Aula 2: Fundamentos

Introdução à Física Nuclear

Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira

Centro de Ciências Naturais e Humanas
Universidade Federal do ABC
Av. dos Estados, 5001
09210-580 Santo André-SP

3 de outubro de 2024

Universidade Federal do ABC

Valores adotados para as constantes físicas:

Valores adotados para as constantes físicas:

- Velocidade da luz no vácuo: $c = 299\,792\,458$ m/s (exato) $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s

Valores adotados para as 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 $\cdot$ s

Valores adotados para as 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 $\cdot$ s
- Constante de Planck reduzida: $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34}$ J $\cdot$ s

Valores adotados para as 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 $\cdot$ s
- Constante de Planck reduzida: $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34}$ J $\cdot$ s
- Carga elementar: $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ C

Valores adotados para as 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 $\cdot$ s
- Constante de Planck reduzida: $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34}$ J $\cdot$ s
- Carga elementar: $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
- Constante de estrutura fina: $\alpha = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)\frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ (adimensional)

Valores adotados para as 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 $\cdot$ s
- Constante de Planck reduzida: $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,055 \cdot 10^{-34}$ J $\cdot$ s
- Carga elementar: $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
- Constante de estrutura fina: $\alpha = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)\frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ (adimensional)
- Unidade de massa atômica (u.m.a.): $u = \frac{M_{mol}(^{12}C)}{12 \cdot N_A} = \frac{1\ \text{g}}{N_A} \approx 1,661 \cdot 10^{-27}$ kg

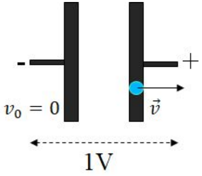
O elétron-volt

Energia:

O elétron-volt

Energia:

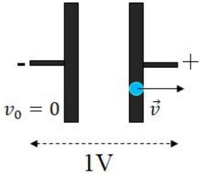
Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



O elétron-volt

Energia:

Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



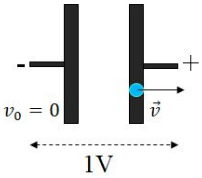
A energia fornecida para este elétron é:

$$E = q \cdot V$$

O elétron-volt

Energia:

Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



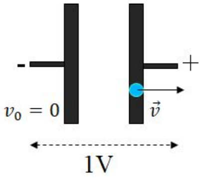
A energia fornecida para este elétron é:

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

O elétron-volt

Energia:

Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



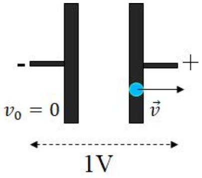
A energia fornecida para este elétron é:

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

O elétron-volt

Energia:

Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



A energia fornecida para este elétron é:

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

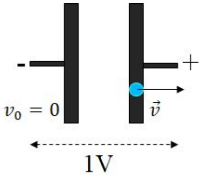
Tomando-se este valor como escala de energia, define-se o *elétron-Volt*:

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

O elétron-volt

Energia:

Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



A energia fornecida para este elétron é:

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

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

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

O elétron-volt

Assim:

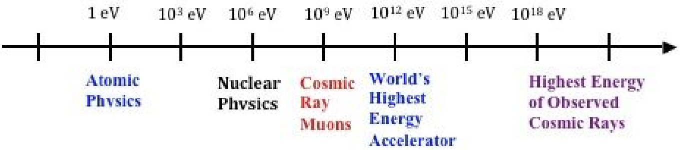
$$1\ \mathrm{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

O elétron-volt

Assim:

$$1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.



O elétron-volt

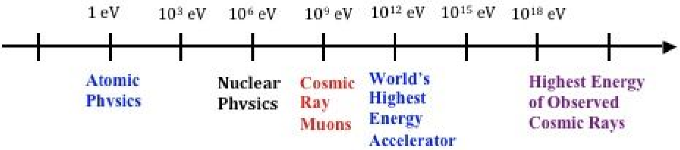
Assim:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \ \ldots$$



O elétron-volt

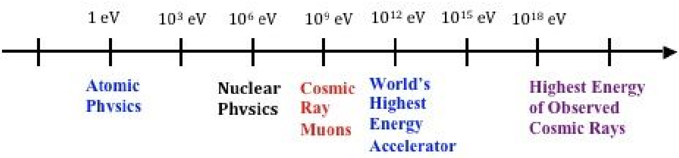
Assim:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \ \text{MeV} = 10^6 \text{ eV}, \ \ldots$$



