C.1 Subatomaire deeltjes

Opgave 1

a Een goudkern is positief geladen.
Ook een alfadeeltje is positief geladen en wordt dus afgestoten door de goudkern.
Het pad van het alfadeeltje is dan niet meer recht.

b 1 De afstand van de elektronen tot de kern is zo groot dat de onderlinge afstand tussen twee elektronen relatief heel groot is. De kans op een botsing is dus klein.
2 De massa van een elektron is veel kleiner dan de massa van een alfadeeltje.
Botst het zware alfadeeltje toch tegen het lichte elektron, dan wordt het elektron weggestoten terwijl het alfadeeltje rechtdoor gaat.

c De straal van een voetbal is ongeveer 10 cm.
De elektronen zitten op een afstand van $10^4 \times 10 = 10^5$ cm van de middenstip.
Dit is 1 km.

Opgave 2

a Voor de straal geldt $r = \dfrac{m \cdot v}{B \cdot q}$.
Het elektron botst voortdurend tegen de moleculen.
Het verliest daarbij kinetische energie en dus snelheid.
Omdat m, B en q gelijk blijven, wordt de straal steeds kleiner.

b Het elektron verliest bij elke botsing kinetische energie.
Als de kinetische energie te klein is, ontstaat bij een botsing geen ion meer.

c Het spoor wordt gevormd door druppeltjes die ontstaan bij de vorming van ionen.
De grootte van een druppeltje hangt dus niet af van de snelheid van een elektron.

d Linksonder beweegt het elektron naar rechts.
De elektrische stroom is dus naar links.
De lorentzkracht is verticaal omhoog gericht.
Met de FBI-regel leid je af dat het magnetisch veld loodrecht het papier uit is gericht.

Opgave 3

a De elektrische kracht bereken je met de formule voor de elektrische kracht.

$$F_{el} = f \cdot \frac{q_e \cdot q_p}{r^2}$$

$f = 8{,}9876 \cdot 10^9$ N m^2 C^{-2} (Zie BINAS tabel 7)
$q_1 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
$q_2 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
$r = 5{,}3 \cdot 10^{-2}$ nm $= 5{,}3 \cdot 10^{-2} \times 10^{-9} = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m

$$F_{el} = 8{,}9876 \cdot 10^9 \times \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} \times 1{,}602 \cdot 10^{-19}}{\left(5{,}3 \cdot 10^{-11}\right)^2}$$

$F_{el} = 8{,}211 \cdot 10^{-8}$ N
Afgerond: $8{,}2 \cdot 10^{-8}$ N

b De snelheid bereken je met de formule voor de middelpuntzoekende kracht.

$$F_{mpz} = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

$F_{mpz} = F_{el} = 8{,}2 \cdot 10^{-8}$ N
$m = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ kg
$r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m

$$8{,}2 \cdot 10^{-8} = \frac{9{,}109 \cdot 10^{-31} \cdot v^2}{5{,}3 \cdot 10^{-11}}$$

$v = 2{,}196 \cdot 10^6$ m/s
Afgerond: $2{,}2 \cdot 10^6$ m/s

c De gravitatiekracht bereken je met de formule voor de gravitatiekracht.

$$F_g = G \cdot \frac{m_e \cdot m_p}{r^2}$$

$G = 6{,}67384 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2\,kg^{-2}}$ (Zie BINAS tabel 7)
$m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ kg (Zie BINAS tabel 7)
$m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ kg (Zie BINAS tabel 7)
$r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m

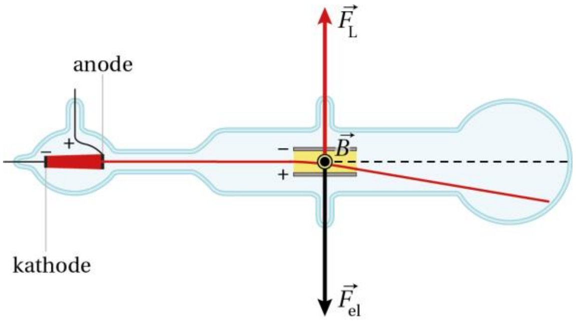
$$F_g = 6{,}674 \cdot 10^{-11} \times \frac{9{,}109 \cdot 10^{-31} \times 1{,}673 \cdot 10^{-27}}{\left(5{,}3 \cdot 10^{-11}\right)^2}$$

$F_g = 3{,}620 \cdot 10^{-47}$ N
Dit is veel kleiner dan de elektrische kracht.

Opgave 4

a De deeltjes worden aangetrokken door de positieve plaat.
De deeltjes zijn zelf dus negatief geladen.

b Zie figuur C.1



Figuur C.1

De lorentzkracht heft de elektrische kracht op.
De elektrische kracht op de deeltjes is omlaag gericht.
Als de deeltjes geen afbuiging ondervinden, dan is de lorentzkracht verticaal omhoog gericht.
De elektronenstroom is naar rechts, dus de elektrische stroom is naar links.
Uit de FBI-regel volgt dat het magnetisch veld dus loodrecht het papier uit is gericht.

c De lorentzkracht is in evenwicht met de elektrische kracht.
Voor de lorentzkracht geldt: $F_L = B \cdot q \cdot v$
Voor de elektrische kracht geldt: $F_{el} = q \cdot E$
Combinatie van beide formules geeft: $B \cdot q \cdot v = q \cdot E$
Dus: $v = \dfrac{E}{B}$

d De elektronen ondervinden een elektrische kracht en krijgen daardoor een verticale versnelling. De verticale versnelling volgt uit de tweede wet van Newton.
De resulterende kracht is gelijk aan de elektrische kracht omdat de zwaartekracht verwaarloosbaar is ten opzichte van de elektrische kracht.

