

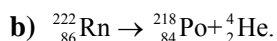
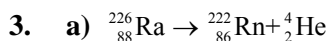
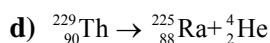
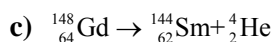
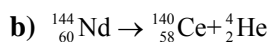
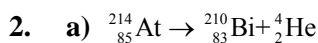
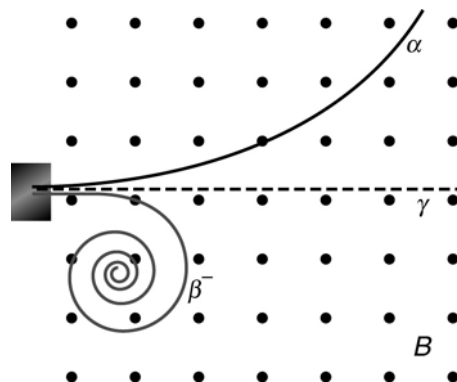
5. Radioaktiivisuus

1. a) Alfa- ja beetahiukkaset ovat varattuja hiukkasia, niiden rata kaartuu magneettikentässä oikeankäden säännön mukaisesti.

b) Gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, joten sen suunta ei muutu magneettikentässä.

c) Radioaktiivisessa hajoamisessa vapautuu energiaa. α - ja β -hiukkaset lähtevät emoytimeistä hajoamisen jälkeen suurella nopeudella, ja näiden hiukkasten liike-energia absorboituu törmäyksissä aineen sisäenergiaksi, jolloin aine lämpenee. γ -säteilyä absorboituu myös aineeseen, jolloin aine lämpenee.

d) Maassa olevien radioaktiivisten aineiden hajoaminen pitää yllä Maan sisäosien kuumuutta.



c) Etsitään taulukosta ${}^{265}\text{Hs}$ - isotoopin järjestysluku $Z = 108$: ${}_{108}^{265}\text{Hs}$.

Koska α -hajoamisessa järjestysluku pienenee kahdella ja massaluku neljällä,

hassiumisotoopista syntyy isotooppi, jonka

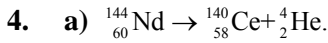
– järjestysluku on $Z = 108 - 2 = 106$ ja

– massaluku on $A = 265 - 4 = 261$.

Syntynyt ydin on nobeliumydin ${}_{102}^{253}\text{No}$.

Vastaus:

c) Syntynyt ydin on nobeliumydin ${}_{102}^{253}\text{No}$.



b) Massan muutos on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{Nd-ydin}} - m_{\text{Ce-ydin}} - m_{\alpha} \\ &= m_{\text{Nd-atomi}} - 60m_e - [m_{\text{Ce-atomi}} - 58m_e + m_{\text{He-atomi}} - 2m_e] \\ &= m_{\text{Nd-atomi}} - m_{\text{Ce-atomi}} - m_{\text{He-atomi}} \\ &= 143,910083 \text{ u} - 139,905433 \text{ u} - 4,0026033 \text{ u} \\ &= 2,0467 \cdot 10^{-3} \text{ u} \approx 2,047 \cdot 10^{-3} \text{ u}.\end{aligned}$$

c) Reaktioenergia on

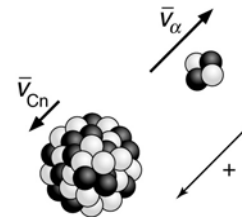
$$Q = 2,0467 \cdot 10^{-3} \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 1,906501 \text{ MeV} \approx 1,907 \text{ MeV}.$$

d) Radioaktiivisessa hajoamisessa säilyy sekä energia että liikemäärä. Hajoamistuotteet liikkuvat vastakkaisiin suuntiin liikemäärän säilymisen vuoksi

$$Q = \frac{1}{2} m_{\text{Ce}} v_{\text{Ce}}^2 + \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2$$

$$0 = m_{\text{Ce}} v_{\text{Ce}} - m_{\alpha} v_{\alpha}.$$

Ratkaistaan liikemäärän säilymislaista $v_{\text{Ce}} = \frac{m_{\alpha} v_{\alpha}}{m_{\text{Ce}}}$ ja sijoitetaan



tämä energiayhtälöön

$$Q = \frac{1}{2} m_{\text{Ce}} \left(\frac{m_{\alpha} v_{\alpha}}{m_{\text{Ce}}} \right)^2 + \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2$$

$$Q = \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 \cdot \left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Ce}}} + 1 \right) = E_{\alpha} \left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Ce}}} + 1 \right).$$

Ratkaistaan α -hiukkasen liike-energia

$$E_{\alpha} = \frac{Q}{\left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Ce}}} + 1 \right)} = \left(\frac{m_{\text{Ce}}}{m_{\text{Ce}} + m_{\alpha}} \right) Q$$

$$\begin{aligned}E_{\alpha} &= \left(\frac{139,905433 \text{ u}}{139,905433 \text{ u} + 4,001507 \text{ u}} \right) \cdot 1,906501 \text{ MeV} \\ &= 1,853488 \text{ MeV} \approx 1,853 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

Ja tytärytimen liike-energia

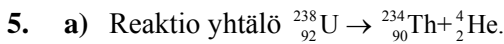
$$\begin{aligned}E_{\text{Ce}} &= Q - E_{\alpha} = 1,906501 \text{ MeV} - 1,853488 \text{ MeV} \\ &= 0,053013 \text{ MeV} \approx 0,05301 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

