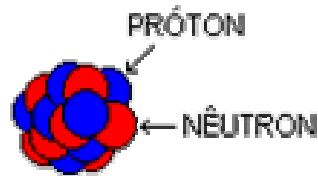


Unidade 3

Núcleo Atômico



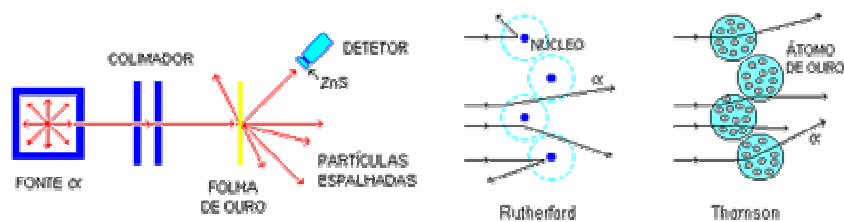
- Descoberta do Núcleo
- Propriedades dos Núcleos
- Forças Nucleares
- Estabilidade Nuclear
- Ressonância Magnética Nuclear

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**) \Rightarrow **NÚCLEONS**

NÚMERO DE MASSA: **A** = **Z** + **N**

Representação: ${}^A X_Z \rightarrow {}^{197}Au_{79}$

Z caracteriza o elemento químico

$\left\{ \begin{array}{l} X = \text{Elemento (Au)} \\ A = 197 \\ Z = 79 \\ N = A - Z = 118 \end{array} \right.$

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

$$= 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \Rightarrow m(^{12}\text{C}) = 12 \text{ u}$$

- 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 ^{12}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:

$$\begin{aligned} u c^2 &= 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2,9979 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = \\ &= 1,4921 \times 10^{-10} \text{ J} = 1,4921 \times 10^{-10} \times 6,2415 \times 10^{12} \text{ MeV} \\ &= 931,4815 \text{ MeV} \Rightarrow \mathbf{1 \text{ u} \approx 931,5 \text{ MeV}/c^2 \text{ ou}} \\ &\quad \mathbf{c^2 \approx 931,5 \text{ MeV/u}} \end{aligned}$$

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

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

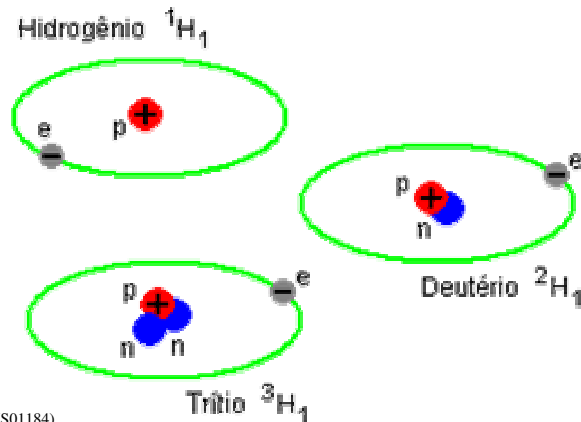
$$m_n c^2 = 939,5854 \text{ MeV}$$

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/>

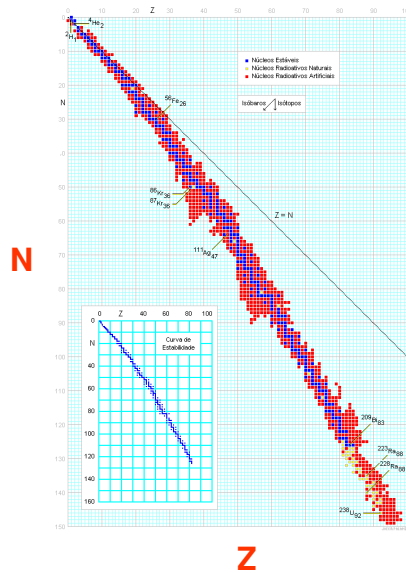


Tabela periódica pouco útil quando se trata de núcleos \Rightarrow usa-se a [carta de nuclídeos](#), onde temos todos os núcleos estáveis e radioativos e facilmente podemos visualizar os isótopos, isóbaros e isótonos.

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: **fermi (ou fermi)** 1 fm = 10^{-15} 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)

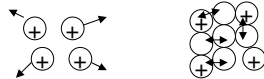
Forças Nucleares

- **Interação forte (I_f):**
 - Independe da carga elétrica de cada núcleon
 - Ocorre para distâncias muito pequenas ($d < 2$ fm): curto alcance
 - Para $d > 2$ 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 $d < 2$ 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.

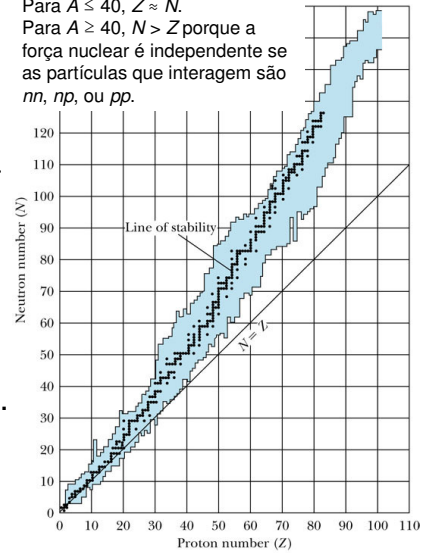


Márcia Russman Gallas (FIS01184)

A linha que representa os núclídeos estáveis é a **linha de estabilidade**.