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{F_{el}}{m} \text{ met } F_{el} = q \cdot E$$

$$a = \frac{q \cdot E}{m} = \frac{q}{m} \cdot E$$

Heruit volgt $\dfrac{q}{m} = \dfrac{a}{E}$

$$\frac{q}{m} = \frac{4{,}8 \cdot 10^{15}}{2{,}5 \cdot 10^{4}} = 1{,}92 \cdot 10^{11}\ \mathrm{C\,kg^{-1}}$$

Afgerond: $1{,}9 \cdot 10^{11}\ \mathrm{C\,kg^{-1}}$

e In BINAS tabellen 7A en 7B vind je:

$$\frac{q}{m} = \frac{1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19}}{9,109\,382\,91 \cdot 10^{-31}} = 1,758\,820\,09 \cdot 10^{11}\ \text{C kg}^{-1}$$

De waarde van Thomson is 9,2 % te groot.

Opgave 5

a De zwaartekracht is verticaal naar beneden gericht.
Om te zweven moeten de elektronen dus een elektrische kracht omhoog ondervinden.
De elektronen zijn negatief geladen.
De bovenste plaat is dus positief geladen.

b De lading bereken je met de formule voor de elektrische veldkracht.
De elektrische velsterkte volgt uit de gegeven formule op pagina 11.
De elektrische veldkracht volgt uit de zwaartekracht.
De zwaartekracht bereken je met de formule voor de zwaartekracht.

$F_{zw} = m \cdot g$
$m = 3{,}0 \cdot 10^{-15}$
$g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$
$F_{zw} = 3{,}0 \cdot 10^{-15} \times 9{,}81 = 2{,}943 \cdot 10^{-14}\text{N}$

$$E = \frac{U}{d}$$

$U = 165$ V
$d = 5{,}0$ mm $= 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ m

$$E = \frac{165}{5{,}0 \cdot 10^{-3}}$$

$E = 3{,}30 \cdot 10^4$ N/C

$F_{el} = F_{zw}$ omdat het druppeltje zweeft, is de resulterende kracht 0 N.

$F_{el} = q \cdot E$
$2{,}943 \cdot 10^{-14} = q \cdot 3{,}30 \cdot 10^4$
$q = 8{,}918 \cdot 10^{-19}$ C
Afgerond: $8{,}9 \cdot 10^{-19}$ C

c Het aantal elektronen dat het oliedruppeltje kwijtraakt, is niet elke keer gelijk.

d Een oliedruppeltje raakt een onbekend aantal elektronen kwijt.
Uit het experiment komt echter telkens een veelvoud van een onbekend getal.
Uit een groot aantal metingen kun je dan dat onbekende getal (en dus de lading van een elektron) berekenen.

C.2 Kernreacties

Opgave 6

a $^{239}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{235}_{92}\text{U} + {}^{4}_{2}\alpha$

b $^{231}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{231}_{91}\text{Pa} + {}^{0}_{-1}\beta$

c $^{123}_{53}\text{I} + {}^{0}_{-1}\beta \rightarrow {}^{123}_{52}\text{Te}$

Opgave 7

a $^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{140}_{54}\text{Xe} + 2{}^{1}_{0}\text{n}$

b Het massadefect uitgedrukt in MeV bereken je met het massadefect uitgedrukt in u.
Het massadefect uitgedrukt in u bereken je uit het verschil tussen de massa's voor en na de kernreactie uitgedrukt in u.
De massa van een kern bereken je met de atoommassa en het aantal elektronen in de elektronenwolk.

m_{voor} = 235,04392 – 92 × 5,4858·10^−4^ + 1,00866491600
m_{voor} = 236,002116 u

m_{na} = 93,91523 − 38 × 5,4858·10^−4^ + 139,92144 − 54 × 5,4858·10^−4^ + 2 × 1,00866491600
m_{na} = 235,80353 u

Δm = 236,002116 − 235,80353 = 0,1985855 u

Volgens BINAS tabel 7 komt 1 u overeen met 931,494061 MeV
Dus 0,198585528 u = 0,1985855 × 931,494061 = 184,98124 MeV
Afgerond: 184,98 MeV

Opgave 8

a De lading van een kern is positief. Dus stoten de plutoniumkern en de calciumkern elkaar af.
Die afstotende kracht remt de calciumkern af: de afstotende kracht verricht negatieve arbeid waarbij de kinetische energie van de calciumkern afneemt.
Er moet voldoende kinetische energie overblijven om bij de plutoniumkern te kunnen komen.

b $^{244}_{94}\text{Pu} + {}^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow {}^{289}_{114}? + 3{}^{1}_{0}\text{n}$
Opmerking: Dit element heeft nog geen naam gekregen.

Opgave 9

a De energie die vrijkomt tijdens een kernreactie wordt gebruikt om water te verhitten tot stoom.
Stoom zet een schoepenrad in beweging dat een dynamo aandrijft.
Bij dit proces wordt 75% van de kernenergie omgezet in elektrische energie.
De resterende 25% energie wordt omgezet in warmte.

b Het gemiddeld aantal splijtingen per seconde bereken je met de totale energie per seconde en de energie per splijting.
De totale energie per seconde volgt uit het totale vermogen.
Het totale vermogen bereken je uit het elektrisch vermogen en het rendement.

$$\eta = \frac{E_{uit}}{E_{in}} \cdot 100\%$$

η = 25%
E_{uit} = 575 MW = 575·10^6^ W

$$25\% = \frac{575 \cdot 10^6}{E_{in}} \cdot 100\%$$

E_{in} = 2,300·10^9^ W

Bij de splijting komt in totaal 2,300·10^9^ J per seconde aan energie vrij.
1 splijting levert 175 MeV = 175·10^6^× 1,6021·10^−19^ = 2,80368·10^−11^ J

Dus per seconde splijten er $\frac{2,300\cdot 10^{9}}{2,80368\cdot 10^{-11}} = 8,2035\cdot 10^{19}$ kernen

Afgerond:8,2·10^{19} kernen

c De massa verrijkt uraan volgt uit de molaire massa van uraan en het aantal kernen in 1 mol.