Vastaus:

b) Reaktiion massan muutos on $2,047 \cdot 10^{-3} \text{ u}$

c) Reaktioenergia on $1,907 \text{ MeV}$

d) α -hiukkasen liike-energia on $1,854 \text{ MeV}$ ja tytärytimen $0,05301 \text{ MeV}$



b) Reaktiossa tapahtuva massan muutos

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{U-ydin}} - m_{\text{Th-ydin}} - m_{\alpha} \\ &= m_{\text{U-atomi}} - 92m_e - [m_{\text{Th-atomi}} - 90m_e + m_{\text{He-atomi}} - 2m_e] \\ &= m_{\text{U-atomi}} - m_{\text{Th-atomi}} - m_{\text{He-atomi}} \\ &= 238,050784 \text{ u} - 234,043593 \text{ u} - 4,002603 \text{ u} \\ &= 0,004588 \text{ u}.\end{aligned}$$

c) Hajoamisen reaktioenergia $Q = \Delta mc^2$ on

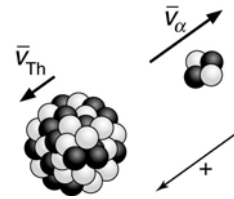
$$Q = 0,004588 \text{ u} \cdot 931,5 \text{ MeV/u} = 4,27372 \text{ MeV} \approx 4,274 \text{ MeV}.$$

d) Radioaktiivisessa hajoamisessa liikemäärä säilyy. Hajoamistuotteet liikkuvat vastakkaisiin suuntiin liikemäärän säilymisen vuoksi.

e) Hajoamisreaktiossa säilyy sekä energia että liikemäärä

$$Q = \frac{1}{2} m_{\text{Th}} v_{\text{Th}}^2 + \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2$$

$$0 = m_{\text{Th}} v_{\text{Th}} - m_{\alpha} v_{\alpha}.$$



Ratkaistaan liikemäärän säilymisestä $v_{\text{Th}} = \frac{m_{\alpha} v_{\alpha}}{m_{\text{Th}}}$ ja sijoitetaan tämä energiayhtälöön

$$Q = \frac{1}{2} m_{\text{Th}} \left(\frac{m_{\alpha} v_{\alpha}}{m_{\text{Th}}} \right)^2 + \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2$$

$$Q = \frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 \cdot \left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Th}}} + 1 \right).$$

Ratkaistaan α -hiukkasen liike-energia

$$\frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 = \frac{Q}{\left(\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{Th}}} + 1 \right)} = \left(\frac{m_{\text{Th}}}{m_{\text{Th}} + m_{\alpha}} \right) Q$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 &= \left(\frac{234,043593 \text{ u}}{234,043593 \text{ u} + 4,001507 \text{ u}} \right) \cdot 4,27372 \text{ MeV} \\ &= 4,201879 \text{ MeV} \approx 4,202 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

Lasketaan α -hiukkasen nopeus. Muutetaan energiayksikkö eV jouleiksi ja atomimassayksiköt kilogrammoiksi.

$$\frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 = 4,201879 \text{ MeV}$$

$$v_{\alpha} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,201879 \cdot 10^6 \cdot 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{4,001507 \text{ u} \cdot 1,660566 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{u}}}} = 14234825,71 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1,423 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

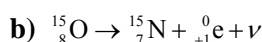
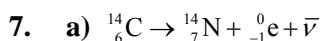
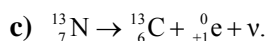
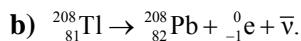
Vastaus:

b) Massanmuutos on 0,004588 u

c) Reaktioenergia on 4,274 MeV

e) α -hiukkasen liike-energia on 4,202 MeV ja nopeus $1,423 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

6. a) Beetahajoamisessa ytimestä poistuu joko elektroni (β^-) tai positroni (β^+). Reaktiossa tytärtyimen massaluku on sama kuin lähtötyimen. Hajoamisen yhteydessä emoytimestä poistuu myös neutriino tai sen antihiukkanen.



8. a) Hajoamisreaktio on ${}_{83}^{213}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{213}\text{Po} + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu}$

Vismutti-213-isotoopin β^- -hajoamisessa tapahtuva massan muutos on

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{Bi-ydin}} - m_{\text{Po-ydin}} - m_e \\ &= m_{\text{Bi-atomi}} - 83m_e - [m_{\text{Po-ydin}} - 84m_e] - m_e \\ &= m_{\text{Bi-atomi}} - m_{\text{Po-atomi}} \\ &= 212,994359 \text{ u} - 212,992833 \text{ u} \\ &= 1,526 \cdot 10^{-3} \text{ u} \end{aligned}$$

sekä reaktioenergia on

$$\begin{aligned} Q &= 1,526 \cdot 10^{-3} \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \\ &= 1,42147 \text{ MeV} \approx 1,421 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

b) Hajoamisreaktio on ${}_{20}^{39}\text{Ca} \rightarrow {}_{19}^{39}\text{K} + {}_{+1}^0\text{e} + \nu$

