Aula 9: Radioatividade

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

31 de outubro de 2024

Universidade Federal do ABC

Tipos de radiações

Núcleos atômicos que emitem **radiações**, quer seja na forma de partículas ou de radiações eletromagnéticas, são chamados de **radioativos**.

Tipos de radiações

Núcleos atômicos que emitem **radiações**, quer seja na forma de partículas ou de radiações eletromagnéticas, são chamados de **radioativos**. Se a transformação pela qual passou o núcleo tenha ocorrido de forma espontânea, ela será chamada de *decaimento* e caso tenha ocorrido como resultado de uma interação entre núcleons e/ou radiações, esta transformação será uma *reação nuclear*.

Tipos de radiações

Núcleos atômicos que emitem **radiações**, quer seja na forma de partículas ou de radiações eletromagnéticas, são chamados de **radioativos**. Se a transformação pela qual passou o núcleo tenha ocorrido de forma espontânea, ela será chamada de *decaimento* e caso tenha ocorrido como resultado de uma interação entre núcleons e/ou radiações, esta transformação será uma *reação nuclear*. Classificamos a seguir os diferentes tipos de radiações conhecidas.

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv {}^4\mathrm{He}$.

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv {}^4\text{He}$, isto é, o núcleo de ${}^4\text{He}$.

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv {}^4\text{He}$, isto é, o núcleo de ${}^4\text{He}$,
  $m_\alpha = 3727,3\ \text{MeV/c}^2$.

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv {}^4\mathrm{He}$, isto é, o núcleo de ${}^4\mathrm{He}$,
  $m_\alpha = 3727,3\ \mathrm{MeV/c^2}$, $q_\alpha = +2e$.

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv {}^4\mathrm{He}$, isto é, o núcleo de ${}^4\mathrm{He}$, $m_\alpha = 3727,3\ \mathrm{MeV/c^2}$, $q_\alpha = +2e$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \to (Z-2, A-4) + \alpha.$$

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv {}^4\mathrm{He}$, isto é, o núcleo de ${}^4\mathrm{He}$, $m_\alpha = 3727,3$ MeV/c^2, $q_\alpha = +2e$.
  Lei de deslocamento:
  $$(Z, A) \to (Z-2, A-4) + \alpha.$$
  Por exemplo:
  $$^{238}\mathrm{U} \to {}^{234}Th + \alpha,$$
  com $t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ anos e $E = 4,27$ MeV.

Tipos de radiações

- **Radiação alfa**:
  Emissão de **raios alfa**: $\alpha \equiv^4$He, isto é, o núcleo de ^{4}He,
  $m_\alpha = 3727,3$ MeV/c^2, $q_\alpha = +2e$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \to (Z-2, A-4) + \alpha.$$

  Por exemplo:

$$^{238}\mathrm{U} \to^{234} Th + \alpha,$$

  com $t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ anos e $E = 4,27$ MeV.
  Tem espectro **discreto** (picos) e origem no decaimento nuclear.

Tipos de radiações

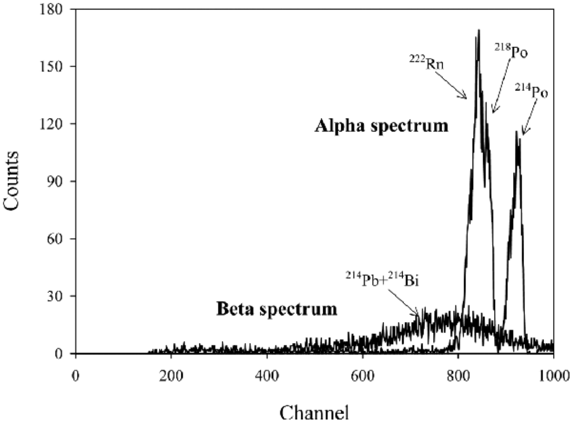

Figura: Espectro energético de emissões α (discreto) e β (contínuo).

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$.

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$, isto é, elétrons/pósitrons.

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$, isto é, elétrons/pósitrons, $m_{\beta} = 0,511$ MeV/c^2.

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$, isto é, elétrons/pósitrons, $m_\beta = 0,511\ \mathrm{MeV/c^2}$, $q_{\beta^\pm} = \pm e$.

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$, isto é, elétrons/pósitrons, $m_\beta = 0,511\ \mathrm{MeV/c^2}$, $q_{\beta^\pm} = \pm e$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \rightarrow (Z \pm 1, A) + \beta^{\mp} + \nu.$$

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$, isto é, elétrons/pósitrons, $m_\beta = 0,511$ MeV/c^2, $q_{\beta^\pm} = \pm e$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \rightarrow (Z \pm 1, A) + \beta^{\mp} + \nu.$$

  Por exemplo:

$$^{14}\mathrm{C} \rightarrow ^{14} N + e^{-} + \overline{\nu}_e,$$

  com $t_{1/2} = 5730$ anos e $E_{max} = 0,156$ MeV.

Tipos de radiações

- **Radiação beta**:
  Emissão de **raios beta**: $\beta^{\pm} \equiv e^{\pm}$, isto é, elétrons/pósitrons, $m_\beta = 0,511$ MeV/c^2, $q_{\beta^\pm} = \pm e$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \to (Z \pm 1, A) + \beta^{\mp} + \nu.$$

  Por exemplo:

$$^{14}\mathrm{C} \to^{14} N + e^- + \overline{\nu}_e,$$

  com $t_{1/2} = 5730$ anos e $E_{max} = 0,156$ MeV.
  Tem espectro **contínuo** e origem no decaimento nuclear (força fraca).

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ.

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $f > 10^{19}$ Hz.

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $f > 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$.

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $f > 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $f > 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.
  Lei de deslocamento:
  $$(Z, A)^* \to (Z, A) + \gamma.$$

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $f > 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.
  Lei de deslocamento:
  $$(Z, A)^* \to (Z, A) + \gamma.$$
  Por exemplo:
  $$^{60}\mathrm{Co}^* \to ^{60}\mathrm{Co} + \gamma,$$
  com $t_{1/2} = 10,47$ min e $E = 58,6$ keV.

Tipos de radiações

- **Radiação gama**:
  Emissão de **raios gama**: γ, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $f > 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.
  Lei de deslocamento:
  $$(Z, A)^* \to (Z, A) + \gamma.$$
  Por exemplo:
  $$^{60}\mathrm{Co}^* \to ^{60}\mathrm{Co} + \gamma,$$
  com $t_{1/2} = 10,47$ min e $E = 58,6$ keV.
  Tem espectro **discreto** e origem em desexcitação nuclear.

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ).

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada.

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização).

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização), $m_\delta = 0,511$ MeV/c^2.

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização),
  $m_\delta = 0,511$ MeV/c^2 e $q_\delta = e^-$.