Per uur vervallen er 8,20·10^{19} × 3600 = 2,952·10^{23} kernen.

In 1 mol kernen zitten N_A = 6,0221·10^{23} kernen.

Per uur vervalt dus $\frac{2,952\cdot 10^{23}}{6,0221\cdot 10^{23}} = 0,4903$ mol U-235.

Uit tabel 25 volgt: 1 mol U-235 heeft een massa van 235,04 g.

Per uur vervalt dus 235,04 × 0,4903 = 115,2 g U-235. Dit is 4,0%.

Er is dus $\frac{115,2}{0,040} = 2,88\cdot 10^{3}$ g verrijkt uraan per uur nodig.

Afgerond: 2,9 kg

Opgave 10

a Om het aantal jaren te berekenen, stem je de eenheden op elkaar af.

1,0 kWh = 3,6·10^{6} J

1,0·10^{14} kWh = 1,0·10^{14} × 3,6·10^{6} = 3,6·10^{20} J

Dus $\frac{3,9\cdot 10^{26}}{3,6\cdot 10^{20}} = 1,0833\cdot 10^{6}$ jaar

Afgerond: 1,1·10^{6} jaar

b Kernen zijn positief geladen en stoten elkaar dus af.

Om toch dicht bij elkaar te komen, moeten hun snelheden dus groot zijn.

Daarvoor is een hoge temperatuur nodig.

C.3 Neutrino's

Opgave 11

a $^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{0}_{-1}\beta + {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \bar{\nu}_e$

b $^{8}_{4}\mathrm{B} \rightarrow {}^{0}_{+1}\beta + {}^{8}_{3}\mathrm{Li} + \nu_e$

c $^{7}_{4}\mathrm{Be} + {}^{0}_{-1}\beta \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \nu_e$

Opgave 12

a De frequentie bereken je met de formule voor de impuls van het foton.

$$p = \frac{h \cdot f}{c}$$

p = 8,8 10^{-28} kg m/s
h = 6,626·10^{-34} J s (Zie BINAS tabel 7A)
c = 2,9979·10^{8} m/s (Zie BINAS tabel 7A)

$$8{,}8\ 10^{-28} = \frac{6{,}626 10^{-34} \cdot f}{2{,}9979 \cdot 10^{8}}$$

f =3,9815 Hz
Afgerond: 4,0·10^{14} Hz

b De snelheid bereken je met de formule voor de impuls van een massa.

$p = m \cdot v$
m = 1,6726·10^{-27} kg (BINAS tabel 7A)
p = 8,8·10^{-28} kg m/s
8,8·10^{-28} = 1,6726·10^{-27} · v
v = 0,5261 m/s
Afgerond: 0,53 m/s

Opgave 13

a Het positron en het elektron staan nagenoeg stil.
Dus de totale impuls vóór de reactie is dan (nagenoeg) gelijk aan 0.
Volgens de wet van behoud van impuls moet de totale impuls na de reactie dan ook gelijk zijn aan 0.
Dit kan niet als er maar één foton vrijkomt.
Een foton heeft immers altijd energie, en dus altijd impuls.

b De frequentie bereken je met de formule voor de energie van een foton.
De energie van een foton volgt uit de totale energie die ontstaat tijdens de annihilatie.
De energie die ontstaat tijdens de annihilatie bereken je met de formule van Einstein.

Tijdens de annihilatie verdwijnen een elektron en een positron, die dezelfde massa hebben.
$E = m \cdot c^2$
$m = 2 \times m_{\text{elektron}}$ = 2 × 9,1093·10^{-31} = 1,82186·10^{-30} kg (Zie BINAS tabel 7)
c = 2,9979·10^{8} m/s (Zie BINAS tabel 7A)
E = 1,82186·10^{-30} × (2,9979·10^{8})^2 = 1,6373·10^{-13} J

1 foton krijgt de helft van deze energie dus 8,1868·10^{-14} J

$E_f = h \cdot f$
h = 6,626·10^{-34} J s (BINAS tabel 7A)
8,1868·10^{-14} = 6,626·10^{-34} · f
f = 1,2355·10^{20} Hz
Afgerond: 1,2·10^{20} Hz

Opgave 14

a Tijdens de botsing geldt de wet van behoud van impuls:

$p_{totaal,voor} = p_{totaal,na}$
$p_{w,voor} + p_{r,voor} = p_{w,na} + p_{r,na}$
$m_w \cdot v_{w,voor} + m_r \cdot v_{r,voor} = m_w \cdot v_{w,na} + m_r \cdot v_{r,na}$ Omdat $m_w = m_r$ kun je m eruit delen
$v_{w,voor} + v_{r,voor} = v_{w,na} + v_{r,na}$ met $v_{w,voor}$ = 5,0 m/s en $v_{r,voor}$ = 0 m/s
$5{,}0 = v_{w,na} + v_{r,na}$
Dit is hetzelfde als $v_w + v_r = 5{,}0$ omdat het gaat om het verband voor de snelheden van de ballen na de botsing

b Wet van behoud van impuls: $v_w + v_r = 5{,}0$

Wet van behoud van energie: $\frac{1}{2}m_w \cdot v_{w,voor}^2 + \frac{1}{2}m_r \cdot v_{r,voor}^2 = \frac{1}{2}m_w \cdot v_{w,na}^2 + \frac{1}{2}m_r \cdot v_{r,na}^2$

