

16 Elementaire deeltjes vwo

16.1 Quarks en leptonen

Examenvragen vwo

Nieuw element

Lees het artikel.

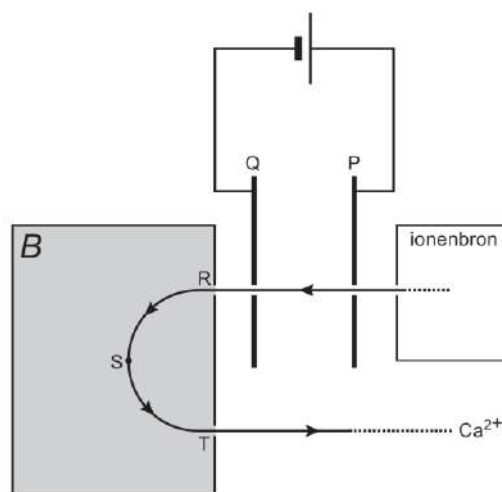
Kernfysici zien nieuw element

Russische onderzoekers hebben vermoedelijk het element met atoomnummer 114 geproduceerd. Al tientallen jaren proberen natuurkundigen met deeltjesversnellers kunstmatig zware kernen te maken. Zij schieten lichte kernen met hoge snelheid op zware kernen af in de hoop samensmelting tot stand te brengen.

Bij het Russische onderzoek werden calcium-48-ionen geschoten op plutonium-244. Uit het radioactief verval van de gevormde atoomkern konden de onderzoekers afleiden dat bij deze botsing de isotoop met 175 neutronen van element 114 gevormd was. Het gevormde element zou een levensduur hebben van 30 seconde, buitengewoon lang voor zo'n zware atoomkern.

naar: NRC Handelsblad, 30-01-1999

In een ionenbron worden verschillende calciumionen geproduceerd. Deze ionen worden gescheiden door ze eerst in een elektrisch veld te versnellen en daarna in een magnetisch veld af te buigen. In figuur 1 is schematisch de opstelling getekend met daarin de baan die een Ca^{2+} -ion doorloopt.



Figuur 1

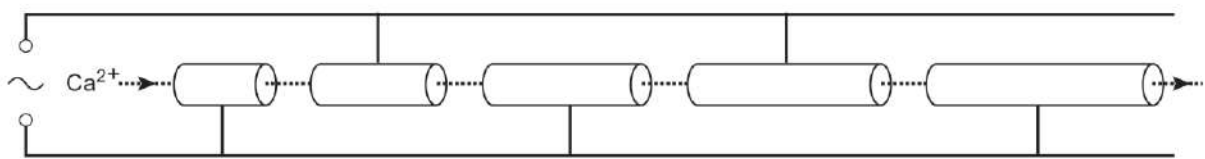
Binnen de linker rechthoek heerst een homogeen magnetisch veld B dat loodrecht op het vlak van tekening staat.

- 3p **a** Bepaal de richting van de magnetische inductie B .
Teken daartoe eerst in de figuur in het punt S:
– de richting van de stroom I of snelheid v
– de richting van de lorentzkracht F_L op de ionen

Het Ca^{2+} -ion verlaat de ionenbron met een verwaarloosbare snelheid. De spanning tussen de platen P en Q is 2,40 kV. De afstand RT bedraagt 52,6 cm.

- 5p **b** Bereken de grootte van de magnetische inductie B .

Omdat het Ca^{2+} -ion een zeer grote snelheid moet krijgen, wordt het vervolgens door een lineaire versneller geleid. Zo'n versneller bestaat uit een aantal cilindervormige metalen buisjes, die zijn aangesloten op een wisselspanning. Zie figuur 2.



Figuur 2

De snelheid waarmee het Ca^{2+} -ion uit de versneller komt, hangt samen met de amplitude en frequentie van de wisselspanning. Men wil deze snelheid verhogen.

- 3p **c** Beredeneer voor elk van de genoemde grootheden (amplitude en frequentie) of de ingestelde waarde daartoe moet worden vergroot of verkleind.

Om een calciumkern te laten samensmelten met een plutoniumkern is het nodig dat het calciumion met een zeer grote snelheid naar de plutoniumkern geschoten wordt.

- 2p **d** Leg uit waarom die snelheid zeer groot moet zijn.

Bij de botsing met de plutoniumkern ontstaat de in het artikel genoemde isotoop en komen er nog enkele deeltjes vrij.

- 3p **e** Ga na welke deeltjes vrijkomen. Stel daartoe de bijbehorende kernreactievergelijking op.

Het nieuw gevormde element is radioactief. In het artikel wordt gesproken over de levensduur van het nieuwe element. Onder de levensduur van een aantal radioactieve deeltjes verstaat men de tijd die verloopt tot er nog maar 37% van het oorspronkelijke aantal deeltjes over is.

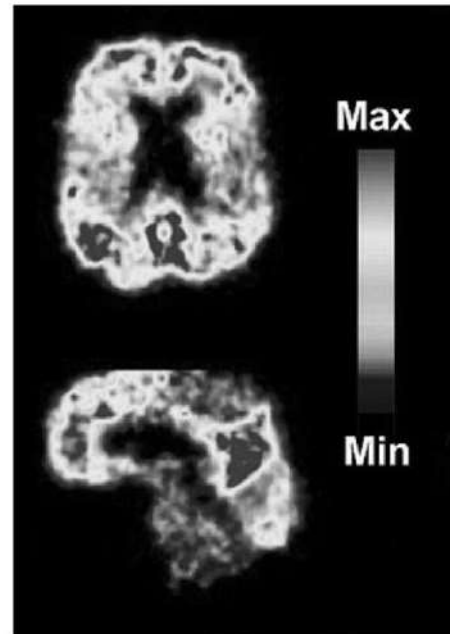
- 4p **f** Bereken met dit gegeven hoe lang het duurt totdat 75% van het aantal deeltjes van het gevormde element vervallen is.

PET-scan

Bij onderzoek naar de ziekte van Alzheimer wordt de PET-scan gebruikt. Daarbij spuit men bij de patiënt een speciale stof in die het C-11-isotoop bevat. Deze stof bindt het C-11-isotoop aan plaatsen in de hersenen waar de oorzaak van de ziekte van Alzheimer zit. Figuur 1 toont een voorbeeld van zo'n PET-scan.

Het C-11-isotoop verkrijgt men door versnelde protonen op N-14 te schieten.

- 2p **a** Geef de kernreactievergelijking van de productie van het C-11-isotoop uit N-14.