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização),
  $m_\delta = 0,511$ MeV/c^2 e $q_\delta = e^-$.
  Raios δ são *secundários*, provenientes de ionizações primárias;

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização), $m_\delta = 0,511$ MeV/c^2 e $q_\delta = e^-$.
  Raios δ são *secundários*, provenientes de ionizações primárias; caso os raios δ ionizem subsequentemente formarão raios ϵ (*terciários*).

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização),
  $m_\delta = 0,511\ \mathrm{MeV/c^2}$ e $q_\delta = e^-$.
  Raios δ são *secundários*, provenientes de ionizações primárias; caso os raios δ ionizem subsequentemente formarão raios ϵ (*terciários*).
  Tem espectro **contínuo** ($E_\delta = E_{\mathrm{ext}} - E_{\mathrm{lig}}$).

Tipos de radiações

- **Radiação delta**:
  Emissão de **raios delta** (δ), elétrons da camada eletrônica emitidos a partir da colisão de uma partícula carregada (ionização), $m_\delta = 0,511$ MeV/c^2 e $q_\delta = e^-$.
  Raios δ são *secundários*, provenientes de ionizações primárias; caso os raios δ ionizem subsequentemente formarão raios ϵ (*terciários*).
  Tem espectro **contínuo** ($E_\delta = E_{\mathrm{ext}} - E_{\mathrm{lig}}$) e origem externa (radiação ionizante).

Tipos de radiações

- **Radiação X**:

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X.

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com 10^{16} Hz $< f < 10^{19}$ Hz.

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com $10^{16}\ \mathrm{Hz} < f < 10^{19}\ \mathrm{Hz}$, $m_\gamma = 0$.

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com 10^{16} Hz $< f < 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com 10^{16} Hz $< f < 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.
  Tem espectro **contínuo** (Bremsstrahlung).

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com 10^{16} Hz $< f < 10^{19}$ Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.
  Tem espectro **contínuo** (Bremsstrahlung) e **discreto** (raias do material).

Tipos de radiações

- **Radiação X**:
  Emissão de **raios X**: γ_X, isto é, ondas eletromagnéticas (fótons) com 10^{16} Hz $< f <$ 10^{19} Hz, $m_\gamma = 0$, $q_\gamma = 0$.
  Tem espectro **contínuo** (Bremsstrahlung) e **discreto** (raias do material) e origem em desexcitação da camada eletrônica.

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica**:

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo.

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo:

$$p + e^- \to n + \nu.$$

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica** ou **beta inverso**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo; para núcleos ricos em prótons, é uma alternativa para o decaimento β^+:

$$\text{(captura eletrônica) } p + e^- \to n + \nu \Leftrightarrow p \to n + e^+ + \nu \text{ (decaimento } \beta^+\text{)}.$$

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica** ou **beta inverso**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo; para núcleos ricos em prótons, é uma alternativa para o decaimento β^+:

$$\text{(captura eletrônica) } p + e^- \to n + \nu \Leftrightarrow p \to n + e^+ + \nu \text{ (decaimento } \beta^+\text{)}.$$

  A emissão do neutrino é acompanhada por um raio X, γ_X, quando outro elétron ocupa o nível vazio.

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica** ou **beta inverso**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo; para núcleos ricos em prótons, é uma alternativa para o decaimento β^+:

  $$\text{(captura eletrônica) } p + e^- \to n + \nu \Leftrightarrow p \to n + e^+ + \nu \text{ (decaimento } \beta^+\text{)}.$$

  A emissão do neutrino é acompanhada por um raio X, γ_X, quando outro elétron ocupa o nível vazio.
  Lei de deslocamento:

  $$(Z, A) \to (Z - 1, A) + \nu + \gamma_X.$$

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica** ou **beta inverso**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo; para núcleos ricos em prótons, é uma alternativa para o decaimento β^+:

  $$\text{(captura eletrônica) } p + e^- \to n + \nu \Leftrightarrow p \to n + e^+ + \nu \text{ (decaimento } \beta^+\text{)}.$$

  A emissão do neutrino é acompanhada por um raio X, γ_X, quando outro elétron ocupa o nível vazio.
  Lei de deslocamento:

  $$(Z, A) \to (Z - 1, A) + \nu + \gamma_X.$$

  Por exemplo:

  $$^{55}\mathrm{Fe} + e^- \to ^{55}\mathrm{Mn} + \nu + \gamma_X,$$

  com $t_{1/2} = 2,73$ anos e “raios-K” do Mn ($E_1 = 5,9$ keV ou $E_2 = 6,5$ keV).

Tipos de radiações

- **Captura eletrônica** ou **beta inverso**:
  Captura de um elétron, geralmente da camada K, pelo núcleo; para núcleos ricos em prótons, é uma alternativa para o decaimento β^+:

  $$\text{(captura eletrônica) } p + e^- \to n + \nu \Leftrightarrow p \to n + e^+ + \nu \text{ (decaimento } \beta^+\text{)}.$$

  A emissão do neutrino é acompanhada por um raio X, γ_X, quando outro elétron ocupa o nível vazio.
  Lei de deslocamento:

  $$(Z, A) \to (Z - 1, A) + \nu + \gamma_X.$$

  Por exemplo:

  $$^{55}\mathrm{Fe} + e^- \to ^{55}\mathrm{Mn} + \nu + \gamma_X,$$

  com $t_{1/2} = 2,73$ anos e "raios-K" do Mn ($E_1 = 5,9$ keV ou $E_2 = 6,5$ keV).
  Tem espectro **discreto** (raio X) e origem nuclear.

Tipos de radiações

- **Conversão interna**:

Tipos de radiações

- **Conversão interna**:
  Emissão de um elétron, geralmente da camada K, pela transmissão direta da excitação nuclear;

Tipos de radiações

- **Conversão interna** (ou **elétrons de Auger**):
  Emissão de um elétron, geralmente da camada K, pela transmissão direta da excitação nuclear (ou da camada eletrônica);

Tipos de radiações

- **Conversão interna** (ou **elétrons de Auger**):
  Emissão de um elétron, geralmente da camada K, pela transmissão direta da excitação nuclear (ou da camada eletrônica); é uma alternativa para o decaimento γ (ou para a emissão de raios X).

Tipos de radiações

- **Conversão interna** (ou **elétrons de Auger**):
  Emissão de um elétron, geralmente da camada K, pela transmissão direta da excitação nuclear (ou da camada eletrônica); é uma alternativa para o decaimento γ (ou para a emissão de raios X):
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A)^* \to (Z, A)^+ + e^-.$$

Tipos de radiações

- **Conversão interna** (ou **elétrons de Auger**):
  Emissão de um elétron, geralmente da camada K, pela transmissão direta da excitação nuclear (ou da camada eletrônica); é uma alternativa para o decaimento γ (ou para a emissão de raios X):
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A)^* \to (Z, A)^+ + e^-.$$

  Tem espectro **discreto** ($E_e = E_{\gamma(\gamma x)} - E_{\text{lig}}$).

