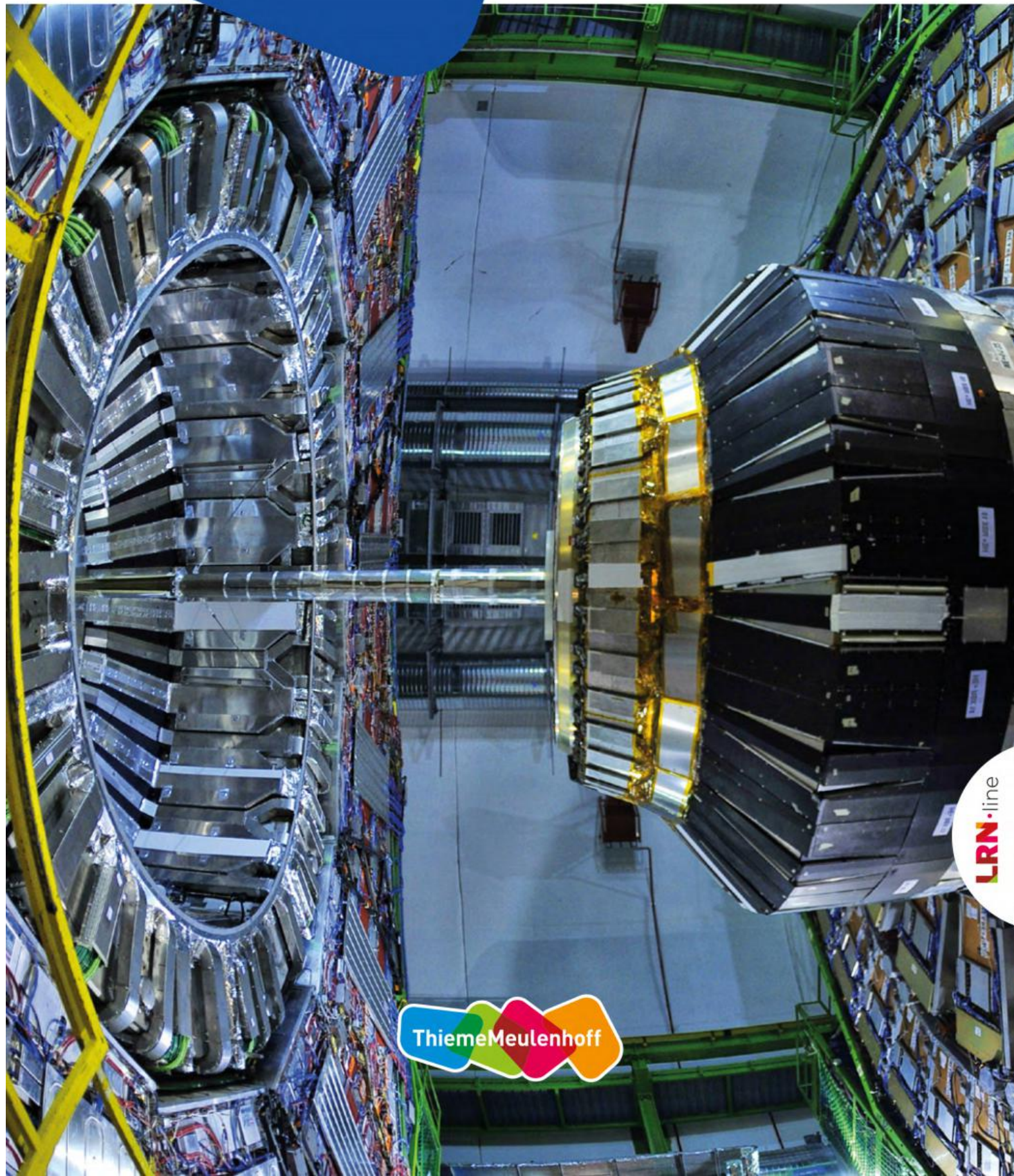


Systematische Natuurkunde

■ VWO

Keuzekatern 3 **Kern- en deeltjesprocessen**



ThiemeMeulenhoff

LRN·line

Systematische Natuurkunde

KATERN ■ VWO

Ton van den Broeck
René de Jong
Arjan Keurentjes
John van Polen
Mark Bosman
Maarten Duijnstee

Nicole ten Broeke
Torsten van Goolen
René Hazejager
Kees Hooyman
Koos Kortland
Michel Philippens
Mariska van Rijsbergen
Hein Vink

Eindredactie
Harrie Ottink

Eindredactie Digitaal
Evert-Jan Nijhof

COLOFON

Bureauredactie

Lineke Pijnappels, Tilburg

Beeldresearch

Verbaal Visuele Communicatie BV,
Velp

Technische illustraties

Jeannette Steenmeijer / Verbaal
Visuele Communicatie BV, Velp

Vormgeving basisontwerp

Studio Bassa, Culemborg

Vormgeving en opmaak

Crius Group

Over ThiemeMeulenhoff

ThiemeMeulenhoff ontwikkelt zich van educatieve uitgeverij tot een learning design company. We brengen content, leerontwerp en technologie samen. Met onze groeiende expertise, ervaring en leeroplossingen zijn we een partner voor scholen bij het vernieuwen en verbeteren van onderwijs. Zo kunnen we samen beter recht doen aan de verschillen tussen lerenden en scholen en ervoor zorgen dat leren steeds persoonlijker, effectiever en efficiënter wordt.

Samen leren vernieuwen.

www.thiememeulenhoff.nl

ISBN 978 90 06 84098 8

Negende druk, eerste oplage, 2021

© ThiemeMeulenhoff, Amersfoort, 2021

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16 Auteurswet 1912 j° het Besluit van 23 augustus 1985, Stbl. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie (PRO), Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp (www.stichting-pro.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet) dient men zich tot de uitgever te wenden. Voor meer informatie over het gebruik van muziek, film en het maken van kopieën in het onderwijs zie www.auteursrechtenonderwijs.nl.

De uitgever heeft ernaar gestreefd de auteursrechten te regelen volgens de wettelijke bepalingen. Degenen die desondanks menen zekere rechten te kunnen doen gelden, kunnen zich alsnog tot de uitgever wenden.

Deze uitgave is volledig CO₂-neutraal geproduceerd.

Het voor deze uitgave gebruikte papier is voorzien van het FSC*-keurmerk.

Dit betekent dat de bosbouw op een verantwoorde wijze heeft plaatsgevonden.

Inhoud

Kern- en deeltjesprocessen	7
1 Subatomaire deeltjes	8
2 Kernreacties	16
3 Neutrino's	22
4 Elementaire deeltjes en het standaardmodel	29
5 Versnellen en detecteren	37
6 Afsluiting	45
Leerdoelen	52
Lijst van uitkomsten	55
Register	56

Werken met Systematische Natuurkunde

Alle leerstof die je nodig hebt voor het examen vind je in de leerboeken. Daarnaast gebruik je nog het tabellenboek BINAS.

Wat kom je verder tegen in een leerboek?

Theorie

In de **theorie** hebben belangrijke begrippen een **blauwe kleur**. Achter in dit boek staan deze begrippen bij elkaar in het **register**. Daarmee vind je snel terug waar een begrip besproken is.

Het stralingsvermogen dat per oppervlakte-eenheid wordt ontvangen, noem je de **intensiteit** van de straling. Er geldt:

$$I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi r^2}$$



- I is de intensiteit van de straling in W m^{-2} .
- P_{bron} is het stralingsvermogen in W.
- r is de afstand tussen de ontvanger en de bron in m.

De gemiddelde intensiteit van de elektromagnetische straling die vanaf de zon de aarde bereikt, heet de **zonneconstante**. De zonneconstante op aarde is gelijk aan $1,368 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}$. Zie BINAS tabel 32C.

Een **applet** is een nabootsing van een experiment op de computer. Via de methode-site kun je de applet uitvoeren. De opdrachten bij een applet krijg je via je docent.

Halveringstijd

► **applet**
halveringstijd
en activiteit

De tijdsduur waarin de helft van de radioactieve isotopen verval, noem je de **halveringstijd** met symbool $t_{\frac{1}{2}}$. Na 55,6 s is de helft van radon-220 vervallen.

Daarna kunnen de overgebleven radonkernen nog steeds vervallen. Na nog eens 55,6 s is ook van deze kernen de helft vervallen, en dit gaat zo door. In figuur 12.24 zie je de grafiek die het verband geeft tussen het aantal kernen radon-220 en de tijd. Zo'n grafiek noem je een **vervalkromme**.

Staat het icoon **practicum** in de kantlijn, dan is op de docentensite een practicum beschikbaar. Je docent bepaalt op welke manier je een practicum aangeboden krijgt.

► **practicum**
Muizen-
valwagen

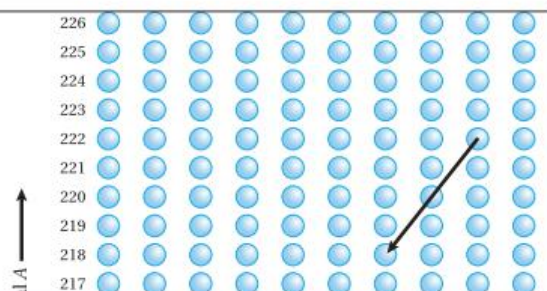
Tegen een ingedrukte spiraalveer is een kogel gelegd. Zie figuur 8.24a. Zodra de veer zich kan ontspannen, werkt er op de kogel een resulterende kracht. Door deze kracht gaat de kogel bewegen. Dus verricht de kracht arbeid. Zie figuur 8.24b.
De energie van een ingedrukte veer noem je **veerenergie**.

Opgaven en uitkomsten

Bij sommige opgaven staat het icoon **tekenblad**. Dan moet er getekend worden in een figuur. Tekenbladen vind je in je eigen digitale omgeving.

► **tekenblad**

33 In de *Radon Health Mine* in de Amerikaanse staat Montana kunnen mensen radontherapie ondergaan. Tien dagen lang verblijven ze enkele uren per dag in een ondergrondse mijntunnel waar de lucht een hoge concentratie aan radioactief radon



Op het **hulpblad** wordt in stappen duidelijk gemaakt hoe je een vraag kunt beantwoorden. Een hulpblad kun je navragen bij je docent.

► **hulpblad**

37 Het is mogelijk om atomen af te remmen met behulp van lasers. Deze techniek wordt gebruikt om extreem lage temperaturen te bereiken.
Een foton met een energie van 1,59 eV passeert een atoom van ^{85}Rb . Als het atoom niet beweegt, is de energie van het foton net te klein om het atoom in aangeslagen toestand te brengen. Als het atoom met een snelheid van $0,500 \text{ m s}^{-1}$ het foton tegemoet komt, wordt het atoom wel aangeslagen. Dit komt door de dopplerverschuiving van licht.
a Leg uit hoe de dopplerverschuiving verklaart dat het atoom aangeslagen raakt, ondanks het feit dat de energie van het foton eigenlijk te klein is.

Achter in dit boek vind je een lijst van **leerdoelen** bij dit katern. Je kunt daarmee controleren of je de stof begrepen hebt. Daarna volgt een lijst met **uitkomsten**. Je kunt daarmee controleren of je een vraag goed hebt beantwoord.

Wil je de **volledige uitwerking** van een vraag inzien, dan krijg je die via je docent.

Lijst van uitkomsten

Hoofdstuk 11

- | | |
|---------------------|--|
| 1 c 210 K | 25 b $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ |
| 2 b 8,7 jaar | d 14 miljard jaar |
| c links | 26 a $3 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ |
| d 25 | d $6,0 \cdot 10^9$ jaar |
| e $0,153 R_{\odot}$ | e $2,9 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ |
| 3 b 46% | 27 b nee |
| c 53 | c 2,5 m |
| 4 d ja | f $3 \cdot 10^4 \text{ m s}^{-1}$ |

Afsluiting

De **Afsluiting** is de laatste paragraaf van elk hoofdstuk.

De Afsluiting begint met een **samenvatting** van de theorie.

11.5 Afsluiting

Samenvatting

De straling afkomstig van de zon en andere sterren behoort tot het elektromagnetisch spectrum. Naast zichtbaar licht worden onder andere uv-straling, infraroodstraling en röntgenstraling uitgezonden. Alle vormen van elektromagnetische straling planten zich voort met de lichtsnelheid.

Verder vind je in de Afsluiting alle **formules** die in het hoofdstuk zijn besproken.

Je ziet een overzicht van de **BINAS-tabellen** die van belang zijn bij de theorie van het hoofdstuk.

Gegevens die betrekking hebben op dit hoofdstuk

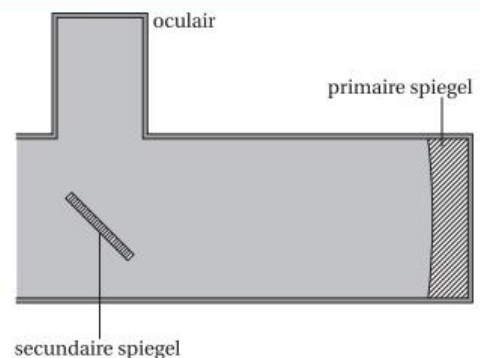
De formules die in dit hoofdstuk zijn besproken, staan hieronder bij elkaar.

lichtsnelheid	$c = f \cdot \lambda$
wet van Wien	$\lambda_{\max} = \frac{k_w}{T}$
wet van Stefan-Boltzmann	$P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$

De opgaven in de Afsluiting gaan over meerdere hoofdstukken en zijn op examenniveau.

Opgaven

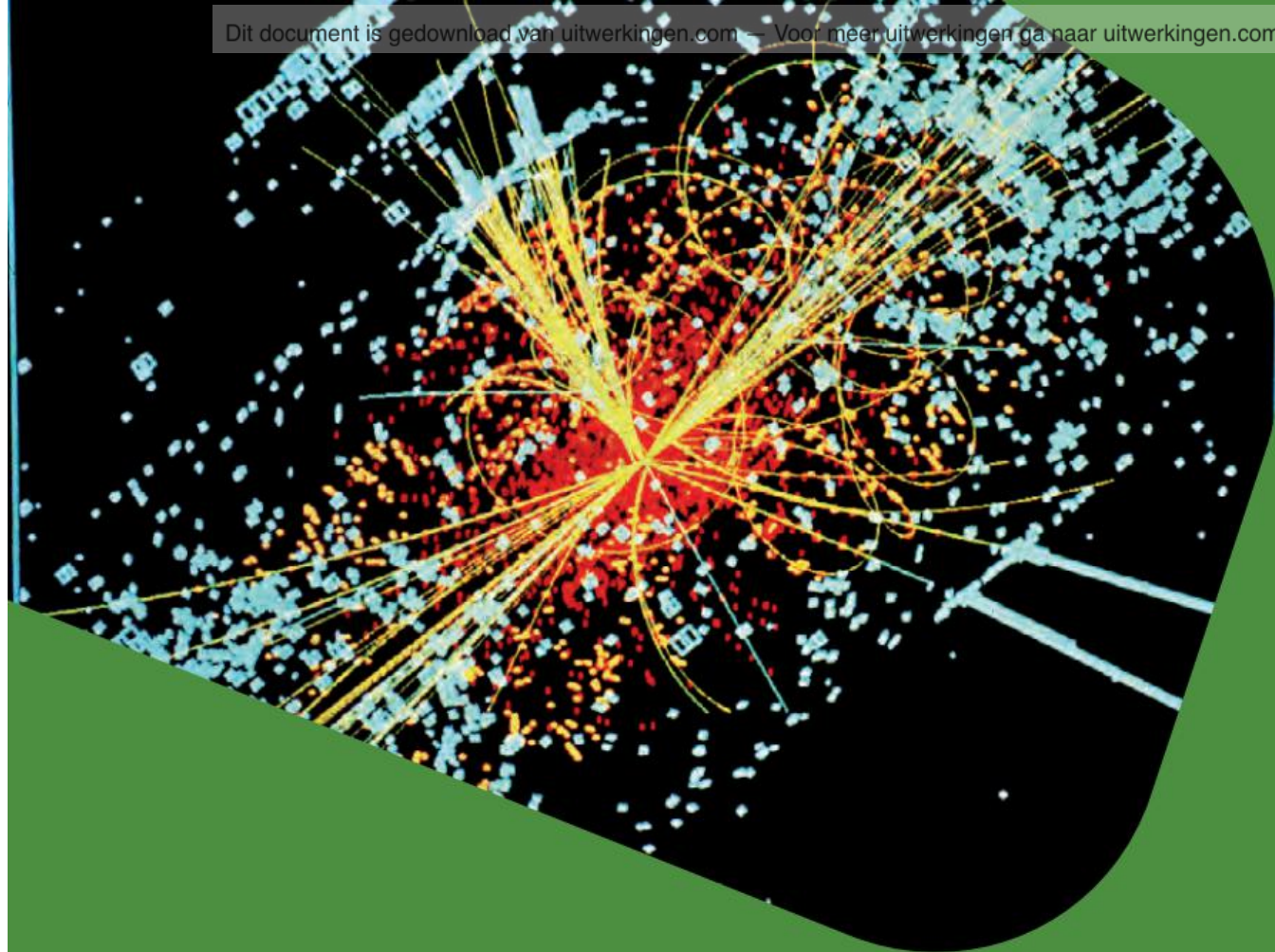
- **tekenblad** 27 Edwin Hubble maakte voor zijn ontdekkingen gebruik van de Hooker Telescope van het Mount Wilson Observatory in Los Angeles. Toentertijd was dit de grootste reflectietelecoop ter wereld. Zie figuur 11.36.
- Leg uit waarom de primaire spiegel zo groot mogelijk moet zijn.
 - Leg uit of de secundaire spiegel ook zo groot mogelijk moet zijn.



Figuur 11.36

De resolutie is de kleinste hoek α tussen twee sterren die door de telescoop nog als afzonderlijke sterren waargenomen kunnen worden.