O elétron-volt

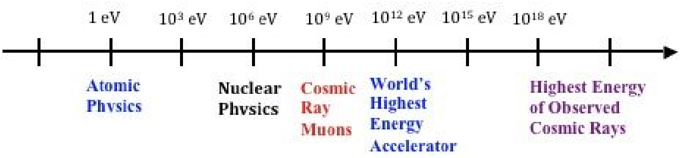
Assim:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \ \text{MeV} = 10^6 \text{ eV}, \ \text{GeV} = 10^9 \text{ eV}, \ \ldots$$



O elétron-volt

Assim:

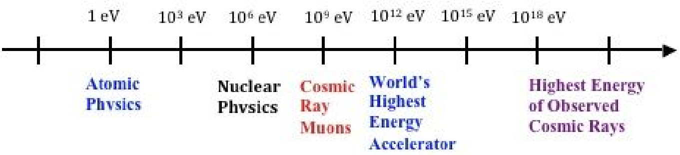
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \ \text{MeV} = 10^6 \text{ eV}, \ \text{GeV} = 10^9 \text{ eV},$$

$$\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}, \ \ldots$$



O elétron-volt

Assim:

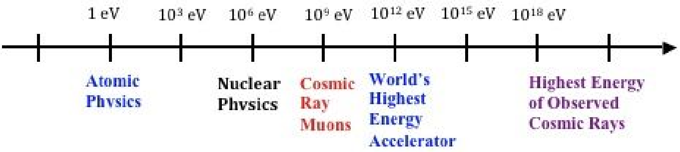
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV},\ \text{MeV} = 10^6 \text{ eV},\ \text{GeV} = 10^9 \text{ eV},$$

$$\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV},\ \text{PeV} = 10^{15} \text{ eV},\ \ldots$$



O elétron-volt

Assim:

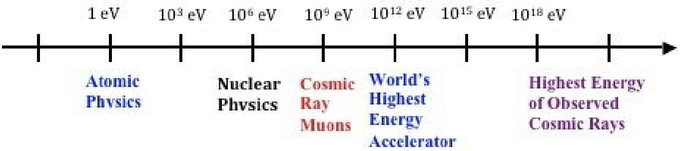
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

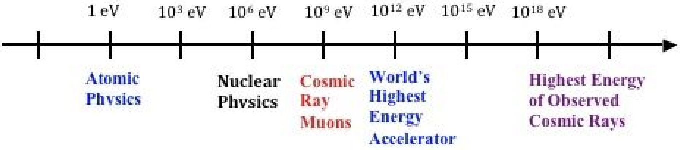
$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV},$$

$$\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}, \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}, \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}, \ldots$$



O elétron-volt

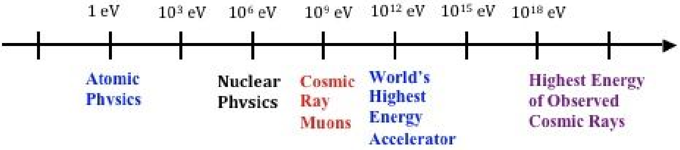
Em física nuclear, estaremos tratando de fenômenos cujas energias irão variar na faixa que vai tipicamente das centenas de keV até GeV.



O elétron-volt

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

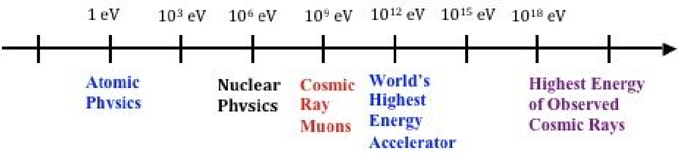
- Modo de decaimento β (máxima energia) do ^{137}Cs: 514 keV;



O elétron-volt

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

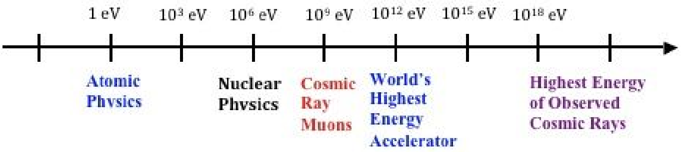
- Modo de decaimento β (máxima energia) do ^{137}Cs: 514 keV;
- Modo de decaimento α do ^{238}U: 4,27 MeV;



O elétron-volt

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:

Momento linear:

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

$$[E] = ML^2T^{-2}$$

Momento linear:

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

$$[E] = ML^2T^{-2}$$
$$[p] = MLT^{-1}$$

Momento linear:

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

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

onde v é uma velocidade.