Kalsium-isotoopin β^+ -hajoamisen massan muutos on

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{Ca-ydin}} - m_{\text{K-ydin}} - m_e \\ &= m_{\text{Ca-atomi}} - 20m_e - [m_{\text{K-atomi}} - 19m_e] - m_e \\ &= m_{\text{Ca-atomi}} - m_{\text{K-atomi}} - 2m_e \\ &= 38,970718 \text{ u} - 38,963707 \text{ u} - 2 \cdot 0,0005485799 \text{ u} \\ &= 0,005913840 \text{ u} \approx 0,005914 \text{ u} \end{aligned}$$

ja reaktioenergia on

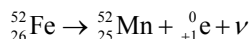
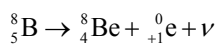
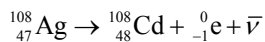
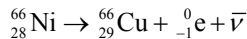
$$\begin{aligned} Q &= 0,00591384 \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \\ &= 5,50874196 \text{ MeV} \approx 5,509 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

Vastaus:

a) Vismutti-isotoopin β^- -hajoamisessa tapahtuva massan muutos on $1,526 \cdot 10^{-3} \text{ u}$ ja reaktioenergia 1,421 MeV.

- b) Kalsium-isotopin β^+ -hajoamisen massan muutos on $5,914 \cdot 10^{-3}$ u ja reaktioenergia on 5,509 MeV.

9. a) Reaktioyhtälöt



- b) Reaktioyhtälö on ${}_{84}^{206}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{202}\text{Pb} + {}_{2}^4\text{He}$.

Massan muutos on

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{Po-ydin}} - m_{\text{Pb-ydin}} - m_{\alpha} \\ &= m_{\text{Po-atomi}} - m_{\text{Pb-atomi}} - m_{\text{He-atomi}} \end{aligned}$$

Hajoamisreaktion reaktioenergia

$$\begin{aligned} Q &= \Delta mc^2 \\ &= (m_{\text{Po-ydin}} - m_{\text{Pb-ydin}} - m_{\alpha})c^2 \\ &= (m_{\text{Po-atomi}} - m_{\text{Pb-atomi}} - m_{\text{He-atomi}})c^2 \end{aligned}$$

Ratkaistaan tästä Pb-atomin massa, kun $1 \text{ u} = 931,5 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

$$\begin{aligned} m_{\text{Pb-atomi}} &= m_{\text{Po-atomi}} - m_{\text{He-atomi}} - \frac{Q}{c^2} \\ &= 205,980472 \text{ u} - 4,0026033 \text{ u} - \frac{5,327 \text{ MeV}}{c^2 \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{c^2}} \text{ u} \\ &= 201,97215 \text{ u}. \end{aligned}$$

Vastaus:

- b) Pb-atomin massa on 201,97215 u.

10. a) Elektronisieppauksessa ydin sieppaa elektronin atomin sisimmiltä kuorilta, jolloin elektroniverhoon jää aukko. Kun tämä aukko täyttyy ylemmästä energiatilasta tulevalle elektronilla, syntyy röntgensäteilyä. Elektronisieppauksessa ytimeen siirtynyt elektroni ja ytimen protoni muodostavat neutronin ja neutriinin.

- b) ${}_{27}^{57}\text{Co}_{30} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_{26}^{57}\text{Fe}_{31} + \nu$

Massan muutos reaktiossa

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{\text{Co-ydin}} + m_e - m_{\text{Fe-ydin}} \\ &= m_{\text{Co-atomi}} - 27m_e + m_e - [m_{\text{Fe-atomi}} - 26m_e] \\ &= m_{\text{Co-atomi}} - m_{\text{Fe-atomi}} \\ &= 56,936294 \text{ u} - 56,935396 \text{ u} \\ &= 8,98 \cdot 10^{-4} \text{ u}\end{aligned}$$

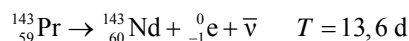
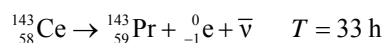
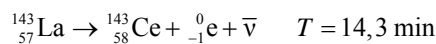
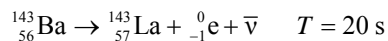
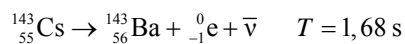
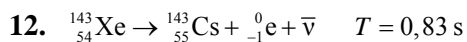
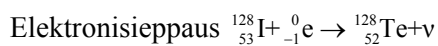
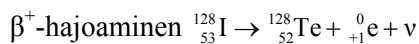
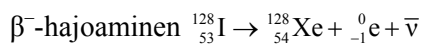
ja hajoamisen reaktioenergia

$$\begin{aligned}Q &= 8,98 \cdot 10^{-4} \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \\ &= 0,836487 \text{ MeV} \approx 0,8365 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

Vastaus:

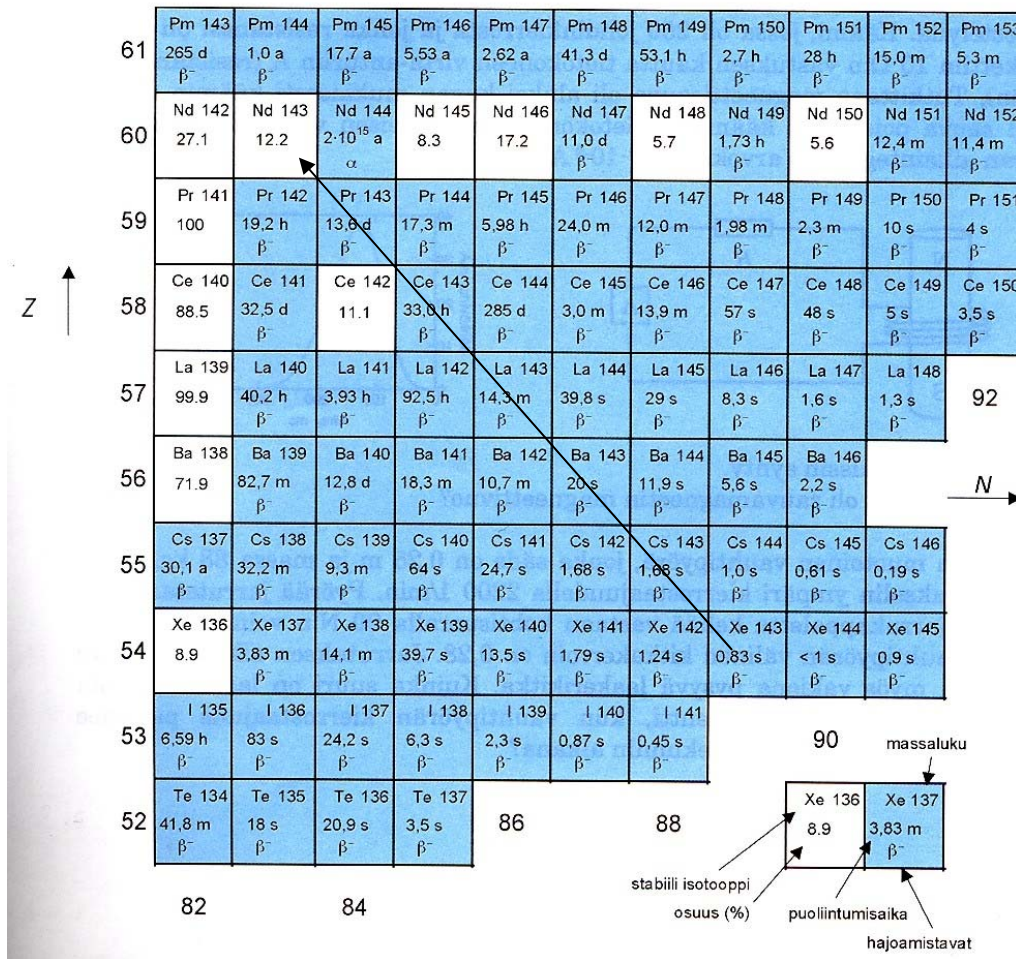
b) Hajoamisen reaktioenergia on 0,8365 MeV.

11. ^{128}I -isotoopin hajoaminen voi tapahtua kolmella tavalla:



Neodyymi $^{143}_{60}\text{Nd}$ on stabiili.

Seuraavalla sivulla prosessi nuklidikartalla.



Vastaus

Ksenon muuttuu stabiiliksi neodyymi ¹⁴³₆₀Nd -isotoopiksi.

13. a) Kun ytimeistä lähtee gammasäteilyä, ei tapahdu ydinmuutosta. Siten ydin ei hajoa.

b) Gammafotonin energia on

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{4,13567 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8,67 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$$

$$= 143007,37 \text{ eV.}$$

Energian ja massan ekvivalenssin $E = \Delta mc^2$ perusteella ytimen massa pienenee

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{0,14300737 \text{ MeV}}{c^2 \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}} \text{ u}$$

$$= 1,535237 \cdot 10^{-4} \text{ u} \approx 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ u.}$$

c) Fotoni emittoituu, koska hajoamisprosessissa ydin on jäänyt viritettyyn tilaan.

Viritystila purkautuu gammafotonin emissiolla.

Vastaus:

b) Ytimen massa pienenee $1,54 \cdot 10^{-4} \text{ u}$.

14. a) Elektronin ja positronin annihilaatio $e + \bar{e} \rightarrow 2\gamma$.

Annihilaatiossa syntyneiden fotonien yhteinen energia on

$$E_{2\gamma} = m_e + m_{\bar{e}} = 2m_e$$

$$= 2 \cdot 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$= 1,022004 \text{ MeV} \approx 1,022 \text{ MeV}$$

Yhden gammafotonin energia on $E_\gamma = \frac{1,022004 \text{ MeV}}{2} = 0,511002 \text{ MeV} \approx 0,5110 \text{ MeV}$

b) Protonin ja antiprotonin annihilaatio $p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma$.

$$E_{2\gamma} = m_p + m_{\bar{p}} = 2m_p$$

$$= 2 \cdot 1,00728 \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$= 1876,56264 \text{ MeV}$$

Yhden gammafotonin energia on

$$E_\gamma = \frac{1876,56264 \text{ MeV}}{2}$$

$$= 938,28132 \text{ MeV} \approx 938,3 \text{ MeV.}$$

Vastaus:

a) Gammakvantin energia on $0,5110 \text{ MeV}$.

b) Gammakvantin energia on $938,3 \text{ MeV}$.

15. Gammafotonin energia on

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{4,13567 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,37 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$$

$$= 335\,110,499 \text{ eV} \approx 3,35 \text{ MeV}.$$

Elektroni-positroniparin massaa vastaava energia on

$$E_{2\gamma} = m_e + m_{\bar{e}} = 2m_e$$

$$= 2 \cdot 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$= 1,022004 \text{ MeV} \approx 1,022 \text{ MeV}.$$

Elektroni-positroniparin yhteinen kineettinen energia on

$$3,35110 \text{ MeV} - 1,022004 \text{ MeV} = 2,329096 \text{ MeV} \approx 2,329 \text{ MeV}$$

Vastaus: Elektroni-positroniparin kineettinen energia on 2,329 MeV.