Voor de resolutie een van reflectietelecoop geldt:

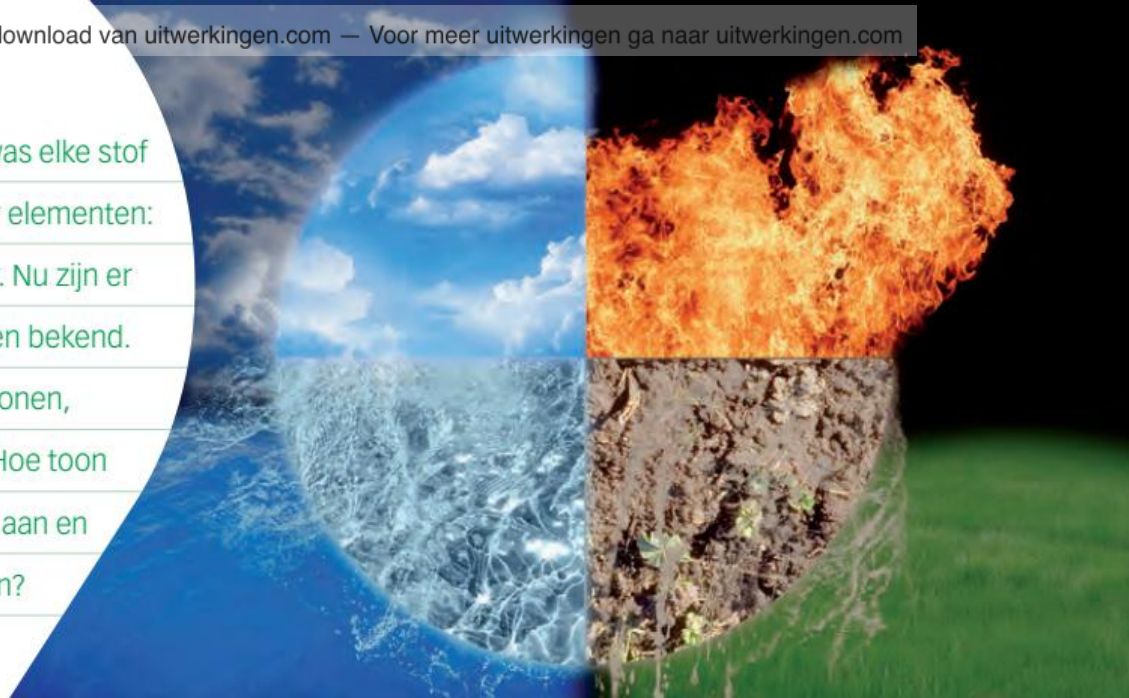


Kern- en deeltjesprocessen

Atoomkernen bestaan uit protonen en neutronen. Die kerndeeltjes zijn zelf opgebouwd uit nog kleinere deeltjes. Om de eigenschappen daarvan te kunnen meten, zijn grote detectoren nodig.

In dit katern lees je over kerndeeltjes, de deeltjes waaruit ze zijn opgebouwd, hun eigenschappen en hun interacties.

Volgens de oude Grieken was elke stof opgebouwd uit slechts vier elementen: aarde, lucht, water en vuur. Nu zijn er ruim honderd atoomsoorten bekend. Een atoom bestaat uit protonen, neutronen en elektronen. Hoe toon je dergelijke kleine deeltjes aan en wat zijn hun eigenschappen?



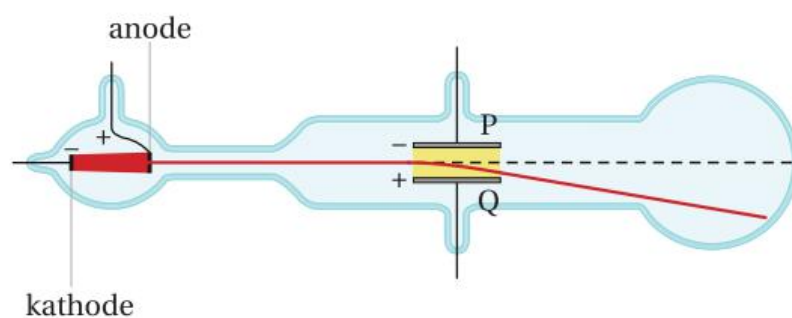
Figuur 1

1 Subatomaire deeltjes

Atoommodel van Thomson

Tot aan het einde van de 18^e eeuw ging men ervan uit dat **moleculen** de kleinste deeltjes van materie vormden. In 1803 publiceerde Dalton echter een theorie waarin elk molecuul is opgebouwd uit nog kleinere deeltjes, de **atomen**. Voor hem waren de atomen ondeelbaar.

In 1897 kwam daar verandering in door experimenten van Thomson. Hij gebruikte daarvoor een zogenoemde **kathodestraalbuis**, die vereenvoudigd is weergegeven in figuur 2.



Figuur 2

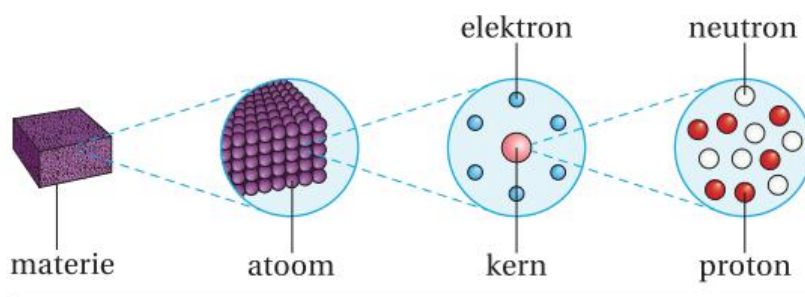
Een hoge spanning tussen de anode en kathode maakt straling vrij die wordt afgebogen door de geladen platen P en Q. Thomson toonde hiermee aan dat deze straling bestaat uit negatief geladen deeltjes. Hij noemde die deeltjes **elektronen**. Omdat een atoom niet geladen is, moet dus in een atoom ook positieve lading aanwezig zijn. Thomson stelde daarom een atoommodel voor als een soort krentenbol: een massa met een positieve lading met daarin losse elektronen.

Atoommodel van Rutherford

In 1896 ontdekte Becquerel dat bepaalde atoomsoorten zoals uraan en radium van nature **radioactief** zijn. Ze zenden spontaan straling uit. Rutherford onderzocht deze straling in een magnetisch veld. Zo ontdekte hij drie soorten straling: **alfastraling** met een positieve lading, **bètastraling** met een negatieve lading en **gammastraling** zonder lading.

In een later onderzoek liet Rutherford alfastraling op goudfolie vallen. Hij stelde vast dat vrijwel alle alfadeeltjes dwars door het goudfolie heen gingen en dat slechts 1 op de ongeveer 8000 alfadeeltjes werd weerkaatst. Hij paste daarom in 1911 het model van Thomson aan. Rutherford veronderstelde dat atomen bestaan uit een compacte, positief geladen **kern**, met daaromheen snel bewegende **elektronen**.

Rutherford toonde ook aan dat de positieve lading in de kern aanwezig is in **protonen**. Als atoomkernen alleen uit protonen zouden bestaan, zou voor elke atoomkern de verhouding tussen lading en massa hetzelfde zijn. Dat is niet het geval, dus moeten er nog andere deeltjes in atoomkernen aanwezig zijn. Rutherford veronderstelde dat die deeltjes ongeveer dezelfde massa hebben maar geen lading. In 1932 toonde Chadwick het bestaan ervan aan: de **neutronen**. Volgens het atoommodel van Rutherford bestaat een atoom dus uit een relatief zware kern met protonen en neutronen. Daaromheen draaien de lichtere elektronen, als planeten om de zon. Zie figuur 3.



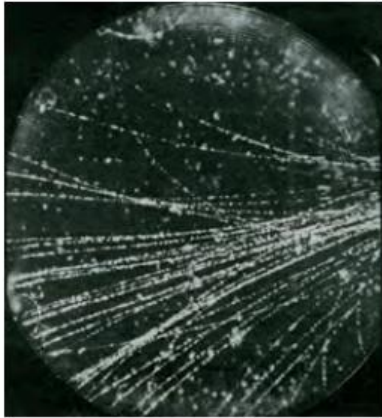
Figuur 3

Inmiddels is bekend dat niet de neutronen de kerndeeltjes bij elkaar houden, maar een speciale kracht. Je leest daarover meer in paragraaf 4. Ook het idee dat elektronen in cirkelvormige banen rondom de kern draaien is bijgesteld; ze vormen eerder een wolk die het atoom helemaal omringt.

Nevelvat

Protonen, neutronen en elektronen zijn kleiner dan atomen. Die kleinere deeltjes noem je **subatomaire deeltjes**. Metingen aan deze deeltjes werden in het begin van de 20^e eeuw gedaan in een **wilsonvat** of **nevelvat**. Daarin bevindt zich een damp die net niet condenseert tot een vloeistof. Komt er een subatomair deeltje in het vat, dan kan het tegen een molecuul van de damp botsen en dat ioniseren.

Op de plaatsen waar een ion ontstaat, vindt condensatie plaats en vormt zich een klein maar zichtbaar druppeltje. Het subatomaire deeltje beweegt verder door het vat waarbij het telkens tegen moleculen van de damp botst. Uiteindelijk vormt zich een **spoor** van druppeltjes. Bij elke botsing neemt de energie van het subatomaire deeltje af. Na een aantal botsingen is de energie te laag om nog dampmoleculen te ioniseren en daarmee stopt het spoor. In figuur 4 zie je de sporen van een groot aantal deeltjes in een nevelvat.



Figuur 4

Het nevelvat bevindt zich in een magnetisch veld. Bewegende, geladen deeltjes ondervinden dan een lorentzkracht die loodrecht op hun snelheid staat. Het spoor van de geladen deeltjes wordt daardoor gekromd. Zie onder andere de sporen rechtsonder in figuur 4.

In het nevelvat treedt de lorentzkracht op als middelpuntzoekende kracht.

Er geldt $F_{\text{mpz}} = F_L$ ofwel $\frac{m \cdot v^2}{r} = B \cdot q \cdot v$.

Hieruit volgt voor de **kromtestraal** van de baan van het deeltje:

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

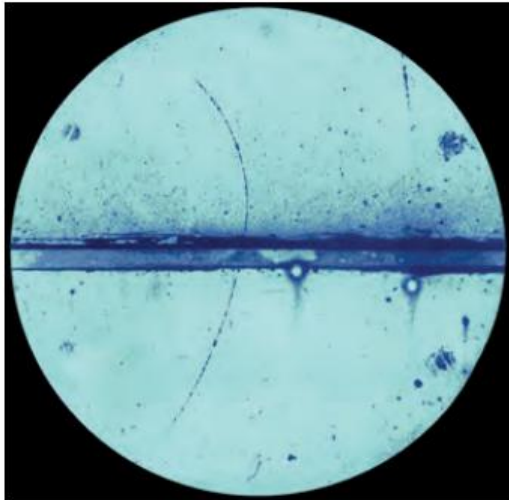
- r is de kromtestraal in m.
- m is de massa van het deeltje in kg.
- v is de snelheid van het deeltje in m s^{-1} .
- B is de sterkte van het magnetisch veld in T.
- q is de lading van het deeltje in C.

De richting van de kromming wordt bepaald door het teken van de lading. Met de FBI-regel bepaal je het teken van de lading van het subatomaire deeltje.

Het nevelvat wordt niet veel meer gebruikt. Tegenwoordig wordt onderzoek gedaan met deeltjesdetectoren waarmee de banen van deeltjes met behulp van computers worden geanalyseerd. Je leest daarover meer in paragraaf 5.

Positron

In het begin van de 20^e eeuw werd **kosmische straling** ontdekt. Deze bestaat uit allerlei deeltjes met hoge energie die vanuit het heelal op de aarde terechtkomen. In 1932 maakte Anderson een bijzondere opname van kosmische straling in zijn nevelvat. Zie figuur 5.



Figuur 5

De horizontale streep is een loodplaat. Een deeltje komt het nevelvat binnen en passeert de loodplaat. Daarbij verliest het deeltje snelheid en de kromtestraal van de baan neemt af. Het deeltje in figuur 5 moet dus van onderen het nevelvat zijn binnengekomen. Anderson nam waar dat de grootte van de kromtestraal in het bovenste gedeelte overeenkomt met die van elektronen, maar dat de richting van de kromming tegengesteld is. Het spoor moet dus door een positief geladen deeltje zijn veroorzaakt. De massa en de grootte van de lading zijn gelijk aan die van een elektron, maar de lading is positief in plaats van negatief. Dit deeltje heeft de naam **positron** gekregen.

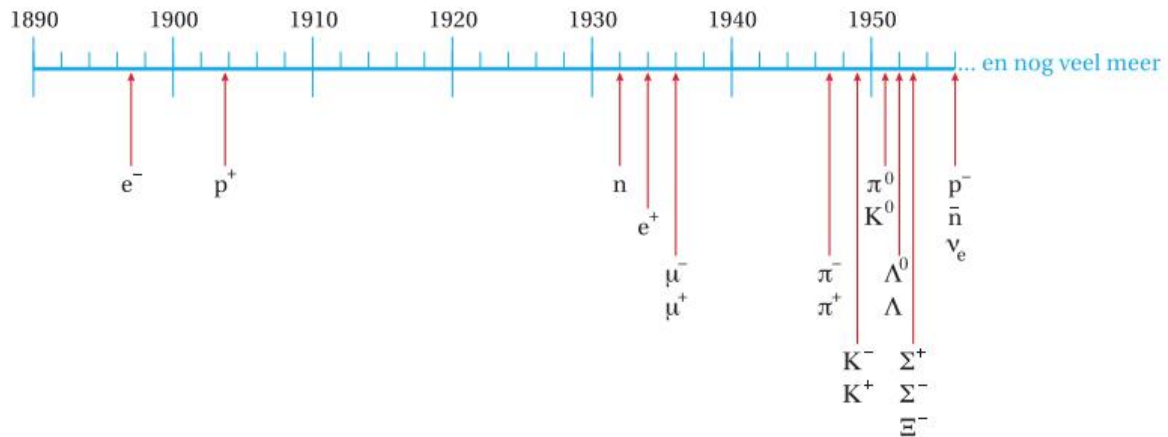
Het positron is het **antideeltje** van het elektron. Antideeltjes hebben dezelfde massa, maar tegengestelde lading. Voor elk deeltje bestaat een antideeltje. Al deze antideeltjes bij elkaar noem je **antimaterie**.

Zodra een deeltje botst met zijn antideeltje veranderen de twee deeltjes in twee fotonen. Omdat er in ons deel van het heelal hoofdzakelijk materie aanwezig is, bestaan antideeltjes doorgaans maar kort. Dit komt in paragraaf 3 aan bod.

Muon

In 1936 zag Anderson opnieuw onbekende sporen in zijn nevelvat. De sporen waren sterker gekromd dan die van protonen, maar minder sterk dan die van elektronen. Hij trok de conclusie dat het om een onbekend deeltje moest gaan, met vergelijkbare eigenschappen als het elektron maar met een tweehonderd keer zo grote massa. Dit deeltje kreeg de naam **muon**.

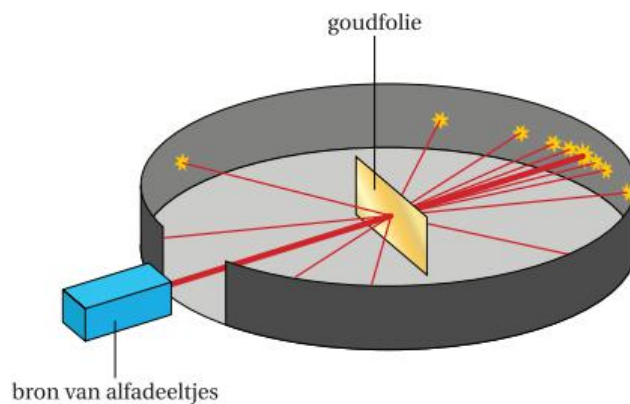
De ontdekking van het muon zorgde destijds voor grote verwarring onder de fysici. Omdat alle bouwstenen van het atoom al bekend waren, was er geen rekening gehouden met het bestaan van een dergelijk deeltje. Het muon bleek het eerste te zijn van een lange reeks deeltjes die vanaf dat moment werden ontdekt. Zie figuur 6.



Figuur 6

Opgaven

- 1 Rutherford schoot positief geladen alfadeeltjes op goudfolie. Bijna alle alfadeeltjes gaan in een rechte lijn door het folie heen. Zie figuur 7.



Figuur 7

Een alfadeeltje wordt alleen afgebogen als het vlak langs een goudkern gaat.

a Leg dit uit.

In de elektronenwolk om elke goudkern beweegt een groot aantal elektronen.

b Geef twee redenen waarom de bewegingsrichting van alfadeeltjes niet beïnvloed lijkt te worden door de elektronen rondom de goudkern.

Nu is bekend dat de ordegrootte van de diameter van de kern een tienduizendste deel van de diameter van een atoom is.

Stel de atoomkern voor als een voetbal op de middenstip van een voetbalveld.

c Schat de afstand van de elektronen tot de middenstip, uitgedrukt in km.

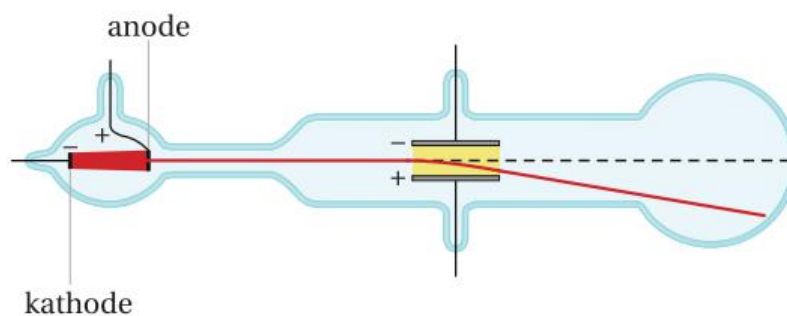
- 2 In figuur 8 zie je het spoor van een elektron in een nevelvat met een homogeen magnetisch veld. De veldlijnen staan loodrecht op de baan van het elektron.



Figuur 8

Het elektron is linksonder het nevelvat binnengekomen.