Tipos de radiações

- **Conversão interna** (ou **elétrons de Auger**):
  Emissão de um elétron, geralmente da camada K, pela transmissão direta da excitação nuclear (ou da camada eletrônica); é uma alternativa para o decaimento γ (ou para a emissão de raios X):
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A)^* \to (Z, A)^+ + e^- .$$

  Tem espectro **discreto** ($E_e = E_{\gamma(\gamma x)} - E_{\text{lig}}$) e origem no núcleo (ou na camada eletrônica).

Tipos de radiações

- **Emissão de próton**:

Tipos de radiações

- **Emissão de próton**:
  Emissão de 1 próton pelo núcleo.

Tipos de radiações

- **Emissão de próton**:
  Emissão de 1 próton pelo núcleo: $m_p = 938,3$ MeV/c^2.

Tipos de radiações

- **Emissão de próton**:
  Emissão de 1 próton pelo núcleo: $m_p = 938,3$ MeV/c^2 e $q_p = e^+$.

Tipos de radiações

- **Emissão de próton**:
  Emissão de 1 próton pelo núcleo: $m_p = 938,3$ MeV/c^2 e $q_p = e^+$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \to (Z-1, A-1) + p.$$

Tipos de radiações

- **Emissão de próton**:
  Emissão de 1 próton pelo núcleo: $m_p = 938,3$ MeV/c^2 e $q_p = e^+$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 1, A - 1) + p.$$

  Tem espectro **discreto** e origem nuclear.

Tipos de radiações

- **Emissão de nêutron**:
  Emissão de 1 nêutron pelo núcleo.

Tipos de radiações

- **Emissão de nêutron**:
  Emissão de 1 nêutron pelo núcleo: $m_n = 939,6$ MeV/c^2.

Tipos de radiações

- **Emissão de nêutron**:
  Emissão de 1 nêutron pelo núcleo: $m_p = 939,6$ MeV/c^2 e $q_n = 0$.

Tipos de radiações

- **Emissão de nêutron**:
  Emissão de 1 nêutron pelo núcleo: $m_p = 939,6$ MeV/c^2 e $q_n = 0$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \rightarrow (Z, A - 1) + n.$$

Tipos de radiações

- **Emissão de nêutron**:
  Emissão de 1 nêutron pelo núcleo: $m_p = 939,6$ MeV/c^2 e $q_n = 0$.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \to (Z, A-1) + n.$$

  Tem espectro **discreto** e origem nuclear.

Tipos de radiações

- **Emissão de grupos** ou **de fragmentos**:

Tipos de radiações

- **Emissão de grupos** ou **de fragmentos**:
  Emissão de prótons, nêutrons, alfas e/ou outros grupos (fragmentos) pelo núcleo.

Tipos de radiações

- **Emissão de grupos** ou **de fragmentos** (**fissão espontânea**):
  Emissão de prótons, nêutrons, alfas e/ou outros grupos (fragmentos) pelo núcleo; a fissão espontânea é um caso particular de emissão de dois fragmentos menores.

Tipos de radiações

- **Emissão de grupos** ou **de fragmentos** (**fissão espontânea**):
  Emissão de prótons, nêutrons, alfas e/ou outros grupos (fragmentos) pelo núcleo; a fissão espontânea é um caso particular de emissão de dois fragmentos menores.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \rightarrow (Z - Z_f, A - A_f) + (Z_f, A_f) + \dots$$

Tipos de radiações

- **Emissão de grupos** ou **de fragmentos** (**fissão espontânea**):
  Emissão de prótons, nêutrons, alfas e/ou outros grupos (fragmentos) pelo núcleo; a fissão espontânea é um caso particular de emissão de dois fragmentos menores.
  Lei de deslocamento:

$$(Z, A) \to (Z - Z_f, A - A_f) + (Z_f, A_f) + \ldots$$

  Tem espectro **discreto** (para decaimentos em 2 corpos) ou **contínuo** (para decaimentos em 3 ou mais corpos) e origem nuclear.

Tipos de radiações

- **Radiação de aniquilação**:

Tipos de radiações

- **Radiação de aniquilação**:
  Emissão de um par de fótons devido à aniquilação de pósitrons na matéria:
  $$e^+ + e^- \to 2\gamma.$$

Tipos de radiações

- **Radiação de aniquilação**:
  Emissão de um par de fótons devido à aniquilação de pósitrons na matéria:
  $$e^{+} + e^{-} \rightarrow 2\gamma.$$
  Tem espectro **discreto** (pico de aniquilação em $E = 0,511$ MeV) e origem no absorvedor.

Tipos de radiações

- **Outras emissões**:

Tipos de radiações

- **Outras emissões**:
  Duplo decaimento β: $(Z, A) \to (Z \pm 2, A) + 2\beta + 2\nu$.

Tipos de radiações

- **Outras emissões**:
  Duplo decaimento β: $(Z, A) \rightarrow (Z \pm 2, A) + 2\beta + 2\nu$.
  Dupla emissão de próton: $(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 2) + 2p$.

Tipos de radiações

- **Outras emissões**:
  Duplo decaimento β: $(Z, A) \to (Z \pm 2, A) + 2\beta + 2\nu$.
  Dupla emissão de próton: $(Z, A) \to (Z - 2, A - 2) + 2p$.
  Dupla emissão de pósitron: $(Z, A) \to (Z - 2, A) + 2e^+ + 2\nu$.

Tipos de radiações

- **Outras emissões**:
  Duplo decaimento β: $(Z, A) \rightarrow (Z \pm 2, A) + 2\beta + 2\nu$.
  Dupla emissão de próton: $(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 2) + 2p$.
  Dupla emissão de pósitron: $(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A) + 2e^+ + 2\nu$.
  Dupla captura eletrônica: $(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A) + 2\gamma_X + 2\nu$.

Tipos de radiações

- **Outras emissões**:
  Duplo decaimento β: $(Z, A) \to (Z \pm 2, A) + 2\beta + 2\nu$.
  Dupla emissão de próton: $(Z, A) \to (Z - 2, A - 2) + 2p$.
  Dupla emissão de pósitron: $(Z, A) \to (Z - 2, A) + 2e^{+} + 2\nu$.
  Dupla captura eletrônica: $(Z, A) \to (Z - 2, A) + 2\gamma_X + 2\nu$.
  etc.

Tipos de radiações

- **Reações nucleares**:

Tipos de radiações

- **Reações nucleares**:
  Qualquer tipo de interação de um núcleo com partículas, radiações ou outros núcleos, produzindo um ou mais dos processos já mencionados.