In de tweede vergelijking kun je de massa's eruit delen en invullen.
$v_{w,voor}$ = 5,0 ms en $v_{r,voor}$ = 0
Er ontstaat:

$\frac{1}{2}\cdot 5^2 + \frac{1}{2}\cdot 0^2 = \frac{1}{2}v_{w,na}^2 + \frac{1}{2}v_{r,na}^2$ Delen door $\frac{1}{2}$ en index na weglaten

$25 = v_w^2 + v_r^2$

Uit $v_w + v_r = 5$ volgt $(v_w + v_r)^2 = 25$

Dus $(v_w + v_r)^2 = v_w^2 + v_r^2$

$v_w^2 + 2\,v_w \cdot v_r + v_r^2 = v_w^2 + v_r^2$

$v_w \cdot v_r = 0$

Dus één van beide snelheden na de botsing is 0.
De witte bal kan niet door rode bal heen. Daarom geldt $v_w = 0$.
Met behulp van $v_w + v_r = 5$ trek je de conclusie v_r = 5,0 m/s.

c De wet van behoud van impuls geldt dan nog steeds.

Voor de energiewet geldt dan: $\frac{1}{2}m_w \cdot v_{w,voor}^2 + \frac{1}{2}m_r \cdot v_{r,voor}^2 = \frac{1}{2}m_w \cdot v_{w,na}^2 + \frac{1}{2}m_r \cdot v_{r,na}^2 + Q$

met Q de warmte die vrijkomt.
In de afleiding bij vraag b vind je dan uiteindelijk in plaats van $v_w \cdot v_r = 0$ het verband

$$v_w \cdot v_r = \frac{Q}{m}$$

Hierbij is $\frac{Q}{m}$ klein, dus is één van beide snelheden klein.

Nog steeds kan de witte bal niet door de rode bal heen, dus krijgt de rode bal iets minder dan de oorspronkelijke snelheid van de witte bal en rolt de witte bal met een kleine snelheid verder.

Opgave 15

a $^1_1\text{p} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^2_1\text{H} + {}^{\;0}_{+1}\beta + \nu_e$

b Het massadefect uitgedrukt in MeV bereken je met het massadefect uitgedrukt in u.
Het massadefect uitgedrukt in u bereken je uit het verschil tussen de massa's voor en na de kernreactie uitgedrukt in u.
De massa van een kern bereken je met de atoommassa en het aantal elektronen in de elektronenwolk.

$m_{voor} = 4 \times m_{proton} + 2 \times m_{elektron}$
$m_{voor} = 4 \times 1{,}007276466812 + 2 \times 5{,}4857990946 \cdot 10^{-4}$
m_{voor} = 4,03020303 u

$m_{na} = m_{He\ kern}$
$m_{na} = 4{,}002603 - 2 \times 5{,}4857990946 \cdot 10^{-4}$
m_{na} = 4,00150584 u
Δm = 4,03020303 − 4,00150584= 0,0286971898 u
Dit komt overeen met 0,0286971898 × 931,494061 = 26,73126 MeV.
Afgerond: 26,731 MeV

c De neutrino's die per seconde op de aarde terechtkomen, bereken je met de cirkelvormige dwarsdoorsnede van de aarde en het aantal neutrino's dat per seconde op 1 m^2 valt.
De dwarsdoorsnede van de aarde bereken je met de straal van de aarde.
Het aantal neutrino's dat per seconde op 1 m^2 valt, volgt uit de het aantal neutrino's dat valt op 1 m^2 van de boloppervlakte met de zon in het middelpunt.
De boloppervlakte bereken je met de afstand tussen de zon en de aarde.

$A_{bol} = 4\pi R^2$
$R = R_{zon\text{-}aarde} = 0{,}1496 \cdot 10^{12}$ m (Zie BINAS tabel 31)
$A_{bol} = 4\pi \cdot (0{,}1496 \cdot 10^{12})^2$
$A_{bol} = 2{,}812373 \cdot 10^{23}$ m^2

Per seconde vallen er $\frac{2{,}0 \cdot 10^{38}}{2{,}812373 \cdot 10^{23}} = 7{,}1114 \cdot 10^{14}$ neutrino's op 1 m^2 boloppervlakte.
Dus op de dwarsdoorsnede van de aarde vallen per seconde $7{,}1114 \cdot 10^{14}$ neutrino's per m^2.

$A_{dwars} = \pi r_{aarde}^2$
$r_{aarde} = 6{,}371 \cdot 10^6$ m (Zie BINAS tabel 31)
$A_{dwars} = \pi \cdot (6{,}371 \cdot 10^6)^2$
$A_{dwars} = 1{,}27516 \cdot 10^{14}$ m^2
Per seconde treffen $7{,}1114 \cdot 10^{14} \times 1{,}27516 \cdot 10^{14} = 9{,}0681 \cdot 10^{28}$ neutrino's de aarde.
Afgerond: $9{,}1 \cdot 10^{28}$ neutrino's.

C.4 Elementaire deeltjes en het standaardmodel

Opgave 16

a Mesonen bestaan uit een quark en een antiquark.
Baryonen bestaan uit drie quarks of drie antiquarks.
De totale lading van een meson of een baryon moet een geheel getal opleveren.
De lading van de quarks zijn: (Zie BINAS Tabel 26A)

$\mathrm{u} = +\frac{2}{3}e \quad \bar{\mathrm{u}} = -\frac{2}{3}e$

$\mathrm{d} = -\frac{1}{3}e \quad \bar{\mathrm{d}} = +\frac{1}{3}e$

Mogelijke mesonen: $\mathrm{u\bar{u}}, \mathrm{u\bar{d}}, \mathrm{\bar{u}d}, \mathrm{d\bar{d}}$

