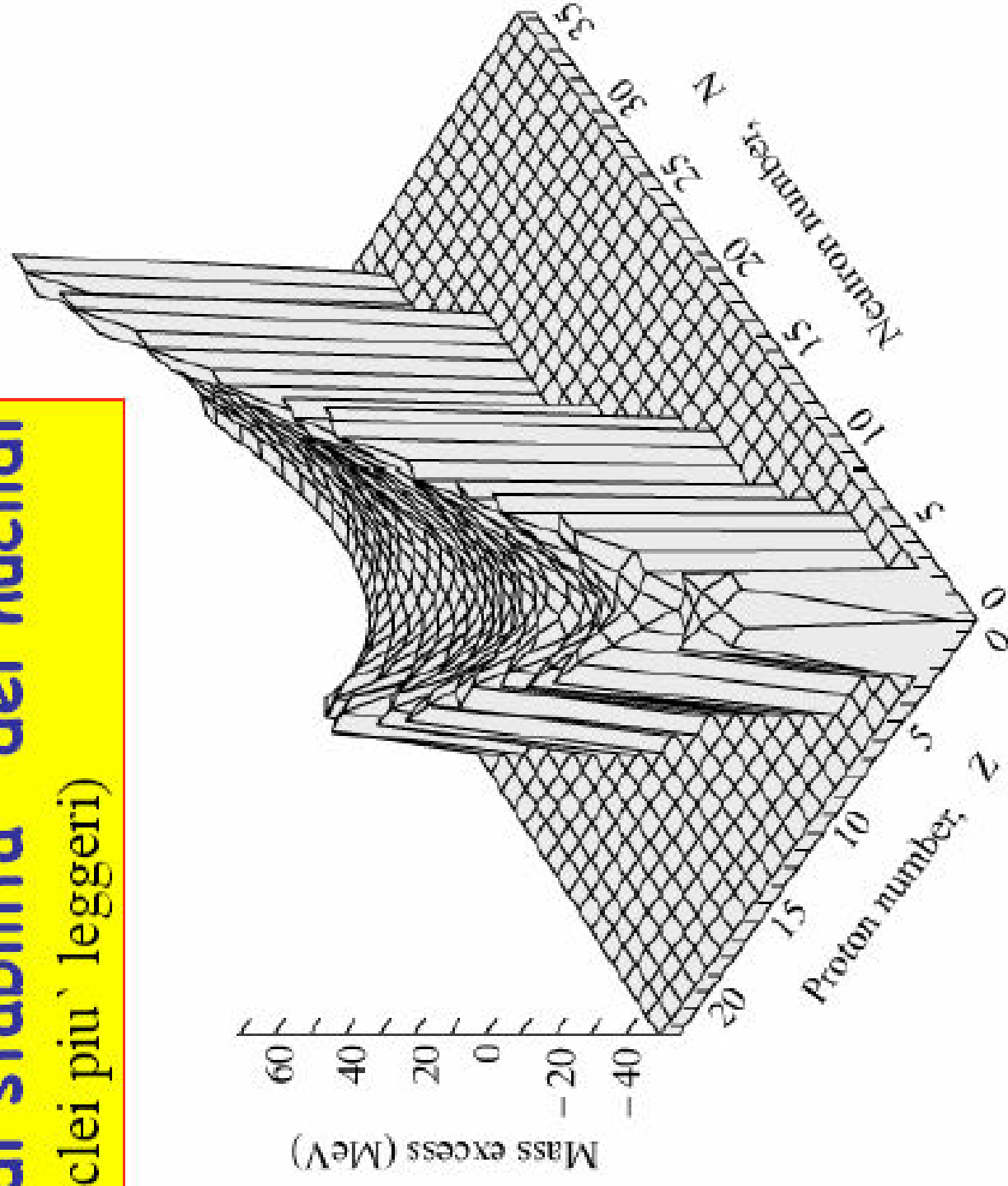
In figura, le linee verticali rappresentano gli isotopi, le orizzontali gli isotoni e quelle oblique gli isobari.





# Valle di stabilità` dei nuclidi

(per i nuclei piu` leggeri)





*numero atomico Z*

*numero di massa in u.m.a.*

*simbolo*

*nome dell'elemento*

1  
1,008  
**H**  
idrogeno

2  
4,003  
**He**  
elio

3  
6,941  
**Li**  
litio

4  
9,012  
**Be**  
berillio

5  
10,811  
**B**  
boro

6  
12,011  
**C**  
carbonio

7  
14,007  
**N**  
azoto

8  
15,994  
**O**  
ossigeno

9  
18,998  
**F**  
fluoro

10  
20,180  
**Ne**  
neon

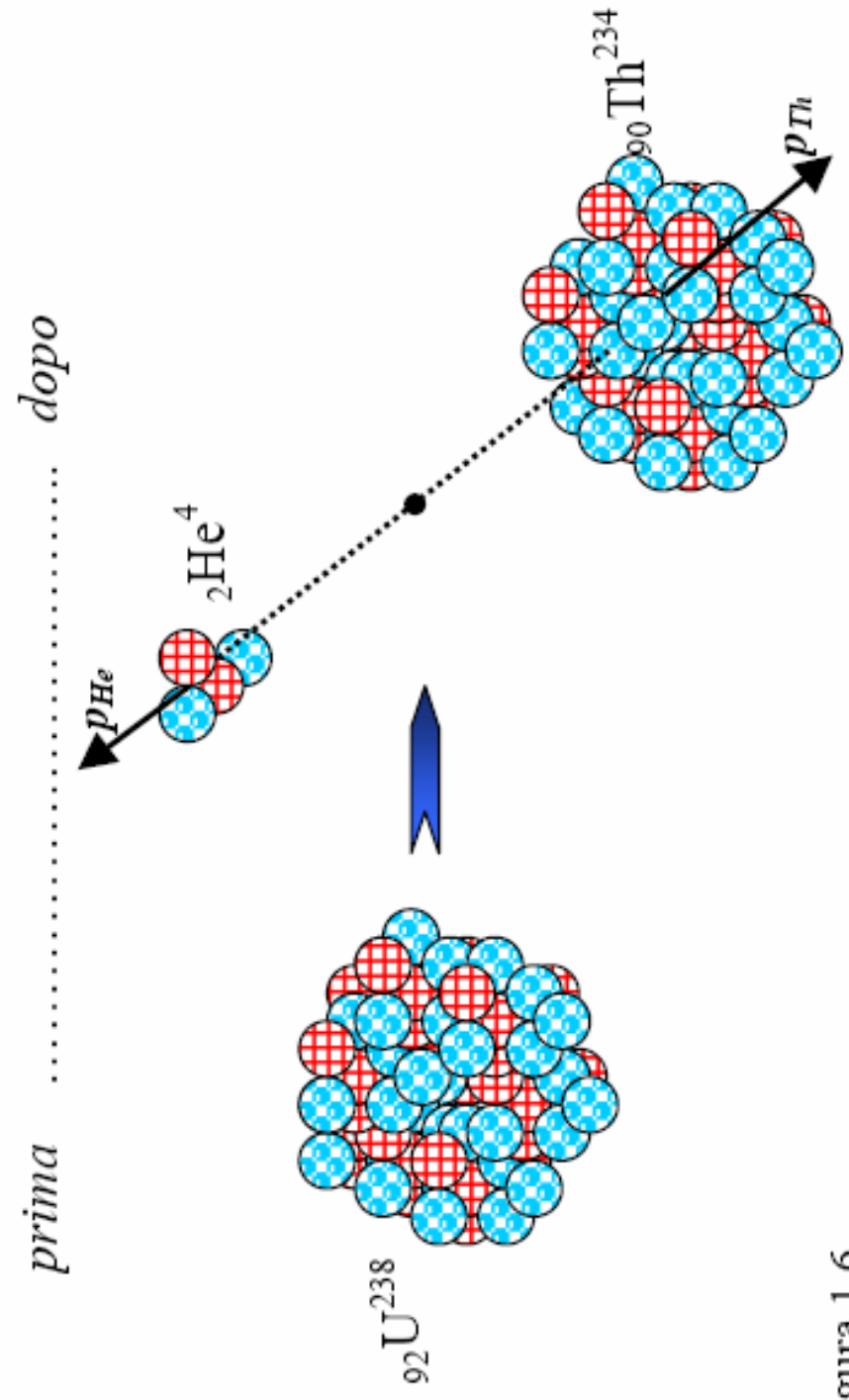
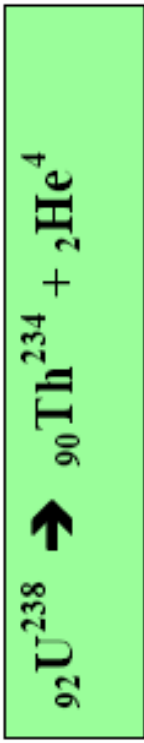


Figura 1.6



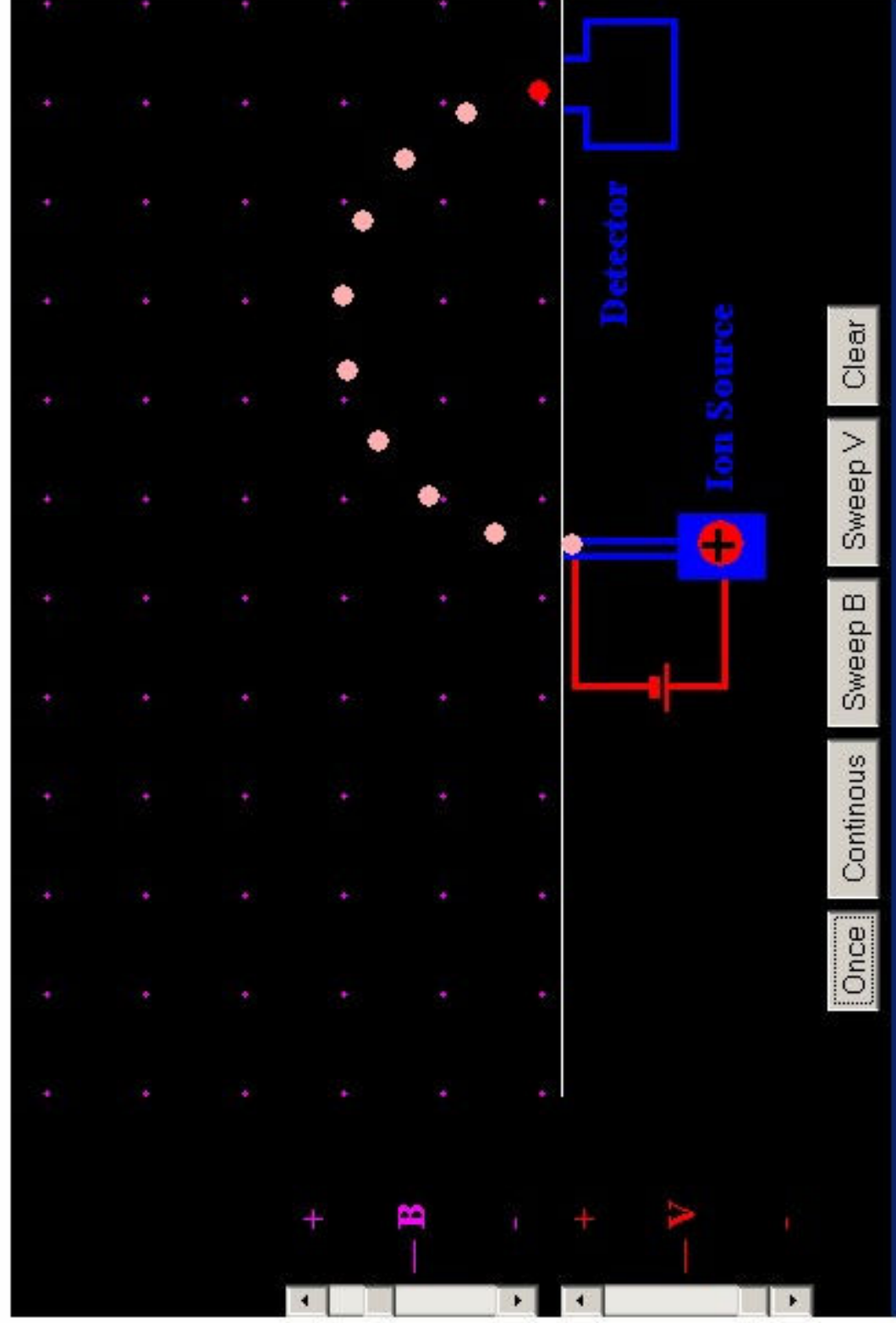
## Beta Minus Decay



## Beta Plus Decay



# Spettrometro di massa



# Energia di legame $B(Z,A)$

Def.  $M(Z,A)c^2 = Z m_p c^2 + N m_n c^2 - B(Z,A)$

Formula semiempirica di Weiszacker } Modello a goccia  
liquida quantistica

$$B(Z,A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{4A} - \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

Termine di volume

Coulombiano

di "asimmetria" tra  $N_n$  e  $N_p$

accoppiamento pp, nn  
effetto pari-dispari

$a_v \cong 15.6$  MeV/ $c^2$

$a_s \cong 17.2$  "