Tipos de radiações

- **Reações nucleares**:
  Qualquer tipo de interação de um núcleo com partículas, radiações ou outros núcleos, produzindo um ou mais dos processos já mencionados.
  Exemplos:
  Bombardeamento α:
  $\alpha +^{9} \mathrm{Be} \rightarrow^{13} \mathrm{C}^{*}$.

Tipos de radiações

- **Reações nucleares**:
  Qualquer tipo de interação de um núcleo com partículas, radiações ou outros núcleos, produzindo um ou mais dos processos já mencionados.
  Exemplos:
  Bombardeamento α:
  $\alpha +^{9} \mathrm{Be} \rightarrow^{13} \mathrm{C}^{*}$;
  Bombardeamento de nêutrons (num reator de fissão):
  $n +^{235} \mathrm{U} \rightarrow^{141} \mathrm{Ba} +^{92} \mathrm{Kr} + 3n$.

Tipos de radiações

- **Reações nucleares**:
  Qualquer tipo de interação de um núcleo com partículas, radiações ou outros núcleos, produzindo um ou mais dos processos já mencionados.
  Exemplos:
  Bombardeamento α:
  $\alpha +^{9}\mathrm{Be} \rightarrow^{13}\mathrm{C}^*$;
  Bombardeamento de nêutrons (num reator de fissão):
  $n +^{235}\mathrm{U} \rightarrow^{141}\mathrm{Ba} +^{92}\mathrm{Kr} + 3n$;
  Fotorreação:
  $\gamma +^{2}\mathrm{H} \rightarrow^{1}\mathrm{H} + n$.

Tipos de radiações

- **Reações nucleares**:
  Qualquer tipo de interação de um núcleo com partículas, radiações ou outros núcleos, produzindo um ou mais dos processos já mencionados.
  Exemplos:
  Bombardeamento α:
  $\alpha +^{9}\mathrm{Be} \to^{13} \mathrm{C}^*$;
  Bombardeamento de nêutrons (num reator de fissão):
  $n +^{235} \mathrm{U} \to^{141} \mathrm{Ba} +^{92} \mathrm{Kr} + 3n$;
  Fotorreação:
  $\gamma +^{2} \mathrm{H} \to^{1} \mathrm{H} + n$;
  Fusão (no Sol):
  $^{2}\mathrm{H} +^{3} \mathrm{H} \to^{4} \mathrm{He} + n$.

Lei do decaimento radioativo

Todo processo de emissão de radiação por um radionuclídeo recebe o nome de *decaimento radioativo* ou *desintegração nuclear*.

Lei do decaimento radioativo

Todo processo de emissão de radiação por um radionuclídeo recebe o nome de *decaimento radioativo* ou *desintegração nuclear*. O decaimento radioativo corresponde a uma mudança de estado do núcleo:

$$X \rightarrow Y + \text{emissão.}$$

Lei do decaimento radioativo

Todo processo de emissão de radiação por um radionuclídeo recebe o nome de *decaimento radioativo* ou *desintegração nuclear*. O decaimento radioativo corresponde a uma mudança de estado do núcleo:

$$X \to Y + \text{emissão},$$

que pode resultar numa alteração na composição do núcleo (como nos decaimentos α e β).

Lei do decaimento radioativo

Todo processo de emissão de radiação por um radionuclídeo recebe o nome de *decaimento radioativo* ou *desintegração nuclear*. O decaimento radioativo corresponde a uma mudança de estado do núcleo:

$$X \to Y + \text{emissão},$$

que pode resultar numa alteração na composição do núcleo (como nos decaimentos α e β) ou não (como no decaimento γ).

Lei do decaimento radioativo

Todo processo de emissão de radiação por um radionuclídeo recebe o nome de *decaimento radioativo* ou *desintegração nuclear*. O decaimento radioativo corresponde a uma mudança de estado do núcleo:

$$X \to Y + \text{emissão},$$

que pode resultar numa alteração na composição do núcleo (como nos decaimentos α e β) ou não (como no decaimento γ). Os decaimentos ocorrem espontaneamente, portanto, são transições energeticamente favoráveis.

Lei do decaimento radioativo

Todo processo de emissão de radiação por um radionuclídeo recebe o nome de *decaimento radioativo* ou *desintegração nuclear*. O decaimento radioativo corresponde a uma mudança de estado do núcleo:

$$X \to Y + \text{emissão},$$

que pode resultar numa alteração na composição do núcleo (como nos decaimentos α e β) ou não (como no decaimento γ). Os decaimentos ocorrem espontaneamente, portanto, são transições energeticamente favoráveis. Diagramas:

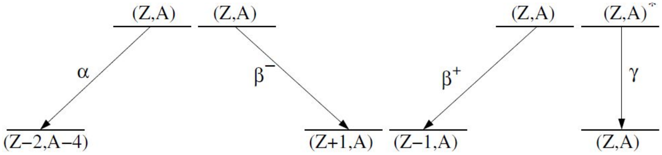

Figura: Diagramas de decaimento.

Lei do decaimento radioativo

A *atividade* de uma fonte é definida como a taxa de decaimentos por unidade de tempo:

$$\boxed{R \equiv -\frac{dN}{dt}} \tag{1}$$

Lei do decaimento radioativo

A *atividade* de uma fonte é definida como a taxa de decaimentos por unidade de tempo:

$$\boxed{R \equiv -\frac{dN}{dt}} \tag{2}$$

Unidades:

- Becquerel: $1\,\mathrm{Bq} \equiv 1\,\mathrm{s}^{-1}$;

Lei do decaimento radioativo

A *atividade* de uma fonte é definida como a taxa de decaimentos por unidade de tempo:

$$\boxed{R \equiv -\frac{dN}{dt}} \tag{3}$$

Unidades:

- Becquerel: $1\,\mathrm{Bq} \equiv 1\,\mathrm{s}^{-1}$;
- Curie: $1\,\mathrm{Ci} \equiv 3,7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{s}^{-1} \sim$ atividade de 1 g de *Ra* puro.