Mogelijke baryonen: $\mathrm{uuu}, \mathrm{\bar{u}\bar{u}\bar{u}}, \mathrm{uud}, \mathrm{\bar{u}\bar{u}\bar{d}}, \mathrm{udd}, \mathrm{\bar{u}\bar{d}\bar{d}}, \mathrm{ddd}, \mathrm{\bar{d}\bar{d}\bar{d}}$

Opgave 17

a 2 up-quarks en 1 strange-quark (Zie BINAS Tabel 26C)

b De lading van een up quark is $+\frac{2}{3}e$

De lading van een strange quark is $-\frac{1}{3}e$

Totaal dus $2 \times (+\frac{2}{3}e) + 1 \times (-\frac{1}{3}e) = +e$

c Reactie: $\Sigma^{+} \rightarrow \mathrm{p}^{+} + \pi^{0}$

m_{voor} = 1189,37 MeV c^{-2} (Zie BINAS Tabel 26C)
m_{na} = 938,272 + 134,98 = 1073,252 MeV c^{-2}
$m_{na} < m_{voor}$; dus er is massa omgezet in energie.

Reactie: $\Sigma^{+} \rightarrow \mathrm{n} + \pi^{+}$

m_{voor} = 1189,37 MeV c^{-2} (Zie BINAS Tabel 26C)
m_{na} = 939,565 + 139,57 = 1079,135 MeV c^{-2}
$m_{na} < m_{voor}$; dus er is massa omgezet in energie.

d Σ^{+} is een geladen deeltje. Zowel de lading van een neutron als van π^{0} is 0.
Dus is er geen behoud van ladingsgetal.
De reactie is dus niet mogelijk.

Opgave 18

a $^{3}_{1}\mathrm{H}$ bestaat uit 1 proton en 2 neutronen.

Een proton bestaat uit uud en een neutron uit udd.

$^{3}_{1}\mathrm{H}$ bestaat dus uit 4 up quarks en 5 down quarks.

b m_{up} = 3 MeV c^{-2} (Zie BINAS Tabel 26A)
m_{down} = 5 MeV c^{-2} (Zie BINAS Tabel 26A)
De totale massa van 4 up quarks en 5 down quarks is dus 4 × 3 + 5 × 5 = 37 MeV c^{-2}.
Volgens BINAS tabel 7 is 1 u gelijk aan 931,494061 MeV c^{-2}.
De massa is:

$$\frac{37}{931{,}494061} = 0{,}03972 \text{ u}$$

Afgerond: 0,04 u

c Je moet veel energie toevoegen aan een tritiumkern om deze in losse quarks uit te laten vallen. De toegevoerde energie wordt volgens de formule van Einstein omgezet in massa.

Opgave 19

Stel Arie en Bart houden beide de bal vast.
Als Arie een kracht uitoefent op de bal, oefent de bal een kracht uit op Arie.
Arie beweegt daardoor richting de bal.
De bal oefent echter ook een kracht uit op Bart richting de bal.
Bart beweegt dus ook richting de bal.
Arie en Bart bewegen naar elkaar toe.
Dit lijkt voor een waarnemer op afstand op een aantrekkende kracht.

Systematische Natuurkunde

Opgave 20

a $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$

Opmerking
Er komen twee fotonen vrij vanwege de wet behoud van impuls.

b $\gamma \rightarrow W^+ + W^-$

c Als de twee vectorbosonen in tegenovergestelde richting bewegen, dan is de totale impuls na de reactie 0.
Volgens de wet van behoud van impuls moet de totale impuls voor de reactie dan ook 0 zijn.
Dat kan niet, want een foton heeft altijd een impuls. Dus Jacoba heeft geen gelijk.

d Volgens BINAS tabel 26B is de massa van W^+ en een W^--vectorboson elk 82 GeV c^{-2}
Om de twee vectorbosonen te creëren, is dus volgens de formule van Einstein minimaal 164 GeV aan energie nodig.
Deze hoeveelheid energie wordt volgens $\gamma \rightarrow W^+ + W^-$ door 1 foton geleverd.
Volgens $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ ontstaan twee fotonen, die elk een energie van 164 GeV bezitten.
Dus een elektron vertegenwoordigt vlak voor de botsing ook 164 GeV aan energie.

C.5 Deeltjesversnellers

Opgave 21

a Het negatief geladen ion wordt aangetrokken door de positieve plaat B en daardoor versneld.
In B raakt het negatieve ion elektronen kwijt en wordt positief.
Het positief geladen ion wordt aangetrokken door de negatieve plaat C en daardoor opnieuw versneld.

b Voor de elektrische energie geldt $E = q \cdot U$.
De spanning over AB is gelijk aan de spanning over BC.
De energie verdubbelt dus als de lading van het negatieve ion even groot is als de lading van het positieve ion.

Opgave 22

a $^{68}_{30}\mathrm{Zn} + {}^{1}_{1}\mathrm{p} \rightarrow {}^{67}_{31}\mathrm{Ga} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$

b Het massadefect uitgedrukt in MeV bereken je met het massadefect uitgedrukt in u.
Het massadefect uitgedrukt in u bereken je uit het verschil tussen de massa's voor en na de kernreactie uitgedrukt in u.
De massa van een kern bereken je met de atoommassa en het aantal elektronen in de elektronenwolk.

