

16

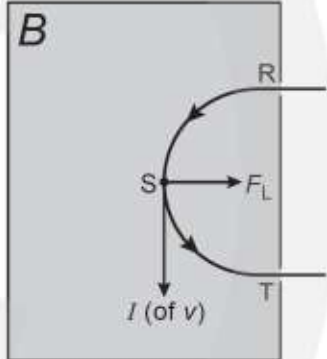
Elementaire deeltjes

vwo

16.1 Quarks en leptonen

Examenvragen vwo

Nieuw element

- 3p **a** Bepaal de richting van de magnetische inductie B .
Teken daartoe eerst in figuur 1 in het punt S:
- de richting van de stroom I of snelheid v ;
 - de richting van de lorentzkracht F_L op de ionen.
- | | |
|---------------------------------------|---|
| • juiste richting I of v | 1 |
| • juiste richting F_L | 1 |
| • B -veld gaat papier in (kruisjes) | 1 |
- 
- 5p **b** Bereken de grootte van de magnetische inductie B .
- inzicht $m = 48 u = 48 \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} = 7,97059 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ 1
 - $q \cdot U = \Delta E_K \rightarrow 2 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 2,4 \cdot 10^3 = \frac{1}{2} \cdot 7,97 \cdot 10^{-26} \cdot v^2 \rightarrow v = 1,389 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ 1
 - gebruik $F_L = F_{\text{mpz}} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$ 1
 - inzicht afstand $RT = 2 \cdot r$ en $q = 2e$ 1
 - $B = \frac{m \cdot v}{q \cdot r} \rightarrow B = \frac{7,97 \cdot 10^{-26} \cdot 1,389 \cdot 10^5}{2 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 0,263} = 0,1314 = 0,131 \text{ T}$ 1
- 4p **c** Beredeneer voor elk van de genoemde grootheden of de ingestelde waarde daartoe moet worden vergroot of verkleind.
- $q \cdot U = \Delta E_K \rightarrow$ een grotere spanning is nodig om de ionen een grotere snelheid te geven 1
 - de amplitude van de wisselspanning moet groter worden 1
 - bij een grotere snelheid is de verblijfstijd tussen de buisjes kleiner 1
 - de frequentie van de wisselspanning moet daarom groter worden 1
- 2p **d** Leg uit waarom die snelheid zeer groot moet zijn.
- beide atoomkernen zijn positief geladen en stoten elkaar af 1
 - er is veel kinetische energie nodig om deze afstotende krachten te overwinnen 1

- 3p e Ga na welke deeltjes vrijkomen. Stel daartoe de bijbehorende kernreactievergelijking op.
- ${}_{20}^{48}\text{Ca} + {}_{94}^{244}\text{Pu} \rightarrow {}_{114}^{288}\text{X} + 3 {}_0^1\text{n}$
 - ${}_{20}^{48}\text{Ca}$ en ${}_{94}^{244}\text{Pu}$ voor de pijl 1
 - juiste massagetal van de nieuwe kern 1
 - inzicht dat er neutronen vrijkomen 1
- 4p f Bereken met dit gegeven hoe lang het duurt totdat 75% van het aantal deeltjes van het gevormde element vervallen is.
- gebruik $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$ met $t = 30$ s 1
 - invullen $37 = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{t_{1/2}}} \rightarrow \log 0,37 = \frac{30}{t_{1/2}} \cdot \log 0,5 \rightarrow t_{1/2} = 20,9146$ s 1
 - inzicht $\frac{N}{N_0} = 0,25$ na twee keer de halveringstijd 1
 - $t = 2 \cdot t_{1/2} \rightarrow t = 2 \cdot 20,9146 = 41,829 = 42$ s 1

PET-scan

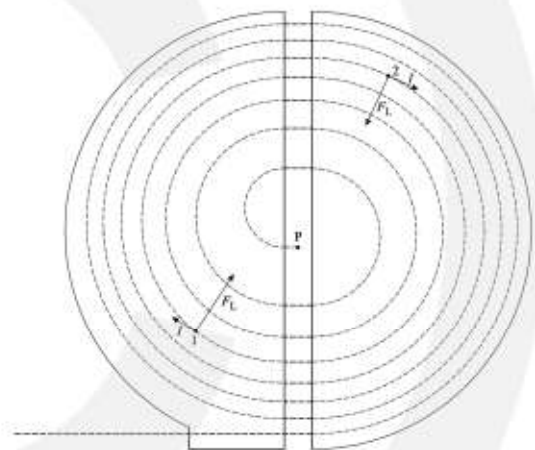
- 2p a Geef de kernreactievergelijking van de productie van het C-11-isotoop uit N-14.
- ${}_1^1\text{p} + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow {}_6^{11}\text{p} + {}_2^4\text{He}$
 - proton en N-14 voor de pijl 1
 - C-11 en α -deeltje na de pijl 1
- 3p b Bereken de orde van grootte van de tijdsduur Δt . Maak daarbij gebruik van een schatting en neem aan dat de fotonen overal bewegen met de lichtsnelheid in vacuüm.
- gebruik $s = v_{\text{gem}} \cdot t$ met $v_{\text{gem}} = c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s 1
 - schat de diameter van het hoofd op 20 cm (tussen 15 cm en 30 cm) 1
 - $t = \frac{\Delta x}{c} \rightarrow t = \frac{0,2}{3,0 \cdot 10^8} = 6,67 \cdot 10^{-10}$ s \rightarrow orde grootte $1 \cdot 10^{-9}$ s 1
- 4p c Bepaal de stralingsdosis die de hersenen ontvangen.
- gebruik $D = \frac{E}{m}$ 1
 - oppervlakte onder de grafiek \rightarrow
 $A_{\text{gem}} = 90 \cdot 10^6$ Bq $\rightarrow N_{\text{vervallen}} = 90 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 60 = 5,4 \cdot 10^{11}$ (marge $1 \cdot 10^{11}$) 1
 - $E_{\text{abs}} = E_{\text{deeltje}} \cdot N_{\text{vervallen}} \rightarrow 0,4 \cdot 10^8 \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 5,4 \cdot 10^{11} = 3,46075 \cdot 10^{-2}$ J 1
 - $D = \frac{3,46075 \cdot 10^{-2}}{1,5} = 2,307 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2}$ Gy 1

- 2p **d** Geef hiervoor, voor beide genoemde technieken, een reden. Gebruik de informatie in Binas tabel 29.
- een röntgenfoto laat zien hoeveel röntgenstraling wordt geabsorbeerd maar geeft geen informatie over specifieke weefsels 1
 - echografie geeft een beeld van zacht weefsel maar kan niet binnen een schedel worden gebruikt 1

Cyclotron

- 3p **a** Voer de volgende opdrachten uit:
- Geef in de figuur op de uitwerkbijlage in de punten 1 en 2 de richting van de elektrische stroom en de richting van de lorentzkracht aan.
 - Leg uit of het magneetveld in de ene trommel gelijk of tegengesteld gericht is aan het magneetveld in de andere trommel.