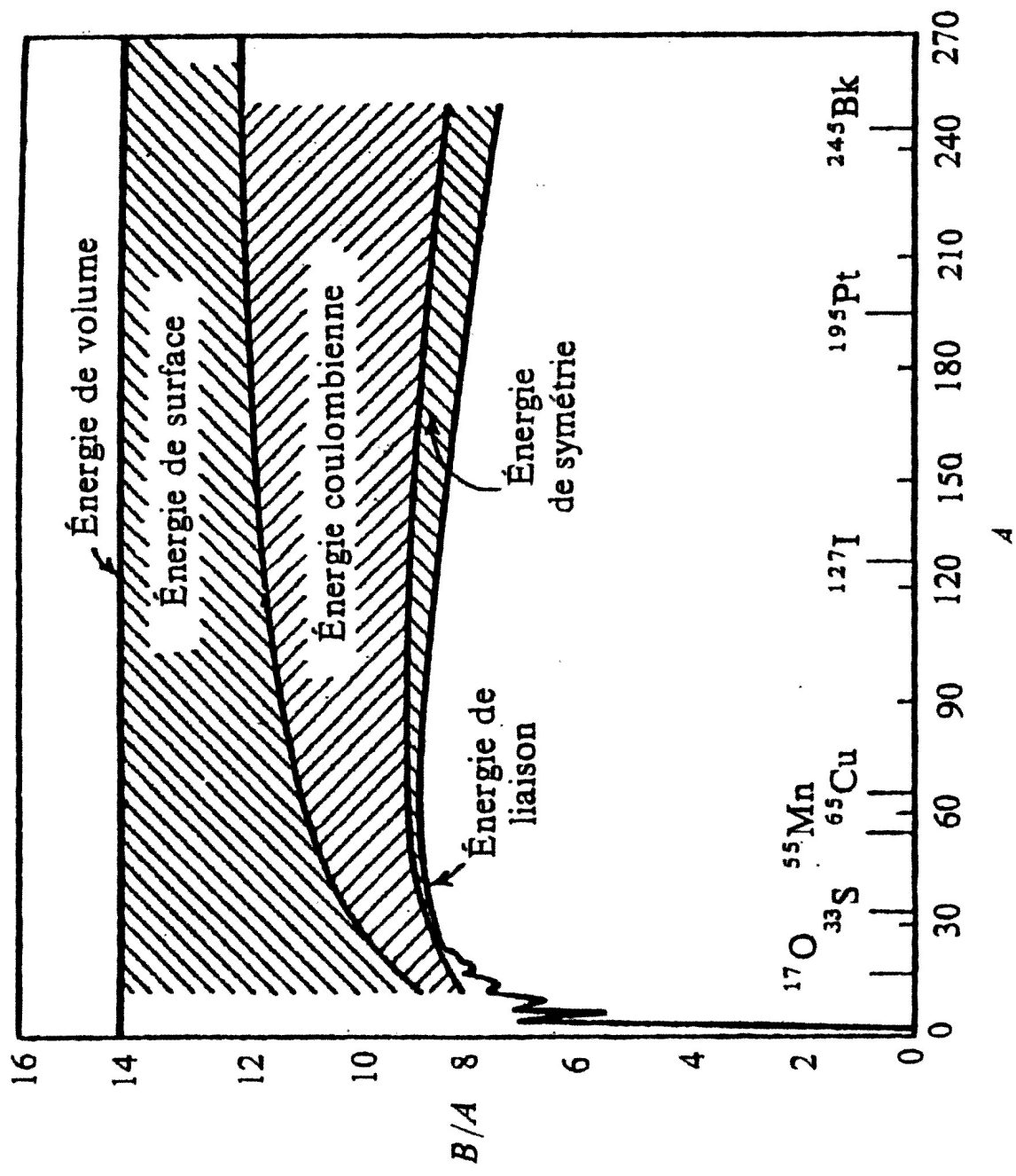
$a_c \cong 0.71$  "

$a_a \cong 93$  "

Fit dei dati alla formula  $B(Z,A)$   
in un certo intervallo di  $Z,A$

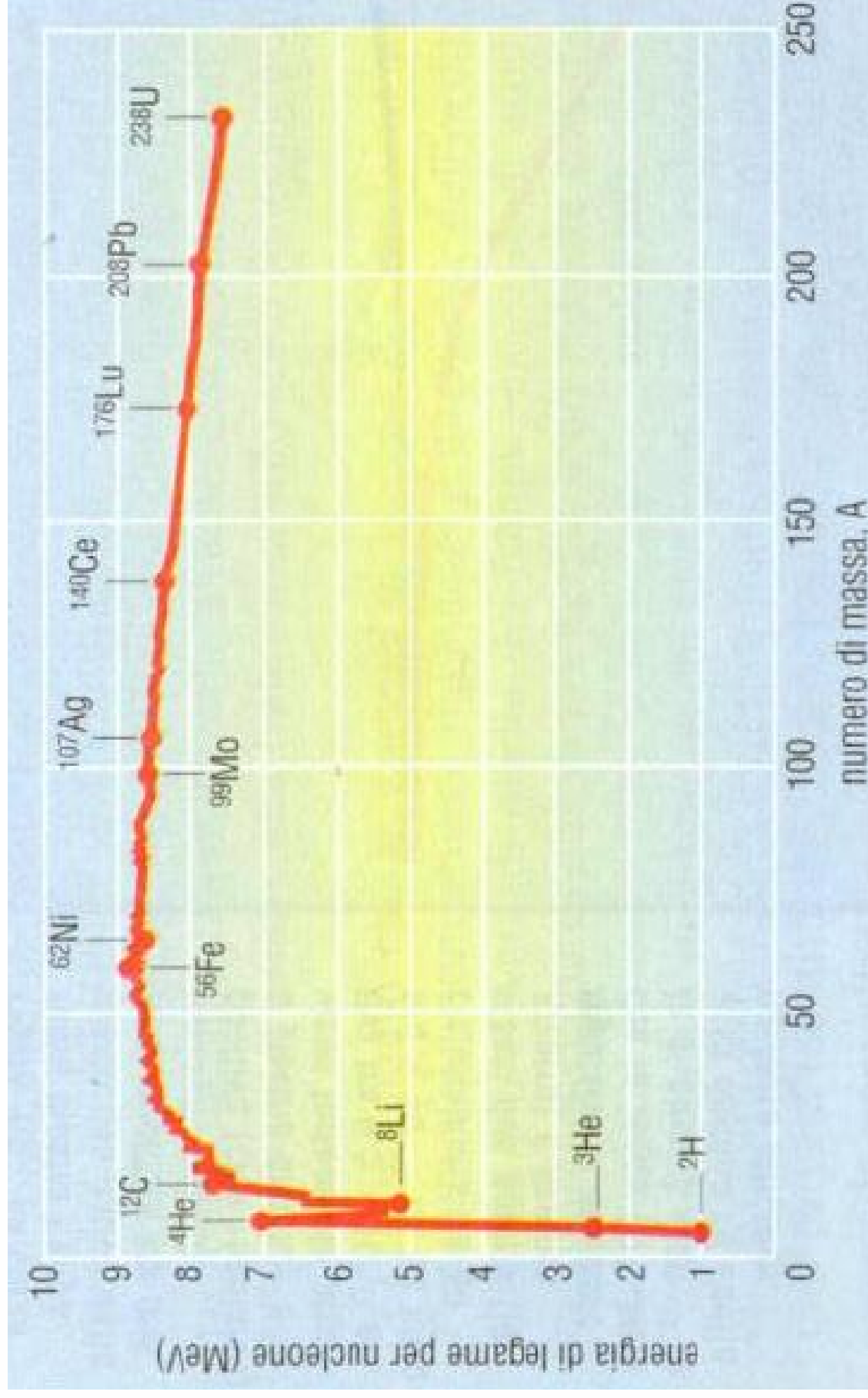
$$\delta = \begin{cases} -11 \text{ MeV} & Z_{\text{pari}} N_{\text{pari}} \\ 0 & A_{\text{dispari}} \text{ (nuclei pari-dispari)} \\ +11 & Z_{\text{dispari}} N_{\text{dispari}} \end{cases}$$



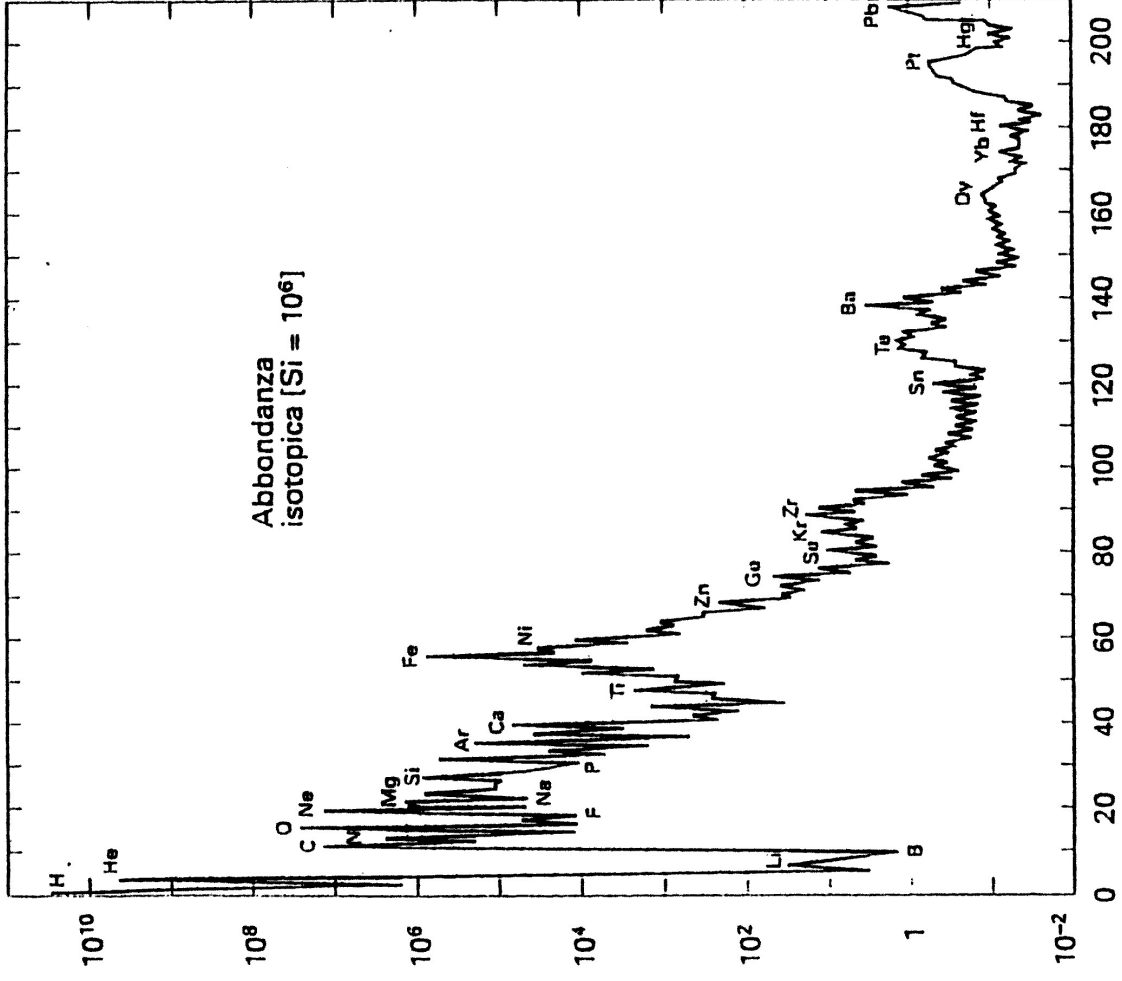


Contributi dei vari termini della formula semiempirica di Weizsacker

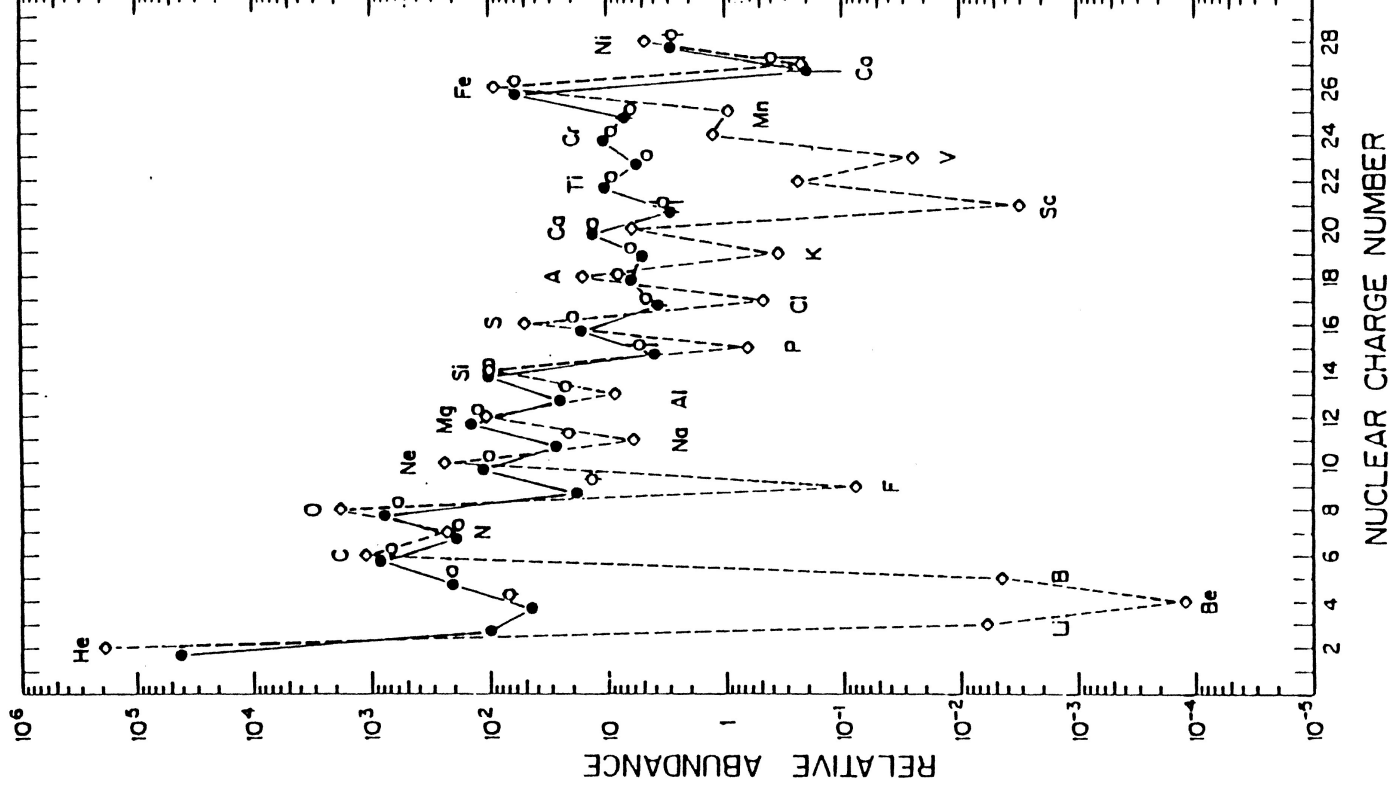
# Energia di legame per nucleone in funzione di A



# Abbondanza relativa degli elementi nel sistema solare vs A



# Abbondanza relativa degli elementi nel sistema solare e nei raggi cosmici in funzione di Z



## 2. Dimensioni nucleari

- Distribuzione della carica elettrica nei nuclei misurata tramite urto  $e^- + \text{Nucleo} \rightarrow e^- + \text{Nucleo}$ .  
Si ottiene la formula di Saxon-Woods

