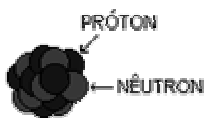


Unidade 3  
**Núcleo Atômico**



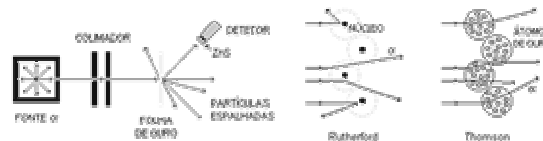
- Descoberta do Núcleo
- Propriedades dos Núcleos
- Forças Nucleares
- Estabilidade Nuclear
- Ressonância Magnética Nuclear

Consultas → <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuccon.html#nuccon>

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Descoberta do Núcleo

- 1911: Rutherford propôs a estrutura atômica com um núcleo massivo, ou seja, carga positiva concentrada no centro do átomo.
- Raio do núcleo 10 mil vezes menor que o raio do átomo, mas contém mais de 99,9 % da massa deste átomo



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Descoberta do Nêutron

- **1932:** marca o início da Física Nuclear Moderna
- Primeira reação nuclear com partículas artificialmente aceleradas obtida por J. D. Cockcroft e E. T. S. Walton.
- Pósitron ( $e^+$ ) é descoberto por C. Anderson.
- Nêutron é descoberto por J. Chadwick

Esta descoberta teve uma importância excepcional. Bombardeando berílio com partículas alfa, ele descobriu que os núcleos desses elementos se desintegravam e emitiam uma partícula, até então não observada. Essa partícula devia ser aquela que fora prevista por Rutherford, chamada de **nêutron**, e que revelou ser eletricamente neutra e possuir massa um pouco maior que a do próton.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Propriedades dos Núcleos

- Terminologia:

**NUCLÍDEOS:** quando nos referimos aos núcleos em vez de aos átomos.

**NÚCLEO:** Prótons ( $Z$ ) + Nêutrons ( $N$ ) ⇒ **NÚCLEONS**

**NÚMERO DE MASSA:**  $A = Z + N$

Representação:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{197}_{79} Au$

$Z$  caracteriza o elemento químico

$X = \text{Elemento (Au)}$   
 $A = 197$   
 $Z = 79$   
 $N = A - Z = 118$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Propriedades dos Núcleos

- **MASSA NUCLEAR: unidades de massa atômica (u)**  
**1 u = 1/12 massa de um átomo de carbono 12**  
**= 1,6605 x 10<sup>-27</sup> kg ⇒ m (<sup>12</sup>C) = 12 u**

- massa de um átomo de carbono 12 vale então:

$$m = (12) (1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 1,9926 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

= massas dos prótons + nêutrons + elétrons

- massa de um elétron é:  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$m_{12e} = (12) (9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}) = 1,0932 \times 10^{-29} \text{ kg}$$

$$m / m_{12e} = (1,9926 \times 10^{-26} \text{ kg}) / (1,0932 \times 10^{-29} \text{ kg}) = 1,8227 \times 10^3$$

- Massa dos elétrons é cerca de 2000 vezes menor que a massa do átomo de <sup>12</sup>C

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

- Massas de prótons e nêutrons em unidades de massa atômica

$$m_p = 1,0078 \text{ u} \quad m_n = 1,0087 \text{ u}$$

- Para  $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $1 \text{ u} = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$  e  $1 \text{ J} = 6,2415 \times 10^{12} \text{ MeV}$ , temos:

$$uc^2 = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2,9979 \times 10^8 \text{ m/s})^2 =$$

$$= 1,4921 \times 10^{-10} \text{ J} = 1,4921 \times 10^{-10} \times 6,2415 \times 10^{12} \text{ MeV}$$

$$= 931,4815 \text{ MeV} \Rightarrow 1 \text{ u} \approx 931,5 \text{ MeV}/c^2 \text{ ou}$$