- I : raaklijn aan de baan met juiste richting 1
- F_L loodrecht op de baan naar middelpunt 1
- gebruik linkerhandregel → in beide halve cirkels heeft het B-veld dezelfde richting (uit het papier)



- 2p **b** Leg uit dat de elektrische kracht wel arbeid op de protonen verricht en de lorentzkracht niet. Gebruik hierbij de formule $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$.
- richting elektrische kracht is richting proton → $\alpha=0$ en $\cos \alpha = 1$ 1
 - richting lorentzkracht staat loodrecht op bewegingsrichting proton → $\alpha=90^\circ$ en $\cos \alpha = 0$ 1

- 4p **c** Leid de formule af met formules uit Binas.

- tijd voor halve cirkel is: $t = \frac{\pi r}{v}$ 1
- $Bqv = \frac{mv^2}{r}$ geeft $r = \frac{mv}{Bq}$ 1
- invullen: $t = \frac{\pi}{v} \cdot \frac{mv}{Bq}$ en v wegstrepen 2

- 3p **d** Leg van beide eigenschappen uit waarom dit zo is.
- volgens de formule hangt t niet af van r en/of v 1
 - inzicht $v \sim \sqrt{E_k}$ 1
 - bij een grotere snelheid is de snelheidstoename kleiner dan bij een kleinere snelheid 1

OOK GOED

- de snelheid neemt toe en de afstand ook → omlooptijd is constant 1
- door de grotere snelheid is de verblijftijd tussen de trommels kleiner 1
- de toename van de snelheid neemt af (want er is een constante versnelling) 1

3p e Bereken de frequentie van deze wisselspanning.

- $t = \frac{\pi m}{Bq} = \frac{\pi \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{1,5 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} = 2,19 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ 1
- gebruik $f = \frac{1}{T}$ met $T = 2t$ 1
- $f = \frac{1}{2 \cdot 2,19 \cdot 10^{-8}} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ 1

Large Hadron Collider

3p a Bereken hoe vaak de protonen deze spanning moeten doorlopen om een snelheid van $1,2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ te krijgen als ze vanuit stilstand versneld worden.

- gebruik $q \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ 1
- $1,602 \cdot 10^{-19} \cdot U = \frac{1}{2} \cdot 1,673 \cdot 10^{-27} \cdot (1,2 \cdot 10^7)^2 \rightarrow U = 7,518 \cdot 10^5 \text{ V}$ 1
- 5,0 kV per keer → aantal rondjes $\frac{7,518 \cdot 10^5}{5000} = 150,36 = 1,5 \cdot 10^2 \text{ keer}$ 1

3p b Bereken hoeveel procent de snelheid van de protonen dan verschilt van de lichtsnelheid.

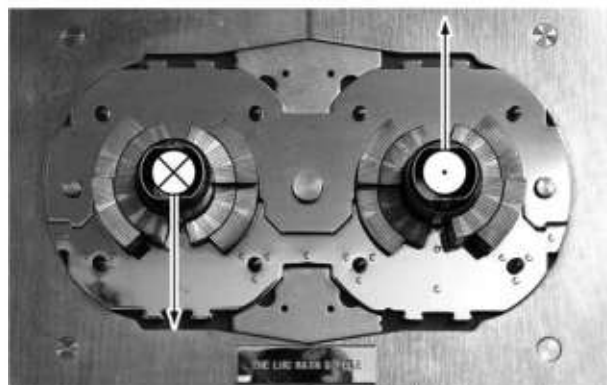
- inzicht $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} = 2\pi \cdot r \cdot f = \pi \cdot d \cdot f$ 1
- $v = \pi \cdot d \cdot f \rightarrow v = \pi \cdot 8485,8 \cdot 11245 = 2,997796 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ 1
- verschil met c: $\frac{2,99792458 \cdot 10^8 - 2,997796 \cdot 10^8}{2,99792458 \cdot 10^8} \cdot 100\% = 4,29 \cdot 10^{-3} = 0,004\%$ 1

2p c Leg uit aan de hand van figuur 1 dat een proton nooit de lichtsnelheid bereikt, hoe groot de kinetische energie ook is.

- als de lichtsnelheid wordt benaderd neemt de massa sterk toe 1
- om de lichtsnelheid te bereiken is oneindig veel energie nodig 1

2p d Teken in het rechterdeel van figuur 2 de richtingen van de magneetvelden in elke buis afzonderlijk.

- één pijl naar boven en één pijl naar beneden 1
- richting van beide pijlen juist 1



- 4p e Bereken de sterkte van het magneetveld.
- inzicht $F_{mpz} = F_L$ 1
 - gebruik $F_L = B \cdot q \cdot v$ 1
 - $E = 7,0 \text{ TeV} = 7,0 \cdot 10^{12} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} = 1,1215 \cdot 10^{-6} \text{ J}$ 1
 - $\frac{E}{r} = B \cdot q \cdot v \rightarrow \frac{1,1215 \cdot 10^{-6}}{4242,9} = B \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \cdot 2,997796 \cdot 10^8 \rightarrow B = 5,5 \text{ T}$ 1
- 4p f Bereken hoeveel protonen er in één groepje zitten.
- gebruik $I = \frac{Q}{t} \rightarrow Q = I \cdot t$ 1
 - $t = \frac{1}{11245} = 8,89284 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ 1
 - $Q = 0,582 \cdot 8,89284 \cdot 10^{-5} = 5,17563 \cdot 10^{-5} \text{ C} \rightarrow$
aantal protonen in één buis is $\frac{5,17563 \cdot 10^{-5}}{1,6022 \cdot 10^{-19}} = 3,23033 \cdot 10^{14}$ 1
 - 2808 groepjes geeft $\frac{3,23033 \cdot 10^{14}}{2808} = 1,15 \cdot 10^{11}$ protonen per groepje 1
- 3p g Laat met een berekening zien of de energie van de twee botsende protonen genoeg is om een Higgs-deeltje te laten ontstaan.
- vergelijk de massa van een Higgs-deeltje met $E = 7,0 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ J}$ 1
 - gebruik $E = m \cdot c^2$ 1
 - $1,12 \cdot 10^{-6} = m \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \rightarrow m = 1,25 \cdot 10^{-23} \text{ kg} \rightarrow$ meer dan 10^{-25} dus genoeg 1

