Capítulo 44

1. De acordo com a lei de conservação da carga, se o sinal do píon for invertido, o sinal do múon produzido no decaimento também terá de ser invertido. Essa mudança corresponde a substituir as partículas carregadas pelas respectivas antipartículas. Menos óbvio é o fato de que devemos substituir o neutrino por um antineutrino, como é discutido no Módulo 44-2, para satisfazer a lei de conservação dos números leptônicos. A reação de decaimento do píon negativo é, portanto, $\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}$, em que usamos uma barra acima do símbolo de neutrino para indicar que se trata de um antineutrino. Na verdade, costuma-se usar um índice inferior para indicar de que tipo é o antineutrino e escrever a reação na forma $\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

2. Como a massa específica da água é ρ = 1000 kg/m^3 = 1 kg/L, a massa total da água da piscina é $M = \rho V$ = 4,32 × 10^5 kg, em que V é o volume da piscina. A fração da massa constituída por prótons (razão entre o número de prótons e o número de núcleons em uma molécula de água) é 10/18. Assim, o número de prótons contidos na água da piscina é

$$N = \frac{(10/18)M}{m_p} = \frac{(10/18)(4{,}32\times10^5 \text{ kg})}{1{,}67\times10^{-27} \text{ kg}} = 1{,}44\times10^{32}.$$

Portanto, de acordo com a Eq. 42-20, temos

$$R = \frac{N\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{(1{,}44\times10^{32})\ln 2}{10^{32} \text{ anos}} \approx 1 \text{ decaimento/ano.}$$

3. A energia de repouso do par elétron-pósitron é

$$E = m_e c^2 + m_e c^2 = 2m_e c^2 = 2(0{,}511 \text{ MeV}) = 1{,}022 \text{ MeV}.$$

Como são produzidos dois raios γ no processo de aniquilação, o comprimento de onda de cada raio gama é

$$\lambda = \frac{hc}{E/2} = \frac{1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}}{0{,}511\times10^6 \text{ eV}} = 2{,}43\times10^{-3} \text{ nm} = 2{,}43 \text{ pm}.$$

4. De acordo com a lei de conservação do momento, os raios gama devem se propagar em sentidos opostos com momentos de mesmo módulo. Como o modulo p do momento de um raio gama está relacionado à energia através da equação $p = E/c$, os dois raios gama têm a mesma energia E. De acordo com a lei de conservação da energia, $m_\pi c^2 = 2E$, em que m_π é a massa do píon neutro. Com base na Tabela 44-4, a energia de repouso de um píon neutro é $m_\pi c^2$ = 135,0 MeV. Assim, E = (135,0 MeV)/2 = 67,5 MeV e o comprimento de onda dos raios gama é

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}}{67{,}5\times10^6 \text{eV}} = 1{,}84\times10^{-5} \text{ nm} = 18{,}4 \text{ fm}.$$

5. De acordo com as Eqs. 14-1 e 22-4,

$$\frac{F_{\text{gravidade}}}{F_{\text{elétrica}}} = \frac{Gm_e^2/r^2}{ke^2/r^2} = \frac{4\pi\varepsilon_0 Gm_e^2}{e^2} = \frac{(6{,}67\times10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(9{,}11\times10^{-31} \text{ kg})^2}{(9{,}0\times10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1{,}60\times10^{-19} \text{ C})^2}$$

$$= 2{,}4\times10^{-43}.$$

Como $F_{\text{gravidade}} << F_{\text{elétrica}}$, não é preciso levar em conta as interações gravitacionais.

6. (a) De acordo com a lei de conservação da energia,

$$Q = K_2 + K_3 = E_1 - E_2 - E_3,$$

em que E_1, E_2 e E_3 são as energias de repouso das três partículas. Escrevendo a equação anterior na forma

$$K_2 + E_2 - E_1 = -(K_3 + E_3)$$

e elevando ambos os membros ao quadrado, obtemos

$$K_2^2 + 2K_2E_2 - 2K_2E_1 + (E_1 - E_2)^2 = K_3^2 + 2K_3E_3 + E_3^2.$$

Aplicando a lei de conservação do momento ao referencial em que a partícula 1 está em repouso, obtemos $|p_2| = |p_3|$, o que nos dá $(p_2c)^2 = (p_3c)^2$. Assim, de acordo com a Eq. 37-54,

$$K_2^2 + 2K_2E_2 = K_3^2 + 2K_3E_3,$$

que podemos subtrair da expressão anterior para obter

$$-2K_2E_1 + (E_1 - E_2)^2 = E_3^2.$$

Explicitando K_2, obtemos a equação pedida,

$$K_2 = \frac{1}{2E_1}\left[\left(E_1 - E_2\right)^2 - E_3^2\right].$$

(b) Fazendo $E_3 = 0$ nessa equação e usando os valores de energia de repouso da Tabela 44-1, obtemos o mesmo valor de K_μ calculado no Exemplo 44.01 "Momento e energia cinética no decaimento de um píon".

7. De acordo com a Tabela 44-4, a energia de repouso de cada píon é 139,6 MeV. De acordo com o enunciado do problema, o módulo do momento de cada píon é p_π = (358,3 MeV)/c. A energia total de cada píon é dada pela Eq. 37-54:

$$E_\pi = \sqrt{(p_\pi c)^2 + (m_\pi c^2)^2} = \sqrt{(358{,}3 \text{ MeV})^2 + (139{,}6 \text{ Mev})} = 384{,}5 \text{ MeV}.$$

De acordo com a lei de conservação da energia,

$$m\rho c^2 = 2E_\pi = 2(384{,}5 \text{ MeV}) = 769 \text{ MeV}.$$

8. (a) Em unidades do SI, a energia cinética do tau positivo é

$$K = (2200 \text{ MeV})(1{,}6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) = 3{,}52 \times 10^{-10} \text{ J}.$$

Como a energia de repouso do tau positivo é $mc^2 = 2{,}85 \times 10^{-10}$ J, o momento relativístico da partícula, de acordo com a Eq. 37-54, é

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{K^2 + 2Kmc^2} = \frac{1}{2{,}998\times10^8 \text{ m/s}}\sqrt{(3{,}52\times10^{-10} \text{ J})^2 + 2(3{,}52\times10^{-10} \text{ J})(2{,}85\times10^{-10} \text{ J})}$$

$$= 1{,}90\times10^{-18} \text{ kg}\cdot\text{m/s}.$$

(b) O raio da trajetória circular pode ser calculado a partir do momento relativístico:

$$r = \frac{\gamma m v}{|q|B} = \frac{p}{eB} = \frac{1{,}90\times10^{-18} \text{ kg}\cdot\text{m/s}}{(1{,}6\times10^{-19} \text{ C})(1{,}20 \text{ T})} = 9{,}90 \text{ m}.$$

9. De acordo com a Eq. 37-48, o fator de Lorentz seria

$$\gamma = \frac{E}{mc^2} = \frac{1{,}5\times10^6 \text{ eV}}{20 \text{ eV}} = 75000.$$