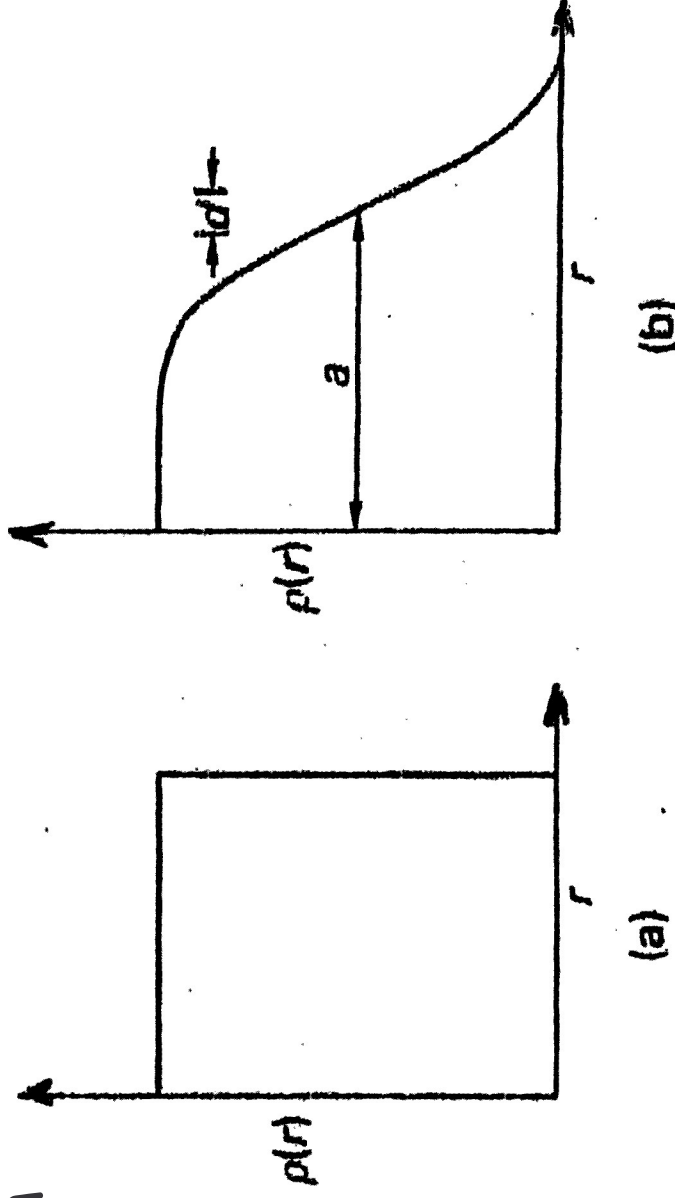
$$\rho_{EM}(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{-(r-a)/d}}, \quad \text{dove} \quad \rho_{EM} = \frac{dq}{dv}$$

$$a = (1.18 A^{1/3} - 0.48) \text{ fm}$$

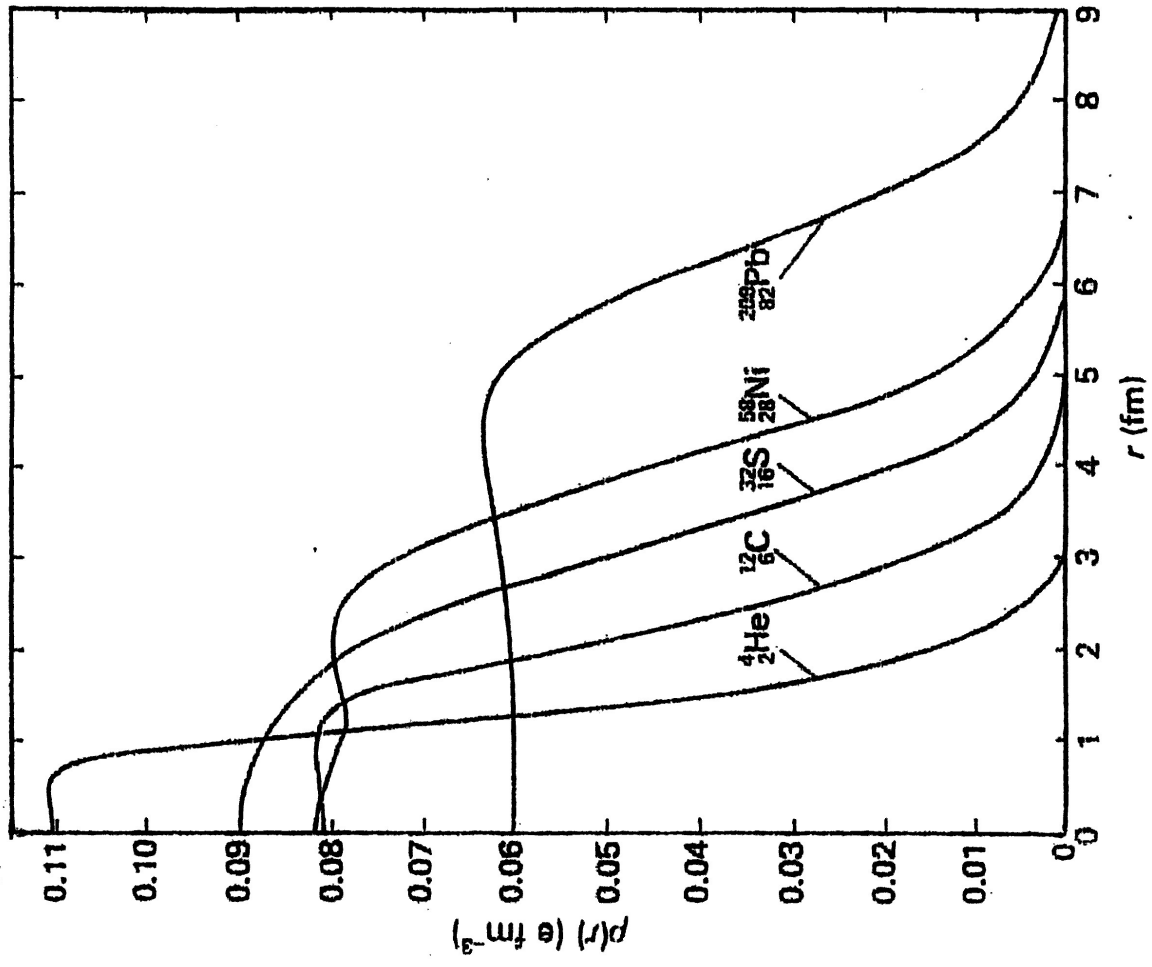
$$d = 0.55 \text{ fm}$$

(a) Densità cost,  
raggio preciso

(b) Saxon-Woods







Densita' di carica elettrica in funzione della distanza dal centro

# Dimensioni nucleari

• Dimensioni nucleari misurate in collisioni  $\left\{ \begin{array}{l} \text{n-nucleo} \\ \text{p-nucleo} \end{array} \right.$

formula di Saxon-Woods con  $\left\{ \begin{array}{l} a = 1.2 A^{1/3} \text{ fm} \\ d = 0.75 \text{ fm} \end{array} \right.$  raggio "buccia"

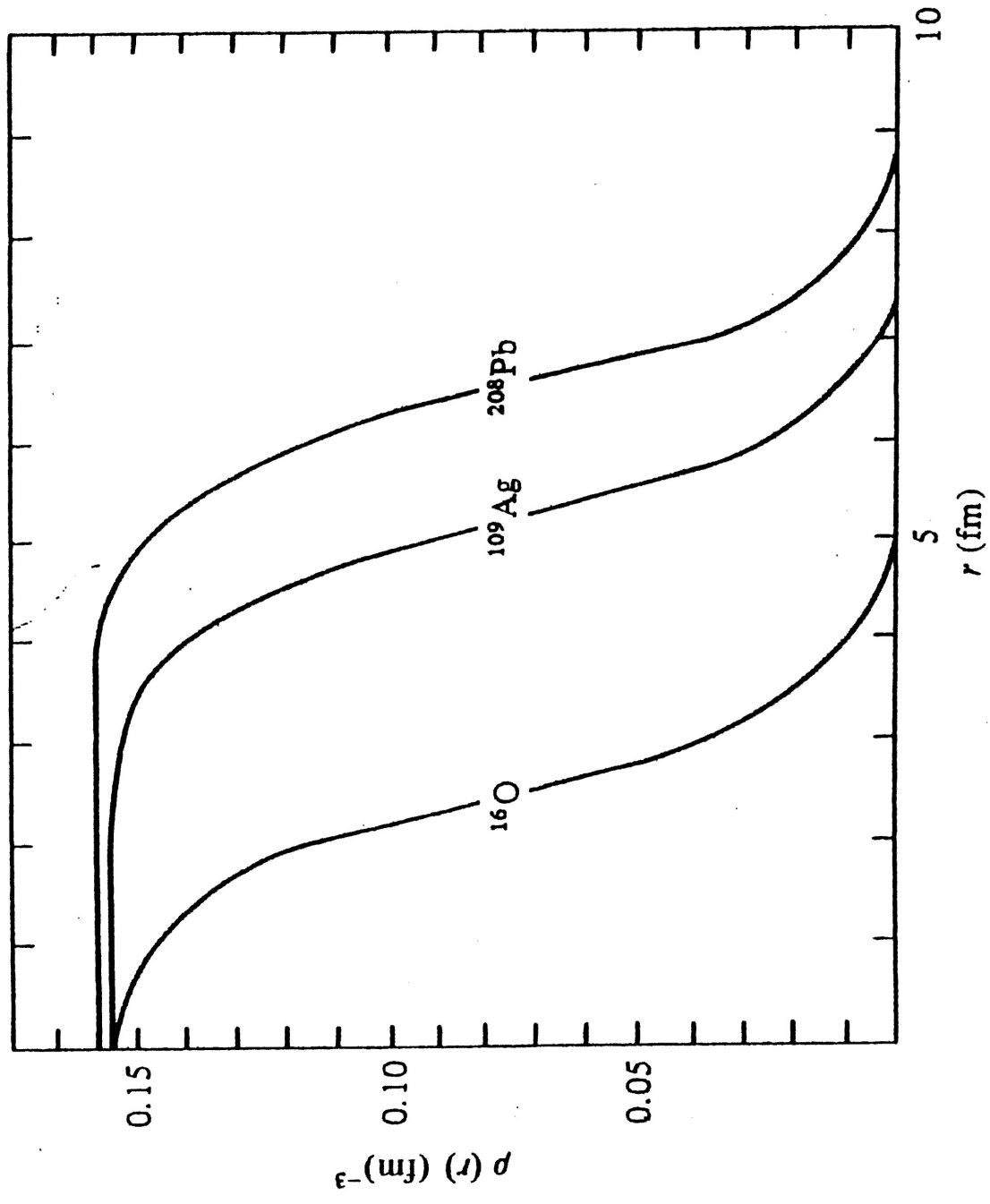
Si ottiene

$a \rightarrow R = R_0 A^{1/3} \text{ fm}, (4/3)\pi R^3 \rho_0 = A$  trascurando la "buccia"  $d$

$$R_0 = 1.2 \text{ fm}$$

$$\rho_{\text{Nucleare}} = \frac{\text{Numero Nucleoni}}{\text{volume}} = \frac{dn}{dv} = \text{cost} = \rho_0 \cong 0.17 \text{ Nucleoni/fm}^3$$

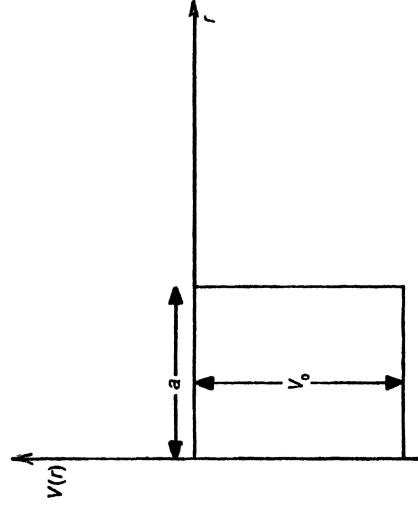
Forma dei nuclei  $\left\{ \begin{array}{l} \text{In maggioranza sferici} \\ \text{Molti ellissoidici} \\ \text{Anche altre forme} \end{array} \right.$



Densità di nucleoni in funzione di  $r$  [ $\rho_0 = 0.17 \text{ nucleoni}/\text{fm}^3$ ]

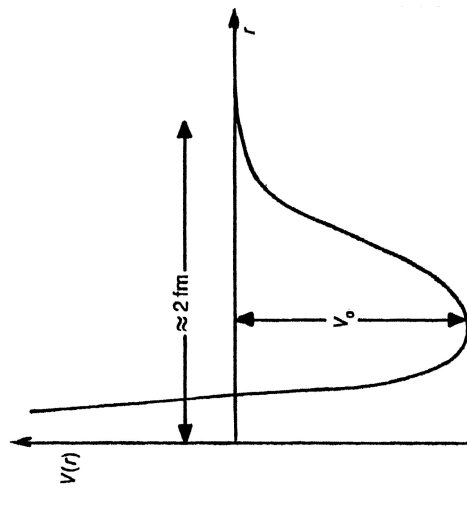
## 2. Forze nucleari. Il potenziale fra 2 nucleoni

- Fra 2 nucleoni vi è una forza nucleare attrattiva capace di vincere la repulsione coulombiana
- $B/A \sim \cos t \sim 9 \text{ MeV}/\text{Nucleone}$  implica un potenziale fra 2 nucleoni a corto raggio d'azione capace di mantenerli a una distanza di  $\sim 1.8 \text{ fm}$  uno dall'altro
- A piccole distanze vi è una repulsione
- Il potenziale deve avere quindi una forma come quella schematizzata in basso a destra. Per calcoli approssimativi si può usare la "buca di potenziale" nucleare indicata in basso a sinistra



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

$$V_0 \sim 20 \text{ MeV}$$



## Il deutone

- Il deutone è uno stato legato protone-neutrone  
Energia di legame  $B=2.23$  MeV  
Spin-parità  $J^P=1^+$   
Momento di dipolo magnetico  $=\mu_d=\mu_n+\mu_p=0.86 \mu_N$  [somma non esatta]  
Momento di quadrupolo elettrico  $=Q=2.8 \cdot 10^{-31} \text{ m}^2$   
Il deutone è relativamente poco legato ed ha dimensioni grandi  $>2$  fm  
La presenza del piccolo momento di quadrupolo elettrico implica una forma non sferica e la presenza di una forza nucleare tensoriale  
C'è anche una forza di scambio [ come se il  $p$  si trasformi in  $n$  e  $n$  in  $p$  ]