Op zoek naar Higgs

- 3p a Leg uit of het deeltje een muon of een anti-muon is. Geef daartoe in figuur 2 de richtingen van het magnetisch veld en van de lorentzkracht binnen de spoel aan.
- de lorentzkracht is naar beneden gericht \rightarrow teken een pijl naar beneden 1
 - B-veld het papier in \rightarrow linkerhandregel stroom van rechts naar links 1
 - deeltjes bewegen van links naar rechts \rightarrow negatieve lading \rightarrow muonen 1
- 2p b Leg uit welke van de aangegeven banen de juiste is.
- antideeltje heeft tegenovergestelde lading 1
 - deeltje beweegt naar links \rightarrow lorentzkracht omlaag \rightarrow baan b is juist 1
- 2p c Toon aan dat het deel van de formule links van het = teken dezelfde eenheid heeft als het deel rechts van het = teken.
- $[F_L] = [B \cdot q \cdot v] \rightarrow \text{N} = \text{T} \cdot \text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 1
 - $[E] = [B \cdot q \cdot c \cdot r] \rightarrow \text{N} \cdot \text{m} = \text{T} \cdot \text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m} \rightarrow \text{N} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$ 1

- 4p **d** Leg voor beide oorzaken uit of ze de grotere straal van de cirkelbaan kunnen verklaren.
- als de deeltjes afremmen wordt E kleiner → r wordt kleiner 1
 - oorzaak I kan de grotere straal NIET verklaren 1
 - als B kleiner wordt en E gelijk blijft wordt r groter 1
 - oorzaak II kan de grotere straal WEL verklaren 1
- 4p **e** Maak hiermee een schatting van de massa van het Higgs-deeltje in kg.
Bepaal daartoe eerst in de figuur op de uitwerkbijlage de straal van de baan die het wegschietend deeltje binnen de spoel beschrijft.
- schat de straal op 5 m (marge 2 m) 1
 - $E = B \cdot q \cdot c \cdot r \rightarrow E = 4,2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \cdot 5 = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ J}$ 1
 - gebruik $E = m \cdot c^2$ 1
 - $1,0 \cdot 10^{-9} = m \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \rightarrow m = 1,12 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
 - 4 deeltjes → $m_{\text{Higgs}} = 4 \cdot 1,12 \cdot 10^{-26} = 4,5 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ 1

16.2 Samengestelde deeltjes

1**

a Leg dit uit.

- quark 1 keuze uit 6 | quark 2 keuze uit 6 | quark 3 keuze uit 6
- totaal $6 \cdot 6 \cdot 6 = 216$ keuzes
- volgorde van kiezen is onbelangrijk \rightarrow delen door $3! = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$
- $\frac{216}{6} = 36$ verschillende baryonen maken

b Hoeveel verschillende baryonen kun je maken als je wél rekening houdt met de quarkkleur?

- er zijn 6 quarks in 3 kleuren dus in totaal 18 verschillende quarks
- een baryon bevat 3 quarks met verschillende kleuren
- quark 1 keuze uit 18 | quark 2 keuze uit 12 | quark 3 keuze uit 6
- totaal $18 \cdot 12 \cdot 6 = 1296$ keuzes
- volgorde van kiezen is onbelangrijk \rightarrow delen door $3! = 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$
- $\frac{1296}{6} = 216$ verschillende baryonen maken

c Hoeveel verschillende mesonen kun je maken als je geen rekening houdt met quarkkleur?

- quark 1 keuze uit 6 | quark 2 keuze uit 6
- totaal $6 \cdot 6 = 36$ keuzes
- volgorde van kiezen is onbelangrijk \rightarrow delen door $2! = 2 \cdot 1 = 2$
- $\frac{36}{2} = 18$ verschillende mesonen maken

d Hoeveel verschillende mesonen kun je maken als je wél rekening houdt met quarkkleur?

- er zijn 6 quarks in 3 kleuren dus in totaal 18 verschillende quarks
- een meson bevat een quark en een antiquark met de anti-kleur
- quark 1 keuze uit 18 | quark 2 keuze uit 6
- totaal $18 \cdot 6 = 108$ keuzes
- volgorde van kiezen is onbelangrijk \rightarrow delen door $2! = 2 \cdot 1 = 2$
- je kunt $\frac{108}{2} = 54$ verschillende mesonen maken

16.3 Krachtdeeltjes

1** a Bereken de afstotende elektromagnetische kracht tussen de twee protonen in een He-kern.

- $F_{el} = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ met $q_1 = q_2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ | $r = 10^{-15} \text{ m}$

- $F_{el} = 8,9876 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ N}$

b Hoe groot is de versnelling die een proton door deze kracht zou krijgen?

- $\Sigma F = 2,3 \cdot 10^2 \text{ N}$ | $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ | $a = \dots \text{ m/s}^2$

- $\Sigma F = m \cdot a$

- $2,3 \cdot 10^2 = 1,6726 \cdot 10^{-27} \rightarrow a = 1,3751 \cdot 10^{29} = 1,4 \cdot 10^{29} \text{ m/s}^2$

c Bereken hoe lang een He-atoom kan bestaan als er alleen elektromagnetische is.

- $s = 10^{-10} \text{ m}$ | $a = 1,3751 \cdot 10^{29} \text{ m/s}^2$ | $t = \dots \text{ s}$

- $v_{gem} = \frac{\Delta v}{2} \rightarrow v_{gem} = \frac{a \cdot t}{2}$

- $s = v_{gem} \cdot t \rightarrow s = \frac{a \cdot t}{2} \cdot t \rightarrow s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$

- $10^{-10} = \frac{1}{2} \cdot 1,3751 \cdot 10^{29} \cdot t^2 \rightarrow t = 3,8137 \cdot 10^{-20} = 3,8 \cdot 10^{-20} \text{ s}$

2*** a Hoe groot is dan de minimale onbepaaldheid van de tijd?