Explicitando a velocidade na Eq. 37-8, obtemos

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \Rightarrow v = c\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}},$$

o que nos dá uma diferença entre c e v

$$c-v=c\left(1-\sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}}\right)\approx c\left[1-\left(1-\frac{1}{2\gamma^2}+L\right)\right]$$

em que o último resultado foi obtido usando a expansão binomial (veja o Apêndice E). Assim,

$$c-v\approx c\left(\frac{1}{2\gamma^2}\right)=(299792458\,\text{m/s})\left(\frac{1}{2(75000)^2}\right)=0{,}0266\,\text{m/s}\approx 2{,}7\,\text{cm/s}.$$

10. De acordo com a Eq. 37-52, o fator de Lorentz é

$$\gamma=1+\frac{K}{mc^2}=1+\frac{80\text{ MeV}}{135\text{ MeV}}=1{,}59.$$

Explicitando a velocidade na Eq. 37-8, obtemos

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\ \Rightarrow\ v=c\sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}},$$

o que nos dá $v = 0{,}778c = 2{,}33 \times 10^8$ m/s. No referencial do laboratório, o tempo de vida do píon não é o valor de τ fornecido e sim o valor "dilatado" dado pela Eq. 37-9:

$$t=\gamma\tau=(1{,}59)(8{,}3\times10^{-17}\text{ s})=1{,}3\times10^{-16}\text{ s}.$$

Assim, de acordo com a Eq. 37-10, a distância percorrida pelo píon no laboratório é

$$x=vt=(2{,}33\times10^8\text{ m/s})\ (1{,}3\times10^{-16}\text{ s})=3{,}1\times10^{-8}\text{ m}.$$

11. PENSE As leis de conservação discutidas até agora foram as leis de conservação da energia, do momento, do momento angular, da carga, do número bariônico e as três leis de conservação do número leptônico.

FORMULE Em todas as interações de partículas, o número leptônico total de cada família (L_e para a família do elétron, L_μ para a família do múon e L_τ para a família do tau) é conservado. De acordo com a lei de conservação do número bariônico, o número bariônico total é conservado em todas as interações.

ANALISE (a) No caso do processo $\mu^- \to e^- + \nu_\mu$, a energia de repouso do múon é 105,7 MeV, a energia de repouso do elétron é 0,511 MeV e a energia de repouso do neutrino é zero ou muito próxima de zero. Assim, a energia de repouso total antes do decaimento é maior que a energia de repouso total após o decaimento. A energia em excesso pode ser convertida em energia cinética dos produtos do decaimento e, portanto, a energia pode ser conservada. O momento é conservado se o elétron e o neutrino se moverem em sentidos opostos com momentos de mesmo módulo. Como o momento angular orbital é zero, precisamos considerar apenas o momento angular de spin. Todas as partículas têm spin $\hbar/2$. O momento angular total após o decaimento pode ser $\hbar$ (se os spins do elétron e do neutrino estiverem paralelos) ou zero (se os spins estiverem antiparalelos). Como o spin antes do decaimento é $\hbar/2$, o momento angular não é conservado. Como o múon tem carga $-e$, o elétron tem carga $-e$ e o neutrino tem carga zero, a carga total é $-e$ antes e depois do decaimento, o que significa que a carga é conservada. Como o número bariônico das três partículas é zero, o número bariônico é conservado. Como o número leptônico muônico do múon é +1, o número leptônico muônico do neutrino do múon é +1 e o número leptônico muônico do elétron é 0, o número leptônico muônico é conservado. Como o número leptônico eletrônico do múon e do neutrino do múon é 0 e o número leptônico eletrônico do elétron é +1, o número leptônico eletrônico não é conservado. Assim, as leis de conservação do momento angular e do número leptônico eletrônico são violadas.

(b) Analisando o processo $\mu^- \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, constatamos que, neste caso, as leis de conservação da carga e do número leptônico muônico são violadas.

(c) No caso do processo $\mu^+ \to \pi^+ + \nu_\mu$, a lei da conservação da energia é violada, já que a massa do múon é menor que a massa do píon. Neste caso, a energia não é conservada, já que a massa do múon é menor que a massa do píon. Além disso, o número leptônico muônico não é conservado. Além disso, a lei de conservação do número leptônico muônico também é violada.

APRENDA Como, nos três processos, a partícula inicial está em repouso, a questão da conservação da energia se resume a verificar se a energia de repouso inicial é suficiente para produzir as energias de repouso dos produtos do decaimento; a energia em excesso é convertida em energia cinética dos produtos.

12. (a) Contando todos os elétrons, pósitrons e neutrinos que resultam do decaimento da partícula A_2^+, sem esquecer que são criados dois píons positivos (e, portanto, os produtos do decaimento do píon devem ser contados em dobro), os produtos estáveis são os seguintes: $2e^+$, e^-, 5ν e $4\bar{\nu}$.

(b) Como tanto a partícula ρ^0 como a partícula π^+ têm spin inteiro, a partícula A_2^+ é um bóson.

(c) Como todos os produtos finais são léptons, o número bariônico da partícula A_2^+ é zero e, portanto, a partícula é um méson.

(d) Como foi dito no item (c), o número bariônico da partícula é zero.

13. A expressão da componente z do isospin costuma ser escrita na forma $T_z = q - (B + S)/2$, em que q é a carga da partícula em unidades da carga elementar. Definindo q como a carga da partícula em unidades do SI, como foi feito em capítulos anteriores, a expressão se torna

$$T_z = \frac{q}{e} - \frac{1}{2}(B + S).$$

Em vez de usar um eixo inclinado, como na Fig. 44-4, é possível reproduzir o mesmo padrão usando eixos retangulares se a estranheza S é substituída pela hipercarga, $Y = B + S$, e a carga q/e é substituída pela componente z do isospin, $T_z = q/e - (B + S)/2$, porque, nesse caso, tanto a grandeza usada para definir o eixo y como a grandeza usada para definir o eixo x variam com $(B + S)$.

14. (a) De acordo com a Eq. 37-50,

$$\begin{aligned} Q &= -\Delta mc^2 = (m_{\Sigma^+} + m_{K^+} - m_{\pi^+} - m_p)c^2 \\ &= 1189{,}4\ \text{MeV} + 493{,}7\ \text{MeV} - 139{,}6\ \text{MeV} - 938{,}3\ \text{MeV} \\ &= 605\ \text{MeV}. \end{aligned}$$

(b) De acordo com a Eq. 37-50,

$$\begin{aligned} Q &= -\Delta mc^2 = (m_{\Lambda^0} + m_{\pi^0} - m_{K^-} - m_p)c^2 \\ &= 1115{,}6\,\text{MeV} + 135{,}0\,\text{MeV} - 493{,}7\,\text{MeV} - 938{,}3\,\text{MeV} \\ &= -181\ \text{MeV}. \end{aligned}$$

15. (a) Como a partícula lambda tem uma energia de repouso de 1115,6 MeV, o próton uma energia de repouso de 938,3 MeV e o kaon uma energia de repouso de 493,7 MeV, a energia de repouso antes do decaimento é menor que a energia de repouso depois do decaimento, o que significa que a energia não é conservada. O momento pode ser conservado. Como a partícula lambda e o próton têm spin $\hbar/2$ e o kaon tem spin zero, o momento angular pode ser conservado. Como a partícula lambda tem carga zero, o próton tem carga $+e$ e o kaon tem carga $-e$, a carga é conservada. Como a partícula lambda e o próton têm número bariônico +1, o número bariônico é conservado. Como a partícula lambda e o kaon têm estranheza −1 e o próton tem estranheza zero, a estranheza é conservada. Assim, a reação viola apenas a lei de conservação da energia.