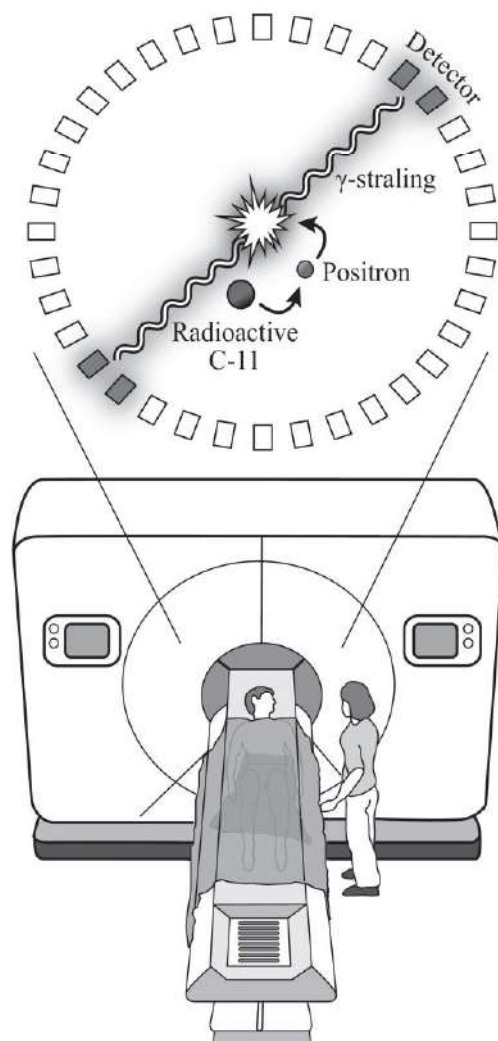


Figuur 1

Het C-11-isotoop vervalst onder uitzending van een positron. Het positron dat ontstaat remt in het hersenweefsel af tot (bijna) stilstand, en annihileert dan met een elektron. Daarbij worden twee gamma-fotonen met dezelfde frequentie in tegengestelde richting uitgezonden. Zie figuur 2.

Als twee gamma-fotonen binnen een tijdsduur Δt de ringvormige detector bereiken, neemt men aan dat ze afkomstig zijn van dezelfde annihiliatie. Een computer verwerkt de gegevens tot een plaatje zoals in figuur 1.

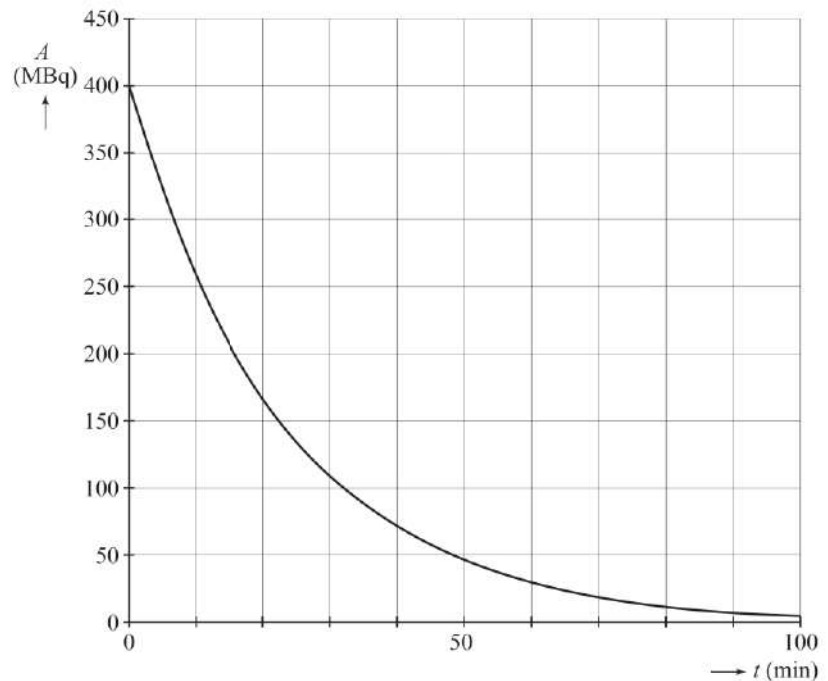
- 3p **b** Bereken de orde van grootte van de tijdsduur Δt . Maak daarbij gebruik van een schatting en neem aan dat de fotonen overal bewegen met de lichtsnelheid in vacuüm.



Figuur 2

De stralingsbelasting bij een PET-scan voor de patiënt is het gevolg van het afremmen van de positronen. De stralingsbelasting ten gevolge van de gammastraling is te verwaarlozen. In figuur 3 staat de grootte van de activiteit van de ingespo-ten stof in de hersenen uit tegen de tijd.

Figuur 3



De massa van de hersenen is 1,5 kg. De gemiddelde energie die een positron door het afremmen aan het hersenweefsel afgeeft, bedraagt 0,4 MeV.

- 4p **c** Bepaal de stralingsdosis die de hersenen ontvangen.

Voor het vaststellen van de ziekte van Alzheimer zijn een röntgenfoto of echografie niet geschikt.

- 2p **d** Geef hiervoor, voor beide genoemde technieken, een reden. Gebruik de informatie in Binas tabel 29.

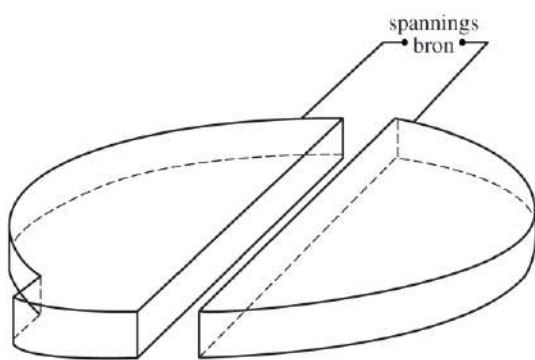
Cyclotron

In ziekenhuizen maakt men met een cyclotron radioactieve isotopen die gebruikt worden voor diagnostiek. Zie de foto in figuur 1.

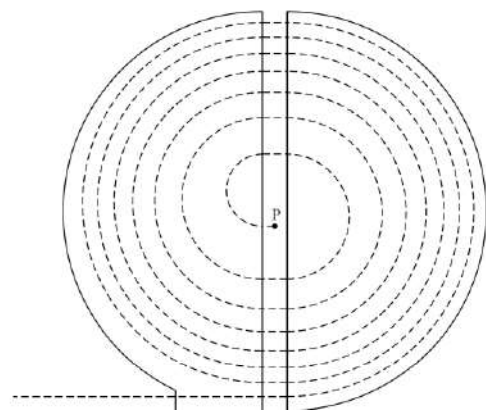
Een cyclotron is een apparaat dat bestaat uit twee holle D-vormige koperen trommels die op een kleine afstand van elkaar staan, zoals schematisch staat weergegeven in de figuren 2 en 3. Deze figuren zijn niet op schaal. Het geheel bevindt zich in vacuüm.