- Leg uit waarom de straal steeds kleiner wordt.
 - Leg uit waarom het spoor ophoudt.
 - Leg uit waarom het spoor niet dunner wordt.
 - Bepaal aan de hand van figuur 8 de richting van het magnetisch veld.
- 3 Het eenvoudigste model van een waterstofatoom bestaat uit een proton met daaromheen cirkelend een elektron. De elektrische kracht is de middelpuntzoekende kracht die het atoom bij elkaar houdt. Het elektron bevindt zich op een afstand van $5,3 \cdot 10^{-2}$ nm van het proton.
- Toon aan dat de grootte van deze elektrische kracht gelijk is aan $8,2 \cdot 10^{-8}$ N.
 - Bereken de snelheid waarmee het elektron beweegt.
 - Toon met een berekening aan dat de gravitatiekracht verwaarloosbaar is.
- hulpblad 4 Thomson bepaalde de verhouding tussen de lading en de massa van het elektron met behulp van de kathodestraalbuis van figuur 9.



Figuur 9

Tussen de kathode en de anode worden elektronen versneld. De elektronen komen vervolgens terecht in een homogeen elektrisch veld tussen twee platen, met een snelheid evenwijdig aan die platen. In de buis heerst vacuüm.

- Leg aan de hand van figuur 9 uit dat de straal bestond uit negatief geladen deeltjes.

Om de snelheid van de elektronen te bepalen, legde Thomson in het gebied tussen de platen tijdelijk ook een homogeen magnetisch veld aan. Door de sterkte van het magnetisch veld te variëren, zorgde Thomson ervoor dat de elektronenbundel toch rechtdoor ging. De zwaartekracht op de elektronen is te verwaarlozen.

In het midden tussen de twee platen bevindt zich een punt P.

- b Licht met behulp van een tekening toe welke richting het magnetisch veld in P heeft zodat de elektronen niet afgebogen worden tussen de platen.
- c Toon aan dat voor de snelheid van de elektronen geldt:

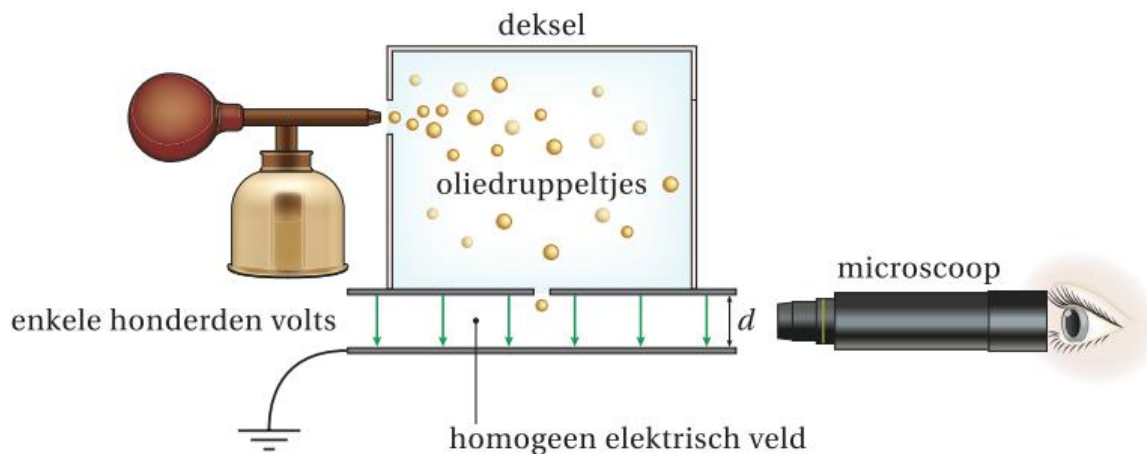
$$v = \frac{E}{B}$$

- v is de snelheid in m s^{-1} .
- E is de elektrische veldsterkte in N C^{-1} .
- B is de magnetische inductie in T.

Vervolgens schakelde Thomson het magnetisch veld weer uit. De elektrische veldsterkte tussen de twee platen is $2,5 \cdot 10^4 \text{ N C}^{-1}$. De elektronen volgen nu weer een gekromd pad. Met behulp van de snelheid van de elektronen en de kromming berekende Thomson dat de verticale versnelling $4,8 \cdot 10^{15} \text{ m s}^{-2}$ is.

- d Bereken de verhouding tussen de lading en de massa van een elektron.
- e Bereken het procentuele verschil tussen de waarde die je bij vraag d hebt berekend en de waarde die volgt uit de gegevens in BINAS.

- **hulpblad** 5 De grootte van de lading van het elektron is aan het begin van de 20^e eeuw bepaald door Millikan. Hij liet daarvoor oliedruppetjes uit een verstuiver zweven in een elektrisch veld. Het elektrisch veld maakte hij door over twee metalen platen een hoge spanning te zetten. Zie figuur 10.



Figuur 10

Door botsingen raken de druppels één of meerdere elektronen kwijt. Onder invloed van de zwaartekracht zakken de geladen druppels naar beneden en komen door een opening in de bovenste metalen plaat in het elektrisch veld. De veldsterkte van het elektrisch veld is gelijk aan:

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

- E is de elektrische veldsterkte in V m^{-1} .
- U is de spanning in V.
- d is de afstand tussen de twee platen in m.

Met een microscoop kon Millikan de individuele druppels zien. Hij paste de spanning zo aan dat een druppeltje tussen de platen bleef zweven.

a Leg uit waarom de bovenste plaat positief geladen is.

De massa van een druppeltje bepaalde hij uit de diameter van het druppeltje.

Een druppeltje heeft een massa van $3,0 \cdot 10^{-15} \text{ kg}$.

Om dit druppeltje te laten zweven, is een spanning van 153 V nodig. De afstand tussen de platen is 5,0 mm.

b Bereken de lading van het druppeltje.

De spanning waarbij een druppeltje zweeft, is niet telkens dezelfde. Een van de redenen is dat de massa van een druppeltje niet steeds dezelfde is.

c Noem nog een reden waarom de spanning niet bij elke proef dezelfde hoeft te zijn.

Door deze proef heel vaak te herhalen, bepaalde Millikan de lading van een elektron. Hij vergeleek de spanningen van deeltjes met dezelfde massa met elkaar.

d Leg uit hoe Millikan hiermee de lading van een elektron kon bepalen.

Atoomkernen kunnen splijten en met elkaar samensmelten. De energie die bij een kernreactie vrijkomt kan worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. Waar komt die energie vandaan?



Figuur 11

2 Kernreacties

Atoomnummer en massagetal

Een atoomkern bestaat uit een aantal protonen en een aantal neutronen. Het aantal protonen in de kern bepaalt de atoomsoort met bijbehorende chemische eigenschappen. Het aantal protonen heet het **atoomnummer** met symbool Z . De lading van de kern is dan Ze . Daarom noem je Z ook wel het **ladingsgetal**. De som van het aantal protonen en neutronen noem je het **massagetal** met symbool A . Atomen met hetzelfde atoomnummer maar een verschillend massagetal noem je **isotopen**.

Met het atoomnummer en het massagetal ligt de samenstelling van het atoom vast. Je noteert een atoomkern van element X als:



- A is de som van het aantal protonen en neutronen.
- Z is het aantal protonen.
- X is het symbool van de atoomsoort.

Een germaniumkern met 32 protonen en 42 neutronen noteer je dus als ${}^{74}_{32}\text{Ge}$. De 32 is eigenlijk overbodig, omdat het atoomnummer van germanium altijd gelijk is aan 32. In plaats van ${}^{74}_{32}\text{Ge}$ kun je ook ${}^{74}\text{Ge}$ of Ge-74 of germanium-74 schrijven.

Protonen, neutronen en elektronen noteer je op een vergelijkbare manier. Zie tabel 1. Hierin staat ook de notatie voor alfa-, bèta- en gammastraling.

Deeltje	Notatie	Verkorte notatie
proton	${}^1_1\text{p}$	p^+
neutron	${}^1_0\text{n}$	n of n^0
elektron	${}^0_{-1}\text{e}$	e^-
positron	${}^0_{+1}\text{e}$	e^+
α -straling	${}^4_2\alpha$	α
β^- -straling	${}^0_{-1}\beta$	β^-
β^+ -straling	${}^0_{+1}\beta$	β^+
γ -straling	${}^0_0\gamma$	γ

Tabel 1

Bij de ontdekking van alfa- en bètastraling wist men nog niet uit welke deeltjes die straling bestond. Alfadeeltjes bestaan uit twee protonen en twee neutronen. Dat is dus de kern van een atoom helium-4. Omdat β^- -straling bestaat uit elektronen en β^+ -straling uit positronen, hebben ze hetzelfde ladingsgetal en massagetal als elektronen respectievelijk positronen.

Verval- en kernreacties

Waterstof heeft drie veelvoorkomende isotopen: H-1, H-2 en H-3. De isotopen H-2 en H-3 hebben zelfs een naam gekregen: H-2 heet deuterium en H-3 tritium.

Van koolstof zijn veertien isotopen bekend. In BINAS tabel 25A vind je gegevens over een selectie daarvan.

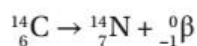
Elk koolstofatoom bestaat uit zes protonen. De koolstofisotopen met massagetal 12 en 13 komen in de natuur voor. De andere drie isotopen van koolstof in BINAS tabel 25A zijn **instabiel**. Dit betekent dat de samenstelling van de kern na verloop van tijd spontaan verandert. Zo'n proces noem je een **vervalreactie**. Er ontstaat een nieuwe kern en er komt straling vrij.

In de laatste kolom van BINAS tabel 25A staat bij dergelijke isotopen informatie over die straling. Bij C-14 staat β^- 0,156. Dit betekent dat bij het verval van C-14 een elektron de kern verlaat met een maximale kinetische energie van 0,156 MeV. Ook lees je in tabel 25A dat het 5730 jaar duurt voordat de helft van de C-14 is vervallen.

Voor een vervalreactie gelden twee **behoudswetten**:

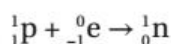
- **Behoud van het ladingsgetal**: de totale lading voor de reactie is gelijk aan de totale lading na de reactie.
- **Behoud van het massagetal**: het totale aantal protonen en neutronen voor de reactie is gelijk aan het totale aantal protonen en neutronen na de reactie.

Met behulp van deze twee behoudswetten is de vervalreactie van C-14 op te stellen:

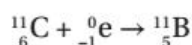


In BINAS tabel 25A zie je dat de nieuwe N-14 **stabiel** is. De instabiele C-14 is overgegaan in de stabiele N-14.

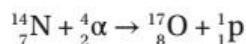
Een andere reactie waarbij een instabiele kern kan overgaan in een stabiele kern is door **K-vangst**. Bij dit proces wordt een elektron uit de elektronenwolk opgenomen in de kern en combineert dan met een proton tot een neutron volgens:



Instabiel koolstof-11 kan op die manier overgaan in stabiel boor-11:



Naast spontane vervalreacties kan men ook kunstmatig **kernreacties** laten optreden. Een voorbeeld van een dergelijke reactie treedt op bij het beschieten van N-14 met een alfadeeltje. Experimenteel blijkt dat er dan een proton vrijkomt. De twee behoudswetten gelden ook voor een kunstmatige kernreactie. Je vindt dus:



Formule van Einstein

In BINAS tabel 7B staat dat de rustmassa van een elektron (afgerond) $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg is en dat daarbij 0,51 MeV of $8,2 \cdot 10^{-14}$ J aan energie hoort. Zo'n energiewaarde bereken je met de bekendste **formule van Einstein**. Hij stelde dat massa kan worden omgezet in energie en andersom. Hierbij geldt:

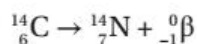
$$E = m \cdot c^2$$

- E is de energie in J.
- m is de massa in kg.
- c is de lichtsnelheid in m s^{-1} .

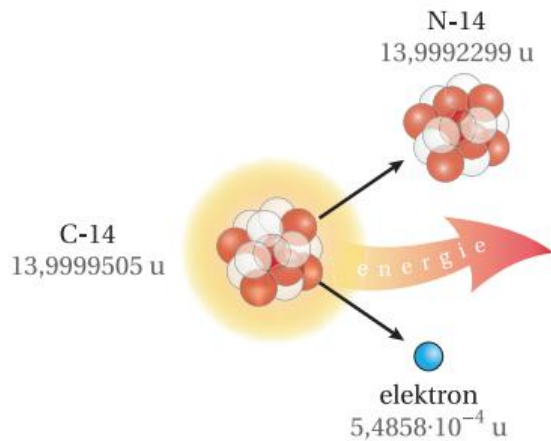
Volgens deze formule komt een massa van 1,0000 u overeen met een energie van 931,49 MeV. Deze waarde vind je terug in BINAS tabel 7B.

Massadefect

Voor het verval van C-14 geldt:



In figuur 12 zie je een schematische weergave van deze vervalreactie waarbij ook de massa's van de kernen en het elektron zijn aangegeven.



Figuur 12

De massa van een kern C-14 vind je in BINAS tabel 25A als je corrigeert voor de massa van het aantal elektronen in de elektronenwolk. De massa van een kern C-14 is dus $14,003242 - 6 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} = 13,999505 \text{ u}$.

Vergelijk je in figuur 12 de massa voor de reactie met de massa na de reactie, dan vind je een verschil. Dit verschil in massa heet het **massadefect**. De verdwenen massa wordt omgezet in energie. De hoeveelheid vrijgekomen energie kun je berekenen met de formule van Einstein of met behulp van BINAS tabel 7B.

Voorbeeld

Het massadefect bij het verval van C-14 kun je ook berekenen door uitsluitend de getallen in BINAS tabel 25 te gebruiken. Er geldt:

$$\text{massadefect} = m_{\text{C-14}} - m_{\text{N-14}}$$

- $m_{\text{C-14}}$ is de massa van een atoom C-14 in u.
- $m_{\text{N-14}}$ is de massa van een atoom N-14 in u.

a Leg uit waarom dit geldt.

In BINAS tabel 25 vind je in de laatste kolom achter C-14 de maximale energie die het elektron heeft na het verval: 0,156 MeV.

b Toon aan dat deze energie overeenkomt met het massadefect.

Uitwerking

a $m_{\text{voor}} = m_{\text{C-14}} - 6m_e$

$$m_{\text{na}} = m_{\text{N-14}} - 7m_e + m_e = m_{\text{N-14}} - 6m_e$$

$$\text{Dus massadefect} = m_{\text{C-14}} - m_{\text{N-14}}$$

b $m_{\text{C-14}} = 14,003242 \text{ u}$ en $m_{\text{N-14}} = 14,00307 \text{ u}$

Zie BINAS tabel 25A.

$$\text{massadefect} = 14,003242 - 14,00307 = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

$$1,00 \text{ u komt overeen met } 931,494061 \text{ MeV.}$$

Zie BINAS tabel 7.

$$1,72 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 1,72 \cdot 10^{-4} \times 931,494061 = 0,160 \text{ MeV.}$$

Afgerond: 0,16 MeV.

Dit komt overeen met 0,156 MeV.

Je moet de uitkomst op twee significante cijfers afronden omdat de massa van N-14 een decimaal minder heeft dan de massa van C-14.

Kernenergie

In een **kerncentrale** wordt de energie die vrijkomt ten gevolge van het massadefect gebruikt om elektrische energie op te wekken. Er vindt een **splijtingsreactie** plaats waarbij een zwaardere kern wordt gesplitst in meerdere lichtere kernen.

Een andere mogelijkheid is een **fusiereactie** waarbij twee lichtere kernen samensmelten tot een zwaardere kern.

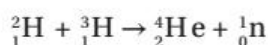
Een voorbeeld van een splijtingsreactie is:



Door een neutron op een kern U-235 te schieten, kan die zich splitsen in een kern Mo-99 en een kern Sn-134. Daarbij komen drie neutronen vrij. Die zijn weer in staat om drie andere kernen U-235 te splitsen waarbij negen neutronen vrijkomen, enzovoort. Op die manier ontstaat een **kettingreactie** waarbij uiteindelijk veel energie vrijkomt.

De vrijkomende energie wordt in de centrale gebruikt om water in stoom om te zetten. Deze stoom drijft een generator aan die elektriciteit opwekt.

Bij een kernfusiereactie komt naar verhouding nog meer energie vrij dan bij een splijtingsreactie. De energie die de zon en andere sterren uitstralen, is afkomstig van kernfusiereacties. De zon bestaat voor het grootste deel uit isotopen van waterstof. Binnen in de zon vindt onder meer de volgende kernreactie plaats:

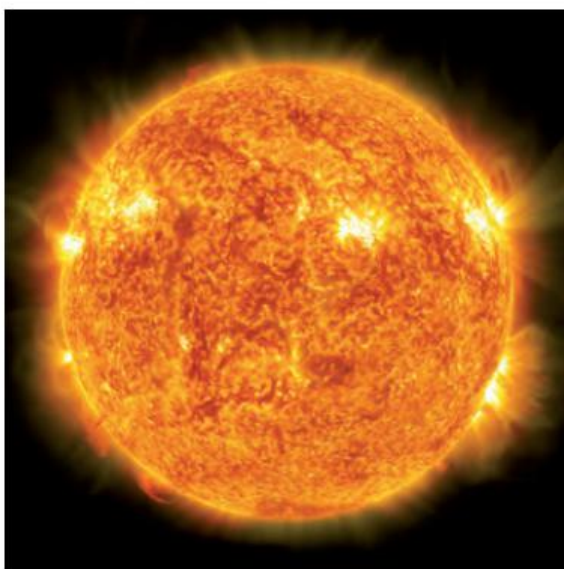


Dit proces treedt alleen op bij een zeer hoge druk en bij een temperatuur van ongeveer 15 miljoen graden Celsius. Door deze extreme omstandigheden is het nog niet gelukt om een commerciële kernfusiecentrale te bouwen die meer energie oplevert dan hij gebruikt.