(b) Como a partícula ômega tem uma energia de repouso de 1680 MeV, a partícula sigma tem uma energia de repouso de 1197,3 MeV e o píon tem uma energia de repouso de 135 MeV, a energia de repouso antes do decaimento é maior que a energia de repouso depois do decaimento, e a energia pode ser conservada. O momento pode ser conservado. Como as partículas ômega e sigma têm spin $\hbar/2$ e o píon tem spin zero, o momento angular pode ser conservado. Como a partícula ômega tem carga $-e$, a partícula sigma tem carga $-e$ e o píon tem carga zero, a carga é conservada. Como as partículas ômega e sigma têm número bariônico +1 e o píon tem número bariônico 0, o número bariônico é conservado. Como a partícula ômega tem estranheza −3, a partícula sigma tem estranheza −1 e o píon tem estranheza zero, a estranheza não é conservada. Assim, a reação viola apenas a lei de conservação da estranheza.

(c) Como o kaon e o próton podem ter energia cinética, a energia pode ser conservada, mesmo que a energia de repouso total após a colisão seja maior que a energia de repouso total após a colisão. O momento pode ser conservado. Como o próton e a partícula lambda têm spin $\hbar/2$ e o kaon e o píon têm spin zero, o momento angular é conservado. Como o kaon tem carga $-e$, o próton tem carga $+e$, a partícula lambda tem carga zero e o píon tem carga $+e$, a carga não é conservada. Como o próton e a partícula lambda têm número bariônico +1 e o kaon e o píon têm número bariônico zero, o número bariônico é conservado. Como o kaon tem estranheza −1, o próton e o píon têm estranheza zero e a partícula lambda tem estranheza −1, a estranheza é conservada. Assim, a reação viola apenas a lei de conservação da carga.

16. Para verificar se a reação proposta, $\mathrm{p}+\bar{\mathrm{p}} \to \Lambda^0 + \Sigma^+ + e^-$, viola alguma lei de conservação, usamos os números quânticos das partículas que aparecem nas Tabelas 44-3 e 44-4.

(a) Como $q(\mathrm{p}) = +1$, $q(\bar{\mathrm{p}}) = -1$, $q(\Lambda^0) = 0$, $q(\Sigma^+) = +1$ e $q(e^-) = -1$, temos $1+(-1) = 0+1+(-1)$ e, portanto, a carga é conservada.

(b) Uma vez que $B(\mathrm{p}) = +1$, $B(\bar{\mathrm{p}}) = -1$, $B(\Lambda^0) = 1$, $B(\Sigma^+) = +1$ e $B(e^-) = 0$, temos $1+(-1) \neq 1+1+0$ e, portanto, o número bariônico não é conservado.

(c) Como $L_e(\mathrm{p}) = L_e(\bar{\mathrm{p}}) = 0$, $L_e(\Lambda^0) = L_e(\Sigma^+) = 0$ e $L_e(e^-) = 1$, temos $0+0 \neq 0+0+1$ e, portanto, o número leptônico eletrônico não é conservado.

(d) Considerando que todas as partículas envolvidas são férmions com $s = 1/2$, temos $(1/2)+(1/2) \neq (1/2)+(1/2)+(1/2)$ e, portanto, o spin não é conservado.

(e) Como $S(\mathrm{p}) = S(\bar{\mathrm{p}}) = 0$, $S(\Lambda^0) = 1$, $S(\Sigma^+) = +1$ e $S(e^-) = 0$, temos $0+0 \neq 1+1+0$ e, portanto, a estranheza não é conservada.

(f) Uma vez que o número leptônico muônico é zero para todas as partículas, o número leptônico muônico é conservado.

17. Para verificar se a reação proposta, $\Xi^- \to \pi^- + \mathrm{n} + \mathrm{K}^- + \mathrm{p}$, viola alguma lei de conservação, usamos os números quânticos das partículas que aparecem nas Tabelas 44-3 e 44-4.

(a) Uma vez que $q(\Xi^-) = -1$, $q(\pi^-) = -1$, $q(\mathrm{n}) = 0$, $q(\mathrm{K}^-) = -1$ e $q(\mathrm{p}) = +1$, temos $-1 = -1+0+(-1)+1$ e, portanto, a carga é conservada.

(b) Uma vez que $B(\Xi^-) = +1$, $B(\pi^-) = 0$, $B(\mathrm{n}) = +1$, $B(\mathrm{K}^-) = 0$ e $B(\mathrm{p}) = +1$, temos $+1 \neq 0+1+0+1 = 2$ e, portanto, o número bariônico não é conservado.

(c) Considerando que Ξ^-, n e p são férmions com $s = 1/2$ e π^- e K^- são mésons com $s = 0$, temos $+1/2 \neq 0+(1/2)+0+(1/2)$ e, portanto, o spin não é conservado.

(d) Como $S(\Xi^-) = -2$, $S(\pi^-) = 0$, $S(\mathrm{n}) = 0$, $S(\mathrm{K}^-) = -1$ e $S(\mathrm{p}) = 0$, temos $-2 \neq 0 + 0 + (-1) + 0$ e, portanto, a estranheza não é conservada.

18. (a) De acordo com as Tabelas 44-3 e 44-4, a estranheza de K^0 é +1, enquanto a estranheza de π^+ e π^- é 0; assim, a estranheza não é conservada; portanto, a reação $\mathrm{K}^0 \to \pi^+ + \pi^-$ não é mediada pela interação forte.

(b) Como a estranheza de Λ^0 e Σ^+ é −1 e a estranheza de p e n é 0, a estranheza é conservada e, portanto, a reação $\Lambda^0 + \mathrm{p} \to \Sigma^+ + \mathrm{n}$ é mediada pela interação forte.

(c) Como a estranheza de Λ^0 é −1 e a estranheza de p e π^- é 0, a estranheza não é conservada e, portanto, a reação $\Lambda^0 \to \mathrm{p} + \pi$ não é mediada pela interação forte.

(d) Como a estranheza de K^- e Λ^0 é −1 e a estranheza de p e π^0 é 0, a estranheza é conservada e, portanto, a reação $\mathrm{K}^- + \mathrm{p} \to \Lambda^0 + \pi^0$ é mediada pela interação forte.

19. Para analisar as propriedades do antinêutron, podemos ignorar um próton de cada lado da reação e escrever a reação na forma

$$\pi^+ \to \mathrm{p} + \bar{\mathrm{n}}.$$

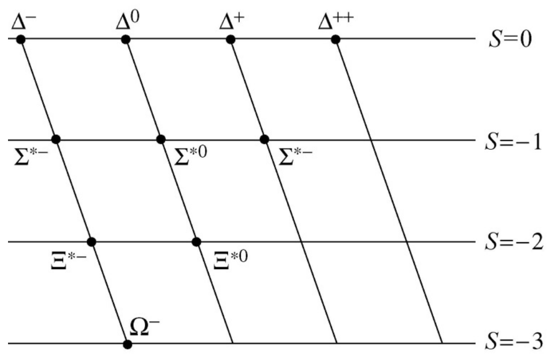
As propriedades das partículas estão nas Tabelas 44-3 e 44-4. Como o píon e o próton têm carga $+e$, o antinêutron tem carga 0. Como o número bariônico do píon é 0 e o número bariônico do próton é +1, o número bariônico do antinêutron é −1. Como a estranheza do píon e do próton é 0, a estranheza do antinêutron é 0. Assim,

(a) $q = 0$.