Figuur 1



Figuur 2



Figuur 3

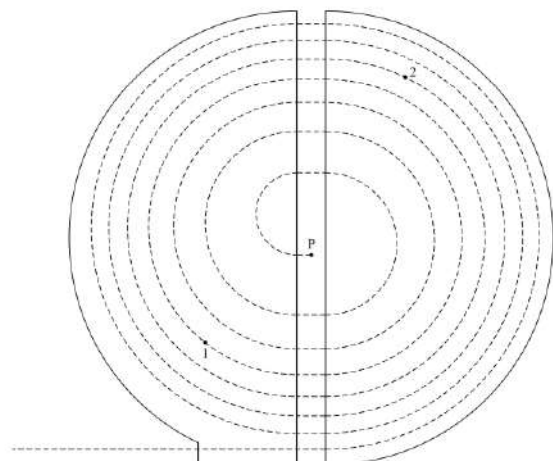
In de ruimte tussen de twee trommels bevindt zich een elektrisch veld. Doordat de trommels zijn aangesloten op een wisselspanningsbron wisselt dit veld steeds van richting.

In het midden bevindt zich een protonenbron P. Zie figuur 3. De protonen worden in het elektrisch veld versneld en komen in een van de trommels terecht. Loodrecht op beide trommels staat een homogeen magnetisch veld waardoor de protonen onder invloed van de Lorentzkracht met constante snelheid een halve cirkelbaan doorlopen. De baan van een proton staat weergegeven met een stippellijn.

3p

a Voer de volgende opdrachten uit:

- Geef in de figuur hiernaast in de punten 1 en 2 de richting van de elektrische stroom en de richting van de Lorentzkracht aan.
- Leg uit of het magnetisch veld in de ene trommel gelijk of tegengesteld gericht is aan het magnetisch veld in de andere trommel.



De protonen worden alleen tussen de trommels versneld: binnen de trommels is de grootte van de snelheid constant.

- 2p **b** Leg uit dat de elektrische kracht wel arbeid op de protonen verricht en de lorentzkracht niet. Gebruik hierbij de formule $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$.

In een trommel doorloopt een proton een halve cirkelbaan. Voor de tijd t die nodig is om zo'n halve cirkelbaan te doorlopen geldt de formule:

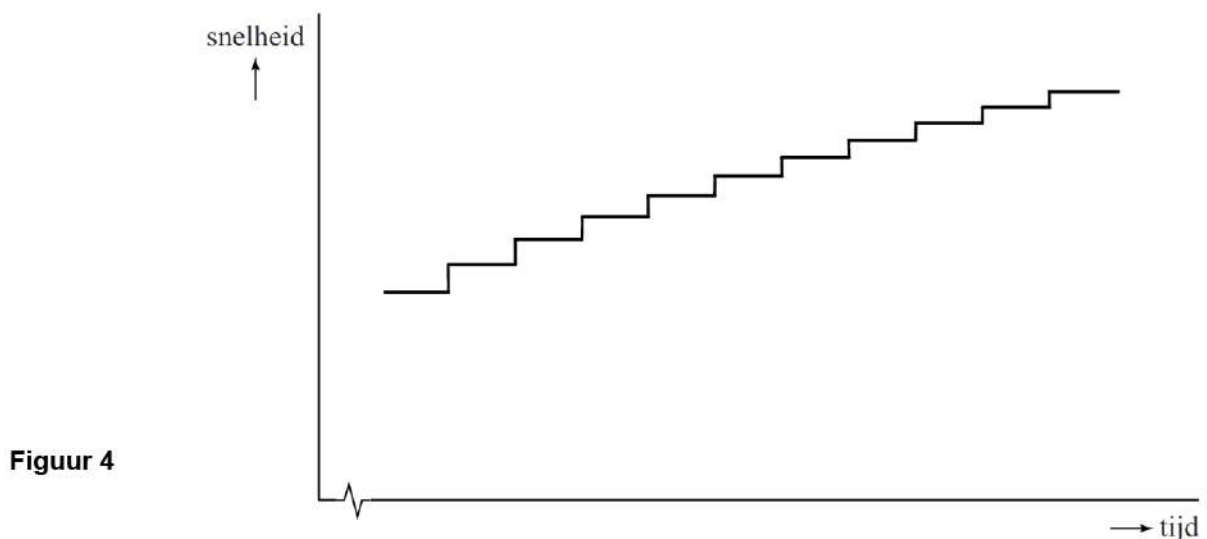
$$t = \frac{\pi m}{Bq}$$

Hierin is:

- m de massa van het proton;
- B de sterkte van het magneetveld;
- q de lading van het proton.

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

Elke keer dat een proton na een halve cirkel in de ruimte tussen de twee trommels komt, is het elektrische veld van richting omgekeerd, zodat het in de goede richting staat en het proton er dezelfde hoeveelheid bewegingsenergie bij krijgt. De snelheid van het proton als functie van de tijd die hieruit volgt is geschetst in figuur 4.



Figuur 4 laat twee eigenschappen zien:

- de tijdsduur van elke stap in de trommels is steeds gelijk;
- de snelheidstoename wordt bij elke stap tussen de trommels kleiner.

- 3p **d** Leg van beide eigenschappen uit waarom dit zo is.

De sterkte van het magneetveld bedraagt 1,5 T. Het wisselende elektrische veld tussen de twee holle ruimtes wordt veroorzaakt door een wisselspanning.

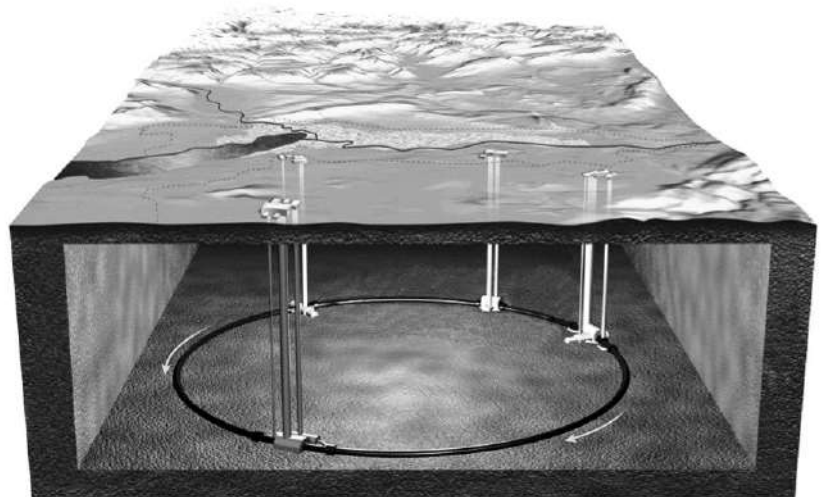
- 3p **e** Bereken de frequentie van deze wisselspanning.

Large Hadron Collider

Lees onderstaand artikel

Large Hadron Collider (LHC) geopend

Wetenschappers zijn al jaren op zoek naar het zogenaamde Higgs-deeltje. Om dit te vinden, is in de buurt van Genève in het voorjaar van 2010 de Large Hadron Collider (LHC) in gebruik genomen. Deze ondergrondse deeltjesversneller is met een diameter van maar liefst 8,4858 km de grootste ter wereld.