Lei do decaimento radioativo

Se num dado instante t uma amostra contém N radionuclídeos

Lei do decaimento radioativo

Se num dado instante t uma amostra contém N radionuclídeos, a quantidade de núcleos que decaem em um infinitesimal de tempo entre t e $t + dt$ é proporcional ao número inicial:

$$dN \propto N.$$

Lei do decaimento radioativo

Se num dado instante t uma amostra contém N radionuclídeos, a quantidade de núcleos que decaem em um infinitesimal de tempo entre t e $t + dt$ é proporcional ao número inicial e ao intervalo de tempo dt:

$$dN \propto N dt.$$

Lei do decaimento radioativo

Se num dado instante t uma amostra contém N radionuclídeos, a quantidade de núcleos que decaem em um infinitesimal de tempo entre t e $t + dt$ é proporcional ao número inicial e ao intervalo de tempo dt:

$$dN = -\lambda N dt,$$

onde a constante de proporcionalidade λ é conhecida como *razão de transição* ou *constante de decaimento*:

Lei do decaimento radioativo

Se num dado instante t uma amostra contém N radionuclídeos, a quantidade de núcleos que decaem em um infinitesimal de tempo entre t e $t + dt$ é proporcional ao número inicial e ao intervalo de tempo dt:

$$dN = -\lambda N dt,$$

onde a constante de proporcionalidade λ é conhecida como *razão de transição* ou *constante de decaimento*:

$$\boxed{\lambda \equiv \frac{-dN/dt}{N} = \frac{R}{N}}, \tag{4}$$

que mede a probabilidade da transição ocorrer por unidade de tempo.

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt$$

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda(t - 0)$$

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda(t - 0) \Rightarrow \ln\left[\frac{N(t)}{N_0}\right] = -\lambda t$$

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda(t-0) \Rightarrow \ln\left[\frac{N(t)}{N_0}\right] = -\lambda t \Rightarrow$$

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}}. \tag{5}$$

Lei do decaimento radioativo

De onde vem:

$$dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda(t - 0) \Rightarrow \ln\left[\frac{N(t)}{N_0}\right] = -\lambda t \Rightarrow$$

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}}. \tag{6}$$

Esta é a *lei do decaimento radioativo.*

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt}$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty tN(t)dt$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty tN(t)dt = \lambda \int_0^\infty tN_0 e^{-\lambda t} dt$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty tN(t)dt = \lambda \int_0^\infty tN_0 e^{-\lambda t} dt =$$

$$= \lambda N_0 \left[\left(-\frac{te^{-\lambda t}}{\lambda} \right) \bigg|_0^\infty + \frac{1}{\lambda} \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt \right]$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty tN(t)dt = \lambda \int_0^\infty tN_0 e^{-\lambda t} dt =$$

$$= \lambda N_0 \left[\cancel{\left(-\frac{te^{-\lambda t}}{\lambda}\right)\Bigg|_0^\infty} + \frac{1}{\lambda}\int_0^\infty e^{-\lambda t} dt \right]$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty tN(t)dt = \lambda \int_0^\infty tN_0 e^{-\lambda t} dt =$$

$$= \lambda N_0 \left[\cancel{\left(-\frac{te^{-\lambda t}}{\lambda} \right)} \Big|_0^\infty + \frac{1}{\lambda} \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt \right] = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

e:

$$\int_0^\infty |dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

e:

$$\int_0^\infty |dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

então:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}{\lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt} \tag{7}$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

e:

$$\int_0^\infty |dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

então:

$$\tau = \frac{\cancel{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}}{\lambda \cancel{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}} \tag{8}$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

e:

$$\int_0^\infty |dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

então:

$$\tau = \frac{\cancel{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}}{\lambda \cancel{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}} = \frac{1}{\lambda} \tag{9}$$

Lei do decaimento radioativo

A *vida média* (τ) da amostra é definida pela média ponderada:

$$\tau \equiv \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt},$$

mas:

$$\int_0^\infty t|dN/dt|dt = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

e:

$$\int_0^\infty |dN/dt|dt = \lambda \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt$$

então:

$$\tau = \frac{\cancel{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}}{\lambda \cancel{\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt}} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}} \tag{10}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade.

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{N_0}{2}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln\ 2^{-1} = -\lambda t_{1/2}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln\, 2^{-1} = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow -\ln\, 2 = -\lambda t_{1/2}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln 2^{-1} = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow$$

$$\boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}} \tag{11}$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln 2^{-1} = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow$$

$$\boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau\ \ln\ 2} \qquad (12)$$

Lei do decaimento radioativo

A *meia-vida* ($t_{1/2}$) é o tempo que leva para a quantidade de núcleos cair à metade:

$$N(t) = \frac{\cancel{N_0}}{2} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln 2^{-1} = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow$$

$$\boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ \ln \ 2} \approx 0,693\,\tau \tag{13}$$

Lei do decaimento radioativo

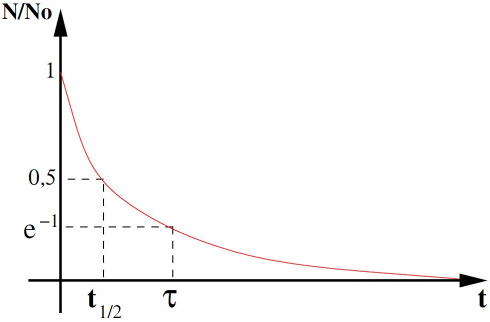

Figura: Lei do decaimento.

Lei do decaimento radioativo

Exemplos:

- ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \to {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + \alpha$, $\quad \tau = 6,5 \cdot 10^9$ anos;

Lei do decaimento radioativo

Exemplos:

- ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha, \qquad \tau = 6,5 \cdot 10^9$ anos;
- ${}^{215}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{211}_{80}\text{Pb} + \alpha, \qquad \tau = 1,9 \cdot 10^3$ s;

Lei do decaimento radioativo

Exemplos:

- ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + \alpha, \qquad \tau = 6,5 \cdot 10^{9}$ anos;
- ${}^{215}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{211}_{80}\mathrm{Pb} + \alpha, \qquad \tau = 1,9 \cdot 10^{3}$ s;
- $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-, \qquad \tau = 2,6 \cdot 10^{-10}$ s;

Lei do decaimento radioativo

Exemplos:

- ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + \alpha$, $\quad \tau = 6,5 \cdot 10^{9}$ anos;
- ${}^{215}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{211}_{80}\mathrm{Pb} + \alpha$, $\quad \tau = 1,9 \cdot 10^{3}$ s;
- $\Lambda^{0} \rightarrow p + \pi^{-}$, $\quad \tau = 2,6 \cdot 10^{-10}$ s;
- $\pi^{0} \rightarrow \gamma + \gamma$, $\quad \tau = 8,3 \cdot 10^{-17}$ s;

Lei do decaimento radioativo

Exemplos:

- ${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + \alpha, \qquad \tau = 6,5 \cdot 10^{9}$ anos;
- ${}^{215}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{211}_{80}\mathrm{Pb} + \alpha, \qquad \tau = 1,9 \cdot 10^{3}$ s;
- $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-, \qquad \tau = 2,6 \cdot 10^{-10}$ s;
- $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma, \qquad \tau = 8,3 \cdot 10^{-17}$ s;
- $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \qquad \tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s.

