

Física 12.º ano
Quinto teste — Onda-partícula.
Teoria atómica. Radioactividade
(versão sem respostas)

versão: 1,5

José Pedro do Amaral

11 de março de 2026

Introdução — constantes e relações úteis

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi},$$
$$|e| = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}, \quad R_H = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

Conversão útil.

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Relações que poderão ser úteis ao longo do conjunto.

$$v = \lambda f, \quad c = \lambda f, \quad E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{h}{\lambda}, \quad p = mv,$$

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad K = \frac{1}{2}mv^2, \quad K = \frac{p^2}{2m}, \quad \Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$

$$\Delta = m\lambda \quad (\text{interferência construtiva}), \quad \Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (\text{interferência destrutiva}),$$

$$K_{\max} = hf - \phi = eV_s, \quad f_c = \frac{\phi}{h}, \quad \lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{hc}{\phi},$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta),$$

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad (\text{átomo de hidrogénio}), \quad \Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (n_i > n_f, \text{ hidrogénio}),$$

$$N = A - Z, \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Problema 1 — Luz monocromática: frequência e energia do fóton

Enquadramento teórico. A luz é uma onda electromagnética que se propaga no vácuo com velocidade constante c . O comprimento de onda λ e a frequência f estão ligados por $c = \lambda f$: quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência. A teoria quântica da luz, desenvolvida por Planck e Einstein, postula que a radiação não é emitida nem absorvida de forma contínua, mas em pacotes discretos de energia chamados *fótons*. A energia de cada fóton é proporcional à sua frequência, $E = hf$, onde h é a constante de Planck. Daqui resulta que fótons de maior comprimento de onda (menor frequência) transportam menos energia. Dado que as energias em jogo à escala atómica são da ordem de electrões-volt, é conveniente converter joule em eV dividindo por $|e| = 1,60 \times 10^{-19}$ J/eV.

Pergunta. Uma radiação electromagnética no vácuo tem comprimento de onda $\lambda = 500$ nm.

Formulário.

$$c = \lambda f, \quad E = hf, \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

- a) Determina a frequência da radiação.
- b) Calcula a energia de **um** fóton dessa radiação em joule.
- c) Converte essa energia para electrão-volt.
- d) Indica se um aumento do comprimento de onda faria aumentar ou diminuir a energia do fóton.

Resposta:

Problema 2 — Onda periódica: período, frequência e comprimento de onda

Enquadramento teórico. Uma onda periódica caracteriza-se por três grandezas fundamentais relacionadas entre si: a frequência f (número de oscilações por segundo), o período T (duração de uma oscilação completa) e o comprimento de onda λ (distância entre duas cristas consecutivas). A relação $f = 1/T$ é imediata. A velocidade de propagação v da onda resulta do produto entre a distância percorrida por ciclo e o número de ciclos por segundo: $v = \lambda f$. Esta relação é universal para ondas mecânicas e electromagnéticas, embora para a luz no vácuo a velocidade seja fixada em c . Se a frequência variar mantendo a velocidade constante, o comprimento de onda varia inversamente: $\lambda = v/f$.

Pergunta. Numa experiência laboratorial, uma onda periódica propaga-se com velocidade $v = 12,0$ m/s e tem frequência $f = 8,0$ Hz.

Formulário.

$$v = \lambda f, \quad f = \frac{1}{T}, \quad v = \frac{\lambda}{T}, \quad c = \lambda f.$$

- a) Determina o período da onda.
- b) Calcula o comprimento de onda.
- c) Se a frequência duplicar e a velocidade de propagação se mantiver, o que acontece ao comprimento de onda?

Resposta:

Problema 3 — Interferência: máximo ou mínimo?