In de LHC worden protonen versneld tot bijna de lichtsnelheid. De LHC bestaat uit een ondergrondse ring met daarin twee dicht naast elkaar gelegen cirkelvormige buizen. In de twee buizen gaan twee bundels protonen rond in tegengestelde richting. Als ze door het versnellen een energie van 7,0 TeV (tera-elektronvolt) hebben gekregen, laten de wetenschappers de protonen in een detector tegen elkaar botsen. Tijdens de botsing ontstaan allerlei elementaire deeltjes. Hierbij hopen de wetenschappers het Higgs-deeltje te vinden.

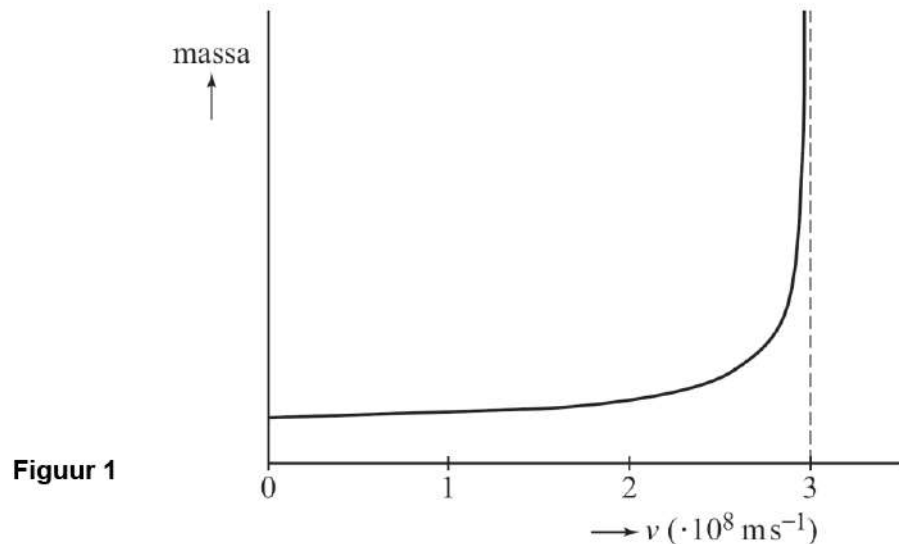
Voordat de protonen in de ring van de LHC binnenkomen, worden ze eerst in een lineaire versneller versneld. (Deze versneller is niet te zien in de figuur in het artikel.) Daarbij doorlopen de protonen een groot aantal malen een elektrische spanning van 5,0 kV.

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

Voordat de protonen in de grote ring komen, worden ze in twee bundels gesplitst. Daarna worden de protonen versneld totdat ze 11245 maal per seconde de ring doorlopen.

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

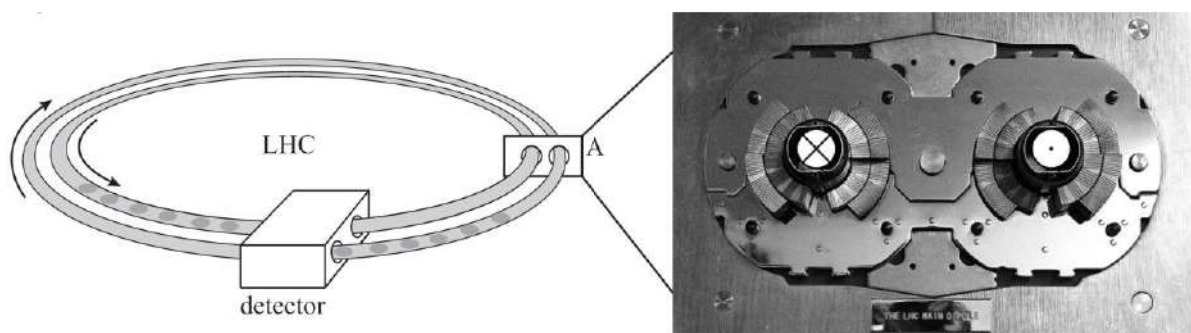
Als je met de klassieke theorie de kinetische energie van 7,0 TeV omrekent naar de snelheid van het proton vind je een waarde die veel groter is dan de lichtsnelheid. Volgens de relativiteitstheorie is dit niet mogelijk, omdat de massa van een deeltje tot oneindig toeneemt als het deeltje de lichtsnelheid bereikt. Dit is weergegeven in figuur 1.



Bij elke omwenteling neemt de kinetische energie van een proton toe.

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

In de ring bevinden zich twee buizen waarin de protonen in tegengestelde richting bewegen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2. Rechts in figuur 2 zie je een foto van de dwarsdoorsnede bij punt A.



Figuur 2

De protonen worden in de buizen in een cirkelbaan gehouden door sterke elektromagneten om de buizen. In figuur 2 zie je de twee buizen waarin de protonen in tegengestelde richting bewegen.

In figuur 2 is aangegeven dat de protonen in de rechterbuis naar je toe bewegen (⊙) en in de linker buis van je af (⊗).

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

Voor een proton met een energie van 7,0 TeV dat rondgaat in een buis geldt voor de middelpuntzoekende kracht:

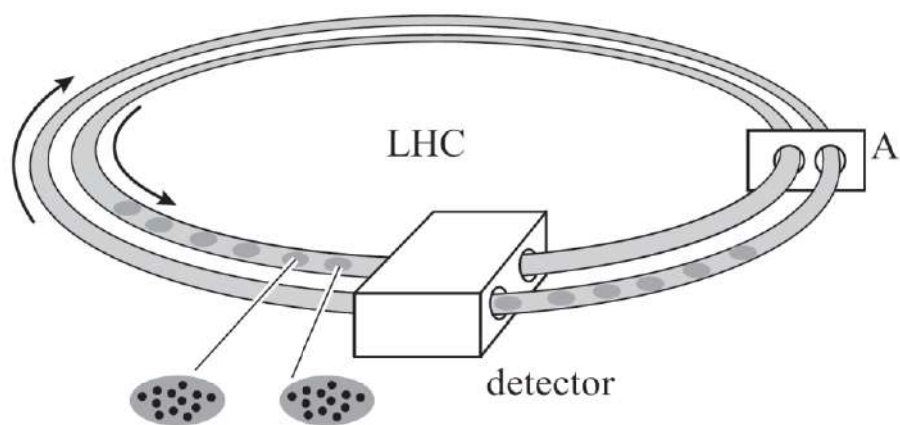
$$F_{\text{mpz}} = \frac{E}{r}$$

Hierin is:

- E de energie van het proton,
- r de straal van de baan.

4p **e** Bereken de sterkte van het magneetveld.

De protonen gaan in groepjes door de buizen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3

In één buis bewegen 2808 groepjes protonen. Hierdoor is in die buis de stroomsterkte gelijk aan 0,582 A.

4p **f** Bereken hoeveel protonen er in één groepje zitten.