(b) $B = -1$,

(c) $S = 0$.

20. Se usássemos eixos mutuamente perpendiculares, as partículas formariam um triângulo retângulo. Usando um eixo q inclinado, como sugere o enunciado, as partículas formam um triângulo equilátero invertido, como mostra a figura.



As retas inclinadas, da esquerda para a direita, correspondem a partículas de carga −1, 0, +1 e + 2.

21. (a) Para analisar a reação do ponto de vista das leis de conservação, podemos cancelar um próton de cada lado da reação e escrever a reação na forma $p \to \Lambda^0 + x$. Como o próton e a partícula lambda têm spin 1/2, o spin da partícula x é 0 ou 1. Como o próton tem carga $+e$ e a partícula lambda é neutra, a carga da partícula x é $+e$. Como o número bariônico do próton e da partícula lambda é +1, o número bariônico da partícula x é 0. Como a estranheza do próton é 0 e a estranheza da partícula lambda é −1, a estranheza da partícula x é +1. Assim, a partícula x é um méson de carga $+e$ e estranheza +1. Consultando a Tabela 44-4, vemos que se trata da partícula K^+.

(b) Como o próton tem spin 1/2, o antipróton tem spin 1/2 e o nêutron tem spin 1/2, a partícula x tem spin 1/2. Como o próton tem carga $+e$, o antipróton tem carga $-e$ e o nêutron tem carga 0, a carga da partícula x é 0. Como o número bariônico do próton e do nêutron é +1 e o número bariônico do antipróton é −1, o número bariônico da partícula x é −1. Como a estranheza do próton, do antipróton e do nêutron é 0, a estranheza da partícula x é 0. Consultando a Tabela 44-3, vemos que se trata de um antinêutron ($\overline{n}$).

(c) Como o píon e a partícula K^0 têm spin 0 e o próton e a partícula Ξ^0 têm spin 1/2, o spin da partícula x é 0 ou 1. Como o píon tem carga $-e$, o próton tem carga $+e$ e as partículas Ξ^0 e K^0 têm carga 0, a carga da partícula x é 0. Como o número bariônico do píon e da partícula K^0 é 0 e o número bariônico do próton e da partícula Ξ^0 é +1, o número bariônico da partícula x é 0. Como a estranheza do píon e do próton é 0, a estranheza da partícula Ξ^0 é −2 e a estranheza da partícula K^0 é +1, a estranheza da partícula x é +1. Consultando a Tabela 44-4, vemos que se trata da partícula K^0.

22. De acordo com a lei de conservação da energia, temos

$$K_f = -\Delta mc^2 + K_i = (m_{\Sigma^-} - m_{\pi^-} - m_n)c^2 + K_i$$

$$= 1197{,}3\,\text{MeV} - 139{,}6\,\text{MeV} - 939{,}6\,\text{MeV} + 220\,\text{MeV}$$

$$= 338\ \text{MeV}.$$

23. (a) De acordo com a Eq. 37-50,

$$Q = -\Delta mc^2 = (m_{\Lambda^0} - m_p - m_{\pi^-})c^2$$

$$= 1115{,}6\,\text{MeV} - 938{,}3\,\text{MeV} - 139{,}6\,\text{MeV} = 37{,}7\,\text{MeV}.$$

(b) De acordo com a expressão obtida no Problema 44-6*a*,

$$K_p = \frac{1}{2E_\Lambda}\left[\left(E_\Lambda - E_p\right)^2 - E_\pi^2\right]$$

$$= \frac{(1115{,}6\,\text{MeV} - 938{,}3\,\text{MeV})^2 - (139{,}6\,\text{MeV})^2}{2(1115{,}6\,\text{MeV})} = 5{,}35\,\text{MeV}.$$

(c) De acordo com a lei de conservação da energia,

$$K_{\pi^-} = Q - K_p = 37{,}7\,\text{MeV} - 5{,}35\,\text{MeV} = 32{,}4\,\text{MeV}.$$

24. De acordo com as Eqs. 37-52 ($\gamma = 1 + K/mc^2$) e 37-8 ($v = \beta c = c\sqrt{1-\gamma^{-2}}$), temos

$$v = c\sqrt{1-\left(1+\frac{K}{mc^2}\right)^{-2}}.$$

(a) Assim, no caso da partícula Σ^{*0},

$$v = (2{,}9979\times10^8\ \text{m/s})\sqrt{1-\left(1+\frac{1000\ \text{MeV}}{1385\ \text{MeV}}\right)^{-2}} = 2{,}4406\times10^8\ \text{m/s}.$$

No caso da partícula Σ^0,

$$v' = (2{,}9979\times10^8\ \text{m/s})\sqrt{1-\left(1+\frac{1000\,\text{MeV}}{1192{,}5\,\text{MeV}}\right)^{-2}} = 2{,}5157\times10^8\ \text{m/s}.$$

A partícula Σ^0 está se movendo mais depressa que a partícula Σ^{*0}.

(b) A diferença entre as velocidades das duas partículas é

$$\Delta v = v' - v = (2{,}5157 - 2{,}4406)(10^8\ \text{m/s}) = 7{,}51\times10^6\ \text{m/s}.$$

25. (a) Usando uma barra acima do símbolo para indicar que se trata de um antiquark, a composição do antipróton é $\bar{\text{u}}\bar{\text{u}}\bar{\text{d}}$.

(b) A composição do antinêutron é $\bar{\text{u}}\bar{\text{d}}\bar{\text{d}}$.

26. (a) A combinação ddu tem uma carga total –1/3 –1/3 +2/3 = 0 e uma estranheza 0. Consultando a Tabela 44-3, vemos que se trata de um nêutron (n).

(b) A combinação uus tem uma carga total +2/3 +2/3 –1/3 = 1 e uma estranheza 0 + 0 –1 = –1. Consultando a Tabela 44-3, vemos que se trata de uma partícula Σ^+.

(c) A combinação ssd tem uma carga total –1/3 –1/3 –1/3 = –1 e uma estranheza –1 –1 +0 = –2. Consultando a Tabela 44-3, vemos que se trata de uma partícula Ξ^-.

27. O méson $\bar{\text{K}}^0$ é formado por um quark e um antiquark. Sabemos que a carga total é zero e a estranheza é –1. O quark com estranheza –1 é o quark s. Para que a carga total seja 0, o antiquark deve ser $\bar{\text{d}}$. Assim, a composição da partícula $\bar{\text{K}}^0$ é s$\bar{\text{d}}$.

28. (a) Consultando a Tabela 44-3, constatamos que $q = 0$ e $S = -1$ para esta partícula (e também $B = 1$, o que acontece para todas as partículas desta tabela). Isto significa que a partícula deve conter um quark estranho, que tem carga –1/3, e, portanto, a soma das cargas dos outros dois quarks deve ser +1/3. Como nenhum dos outros quarks pode ser estranho, a composição de quarks da partícula é sud.

