

Física 12.^o ano
Quinto teste — Onda-partícula.
Teoria atómica. Radioactividade
(versão com 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 $|e| = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}$.

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

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:

- a) Usando $c = \lambda f$:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}} = \boxed{6,00 \times 10^{14} \text{ Hz.}}$$

- b) Usando $E = hf$:

$$E = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \times 6,00 \times 10^{14} \text{ Hz} = \boxed{3,98 \times 10^{-19} \text{ J.}}$$

- c) Dividindo pelo valor de $|e|$:

$$E = \frac{3,98 \times 10^{-19} \text{ J}}{1,60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = \boxed{2,49 \text{ eV.}}$$

- d) Como $E = hc/\lambda$, a energia é *inversamente proporcional* ao comprimento de onda. Um aumento de λ faz **diminuir** a energia do fóton.

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:

- a) Usando $f = 1/T$:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8,0 \text{ Hz}} = \boxed{0,125 \text{ s.}}$$

- b) Usando $v = \lambda f$:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{12,0 \text{ m/s}}{8,0 \text{ Hz}} = \boxed{1,50 \text{ m.}}$$

- c) Se a velocidade v se mantiver constante e f duplicar, então $\lambda = v/f$ diminui para metade:

$$\lambda' = \frac{v}{2f} = \frac{\lambda}{2} = 0,75 \text{ m.}$$

O comprimento de onda **diminui para metade**.

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:

a)

$$\Delta = |L_2 - L_1| = |3,95 - 3,20| \text{ m} = \boxed{0,75 \text{ m.}}$$

b) Calcula-se a razão Δ/λ :

$$\frac{\Delta}{\lambda} = \frac{0,75}{0,25} = 3 \in \mathbb{Z}.$$

Como $\Delta = 3\lambda$, trata-se de um múltiplo inteiro do comprimento de onda. Ocorre **interferência construtiva** (máximo de amplitude) no ponto P .

- c) Não necessariamente. Se f aumentar com v constante, o novo comprimento de onda será $\lambda' = v/f' < \lambda$, pelo que a razão Δ/λ' mudará. Em geral, Δ/λ' deixará de ser inteiro, podendo o ponto P passar a corresponder a interferência destrutiva ou a uma situação intermédia. A classificação do ponto depende inteiramente do valor actual de λ ; qualquer alteração a λ implica reclassificar o ponto.

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:

a)

$$p = m_e v = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 2,0 \times 10^6 \text{ m/s} = \boxed{1,82 \times 10^{-24} \text{ kg}\cdot\text{m/s.}}$$

b)

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{1,82 \times 10^{-24} \text{ kg}\cdot\text{m/s}} = \boxed{3,64 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,364 \text{ nm.}}$$

- c) O valor obtido, $\lambda \approx 0,36$ nm, é da mesma ordem de grandeza dos espaçamentos entre planos atómicos nos cristais (tipicamente 0,1–0,5 nm), o que torna possível observar fenómenos de difracção e interferência. Para um objecto macroscópico — por exemplo, uma bola com $m \sim 0,1$ kg a $v \sim 1$ m/s — o comprimento de onda de de Broglie seria da ordem de 10^{-33} m, um valor tantas ordens de grandeza abaixo do diâmetro de um protão que nenhuma estrutura física poderia servir de rede de difracção. Os efeitos ondulatórios são, na prática, absolutamente indetectáveis à escala macroscópica.

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:

- a) Para a mesma velocidade v , a quantidade de movimento é $p = mv$. Como $m_e \ll m_p$, o electrão tem menor p e, portanto, $\lambda = h/p$ maior. O **electrão** tem maior comprimento de onda de de Broglie.
- b) Como as velocidades são iguais, $p = mv$ e portanto:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{h/p_e}{h/p_p} = \frac{p_p}{p_e} = \frac{m_p v}{m_e v} = \frac{m_p}{m_e} = \frac{1,67 \times 10^{-27}}{9,11 \times 10^{-31}} = \boxed{1,83 \times 10^3 \approx 1836}.$$

- c) O comprimento de onda do electrão é cerca de 1836 vezes maior do que o do protão à mesma velocidade. Para que ocorra difracção, é necessário que λ seja comparável ao espaçamento da rede difractora. Com λ_e da ordem de décimos de nanómetro, os electrões difractam eficazmente em cristais; o λ_p , sendo 1836 vezes menor, já não é comparável aos espaçamentos típicos nessas mesmas condições, tornando os efeitos ondulatórios do protão muito mais difíceis de observar.