<u>Momento linear</u>:

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

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

onde v é uma velocidade.

Ademais, partindo da fórmula da energia relativística:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

Momento linear:

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

$$\left.\begin{aligned} [E] &= ML^2T^{-2} \\ [p] &= MLT^{-1} \end{aligned}\right\} \text{isto sugere que: } [p] = [E]\,/\,[v]\,,$$

onde v é uma velocidade.

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

$$E^2 = p^2c^2 + \cancel{m_0}^2c^4 \Rightarrow \; E = pc$$

Momento linear:

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

$$\left.\begin{aligned} [E] &= ML^2T^{-2} \\ [p] &= MLT^{-1} \end{aligned}\right\} \text{isto sugere que: } [p] = [E]\,/\,[v]\,,$$

onde v é uma velocidade.

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

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

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

Momento linear:

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

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

onde v é uma velocidade.

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

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

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

Então, utilizaremos para o momento linear a unidade:

$$\boxed{1\ \mathrm{eV/c} \equiv 5,344 \cdot 10^{-28}\ \mathrm{kg \cdot m/s}}$$

Massa:

Massa:

De $E = mc^2$ vem:

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

Massa:

De $E = mc^2$ vem:

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

Desta forma, teremos, por exemplo:

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

Massa:

De $E = mc^2$ vem:

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

Desta forma, teremos, por exemplo:

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

$$m_p = 938,3\ \mathrm{MeV/c^2} \quad , \quad m_n = 939,6\ \mathrm{MeV/c^2} \quad , \quad m_e = 0,511\ \mathrm{MeV/c^2}.$$

Comprimento:

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

$$c = 3 \cdot 10^{23}\ \text{fm/s}$$

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

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

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

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

que é um fator de conversão muito útil.

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

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

que é um fator de conversão muito útil. Ele permite-nos calcular, por exemplo, que:

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c}$$

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

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

que é um fator de conversão muito útil. Ele permite-nos calcular, por exemplo, que:

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} \Rightarrow ke^2 = \alpha(\hbar c)$$

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

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

que é um fator de conversão muito útil. Ele permite-nos calcular, por exemplo, que:

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} \Rightarrow ke^2 = \alpha(\hbar c) = \frac{197,3}{137}\ \mathrm{MeV} \cdot \mathrm{fm}$$

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

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

Então:

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

que é um fator de conversão muito útil. Ele permite-nos calcular, por exemplo, que:

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} \Rightarrow ke^2 = \alpha(\hbar c) = \frac{197,3}{137}\ \text{MeV} \cdot \text{fm} \Rightarrow \boxed{ke^2 = 1,44\ \text{MeV} \cdot \text{fm}}$$

Exemplos

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

Exemplos

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

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar/2$$

Exemplos

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

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar c/2c$$

Exemplos

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

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

Exemplos

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

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

Exemplos

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

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

Exemplos

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

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

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

Exemplos

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

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

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

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar/2$$

Exemplos

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

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

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

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

Exemplos

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

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

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

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

Exemplos

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

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

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

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

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}}$$

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}}$$

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}\mathrm{X}}$$

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons.

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z;

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z (um *radionuclídeo* é um nuclídeo radioativo);

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z (um *radionuclídeo* é um nuclídeo radioativo);
- *núcleon*: designação genérica para um próton ou um nêutron;

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z (um *radionuclídeo* é um nuclídeo radioativo);
- *núcleon*: designação genérica para um próton ou um nêutron;
- *isótopos*: nuclídeos com o mesmo número de prótons: ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ e ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$;

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z (um *radionuclídeo* é um nuclídeo radioativo);
- *núcleon*: designação genérica para um próton ou um nêutron;
- *isótopos*: nuclídeos com o mesmo número de prótons: ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ e ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ (um *radioisótopo* é um isótopo radioativo);