(b) Neste caso, como $S = -2$, a partícula deve conter dois quarks estranhos, que, juntos, têm carga –2/3. Como a carga total é 0, o terceiro quark deve ter carga +2/3. Assim, a composição de quarks da partícula é uss.

29. (a) No caso da combinação ssu, a carga total é (−1/3 −1/3 +2/3) = 0 e a estranheza total é (−1 −1 +0) = −2. Consultando a Tabela 44-3, verificamos que se trata da partícula Ξ^0.

(b) No caso da combinação dds, a carga total é (−1/3 −1/3 −1/3) = −1 e a estranheza total é (0 + 0 −1) = −1. Consultando a Tabela 44-3, vemos que se trata da partícula Σ^-.

30. PENSE Todo bárion é composto por três quarks.

FORMULE A tabela a seguir mostra os números quânticos mais relevantes dos quarks up, down e estranho (veja a Tabela 44-5).

Sabor	Carga q	Estranheza S
Up (u)	+2/3	0
Down (d)	−1/3	0
Estranho (s)	−1/3	−1

ANALISE (a) Para obter uma estranheza de −2, é preciso que dois dos quarks sejam estranhos. Como um quark estranho tem uma carga $-e/3$, os dois quarks têm uma carga $-2e/3$. Para que a carga total fosse $+e$, o terceiro quark teria de ter uma carga $+5e/3$. Como não existe nenhum quark com essa carga, essa partícula não pode existir.

(b) Para obter uma estranheza de zero, é preciso que nenhum dos três quarks seja um quark estranho. Para que a carga total seja $2e$, basta que os três quarks sejam up. Assim, uma partícula com essas características pode existir e sua composição de quarks é uuu.

APRENDA O bárion com três quarks up é a partícula Δ^{++}.

31. De acordo com a Eq. 37-31, o fator de velocidade da galáxia é

$$\beta=\frac{1-(f/f_0)^2}{1+(f/f_0)^2}=\frac{1-(\lambda_0/\lambda)^2}{1+(\lambda_0/\lambda)^2}$$

$$=\frac{1-(590{,}0\text{ nm}/602{,}0\text{ nm})^2}{1+(590{,}0\text{ nm}/602{,}0\text{ nm})^2}=0{,}02013.$$

Assim, de acordo com a Eq. 44-19,

$$r=\frac{v}{H}=\frac{\beta c}{H}=\frac{(0{,}02013)(2{,}998\times10^8\text{ m/s})}{0{,}0218\ \text{m/s}\cdot\text{ano-luz}}=2{,}77\times10^8\ \text{anos-luz}.$$

32. Como

$$\lambda=\lambda_0\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}=2\lambda_0\quad\Rightarrow\quad\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}=2\quad\Rightarrow\quad\beta=\frac{3}{5},$$

a velocidade da galáxia é $v=\beta c=3c/5$. Assim, a distância entre a galáxia e a Terra no momento em que a luz foi emitida era

$$r=\frac{v}{H}=\frac{\beta c}{H}=\frac{(3/5)c}{H}=\frac{(0{,}60)(2{,}998\times10^8\text{ m/s})}{0{,}0218\ \text{m/s}\cdot\text{ano-luz}}=8{,}3\times10^9\ \text{anos-luz}.$$

33. De acordo com a Eq. 37-36,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{v}{c},$$

em que v é a velocidade da galáxia. Como, de acordo com a lei de Hubble, $v = Hr$, em que r é a distância da galáxia e H é a constante de Hubble, temos

$$v=(21{,}8\times10^{-3}\text{ m/s}\cdot\text{ano-luz})(2{,}40\times10^8\ \text{anos-luz})=5{,}23\times10^6\text{ m/s},$$

e

$$\Delta\lambda = \frac{v}{c}\lambda = \left(\frac{5,23\times10^6\ \text{m/s}}{3,00\times10^8\ \text{m/s}}\right)(656,3\ \text{nm}) = 11,4\ \text{nm}.$$

Como a galáxia está se afastando da Terra, o comprimento de onda observado é maior que o comprimento de onda no referencial da galáxia, e seu valor é

$$656,3\ \text{nm} + 11,4\ \text{nm} = 667,7\ \text{nm} \approx 668\ \text{nm}.$$

34. (a) De acordo com a lei de Hubble (Eq. 44-19), a velocidade do astro é

$$v = Hr = (0,0218\ \text{m/s}\cdot\text{ano-luz})(1,5\times10^4\ \text{anos-luz}) = 327\ \text{m/s}.$$

Assim, a distância adicional entre o astro e a Terra daqui a um ano será

$$d = vt = (327\ \text{m/s})(365\ \text{d})(86400\ \text{s/d}) = 1,0\times10^{10}\ \text{m}.$$

(b) Como foi visto no item (a), a velocidade do astro é

$$v = 327\ \text{m/s} \approx 3,3\times10^2\ \text{m/s}.$$

35. Fazendo $v = Hr = c$, obtemos

$$r = \frac{c}{H} = \frac{3,0\times10^8\ \text{m/s}}{0,0218\,\text{m/s}\cdot\text{ano-luz}} = 1,376\times10^{10}\ \text{anos-luz} \approx 1,4\times10^{10}\ \text{anos-luz}.$$

36. Como $F_{\text{grav}} = GMm/r^2 = mv^2/r$, $M \propto v^2$. Assim, a massa do Sol teria que ser

$$M'_S = \left(\frac{v_{\text{Mercúrio}}}{v_{\text{Plutão}}}\right)^2 M_S = \left(\frac{47,9\,\text{km/s}}{4,74\,\text{km/s}}\right)^2 M_S = 102\,M_S.$$

37. (a) Fazendo $\lambda = (2898\ \mu\text{m}\cdot\text{K})/T$ na expressão $E = hc/\lambda = (1240\ \text{eV}\cdot\text{nm})/\lambda$, obtemos

$$E = \frac{1240\ \text{eV}\cdot\text{nm}}{2898\ \mu\text{m}\cdot\text{K}}T = \frac{1,240\times10^{-3}\,\text{MeV}\cdot\text{nm}}{2,898\times10^6\,\text{nm}\cdot\text{K}} = (4,28\times10^{-10}\ \text{MeV/K})T.$$

(b) A energia mínima necessária para criar um par elétron-pósitron é o dobro da energia do repouso do elétron, ou seja, 2(0,511 MeV) = 1,022 MeV. Assim,

$$T = \frac{E}{4,28\times10^{-10}\ \text{MeV/K}} = \frac{1,022\,\text{MeV}}{4,28\times10^{-10}\ \text{MeV/K}} = 2,39\times10^9\ \text{K}.$$

38. No caso da radiação cósmica de fundo, a lei de Wien nos dá

$$T = \frac{2898\,\mu\text{m}\cdot\text{K}}{\lambda_{\text{máx}}} = \frac{2898\,\text{mm}\cdot\text{K}}{1,1\,\text{mm}} = 2,6\ \text{K}.$$

