



# Os Modelos Nucleares e o Atual Cenário da Física Nuclear



# Estado da arte da Física Nuclear e Suas aplicações

- A Física Nuclear tem como objetivo a investigação da origem, evolução, estrutura e fases da matéria nuclear de interação forte.
- O objeto de estudo da Física Nuclear hoje se estende desde as partículas mais fundamentais, como os quarks, até gigantescas estruturas do universo, como as supernovas.
- O papel original e central da Física Nuclear é buscar a compreensão das propriedades dos núcleos e da matéria nuclear.

# Comissões de Áreas

➤ A SBF ( Sociedade Brasileira de Física) desenvolveu uma forma de organizar a pesquisa em Física no Brasil nas seguintes áreas.

- 1) Física Atômica e Molecular
- 2) Física Biológica
- 3) Física Estatística e Computacional
- 4) Física na Empresa
- 5) Física Matemática
- 6) Física da Matéria Condensada e de Materiais



# Comissões de Áreas

- 7) Física Médica
- 8) Física Nuclear e aplicações
- 9) Ótica e Fotônica
- 10) Pesquisa em Ensino de Física
- 11) Física de Plasma
- 12) Física de Partículas e Campos



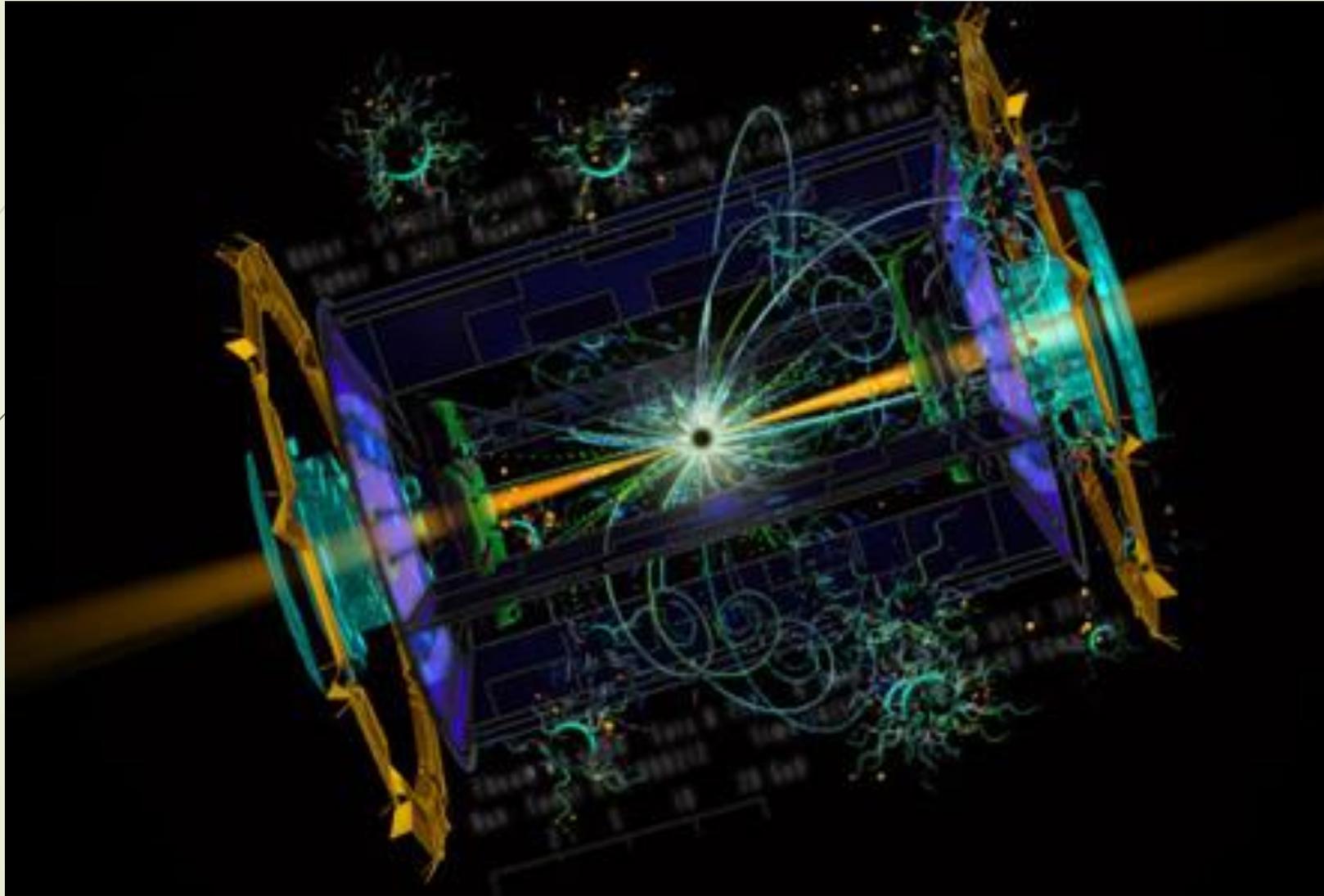
➤ A áreas de Física Nuclear e aplicações no Brasil realiza todos os anos, geralmente no mês de setembro, a “Reunião de Trabalho de Física Nuclear no Brasil”, cujos temas são subdivididos nas seguintes áreas.

- 1) Física de Hádrons
- 2) Física de Altas Energias
- 3) Estrutura Nuclear e Reações em Baixas Energias
- 4) Astrofísica Nuclear
- 5) Física Nuclear Aplicada
- 6) Instrumentação
- 7) Problemas de Poucos Corpos

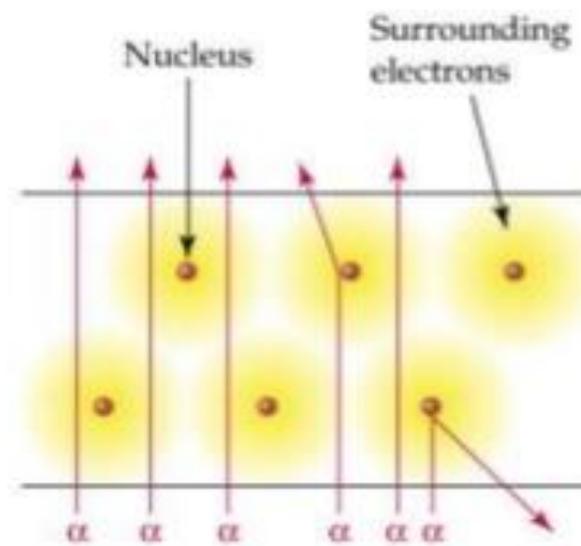
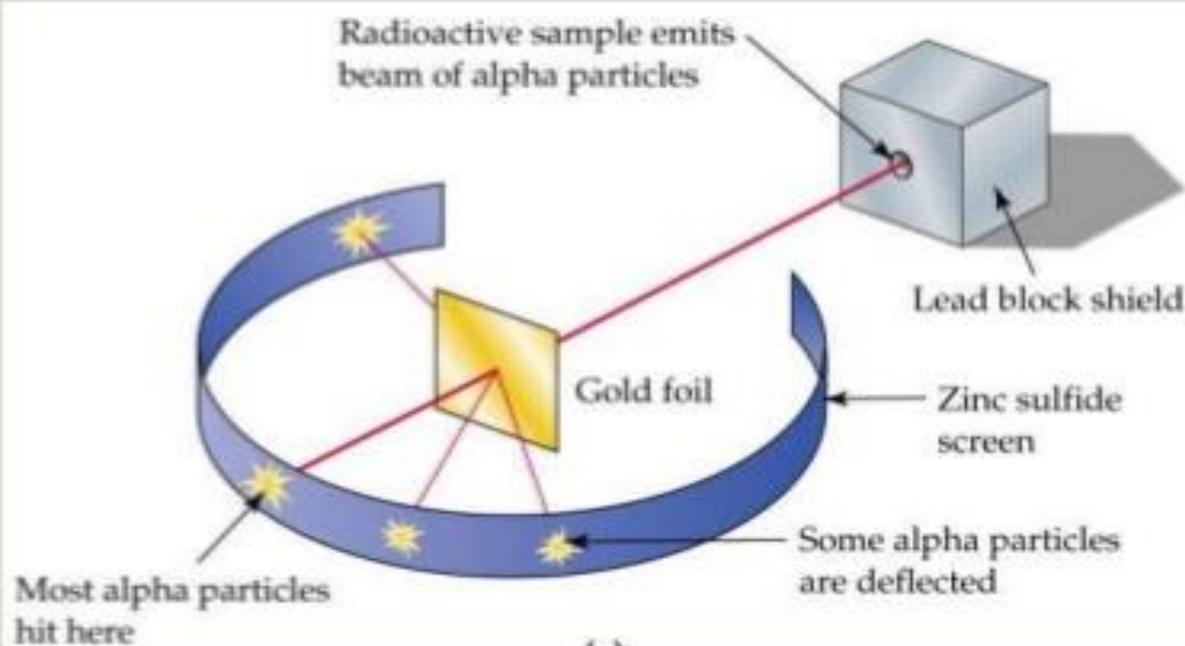
# Física Nuclear Experimental - Aceleradores

- ▶ O Aparato experimental para estudar os núcleos são os aceleradores de partículas.