- massa is $80,39 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow \Delta E = 80,39 \cdot 10^9 \cdot 1,602177 \cdot 10^{-19} = 1,28799 \cdot 10^{-8} \text{ J}$

- $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$

- $1,28799 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta t \geq \frac{6,62607 \cdot 10^{-34}}{4\pi} \rightarrow \Delta t = 4,09387 \cdot 10^{-27} = 4,1 \cdot 10^{-27} \text{ s}$

b Wat valt op als je dit vergelijkt met de levensduur van een W-deeltje?

- het W-deeltje heeft een levensduur van $3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

- dit is ongeveer 100 keer de onbepaaldheid van de tijd

c Hoeveel afstand kan het deeltje dan volgens de klassieke natuurkunde afleggen.

- $v_{gem} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ | $t = 3,0 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ | $s = \dots \text{ m}$

- $s = v_{gem} \cdot t$

- $s = 3,0 \cdot 10^8 \cdot 3,0 \cdot 10^{-25} = 9,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}$

d Geef hiervoor een verklaring.

- het W-deeltje heeft een relativistische snelheid
- in het referentiestelsel van het W-deeltje gaat de tijd langzamer
- hierdoor kan het W-deeltje verder reizen

3^{***} VERVOLG

a Hoeveel tijd heeft een gluon nodig om met de lichtsnelheid deze afstand af te leggen?

- $s = 1,0 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad | \quad v_{\text{gem}} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad | \quad t = \dots \text{ s}$
- $s = v_{\text{gem}} \cdot t$
- $1,0 \cdot 10^{-15} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot t \rightarrow t = 3,333 \cdot 10^{-24} = 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$

b Als we deze tijd opvatten als onbepaaldheid van de tijd, hoe groot is dan de minimale onbepaaldheid van de energie?

- $\Delta t = 3,333 \cdot 10^{-24} \text{ s} \quad | \quad \Delta E = \dots \text{ J}$
- $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$
- $\Delta E \cdot 3,333 \cdot 10^{-24} \geq \frac{6,62607 \cdot 10^{-34}}{4\pi} \rightarrow \Delta E = 1,582 \cdot 10^{-11} = 1,6 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

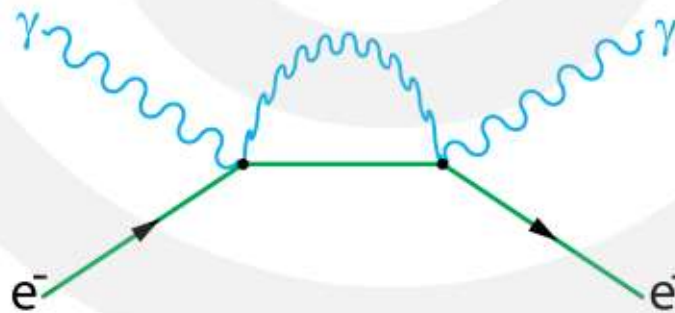
c Hoeveel MeV is dit?

- $\Delta E = 1,582 \cdot 10^{-11} \text{ J} = \frac{1,582 \cdot 10^{-11}}{1,602177 \cdot 10^{-13}} = 98,74 = 99 \text{ MeV}$

16.4 Feynmandiagrammen

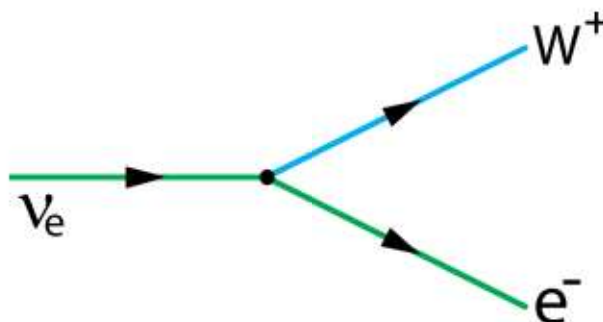
1*** Comptonverstrooiing

- a Leg uit of de kinetische energie van het uitgaande elektron groter, kleiner of gelijk is aan de kinetische energie van het ingaande elektron.
- het rode uitgezonden foton heeft minder energie dan het blauwe opgenomen foton
 - behoud van energie → het uitgaande elektron heeft meer kinetische energie dan het ingaande elektron
- b Leg uit of bij reactie 1 de kinetische energie van het elektron tussen de twee vertexen groter, kleiner of gelijk is aan de kinetische energie van het ingaande elektron.
- bij reactie 1 heeft het elektron bij vertex 1 een blauw foton geabsorbeerd
 - hierdoor is zijn kinetische energie toegenomen
- c Leg uit of bij reactie 2 de kinetische energie van het elektron tussen de twee vertexen groter, kleiner of gelijk is aan de kinetische energie van het ingaande elektron.
- bij reactie 2 heeft het elektron bij vertex 1 een rood foton uitgezonden
 - hierdoor is zijn kinetische energie afgenomen
- d Verzin een derde mogelijke reactie en teken hiervan het feynmandiagram.
- bij vertex 1 wordt een foton uitgezonden en hetzelfde foton wordt bij vertex 2 weer geabsorbeerd

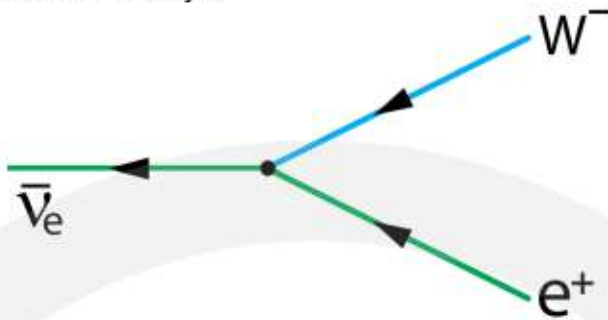


2*** Verstrooiing van W^+ deeltjes en elektronen

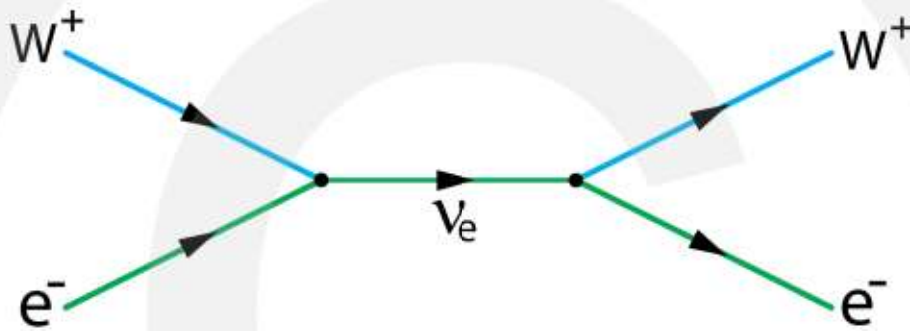
- a Geef het feynmandiagram van deze reactie.