(b) Na época do "desacoplamento", em que o universo se tornou "transparente",

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2898\ \mu\text{m}\cdot\text{K}}{T} = \frac{2898\ \mu\text{m}\cdot\text{K}}{2970\ \text{K}} = 0,976\ \mu\text{m} = 976\ \text{nm}.$$

39. (a) Fazendo

$$v(r) = Hr \le v_e = \sqrt{2GM/r},$$

obtemos

$$M/r^3 \geq H^2/2G,$$

o que nos dá

$$\rho = \frac{M}{4\pi r^2/3} = \frac{3}{4\pi}\frac{M}{r^3} \geq \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

(b) Expressar a densidade em átomos de hidrogênio por metro cúbico equivale a expressar a massa específica em unidades de $\rho_0 = m_H/m^3 = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg/m³. Assim, temos

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G\rho_0}(\text{átomos de H/m}^3)$$

$$= \frac{3(0{,}0218\,\text{m/s}\cdot\text{ano-luz})^2(1{,}00\,\text{ano-luz}/9{,}460\times10^{15}\ \text{m})^2(\text{átomos de H/m}^3)}{8\pi(6{,}67\times10^{-11}\,\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2)(1{,}67\times10^{-27}\,\text{kg/m}^3)}$$

$$= 5{,}7\ \text{átomos de H/m}^3.$$

40. (a) De acordo com a Eq. 37-32, temos

$$\lambda_0 = \lambda\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} = (\lambda_0 + \Delta\lambda)\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}.$$

Dividindo ambos os membros por λ_0, obtemos

$$1 = (1+z)\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}},$$

em que $z = \Delta\lambda/\lambda$. Explicitando β, obtemos

$$\beta = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2}.$$

(b) Para $z = 4{,}43$, temos

$$\beta = \frac{(4{,}43)^2 + 2(4{,}43)}{(4{,}43)^2 + 2(4{,}43) + 2} = 0{,}934.$$

(c) De acordo com a Eq. 44-19,

$$r = \frac{v}{H} = \frac{\beta c}{H} = \frac{(0{,}934)(3{,}0\times10^8\ \text{m/s})}{0{,}0218\,\text{m/s}\cdot\text{ano-luz}} = 1{,}28\times10^{10}\ \text{anos-luz}.$$

41. De acordo com a Eq. 39-33, a energia do fóton emitido é

$$E = E_3 - E_2 = -(13{,}6\ \text{eV})\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2}\right) = 1{,}89\ \text{eV}$$

e o comprimento de onda é

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E} = \frac{1240\ \text{eV}\cdot\text{nm}}{1{,}89\ \text{eV}} = 6{,}56\times10^{-7}\ \text{m}.$$

Como o comprimento de onda detectado é λ = 3,00 × 10^{-3} m, temos

$$\frac{\lambda}{\lambda_0}=\frac{3,00\times10^{-3}\ \text{m}}{6,56\times10^{-7}\ \text{m}}=4,57\times10^3.$$

42. (a) De acordo com a Eq. 41-29, $N_2/N_1=e^{-\Delta E/kT}$. Explicitando ΔE, obtemos

$$\Delta E = kT\ln\frac{N_1}{N_2}=(8,62\times10^{-5}\ \text{eV/K})(2,7\ \text{K})\ln\left(\frac{1-0,25}{0,25}\right)$$
$$=2,56\times10^{-4}\ \text{eV}\approx0,26\ \text{meV}.$$

(b) O comprimento de onda seria

$$\lambda=\frac{hc}{\Delta E}=\frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{2,56\times10^{-4}\ \text{eV}}=4,84\times10^6\ \text{nm}\approx4,8\ \text{mm}.$$

43. PENSE O raio da órbita da Terra continuaria a ser 1,50 × 10^{11} km, a distância atual entre a Terra e o Sol (veja o Apêndice C).

FORMULE A força gravitacional experimentada pela Terra se deve apenas à massa M envolvida pela órbita terrestre. Se r é o raio da órbita, R é o raio do novo Sol e M_S é a massa do Sol, temos

$$M=\left(\frac{r}{R}\right)^3 M_s=\left(\frac{1,50\times10^{11}\ \text{m}}{5,90\times10^{12}\ \text{m}}\right)^3\left(1,99\times10^{30}\ \text{kg}\right)=3,27\times10^{25}\ \text{kg}.$$

A força gravitacional experimentada pela Terra é dada por GMm/r^2, em que m é a massa da Terra e G é a constante gravitacional. Como a aceleração centrípeta é dada por v^2/r, em que v é a velocidade da Terra, $GMm/r^2 = mv^2/r$ e

$$v=\sqrt{\frac{GM}{r}}.$$

ANALISE (a) Substituindo os valores conhecidos, obtemos

$$v=\sqrt{\frac{GM}{r}}=\sqrt{\frac{\left(6,67\times10^{-11}\ \text{m}^3/\text{s}^2\cdot\text{kg}\right)\left(3,27\times10^{25}\ \text{kg}\right)}{1,50\times10^{11}\ \text{m}}}=1,21\times10^2\ \text{m/s}.$$

(b) A razão das velocidades é

$$\frac{v}{v_0}=\frac{1,21\times10^2\ \text{m/s}}{2,98\times10^4\ \text{m/s}}=0,00405.$$

(c) O novo período de revolução seria

$$T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi\left(1,50\times10^{11}\ \text{m}\right)}{1,21\times10^2\ \text{m/s}}=7,82\times10^9\ \text{s}=247\ \text{anos}.$$

APRENDA Outra forma de calcular a razão das velocidades e o novo período de revolução seria a seguinte: como $v\sim\sqrt{M}$, a razão das velocidades é dada por

$$\frac{v}{v_0}=\sqrt{\frac{M}{M_S}}=\left(\frac{r}{R}\right)^{3/2}=\left(\frac{1,50\times10^{11}\ \text{m}}{5,90\times10^{12}\ \text{m}}\right)^{3/2}=0,00405.$$

Além disso, como $T\sim1/v\sim1/\sqrt{M}$, temos

$$T=T_0\sqrt{\frac{M_S}{M}}=T_0\left(\frac{R}{r}\right)^{3/2}=(1\ \text{ano})\left(\frac{5,90\times10^{12}\ \text{m}}{1,50\times10^{11}\ \text{m}}\right)^{3/2}=247\ \text{anos}.$$

44. (a) A massa da parte da galáxia que está no interior da órbita da estrela é dada por $M' = M(r/R)^3$. Como $GM'm/r^2 = mv^2/r$, em que m é a massa da estrela, temos

$$v = \sqrt{\frac{GM'}{r}} = \sqrt{\frac{GM}{r}\left(\frac{r}{R}\right)^3} = r\sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

e

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}.$$

(b) Nesse caso, $M' = M$ e, portanto,

$$v = \sqrt{GM/r}$$

e

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM}} = 2\pi\frac{r^{3/2}}{\sqrt{GM}}.$$

$$T = \frac{2898\,\mu\text{m}\cdot\text{K}}{\lambda_{\text{máx}}} = \frac{2898\,\text{mm}\cdot\text{K}}{1{,}1\,\text{mm}} = 2{,}6\text{ K}.$$

45. PENSE Todo méson é composto por um quark e um antiquark.

FORMULE Apenas o quark estranho e o antiquark estranho têm números quânticos de estranheza diferentes de zero; o quark estranho (s) tem estranheza $S = -1$ e carga $q = -1/3$, enquanto o antiquark estranho ($\bar{s}$) tem estranheza $S = +1$ e carga $q = +1/3$.