16. a) Hiiliatomi on keveä, $Z = 6$: Gammafotoni absorboituu hiileen Comptonin ilmiön kautta.

Thorium on raskas, $Z = 90$: Pienienergiset gammafotonit absorboituvat valosähköisen ilmiön kautta, 1-10 MeV:n gammafotoneilla tapahtuu Comptonin sironta ja tätä suurenergisemmät fotoneilla tapahtuu parinmuodostus.

b) Gammasäteily vuorovaikuttaa pääasiassa atomien elektronien kanssa. Joten gammasäteily vaimenee parhaiten raskaissa alkuaineissa, koska niissä on paljon elektroneita.

c) Lasketaan gammafotonin energia

$$E_\gamma = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{4,13567 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,12 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$$

$$= 10,3323 \cdot 10^6 \text{ eV} \approx 10,3 \text{ MeV}.$$

Fotonit absorboituvat lyijyyn parinmuodostuksen kautta.

17. a) Ydinten määrä alkuhetkellä on N_0 .

Puoliintumisaikana ydinten määrää puoliintuu.

Viiden puoliintumisajan jälkeen $(\frac{1}{2})^5 \cdot N_0 = \frac{1}{32} N_0$. Eli $\frac{1}{32}$ -osaan alkuperäisestä.

b) Radonin aktiivisuus pienen $\frac{1}{4}$ -osaan kahden puoliintumisajan kuluessa. Aikaa on kulunut 8 vuorokautta.

c) Hajoamisvakio

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \\ &= \frac{\ln 2}{3,82 \text{ d}} \\ &= \frac{\ln 2}{3,82 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} \\ &= 2,10014 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{s}} \approx 2,10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{s}}\end{aligned}$$

Vastaus:

a) Ytimien määrä on pienentynyt 1/32-osaan.

b) Kahdeksan vuorokauden kuluttua.

c) Hajoamisvakio on $2,10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{s}}$

18. Aktiivisuus määritellään $A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = A_0 e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$

a) Ratkaistaan aika, joka kuluu aktiivisuuden pienemiseen $\frac{1}{3}$ -osaan

$$\frac{A}{A_0} = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{1}{3}, \text{ josta}$$

$$-\frac{t}{T_{1/2}} \cdot \ln 2 = -\ln 3$$

ja

$$t = \frac{\ln 3}{\ln 2} \cdot T_{1/2} = \frac{\ln 3}{\ln 2} \cdot 8,02 \text{ d} = 12,7114 \text{ d} \approx 12,7 \text{ d}$$

b) Ratkaistaan aika, joka kuluu aktiivisuuden pienemiseen $\frac{1}{100}$ -osaan

$$\frac{A}{A_0} = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{1}{100}, \text{ josta}$$

$$t = \frac{\ln 100}{\ln 2} \cdot T_{1/2} = \frac{\ln 100}{\ln 2} \cdot 8,02 \text{ d} = 53,2837 \text{ d} = 53,3 \text{ d}$$

Vastaus:

a) Aktiivisuus pienenee kolmasosaan 12,7 päivässä.

b) Aktiivisuus pienenee sadasosaan 53,3 päivässä.

19. Hajoamislaki $A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$, josta

$$\ln \frac{A}{A_0} = \ln e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t.$$

Puoliintumisaika on

$$T_{1/2} = -\frac{\ln 2}{\ln \frac{A}{A_0}} t = -\frac{\ln 2}{\ln \frac{349 \text{ kBq}}{425 \text{ kBq}}} \cdot 2 \text{ d} = 7,0364 \text{ d} \approx 7,04 \text{ d}$$

Vastaus: Näytteen puoliintumisaika on 7,04 d.

20. a) Hajoamisen reaktioyhtälö ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$

Hajoamisvakio on

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \\ &= \frac{\ln 2}{1600 \text{ a}} = \frac{\ln 2}{1600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = \frac{\ln 2}{5,046 \cdot 10^{10} \text{ s}} \\ &= 1,374 \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{s}} \approx 1,4 \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{s}} \end{aligned}$$

b) Ydinten lukumäärä $N = nN_A = \frac{m}{M} N_A$.

Ajassa Δt hajoavien ydinten lukumäärä saadaan yhtälöstä $\Delta N = -\lambda N \Delta t$, josta

$$\begin{aligned} \Delta N &= -\lambda \frac{m}{M} N_A \Delta t \\ &= -1,374 \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{5,0 \text{ g}}{226,025 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \cdot 10,0 \text{ s} \\ &= -1,82977 \cdot 10^{12} \approx -1,8 \cdot 10^{12}. \end{aligned}$$

c) Aktiivisuus $A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \left| \frac{-\lambda N \Delta t}{\Delta t} \right| = \lambda N$

Aktiivisuus alussa on c)-kohdan perusteella $A_0 = \frac{1,82977 \cdot 10^{12}}{10 \text{ s}} = 1,82977 \cdot 10^{11} \text{ Bq} \approx 1,8 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$.

d) Kun ytimiä on hajonnut 75 %, jäljellä on 25 % alkuperäisistä radioaktiivisista ytimistä

eli $N = 0,25 N_0$

Aktiivisuus

$$\begin{aligned} A &= \lambda N \\ &= 0,25 \cdot \lambda N_0 \\ &= 0,25 \cdot A_0 \\ &= 0,25 \cdot 1,82977 \cdot 10^{11} \text{ Bq} \\ &= 4,57443 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \approx 4,6 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \end{aligned}$$

Vastaus:

a) Hajoamisvakio on $1,4 \cdot 10^{-11} \frac{1}{\text{s}}$.

b) Hajoavien ytimien lukumäärä on $1,8 \cdot 10^{12}$.

c) Näytteen aktiivisuus alussa on $1,8 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$.

d) Näytteen aktiivisuus lopussa on $4,6 \cdot 10^{10}$ Bq.