$$c^2 \approx 931,5 \text{ MeV/u}$$

$$m_e c^2 = 511,0244 \times 10^{-3} \text{ MeV} = 0,5110 \text{ MeV}$$

$$m_p c^2 = 938,7471 \text{ MeV}$$

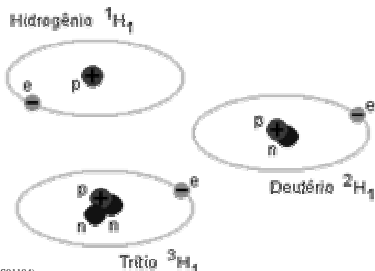
$$m_n c^2 = 939,5854 \text{ MeV}$$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Propriedades dos Núcleos

- **ISÓTOPOS:** núcleos associados ao mesmo elemento da tabela periódica (mesmo Z)

**Exemplo:** Hidrogênio (Z=1), temos isótopos com N=0 (A=1), N=1 (deutério) (A=2) e N=2 (trítio) (A=3)



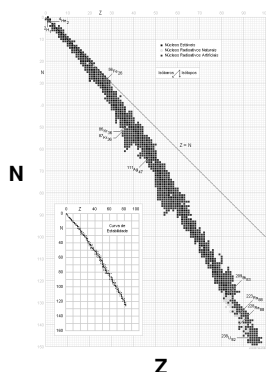
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Propriedades dos Núcleos

- **ISÓBAROS:** núcleos associados a elementos diferentes da tabela periódica mas com iguais números de massa. (mesmo A)  
**Exemplo:** núcleos de berílio 10 (Z = 4, N = 6), boro 10 (Z = 5, N = 5) e carbono 10 (Z = 6, N = 4) são núcleos isóbaros.
- **ISÓTONOS:** núcleos associados a elementos diferentes da tabela periódica mas com mesmo número de nêutrons. (mesmo N)
- **ISÔMEROS:** núcleos num estado excitado com um tempo de decaimento longo (estado isomérico)  $\Rightarrow$  núcleo não estável

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## CARTA DE NUCLÍDEOS



<http://atom.kaeri.re.kr/>

Tabela periódica pouco útil quando se trata de núcleos  $\Rightarrow$  usa-se a **carta de núclídeos**, onde temos todos os núcleos estáveis e radioativos e facilmente podemos visualizar os isótopos, isóbaros e isótonos.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Tamanhos e Formas dos Núcleos

- Rutherford concluiu que o alcance da força nuclear deveria ser menor que aproximadamente  $10^{-14}$  m.
- Suposição: núcleo é uma esfera de raio  $R$ .
- Partículas (elétrons, prótons, nêutrons, e alfas) são espalhadas quando se aproximam do núcleo.
- Não é óbvio se este espalhamento ocorre por causa do tamanho do núcleo (raio do núcleo) ou se é devido a força nuclear, que teria um alcance um pouco além do raio do núcleo.
- Raio de alcance da força nuclear  $\approx$  raio do núcleo (massa)  
 $\approx$  raio da carga

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Tamanhos e Formas dos Núcleos

- O raio nuclear pode ser dado aproximadamente por

$$R = r_0 A^{1/3} \text{ onde } r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{ m.}$$

- Unidade: **fermímetro (ou fermi)**  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ .
- Volume nuclear, considerando forma esférica:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad V \propto R^3 \propto A$$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

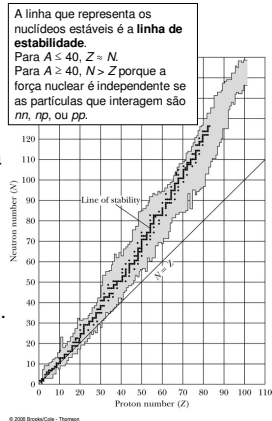
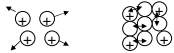
## Forças Nucleares