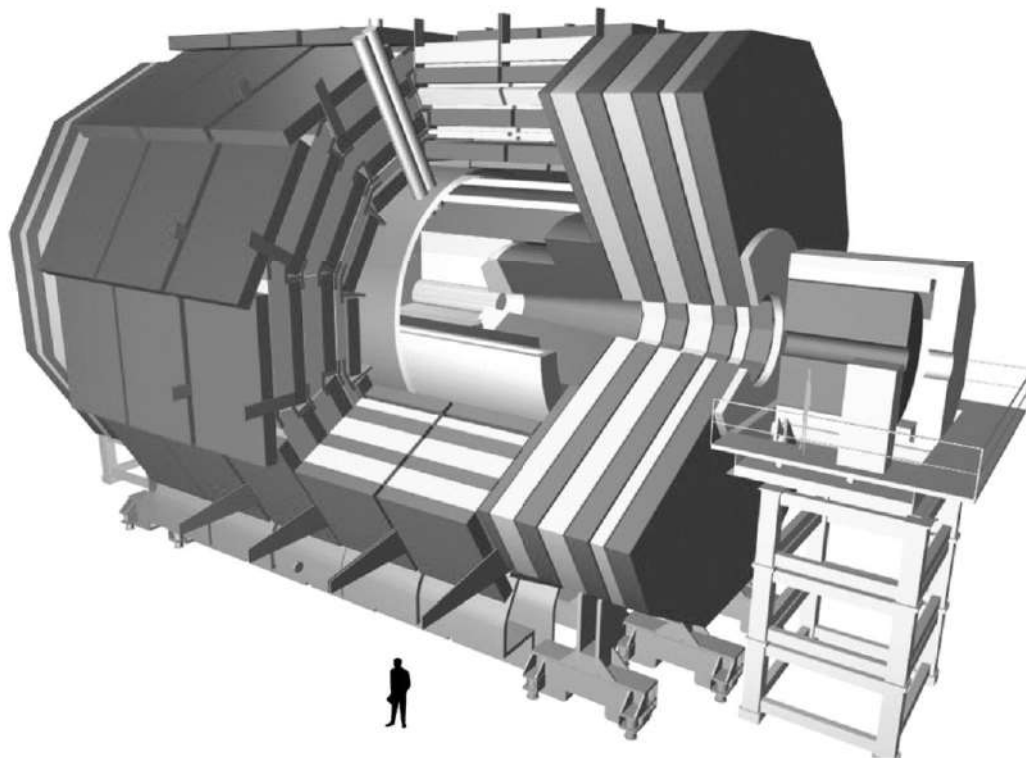
In de detector laten de wetenschappers de bundels elkaar snijden. Als twee protonen op elkaar botsen, kunnen nieuwe elementaire deeltjes ontstaan. De wetenschappers hopen hierbij het 'Higgs-deeltje' te vinden. De massa van het Higgs-deeltje is nog niet bekend. Wel zijn schattingen gemaakt. Eén van de schattingen stelt dat de massa van het Higgs-deeltje in de orde van grootte van 10^{-25} kg is.

3p **g** Laat met een berekening zien of de energie van de twee botsende protonen genoeg is om een Higgs-deeltje te laten ontstaan.

Op zoek naar Higgs

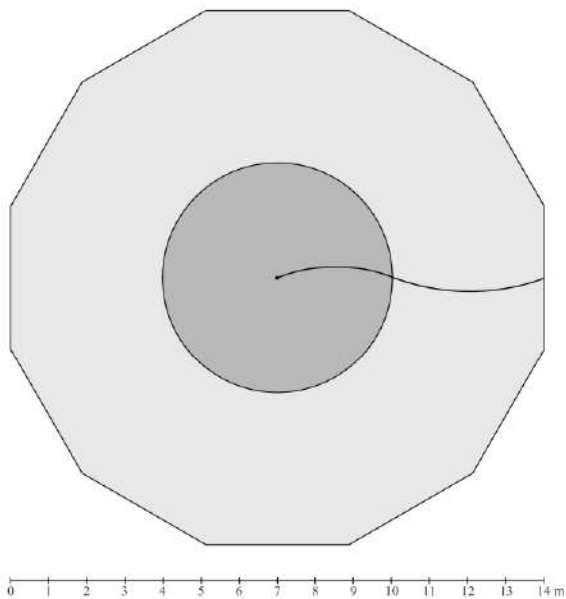
Lees het artikel

Bij het onderzoekscentrum CERN in Geneve laten natuurkundigen in de LHC (Large Hadron Collider) protonen met een zeer hoge snelheid op elkaar botsen. Er ontstaan daarbij verschillende deeltjes. Op deze manier toont men het zogenaamde Higgs-deeltje aan. Het Higgs-deeltje is niet rechtstreeks te detecteren. Soms valt het Higgs-deeltje via een vervalreactie uiteen in twee muonen en twee antimuonen. Een muon heeft dezelfde lading als een elektron, maar is veel zwaarder. Een anti-muon is even zwaar als een muon, maar heeft een tegengestelde lading. De (anti-)muonen worden waargenomen in de CMS- (Compact Muon Solenoïd) detector. Deze 14 meter hoge cilindervormige detector bestaat uit vele lagen waarin de banen van de deeltjes worden vastgelegd. Zie figuur 1. In het centrum van de detector vindt de botsing van de protonen plaats. Daar wordt door een grote supergeleidende spoel een magnetisch veld gemaakt.

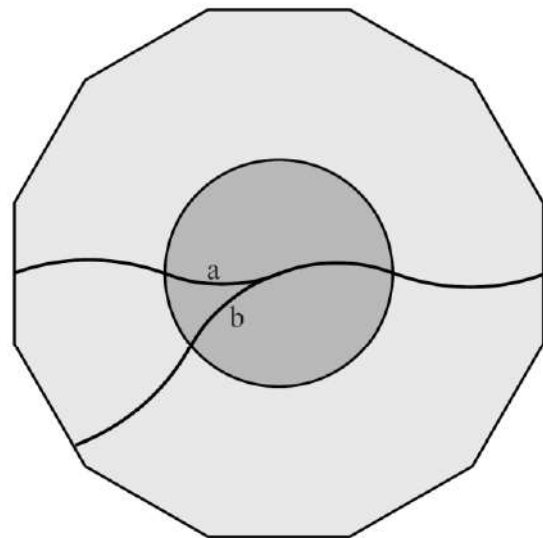


Figuur 1 Opengewerkte tekening van de CMS-detector. Midden in de detector vinden de botsingen plaats.

In figuur 2 is de dwarsdoorsnede van de CMS-detector getekend. De cirkel stelt de spoel voor. Daarbinnen (aangegeven met donkergrijs) heerst een homogeen magnetisch veld van 4,2 T. Midden in deze cirkel vindt de botsing plaats. De veldlijnen in die cirkel staan loodrecht op het vlak van tekening en zijn het papier in gericht. Ook buiten de spoel heerst een magnetisch veld (aangegeven met lichtgrijs). De baan van een wegschietend deeltje binnen en buiten de spoel is getekend.