Para $A \leq 40$, $Z \approx N$.

Para $A \geq 40$, $N > Z$ porque a força nuclear é independente se as partículas que interagem são nn , np , ou pp .



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

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

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

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

Δm (variação de massa)

M_H = massa do hidrogênio

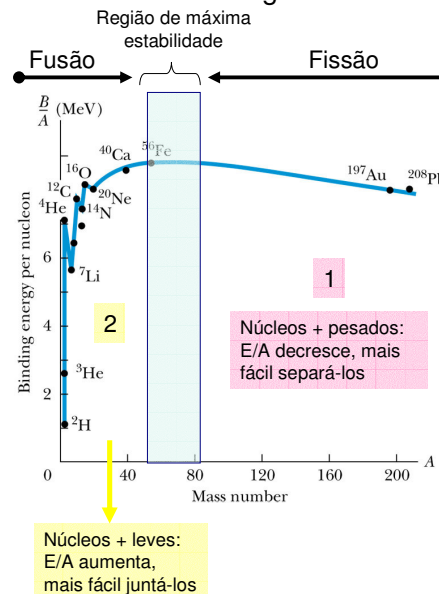
(1 próton + 1 elétron)

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 núcleon: E_{lig}/A = energia média necessária para arrancar um núcleon do núcleo

Márcia Russman Gallas (FIS01184)



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

- **Energia de ligação nuclear:**

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

$$\Delta m > 0$$

- $Q = -\Delta m c^2$, onde Δm é a variação da massa de repouso.
- $E_{\text{lig}} = \Delta m c^2$ é a diferença entre a energia de repouso do núcleo e a energia de repouso dos núcleons.

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

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

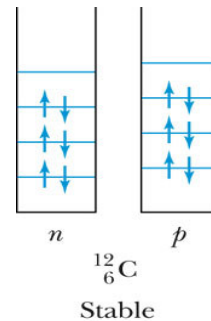
$$M_A = M_{\text{Núcleo}} + \cancel{Z \text{ elétrons } M_e}$$

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

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 intrínscio
- prótons e nêutrons: número quântico de spin $\frac{1}{2}$
- núcleos com número par de prótons e nêutrons tem spin nuclear nulo
- momento magnético nuclear intrínscio associado ao spin nuclear (<< que o momento magnético dos elétrons)
- momento magnético do núcleo μ_N (magneton nuclear)



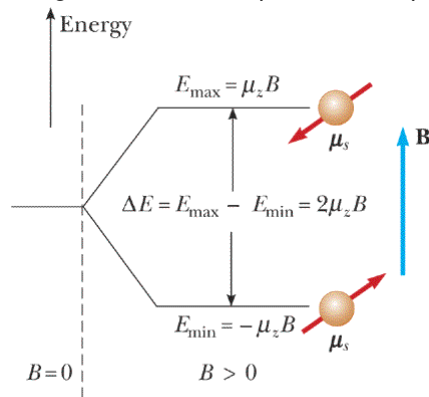
$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3,15 \times 10^{-8} \text{ eV} / T$$

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!



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

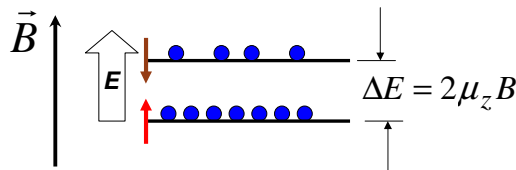
Diferença de energia entre as duas orientações de spin

Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

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

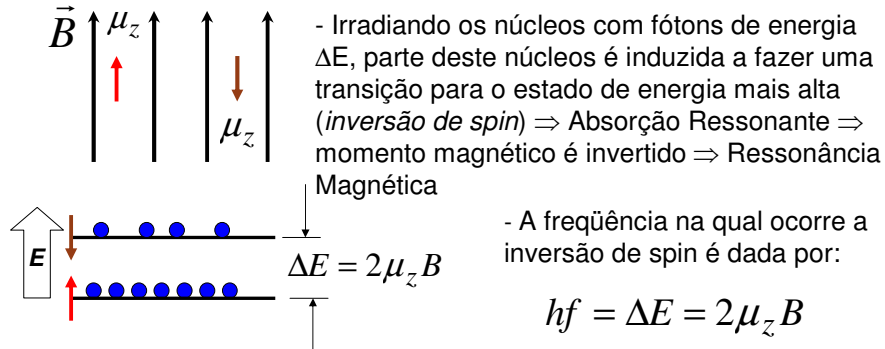
Próton pode ser orientado de duas maneiras sob um campo magnético externo:

- **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)

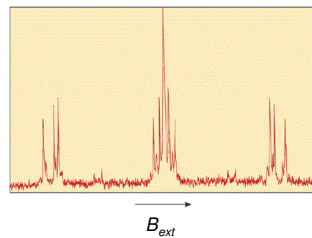
Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

- 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



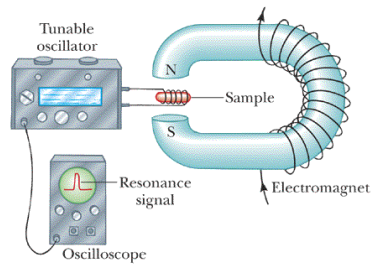
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

- Ordens de grandeza de campos e freqüências:

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)

Freqüências (radio freqüências - 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