Enquadramento teórico. Quando duas ondas coerentes (mesma frequência e relação de fase constante) chegam ao mesmo ponto, o seu efeito combina-se pelo princípio da sobreposição. O resultado depende da diferença de caminho $\Delta = |L_2 - L_1|$, ou seja, da diferença entre as distâncias percorridas pelas duas ondas. Se essa diferença for um múltiplo inteiro do comprimento de onda ($\Delta = m\lambda$, com $m = 0, 1, 2, \dots$), as ondas chegam em fase e reforçam-se mutuamente: ocorre *interferência construtiva* (máximo). Se $\Delta = (m + \frac{1}{2})\lambda$, chegam em oposição de fase e anulam-se: ocorre *interferência destrutiva* (mínimo). Uma alteração na frequência — mantendo a velocidade constante — altera λ e, por conseguinte, pode mudar a classificação do ponto.

Pergunta. Duas ondas coerentes chegam a um ponto P depois de percorrerem caminhos $L_1 = 3,20$ m e $L_2 = 3,95$ m. O comprimento de onda é $\lambda = 0,25$ m.

Formulário.

$$\Delta = |L_2 - L_1|, \quad \Delta = m\lambda, \quad \Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad v = \lambda f.$$

- a) Calcula a diferença de caminho Δ .
- b) Indica se no ponto P ocorre interferência construtiva ou destrutiva.
- c) Se a frequência da onda aumentasse sem mudar a velocidade de propagação, a classificação do ponto P se manteria necessariamente? Justifica com base física.

Resposta:

Problema 4 — Comprimento de onda de de Broglie de um electrão

Enquadramento teórico. Em 1924, Louis de Broglie propôs que não só a luz mas também a matéria possui dualidade onda-corpúsculo. A qualquer partícula com quantidade de movimento $p = mv$ está associado um comprimento de onda $\lambda = h/p$, hoje chamado *comprimento de onda de de Broglie*. Esta hipótese foi confirmada experimentalmente pela difracção de electrões em cristais. Para partículas macroscópicas, a massa é tão grande que λ é vanishingly pequeno — muitos orders of magnitude abaixo de qualquer escala física relevante — pelo que os efeitos ondulatórios são completamente indetectáveis. Para partículas microscópicas como o electrão, ao contrário, λ é da ordem dos espaçamentos interatómicos (décimos de nanómetro), tornando a difracção e a interferência observáveis.

Pergunta. Um electrão move-se com velocidade $v = 2,0 \times 10^6$ m/s.

Formulário.

$$p = mv, \quad \lambda = \frac{h}{p}, \quad K = \frac{1}{2}mv^2, \quad K = \frac{p^2}{2m}.$$

- a) Calcula a quantidade de movimento do electrão.
- b) Determina o comprimento de onda de de Broglie associado.
- c) Explica, com base no valor obtido, por que razão efeitos ondulatórios são observáveis para partículas microscópicas e não para objectos macroscópicos.

Resposta:

Problema 5 — Comparação de de Broglie entre duas partículas

Enquadramento teórico. O comprimento de onda de de Broglie $\lambda = h/p = h/(mv)$ depende inversamente da quantidade de movimento. Para duas partículas com a mesma velocidade, a que tiver maior massa terá maior quantidade de movimento e, portanto, menor comprimento de onda. O protão tem massa cerca de 1836 vezes superior à do electrão, pelo que, à mesma velocidade, o seu comprimento de onda é 1836 vezes menor. Este facto explica por que razão os electrões exibem comportamento ondulatório muito mais pronunciado do que os protões nas mesmas condições: o seu λ é suficientemente grande para que a difracção em estruturas cristalinas seja facilmente observada, enquanto o do protão é já muito mais curto.

Pergunta. Duas partículas têm a mesma velocidade: um electrão e um protão. Admite

$$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}, \quad m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

Formulário.

$$p = mv, \quad \lambda = \frac{h}{p}, \quad K = \frac{1}{2}mv^2, \quad E = hf.$$

- a) Sem fazer de início contas completas, indica qual das partículas tem maior comprimento de onda de de Broglie.
- b) Calcula a razão

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p}.$$

- c) Explica por que razão isto ajuda a perceber a maior facilidade em observar comportamento ondulatório em electrões.