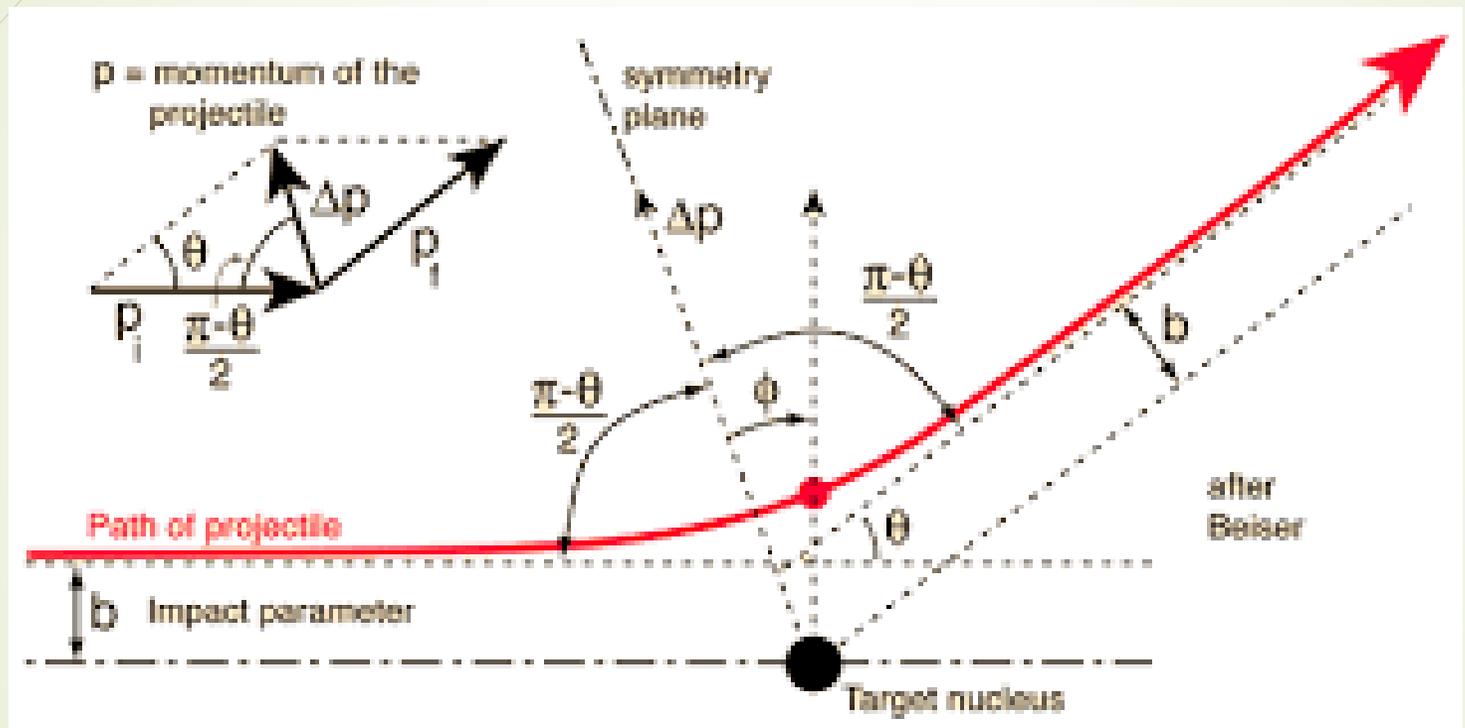


# A Descoberta do Núcleo

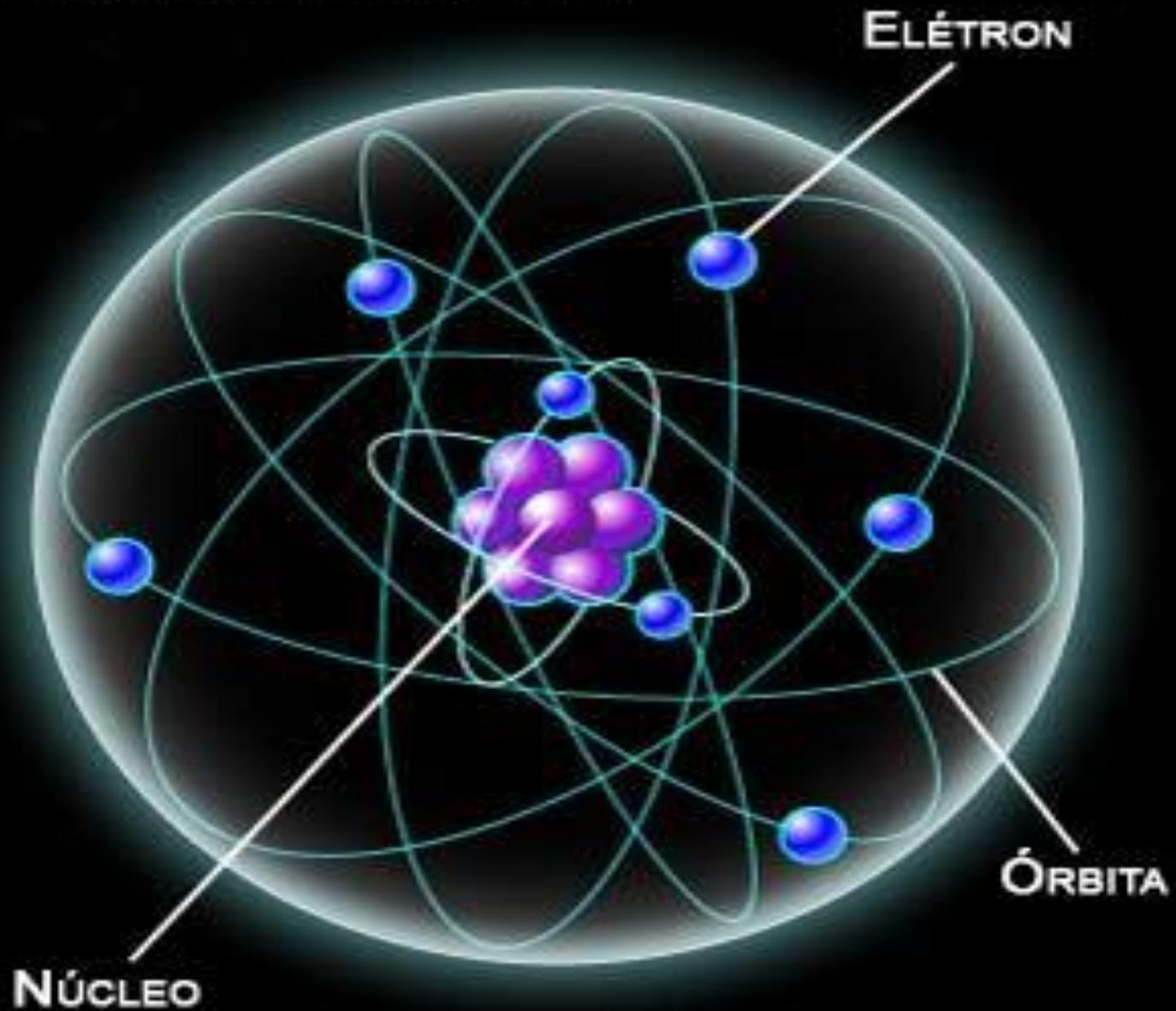


O experimento mostrou que, para desviar as partículas alfa para trás, deveria haver uma força muito grande.

Através da observação dos ângulos de espalhamento, Rutherford deduziu que essa força poderia ser obtida se a carga positiva, ao invés de estar espalhada por todo o átomo, estivesse fortemente concentrada em seu centro.