Decaimentos multimodais

Observe os modos de decaimento do ^{212}Bi:

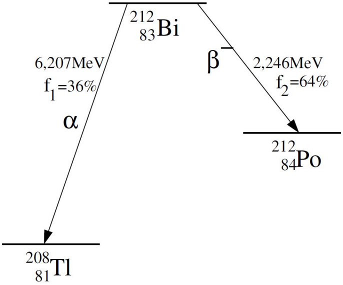

Figura: Decaimento bimodal do ^{212}Bi.

Decaimentos multimodais

Observe os modos de decaimento do ^{212}Bi:

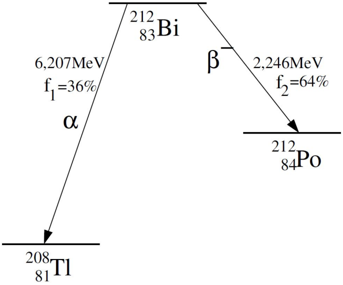

Figura: Decaimento bimodal do ^{212}Bi.

f_1 e f_2 são as *razões de ramificações.*

Decaimentos multimodais

Observe os modos de decaimento do ^{212}Bi:

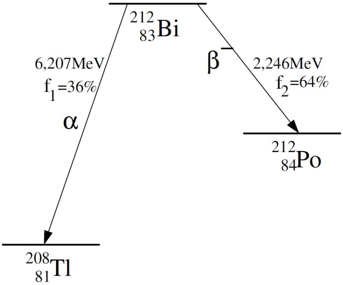

Figura: Decaimento bimodal do ^{212}Bi.

f_1 e f_2 são as *razões de ramificações*. A cada modo, podemos associar uma razão de transição parcial λ_1 e λ_2, tais que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N - \lambda_2 N$$

Decaimentos multimodais

Observe os modos de decaimento do ^{212}Bi:

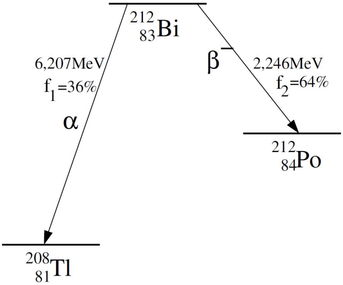

Figura: Decaimento bimodal do ^{212}Bi.

f_1 e f_2 são as *razões de ramificações*. A cada modo, podemos associar uma razão de transição parcial λ_1 e λ_2, tais que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N - \lambda_2 N \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}$$

Decaimentos multimodais

Observe os modos de decaimento do ^{212}Bi:

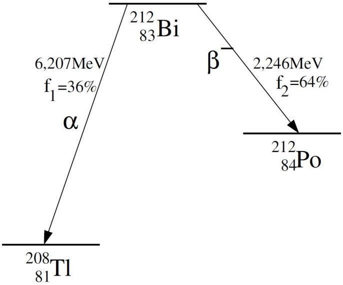

Figura: Decaimento bimodal do ^{212}Bi.

f_1 e f_2 são as *razões de ramificações*. A cada modo, podemos associar uma razão de transição parcial λ_1 e λ_2, tais que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N - \lambda_2 N \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} = N_0 e^{-\lambda t}$$

Decaimentos multimodais

A cada modo, podemos associar uma razão de transição parcial λ_1 e λ_2, tais que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N - \lambda_2 N \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Então:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

Decaimentos multimodais

A cada modo, podemos associar uma razão de transição parcial λ_1 e λ_2, tais que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N - \lambda_2 N \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Então:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \Rightarrow \tau^{-1} = \tau_1^{-1} + \tau_2^{-1}$$

Decaimentos multimodais

A cada modo, podemos associar uma razão de transição parcial λ_1 e λ_2, tais que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N - \lambda_2 N \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Então:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \Rightarrow \tau^{-1} = \tau_1^{-1} + \tau_2^{-1}$$

de onde podemos concluir que: $f_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda}$ e $f_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda}$.

Decaimentos multimodais

Generalizando para o caso multimodal:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

Decaimentos multimodais

Generalizando para o caso multimodal:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i, \qquad \tau^{-1} = \sum_i \tau_i^{-1}$$

Decaimentos multimodais

Generalizando para o caso multimodal:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i, \quad \tau^{-1} = \sum_i \tau_i^{-1} \quad \text{e} \quad f_i = \frac{\lambda_i}{\lambda} = \frac{\lambda_i}{\sum_i \lambda_i}.$$

Decaimentos multimodais

Exemplo: méson K^+, com $\lambda = 8,08 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$:

- $K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$, $f_1 = 0,635$, $\lambda_1 = 5,13 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$;

Decaimentos multi-modais

Exemplo: méson K^+, com $\lambda = 8,08 \cdot 10^7 \text{s}^{-1}$:

- $K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$, $\quad f_1 = 0,635$, $\quad \lambda_1 = 5,13 \cdot 10^7 \text{s}^{-1}$;
- $K^+ \to \pi^+ + \pi^0$, $\quad f_2 = 0,212$, $\quad \lambda_2 = 1,71 \cdot 10^7 \text{s}^{-1}$;

Decaimentos multi-modais

Exemplo: méson K^+, com $\lambda = 8,08 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$:

- $K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$, $\quad f_1 = 0,635$, $\quad \lambda_1 = 5,13 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$;
- $K^+ \to \pi^+ + \pi^0$, $\quad f_2 = 0,212$, $\quad \lambda_2 = 1,71 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$;
- $K^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, $\quad f_3 = 0,056$, $\quad \lambda_3 = 4,53 \cdot 10^6 \mathrm{s}^{-1}$;

Decaimentos multi-modais

Exemplo: méson K^+, com $\lambda = 8,08 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$:

- $K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$, $f_1 = 0,635$, $\lambda_1 = 5,13 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$;
- $K^+ \to \pi^+ + \pi^0$, $f_2 = 0,212$, $\lambda_2 = 1,71 \cdot 10^7 \mathrm{s}^{-1}$;
- $K^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, $f_3 = 0,056$, $\lambda_3 = 4,53 \cdot 10^6 \mathrm{s}^{-1}$;
- $K^+ \to \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$, $f_4 = 0,017$, $\lambda_4 = 1,37 \cdot 10^6 \mathrm{s}^{-1}$; ...

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons.

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons. Sabe-se, entretanto que o nuclídeo ^{24}Na não é estável e decai por emissão beta.

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons. Sabe-se, entretanto que o nuclídeo ^{24}Na não é estável e decai por emissão beta. Assim, a reação completa seria:

$$n +^{23} \text{Na} \rightarrow^{24} \text{Na} \rightarrow^{24} \text{Mg} + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons. Sabe-se, entretanto que o nuclídeo ^{24}Na não é estável e decai por emissão beta. Assim, a reação completa seria:

$$n +^{23} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Mg} + e^- + \bar{\nu}_e,$$

que indica, por um lado, a produção e, por outro lado, a diminuição na quantidade de ^{24}Na.