21. a) Aktiivisuus

$$\begin{aligned} A &= \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N \\ &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A \\ &= \frac{\ln 2}{25,0 \cdot 60 \text{ s}} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^{-9} \text{ g}}{128 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \\ &= 6,5221 \cdot 10^9 \text{ Bq} \approx 6,5 \text{ GBq} \end{aligned}$$

b) Hoitojakson pituus 2 h 45 min = 165 min.

Aktiivisuus tällöin

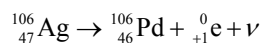
$$\begin{aligned} A &= A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \\ &= 6,5221 \cdot 10^9 \text{ Bq} \cdot 2^{-\frac{165 \text{ min}}{25,0 \text{ min}}} \\ &= 6,7234 \cdot 10^7 \text{ Bq} = 0,067 \text{ GBq} \end{aligned}$$

Vastaus:

a) Näytteen aktiivisuus alussa 6,5 GBq.

b) Näytteen aktiivisuus lopussa 0,067 GBq.

22. a) Hopeaisotoopin hajoamisreaktio



Tytärytimenä syntyy palladiumisotooppi.

b) Hajoamislaki $N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$, josta

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

Ottamalla logaritmi puolittain saadaan

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

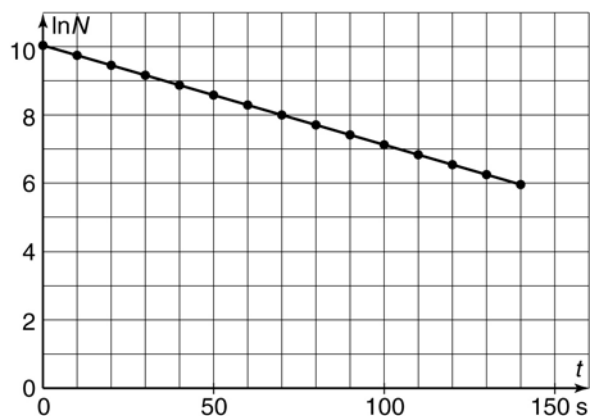
ja

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0.$$

Tämä vastaa suoran yhtälöä $y = kx + b$, jossa $y = \ln N$ ja hajoamisvakion vastaluku on suoran fysikaalinen kulmakerroin. Piirretään $t, \ln N$ -kuvaaja.

aika (s)	N	$\ln N$
0	22436	10,024
10	16808	9,729
20	12591	9,441
30	9433	9,152
40	7066	8,863
50	5294	8,574
60	3966	8,286
70	2971	7,997
80	2225	7,708
90	1667	7,419
100	1249	7,130
110	935	6,841
120	701	6,553
130	525	6,263
140	393	5,974



Havaitaan, että pisteet asettuvat samalle suoralle.

Lasketaan suoran fysikaalinen kulmakerroin $k = \frac{\Delta(\ln N)}{\Delta t}$.

Suoran kulmakertoimen vastaluku on hajoamisvakio

$$\lambda = -\frac{\Delta(\ln N)}{\Delta t} = -\frac{5,9 - 10,0}{(140 - 0) \cdot 60 \text{ s}} = 4,916 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{s}}.$$

Hopea-106:n puoliintumisaika on

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{4,916 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{s}}} = 1409,98 \text{ s} = 23,4997 \text{ min} \approx 23,5 \text{ min}$$

Vastaus:

b) Puoliintumisaika on 23,5 min.

23. a) ^{137}Cs :n aktiivisuus päästöhetkellä

$$\begin{aligned} A = \lambda N &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M_{^{137}\text{Cs}}} \\ &= \frac{\ln 2 \cdot 0,13 \cdot 100 \text{ kg}}{30,2 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \cdot 136,907 \cdot 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \\ &= 4,1606 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{s}} \approx 4,2 \cdot 10^{16} \text{ Bq}. \end{aligned}$$

^{134}Cs :n aktiivisuus päästöhetkellä

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M_{^{134}\text{Cs}}}$$

$$= \frac{\ln 2 \cdot 0,13 \cdot 5 \text{ kg}}{2,1 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \cdot 133,907 \cdot 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$= 3,0587 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{s}} \approx 3,1 \cdot 10^{16} \text{ Bq.}$$

b) Aktiivisuudet nyt 26.4.2007 (21 a)

$$^{137}\text{Cs}: A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = 4,161 \cdot 10^{16} \text{ Bq} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{30,2 \text{ a}} \cdot 21 \text{ a}} = 2,5694 \cdot 10^{16} \text{ Bq} \approx 2,6 \cdot 10^{16} \text{ Bq}$$

$$^{134}\text{Cs}: A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = 3,0587 \cdot 10^{16} \text{ Bq} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{2,1 \text{ a}} \cdot 21 \text{ a}} = 2,9870 \cdot 10^{13} \text{ Bq} \approx 0,0030 \cdot 10^{13} \text{ Bq}$$

Vastaus:

a) Aktiivisuudet päästöhetkellä olivat $4,2 \cdot 10^{16}$ Bq ja $3,1 \cdot 10^{16}$ Bq.