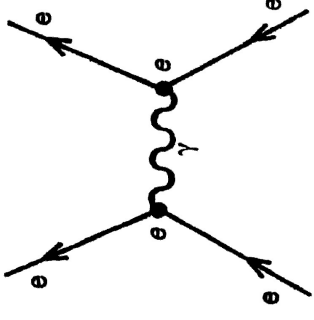
## Indipendenza dalla carica elettrica

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

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

## Potenziale internucleonico. Il mesone $\pi$

Interazione coulombiana fra 2 cariche, al 1° ordine, tramite scambio fotone con massa nulla [  $V \sim 1/r$  ]



Yukawa: forza fra 2 nucleoni con scambio particella di massa intermedia [per  $R \sim 2 \text{ fm} \rightarrow m \sim 200 \text{ MeV}$ ]

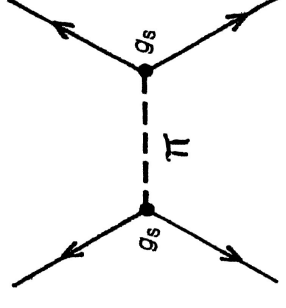
Potenziale di Yukawa

$$V(r) = g^2 e^{-r/R} / 4\pi r, \quad R = \hbar / 2\pi mc$$

Cost di accoppiamento  $g$  in forma adimensionale

$$\rightarrow \alpha_S \sim g^2 / 2\hbar c \sim 1 \sim 100 \alpha_{EM}$$

Il mesone  $\pi^0$  può essere considerato la particella di Yukawa; I mesoni  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  danno un contributo come forze di scambio-carica [ scambiano un neutrone in protone e viceversa ]



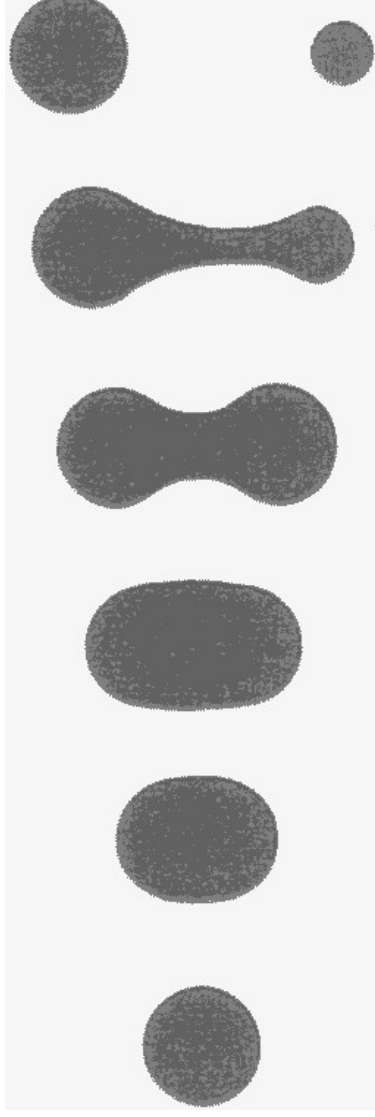
# Modelli nucleari

Ciascun modello nucleare descrive un aspetto della realtà, spesso diversa e forse contraddittoria rispetto a quella di altri modelli

- **Nuclei come aggregati di protoni e neutroni**
- **Modello a goccia**

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

Il modello è utile per il calcolo dell'energia di legame della fissione nucleare



# Modello a gas di Fermi

- I nucleoni si muovono liberamente entro il volume nucleare con

$$p_F^n \sim p_F^p = p_0 \sim 250 \text{ MeV}/c \quad [\text{valori medi}]$$

Gas di p,n entro buca di potenziale

soggetti al principio di esclusione di Pauli

per i p va aggiunta la barriera Coulombiana

All'interno della buca: livelli energetici indipendenti per p, n

Energia di Fermi=energia del livello occupato più alto

$$E_F \sim \frac{p_F^2}{2m_N} \sim \frac{250^2}{2 \times 940} \sim 33 \text{ MeV}$$

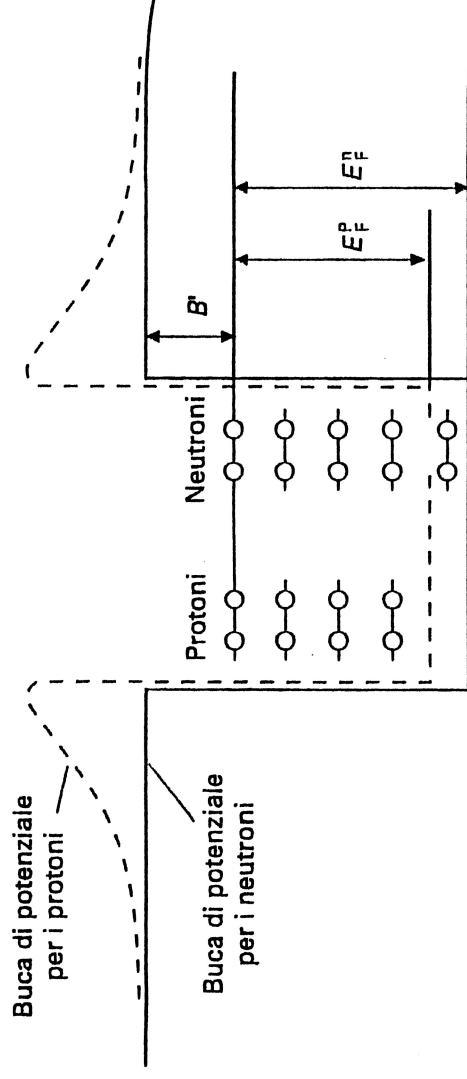
Energia totale  $V = E_F + B' \sim 33 + 9 \sim 42 \text{ MeV}$

Nuclei pesanti: hanno un eccesso di neutroni

: la profondità della buca è più grande per n che per p

Verifica modello:

Produzione sotto soglia



# Il modello a shell

Ogni nucleone occupa un livello definito di energia

- In atomo: e- si muovono nel campo coulombiano del nucleo
- In nucleo: N si muovono nel campo di potenziale medio nucleare degli altri nucleoni

Fisica { gas nobili → shell completamente occupate (chiuse)  
Atomica { metalli alcalini → shell chiuse + un e-

Fisica { nuclei con  $N_p$  oppure  $N_n$  = numero magico sono piu' stabili  
Nucleare { → corrispondono a shell chiuse

Numeri magici 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Nuclei doppiamente magici: particolarmente legati

es.  ${}^4_2\text{He}_2$ ,  ${}^{16}_8\text{O}_8$ , ...,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$

Autofunzioni  $\Psi = R_{n,e}(r) Y_l^m(\theta, \varphi)$  :  $P = (-1)^l$   
[  $n=1,2,3,\dots$  ;  $l=0,1,2,\dots$  (s,p,d,...) ;  $-l < m < l$  ]

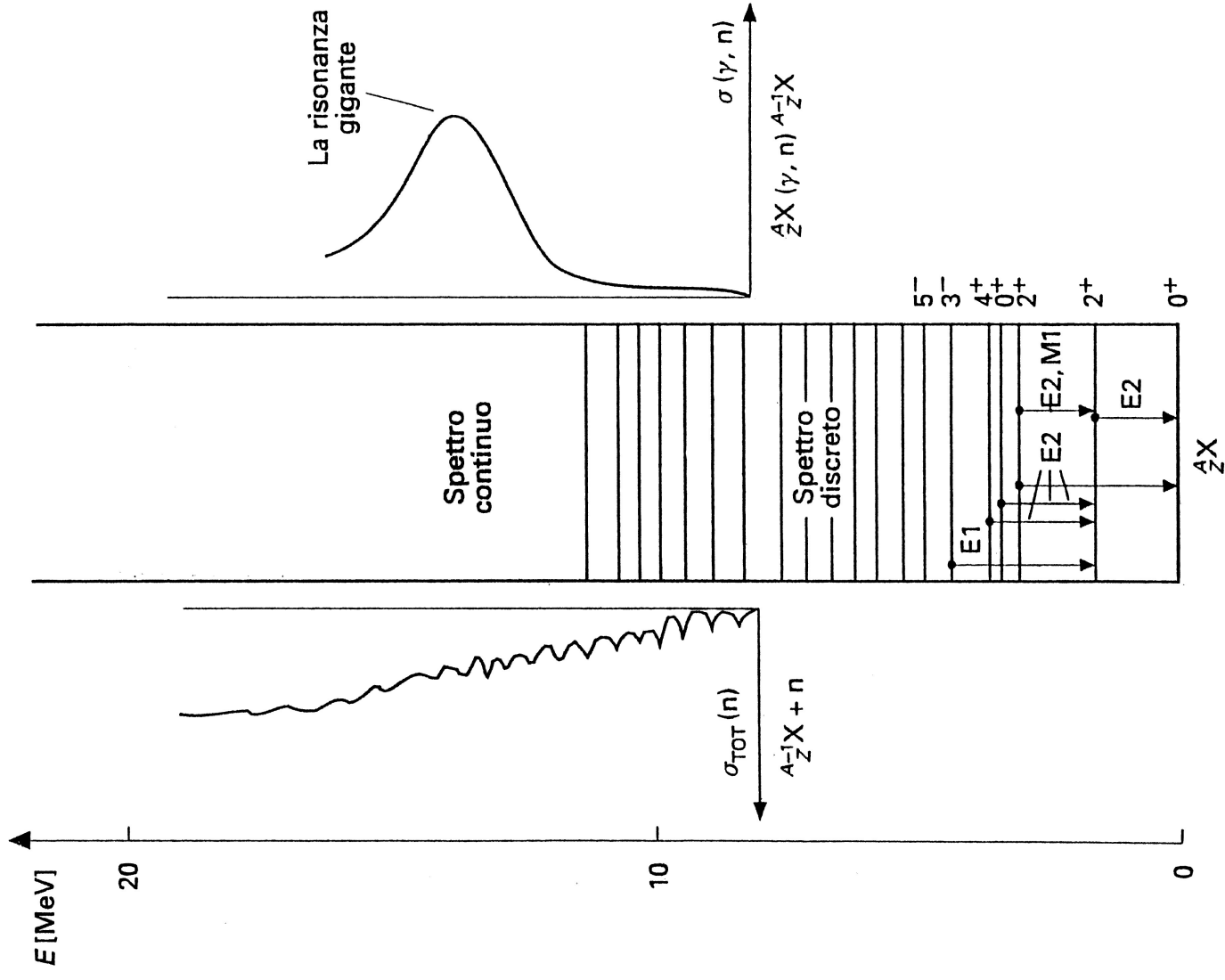
Potenziale di Woods-Saxon  $V(r) = \frac{-V^0}{1 + e^{(r-R)/a}}$

# Modello a shell

Livelli nucleari in un nucleo par-pari: I primi livelli hanno  $J^P=0^+, 2^+$ .

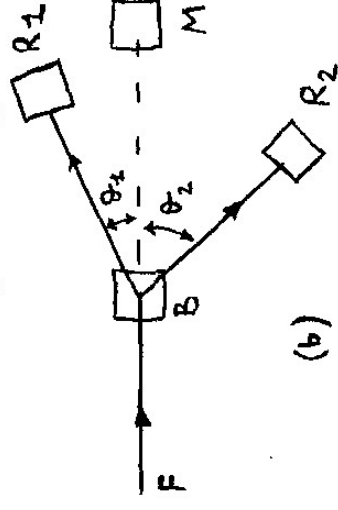
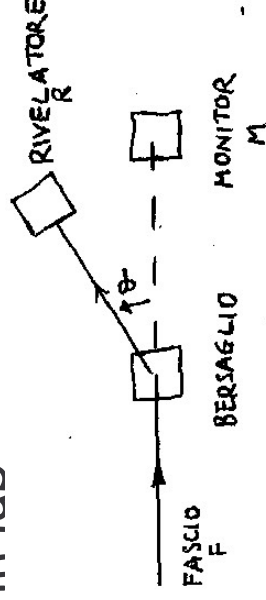
A sinistra: la sezione d'urto totale n-nuclei; i piccoli picchi sono connessi con i livelli eccitati dei nuclei.

A destra: sezione d'urto di fotoproduzione; notare la risonanza gigante.