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons. Sabe-se, entretanto que o nuclídeo ^{24}Na não é estável e decai por emissão beta. Assim, a reação completa seria:

$$n +^{23} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Mg} + e^- + \bar{\nu}_e,$$

que indica, por um lado, a produção e, por outro lado, a diminuição na quantidade de ^{24}Na. Seja p a razão de produção, então:

$$\frac{dN}{dt} = p - \lambda N$$

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons. Sabe-se, entretanto que o nuclídeo ^{24}Na não é estável e decai por emissão beta. Assim, a reação completa seria:

$$n +^{23} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Mg} + e^{-} + \bar{\nu}_e,$$

que indica, por um lado, a produção e, por outro lado, a diminuição na quantidade de ^{24}Na. Seja p a razão de produção, então:

$$\frac{dN}{dt} = p - \lambda N \Rightarrow \frac{dN}{dt} + \lambda N = p$$

Produção de materiais radioativos

Suponha que queremos produzir ^{24}Na por bombardeamento de nêutrons. Sabe-se, entretanto que o nuclídeo ^{24}Na não é estável e decai por emissão beta. Assim, a reação completa seria:

$$n +^{23} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Na} \rightarrow^{24} \mathrm{Mg} + e^{-} + \bar{\nu}_e,$$

que indica, por um lado, a produção e, por outro lado, a diminuição na quantidade de ^{24}Na. Seja p a razão de produção, então:

$$\frac{dN}{dt} = p - \lambda N \Rightarrow \frac{dN}{dt} + \lambda N = p,$$

que é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem não-homogênea, que descreve a evolução temporal da quantidade de ^{24}Na.

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário ($t \to \infty$) que:

$$N(t \to \infty) = N'$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário ($t \to \infty$) que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário ($t \to \infty$) que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda, \text{ pois: } \frac{dN}{dt} \to 0.$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário $(t \to \infty)$ que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda, \text{ pois: } \frac{dN}{dt} \to 0.$$

Supondo $N(t) = N_h(t) + N'$, vem:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} + 0$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário $(t \to \infty)$ que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda.$$

Supondo $N(t) = N_h(t) + N'$, vem:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} + 0$$

e substituindo de volta na equação diferencial, vem:

$$-\lambda N_0 e^{-\lambda t} + 0 + \lambda N_0 e^{-\lambda t} + \lambda N' = p$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário ($t \to \infty$) que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda.$$

Supondo $N(t) = N_h(t) + N'$, vem:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} + 0$$

e substituindo de volta na equação diferencial, vem:

$$\cancel{-\lambda N_0 e^{-\lambda t}} + 0 + \cancel{\lambda N_0 e^{-\lambda t}} + \lambda N' = p$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário $(t \to \infty)$ que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda.$$

Supondo $N(t) = N_h(t) + N'$, vem:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} + 0$$

e substituindo de volta na equação diferencial, vem:

$$\cancel{-\lambda N_0 e^{-\lambda t}} + 0 + \cancel{\lambda N_0 e^{-\lambda t}} + \lambda N' = p \Rightarrow$$

$$N' = p/\lambda$$

Produção de materiais radioativos

Para a parte homogênea da equação temos a solução:

$$N_h(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

e para a parte não-homogênea, vamos, inicialmente, propor no regime estacionário ($t \to \infty$) que:

$$N(t \to \infty) = N' = p/\lambda.$$

Supondo $N(t) = N_h(t) + N'$, vem:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} + 0$$

e substituindo de volta na equação diferencial, vem:

$$\cancel{-\lambda N_0 e^{-\lambda t}} + 0 + \cancel{\lambda N_0 e^{-\lambda t}} + \lambda N' = p \Rightarrow$$

$$N(t \to \infty) = N_\infty = N' = p/\lambda,$$

denominado *número de equilíbrio*.

Produção de materiais radioativos

Falta ainda especificar N_0.

Produção de materiais radioativos

Falta ainda especificar N_0. No limite $t \to 0$, a quantidade inicial é $N_0 = 0$:

$$N(t = 0) = 0$$

Produção de materiais radioativos

Falta ainda especificar N_0. No limite $t \to 0$, a quantidade inicial é $N_0 = 0$:

$$N(t=0) = N_0\, e^{-\lambda 0} + p/\lambda = 0$$

Produção de materiais radioativos

Falta ainda especificar N_0. No limite $t \to 0$, a quantidade inicial é $N_0 = 0$:

$$N(t=0) = N_0\, \cancel{e^{-\lambda 0}} + p/\lambda = 0$$

Produção de materiais radioativos

Falta ainda especificar N_0. No limite $t \to 0$, a quantidade inicial é $N_0 = 0$:

$$N(t=0) = N_0 \cancel{e^{-\lambda 0}} + p/\lambda = 0 \Rightarrow N_0 = -p/\lambda$$

Produção de materiais radioativos

Falta ainda especificar N_0. No limite $t \to 0$, a quantidade inicial é $N_0 = 0$:

$$N(t=0) = N_0 \cancel{e^{-\lambda 0}} + p/\lambda = 0 \Rightarrow N_0 = -p/\lambda$$

Assim:

$$\boxed{N(t) = \frac{p}{\lambda}\left(1 - e^{-\lambda t}\right)}, \tag{14}$$

conhecida como *equação secular*.

Produção de materiais radioativos

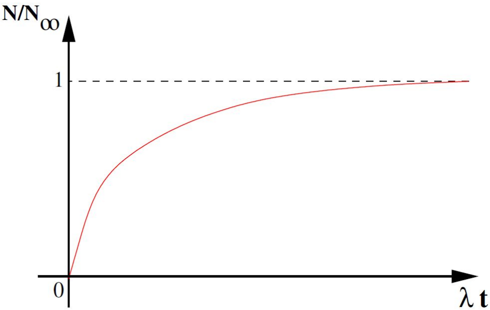

Figura: Equação secular.

Decaimentos sequenciais

Suponha, agora, uma sequência de dois decaimentos, isto é, um núcleo pai (1) decai num núcleo filho (2), que é, por sua vez, ativo.

Decaimentos sequenciais

Suponha, agora, uma sequência de dois decaimentos, isto é, um núcleo pai (1) decai num núcleo filho (2), que é, por sua vez, ativo. Teremos, então:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \\ \\ \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 \end{cases} \tag{15}$$

Decaimentos sequenciais

Suponha, agora, uma sequência de dois decaimentos, isto é, um núcleo pai (1) decai num núcleo filho (2), que é, por sua vez, ativo. Teremos, então:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \\ \\ \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 \end{cases}$$

Integrando a primeira equação, vem:

$$\boxed{N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}}, \tag{16}$$

que já é a solução para o núcleo pai.