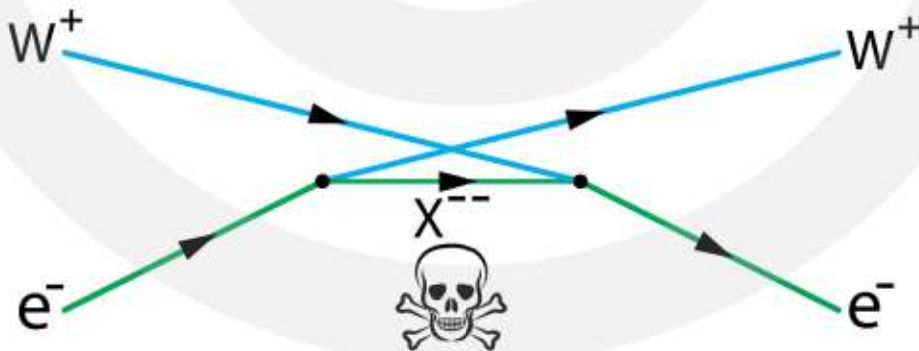
b Geef het feynmandiagram van de reactie waarbij een anti-elektron-neutrino vervalt in een positron en een W^- deeltje.



c Geef het feynmandiagram van het proces waarin een W^+ deeltje en een elektron worden verstrooid.



d Geef het feynmandiagram van het proces waarin eerst een W^+ deeltje wordt uitgezonden en daarna een W^+ deeltje wordt geabsorbeerd.

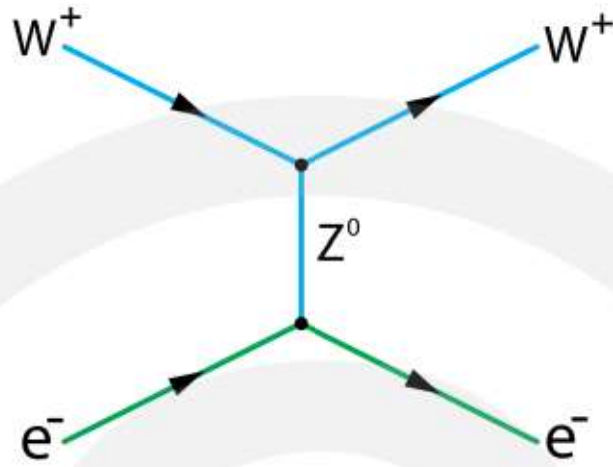


e Leg uit waarom dit proces niet mogelijk is.

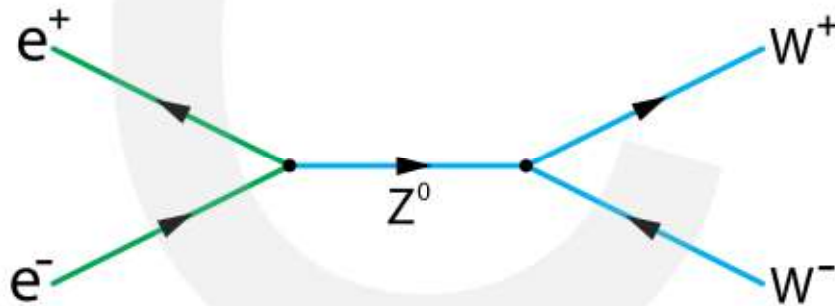
- het deeltje tussen de twee vertexen moet elektrische lading -2 hebben
- er bestaat geen elementair deeltje met elektrische lading -2

3* De ontdekking van het Z^0 deeltje**

a Geef het feynmandiagram van deze reactie.



b Geef het feynmandiagram van een gekruisd proces van vraag a. Een elektron en een positron annihileren tot een Z^0 deeltje wat daarna vervalt in een W^+ en een W^- deeltje.



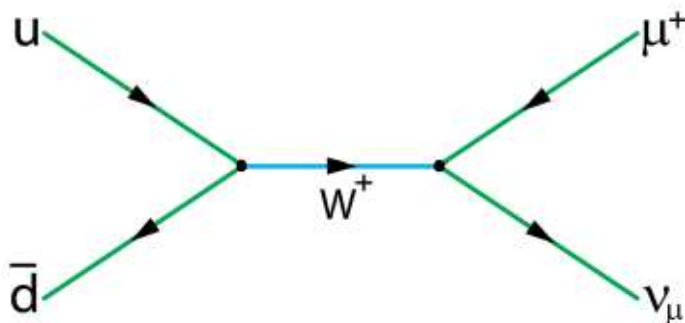
4* Pion verval**

a Geef de reactievergelijking van het π^+ en van het π^- verval.

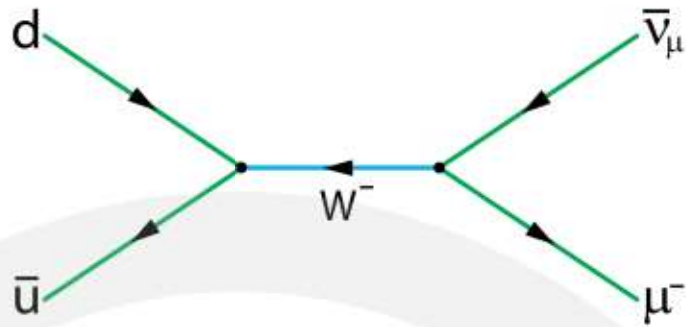
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

b Geef de feynmandiagrammen van deze reacties.

- π^+ verval



- π^- verval



5*** Neutron verval

Het neutron vervalt volgens de reactie: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Maak met gebruik van het neutron verval de volgende reactievergelijkingen af.

a $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e$

b $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

c $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

d $\nu_e \rightarrow p + \bar{n} + e^-$

e Teken het feynmandiagram van de reacties a en d

- **DOEN**

16.5 Behoudswetten

1* a Hoe groot is het baryongetal van een meson?

- nul

b Hoe groot is het leptongetal van een meson?

- nul

c Hoe groot is het baryongetal van een lepton?