Opgaven

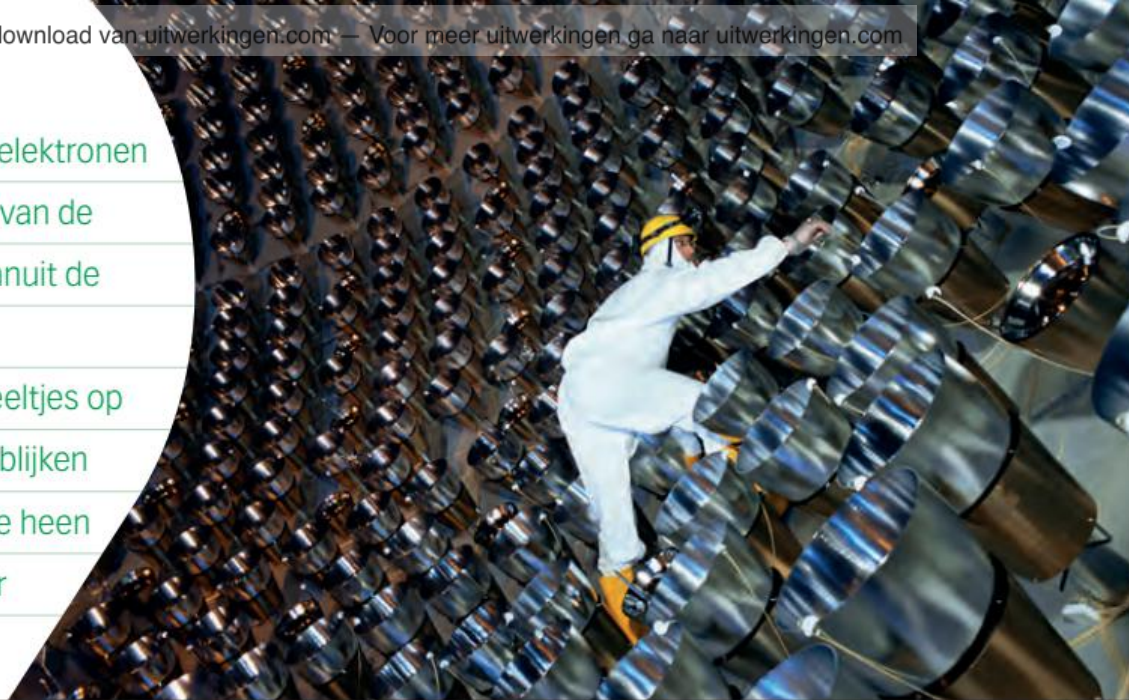
- 6 Geef de vervalreacties van de volgende kernen. Gebruik hierbij BINAS tabel 25A.
 - a Plutonium-239
 - b Thorium-231
 - c Jood-123
- 7 Een uraan-235-kern wordt beschoten met een neutron. Naast strontium-94 en twee neutronen ontstaat nog een ander element.
 - a Stel de vervalreactie van dit proces op.
 - b Bereken het massadefect bij deze reactie in MeV.

- 8 Sommige elementen komen in de natuur niet voor maar kunnen wel in laboratoria worden gemaakt. In een artikel in Science van januari 1999 stond dat Russische wetenschappers erin waren geslaagd om het element met atoomnummer 114 te maken. Hiervoor werd plutonium-244 beschoten met calcium-48.
- Om een plutoniumkern te laten samensmelten met een calciumkern is het nodig dat de calciumkern met zeer grote snelheid naar de plutoniumkern wordt geschoten.
- Leg uit waarom die snelheid zeer groot moet zijn.
 - Geef de reactievergelijking van deze kernreactie.
- hulpblad 9 Een kerncentrale die uraan-235 als brandstof gebruikt, geeft 575 MW aan elektrisch vermogen af. Hierbij wordt 25% van de kernenergie omgezet in elektrische energie.
- Leg uit wat er met de resterende 75% gebeurt.
- Per splijting komt 175 MeV aan energie vrij.
- Toon aan dat er gemiddeld $8,2 \cdot 10^{19}$ splijtingen per seconde plaatsvinden.
- De centrale gebruikt als brandstof verrijkt uraan dat 4,0% uraan-235 bevat.
- Bereken het aantal kilogram verrijkt uraan dat per uur wordt gebruikt als je aanneemt dat het afgegeven vermogen van de centrale constant blijft.
- 10 In de zon fuseren waterstofkernen tot heliumkernen waarbij veel energie vrijkomt. Zie figuur 13. Op deze manier produceert de zon per seconde $3,9 \cdot 10^{26}$ J. De totale wereldwijde energieconsumptie is in één jaar ongeveer $1,5 \cdot 10^{14}$ kWh. Daarvan bestaat ongeveer 25% uit elektrische energie.
- Bereken in één significant cijfer hoeveel jaar alle centrales op aarde moeten werken om evenveel energie te produceren als de zon in één seconde doet.
- Waterstofkernen fuseren alleen als ze elkaar heel dicht naderen. Daarom vindt kernfusie alleen plaats in het binnenste van de zon, waar de temperatuur hoog genoeg is.
- Leg uit waarom waterstofkernen alleen bij een (zeer) hoge temperatuur elkaar dicht kunnen naderen.



Figuur 13

Protonen, neutronen en elektronen zijn de bekende deeltjes van de materie om ons heen. Vanuit de ruimte komen ook grote hoeveelheden andere deeltjes op de aarde af. Die deeltjes blijken ongemerkt door de aarde heen te gaan. Wat zijn dat voor deeltjes?

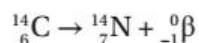


Figuur 14

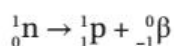
3 Neutrino's

Ontdekking van het neutrino

Bij het verval van C-14 treedt de volgende reactie op:



Je ziet dat bij deze reactie het aantal protonen in de kern met één is toegenomen. Omdat het massagetal niet is veranderd, heeft in de kern van C-14 een reactie plaatsgevonden waarbij een neutron vervalt in een proton en een elektron:



Uit een berekening van het massadefect volgt de hoeveelheid energie die bij dit bètaverval vrijkomt. Die energie is de kinetische energie van de vrijkomende deeltjes. En die verwacht je dan vooral als kinetische energie van het elektron dat vrijkomt als bètastraling.

Uit metingen aan de bètastraling blijkt echter dat de energie van het vrijkomende elektron alle waarden tot de maximale hoeveelheid kan hebben. Aan het begin van de vorige eeuw kon men niet verklaren waar de rest van de energie blijft als een elektron niet de maximale hoeveelheid kinetische energie heeft.

Pauli voorspelde daarom in 1930 dat bij het **bètaverval** van een neutron nog een derde deeltje moest vrijkomen. Dit deeltje zou dan het verschil in energie verklaren. In overeenstemming met het experiment mocht het deeltje geen lading hebben. Het was niet duidelijk of het massaloos moest zijn. Dit derde deeltje bleek het **anti-elektronneutrino** te zijn, afgekort met het symbool $\bar{\nu}_e$. Dit is het antideeltje van het **elektronneutrino**, dat pas later is ontdekt.

Drie soorten neutrino's

Na de ontdekking van het anti-elektronneutrino dat bij β -verval vrijkomt, zijn er nog twee andere typen neutrino's ontdekt. Die zijn gekoppeld aan het muon en aan een nieuw deeltje, het **tauon**. Samen behoren al die deeltjes tot de **leptonen**. Zie tabel 2 en BINAS tabel 26A.

Leptonen				
Generatie	Naam	Symbool	Lading (e)	Massa (MeV c^{-2})
I	elektron	e^{-}	-1	0,51
	elektronneutrino	ν_e	0	$< 2 \cdot 10^{-6}$
II	muon	μ^{-}	-1	106
	muonneutrino	ν_μ	0	$< 0,19$
III	tauon	τ^{-}	-1	1777
	tauonneutrino	ν_τ	0	$< 18,2$

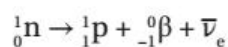
Tabel 2

Het elektron heeft het positron als antideeltje. Van alle andere leptonen in tabel 2 is eveneens een antideeltje ontdekt.

Een neutrino heeft geen lading en een zeer kleine massa in vergelijking met het deeltje waaraan het gekoppeld is. Met de nu bekende nauwkeurigheid van atoommassa's leveren neutrino's geen meetbare bijdrage aan de berekening van het massadefect van een kernreactie.

Behoud van leptongetal

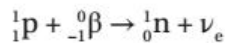
Bij het ${}^0_{-1}\beta$ -verval van een neutron komt het anti-elektronneutrino $\bar{\nu}_e$ vrij. Er geldt dus:



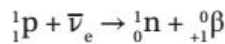
Dat er een antideeltje van het elektronneutrino vrijkomt, heeft te maken met het **behoud van leptongetal** bij een reactie. Hierbij hebben de leptonen zoals vermeld in tabel 2 en BINAS tabel 26A allemaal een leptongetal +1 en de antideeltjes ervan een leptongetal -1.

Protonen en neutronen behoren niet tot de leptonen. Voor de pijl is de som van de leptongetallen dus 0. Dus moet na de pijl de som van de leptongetallen ook 0 zijn. Het elektron heeft een leptongetal +1. Dan moet er een neutrino ontstaan met leptongetal -1. Dit is dus het anti-elektronneutrino.

Botst een elektron op een proton, dan ontstaat er een neutron. Omdat het elektron met leptongetal +1 voor de pijl staat, moet het leptongetal van het deeltje na de pijl +1 zijn: een elektronneutrino:

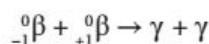


Een neutron kan ook ontstaan als een anti-elektronneutrino op een proton botst. Vanwege het behoud van leptongetal komt er dan een positron vrij:



Annihilatie

Bij bèta-erval komen anti-elektronneutrino's vrij. Die zijn bijna onmogelijk direct te detecteren. Bij een onderzoek kijkt men daarom of er deeltjes zijn ontstaan uit een reactie met anti-elektronneutrino's. Men richt zich bijvoorbeeld op positronen die vrijkomen als een anti-elektronneutrino op een proton botst. Als een positron op een elektron botst treedt **annihilatie** op: de massa van beide deeltjes wordt volledig omgezet in energie. Die energie komt vrij als gammastraling in de vorm van twee gammafotonen:



De twee fotonen geven een ondubbelzinnig experimenteel signaal: vanwege de wet van behoud van energie moeten het fotonen zijn van 0,51 MeV. Zie BINAS tabel 7B. Dat er twee fotonen vrijkomen en niet één foton met de dubbele energie volgt uit een nieuwe behoudswet: de wet van behoud van impuls.

Impuls

Een voorwerp met massa m en snelheid v heeft niet alleen kinetische energie, maar ook **impuls**. Voor de impuls van een voorwerp met massa geldt:

$$p = m \cdot v$$

- p is de impuls in kg m s^{-1} .
- m is de massa in kg.
- v is de snelheid in m s^{-1} .

De impuls noem je ook wel de **hoeveelheid beweging**. Een voorwerp met een grote massa en/of een hoge snelheid heeft dus een grote impuls. Uit de tweede wet van Newton volgt dat voor een impulsverandering een kracht nodig is.

$$F_{\text{res}} = m \cdot a$$

$$F_{\text{res}} = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$F_{\text{res}} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$$

$$F_{\text{res}} \cdot \Delta t = \Delta(m \cdot v)$$

$$F_{\text{res}} \cdot \Delta t = \Delta p$$

Een voorwerp met een grote impuls laat zich lastig van richting veranderen of tot stilstand brengen. Stel, een vrachtwagen en een personenauto rijden naast elkaar met dezelfde snelheid. Om in dezelfde tijd tot stilstand te komen, is de vereiste remkracht van de vrachtwagen groter dan die van de personenauto.

Ook deeltjes zonder massa hebben impuls. De **impuls van een foton** bereken je met:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

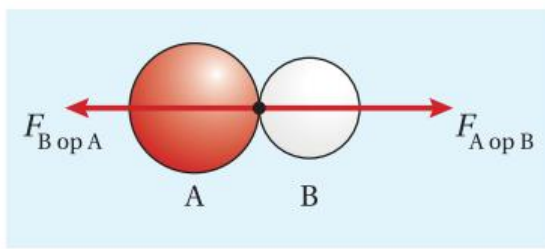
- p is de impuls van het foton in kg m s^{-1} .
- E is de energie van het foton in J.
- c is de lichtsnelheid in m s^{-1} .
- h is de constante van Planck in J s.
- λ is de golflengte in m.

De tweede formule volgt uit: $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

Wet van behoud van impuls

Voor interacties tussen voorwerpen en ook tussen deeltjes geldt de **wet van behoud van impuls**: de totale impuls voor de interactie is gelijk aan de totale impuls na de interactie. Deze wet leid je als volgt af uit de derde wet van Newton.

In figuur 15 zie je twee kogels die met elkaar in botsing zijn gekomen.



Figuur 15

Tijdens de botsing oefenen ze krachten op elkaar uit. Hierbij geldt:

$$F_{A \text{ op } B} = -F_{B \text{ op } A} \quad \text{De onderlinge krachten werken gedurende dezelfde tijd } \Delta t.$$

$$F_{A \text{ op } B} \cdot \Delta t = -F_{B \text{ op } A} \cdot \Delta t \quad F \cdot \Delta t \text{ is gelijk aan een impulsverandering } \Delta p.$$

$$\Delta p_B = -\Delta p_A$$

$$p_{B, \text{na}} - p_{B, \text{voor}} = -(p_{A, \text{na}} - p_{A, \text{voor}})$$

$$p_{A, \text{voor}} + p_{B, \text{voor}} = p_{A, \text{na}} + p_{B, \text{na}}$$

$$p_{\text{totaal, voor}} = p_{\text{totaal, na}}$$

Door het behoud van impuls kan de annihilatie van een elektron en een positron tot één gammafoton niet plaatsvinden. Stel namelijk dat het elektron en positron vanuit tegengestelde richting met dezelfde snelheid op elkaar botsen. De totale impuls voor de annihilatie is dan nul. Dan kan er nooit maar één foton ontstaan, omdat fotonen niet stil kunnen staan. Er moeten dus minimaal twee fotonen zijn ontstaan die in tegengestelde richting bewegen.

Cowan-Reines neutrino-experiment

Botst een anti-elektronneutrino op een proton, dan kunnen daarbij een neutron en positron ontstaan. Het positron komt vrijwel onmiddellijk een elektron tegen, waarbij beide annihileren tot twee gammafotonen. Het vrijkomende neutron wordt vrijwel direct in een andere kern opgenomen. Hierbij komt energie vrij in de vorm van een derde gammafoton.

Cowan en Reines registreerden inderdaad het gelijktijdig optreden van die twee gebeurtenissen: de positronannihilatie en de neutronvangst. Zij toonden daarmee indirect het bestaan van de neutrino's aan en kregen hiervoor in 1995 de Nobelprijs.

Neutrinodetectoren

Neutrino's kunnen niet direct worden waargenomen. Zij hebben geen lading, bijna geen massa en bewegen vrijwel zonder interactie door alle materie heen. Vanuit de zon treffen zo'n 65 miljard neutrino's per seconde een stukje aardoppervlak van slechts 1 cm² en komen er aan de andere van de aarde vrijwel allemaal weer uit.

In Japan staat de ondergrondse Super-Kamiokande neutrinodetector. Deze bestaat uit een enorm vat met een diameter van 39 m en een hoogte van 42 m, gevuld met zeer zuiver water. Botst een neutrino op een van de kernen van een watermolecuul of op een elektron, dan kan er een subatomair deeltje ontstaan dat sneller beweegt dan de lichtsnelheid in het water. Er komt dan energie vrij in de vorm van een lichtflitsje. Vergelijk dit met de knal die je hoort als een vliegtuig door de geluidsbarrière gaat.

De grote hoeveelheid water is nodig om het aantal botsingen met neutrino's groot genoeg te maken. Rondom het vat bevinden zich tienduizend lichtgevoelige detectoren, zodat een zeldzaam lichtflitsje ook daadwerkelijk geregistreerd wordt.

Opgaven

- 11 Er zijn verschillende vervalreacties waarbij een β -deeltje betrokken is. Naast een andere kern ontstaat er dan ook altijd een neutrino.
- Geef de reactievergelijking van de volgende vervalreacties:
- Helium-3 verval, waarbij een elektron de kern verlaat.
 - Boor-8 verval, waarbij een positron de kern verlaat.
 - Beryllium-7 verval, waarbij een elektron uit de elektronenwolk in de kern wordt opgenomen.

- 12 Deeltjes met massa hebben impuls. Ook massaloze deeltjes zoals fotonen hebben impuls.

De impuls van de fotonen in een lichtstraal is gelijk aan $8,8 \cdot 10^{-28} \text{ kg m s}^{-1}$.

- Bereken de frequentie van het licht.
- Bereken de snelheid van een proton met dezelfde impuls als het foton.

- 13 Een detector registreert de fotonen die vrijkomen als een positron op een elektron botst. Tijdens de interactie tussen die twee deeltjes is hun snelheid zeer klein.

- Leg uit dat bij deze botsing dan minstens twee fotonen moeten vrijkomen. Tijdens de annihilatie komen twee fotonen vrij.
- Bereken de frequentie van één zo'n foton. Geef je antwoord in twee significante cijfers.

- **hulpblad** 14 De wet van behoud van impuls geldt ook voor botsingen tussen gewone voorwerpen zoals biljartballen. Op een biljartlaken liggen een rode en een witte bal. Meneer Ceulemans stoot een witte biljartbal met een snelheid $v_w = 5,0 \text{ m s}^{-1}$ richting het midden van de rode bal. Zie figuur 16.

Als je de weerstandskrachten verwaarloost, dan geldt voor de snelheden van de twee ballen na de botsing: $v_w + v_r = 5,0$.

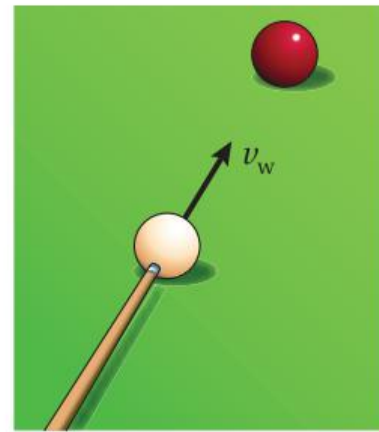
- Leid dit verband af.

Behalve de wet van behoud van impuls geldt ook de wet van behoud van energie.

- Bereken de snelheid van de rode en van de witte bal na de botsing. Neem hierbij aan dat de witte bal de rode in het midden raakt en dat er bij de botsing geen warmte ontstaat.