- **Interação forte ( $I_f$ ):**
  - Independe da carga elétrica de cada núcleon
  - Ocorre para distâncias muito pequenas ( $d < 2 \text{ fm}$ ): curto alcance
  - Para  $d > 2 \text{ fm}$ ,  $I_f \Rightarrow 0$ , decai exponencialmente com a distância
  - Sempre atrativa
- **Interação eletromagnética ( $I_e$ ):**
  - Núcleons carregados (prótons)
  - Inversamente proporcional a distância entre os dois núcleons ao quadrado ( $I_e \propto 1/d^2$ )
  - Repulsiva ou atrativa
  - $I_e \propto Z^2$
  - Para  $d < 2 \text{ fm}$   $I_f \gg I_e$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Forças Nucleares

- *Porque núcleos pesados tem mais nêutrons???*
- Núcleons se atraem via  $I_f$
- Prótons se repelem entre si para distâncias  $> 1$  fm
- Para núcleos pesados, nêutrons precisam ser intercalados entre prótons para manter o núcleo estável e a  $I_e$  (repulsão entre prótons) não começar a dominar.



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Energia de Ligação por Núcleon ( $E_{lig}/A$ )

- **Energia de ligação nuclear:** energia necessária para juntar prótons e nêutrons e compor o núcleo.

$$E_{lig} = (Z M_H + N M_N - M_A) c^2$$

$\Delta m$  (variação de massa)

$M_H$  = massa do hidrogênio (1 próton + 1 elétron)

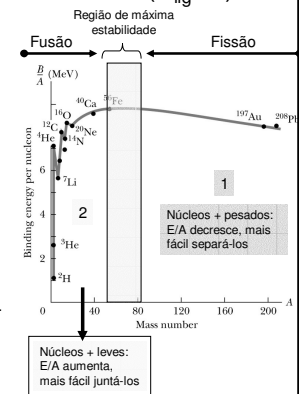
$M_N$  = massa do nêutron

$M_A$  = massa atômica (tabela periódica)

- Quanto maior  $E_{lig}$  mais estável é o núcleo.

- Trabalha-se com energia de ligação por nucleon:  $E_{lig}/A$  = energia média necessária para arrancar um nucleon do núcleo

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



## Energia de Ligação por Núcleon ( $E_{lig}/A$ )

- **Energia de ligação nuclear:**  
 $E_{lig} = (Z M_H + N M_N - M_A) c^2 \Rightarrow Z M_H + N M_N > M_A$   
 $\Delta m > 0$
- $Q = -\Delta m c^2$ , onde  $\Delta m$  é a variação da massa de repouso.
- $E_{lig} = \Delta m c^2$  é a diferença entre a energia de repouso do núcleo e a energia de repouso dos nucleons.

**Note que na equação acima a  $m_{elétrons}$  se cancela pois usamos a  $M_H$  multiplicada por  $Z$ , e deste modo ficamos apenas com a variação na massa nuclear**

$$Z M_H + N M_N = Z \text{ prótons } M_p + Z \text{ elétrons } M_e + N \text{ nêutrons } M_n$$

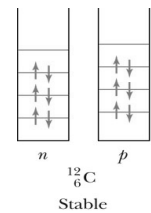
$$M_A = M_{\text{Núcleo}} + Z \text{ elétrons } M_e$$

$$Z M_H + N M_N - M_A = Z \text{ prótons } M_p + N \text{ nêutrons } M_n - M_{\text{Núcleo}}$$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Níveis de Energia / Spin

- quantizados
- determinados através de reações nucleares conhecidas
- ordem de grandeza: MeV
- modelo de poço infinito: estado mais baixo 2p e 2n (princípio de exclusão de Pauli)
- spin nuclear: momento angular nuclear intrínseco
- prótons e nêutrons: número quântico de spin  $1/2$
- núcleos com número par de prótons e nêutrons tem spin nuclear nulo
- momento magnético nuclear intrínseco associado ao spin nuclear ( $\ll$  que o momento magnético dos elétrons)
- momento magnético do núcleo  $\mu_N$  (magneton nuclear)