- nul

d Hoe groot is het leptongetal van een baryon?

- nul

2* a Leg uit of in deze reactie het baryongetal behouden is.

- $B_{\text{voor}} = 1 \quad | \quad B_{\text{na}} = 1$

- het baryongetal is behouden

b Leg uit waarom er geen neutron kan ontstaan.

- $e^- + e^+ \rightarrow$

- $B_{\text{voor}} = 0$

- $B_{\text{voor}} = B_{\text{na}} \rightarrow B_{\text{na}} = 0 \rightarrow$ er kan geen neutron ontstaan

3** a $p + n \rightarrow p + p + \bar{p}$

- $Q_{\text{voor}} = 1 \quad | \quad Q_{\text{na}} = 1 \quad \rightarrow$ er is behoud van lading

- $B_{\text{voor}} = 2 \quad | \quad B_{\text{na}} = 1 \quad \rightarrow$ er is GEEN behoud van baryongetal

- $L_{e \text{ voor}} = 0 \quad | \quad L_{e \text{ na}} = 0 \quad \rightarrow$ er is behoud van e-leptongetal

- $L_{\mu \text{ voor}} = 0 \quad | \quad L_{\mu \text{ na}} = 0 \quad \rightarrow$ er is behoud van μ -leptongetal

- $L_{\tau \text{ voor}} = 0 \quad | \quad L_{\tau \text{ na}} = 0 \quad \rightarrow$ er is behoud van τ -leptongetal

- de reactie is NIET mogelijk

b $p + p \rightarrow p + p + \bar{p} + p$

- $Q_{\text{voor}} = 2 \quad | \quad Q_{\text{na}} = 2 \quad \rightarrow$ er is behoud van lading

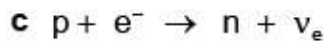
- $B_{\text{voor}} = 2 \quad | \quad B_{\text{na}} = 2 \quad \rightarrow$ er is behoud van baryongetal

- $L_{e \text{ voor}} = 0 \quad | \quad L_{e \text{ na}} = 0 \quad \rightarrow$ er is behoud van e-leptongetal

- $L_{\mu \text{ voor}} = 0 \quad | \quad L_{\mu \text{ na}} = 0 \quad \rightarrow$ er is behoud van μ -leptongetal

- $L_{\tau \text{ voor}} = 0 \quad | \quad L_{\tau \text{ na}} = 0 \quad \rightarrow$ er is behoud van τ -leptongetal

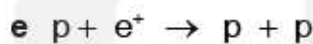
- de reactie is mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 0$ | $Q_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 1$ | $L_{e \text{ na}} = 1$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 0$ | $Q_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is geen behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 1$ | $L_{e \text{ na}} = -1$ → er is GEEN behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk

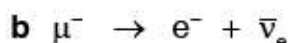


- $Q_{\text{voor}} = 2$ | $Q_{\text{na}} = 2$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 2$ → er is GEEN behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = -1$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is GEEN behoud van leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk

4***

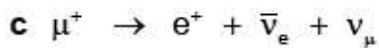


- $Q_{\text{voor}} = -1$ | $Q_{\text{na}} = -1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 0$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 1$ | $L_{\mu \text{ na}} = 1$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk

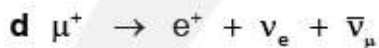


- $Q_{\text{voor}} = -1$ | $Q_{\text{na}} = -1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 0$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 1$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is GEEN behoud van μ -leptongetal

- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 1$ | $Q_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 0$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = -2$ → er is GEEN behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = -1$ | $L_{\mu \text{ na}} = 1$ → er is GEEN behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 1$ | $Q_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 0$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = -1$ | $L_{\mu \text{ na}} = -1$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk

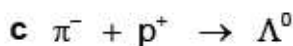
5***



- $Q_{\text{voor}} = -1$ | $Q_{\text{na}} = -1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 0$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 2$ → er is GEEN behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 0$ | $Q_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk



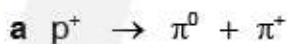
- $Q_{\text{voor}} = 0$ | $Q_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal

- $L_e \text{ voor} = 0$ | $L_e \text{ na} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_\mu \text{ voor} = 0$ | $L_\mu \text{ na} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_\tau \text{ voor} = 0$ | $L_\tau \text{ na} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 1$ | $Q_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal
- $L_e \text{ voor} = 0$ | $L_e \text{ na} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_\mu \text{ voor} = 0$ | $L_\mu \text{ na} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_\tau \text{ voor} = 0$ | $L_\tau \text{ na} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk

6***



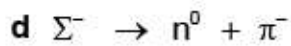
- $Q_{\text{voor}} = 1$ | $Q_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is GEEN behoud van baryongetal
- $L_e \text{ voor} = 0$ | $L_e \text{ na} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_\mu \text{ voor} = 0$ | $L_\mu \text{ na} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_\tau \text{ voor} = 0$ | $L_\tau \text{ na} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 1$ | $Q_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 0$ → er is GEEN behoud van baryongetal
- $L_e \text{ voor} = 0$ | $L_e \text{ na} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_\mu \text{ voor} = 0$ | $L_\mu \text{ na} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_\tau \text{ voor} = 0$ | $L_\tau \text{ na} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 1$ | $Q_{\text{na}} = -1$ → er is GEEN behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal
- $L_e \text{ voor} = -1$ | $L_e \text{ na} = 1$ → er is GEEN behoud van e-leptongetal
- $L_\mu \text{ voor} = 0$ | $L_\mu \text{ na} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_\tau \text{ voor} = 0$ | $L_\tau \text{ na} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is NIET mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = -1$ | $Q_{\text{na}} = -1$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk



- $Q_{\text{voor}} = 0$ | $Q_{\text{na}} = 0$ → er is behoud van lading
- $B_{\text{voor}} = 1$ | $B_{\text{na}} = 1$ → er is behoud van baryongetal
- $L_{e \text{ voor}} = 0$ | $L_{e \text{ na}} = 0$ → er is behoud van e-leptongetal
- $L_{\mu \text{ voor}} = 0$ | $L_{\mu \text{ na}} = 0$ → er is behoud van μ -leptongetal
- $L_{\tau \text{ voor}} = 0$ | $L_{\tau \text{ na}} = 0$ → er is behoud van τ -leptongetal
- de reactie is mogelijk

