

Notas de Aula de Introdução à Física Nuclear (NHZ3026)

Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
 Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH)
 Universidade Federal do ABC (UFABC)
 Santo André - SP

AULA #2: FUNDAMENTOS

I. CONSTANTES FÍSICAS

- Velocidade da luz no vácuo: $c = 299\,792\,458$ m/s (exato) $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s
- Constante de Planck: $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J · s
- Constante de Planck reduzida: $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34}$ J · s
- Carga elementar: $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
- Constante de estrutura fina: $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ (adimensional)
- Unidade de massa atômica (u.m.a.): $u = \frac{M_{mol}(^{12}\text{C})}{12 \cdot N_A} = \frac{1\text{g}}{N_A} \approx 1,661 \cdot 10^{-27}$ kg
- Fator de conversão: $\hbar c \approx 3,161 \cdot 10^{-26}$ J · m

II. UNIDADES

Energia: a energia fornecida a um elétron ao ser acelerado por uma diferença de potencial de 1 V é:

$$E = q \cdot V = (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Tomando-se este valor como escala de energia, define-se o *elétron-Volt*:

$$\boxed{1 \text{ eV} \equiv 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

que corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia conveniente para fenômenos atômicos e moleculares. Assim, em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}, \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}, \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}, \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}, \dots$$

Em física nuclear, estaremos tratando de fenômenos cujas energias irão variar na faixa que vai tipicamente das centenas de keV até GeV, por exemplo:

- Modo de decaimento β (máxima energia) do ^{137}Cs : 514 keV;
- Modo de decaimento α do ^{238}U : 4,27 MeV;
- Emissão de prótons: $m_p = 938,3$ MeV ~ 1 GeV.

Momento linear: vamos fazer uma análise dimensional das grandezas mecânicas momento linear e energia:

$$\left. \begin{array}{l} [p] = M L T^{-1} \\ [E] = M L^2 T^{-2} \end{array} \right\} \text{isto sugere que: } [p] = [E] / [v],$$

onde v é uma velocidade.

Ademais, partindo da fórmula da energia relativística, se a massa for nula (como no caso de um fóton):

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \Rightarrow E = pc,$$

que é a relação entre a energia e o momento linear do fóton.

Então, utiliza-se como unidade para o momento: $1 \text{ eV}/c = 5,344 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

Massa:

De $E = mc^2$ vem:

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1,783 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Então, para a unidade de massa atômica temos:

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

Comprimento:

Define-se o Fermi:

$$1 \text{ F} \equiv 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

Então:

$$\left. \begin{array}{l} c = 3 \cdot 10^{23} \text{ fm/s} \\ \hbar = 6,582 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s} \end{array} \right\} \Rightarrow \hbar c = 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm},$$

o que nos permite calcular, com a constante de estrutura fina, o fator de grandezas eletromagnéticas:

$$\alpha = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{1}{\hbar c} \Rightarrow \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = \alpha(\hbar c) = \frac{197,3}{137} \text{ MeV} \cdot \text{fm} = 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

Exemplos:

1. Considere uma partícula confinada à dimensão de 1 F, determine a incerteza na medida de seu momento:

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar/2 \Rightarrow \Delta p \cdot 1 \text{ fm} = \frac{197,3}{2} \frac{\text{MeV} \cdot \text{fm}}{c} \Rightarrow \Delta p = 98,7 \text{ MeV}/c$$

2. Seja uma partícula cujo decaimento ocorre em 10^{-22} s, determine a incerteza na medida de sua energia:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar/2 \Rightarrow \Delta E \cdot 10^{-22} \text{ s} = \frac{6,582}{2} \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s} \Rightarrow \Delta E = 3,29 \text{ MeV}$$

III. MASSAS

- próton: $m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2 = 1,007276 u$
- nêutron: $m_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2 = 1,008665 u$
- elétron: $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2 \approx \frac{1}{1823} u$

A massa nuclear é aproximadamente igual à massa do átomo, assim:

$$m_{nucl} \approx A \cdot m_p \approx A \cdot m_H,$$

onde A é o número de massa.

Em 1911, Thomson descobriu os *isótopos* do neônio, observando uma linha forte (91%) para $A = 20$ e uma linha fraca (9%) para $A = 22$.

Exemplo: isótopos do oxigênio: ^{16}O (99,759%), ^{17}O (0,037%) e ^{18}O (0,204%),

O espectrômetro de massa:

Na figura 1, vemos o diagrama de um espectrômetro de massa. Posiciona-se uma fonte emissora dos núcleos que se deseja medir a massa numa região de campo magnético \vec{B} uniforme e, imediatamente na saída do feixe, aplica-se um campo elétrico \vec{E} .

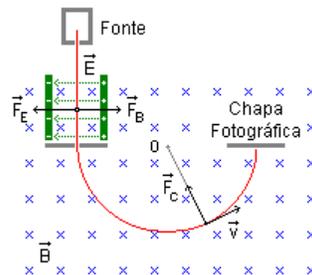


Figura 1: Espectrômetro de massa.

Para núcleos de carga $+Ze$, temos:

$$\vec{F}_E = Ze\vec{E}$$

$$\vec{F}_B = Ze\vec{v} \times \vec{B}$$

ajustam-se os campos entre as placas do capacitor, tais que as forças se cancelem, assim podemos determinar a velocidade dos núcleos:

$$F_E = F_B \Rightarrow ZeE = ZevB \Rightarrow v = \frac{E}{B},$$

ou seja, a região entre placas do capacitor funciona como um filtro de velocidades.