ANALISE (a) Para obter um méson com $S = -1$, precisamos combinar um quark estranho com um antiquark que não seja estranho. O problema é que a carga do quark estranho é $-1/3$; isso significa que, para que a carga total fosse +1, o antiquark teria de ter uma carga de +4/3. Como não existe nenhum antiquark com essa carga, essa partícula não pode existir.

(b) Utilizando um raciocínio semelhante, é possível mostrar que, uma vez que não existe nenhum quark com uma carga de $-4/3$, não pode existir um méson com $S = +1$ e $q = -1$.

APRENDA Os quarks e antiquarks podem ser combinados para formar bárions e mésons, mas nem todas as combinações são permitidas por causa das restrições impostas pelos números quânticos.

46. Supondo que a reta passa pela origem, a inclinação é $0{,}40c/(5{,}3 \times 10^9$ anos-luz). Assim,

$$T = \frac{1}{H} = \frac{1}{\text{inclinação}} = \frac{5{,}3\times10^9\text{ anos-luz}}{0{,}40c} = \frac{5{,}3\times10^9\text{ anos}}{0{,}40} \approx 13\times10^9\text{ anos.}$$

47. PENSE A aniquilação é um processo no qual uma partícula e sua antipartícula colidem e se aniquilam mutuamente.

FORMULE A energia liberada seria o dobro da energia de repouso da Terra: $E = 2M_Tc^2$.

ANALISE Como a massa da Terra é $M_T = 5{,}98 \times 10^{24}$ kg (veja o Apêndice C), a energia liberada seria

$$T = 2M_Tc^2 = 2(5{,}98 \times 10^{24}\text{ kg})(2{,}998 \times 10^8\text{ m/s})^2 = 1{,}08 \times 10^{42}\text{ J.}$$

APRENDA Como no caso da aniquilação de um par elétron-pósitron, a aniquilação do par Terra-Antiterra transformaria toda a energia de repouso dos dois corpos em ondas eletromagnéticas.

48. Observando o rastro 1 e notando que, de acordo com a Tabela 44-6, a partícula A tem carga positiva, chegamos à conclusão de que a curvatura dos rastros das partículas de carga positiva é no sentido anti-horário, o que, por extensão, significa que a curvatura dos rastros das partículas negativas é no sentido horário. Assim, ficamos sabendo que os rastros 1, 2, 4, 6 e 7 foram criados por partículas de carga positiva, e os rastros 5, 8 e 9 foram criados por partículas negativas. Examinando a Tabela 44-6 (e sabendo que somente uma partícula de cada tipo é observada), encontramos apenas as seguintes possibilidades:

$$\text{rastros } 2,4,6,7, \leftrightarrow \text{ partículas} C,F,H,J$$
$$\text{rastros } 5,8,9 \leftrightarrow \text{ partículas} D,E,G$$

Sabemos, também, que a partícula que não é observada é *B* ou *I*, já que apenas uma partícula neutra é indicada na Fig. 44-12 por uma reta tracejada. De acordo com a lei de conservação da carga, os rastros 2, 4 e 6 foram feitos por partículas com uma unidade de carga positiva (note que o rastro 5 foi feito por uma partícula com uma unidade de carga negativa), o que significa, por eliminação, que o rastro 7 foi feito pela partícula *H*. Esta conclusão é confirmada aplicando a lei de conservação da carga ao vértice formado pelos rastros 7, 8 e 9. Depois de esgotar as informações relacionadas à carga, vamos passar aos números quânticos fictícios. Considere o vértice formado pelos rastros 2, 3 e 4 (na lista a seguir, o índice inferior indica o número de Graça):

$$\text{rastros } 2,4 \leftrightarrow \text{ partículas } C_2, F_0, J_{-6}$$
$$\text{rastro } 3 \leftrightarrow \text{ partícula } B_4 \text{ ou } I_6$$

Como o número de Graça da partícula responsável pelo rastro 4 deve ser igual à soma dos números de Graça das partículas 2 e 3, chegamos à conclusão de que a partícula *F* é responsável pelo rastro 4, a partícula *J* é responsável pelo rastro 2 e a partícula *I* é responsável pelo rastro 3. Por eliminação, a partícula responsável pelo rastro 6 (a única partícula de carga positiva que ainda não foi identificada) é a partícula *C*. No vértice definido por

$$A \to F + C + (\text{rastro}\,5)_- \ ,$$

em que a carga da partícula responsável pelo rastro 5 está indicada pelo índice inferior, vemos que, de acordo com a lei de conservação da Simpatia, a partícula responsável pelo rastro 5 deve ter Simpatia = –1 e, portanto, só pode ser a partícula *G*. Resta apenas uma dúvida:

$$\text{rastros}\, 8,9 \leftrightarrow \text{ partículas } D,E.$$

De acordo com o enunciado, a partícula responsável pelo rastro 8 é a partícula *D*, pois é a única partícula não identificada com Seriedade = 0. Em consequência, a partícula responsável pelo rastro 9 só pode ser a partícula *E*.

Resumindo, temos

(a) A partícula *A* é responsável pelo rastro 1.

(b) A partícula *J* é responsável pelo rastro 2.

(c) A partícula *I* é responsável pelo rastro 3.

(d) A partícula *F* é responsável pelo rastro 4.

(e) A partícula *G* é responsável pelo rastro 5.

(f) A partícula *C* é responsável pelo rastro 6.

(g) A partícula *H* é responsável pelo rastro 7.

(h) A partícula *D* é responsável pelo rastro 8.

(i) A partícula *E* é responsável pelo rastro 9.

49. (a) Explicitando a velocidade na Eq. 37-42, que expressa a relação relativística entre velocidade e momento,

$$p = \gamma m v = \frac{mv}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \ ,$$

obtemos

$$v = c\sqrt{1 - \frac{1}{(pc/mc^2)^2 + 1}} \, .$$

No caso de um antipróton, mc^2 = 938,3 MeV. Assim, para pc = 1,19 GeV = 1190 MeV, temos

$$v = c\sqrt{1-\frac{1}{(1190\ \text{MeV}/938{,}3\ \text{MeV})^2+1}} = 0{,}785c.$$

(b) No caso de um píon negativo, mc^2 = 193,6 MeV. Assim, para pc = 1190 MeV, temos

$$v = c\sqrt{1-\frac{1}{(1190\ \text{MeV}/193{,}6\ \text{MeV})^2+1}} = 0{,}993c.$$

(c) Como a velocidade dos antiprótons está entre 0,78 e 0,79, um antipróton faria disparar o detector C2.

(d) Como a velocidade dos píons negativos é maior que 0,79, um píon negativo faria disparar o detector C1.

(e) Como o intervalo de tempo é dado por $\Delta t = d/v$, em que d = 12 m, temos

$$\Delta t = \frac{1}{0{,}785(2{,}998\times10^8\ \text{m/s})} = 5{,}1\times10^{-8}\ \text{s} = 51\ \text{ns}.$$

(f) No caso de um píon negativo,

$$\Delta t = \frac{12\ \text{m}}{0{,}993(2{,}998\times10^8\ \text{m/s})} = 4{,}0\times10^{-8}\ \text{s} = 40\ \text{ns}.$$

50. (a) O decaimento não viola a lei de conservação da carga porque a carga é $+e$ antes e depois do decaimento (o próton e o pósitron têm carga $+e$ e o neutrino tem carga 0).