16.6 Behoud van impuls en van energie

Behoud van impuls

- 1**
- a** Leg uit waarom dit het geval is.
- voor het schot is de impuls nul
 - na het schot heeft de kogel een snelheid naar rechts
 - impulsbehoud: $\Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}}$
 - na het schot moet het kanon een snelheid naar links hebben
- b** Bereken de snelheid van het kanon vlak na het schot.
- $m_{\text{kanon}} = 2000 \text{ kg}$ | $m_{\text{kogel}} = 40 \text{ kg}$ | $v_{\text{kogel}} = 300 \text{ m/s}$ | $v_{\text{kanon}} = \dots \text{ m/s}$
 - impulsbehoud: $\Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}}$
 - $0 = 40 \cdot 300 + 2000 \cdot v_{\text{kanon}} \rightarrow v_{\text{kanon}} = 6,0 \text{ m/s}$

Inelastische botsing

- 2**
- a** Bereken met welke snelheid de wrakken over de weg schuiven.
- $m_A = 1400 \text{ kg}$ | $m_B = 1600 \text{ kg}$ | $v_A = 12 \text{ m/s}$ | $v_B = 0 \text{ m/s}$
 - impulsbehoud: $\Sigma \vec{p}_{\text{voor}} = \Sigma \vec{p}_{\text{na}}$
 - $1400 \cdot 12 + 0 = (1400 + 1600) \cdot v_{\text{na}} \rightarrow v_{\text{na}} = 5,6 \text{ m/s}$
- b** Leg uit waarom het indeuken van de auto's ervoor zorgt dat de botsing niet elastisch is.
- het kost arbeid (kracht keer afstand) om de auto te vervormen
 - deze arbeid is niet meer beschikbaar als kinetische energie
- c** Bereken hoeveel kinetische energie er wordt omgezet in warmte.
- $m_A = 1400 \text{ kg}$ | $m_B = 1600 \text{ kg}$ | $v_A = 12 \text{ m/s}$ | $v_{AB} = 5,6 \text{ m/s}$
 - voor de botsing: $E_K = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 \rightarrow E_K = \frac{1}{2} \cdot 1400 \cdot 12^2 = 1,008 \cdot 10^5 \text{ J}$
 - na de botsing: $E_K = \frac{1}{2} m \cdot v_{AB}^2 \rightarrow E_K = \frac{1}{2} \cdot (1400 + 1600) \cdot 5,6^2 = 4,704 \cdot 10^4 \text{ J}$
 - er is $1,008 \cdot 10^5 - 4,704 \cdot 10^4 = 5,376 \cdot 10^4 = 5,4 \cdot 10^4 \text{ J}$ omgezet

Elastische botsing

- 3**
- a** Leg uit wie er gelijk heeft: Jikke, Olav of geen van beiden.
- voor de botsing: $\Sigma p_{\text{voor}} = p_r + p_w = m \cdot v - m \cdot v = 0$
 - volgens Olav: $\Sigma p_{\text{na}} = m \cdot 2v$ en dit is niet gelijk aan nul \rightarrow Olav heeft geen gelijk
 - voor de botsing: $\Sigma E_{K \text{ voor}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} m \cdot v^2\right)$

- volgens Jikke: $\Sigma E_{K\ na} = 0$ en dit is niet gelijk aan E_K voor de botsing \rightarrow Jikke heeft geen gelijk

b Hoe bewegen de biljardballen na de botsing wel?

- E_K -behoud: $\Sigma E_{K\ voor} = \Sigma E_{K\ na} \rightarrow$ snelheden zijn na de botsing even groot als ervoor
- p -behoud: $\Sigma p_{voor} = \Sigma p_{na} = 0 \rightarrow$ snelheden zijn tegengesteld
- bij de botsing kaatsen de biljardballen met dezelfde snelheid als waarmee ze aankomen terug
- van iedere bal keert de beweging om

4***

a Toon met een berekening aan dat na de botsing één van de ballen stil ligt.

- behoud van energie: $\frac{1}{2} m_A \cdot v_{A\ voor}^2 = \frac{1}{2} m_A \cdot v_{A\ na}^2 + \frac{1}{2} m_B \cdot v_{B\ na}^2$
- behoud van impuls: $m_A \cdot v_{A\ voor} = m_A \cdot v_{A\ na} + m_B \cdot v_{B\ na}$
- $m_A = m_B \rightarrow$ massa wegstrepen
- energie: $\frac{1}{2} v_{A\ voor}^2 = \frac{1}{2} v_{A\ na}^2 + \frac{1}{2} v_{B\ na}^2 \rightarrow v_{A\ voor}^2 = v_{A\ na}^2 + v_{B\ na}^2$ ($\frac{1}{2}$ wegstrepen)
- impuls: $v_{A\ voor} = v_{A\ na} + v_{B\ na} \rightarrow v_{A\ voor}^2 = v_{A\ na}^2 + 2 \cdot v_{A\ na} \cdot v_{B\ na} + v_{B\ na}^2$
- combineer: $v_{A\ na}^2 + 2 \cdot v_{A\ na} \cdot v_{B\ na} + v_{B\ na}^2 = v_{A\ na}^2 + v_{B\ na}^2 \rightarrow 2 \cdot v_{A\ na} \cdot v_{B\ na} = 0$
- $v_{A\ na} \cdot v_{B\ na} = 0 \rightarrow v_{A\ na} = 0$ of $v_{B\ na} = 0$

b Beredeneer welke van de twee ballen na de botsing stil ligt.

- stel: $v_{B\ na} = 0$ dan volgt: $v_{A\ voor} = v_{A\ na} \rightarrow$ A rolt met dezelfde snelheid verder
- stel: $v_{A\ na} = 0$ dan volgt: $v_{A\ voor} = v_{B\ na} \rightarrow$ B krijgt dezelfde snelheid als A voor de botsing
- als A met dezelfde snelheid verder rolt heeft er geen botsing plaatsgevonden
- conclusie: na de botsing ligt A stil en rolt B verder met $v_{B\ na} = v_{A\ voor}$

5****

a Welke snelheden verwacht je voor de pingpongbal en de voetbal na de botsing?

- je verwacht de pingpongbal met vrijwel dezelfde snelheid (10 m/s) terug stuitert
- je verwacht dat de voetbal stil blijft liggen (een verwaarloosbare snelheid krijgt)

b Bereken de snelheid van de pingpongbal en van de voetbal na de botsing.