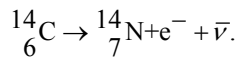
b) Aktiivisuudet 26.4.2007 olivat $2,6 \cdot 10^{16}$ Bq ja $0,0030 \cdot 10^{13}$ Bq.

24. a) Kosminen säteilyn vaikutuksesta ilmakehän tyyppistä syntyy radioaktiivista

^{14}C - isotooppia yhtälön $^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1\text{p}$ mukaisesti. ^{14}C - isotoopin puoliintumisaika

on 5730 a. ^{14}C - isotoopin määrä pysyy vakiona ilman hiilidioksidissa ja elollisessa luonnossa.

Eliön kuoltua ^{14}C - isotooppi hajoaa beetahajoamisen kautta



Kuolleen näytteen aktiivisuus vähenee hajoamislain mukaisesti. Eleperäisen näytteen ikä saadaan selville mittaamalla näytteen ^{14}C - määrä mahdollisimman tarkasti.

b) Radiohiilen puoliintumisaika on 5 730 a.

$$\text{Hajoamislaki } A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t},$$

$$\text{josta saadaan } \frac{A}{A_0} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}.$$

Ottamalla logaritmi puolittain saadaan

$$\ln \frac{A}{A_0} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t.$$

Ratkaistaan puoliintumisaika

$$t = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{A}{A_0}$$

$$= -\frac{5\,730 \text{ a}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{7\,525 \text{ Bq}}{20\,200 \text{ Bq}}$$

$$= 8\,162,911 \text{ a} \approx 8\,200 \text{ a.}$$

Vastaus: b) Näytteen ikä oli 8 200 a.

- 25. a)** Oikein. Muun muassa maaperässä on radioaktiivisia aineita (esimerkiksi uraani), jotka lähettävät säteilyä, toisaalta avaruudesta saapuu ionisoivaa kosmista säteilyä. Radioaktiiviset aineet kiertävät luonnossa, esimerkiksi maaperästä vapautuva radioaktiivinen radon-kaasu kulkeutuu ilmaan sekä liukenee pohjaveteen. Kosminen säteily tuottaa mm. isotooppia hiili-14, jota kerääntyy kaikkeen elävään orgaaniseen ainekseen.
- b)** Oikein. Röntgensäteily on lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä ja läpäisee helposti kevyitä aineita, mutta absorboituu voimakkaasti raskaisiin alkuaineisiin, kuten lyijyyn. (Lisäksi lyijy on tähän käyttöön halpaa ja helposti muotoiltavaa.)
- c)** Väärin. Alfahiukkaset ovat raskaita positiivisia ioneja, ilmassa ne törmäilevät tiheästi ilmamolekyyleihin ionisoiden niitä ja menettävät liike-energiansa jo lyhyellä matkalla. (Alfahiukkanen on helium-ioni; kun se sieppaa ympäristöstään kaksi elektronia, muodostuu heliumatomi, joka tietysti kulkeutuu tuulen mukana.)
- d)** Väärin. Säteily vaimenee kallioperässä jo muutamien metrien matkalla. Ydinjäte sijoitetaan vakaaseen kallioperään siksi, että se pysyisi turvassa eikä leviäisi ympäristöön luonnonmullistuksissa tai muissa onnettomuuksissa (tai terroristihyökkäyksissä).
- 26. a)** Ionisoiva säteily ionisoi aineen atomeja, irrottaa elektroneja atomin elektroniverhosta. Ionisoivaa säteilyä on ydinsäteily (α -, β -, γ -säteily), röntgensäteily ja lyhytaaltainen UV-säteily.
- b)** Sisäilman radon
- maaperästä tihkuva radioaktiivinen kaasu, kerääntyy huoneisiin, jos tuuletusta ei ole järjestetty
 - α -aktiivinen, hengitettynä vaarallista
- Lääketieteellinen käyttö
- sädehoito, röntgentutkimukset, gammakuvaukset, isotooppitutkimukset
- Ulkoisen säteily maaperästä
- maaperässä ja rakennusmateriaaleissa oleva β -aktiivinen ^{40}K -isotooppi
 - maaperän U-, Ra, Th, yms. synnyttävät gammasäteilyä
- Ulkoisen säteily avaruudesta
- suurenergisistä hiukkasista muodostuva kosminen säteily, synnyttää ilmakehässä uusia hiukkasia
 - aurinkotuulen hiukkaset, protonit ja elektronit
- Luonnon radioaktiiviset aineet
- maaperässä oleva β -aktiivinen ^{40}K -isotooppi
 - veteen liuenneet Rn-, U-, Ra, Th-radioisotoopit

Tšernobyli

– Tšernobylistä tapahtui 26.4.1986 ydinvoimalaonnettomuus, jonka seurauksena mm. Suomeen levisi radioaktiivinen laskeuma. Jäljellä on enää β -aktiivista ^{137}Cs -isotooppia. Tätä voi joutua elimistöön mm. sienistä tai kaloista valmistetussa ruuassa.