(b) O decaimento não viola a lei de conservação da energia, pois $m_pc^2 > m_ec^2 + m_\nu c^2$.

(c) O decaimento não viola a lei de conservação do momento linear porque tanto o pósitron como o neutrino podem possuir momento linear, e a soma vetorial dos momentos lineares das duas partículas, que dependem da velocidade e da direção do movimento das partículas, pode ser igual ao momento linear do próton.

(d) O decaimento viola a lei de conservação do momento angular porque o spin é 1/2 antes do decaimento e não pode ser 1/2 depois do decaimento porque as duas partículas que resultam do decaimento têm spin 1/2.

51. (a) Durante o intervalo de tempo Δt, a luz emitida pela galáxia A percorreu uma distância $c\Delta t$. Enquanto isso, a distância entre a Terra e a galáxia aumentou de r para $r' = r + r\alpha\Delta t$. Fazendo $c\Delta t = r' = r + r\alpha\Delta t$, obtemos

$$\Delta t = \frac{r}{c - r\alpha}.$$

(b) O comprimento de onda detectado, λ', é maior que λ, o comprimento de onda emitido, por causa da expansão do universo: $\lambda' = \lambda + \lambda\alpha\Delta t$. Assim,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \alpha\Delta t = \frac{\alpha r}{c - \alpha r}.$$

(c) Podemos usar a expansão binomial (veja o Apêndice E)

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \cdots \quad (x^2 < 1)$$

para obter

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\alpha r}{c-\alpha r} = \frac{\alpha r}{c}\left(1-\frac{\alpha r}{c}\right)^{-1} = \frac{\alpha r}{c}\left[1+\frac{-1}{1!}\left(-\frac{\alpha r}{c}\right)+\frac{(-1)(-2)}{2!}\left(-\frac{\alpha r}{c}\right)^2+\cdots\right]$$

$$\approx \frac{\alpha r}{c}+\left(\frac{\alpha r}{c}\right)^2+\left(\frac{\alpha r}{c}\right)^3.$$

(d) Conservando apenas o primeiro termo da expansão de $\Delta\lambda/\lambda$, obtemos

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\alpha r}{c}.$$

(e) Supondo que

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = \frac{Hr}{c}$$

e comparando com o resultado do item (d), obtemos $\alpha = H$.

(f) Explicitando r na expressão obtida no item (b), $\Delta\lambda/\lambda = \alpha r/(c - \alpha r)$, e substituindo os valores conhecidos, obtemos

$$r = \frac{c(\Delta\lambda/\lambda)}{\alpha(1+\Delta\lambda/\lambda)} = \frac{(2{,}998\times10^8\ \text{m/s})(0{,}050)}{(0{,}0218\ \text{m/s}\cdot\text{ano-luz})(1+0{,}050)} = 6{,}548\times10^8\,\text{anos-luz} \approx 6{,}5\times10^8\,\text{anos-luz}.$$

(g) De acordo com a expressão obtida no item (a),

$$\Delta t = \frac{r}{c-\alpha r} = \frac{(6{,}5\times10^8\,\text{anos-luz})(9{,}46\times10^{15}\ \text{m/anos-luz})}{2{,}998\times10^8\ \text{m/s}-(0{,}0218\ \text{m/s}\cdot\text{anos-luz})(6{,}5\times10^8\,\text{anos-luz})} = 2{,}17\times10^{16}\,\text{s},$$

o que equivale a $6{,}9 \times 10^8$ anos.

(h) Explicitando Δt na relação $r = c\Delta t$,

$$\Delta t = \frac{r}{c} = \frac{6{,}5\times10^8\,\text{anos-luz}}{c} = 6{,}5\times10^8\ \text{anos}.$$

(i) A distância é dada por

$$r = c\Delta t = c(6{,}9\times10^8\ \text{anos}) = 6{,}9\times10^8\ \text{anos-luz}.$$

(j) De acordo com o resultado do item (f),

$$r_B = \frac{c(\Delta\lambda/\lambda)}{\alpha(1+\Delta\lambda/\lambda)} = \frac{(2{,}998\times10^8\ \text{m/s})(0{,}080)}{(0{,}0218\ \text{mm/s}\cdot\text{anos-luz})(1+0{,}080)} = 1{,}018\times10^9\ \text{anos-luz} \approx 1{,}0\times10^9\,\text{anos-luz}.$$

(k) De acordo com a expressão obtida no item (a),

$$\Delta t_B = \frac{r_B}{c-r_B\alpha} = \frac{(1{,}0\times10^9\ \text{anos-luz})(9{,}46\times10^{15}\ \text{m/anos-luz})}{2{,}998\times10^8\ \text{m/s}-(1{,}0\times10^9\ \text{anos-luz})(0{,}0218\,\text{m/s}\cdot\text{anos-luz})} = 3{,}4\times10^{16}\ \text{s},$$

o que equivale a $1{,}1 \times 10^9$ anos.

(l) Na época atual, a distância entre as galáxias A e B é dada por $r_{atual} = c\Delta t_B - c\Delta t_A$. Como $r_{atual} = r_{passado} + r_{passado}\alpha\Delta t$, obtemos

$$r_{passado} = \frac{r_{atual}}{1+\alpha\Delta t} = 3{,}9\times10^8\ \text{anos-luz}.$$

52. De acordo com a Tabela 44-1, a diferença de massa entre o píon e o múon é

$$\Delta m = \left(139{,}6\ \text{MeV}/c^2 - 105{,}7\ \text{MeV}/c^2\right) = \frac{(33{,}9\ \text{MeV})\left(1{,}60\times10^{-13}\ \text{J/MeV}\right)}{\left(2{,}998\times10^{8}\ \text{m/s}\right)^2}$$

$$= 6{,}03\times10^{-29}\ \text{kg}.$$

53. (a) A composição de quarks da partícula Ξ^- é dss.

(b) A composição de quarks da partícula $\overline{\Xi}^-$ é $\overline{s}\,\overline{s}\,\overline{d}$.

54. Como a velocidade das partículas é próxima da velocidade da luz, devemos usar uma expressão relativística para determinar a energia. Para isso, calculamos primeiro o fator de Lorentz. De acordo com a Eq. 37-52,

$$\gamma = 1 + \frac{K}{mc^2} = 1 + \frac{2{,}5\ \text{MeV}}{0{,}511\ \text{MeV}} = 5{,}892.$$

De acordo com a Eq. 37-48, a energia total do elétron ou do pósitron é

$$E = \gamma mc^2 = (5{,}892)(0{,}511\ \text{MeV}) = 3{,}011\ \text{MeV} = 4{,}82\times10^{-13}\ \text{J}.$$

A frequência dos fótons produzidos é, portanto,

$$f = \frac{E}{h} = \frac{4{,}82\times10^{-13}\ \text{J}}{6{,}626\times10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}} = 7{,}3\times10^{20}\ \text{Hz}.$$