- behoud van impuls: $\Sigma \vec{p}_{voor} = \Sigma \vec{p}_{na}$
- voor de botsing: $p_A = 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \mid p_B = 0$
- $2,0 \cdot 10^{-2} = 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot v_A + 400 \cdot 10^{-3} \cdot v_B \rightarrow 20 = 2 \cdot v_A + 400 \cdot v_B$
- behoud van kinetische energie: $\Sigma E_{K\ voor} = \Sigma E_{K\ na}$
- voor de botsing: $E_{KA} = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \mid E_{KB} = 0$

- $0,1 = \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot v_A^2 + \frac{1}{2} \cdot 400 \cdot 10^{-3} \cdot v_B^2 \rightarrow 100 = v_A^2 + 200 \cdot v_B^2$
- impulsbehoud $\rightarrow 20 = 2 \cdot v_A + 400 \cdot v_B \rightarrow v_A = 10 - 200 \cdot v_B$
- $v_A^2 = 100 - 4000 \cdot v_B + 4,0 \cdot 10^4 \cdot v_B^2$
- invullen $\rightarrow 100 = 100 - 4000 \cdot v_B + 4,0 \cdot 10^4 \cdot v_B^2 + 200 \cdot v_B^2$
- $4,02 \cdot 10^4 \cdot v_B^2 - 4000 \cdot v_B = 0 \rightarrow 4,02 \cdot 10^4 \cdot v_B = 4000$
- $v_B = \frac{4000}{4,02 \cdot 10^4} = 9,95 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
- $v_A = 10 - 200 \cdot v_B \rightarrow v_A = 10 - 200 \cdot 9,95 \cdot 10^{-2} = -9,9 \text{ m/s}$

Botsing van twee deeltjes met grote snelheid ($v \approx c$)

6***

a Laat zien dat een deeltje met rustmassa m_0 nooit de lichtsnelheid kan hebben.

- als v de lichtsnelheid nadert gaat $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ naar nul
- hierdoor wordt γ oneindig groot en daarmee de impuls ook
- de impuls van een deeltje kan niet oneindig groot zijn

b Laat zien dat voor snelheden tot 10% van de lichtsnelheid γ benaderd kan worden

met: $\gamma \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2}$.

- vul in $v = 0,1 \cdot c$ voor beide formules
- $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,1c)^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,01}} = \frac{1}{\sqrt{0,99}} = 1,00504$
- $\gamma \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{(0,1c)^2}{c^2} = 1 + \frac{1}{2} \cdot 0,01 = 1 + 0,005 = 1,005$

c Laat zien dat voor de totale energie geldt: $E = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2$

- $E^2 = (\gamma \cdot m_0 \cdot v)^2 \cdot c^2 + (m_0 \cdot c^2)^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot v^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4$
- $E^2 = m_0^2 \cdot c^4 \cdot \left(\gamma^2 \cdot \frac{v^2}{c^2} + 1 \right) = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4 \cdot \left(\frac{v^2}{c^2} + \frac{1}{\gamma^2} \right)$
- $E^2 = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4 \cdot \left(\frac{v^2}{c^2} + 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \gamma^2 \cdot m_0^2 \cdot c^4$

7***

a Bereken hoe groot de totale massa van de nieuwe deeltjes maximaal kan zijn.

- $m_0 = 938,272 \text{ MeV}/c^2 \quad | \quad E_K = 1500 \text{ MeV}/c^2 \quad | \quad E = \dots \text{ MeV}$
- $E = E_K + E_0$
- $E = 1500 + 938,272 = 2438,272 \text{ MeV}$
- twee deeltjes: $E = 2 \cdot 2438,272 = 4876,544 = 4877 \text{ MeV}$

- b** Waarom gaat het hier om de maximale massa van de nieuwe deeltjes?
- alleen als de deeltjes die ontstaan stilstaan is alle energie beschikbaar voor het maken van massa
 - als de ontstane deeltjes kinetische energie (snelheid) hebben is er minder energie beschikbaar voor het maken van massa
- c** Leg uit of er nu meer, minder of even veel energie beschikbaar is voor de vorming van nieuwe deeltjes.
- impulsbehoud: $\sum \vec{p}_{\text{voor}} = \sum \vec{p}_{\text{na}}$
 - voor de botsing is er impuls en na de botsing dus ook
 - de ontstane deeltjes hebben snelheid en dus kinetische energie
 - er is minder energie beschikbaar voor het maken van massa

8***

- a** Zijn bij dit verval de leptongetallen behouden?
- voor de reactie: $L_{\mu} = 1$ en $L_e = 0$
 - na de reactie: $L_{\mu} = 1$ en $L_e = 1 - 1 = 0$
 - de leptongetallen zijn behouden
- b** Leg uit waarom.
- $\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \gamma \rightarrow L_{\mu \text{ voor}} = 1$ en $L_{\mu \text{ na}} = 0$ | $L_{e \text{ voor}} = 0$ en $L_{e \text{ na}} = 1$
 - de leptongetallen zijn niet behouden
 - $\mu^{-} \rightarrow e^{-} + e^{+} + e^{-} \rightarrow L_{\mu \text{ voor}} = 1$ en $L_{\mu \text{ na}} = 0$ | $L_{e \text{ voor}} = 0$ en $L_{e \text{ na}} = 1$
 - de leptongetallen zijn niet behouden
- c** Bereken de totale kinetische energie van het elektron en van de twee neutrino's. Verwaarloos hierbij de massa van de neutrino's.
- zoek op rustmassa muon is $105,66 \text{ MeV}/c^2$
 - totale energie van elektron + neutrino's is $105,66 \text{ MeV}/c^2$
 - zoek op rustmassa elektron is $0,511 \text{ MeV}/c^2$
 - relativiteit: $E - E_0 = E_K$
 - $105,66 - 0,511 = 105,149 \rightarrow E_K = 105,149 = 105 \text{ MeV}$
- d** Welke γ -factor hebben elektronen met deze hoeveelheid energie?
- muon massa = $105,66 \text{ MeV} / c^2 \rightarrow 105,66 \text{ MeV}$ komt vrij
 - $105,66 \cdot 1,602176565 \cdot 10^{-13} = 1,69285976 \cdot 10^{-11} \text{ J}$
 - $E = \gamma \cdot m_0 \cdot c^2$
 - $1,69286 \cdot 10^{-11} = \gamma \cdot 9,10938 \cdot 10^{-31} \cdot (2,99792 \cdot 10^8)^2 \rightarrow \gamma = 206,77$
(5 significante cijfers)