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}},\ \text{ou}\ \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z (um *radionuclídeo* é um nuclídeo radioativo);
- *núcleon*: designação genérica para um próton ou um nêutron;
- *isótopos*: nuclídeos com o mesmo número de prótons: ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ e ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ (um *radioisótopo* é um isótopo radioativo);
- *isótonos*: nuclídeos com o mesmo número de nêutrons: ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ e ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$;

Nomenclatura

Seja uma *espécie nuclear*:

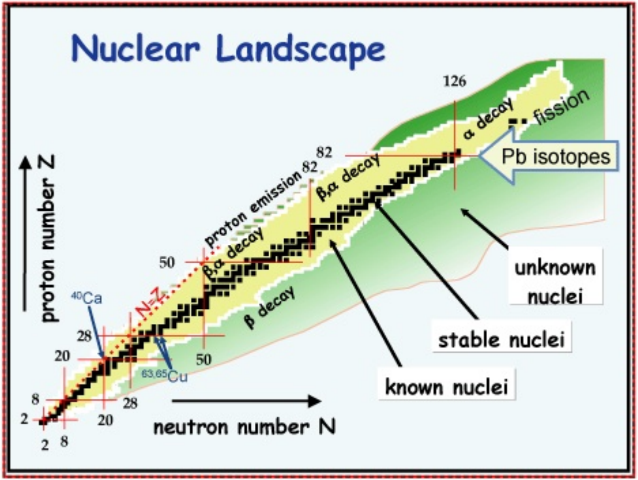
$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}_N}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X}}, \text{ ou } \boxed{{}^{A}\mathrm{X}},$$

onde A é o número de massa, Z é o número atômico (número de prótons) e $N = A - Z$ é o número de nêutrons. Por exemplo: ${}^{235}\mathrm{U}$ é um dado *nuclídeo*.

Definições:

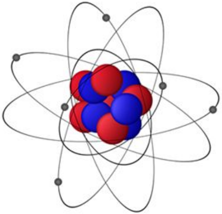
- *nuclídeo*: uma dada espécie nuclear, com dados A e Z (um *radionuclídeo* é um nuclídeo radioativo);
- *núcleon*: designação genérica para um próton ou um nêutron;
- *isótopos*: nuclídeos com o mesmo número de prótons: ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ e ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ (um *radioisótopo* é um isótopo radioativo);
- *isótonos*: nuclídeos com o mesmo número de nêutrons: ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ e ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$;
- *isóbaros*: nuclídeos com o mesmo número de massa: ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ e ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$.

A carta de nuclídeos:



Existem cerca de 118 elementos (Z) e mais de 1000 nuclídeos (A,Z).

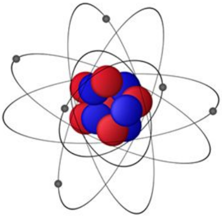
A massa nuclear é aproximadamente igual à massa do átomo.



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

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

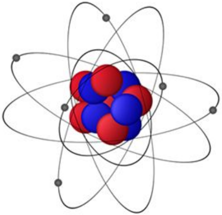
onde A é o número de massa e m_p é a massa do próton.



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, m_p é a massa do próton e m_H a massa do átomo de hidrogênio.



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

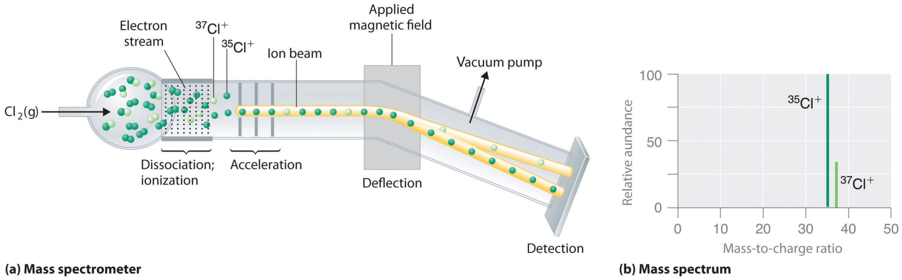


Figura: Espectrometria de massa.