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:

- a) A incerteza mínima corresponde ao caso de igualdade:

$$\Delta p_{\min} = \frac{\hbar}{2 \Delta x} = \frac{1,0546 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2 \times 2,0 \times 10^{-10} \text{ m}} = \boxed{2,64 \times 10^{-25} \text{ kg}\cdot\text{m/s.}}$$

- b) Usando $\Delta p = m_e \Delta v$:

$$\Delta v = \frac{\Delta p_{\min}}{m_e} = \frac{2,64 \times 10^{-25} \text{ kg}\cdot\text{m/s}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = \boxed{2,90 \times 10^5 \text{ m/s.}}$$

Note-se que esta incerteza na velocidade é cerca de 0,1% da velocidade da luz, um valor macroscopicamente imenso para uma medição de posição da escala de um átomo.

- c) Na mecânica quântica, a partícula não tem simultaneamente posição e quantidade de movimento bem definidas — estes não são atributos pré-existentes que a medição revela, mas grandezas cujos valores são intrinsecamente indeterminados. Confinar espacialmente a partícula numa região de largura Δx é equivalente, no formalismo ondulatório, a construir um pacote de ondas com essa extensão. Um pacote de ondas espacialmente estreito requer a sobreposição de muitos comprimentos de onda diferentes, o que implica uma grande dispersão em $p = h/\lambda$. É esta dualidade onda-corpúsculo, e não qualquer perturbação introduzida pela medição, que torna as duas incertezas fundamentalmente interdependentes.

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:

a)

$$E = hf = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \times 8,0 \times 10^{14} \text{ Hz}}{1,60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = \frac{5,30 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} \text{ eV} = \boxed{3,31 \text{ eV.}}$$

b)

$$K_{\max} = hf - \phi = 3,31 - 2,30 = \boxed{1,01 \text{ eV.}}$$

- c) Como $hf = 3,31 \text{ eV} > \phi = 2,30 \text{ eV}$, **há emissão fotoelétrica.**
- d) A intensidade da luz determina o número de fótons que atingem a superfície por unidade de tempo, mas não a energia de cada fóton individualmente. A energia cinética máxima dos fotoelectrões depende apenas da energia de um único fóton menos a função de trabalho: $K_{\max} = hf - \phi$. Aumentar a intensidade faz emitir mais electrões, mas cada um continua a receber a mesma energia hf ; $K_{\max}$ permanece inalterada.

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:

a)

$$f_c = \frac{\phi}{h} = \frac{4,00 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} = \boxed{9,66 \times 10^{14} \text{ Hz.}}$$

b)

$$\lambda_c = \frac{hc}{\phi} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{4,00 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}} = \boxed{3,10 \times 10^{-7} \text{ m} = 310 \text{ nm.}}$$

- c) $\lambda = 400 \text{ nm} > \lambda_c = 310 \text{ nm}$, ou seja, a frequência é inferior a f_c . **Não há emissão fotoelétrica.**
- d) $\lambda = 700 \text{ nm} > \lambda_c = 310 \text{ nm}$, portanto a frequência é ainda mais baixa. **Não há emissão fotoelétrica.**

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 fotão 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 fotão incidente em eV.
- c) Determina a frequência da radiação incidente.
- d) Calcula o respectivo comprimento de onda no vácuo.