# 5. Reazioni nucleari

- Rutherford 1919  ${}^4\text{He}_2+{}^{14}\text{N}_7 \rightarrow {}^{17}\text{O}_8+{}^1\text{H}_1$
- Notazione generale  $a + B \rightarrow c + D$  ,  $B(a,c)D$
- Schema esperimento in lab



- Reazioni  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Esotermiche : forniscono energia} \\ \text{Endotermiche: occorre fornire energia} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{spesso} \\ a+b \leftrightarrow c+d \end{array} \right.$

**Esercizio.** 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

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

## Reazioni nucleari

- **Esercizio.** 2 protoni sono sparati uno contro l'altro con uguale velocità. Calcolare energia Cinetica necessaria per farli arrivare a 1fm  $2 E_{cin} = E_{pot}$

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^r}{r} = \frac{1}{2} \frac{9 \times 10^9 \text{ Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{10^{-15} \text{ m}} \cong 1.13 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ eV}} \cong 0.71 \text{ MeV}$$

Questa energia cinetica corrisponde a

$$T = \frac{2}{3} \frac{< E_{cin} >}{\text{K}} = \frac{2}{3} \frac{1.13 \times 10^{-13}}{1.38 \times 10^{-23}} \cong 5.5 \times 10^9 \text{ K}$$

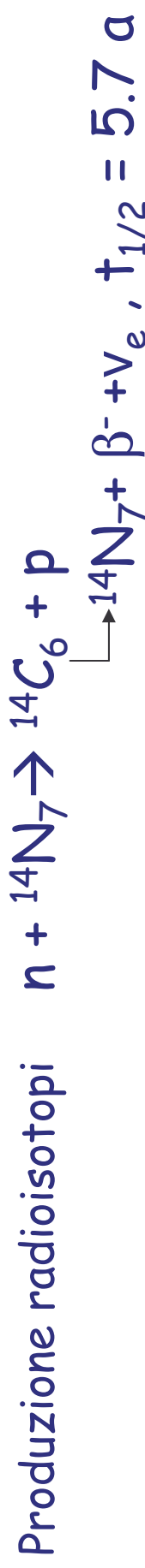
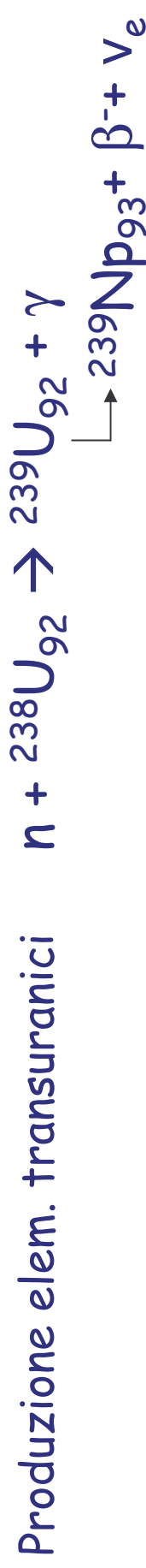
$$[T(\text{K}) = \frac{< E_{cin} >}{8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}} = 11605 E_{cin}(\text{eV})]$$



# Reazioni nucleari



Iniziate da n



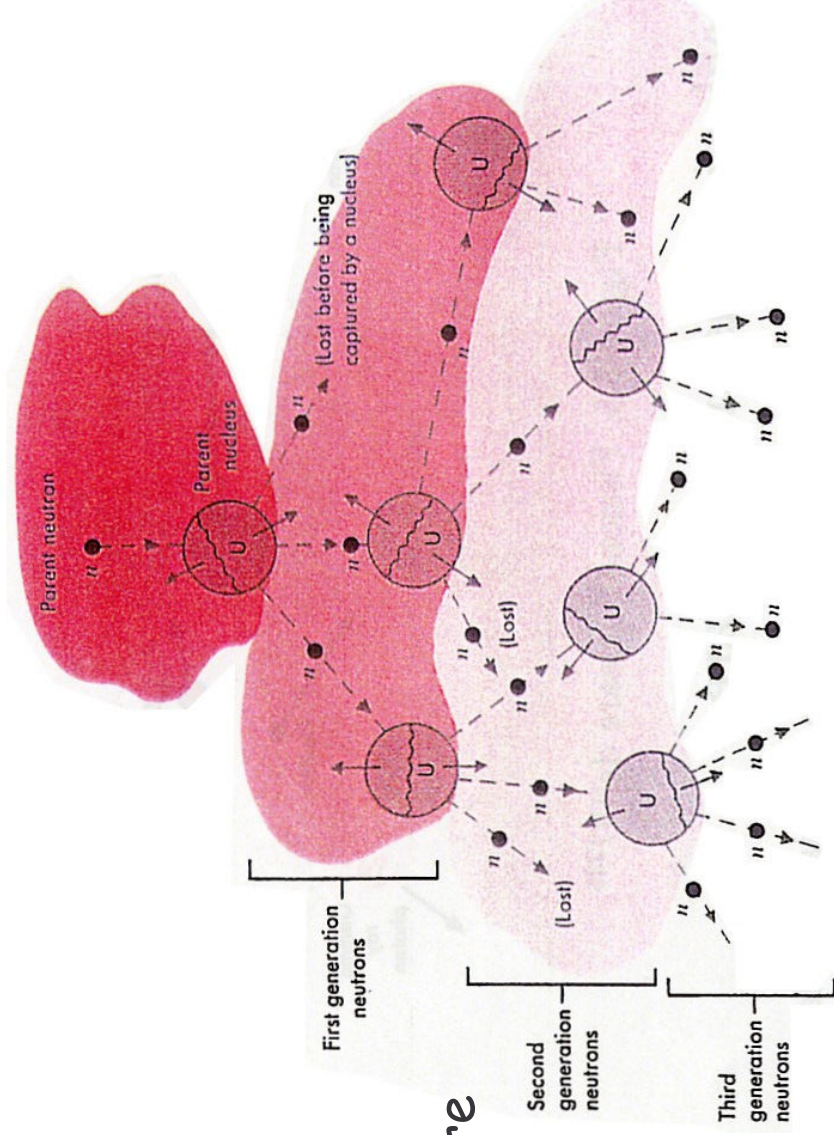
- **Reazioni di fissione**  $n + {}^{235}\text{U}_{92} \rightarrow {}^{140}\text{Xe}_{54} + {}^{94}\text{Sr}_{38} + n + \gamma$
- " "  $\rightarrow {}^{139}\text{Xe}_{54} + {}^{94}\text{Sr}_{38} + n + n + \gamma$
- " "  $\rightarrow A + B + 2n$
- " "  $3n$
- " " .....

Sono liberati circa 200 MeV di energia per ogni fissione.

Reazioni a catena

Esplosiva  $\rightarrow$  bomba a fissione

Controllata  $\rightarrow$  reattore nucleare



## Reazioni di fusione

1a reazione al centro del sole  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$

reazione successive  $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$

$d + d \rightarrow {}^4\text{He}_2 + n + 3.3 \text{ MeV}$

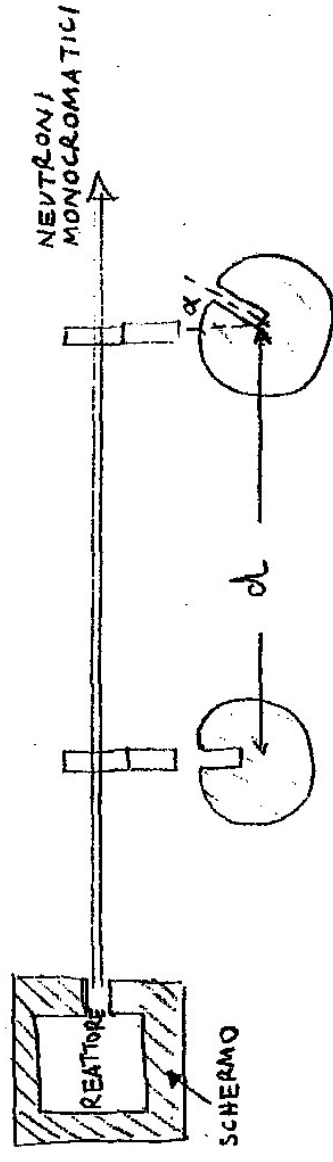
$d + d \rightarrow t + p + 4.03 \text{ MeV}$

$d + t \rightarrow {}^4\text{He}_2 + n + 17.6 \text{ MeV}$

$n + {}^6\text{Li}_3 \rightarrow {}^4\text{He}_2 + t + 4.79 \text{ MeV}$

(produzione trizio)

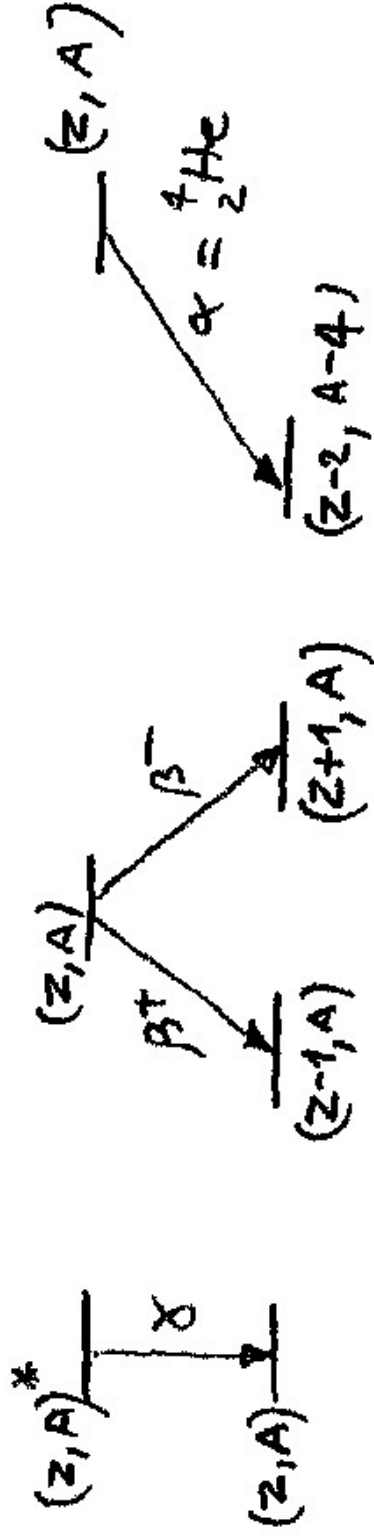
Reazioni iniziate da n monocromatici



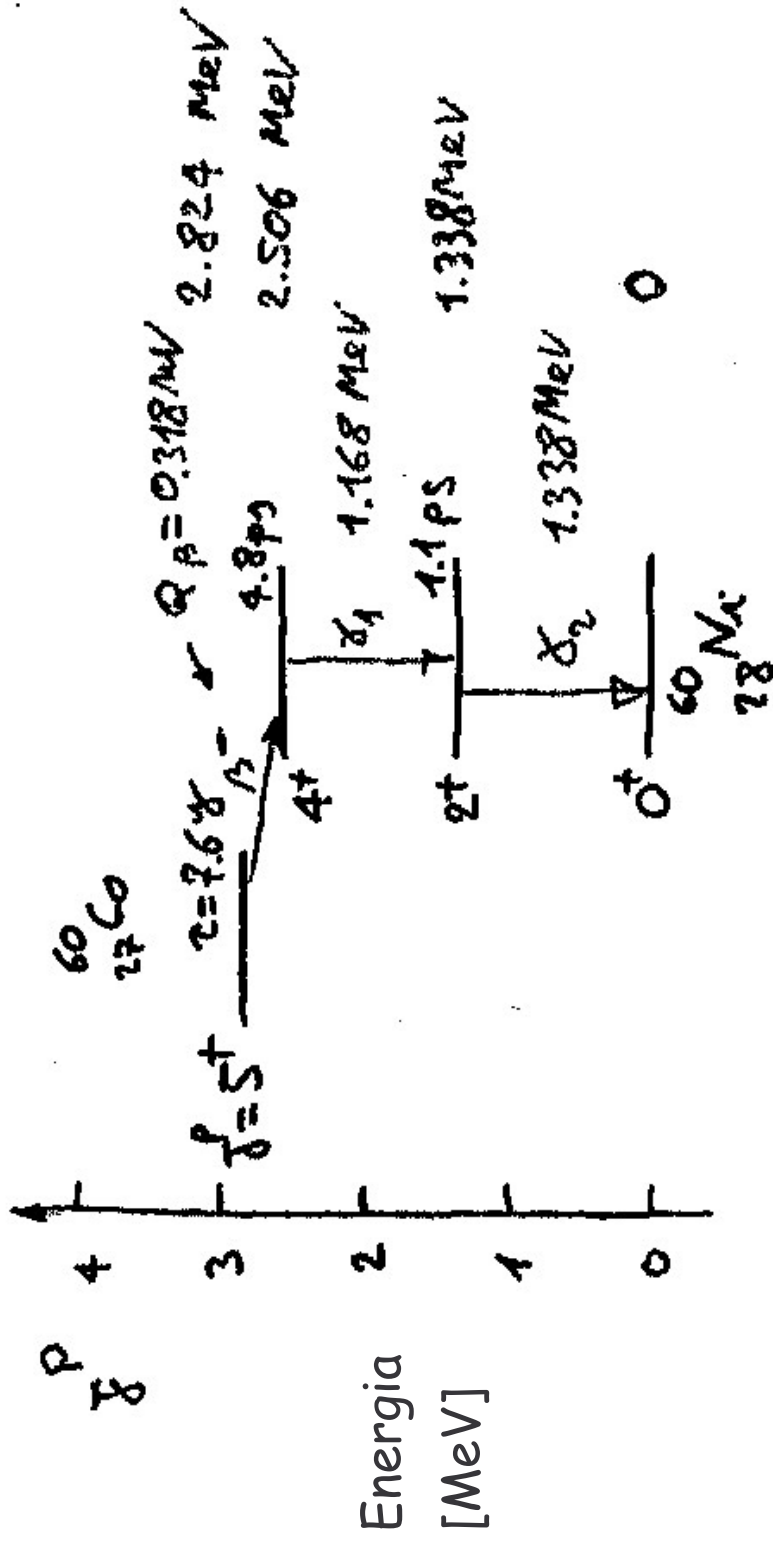
## 6. Decadimenti radioattivi

- La maggior parte dei nuclidi terrestri è stabile.
- Vi sono anche alcuni nuclei instabili [radioattivi]
- Radioattività naturale [scoperta da Becquerel nel 1896] e radioattività artificiale
- $N = N_0 e^{-t/\tau}$  ,  $\tau$  = vita media
- $t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693 \tau$  = tempo di dimezzamento

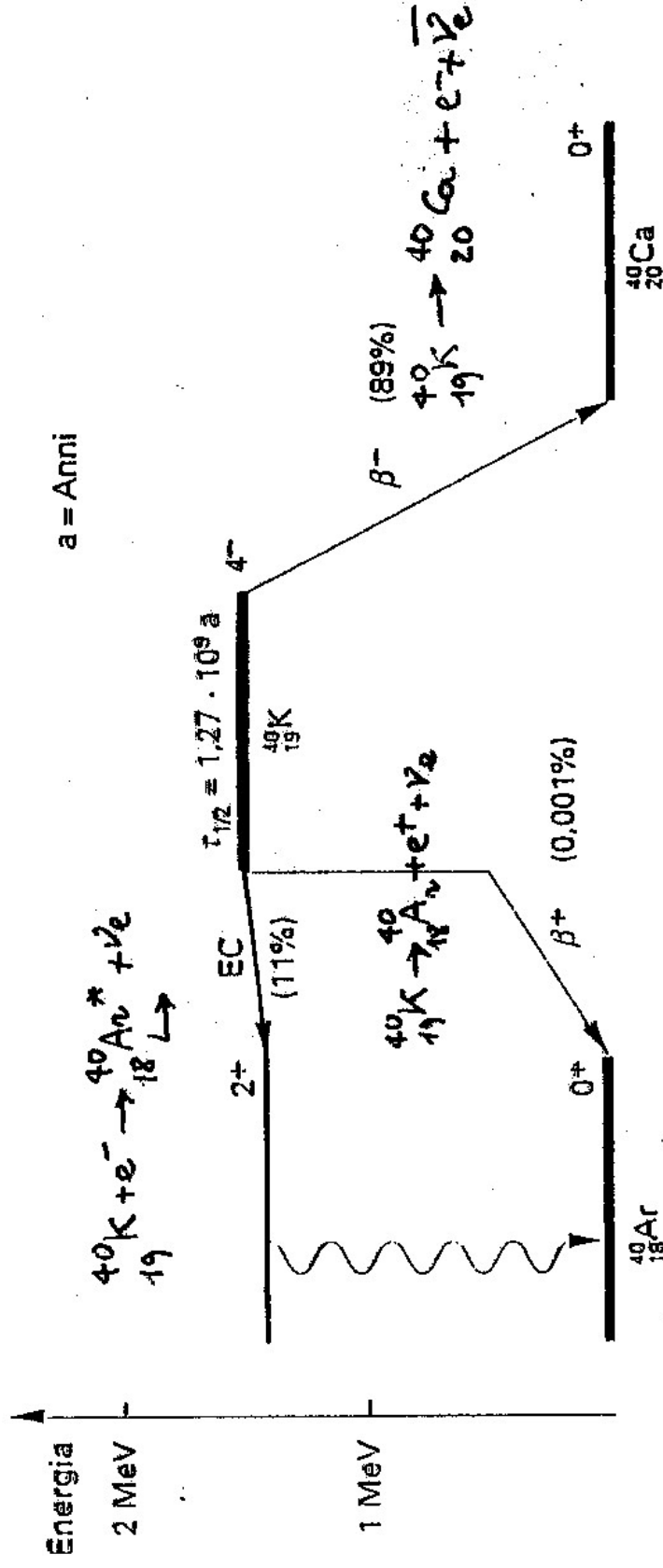
- Raggi  $\alpha$  ,  $\beta$  ,  $\gamma$



# Decadimento del $^{60}\text{Co}$



## Decadimenti del $^{40}\text{K}$



La radiazione ambientale naturale e' dovuta principalmente ai decadimenti degli elementi a lunghissima vita media: U, Th, K, e ai decadimenti dei nuclei "figli, nipoti,, ecc". Il contributo piu' grande viene da un elemento gassoso, il radon, che proviene da U, Th..