27. a) Aktiivisuus määritellään $A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N$ ja hajoamisvakion ja puoliintumisaian yhteys

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \text{ josta}$$

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N.$$

Aktiivisuus on kääntäen verrannollinen puoliintumisaikaan $A \sim \frac{1}{T_{1/2}}$.

Näytteen aktiivisuus massayksikköä kohti on sitä suurempi, mitä pidempi isotoopin puoliintumisaika on. Kun ainemäärä on sama, pitkäikäisten isotooppien säteily on vähäisempää kuin lyhytikäisten isotooppien. Käsitys ei ole oikea.

Pitkä puoliintumisaika on ongelmallinen, jos

- näytteen ainemäärä on suuri, jolloin sen aktiivisuus voi olla suuri. Ongelma syntyy tällöin, miten näyte varastoidaan.
- sellaisia radioisotooppeja, jotka eivät poistu elimistöstä kemiallisten tai biologisten prosessien kautta., joutuu elimistöön. Esimerkiksi fissiona syntyvä ^{90}Sr ja radonin pitkäikäiset hajoamistuotteet ovat tällaisia.

b) Aktiivisuus

$$\begin{aligned} A &= \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M} N_A \\ &= \frac{\ln 2 \cdot 0,010 \text{ g} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}}{4,47 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \cdot 238 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \\ &= 124,4157 \frac{1}{\text{s}} \approx 120 \text{ Bq}. \end{aligned}$$

Vastaus:

b) Ilman ^{238}U -aktiivisuus oli 120 Bq.

28. a) Taustasäteily aiheutuu mm. maaperän ja ilman radioaktiivisuudesta sekä kosmisesta säteilystä. Alueellisesti taustasäteilyn arvoa nostavat hieman ydinkokeet, mahdolliset reaktoreiden päästöt ja radioaktiivinen jäte sekä teknisissä ja lääketieteellisissä sovelluksissa käytettävät säteilylähteet.

b) Hajoamislaista $N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$ saadaan $\frac{N}{N_0} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$.

Ottamalla logaritmi puolittain saadaan

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t.$$

Ratkaistaan puoliintumisaika

$$T_{1/2} = -\frac{\ln 2}{\ln \frac{N}{N_0}} t.$$

Näytteen laskentataajuudet saadaan, kun mitatuista taajuuksista vähennetään taustasäteilyn aiheuttamat taajuudet

$$N_{0\text{näyte}} = N_0 - N_{\text{tausta}} = 825 \frac{1}{\text{min}} - 110 \frac{1}{\text{min}} = 715 \frac{1}{\text{min}}$$

$$N_{\text{näyte}} = N - N_{\text{tausta}} = 520 \frac{1}{\text{min}} - 110 \frac{1}{\text{min}} = 410 \frac{1}{\text{min}}$$

$$T_{1/2} = -\frac{\ln 2}{\ln \frac{410}{715}} \cdot 20 \text{ min} = 24,928 \text{ min} \approx 25 \text{ min}$$

Vastaus:

b) Isotoopin puoliintumisaika on 25 min.

29. a) 1 Bq = 1 hajoaminen/sekunti. Becquerel ilmoittaa hajoamisten määrän sekunnissa.
b) 1 Sv mittaa sitä energiaa, joka absorboituu aineeseen massayksikköä kohti. Sievert ottaa huomioon myös eri säteilylajien biologisten vaikutusten eron.
c) Hajoamislaki

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= 8,65 \frac{\text{kBq}}{\text{l}} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{8,02 \text{ d}} \cdot 14 \text{ d}} \\ &= 2,5794 \frac{\text{kBq}}{\text{l}}. \end{aligned}$$

Maidon aktiivisuus on edelleen suurempi kuin hylkäysraja. Maitoa ei voida käyttää. Kahdessa viikossa maito kyllä huononee muutenkin, jos sitä ei säilytetä erityisen huolella.

Vastaus

c) Maidon aktiivisuus on 2,6 kBq/l. Maitoa ei voida käyttää.

30. a) Lyijy on paras gammasäteilyn absorboija.

Heikentyminen on eksponentiaalista ja sitä kuvataan heikennyslailla $I = I_0 e^{-\mu x}$.

Säteilyn intensiteetin pitää pienentyä 90 %, jolloin läpi pääsee 10 %

$$0,1I_0 = I_0 e^{-\mu x}$$

$$0,1 = e^{-\mu x}$$

$$\ln 0,1 = \ln(e^{-\mu x})$$

$$\ln 0,1 = -\mu x$$

$$x = -\frac{\ln 0,1}{\mu} = -\frac{\ln 0,1}{10,15 \frac{1}{\text{m}}} = 0,23 \text{ m} \approx 2,3 \text{ dm}$$

- b) Lasketaan lyijykerroksen paksuus siinä tapauksessa, että läpi pääsee vain 0,1 % saapuvasta säteilystä. a)-kohdan perusteella

$$x = -\frac{\ln 0,001}{\mu} = -\frac{\ln 0,001}{10,15 \frac{1}{\text{m}}} = 0,68 \text{ m} \approx 6,8 \text{ dm}.$$

Vastaus:

- a) Lyijysuojan paksuus on 2,3 mm.
b) Lyijysuojan paksuus on 6,8 mm.