# DENTRO DE UM ÁTOMO



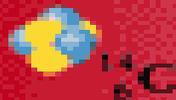
# Radioactivity



Alpha  
Decay



(alpha particle)



Beta Minus  
Decay



(beta particle)



Beta Plus  
Decay



(beta particle)



Gamma  
Decay



(gamma ray)



before

after

# Propriedades do Núcleo

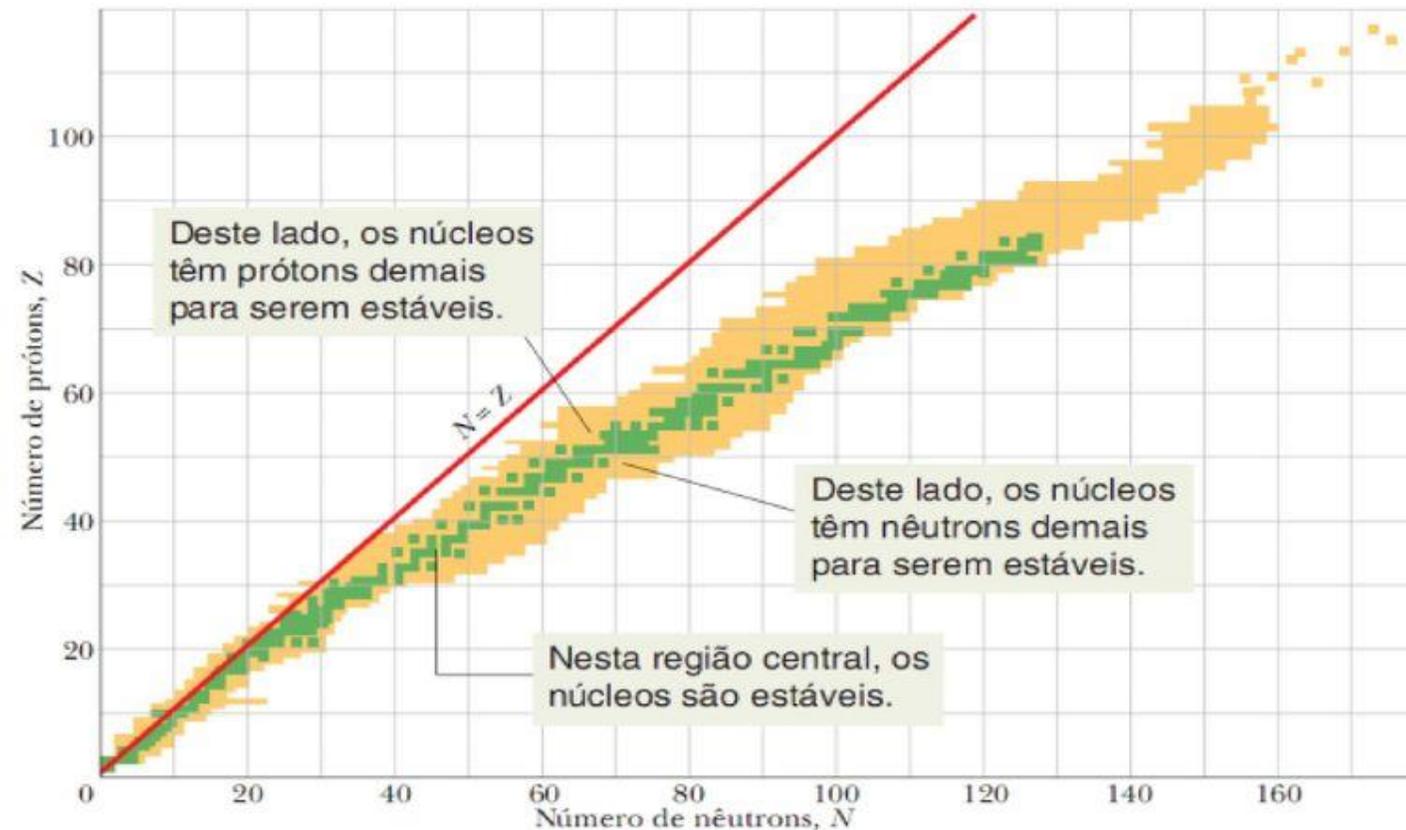
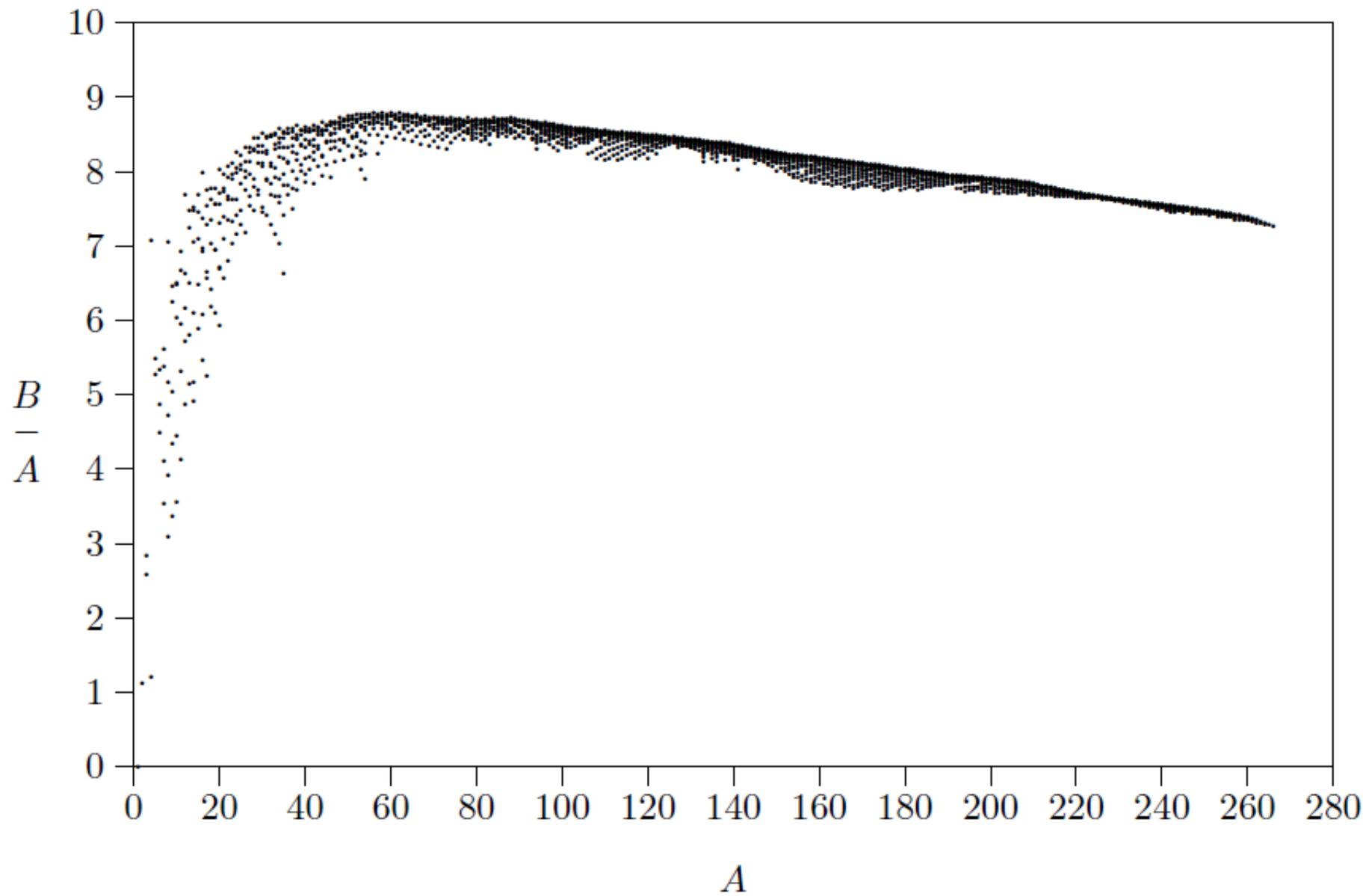
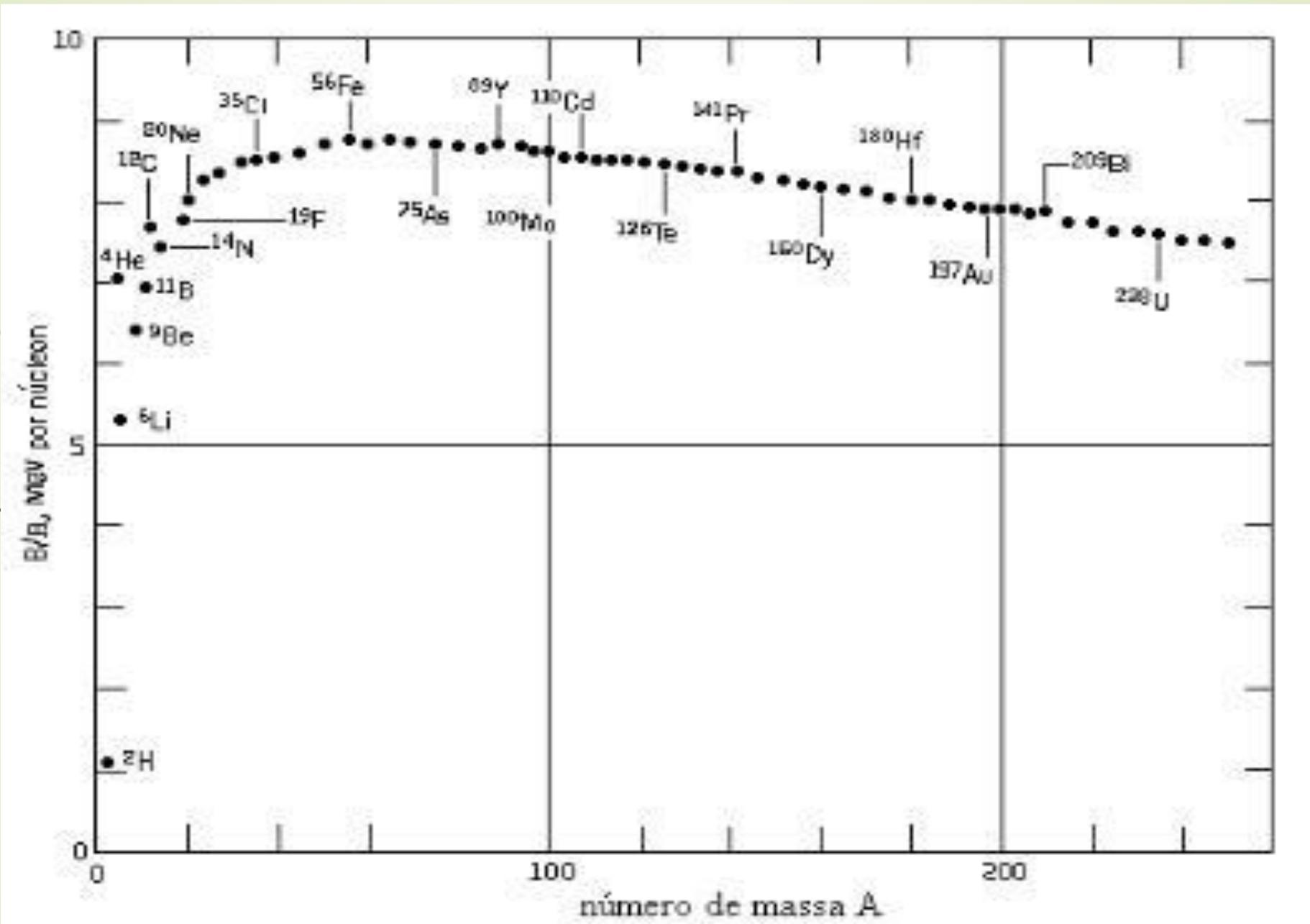
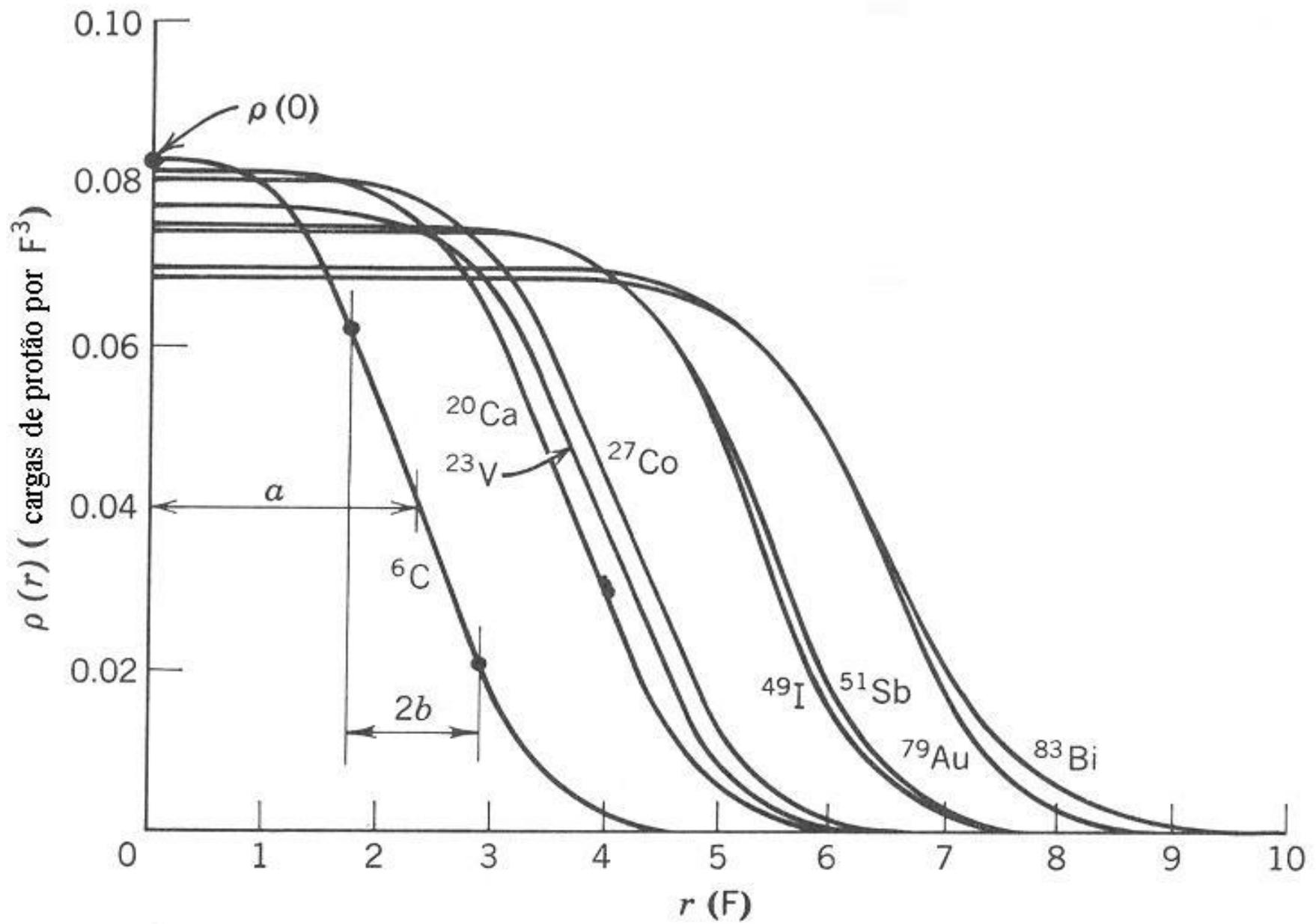
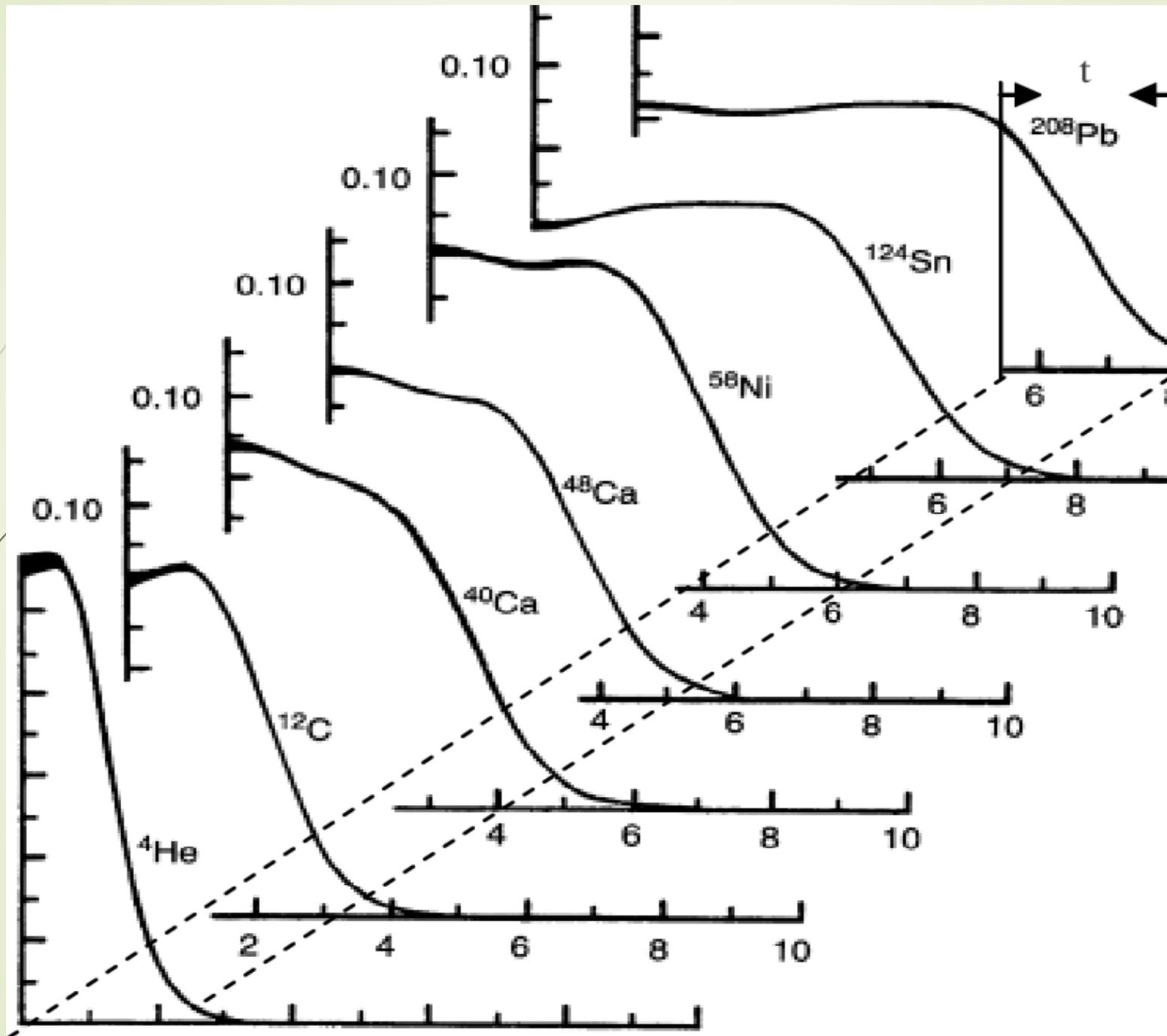