## Diagramma di fase materia nucleare

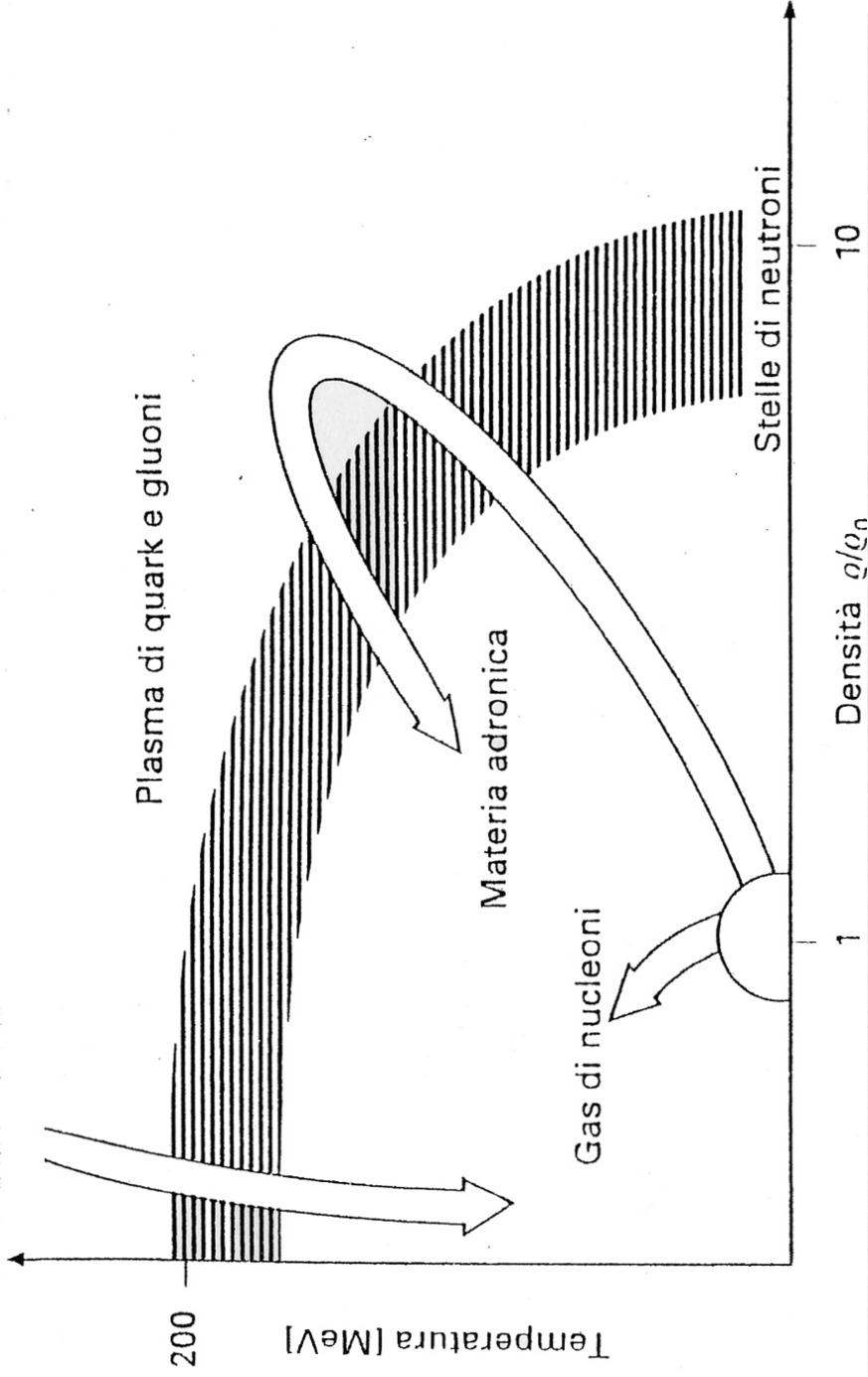
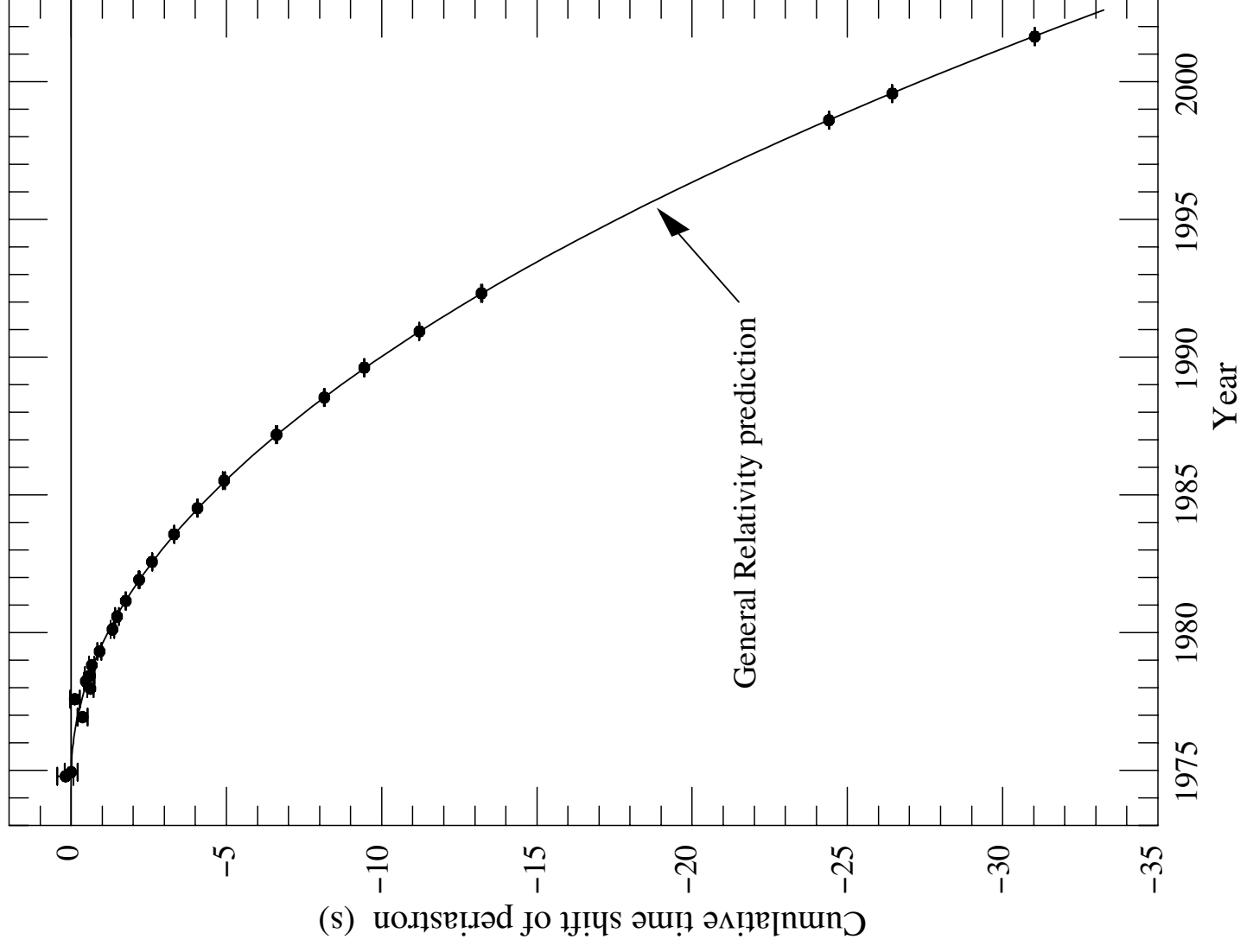


Figura 7.3: Diagramma di fase per la materia nucleare. I nuclei normali hanno  $\rho = \rho_0$  ( $\rho/\rho_0 \simeq 1$ ) e bassa temperatura. Le frecce mostrano i cammini seguiti dai nuclei in diverse reazioni fra nuclei pesanti. La freccia corta verso sinistra rappresenta simbolicamente il riscaldamento dei nuclei in urti radenti. La freccia lunga verso destra rappresenta urti fra ioni pesanti relativistici, nei quali la materia nucleare può al limite trasformarsi in un plasma di quark e gluoni. Il raffreddamento dell'universo al tempo  $T \approx 1 \mu s$  è indicato dalla freccia a sinistra che punta verso il basso (transizione dal plasma di quark e gluoni in materia nucleare). (da ref. 4).

Accumulated shift of the times of periastron passage in the PSR 1913+16 system, relative to an assumed orbit with a constant period.





## I raggi cosmici

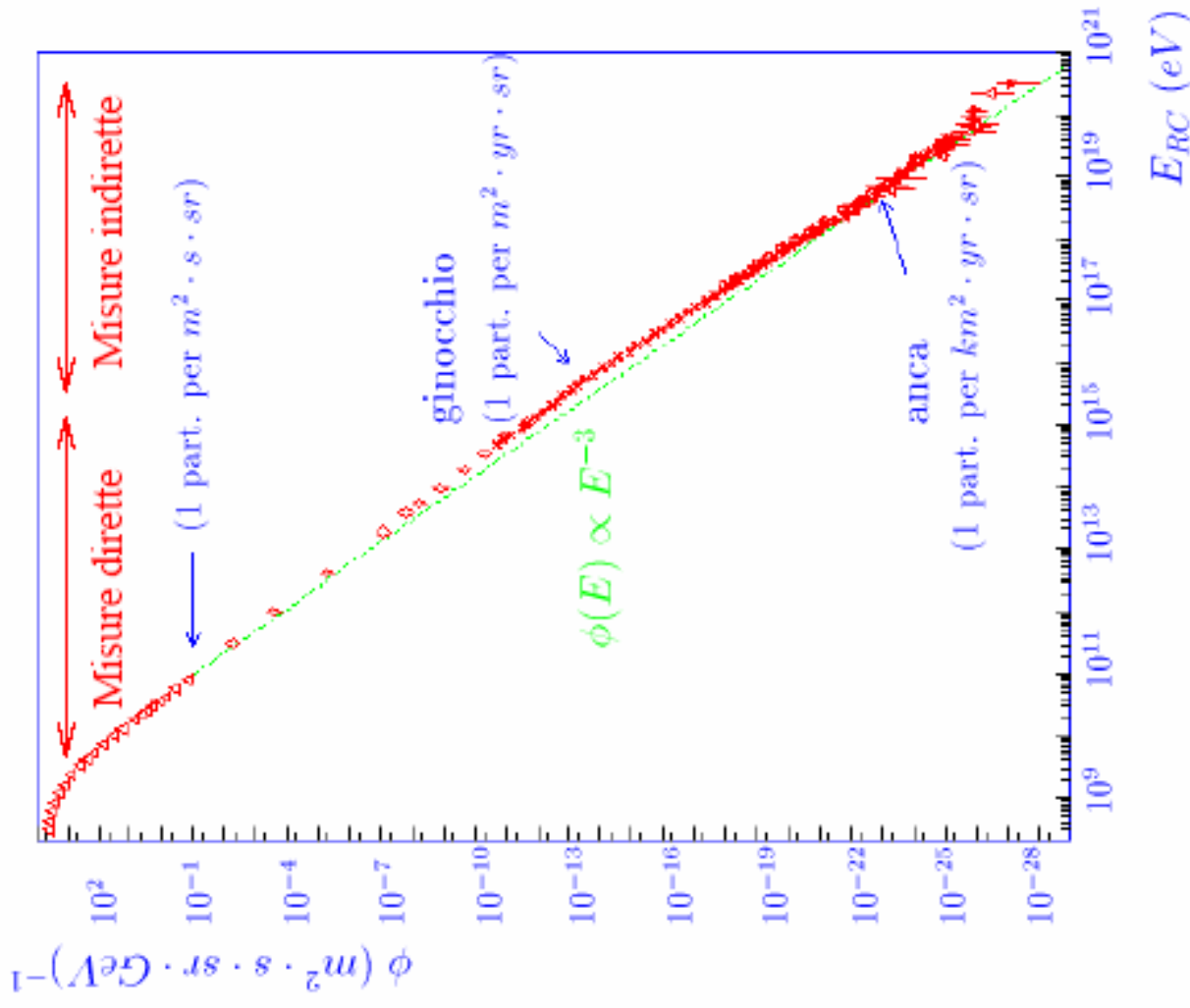
- I raggi cosmici [RC] sono il solo campione di materia proveniente dal di fuori dal sistema solare. Il loro studio permette di dare informazioni su origine e propagazione.
- Alla cima dell'atmosfera il flusso di RC con  $E > 1 \text{ GeV}$  e'  $\sim 1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . E' costituito da p 93%, nuclei di elio 6%, nuclei piu' pesanti 1 %,  $\gamma$ , tracce di positroni e antiprotoni.
- Al livello del mare arrivano RC secondari e terziari; in particolare ogni persona e' attraversata da  $\sim 30$  muoni/sec.
- **I RC sono stati scoperti nel 1912 da V. Hess**
- Nei RC sono poi stati scoperti
- 1932  $e^+$     1938  $\mu^+$ ,  $\mu^-$     1947  $\pi^+$ ,  $\pi^-$     1948  $K^+$ ,  $K^-$   
1951  $\Lambda$     1952  $\Xi^0$     1953  $K^0$ ,  $\text{anti}\Sigma^+$