$m_{\text{voor}} = m_{\text{Zn-kern}} + m_{\text{proton}}$
$m_{\text{voor}} = 67{,}92485 - 30 \times 5{,}4857990946 \cdot 10^{-4} + 1{,}007276466812$
$m_{\text{voor}} = 68{,}9156691$ u

$m_{\text{na}} = m_{\text{Ga-kern}} + 2 \times m_{\text{neutron}}$
$m_{\text{na}} = 66{,}92821 - 31 \times 5{,}4857990946 \cdot 10^{-4} + 2 \times 1{,}00866491600$
$m_{\text{na}} = 68{,}9285339$ u
$\Delta m = 68{,}9156691 - 68{,}9285339 = 0{,}0128647548$ u.
Dit komt overeen met $0{,}0128647548 \times 931{,}494061 = 11{,}9834427$ MeV.
Afgerond: 12,0 MeV

c Bij elke oversteek krijgt het proton 50 keV aan energie erbij.
Per rondje zijn er 2 oversteken.
Dus totaal zijn er $\dfrac{12{,}0 \cdot 10^6}{2 \times 50 \cdot 10^3} = 120$ omlopen.

d De sterkte van het magnetisch veld bereken je met de formule voor de kromtestraal.

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$$

$m = 1{,}67262 \cdot 10^{-27}$ kg
$v = 2{,}5 \cdot 10^{7}$ m/s
$q = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
$r = 48$ cm $= 0{,}48$ m

$$0{,}48 = \frac{1{,}67262 \cdot 10^{-27} \times 2{,}5 \cdot 10^{7}}{1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot B}$$

$B = 0{,}54379$ T
Afgerond: 0,54 T

Opgave 23

a Het aantal malen dat de spanning van 5,0 kV wordt doorlopen bereken je uit de kinetische energie en de toename van de elektrische energie tijdens het doorlopen van de spanning van 5,0 kV.
De kinetische energie bereken je met de formule voor kinetische energie.
De toename van de elektrische energie bereken je met formule voor elektrische energie.

$\Delta E_k = q \cdot U$
$q = +e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
$U = 5{,}0$ kV $= 5{,}0 \cdot 10^3$ V
$\Delta E_k = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \times 5{,}0 \cdot 10^3$
$\Delta E_k = 8{,}01 \cdot 10^{-16}$ J

$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
$m = 1{,}67262 \cdot 10^{-27}$ kg
$v = 1{,}2 \cdot 10^7$ m/s
$E_k = \frac{1}{2} \times 1{,}67262 \cdot 10^{-27} \times \left(1{,}2 \cdot 10^7\right)^2$
$E_k = 1{,}204286 \cdot 10^{-13}$ J
De spanning moet dus $n = \dfrac{E_k}{\Delta E_k} = \dfrac{1{,}204286 \cdot 10^{-13}}{8{,}010 \cdot 10^{-16}} = 1{,}503 \cdot 10^2$ keer worden doorlopen.
Afgerond: $n = 1{,}5 \cdot 10^2$ keer

b De sterkte van het magnetisch veld bereken je met de formule voor de lorentzkracht.
De lorentzkracht volgt uit de middelpuntzoekende kracht.
De middelpuntzoekende kracht bereken je met de gegeven formule.
De straal bereken je met de diameter.

$r = \frac{1}{2} d = \frac{1}{2} \times 8{,}5 \cdot 10^3$
$r = 4{,}25 \cdot 10^3$ m

$F_{mpz} = \dfrac{E}{r}$
$E = 7{,}0$ TeV $= 7{,}0 \cdot 10^{12} \times 1{,}602 \cdot 10^{-19} = 1{,}1214 \cdot 10^{-6}$ J
$r = 4{,}25 \cdot 10^3$ m
$F_{mpz} = \dfrac{1{,}1214 \cdot 10^{-6}}{4{,}25 \cdot 10^3} = 2{,}638 \cdot 10^{-10}$ N

$F_L = B \cdot q \cdot v$
$F_L = F_{mpz} = 2{,}638 \cdot 10^{-10}$ N
$q = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
$v = 2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s
$2{,}638 \cdot 10^{-10} = B \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \times 2{,}9979 \cdot 10^8$
$B = 5{,}492$ T
Afgerond: 5,5 T

c $^1_1\text{p} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^2_1\text{H} + ^{\ 0}_{+1}\beta + \nu_e$
Toelichting
Er is al voldaan aan de wet van behoud van ladingsgetal en van massagetal.
Bij de reactie geldt ook de wet van behoud van leptongetal.
Het positron heeft leptongetal −1.
Er moet dus een elektronneutrino met leptongetal +1 vrijkomen.

Opgave 24

a De versnelspanning bereken je met de formule voor de elektrische energie.
De afname van de elektrische energie bereken je met de formule voor kinetische energie in een elektrisch veld.

$\Delta E_k = -\Delta E_{el}$

$\frac{1}{2} m \cdot v_{eind}^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_{begin}^2 = -E_{el}$

m = 9,109·10^{-31} kg
v_{eind} = 2,4·10^7 m/s
v_{begin} = 0 m/s

$\frac{1}{2} \times 9{,}109 \cdot 10^{-31} \times \left(2{,}4 \cdot 10^7\right)^2 - 0 = -\Delta E_{el}$

ΔE_{el} = −2,623·10^{-16} J

$\Delta E_{el} = q \cdot U$

ΔE_{el} = −2,623·10^{-16} J
q = −1,602·10^{-19} C
−2,623·10^{-16} = −1,602·10^{-19} · U
U = 1,637·10^3 V
Afgerond: 1,6·10^3 V

b Het kan geen gelijkspanningsbron zijn. Wordt een geladen deeltje tussen cilinder 1 en 2 versneld, dan zou het bij een gelijkspanningsbron tussen cilinder 2 en 3 weer vertraagd worden.

c De ladingen in P en Q zijn tegengesteld, de richtingen van de snelheden zijn gelijk.
Dus de richting van de stroomsterkte in punt P is tegengesteld aan die in punt Q.
De lorentzkrachten zijn gericht naar het middelpunt van de cirkel. Dus de lorentzkrachten zijn tegengesteld gericht.
Dus moeten volgens de FBI-regel de magneetvelden bij P en Q gelijk gericht zijn.