Figuur 2



Figuur 3

- 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.

In de figuur 3 zijn twee banen getekend van een ander wegschietend deeltje. Dit deeltje is het antideeltje van het deeltje uit vraag a en heeft dezelfde energie maar een tegenovergestelde beginrichting.

- 2p **b** Leg uit welke van de aangegeven banen de juiste is.

Voor een wegschietend deeltje geldt:

$$E = B \cdot q \cdot c \cdot r$$

Hierin is:

- E de totale energie van het deeltje;
- B de sterkte van het magnetisch veld;
- q de lading van het deeltje;
- c de lichtsnelheid;
- r de straal van (het deel van) de cirkelbaan van het deeltje.

- 2p **c** Toon aan dat het deel van de formule links van het = teken dezelfde eenheid heeft als het deel rechts van het = teken.

In figuur 2 is te zien dat buiten de spoel de straal van de cirkelbaan die het deeltje beschrijft groter is dan binnen de spoel. Twee onderzoekers noemen hiervoor een oorzaak.

Oorzaak I:

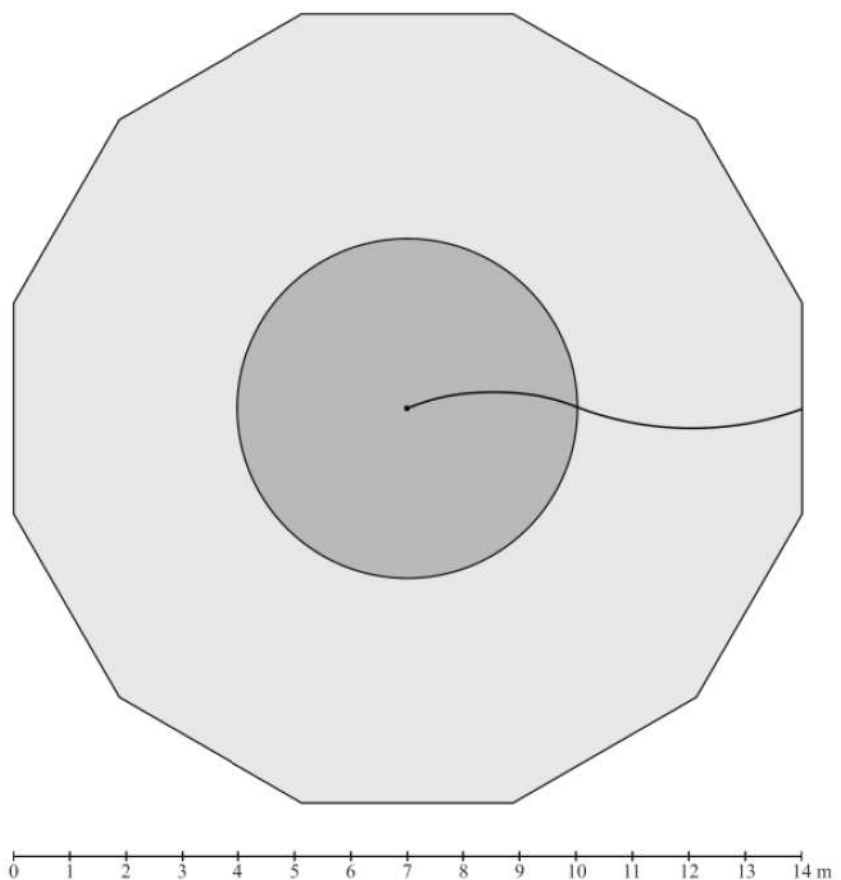
De deeltjes hebben buiten de spoel een kleinere snelheid omdat ze door botsingen met de materie van de detector zijn afgeremd.

Oorzaak II:

Het magnetisch veld buiten de spoel is kleiner dan het magnetisch veld binnen de spoel.

- 4p **d** Leg voor beide oorzaken uit of ze de grotere straal van de cirkelbaan kunnen verklaren.

Op basis van de energieën van de wegschietende deeltjes (twee muonen en twee anti-muonen) kan een schatting gemaakt worden van de maximale massa van het Higgs-deeltje. Ga ervan uit dat de gehele massa van het Higgs-deeltje omgezet wordt in de energie van de vier wegschietende deeltjes en dat de vier wegschietende deeltjes dezelfde energie hebben als het deeltje in figuur 2. Figuur 2 is hieronder vergroot weergegeven.



Figuur 2 vergroot

- 4p **e** Maak hiermee een schatting van de massa van het Higgs-deeltje in kg. Bepaal daartoe eerst in de figuur de straal van de baan die het wegschietend deeltje binnen de spoel beschrijft.

16.2 Samengestelde deeltjes

1** Er zijn 6 verschillende quarks. Als je geen rekening houdt met de kleur kun je hieruit $(6 \times 6 \times 6) / 3! = 36$ verschillende baryonen maken.

a Leg dit uit.

Als je wél rekening houdt met de quarkkleur zijn er meer mogelijkheden.

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

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

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

16.3 Krachtdeeltjes

1** In een heliumkern is de afstand tussen de twee protonen 10^{-15} m. Geef bij de volgende vragen je antwoord in twee significante cijfers.

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

Stel dat er in een atoomkern alleen elektromagnetische kracht aanwezig is.

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

Neem aan dat als de protonen 10^{-10} m van elkaar zijn verwijderd de atoomkern is vervallen.

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

2*** De zwakke kernkracht wordt overgebracht door W-deeltjes en het Z^0 -deeltje. In tegenstelling met de andere krachtdeltjes hebben deze deeltjes massa. In de kwantummechanica geldt er een "onbepaaldheidsrelatie". Deze relatie zegt dat in tijdsinterval Δt de energie niet nauwkeuriger bepaald kan worden dan ΔE . Voor de onbepaaldheid in energie ΔE en de onbepaaldheid in tijd Δt geldt:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \quad (h \text{ is de constante van Planck})$$

Stel dat we de energie die hoort bij de massa van een W-deeltje opvatten als onbepaaldheid van energie ΔE . De massa van een W-deeltje is $80,39 \text{ GeV}/c^2$.

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

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

Stel dat een W-deeltje met de lichtsnelheid reist.

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

In werkelijkheid kan een W-deeltje een grotere afstand afleggen.

d Geef hiervoor een verklaring.

3*** VERVOLG

De sterke kernkracht wordt overgebracht door gluonen. Een gluon heeft geen rustmassa. Een atoomkern heeft een diameter van 10^{-15} m.

- a Hoeveel tijd heeft een gluon nodig om met de lichtsnelheid deze afstand af te leggen?
- b Als we deze tijd opvatten als onbepaaldheid van de tijd Δt , hoe groot is dan de minimale onbepaaldheid van de energie ΔE uitgedrukt in joule?
- c Hoeveel MeV is dit?