Ricerche di nuove particelle: monopoli, WIMPs, Nuclearites

# Raggi Cosmici. Spettro energetico "all particle"

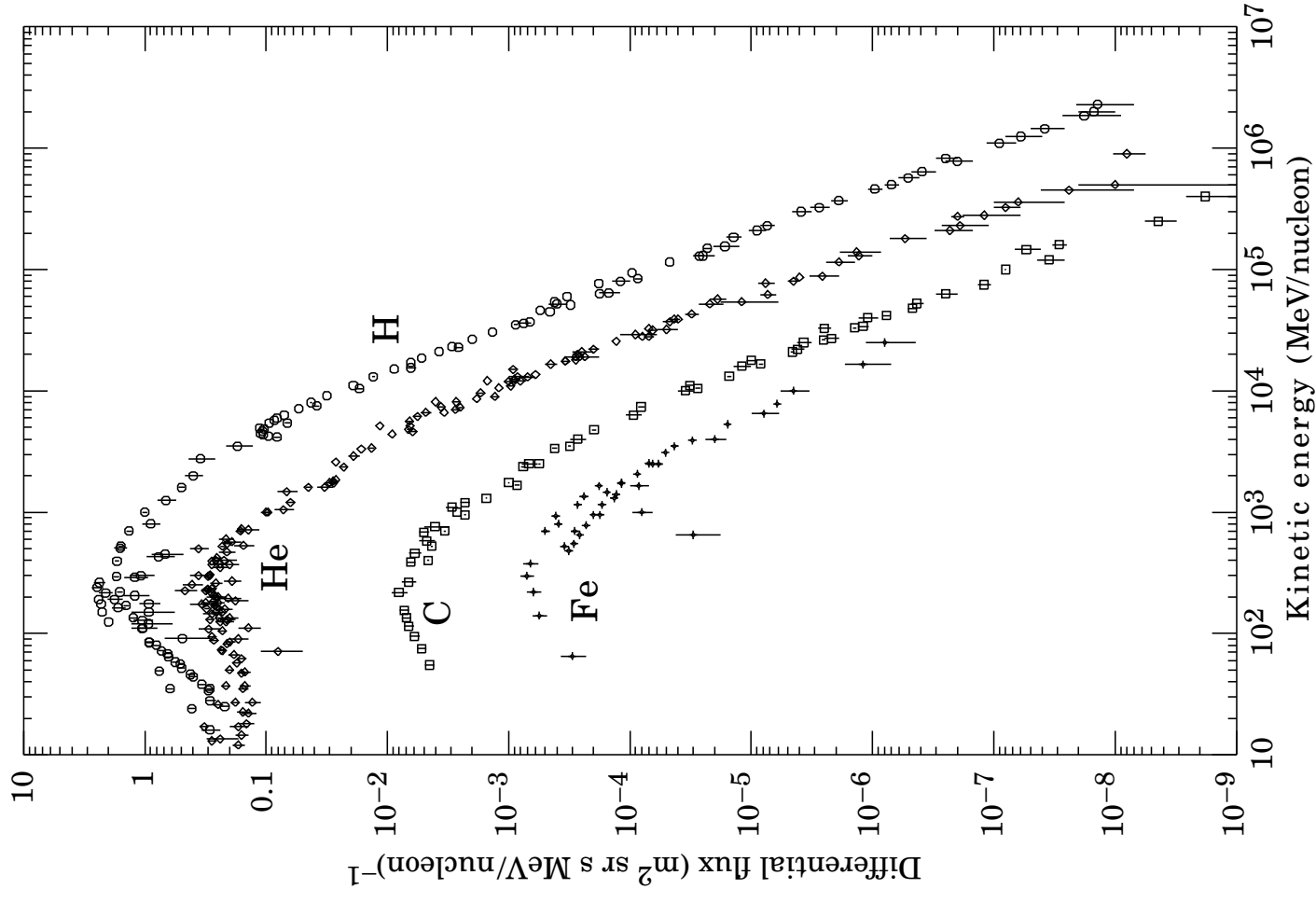
$$dN/dE \sim E^{-(\gamma+1)}$$

- P     $\gamma=1.7$      $10 < E_p < 10^6$  GeV  
        $2.0$       $E_p > 10^6$  GeV

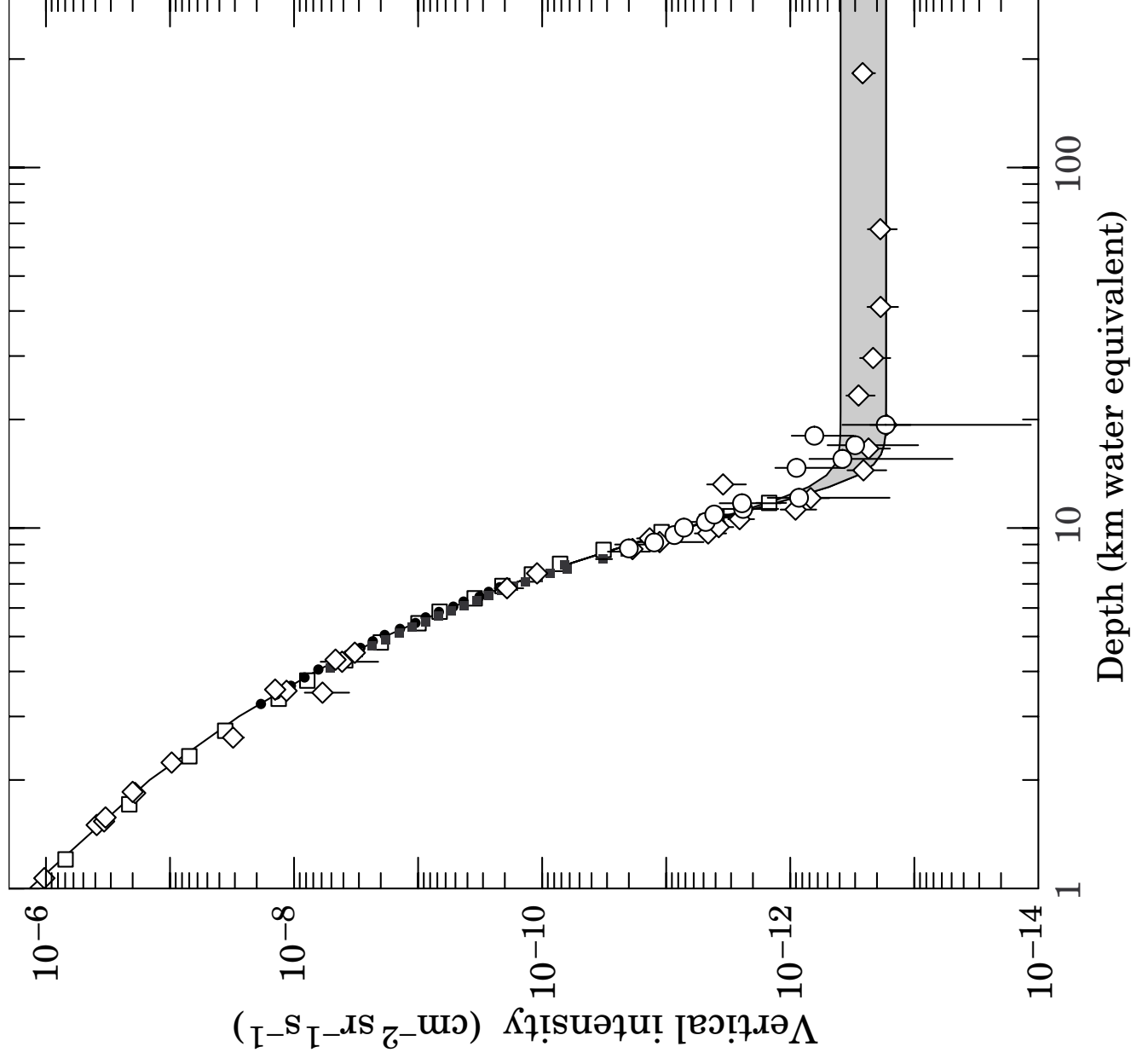


# Cosmic rays

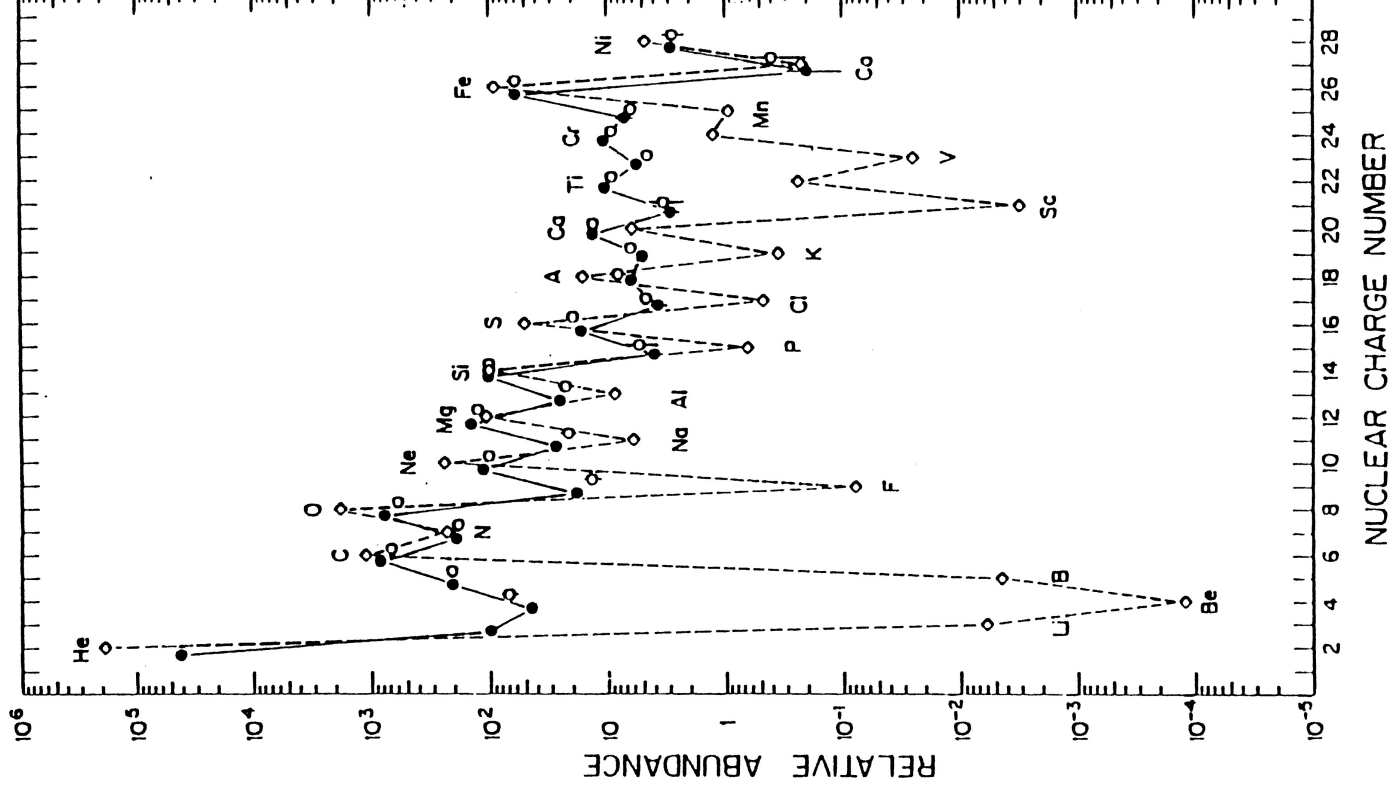
Fluxes of the major components  
of the primary cosmic rays  
plotted versus kinetic energy



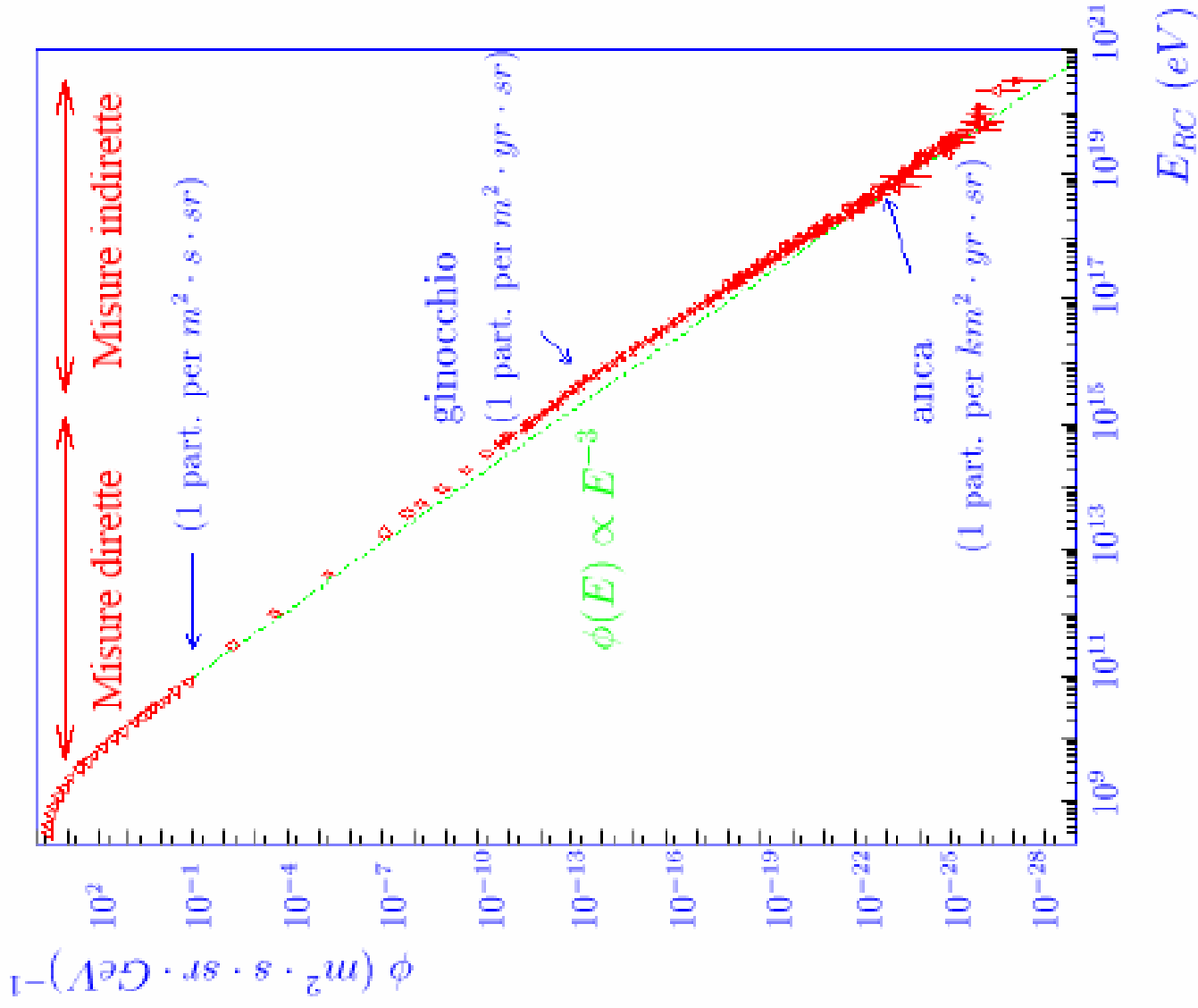
Intensita' verticale dei RC  
In funzione dello spessore  
d'acqua attraversata