d Er geldt: $m_{elektron} \cdot c^2 + E_{k,elektron} + m_{positron} \cdot c^2 + E_{k,positron} \geq m_{Z^0} \cdot c^2$
Volgens BINAS tabel 26B komt de massa van een Z^0-vectorboson overeen met 93 GeV c^{-2}
Volgens BINAS tabel 26B komt de massa van een elektron en dus ook van een positron overeen met 0,51 MeVc^{-2}= 0,51·10^{-3} GeV c^{-2}.
Omdat $E_{k,elektron} = E_{k,positron}$ ontstaat dus:
2 $E_{k,elektron}$ + 2 × 0,51·10^{-3} ≥ 93
$E_{elektron}$ ≥ 46,499 GeV c^{-2}
Afgerond: 46 GeV c^{-2}

C.6 Afsluiting

Opgave 25

a $^{1}_{1}p + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{11}_{6}C + ^{4}_{2}He$

b Het positron heeft het leptongetal −1.
Volgens de wet van behoud van leptongetal moet dus ook een deeltje met leptongetal +1 ontstaan.
Er ontstaat dus een neutrino.

c Het positron en het elektron staan (nagenoeg) stil. Dus de totale impuls vóór de reactie is (nagenoeg) gelijk aan 0. Volgens de wet van behoud van impuls moet de totale impuls na de reactie dan ook gelijk zijn aan 0.
Dit kan alleen als de twee fotonen in tegengestelde richting bewegen.

d De orde van grootte van de tijdsduur Δt bereken je met de formule voor de gemiddelde snelheid.
De gemiddelde snelheid volgt uit de snelheid van fotonen.

$$v_{gem} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

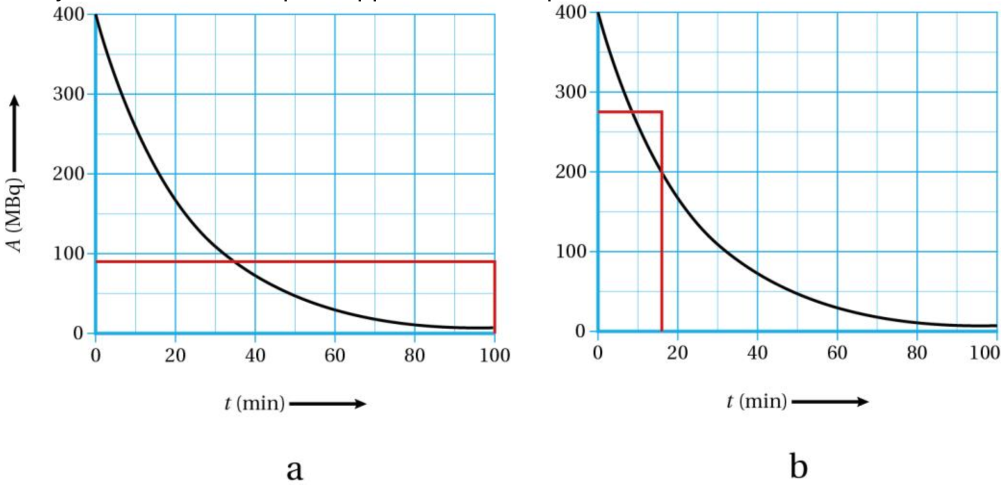
$v_{gem} = c = 2{,}9979 \cdot 10^{8}$ m/s
$\Delta x = 20$ cm $= 20 \cdot 10^{-2}$ m (schatting van de diameter van het hoofd)

$$2{,}9979 \cdot 10^{8} = \frac{20 \cdot 10^{-2}}{\Delta t}$$

$\Delta t = 6{,}67 \cdot 10^{-10}$ s
Dus de orde van grootte is 10^{-9} s.

e De stralingsdosis bereken je met de formule voor de (geabsorbeerde stralings-)dosis.
De hoeveelheid geabsorbeerde energie bereken je met de gemiddelde energie die een positron afgeeft en het aantal positronen dat is ontstaan.
Het aantal positronen dat is ontstaan volgt uit de oppervlakte onder de (A,t)-grafiek.

Er zijn twee manieren op de oppervlakte te bepalen.



Figuur C.2

Zie figuur C.2a.
De oppervlakte onder de grafiek is gelijk aan $N = 90 \cdot 10^{6} \times 100 \times 60 = 5{,}4 \cdot 10^{11}$.

Zie figuur C.2b.
In de tijd tot aan de halveringstijd, vervallen evenveel deeltjes als in de rest van de tijd.
De halveringstijd is 16 minuten.

Totale oppervlakte is dan $N = 2 \times 275 \cdot 10^{6} \times 16 \times 60 = 5{,}28 \cdot 10^{11}$

Voor de totaal geabsorbeerde energie geldt:

$E = N \cdot E_{\text{positron}}$

$E_{\text{positron}} = 0{,}4$ MeV $= 0{,}4 \cdot 10^{6} \times 1{,}602 \cdot 10^{-19} = 6{,}4 \cdot 10^{-14}$ J

Figuur C.2a

$E = 5{,}4 \cdot 10^{11} \times 6{,}4 \cdot 10^{-14} = 3{,}45 \cdot 10^{-2}$ J

Figuur C.2b

$E = = 5{,}28 \cdot 10^{11} \times 6{,}4 \cdot 10^{-14} = 3{,}37 \cdot 10^{-2}$ J

$$D = \frac{E}{m}$$

$$D = \frac{3{,}45 \cdot 10^{-2}}{1{,}5} = 2{,}3 \cdot 10^{-2}\ \text{Gy}$$

$$D = \frac{3{,}37 \cdot 10^{-2}}{1{,}5} = 2{,}24 \cdot 10^{-2}\ \text{Gy}$$

Afgerond: 0,02 Gy

f Een deel van de C-11 isotopen verlaten gedurende de tijd de hersenen.