Gráfico da relação entre o número atômico e o número de nêutrons para diferentes isótopos. A cor verde indica estabilidade.











# Modelos Nucleares

- ▶ Um dos grandes desafios do modelo atômico nuclear era explicar a grande estabilidade dos núcleos.
- ▶ Como explicar que uma quantidade grande de prótons pudessem ser empacotados sem que o núcleo explodisse devido a repulsão eletrostática entre eles.
- ▶ Foi proposto então que deveria existir uma outra força atrativa muito maior que a eletrostática que mantinha os núcleos estáveis, chamada “Força Nuclear”.
- ▶ Considerando então esta nova força foram propostos modelos para explicar a estabilidade dos núcleos.



➤ A partir das informações experimentais verificou-se que prótons e nêutrons possuem propriedades bastante semelhantes.

➤ Ambos são férmions e possuem o mesmo spin (1/2)

➤ As massas são praticamente iguais

$$m_p = 938.280 \text{ MeV} \text{ e } m_n = 938.573 \text{ MeV}$$

➤ Cargas elétricas opostas

Próton +1 e Nêutron 0

➤ Como a força nuclear não reconhece a carga elétrica, do ponto de vista apenas das interações fortes, prótons e nêutrons são considerados indistinguíveis.

➤ Sendo assim denominamos prótons e nêutrons como “Nucleon”.

# Modelo da Gota Líquida

- ▶ C. von Weizsäcker observou, em 1935, que as propriedades nucleares associadas com o tamanho, a massa e a energia de ligação de um núcleo são similares àsquelas encontradas em uma gota líquida.
- ▶ Em uma gota de um líquido sua densidade é aproximadamente constante e suas dimensões são proporcionais ao número de partículas do sistema.
- ▶ A energia de ligação dela é proporcional à massa ou ao número de partículas que a compõem.
- ▶ Este modelo levou a fórmula semi-empírica de massa que expressa a dependência desta com  $A$  e  $Z$ .

# Energia de Ligação

$$B(Z, A) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2 A^{-1/3} - a_A \frac{(Z - A/2)^2}{A} + \frac{(-1)^Z + (-1)^N}{A} a_P A^{-1/2}.$$

$$m(Z, A) = Z m_p + N m_n - a_V A + a_S A^{2/3} + a_C Z^2 A^{-1/3} + a_A \frac{(Z - A/2)^2}{A} - \frac{(-1)^Z + (-1)^N}{A} a_P A^{-1/2}. \quad (2.11)$$

$$a_V = 15,85 \text{ MeV}/c^2,$$

$$a_S = 18,34 \text{ MeV}/c^2,$$

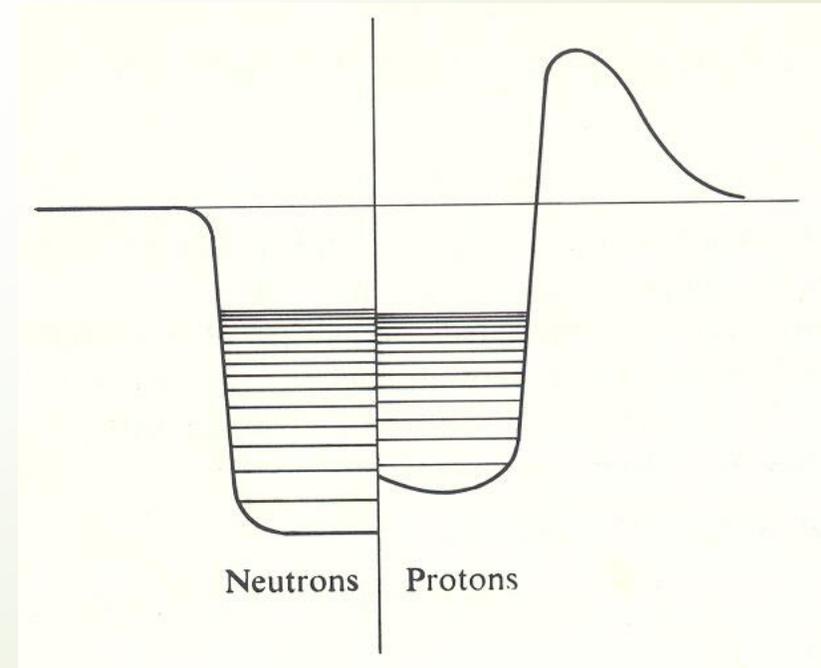
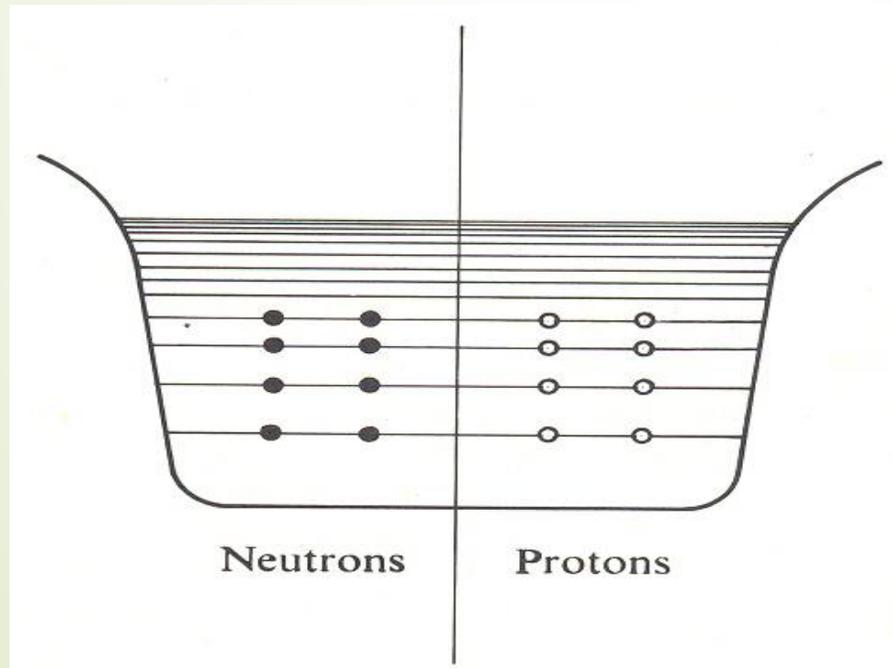
$$a_C = 0,71 \text{ MeV}/c^2,$$