Als er wel warmte ontstaat, houdt de witte bal na de botsing een kleine voorwaartse snelheid.

- Leg dit uit.



Figuur 16

- **hulpblad** 15 In de zon wordt door kernfusie helium gevormd uit waterstof. De eerste stap in dit proces bestaat uit de fusie van twee protonen, waarbij een positron, een neutrino en nog een deeltje ontstaan.

- Geef de reactievergelijking van deze fusie.

Na een aantal stappen ontstaat een kern He-4. Bij dit proces worden netto vier protonen en twee elektronen omgezet in een kern He-4 en twee neutrino's.

- Bereken hoeveel MeV in totaal per heliumkern vrijkomt. Neem daarbij aan dat de neutrino's geen massa hebben.

Elke seconde worden door de zon $2,0 \cdot 10^{38}$ neutrino's uitgezonden. De neutrino's bewegen vanuit de zon in alle richtingen en worden onderweg in de ruimte niet tegengehouden. De zonkant van de aarde wordt permanent getroffen door een bombardement van deze neutrino's.

- Bereken het aantal neutrino's dat de aarde per seconde treft.

16 Tritium, H-3, vervalt onder het uitzenden van een elektron tot een dochterkern.

a Geef de reactievergelijking.

De elektrische energie tussen de vrijkomende deeltjes is verwaarloosbaar als de deeltjes niet meer dicht bij elkaar zijn. De deeltjes hebben dan alleen nog maar kinetische energie. De kinetische energie van een deeltje kun je uitdrukken in de impuls p :

$$E_k = \frac{p^2}{2m}$$

b Leid dit af.

Bij het verval van tritium is sprake van een massadefect. In het begin van de 20^e eeuw dacht men dat deze energie werd verdeeld over het vrijkomende elektron en de achterblijvende dochterkern. Als de tritiumkern voor het verval stilstaat, is na het verval de impuls van het elektron gelijk aan die van de achterblijvende dochterkern.

c Leg dit uit.

De verhouding tussen de kinetische energie $E_{k,e}$ en de totale kinetische energie $E_{k,tot}$ wordt dan gegeven door:

$$\frac{E_{k,e}}{E_{k,tot}} = \frac{m_d}{m_d + m_e}$$

- $E_{k,e}$ is de kinetische energie van het elektron in J.
- $E_{k,tot}$ is de totale kinetische energie van het elektron en de dochterkern in J.
- m_d is de massa van de dochterkern in kg.
- m_e is de massa van het elektron in kg.

d Leidt dit af. Gebruik het resultaat van vraag c.

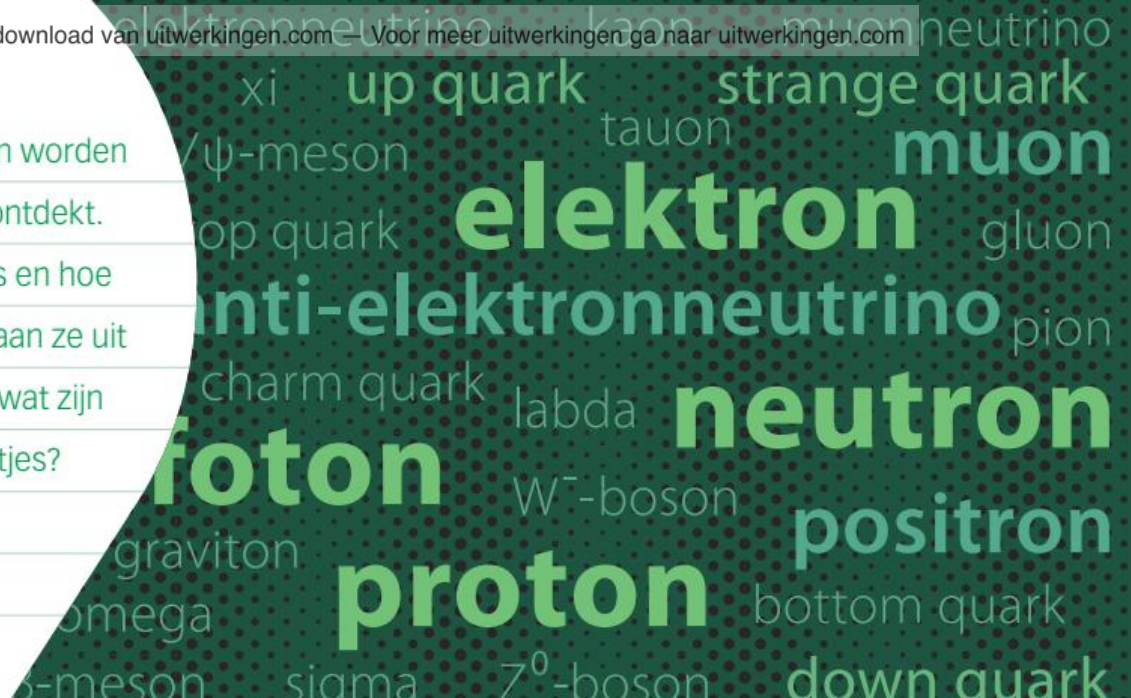
e Bereken in vier significante cijfers de verhouding $\frac{E_{k,e}}{E_{tot}}$ voor het verval van tritium.

Uit het massadefect volgt dat er 0,018 MeV vrijkomt bij verval van tritium. Dit vind je ook terug in BINAS tabel 25A als de maximale energie van het elektron. Ontstaat er alleen een elektron en een dochterkern, dan is de verhouding tussen de kinetische energieën constant en de totale kinetische energie van het elektron altijd 0,018 MeV. In werkelijkheid is de kinetische energie van het elektron bijna altijd kleiner, waarbij verschillende kleinere waarden mogelijk zijn. Pauli stelde daarom voor dat er bij bètaverval nog een extra deeltje vrijkomt.

f Verklaar hiermee dat

- de kinetische energie van het elektron kleiner is dan 0,018 MeV;
- de kinetische energie van het elektron verschillende kleinere waarden kan hebben.

Bij botsingsexperimenten worden steeds nieuwe deeltjes ontdekt. Wat zijn dat voor deeltjes en hoe kun je ze ordenen? Bestaan ze uit nog kleinere deeltjes en wat zijn dan de allerkleinste deeltjes?



Figuur 17

4 Elementaire deeltjes en het standaardmodel

Leptonen, mesonen en baryonen

Vanaf de jaren 50 van de vorige eeuw zijn met behulp van botsingsproeven in deeltjesversnellers meer dan 200 verschillende deeltjes ontdekt. Bij sommige deeltjes gebeurde dat bij toeval. Naar andere deeltjes werd bewust gezocht op grond van theoretische voorspellingen. In eerste instantie werden de deeltjes op grond van hun massa in drie groepen ingedeeld: de **leptonen**, de **mesonen** en de **baryonen**, naar de Griekse woorden voor licht, middelzwaar en zwaar.

Men ging ervan uit dat deeltjes in dezelfde groep, naast hun massa's ook andere overeenkomstige eigenschappen hebben. Deze indeling ging goed totdat er deeltjes werden ontdekt die mesonachtige eigenschappen hebben, maar zwaarder zijn dan de toen bekende baryonen. Zie BINAS tabel 26C.

MeV c^{-2} als eenheid van massa

De massa van een subatomair deeltje is zo klein, dat het niet handig is om die in kilogram weer te geven. Een handigere eenheid volgt uit de formule van Einstein $E = m \cdot c^2$.

Omdat de lichtsnelheid c constant is, is de energie een maat voor de massa. Daarom staat in BINAS tabel 7B de massa zowel in kg als in MeV en in J. MeV is handiger omdat je dan machten van 10 kunt vermijden.

Uit $E = m \cdot c^2$ volgt $m = E \cdot c^{-2}$. Druk je de energie uit in MeV, dan ontstaat voor massa de eenheid MeV c^{-2} . Deze eenheid wordt gebruikt in BINAS tabel 26.

Voorbeeld

Volgens BINAS tabel 26A is de massa van het elektron $0,511 \text{ MeV } c^{-2}$.

Bereken de massa uitgedrukt in kg.

Uitwerking

$$E = m \cdot c^2$$

Als $m = 0,511 \text{ MeV } c^{-2}$, dan geldt $E = 0,511 \text{ MeV } c^{-2} \cdot c^2 = 0,511 \text{ MeV}$.

$$E = 0,511 \text{ MeV} = 0,511 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

$$\text{eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Zie BINAS tabel 5.

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Zie BINAS tabel 7A.

$$0,511 \cdot 10^6 \times 1,6021 \cdot 10^{-19} = m \cdot (2,9979 \cdot 10^8)^{-2}$$

$$m = 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Afgerond: $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Dit komt overeen met de afgeronde waarde in BINAS tabel 7B.

Quarks

Het periodiek systeem van de elementen geeft een schema waarin alle atoomsoorten zijn ondergebracht. In zo'n schema worden eigenschappen van de atoomsoorten en verbanden tussen atoomsoorten duidelijk. Met combinaties van uitsluitend protonen en neutronen kunnen alle atoomsoorten worden gekarakteriseerd. In de hoop om orde te scheppen in het grote aantal subatomaire deeltjes die waren ontdekt, onderzochten theoretici of ook deze deeltjes in een schema konden worden ingedeeld.

In 1964 werd door Gell-Mann een model opgesteld met slechts een klein aantal bouwstenen: de al genoemde zes leptonen, drie **quarks** en hun antideeltjes. Hij noemde die quarks up, down en strange. Inmiddels is zijn **quarkmodel** uitgebreid met drie andere quarks, charm, top en bottom. Zie tabel 3 en BINAS tabel 26A.

Quarks				
Generatie	Naam	Symbool	Lading (e)	Massa ($\text{MeV } c^{-2}$)
I	up	u	$+\frac{2}{3}$	3
	down	d	$-\frac{1}{3}$	5
II	charm	c	$+\frac{2}{3}$	$1,7 \cdot 10^3$
	strange	s	$-\frac{1}{3}$	$0,1 \cdot 10^3$
III	top	t	$+\frac{2}{3}$	$173 \cdot 10^3$
	bottom	b	$-\frac{1}{3}$	$4,8 \cdot 10^3$

Tabel 3

Quarks hebben een **gebroken lading**, $+\frac{2}{3}e$ of $-\frac{1}{3}e$. Een **antiquark** heeft dezelfde massa maar een tegenovergestelde lading.

Quarks komen niet vrij in de natuur voor, maar altijd in combinaties. Een combinatie van drie quarks of drie antiquarks vormt een baryon en een combinatie van een quark en een antiquark een meson. In principe zijn alle combinaties mogelijk zolang de totale lading nul of een geheel getal oplevert. Zie BINAS tabel 26C. De samenstelling van een proton is udd. De lading is dus

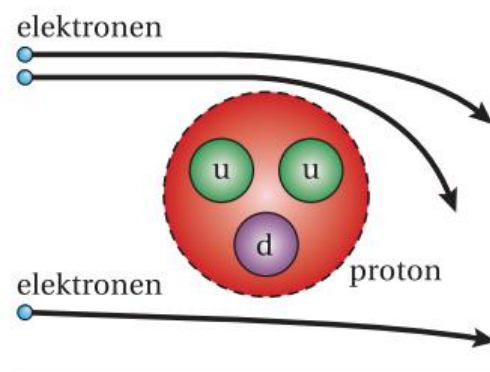
$$+\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e + -\frac{1}{3}e = 1e$$

Een neutron bestaat uit udd en heeft als lading

$$+\frac{2}{3}e + -\frac{1}{3}e + -\frac{1}{3}e = 0e$$

In 1968 zijn experimenten uitgevoerd waarbij elektronen richting protonen werden geschoten. Figuur 18 laat zien in welke richtingen elektronen in de buurt van een proton worden afgebogen. Aan de bovenkant worden elektronen aangetrokken omdat een upquark positief geladen is. Aan de onderkant bevindt zich een negatief geladen downquark, dat de elektronen afstoot.

De conclusie uit het experiment was dat de lading van het proton niet gelijkmatig is verdeeld. Deze waarnemingen konden zo goed met de theorie van Gell-Mann worden verklaard, dat hij al een jaar later voor zijn quarkmodel de Nobelprijs kreeg.



Figuur 18

Elementaire deeltjes

Quarks behoren evenals de leptonen tot de **elementaire deeltjes**. Dit zijn deeltjes die niet uit nog kleinere onderdelen bestaan. BINAS tabel 26A toont een overzicht van alle elementaire deeltjes.

Je ziet dat quarks en leptonen zijn opgedeeld in drie generaties. Alle 'normale' materie is opgebouwd uit deeltjes van generatie I. Hogere generaties hebben overeenkomstige ladingen, maar daarnaast veel grotere massa's en veel kortere levensduren. Ze vervallen tot de deeltjes van de lagere generaties.

Vier fundamentele krachten

Bij de klassieke mechanica ben je vele soorten krachten tegengekomen. Die zijn allemaal te herleiden tot slechts twee **fundamentele krachten**, de **elektromagnetische kracht** tussen deeltjes met lading, en de **gravitatiekracht** tussen deeltjes met massa.

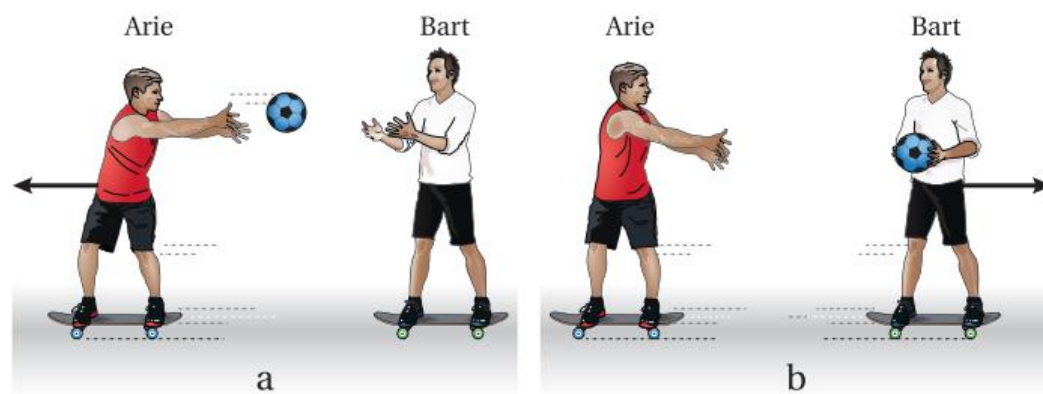
De massa's van de elementaire deeltjes zijn zo klein dat binnen een atoom de gravitatiekrachten te verwaarlozen zijn. Protonen zijn positief geladen en stoten elkaar dus af. Toch valt een atoomkern niet uiteen. Er moet dus nog een kracht zijn die de kern bij elkaar houdt en die sterker is dan de afstotende, elektromagnetische kracht tussen de protonen. Die kracht noem je de **sterke kernkracht** en is de derde fundamentele kracht. Hij houdt de quarks in de mesonen en baryonen bij elkaar. In tegenstelling tot de andere twee fundamentele krachten, werkt de sterke kernkracht alleen op atomaire schaal tot zo'n 10^{-15} m. Op die schaal is de sterke kernkracht veel groter dan de elektromagnetische kracht. Hierdoor blijven de protonen en de neutronen in een atoomkern bij elkaar.

Er blijkt nog een vierde fundamentele kracht te bestaan die de **zwakke kernkracht** heet. Deze kracht speelt een rol bij de wisselwerking tussen quarks en leptonen. Een voorbeeld hiervan is het bètaverval van het proton. Ook de zwakke kernkracht werkt alleen maar op atomaire schaal.

Kracht en uitwisseling van deeltjes

Tussen twee geladen deeltjes werkt een elektrische kracht en je merkt het gevolg ervan als een aantrekking of een afstoting. Wat een kracht is, kun je beschrijven met behulp van de **wisselwerking** tussen deeltjes.

Stel, Arie en Bart staan beiden op een skateboard. Arie gooit een zware bal naar Bart. Zie figuur 19a. Als Arie een kracht uitoefent op de bal, oefent de bal een kracht uit op Arie. Arie gaat daardoor naar links. Als Bart de bal ontvangt, oefent hij een kracht uit op de bal om de bal af te remmen. Tegelijkertijd oefent de bal dus een kracht uit op Bart. Daardoor gaat hij naar rechts. Zie figuur 19b. De conclusie is dat beide skateboards van elkaar af gaan bewegen.



Figuur 19

Connie staat op grote afstand en ziet in verte slechts de twee jongens. Vanwege de afstand kan zij de bal niet zien en ziet zij slechts twee uit elkaar bewegende jongens. Zij concludeert dat er tussen beide jongens een afstotende kracht werkt.

Een afstotende kracht kun je dus beschrijven met de uitwisseling van een deeltje. Dat geldt ook voor een aantrekkende kracht. Zie opgave 21. In tabel 4 zie je de namen van de wisselwerkingsdeeltjes bij de fundamentele krachten. Het foton ken je al als deeltje dat stralingsenergie verplaatst.