Na região de \vec{B} somente, a força de Lorentz é a força centrípeta \vec{F}_c :

$$F_B = F_c \Rightarrow ZevB = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow m = \frac{ZeRB}{v} = \frac{ZeRB^2}{E}$$

Para a calibração do espectrômetro, utiliza-se uma variedade de hidrocarbonetos com massas sob uma grande variação de valores. Na tabela 1 são fornecidos valores de massa para o nêutron e alguns isótopos (em unidades de u):

Nuclídeo	Z	A	massa atômica [u]
n	0	1	1,008665
^1H	1	1	1,007825
^2H	1	2	2,014102
^3H	1	3	3,016050
^3He	2	3	3,016030
^4He	2	4	4,002603
^6Li	3	6	6,015125
^7Li	3	7	7,016004
^{10}B	5	10	10,012939
^{11}B	5	11	11,009305
^{12}C	6	12	12,000000
^{13}C	6	13	13,003354
^{14}C	6	14	14,003242
^{13}N	7	13	13,005738
^{14}N	7	14	14,003074
^{16}O	8	16	15,994915
^{56}Fe	26	56	55,939395
^{238}U	92	238	238,048608

Tabela 1
Massa atômica de alguns nuclídeos selecionados.

IV. NOMENCLATURA

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, $^A_Z\text{X}_N$, onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Notações mais comuns: ^A_ZX ou ^AX ou (Z, A) ;
- *núcleon*: designação genérica para um próton ou um nêutron;
- *isótopos*: nuclídeos com o mesmo número de prótons: $^{235}_{92}\text{U}$ e $^{238}_{92}\text{U}$;
- *isótonos*: nuclídeos com o mesmo número de nêutrons: ^2_1H e ^3_2He ;
- *isóbaros*: nuclídeos com o mesmo número de massa: ^3_1H e ^3_2He ;
- *radionuclídeo*: nuclídeo radioativo;
- *radioisótopos*: isótopo radioativo.

Existem cerca de 118 elementos¹: $Z = 0, 1, 2, \dots, 117$, mas existem mais de 1000 núclídeos. Na figura 2 vemos um gráfico que representa em cada pequeno quadrado um diferente núclídeo: na ordenada temos o número atômico e na abscissa o número de nêutrons; em preto estão representados os núclídeos estáveis, em amarelo os radionúclídeos conhecidos e em verde os supostos radionúclídeos desconhecidos. Sobre uma linha horizontal, encontramos os isótopos de um dado elemento e sobre uma linha vertical, os isótonos. Note a linha vermelha da igualdade $N = Z$ e note que os núclídeos estáveis se posicionam ligeiramente abaixo dessa linha, ou seja, tais que $N \geq Z$.

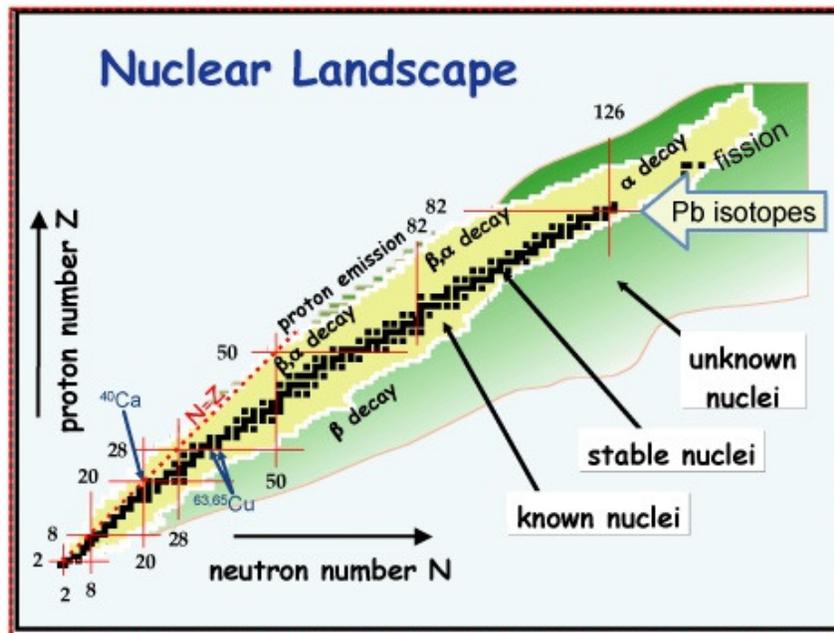


Figura 2: Carta de núclídeos.

¹Este número aumenta gradativamente, conforme novos elementos são sintetizados em laboratório.

V. EXERCÍCIOS

1. Em física de partículas elementares são definidas as chamadas *unidades naturais*, tais que $\hbar = c = 1$. Nestas condições e tomando GeV como escala de energia, mostre que:

$$[m] = \text{GeV}, [x] = \text{GeV}^{-1} = 0,1973 \text{ fm e } [t] = \text{GeV}^{-1} = 6,582 \cdot 10^{-25} \text{ s.}$$

Dica: use o princípio da incerteza com $\Delta p \Delta x \sim \hbar$ no cálculo dos fatores de escala.

2. Antes de Chadwick, acreditava-se que o núcleo continha A prótons e $(A - Z)$ *elétrons nucleares*. Se fosse para confinar um elétron numa região do tamanho do núcleo ($\sim 10^{-14}$ m), calcule qual deveria ser o momento dos supostos elétrons nucleares. Sabendo que a máxima energia da radiação β é, geralmente, menor que 1 MeV, discuta a possibilidade de existência dos elétrons nucleares. Obs.: use a fórmula da energia relativística: $E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$.
3. Um feixe estreito de íons de boro, carregados unitariamente — isto é, com $^{10}\text{B}^+$ e $^{11}\text{B}^+$ —, passa através de um seletor de velocidades em que $E = 20$ kV/m e $B = 0,25$ T e após um desvio de 180° os íons são registrados em uma placa fotográfica. Qual é a separação espacial das imagens?