16.4 Feynmandiagrammen

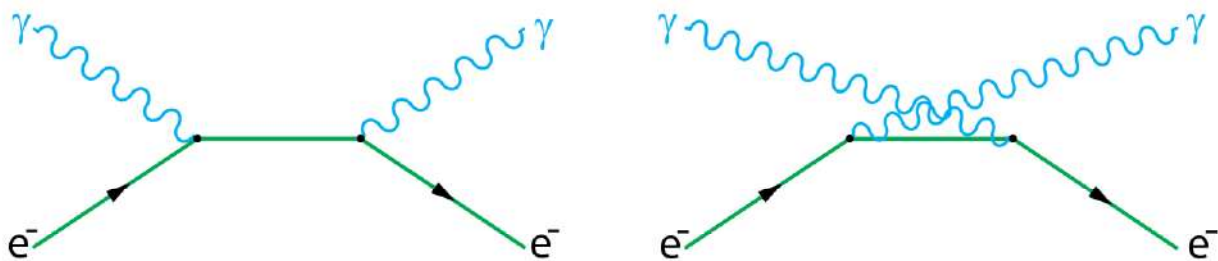
1*** Comptonverstrooiing

Bij Comptonverstrooiing wordt een inkomend foton geabsorbeerd door een elektron. Even later zendt dit elektron een ander foton uit dat een andere energie kan hebben.

Bij een bepaald experiment heeft het inkomende foton een kortere golflengte (blauw licht) dan het uitgaande foton (rood licht). Er zijn twee mogelijkheden. Figuur 1 zijn de feynmandiagrammen van deze reacties.

Reactie 1: Eerst wordt het blauwe foton geabsorbeerd en daarna het rode foton uitgezonden (figuur 1, links).

Reactie 2: Eerst wordt het rode foton uitgezonden en daarna het blauwe foton geabsorbeerd (figuur 1, rechts).



Figuur 1

- a Leg uit of de kinetische energie van het uitgaande elektron groter, kleiner of gelijk is aan de kinetische energie van het ingaande elektron.

Bij de reacties zijn er twee plaatsen waar twee of meer deeltjes elkaar tegenkomen (twee vertexen). Tussen deze vertexen legt het elektron een korte afstand af.

- 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.
- 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.

Omdat de tijd tussen de twee vertexen heel kort is kan niet worden waargenomen welke van de twee reacties plaatsvindt. Om de eindtoestand te berekenen uit de begintoestand moeten beide mogelijkheden in rekening worden gebracht.

Behalve reacties 1 en 2 zijn er nog meer reacties mogelijk.

- d Verzin een derde mogelijke reactie en teken hiervan het feynmandiagram.

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

Een elektron-neutrino vervalst in een elektron en een W^+ deeltje.

a Geef het feynmandiagram van deze reactie.

Als een vertex bestaat, dan bestaat de vertex waarbij alle deeltjes zijn vervangen door antideeltjes ook.

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

In een gedachtenexperiment laten we een W^+ deeltje en een elektron verstrooien. Dit is vergelijkbaar met Comptonverstrooiing van de vorig vraag. In de praktijk kan deze reactie niet worden bestudeerd, omdat het niet mogelijk is om een bundel W^+ deeltjes te maken. Een W^+ deeltje leeft immers maar $3 \cdot 10^{-25}$ s en vervalst vrijwel meteen in deeltjes met een kleinere massa.

Als inkomende deeltjes nemen we de gekruiste versie van de reactie van vraag b. Als uitgaande deeltjes nemen we de reactie van vraag a.

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

We gaan onderzoeken of er, net als bij Comptonverstrooiing twee mogelijke reacties zijn:

Reactie 1: Eerst wordt een W^+ deeltje geabsorbeerd en daarna wordt een W^+ deeltje uitgezonden.

Reactie 2: Eerst wordt een W^+ deeltje uitgezonden en daarna wordt een W^+ deeltje geabsorbeerd.

Bij de verstrooiing van een W^+ deeltje en een elektron is Reactie 2 niet mogelijk.

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

e Leg uit waarom dit proces niet mogelijk is.

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

Bij de verstrooiing van W^+ deeltjes en elektronen kan in plaats van een neutrino ook een Z^0 deeltje ontstaan.

a Geef het feynmandiagram van deze reactie.

Het Z^0 deeltje is in 1983 voor het eerst waargenomen in een proces dat de gekruiste versie is van het proces van vraag a. Voor zijn bijdrage aan dit onderzoek heeft de Nederlander Simon van de Meer in 1984 de Nobelprijs gekregen.

- 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

Up- en down quarks kunnen behalve de baryonen (proton en neutron) ook mesonen vormen. Mesonen die up- en down quarks bevatten zijn de **pi-mesonen**, ook wel **pionen** genoemd. De pionen zijn in 1947 ontdekt. Er zijn drie verschillende pionen:

$$\pi^+ (u\bar{d}) \quad | \quad \pi^0 (u\bar{u} \text{ of } d\bar{d}) \quad | \quad \pi^- (d\bar{u}) .$$

Pionen leven maar kort: π^+ en π^- mesonen hebben een levensduur van $2,6 \cdot 10^{-8}$ s. Het π^0 meson leeft nog veel korter, namelijk $8,4 \cdot 10^{-17}$ s.

De pionen π^+ en π^- vervallen door de zwakke wisselwerking in een muon en een muon-neutrino.

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

- b** Geef het feynmandiagrammen van deze reacties.

5*** Neutron verval

Bij een reactievergelijking mag je alle deeltjes vervangen door hun antideeltjes. Je mag ook een deeltje naar de andere kant van de pijl brengen als je het vervangt door zijn antideeltje (kruisen).

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 $\bar{n} \rightarrow$

b $p \rightarrow$

c $p + e^- \rightarrow$

d $\nu_e \rightarrow$

16.5 Behoudswetten

- 1***
- a** Hoe groot is het baryongetal van een meson?
 - b** Hoe groot is het leptongetal van een meson?
 - c** Hoe groot is het baryongetal van een lepton?
 - d** Hoe groot is het leptongetal van een baryon?

- 2*** Bij het β^- -verval verandert een neutron in een proton.

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

Als een elektron met een positron annihileert ontstaan er één of meerdere fotonen maar er ontstaat nooit een neutron.

- b** Leg uit waarom er geen neutron kan ontstaan.

- 3**** Bij onderstaande reacties zijn de energie de impuls en het impulsmoment behouden. Controleer met behulp van de andere behoudswetten of de reactie mogelijk is.