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$.

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B$$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ que derivando:

$$\frac{dN_2}{dt} = A(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t})$$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ que derivando e substituindo na segunda equação:

$$\frac{dN_2}{dt} = A(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = -\lambda_2 A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ que derivando e substituindo na segunda equação:

$$\frac{dN_2}{dt} = A(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = -\lambda_2 A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow$$

$$e^{-\lambda_1 t}(-\lambda_1 A + \lambda_2 A - \lambda_1 N_0) + e^{-\lambda_2 t}(\lambda_2 A - \lambda_2 A) = 0$$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ que derivando e substituindo na segunda equação:

$$\frac{dN_2}{dt} = A(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = -\lambda_2 A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow$$

$$e^{-\lambda_1 t}(-\lambda_1 A + \lambda_2 A - \lambda_1 N_0) + e^{-\lambda_2 t}\cancel{(\lambda_2 A - \lambda_2 A)} = 0$$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ que derivando e substituindo na segunda equação:

$$\frac{dN_2}{dt} = A(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = -\lambda_2 A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow$$

$$e^{-\lambda_1 t}(-\lambda_1 A + \lambda_2 A - \lambda_1 N_0) + e^{-\lambda_2 t}\cancel{(\lambda_2 A - \lambda_2 A)} = 0 \Rightarrow A = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Decaimentos sequenciais

Agora, para o núcleo filho, vamos propor inicialmente: $N_2(t) = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$, com a condição inicial $N_2(0) = 0$:

$$A + B = 0 \Rightarrow A = -B,$$

então: $N_2(t) = A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ que derivando e substituindo na segunda equação:

$$\frac{dN_2}{dt} = A(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = -\lambda_2 A(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow$$

$$e^{-\lambda_1 t}(-\lambda_1 A + \lambda_2 A - \lambda_1 N_0) + e^{-\lambda_2 t}\cancel{(\lambda_2 A - \lambda_2 A)} = 0 \Rightarrow A = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \Rightarrow$$

$$\boxed{N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})} \tag{17}$$

Decaimentos sequenciais

Casos especiais:

Decaimentos sequenciais

Casos especiais:

- filho estável: $\lambda_2 \to 0 \Rightarrow N_2(t) = N_0 \left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right)$, que é a equação secular;

Decaimentos sequenciais

Casos especiais:

- filho estável: $\lambda_2 \to 0 \Rightarrow N_2(t) = N_0 \left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right)$, que é a equação secular;
- pai quase estável: $\lambda_1 << \lambda_2 \Rightarrow N_2(t) \approx N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right)$.

Decaimentos sequenciais

O instante da máxima atividade do núcleo filho ocorre quando:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0$$

Decaimentos sequenciais

O instante da máxima atividade do núcleo filho ocorre quando:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = 0$$

Decaimentos sequenciais

O instante da máxima atividade do núcleo filho ocorre quando:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = 0 \Rightarrow \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$$

Decaimentos sequenciais

O instante da máxima atividade do núcleo filho ocorre quando:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = 0 \Rightarrow \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \Rightarrow$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}$$

Decaimentos sequenciais

O instante da máxima atividade do núcleo filho ocorre quando:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = 0 \Rightarrow \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \Rightarrow$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} \Rightarrow \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) = (\lambda_1 - \lambda_2)t \Rightarrow$$

Decaimentos sequenciais

O instante da máxima atividade do núcleo filho ocorre quando:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1}(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = 0 \Rightarrow \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \Rightarrow$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} \Rightarrow \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) = (\lambda_1 - \lambda_2)t \Rightarrow$$

$$\boxed{t_{max} = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\lambda_1 - \lambda_2}} \tag{18}$$

Exercícios

1. Numa amostra de 1 litro de dióxido de carbono a CNTP, uma média de 5 desintegrações por minuto são observadas para o decaimento:

$$^{14}\mathrm{C} \rightarrow ^{14}\mathrm{N} + e^{+} + \overline{\nu}.$$

Calcule a fração de ^{14}C presente na amostra se a vida média deste nuclídeo é 5730 anos.

Exercícios

2. O nuclídeo ${}^{210}_{83}\mathrm{Bi}$ decai, com vida média de 7,2 dias, em ${}^{210}_{84}\mathrm{Po}$ através de emissão β. O nuclídeo ${}^{210}_{84}\mathrm{Po}$, por sua vez, decai, com vida média de 200 dias, em ${}^{206}_{82}\mathrm{Pb}$ através de emissão α. Se uma fonte contém, inicialmente, ${}^{210}_{83}\mathrm{Bi}$ puro, após quanto tempo a taxa de emissão de partícula α atingirá o máximo?

Exercícios

3. Uma amostra de ouro é exposta a um feixe de nêutrons de intensidade constante tal que 10^{10} nêutrons por segundo são absorvidos na reação: $n + {}^{197}_{79}\mathrm{Au} \rightarrow {}^{198}_{79}\mathrm{Au} + \gamma$. O nuclídeo ${}^{198}_{79}\mathrm{Au}$ decai em ${}^{198}_{80}\mathrm{Hg}$ via emissão β com vida média de 3,89 dias. Quantos núcleos de ${}^{198}_{79}\mathrm{Au}$ estarão presentes após 6 dias de irradiação? Qual o número de equilíbrio destes núcleos? Assumindo que o nuclídeo ${}^{198}_{80}\mathrm{Hg}$ não seja afetado pelo feixe de nêutrons, quantos de seus núcleos estarão presentes após os 6 dias?

Exercícios

4. Seja uma amostra contendo, num dado instante t, uma quantidade $N_p(t)$ de núcleos-pai e $N_f(t)$ núcleos-filho. Supondo que no instante de formação da amostra, $t = 0$, havia apenas $N_p(0)$ núcleos-pai e admitindo-se que as quantidades de núcleos se conservem, temos que:

$$N_p(0) = N_p(t) + N_f(t).$$

Mostre que a idade estimada da amostra será dada por:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left[1 + \frac{N_f(t)}{N_p(t)}\right],$$

onde λ é a constante de decaimento do núcleo-pai.

Exercícios

5. Uma amostra de urânio natural contém hoje 99,3% de $^{238}_{92}$U e 0,7% de $^{235}_{92}$U, com meias-vidas de $4,47 \cdot 10^9$ anos e $7,04 \cdot 10^8$ anos, respectivamente. Se a formação do urânio se deu há 6 bilhões de anos após o Big Bang, com uma abundância relativa de $^{235}_{92}\text{U}/^{238}_{92}\text{U} \approx 4,2$, estime a idade do universo.