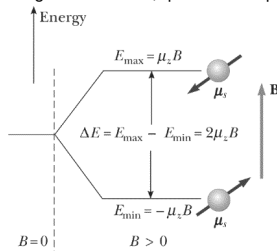
$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3,15 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

(Fundamentos de Física – Halliday, Resnick, Walker, vol. 4 – 6ª. Ed.- cap. 41.6)

- Técnica espectroscópica que envolve apenas o núcleo atômico. A vizinhança química de um núcleo específico é deduzida a partir das informações obtidas para o núcleo ao se aplicar um campo magnético externo, que atua no spin nuclear!



$$\Delta E = 2\mu_z B$$

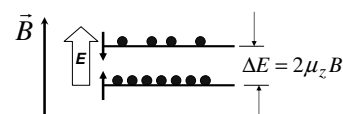
Diferença de energia entre as duas orientações de spin

## Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

- Vamos analisar o caso mais simples: átomo de H (1 próton) submetido a um campo magnético externo

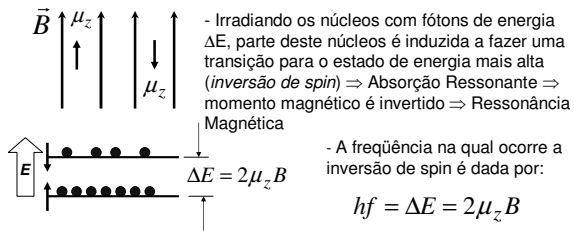
Próton pode ser orientado de duas maneiras sob um campo magnético externo:

- **Antiparalelo** ao campo (maior energia) (spin  $1/2$ )
- **Paralelo** ao campo (menor energia) (spin  $-1/2$ )



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Ressonância Magnética Nuclear (RMN)



- Depois que ocorre esta inversão, alguns prótons podem decair para o estado de menor energia, e emitir fótons com a mesma energia que o fóton original  $\Rightarrow$  em geral temos mais prótons no estado de mais baixa energia, o que significa que o material absorve energia.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

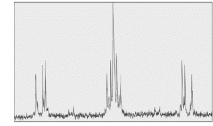
- Vamos supor uma gota de água submetida a um campo magnético uniforme: ocorre exatamente a mesma coisa que vimos para um próton.

- O campo magnético aplicado ( $B$ ) não é exatamente o campo externo ( $B_{ext}$ ) pois temos um campo local ( $B_{loc}$ ) interno pequeno, produzido pelos elétrons e núcleos situados perto do próton considerado, assim que:

$$hf = 2\mu_z (B_{ext} + B_{loc})$$

- Para se manter a ressonância magnética, pode-se manter fixa a frequência (fótons incidentes) e variar o  $B_{ext}$  até conseguir a inversão de spin (equação acima é satisfeita)  $\Rightarrow$  pico de absorção (ou emissão).

- Um espectro de RMN pode identificar substâncias, principalmente compostos orgânicos



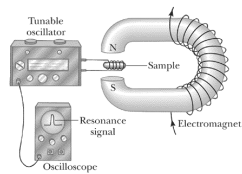
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

## Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

- Ordens de grandeza de campos e frequências:

**Campos magnéticos:** da ordem de 1 a 20 T – campo magnético da Terra da ordem de  $10^{-4}$  T (T = tesla, unidade para fluxo magnético no SI)

**Frequências (radio frequências - RF):** da ordem de MHz, variando de 20 a 900 MHz, dependendo da intensidade do campo magnético e do núcleo a ser estudado.



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Aplicações:

- No corpo humano os prótons são submetidos a diversos campos magnéticos diferentes (campos locais)

- Aplica-se um campo externo, diferenças em campos locais são detectadas e processadas para dar origem a uma imagem