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

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

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

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

e $p + e^+ \rightarrow p + p$

- 4***** Bij onderstaande reacties zijn de energie de impuls en het impulsmoment behouden. Controleer met behulp van de andere behoudswetten of de reactie mogelijk is.

a $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

b $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$

c $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

d $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

5*** Bij onderstaande reacties zijn de energie de impuls en het impulsmoment behouden. Controleer met behulp van de andere behoudswetten of de reactie mogelijk is. p^+ is een proton en n^0 is een neutron.

a $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$

b $\pi^- + p^+ \rightarrow \Sigma^- + K^+$

c $\pi^- + p^+ \rightarrow \Lambda^0$

d $\pi^+ + n^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+$

6*** Bij onderstaande reacties zijn de energie de impuls en het impulsmoment behouden. Controleer met behulp van de andere behoudswetten of de reactie mogelijk is. p^+ is een proton en n^0 is een neutron.

a $p^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+$

b $p^+ \rightarrow K^+ + \pi^0$

c $\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow e^- + \Sigma^0$

d $\Sigma^- \rightarrow n^0 + \pi^-$

e $K^- + p^+ \rightarrow n^0 + \bar{K}^0$

16.6 Behoud van impuls en van energie

Behoud van impuls

- 1**** Je schiet met een kanon een kogel af. Bij het schot schiet het kanon achteruit.

a Leg uit waarom dit het geval is.

Het kanon met onderstel heeft een massa van 2000 kg. De kanonskogel heeft een massa van 40 kg en verlaat de loop met een snelheid van 300 m/s.



b Bereken de snelheid van het kanon vlak na het schot.

Inelastische botsing

- 2**** Een Audi met een massa van 1400 kg botst met 12 m/s tegen een stilstaande BMW met een massa van 1600 kg. Na de botsing blijven de wrakken aan elkaar vasthaken en schuiven ze met een bepaalde snelheid over de weg.



a Bereken met welke snelheid de wrakken over de weg schuiven.

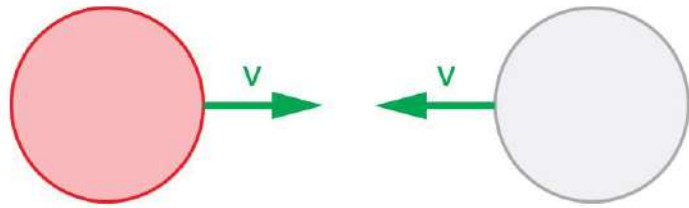
Bij een elastische botsing zijn zowel de impuls als de kinetische energie behouden. Omdat de auto's ingedeukt worden is de botsing niet elastisch.

b Leg uit waarom het indeuken van de auto's ervoor zorgt dat de botsing niet elastisch is.

c Bereken hoeveel kinetische energie er wordt omgezet in warmte.

Elastische botsing

- 3**** Een witte en een rode biljardbal bewegen met dezelfde snelheid naar elkaar toe en botsen frontaal op elkaar. De ballen zijn even zwaar.



Jikke beweert dat de biljardballen na de botsing stilliggen. Olav beweert dat één van de ballen stil ligt en dat de andere een twee keer zo grote snelheid heeft dan voor de botsing. De botsing is elastisch.

- a** Leg uit wie er gelijk heeft: Jikke, Olav of geen van beiden.

Het blijkt dat ze geen van beiden gelijk hebben.

- b** Hoe bewegen de biljardballen na de botsing wel?

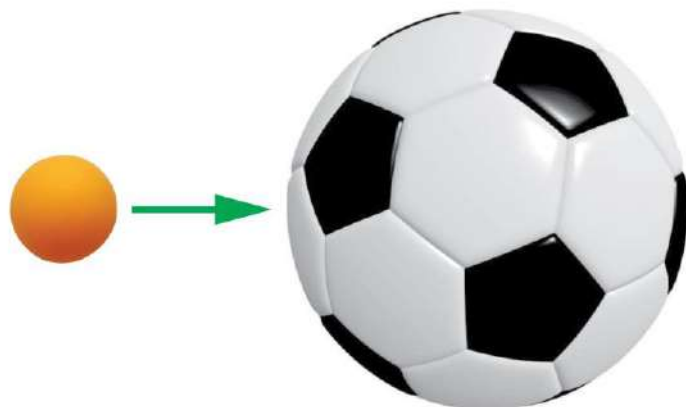
- 4***** Een witte biljardbal wordt frontaal op een rode biljardbal geschoten. De ballen zijn even zwaar. De botsing is elastisch.



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

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

- 5****** Een pingpongbal A met een massa van 2,0 gram botst met een snelheid van 10 m/s frontaal op voetbal B met een massa van 400 gram. Na de botsing stuitert de pingpongbal terug. De botsing is elastisch.



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

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

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

6** Voor de relativistische impuls geldt: $\vec{p} = \gamma \cdot m_0 \cdot \vec{v}$ met $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

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

b Laat zien dat voor snelheden tot 10% van de lichtsnelheid γ benaderd kan worden met: $\gamma \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2}$.

HINT vul $v = 0,1 \cdot c$ in en reken de γ -factor met beide formules uit.

Voor de totale energie geldt: $E^2 = p^2 \cdot c^2 + E_0^2$ met $E_0 = m_0 \cdot c^2$

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

7*** Twee protonen, beide met een kinetische energie van 1500 MeV, botsen frontaal op elkaar. Hierbij worden de protonen omgezet in nieuwe deeltjes. Voor de creatie van deze nieuwe deeltjes is zowel de massa als de energie van de protonen beschikbaar.

a Bereken hoe groot de totale massa van de nieuwe deeltjes maximaal kan zijn uitgedrukt in MeV/c^2 .

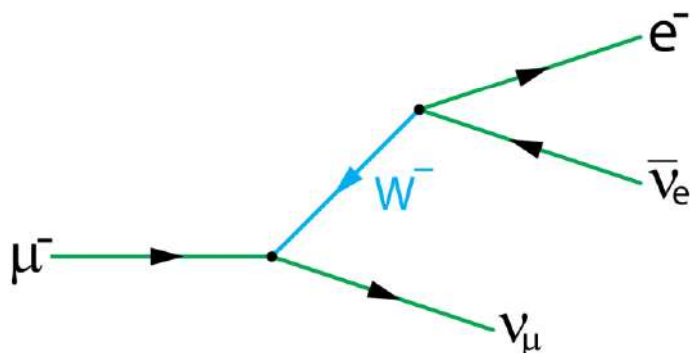
b Waarom gaat het hier om de maximale massa van de nieuwe deeltjes?

In een ander experiment botst een proton met een kinetische energie van 3000 MeV tegen een stilstaand proton.

c Leg uit of er nu meer, minder of even veel energie beschikbaar is voor de vorming van nieuwe deeltjes.

8*** Een stilstaand muon vervalst. Hierbij komt een elektron en twee neutrino's vrij. De figuur is het feynmandiagram van dit verval.

Bij dit verval zijn leptonen uit twee verschillende families betrokken.



a Zijn bij dit verval de leptongetallen behouden?

De volgende reacties zijn verboden:

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

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

b Leg uit waarom.

c Bereken de totale kinetische energie van het elektron en van de twee neutrino's. Verwaarloos hierbij de massa van de neutrino's.

Stel dat er bij het muonverval geen neutrino's ontstaan. Dan zou al de vrijkomende energie naar het elektron gaan.

d Welke γ -factor hebben elektronen met deze hoeveelheid energie?