Resposta:

Problema 6 — Princípio de incerteza de Heisenberg

Enquadramento teórico. O princípio de incerteza de Heisenberg, formulado em 1927, estabelece que é impossível conhecer simultaneamente, com precisão arbitrária, a posição e a quantidade de movimento de uma partícula. Quantitativamente, $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, onde Δx é a incerteza na posição e Δp a incerteza na quantidade de movimento. Esta não é uma limitação tecnológica — é uma propriedade fundamental da natureza quântica da matéria. Quanto mais se restringe a região onde a partícula pode ser encontrada (menor Δx), maior tem de ser a indeterminação na sua quantidade de movimento (maior Δp), e consequentemente na sua velocidade. A relação $\Delta p \geq \hbar/(2 \Delta x)$ fornece a incerteza mínima possível na quantidade de movimento para uma dada localização.

Pergunta. Pretende-se localizar um electrão com uma incerteza máxima de $\Delta x = 2,0 \times 10^{-10}$ m.

Formulário.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad p = mv, \quad K = \frac{p^2}{2m}, \quad \lambda = \frac{h}{p}.$$

- a) Determina a menor incerteza possível na quantidade de movimento do electrão.
- b) A partir desse valor, calcula a menor incerteza correspondente na velocidade.
- c) Explica, em termos qualitativos, por que razão tentar localizar muito precisamente uma partícula afecta a precisão com que podemos conhecer o seu movimento.

Resposta:

Problema 7 — Efeito fotoelétrico: energia do fóton e função de trabalho

Enquadramento teórico. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de electrões por uma superfície metálica quando esta é iluminada com radiação de frequência suficientemente elevada. Einstein explicou o fenómeno em 1905 com base na natureza corpuscular da luz: cada fóton cede toda a sua energia $E = hf$ a um único electrão. Parte dessa energia é usada para arrancar o electrão do metal, vencendo a energia de ligação característica do material, a chamada *função de trabalho* ϕ . O excesso converte-se em energia cinética máxima dos fotoelectrões: $K_{\max} = hf - \phi$. Se $hf < \phi$, não há emissão independentemente da intensidade da luz, pois aumentar a intensidade apenas aumenta o número de fótons, não a energia de cada um. A tensão de paragem V_s é a diferença de potencial necessária para travar os fotoelectrões mais energéticos, satisfazendo $eV_s = K_{\max}$.

Pergunta. Uma superfície metálica tem função de trabalho $\phi = 2,30$ eV e é iluminada com luz de frequência $f = 8,0 \times 10^{14}$ Hz.

Formulário.

$$E = hf, \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad K_{\max} = hf - \phi, \quad K_{\max} = eV_s.$$

- a) Calcula a energia do fóton incidente em eV.
- b) Determina a energia cinética máxima dos fotoelectrões em eV.
- c) Indica se há emissão fotoelétrica.
- d) Explica por que razão aumentar apenas a intensidade da luz não alteraria a energia cinética máxima dos electrões emitidos.

Resposta:

Problema 8 — Efeito fotoelétrico: frequência limite

Enquadramento teórico. Para que ocorra efeito fotoelétrico, a energia do fóton incidente tem de ser pelo menos igual à função de trabalho do metal: $hf \geq \phi$. A frequência mínima para a qual a emissão é ainda possível chama-se *frequência limite* (ou frequência de corte) $f_c = \phi/h$. Abaixo desta frequência, nenhum electrão é emitido, qualquer que seja a intensidade da radiação. O comprimento de onda correspondente, $\lambda_c = hc/\phi$, é o comprimento de onda máximo que ainda produz emissão. Radiação com $\lambda > \lambda_c$ (frequência abaixo de f_c) não arranca electrões; radiação com $\lambda < \lambda_c$ produz fotoelectrões com energia cinética positiva.

Pergunta. Para um dado metal, a função de trabalho é $\phi = 4,00$ eV.