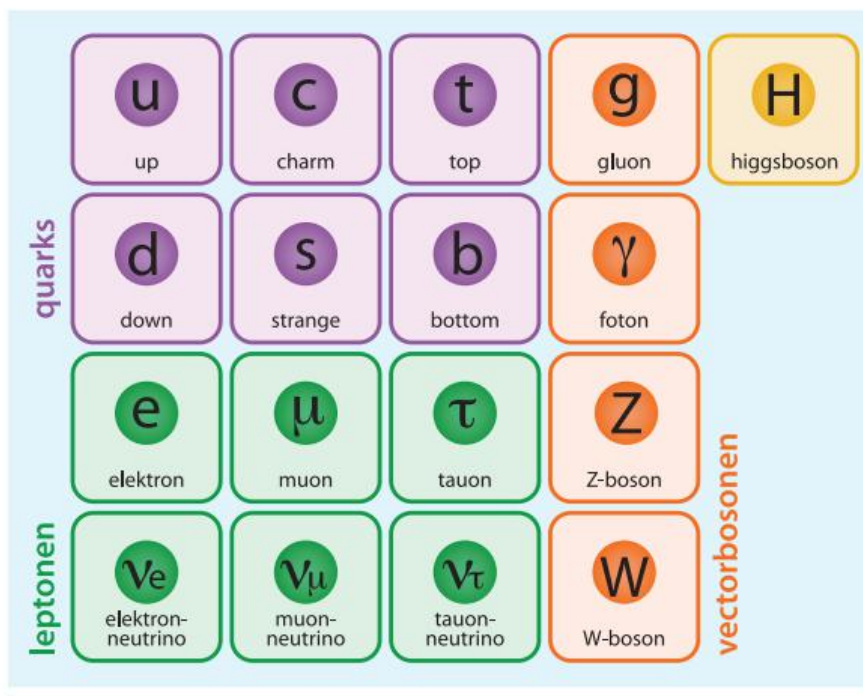
Fundamentele kracht	Wisselwerkingsdeeltje
sterke kernkracht	gluon
zwakke kernkracht	W-boson, Z-boson
elektromagnetische kracht	foton
gravitatiekracht	graviton

Tabel 4

Vanwege de wiskundige beschrijving worden de wisselwerkingsdeeltjes van de elektromagnetische en de kernkrachten **vectorbosonen** genoemd. Zie BINAS tabel 26B met onder andere de relatieve sterkte van een fundamentele kracht ten opzichte van de sterke kernkracht. Het **gluon**, het **W-boson**, het **Z-boson** en het **foton** zijn experimenteel aangetoond; het **graviton** echter nog niet.

Standaardmodel van de elementaire deeltjes

In de jaren 60 en 70 van de vorige eeuw werd het **standaardmodel** ontwikkeld dat de krachten en de deeltjes die alle materie vormen, beschrijft. Dit model combineert de leptonen uit tabel 2, de quarks uit tabel 3 en de vectorbosonen uit tabel 4. Zie figuur 20.



Figuur 20

Higgsboson

Een foton beweegt in vacuüm per definitie met de lichtsnelheid en kan daarom geen massa hebben. Zo zijn er ook andere deeltjes die volgens de wiskundige structuur van het standaardmodel massaloos zouden moeten zijn. Uit experimenten blijkt echter dat ze toch een massa hebben. Om die deeltjes in het standaardmodel te kunnen plaatsen, is er door Higgs en anderen in 1964 een bijzonder, extra deeltje aan het standaardmodel toegevoegd, het **higgsboson**. Dit deeltje geeft massa aan de deeltjes waarmee het interactie heeft.

Om te voldoen aan experimentele en theoretische eigenschappen moest het higgsboson een extreem grote massa hebben van ongeveer $125 \text{ GeV } c^{-2}$ en een levensduur in de orde van 10^{-22} s . Met deze extreem korte levensduur kan een higgsboson nooit direct worden gedetecteerd. Onderzoekers van het CERN in Genève maakten in 2012 bekend dat ze voldoende informatie hadden vergaard die het bestaan van het higgsboson aantoont en dat het de voorspelde massa heeft.

Opgaven

- 17 De eerste generatie quarks bestaat uit de upquark, de downquark en hun antideeltjes.
Toon aan dat je hiermee in theorie vier verschillende mesonen en acht verschillende baryonen kunt bouwen.
(Opmerking: In werkelijkheid zijn er er minder dan je hebt berekend. Sommige combinaties zijn verboden op grond van regels die je niet hoeft te kennen.)
- 18 Eén van de drie sigmadeeltjes is het Σ^+ -deeltje.
 - a Uit welke quarks bestaat het Σ^+ -deeltje?
 - b Leg uit dat de lading van het Σ^+ -deeltje $+e$ is.
In BINAS tabel 26C zijn twee mogelijkheden genoemd voor verval van een Σ^+ -deeltje.
 - c Laat zien dat bij beide mogelijkheden energie vrijkomt.
 - d Leg uit waarom een Σ^+ -deeltje niet kan vervallen volgens de vergelijking $\Sigma^+ \rightarrow n + p^0$.
- 19 Tritium, ${}^3_1\text{H}$ is één van de drie isotopen van waterstof.
 - a Leg uit dat een tritiumkern is opgebouwd uit vier upquarks en vijf downquarks.
 - b Toon aan dat de totale massa van de quarks in een tritiumkern $0,04 \text{ u}$ is.
In BINAS tabel 25A vind je voor de massa van een tritiumkern $3,016049 \text{ u}$. Deze waarde is 75 keer groter dan de massa bij vraag b.
 - c Geef een reden voor dit verschil.

- 20 Helium is een atoomsoort waarvan He-4 een zeer stabiele isotoop is. De deeltjes waaruit He-4 bestaat, zijn stevig gebonden aan elkaar.
In deze opgave bekijk je drie (theoretische) reacties:

- 1 $\text{He} \rightarrow \text{He}^{2+} + 2\text{e}^-$
- 2 $\text{He}^{2+} \rightarrow 2\text{p} + 2\text{n}$
- 3 $\text{p} \rightarrow 2\text{u} + \text{d}$

Je berekent voor elke reactie de verhouding tussen de energie die het kost om de reactie laten plaatsvinden en de energie die de massa van het deeltje voor de pijl vertegenwoordigt volgens de formule van Einstein:

$$\text{verhouding} = \frac{E_{\text{reactie}}}{E_{\text{Einstein}}}$$

De gegevens voor de vragen a, b en c kun je vinden in BINAS tabellen 7, 21, 25 en 26.

- a Bereken in twee significante cijfers voor reactie 1 de verhouding $\frac{E_{\text{reactie}}}{E_{\text{Einstein}}}$.
- b Bereken in twee significante cijfers voor reactie 2 de verhouding $\frac{E_{\text{reactie}}}{E_{\text{Einstein}}}$.
- c Bereken in twee significante cijfers voor reactie 3 de verhouding $\frac{E_{\text{reactie}}}{E_{\text{Einstein}}}$.

Reactie 1 is een chemische reactie. Reactie 2 is een kernreactie.

In een elektriciteitscentrale wordt warmte geproduceerd om water in stoom om te zetten. Deze stoom drijft een generator aan die elektriciteit opwekt. Warmte kun je opwekken in een conventionele centrale met behulp van een chemische reactie of in een kerncentrale met een kernreactie. De massa van het afval in een kerncentrale is veel kleiner dan de massa van het afval in een conventionele centrale met hetzelfde vermogen.

d Leg dit uit.

Reactie 3 blijkt in de praktijk onmogelijk. Dat heeft te maken met de hoeveelheid energie die nodig is om quarks vrij te maken.

e Leg dit uit.

- 21 In deze paragraaf is een afstotende kracht beschreven met de wisselwerking van een deeltje. Zie ook het model met twee jongens op een skateboard, die een bal overgooien.

Een aantrekkende kracht kun je ook beschrijven met de wisselwerking van een deeltje.

Leg dit uit aan de hand van een model met twee jongens op een skateboard die aan een bal trekken.

- 22 Bij het CERN in Genève hebben wetenschappers met de Large Electron Positroncollider (LEP) onderzoek gedaan naar het standaardmodel. In een grote, cirkelvormige ring lieten zij elektronen en positronen op elkaar botsen. Hierbij ontstaan fotonen.
- a Geef de reactievergelijking van een botsing tussen een elektron en een positron. Uit de energie van een foton dat bij deze reactie vrijkomt, kunnen tegelijkertijd een W^+ - en een W^- -vectorboson ontstaan.
 - b Geef ook van deze reactie de vergelijking.
Jacoba zegt dat de twee vectorbosonen in tegenovergestelde richting bewegen.
 - c Leg uit of Jacoba gelijk heeft.
Vlak voor de botsing hebben de elektronen en de positronen dezelfde hoeveelheid energie.
 - d Bereken de energie van een elektron vlak voor de botsing.

Onderzoek naar het bestaan en de eigenschappen van elementaire deeltjes vindt plaats in grote deeltjesversnellers. Hoe zien die eruit? Hoe bepaal je de deeltjes die ontstaan bij een botsing?



Figuur 21

5 Versnellen en detecteren

Principe van een deeltjesversneller

Stel dat je een spaarvarken wilt kapotslaan om erachter te komen wat erin zit. Naarmate de buitenkant harder is, kost dat meer energie. Een grotere energie krijg je door een zwaardere hamer te nemen of door de hamer met een grotere snelheid te laten neerkomen.

Dit principe geldt ook bij het onderzoek naar deeltjes van atomaire afmetingen. Als 'hamer' dient een deeltje dat met grote snelheid op het te bestuderen deeltje botst. Die deeltjes krijgen een grote snelheid in **deeltjesversnellers** waarvan er wereldwijd inmiddels zo'n 30.000 in werking zijn.

In een deeltjesversneller worden geladen deeltjes gebruikt. Deze kun je versnellen met elektrische velden en afbuigen met magnetische velden.

Een deeltjesversneller bestaat uit twee gedeelten:

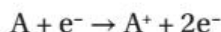
- één of meerdere **ionenbronnen** waarin de geladen deeltjes worden vrijgemaakt;
- een **versneller** die de deeltjes de gewenste snelheid geeft en ze in een bepaalde baan houdt.

Vrijmaken van deeltjes voor botsingsproeven

In versnellers wordt vaak gebruik gemaakt van protonen en elektronen. Protonen hebben als voordeel dat ze zwaar zijn en dat daardoor voor dezelfde hoeveelheid energie een kleinere snelheid nodig is. Protonen bestaan echter uit quarks. Bij een botsing met een ander deeltje is het aantal mogelijke reacties daardoor veel groter. Elektronen bestaan niet uit kleinere deeltjes en hebben dit nadeel dus niet.

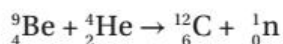
Elektronen kunnen relatief gemakkelijk worden vrijgemaakt uit metalen, zoals in de kathodestraalbuis gebeurt. De kathode wordt hierbij elektrisch verwarmd, waardoor aan het oppervlak elektronen vrijkomen. De positief geladen anode trekt deze vrije elektronen aan zodat ze niet terug kunnen vallen op de kathode. Uit een gaatje in de anode komt uiteindelijk een bundel vrije elektronen, die daarna versneld worden in het versnellergedeelte.

Protonen en andere positief geladen ionen genereer je met een ionenbron. Een veelgebruikte techniek is het beschieten van het neutrale atoom met een sterke elektronenbundel. Je krijgt dan de volgende reactie:



Vrije protonen maak je dus door waterstofatomen te beschieten met elektronen.

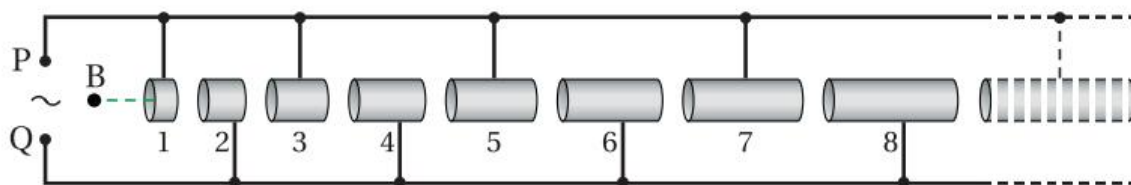
Vrije neutronen kun je maken door met alfadeeltjes op beryllium te schieten. Je krijgt dan de volgende reactie:



De energie van neutronen hangt samen met de kernreactie waarbij ze vrijkomen omdat je ze niet kunt versnellen.

Typen versnellers

Er zijn twee soorten versnellers: lineaire versnellers en circulaire versnellers. In figuur 22 zie je een schematische tekening van een **lineaire versneller**.



Figuur 22

Vanuit bron B komt een geladen deeltje met een verwaarloosbare snelheid in buis 1. Tussen buis 1 en buis 2 staat een zodanige spanning dat het deeltje richting buis 2 wordt versneld. Terwijl het deeltje buis 2 doorloopt, wordt de spanning tussen de punten P en Q omgedraaid. Daardoor wordt het deeltje weer versneld bij de oversteek tussen buis 2 en buis 3. De kinetische energie van het deeltje neemt dus toe. Doordat de spanning op het juiste moment wordt omgedraaid, neemt de kinetische energie van de deeltjes tussen elke twee buizen steeds verder toe.

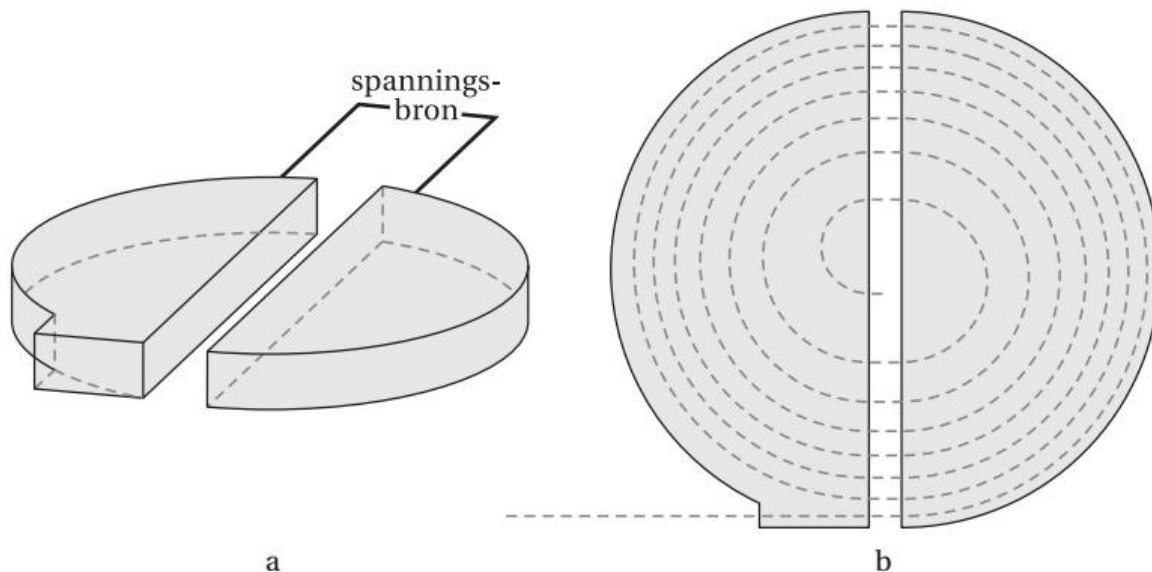
Hierbij geldt telkens:

$$\Delta E_k = q \cdot U_{PQ}$$

- ΔE_k is de toename van de kinetische energie in J.
- q is de lading van het deeltje in C.
- U_{PQ} is de spanning over P en Q in V.

Het **cyclotron** is een voorbeeld van een **circulaire versneller**. Zie figuur 23a.

Een cyclotron bestaat uit twee platte, D-vormige metalen dozen, met loodrecht daarop een magnetisch veld met constante waarde. In paragraaf 1 heb je kunnen lezen dat in een magnetisch veld een geladen deeltje een lorentzkracht ondervindt waardoor het een halve cirkelbaan doorloopt met straal $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$.



Figuur 23

Tussen de twee dozen staat een wisselspanning met een constante frequentie. Door het elektrisch veld wordt het geladen deeltje in de ruimte tussen de twee dozen versneld. Bij elke oversteek neemt de snelheid van het deeltje toe, waardoor ook de straal van de cirkelbaan toeneemt. Aan de rand van de versneller worden de deeltjes naar buiten geleid. Zie figuur 23b.

Combineer je $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$ met $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$, dan krijg je $r = \frac{m \cdot 2\pi \cdot r}{B \cdot q \cdot T}$. Dus geldt:

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$$

- T is de omlooptijd in s.
- m is de massa van het deeltje in kg.
- B is de magnetische inductie in T.
- q is de lading van het deeltje in C.

De **omlooptijd** in een cyclotron is dus niet afhankelijk van de straal van de cirkelbaan en de snelheid van het deeltje. Deze formule is geldig voor deeltjes met een snelheid veel kleiner dan de lichtsnelheid. Blijft de omlooptijd bij een steeds grotere baanstraal constant, dan wordt op den duur de snelheid van het deeltje gelijk aan de lichtsnelheid. Volgens de relativiteitstheorie kunnen deeltjes niet met de lichtsnelheid bewegen en moet in de buurt van de lichtsnelheid de formule $T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$ aangepast worden. Een constante frequentie van de wisselspanning volstaat dan niet meer.

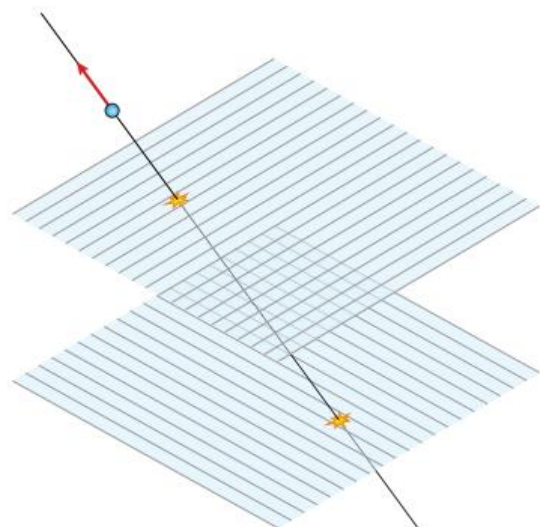
De moderne circulaire versneller is het **synchrotron**. Die lijkt wat betreft de opzet veel op het cyclotron. Het magnetisch veld dat zorgt voor de cirkelvormige baan is echter niet langer constant, maar varieert met de snelheid van de deeltjes. Dat gebeurt zodanig dat de omlooptijd constant blijft, zelfs bij zeer hoge energieën.

Op het Fermi-laboratorium bij Chigaco in de Verenigde Staten staat de op één na grootste versneller, de Tevatron. Dat is een synchrotron met een omtrek van bijna 7 km waarin protonen en antiprotonen op elkaar botsen met een maximale energie van 1 TeV. Met de Tevatron is het bestaan van de topquark aangetoond.