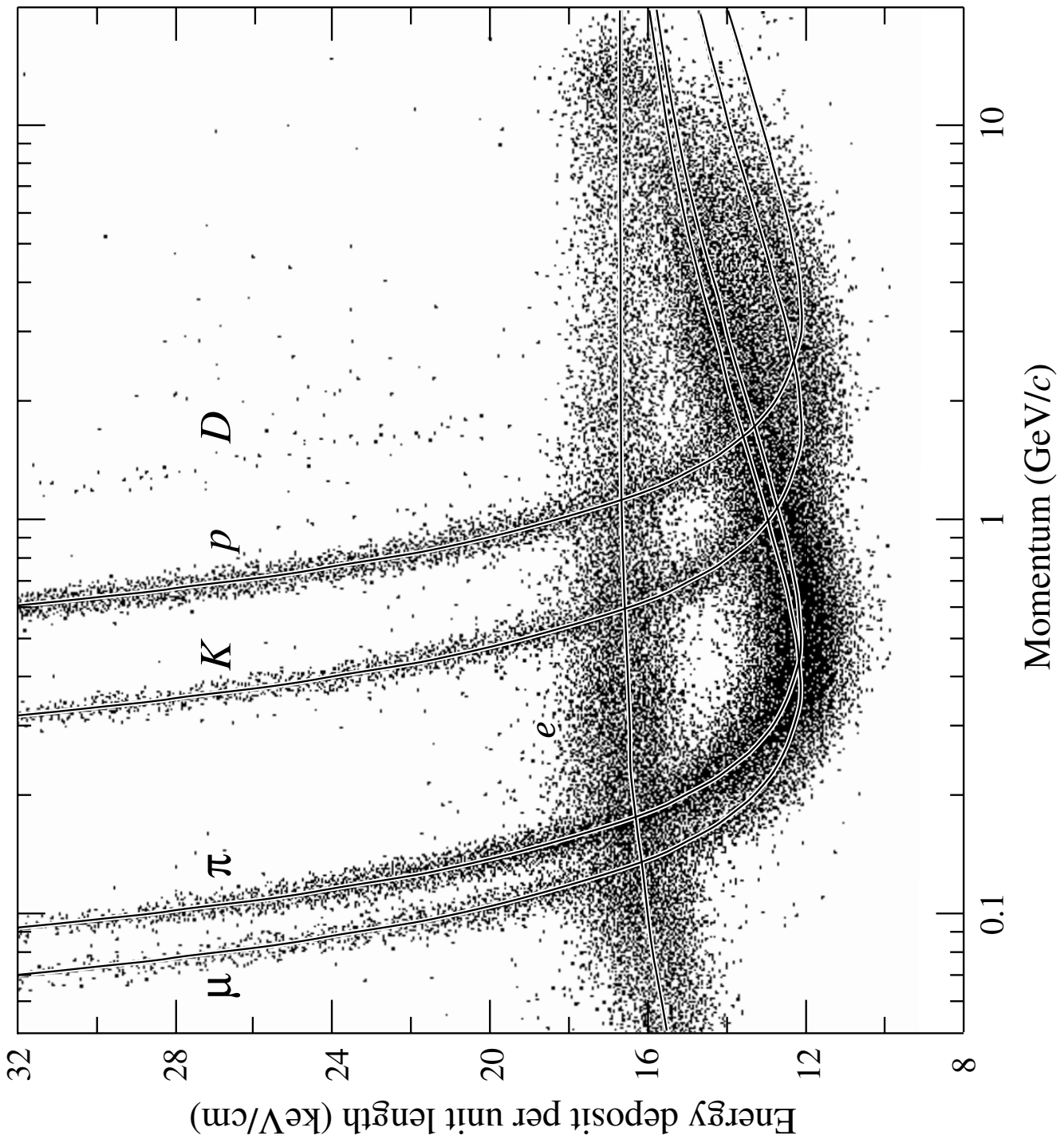


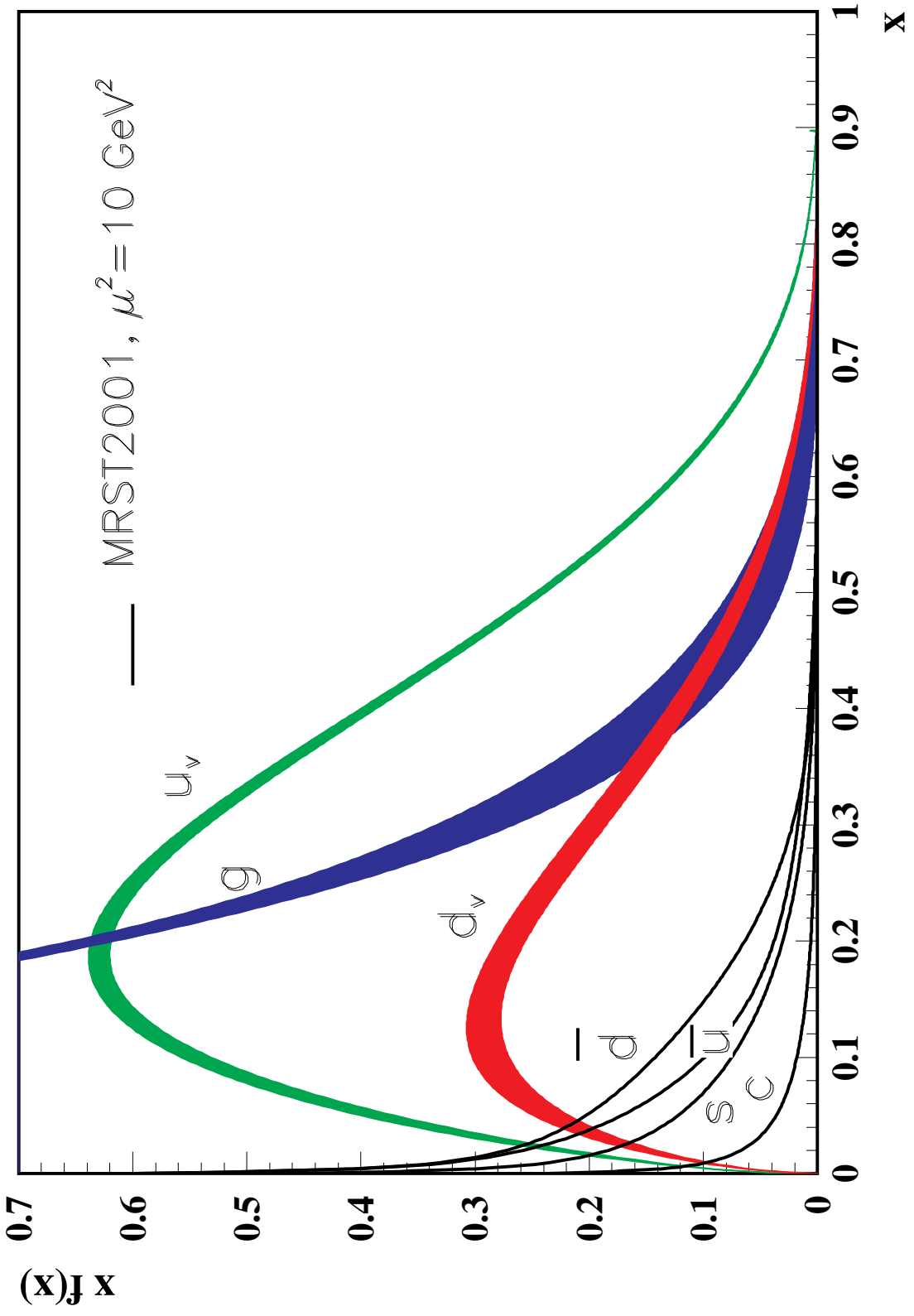
# Abbondanza relativa degli elementi nel sistema solare e nei raggi cosmici in funzione di Z



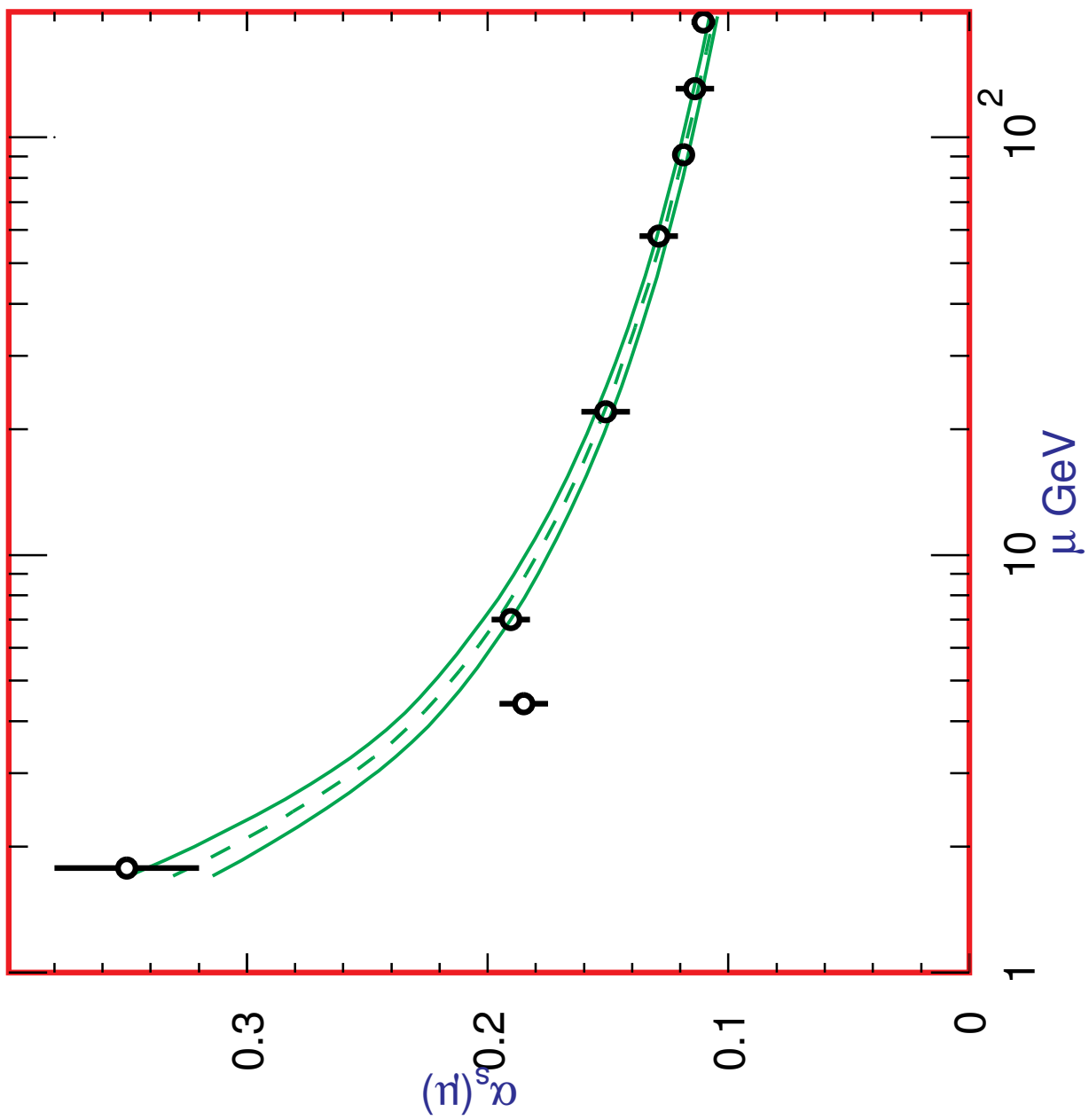
Primary Cosmic Ray  
all-particle energy  
spectrum











**ERA DELLA MATERIA**

15 miliardi di anni  
30°K

5 miliardi di anni  
Prime supernovae

1 miliardo di anni

Formazione delle galassie e delle stelle  
Nucleosintesi di elementi leggeri e pesanti

Formazione degli atomi  
Epoca dei Fotoni

10<sup>-3</sup> sec  
10<sup>-2</sup> sec

Scomparsa dei positroni  
Epoca L eptonica  
Epoca dei protoni, neutroni

10<sup>-10</sup> sec  
10<sup>-6</sup> sec

Epoca dei Quarks

10<sup>-32</sup> sec

Monopoli magnetici?  
Q - Q  
Asimmetria L - L

10<sup>-43</sup> sec  
10<sup>32</sup>°K

Epoca Elettrodinamica

Confineamento dei quarks, formazione di protoni, neutroni

Nucleosintesi dell'idrogeno

L'universo diventa trasparente e materia radiazione

Epoca della Grande Unificazione

Fine dell'epoca della gravità quantistica

Epoca della Gravità Quantistica

Big Bang

Il Deserto