Formulário.

$$f_c = \frac{\phi}{h}, \quad \lambda_c = \frac{c}{f_c}, \quad \lambda_c = \frac{hc}{\phi}, \quad E = hf.$$

- a) Calcula a frequência limite f_c .
- b) Determina o comprimento de onda limite λ_c .
- c) Indica se luz com $\lambda = 400$ nm produziria fotoelectrões.
- d) Indica se luz com $\lambda = 700$ nm produziria fotoelectrões.

Resposta:

Problema 9 — Efeito fotoelétrico: potencial de paragem

Enquadramento teórico. Quando há emissão fotoelétrica, os electrões abandonam a superfície com energias cinéticas que vão de zero até um máximo $K_{\max} = hf - \phi$. Para medir experimentalmente $K_{\max}$, aplica-se entre o cátodo e um ânodo uma tensão contrária ao movimento dos electrões. A *tensão de paragem* (ou potencial de paragem) V_s é o valor mínimo dessa tensão que impede mesmo os electrões mais rápidos de atingir o ânodo, satisfazendo $eV_s = K_{\max}$. Conhecida V_s e a função de trabalho ϕ , é possível calcular a energia do fóton incidente e, a partir daí, a frequência e o comprimento de onda da radiação, sem necessitar de os medir directamente.

Pergunta. Uma superfície metálica é iluminada e observa-se um potencial de paragem $V_s = 1,8$ V. A função de trabalho do metal é $\phi = 1,8$ eV.

Formulário.

$$K_{\max} = eV_s, \quad K_{\max} = hf - \phi, \quad E = hf, \quad c = \lambda f.$$

- a) Determina a energia cinética máxima dos fotoelectrões em eV.
- b) Calcula a energia do fóton incidente em eV.
- c) Determina a frequência da radiação incidente.
- d) Calcula o respectivo comprimento de onda no vácuo.

Resposta:

Problema 10 — Efeito de Compton

Enquadramento teórico. O efeito de Compton, descoberto em 1923, consiste na dispersão de raios X por electrões quase livres, com aumento do comprimento de onda dos fotões dispersos. Quando um fotão colide com um electrão em repouso, transfere-lhe parte da sua energia e quantidade de movimento, saindo desviado com menor energia — e, portanto, maior comprimento de onda. A variação de comprimento de onda depende apenas do ângulo de desvio θ :

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta).$$

O factor $h/(m_e c) \approx 0,00243$ nm é o *comprimento de onda de Compton do electrão*. Este resultado só pode ser explicado tratando a luz como partícula (fotão) com energia e quantidade de movimento bem definidas — constituindo uma das provas mais directas da dualidade onda-corpúsculo da radiação.

Pergunta. Um feixe de raios X de comprimento de onda inicial $\lambda = 0,0500$ nm sofre dispersão por electrões quase livres com ângulo de desvio $\theta = 90^\circ$.

Formulário.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta), \quad \frac{h}{m_e c} = 0,00243 \text{ nm}, \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{h}{\lambda}.$$

- a) Calcula a variação de comprimento de onda $\Delta\lambda$.
- b) Determina o novo comprimento de onda λ' .
- c) Indica se a energia do fotão disperso é maior, menor ou igual à energia inicial.
- d) Explica por que razão este resultado favorece uma descrição corpuscular da radiação.

Resposta:

Problema 11 — Modelo de Bohr: energia de um nível

Enquadramento teórico. No modelo atómico de Bohr (1913), o electrão do hidrogénio só pode ocupar órbitas circulares bem determinadas, às quais correspondem energias discretas:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

O sinal negativo indica que o electrão está ligado ao núcleo: é necessário fornecer energia para o libertar. O estado de menor energia ($n = 1$), chamado *estado fundamental*, tem $E_1 = -13,6 \text{ eV}$; os estados com $n > 1$ são *estados excitados*, com energias menos negativas. A *energia de ionização* a partir de um nível n é a energia mínima necessária para levar o electrão até $E = 0$ (electrão livre em repouso), ou seja, $E_{\text{ion}} = -E_n$.

Pergunta. Considera o átomo de hidrogénio no modelo de Bohr.