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

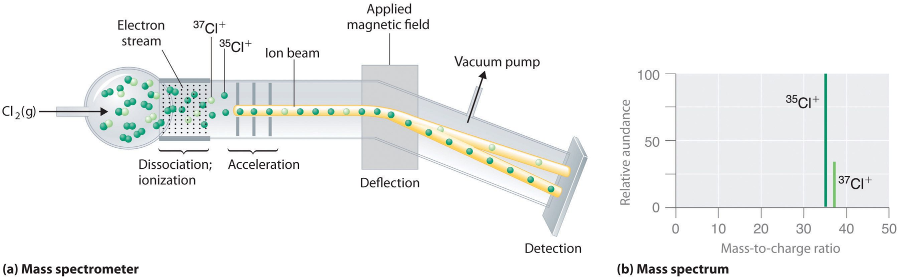


Figura: Espectrometria de massa.

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

O espectrômetro de massa

Na figura, vemos o diagrama de um espectrômetro de massa. Posiona-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 também um campo elétrico $\vec{E}$.

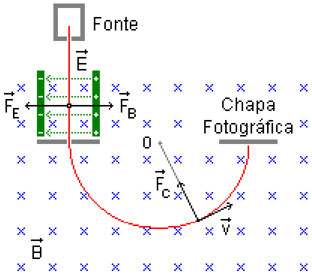
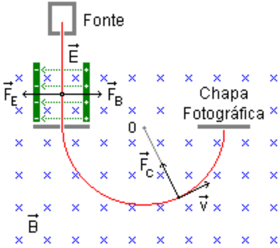


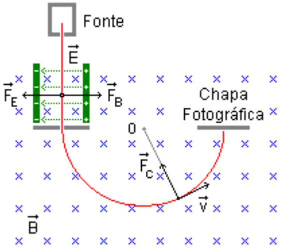
Figura: Espectrômetro de massa.

O espectrômetro de massa

Para núcleos de carga $+ze$



O espectrômetro de massa

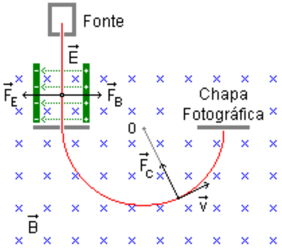


Para núcleos de carga $+ze$ ($z \leq Z$), temos:

$$\vec{F_E} = ze\vec{E}$$

$$\vec{F_B} = ze\,\vec{v} \times \vec{B}$$

O espectrômetro de massa



Para núcleos de carga $+ze$ ($z \leq Z$), temos:

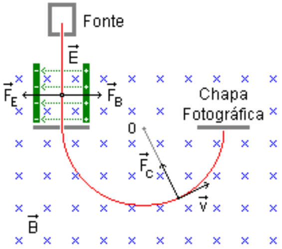
$$\vec{F_E} = ze\vec{E}$$

$$\vec{F_B} = ze\,\vec{v} \times \vec{B}$$

Ajustam-se os campos, tal que:

$$F_E = F_B$$

O espectrômetro de massa



Para núcleos de carga $+ze$ $(z \leq Z)$, temos:

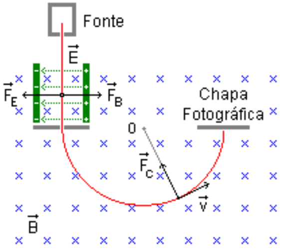
$$\vec{F_E} = ze\vec{E}$$

$$\vec{F_B} = ze\,\vec{v} \times \vec{B}$$

Ajustam-se os campos, tal que:

$$F_E = F_B \Rightarrow zeE = zevB$$

O espectrômetro de massa



Para núcleos de carga $+ze$ ($z \leq Z$), temos:

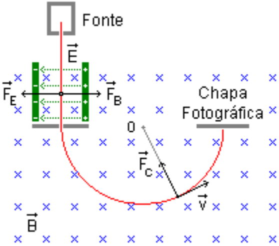
$$\vec{F_E} = ze\vec{E}$$

$$\vec{F_B} = ze\,\vec{v} \times \vec{B}$$

Ajustam-se os campos, tal que:

$$F_E = F_B \Rightarrow \cancel{ze}E = \cancel{ze}vB$$

O espectrômetro de massa



Para núcleos de carga $+ze$ $(z \leq Z)$, temos:

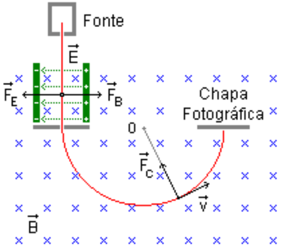
$$\vec{F_E} = ze\vec{E}$$

$$\vec{F_B} = ze\,\vec{v} \times \vec{B}$$

Ajustam-se os campos, tal que:

$$F_E = F_B \Rightarrow \cancel{ze}E = \cancel{ze}vB \Rightarrow \boxed{v = \frac{E}{B}}$$

O espectrômetro de massa



Para núcleos de carga $+ze$ ($z \leq Z$), temos:

$$\vec{F_E} = ze\vec{E}$$

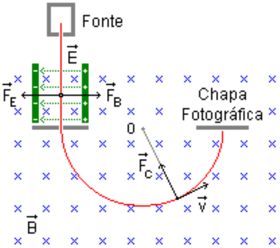
$$\vec{F_B} = ze\,\vec{v} \times \vec{B}$$

Ajustam-se os campos, tal que:

$$F_E = F_B \Rightarrow \cancel{ze}E = \cancel{ze}vB \Rightarrow \boxed{v = \frac{E}{B}},$$

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

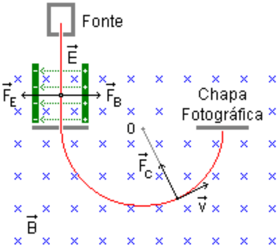
O espectrômetro de massa



Na região que contém somente o campo magnético $\vec{B}$, a força de Lorentz é a força centrípeta $\vec{F}_c$:

$$F_B = F_c$$

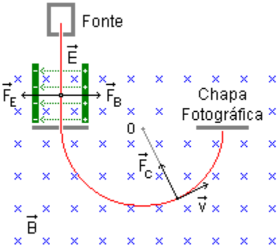
O espectrômetro de massa



Na região que contém somente o campo magnético $\vec{B}$, a força de Lorentz é a força centrípeta $\vec{F}_c$:

$$F_B = F_c \Rightarrow zevB = \frac{mv^2}{R}$$

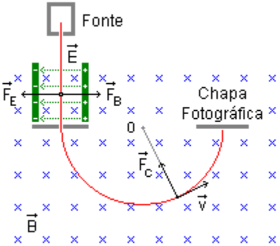
O espectrômetro de massa



Na região que contém somente o campo magnético $\vec{B}$, a força de Lorentz é a força centrípeta $\vec{F_c}$:

$$F_B = F_c \Rightarrow ze\cancel{v}B = \frac{mv^{\cancel{2}}}{R}$$

O espectrômetro de massa

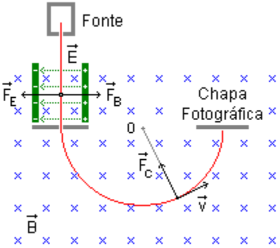


Na região que contém somente o campo magnético $\vec{B}$, a força de Lorentz é a força centrípeta $\vec{F_c}$:

$$F_B = F_c \Rightarrow ze\cancel{v}B = \frac{mv^{\cancel{2}}}{R} \Rightarrow$$

$$m = \frac{zeRB}{v}$$

O espectrômetro de massa



Na região que contém somente o campo magnético $\vec{B}$, a força de Lorentz é a força centrípeta $\vec{F}_c$:

$$F_B = F_c \Rightarrow ze\cancel{v}B = \frac{mv^{\cancel{2}}}{R} \Rightarrow$$

$$\boxed{m = \frac{zeRB}{v} = \frac{zeRB^2}{E}}$$

Nuclídeo	Z	A	massa atômica [u]
n	0	1	1,008665
^{1}H	1	1	1,007825
^{2}H	1	2	2,014102
^{3}H	1	3	3,016050
^{3}He	2	3	3,016030
^{4}He	2	4	4,002603
^{6}Li	3	6	6,015125
^{7}Li	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: Massas de alguns nuclídeos selecionados (em unidades de massa atômica).

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:

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

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

Exercícios

2. Rutherford acreditava 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 linear 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: $E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$.

Exercícios

3. Um feixe estreito de íons de boro, carregados unitariamente — isto é, com $^{10}B^{+}$ e $^{11}B^{+}$ —, 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?