De grootste synchrotronversneller, de Large Hadron Collider, staat bij het CERN in de buurt van Genève. Deze versneller heeft een omtrek van 27 km. Hierin worden protonen versneld tot een maximale energie van 7 TeV. De LHC bestaat uit een ondergrondse ring met daarin twee cirkelvormige buizen die dicht naast elkaar liggen. In de twee buizen gaan twee bundels protonen rond in tegengestelde richting. Als de protonen voldoende energie hebben, laten wetenschappers deze protonen in een detector tegen elkaar botsen.

Dradenkamer

Een nevelvat wordt niet meer gebruikt. Tegenwoordig wordt het pad van de deeltjes bepaald met een **dradenkamer**. Een dradenkamer bestaat uit lagen met een groot aantal evenwijdige draden die onder een hoge spanning staan. In figuur 24 zie je twee van die lagen. De lagen zijn 90° gedraaid ten opzichte van elkaar waardoor er een soort rooster ontstaat. Een deeltje of foton dat de dradenkamer binnenkomt, laat een spoor van ionen en elektronen na. De ionen bewegen naar de dichtstbijzijnde draad. Treft een ion een draad, dan ontstaat er een klein stroompje in de draad. Aan de hand van de draden waarin wel en niet een stroompje ontstaan, kan een computer het pad van het invallende deeltje bepalen.



Figuur 24

Toepassingen

De versnelde deeltjes worden uiteindelijk op een doel gericht. Wil je nieuwe atomen maken, dan laat je deeltjes met grote snelheid op een stilstaand doel botsen. In 1939 lukte het bijvoorbeeld om in een cyclotron met een deuteriumbundel het nieuwe element neptunium te maken. Dit element komt niet vrij in de natuur voor.

Met botsingsexperimenten zoals in de Tevatron en de LHC bestuderen wetenschappers de opbouw van de materie. Hierbij worden twee bundels gebruikt van snel bewegende lichte deeltjes die in tegengestelde richting bewegen. Daardoor is bij de botsing meer energie beschikbaar om nieuwe deeltjes te laten ontstaan.

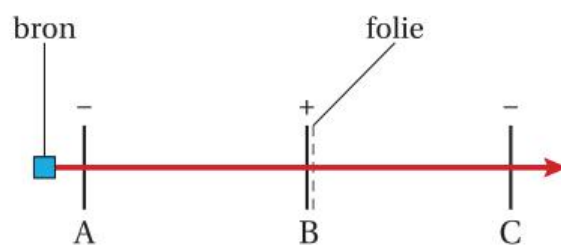
Naast de zoektocht naar nieuwe deeltjes, richt het onderzoek zich de komende tijd onder andere op de eigenschappen van het recent ontdekte higgsboson. Ook zal een speciale versneller gebouwd gaan worden om neutrino's beter te bestuderen. Eén van de fundamentele vragen hierbij is of het neutrino massaloos is zoals het standaardmodel voorspelt, of dat het toch een heel kleine massa heeft zoals recente experimenten lijken aan te tonen.

Opgaven

- 23 De energie van een deeltje in een lineaire versneller wordt bepaald door de spanning tussen de versnelplaten. Is de spanning te groot, dan treedt er 'doorslag' op. Elektronen springen daarbij spontaan over van de kathode naar de anode, vergelijkbaar met de bliksem tussen een onweerswolk en de aarde.

Toch kan de maximale energie van een deeltje op een elegante manier worden verdubbeld. Dat gebeurt in een zogenoemde tandemversneller. Dit type versneller bevat drie platen A, B en C waarover een spanning staat. Zie figuur 25.

Er wordt een bron met negatief geladen ionen gebruikt. In het midden van de versneller treft het ion een stukje folie die elektronen van het ion losmaakt. Hierdoor wordt het ion positief.



Figuur 25

- a Leg uit dat het ion nu twee keer wordt versneld.

In de versneller zijn de platen A en C met elkaar verbonden. Onder bepaalde voorwaarden is de energie van het deeltje dat plaat C verlaat verdubbeld ten opzichte van een deeltje dat enkel wordt versneld tussen de platen A en B. Hierbij is de invloed van de massa verwaarloosbaar.

- b Leg uit onder welke voorwaarde de energie is verdubbeld.

24 De isotoop gallium-67 kan worden gemaakt door een geschikt element te beschieten met protonen. Wanneer de kern van dat element een proton invangt, ontstaan naast gallium-67 ook twee neutronen.

- Geef de reactievergelijking.
- Toon aan dat het proton minimaal een energie van 12,0 MeV moet hebben om de reactie te laten plaatsvinden.

De protonen worden versneld in een cyclotron. Bij elke oversteek doorloopt het proton een versnelspanning van 50 kV.

- Bereken hoeveel omlopen een proton vanuit rust heeft doorlopen om de energie van 12,0 MeV te krijgen.

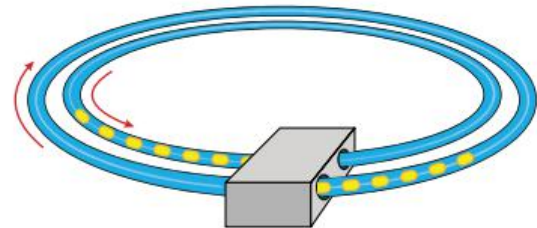
In de gebieden waar het proton niet wordt versneld, is zijn snelheid constant. Een magnetisch veld zorgt ervoor dat het proton daar een halve cirkelbaan beschrijft. Op een gegeven moment heeft een proton een snelheid van $2,5 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$. Met deze snelheid doorloopt het een cirkelbaan met een straal van 48 cm.

- Bereken de sterkte van het magnetisch veld in het cyclotron.

► hulplblad

25 De LHC bestaat uit een ondergrondse ring met daarin twee cirkelvormige buizen dicht naast elkaar. Zie figuur 26. De buizen vormen een cirkel met een diameter van 8,5 km.

In de twee buizen gaan twee bundels protonen rond in tegengestelde richting waarbij ze worden versneld. Als de protonen door het versnellen een energie van 7,0 TeV hebben gekregen, laten de wetenschappers deze protonen in een detector tegen elkaar botsen.



Figuur 26

Voordat de protonen in de ring van de LHC binnenkomen, worden ze eerst in een lineaire versneller versneld. Daarbij doorlopen de protonen vele malen een elektrische spanning van 5,0 kV.

- Bereken hoe vaak de protonen deze spanning moeten doorlopen om vanuit stilstand een snelheid van $1,2 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$ te krijgen.

De protonen worden in de buizen in een cirkelbaan gehouden door sterke elektromagneten om de buizen. Met een energie van 7,0 TeV is de snelheid van de protonen (vrijwel) gelijk aan de lichtsnelheid.

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

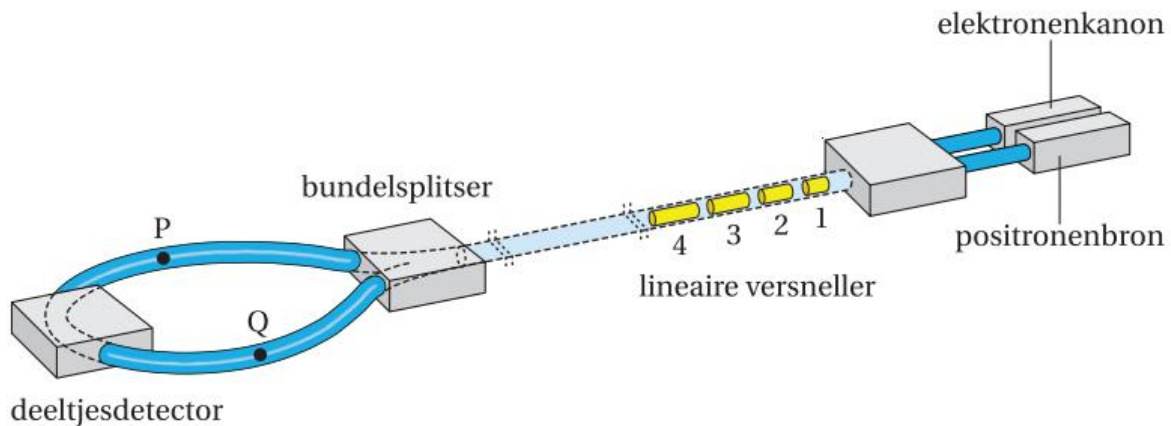
$$F_{\text{mpz}} = \frac{E}{r}$$

- F_{mpz} is de middelpuntzoekende kracht in N.
 - E is de energie van het proton in J.
 - r is de straal van de baan in m.
- Bereken de sterkte van het magnetisch veld.

De wetenschappers laten de bundels samenkomen zodat de protonen botsen. Als twee protonen op elkaar botsen, kunnen allerlei reacties plaatsvinden. Bij één van die reacties ontstaan deuterium, een positron en een neutrino.

c Stel de vergelijking van deze reactie op.

- 26 In de Verenigde Staten staat een versneller waarmee elementaire deeltjes geproduceerd worden door elektronen en positronen op elkaar te laten botsen. De deeltjes worden versneld in de opstelling van figuur 27.



Figuur 27

In het elektronenkanon worden de elektronen versneld in een elektrisch veld. Ze verlaten dit veld met een snelheid van $2,4 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$.

a Bereken de versnелspanning.

Door het elektronenkanon met een bepaalde frequentie aan en uit te schakelen, komen de elektronen in groepjes de lineaire versneller binnen. Ook de positronen komen in groepjes de lineaire versneller binnen met de snelheid van $2,4 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$. Om en om beweegt zo een groepje elektronen en een groepje positronen.

In figuur 27 is de nummering van de eerste vier cilinders aangegeven. De cilinders met een even nummer zijn op het ene aansluitpunt van een spanningsbron aangesloten, die met een oneven nummer op het andere aansluitpunt.

b Leg uit of deze spanningsbron een wisselspanningsbron of een gelijkspanningsbron is.

De elektronen en positronen komen met een even grote snelheid de bundelsplitser binnen. Ze worden hier door een magnetisch veld van elkaar gescheiden. Daarna worden beide soorten deeltjes afzonderlijk door middel van magnetische velden naar een plaats binnen de deeltjesdetector geleid, waar ze botsen.

c Beredeneer of de magnetische velden bij P en Q gelijk gericht zijn of juist tegengesteld gericht zijn aan elkaar.

Bij de botsing van een positron en een elektron kan een Z^0 -vectorboson ontstaan.

d Bereken hoe groot de energie van een botsend elektron minimaal is geweest als een Z^0 -vectorboson ontstaat. Geef je uitkomst in twee significante cijfers.

27 In de LHC bewegen groepjes protonen met zeer hoge snelheid. Zo'n groepje kleine deeltjes heet een bunch. Een bunch heeft de vorm van een cilinder met een frontaal oppervlak met een diameter van $16\text{ }\mu\text{m}$.

Een cilindervormige bunch bevat $1,15 \cdot 10^{11}$ protonen. Een proton heeft een diameter in de ordegrootte van 10^{-15} m . Doordat de protonen een heel hoge snelheid hebben heeft de elektrische afstoting nauwelijks effect. Als een proton frontaal door een bunch vliegt is de kans dat hij een ander proton raakt ongeveer 1 op 10^{20} .

a Toon dit aan.

Doordat de kans op een botsing zo klein is, levert een ontmoeting van twee bunches een aantal botsingen op in de ordegrootte 10^2 .

b Toon dit aan.

In de praktijk blijkt het kruisen van twee bunches maar twintig detecteerbare botsingen op te leveren. De LHC is een ring met een omtrek van 27 km. De protonen bewegen daarin met bijna de lichtsnelheid. Daardoor kruisen de bunches elkaar dus vele malen per seconde. Bovendien draaien er niet één, maar ongeveer $2,8 \cdot 10^3$ bunches tegelijk hun rondjes. Dit levert ongeveer 600 miljoen botsingen per seconde op.

c Toon dit aan.

Eén run van de LHC duurt ongeveer 10 uur. Elke botsing levert ongeveer 1,6 megabyte aan data. De vier grootste internetbedrijven (Google, Amazon, Microsoft en Facebook) hebben samen ongeveer $1,2 \cdot 10^{18}$ bytes opgeslagen.

d Bereken hoelang de LHC erover doet om $1,2 \cdot 10^{18}$ bytes aan data te genereren. Zelfs met de snelste computers is deze datastroom niet te beheersen, laat staan te analyseren. Daarom worden de data snel gecheckt op interessante events. Slechts een op de miljoen waargenomen botsingen overleeft deze schifting, en wordt definitief vastgelegd in computergeheugen. De rest wordt gewist.

e Leg uit waarom het grootste deel van de botsingen voor de onderzoekers aan de LHC geen interessante gegevens genereert.

6 Afsluiting

Samenvatting

Alle materie is opgebouwd uit slechts een honderdtal atomen. Elk atoom bestaat uit drie verschillende deeltjes: positief geladen protonen, negatief geladen elektronen en ongeladen neutronen. In de eerste helft van de vorige eeuw is veel onderzoek gedaan naar de eigenschappen van deze subatomaire deeltjes, zoals naar de massa en de lading.

In de jaren 30 namen onderzoekers een nieuw deeltje waar met dezelfde massa en lading als het elektron. Dit deeltje heeft echter een positieve in plaats van een negatieve lading. Het deeltje kreeg de naam positron en is een voorbeeld van antimaterie. Inmiddels is van alle bekende deeltjes ook het bijbehorende antideeltje ontdekt.

Bij een kernreactie verandert de kern van een atoom. Bij alle kernreacties geldt behoud van ladingsgetal en behoud van massagetal.

Bij radioactief verval verandert de kern spontaan. Hierbij kunnen alfastraling, bètastraling en gammastraling ontstaan.

Bij elk radioactief verval komt energie vrij. Deze hoeveelheid energie bereken je met de formule van Einstein uit het massadefect bij de kernreactie.

Ook kunnen atomen veranderen in een andere soort door ze te beschieten met deeltjes. In sommige gevallen komt daarbij zoveel energie vrij dat die in kerncentrales kan worden benut om elektriciteit op te wekken.

Zoals alle processen voldoen ook kernreacties aan de wet van behoud van impuls. Op grond hiervan werd het bestaan van het neutrino voorspeld: een deeltje zonder lading en zonder noemenswaardige massa.

Neutrino's hebben vrijwel geen interactie met andere materie. Vanuit de zon wordt de aarde elke seconde gebombardeerd met miljarden neutrino's die er vervolgens dwars doorheen gaan. Inmiddels zijn er drie verschillende soorten neutrino's bekend, het elektronneutrino, het muonneutrino en het tauonneutrino.

Neutrino's hebben een te kleine massa om een rol te spelen bij de berekening van het massadefect. Welk neutrino een rol speelt bij een kernreactie, leid je af met behulp van het leptongetal.

Uit botsingsexperimenten tussen protonen en elektronen bleek dat een proton geen homogeen geladen bolletje is. Protonen en neutronen bestaan uit nog kleinere deeltjes: quarks. Er zijn zes verschillende quarks ontdekt, het up-, down-, strange, charm, top en bottomquark.

Quarks hebben een gebroken lading. Ze komen niet vrij in de natuur voor, maar alleen in combinatie met andere quarks. Baryonen, zoals protonen en neutronen, zijn opgebouwd uit een combinatie van drie quarks of drie antiquarks. Mesonen bestaan uit een combinatie van een quark en een antiquark.

Leptonen, zoals elektronen en neutrino's, bestaan niet uit nog kleinere deeltjes. Met de kennis van nu zijn elektronen en neutrino's dus voorbeelden van elementaire deeltjes.

Vergelijkbaar met het periodieke systeem waarin alle atoomsoorten systematisch zijn gerangschikt, zijn ook de elementaire deeltjes systematisch gerangschikt. Dat is gebeurd in het standaardmodel. Hierin staan het elektron, het muon, het tauon, de drie neutrino's en de zes quarks.

Tussen macroscopische voorwerpen werken slechts twee fundamentele krachten: de gravitatiekracht tussen massa's en de elektromagnetische kracht tussen ladingen. Op atomaire schaal werken nog twee andere fundamentele krachten: de sterke kernkracht die de quarks bij elkaar houdt en de zwakke kernkracht die bepaalde kernreacties veroorzaakt.

In het standaardmodel wordt een kracht beschreven aan de hand van de uitwisseling van een deeltje.

In de natuur komen alleen stabiele en langlevende deeltjes voor. Instabiele deeltjes kunnen in versnellers worden gemaakt. Deze deeltjes kunnen ontstaan als geladen deeltjes zoals elektronen of protonen met een zeer hoge snelheid op andere deeltjes botsen. Voorbeelden van versnellers zijn de lineaire versneller en het cyclotron. Bij botsingen tussen deeltjes kunnen nieuwe deeltjes ontstaan. Deze nieuwe deeltjes hebben meestal een korte levensduur en vallen snel uiteen in lichtere deeltjes. Door de sporen van deze deeltjes te analyseren kan worden afgeleid welke deeltjes tijdens de botsing zijn ontstaan.

Gegevens die betrekking hebben op dit katern

De formules die in dit katern aan bod gekomen zijn, staan hieronder bij elkaar.

middelpuntzoekende kracht	$F_{\text{mpz}} = \frac{m \cdot v^2}{r}$
lorentzkracht	$F_L = B \cdot q \cdot v$
kromtestraal	$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$
omlooptijd	$T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$
toename kinetische energie	$\Delta E_k = q \cdot U_{\text{PQ}}$
formule van Einstein	$E = m \cdot c^2$
impuls van een voorwerp met massa	$p = m \cdot v$
impuls van een foton	$p = \frac{E}{c}$ en $p = \frac{h}{\lambda}$

De meeste formules kun je terugvinden in BINAS tabel 35A, D en E.

In BINAS staan de gegevens die horen bij dit katern in verschillende tabellen.