Formulário.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad \Delta E = hf, \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right).$$

- a) Calcula a energia do nível $n = 1$.
- b) Calcula a energia do nível $n = 3$.
- c) Determina a energia necessária para ionizar o átomo a partir do estado fundamental.
- d) Explica o significado físico de a energia dos níveis ser negativa.

Resposta:

Problema 12 — Emissão no hidrogénio: transição entre níveis

Enquadramento teórico. Quando um electrão transita entre dois níveis de energia no átomo de hidrogénio, a diferença de energia é emitida ou absorvida sob a forma de um fóton. Numa transição de um nível superior n_i para um nível inferior n_f ($n_i > n_f$), o átomo perde energia e emite um fóton com energia $|\Delta E| = E_{n_i} - E_{n_f} = hf$. Inversamente, se o electrão sobe de n_f para n_i , o átomo absorve um fóton com exactamente essa energia. Como as energias dos níveis são discretas, as frequências (e comprimentos de onda) dos fótons emitidos ou absorvidos também são discretas, originando o espectro de riscas característico do hidrogénio.

Pergunta. Um electrão no átomo de hidrogénio transita do nível $n_i = 4$ para o nível $n_f = 2$.

Formulário.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad |\Delta E| = hf, \quad |\Delta E| = \frac{hc}{\lambda}, \quad c = \lambda f.$$

- a) Calcula a variação de energia do átomo em eV.
- b) Determina a frequência do fóton emitido.
- c) Calcula o comprimento de onda da radiação emitida.
- d) Indica se se trata de absorção ou emissão.

Resposta:

Problema 13 — Série de Balmer

Enquadramento teórico. As transições electrónicas no hidrogénio agrupam-se em *séries espectrais*, consoante o nível final n_f da transição. A *série de Balmer* corresponde a $n_f = 2$: todas as transições que terminam no segundo nível emitem (ou absorvem) fotões no visível ou no ultravioleta próximo. As suas riscas foram as primeiras a ser sistematizadas empiricamente por Balmer em 1885, antes mesmo do modelo de Bohr. O comprimento de onda de cada risca é dado pela fórmula de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$$

onde $R_H = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ é a constante de Rydberg. O facto de as riscas ocorrerem em comprimentos de onda discretos reflecte directamente a quantização dos níveis de energia.

Pergunta. No átomo de hidrogénio, considera uma transição para o nível $n_f = 2$ a partir do nível $n_i = 5$.

Formulário.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad c = \lambda f.$$

- a) Determina o comprimento de onda da linha espectral.
- b) Indica a que região do espectro electromagnético pertence a radiação emitida (visível, ultravioleta ou infravermelho).
- c) Explica por que razão as linhas do hidrogénio aparecem em comprimentos de onda discretos e não num contínuo.

Resposta:

Problema 14 — Absorção atômica

Enquadramento teórico. Um átomo no estado fundamental pode absorver um fóton e promover o seu electrão a um estado excitado, desde que a energia do fóton corresponda *exactamente* à diferença de energia entre os dois níveis: $\Delta E = E_{n_f} - E_{n_i} = hf$. Se a energia do fóton não coincidir com nenhuma transição permitida, o fóton não é absorvido. Se a energia do fóton for superior à energia de ionização a partir do estado inicial ($|\Delta E| > 13,6 \text{ eV}$ a partir de $n = 1$), o electrão é libertado com energia cinética positiva e o átomo fica ionizado. Para determinar o nível final, calcula-se $E_{n_f} = E_{n_i} + \Delta E$ e identifica-se n_f a partir de $E_n = -13,6/n^2 \text{ eV}$.

Pergunta. Um átomo de hidrogénio inicialmente no estado fundamental absorve um fóton de energia 12,09 eV.

Formulário.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}, \quad \Delta E = hf, \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right).$$

- a) Determina para que nível n transita o electrão.
- b) Calcula o comprimento de onda do fóton absorvido.
- c) Indica se este fóton ioniza o átomo.