Opgave 26

a De tijd bereken je met de formule voor het aantal moederkernen.
Het aantal moederkernen $N(0)$ bereken je uit de massa P-32.
Het aantal moederkernen $N(t)$ bereken je met de formule de activiteit.

$$A(t) = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N(t)$$

$A(t) = 2{,}5 \cdot 10^{12}$ Bq

$t_{\frac{1}{2}} = 14{,}3$ d $= 14{,}3 \times 24 \times 60 = 2{,}059 \cdot 10^{4}$ s

$$2{,}5 \cdot 10^{12} = \frac{\ln 2}{2{,}059 \cdot 10^{4}} \cdot N(t)$$

$N(t) = 4{,}456 \cdot 10^{18}$

$$N(0) = \frac{\text{massa van bron P-32}}{\text{atoommassa van P-32}}$$

massa van bron P-32 = 1,0 g = $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ kg (Afstemmen eenheden)

atoommassa van P-32 = 31,973 u = $31{,}973 \times 1{,}660 \cdot 10^{-27} = 5{,}307 \cdot 10^{-26}$ kg

$$N(0) = \frac{1{,}0 \cdot 10^{3}}{5{,}307 \cdot 10^{-26}} = 1{,}88 \cdot 10^{22}$$

$$N(t) = N(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$N(t) = 4{,}456 \cdot 10^{18}$

$N(0) = 1{,}88 \cdot 10^{18}$

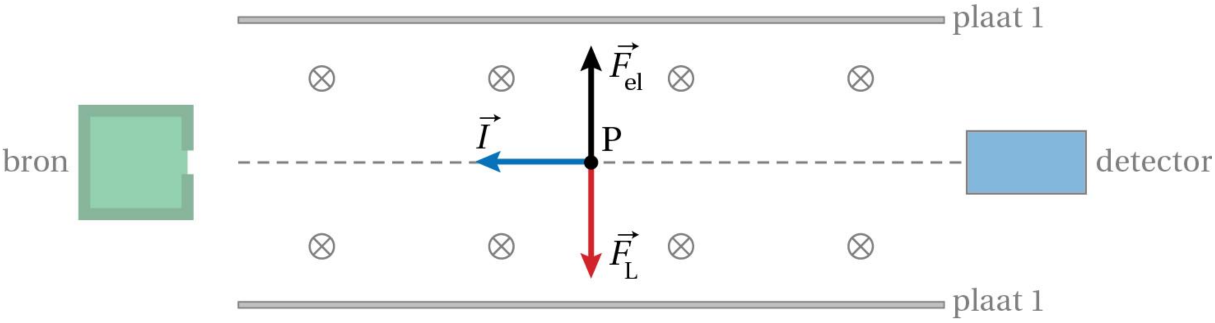
$t_{\frac{1}{2}} = 14{,}3$ d

$$4{,}46 \cdot 10^{18} = 1{,}88 \cdot 10^{22} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{14{,}3}}$$

$t = 1{,}72 \cdot 10^{2}$ d

Afgerond: $t = 1{,}7 \cdot 10^{2}$ dag.

b Zie figuur C.3.



Figuur C.3

De elektronen bewegen in punt P naar rechts. Dus de stroomrichting in punt P is naar links.
De richting van het magnetisch veld is het papier in gericht.
Dus is volgens de FBI-regel de lorentzkracht naar beneden gericht.
Om de elektronen rechtdoor te laten bewegen, moet de elektrische kracht naar boven zijn gericht.

c De elektrische kracht is naar boven gericht. De negatieve elektronen moeten dus aangetrokken worden door de positieve plaat 1.
Dus plaat 1 moet op de positieve pool worden aangesloten.

d Als een elektron rechtdoor beweegt, geldt $F_L = F_{el}$.
$F_L = B \cdot q \cdot v$
$F_{el} = q \cdot E$ met $E = \frac{U}{\Delta x} = \frac{U}{d}$ Zie BINAS tabel 35 D2 in kolom *overige* veldsterkte en spanning

$$q \cdot \frac{U}{d} = B \cdot q \cdot v$$

$$\frac{U}{d} = B \cdot v$$

$$v = \frac{U}{B \cdot d}$$

e De kinetische energie bereken je met de formule voor kinetische energie.

$$E_k = \tfrac{1}{2} m \cdot v^2$$

E_k = 1,72 MeV = $1{,}72 \cdot 10^6 \times 1{,}602 \cdot 10^{-19} = 2{,}755 \cdot 10^{-13}$ J
$m = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ (Zie BINAS tabel 7)

$$2{,}755 \cdot 10^{-13} = \tfrac{1}{2} \times 9{,}109 \cdot 10^{-31} \cdot v^2$$

$v = 7{,}77 \cdot 10^8$ m/s
Dit is niet gelijk aan de meest voorkomende snelheid $2{,}75 \cdot 10^8$ m/s.

f De vergelijking van de vervalreactie is ${}^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\mathrm{S} + {}^{0}_{-1}\beta$
Bij dit verval is het leptongetal behouden.
Vóór de reactie is het leptongetal gelijk aan nul.
Dus moet na de reactie het leptongetal ook gelijk zijn aan nul.
Een elektron heeft het leptongetal 1.
Dus moet er een deeltje ontstaan met leptongetal –1.
Dus is het deeltje een antineutrino.

g De energie die vrijkomt, wordt verdeeld over het elektron en het antineutrino.
Dus bij elke waarde van *n* is de som van de bijbehorende energieën gelijk aan 1,72 MeV.
Volgens figuur C.32 hebben de meeste elektronen een energie van (ongeveer) 0,51 MeV. Dan moeten de meeste antineutrino’s een energie hebben van 0, 71 MeV.
Dus is grafiek d de juiste.