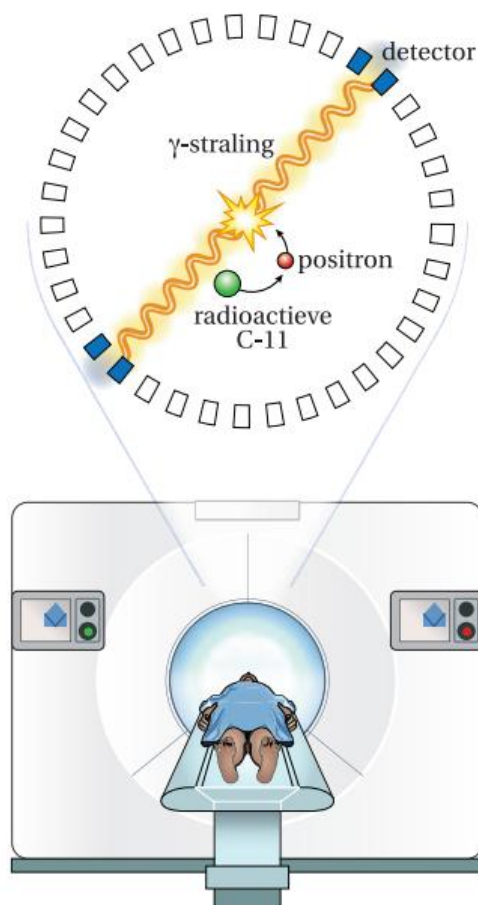
- Tabel 7: Waarden van enige constanten
- Tabel 25A: Isotopentabel
- Tabel 26: Bouw en structuur van de materie

Opgaven

► tekenblad

► hulpblad

- 28 Bij onderzoek naar de ziekte van Alzheimer wordt een PET-scanner gebruikt. PET staat voor Positron Emissie Tomografie. Daarbij injecteert men bij de patiënt een speciale stof die de C-11 isotoop bevat. Deze stof bindt de C-11 isotoop aan plaatsen in de hersenen waar de ziekte van Alzheimer zich manifesteert. De isotoop C-11 verkrijgt men door versnelde protonen op N-14 te schieten.
- a Geef de kernreactievergelijking van de productie van C-11.
- De C-11 vervalst onder uitzending van een positron.
- b Leg uit of bij deze vervalreactie een neutrino of een antineutrino ontstaat. Het positron dat ontstaat, remt in het hersenweefsel af tot (bijna) stilstand, en annihileert dan op die plaats met een elektron. Daarbij worden twee gammafotonen met dezelfde frequentie in tegengestelde richting uitgezonden. Zie figuur 28.
- c Leg uit waarom de twee gammafotonen in tegengestelde richting bewegen.



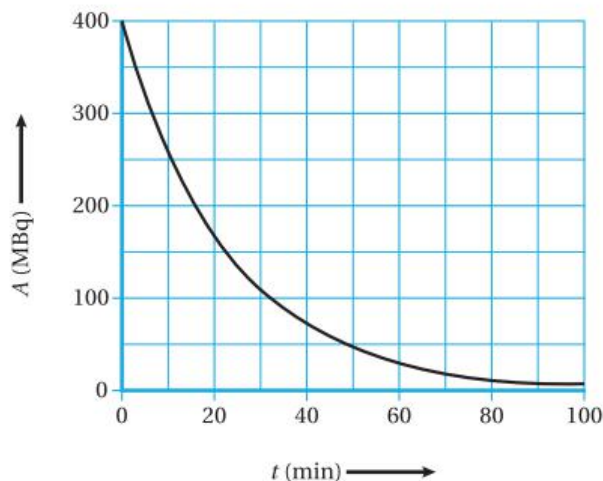
Figuur 28

Als twee gammafotonen binnen een tijdsduur Δt de ringvormige detector bereiken, neemt men aan dat ze afkomstig zijn van dezelfde annihilatie.

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

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 29 is de grootte van de activiteit van de ingespoten stof in de hersenen uitgezet tegen de tijd.



Figuur 29

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.

- e Bepaal de stralingsdosis die de hersenen ontvangen.

De halveringstijd die uit het verloop van de activiteit in figuur 29 volgt, is kleiner dan de halveringstijd voor het verval van C-11 die in BINAS staat.

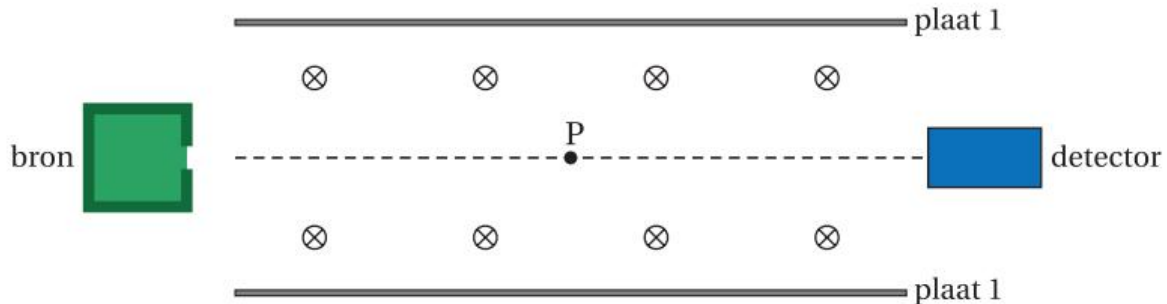
- f Geef hiervoor een reden.

- **tekenblad** 29 Zoals bekend bestaat β^- -straling uit elektronen. Om een onderzoek aan β^- -straling te doen, heeft Harald een radioactieve bron met P-32 laten maken. Hierbij is 1,0 gram P-32 gebruikt. Tijdens zijn onderzoek heeft de bron nog maar een activiteit van $2,5 \cdot 10^{12}$ Bq.

► **hulpblad**

- a Bereken de tijd tussen het maken van de bron en het onderzoek van Harald. Druk je antwoord uit in dagen.

Harald wil de snelheid bepalen van de β^- -deeltjes die de bron verlaten. Hij plaatst daarvoor de bron met een detector in een luchtledige ruimte met een homogeen magnetisch en een homogeen elektrisch veld. Deze opstelling is schematisch weergegeven in figuur 30.



Figuur 30

De magnetische veldlijnen staan loodrecht op het vlak van de tekening, het papier in gericht. De zwaartekracht op de deeltjes is te verwaarlozen ten opzichte van de andere twee krachten die op de deeltjes werken: de lorentzkracht en de elektrische kracht.

Door de platen 1 en 2 op de juiste wijze op een spanningsbron aan te sluiten, is het mogelijk de elektronen uit de bron langs een rechte lijn in de detector terecht te laten komen.

- b Geef in figuur 30 in punt P met pijlen de richtingen aan van de stroom I , van de lorentzkracht F_L en van de elektrische kracht F_{el} . Geef een uitleg bij je tekening.
- c Leg uit of plaat 1 op de positieve pool of op de negatieve pool van de spanningsbron moet worden aangesloten.

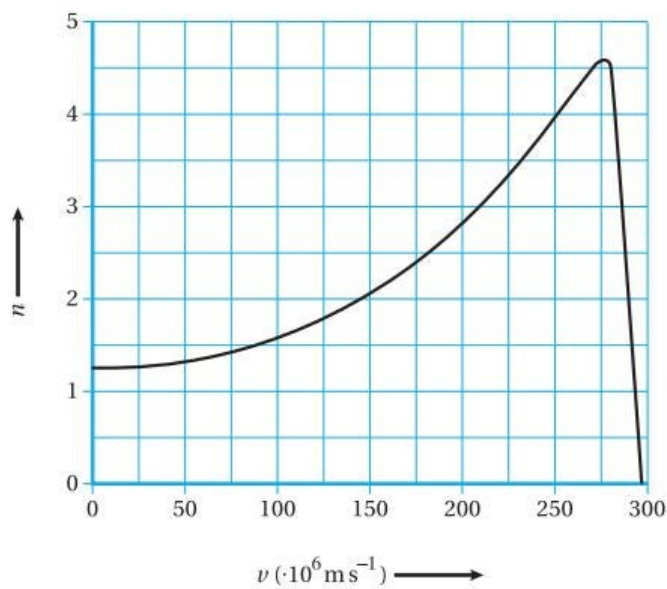
Bij een bepaalde snelheid gaan de elektronen in een rechte lijn van de bron naar de detector. Voor deze snelheid geldt:

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

- v is de snelheid in m s^{-1} .
 - U is de spanning tussen de platen in V.
 - B is de sterkte van het magnetisch veld in T.
 - d is de afstand tussen de platen in m.
- d Leid deze formule af met behulp van formules uit BINAS.

De elektronen die uit de bron komen, hebben niet allemaal dezelfde snelheid.

Harald gebruikt zijn opstelling om te bepalen hoe die snelheid verdeeld is. Daartoe varieert hij de spanning U en meet hij het aantal elektronen n dat gedurende een bepaalde tijdsduur de detector bereikt. Uit deze gegevens maakt hij een grafiek van de snelheidsverdeling van de elektronen uit de bron. Zie figuur 31.

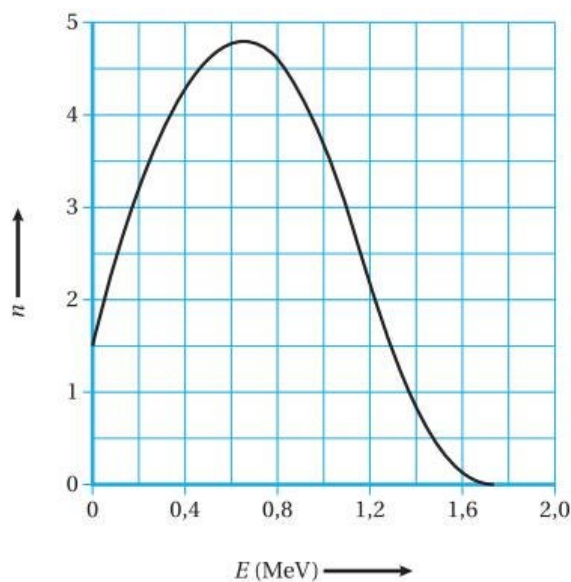


Figuur 31

Harald ziet in BINAS tabel 25A de waarde van 1,72 MeV bij P-32 onder '*verval en energie van het deeltje*'. Hij denkt dat die energie de kinetische energie is die hoort bij de meest voorkomende snelheid uit figuur 31.

e Toon met een berekening aan dat dit niet zo is.

Harald realiseert zich dat de massa's van de elektronen bij deze snelheden volgens de relativiteitstheorie niet meer constant zijn. Als je daarvoor corrigeert krijg je de energieverdeling van de elektronen die is weergegeven in figuur 32.



Figuur 32

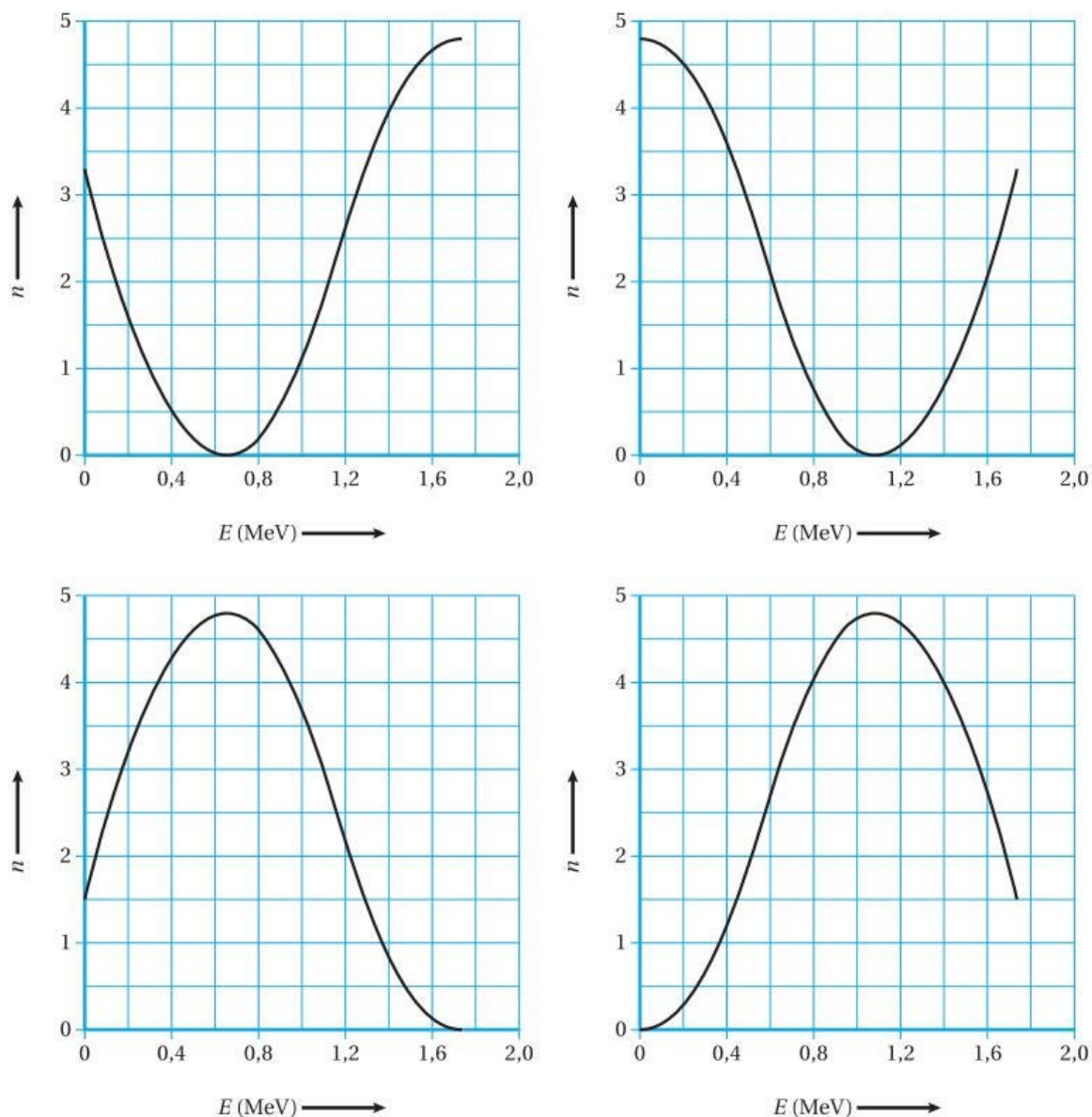
Omdat bij β^- -verval elke keer dezelfde hoeveelheid energie vrijkomt (in dit geval 1,72 MeV), toont het experiment van Harald aan dat bij β^- -verval tegelijk met elk elektron nog een ander deeltje vrijkomt.

f Leg uit of dit deeltje een neutrino is of een antineutrino.

Harald wil de energieverdeling van de vrijkomende (anti)neutrino's vergelijken met de energieverdeling van de elektronen uit figuur 32.

In figuur 33 staan vier grafieken met een energieverdeling van de vrijkomende (anti)neutrino's.

g Leg uit welke grafiek de energieverdeling van de (anti)neutrino's het beste weergeeft.



Figuur 33

Leerdoelen

Hierna vind je een overzicht van de leerdoelen per paragraaf. Ga voor jezelf na of je de leerdoelen beheerst. Geef aan met welke leerdoelen je nog moeite hebt en wat je hiermee gaat doen.

Paragraaf 1 Subatomaire deeltjes

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: moleculen, atomen, elektronen(wolk), kathodestraalbuis, radioactief, alfastraling, bètastraling, gammastraling, (atoom)kern, protonen, neutronen, (sub)atomaire deeltjes, wilsonvat, nevelvat, spoor, kromtestraal, kosmische straling, positron, antideeltje, antimaterie, muon	☐	
atoommodel van Thomson beschrijven	☐	
atoommodel van Rutherford beschrijven	☐	
beschrijven hoe je uit een spoor in een wilsonvat informatie over de lading en snelheid van het deeltje kunt afleiden	☐	
berekeningen maken en redeneren met de formule voor de kromtestraal: $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$	☐	

Paragraaf 2 Kernreacties

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: atoomnummer, ladingsgetal, massagetal, (in)stabiele isotopen, vervalreacties, behoudswet, behoud van ladingsgetal, behoud van massagetal, K-vangst, kernreacties, massadefect, kerncentrale, splijtingsreactie, fusiereactie, kettingreactie	☐	
met behulp van behoudswetten verval- en kernreacties opstellen	☐	
het principe van de opwekking van elektrische energie in een kerncentrale beschrijven	☐	

Paragraaf 3 Neutrino's

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: bèta-erval, elektronneutrino, anti-elektronneutrino, tauon, leptonen, behoud van leptongetal, annihilatie, impuls, hoeveelheid beweging, wet behoud van impuls	☐	
beschrijven waarom bij bèta-erval van een neutron nog een derde deeltje moet vrijkomen	☐	
met behulp van behoudswetten bepalen welk neutrino ontstaat bij een kernreactie	☐	
beschrijven hoe neutrino's indirect kunnen worden gedetecteerd	☐	
uitleggen waarom bij annihilatie van een elektron en een positron twee fotonen ontstaan en niet één	☐	
beschrijven hoe het Cowan-Reines-neutrino-experiment het bestaan van neutrino's aantoont	☐	
berekeningen maken en redeneren met de wet behoud van impuls en de formules voor impuls van een voorwerp en van een foton: $p_{\text{totaal,voor}} = p_{\text{totaal,na}}; p = m \cdot v; p = \frac{E}{c}; p = \frac{h}{\lambda}$	☐	

Paragraaf 4 Elementaire deeltjes en het standaardmodel

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: mesonen, baryonen, up-, down-, strange, charm-, top-, bottomquark, antiquark, quarkmodel, gebroken lading, elementair deeltje, fundamentele kracht, elektromagnetische kracht, gravitatiekracht, sterke en zwakke kernkracht, wisselwerking, vectorboson, gluon, W-boson, Z-boson, foton, graviton, standaardmodel, higgsboson	☐	
beschrijven hoe resultaten van experimenten het quarkmodel bevestigen	☐	
een kracht beschrijven als een uitwisseling van een deeltje	☐	

Paragraaf 5 Versnellen en detecteren

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: deeltjesversneller, lineaire versneller, ionenbron, cyclotron, circulaire versneller, omlooptijd, synchroton, dradenkamer	○	
het principe van een lineaire deeltjesversneller beschrijven	○	
het principe van een circulaire deeltjesversneller beschrijven	○	
berekeningen maken en redeneren met de formules voor de toename kinetische energie, de omlooptijd: $\Delta E_k = q \cdot U_{PQ}$; $T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$	○	