Resposta:

Problema 15 — Isótopos e composição nuclear

Enquadramento teórico. O núcleo atómico é composto por *protões* (carga positiva $+|e|$) e *neutrões* (sem carga). O número de protões Z define o elemento químico e chama-se *número atómico*. O número total de nucleões (protões mais neutrões) é o *número de massa* A . O número de neutrões obtém-se por $N = A - Z$. Num átomo neutro, o número de electrões na nuvem electrónica é igual a Z . *Isótopos* são átomos do mesmo elemento (mesmo Z) que diferem no número de neutrões (e portanto em A). Têm comportamento químico praticamente idêntico (mesma configuração electrónica), mas propriedades nucleares distintas, nomeadamente diferentes estabilidades.

Pergunta. Considera o nuclídeo ${}^{37}_{17}\text{Cl}$.

Formulário.

$$N = A - Z, \quad {}^A_ZX, \quad A = Z + N, \quad Z = \text{número atómico}.$$

- a) Indica o número de protões, neutrões e electrões de um átomo neutro desse isótopo.
- b) Escreve a notação nuclear de um isótopo do mesmo elemento com 18 neutrões.
- c) Explica o que significa dizer que dois nuclídeos são isótopos.
- d) Indica o que permanece igual e o que muda entre dois isótopos do mesmo elemento.

Resposta:

Problema 16 — Desintegração alfa

Enquadramento teórico. A *desintegração alfa* é um processo de decaimento radioactivo em que um núcleo instável emite uma partícula alfa ${}^4_2\alpha$ (idêntica a um núcleo de hélio-4, com 2 prótons e 2 neutrões). Em consequência, o núcleo pai perde 2 prótons e 2 neutrões: o número atómico diminui de 2 e o número de massa diminui de 4. Como Z muda, o elemento químico também muda — ocorre *transmutação*. As leis de conservação do número de massa e do número atómico (carga) devem ser verificadas em ambos os membros da equação nuclear. A partícula alfa tem fraco poder de penetração, sendo travada por uma folha de papel ou alguns centímetros de ar.

Pergunta. O urânio-238 sofre desintegração alfa.

Formulário.

$${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\alpha, \quad N = A - Z, \quad {}^A_ZX, \quad A = Z + N.$$

- a) Escreve a equação nuclear completa da desintegração alfa do ${}^{238}_{92}\text{U}$.
- b) Indica o número atómico e o número de massa do núcleo filho.
- c) Determina o número de neutrões no núcleo inicial e no núcleo final.
- d) Explica por que razão a emissão alfa altera o elemento químico.

Resposta:

Problema 17 — Desintegração beta menos

Enquadramento teórico. Na *desintegração beta menos* (β^-), um neutrão no interior do núcleo transforma-se num protão, emitindo um electrão (β^-) e um antineutrino electrónico $\bar{\nu}_e$. O número de massa A conserva-se (o número total de nucleões não muda), mas o número atómico aumenta por 1 (o neutrão torna-se protão), pelo que ocorre *transmutação*. A conservação simultânea de energia, quantidade de movimento e número leptónico exige a emissão do antineutrino. A partícula β^- tem poder de penetração intermédio — é travada por alguns milímetros de alumínio.

Pergunta. O carbono-14 sofre desintegração β^- .

Formulário.

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}_e, \quad N = A - Z, \quad {}^A_ZX, \quad A = Z + N.$$

- a) Escreve a equação nuclear da desintegração β^- do ${}^{14}_6\text{C}$.
- b) Indica o número de massa e o número atómico do núcleo filho.
- c) Explica, em termos de protões e neutrões, o que acontece no interior do núcleo.
- d) Justifica por que razão o número de massa se conserva nesta transformação.