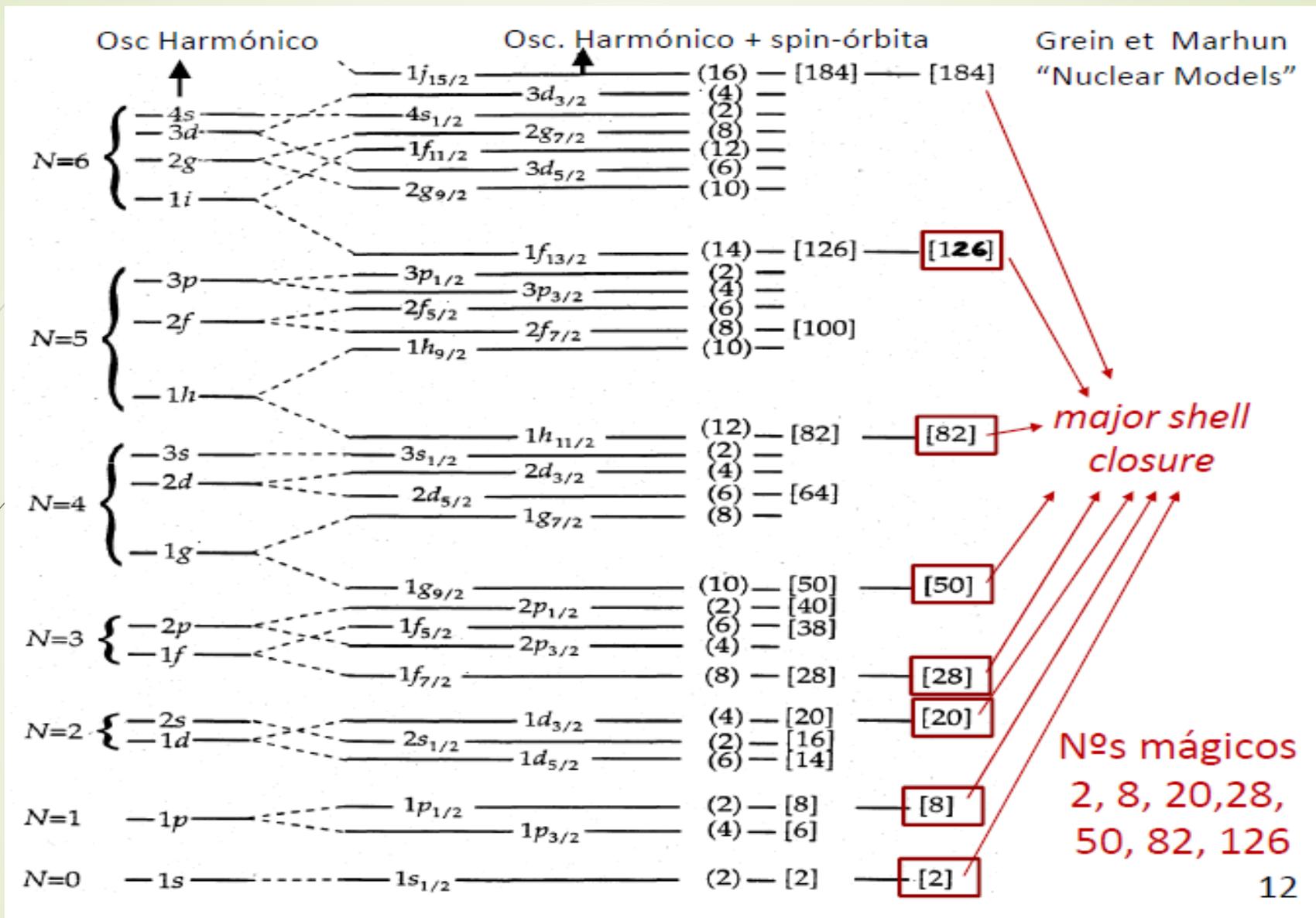
$$a_A = 92,86 \text{ MeV}/c^2,$$

$$a_P = 11,46 \text{ MeV}/c^2.$$

# Modelo de Camadas

- No modelo da gota líquida os nucleons interagem diretamente uns com os outros.
- No modelo de camadas os nucleons interagem através de um potencial médio gerado pela contribuição de todas as outras partículas.





- Uma das descobertas deste modelo são os chamados números mágicos: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

# Propriedades da força Nucleon-Nucleon

- Até o momento, tratamos a interação nuclear com um potencial médio, com resultados bastante satisfatórios;
- Porém, precisamos compreender melhor a natureza da força nucleon-nucleon;
- O que sabemos efetivamente sobre força nuclear?
  - 1) A força nuclear é atrativa e forte (supera a força Coulombiana): condição necessária para a própria existência do núcleo;
  - 2) A força nuclear é de curto alcance (satura): dependência do raio e energia de ligação dos núcleos com a massa atômica ( $A$ );

# Propriedades da força Nucleon-Nucleon

3) A força nuclear independe da carga; é igual entre prótons e entre nêutrons.

4) A força nuclear apresenta uma componente repulsiva: caso contrário, o núcleo colapsaria;

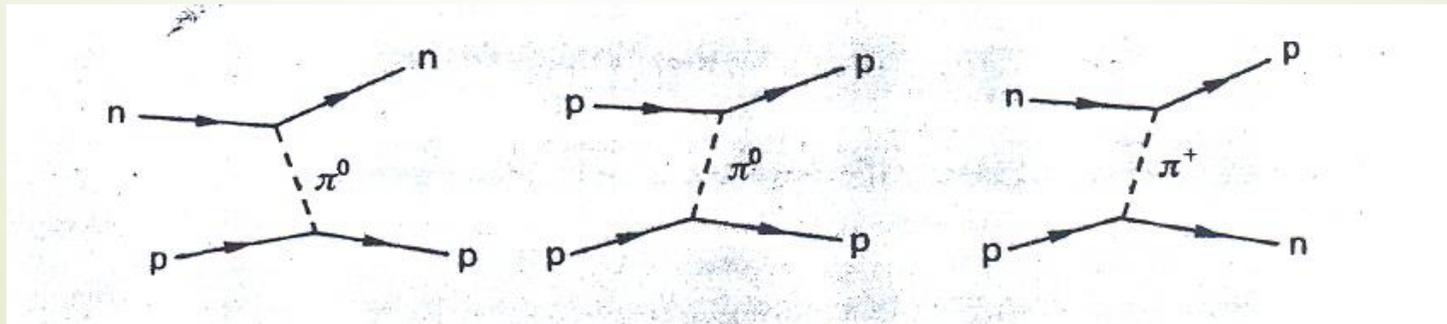
- Uma maneira conveniente de se estudar a força nucleon-nucleon é utilizar sistemas de dois nucleons, ou seja, p-p, n-n ou n-p.
- Em termos de sistemas ligados, apenas a combinação n-p é ligada, formando um deutério.
- Também é possível estudar estes sistemas através de processos de espalhamento calculando o phase shift e a seção de choque.

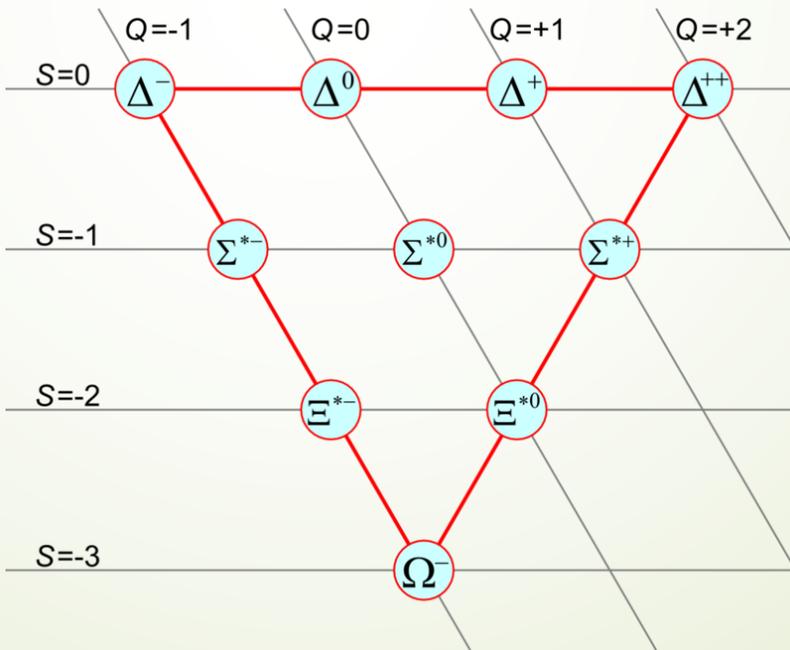
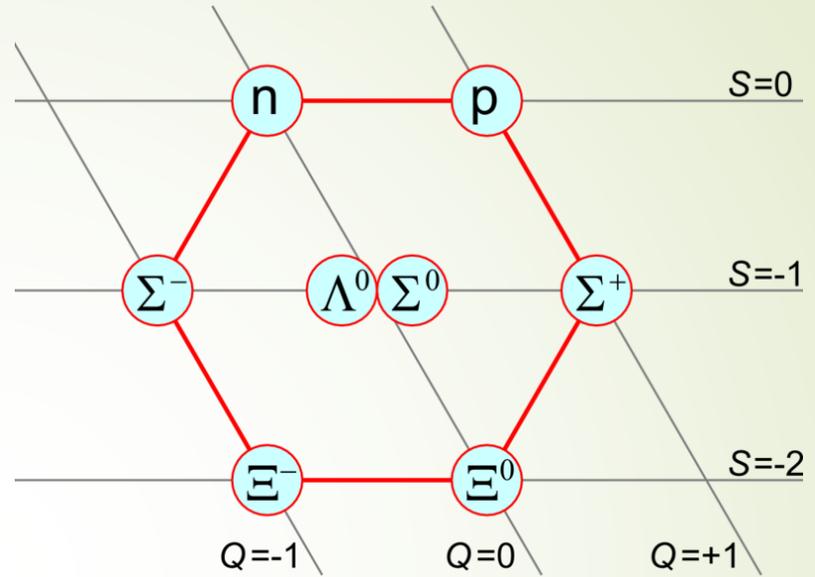
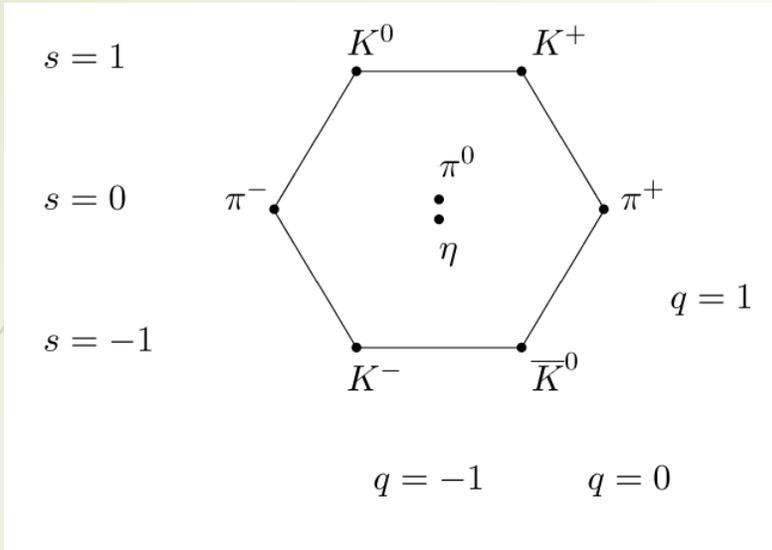
# MODELO DE YUKAWA

- Em 1935 o físico japonês Hideki Yukawa propôs um potencial de alcance curto dado na forma

$$V(r) = -\alpha \frac{e^{-\mu r}}{r},$$

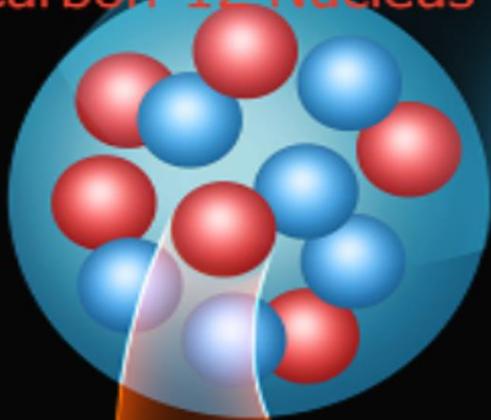
- Yukawa associou este potencial a partícula que ele chamou de méson  $\pi$ . De modo que no processo de interação entre dois nucleons esses mesons eram trocados.





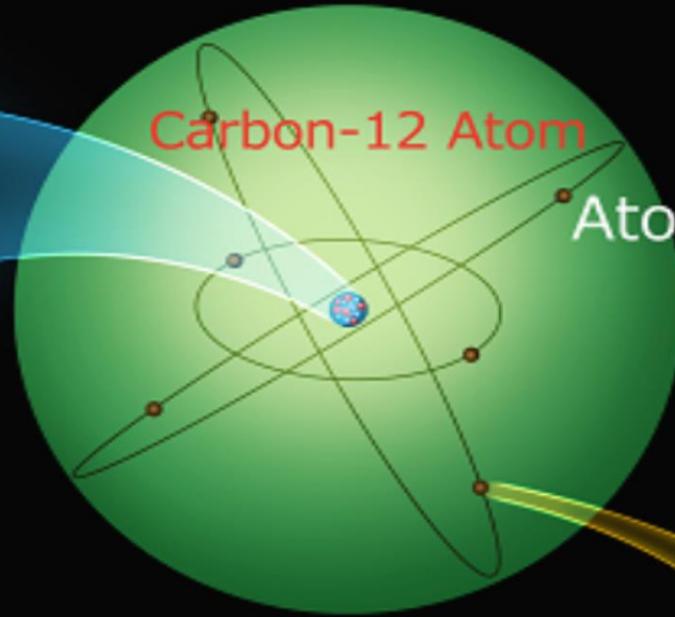
Atomic Nucleus Scale  
~ a few  $10^{-15}\text{m}$

Carbon-12 Nucleus



Carbon-12 Atom

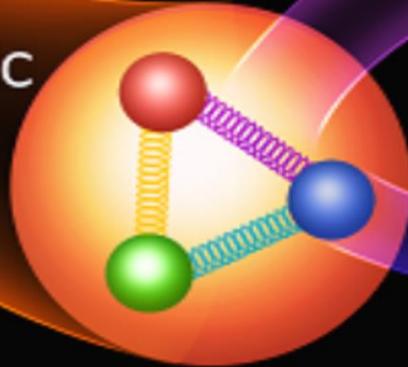
Atomic Scale  
 $\geq 10^{-10}\text{m}$



Elementary Particle  
Scale  
 $\ll 10^{-15}\text{m}$

Proton

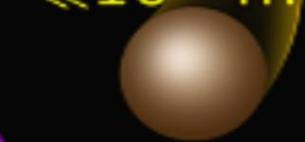
Nuclear/Hadronic  
Scale  
 $\sim 1.2 \times 10^{-15}\text{m}$



Gluon

Electron

Quark



# THE STANDARD MODEL OF FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

## FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_L$ lightest neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	<b>u</b> up	0.002	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.005	-1/3
$\nu_M$ middle neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_H$ heaviest neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	<b>t</b> top	173	2/3
$\tau$ tau	1.777	-1	<b>b</b> bottom	4.2	-1/3

\*See the neutrino paragraph below.

**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$  GeV s =  $1.05 \times 10^{-34}$  J s.

**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

**The energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ ) where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$  joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c<sup>2</sup> =  $1.67 \times 10^{-27}$  kg.

### Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ , or  $\nu_\tau$ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite-mass neutrinos  $\nu_L$ ,  $\nu_M$ , and  $\nu_H$  for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$  but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

## Particle Processes

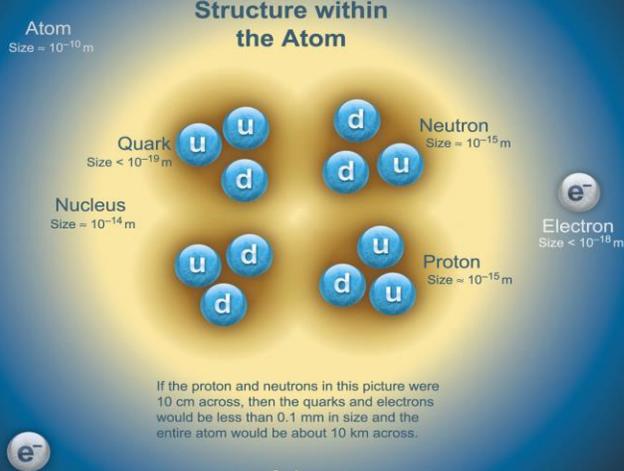
These diagrams are an artist's conception. Orange shaded areas represent the cloud of gluons.

$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron  $\beta$  (beta) decay.

$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce  $B^0$  and  $\bar{B}^0$  mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
<b>W<sup>-</sup></b>	80.39	-1	<b>Higgs Boson spin = 0</b>		
<b>W<sup>+</sup></b>	80.39	+1	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>Z<sup>0</sup></b>	91.188	0	<b>H</b> Higgs	126	0

### Higgs Boson

The Higgs boson is a critical component of the Standard Model. Its discovery helps confirm the mechanism by which fundamental particles get mass.

### Color Charge

Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

### Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature **mesons**  $q\bar{q}$  and **baryons**  $qqq$ . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ( $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ ), and neutron (udd). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion  $\pi^+$  ( $u\bar{d}$ ), kaon  $K^+$  ( $u\bar{s}$ ), and  $B^0$  ( $d\bar{s}$ ).

## Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	<b>W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> Z<sup>0</sup></b>	$\gamma$	Gluons
Strength at $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$	$\begin{matrix} 10^{-41} \\ 10^{-41} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0.8 \\ 10^{-4} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 25 \\ 60 \end{matrix}$

## Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, microscopic black holes, and/or evidence of string theory.

### Why is the Universe Accelerating?



The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

### Why No Antimatter?



Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

### What is Dark Matter?



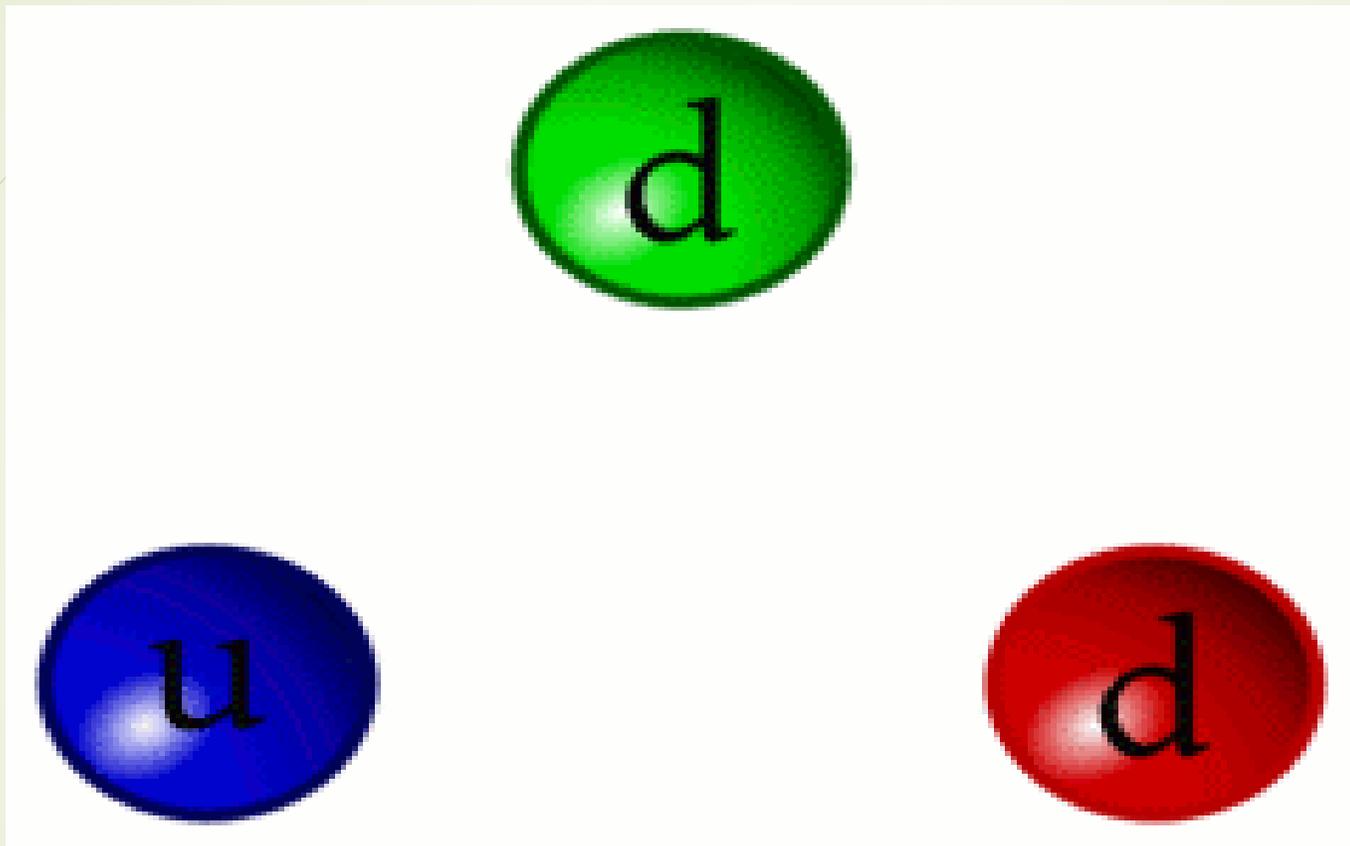
Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

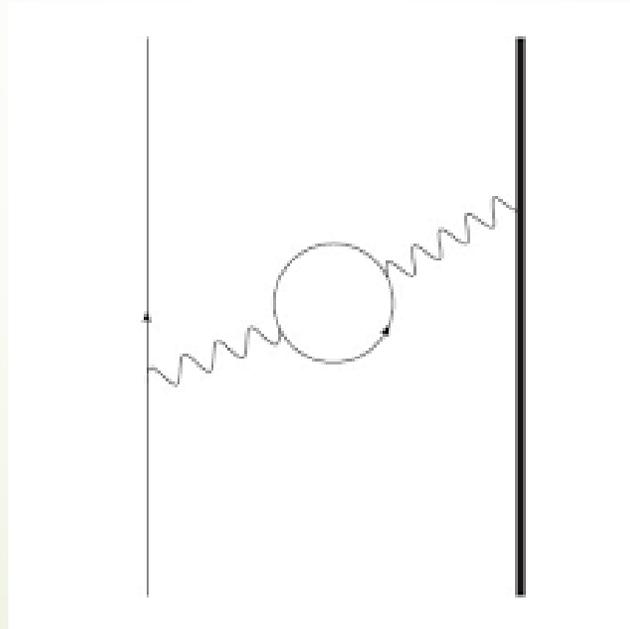
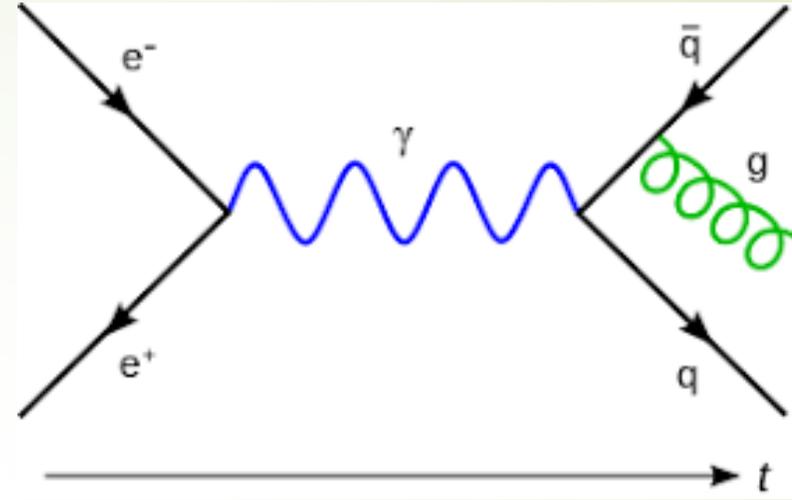
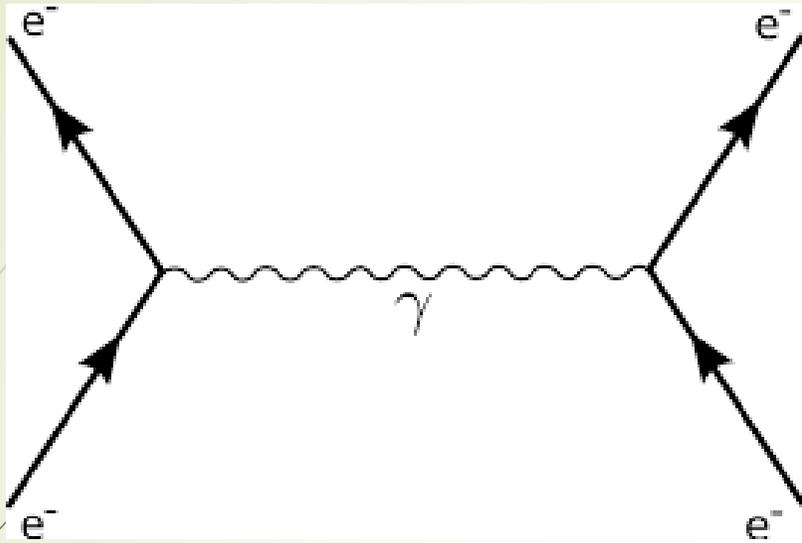
### Are there Extra Dimensions?



An indication for extra dimensions may be the extreme weakness of gravity compared with the other three fundamental forces (gravity is so weak that a small magnet can pick up a paperclip overwhelming Earth's gravity).









	Two-nucleon force	Three-nucleon force	Four-nucleon force
LO ( $Q^0$ )			
NLO ( $Q^2$ )			
N <sup>2</sup> LO ( $Q^3$ )			
N <sup>3</sup> LO ( $Q^4$ )			
N <sup>4</sup> LO ( $Q^5$ )			