Resposta:

a)

$$K_{\max} = eV_s = \boxed{1,8 \text{ eV.}}$$

Note-se que $K_{\max} = \phi$: a energia cinética máxima iguala exactamente a função de trabalho, o que significa que o fotão incidente tem energia 2ϕ .

b)

$$hf = K_{\max} + \phi = 1,8 + 1,8 = \boxed{3,6 \text{ eV.}}$$

c)

$$f = \frac{hf_{\text{valor}}}{h} = \frac{3,6 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} = \boxed{8,69 \times 10^{14} \text{ Hz.}}$$

d)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{8,69 \times 10^{14} \text{ Hz}} = \boxed{3,45 \times 10^{-7} \text{ m} = 345 \text{ nm.}}$$

Este comprimento de onda situa-se no ultravioleta próximo.

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:

a)

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos 90^\circ) = 0,00243 \text{ nm} \times (1 - 0) = \boxed{0,00243 \text{ nm}}.$$

b)

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 0,0500 + 0,00243 = \boxed{0,05243 \text{ nm}}.$$

- c) Como $\lambda' > \lambda$ e $E = hc/\lambda$, a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda. A energia do fotão disperso é **menor** do que a energia inicial.
- d) Um modelo ondulatório clássico da luz preveria que os electrões irradiados oscilassem com a frequência da onda incidente, emitindo radiação com exactamente a mesma frequência — não se verificaria qualquer desvio em λ . O desvio observado só é explicável se a interacção ocorrer como uma colisão entre dois corpúsculos — o fotão e o electrão — com conservação de energia e de quantidade de movimento. O fotão transfere parte da sua energia e quantidade de movimento ao electrão e sai com menor energia, logo maior λ . Este resultado constitui uma das demonstrações mais directas de que a radiação possui propriedades corpusculares.

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:

a)

$$E_1 = -\frac{13,6}{1^2} = \boxed{-13,6 \text{ eV.}}$$

b)

$$E_3 = -\frac{13,6}{3^2} = -\frac{13,6}{9} = \boxed{-1,51 \text{ eV.}}$$

- c) Para ionizar o átomo a partir de $n = 1$ é necessário fornecer energia suficiente para levar o electrão a $E = 0$:

$$E_{\text{ion}} = 0 - E_1 = 0 - (-13,6) = \boxed{13,6 \text{ eV.}}$$

- d) A energia negativa dos níveis reflecte o facto de o electrão estar *ligado* ao núcleo: o sistema electrão–protão tem menor energia do que os dois separados (estado de referência $E = 0$ corresponde ao electrão livre em repouso a distância infinita). Quanto mais negativa a energia, mais fortemente o electrão está ligado e maior a energia que é necessário fornecer para o libertar. Nenhum nível ligado pode ter energia positiva.

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:

- a) Calculam-se primeiro as energias dos dois níveis:

$$E_4 = -\frac{13,6}{16} = -0,850 \text{ eV}, \quad E_2 = -\frac{13,6}{4} = -3,40 \text{ eV}.$$

A variação de energia do átomo (que perde energia ao emitir) é:

$$|\Delta E| = |E_4 - E_2| = |-0,850 - (-3,40)| = \boxed{2,55 \text{ eV}}.$$

- b)

$$f = \frac{|\Delta E|}{h} = \frac{2,55 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} = \boxed{6,15 \times 10^{14} \text{ Hz}}.$$

- c)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8}{6,15 \times 10^{14}} = \boxed{4,88 \times 10^{-7} \text{ m} = 488 \text{ nm}}.$$

Este comprimento de onda cai na região do azul-verde do espectro visível (risca H_β da série de Balmer).

- d) O electrão transita de $n_i = 4$ para $n_f = 2$, ou seja, de um nível de maior energia para um de menor energia. O átomo **emite** um fóton.

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) fótons 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:

a)

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right) = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{25} \right) = 1,097 \times 10^7 \times \frac{21}{100} = 2,304 \times 10^6 \text{ m}^{-1}.$$

$$\lambda = \frac{1}{2,304 \times 10^6} = \boxed{4,34 \times 10^{-7} \text{ m} = 434 \text{ nm.}}$$

- b) O espectro visível estende-se aproximadamente de 380 nm a 700 nm. Como 434 nm se situa dentro desse intervalo, a radiação emitida pertence à região do **visível** (cor violeta).
- c) Os níveis de energia do átomo de hidrogénio são quantizados — só podem assumir os valores discretos $E_n = -13,6/n^2 \text{ eV}$. A energia de cada fóton emitido ou absorvido corresponde à diferença entre dois desses níveis, que é também um valor discreto. Dado que $E = hf = hc/\lambda$, a cada diferença de energia discreta corresponde um comprimento de onda específico. O espectro é, portanto, constituído por riscas em comprimentos de onda bem determinados, em contraste com o espectro contínuo que seria emitido por um electrão clássico com energia variando de forma contínua.

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:

- a) O electrão parte de $n_i = 1$, com $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. Após absorver o fóton:

$$E_{n_f} = E_1 + \Delta E = -13,6 + 12,09 = -1,51 \text{ eV}.$$

Identificando n_f :

$$-\frac{13,6}{n_f^2} = -1,51 \implies n_f^2 = \frac{13,6}{1,51} = 9 \implies \boxed{n_f = 3}.$$

- b)

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{12,09 \times 1,60 \times 10^{-19}} = \frac{1,988 \times 10^{-25}}{1,934 \times 10^{-18}} = \boxed{1,03 \times 10^{-7} \text{ m} = 103 \text{ nm}}.$$

- c) A energia do fóton é $12,09 \text{ eV} < 13,6 \text{ eV}$ (energia de ionização a partir de $n = 1$). O fóton **não ioniza** o átomo; promove o electrão para o nível $n = 3$, onde continua ligado.

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:

- a) Para ${}^{37}_{17}\text{Cl}$:

Protões: $Z = 17$

Neutrões: $N = A - Z = 37 - 17 = 20$

Electrões (átomo neutro): 17

- b) Um isótopo do cloro tem necessariamente $Z = 17$. Com $N = 18$ neutrões:

$$A = Z + N = 17 + 18 = 35.$$

A notação nuclear é $\boxed{{}^{35}_{17}\text{Cl}}$, que corresponde ao isótopo estável mais abundante do cloro (75% na natureza).

- c) Dois nuclídeos são isótopos se pertencerem ao mesmo elemento químico, isto é, se tiverem o mesmo número atómico Z (o mesmo número de protões), diferindo apenas no número de neutrões N e, consequentemente, no número de massa A .
- d) Entre dois isótopos do mesmo elemento: **permanece igual** o número de protões Z (e, portanto, o elemento químico e o número de electrões num átomo neutro, logo o comportamento químico); **muda** o número de neutrões N , o número de massa A e, em geral, a estabilidade nuclear e a massa atómica.

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:

a)



Verificação: $238 = 234 + 4$ (massa) e $92 = 90 + 2$ (carga). ✓

b) Núcleo filho: $Z = 92 - 2 = \boxed{90}$ (Tório), $A = 238 - 4 = \boxed{234}$.

c) Urânio-238: $N = 238 - 92 = 146$ neutrões.

Tório-234: $N = 234 - 90 = 144$ neutrões.

d) O elemento químico é definido exclusivamente pelo número de prótons Z . A emissão de uma partícula alfa retira 2 prótons ao núcleo, diminuindo Z de 92 para 90. Com um número de prótons diferente, o núcleo corresponde a um elemento diferente (o tório), independentemente de qualquer outra propriedade.

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.

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + \beta^- + \bar{\nu}_e, \quad N = A - Z, \quad {}_Z^AX, \quad A = Z + N.$$

- 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:

a)



Verificação: $14 = 14$ (massa) e $6 = 7 - 1$ (carga, contando β^- com carga -1). ✓

b) Núcleo filho (Azoto): $A = \boxed{14}$, $Z = \boxed{7}$.

c) No interior do núcleo, um neutrão transforma-se num protão através da interacção fraca:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

O número total de nucleões não se altera (um neutrão é substituído por um protão), mas a composição do núcleo muda: o número de protões aumenta de 1 e o de neutrões diminui de 1.

d) O número de massa A conta o número total de nucleões (protões mais neutrões). Na desintegração β^- , um neutrão converte-se num protão: o total de nucleões no núcleo mantém-se inalterado. O electrão e o antineutrino emitidos não são nucleões, pelo que não contribuem para A . Daqui resulta a conservação de A .

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:

- a) Na desintegração β^+ , um próton converte-se num neutrão: o número atómico **diminui de 1** ($Z \rightarrow Z - 1$) e o número de massa **conserva-se** (A inalterado).
- b) Na emissão γ , o núcleo passa de um estado excitado para um estado de menor energia, emitindo um fóton. O número atómico e o número de massa **não se alteram**.
- c) A transmutação de elemento implica uma alteração do número de prótons Z , que define o elemento químico. A emissão γ é uma transição entre estados de energia do mesmo núcleo — o número de prótons (e de neutrões) não se altera. O elemento e o isótopo são exactamente os mesmos antes e depois; só muda o estado de energia nuclear.
- d) Do menos penetrante para o mais penetrante: α (travada por folha de papel ou poucos centímetros de ar), β (travada por alguns milímetros de alumínio), γ (requer espessas camadas de chumbo ou betão para atenuação significativa).

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:

- a) Convertendo $T_{1/2}$ para segundos: $T_{1/2} = 12,0 \times 3600 = 43200$ s.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,6931}{43200 \text{ s}} = \boxed{1,60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}}.$$

- b) $t = 36,0 \text{ h} = 3 \times T_{1/2}$, portanto pode usar-se directamente a forma das meias-vidas:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{8,0 \times 10^{20}}{8} = \boxed{1,0 \times 10^{20} \text{ núcleos}}.$$

- c) A fracção que subsiste é $N/N_0 = 1/8$. A fracção já desintegrada é:

$$1 - \frac{1}{8} = \boxed{\frac{7}{8} = 87,5\%}.$$

- d) A lei exponencial descreve o comportamento *médio* de uma população muito grande de núcleos, cada um com a mesma probabilidade de se desintegrar por unidade de tempo. Para um núcleo individual, a desintegração é um evento quântico inteiramente aleatório: não existe nenhum mecanismo interno que «envelheça» o núcleo nem nenhuma memória

do tempo decorrido. Não é possível saber, nem mesmo em princípio, quando um dado núcleo se irá desintegrar; apenas se pode afirmar qual a probabilidade de isso acontecer num dado intervalo de tempo.

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:

a)

$$A = \lambda N = 2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \times 3,0 \times 10^{12} = \boxed{6,0 \times 10^6 \text{ Bq} = 6,0 \text{ MBq}}.$$

b) $t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$.

$$\Delta N = A \cdot t = 6,0 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \times 600 \text{ s} = \boxed{3,6 \times 10^9 \text{ desintegrações}}.$$

- c) A *actividade* mede quantas desintegrações ocorrem por segundo num dado instante: é uma taxa e depende simultaneamente de λ e do número de núcleos presentes ($A = \lambda N$). O *período de semi-desintegração* $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ é uma propriedade intrínseca do isótopo, independente da quantidade de material: caracteriza a rapidez com que a amostra decai. Um isótopo com $T_{1/2}$ curto tem λ grande e, para igual número de núcleos, maior actividade; mas a actividade decresce rapidamente. Um isótopo com $T_{1/2}$ longo tem actividade por unidade de massa baixa, mas persiste durante muito mais tempo.
- d) Não necessariamente. A actividade indica quantas desintegrações ocorrem por segundo, mas o efeito biológico depende de vários outros factores: o *tipo de radiação* (α , β , γ), pois diferentes radiações têm diferentes poderes de ionização e de penetração nos tecidos; a *energia depositada por desintegração*; e a *forma de exposição* — uma fonte α externamente

ao corpo é praticamente inofensiva (a pele basta para a travar), mas a mesma fonte ingerida ou inalada é altamente perigosa por irradiação interna directa dos tecidos. Duas fontes com a mesma actividade mas a emitir radiações diferentes podem ter efeitos biológicos muito distintos.