Resposta:

Problema 18 — Desintegração beta mais e emissão gama

Enquadramento teórico. Na *desintegração beta mais* (β^+), um próton transforma-se num neutrão com emissão de um positrão (β^+ , antipartícula do electrão) e um neutrino electrónico ν_e . O número de massa conserva-se, mas Z diminui de 1. Após qualquer desintegração α ou β , o núcleo filho pode ficar num estado excitado, denotado ${}^A_ZX^*$. Ao regressar ao estado fundamental, emite a energia em excesso sob a forma de um fóton de muito alta energia chamado *radiação gama* (γ). A emissão γ não altera A nem Z : o elemento e o isótopo são os mesmos, apenas muda o estado de energia do núcleo. A radiação γ é a mais penetrante das três, necessitando de espessas camadas de chumbo ou betão para ser atenuada.

Pergunta. Um núcleo instável sofre primeiro uma desintegração β^+ e o núcleo filho fica excitado, emitindo depois radiação γ .

Formulário.

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu_e, \quad {}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma, \quad E = hf, \quad E = \frac{hc}{\lambda}.$$

- a) Indica o que acontece ao número atómico e ao número de massa na desintegração β^+ .
- b) Indica o que acontece a essas duas grandezas numa emissão γ .
- c) Explica por que razão a emissão gama não corresponde a transmutação de elemento.
- d) Ordena, do menos penetrante para o mais penetrante, as radiações α , β e γ .

Resposta:

Problema 19 — Lei de desintegração radioactiva e período de semi-desintegração

Enquadramento teórico. A desintegração radioactiva é um processo aleatório e espontâneo. A probabilidade de um dado núcleo se desintegrar por unidade de tempo é constante e característica do isótopo, sendo designada *constante de desintegração* λ . Para uma amostra com muitos núcleos, a lei estatística resulta numa diminuição exponencial do número de núcleos não desintegrados: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$. O *período de semi-desintegração* $T_{1/2}$ é o tempo necessário para que metade dos núcleos iniciais se desintegre, relacionando-se com λ por $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$. A expressão equivalente $N(t) = N_0 (1/2)^{t/T_{1/2}}$ é frequentemente mais prática quando t é múltiplo inteiro de $T_{1/2}$.

Pergunta. Uma amostra radioactiva tem período de semi-desintegração $T_{1/2} = 12,0$ h e contém inicialmente $N_0 = 8,0 \times 10^{20}$ núcleos.

Formulário.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}, \quad A = \lambda N.$$

- a) Determina a constante de desintegração λ .
- b) Calcula o número de núcleos ainda não desintegrados ao fim de 36,0 h.
- c) Indica que fracção da amostra inicial já se desintegrou nesse instante.
- d) Explica por que razão a lei é estatística e não permite prever quando um núcleo individual se desintegrará.

Resposta:

Problema 20 — Actividade radioactiva

Enquadramento teórico. A *actividade* A de uma fonte radioactiva é o número de desintegrações por segundo, dada por $A = \lambda N$, onde N é o número de núcleos radioactivos presentes. A unidade SI é o *becquerel* (Bq), correspondendo a uma desintegração por segundo. Como N diminui exponencialmente com o tempo, a actividade também decresce: $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$. A actividade mede a *taxa* de decaimento, enquanto $T_{1/2}$ caracteriza a *velocidade* com que a amostra envelhece. Uma actividade elevada não implica necessariamente maior perigo biológico: este depende também do tipo de radiação emitida, da energia por desintegração e da forma como o corpo é exposto (irradiação externa ou contaminação interna).

Pergunta. Uma fonte radioactiva tem constante de desintegração $\lambda = 2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e contém, num certo instante, $N = 3,0 \times 10^{12}$ núcleos radioactivos.

Formulário.

$$A = \lambda N, \quad 1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegração/s}, \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

- a) Calcula a actividade da fonte em becquerel.
- b) Determina o número esperado de desintegrações em 10 min, supondo a actividade aproximadamente constante nesse intervalo.
- c) Explica a diferença entre actividade e período de semi-desintegração.
- d) Uma fonte com maior actividade é necessariamente mais perigosa em qualquer situação? Responde de forma fundamentada, distinguindo actividade de efeito biológico.

Resposta: