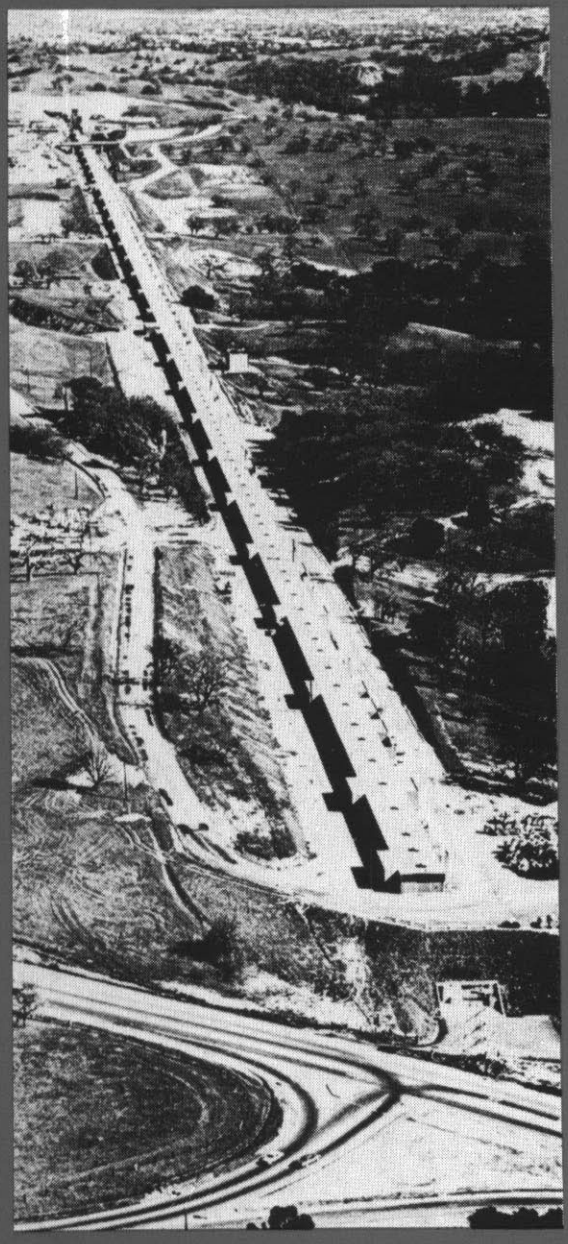
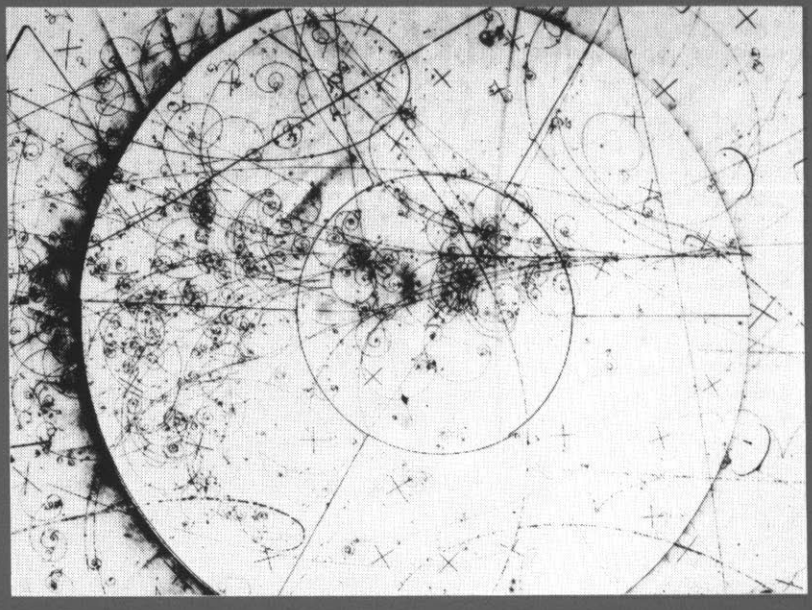
MATERIE





PLON
Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

bovenbouw
HAVO

materie

Samengesteld door de projectgroep van het PLON in samenwerking met de Vakgroep Natuurkunde-Didactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht

voor de 5e klas HAVO

Experimentele uitgave

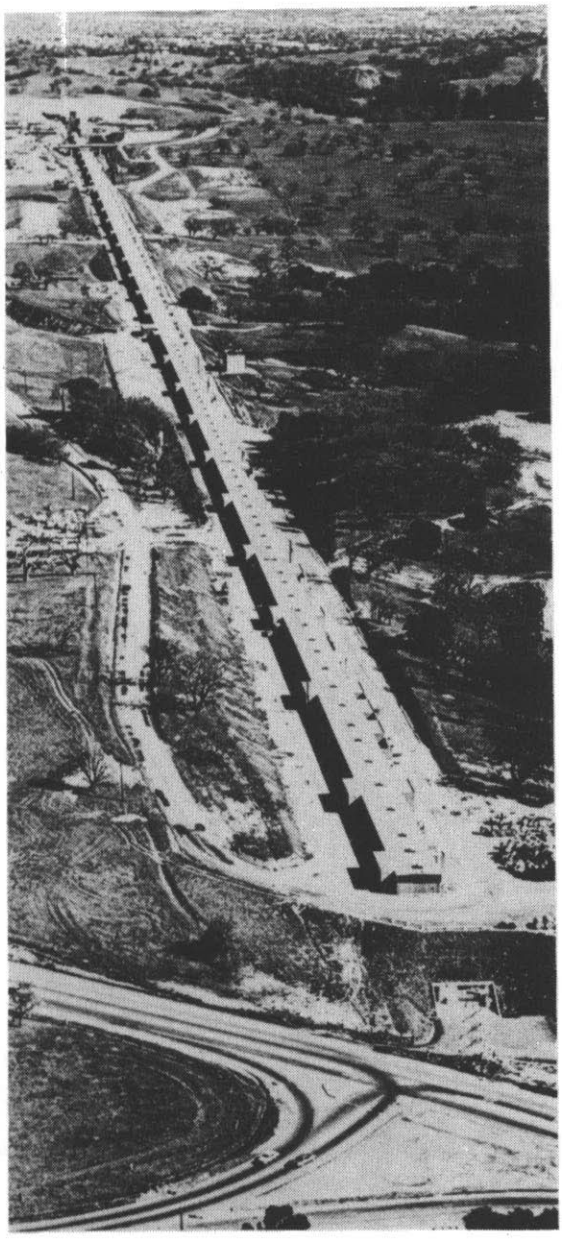
PLON

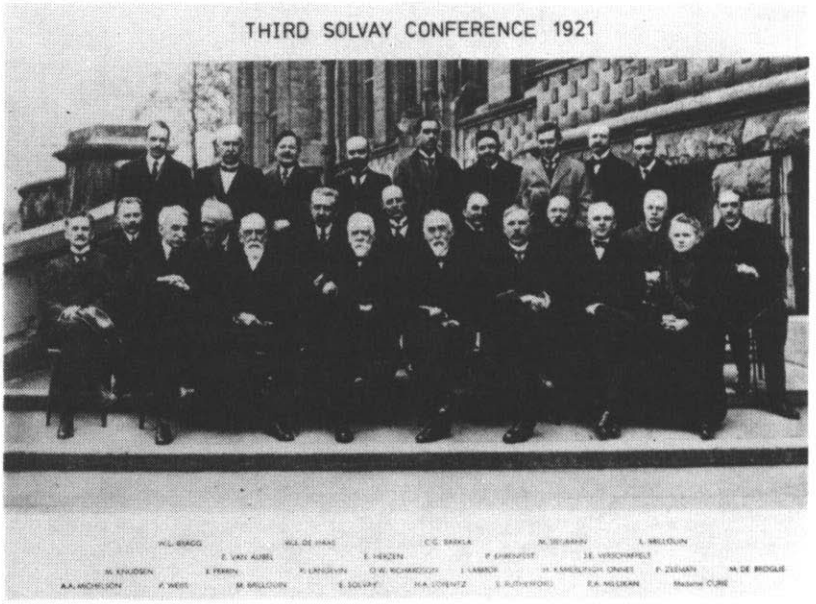
* Het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) is in 1972 begonnen onder auspiciën van de Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde (CMLN). De opdracht was: het ontwikkelen en door middel van onderzoek evalueren van leerpakketten voor natuurkundeonderwijs op mavo, havo en vwo, en het ontwerpen van een plan voor goede begeleide introductie daarvan in de scholen.
* Het PLON werkt onder toezicht van een stuurgroep waarin vertegenwoordigers uit het onderwijs, de vervolgopleiding, didactische instellingen, onderwijsondersteuningsinstituten, lerarenopleidingen en het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen vertegenwoordigd zijn.
* Het PLON is ondergebracht bij de Vakgroep Natuurkunde Didaktiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Deze vakgroep participeert tevens in de activiteiten ten behoeve van havo-bovenbouw. Ten behoeve van vwo-bovenbouw bestaat een samenwerkingsverband met de universiteiten van Amsterdam (GU) en Groningen, en groepen leraren die werken aan de ontwikkeling van lesmateriaal.
* Het adres van het PLON is:
  PLON, lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA, de Uithof, Utrecht, Tel. 030-532717

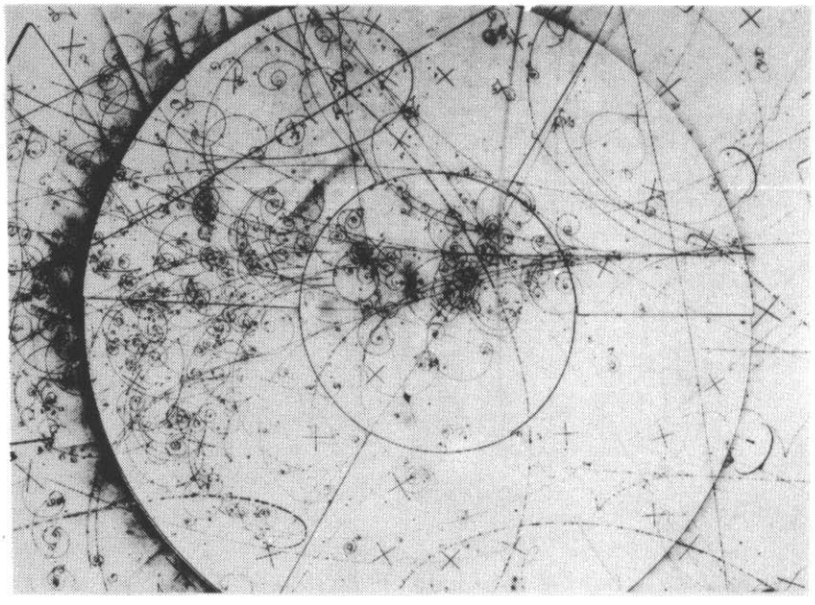
© 1984 Rijksuniversiteit Utrecht Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without the prior permission of the publisher.

MATERIE







PLON
Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

bovenbouw
HAVO

inhoud

		blz.
1	oriëntatie	5
2	elementen en atomen: eeuwenoude ideeën	9
3	van elektriciteit tot elektron	19
4	vier natuurkundigen rond 1900	37
5	van elektron tot neutron	51
6	van neutron tot quark	60
7	wie zal dat betalen	81
	index	87
	namenregister	88

hoofdstuk 1

ORIENTATIE

inhoud blz.

1.1 materie als onderwerp van onderzoek 5
1.2 de opzet van het thema 'Materie' 8

1.1 MATERIE ALS ONDERWERP VAN ONDERZOEK

In de vierde klas heb je de natuurkunde leren kennen aan de hand van een aantal toepassingsgebieden uit het dagelijks leven. Die gebieden waren onder andere het weer, muziek, verkeer, elektrische machines en de energievoorziening. In de loop van dit laatste schooljaar zul je nog andere toepassingsgebieden tegenkomen, zoals elektronica, lichtbronnen, kernenergie, kernwapens en gezondheidszorg.
De meeste natuurkundigen houden zich bezig met toepassingen. Toch zou het een incompleet beeld van de natuurkunde geven, wanneer je alleen met de toepassingen van dit vak zou kennismaken. Voor een vollediger beeld van natuurkunde is het nodig ook enige tijd stil te staan bij het werk van díe natuurkundigen, die betrokken zijn bij het zogenaamde *fundamentele* onderzoek. Dit is onderzoek dat niet gedaan wordt met het oog op toepassingen, op praktisch nut.

Als onderwerp hebben we 'materie' gekozen. Dat woord stamt af van het Latijnse 'materia', wat *grondstof* betekent. Het gaat dus over de stof waaruit de dingen gemaakt zijn. Dat Latijnse woord geeft aan, dat ook lang geleden al over de aard der dingen werd nagedacht en gelukkig ook geschreven. En aangezien het heden nooit te begrijpen is zonder het verleden, willen we in dit thema globaal nagaan hoe het denken over materie zich in de loop van de tijd heeft ontwikkeld. Niet als leuk op zichzelf staand verhaal, maar om de wortels van de tegenwoordige natuurkunde te doorgronden.
We zullen speciaal aandacht besteden aan de periode omstreeks 1900, waarin een aantal fundamentele ontdekkingen werd gedaan. En aan vier natuurkundigen die daar een belangrijke rol in speelden: Röntgen, Thomson, Rutherford en (Madame) Curie.

HERINNERINGEN AAN Mme CURIE.

Donderdag 5 Juli 1934 – DE TELEG

GEEN MOEILIJKHEDEN TE GROOT.

Experimenteele vaardigheid en eindeloos geduld. – Bewondering voor de Nederlandsche natuurkundigen.

HET ELEMENT 93
Ontdekking van
Prof. Fermi.

De wetenschap bouwt weer op, wat de natuur zelf vernield heeft.

WETENSCHAPPEN.

WAT Mme CURIE ONTDEKTE.

De kostbaarste stof.

Radium en zijn werking. Slechts 700 gr. verkregen. Ca. *f* 150.000 per gram.

Ongeveer 35 jaar zijn er verloopen sinds Mme Curie het radium heeft ontdekt (1898) en thans in 1934 zijn er ongeveer gram van deze kostbare

THE TIMES, MONDAY, FEBRUARY
ESTIMATES 1932-33
A NEW RAY
DR. CHADWICK'S SEARCH FOR "NEUTRONS"

met succes radiumbehan-

WETENSCHAP & SAMENLEVING

Versneller 1

Het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energie Fysica (NIKHEF) in Amsterdam gaat meewerken aan de ontwikkeling van de nieuwe deeltjesversneller HERA in Hamburg. Het gaat om een ringvormige machine met een omtrek van 6,5 kilometer

het eerst botsingen en protonen bij ho doelmatig kunnen Bij het Europese o CERN in Genève, b kunnen reeds expe botsingen tussen p antiprotonen bij h gedaan. Als de nie

TOCH „VRIJE" QUARKS?

Eind april dit jaar hebben drie Amerikaanse onderzoekers van de Stanford Universiteit in Californië een aanwijzing gevonden dat er wel dege-

elke normale elektrische lading ont- el daan. Bij metingen bleek toen dat ti-el twee van de acht bolletjes een lading och dichtbij +1/3 en −1/3 bezaten in

de Volkskrant

WETENSCHAP & S

Ontdekking W-deeltje wijst op bestaan van oerkracht

Na jaren van intensief speurwerk meent een groep natuurkundigen een bijzonder deeltje te hebben ontdekt. Het bestaan van dit deeltje, dat de naam W-

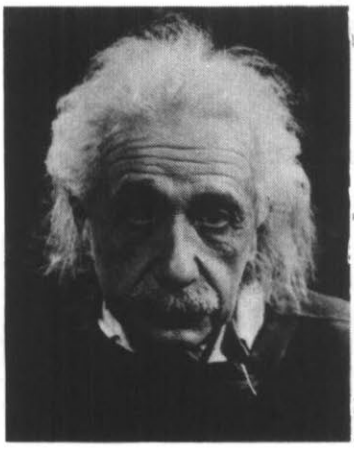
Over de hele wereld is opwinding ontstaan onder de natuurkundigen. Eind januari maakten onderzoekers

een bepaalde vorm van radioactiviteit kunnen met elkaar in verband worden gebracht. Eind februari zal van de126

Voortgang in het natuurkundig onderzoek was en is sterk afhankelijk van de techniek. Juist bij het onderzoek naar kleine, snelle en onzichtbare dingen is de natuurkundige sterk afhankelijk van technische hulpmiddelen, die vaak zelf weer berusten op fysische principes. In dit thema komen vooral díe apparaten aan bod, die gebruik maken van elektrische en magnetische velden. Zonder het gebruik van die velden zouden we nu niet veel meer weten dan een eeuw geleden ...

Ook nu nog zijn duizenden natuurkundigen bezig om antwoorden te krijgen op vragen over de aard van materie. Af en toe verschijnen er stukken in de pers die tipjes van de sluier rond dit werk oplichten. Bij onthullingen zie je altijd meer als je weet waar je op moet letten. Vandaar dat ook een doel van dit thema is een overzicht te geven van het soort werk dat nu op dit gebied wordt gedaan. Waar zijn ze naar op zoek, hoe gaan ze te werk, hoe duur is dit soort onderzoek, wie werken er aan wat en wat voor nut zou het kunnen hebben anders dan het bevredigen van de eeuwige nieuwsgierigheid van de mens naar hoe alles in elkaar zit?

Samenvattend: in het thema 'Materie' gaat het om:
- de ontwikkeling van het denken over materie in de loop der tijd;
- de rol van techniek bij de voortgang van natuurkundig onderzoek;
- het persoonlijk stempel dat enkele natuurkundigen hebben gedrukt op de ontwikkeling in hun vak;
- een overzicht van het huidige fundamentele onderzoek naar materie.



1. HOE BEKEND IS HET WERK VAN NATUURKUNDIGEN?

Ga eens na in je omgeving welke antwoorden je krijgt op de volgende vragen.

a. Welke mannelijke en vrouwelijke natuurkundigen van vroeger en nu ken je van naam?

b. Waar bestaat materie uit? (Niet tevreden zijn met antwoorden als 'atomen'; doorvragen!)

c. Waar wordt natuurkundig onderzoek naar materie bedreven?

d. Wat voor nut heeft dit soort onderzoek?

historische ontwikkeling

Het denken over 'materie' begint bij de Griekse filosofen. In de loop van dit thema worden talrijke ontdekkingen of theorieën genoemd, samen met een jaartal en met de naam van de betrokken natuurwetenschapper. Een hulpmiddel bij het overzien van deze ontwikkeling is de *tijdbalk*.

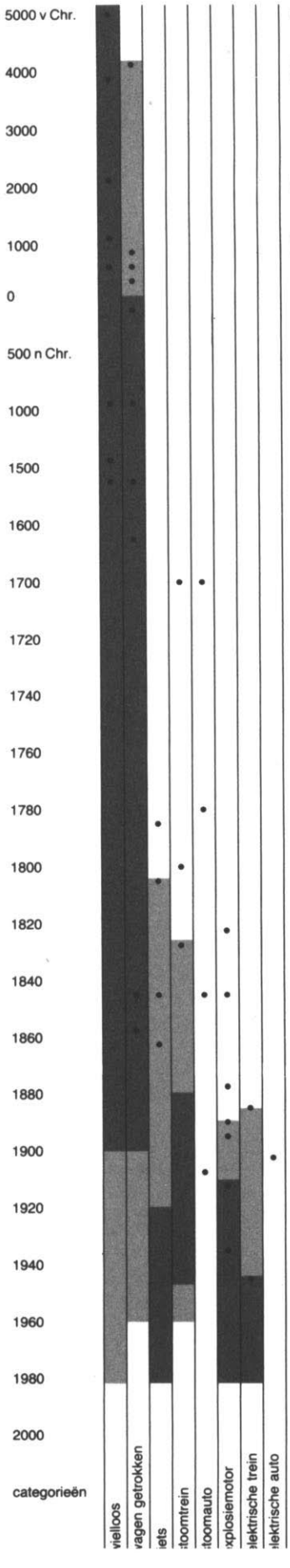
Om de mogelijkheden van zo'n tijdbalk aan te geven, is op blz. 7 de 'historische ontwikkeling van het vervoer over land' weergegeven.

De ontwikkeling is opgedeeld naar diverse categorieën: in dit voorbeeld zijn dat soorten van vervoer. Met behulp van een arcering van licht tot donker is aangegeven welke categorie op een bepaald tijdstip weinig tot zeer belangrijk was. Tenslotte is uit het overzicht af te lezen hoeveel tijd is verlopen tussen de ontdekking van een principe en de toepassing ervan bij vervoer over land.

2. DE MATERIE-TIJDBALK

Tijdens het bestuderen van dit thema kun je zelf een 'materie-tijdbalk' opstellen. Maak daartoe een eigen boekhouding van theoretische of experimentele vondsten, mét jaartal en bijbehorende natuurwetenschapper.

HISTORISCHE ONTWIKKELING VAN HET VERVOER OVER LAND



in Scandinavië gebruikt men sleden

het wiel is bekend in Sumerië
de ezel als lastdier in Egypte en Sumerië

paard als rijdier, eerst in Centraal Azië, later in Midden Oosten

eerste sporen van een wegennet in Griekenland
de wagen wordt bekend in Europa
Carthago en Rome starten de aanleg van een wegennet
in Rome worden wagenverhuurbedrijven opgericht

Chinezen rusten paarden uit met borstriemen

Karel de Grote opent postwegen naar Duitsland, Italië en Spanje

de Inca's (Peru) leggen een wegennet door het Andes gebergte aan

Charles Estienne publiceert een wegengids voor Frankrijk

in Londen start het openbaar vervoer met rijtuigen

Thomas Savery (Engeland) bouwt de eerste bruikbare stoommachine

William Murdock toont het eerste stoomvoertuig
de graaf van Sivrac ontwikkelt de voorloper van de fiets

Richard Trevithick's eerste locomotief wordt in Londen tentoongesteld
loopfiets met stuur en verend zadel van baron Drais zu Sauerbrun

Samuel Brown ontwikkelt een explosiemotor
vanaf 1825 (George Stephenson) worden spoorlijnen aangelegd

Robert W. Thomson ontwikkelt de luchtband; er is géén belangstelling

in Parijs wordt een paardentramlijn geopend
Pierre Michaux (Parijs) bouwt de eerste fiets met pedalen

Otto ontwikkelt de viertaktmotor

Siemens demonstreert de eerste elektrische trein; elektrische tram in Berlijn
Delamare-Bebouteville; eerste auto met benzinemotor
Rudolf Diesel bouwt zijn dieselmotor

elektrische auto rijdt 105 km/h
stoomauto rijdt 200 km/h
Henry Ford start de massaproductie van auto's

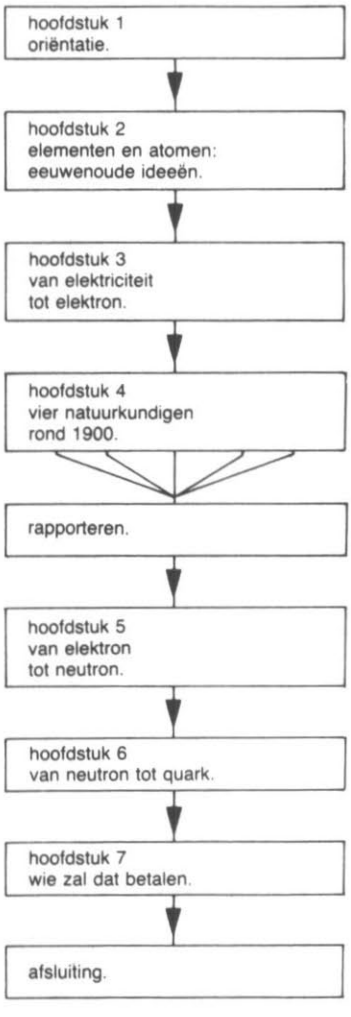
Adolf Hitler start de aanleg van een autowegennet

ook in Nederland komt de elektrificatie van het spoorwegnet op gang

N.B.: Het belang van een categorie is met meer en minder arcering aangegeven. Voor de laatste 100 jaar geldt deze belang-afweging slechts voor de rijke landen.

1.2 DE OPZET VAN HET THEMA 'MATERIE'

De opzet van het thema 'Materie'.



De figuur hiernaast geeft een overzicht van de structuur van dit thema. In hoofdstuk 2 lopen we met zevenmijlslaarzen door de geschiedenis, om de fundamenten te leren kennen waarop het huidige bouwwerk van de natuurkunde rust. Hoofdstuk 3 gaat in op het onderzoek naar kathodestralen met behulp van elektrische en magnetische velden. Dit onderzoek heeft geleid tot de ontdekking van het elektron. Er komen wat nieuwe formules in voor, die je leert gebruiken, en je doet enkele proeven.

In hoofdstuk 4 maak je nader kennis met één van de vier roemruchte natuurkundigen die rond 1900 belangrijke bijdragen aan het onderzoek naar materie leverden: Thomson, Röntgen, Rutherford en Madame Curie. Het werk van deze vier wordt in de les met elkaar vergeleken.

Hoofdstuk 5 staat wat langer stil bij de ontwikkeling van het atoommodel tussen 1895 en 1932, eindigend met de ontdekking van het neutron.

Die ontdekking was echter ook een nieuw begin, zoals in hoofdstuk 6 blijkt. Daar komen recente ontwikkelingen in het onderzoek naar elementaire deeltjes aan bod. Je leert de quarks kennen, evenals de vier fundamentele krachten waar men het verband tussen zoekt. Tenslotte wijden we hoofdstuk 7 aan de betekenis van fundamenteel natuurkundig onderzoek. Welke lessen zijn er te trekken uit het verleden? Welke kant kan, mag of moet het onderzoek uitgaan? Is het de moeite en het geld waard?

ELEMENTEN EN ATOMEN: EEUWENOUDE IDEEEN

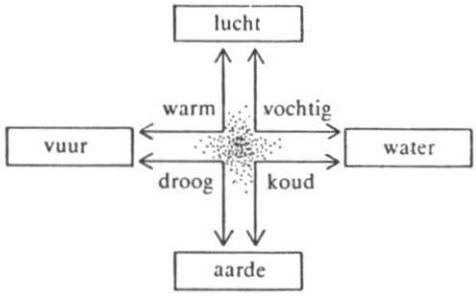
inhoud blz.

2.1 inleiding 10
2.2 water, aarde, lucht en vuur 10
2.3 de eerste atoomtheorie 11
2.4 de atoomtheorie langdurig in de verdrukking 12
2.5 herleving van de atoomtheorie 14
2.6 een nieuwe ordening van elementen 16

elementen en atomen: eeuwenoude ideeën

Waaruit bestaat materie?

Door Griekse wijsgeren werden al voor het begin van onze jaartelling ideeën hierover op papier gezet. Tweeduizend jaar later werden aanwijzingen gevonden dat één van de Griekse fantasieën, de atoomtheorie, het best bruikbaar was. De functie van deze theorieën of modellen is het kunnen beschrijven, verklaren en mogelijk voorspellen van natuurwetenschappelijke verschijnselen.



group→		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Higher oxides and hydrides		R_2O ——	RO ——	R_2O_3 ——	RO_2 H_4R	R_2O_5 H_3R	RO_3 H_2R	R_2O_7 HR	RO_4 ——
series	1	H(1)							
	2	Li(7)	Be(9.4)	B(11)	C(12)	N(14)	O(16)	F(19)	
	3	Na(23)	Mg(24)	Al(27.3)	Si(28)	P(31)	S(32)	Cl(35.5)	
	4	K(39)	Ca(40)	—(44)	Ti(48)	V(51)	Cr(52)	Mn(55)	Fe(56), Co(59), Ni(59), Cu(63)
	5	[Cu(63)]	Zn(65)	—(68)	—(72)	As(75)	Se(78)	Br(80)	
	6	Rb(85)	Sr(87)	?Yt(88)	Zr(90)	Nb(94)	Mo(96)	—(100)	Ru(104), Rh(104), Pd(106), Ag(108)
	7	[Ag(108)]	Cd(112)	In(113)	Sn(118)	Sb(122)	Te(125)	I(127)	
	8	Cs(133)	Ba(137)	?Di(138)	?Ce(140)	——	——	——	
	9								
	10	——	——	?Er(178)	?La(180)	Ta(182)	W(184)	——	Os(195), Ir(197), Pt(198), Au(199)
	11	[Au(199)]	Hg(200)	Tl(204)	Pb(207)	Bi(208)	——	——	
	12	——	——	——	Th(231)	——	U(240)		

2.1 INLEIDING

Snelle ontwikkelingen in de natuurwetenschappen van de laatste honderd jaar zouden ons gemakkelijk doen vergeten op welke fundamenten deze ontwikkelingen rusten. Al meer dan 2500 jaar geleden probeerden mensen meer inzicht te krijgen in de verschijnselen om hen heen, zoals het bewegen van hemellichamen, het groeien van planten en dieren en het veranderen van stoffen. Door het bedenken van theorieën probeerde men achter de werkelijkheid te komen. Vragen die men zich daarbij stelde, waren bijvoorbeeld:

- wat is veranderlijk, wat onveranderlijk;
- hoe verhouden zich geest en materie;
- waarom bewegen voorwerpen;
- waaruit bestaat materie?

In dit hoofdstuk zullen we ons met de laatste van deze vragen bezig houden.

We beginnen met de Grieken met hun fantastische bespiegelingen over materie, die altijd wel een kern van waarheid bevatten. Ze waren echter niet te controleren met de middelen van die tijd. Wel inspireerden deze filosofische theorieën anderen tot het bedenken van nieuwe ideeën die voortborduurden op de oude.
We volgen de ontwikkeling van twee elkaar bestrijdende theorieën, waarin al de woorden *atomen* en *elementen* voorkomen. Belangrijk is daarbij te letten op de factoren die bepalen of een theorie al dan niet een brede aanhang krijgt en of die theorie de kans krijgt zich verder te ontwikkelen. Eeuwen lang immers blijven sommige theorieën in dezelfde vorm als die van de Grieken bestaan, om dan plotseling tot verdere groei te komen of door andere vervangen te worden.
We eindigen met de inzichten die verworven zijn door natuurwetenschappers in de 17e t/m de 19e eeuw. Door goede combinaties van verstand, zintuigen en technische hulpmiddelen worden eigenschappen van stoffen en rangschikkingen van deze stoffen gevonden, zonder welke de huidige stand van de wetenschap niet mogelijk was geweest.
De vragen zijn bedoeld om beter inzicht te krijgen in de ontwikkelingen van het denken over materie.

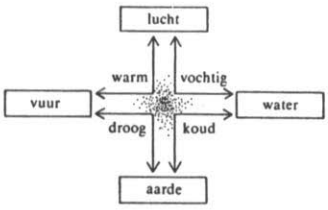
2.2 WATER, AARDE, LUCHT EN VUUR

De eerste Griekse natuurfilosofen (rond 600 voor Christus) gingen ervan uit dat alles gemaakt is uit één enkele *oerstof*. Sommigen meenden dat *water* deze oerstof is: aarde, lucht en levende wezens zouden er uit voortkomen. Anderen dachten dat *lucht* de oerstof is, en dat andere stoffen op een meer of mindere mate van condensatie duiden. De ziel zou lucht zijn en vuur een soort ijle lucht. Bij condensatie wordt lucht water, en bij nog verdergaande condensatie aarde en tenslotte steen. Weer anderen hielden het op *vuur* als oerstof. Volgens hen is vuur altijd actief en in staat alles een andere vorm te geven. Een typerende uitspraak van één van hen was: 'Alle dingen kunnen ingewisseld worden voor vuur en vuur voor alle dingen, evenals koopwaren voor goud en goud voor koopwaren.'

Aristoteles.

Rond 450 voor Chr. kwam Empedocles met het idee dat er vier basisstoffen zijn, die hij *elementen* noemde. Volgens hem zijn alle stoffen gemaakt uit water, aarde, lucht en vuur. Deze elementen kunnen in verschillende verhoudingen gemengd worden, en ook weer van elkaar worden gescheiden. Alle veranderingen in stoffen zouden hiermee te verklaren zijn. Deze theorie was het eerste *model* van materie, waarin alle dingen verklaard werden met verschillende samenvoegingen van enkele elementen.
Aristoteles (389-321 voor Chr.) bouwde dit model van materie verder uit. Hij kende de vier elementen water, aarde, lucht en vuur een aantal *eigenschappen* toe: koud, warm, vochtig en droog. Elk element werd gekarakteriseerd door twee eigenschappen:

- aarde is droog en koud;
- water is koud en vochtig;



Elementen-schema van Aristoteles.

Aristoteles' ideeën waren omvangrijker dan hier beschreven. Zo dacht hij dat alles een doel of bestemming had. Over beweging dacht hij dat een voorwerp tot stilstand zou komen als er geen kracht meer op werkte.

- lucht is vochtig en warm;
- vuur is warm en droog.

Volgens Artistoteles overheerst de eerste van de twee eigenschappen. De elementen zijn niet onveranderlijk en kunnen in elkaar overgaan als één van de eigenschappen in zijn tegengestelde verandert. Dus aarde wordt water als droog verandert in vochtig. Aarde kan alleen in lucht veranderen als beide eigenschappen tegengesteld worden.

1.
a. In hoeverre maakten Empedocles en Aristoteles gebruik van de ideeën van hun voorgangers?
b. Welke toevoegingen deden zij aan de voorafgaande theorieën?

2.
Welke 'elementen' spelen een rol bij het verschijnsel verdampen? Welke 'eigenschappen' veranderen daarbij en welke blijven constant?

3.
Probeer met behulp van de theorie van de vier elementen de volgende waarnemingen te 'verklaren':
- de vorming van hout door een groeiende boom;
- het verbranden van een blokje hout.

4.
Je kent waarschijnlijk wel het gezegde: 'Die twee zijn water en vuur'. Laat zien dat de betekenis van dit gezegde overeenkomt met de ideeën van Aristoteles.

5.
Ook in deze tijd kunnen water, aarde, lucht en vuur voor mensen een bijzondere betekenis hebben. Kun je voorbeelden bedenken van situaties, gezegden en theorieën die dit aantonen?

2.3 DE EERSTE ATOOMTHEORIE

Ten tijde van Empedocles ontstond ook een andere theorie over de aard van materie. Democritus (460-370 voor Chr.) was een van de ontwerpers van deze theorie. Hij veronderstelde dat alle materie bestaat uit ontelbare, kleine, ondeelbare en onveranderlijke deeltjes: *atomen* genaamd. ('Atomos' is het Griekse woord voor ondeelbaar.)
Deze atomen verschillen per stof alleen van vorm en grootte. Ze bewegen voortdurend in een lege ruimte (vacuüm), maar hoe en waarom is niet duidelijk. Door hun beweging kunnen de atomen bij elkaar komen, en door een bepaalde rangschikking de stoffen vormen die waarneembaar zijn. De stoffen kunnen weer uiteen vallen als de atomen zich van elkaar losmaken. Eigenschappen als smaak, kleur, geur, koud en warm, die we met behulp van onze zintuigen aan de dingen toekennen, zijn slechts schijn. Democritus ging er van uit, dat er geen goden en bovennatuurlijke krachten in het spel zijn bij de vorming van atoomcombinaties. Deze theorie was dan ook een poging een eind te maken aan bijgeloof en angst voor het bovennatuurlijke.
De theorie van de Griekse atomisten liet veel onverklaard. Alles wat er niet mee klopte werd buiten beschouwing gelaten. Te bewijzen viel hij ook niet in die tijd. De theorie was meer een waarschijnlijk verhaal, waarmee een en ander viel te verklaren. Voor het doen van *voorspellingen* was hij niet te gebruiken. Dat geldt overigens óók voor de elementen-theorie.
Van de geschriften van de eerste atomisten is weinig overgebleven. Hun ideeën zijn bewaard gebleven door de discussies die onder andere Aristoteles er aan wijdde in zijn werk. Bovendien is door de Latijnse dichter Lucretius in de eerste eeuw voor Christus een gedicht gewijd aan de ideeën van de atomisten. Dat gedicht heet: 'De Rerum Natura' (ofwel: 'Over de Aard der Dingen').

Deel van het gedicht 'De Rerum Natura'
van de Latijnse dichter Lucretius.

Thans ga ik verder met verklaren, hoe de geest
bestaat uit stofatomen en van welken aard.
Vooreerst beweer ik, dat hij uiterst fijn is en
uit extra-kleine deeltjes moet bestaan. Dat dit
zo is, kan ieder vatten als men hierop let:
niets blijkt ooit zo snel te geschieden als de geest
zich voorstelt dat 't geschiedt, en uit zichzelf begint;
dus moet de geest in snellere beweging zijn
dan alles wat wij duidelijk voor ogen zien.
Maar wat zo snel is, moet noodzakelijk bestaan
uit deeltjes die heel klein zijn en volkomen rond,
zodat een lichte schok hen in beweging brengt.
Het water immers vloeit zo snel door weinig kracht,
omdat 't uit kleine ronde deeltjes is gebouwd.
Van honing echter is het wezen vaster en
de vloeibaarheid geringer met een trager gang;
want die substantie hangt meer samen met zichzelf,
omdat ze niet uit zulke gladde deeltjes en
zo uiterst fijne ronde korreltjes bestaat.
Een lichte windzucht immers kan een helen hoop
van maanzaad weg doen vloeien uit een hoger punt
maar 'n hoop van kiezels of van aren niet zo gauw.
De kleinste dingen hebben dus, naarmate zij
het gladste zijn ook lichtere beweeglijkheid.

1.
Welke aannemelijke verklaringen kun je met behulp van de eerste atoomtheorie bedenken voor:

- verschillen in dichtheid van stoffen;
- faseveranderingen van een stof.

2.4 DE ATOOMTHEORIE LANGDURIG IN DE VERDRUKKING

De ideeën over het bestaan van atomen werden fel bekritiseerd door Aristoteles. Hij verzette zich vooral tegen het bestaan van een vacuüm. Verder veronderstelde Artistoteles dat materie oneindig deelbaar was, en dat weersprak het bestaan van atomen. Op de achtergrond speelde sterk mee dat de atoomtheorie zou leiden tot atheïsme, omdat deze niet uitging van een orde die van hogerhand werd bestierd (zoals Aristoteles dacht volgens onderstaande tekening uit de Middeleeuwen).

Het wereldsysteem volgens de ideeën van Aristoteles. In het centrum aarde en water, daaromheen lucht en dan vuur. Daarna volgen de hemellichamen met de zon als vierde in de rij. De buitenste ring stelt de verblijfplaats van de goden voor.

Tot het eind van de Middeleeuwen hielden de ideeën van Aristoteles over materie de overhand. Zij hadden ook enkele duidelijke voordelen boven de atoomtheorie. Zo waren ze gebaseerd op elementen en eigenschappen die de mensen vertrouwd voorkwamen. Je had er geen atomen voor nodig die niet met de zintuigen waar te nemen waren, en ook geen vacuüm waar men zich toch moeilijk een voorstelling van kon maken. Bovendien nodigde de theorie van Aristoteles meer uit tot het doen van proeven, omdat het mogelijk was het ene materiaal in het andere te veranderen.

1. PROEFWERK UIT HET JAAR NUL

Kennis over de natuur is van oudsher door leermeesters overgedragen aan leerlingen: op het marktplein, onder een boom, onder een afdak, in een tempel of in het soort gebouwen dat we tegenwoordig school noemen. De plaatsen zijn veranderd, de klassegrootte ook, maar niet het leren. Wél is veranderd dat wat er geleerd wordt.

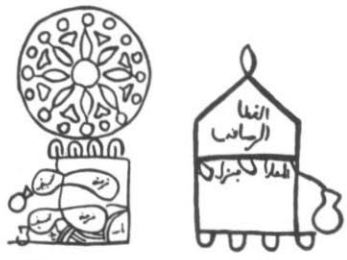
Om je een beeld te geven van de veranderingen in de kennis over materie, kom je in dit themaboek op verschillende plaatsen opdrachten tegen waarin je gevraagd wordt antwoorden te geven op vragen over atomen en elementen, rekening houdend met wat op dat moment bekend was. Je herkent die opdrachten aan schoolplaatjes uit de betreffende tijd.

a. Wat zijn elementen?
b. Welke eigenschappen hebben ze?
c. Hoe kan een element in een ander element veranderen?
Je mag wel blij zijn op deze christelijke school te zitten, want er zijn scholen waar ze de leerlingen lastig vallen met een zogenaamde atoomtheorie.
d. Wat bedoelen die ketters met atomen?
e. Geef enkele argumenten waarom deze theorie onzinnig en gevaarlijk is.

De atoomtheorie werd nooit volledig in de steek gelaten, maar had toch weinig aanhangers tussen 300 voor en 1600 na Christus. Net als de meeste Grieken vonden de latere Christenen, Joden en Islamieten de atomisten atheïstisch en materialistisch, omdat de atomisten geloofden dat alles in het heelal verklaard kan worden in termen van materie en beweging. En dat was in grote tegenspraak met de heersende godsdiensten in die bijna 2000 jaar.

In die periode kwam wel de *alchemie* op. Deze alchemie combineerde de ideeën van Aristoteles over materie met methoden om ertsen en metalen te bewerken. Een van de

Een alchemist aan het werk. Houtsnijwerk van H. Weiditz (1535).



Tekeningen van twee destilleerapparaten uit een Arabisch alchemisten-manuscript.

doelen van de alchemisten was om gewone metalen te veranderen in kostbare metalen (zoals goud). Dat lukte niet, maar het werk van de alchemisten leidde wel tot de ontdekking van veel chemische eigenschappen. Ze vonden ook toestellen uit die nu nog in chemische laboratoria terug te vinden zijn in modernere vorm, zoals distillatie-apparaten. De alchemie liet echter een aantal fundamentele vragen onbeantwoord:
- wat is een chemisch element;
- wat zijn chemische verbindingen en waarom kunnen ze veranderen (bijv. door verbranding);
- uit welke chemische elementen en verbindingen bestaan de oerelementen water, aarde, lucht en vuur?

2.5 HERLEVING VAN DE ATOOMTHEORIE

In de zestiende en zeventiende eeuw werden een aantal wetenschappelijke stappen gezet, die voortgang in het denken over materie mogelijk maakten. Bewegingstheorieën van onder andere Copernicus en Newton ondermijnden de autoriteit van Aristoteles, wiens ideeën over beweging het ook tot die tijd hadden uitgehouden. Markante nieuwe ideeën waren bijvoorbeeld:
- niet de aarde, maar de zon staat in het centrum van het heelal (Copernicus);
- een bewegend voorwerp blijft vanzelf in beweging en komt alleen tot rust onder invloed van een kracht (Newton).

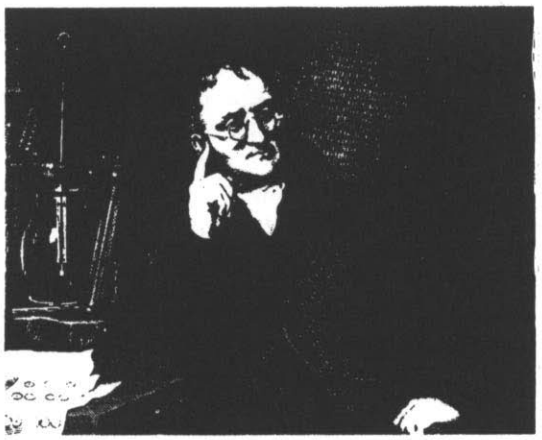
Nicolaas Copernicus (1473-1543).

Het wereldbeeld van Copernicus (1543). De aarde staat niet langer in het centrum.

Antoine Lavoisier (1743-1793).

Het gevolg was dat theorieën waarin deeltjes of atomen een rol spelen, weer een kans kregen. Vooral het idee dat gassen uit deeltjes bestaan, werd populair. Het atheïstische karakter van de atoomtheorie werd bestreden met de bewering dat God de atomen had geschapen en gezorgd had dat ze in beweging waren gekomen.
Bovendien maakten de nieuwe theorieën over beweging (mechanica) het mogelijk na te denken over manieren waarop de atomen bewegen. Zo werd het klimaat rijp voor een herleving van de atoomtheorie.

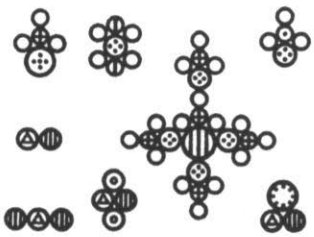
In de achttiende eeuw werd de scheikunde meer kwantitatief: er werd meer gelet op hoeveelheden. Zorgvuldige wegingen van hoeveelheden werden verricht. Nieuwe stoffen werden ontdekt, waarvan de eigenschappen werden onderzocht. Belangrijk werk werd verricht door Lavoisier. Hij formuleerde de wet van behoud van massa op grond van verbrandingsexperimenten. Hij ontdekte ook de elementaire aard van waterstof en



John Dalton (1766-1844).

De elementen, atoomsymbolen en atoomgewichten volgens een wandplaat van Dalton (1806).

zuurstof, en hun combinatie tot water. Het onderscheid tussen *elementen* (niet verder te ontbinden stoffen) en *verbindingen* (combinaties van elementen) werd langzaamaan duidelijk.
Een volgende belangrijke stap werd gezet door Dalton (rond 1810). Hij was vooral geïnteresseerd in het gedrag van gassen. Dalton formuleerde een nieuwe atoomtheorie, die berustte op de volgende ideeën:
- materie bestaat uit ondeelbare atomen;
- elk element bestaat uit een bepaald soort atomen, die in gewicht en vorm gelijk zijn; er zijn dus net zo veel soorten atomen als er elementen zijn;
- atomen zijn onveranderlijk;
- als verschillende elementen een verbinding vormen, dan bestaat een deeltje van die verbinding uit een combinatie van de atomen van die elementen in een vaste verhouding (bijv. NO_2: 1 × N en 2 × O);
- bij chemische reacties vormen de atomen nieuwe combinaties.



Tekeningen van Dalton om de samenstelling van chemische verbindingen van atomen uit te beelden.

Dalton was niet in staat om de precieze massa van atomen te bepalen. Wat hem wél lukte, was de *relatieve atoommassa* te bepalen. Daarmee bedoelde hij de verhouding tussen de atoommassa van een element en die van waterstof (de massaeenheid). Zo toonde hij aan dat het chlooratoom een massa had van 35,5 atoommassaeenheden.

1.
Vergelijk de atoomtheorieën van Democritus en Dalton met elkaar. In welke opzichten komen ze overeen? Welke verschillen zijn er?

2.
Welke verschillen zijn er tussen de elementen van Aristoteles en die van Dalton?

3.
In de loop van de tijd zijn er heel wat conflicten geweest tussen geloof en wetenschap. Vraag eens aan een aantal mensen in je omgeving of ze vinden dat ideeën over atomen in strijd zijn met het geloof in een goddelijk wezen. Hoe denk je er zelf over?

4. PROEFWERK UIT 1810
a. Wat is een element?
b. Welke eigenschappen hebben ze?
c. Wat zijn atomen?
d. Wat is een chemische verbinding?
e. De alchemisten dachten elementen te kunnen veranderen; hadden ze gelijk of niet?

2.6 EEN NIEUWE ORDENING VAN ELEMENTEN

In de loop van de negentiende eeuw zetten chemici het werk van Dalton voort. Steeds nauwkeuriger bleek men in staat de relatieve atoommassa's te bepalen van een toenemend aantal elementen.
In 1872 waren 63 elementen bekend. Onderstaande tabel bevat de namen van deze elementen en hun relatieve atoommassa's.

DE IN 1872 BEKENDE ELEMENTEN

Naam	Symbool	relatieve atoommassa*	Naam	Symbool	relatieve atoommassa	Naam	Symbool	relatieve atoommassa
waterstof	H	1,0	ijzer	Fe	55,8	antimoon	Sb	121,7
lithium	Li	6,9	cobalt	Co	58,9	telluur	Te	127,6 (125)
beryllium	Be	9,0	nikkel	Ni	58,7	jood	I	126,9
boor	B	10,8	koper	Cu	63,5	cesium	Cs	132,9
koolstof	C	12,0	zink	Zn	65,4	barium	Ba	137,3
stikstof	N	14,0	arseen	As	74,9	didymium**	Di	– (138)
zuurstof	O	16,0	seleen	Se	79,0	cerium	Ce	140,1
fluor	F	19,0	broom	Br	79,9	erbium	Er	167,3 (178)
natrium	Na	23,0	rubidium	Rb	85,5	lanthaan	La	138,9 (180)
magnesium	Mg	24,3	strontium	Sr	87,6	tantaal	Ta	180,9 (182)
aluminium	Al	27,0	yttrium	Y	88,9	wolfraam	W	183,9
silicium	Si	28,1	zirconium	Zr	91,2	osmium	Os	190,2 (195)
fosfor	P	31,0	niobium	Nb	92,9	iridium	Ir	192,2 (197)
zwavel	S	32,1	molybdeen	Mo	95,9	platina	Pt	195,1 (198)
chloor	Cl	35,5	ruthenium	Ru	101,1 (104)	goud	Au	197,0 (199)
kalium	K	39,1	rhodium	Rh	102,9 (104)	kwik	Hg	200,6
calcium	Ca	40,1	palladium	Pd	106,4	thallium	Tl	204,4
titaan	Ti	47,9	zilver	Ag	107,9	lood	Pb	207,2
vanadium	V	50,9	cadmium	Cd	112,4	bismut	Bi	209,0
chroom	Cr	52,0	indium	In	114,8 (113)	thorium	Th	232,0
mangaan	Mn	54,9	tin	Sn	118,7	uraan	U	238,0 (240)

* atoommassa's in moderne waarden; als de waarden uit 1872 hiervan sterk afwijken, zijn ze tussen haakjes vermeld.
** didymium (Di) bleek later een mengsel te zijn van twee elementen, namelijk praseodymium (Pr; 140,9) en neodymium (Nd; 144,2).

Dimitri Mendelejef (1834-1907).

Behalve de relatieve atoommassa's werden vele andere eigenschappen onderzocht van de elementen en hun verbindingen. Voorbeelden hiervan zijn smeltpunt, kookpunt, dichtheid, elektrische geleiding en warmtegeleiding.

Zo'n lange lijst met elementen en hun eigenschappen is niet zo bevredigend. Rond 1870 zochten een aantal chemici naar mogelijke *ordeningen* van de elementen. Het bleek dat er bepaalde families waren van elementen, die door hun eigenschappen veel verwantschap vertoonden. Lithium, natrium, kalium, rubidium en cesium vormen zo'n familie. Ze zijn zacht, hebben een geringe dichtheid, en hun smeltpunt is laag. Een andere familie omvat fluor, chloor, broom en jood. Zij reageren alle goed met metalen en vormen dan witte, kristalvormige zouten. De vraag was nu hoe je de elementen zo kunt ordenen, dat deze families bij elkaar komen te staan. Veel schema's werden hiervoor bedacht. De meest succesvolle was die van de Russische chemicus Mendelejef (1834-1907).
Hij rangschikte de elementen nog steeds volgens hun atoommassa, maar op een speciale manier: te vergelijken met het kaartspel patience. Mendelejef begon met eerst 7 elementen op een rij te zetten, en daaronder de volgende 7 enz. De verschillende families bleken nu in verschillende verticale kolommen te komen. Het waarom was volstrekt onduidelijk, maar het klopte verrassend goed.

GROUP→		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Higher oxides and hydrides		R_2O ——	RO ——	R_2O_3 ——	RO_2 H_4R	R_2O_5 H_3R	RO_3 H_2R	R_2O_7 HR	RO_4 ——
SERIES	1	H(1)							
	2	Li(7)	Be(9.4)	B(11)	C(12)	N(14)	O(16)	F(19)	
	3	Na(23)	Mg(24)	Al(27.3)	Si(28)	P(31)	S(32)	Cl(35.5)	
	4	K(39)	Ca(40)	—(44)	Ti(48)	V(51)	Cr(52)	Mn(55)	Fe(56), Co(59), Ni(59), Cu(63)
	5	[Cu(63)]	Zn(65)	—(68)	—(72)	As(75)	Se(78)	Br(80)	
	6	Rb(85)	Sr(87)	?Yt(88)	Zr(90)	Nb(94)	Mo(96)	—(100)	Ru(104), Rh(104), Pd(106), Ag(108)
	7	[Ag(108)]	Cd(112)	In(113)	Sn(118)	Sb(122)	Te(125)	I(127)	
	8	Cs(133)	Ba(137)	?Di(138)	?Ce(140)	——	——	——	
	9	——	——	——	——	——	——	——	
	10	——	——	?Er(178)	?La(180)	Ta(182)	W(184)	——	Os(195), Ir(197), Pt(198), Au(199)
	11	[Au(199)]	Hg(200)	Tl(204)	Pb(207)	Bi(208)	——	——	
	12	——	——	——	Th(231)	——	U(240)		

Periodiek systeem van elementen zoals voorgesteld door Mendelejef (1872). Tussen haakjes de relatieve atoommassa zoals in die tijd bekend.

In 1872 had hij zijn *periodiek systeem* gereed. Hij verdeelde de 63 elementen (waarvan 5 onzeker) in 12 rijen of series. De tabel vertoonde nog vele gaten, die het mogelijk maakten nieuwe elementen te *voorspellen*. Zo voorspelde Mendelejef het element germanium, dat pas 16 jaar later werd gevonden en in vrijwel alle eigenschappen voldeed aan de verwachtingen.
Het huidige periodiek systeem bevat meer dan honderd elementen. Het verschilt in enkele opzichten van dat van Mendelejef, maar het basisprincipe is hetzelfde.

1 H 1.0080																	2 He 4.003
3 Li 6.940	4 Be 9.013											5 B 10.82	6 C 12.011	7 N 14.008	8 O 16.000	9 F 19.00	10 Ne 20.183
11 Na 22.991	12 Mg 24.32											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.975	16 S 32.066	17 Cl 35.457	18 Ar 39.944
19 K 39.100	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.94	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.91	34 Se 78.96	35 Br 79.916	36 Kr 83.80
37 Rb 85.48	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc	44 Ru 101.1	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.880	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.61	53 I 126.91	54 Xe 131.30
55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57–71 La Series	72 Hf 178.50	73 Ta 180.95	74 W 183.86	75 Re 186.22	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 197.0	80 Hg 200.61	81 Tl 204.39	82 Pb 207.21	83 Bi 208.99	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra 226.03	89–103 Ac Series	(104)	(105)	(106)	(107)	(108)										

Lanthanide series	57 La 138.92	58 Ce 140.13	59 Pr 140.92	60 Nd 144.27	61 Pm	62 Sm 150.35	63 Eu 152.0	64 Gd 157.26	65 Tb 158.93	66 Dy 162.51	67 Ho 164.94	68 Er 167.27	69 Tm 168.94	70 Yb 173.04	71 Lu 174.99
Actinide series	89 Ac 227.04	90 Th 232.05	91 Pa 231.05	92 U 238.04	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw

Modern periodiek systeem van elementen.

In hoofdstuk 4 zullen we aandacht besteden aan de ontdekking van enkele elementen met grote relatieve atoommassa.

1.
Welke van de nu bekende eerste 20 elementen ontbraken in Mendelejef's periodiek systeem? Tot welke familie behoren deze 3 elementen? Kun je een reden bedenken waarom deze elementen zo laat ontdekt zijn?

2.
Waarom noemde Mendelejef zijn tabel *periodiek*?

3.
In het periodiek systeem spelen elementen en atomen een rol. In welke opzichten verschillen elementen en atomen van hun betekenis in de Griekse theorieën?

4. ORDENING
In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe natuurwetenschappers feiten en ideeën proberen te ordenen.
a. Welke ordeningen kom je tegen in dit hoofdstuk?
b. Wat is het nut van ordenen in de natuurwetenschappen?

5. WERKWIJZE
De Griekse natuurwetenschappers hielden er andere werkwijzen op na dan hun collega's uit de negentiende eeuw. Noem enkele belangrijke verschillen.

6. DE MATERIE-TIJDBALK
De categorieën voor de materie-tijdbalk kun je rangschikken naar de nauwkeurigheid van het bedachte model. Steeds meer details worden ingevuld.
a. Welke categorieën (tenminste twee) kun je tot hier toe onderscheiden?
b. Selekteer de vijf naar jouw idee belangrijkste vondsten uit dit hoofdstuk.
c. Probeer aan te geven in welke tijd de voorkeur in de wetenschap verschuift van het ene naar het andere model.

hoofdstuk 3

VAN ELEKTRICITEIT TOT ELEKTRON

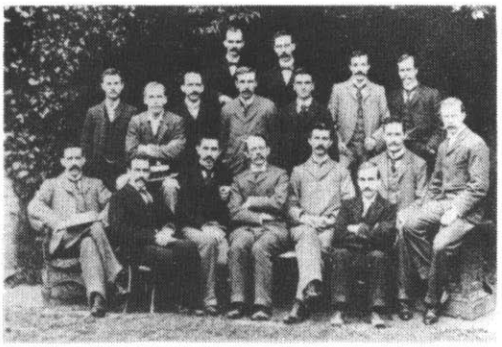
inhoud

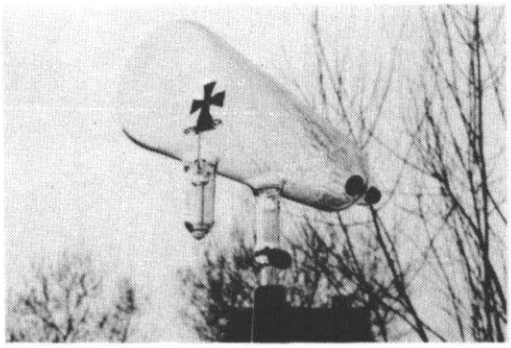
		blz
3.1	nieuwe impulsen voor onderzoek	20
3.2	elektrische lading	21
3.3	elektrische stroom door vloeistoffen	23
3.4	elektrische stroom door gassen	23
3.5	elektrische kracht	27
3.6	lorentzkracht	28
3.7	de cirkelstraalbuis	30
3.8	de thomson-buis	31
3.9	het elektron	33
3.10	opgaven	34

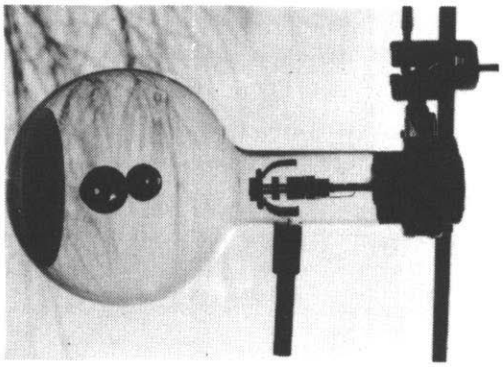
van elektriciteit tot elektron

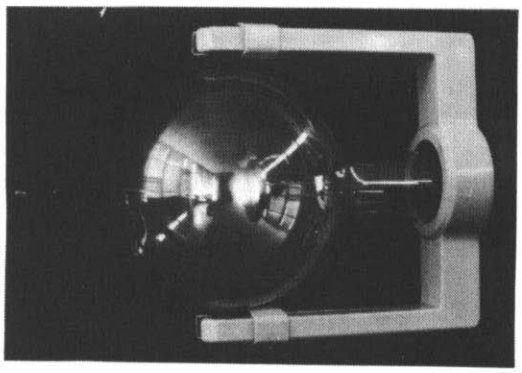
Elektriciteit is eeuwenlang een mysterieus verschijnsel geweest. In dit hoofdstuk zie je hoe in de negentiende eeuw veel onderzoek naar elektriciteit is gedaan. In 1897 leidde dit tot de ontdekking van het *elektron* door J.J. Thomson.

In tegenstelling tot later onderzoek naar materie kun je de proef van Thomson nog zelf doen en uitwerken. Vooraf moet je je echter verdiepen in de krachten die op elektrische ladingen werken.

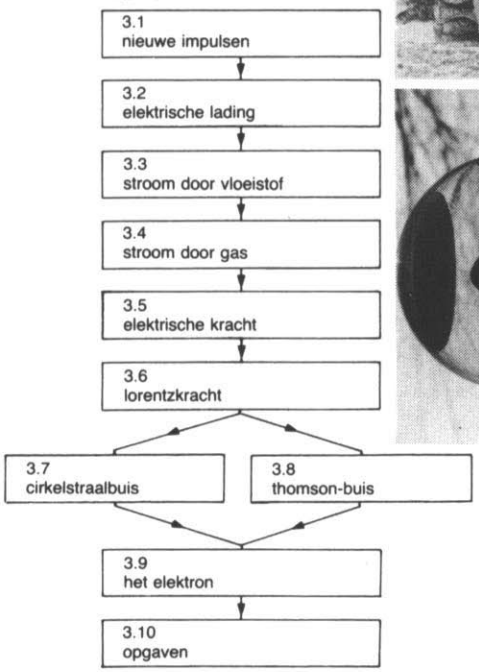








De opzet van hoofdstuk 3: 'van elektriciteit tot elektron'.



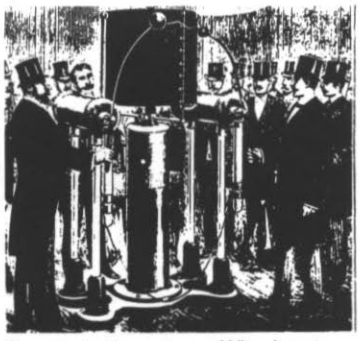
3.1 NIEUWE IMPULSEN VOOR ONDERZOEK

In het vorige hoofdstuk heb je gezien hoe scheikundigen steeds meer verschillende elementen op het spoor kwamen. Deze elementen, geordend in het periodiek systeem, zijn tastbaar en voorstelbaar. De eigenschappen van sommige elementen en verbindingen zijn zó bekend dat ze in onze spreektaal terugkomen: 'met ijzeren hand', 'vlug als water', 'een gouden greep'.
In dit hoofdstuk pakken we een nieuwe lijn op. Onderzoekingen op het gebied van elektriciteit en magnetisme leidden in de loop van de negentiende eeuw tot meer en meer vragen:
- wat is elektriciteit;
- hoe ontstaat magnetisme;
- wat heeft elektriciteit te maken met materie?

Elektriciteit en magnetisme leverden ook hulpmiddelen voor het bestuderen van de materie.
De verschijnselen die we tegenkomen zijn minder tastbaar. Nauwkeurige metingen en theoretische modellen zijn nodig om de conclusies van de onderzoekers te volgen. Dit is een belangrijke stap. Deze overgang van de tastbare naar de theoretische wereld is een typerend verschil tussen de thema's in de vierde en in de vijfde klas. Het thema 'Materie' is dan ook duidelijk een inleiding, die in 'Lichtbronnen' en 'Ioniserende Straling' verder wordt uitgewerkt. De samenhang van deze thema's is af te lezen uit de tabel 'elektriciteit tot 1900'.

ELEKTRICITEIT: VERSCHIJNSELEN, THEORIEEN EN TOEPASSINGEN TOT 1900.

stroom door draad	stroom door vloeistof	stroom door gas	licht	ioniserende straling	techniek	theorie	
•							1720: Stephan Gray: onderscheidt geleiders en isolatoren
		•			•		1752: Benjamin Franklin: ontwerpt bliksemafleider
						•	1784: Charles Coulomb: meet en beschrijft elektrische kracht
	•				•		1800: Alessandro Volta: vindt elektrische cel uit (voorloper van de batterij)
		•	•		•		1809: Humphry Davy: vertoont booglamp, gevoed met 2000 cellen in serie
•						•	1819: Hans Oersted: ontdekt magnetisch effect van stroomvoerende draad
•						•	1827: Georg Ohm: meet stroom door draden ($R = V/I$)
	•					•	1830: Michael Faraday: meet vaste lading-massa-verhoudingen bij elektrolyse
•						•	1831: Henry, Lenz en Faraday: ontdekken elektro-magnetische inductie
					•		1836: Sturgeon: ontwerpt draaispoel-stroommeter
		•	•				1838: Faraday: beschrijft lichteffect als stroom door gas van lage druk gaat
					•		1855: Heinrich Geissler: bouwt betere vacuümpomp
		•					1860: Plücker: buigt stroom door gas af met een magnetisch veld
					•		1870: Siemens: bouwt bruikbare gelijkstroomgenerator
						•	1873: James Maxwell: ontwerpt theorie van elektro-magnetische golven
		•					1875: Hittorf en Crookes: benoemen stroom door gas als kathodestralen
•			•		•		1879: Thomas Edison: demonstreert de gloeilamp
•							1881: Heinrich Hertz: produceert en registreert onzichtbare elektro-magnetische golven
•					•		1884: Edison: meet stroom van gloeidraad naar +elektrode door vacuüm
		•					1886: Goldstein: produceert anodestralen door een gat in de kathode
	•				•		1890: Charles Hall: past elektrolyse toe voor aluminiumbereiding
		•					1894: Philipp von Lenard: toont aan dat kathodestralen door metaalfolie gaan
		•					1895: Jean Perrin: toont aan dat kathodestralen een negatieve lading hebben
		•		•			1895: Wilhelm Röntgen: ontdekt röntgenstralen met een kathodestraalbuis
		•					1896: Wien: toont afbuiging van anodestralen in een magnetisch veld aan
		•				•	1897: J.J. Thomson: toont aan dat kathodestralen uit deeltjes met lading en massa bestaan

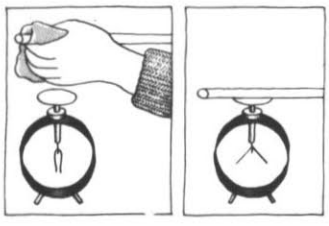


Demonstratie van een Wimshurst-machine voor hoge spanningen te Parijs (1896).

Tot 1800 bleef elektriciteit in de sfeer van 'physique amusante': leuke proeven met elektriseermachines, die vonken en schokken opleverden. De enige praktische toepassing was de bliksemafleider van de Amerikaan Franklin.
In 1800 vond Volta in Italië de werking van een *elektrische cel* uit, voorloper van de huidige batterij. Deze bron van stromende elektriciteit werd al gauw door talrijke onderzoekers gebruikt.
Stroom door draden bleek warmte en een magnetisch effect te veroorzaken. *Stroom door vloeistoffen* maakte nieuwe scheikundige omzettingen mogelijk, en leidde nog vóór 1900 tot de opkomst van de aluminiumindustrie. *Stroom door gassen* bleek op den duur de rijkste inspiratiebron voor onderzoek naar materie.

3.2 ELEKTRISCHE LADING

Als je een plastic staaf wrijft met een doek, wordt de staaf *elektrisch geladen*. Na het wrijven trekt de staaf allerlei voorwerpen aan. Dat is vooral duidelijk als die voorwerpen licht zijn, zoals papiersnippers, haren en dergelijke.
Al in 1600 werd een 'ladingmeter' ontworpen, de zogenaamde *elektroscoop*. Een dun stripje metaalfolie hangt dubbelgevouwen onderaan een geïsoleerde metalen pen. Als je een geladen staaf tegen de pen houdt, wordt de elektroscoop óók geladen. De uiteinden van de strip verwijderen zich van elkaar. Men zegt dat de elektroscoop uitslaat. Des te groter de lading, des te groter de uitslag.
Ook andere staven van isolerend materiaal zijn met een doek op te laden. Onderzoek aan geladen voorwerpen toonde aan dat sommige elektrisch geladen voorwerpen elkaar aantrekken, terwijl andere elkaar afstoten. Gelijke staven, met gelijksoortige ladingen, stoten elkaar steeds af. Men veronderstelde dat er twee soorten lading zijn. Voor de *elektrische kracht* tussen ladingen geldt:
- *gelijksoortige ladingen stoten elkaar af*;
- *ongelijksoortige ladingen trekken elkaar aan*.

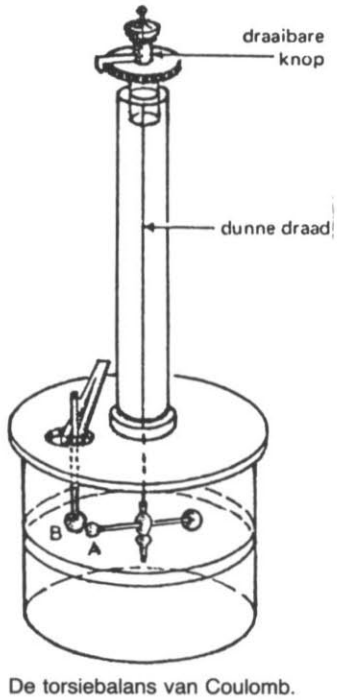


Het laden van een elektroscoop.

1. ONGELIJKSOORTIGE LADINGEN SAMENVOEGEN

Laad een elektroscoop met behulp van een geladen staaf. Neem daarna een andere staaf met de andere soort lading. Breng ook deze staaf in contact met de elektroscoop. (Gebruik glas en eboniet, of een geschikte combinatie van kunststoffen.)

a. Wat gebeurt er met de uitslag van de elektroscoop als de ongelijksoortige ladingen bij elkaar komen?
b. Verklaar, met behulp van deze proef, waarom wordt gesproken van *positieve en negatieve lading*.



De torsiebalans van Coulomb.

De vraag 'wat nu eigenlijk elektrische lading is', is veel moeilijker te beantwoorden. Je kunt je daar in gedachten een beeld van vormen: een *model*. Een model is zinvol, als je daarmee de resultaten van experimenten kunt beschrijven.

elektrische kracht
In 1784 onderzocht Charles Coulomb de grootte van de elektrische kracht tussen twee geladen bolletjes. In de beschrijving van zijn experiment gebruikte hij de woorden 'positieve en negatieve elektrische substantie', met als commentaar:
'Ik wil hiermee de resultaten van mijn experimenten en berekeningen zo eenvoudig mogelijk weergeven. Ik ga *niet* in op *de werkelijke aard* van elektriciteit'.
De krachtmeting zelf was al moeilijk genoeg. Coulomb gebruikte de hiernaast afgebeelde *torsiebalans*. De *torsiehoek* (dat wil zeggen: de hoekverdraaiïng van de uiteinden van de dunne draad) is een maat voor de kracht tussen de bolletjes A en B. Hij vond dat deze elektrische kracht F_e afneemt met het kwadraat van de afstand r tussen hun middelpunten. Verder nam hij aan dat de kracht evenredig was met de ladingen Q van de bolletjes.

Samengevat:

$$\left.\begin{array}{l} F_e \sim \frac{1}{r^2} \\ F_e \sim Q_A \\ F_e \sim Q_B \end{array}\right\} \Rightarrow F_e \sim \frac{Q_A \cdot Q_B}{r^2}$$

Definitie van de coulomb (afgekort: C):
als in een draad de stroomsterkte 1 ampère bedraagt, dan passeert elke seconde 1 coulomb elektrische lading door een dwarsdoorsnede van die draad.
Samengevat: 1A = 1C/s
Wat is dan 1 ampère?
Definitie van de ampère (A):
als in elk van twee evenwijdige, zeer lange, rechte draden op 1 meter afstand van elkaar de stroomsterkte 1 ampère bedraagt, dan oefenen die draden per meter lengte een kracht van $2 \cdot 10^{-7}$ newton op elkaar uit.

Pas veel later was men in staat alle grootheden in deze *wet van Coulomb* precies te meten. Als F_e wordt uitgedrukt in newton, de ladingen in *coulomb* (de eenheid van lading) en de afstand r in meter, dan ontstaat de volgende formule:

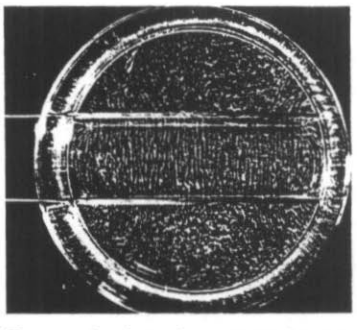
$$F_e = k \cdot \frac{Q_A \cdot Q_B}{r^2}$$

Hierin is k een *evenredigheidsconstante* met een waarde $k = 9 \cdot 10^9$ Nm^2/C^2 (in vacuüm).

de richting van de elektrische kracht

In het thema 'Elektrische Machines' ben je krachtwerking op afstand tegengekomen, bijvoorbeeld tussen magneten. Daar konden we de richting van de kracht op een noordpooltje vastleggen met behulp van een magnetisch veld.
Ook de elektrische kracht werkt op afstand. De *richting* van de kracht op een geladen bolletje is vast te leggen met een *elektrisch veld*. Voor een elektrisch veld gelden de volgende afspraken:
– de richting van het elektrisch veld in punt P is de richting waarin de kracht op een *positief* geladen bolletje in P wijst;
– een *elektrische veldlijn* is zó gericht, dat de raaklijn in een punt de veldrichting in dat punt aangeeft.

Het elektrisch veld is zichtbaar te maken met behulp van griesmeelkorrels in olie.



Tussen de platen heerst een homogeen elektrisch veld, zichtbaar gemaakt met behulp van griesmeelkorrels.

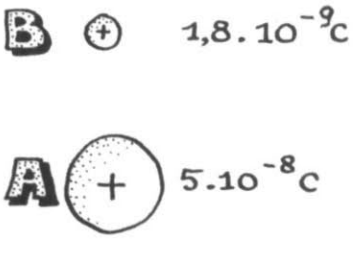
2. HET VELD TUSSEN TWEE VLAKKE PLATEN

In een bakje met olie worden twee vlakke metalen plaatjes gezet. De plaatjes worden verbonden met de polen van een gelijkspanningsbron, die een hoge spanning levert. Strooi griesmeel op de olie en zet de spanningsbron aan. Je krijgt dan een beeld als in de foto hiernaast.

a. Wat is de richting van het elektrisch veld als je er van uitgaat dat de bovenste plaat positief is en de onderste negatief?

b. In welk gebied zou je het elektrisch veld *homogeen* kunnen noemen?

3. HET VELD ROND EEN GELADEN BOL



Ook dit veld is zichtbaar te maken door een draadeinde dat midden in het bakje met olie en griesmeel steekt, te verbinden met een hoge spanning. Ook zonder proef is dit veld goed voorstelbaar. In de figuur hiernaast heeft bol A een lading $Q_A = 5 \cdot 10^{-8}$ C en is positief. Bolletje B, $Q_B = 1{,}8 \cdot 10^{-9}$ C en ook positief, bevindt zich op 12 cm afstand van A.

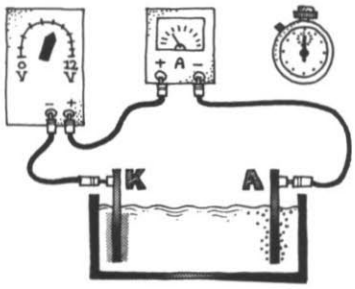
a. Geef met een pijl de richting aan van de elektrische kracht die bolletje B ondervindt.

b. Bereken hoe groot deze kracht is.

c. Schets het veldlijnenpatroon rond een positief geladen bol; geef voor elke veldlijn de richting aan met een pijlpunt.

d. In welke richting zou de kracht op bolletje B werken als B negatief geladen is?

3.3 ELEKTRISCHE STROOM DOOR VLOEISTOFFEN



Elektrolyse van kopersulfaat.

Sommige vloeistoffen en oplossingen geleiden elektrische stroom. In de hiernaast weergegeven opstelling zie je twee *elektroden* in de oplossing staan. In de vloeistof speelt zich een proces af dat *elektrolyse* wordt genoemd.
Als de vloeistof een kopersulfaat-oplossing is, worden bij de *anode* A (de positief geladen plaat) zuurstofbelletjes gevormd. Bij de *kathode* K (de negatieve plaat) wordt koper afgezet. Al vóór 1830 deed Michael Faraday onderzoek aan elektrolyse. Hij stelde vast dat de massa m van de gevormde stof evenredig is met de getransporteerde lading Q.

1. ELEKTROLYSE

In een elektrolyse-proef met een kopersulfaatoplossing wordt gedurende 5 minuten een stroom van 0,4 A door de oplossing gestuurd. De kathode is voor de proef gewogen. Na de proef wordt de kathode met gedestilleerd water gespoeld en daarna gedroogd. Vervolgens wordt nog eens de massa bepaald. De massa van de kathode is toegenomen met 40,5 mg, doordat er koper op de kathode is afgezet.

a. Waarom is het nodig de kathode na de proef te spoelen en te drogen?
b. Bereken de lading Q die tijdens de proef door de oplossing is vervoerd.
c. Als je aanneemt dat deze lading door 40,5 mg koper is vervoerd, bereken dan de lading – massa – verhouding van koper in C/kg.

Faraday schreef in 1830:
'We weten niet wat een atoom is. Toch ontkomen we er niet aan ons een heel klein deeltje voor te stellen. We weten misschien nog wel minder van elektriciteit. Toch hebben we erg veel waargenomen dat ons sterkt in een vermoeden. Het vermoeden dat materiedeeltjes op de een of andere manier begiftigd zijn met elektrische machten en dat zij juist dááraan hun belangrijkste eigenschappen te danken hebben; daartoe behoort met name hun onderlinge chemische affiniteit.'

Bij elk experiment waarbij zich koper afzet op de kathode, blijkt de verhouding Q/m steeds gelijk te zijn.

Elke stof die zich afzet op een elektrode en elk gas dat vrij komt bij een elektrode levert een eigen waarde voor de *lading-massa-verhouding* Q/m. Faraday trok hieruit de conclusie dat er een verband moet bestaan tussen materie en elektrische lading. Hij nam aan dat er geladen materiedeeltjes, die hij *ionen* noemde, door de vloeistof bewegen.

2. ALUMINIUM PRODUKTIE

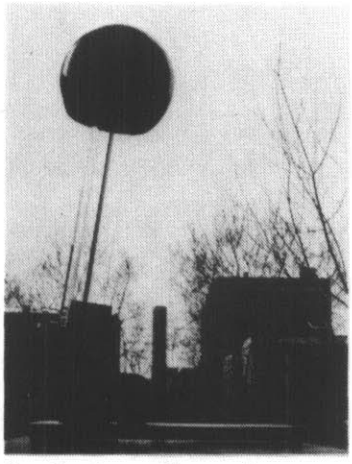
Voor het verkrijgen van aluminium uit erts wordt elektrolyse gebruikt. De waarde van Q/m van aluminium is $1{,}07 \cdot 10^7$ C/kg.

a. Bereken de stroomsterkte die nodig is om in 1 uur 1 kg aluminium af te scheiden.
b. Verklaar waarom de aluminium-industrie pas aan het einde van de negentiende eeuw op gang is gekomen.

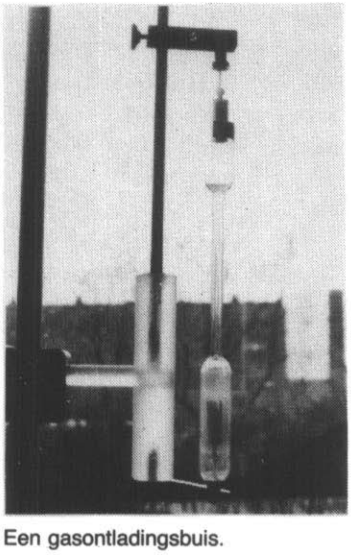
3.4 ELEKTRISCHE STROOM DOOR GASSEN

Bij de proeven met de elektroscoop heb je gezien dat een geladen elektroscoop zijn lading niet zomaar verliest. Als je de elektroscoop met de hand aanraakt, verdwijnt de lading ogenblikkelijk. Het menselijk lichaam is een matige geleider. Lucht echter is een goede isolator. Om toch stroom door lucht of een ander gas te sturen, zijn kunstgrepen nodig. In de negentiende eeuw zijn onder andere de volgende drie methoden gevonden:
– het gebruik van een *hoge spanning*, waarvoor in de loop der tijd verschillende bronnen zijn ontwikkeld;
– het gebruik van een *lage gasdruk*, vooral nadat in 1855 Heinrich Geissler een nieuw type vacuümpomp had ontworpen;
– het gebruik van een *gloeiende kathode*, voortgekomen uit een (toevallige) ontdekking door Thomas A. Edison in 1884.

De volgende experimenten geven een beeld van de verschijnselen die optreden als elektrische stroom door gassen beweegt.



Een Vandergraaff-generator.



Een gasontladingsbuis.

1. HOGE SPANNING

Een Vandergraaff-generator wordt gestart. Onder gunstige omstandigheden (droge lucht) wordt snel lading op de bol gepompt, en neemt de spanning toe tot duizenden volt.

a. Het uiteinde van een geaarde draad wordt in de buurt van de geladen bol gebracht. Wat zie je? Wat hoor je?

b. De proef wordt herhaald terwijl de bol is verbonden met een goed geïsoleerde elektroscoop. Wat zie je aan de uitslag van de elektroscoop?

c. De geaarde draad wordt met het ene uiteinde van een TL-buis verbonden. Het andere uiteinde van de lamp houdt men bij de Vandergraaff-generator. Is het verschijnsel in de TL-buis gelijk aan dat in de lucht?

2. LAGE GASDRUK

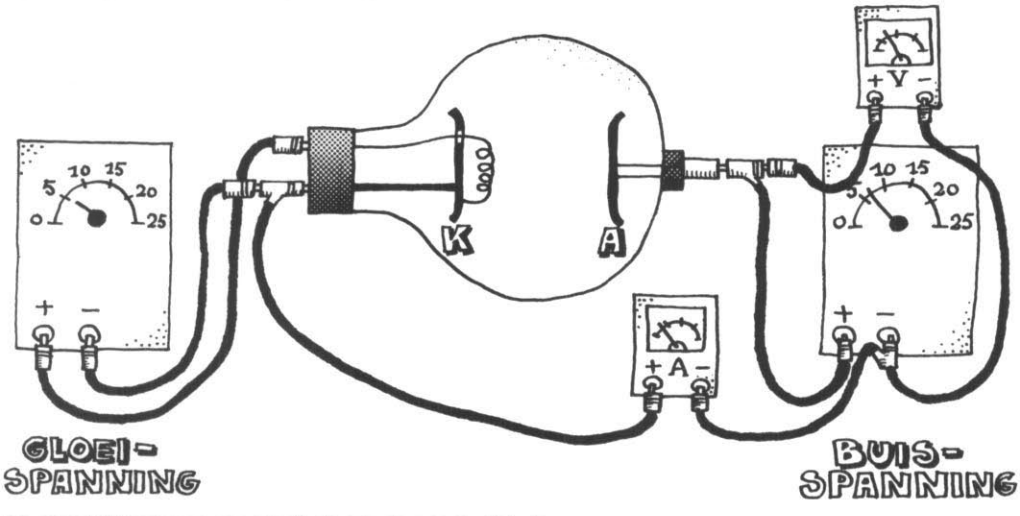
Hiernaast zie je een gasontladingsbuis. Door het glas van een gesloten buis steken twee elektroden. In de buis bevindt zich gas van een zeer lage druk (minder dan 1% van de atmosferische druk). De buis wordt aangesloten op een hoogspanningsbron. Welk effect heeft drukverlaging op de stroomgeleiding door gassen?

3. GLOEIKATHODE

De kathode bestaat uit een gloeispiraal die gevoed wordt met een lage spanning: de *gloeispanning* V_g. De anode en kathode worden aangesloten op een tweede spanningsbron. Deze spanning noemen we de *buisspanning* V_b.

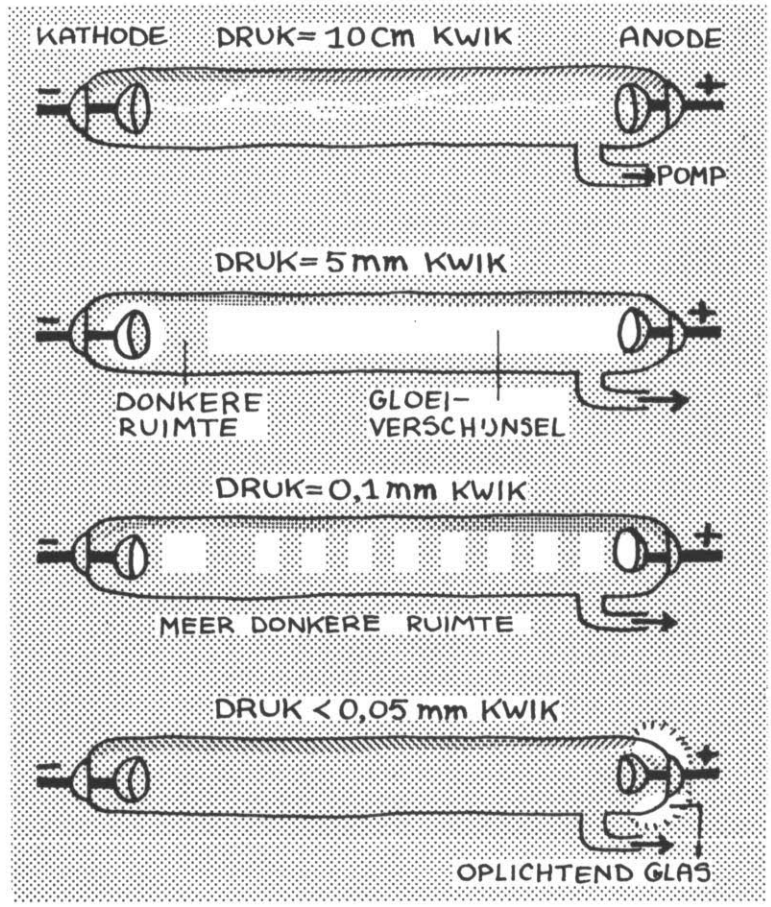
a. Meet V_b en I_b.

b. Herhaal de proef nadat de aansluitingen van anode en kathode zijn verwisseld.



De aansluitingen van een gloeikathode-demonstratiebuis.

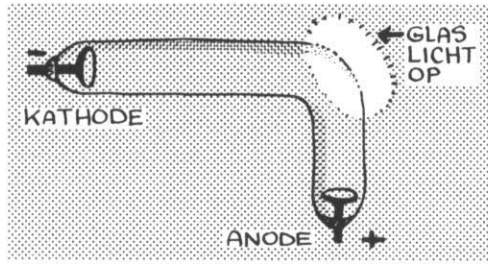
De figuur op blz. 25 laat schematisch zien wat je waarneemt bij elektrische stroom door een gas. Van boven naar beneden wordt de druk in de buis steeds lager.
Bij atmosferische druk kun je vonken produceren. Alleen over zeer korte afstand zijn spanningsbronnen in staat een voortdurende vonk, een *vlamboog*, in stand te houden.
Bij een druk van enkele mm kwik ontstaat bij een lagere spanning een voortdurende stroom. *Het gas in de buis licht op.* (Meer hierover in het thema 'Lichtbronnen').
Bij nog verdere verlaging van de druk neemt het oplichten van het gas af. Er ontstaan steeds grotere 'donkere ruimtes'. Daarentegen blijkt bij de anode het *glas op te lichten*.



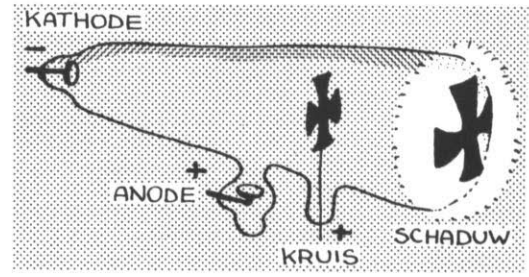
Verschijnselen die in een gasontladingsbuis optreden bij steeds lagere gasdruk.

kathodestralen

Met name Hittorf en Crookes onderzochten het oplichten van het glas met afwijkend gevormde buizen. De figuren hieronder laten zien waar het glas oplichtte.



Buis van Hittorf.



Schaduwkruisbuis volgens Crookes.

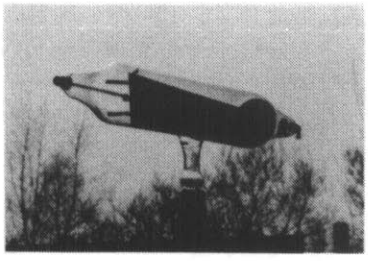
Op grond van deze in proeven en schetsen getoonde verschijnselen kwamen onderzoekers tot de term *kathodestralen*. Daarmee drukten ze uit dat er 'iets' door de kathode werd uitgestraald. De aard van deze stralen was lange tijd een twistpunt.

4. KATHODESTRALEN

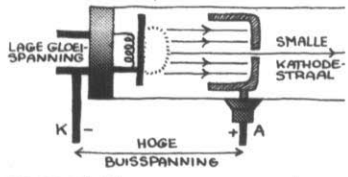
a. Welke verschijnselen wijzen op stralen die vanuit de kathode naar de anode gaan?

b. De buis vormt, samen met de draden van en naar de hoogspanningsbron, een gesloten stroomkring. Welk effect hebben kathodestralen binnen de buis in ieder geval?

c. Een deel van de wetenschappers vermoedde dat kathodestralen uit zeer kleine deeltjes bestaan, die elektrische lading kunnen vervoeren. Wat zou de soort lading van kathodestraaldeeltjes moeten zijn?

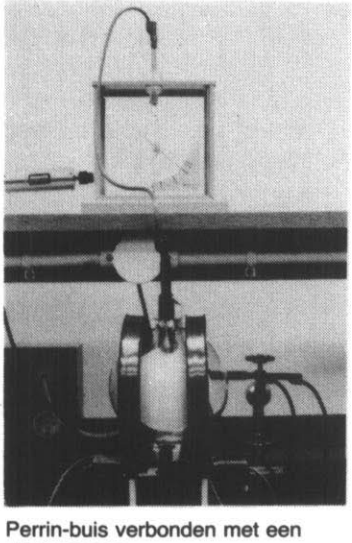


Ouder type kathodestraalbuis, zonder gloeidraad.



De aansluitingen van een modern kathodestraalkanon.

Een deel van de onderzoekers veronderstelde dat kathodestralen bundels snelle geladen deeltjes waren.
'Dat is nonsens', zeiden anderen. 'Hoe zou je geladen deeltjes ooit dwars door metaalfolie kunnen schieten?' (Von Lenard, 1894). 'Wij veronderstellen dat het een onzichtbaar soort licht is, behorend tot de elektromagnetische straling en met het karakter van golven'. (Zie ook het thema 'Lichtbronnen'.)



Perrin-buis verbonden met een elektroscoop.

Een laatste vinding, eind negentiende eeuw, produceerde een smalle kathodestraal die geschikt was voor onderzoek. Hiertoe wordt in de anode een smalle spleet of een klein gat gemaakt. Slechts een smalle bundel passeert de spleet en komt in de ruimte achter de anode.
Als je een doorboorde anode combineert met een gloeikathode, ontstaat een *kathodestraalkanon* (zoals nu nog wordt toegepast in de oscilloscoop en in het tv-toestel). Een doorsnede van zo'n 'kanon' zie je hiernaast.

5. HET STRAALKANON

Een modern kathodestraalkanon wordt aangesloten zoals in de tekening hiernaast.
a. Onderzoek welk effect de gloeispanning op de straal heeft.
b. Onderzoek welk effect de spanning tussen anode en kathode (de zogenaamde buisspanning) op de straal heeft.
c. Houd een magneet in de buurt van het kathodestraalkanon. Welk effect heeft dat op de straal?
d. Doe hetzelfde met een geladen staaf.

wat zijn kathodestralen

In het laatste kwart van de negentiende eeuw stelde men zich atomen voor als massieve bolletjes: het model van Dalton. Het bestaan van atomen werd niet algemeen aanvaard: losse atomen waren nog nooit waargenomen.
Nu had men de beschikking over kathodestralen. Een deel van de onderzoekers veronderstelde dat kathodestralen bundels snelle geladen deeltjes waren. Atomen met elektrische lading bijvoorbeeld. Via onderzoek zochten zij allereerst bevestiging van hun deeltjes-model. Vervolgens wilden zij de massa m en de lading q van de deeltjes bepalen.
Daarbij zou blijken of die kathodestraaldeeltjes wel altijd allemaal gelijk zijn. Door vergelijking met elektrolyse-proeven (zie paragraaf 3.3) kon men dan bepalen of die deeltjes atomen zijn, en zo ja welke.

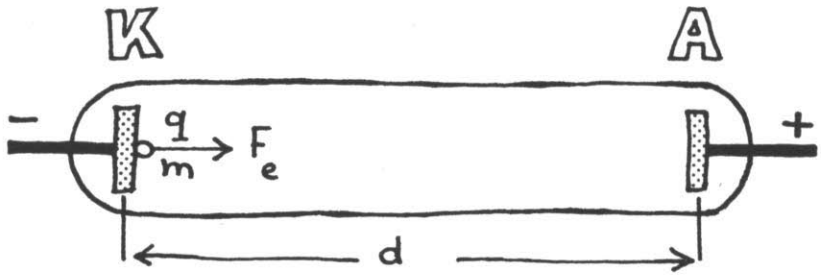
Hoe kun je de massa en lading bepalen van deeltjes die in grote getale onderweg zijn? Er werden een groot aantal pogingen gedaan:
– je kunt ze tegen een voorwerp laten botsen, en meten hoeveel warmte daarbij vrij komt (Crookes, 1879);
– je kunt ze op een klein schoepenrad richten, en kijken of het rad gaat draaien (Crookes, 1880);
– je kunt ze opvangen op een elektrode, verbonden met een elektroscoop (Perrin, 1895);
– je kunt ze afbuigen met een magnetisch veld (Plücker, 1860 en Schuster, 1880);
– je kunt ze afbuigen met een elektrisch veld (Thomson, 1897; deze proef mislukte steeds bij eerdere onderzoekers).

Dit soort waarnemingen alléén zijn niet voldoende. Om meer over lading en massa te weten te komen moet je je verdiepen in:
– de *krachten* die op geladen deeltjes werken;
– de *energie* van geladen deeltjes.
Tenslotte moet je enkele van de genoemde verschijnselen combineren. Alleen uit geschikte combinaties is het mogelijk de verhouding van lading en massa (q/m) te bepalen. Thomson slaagde hierin in 1897. Pas in 1910 zag Millikan kans de lading q van het kathodestraaldeeltje nauwkeurig te meten (zie paragraaf 5.3).

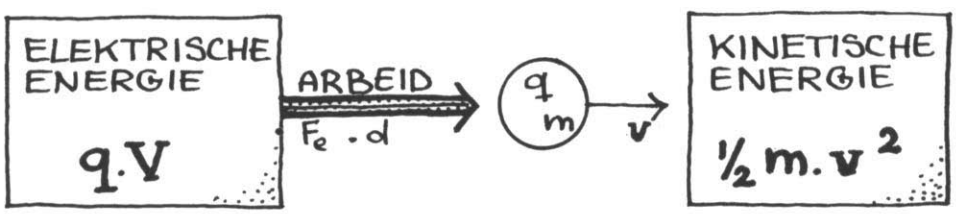
Hierna wordt eerst afgeleid hoe groot de elektrische kracht (paragraaf 3.5) en de lorentzkracht (paragraaf 3.6) op een geladen deeltje zijn. Daarna komen we terug op experimenten van Schuster (1880) en van Thomson (1897) in de paragrafen 3.7 en 3.8.

3.5 ELEKTRISCHE KRACHT

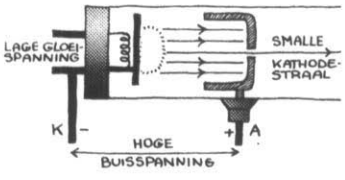
We gaan uit van een bekende situatie. Een stroom I gaat door een draad. De spanning op de uiteinden van de draad is V. De proef duurt t seconde. In die tijd is elektrische energie omgezet in warmte. In het thema 'Elektrische Machines' heb je gezien dat die hoeveelheid energie gegeven wordt door $E_e = V \cdot I \cdot t$.
Nu een sprong verder.
I is de lading die in 1 seconde passeert.
$Q = I \cdot t$ is de lading die tijdens de hele proef passeert.
Van de elektrische energie kunnen we dus ook zeggen:
elektrische energie = lading · spanning
$E_e = Q \cdot V$



In bovenstaande kathodestraalbuis bevindt zich op dit moment één deeltje met massa m en negatieve lading q juist tegen de kathode. Het deeltje ondervindt een elektrische kracht richting anode. Aangezien er in de buis vacuüm heerst, kan het deeltje ongehinderd van K naar A vliegen.
De elektrische lading Q, die door een draad stroomt, bezit een elektrische energie $E_e = Q \cdot V$. Deze elektrische energie wordt tijdens het stromen omgezet in warmte. Op dezelfde manier heeft een *deeltje* met lading q een elektrische energie $E_e = q \cdot V$, als het nog op de kathode is. Hierin is V de spanning tussen de kathode en de anode.
In een kathodestraalbuis wordt de *elektrische energie* echter omgezet in *kinetische energie*: $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2$. Het deeltje arriveert met een snelheid v_A bij de anode, botst daar tegen of passeert door een gat in de anode. De wet van behoud van energie geeft aan dat:
$q \cdot V = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2$.
In het thema 'Verkeer' heb je gezien dat voor verandering van snelheid een kracht nodig is. De door de *netto kracht* F_{netto} geleverde *arbeid* is gelijk aan de *verandering van kinetische energie* ΔE_k:
$F_{netto} \cdot s = \Delta E_k$
In de kathodestraalbuis werkt alleen de elektrische kracht F_e op het deeltje (zwaartekracht is verwaarloosbaar). De weg waarover deze kracht werkt is de afstand d tussen de elektroden. De kinetische energie van het deeltje is bij het loskomen van de kathode verwaarloosbaar klein, zodat geldt:
$F_e \cdot d = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2$.
Samengenomen blijkt dus:
$q \cdot V = F_e \cdot d = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2$.



In een kathodestraalbuis kunnen we op twee manieren een elektrisch veld toepassen:
- om het geladen deeltje *te versnellen* (in het straalkanon);
- om de kathodestraal *af te buigen* met een veld dat loodrecht op de straal staat.

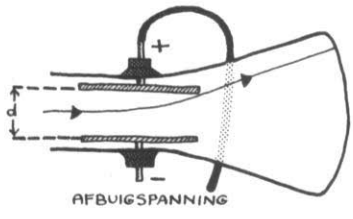


De aansluitingen van een kathodestraalbuis.

het straalkanon

We hebben gezien dat de gloeispanning V_g de kathode verhit, waardoor de stroom door de buis gemakkelijker op gang komt. Het versnellen van de negatief geladen deeltjes van kathode naar anode wordt veroorzaakt door de buisspanning V_b (ook wel versnelspanning genaamd). De elektrische energie van het deeltje, als het nog bij de kathode is en stil staat, is $q \cdot V_b$. Deze energie wordt volledig omgezet in de kinetische energie $\frac{1}{2} m \cdot v_A^2$ van het deeltje, als dat juist door het gat in de anode vliegt.
Voor het kanon geldt nu:

$$q \cdot V_b = \tfrac{1}{2} m \cdot v_A^2.$$



Afbuiging met behulp van een elektrisch veld.

homogeen dwarsveld

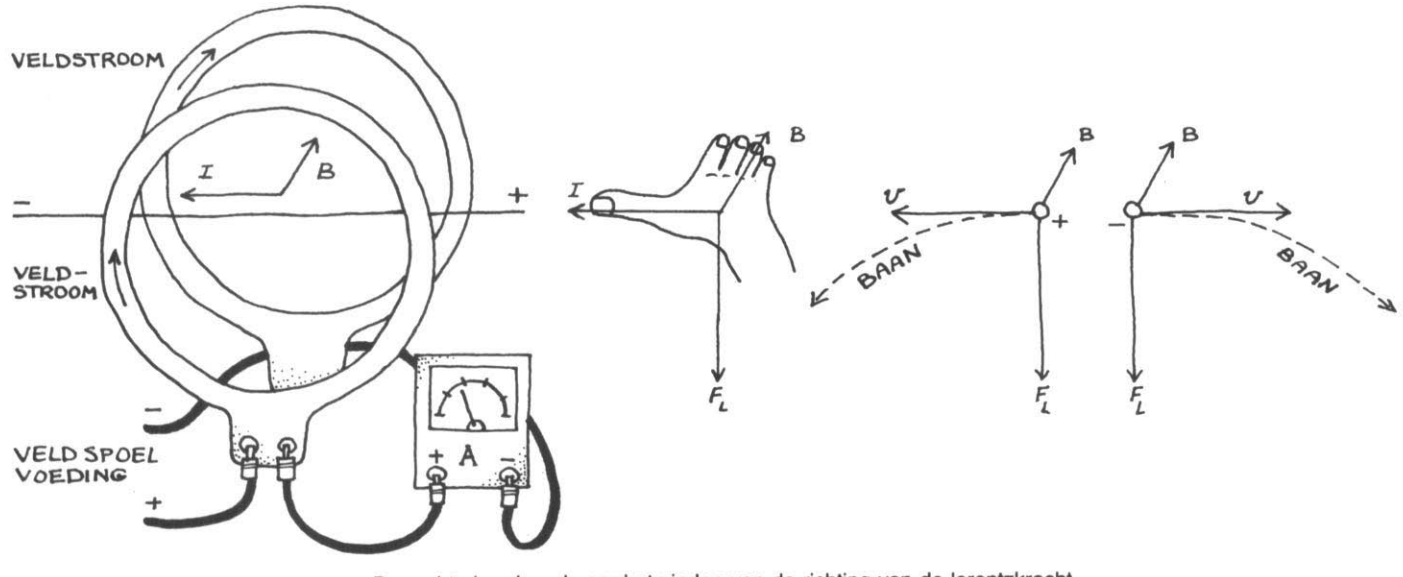
Twee vlakke afbuigplaten worden in een buis gesmolten. Zij worden verbonden met een *afbuigspanning* V_a. De kathodestraal van het kanon gaat tussen de twee platen door. Gedurende de tijd dat de negatieve deeltjes tussen de platen zijn, werkt een elektrische kracht F_e op de deeltjes. In het hiernaast geschetste geval werkt F_e naar boven, en zal de kathodestraal naar boven worden afgebogen. Hoe groot is die kracht?
Aangezien $F_e \cdot d = q \cdot V_a$, zal de afbuigende kracht gelijk zijn aan:

$$F_e = \frac{q \cdot V_a}{d}$$

Hierin is d de afstand tussen de twee afbuigplaten.

3.6 LORENTZKRACHT

In het thema 'Elektrische Machines' heb je gezien dat een stroomvoerende draad in een magnetisch veld een lorentzkracht ondervindt, tenzij het magnetisch veld en de stroomrichting evenwijdig zijn. De richting van de lorentzkracht is te onthouden met de rechterhandregel. De grootte van de lorentzkracht wordt gegeven door $F_L = B \cdot I \cdot l$ als $l \perp B$.



De rechterhandregel voor het vinden van de richting van de lorentzkracht.

Bewegende geladen deeltjes ondervinden ook een lorentzkracht. Positief geladen deeltjes bewegen in dezelfde richting als de stroom in een draad, namelijk van + naar −. De richting van de lorentzkracht voor positief geladen deeltjes kunnen we dan ook met de rechterhandregel bepalen.

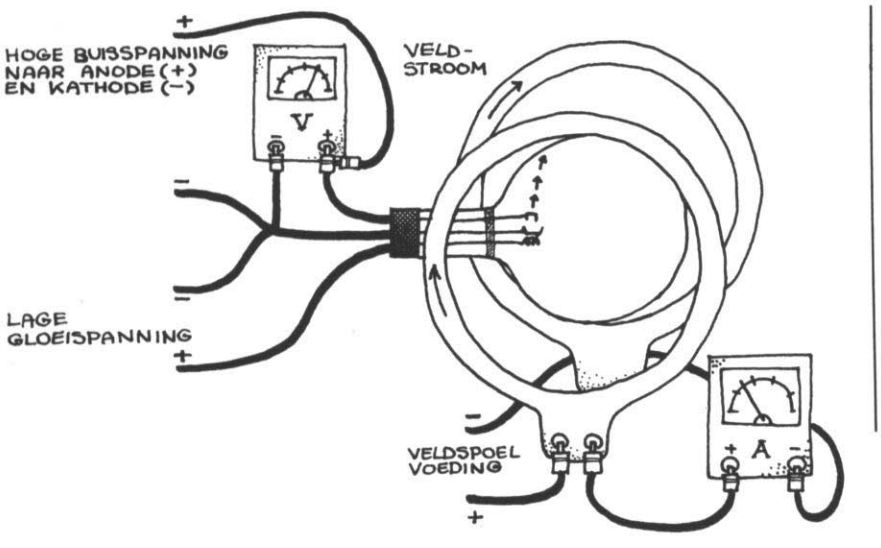
Negatief geladen deeltjes bewegen van − naar +, dus tegengesteld aan de normale stroomrichting. De krachtrichting volgt nog steeds met de rechterhandregel, mits je de duim tegen de kathodestraal in laat wijzen.
De grootte van de lorentzkracht op een deeltje met lading q en snelheid v wordt gegeven door:

$F_L = B \cdot q \cdot v$ als $v \perp B$.

DE GROOTTE VAN DE LORENTZKRACHT OP EEN DEELTJE
De grootte van de lorentzkracht is af te leiden uit $F_L = B \cdot I \cdot l$. Stroomsterkte I is de lading die per seconde passeert. Nu heeft het passerende deeltje een lading q C.
In een seconde legt dat deeltje een afstand van v m af.
In plaats van I en l kunnen we schrijven q en v. Voor de lorentzkracht op het deeltje vind je dan: $F_L = B \cdot q \cdot v$ (als $v \perp B$).

de baan van het deeltje
De lorentzkracht staat op elk moment loodrecht op de bewegingsrichting. Deze kracht kan nooit arbeid op het deeltje verrichten. Met een magnetisch veld kun je nooit de kinetische energie van een geladen deeltje veranderen. De snelheid is constant van grootte, alleen de richting van die snelheid verandert voortdurend. Dit effect is goed te zien als het magnetisch veld homogeen is. Dat is te bereiken met twee vrij grote spoelen aan weerszijden van een kathodestraal.

1. KATHODESTRAAL IN MAGNETISCH VELD



Van de hiernaast getekende buis wordt het kanon aangesloten op de gloeispanning V_g en de versnelspanning V_b. Vervolgens worden de veldspoelen aangesloten.
a. Welke vorm krijgt de kathodestraal?
b. Bepaal met een kompasnaald de richting van het magnetisch veld B; leid uit B en v de richting van de lorentzkracht af.

De aansluitingen voor een buis waarmee het effect van een magnetisch veld op een kathodestraal kan worden bestudeerd.

Voor een *cirkelbeweging* met constante snelheid (ook wel *eenparige cirkelbeweging* genoemd) is een kracht nodig die op elk moment naar het middelpunt van de cirkel is gericht. Deze kracht wordt de *centripetale kracht* genoemd.
Volgens de bewegingstheorie moet voor de grootte van de centipetale kracht F_c gelden:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r}.$$

Daarin is m de massa van het rondcirkelende voorwerp, v de (constante) snelheid van het voorwerp en r de straal van de cirkel.

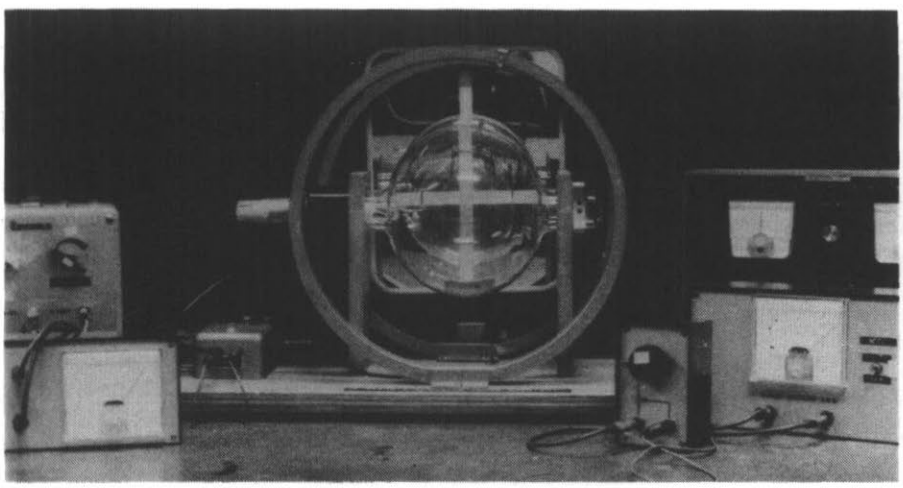
Een kracht die naar het middelpunt van de cirkel is gericht, zal altijd loodrecht op de raaklijn aan de cirkel staan en dus ook loodrecht op de snelheid van het cirkelende

voorwerp. De lorentzkracht voldoet aan die richtingsvoorwaarde. In de kathodestraalbuis voeren de kathodestraaldeeltjes een cirkelbeweging uit, omdat de lorentzkracht ($F_L = B \cdot q \cdot v$) als centripetale kracht werkt. Daaruit volgt:

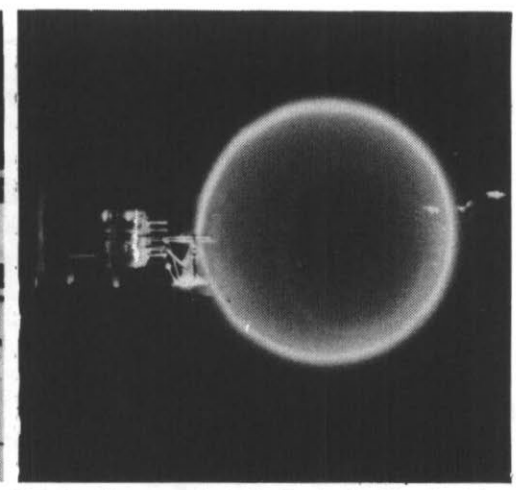
$$B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

3.7 DE CIRKELSTRAALBUIS

De eerste globale bepaling van de lading-massa-verhouding van kathodestraaldeeltjes is uitgevoerd met een *cirkelstraalbuis*. Het experiment kunnen we zelf uitvoeren met de hieronder weergegeven, moderne buis. We zullen de meetresultaten uitwerken en vervolgens aangeven waarom deze resultaten in 1880 verworpen werden.



De cirkelstraalbuis-opstelling.



Het straalkanon met gloeikathode staat loodrecht op de as van de buis.

De opstelling bestaat uit een buis met een kathodestraalkanon zoals op blz. 29. Door het elektrisch veld tussen de gloeiende kathode en de anode worden de geladen deeltjes op gang gebracht. Een deel van de bundel vliegt door een gat in de anode de buis in. In de buis bevindt zich waterstofgas van lage druk om de kathodestraal zichtbaar te maken. Buiten de bol zijn twee grote spoelen aangebracht, waarmee een magnetisch veld kan worden opgewekt. Aan één kant van de buis bevindt zich een vlakke spiegel. Het spiegelbeeld van de oplichtende cirkel vereenvoudigt de meting van de diameter van de cirkel.

1. VERKENNING VAN DE CIRKELSTRAALBUIS

De drie spanningsbronnen (gloeispanning V_g, versnelspanning V_b en veldspoelspanning V_v) worden aangesloten. De gloeispanning wordt ingeschakeld. De versnelspanning wordt opgevoerd, totdat de kathodestraal goed zichtbaar is in een half verduisterde ruimte ($V_b \approx 250$ V). WEES VOORZICHTIG MET DE HOOGSPANNING.

De stroom door de veldspoelen wordt ingeschakeld, zodat de bundel door een homogeen magnetisch veld gaat.

a. Beschrijf wat je waarneemt bij langzaam opvoeren van de magnetische veldsterkte.

b. Verklaar de waarnemingen met behulp van de relaties uit paragraaf 3.6.

2. BEPALING LADING-MASSA-VERHOUDING

Regel de stroom door de spoelen zodanig dat de kathodestraal een cirkelbaan volgt.

a. Meet de versnelspanning V_b, de veldspoelstroom I_v en de straal r van de cirkel.

b. Bepaal het verband tussen de veldspoelstroom I_v en de magnetische veld-

sterkte B tussen de spoelen, bijvoorbeeld met een hall-sensor. Indien aanwezig kun je hiervoor ook een *ijktabel* van de veldspoelen raadplegen.
c. Herhaal de meting met andere waarden van V_b en I_v.
d. Bepaal de snelheid v van de deeltjes. Maak gebruik van de energievergelijking van de versneller:
$q \cdot V_b = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
en van de cirkelvergelijking:

$$B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Aanwijzing: volgens de eerste vergelijking geldt: $m \cdot v^2 = 2q \cdot V_b$; vul deze $2q \cdot V_b$ in het rechter lid van de tweede vergelijking in.
e. Bepaal vervolgens de lading-massa-verhouding q/m, door v te substitueren in één van de vergelijkingen.

3.
Uit elektrolyse-proeven is de waarde van q/m van het kleinste ion, het waterstof-ion, bekend. Deze waarde is $9{,}4 \cdot 10^7$ C/kg.

Vergelijk deze waterstof-ion waarde met de door jou bepaalde q/m van een kathodestraaldeeltje. Kan een kathodestraaldeeltje een ion zijn? Waarom?

In 1880 werd de meting van de lading-massa-verhouding van kathodestraaldeeltjes uitgevoerd door Schuster. Hij verwierp zijn eigen meetresultaten. De enige deeltjes die men zich in die tijd kon voorstellen, waren Dalton's massieve bolvormige atomen. De meetresultaten wezen op iets anders dan een geladen atoom (een ion). Dat was in 1880 zo spectaculair, dat het niet werd geloofd.
Schuster bedacht andere verklaringen. Niet een 'vreemd deeltje', maar foute vooronderstellingen zouden de oorzaak van zijn vreemde meetresultaten kunnen zijn. Met name wantrouwde hij de snelheid van het deeltje bij het verlaten van het kanon. Hij vroeg zich af:
– *waar* in het kanon *ontstaat het geladen deeltje*, en heeft het misschien een beginsnelheid;
– *welk effect heeft botsen met gasatomen* op de kinetische energie van het deeltje?

4.
a. Waar ontstaat het kathodestraaldeeltje volgens de afgeleide formule van het straalkanon, en welke beginsnelheid heeft het?
b. Als het deeltje dicht bij de anode zou ontstaan, zou de snelheid tijdens het passeren anders zijn. Groter of kleiner?
c. Een kathodestraal beïnvloedt het gas in de buis. De energie voor het gloeien van het gas moet ergens vandaan komen. Wat gebeurt er met de snelheid van het kathodestraaldeeltje op het moment dat het tegen een gasatoom botst?
d. Als de snelheid kleiner is dan berekend, wat kun je dan zeggen over de werkelijke waarde van q/m?

3.8 DE THOMSON-BUIS

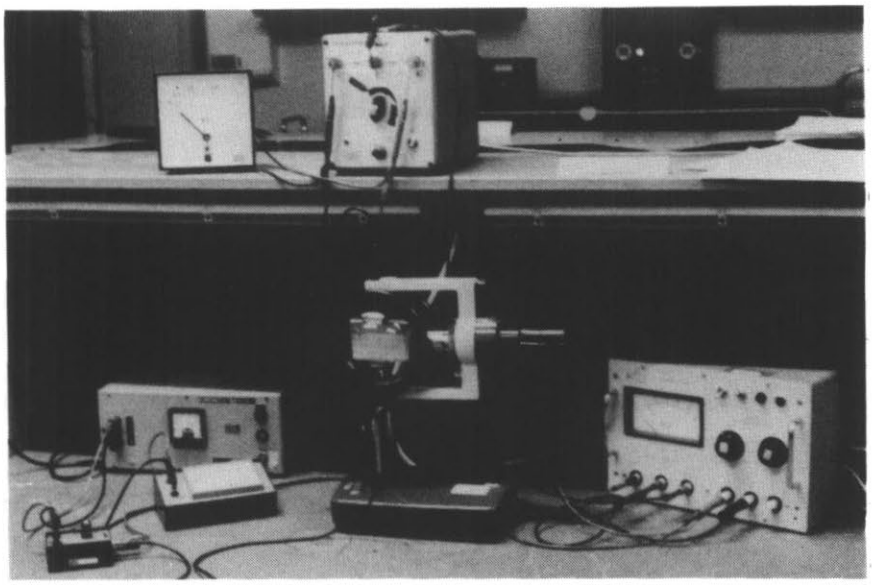
De originele buis van Thomson, opgesteld in het Science Museum te Londen.

Onder leiding van J.J. Thomson (zie ook hoofdstuk 4) werden tenminste twee proeven uitgevoerd, waaruit q/m kan worden bepaald zonder gebruik te maken van de formule van het straalkanon. De bekendste is wel de proef met de hiernaast weergegeven *Thomsonbuis*. (Zie paragraaf 3.7 voor de bezwaren die bestonden tegen het gebruik van de straalkanonformule.)
Het vacuüm in deze buis is van zeer hoge kwaliteit. Er treedt geen gloeiverschijnsel in het gas op. De kathodestraal wordt zichtbaar op een fluorescerend scherm in de langsrichting van de buis.
Door het elektrisch veld tussen de gloeiende kathode K en de anode A worden de geladen deeltjes op gang gebracht.
Voorbij de anode bevinden zich twee platen, P_1 en P_2. De kathodestraal passeert midden tussen deze evenwijdige platen. Door spanning op de platen P_1 en P_2 te zetten

(afbuigspanning V_a) ontstaat een elektrisch veld dwars op de kathodestraal. De kathodestraal is ook af te buigen met behulp van een magnetisch veld, gemaakt met twee spoelen aan weerszijden van de buis.

1. VERKENNING VAN DE THOMSON-BUIS

Het kathodestraalkanon wordt aangesloten op de lage gloeispanning V_g en op de hoge versnelspanning V_b. De afbuigplaten worden aangesloten op de afbuigspanning V_a.



Een moderne versie van de Thomson-buis.

a. Gloeispanning en versnelspanning worden ingeschakeld en opgevoerd tot de rechtdoorgaande kathodestraal een duidelijk spoor op het scherm maakt. Dan wordt de afbuigspanning V_a ingeschakeld. Wat neem je waar als V_a toeneemt?

b. Welke invloed heeft variatie van de versnelspanning V_b op de afbuiging bij constante V_a?

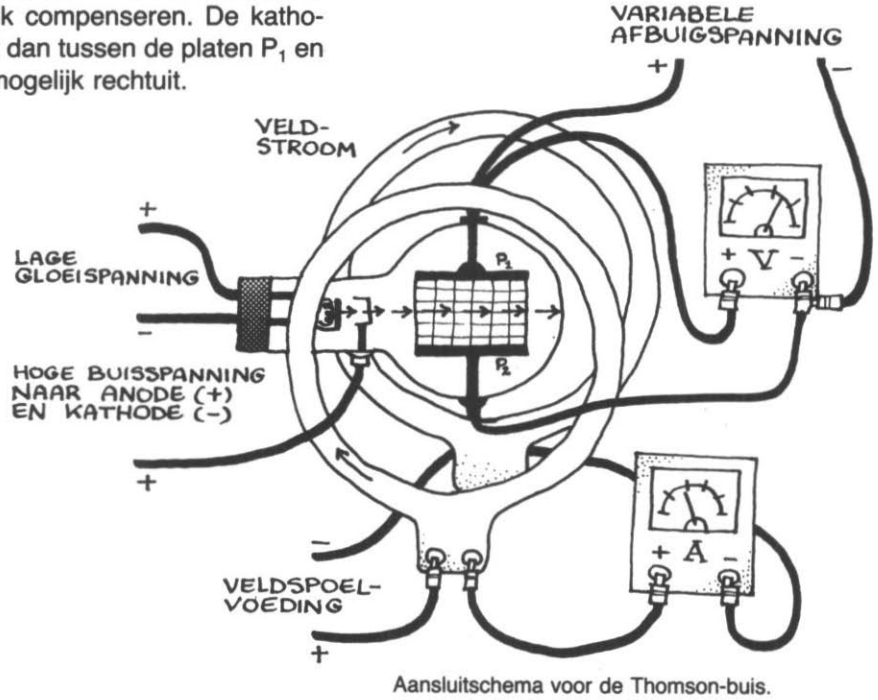
c. Probeer deze samenhang te verklaren met behulp van de theorie in paragraaf 3.5.

d. Nu wordt ook de stroom I_v door de veldspoelen ingeschakeld. De stroomrichting moet zó zijn, dat elektrisch en magnetisch veld elkaar tegenwerken bij de afbuiging van de kathodestraal.
Wat neem je waar bij toenemende veldspoelstroom I_v?

e. Leid uit de waarnemingen de richting van het magnetisch veld af. Controleer de afleiding met een kompasnaald.

2. DE METINGEN VAN THOMSON

De veldspoelstroom I_v en de afbuigspanning V_a worden zó ingesteld, dat lorentzkracht en elektrische kracht elkaar zo goed mogelijk compenseren. De kathodestraal gaat dan tussen de platen P_1 en P_2 zo goed mogelijk rechtuit.



Aansluitschema voor de Thomson-buis.

a. Meet V_a en I_v.
b. *Verander de instelling van de spanningsbronnen niet meer.* De spanningsbronnen worden uitgeschakeld en de voeding voor de afbuigplaten wordt verwijderd. P_1 en P_2 worden met elkaar verbonden, waarna V_b, V_g en I_v weer ingeschakeld worden.
Meet I_v (onveranderd!) en de straal r van de cirkelboog. (Copieer het beeld op het scherm op een vel papier met hokjes van gelijke afmetingen; de straal kan met dit papier zo goed mogelijk worden benaderd.)
Bepaal de magnetische veldsterkte B met een hall-sonde of met een *ijktabel* van de gebruikte veldspoelen.

3. DE UITWERKING VOLGENS THOMSON
In de eerste meting bij activiteit 2 is de lorentzkracht gelijk aan de elektrische kracht:

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

(hierin is d de afstand tussen de platen P_1 en P_2.)
a. Leid uit deze vergelijking de snelheid van de kathodestraal af.

b. Na het uitschakelen van het elektrisch veld, maar onder overigens gelijke omstandigheden, werd een cirkelboog gevormd met straal r. De lorentzkracht werkt nu als centripetale kracht:

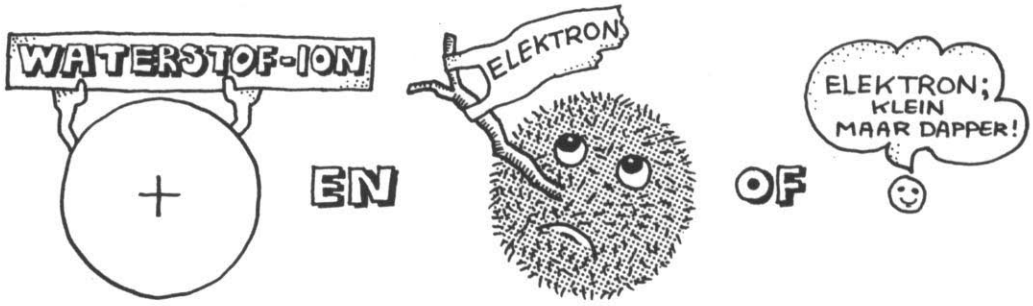
$$B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Vul de gevonden snelheid v in, en bepaal q/m.

3.9 HET ELEKTRON

Afbuiging met een elektrisch veld is vóór 1897 niet gelukt. De kathodestraal ioniseert vele gas-atomen op zijn weg. Positieve en negatieve ionen worden respektievelijk naar de negatieve en de positieve plaat getrokken. Dichtbij de negatieve plaat ontstaat een overmaat aan positieve ionen, terwijl dichtbij de positieve plaat juist veel negatieve deeltjes zijn te vinden. Deze 'wolken' geladen deeltjes werken het elektrisch veld van de platen tegen. Deze tegenwerking is zó sterk, dat de kathodestraal helemaal niet afgebogen wordt. Alleen met een betere pomp en een vacuüm van zeer hoge kwaliteit is ionisatie en vorming van ionenwolken te voorkomen.

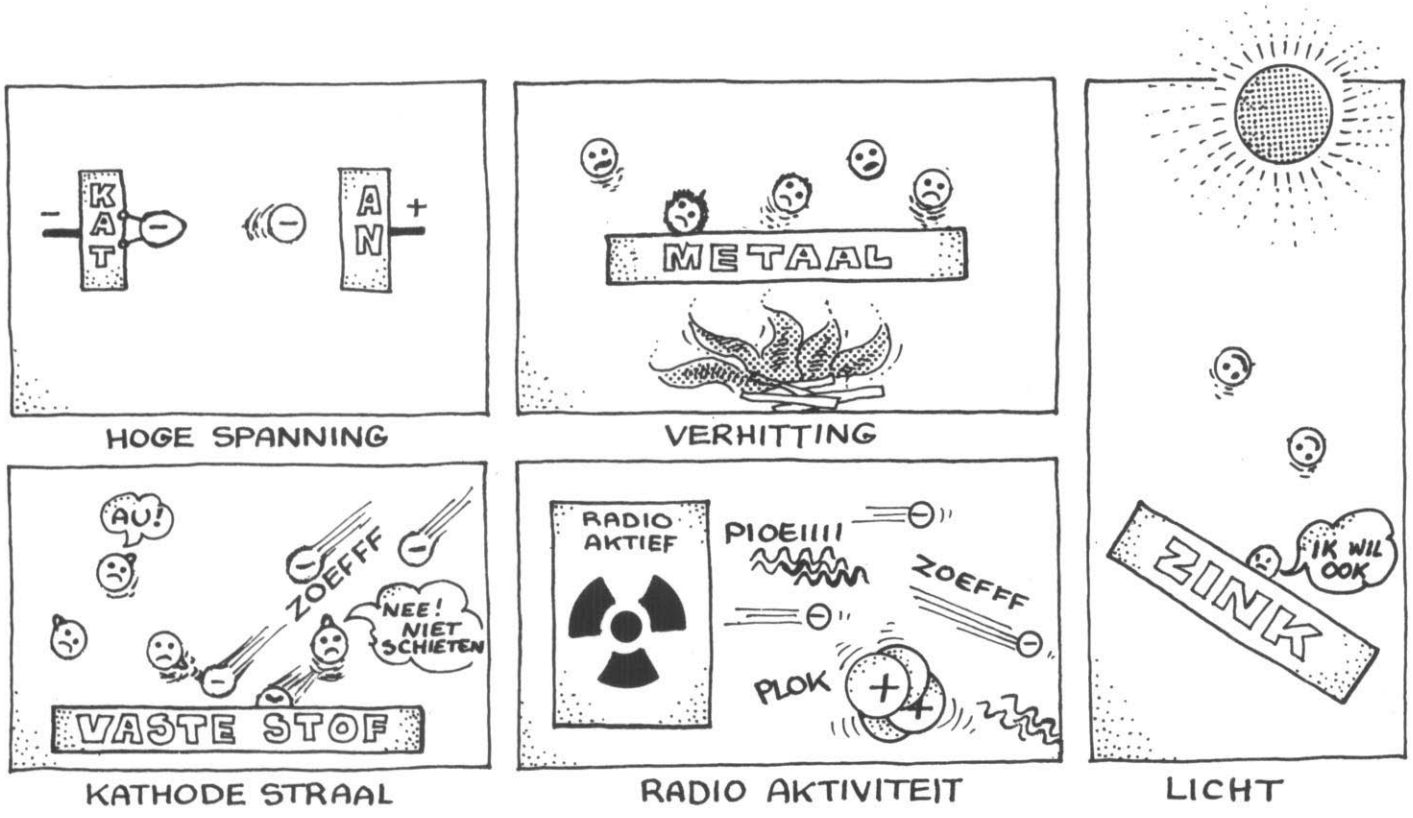
Thomson's experimenten vormden het begin van de aanvaarding in de natuurwetenschappen van het *elektron.* Nu ook de afbuiging in een elektrisch veld was aangetoond, was een belangrijk argument tegen het deeltjeskarakter van kathodestralen opgeruimd. Bovendien waren de argumenten van Schuster in 1880 tegen het cirkelstraalbuisexperiment (zie paragraaf 3.7) omzeild.
Wel was het elektron een vreemd soort deeltje, met name door zijn q/m-verhouding. Voor een elektron bleek: $q/m = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ C/kg. Voor een waterstof-ion, het kleinste bestaande ion, was via elektrolyse gevonden: $q/m = 9{,}4 \cdot 10^7$ C/kg. De lading van het elektron is in verhouding tot zijn massa haast 2000 maal zo groot. Hoe zit dat nu?



Hoe moeten we ons zo'n elektron voorstellen?

Al vrij snel rees het vermoeden dat een positief waterstof-ion samen met een negatief elektron een neutraal waterstof-atoom vormde. Het waterstof-ion moest dan evenveel positieve lading als het elektron negatieve lading bevatten.
Bovendien zou dan de massa van het elektron ongeveer 2000 maal zo klein zijn als de massa van het waterstof-ion.
In hoofdstuk 5 gaan we dieper in op *nieuwe atoommodellen*, waarin men het bestaan van elektronen probeerde te verwerken.

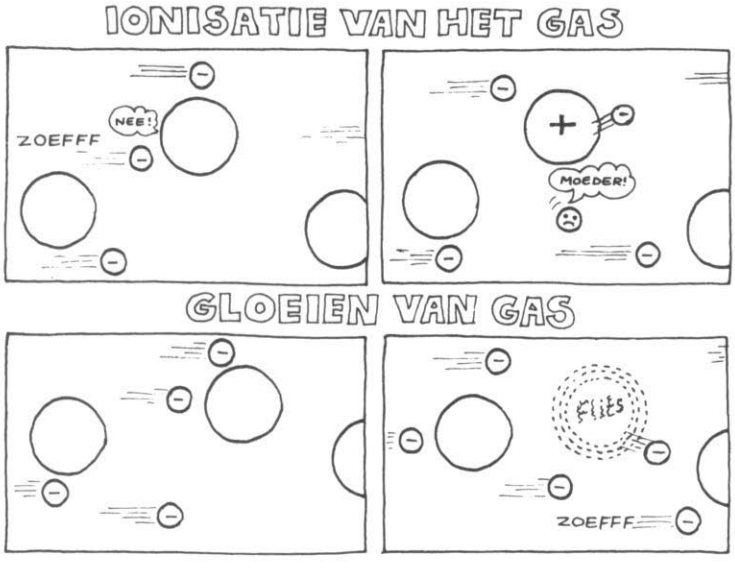
Hieronder zijn een aantal eigenschappen van elektronen op een rij gezet, die rond 1900 aan het licht kwamen.



Elektronen-emissie (dat wil zeggen: losmaken van elektronen uit vaste stof) is mogelijk door:
- een zeer sterk elektrisch veld (hoge spanning op korte afstand zodat V/d groot is);
- door verhitting van de vaste stof;
- door het bestralen van sommige vaste stoffen met licht (zichtbaar of ultraviolet);
- door het bestralen van een vaste stof met snelle elektronen.

Daarnaast bleek één van de vormen van radioactieve straling ook uit snelle elektronen te bestaan, die uit de radioactieve stof kwamen.

Elektronen die door een gas bewegen kunnen tot gevolg hebben:
- *ionisatie* van het gas, waarbij elektronen van het gasatoom worden losgeslagen en er positieve gasionen achterblijven;
- *oplichten of gloeien* van het gas.



Elektronen die tegen een vaste stof botsen kunnen tot gevolg hebben:
- *oplichten*, bijvoorbeeld van glas;
- *temperatuurstijging*;
- *röntgenstraling*;
- *elektron-emissie*;
- *sporen in fotografisch materiaal*.

In dit overzicht zie je regelmatig dat kathodestralen andere straling als oorzaak of gevolg kunnen hebben. Hiervan bestaan licht en röntgenstraling niet uit geladen deeltjes. Deze zijn beter te beschrijven als golven. In sommige eigenschappen vertonen zij overeenkomsten met watergolven en geluidgolven. Licht en röntgenstraling komen respektievelijk in de thema's 'Lichtbronnen' en 'Ioniserende Straling' uitgebreider aan de orde.

3.10 OPGAVEN

1.

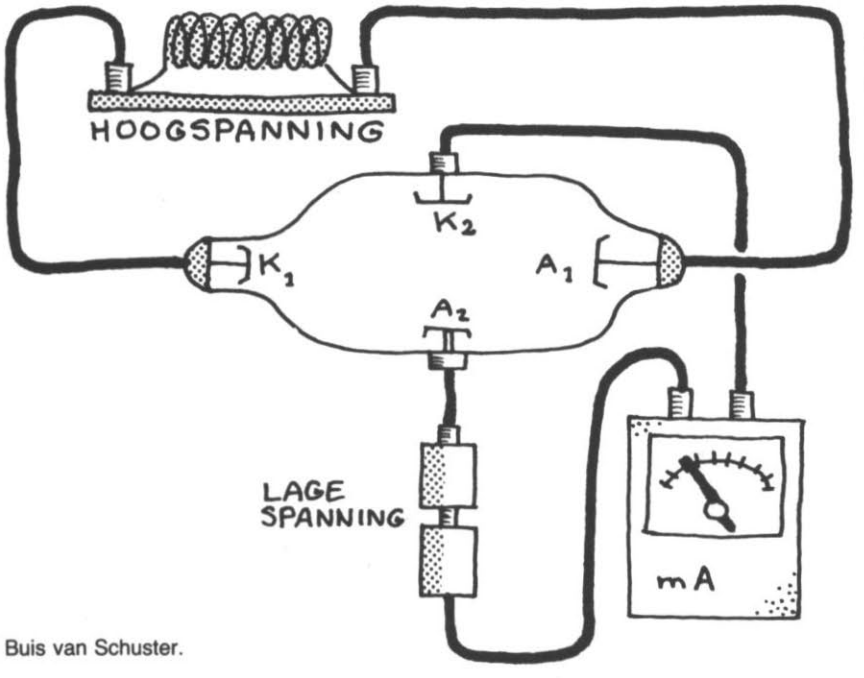
'Instances are remembered when research workers gave up their work and left after smashing their tormenting glass apparatus into little bits with a hammer.'

Vooral in de laatste veertig jaar van de negentiende eeuw zijn vele proeven met kathodestralen gedaan, door vaak jonge onderzoekers. De resultaten waren soms teleurstellend, soms verbijsterend. Zie het citaat hiernaast.

a. Welke experimenten en resultaten uit de lijst van paragraaf 3.1 zijn verklaarbaar, nu de ware aard van kathodestralen bekend is?

b. Leg uit hoe anodestralen kunnen ontstaan door een gat in de kathode.

c. Elektronen blijken een basisbestanddeel van materie. Schrijf tenminste twee vragen op over de bouw van de materie die in 1897 nog niet waren beantwoord.



Buis van Schuster.

2.

In 1880 voerde Arthur Schuster in Manchester een experiment uit met de hiernaast weergegeven buis. De buis is gevuld met gas van lage druk en bevat 4 elektroden. Twee daarvan, K_1 en A_1, zijn aangesloten op een regelbare hoogspanningsbron. De andere elektroden, K_2 en A_2, zijn via een ampèremeter verbonden met laagspanningsbron.

De spanning V_1 tussen K_1 en A_1 werd opgevoerd, totdat het gas in de buis ging oplichten. Vanaf dat moment is de lage spanning V_2 voldoende om een kleine stroom door de ampèremeter op te wekken.

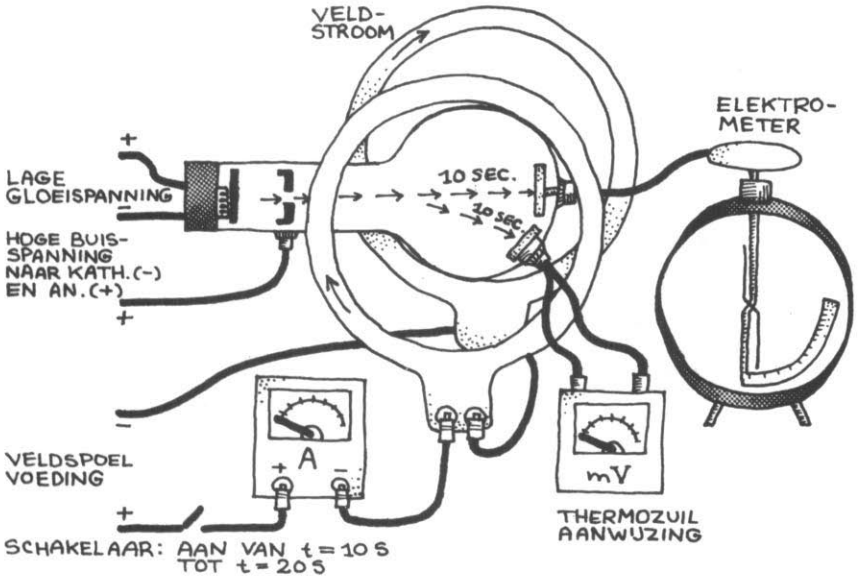
Verklaar dit verschijnsel met behulp van de eigenschappen van kathodestralen die in de vorige paragraaf genoemd zijn.

3. THOMSONS' ALTERNATIEF

De op blz. 36 weergegeven buis bevat een kathodestraalkanon. Recht voor het kanon bevindt zich een elektrode, verbonden met een *elektrometer* (dat is een elektroscoop waarvan de uitslag evenredig is met de lading). Met twee veldspoelen kun je een magnetisch veld opwekken, waardoor de kathodestraal op een *thermozuil* kan worden gericht. Deze thermozuil meet hoeveel warmte bij de bestraling wordt gevormd.

Meetmethode:

De kathodestraal werd 10 seconde op de elektrometer gericht, waarna de daarop



Thomson's alternatieve buis.

verzamelde lading werd afgelezen. Na 10 seconde werd het magnetisch veld ingeschakeld en de volgende 10 seconde viel de straal volledig op de thermozuil. Tijdens deze tweede 10 seconde werd de veldstroom afgelezen (waaruit de magnetische veldsterkte B volgt) en de straal r van de baan werd gemeten. Na de tweede 10 seconde kon men tenslotte aflezen hoeveel warmte was gevormd.

Aangenomen werd dat de kathodestraal in beide perioden van 10 seconde hetzelfde aantal N elektronen aanvoerde.
Meetresultaten:
- lading na 10 seconde: $Q = q \cdot N = 1{,}1 \cdot 10^{-2}$ C;
- warmte in 10 seconde: $E = 36$ J;
- magnetische veldsterkte: $B = 1{,}17 \cdot 10^{-3}$ T;
- straal van de cirkelbaan: $r = 0{,}20$ m.

a. Welke richting moet het magnetisch veld hebben?
b. Welke energie-omzetting zorgt voor de warmte op de thermozuil?
c. Druk de gevormde warmte E uit in N en in de massa m en de snelheid v van de elektronen.
d. Bepaal uit E en Q de waarde van $\frac{m \cdot v^2}{q}$ van elk elektron.
e. Stel de vergelijking voor de cirkelbaan in een magnetisch veld op, en vul de bekende grootheden in.
f. Uit de voorgaande twee vergelijkingen kun je de snelheid van de elektronen bepalen.
f. Toon aan dat dit experiment een waarde q/m van ongeveer $1{,}2 \cdot 10^{11}$ C/kg oplevert.

4. DE ZWAARTEKRACHT

Elektronen hebben behalve lading ook massa. Op een elektron werkt dus de zwaartekracht. Tot nu toe is in dit hoofdstuk niet op de zwaartekracht gelet.
De twee afbuigplaten P_1 en P_2 in een kathodestraalbuis zijn horizontaal geplaatst op een onderlinge afstand van 2,0 cm. De spanning op de afbuigplaten V_a wordt zó groot gemaakt, dat de werking van de zwaartekracht op de kathodestraal precies wordt opgeheven. In die situatie geldt: $F_z = F_e$.
a. Geef aan welke plaat positief en welke negatief moet zijn.
b. Bereken hoe groot V_a moet zijn om de zwaartekracht te compenseren.
c. Toon aan dat in de proeven van Schuster (paragraaf 3.7) en Thomson (paragraaf 3.8) de zwaartekracht verwaarloosbaar klein is.

5. DE MATERIE-TIJDBALK

In hoofdstuk 3 komen maar weinig nieuwe details over materie aan het licht. Wel wordt de basis gelegd voor een nieuwe categorie: 'het samengestelde atoom'.

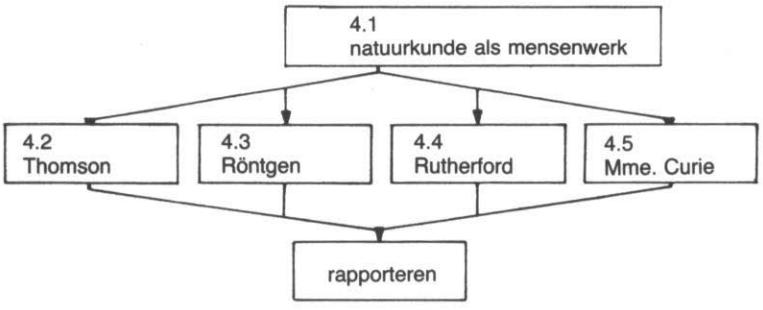
Selecteer uit dit hoofdstuk drie ontdekkingen, waardoor de samenhang tussen atomen en elektrische lading duidelijker werd.

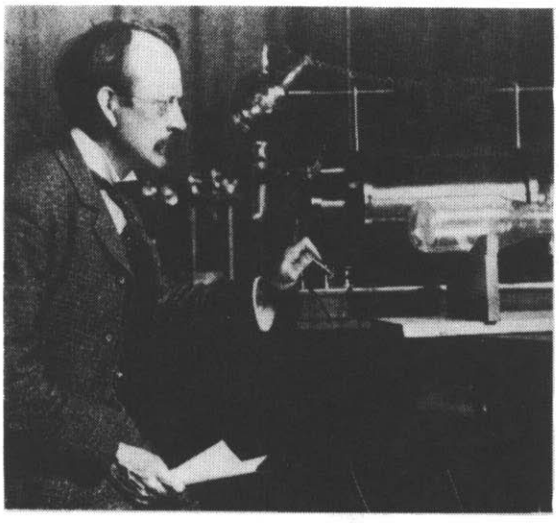
hoofdstuk 4

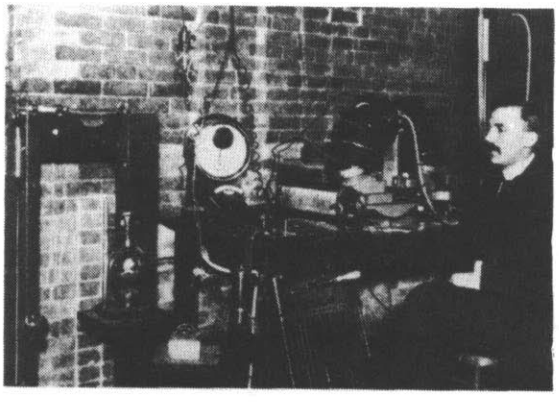
VIER NATUURKUNDIGEN ROND 1900

inhoud

		blz.
4.1	natuurkunde als mensenwerk	38
4.2	Thomson	39
4.3	Röntgen	41
4.4	Rutherford	44
4.5	Madame Curie	47







4.1 NATUURKUNDE ALS MENSENWERK

In het vorige hoofdstuk werden vrij veel namen genoemd van natuurkundige onderzoekers uit de negentiende eeuw. Hun namen zijn gekoppeld aan uitvindingen en ontdekkingen: de producten van het werk van deze mensen. Om tot deze producten te komen, moesten deze natuurkundigen heel wat wetenschappelijke arbeid verrichten. Dit hoofdstuk is gewijd aan de manier van werken van enkele onderzoekers.
De manier van werken is niet met een enkel woord te beschrijven. De mogelijkheden van een onderzoeker worden door een aantal factoren beïnvloed. Zo is de gebruikte apparatuur van belang. Nieuwe technische vindingen maken nieuwe stappen van de onderzoekers mogelijk. Verder werken sommigen alleen, anderen juist samen met veel medewerkers; sommigen in goed uitgeruste laboratoria, terwijl anderen zich moeten behelpen. Sommigen doen toevallige ontdekkingen, anderen vinden na jaren zwoegen datgene wat ze wilden vinden.
Tenslotte moet je bedenken dat het werk verricht werd door mensen, elk met een eigen levensloop, eigen geluk en persoonlijke tragedies, en eigen karakter. Ook al deze persoonlijke factoren waren van grote invloed op het welslagen van hun werk.

Deelnemers aan een conferentie van natuurkundigen in Brussel (1911).

Vier van deze mensen krijgen in dit hoofdstuk de aandacht. Ze hebben met elkaar gemeen dat hun werk van groot belang was voor de voortgang van de natuurkunde, en een belangrijke periode rond 1900 vormde. Het is niet toevallig dat aan allen de Nobelprijs werd toegekend. Bovendien vertoont hun werk grote verwantschap, omdat het elkaar aanvulde of omdat het ene werk pas verricht kon worden dankzij het werk van de ander.

Je kiest één van deze mensen – Thomson, Röntgen, Rutherford of Madame Curie – en bestudeert hun leven en werk aan de hand van de zes hier volgende vragen. Over elk van deze onderzoekers wordt gerapporteerd, waarna samen overeenkomsten en verschillen worden gesignaleerd.

1. VERGELIJKEN OP PUNTEN
Welke rol speelden de volgende punten in het leven van elk van de natuurkundigen:
a. de gebruikte apparatuur
b. het soort laboratorium
c. het toeval
d. intuïtie
e. persoonlijke tragedies
f. eigen karakter
g. samenwerking met anderen.

2. WAT IS EEN GOED NATUURKUNDIGE?
Welke persoonlijke karaktertrekken en manieren van werken zijn belangrijk om belangwekkend onderzoek te kunnen verrichten in de natuurkunde?

3. WEDERZIJDSE BEINVLOEDING
Maak een overzicht van de belangrijkste ontdekkingen van de vier onderzoekers. Laat zien op welke manieren deze ontdekkingen met elkaar te maken hebben.

4. DE EERSTE WERELDOORLOG
Oorlogen spelen niet alleen een rol in het leven van staatslieden en soldaten. Ook onderzoekers krijgen er op één of andere manier mee te maken. Welke invloed had de eerste wereldoorlog op leven en werk van elk van de natuurkundigen?

5. TRANSPIRATIE EN INSPIRATIE
Rutherford zei vaak: 'Natuurkundig onderzoek is voor 90% transpiratie en voor 10% inspiratie'. Welke voorbeelden die deze uitspraak ondersteunen, kun je vinden in het werk van de vier onderzoekers?

6. OP DE SCHOUDERS VAN VELEN
Een ander citaat van Rutherford: 'Het ligt niet in de aard der dingen dat een mens plotseling een geweldige ontdekking doet; de natuurwetenschappen gaan stap voor stap vooruit en iedere onderzoeker steunt op het werk van zijn voorgangers'.
Geef voorbeelden uit het werk van Thomson, Röntgen, Rutherford en Curie die deze opvatting ondersteunen of tegenspreken.

4.2 THOMSON

Het Cavendish Laboratorium te Cambridge.

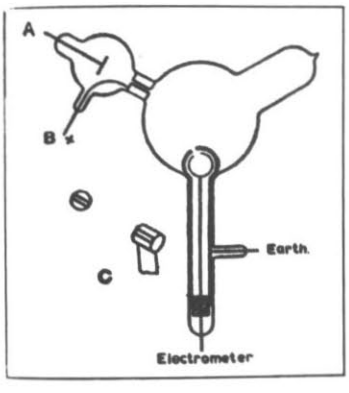
Joseph John Thomson werd geboren in Cheetham, een voorstad van Manchester op 18 december 1856. Zijn vader was van Schotse afkomst, en was van beroep boekhandelaar en uitgever. Op 14-jarige leeftijd ging Joseph naar de middelbare school in Manchester en in 1876 werd hij toegelaten tot het Trinity College in Cambridge. Vier jaar later rondde hij zijn studie af. In de periode daarop schreef hij een aantal theoretische artikelen onder supervisie van Lord Rayleigh, die in die tijd directeur was van het Cavendish Laboratorium in Cambridge. Rayleigh was vooral geïnteresseerd in licht en geluid. Hij deed metingen aan de dichtheid van gassen en was de ontdekker van het edelgas *argon* (*Nobelprijs* 1904). In het Cavendish Laboratorium begon Thomson met onderzoek naar *kathodestralen*.
Tegen zijn verwachting in, werd hij in 1894 voorgedragen als opvolger van Lord Rayleigh als directeur van het Cavendish Laboratorium. Wat er toen in Thomson omging, kunnen we hem beter zelf laten zeggen:
'Ik voelde me net een visser die per ongeluk met een licht tuig op een onwaarschijnlijke plaats zijn hengel uitwerpt en een veel te zware vis vangt om aan land te krijgen. Het leek me erg moeilijk om een uitzonderlijk man als Lord Rayleigh op te volgen'. Spoedig na het accepteren van zijn benoeming vernieuwde Thomson het laboratorium, introduceerde nieuwe onderwijsmethoden en startte een zeer succesvolle onderzoeksgroep. Uit zijn studenten kwamen hoogleraren voort aan 55 universiteiten.

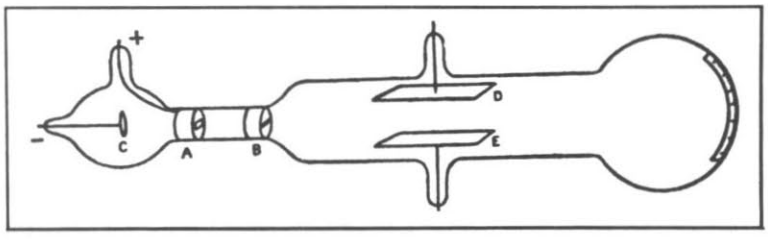
Thomson temidden van zijn medewerkers (1898). Staande in het midden (achter Thomson) Rutherford.

Rutherford schreef op 15-1-1896 aan zijn verloofde hoe op het nieuws van de ontdekking van de röntgenstralen werd gereageerd: 'Ik heb alle foto's die we hier hebben gemaakt, gezien. Een foto van een kikker is heel mooi. Je ziet de omtrek van de kikker en al zijn beenderen heel duidelijk. De Professor probeert natuurlijk de ware oorzaak en aard van de straling vast te stellen, en het grote doel is de theorie over materie te vinden vóór iemand anders dat doet, want bijna elke Professor in Europa is nu op het oorlogspad ...'

Zeven van zijn leerlingen kregen de Nobelprijs, onder wie Rutherford, Bohr, C.T.R. Wilson en zijn enige zoon George Paget Thomson (geboren in 1892).

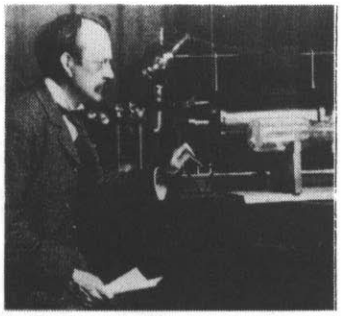
Thomson was al vroeg geïnteresseerd in kathodestraalexperimenten. De ontdekking van *röntgenstralen* (in 1895) leverde een nieuwe methode op om gassen te *ioniseren*, en maakte nieuw inzicht mogelijk in het gedrag van gasionen. Thomson begon in deze richting te werken (samen met Rutherford), en dat leidde tot zijn ontdekking van het *elektron*. Hiervoor gebruikte hij diverse buizen. In het vorige hoofdstuk heb je misschien met een moderne vorm van zijn buis gewerkt.





Twee tekeningen van buizen van Thomson.

Thomson was de eerste die afbuiging van kathodestralen in een elektrisch veld waarnam. Magnetische afbuiging was al eerder ontdekt. De reden waarom elektrische afbuiging pas later werd aangetoond, lag in de rol van het vacuüm. Zonder een goed vacuüm is het niet mogelijk een elektrisch veld van voldoende sterkte in stand te houden.
In augustus 1897 publiceerde Thomson een beroemd geworden artikel, waarin hij de volgende resultaten van zijn experimenten beschreef (zie hoofdstuk 3):
- kathodestralen bestaan uit negatief geladen deeltjes;
- deze deeltjes hebben een vaste verhouding tussen lading en massa: q/m = constant;
- de snelheid v van de deeltjes is te bepalen;
- de eigenschappen van de deeltjes zijn niet afhankelijk van de kathode, de anode of het gas.



Thomson bij een kathodestraalbuis.

De waarde van de verhouding q/m bleek $1{,}76 \cdot 10^{11}$ C/kg te zijn. Dat was zo'n 2000 maal groter dan de waarde die Faraday had gevonden voor het waterstof-ion. Thomson en zijn medewerkers zetten hun experimenten met elektrische en magnetische velden voort, en in 1899 kon hij een ruwe schatting maken van de lading van het elektron. Deze bleek in grootte niet veel af te wijken van de lading van het waterstof-ion. Daaruit kon men afleiden dat het elektron zo'n 2000 maal lichter is dan het H^+-ion. Duidelijk werd verder dat alle soorten materie elektronen bevatten. De precieze waarde van de lading van het elektron kon pas in 1911 worden bepaald door de Amerikaan Robert Millikan. Deze Millikan werd sterk gemotiveerd door Thomson's artikel van 1897. Hij zei daarover:
'Dit artikel maakte diepe indruk op me, en zette me op het spoor van het onderzoek dat mijn levenswerk werd'.
Met de ontdekking van het elektron werd duidelijk dat alle materie elektronen bevat, en de vraag rees hoe de elektronen deel uitmaakten van atomen.
Thomson meende in 1904 een antwoord op deze vraag gevonden te hebben. Hij stelde zich een atoom voor als een soort ronde 'pudding' van positieve materie, met daarin de elektronen als negatieve 'krenten'. Aan de hand van proeven met drijvende magneetjes ordende Thomson de 'krenten'. Tot 1911 was dit het meest populaire *atoommodel.*
In 1906 kreeg Thomson de *Nobelprijs.*

Thomson en Rutherford in het laboratorium (1935).

Tijdens de eerste wereldoorlog was Thomson voorzitter van een raad die de Engelse regering moest adviseren over het onderwijs in de natuurwetenschappen. Zijn rapport benadrukte niet alleen het belang van natuurwetenschappen voor defensie, industrie en handel. Het wees ook op de mogelijkheden om via het onderwijs in de natuurwetenschappen bijdragen te leveren aan oordeelsvorming en verbeeldingskracht. Verder toonde het rapport zorg over de achterstelling van meisjes op dit vlak.

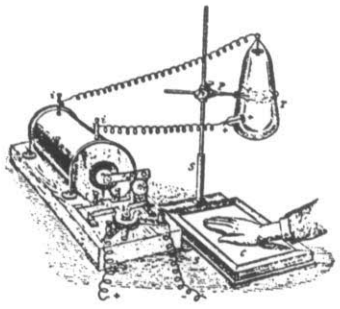
Thomson en Rutherford bij een cricketwedstrijd (1936).

In 1919 droeg Thomson het directeurschap van het Cavendish Laboratorium over aan Rutherford, nadat beide heren de afspraak hadden gemaakt dat de voorganger niet te veel invloed zou blijven uitoefenen op de gang van zaken in het laboratorium. Thomson hield een kleine experimenteerruimte op Trinity College.
'J.J.', zoals hij door zijn studenten werd genoemd, was bescheiden en mild en discussiëerde graag over veel onderwerpen. Hij had een geweldig geheugen, en kon met allerlei soorten mensen goed opschieten. Verder wist hij zijn studenten tot enthousiasme te inspireren.
Hij overleed op 30 augustus 1940 en werd begraven in de Londense Westminster Abbey, nabij de graven van Newton, Darwin, Kelvin en Rutherford.

4.3 RÖNTGEN

Wilhelm Conrad Röntgen.

Wilhelm Conrad Röntgen werd op 27 maart 1845 geboren in het Duitse plaatsje Lennep, als enig kind van een textielkoopman. Zijn moeder was Nederlandse en op 3-jarige leeftijd kwam hij te wonen in Apeldoorn. Een deel van zijn jeugd bracht hij in Utrecht door. In 1865 begon hij met zijn studie werktuigbouw in Zürich. Die studie verliep vlot, want in drie jaar was hij afgestudeerd waarna hij in één jaar zijn proefschrift voltooide.
Over de periode 1870-1895 valt niet veel bijzonders te melden. Röntgen werkte achtereenvolgens in Würzburg, Straatsburg, Giessen en wederom Würzburg. In deze periode schreef hij 48 artikelen over allerlei eigenschappen van kristallen, die weinig opzien baarden. Je zou hem in die zin een middelmatig fysicus kunnen noemen. Zijn manier van werken was wel uiterst fijn en nauwkeurig, en zeer grondig. Zijn instrumenten construeerde hij meestal zelf, en bij de theorieën die hij opstelde vermeed hij zoveel mogelijk het gebruik van wiskunde. Uiterlijk was hij een strenge, imposante man die zelden lachte en weinig contact met zijn medemensen zocht. In 1872 trouwde hij Bertha Ludwig. Het huwelijk bleef kinderloos.



Apparatuur van Röntgen.

Evenals vele collega's in die tijd hield Röntgen zich in 1895 bezig met het onderzoek naar kathodestralen. Hij had in het najaar net een nieuwe gasontladingsbuis aangeschaft om onderzoek te doen naar de werking en dus naar processen binnen de buis. Op 8 november 1895 was Röntgen bezig met zijn glazen, peervormige buis die hij had afgedekt met zwart karton om in de verduisterde kamer de doorschijning van het zwarte karton te testen. Plotseling zag hij, op ongeveer een meter van de buis een zwak licht dat glinsterde op een naburige bank. Tot zijn verrassing ontdekte Röntgen dat de bron van het mysterieuze licht gevormd werd door een klein scherm dat aan één zijde bedekt was met een laagje bariumplatinacyanide: het scherm *fluoresceerde.* Iets moest het scherm geraakt hebben, anders kon er geen fluorescentie optreden. Hij ging van alles proberen. Hij draaide het scherm om: nog steeds fluorescentie. Het scherm werd verder weggezet: weer hetzelfde effect. Voorwerpen werden tussen het scherm en de buis gezet: ze leken op het scherm doorschijnend te zijn. Het moest een 'nieuw soort straling' zijn die tot dan toe onbekend was. Röntgen noemde ze X-stralen, en in het Engelse taalgebied praat men nog steeds over 'X-rays' wanneer wij de term *röntgenstraling* gebruiken.

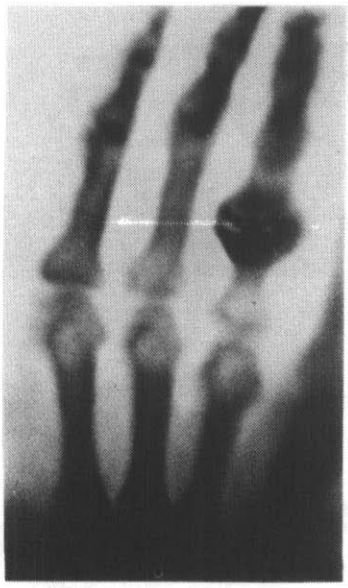
Zeven weken werkte Röntgen vrijwel onafgebroken alleen aan zijn ontdekking. Niemand vertelde hij wat. Zijn vrouw merkte dat hij druk bezig was, maar wist niet waarom en ze begon zich zorgen te maken. Achteraf zei hij hierover dat hij zó verbaasd was over zijn ontdekking, dat hij eerst zichzelf wilde overtuigen van het bestaan van de nieuwe stralen. In de genoemde zeven weken legde hij zijn resultaten ook op fotografische plaat vast.

Op 28 december leverde Röntgen zijn artikel in, dat begin januari 1896 werd gedrukt. In het sobere, beknopte artikel wordt niets onthuld van zijn eerste gedachten en twijfels tijdens de zeven weken van onderzoek. Het artikel heet 'Over een nieuw soort straling', en begint als volgt:

'Wanneer we de ontlading van een grote Ruhmkorffspoel door een Hittorf-, Lenard-, Crookes- of andere soortgelijke buis laten gaan en de buis afdekken met een vrij nauw passend omhulsel van dun zwart karton, nemen we in een volledig verduisterde kamer waar dat een papieren scherm bedekt met een laagje bariumplatinacyanide helder oplicht en even goed fluoresceert of de speciale kant nu wel of niet naar de buis is gericht'.

Het artikel behandelde verder een aantal andere eigenschappen van de nieuwe straling:

- de straling ontstaat in het gebied van de buis waar de kathodestralen op de wand van de glazen buis vallen;
- de stralen planten zich rechtlijnig voort, en worden niet afgebogen door elektrische of magnetische velden;
- ze zijn in staat een gas elektrisch geleidend te maken;
- fotografische platen zijn gevoelig voor de straling;
- voorwerpen blijken in wisselende mate doorzichtig te zijn voor deze straling.



Een foto die Röntgen maakte van de hand van zijn vrouw.

De aard van de straling begreep hij niet; deze werd pas 16 jaar later door anderen aangetoond.

Het nieuws over de ontdekking werd snel verspreid. Al op 4 januari 1896 waren enkele van Röntgens foto's te zien op een vergadering van natuurkundigen in Berlijn. Een dag later verschenen de eerste berichten in de Duitse pers en weer een dag later in de Engelse:

'Gemeld wordt dat prof. Routgen (!) uit Würzburg een licht heeft ontdekt dat bij het maken van foto's door hout, vlees en de meeste andere organische stoffen heen gaat. De professor is er in geslaagd metalen gewichten te fotograferen die zaten opgesloten in een houten kist, evenals een menselijke hand waarvan alleen de beenderen en niet het vlees te zien zijn.

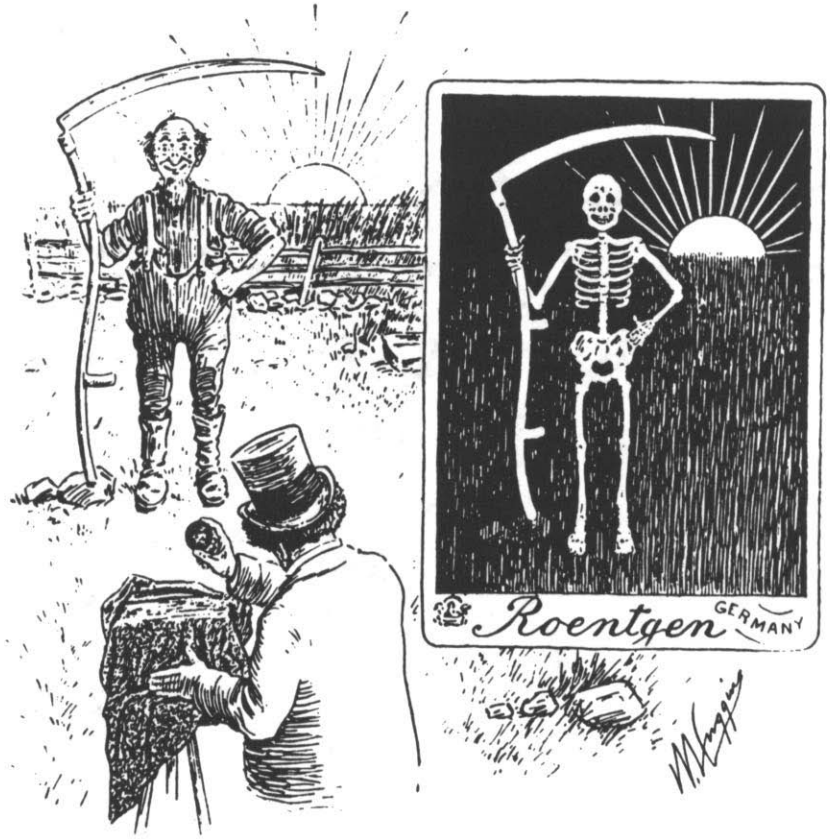
Volgens de Weense krant 'Presse' gaat het niet om een grap of bedrog. Het is een serieuze ontdekking door een serieuze Duitse professor'. (London Standard, 7-1-'96)

Over de hele wereld renden natuurkundigen naar hun laboratoria om het ook te proberen. En met succes. Dat kon ook omdat bijna overal gasontladingsbuizen beschikbaar

THE MARCH OF SCIENCE.

Cartoon uit Punch, 7 maart 1896.

waren. In de andere paragrafen van dit hoofdstuk komen de consequenties van dit onderzoek naar röntgenstraling aan bod.
Ook in Amerika was de belangstelling enorm. De 'Electrical World' van februari 1896 bericht:
'Edison lijdt aan een ernstige aanval van Röntgen-waanzin. De verslaggevers die zijn laboratorium belegeren wachtten niet tevergeefs gezien de vele sensationele berichten uit deze bron. Vorige week werkten Edison en zijn medewerkers 70 uren aan één stuk, waarbij een orgel werd bespeeld om de onderzoekers wakker te houden'.
De medische betekenis werd snel doorzien. Al in maart 1896 gebruikte een Weens ziekenhuis röntgenfotografie bij de diagnose voor chirurgische ingrepen. Er waren ook mensen die dachten hiermee dronkenschap en kettingroken te kunnen bestrijden: deze verslaafden konden immers met eigen ogen zien hoe hun lichaam van binnen naar de knoppen ging. In de kranten verschenen verder advertenties voor damesondergoed die bescherming boden tegen röntgenstraling.
Grappen uit die tijd:
– 'Ober, is dit een karbonade à la Röntgen?'
– 'Shah Kal-Y-Jula heeft zijn hele hofhouding laten doorlichten met röntgenstraling. Zelfs na een uur belichten werd bij geen van hen een ruggegraat gezien'.



THE NEW ROENTGEN PHOTOGRAPHY.
"LOOK PLEASANT, PLEASE."

Cartoon uit Life, 27 februari 1896.

We keren terug naar onze geleerde in Würzburg. Hij beperkte zich tot een demonstratie voor de keizer op 13 januari en een openbare lezing op 23 januari, waarbij hij onder andere een hand doorlichtte. In 1896 en 1897 schreef hij nog twee artikelen over zijn straling. Daarna keerde hij terug naar het onderzoeksgebied dat hij slechts tijdelijk had verlaten. Zijn volgende 7 artikelen raakten snel vergeten.
In 1901 ontving hij de allereerste *Nobelprijs* voor zijn ontdekking, maar hij zag af van de – later gebruikelijke – lezing. Het geld schonk hij aan de Universiteit van Würzburg.

In 1914 tekende hij het beruchte manifest van Duitse natuurwetenschappers, waarin ze hun solidariteit betuigden met het militaristische Duitsland. Daar kreeg hij later overigens spijt van. Als gevolg van de oorlog raakte hij al zijn spaargeld kwijt, zijn vrouw stierf in 1919 en in zijn laatste jaren was hij erg eenzaam. Hij stierf op 10 februari 1923 in München.

4.4 RUTHERFORD

Ernest Rutherford werd geboren op 13 augustus 1871 bij het plaatsje Nelson in Nieuw Zeeland. Zijn moeder was lerares en speelde veel piano. Vader was begonnen als boer, en richtte later een aantal fabrieken op. Het gezin telde 12 kinderen waarvan Ernest de vierde was. Op school blonk hij uit in de meeste vakken.
Op 18-jarige leeftijd kreeg hij een beurs voor de Universiteit van Nieuw Zeeland in Christchurch, waar hij afstudeerde in Latijn, Engels, Frans, Wiskunde, Mechanica en Schei-/Natuurkunde.

Rutherford op 21-jarige leeftijd.

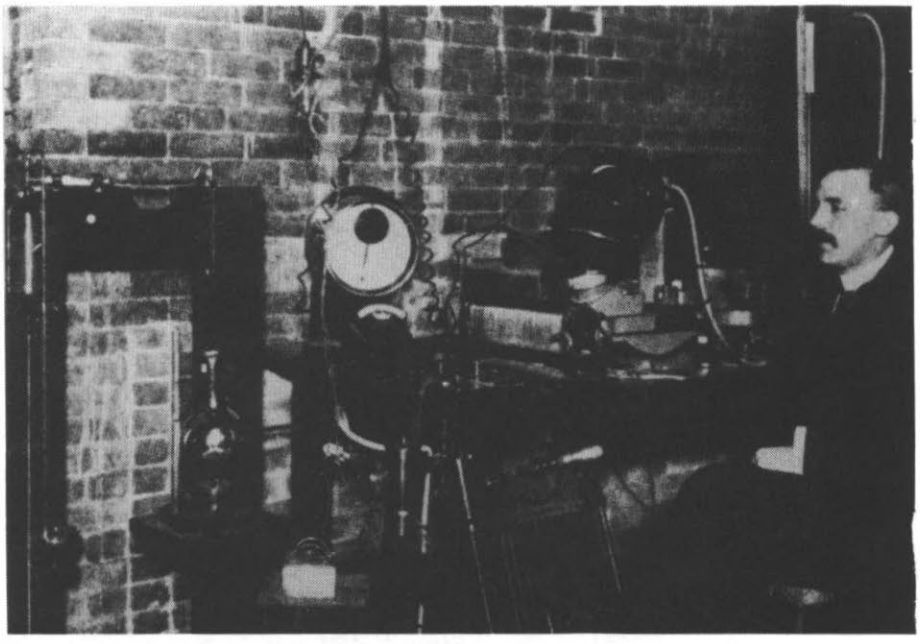
Rutherford's eerste laboratorium, Christchurch (Nieuw Zeeland).

In 1895 lukte het Rutherford een beurs te krijgen om zijn studie in Engeland voort te zetten. Met geleend geld voer hij er heen. In Cambridge schreef hij zich in bij Trinity College, waarvan het Cavendish Laboratorium een onderdeel was. Thomson had in die tijd net de leiding op zich genomen van dit laboratorium en Rutherford werd een van zijn eerste studenten.

Aanvankelijk zette Rutherford zijn Nieuwzeelandse experimenten met magnetisme en radiogolven voort. Na de ontdekking van de *röntgenstraling* werd hij door Thomson gevraagd mee te werken aan onderzoek naar *ionisaties*, veroorzaakt door deze straling. Toen vlak daarop Becquerel de *radioactiviteit* van uranium ontdekte, concentreerde Rutherford zich op de ionisatie-effecten van radioactieve straling. Hij toonde aan dat uranium twee soorten radioactieve straling uitzendt. De ene – sterk ioniserend en gemakkelijk waarneembaar – noemde hij α-straling, de andere – met een groter doordrin-

gingsvermogen – gaf hij de naam β-straling. De overeenkomst tussen kathodestralen en β-straling was snel duidelijk. De aard van α-straling bleef nog jaren een mysterie.

In augustus 1898 werd Rutherford benoemd tot hoogleraar in Montreal, Canada aan de McGill Universiteit. In de aanbevelingsbrief die Thomson bij deze gelegenheid schreef, stond het volgende:
'Ik heb nog nooit een student gehad met meer enthousiasme of meer bedrevenheid in origineel onderzoek als de heer Rutherford, en ik ben er zeker van dat als hij wordt uitverkoren, hij een uitgelezen onderzoeksgroep in Montreal zal opzetten. Elk instituut kan zich gelukkig prijzen met zo'n hoogleraar als de heer Rutherford'.
Na de nodige aarzelingen accepteerde Rutherford de benoeming, vooral omdat die hem de financiële middelen verschafte om te kunnen trouwen met de dochter van zijn hospita uit Christchurch. Verder zou hij het besluit ook niet hebben genomen als hij niet zo veel zelfvertrouwen had en niet zo avontuurlijk van aard was.
Snel verzamelde hij een groep medewerkers om zich heen om het onderzoek aan radioactiviteit voort te zetten. Onder hen bevond zich Otto Hahn, de latere ontdekker van *kernsplijting* (in 1938). In 1900 onderbrak hij het werk een paar maanden om in Nieuw Zeeland met Mary Newton te trouwen en haar mee te nemen naar Canada. Een jaar later werd hun enige kind Eileen geboren.



Rutherford in zijn Canadese laboratorium (1905).

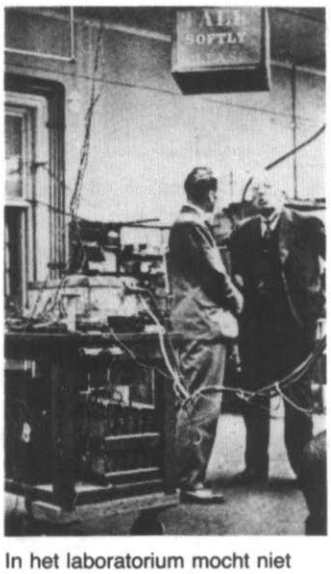
Tijdens zijn Canadese onderzoeksperiode deed Rutherford belangrijke ontdekkingen, alleen en in samenwerking met medewerkers van uiteenlopende leeftijd. Hij liet zien dat α-deeltjes waarschijnlijk heliumionen waren met een dubbelpositieve lading en met een snelheid van ongeveer 10% van de lichtsnelheid. Bovendien toonde hij aan (in 1903) dat het ene element in het andere overgaat door het uitzenden van radioactieve straling. Daarmee was het oude idee dat atomen onverwoestbaar zijn, omvergekegeld. Naast zijn onderzoek gaf Rutherford lezingen in tal van plaatsen in de Verenigde Staten.
Bij het doen van zijn onderzoek naar radioactieve straling in Canada maakte hij dankbaar gebruik van de resultaten van het werk van Pierre en Marie Curie in Parijs. Maar ook het competitie-element ontbrak daarbij niet, getuige een brief aan zijn moeder op 5 januari 1902:
'Ik ben nu druk bezig met artikelen te schrijven ter publicatie, en met het starten van nieuw onderzoek. Ik moet de vaart er in houden want er zijn altijd anderen op jacht. Om in de race te blijven moet ik mijn huidige resultaten zo snel mogelijk publiceren. De beste mededingers in de strijd zijn Becquerel en de Curies in Parijs, die heel veel

belangwekkend onderzoek hebben gedaan de laatste jaren op het gebied van radioactieve stoffen'.
Die wedijver verhinderde overigens niet de goede verstandhouding tussen Rutherford en de Curies. Zo kreeg hij voor zijn onderzoek wat radium van hen en bezocht hij hen in 1902 in Parijs. Overigens had Rutherford, naast zijn bewondering voor hun ontdekking van het *radium* en het *polonium* een minder hoge dunk van hun inzicht in de aard van radioactiviteit.

In 1907 keerde Rutherford terug naar Engeland, waar hij hoogleraar werd aan de Universiteit van Manchester. Het werk daar startte voortvarend om een aantal redenen. Het laboratorium was goed uitgerust en efficiënt georganiseerd. Hij trof een uitstekend medewerker (Geiger) en technicus (Kay). Bovendien slaagde Rutherford erin 350 mg radiumbromide te lenen uit Wenen.
De *Nobelprijs* voor scheikunde van 1908 werd aan Rutherford toegekend. Zijn toespraak bij gelegenheid van de uitreiking van die prijs ging over 'De chemische aard van de α-deeltjes afkomstig van radioactieve stoffen'. De titel gaf goed weer waar Rutherford's belangstelling in die tijd naar uitging. Zo slaagde hij erin definitief aan te tonen dat α-deeltjes heliumionen waren. Verder kon hij het aantal α-deeltjes bepalen, dat per seconde door een gram radium wordt uitgezonden. Dat vereiste uren kijken door een zwakke microscoop in het donker naar lichtflitsen die ontstaan als een α-deeltje een scherm van zinksulfide treft. Dat was heel vermoeiend werk, dat hij veelal met Geiger deed. Geen wonder dat die zocht naar andere telmethoden: de latere Geiger-teller.
In 1911 ontdekten medewerkers van Rutherford dat α-deeltjes, die op een zeer dun metaalplaatje werden geschoten, sterk konden worden afgebogen. Zó sterk dat ze soms weer terugkeerden. Met het atoommodel van Thomson was dit niet te verklaren. Rutherford vroeg zich af hoe het dan wél mogelijk was. Uit berekeningen over de grootte van de coulombkracht die in het spel was, maakte hij aannemelijk dat het verschijnsel wel te verklaren was als men zich een atoom voorstelde als een zeer kleine kern met positieve lading waaromheen zich de elektronen in cirkelbanen bewegen. Daarmee was een nieuw *atoommodel* geboren.
Rutherford zette zijn werk voort door radioactieve straling te bestuderen, samen met veel medewerkers.

Rutherford en Bohr. Rechts de vrouw van Bohr.

Ook Bohr werkte een paar maanden mee in 1912. Ruw werd het onderzoek onderbroken door de eerste wereldoorlog. Veel medewerkers en studenten trokken de wapenrok aan. Rutherford zelf besteedde veel tijd aan het onderzoek naar methoden om onderzeeboten op te sporen. Toch wist hij in 1919 nog belangwekkend werk te publiceren over het vrijkomen van protonen (waterstofkernen) bij botsingen van snelle α-deeltjes met stikstof-atomen.

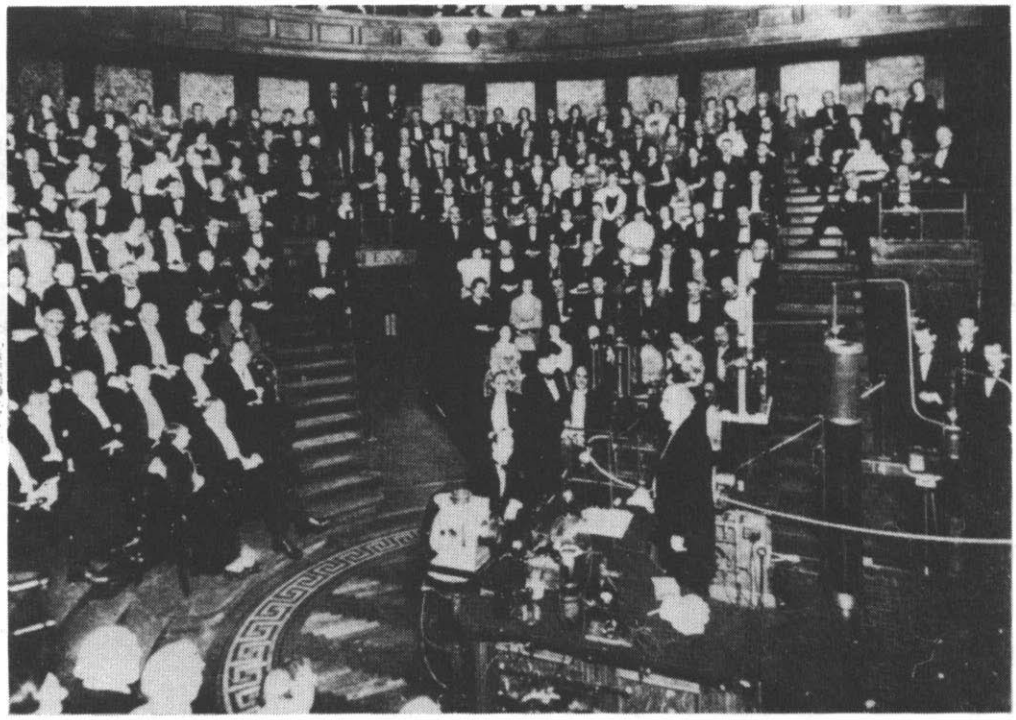


In het laboratorium mocht niet luid worden gesproken, om de experimenten niet te verstoren.

In 1919 volgde Rutherford Thomson op als directeur van het Cavendish Laboratorium in Cambridge, de plaats waar hij in Engeland was begonnen met onderzoek. Sindsdien deed hij geen eigen onderzoek meer, maar gaf bezielend leiding aan het laboratorium. Hij volgde alle onderzoekers nauwgezet en wist de veelal jonge medewerkers te inspireren. Zijn intuïtie was daarbij belangrijk. Al in 1920 opperde hij het bestaan van het *neutron*, dat 12 jaar later door één van zijn medewerkers (Chadwick) werd ontdekt. Als hem naar argumenten voor hypothesen werd gevraagd, antwoordde hij soms: 'Ik voel het aan mijn water'.
Rutherford was een sterk op het experiment gerichte natuurkundige. Hij stak vaak de draak met theorieën en theoretici. Wél wist hij theoretische onderzoeksresultaten in een voor hem bruikbare vorm te vertalen. College geven kon hij echter niet best: hij dwaalde snel af naar onderwerpen die hem werkelijk interesseerden. Een andere zwakheid was dat hij weinig pogingen ondernam om geld los te krijgen voor het onderzoek.

Als persoon was Rutherford een grote, wat lompe man met een flink buikje, grote en heldere blauwe ogen en een geweldige stem. Hij las veel romans naast zijn werk. In politiek opzicht was hij vrij conservatief en weinig actief. Wel werd hij in de jaren dertig voorzitter van een comité tot steun aan slachtoffers van het nazi-regime.

Rutherford in 1932.

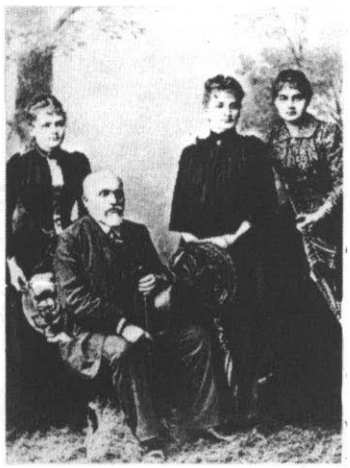


Rutherford geeft een lezing met demonstratie.

Rutherford na het ontbijt.

Zijn enige dochter overleed in 1930 als gevolg van complicaties bij de geboorte van haar vierde kind. Dat was een nog lang zichtbare schok voor Rutherford, die erg aan Eileen en haar kinderen was gehecht.
Op 19 oktober 1937 kwam een onverwacht eind aan het leven van Ernest Rutherford. Hij overleed tijdens een operatie na een val uit een boom bij het snoeien van takken, nog in de kracht van zijn leven. Hij werd begraven in de Westminster Abbey in Londen, dichtbij het graf van Newton.

4.5 MADAME CURIE



Vader Sklodowski en zijn dochters in 1890. Links op de foto Maria; in het midden Bronia.

Maria Sklodowska werd op 7 november 1867 geboren in Warschau. Haar vader was leraar wis- en natuurkunde aan een gymnasium. Moeder overleed aan tuberculose toen Maria 10 jaar oud was. De familie had een patriottische instelling, welke zich uitte in allerlei clandestiene culturele activiteiten in het door Rusland overheerste Polen. Zo werd op school de regel ontdoken dat alle lessen in het Russisch moesten worden gegeven. Maria had een oudere zus, Bronia, die net als zij ambitieus was. Beide zussen waren ook aan elkaar gehecht. Omdat de studiemogelijkheden in Polen beperkt waren, vertrok Bronia in 1886 naar Parijs om daar medicijnen te studeren. Vijf jaar lang werden haar studiekosten deels betaald uit het loon dat Maria als gouvernante in diverse gezinnen verdiende.
In 1891 kocht Maria zelf een 4^{e} klas kaartje naar Parijs, waar ze zich inschreef aan de Sorbonne om natuurkunde te gaan studeren. Een handicap was in het begin haar tekort aan kennis van wiskunde en Frans. De studie fascineerde haar. In een brief schreef zij: 'Het was of er een nieuwe wereld voor me openging, de wereld van de natuurwetenschappen, die ik eindelijk in alle vrijheid kon leren kennen'. Het fanatieke studeren ging wel ten koste van sociale contacten. Alleen met Bronia was (en bleef) er een goed contact. In vier jaar rondde Marie (zoals ze zich nu noemde) haar studie af.
In 1894 had ze Pierre Curie ontmoet.
Een jaar later besloot ze met hem te trouwen. Dat was een moeilijke beslissing, omdat het haar plannen in de weg stond om weer in Polen te gaan leven.

Piëzo-elektriciteit treedt op wanneer bepaalde kristallen onder druk worden gezet. Toepassingen vindt men in bijvoorbeeld gasaanstekers, microfoons en elektrische klokken

Pierre was geboren in 1859 en had in 1894 al heel wat belangwekkend fysisch onderzoek verricht naar *piëzo-elektriciteit* en naar magnetische eigenschappen van stoffen. Hun huwelijksreis bestond uit een fietstocht van drie weken door Frankrijk.
Pierre en Marie besloten samen onderzoek te gaan doen in de tijd die overbleef na het lesgeven aan Parijse scholen. Na de ontdekking van de *radioactiviteit* (van een uraniumzout) door Becquerel in 1896 wierpen zij zich op deze nieuwe straling. Deze was min of meer toevallig ontdekt bij onderzoek naar de net twee maanden eerder ontdekte *röntgenstraling*. Maar dat is een ander verhaal (zie kader).

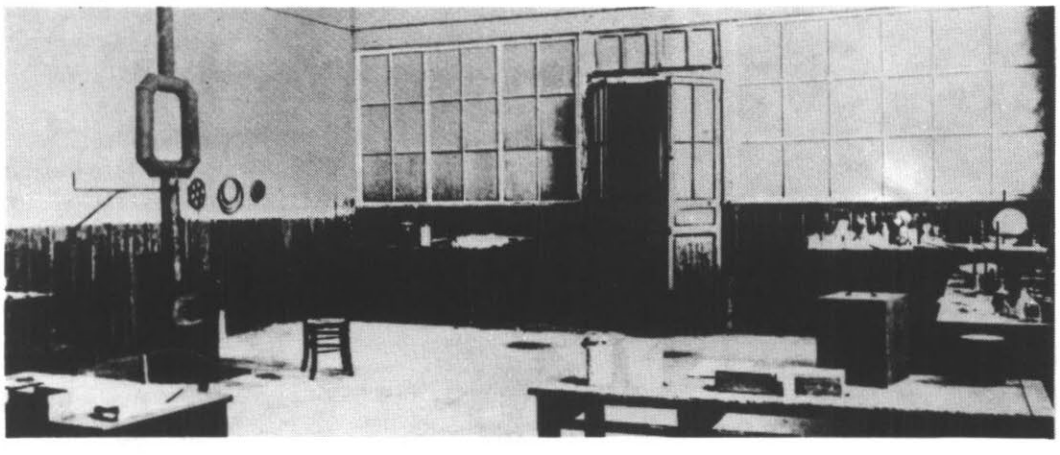
Becquerel.

Becquerel had zich, net als vele andere onderzoekers op de *röntgenstraling* gestort. Hij dacht dat zonnestraling misschien röntgenstraling kon opwekken in een uraniumzout. Inderdaad bleek in zonlicht geplaatst uraniumzout in staat een fotografische plaat te zwarten. Zijn theorie leek dus te kloppen. Tot er iets vreemds gebeurde. Becquerel schreef daarover:
'... van de voorgaande experimenten waren sommige gedaan op woensdag de 26 ste en donderdag de 27 ste februari (1896); en omdat op deze dagen de zon slechts af en toe scheen, hield ik mijn spullen allemaal gereed, maar opgeborgen in een donkere la, met de korreltjes uraniumzout nog steeds op hun plaats. Omdat de zon zich opnieuw enkele dagen niet liet zien, ontwikkelde ik op 1 maart de fotografische platen in de verwachting slechts erg zwakke afbeeldingen te vinden. Maar het tegendeel bleek waar te zijn, de silhouetten waren uitermate duidelijk zichtbaar. Onmiddellijk dacht ik dat het proces misschien ook in het donker zou kunnen doorgaan...'

Dit geheimzinnige proces, dat 'ook in het donker kon doorgaan', bleek de ontdekking van *radioactieve straling* in te houden.

Pierre en Marie Curie (1904).

Net als Becquerel begonnen de Curies met uranium als onderzoekobject. De omstandigheden waaronder ze moesten werken waren belabberd: er was geen laboratorium voor hen beschikbaar, en dus werkten ze in een schuur. Bij het onderzoeken van het uraniumerts *pikblende* vonden ze dat dit erts enkele malen sterker radioactief was dan uranium zelf. Ze veronderstelden dat dit erts één of meer andere elementen zou bevatten, die veel radioactiever waren dan uranium. Om dat te kunnen bewijzen moesten ze 100 kg pikblende, gekregen van de Oostenrijkse regering, chemisch ontleden. Dit zuiveringswerk maakte talloze handelingen nodig en vroeg dus veel geduld en uithoudingsvermogen. Het schuurtje werd voor dit werk te klein en ze konden een nabije loods gebruiken. Marie schreef hier later over:
'In deze loods met geteerde vloer, waarvan het dak lekte, waar het in de zomer heet was als in een broeikas en waar in de winter een ijzeren potkacheltje onvoldoende verwarming gaf, hebben we de beste en gelukkigste jaren van ons leven doorgebracht, hele dagen wijdend aan de arbeid'.



De loods van de Curies.

Ondanks deze primitieve omstandigheden slaagden ze erin het bestaan van twee nieuwe elementen aan te tonen: *polonium* en *radium.* Na isolatie van 0,1 gram radiumchloride, slaagde Marie er in 1902 in de atoommassa van radium te bepalen op 225,93. Als eersten gebruikten de Curies verder de term radioactiviteit. Van groot belang daarbij was, dat ze stelden dat radioactiviteit een eigenschap was van atomen, en dus niet van chemische verbindingen. In 1903 deelden Becquerel, Pierre en Marie Curie de *Nobelprijs* voor natuurkunde voor hun werk aan radioactiviteit.

De Curies hadden twee kinderen: Irene (geboren in 1897) en Eva (1904). Rond de geboorte van Eva werd Pierre benoemd tot hoogleraar aan de Parijse Faculteit der Natuurwetenschappen en Marie werd aangesteld als zijn assistente. Tot dan toe had ze al het onderzoek onbetaald gedaan. Op 19 april 1906 kwam Pierre door een verkeersongeluk om het leven. Het verdriet was groot. In haar dagboek schreef Marie:
'We hebben je in de kist gelegd op zaterdagmorgen, waarbij ik je hoofd ondersteunde. We kusten voor de laatste maal je koude gezicht. Toen een paar bloemen uit de tuin voor op de kist, en de kleine foto van me die je 'de goede kleine student' noemde en waar je van hield. Die foto moet met je mee het graf in, de foto van haar die je aanbood het leven mee te delen, al had je haar pas een paar maal gezien. Vaak zei je me dat dit de enige gelegenheid was in je leven waarbij je zonder aarzelingen handelde, met de volle overtuiging dat het goed was wat je deed'.
Na Pierre's dood werd Marie benoemd als zijn opvolger, de eerste vrouw die aan de Sorbonne doceerde. In de periode daarna wijdde ze al haar tijd aan het doen van verder onderzoek en aan de opvoeding van haar dochters.

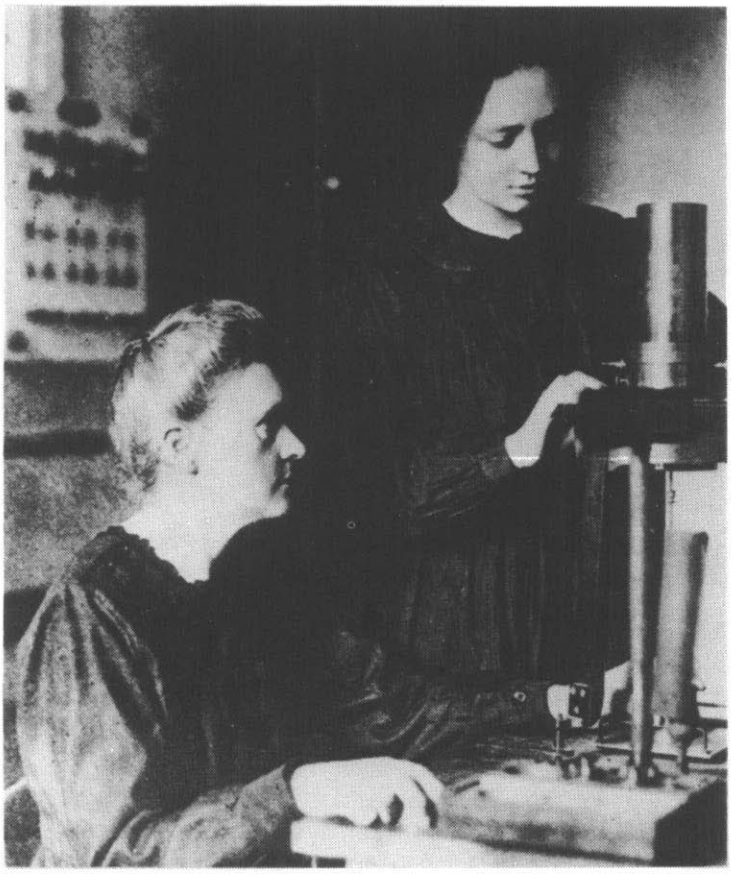
Marie Curie en haar dochterjes (1908).

In 1910 publiceerde Marie een twee-delig werk over radioactiviteit, waarin ze in bijna 1000 bladzijden de voortgang op dit gebied beschreef sinds 1897. In het gezaghebbende tijdschrift (ook nu nog) 'Nature' schreef Rutherford een lovende recensie. Maar in een brief aan een vriend zwakte hij die lof wat af:
'Ze zijn erg zwaar en erg lang, maar zij heeft een heleboel nuttige informatie bij elkaar gebracht. Ze maakt echter de fout al het werk op te nemen zonder het relatieve belang kritisch te bediscussiëren... Het is erg amusant te lezen hoe ze de Franse natuurwetenschappers ophemelt, vooral het werk van haar man en haarzelf... De arme vrouw heeft verschrikkelijk hard gewerkt, en voorlopig besparen beide delen de onderzoeker het zelf duiken in de literatuur; een besparing die niet in alle opzichten voordelig is'.
Overigens, hoe kritisch hij ook stond tegenover haar werk, Rutherford bleef haar sympathiek vinden. Op congressen werkte hij goed met haar samen, in tegenstelling tot anderen die veel moeite hadden met de teruggetrokken en eigenzinnige vrouw. Zo waardeerde niet iedereen het dat ze in 1911 een tweede Nobelprijs kreeg (voor scheikunde). En op het congres in Brussel waarop een radioactieve eenheid moest worden vastgesteld, maakte ze zich weinig geliefd door keihard vast te houden aan háár definitie van de eenheid *curie*: 'de hoeveelheid straling die een gram radium uitzendt'. Weer anderen vonden het nodig om in november 1911 in de Franse pers een serie lasterverhalen te schrijven over haar vriendschap met de fysicus Paul Langevin. Deze lastercampagne leidde een diepe depressie in, waar ze slechts met veel moeite van herstelde.

Marie Curie in 1912.

Door haar Nobelprijs, en met name haar ontdekking van het radium, was Marie bij het begin van de eerste wereldoorlog wereldberoemd. Leuk vond ze dat niet. Ze zei hierover:
'Als ze het tegen me hebben over het 'prachtige werk dat ik gedaan heb', krijg ik het gevoel of ik al dood ben. Soms geloof ik dat ze zich weinig bekommeren om de diensten die ik hen nog zou kunnen bewijzen en dat ze zich beter op hun gemak zouden voelen als ik helemaal verdween, zodat ze me ongestoord konden prijzen'.
Tijdens de oorlog was Marie hoofd van de radiologische dienst van het Franse Rode Kruis. In die functie rustte ze 200 wagens uit met röntgenapparatuur voor gebruik aan het oorlogsfront. Meer dan een miljoen gewonde soldaten werden met deze apparatuur doorgelicht. Haar dochter Irene was één van haar naaste assistenten bij dit werk. In 1920 schreef ze een boek over haar ervaringen.

Na de oorlog werd een oude wens eindelijk vervuld. Er kwam een instituut voor radioactiviteit dat uit twee afdelingen bestond. De ene hield zich bezig met fysisch en chemisch onderzoek, de andere afdeling wijdde zich aan medische en biologische toepassingen van straling. Het instituut kwam te staan in de Rue Pierre Curie, en Marie kreeg de leiding over de eerstgenoemde afdeling. Voor haar eigen wetenschappelijk werk kwam het laboratorium echter te laat. Haar gezondheid liet steeds meer te wensen over. De oorzaak was gelegen in haar eigen werk, maar dat werd pas later door haar beseft.



Madame Curie met Irene in haar laboratorium (1923).

Madame Curie met Millikan op een congres in Rome (1931).

In de twintiger jaren reisde ze veel, onder andere om 1 gram zuiver radium aan te nemen als gift van Amerikaanse vrouwen. Ze zette zich in voor het gebruik van radioactieve straling voor medische toepassingen, en droeg bij aan het vaststellen van *veiligheidsnormen* voor stralingswerkers.

Haar gezondheid verslechterde. Ze leed aan de effecten van langdurige blootstelling aan radioactieve straling. Geen wonder als men bedenkt dat haar prakticumboeken later ernstig radioactief besmet bleken, terwijl haar kookboeken 50 jaar na gebruik nog radioactief waren. In de laatste maanden van haar leven maakte ze nog de ontdekking van kunstmatige radioactiviteit mee door haar dochter Irene en haar schoonzoon Frédéric Joliot (Nobelprijs chemie 1935). Op 4 juli 1934 overleed ze in een sanatorium te Sancellemoz in de Franse Alpen.

hoofdstuk 5

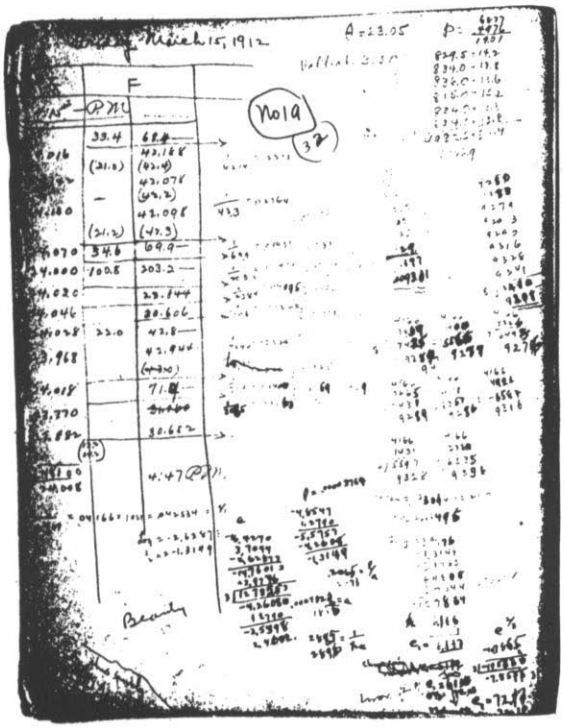
VAN ELEKTRON TOT NEUTRON

inhoud blz.

5.1 het model van Thomson 52
5.2 het model van Rutherford 52
5.3 de lading van het elektron 55
5.4 atoomkernen ontleden 57

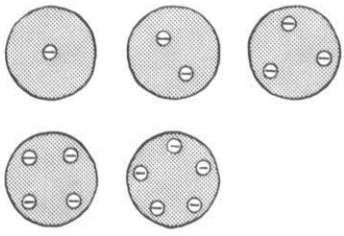
van elektron tot neutron

De ontdekking van het *elektron* leidde tot vragen over de samenstelling van het atoom. In dit hoofdstuk maak je kennis met de eerste *atoommodellen* van respectievelijk Thomson en Rutherford.
Vervolgens zul je zien hoe Millikan de lading van een elektron bepaalde.
Tenslotte bleek bij proeven dat kernen van atomen zijn samengesteld uit twee soorten deeltjes: *protonen* en *neutronen.*



De deelnemers aan een conferentie van natuurkundigen in 1933.

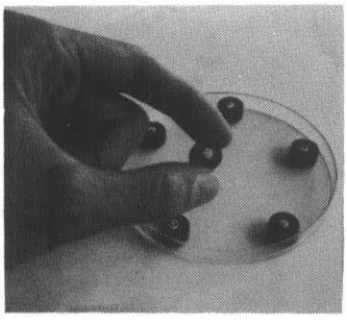
5.1 HET MODEL VAN THOMSON



Het atoommodel van Thomson.

Tot 1897 was het onderzoek naar materie vooral gericht op het inventariseren van alle atoomsoorten en hun eigenschappen. Tevens werd gezocht naar een samenhang tussen atomen en elektrische lading. De ontdekking van het elektron maakte het bestaan van deeltjes die kleiner zijn dan het kleinste atoom steeds aannemelijker.
Een belangrijke veronderstelling van veel wetenschappers was en is dat materie uiteindelijk systematisch van opbouw is. Vermoedelijk is er een duidelijke *orde.* Vermoedelijk bestaan alle verschillende atomen uit een beperkt aantal *bouwstenen.* Het elektron zou één van die bouwstenen kunnen zijn.
Een atoom moet echter ook positieve lading bevatten, omdat een volledig atoom elektrisch neutraal is. Een nieuw beeld van het atoom moest dus in ieder geval antwoord geven op vragen als:
- hoeveel elektronen zitten er in elk atoom;
- hoe zijn de negatieve elektronen en de positieve materie verdeeld over elk atoom?

Daarnaast zocht men nog naar de bepaling van de lading of de massa van een elektron.



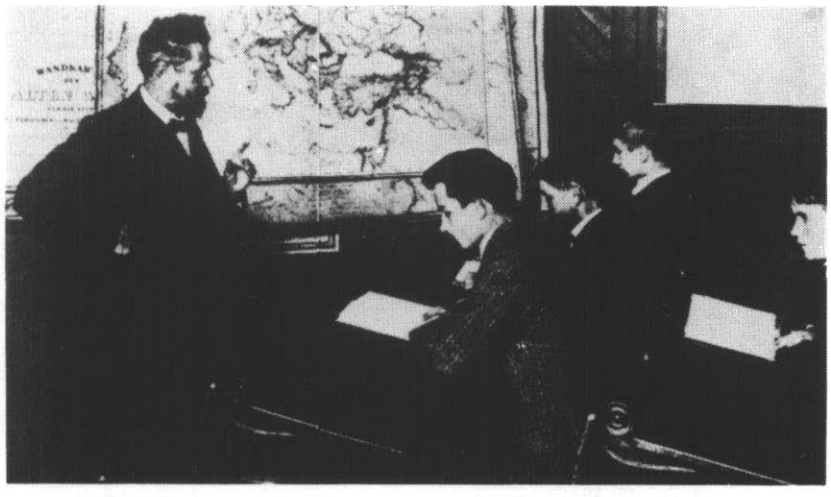
Een modelproef waaruit de positie van de elkaar afstotende krenten kan worden afgeleid.

Het was opnieuw J.J. Thomson die in 1904 een *atoommodel* formuleerde. Hij stelde zich een atoom voor als een soort ronde *'pudding'* van positieve materie, met daarin de elektronen als negatieve *'krenten'.* Dit eerste gedachtenbeeld was, ondanks zijn gebreken, een goed uitgangspunt voor verder onderzoek.

1. THOMSON-MODEL
Je hebt een zestal kleine ronde magneetjes nodig en een petrischaaltje (rond met vlakke bodem). Leg achtereenvolgens 1, 2, 3 enz. magneetjes in het schaaltje, zó dat ze elkaar afstoten. In het begin zullen de magneetjes zich regelmatig over de omtrek verspreiden.

a. Onderzoek vanaf welk aantal het mogelijk is een magneetje blijvend in het midden te plaatsen.
b. Als je de magneetjes als elektronen beschouwt, zie je dan overeenkomsten met Thomson's model?

Dit model beleefde een korte bloeiperiode, die eindigde in 1911. Het was populair, al bleef het met name moeilijk om de verdeling van de 'krenten' nauwkeurig te beschrijven. Ook bleef de koppeling met de chemische eigenschappen en de regelmaat van het periodiek systeem problematisch.



2. PROEFWERK UIT 1910
a. Waar bestaat een atoom uit?
b. In welk opzicht verschillen atomen van elkaar?
c. Kan het atoom van een element in dat van een ander element overgaan? Beargumenteer je antwoord.

5.2 HET MODEL VAN RUTHERFORD

Een atoom is te klein om direct, bijvoorbeeld met een microscoop, waar te nemen. Hoe kom je dan meer over de bouw van het atoom te weten?
De oplossing is: doe er iets mee! Voer experimenten uit, en kijk hoe de atomen reage-

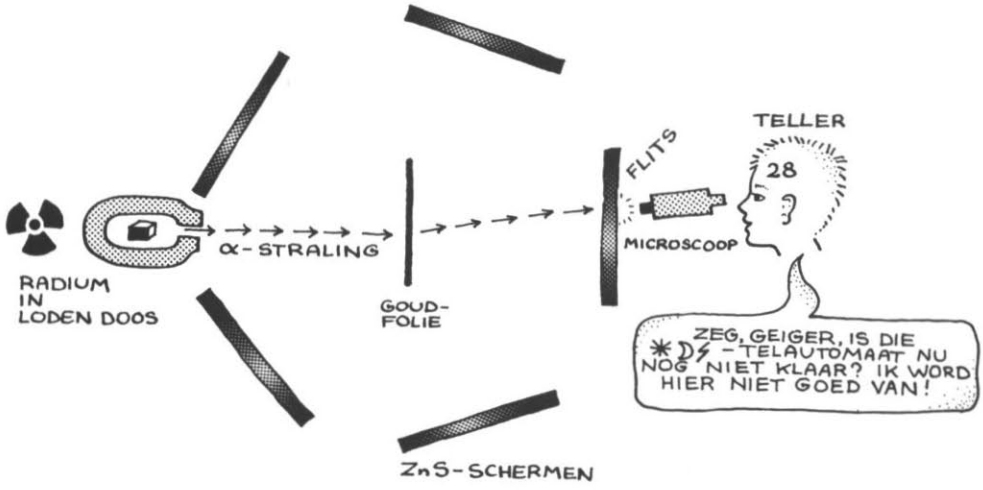
ren. Je zult dan nieuwe verschijnselen waarnemen. Dan moet je je afvragen: zijn die verschijnselen voorstelbaar met behulp van het bestaande atoommodel? Een model dat niets verklaart is vrij zinloos. Dan moet je een beter model bedenken. Misschien denk je: 'Het zal mij een zorg zijn'. Voor wetenschappers is dat echt een zorg.

Aan het eind van de negentiende eeuw werden, behalve het elektron, ook *röntgenstralen* en *radioactiviteit* ontdekt. Vooral radioactieve straling bleek op den duur een vruchtbaar hulpmiddel bij het onderzoek naar de samenstelling van het atoom.
Rutherford was sterk geïnteresseerd in de studie van radioactieve straling, in het bijzonder van zogenaamde α-straling. Van α-straling was al bekend dat ze bestaat uit kleine, vrij zware deeltjes, die positief geladen zijn. Deze deeltjes worden met grote energie door de radioactieve stof uitgezonden. De grote energie en de kleine afmetingen van deze deeltjes maakte ze bijzonder geschikt voor bestudering in *verstrooiings- of botsings-experimenten.*

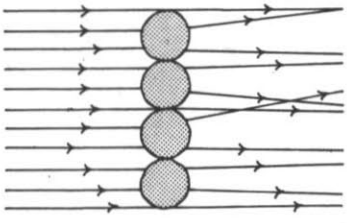
Dit soort verstrooiings-experimenten is verschrikkelijk belangrijk gebleken. Veel van de kennis die we hebben over atoombouw is afkomstig uit zulke experimenten. Naast α-deeltjes worden ook elektronenbundels gebruikt. Bovendien wordt ook röntgenstraling verstrooid.

In een verstrooiingsexperiment wordt een smalle, evenwijdige bundel 'projectieldeeltjes' geschoten op een doel: meestal een heel dun *trefplaatje*. Het trefplaatje bestaat uit het materiaal dat je wilt bestuderen. Als de bundel doel treft, worden de projectieldeeltjes in allerlei richtingen afgebogen. Dat heet *verstrooiing*.
Nauwkeurige bestudering van de richting en energie van de verstrooide deeltjes geeft informatie over de eigenschappen van het trefplaatje.

Geiger en Marsden
In Manchester schoten Geiger en Marsden in 1911 α-deeltjes door goudfolie. De α-bron bevond zich in een loden houder met een gerichte uitgang. De straal viel loodrecht op het folie. In een cirkel eromheen stonden zinksulfide schermen. Zinksulfide licht op als het wordt getroffen door een α-deeltje. Dit korte oplichten kon door een microscoop worden waargenomen.



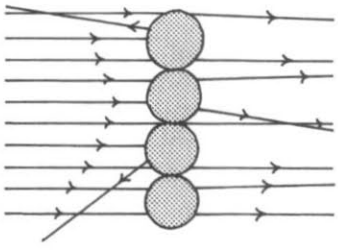
Opstelling van het experiment van Geiger en Marsden.


De verwachte resultaten aan de hand van Thomson's atoommodel.

Rutherford, in die tijd directeur van het laboratorium in Manchester, verwachtte dat het verstrooiingseffect gering zou zijn. Deze verwachting was gebaseerd op het 'puddingmodel' van Thomson. Als atomen zó zijn opgebouwd, zullen zware, snelle α-deeltjes niet sterk worden afgebogen.

1.
Ga na dat dit een redelijke verwachting was. Stel je bijvoorbeeld voor, dat je met metalen kogeltjes schiet op een pudding met krenten. Wat gebeurt er dan met de kogeltjes en waarom?

Het resultaat was onverwacht. Ondanks dat het folie toch wel een honderd atoomlagen dik moest zijn, gingen bijna evenveel deeltjes rechtdoor als zonder folie. Een klein deel



De werkelijkheid volgens de experimenten.

Rutherford zei later over dit resultaat: 'Dit was het meest ongelooflijke dat me ooit is overkomen. Het was haast net zo ongelooflijk als wanneer je een 50 cm granaat op een vloeipapiertje schiet en dat die granaat terugkaatst en jezelf treft'.

werd over een kleine hoek afgebogen. Maar het bizarre was:
1 op de 8000 deeltjes kaatste weg onder hoeken van meer dan 90°, zelfs tot 180° toe.
Hoe kon dat?

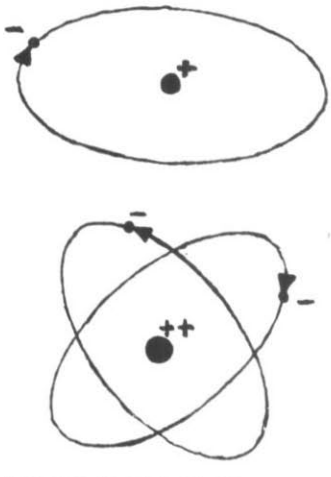
een nieuw model

Het terugkaatsen was niet te verklaren als het atoom bestaat uit een 'zachte positieve brij' met zeer lichte negatieve krenten.
Rutherford stelde een nieuw atoommodel voor. In het atoom moet zich een klein centrum bevinden, dat positief geladen is en waarin zich bijna alle massa bevindt. Dit centrum wordt de *atoomkern* genoemd. Op ruime afstand cirkelen de veel lichtere elektronen om de kern. De positieve lading van de kern is gelijk aan de totale negatieve lading van alle elektronen die deel uitmaken van het atoom.
Dit is het *atoommodel van Rutherford*.

Met dit beeld in gedachten bekijken we nog eens de verstrooiingsproef.
Een atoomkern en een α-deeltje zijn beide positief geladen. Zij zullen een *afstotende elektrische kracht* op elkaar uitoefenen. De grootte van deze kracht wordt gegeven door:

$$F_{\alpha,\,\text{kern}} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{q_\alpha \cdot q_{\text{kern}}}{r^2}$$

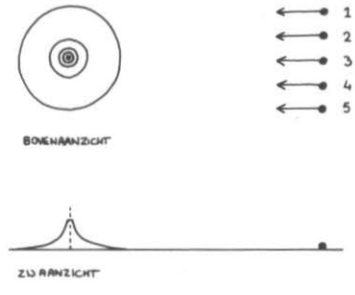
Daarin is r de afstand van het α-deeltje tot de kern.



Het atoommodel volgens Rutherford.

2. MODELPROEF VERSTROOIING

De banen van α-deeltjes in de buurt van een kern zijn na te bootsen met het model hieronder.



De verticale as van de kegel stelt de kern voor. De α-deeltjes worden vervangen door ronde kogeltjes die in de richting van de kegel worden gerold. De steilheid van de kegel zorgt voor een kracht op het kogeltje. Die kracht is steeds van de kegelas af gericht, en ongeveer evenredig met $1/r^2$.

a. Rol een kogeltje achtereenvolgens vanaf een aantal verschillende punten (1 tot en met 5 in de tekening) steeds in dezelfde richting op de kegel af. Eén baan gaat recht naar het centrum. De andere gaan er meer of minder naast.
Schets in een bovenaanzicht zo goed mogelijk de gevolgde baan vanuit elk punt. PAS OP: het kogeltje mag niet vrij komen van het tafel- of kegeloppervlak. Overigens veroorzaakt wrijving afwijkingen ten opzichte van de banen van α-deeltjes.

b. Zelfs in metaalfolie dat honderd atoomlagen dik is, worden maar erg weinig α-deeltjes afgebogen. In het model zouden we honderd rijen kegels moeten opstellen. Toch zouden veel van de afgeschoten kogeltjes ongehinderd rechtuit moeten gaan.
Als de kegels een straal van 10 cm hebben, hoe ver zou je ze dan van elkaar af moeten plaatsen opdat slechts één op de 8000 kogeltjes meer dan 90° van richting verandert?

3.
Voor een α-deeltje en een goudkern geldt: $F_{\alpha,\,\text{Au}} = 3{,}6 \cdot 10^{-6}$ N als $r = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ m.

a. Bereken de onderlinge kracht voor $r = 0{,}5 \cdot 10^{-10}$ m, $r = 1{,}5 \cdot 10^{-10}$ m en $r = 2{,}0 \cdot 10^{-10}$ m.

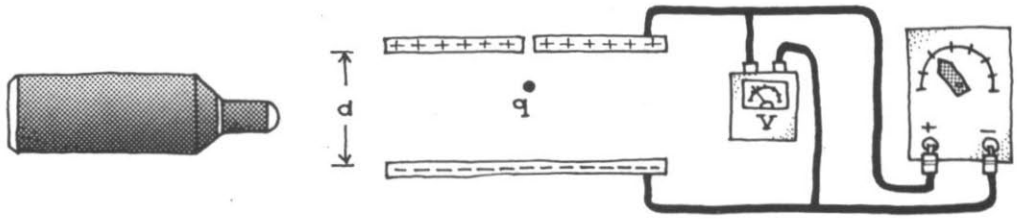
b. Teken een diagram dat het verloop van $F_{\alpha,\,\text{Au}}$ als functie van r weergeeft.

c. Welk effect heeft deze afstotende kracht op een α-deeltje dat recht op de goudkern afvliegt?
Beschrijf zo goed mogelijk wat er gebeurt met de snelheid van dat α-deeltje.

Volgens Rutherford's atoommodel draaien elektronen in cirkels om de kern. Zowel door scheikundigen als door natuurkundigen is het model wat betreft de elektronenbanen verfijnd. In het thema 'Lichtbronnen' komt zo'n verfijning aan de orde.

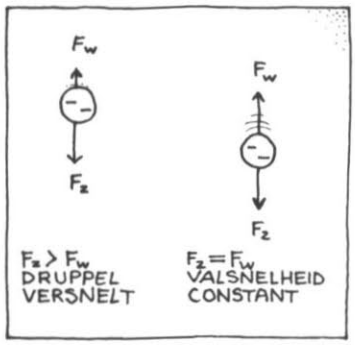
5.3 DE LADING VAN HET ELEKTRON

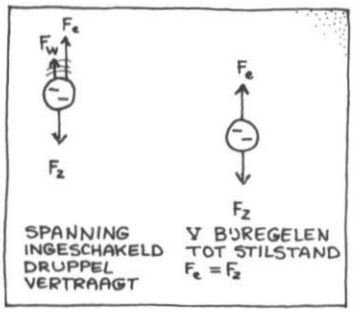
Robert A. Millikan was niet de enige die zocht naar de lading van het elektron. Wel vond Millikan in 1909 een erg geschikte methode, en in 1910 publiceerde hij zijn gegevens. Zijn experiment leent zich niet zo goed voor uitvoering in de klas. We zullen in deze paragraaf zijn methode beschrijven en zijn uitwerking volgen.



Schematische weergave van Millikan's experiment.

Hierboven zie je een schema van Millikan's opstelling. Twee vlakke metalen platen zijn horizontaal boven elkaar opgesteld op een afstand *d*. Door een klein gaatje in de bovenste plaat kun je heel kleine oliedruppeltjes in de ruimte tussen de platen sproeien. Door de wrijving bij het sproeien krijgen sommige druppeltjes een elektrische lading. Millikan zocht met zijn proef bevestiging van de volgende *hypothese:*
'De lading van deze druppeltjes wordt veroorzaakt door een teveel of tekort aan elektronen. De ladingen van die druppeltjes zijn steeds veelvouden van de lading van het elektron'.





de proef van Millikan

Situatie 1: *de platen zijn ongeladen.*
Als motregen zakken de minuscule druppeltjes naar beneden. Ze worden van opzij belicht en met een microscoop gevolgd om de valsnelheid te meten. Na enkele ogenblikken is de valsnelheid van de druppeltjes constant. De luchtweerstand is dan even groot als de zwaartekracht. Uit de constante valsnelheid (1 à 3 cm per minuut) is de massa van het druppeltje af te leiden.

Situatie 2: *spanning op de platen.*
De bovenste plaat wordt positief gemaakt. Op het geladen druppeltje gaat een elektrische kracht werken:

$$F_e = \frac{q \cdot V}{d}$$

Door de spanning V aan te passen, kun je het druppeltje tot stilstand brengen (als het negatief geladen is). Voor een druppeltje dat stilstaat, geldt dat de zwaartekracht gelijk is aan de elektrische kracht:

$F_z = F_e$.

Situatie 3: *lading veranderen.*
Hiervoor wordt α-straling gebruikt. Na het veranderen van de lading wordt de valsnelheid gecontroleerd en het druppeltje opnieuw tot stilstand gebracht; enz.

1.

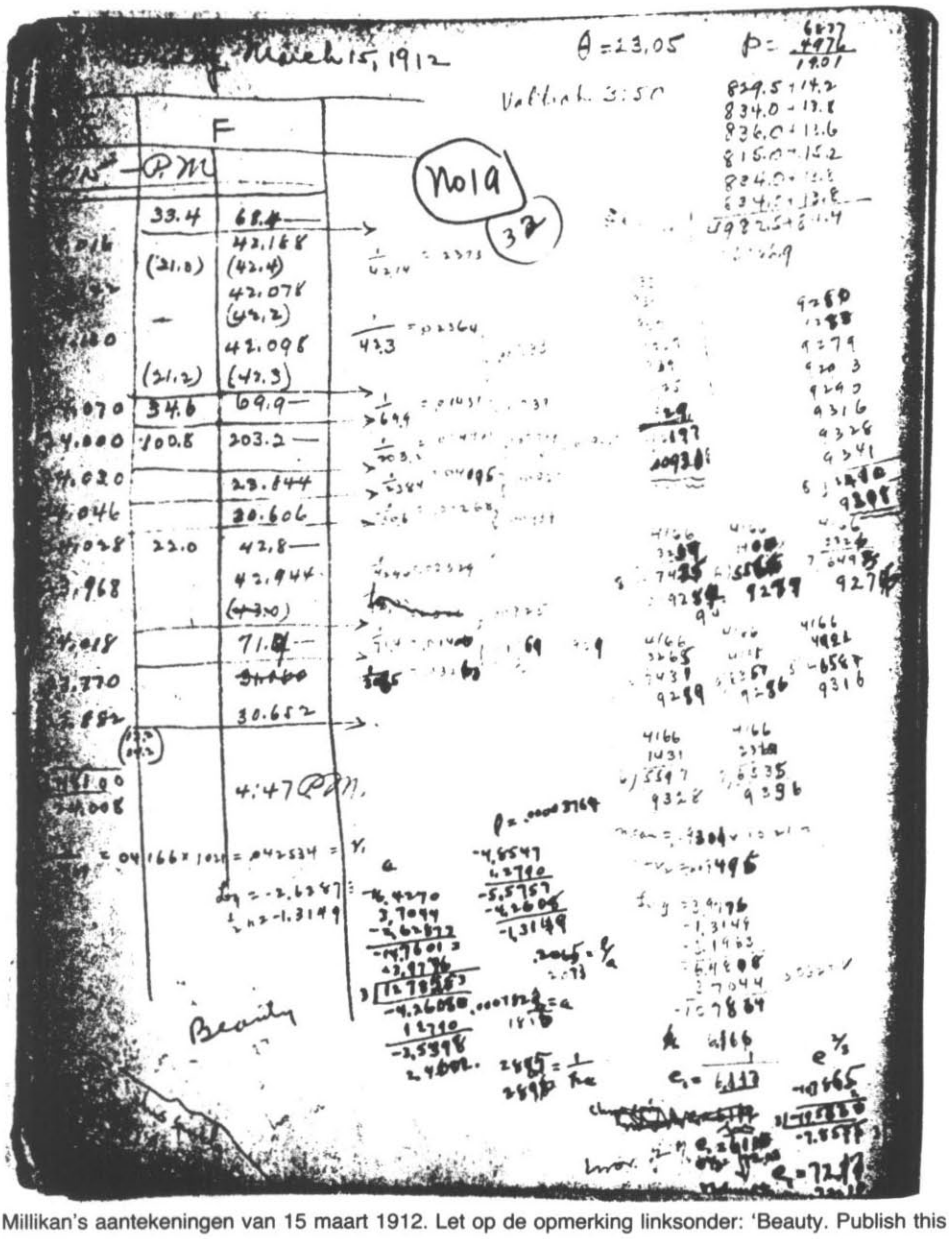
a. Voor een stilstaand druppeltje is de zwaartekracht even groot als de elektrische kracht. Toon aan dat aan het eind van situatie 2 alleen de lading van het druppeltje onbekend is en berekend kan worden.

b. Bereken q als $V_{stop} = 1{,}54 \cdot 10^3$ V, $d = 16{,}0$ mm, $m = 9{,}42 \cdot 10^{-12}$ g en $g = 9{,}81$ m/s^2.

De lading van het elektron is niet in één keer te vinden. Het overschot aan elektronen op een druppeltje kan 2 of 5 of zelfs 50 of 500 bedragen. De gemeten lading q zal steeds een andere zijn, nog afgezien van meetfouten.

DE SLAG OM HET ELEKTRON
Al in de negentiende eeuw bleken Engelstalige onderzoekers meer dan Duitstalige fysici geneigd te denken in atomen en in deeltjes met lading. Heinrich Hertz, Philip von Lenard, Ernst Mach en Felix Ehrenhaft zijn duidelijke voorbeelden van de Duitse school, die eerst trachtte te bewijzen dat kathodestralen een golfkarakter hebben en later vooral dat er géén elementaire ladingen bestonden. 'Millikan pleegt fraude', zo stelde Ehrenhaft, 'door alle afwijkende metingen te verwaarlozen.' In Wenen liet Ehrenhaft diverse proeven doen (vaak met veel ingenieuzer apparatuur dan Millikan ter beschikking had) om aan te tonen dat er géén regelmaat in de waargenomen ladingen bestaat. Hij selecteerde echter niet in zijn meetresultaten.
Millikan's aanhang onder natuurkundigen groeide. Hij ontving in 1924 de Nobelprijs. Ehrenhaft bleef tot in de tweede wereldoorlog publiceren over ladingen kleiner dan e. Niemand besteedde er nog aandacht aan.

Bij voortzetting van de metingen ontstaat een waterval van gegevens. Het is noodzakelijk orde te scheppen of te zien in de chaos. Millikan slaagde daarin, omdat hij overtuigd was van het bestaan van elektronen en dus van kleinste porties lading. Bovendien gebruikte hij in zijn uiteindelijke publikaties alleen díe metingen die niet in tegenspraak waren met zijn ideeën.



Millikan's aantekeningen van 15 maart 1912. Let op de opmerking linksonder: 'Beauty. Publish this ...'

2. HET ORDENEN VAN GETALLEN

Gemeten lading van druppeltjes in 10^{-19} C:

6,93	9,45	7,96	12,76	7,88	2,99
8,03	9,92	6,15	9,41	4,72	11,32
6,52	3,08	11,38	8,33	3,52	9,04
11,15	8,12	10,19	4,96	9,64	6,32
5,91	7,92	10,78	6,64	8,25	7,52
9,57	3,22	6,42	4,85	10,88	11,41

Je kunt deze ladingen ordenen naar grootte. Een beter overzicht krijg je, als je de resultaten in een *staafdiagram* verwerkt. Zoek daarvoor eerst hoeveel metingen vallen binnen de aansluitende *intervallen* (of *klassen*): [0; 0,5⟩, [0,5; 1,0⟩, [1,0; 1,5⟩ enz. tot [12,5; 13,0⟩.
In het staafdiagram wordt voor elk interval een staaf getekend waarvan de hoogte evenredig is met het aantal metingen binnen dat interval. Uit het staafdiagram moet blijken of de meetresultaten groepsgewijs gerangschikt zijn.

a. Teken het staafdiagram.

b. Ons inziens wordt een groep ge-

vormd door de metingen 5,91; 6,15; 6,32; 6,64 en 6,93 · 10^{-19} C.
Het overschot aan elektronen is in al deze gevallen gelijk.
Bepaal zo nauwkeurig mogelijk de lading van de n elektronen in deze selectie.
c. Als er druppeltjes met n elektronen bestaan, dan zullen er ook druppeltjes met $n+1$, $n+2$ en mogelijk $n-1$, $n-2$ elektronen voorkomen. Zoek méér bij elkaar horende groepen metingen, en bepaal zo nauwkeurig mogelijk de lading per serie.
d. Bepaal met behulp van je resultaten bij b en c de waarde van n.
e. Bereken zo nauwkeurig mogelijk de lading van één elektron.

De lading van het elektron heeft men de *elementaire lading* genoemd. Deze lading is negatief en wordt aangeduid met $-e$. De waarde van e is 1,6 · 10^{-19} C.

Het gebruik van de elementaire lading e in teksten en berekeningen vermindert het schrijfwerk. Het heeft bovendien geleid tot een energie-eenheid op atoomschaal: de *elektronvolt* (afgekort: eV).
In een straalkanon wordt elektrische energie van elektronen met lading $-e$ omgezet in kinetische energie. In hoofdstuk 3 zag je: $q \cdot V = \frac{1}{2} m \cdot v^2$.
Als de spanning V gelijk is aan 1 volt, krijgt het elektron een kinetische energie van 1 eV.

1 eV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J
1 keV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{3} = 1{,}6 \cdot 10^{-16}$ J
1 MeV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{6} = 1{,}6 \cdot 10^{-13}$ J (M = mega)
1 GeV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{9} = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J (G = giga)
1 TeV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{12} = 1{,}6 \cdot 10^{-7}$ J (T = tera)

3.
a. Bereken met behulp van de resultaten van Thomson en Millikan de massa van het elektron.
b. De elektronbaan om een waterstofkern heeft een straal van ongeveer 0,5 · 10^{-10} m. De elektrische kracht werkt als centripetale kracht op het elektron. Bereken de snelheid van het elektron.

4. PROEFWERK UIT 1920
a. Waar bestaat een atoom uit?
b. Waaruit bestaat de kern van een atoom?
c. Hoeveel elementaire deeltjes bestaan er?

5.4 ATOOMKERNEN ONTLEDEN

Radioactieve stoffen zenden drie soorten straling uit. In 1909 toonden Rutherford en Royds aan dan één van die soorten (α-straling) uit kernen van helium-atomen bestaat. Dit verschijnsel was niet te beschrijven met Rutherford's atoommodel zoals dat in 1911 werd opgesteld. Volgens dat model bestaan er evenveel soorten kernen als er elementen zijn. Die kernen konden (voorlopig) niet nader worden beschreven.
In 1919 bleek echter dat het ook mogelijk was een waterstofkern, de kern van het lichtste atoom, vrij te maken uit andere kernen. Een waterstof-atoom bestaat uit één elektron met een lading $-e$ en een kern met een lading $+e$, zodat het gehele atoom elektrisch neutraal is. De massa van die waterstofkern is te bepalen met de uit elektrolyseproeven bekende verhouding van lading en massa. Deze massa is 1,76 · 10^{-27} kg. Dit deeltje kreeg de naam *proton*.

Groep → / Periode ↓	I	II	III	IV	V	VI	VII	0
1	1.0080 H 1							4.0026 He 2
2	6.939 Li 3	9.012 Be 4	10.811 B 5	12.011 C 6	14.007 N 7	15.999 O 8	18.998 F 9	20.183 Ne 10
3	22.990 Na 11	24.31 Mg 12	26.98 Al 13	28.09 Si 14	30.97 P 15	32.06 S 16	35.45 Cl 17	39.95 Ar 18

Gedeelte van het periodiek systeem.

Waaruit bestaan nu de kernen van andere atomen? Om daar iets over te kunnen zeggen, kijken we naar het periodiek systeem. De atomen staan daarin gerangschikt naar de lading van de kern. In die volgorde zijn de atomen genummerd. Dit *atoomnummer Z* is gelijk aan het aantal elektronen dat om de kern cirkelt; het geeft dus aan hoe groot de negatieve lading van de elektronenwolk is en ook hoe groot de positieve lading van de kern moet zijn. In het periodiek systeem vind je ook de *atoommassa A* van de atomen:

$$A \approx \frac{\text{massa van het atoom}}{\text{massa van een proton}}$$

In werkelijkheid gebruikt men $^1/_{12}$ van de massa van het meest voorkomende koolstofatoom als atomaire massaeenheid. *Deze hoeveelheid* u *is gelijk aan* $1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ kg.
De massa van een proton is $1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg = *1,00728* u

1.

a. Zoek in het periodiek systeem het element *natrium* op. Hoe groot zijn het atoomnummer *Z* en de atoommassa *A* van natrium?

b. Kan een natriumkern alleen uit protonen bestaan? Verklaar je antwoord.

c. Een van de eerste ideeën over de samenstelling van de kern was de volgende: een kern bestaat uit A protonen en A-Z elektronen. Toon aan dat in dat geval een volledig atoom neutraal is.

Dit model met protonen én elektronen in de kern gaf veel theoretische problemen. Onafhankelijk van elkaar kwamen Heisenberg in Duitsland en Rutherford in Engeland (1920) met de voorspelling van een nieuw deeltje. Het nieuwe deeltje zou even zwaar als het proton zijn, maar het zou geen lading bezitten. Het werd *neutron* gedoopt.
Om experimenteel het bestaan van een neutron aan te tonen, moest men vrij bewegende neutronen produceren én waarnemen. Vervolgens zou men uit de sporen die rondvliegende neutronen achterlaten genoeg gegevens moeten halen om massa en snelheid van het neutron te bepalen.

2. WAARNEMEN VAN NEUTRONENSTRALING

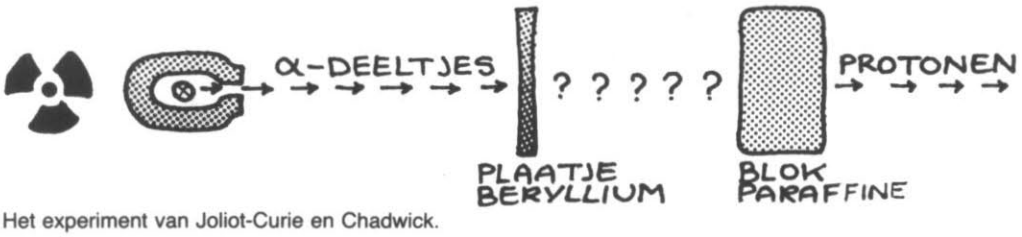
Bij het identificeren van kathodestralen heeft men onder andere gebruik gemaakt van elektrische en magnetische velden.

a. Ben je nog andere hulpmiddelen tegengekomen om straling te bestuderen en waar te nemen? Welke?

b. Welke uitwerking hebben elektrische en magnetische velden op neutronenstraling?

c. Neutronen hebben als projectiel een bijzondere eigenschap. Beschrijf welke krachten er werken als een neutron recht op de kern van een atoom afvliegt. Wat denk je dat er zou kunnen gebeuren in zo'n geval?

Het echtpaar Joliot-Curie publiceerde in 1932 een artikel waarin zij een experiment met radioactieve straling beschreven. Als α-straling op een plaatje beryllium valt, zendt het beryllium iets uit dat geen lading heeft en dat door een laag van enkele centimeters lood kan dringen. Als deze ongeladen straling een blok paraffine treft (of een andere verbinding met waterstof), worden er protonen uit de paraffine weggeschoten.



Het experiment van Joliot-Curie en Chadwick.

Zij namen aan dat het beryllium γ-straling uitzendt: radioactieve straling met een golfkarakter. Méér over γ-straling vind je in het thema 'Ioniserende Straling'.
Rutherford twijfelde sterk aan hun verklaring van dit verschijnsel. Zijn assistent Chadwick herhaalde de experimenten en breidde ze uit. Hij voegde metingen toe om de energie van α-deeltjes en protonen nauwkeurig te bepalen. Door beschouwing van de

botsingen in het beryllium en in de paraffine kon hij massa en snelheid van de straling op weg van beryllium naar paraffine bepalen.
Het bleken ongeladen deeltjes te zijn met een massa gelijk aan die van het proton: de al eerder voorspelde neutronen. Hiermee ontstond een nieuw beeld van het atoom.
Een atoom met atoommassa *A* en atoomnummer *Z* bevat:
- Z elektronen in banen rond de kern;
- Z protonen in de kern;
- A-Z neutronen in de kern;
- A *kerndeeltjes* (protonen en neutronen samen).

3.
a. De atoommassa *A* van beryllium is 9. Het atoomnummer Z is 4. Hoeveel elektronen, protonen en neutronen bevinden zich in een beryllium-atoom?
b. Tijdens beschieting van berylliumkernen met α-deeltjes (heliumkernen bestaande uit 2 protonen en 2 neutronen) ontstaat neutronenstraling. Ga na wat er in het blok beryllium achterblijft.
c. Je hebt je in het thema 'Verkeer' verdiept in botsingen. Probeer met je kennis van botsingen aan te geven waarom de neutronen juist de waterstofkernen uit de paraffine vrijmaken, en waarom de koolstofkernen ($A=12$, $Z=6$) op hun plaats blijven.

Chadwick was al jaren op zoek naar het neutron. Het is dan ook niet verwonderlijk dat hij de neutronenstraling onderkende. Bij onderzoek wordt vaak alleen dát herkend waar men naar op zoek naar is.
In 1935 ontving Chadwick de Nobelprijs voor natuurkunde. In hetzelfde jaar ontvingen Frédéric en Irene Joliot-Curie de Nobelprijs voor scheikunde.
Alle bouwstenen van het atoom zijn hiermee gevonden. Het atoommodel lijkt vrijwel afgerond. Kernreacties kunnen vrij goed beschreven worden met dit model. Er zijn nog slechts een paar kleinigheden op te lossen.

4. DE MATERIE-TIJDBALK
a. Door wie en wanneer werd het eerste 'samengestelde atoommodel' gelanceerd?
b. Selecteer enkele belangrijke tijdstippen waarop het atoommodel werd verbeterd of nauwkeuriger werd vastgelegd.
c. Welk experiment toonde als eerste aan dat ook de kern van een atoom uit meerdere bouwstenen bestaat?
d. Selecteer nog één of enkele vondsten voor de categorie 'samengestelde kern'.
e. Onderzoek naar elektrolyse en naar kathodestralen hebben de basis gelegd voor het bestuderen van het samengestelde atoom. Welke andere tak (of takken) van de natuurkunde waren van belang voor het onderzoek naar de 'samengestelde kern'?

5. PROEFWERK UIT 1932
a. Waaruit bestaat de kern van een atoom?
b. Hoeveel elementaire deeltjes bestaan er?
c. Hoe kun je onderzoek doen aan deze elementaire deeltjes?

hoofdstuk 6

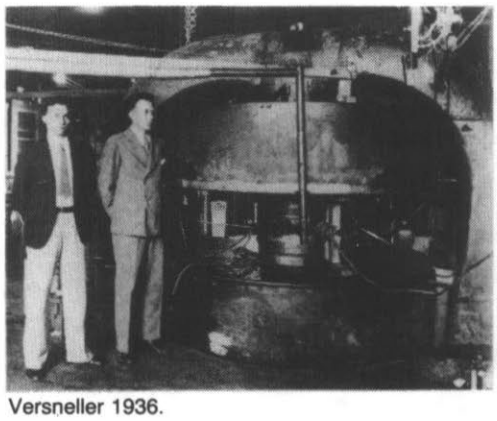
VAN NEUTRON TOT QUARK

inhoud blz.

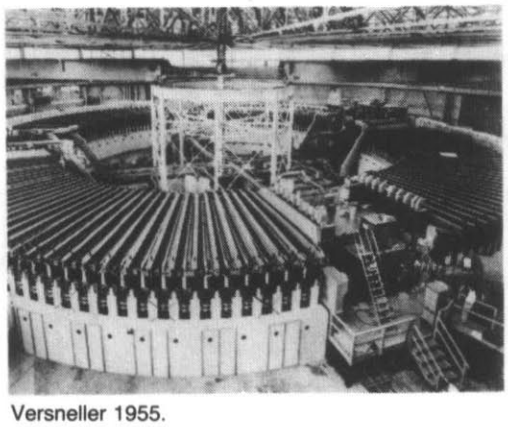
6.1 inleiding 61
6.2 straling uit het heelal 61
6.3 deeltjesversnellers 63
6.4 opsporen en identificeren van deeltjes 66
6.5 een beroemde formule 68
6.6 krachten tussen deeltjes 70
6.7 een onverzichtelijke verzameling 71
6.8 ordening van elementaire deeltjes 73
6.9 quarks nader beschouwd 76
6.10 verder onderzoek 78

van neutron tot quark

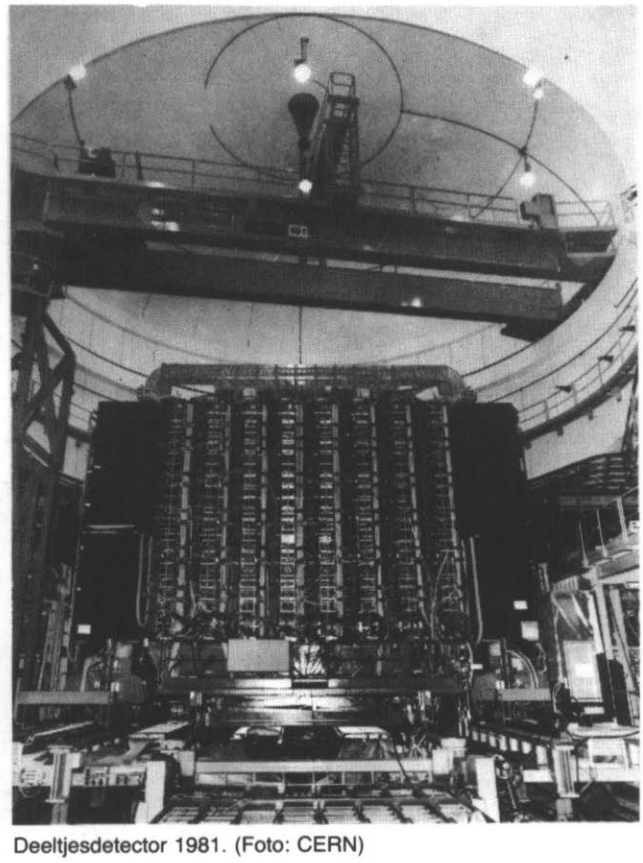
Zelden is er zo intensief gezocht naar de 'geheimen van de materie' als tegenwoordig. In de kranten en tijdschriften verschijnen dan ook regelmatig artikelen, waarin verslag wordt gedaan van de voortgang van dit onderzoek. Om deze artikelen te kunnen begrijpen is een behoorlijke kennis van dit onderzoek nodig. Het vorige hoofdstuk eindigde in 1932 met de ontdekking van het neutron. In dit hoofdstuk zullen we proberen een beeld te geven van het onderzoek sinds die tijd, en van de resultaten daarvan.



Versneller 1936.



Versneller 1955.

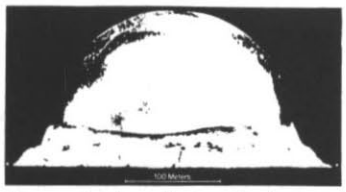


Deeltjesdetector 1981. (Foto: CERN)

Dat beeld kan niet anders dan tamelijk oppervlakkig zijn. Het onderzoek wordt steeds omvangrijker en ingewikkelder, terwijl de theorieën zó ingewikkeld worden dat ze pas na een grondige wiskundige scholing volledig begrepen kunnen worden. De apparatuur wordt zó omvangrijk en verfijnd, dat experimenten in de klas uitgesloten zijn.
Omwille van de begrijpelijkheid hebben we dus veel dingen weg moeten laten en veel vereenvoudigingen moeten toepassen.

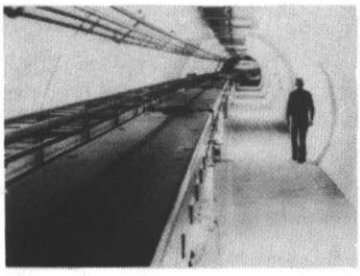
6.1 INLEIDING

Het atoommodel van Rutherford uit het vorige hoofdstuk vormde een uitstekende basis voor verder onderzoek. Er waren nog vele vragen te beantwoorden. Hoe is de samenstelling van de kernen van de zwaardere atomen? Zijn er nog meer deeltjes dan het neutron, het proton en het elektron? Waarom is de ene stof radioactief en de andere niet?
Botsingsexperimenten bleken ook nu weer een bron van veel nieuwe informatie. Er tekenden zich al snel twee belangrijke onderzoeksgebieden af: de *kernfysica* en de *elementaire-deeltjesfysica*.



De eerste atoombomexplosie op 16 juli 1945 in Jornada del Muerto in Mexico. Sinds het begin van de explosie is 1/40 seconde voorbijgegaan.

kernfysica
De resultaten van botsingsproeven wezen soms zeer sterk in de richting van de splijting van de kern. Nadat de mogelijkheid van *kernsplijting* aanvaard was, breidde het onderzoek zich zeer snel uit. Met name het uitbreken van de tweede wereldoorlog gaf een sterke impuls aan het onderzoek. Uiteindelijk leidde het kernfysisch onderzoek tot kernwapens, kerncentrales en tal van medische en technische toepassingen. In het thema 'Ioniserende Straling' komt de kernfysica uitgebreid aan de orde.



Versneller 1976.

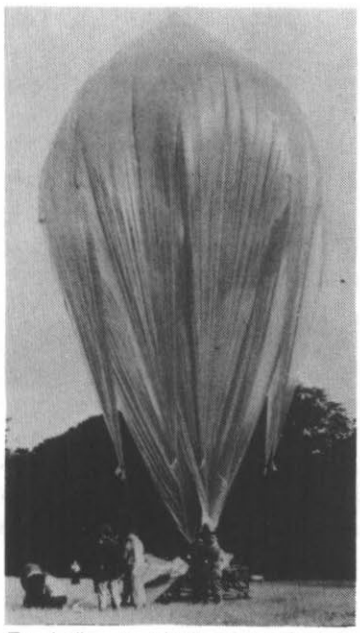
elementaire-deeltjesfysica
Soms ontstaan bij botsingsexperimenten onbekende deeltjes. Al snel blijkt dat er méér elementaire deeltjes zijn dan alleen het proton, het neutron en het elektron. Het ontstaan van die nieuwe deeltjes kan het beste bestudeerd worden bij zeer krachtige botsingen. Deze tak van de natuurkunde maakt dan ook gebruik van zeer grote *versnellers*, waarin deeltjes tot een zeer hoge snelheid gebracht worden. De daaropvolgende botsingen vinden dan met een zeer grote energie plaats. Daarom wordt dit soort onderzoek ook wel *hoge-energie-fysica* genoemd, en is het één van de meest spectaculaire èn kostbare takken van de natuurkunde. In de komende paragrafen zullen we nader op deze apparatuur ingaan. Ook komen de onderzoeksmethoden en de resultaten van het onderzoek aan de orde.

1.
Waarom gaf de tweede wereldoorlog een krachtige impuls aan het kernfysisch onderzoek, en niet aan het elementaire-deeltjes-onderzoek?

2.
Bij kernsplijting wordt het ene element omgezet in één of meer andere.
a. Welke groep onderzoekers had al veel eerder in de geschiedenis geprobeerd dat gedaan te krijgen?
b. Waarom hadden de kernfysici zoveel moeite met de aanvaarding van de omzetting van het ene element in het andere?

6.2 STRALING UIT HET HEELAL

Al in het begin van deze eeuw merkten Wilson en anderen dat geladen voorwerpen langzaam ontladen werden, zelfs als ze heel goed waren geïsoleerd. Pas later, na het onderzoek naar de eigenschappen van radioactieve straling, werd de oorzaak daarvan duidelijk. Radioactieve straling is in staat een zeer goed geïsoleerd voorwerp te ontladen, omdat die straling de lucht eromheen ioniseert. De bron van deze straling was echter moeilijk aanwijsbaar. Uiteindelijk bleek de straling uit het heelal te komen: vandaar de naam *kosmische straling*.
Met ballonnen, die tegenwoordig een hoogte van 30 km bereiken, wordt de samenstelling van deze straling onderzocht. De kosmische straling bestaat vooral uit protonen en α-deeltjes. Een zeer klein deel ervan bestaat uit kernen van bijv. koolstof, zuurstof, cobalt, ijzer enz. De deeltjes hebben naar aardse begrippen een zeer hoge energie: gemiddeld ongeveer 9 GeV, met uitschieters van 1000 GeV en meer.



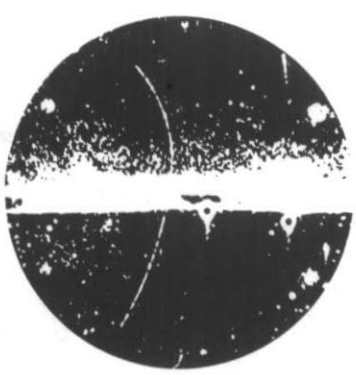
Een ballon voor het onderzoek van kosmische straling op grote hoogte.

Op het aardoppervlak heeft de kosmische straling een geheel andere samenstelling. Naast bovengenoemde deeltjes komen er ook geheel nieuwe deeltjes in voor. Die nieuwe deeltjes worden gevormd bij de botsingen van de snelle protonen met de atomen van de aardatmosfeer. Veel van die nieuwe deeltjes bestaan maar kort: ze zijn *niet stabiel*. Ze vallen uiteen in andere deeltjes; dit wordt *verval* genoemd.
De belangrijkste nieuwe deeltjes die op die manier werden ontdekt zijn:
– het *muon*
De lading van het muon is gelijk aan die van het elektron, maar het deeltje is 200 keer zo zwaar. Het muon is niet stabiel, en als het vervalt wordt er een elektron gevormd.
– het *pion*
Naast het neutrale pion (π^0) bestaat er ook nog een positief (π^+) en een negatief (π^-) geladen pion. De massa van een pion is wat groter dan die van een muon. Het deeltje is niet stabiel, en als het vervalt wordt er een muon gevormd.
– het *positron*
Het positron heeft dezelfde massa als het elektron, maar de lading is positief.

Er bleken dus veel meer deeltjes dan alleen het proton, het neutron en het elektron te bestaan. Dat was voor natuurkundigen eigenlijk een frustrerende ontdekking. Het mooie en eenvoudige model van 'materie is opgebouwd uit protonen, neutronen en elektronen' bleek niet houdbaar. Vooral de ontdekking van het positron in 1932 veroorzaakte nogal wat opwinding. Al in 1928 had Dirac een theorie over het elektron opgesteld, waaruit ook volgde dat er een positief elektron moest bestaan. De ontdekking van het positron vormde een krachtige bevestiging van deze theorie.
De ontdekking van deze nieuwe deeltjes leidde weer tot een stroom van vragen. Zijn er nog meer deeltjes? Bestaat er ook een positief muon? Komen deze deeltjes ook in de kern van het atoom voor? Waarom is het elektron wél stabiel en het muon niet? Er zou nog veel onderzoek nodig zijn om de antwoorden op deze vragen te vinden.

Botsingen van deeltjes uit de kosmische straling met andere deeltjes vormden tot 1960 het belangrijkste studieterrein van de elementaire-deeltjes-fysici.
De kosmische straling was weliswaar altijd beschikbaar en goedkoop, maar de straling kon niet intensiever worden gemaakt of anderszins worden gemanipuleerd.
Men heeft dan ook gezocht naar manieren om een stroom energierijke deeltjes te produceren, waarvan de eigenschappen wél veranderd kunnen worden. Na 1960 werd de rol van de kosmische straling dan ook overgenomen door de grote deeltjesversnellers.

1.
In het begin van deze eeuw vermoedde men dat het ontladen van goed geïsoleerde geladen voorwerpen veroorzaakt werd door radioactieve straling uit de grond.
a. met welk experiment zou je deze veronderstelling kunnen toetsen?
b. Bij waarnemingen met ballonnen bleek de intensiteit van de straling met de hoogte toe te nemen.
Welke conclusie volgt daaruit?
c. Met welk experiment zou je na kunnen gaan of de straling van de zon afkomstig is?



Anderson ontdekte met deze foto in 1932 het positron.

2.
Op de foto hiernaast zie je het spoor dat een deeltje heeft nagelaten in een detectieapparaat. De witte band in het midden is een loodplaat, waardoor het deeltje vertraagd wordt. De kromming van de baan van het deeltje wordt veroorzaakt door een magnetisch veld.
a. Hoe kun je op de foto zien in welke richting het deeltje zich bewoog?
b. Hoe kun je, als de richting van het veld bekend is, het teken van de lading van het deeltje bepalen?

6.3 DEELTJESVERSNELLERS

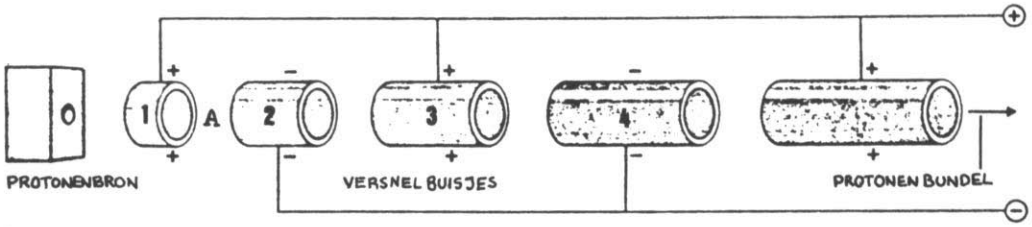
In principe wordt in alle *versnellers* de versnelling van een geladen deeltje veroorzaakt door een elektrisch veld. We nemen als voorbeeld een proton: één van de meest gebruikte deeltjes in versnellers. Het proton wordt verkregen door ionisatie van een waterstofatoom. Het elektron is dan verdwenen, en alleen de kern – het proton – blijft over. Het proton kan dan met een elektrisch veld versneld worden. Een spanning van 1000 V levert het proton dan 1 keV energie op. In vergelijking met de kosmische straling (6 GeV) is dat maar heel weinig.
De versnelspanning kan natuurlijk wel verhoogd worden, maar dat kan niet onbeperkt gebeuren omdat er al spoedig vonkontlading plaatsvindt. Bij een *enkelvoudige versneller* (alleen een positieve en een negatieve plaat) kan een proton maximaal tot 10 MeV versneld worden.

1.
Bereken de snelheid van een proton met een energie van 10 MeV.

2.
Kan een neutron ook met behulp van een versneller versneld worden?

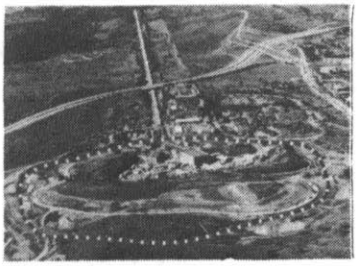
3.
Waar ben je in dit thema al eens eerder een versneller voor elektronen tegengekomen? Welke afmetingen had die ongeveer? Welke versnelspanning werd daarbij gebruikt?

de lineaire versneller
In een *lineaire versneller* wordt het proton stapje voor stapje versneld in plaats van met één reuzensprong. Zo'n versneller bestaat uit een langgerekte aaneenschakeling van cilindervormige metalen buisjes. De buisjes zijn op een wisselspanningsbron aangesloten, zodat deze afwisselend positief en negatief geladen zijn. Als het proton zich in punt A bevindt, wordt het aangetrokken door buisje 2 en afgestoten door buisje 1. Het wordt dus versneld in de richting van buisje 2. In het buisje beweegt het proton eenparig. Als



Principe van een lineaire versneller.

het middenin buisje 2 aangekomen is, wordt de spanning omgekeerd. Daardoor treedt er in de ruimte tussen de buisjes 2 en 3 wéér versnelling op. Zo wordt het proton stapsgewijs versneld. Door op het juiste moment de spanning om te draaien, kan een zeer hoge energie van het proton bereikt worden. Tegenwoordig wordt de lineaire versneller alleen nog maar gebruikt voor het versnellen van elektronen en positronen. Voor het versnellen van zwaardere deeltjes zoals protonen, is het *synchrotron* geschikter. Dat type zullen we verderop bekijken.
De grootste lineaire versneller voor elektronen staat in Californië: de Stanford Linear Accelerator (SLAC). Deze versneller is gebouwd in 1961 en kostte toen 115 miljoen dollar. De SLAC heeft een lengte van ruim 3 km en bevat 82560 buisjes. De maximale energie bedroeg toen 22 GeV, maar door verbeterde technologie is dat nu opgevoerd tot 32 GeV. Over een paar jaar zal dat 50 GeV zijn.
Dan zullen er ook nog twee 'armen' aan de versneller gezet worden, waarmee op een zeer slimme manier de botsingenergie verhoogd wordt. De versneller zal dan vlak na elkaar een stoot elektronen en een stoot positronen tot 50 GeV versnellen. Deze worden op het eind van de versneller van elkaar gescheiden en botsen dan frontaal tegen elkaar in een trefruimte. De daarbij vrijkomende energie is heel hoog. In de USSR zijn er plannen voor de bouw van twee 150 GeV lineaire versnellers, die tegenover elkaar


Stanford Linear Accelerator.
De gestippelde lijnen geven de twee 'armen' aan, die aan de SLAC gebouwd zullen worden.

staan. De elektronenbundel van de ene botst dan met de positronenbundel van de ander in de ruimte tussen de versnellers. Het vermogen zal later wellicht opgevoerd worden tot 2 maal 500 GeV.

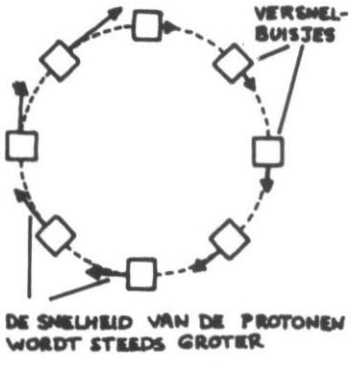
4.
Waarom moet in een versneller een vacuüm heersen?

5.
In een lineaire versneller neemt de lengte van de buisjes toe in de bewegingsrichting van het deeltje. Wat zou het doel daarvan zijn?

6.
In de tekst vind je een aantal gegevens van de grootste lineaire versneller van dit moment: de SLAC. Bereken met deze gegevens de gemiddelde spanning tussen twee opeenvolgende buisjes.

7.
Na de modernisering zal de SLAC elektronen én positronen versnellen. Op welke manier kun je ervoor zorgen dat de elektronen de ene 'arm' kiezen en de positronen de andere?

het synchrotron



Principe van een synchrotron.

In het thema 'Elektrische Machines' heb je gezien dat de warmteproductie in een weerstand gegeven wordt door $P = I^2 \cdot R$

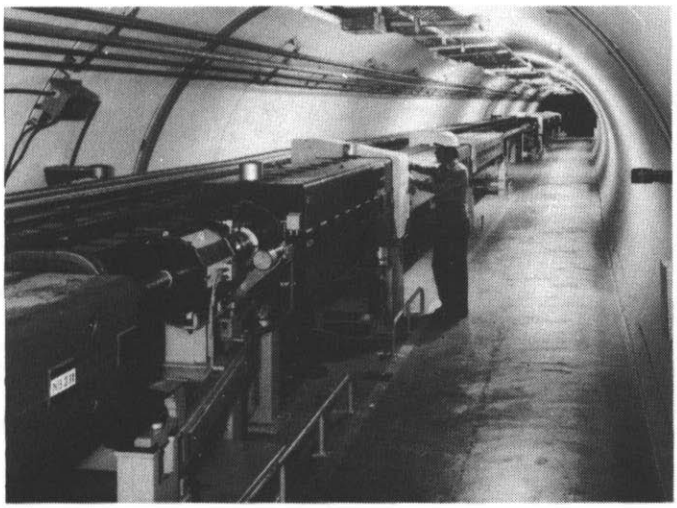
Bij het *synchrotron* zijn de versnelbuisjes niet in een rechte lijn, maar in een cirkel opgesteld. De bron levert een protonenstoot, die vervolgens een aantal malen de cirkel doorloopt. Zo wordt elk buisje een aantal malen gebruikt, hetgeen een aanzienlijke kostenbesparing oplevert. Om de deeltjes in een cirkelbaan te laten lopen, is een kracht naar het middelpunt noodzakelijk. De buisjes zijn dan ook omringd door grote spoelen. De stroom die door deze spoelen loopt, veroorzaakt een magneetveld in en tussen de buisjes. Het magneetveld is zo gericht dat de lorentzkracht naar het middelpunt wijst. Voor een synchrotron is dus zowel een elektrisch als een magnetisch veld noodzakelijk.
De snelheid van de deeltjes neemt steeds toe. Er kan daardoor niet worden volstaan met een vaste frekwentie waarmee het elektrisch veld wisselt. Men moet deze frekwentie steeds laten toenemen, zodat het veld precies op tijd omdraait. Dit op elkaar afstemmen van snelheid en frekwentie heet *synchroniseren*; vandaar de naam *synchrotron*.
Als de snelheid van het deeltje toeneemt, wordt ook de benodigde centripetale kracht groter. De magnetische veldsterkte moet daarom ook toenemen. Dit wordt bereikt door de stroomsterkte in de spoelen te vergroten. Om met zeer grote stroomsterkten te kunnen werken, moet de geproduceerde warmte door een koelsysteem afgevoerd worden.
Het energiegebruik van een synchrotron is door de grote aantallen spoelen en de hoge waarden van de stroomsterkte erg hoog. In de nieuwste versnellers maakt men dan ook gebruik van een merkwaardig verschijnsel: de *supergeleiding*. Bij sommige metalen daalt de weerstand bij een zeer lage temperatuur plotseling tot nul. De spoelen van de versneller worden nu gekoeld met vloeibaar helium (T = 4,2 K), waardoor ze supergeleidend worden. Er is dan geen warmte-ontwikkeling meer. De stroomsterkte en dus de magnetische veldsterkte kunnen dan aanzienlijk toenemen, waardoor ook de maximale snelheid van de deeltjes kan toenemen.
Problemen bij de constructie van de spoelen beperken de maximale veldsterkte, en daarmee ook de maximale energie van de deeltjes. Bovendien wordt het bij een toenemende snelheid steeds moeilijker de bundel deeltjes nog bij elkaar te houden. Dit uiteenwaaieren van de bundel is een tweede factor waardoor de energie van de deeltjes begrensd is.
De maximale energie die de deeltjes kunnen behalen is een van de belangrijkste eigenschappen van een versneller.

LAND	PLAATS	NAAM	TYPE VERSNELLER	BOUW-JAAR	DEELTJES	ENERGIE-BUNDEL (GeV)	EFFECTIEVE ENERGIE (GeV)	AFMETING VERSNELLER	ONTDEKKINGEN EN LOPENDE ONDERZOEKINGEN
EUROPA	Genève (C.E.R.N.)	PS	synchrotron	1960	protonen	28	7,4	straal 100 m	hyperkernen
		ISR	ISR-opslagring	1971	protonen-protonen	31	62	straal 150 m	tover quark, sterke kernkracht
		SPS	synchrotron	1976	protonen-antiprotonen	270	540	straal 1100 m	opbouw var. leptonen en hadronen
		LEP	ISR-opslagring	1988	electronen-positronen	86	172	straal 4,9 km	intermediaire boson
FRANKRIJK	Orsay	DCI	ISR-opslagring	1975	electronen-positronen	3,7	7,4	straal 94 m	tau lepton synchrotronstraling
WEST-DUITS-LAND	Hamburg (DESY)	DORIS	opslagring	1974	electronen-positronen	4,5	9	twee ovale ringen 120 x 60 m	upsilon 5e quark, tau lepton
		PETRA	opslagring	1978	electronen-positronen	19	38	omtrek 2,3 km	gluonenjets 5e quark
		HERA	ISR-opslagring	1985 à 1989	electronen-positronen	30	60	omtrek 6,5 km	intermediare boson
USA	Brookhaven	AGS	AGS-synchrotron	961	protonen	30	8	straal 320 m	ontdekking J/Psi deeltje
		ISABELLE	ISR-opslagring	1986	protonen-protonen	400	800	Straal 220 m 2 rechte stukken van 300 m elk	botsingen protonen
	Batavia (Fermilab)	FNAL	synchrotron	1972	protonen	500	30,7	straal 1 km	upsilon en 5e quark
		TEVATRON	dubbel synchrotron	1982	protonen-antiprotonen	1000	2000	zelfde als FNAL, supergeleidende magneetspoelen	botsingen protonen en antiprotonen bij zeer hoge energie
		PENTEVAC	synchrotron	onbek	protonen	5000	97	straal ca. 5 km	
	Stanford	SLAC	lineaire versneller	1961	electronen	22	6,5	lengte 3 km	fijnstructuur van nucleonen
		SPEAR	opslagring	1974	electronen-positronen	4,2	8,4	straal 31,5 m	ontdekking var. tau lepton en J/Psi deeltje
		PEP	opslagring	1980	electronen-positronen	18	36	omtrek 2,2 km	intermediaire boson
	Ithaca (Cornell Univ.)	CESR	opslagring	1979	electronen-positronen	8	16	straal 100 m	electronen-positronen botsingen
USSR	Novosibirsk	VEPP 4	opslagring	1978	electronen-positronen	7	14	straal 100 m	tover quark, opbouw van het tau lepton
	Serpukhov	SERPUKHOV PROTON	synchrotron	1967	protonen	12	4,9	straal 1 km	h meson
		UNK	synchrotron idem	1989? idem	protonen protonen-antiprotonen	3000 3000	75 6000	straal 10 km? idem	zéér hoge energieën
JAPAN	Tsukuba	KEK	AGS-synchrotron	1974	protonen	12	5	straal 54 m	
	Oho-Mashi	TRISTAN	dnevoudige opslagring	1989	electronen-positronen	20-50	40-100	gemiddelde straal 420 m	hoge energie botsingen
CHINA	Beijing	BEIJING	synchrotron	1985	protonen	50	9,8	straal 216 m	gevaneerd onderzoek

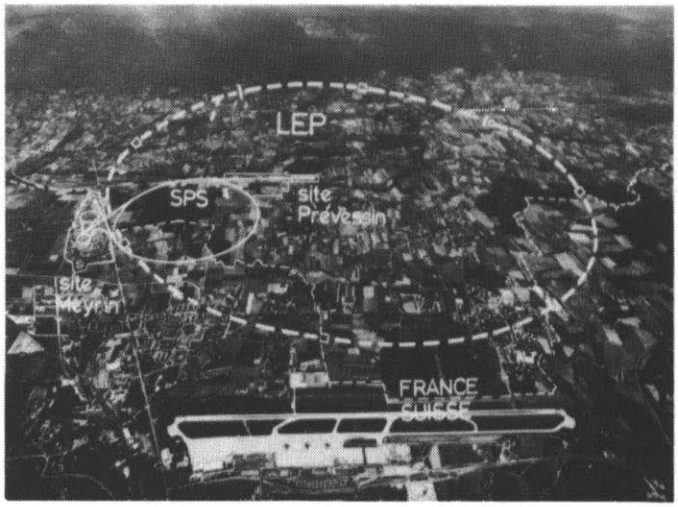
Versneller	Jaar van ingebruik-stelling	Energie	Omtrek	Bouwkosten
Tevatron Chigaco, VS (verbouwing	1984 1886	1000 GeV 2 × 1000 GeV	6400 m	ƒ 450 miljoen
TRISTAN Japan	1986	2 × 30 GeV	3000 m	?
SLAC lineaire versneller California, VS	1986	2 × 50 GeV	4 km (lengte)	ƒ 330 miljoen
LEP Genève Zwitserland	1988	2 × 50 GeV	26,6 km	ƒ 1,4 miljard
HERA Hamburg, West-Duitsland	1989	30 + 820 GeV	6450 m	ƒ 1,1 miljard
UNK Moskou Sovjet-Unie	1990	2 × 3000 GeV	± 10 km	?
Desertron VS	Na 1995	2 × 20000 GeV	100-200 km	ƒ 6 miljard

Gegevens van bestaande en in aanbouw zijnde of geplande versnellers.

Als de protonen de maximale energie bereikt hebben, verlaten ze de tunnel van de versneller en botsen in de experimenteerkamer tegen het doelwit. Het hangt af van het doel van het experiment wat als doelwit gekozen wordt.
Hoeveel energie komt er bij zo'n botsing vrij? Na de verbouwing in 1984 levert het Tevatron in Chicago (USA) protonen met een maximale energie van 1000 GeV. Zo'n proton heeft dan ongeveer de energie van een vliegende mug. Dat is niet veel. Maar per keer treffen $5 \cdot 10^{13}$ protonen het doelwit. Hun totale energie is te vergelijken met de kinetische energie van een kudde galopperende olifanten.



Een kijkje in de tunnel van het Super Proton Synchrotron (SPS) in Genève. Het is wel ver lopen als je van de ene naar de andere kant moet. Meestal gaat men met de fiets. (Foto: CERN)



Een luchtfoto van de huidige en toekomstige versnellers van het CERN in Genève. Met de bouw van de 26,6 km lange tunnel voor de LEP is in 1983 begonnen. (Foto: CERN)

In bovenstaande luchtfoto zijn de synchrotrons van het Centre Européenne pour la Recherche Nucleaire (CERN) in Genève ingetekend. Op de tekening is goed te zien hoe het oude synchrotron bij de bouw van het nieuwe als bron gebruikt wordt. Overigens

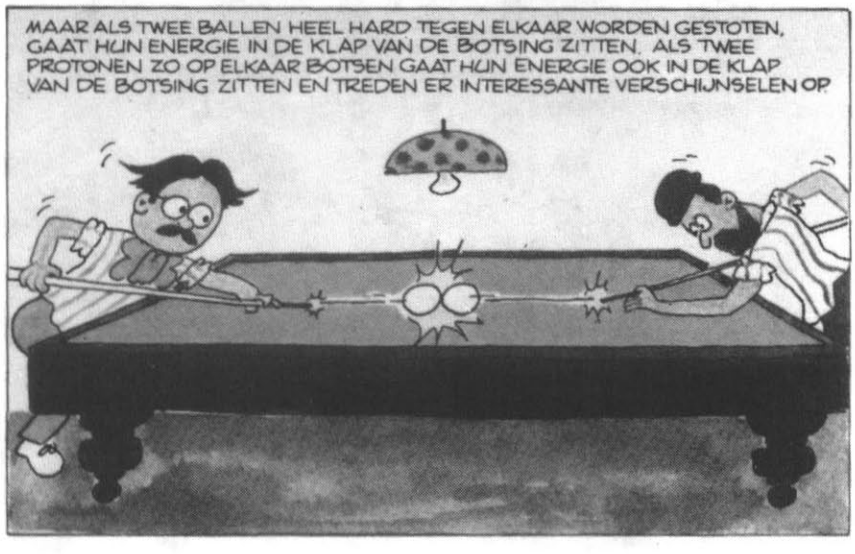
botsen bij dit synchrotron de protonen niet tegen een doelwit. In het synchrotron wordt een bundel protonen en een bundel *anti-protonen* versneld. Anti-protonen zijn deeltjes met dezelfde massa als protonen, maar met een negatieve lading. De bundels bewegen in tegengestelde richting en op sommige punten kruisen ze elkaar. Soms vindt op zo'n plaats dan een frontale botsing van een proton en een anti-proton plaats.

8.
Als de protonen de maximale energie bereikt hebben, verlaten ze de tunnel van de versneller. Op welke wijze kun je zoiets laten gebeuren?

9.
a. Welke is de meest opvallende ontwikkeling die de versnellers in de afgelopen veertig jaar hebben doorgemaakt?

b. Wat is de reden van deze ontwikkeling?

10.
In de linkertabel op blz. 65 staat naast de maximale energie ook nog de *effectieve* energie vermeld. De effectieve energie is de energie die werkelijk voor de botsingsprocessen beschikbaar is.
a. Leg met behulp van de strip hiernaast uit, waarom niet alle energie beschikbaar is voor de botsingsprocessen.
b. Hoeveel procent van de energie van het PS-synchrotron in Genève wordt effectief gebruikt?



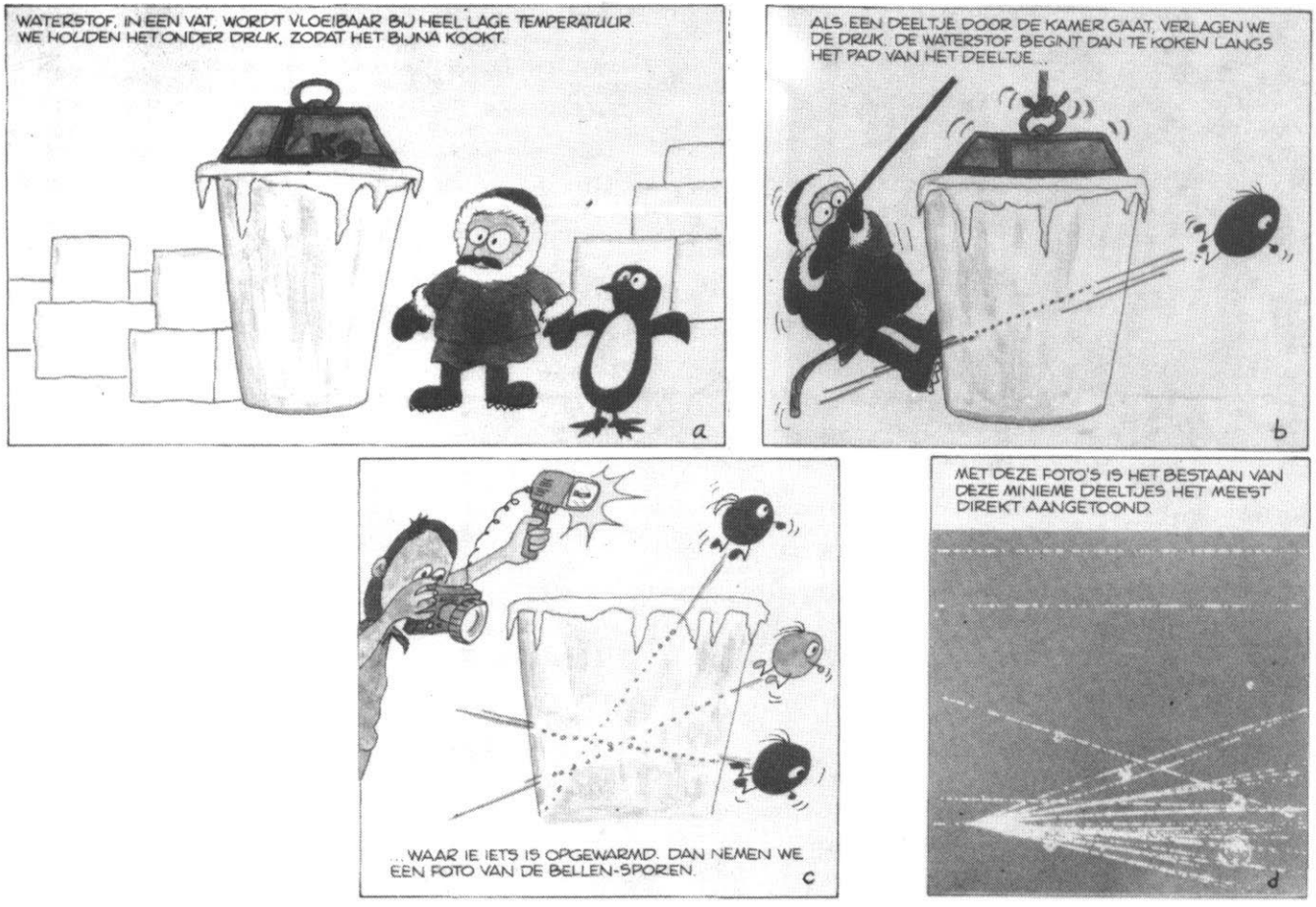
11.
Bij sommige synchrotrons is de effectieve energie twee keer zo groot als de maximale energie.
a. Leg uit hoe dat kan. (Let daarbij op de strip hiernaast.)
b. Hoe groot zal de effectieve energie van de SLAC worden na de voltooiïng van de 'armen'?

6.4. OPSPOREN EN IDENTIFICEREN VAN DEELTJES

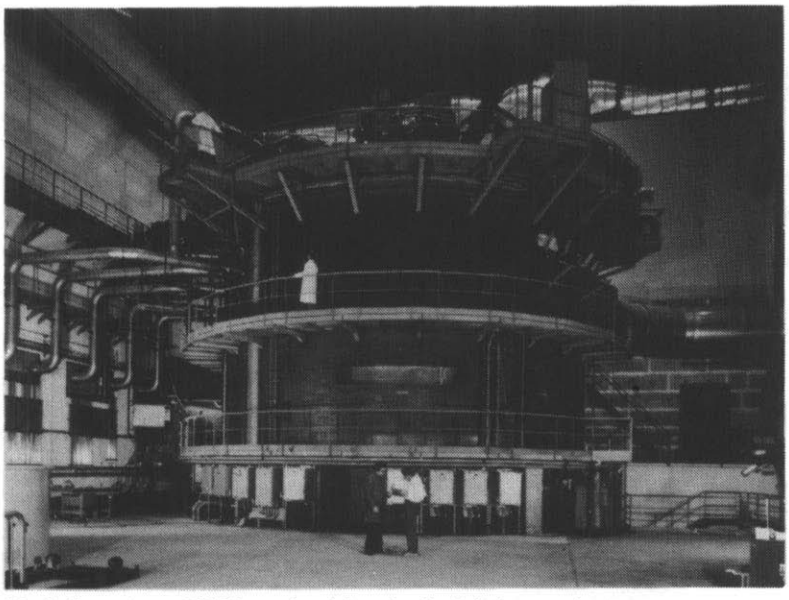
Het vaststellen van de aanwezigheid en het bepalen van de eigenschappen van deeltjes die door kosmische straling of in een versneller worden geproduceerd, is niet zo eenvoudig. De volgende problemen doen zich daarbij voor:
– de deeltjes zijn zeer klein: miljoenen malen kleiner dan de kleinste voorwerpen die via microscopen nog te zien zijn;

– de deeltjes bewegen heel snel;
– de deeltjes hebben vaak een korte levensduur: al spoedig vervallen ze tot andere deeltjes.

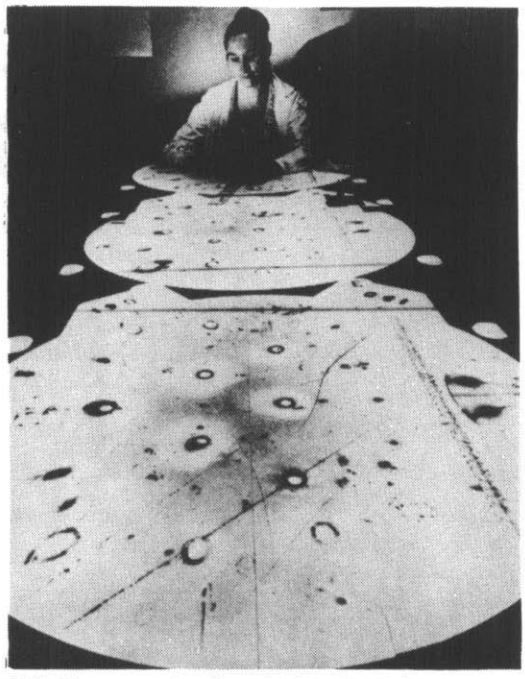
Door deze problemen kunnen we niet de deeltjes zélf bestuderen, maar alleen de sporen die ze nalaten. Door foto's te maken van deze sporen kan men (achteraf) vaststellen welke eigenschappen het deeltje heeft.
Sinds 1950 maakt men daarvoor gebruik van een *bellenvat*. Een bellenvat bevat een vloeistof, bijv. waterstof of helium. Deze stoffen komen normaal gesproken alleen voor in gasvorm: ze worden pas vloeibaar bij zeer lage temperaturen. (Voor waterstof is dat 20 K en voor helium 4 K.)
Een bellenvat wordt dan ook omringd door grote koelinstallaties. Met een zuiger wordt de vloeistof onder hoge druk gezet, zodat ze niet gaat koken. Bij vermindering van de druk gaat de vloeistof wél koken, en ontstaan er dampbellen rond onregelmatigheden aan de wand. Iets dergelijks heb je misschien ook wel eens gezien bij het koken van water in een reageerbuis. Ook kunnen dampbellen rond ionen in de vloeistof gevormd worden.



Als een geladen deeltje met grote snelheid het bellenvat binnendringt, ioniseert het de atomen die het op zijn pad vindt. Rond deze ionen ontstaan belletjes, zodat een bellenspoor zichtbaar wordt. Dat spoor wordt gefotografeerd met behulp van een lichtbron en een camera. Meestal worden stereoscopische foto's gemaakt door meerdere camera's tegelijk te gebruiken. Een belangrijk hulpmiddel bij het bellenvat is het magnetisch veld. Op geladen deeltjes die in een magnetisch veld bewegen, werkt immers de lorentzkracht. Daardoor wordt de baan van zo'n deeltje gekromd. Uit de richting van de kromming ten opzichte van de richting van het magneetveld kan men afleiden of het deeltje positief of negatief geladen is. De sterkte van de kromming levert gegevens op over snelheid en massa van het deeltje. Soms kan de levensduur van het deeltje worden bepaald uit de lengte van het spoor.



Het bellenvat van CERN, omringd door koelinstallaties en electromagneten. (Foto: CERN)



Het uitlezen van de talloze foto's gebeurt door mensen; de computer selecteert de bijzondere foto's uit.

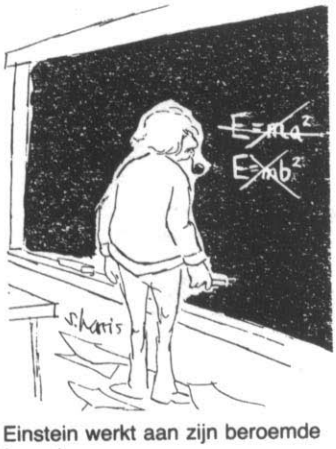
De foto's worden uitgemeten en geanalyseerd met behulp van een computer. Deze is geprogrammeerd met de gegevens van een groot aantal 'standaardbotsingen'. Door het vergelijken van de analyse van de foto met de 'standaardbotsingen' kan de computer foto's uitselecteren, waarop misschien iets bijzonders te zien is.

1.
a. Waarom is bij elke versneller ook een bellenvat noodzakelijk?
b. Waarom moet bij vergroting van de maximale energie van de versneller ook het bellenvat uitgebreid worden?

2.
Zijn deeltjes die geen ioniserende werking hebben óók zichtbaar in een bellenvat?

3.
De levensduur van vele deeltjes is ongeveer 10^{-10} s. Hoe lang is het spoor van het deeltje, als het gemiddeld met de halve lichtsnelheid door het bellenvat beweegt? De lichtsnelheid is $3 \cdot 10^8$ m/s.

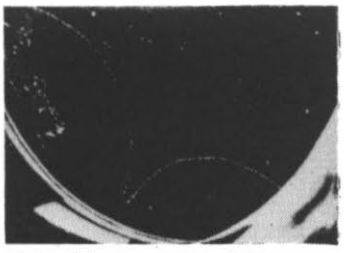
6.5 EEN BEROEMDE FORMULE



Einstein werkt aan zijn beroemde formule.

Bij de botsing van een energierijk deeltje met een atoomkern ontstaan tal van nieuwe deeltjes. Die nieuwe deeltjes ontstaan niet door het uiteenspatten van de kern. In dat geval zou de totale massa voor en na de botsing even groot moeten zijn, en dat is zelden het geval. Meestal is er na de botsing méér massa aanwezig dan daarvoor. Zo ontstaat massa als het ware uit energie.
Die mogelijkheid was door Einstein al in 1905 voorspeld. Hij legde toen het verband tussen massa m en energie E vast in de formule $E = m \cdot c^2$, waarin c de *lichtsnelheid* voorstelt. Door deze ingreep komt de wet van behoud van energie nóg centraler te staan in de natuurkunde, en wordt het mogelijk massa uit te drukken in een energie-eenheid. In dit thema wordt de massa van deeltjes meestal uitgedrukt in eV, omdat dat de handigste eenheid is.

antimaterie
De bellenvatfoto op blz. 69 toont een duidelijk voorbeeld van het ontstaan van massa



Het ontstaan van een elektron en een positron.

uit energie. Analyse van de foto wijst uit, dat een elektron en een positron ontstaan zijn uit een hoeveelheid energie. Het omgekeerde kan ook gebeuren. Als een elektron en een positron met elkaar in aanraking komen, verdwijnen ze beide. Er ontstaan dan andere deeltjes en er komt energie vrij. De totale energie vóór en ná de botsing (inclusief massa) is even groot. Men zegt nu dat het positron het *anti-deeltje* van het elektron is. Er bestaat een grote mate van overeenkomst tussen een deeltje en zijn anti-deeltje: sommige eigenschappen zijn gelijk, maar andere eigenschappen precies tegenovergesteld. Bij een elektron en een positron bijv. is de eigenschap massa gelijk, maar de eigenschap lading tegenovergesteld. Hetzelfde geldt voor het proton en het anti-proton. Elk deeltje heeft een anti-deeltje. Zo bestaat er ook het anti-neutron.

Bij hun speurtocht naar steeds nieuwe elementaire deeltjes bouwden de fysici steeds grotere versnellers. De botsingen werden daardoor energierijker, en er konden zwaardere deeltjes ontstaan. Zo werden in 1982 de reeds theoretisch voorspelde W^+ en W^--deeltjes gevonden, elk met een massa van 80 GeV.

1.
Ongetwijfeld heb je al eens van de formule $E = m \cdot c^2$ gehoord. Waarom zou juist deze formule zo beroemd geworden zijn, en niet een andere zoals de wet van ohm ($V = I \cdot R$)?

2. PAARVORMING
a. Hoeveel energie is er minstens nodig om een elektron-positron-paar te vormen?
b. Bij de gebeurtenis op de foto was er méér energie beschikbaar. Hoe kun je dat zien?
c. Tijdens het maken van de foto was het magneetveld loodrecht op het vlak van de foto naar beneden gericht. Welke van deze sporen is het positron?
d. Welke van de twee gevormde deeltjes heeft de grootste snelheid?

3. ANNIHILATIE
a. Met hoeveel eV energie komt de gezamenlijke massa van een proton en een anti-proton overeen?
b. Hoe groot is de kinetische energie van een proton met een snelheid van $1 \cdot 10^8$ m/s (een vierde van de lichtsnelheid)?
c. Als een proton en een anti-proton met elkaar in aanraking komen, komt er energie vrij. Mag je bij de berekening van de grootte van die energie de kinetische energie van de deeltjes verwaarlozen?

ALS JE SNELLER GAAT, WORD JE ZWAARDER

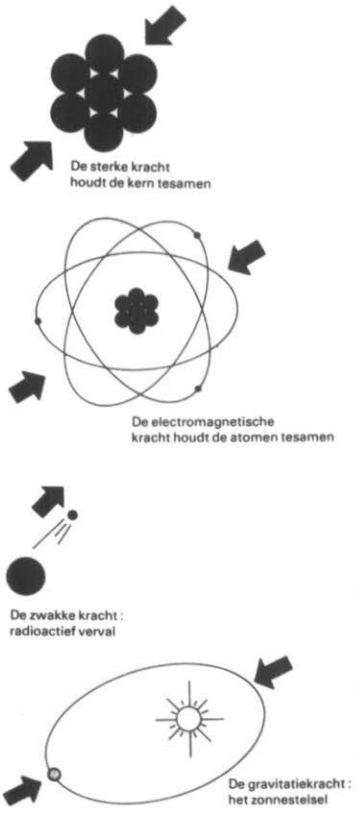
Einstein bracht massa en energie met elkaar in verband in de theorie die bekend staat onder de naam *relativiteitstheorie*. Dit is een zeer veelomvattende theorie, waarvan het verband tussen massa en energie een onderdeel is. Ook stelt de theorie dat de massa van een voorwerp toeneemt, als de snelheid groter wordt. In het dagelijks leven merk je daar niets van: de snelheden zijn daar erg klein. Maar in een versneller speelt dat verschijnsel een zeer belangrijke rol. De massa van de protonen neemt toe, als hun snelheid groter wordt. Daarmee moet bijv. bij de berekening van de grootte van de magnetische veldsterkte rekening gehouden worden.
We noemen de massa van een voorwerp als het stilstaat de *rustmassa* m_0. De massa m van een voorwerp met een snelheid v kan dan berekend worden met de volgende formule:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

4.
Uit de relativiteitstheorie volgt ook dat een voorwerp geen snelheid kan hebben groter dan de lichtsnelheid.
a. Hoe kun je aan deze formule zien dat de massa toeneemt als de snelheid groter wordt?
b. Hoe groot wordt de massa als de snelheid nagenoeg even groot is als de lichtsnelheid?
c. Waarom kan de snelheid van een deeltje volgens deze theorie nooit groter worden dan de lichtsnelheid?

5.
In een synchrotron worden protonen versneld. Op een bepaald ogenblik hebben ze een snelheid die gelijk is aan 90% van de lichtsnelheid. De totale energie van zo'n proton wordt gegeven door $E = m \cdot c^2$.
a. Hoe groot is de totale massa van een proton bij die snelheid?
b. Bereken de energie van het proton.
c. Vergelijk deze energie met de maximale energie die een proton in een grote versneller kan bereiken. Wat kun je nu zeggen over de maximale snelheid van de protonen in een dergelijke versneller.

6.6 KRACHTEN TUSSEN DEELTJES



De vier basiskrachten.

Bij de bestudering van de materie zijn niet alleen de elementaire deeltjes, maar ook de *krachten* tussen die deeltjes van belang. Door die krachten blijven de atomen van een vaste stof bij elkaar, blijft het elektron bij de kern, vormt een deeltje een spoor in een bellenvat enz. In het dagelijks leven kennen we zeer veel verschillende krachten: wrijvingskracht, zwaartekracht, veerkracht, kracht van een motor enz. De natuurkunde is erin geslaagd al deze verschillende krachten terug te brengen tot vier verschillende soorten:

– de *sterke kracht*

Deze kracht zijn we nog niet tegengekomen. Toch is zonder de sterke kracht (of kernkracht) het bestaan van een atoom in het model van Rutherford niet te begrijpen. De afstotende krachten tussen de protonen in de kern zouden de kern meteen uit elkaar laten vallen. Er is dus kennelijk een andere, zeer sterke kracht die de kerndeeltjes bijeen houdt. Dat doet de *sterke kracht* (of *kernkracht*).

– de *elektromagnetische kracht*

In het thema 'Elektrische Machines' en in hoofdstuk 3 van dit thema ben je de elektrische en de magnetische kracht tegengekomen. In de vorige eeuw is Maxwell erin geslaagd een theorie op te stellen waarin beide krachten beschreven worden. We spreken dan ook over de *elektromagnetische kracht*.

– de *zwakke kracht*

De *zwakke kracht* speelt een rol bij het uiteenvallen van deeltjes. Ze is daardoor de oorzaak van vele radioactieve verschijnselen.

– de *zwaartekracht*

De *zwaartekracht* werkt op alle deeltjes en is de zwakste van de vier. Toch houdt de zwaartekracht het zonnestelsel bijeen en zorgt zij ervoor dat je niet van de aarde geslingerd wordt. Als het om afzonderlijke deeltjes gaat, is de zwaartekracht echter zeer klein.

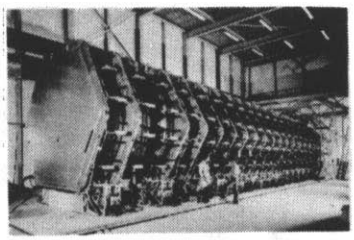
Niet alle deeltjes ondergaan de invloed van alle krachten. De elektromagnetische kracht werkt bijv. alleen op geladen deeltjes. Ook zijn niet alle deeltjes gevoelig voor de sterke kracht. In de volgende paragraaf zullen we dat gebruiken om orde te scheppen in een grote verzameling deeltjes.

HET NEUTRINO

Het *neutrino* heeft al voor heel wat opschudding gezorgd. Het was onderwerp van felle discussies rond 1930, en vereist de allergrootste apparatuur voor onderzoek in de huidige tijd. Wat is het probleem?

Bij sommige radioactieve processen worden elektronen uitgezonden. De resultaten van het onderzoek daarvan waren schokkend: telkens weer bleek er een hoeveelheid energie te verdwijnen. Eén van de belangrijkste wetten van de natuurkunde, de wet van behoud van energie, stond op het spel. Er moest een oplossing gevonden worden. Pauli, en later ook Fermi, stelde dat er nóg een deeltje uitgezonden werd. Dat deeltje zou de resterende energie en impuls met zich meedragen. Hij doopte het *neutrino*, en beschreef zijn poging in een brief aan collega's als 'een wanhopige poging om de wet van behoud van energie te redden'. Het neutrino zou een neutraal deeltje zijn met een zeer kleine massa en ongevoelig voor alle krachten behalve de zwakke kracht.

Een aantal van zijn collega's, waaronder Bohr, verwierp de poging. Zij waren bereid de grote stap te zetten, en de algemene geldigheid van de wet van behoud van energie op te geven. Pas in 1936, toen de neutrino-theorie succes bleek te hebben, waren zij bereid het neutrino te aanvaarden. Het neutrino werd overigens pas in 1956 (twintig jaar later) experimenteel aangetoond.



Deze neutrino-detector is 20 m lang en weegt 1400 ton. Ondanks de omvang van de detector en de intensiteit van de neutrinobundel vinden er maar weinig botsingen plaats. De meeste neutrino's vliegen dwars door de detector heen.

Bij CERN worden neutrino's nader onderzocht. Daarvoor is een gigantische installatie nodig. De protonenbundel van de versneller valt op een trefplaat van koper, waarna er nieuwe deeltjes ontstaan: voornamelijk pionen. In een 400 m lange tunnel vervallen deze pionen daarna tot muonen en neutrino's. De bundel wordt daarna door een blok ijzer met een lengte van 200 m en een laag aarde van 600 m geleid. De muonen blijven daarin achter, terwijl de neutrino's er nauwelijks hinder van ondervinden. De neutrinobundel valt dan op een trefplaat. Deze bestaat uit 78 achter elkaar geplaatste platen marmer van elk 8 cm dik. Over het geheel wordt een magneetveld aangelegd en er worden zo'n 14000 detectoren aangebracht. Als een neutrino botst met een atoomkern van het marmer, worden er soms nieuwe deeltjes gevormd. De bestudering daarvan verschaft nieuwe informatie over het neutrino en over de eigenschappen van de zwakke kracht. In 1980 bleek uit zo'n onderzoek dat de massa van het neutrino ongeveer 1/30 van de massa van het elektron bedraagt. Het neutrino is daarmee het lichtste deeltje dat bekend is.

6.7 EEN ONOVERZICHTELIJKE VERZAMELING

Naarmate het onderzoek verder gaat, groeit ook de lijst van elementaire deeltjes. In 1932 zijn het er vier, maar in 1947 is het aantal al gegroeid tot twaalf. Daarna gaat het hard. De steeds krachtiger wordende versnellers veroorzaken in de vijftiger jaren een golf van ontdekkingen van nieuwe deeltjes, waaronder ook de anti-deeltjes van het muon, het proton en het neutron. Ook worden er steeds zwaardere deeltjes gevonden, zoals kaonen (K), lambda-(Λ), sigma-(Σ) en ksi-(Ξ) deeltjes.

Rond 1964 zijn er ongeveer tachtig deeltjes bekend. Die deeltjes verschillen van elkaar in eigenschappen als massa, lading, gemiddelde levensduur en gevoeligheid voor krachten.

Elk deeltje heeft zijn eigen (rust)*massa*, uitgedrukt in MeV.

Alle deeltjes blijken een *lading* te hebben, die een veelvoud is van de elementaire lading ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C). Voor het gemak wordt die lading met dat veelvoud aangegeven. Zo betekent $q = +2$ dat de lading van het deeltje positief en twee maal zo groot is als de elementaire lading.

De *gemiddelde levensduur* is zeer uiteenlopend. Sommige deeltjes, zoals het elektron, en het proton, worden als stabiel beschouwd. Van het proton is men daar niet zo zeker van, getuige het krantenartikel op blz. 72.

Proton 1

Japanse onderzoekers hebben donderdag meegedeeld dat ze verschijnselen hebben waargenomen die er op wijzen dat elementaire deeltjes zoals protonen, die volgens sommige fysici eeuwig bestaan, uiteen kunnen vallen in kleinere deeltjes.
De onderzoekers zeiden dat ze tijdens vijf maanden van waarnemingen in een watertank diep in een verlaten kolenmijn twee voorbeelden hebben ontdekt van wat het uiteen vallen van een proton zou kunnen zijn. Het team, van het Japanse nationale laboratorium voor hoge-energie fysica en de universiteiten van Tokio en Tsukuba, analyseerde gegevens van de twee gebeurtenissen en concludeerde dat deze "niet kunnen worden verklaard door conventionele theorieën in de natuurkunde," aldus de fysicus Kasuke Takahashi van het nationale laboratorium in een interview.
Protonen, die als bouwstenen in alle atoomkernen zitten, zouden volgens conventionele theorieën eeuwig bestaan. Volgens een geavanceerd concept, dat de *grote unificatietheorie* wordt genoemd en de fundamentele natuurkrachten onder één noemer wil brengen, hebben protonen echter een gemiddelde levensduur van ongeveer 10^{32} (10 gevolgd door 31 nullen) jaar.

Protonen 2

Daar het heelal volgens de huidige inzichten ongeveer 10 tot 20 miljard jaar geleden is ontstaan is de gemiddelde levensduur van protonen 10^{22} langer dan die van het heelal. Maar sommige protonen desintegreren al voordat ze hun gemiddelde levensverwachting hebben bereikt, zei het teamlid Katsuji Arisaka van de Universiteit van Tokio in een interview.

Bij één van de waargenomen gebeurtenissen spleet een proton in twee kleinere elementaire deeltjes een muon en een eta-meson. In het andere geval viel een proton uiteen in een positron (anti-elektron) en een omega-meson.
Bij elke splijting werd een deel van de massa van het proton omgezet in energie, die zich manifesteerde in de vorm van een kegel van extreem zwak licht. De kegels werden opgepikt door enkele van de 1000 hooggevoelige lichtdetectoren die aan de binnenwanden van de watertank waren bevestigd, en de gegevens werden geregistreerd door een computer, aldus Arisaka.
De tank bevat 3000 ton gedestilleerd water en bevindt zich op 1000 meter onder de grond in de afgedankte Kamioka mijn in de centraal-Japanse provincie Gifu. Deze plek voor het experiment werd gekozen om de biljoenen protonen in het water af te schermen tegen kosmische straling, die de waarnemingen zou kunnen verstoren.

De Volkskrant, 5-1-1984.

Nagenoeg alle andere deeltjes hebben een zeer beperkte levensduur en vervallen tot deeltjes met een kleinere massa, waarbij energie vrijkomt.
Het neutron is een buitenbeentje. In de kern is het stabiel, maar in vrije toestand bestaat het gemiddeld maar 918 s. Dat is zeer lang in vergelijking met de levensduur van de meeste andere deeltjes. Pionen bijvoorbeeld hebben een gemiddelde levensduur van $2{,}6 \cdot 10^{-8}$ s.
Tenslotte verschillen de deeltjes in hun *gevoeligheid voor krachten*.
Sommige deeltjes zijn gevoelig voor de kernkracht en andere niet. De deeltjes die er wél gevoelig voor zijn noemen we *hadronen*. De hadronen worden weer onderverdeeld in twee groepen: de *mesonen* (lichter dan protonen) en de *baryonen* (zwaarder dan of even zwaar als protonen).
Deeltjes die niet gevoelig zijn voor de kernkracht noemen we *leptonen*. Bij deze groep horen bijvoorbeeld het elektron, positron, muon, neutrino en hun antideeltjes.

Deze opsomming van eigenschappen is lang niet volledig. Er zijn nog een aantal andere zoals de vreemdheid, isospin, spin en de pariteit. Het zou te ver gaan om op al deze eigenschappen in te gaan.

1.
De massa van een elementair deeltje wordt vaak gegeven in een energie-eenheid.
a. Waarom is dat mogelijk?
b. Wat is hiervan het voordeel?
c. Bereken de massa van een proton (938 MeV) en van een J/ψ deeltje (3100 MeV) in kg.

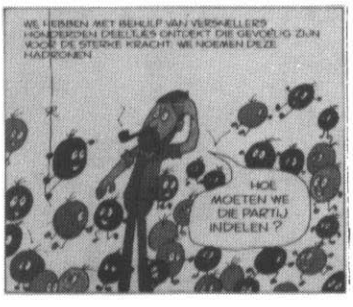
2.
De massa van een J/ψ deeltje is ongeveer te vergelijken met die van een lithiumkern. Waarom wordt het J/ψ deeltje wél, en de Li-kern níet als een elementair deeltje beschouwd?

HET GRIEKSE ALFABET

kleine letter	hoofd-letter	Griekse naam	Nederlands teken
α	A	alpha	a
β	B	bêta	b
γ	Γ	gamma	g
δ	Δ	delta	d
ε	E	e-psilon	e
ζ	Z	zèta	z
η	H	èta	è
θ	Θ	thèta	th
ι	I	jota	i(j)
κ	K	kappa	k
λ	Λ	la(m)bda	l
μ	M	mu	m
ν	N	nu	n
ξ	Ξ	xi	x
o	O	o-mikron	o
π	Π	pi	p
ρ	P	rho	r
σ	Σ	sigma	s
τ	T	tau	t
υ	Y	u-psilon	u
φ	Φ	phi	f(ph)
χ	X	chi	ch
ψ	Ψ	psi	ps
ω	Ω	o-mega	oo

DE NAAMGEVING VAN NIEUWE DEELTJES
Het Nederlands alfabet kent 26 letters. Met de hoofdletters meegerekend kunnen we dus over 52 symbolen beschikken om natuurkundige grootheden en eenheden aan te duiden. Al deze symbolen zijn reeds één of meer keer voor dat doel gebruikt. Men is er dan ook toe overgegaan om het Griekse alfabet in te schakelen. In voorgaande thema's hebben we al een aantal malen Griekse letters voor dat doel gebruikt, bijv. het symbool Ω voor de eenheid van weerstand.
We gebruiken die Griekse letters meestal óók om deeltjes te benoemen. Daarbij geven we een antideeltje aan met een streepje boven de letter. Door deze ingreep wordt het aantal beschikbare symbolen verdubbeld.

6.8 ORDENING VAN ELEMENTAIRE DEELTJES



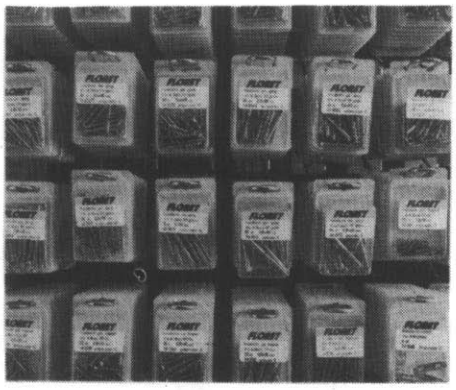
De ontdekking van het periodiek systeem in 1842 werd toen begroet als een zeer welkome *ordening* van de elementen die in de loop van de jaren ontdekt waren. Op grond van die ordening werden een aantal nieuwe elementen *verondersteld*, en later ook gevonden. Het zoeken wordt aanzienlijk eenvoudiger als je weet waar je op moet letten.
Inmiddels zijn er meer dan 200 elementaire deeltjes ontdekt, en ook hier is een ordening dringend noodzakelijk. Ordenen doe je op grond van *eigenschappen*. Als je de school-

boeken ordent, kun je ze per vak bij elkaar zetten. Dat is het handigste. Je kunt ook alle boeken van dezelfde kleur bij elkaar zetten. Dat is misschien het mooiste. En als de planken van de boekenkast niet dezelfde afstand hebben, zet je de grote boeken op de ene en de kleine boeken op de andere plank. Hoe je ze ordent, hangt dus af van het doel dat je met de ordening hebt.

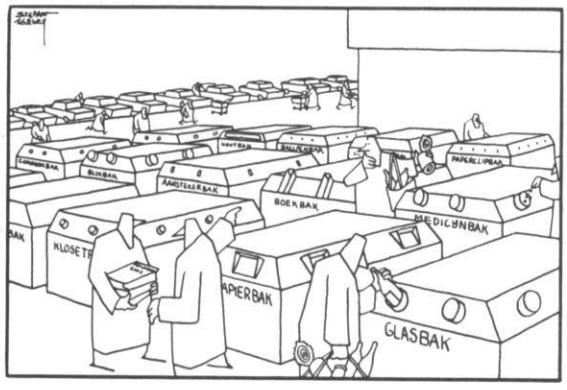
zie aanwijzingen onder de woonplaatsnaam **leerdam (03451)**

46 02 **neef-van steijn**, g c j, griend 2
27 89 **neef**, w, kruiswerf 27
42 75 **neef**, c, spartaveld 23
23 36 **neeleman**, prof dr ir d, dimmerin 27
neet, m a, dieltik 26 (03454) 17 21
36 28 **neet-donatz**, j b m, kruiswerf 9
94 79 **neon glasblazerij r buijs**, energieweg 15
88 78 **nettorama verbruikersmarkt bv**, markt 8
85 47 **neumann**, l e, groenzoom 52
53 04 **newsr**, g h, a v damstr 7
44 83 **niekerk**, m k, wederikin 24
85 96 **nierop-groot**, j, dimmerin 41, bedrijfsl kon aannemingsmij van drunen bv
30 25 **niet**, j, wd, kerkstr 27
48 14 **nieuwboer**, j, v st aldegondestr 9
59 73 **nieuwboer**, r, klein oosterwyk 5
43 07 **nieuwboer**, w, lingezoom 8
23 87 **nieuwenhuis**, h, dimmerin 38
48 84 **nieuwenhuis**, a j, spartaveld 41
62 28 **nieuwenhuize**, c w a, van, pr beatrixstr 24
24 72 **nieuwenhuize**, m j, burg meesstr 7
93 29 **nieuwenhuize**, j c, burg meesstr 9, keurm
28 75 **nieuwenhuize**, j m, v oldenbarnev str 1
92 40 **nieuwenhuize**, m, oranjehof 99
70 04 **nieuwold**, j, veldulstr 3
37 28 **niftrik**, j, van, schalksewg 73, verl
40 21 **oort**, d j, van, f radewynsstr 25
40 03 **oosten**, j, v oldenbarnev str 84
89 64 **oosterom**, r, van, b l a duetzstr 20
36 94 **oosterom**, j, van, v oldenbarnev str 70
67 02 **oosterom**, c, schoolstr 33
95 11 **oosterwijk**, c, horndk 55, ontlerw
95 85 **oosthoek uitgevers maatschappij bv**, industrieweg 15
58 07 **oostra**, l, akkerwindeln 7
26 21 **oostrom**, m, westwal 20, metaalhdl en slopersbdr
50 90 **oostrum**, g h j, van, sperwerln 48
38 03 **oostveen**, a m, van, schalksewg 76/a
72 48 **ooijen**, a c, van, drossaardsln 31
41 74 **ooijen**, h, van, eiland 1/k212
ooijen, a, van, hoogeind 42/a, landbouwbdr (03458) 3 04
70 90 **ooijen**, f t, van, iepstr 40
59 33 **ooijen**, h, van, d karsstr 38
82 50 **ooijen**, j, van, v lannoystr 24
41 89 **ooijen**, g j, van, f v ter leedestr 35
45 36 **ooijen**, w j, van, lisdoddeln 61
32 24 **ooijen**, g a, van, pr marykestr 31
64 12 **ooyen**, j, van, pr mauritsstr 8
94 92 **ooijen**, n, van, oranjehof 35
78 35 **ooyen**, j b, q de palmeln 1
23 43 **ooijen**, a, van, f radewynsstr 20
56 73 **ooijen**, j, van, rozenstr 19
47 13 **ooijen**, g, van, rozenstr 20
46 90 **ooyen**, a w, van, j c rysdykstr 16
38 10 **ooyen-van ee**, w h, van,

Ordenen op alfabet.



Ordenen naar afmeting.



Ordenen naar grondstof.

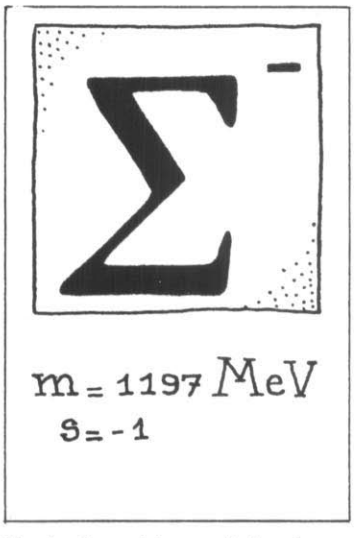
1.

De leerlingen van een school zijn geordend in klassen. Binnen de klas kun je de leerlingen weer opnieuw ordenen, bijv. voor het doen van groepswerk.

a. Op welke eigenschap zou jij de leerlingen ordenen om:

- naar de film te kijken in de gymzaal;
- een wedstrijd te spelen voor het schoolvolleybaltoernooi;
- het vormen van discussiegroepjes over verliefdheid.

b. Geef nog vijf andere manieren om de leerlingen te ordenen.



Voorkant van één van de kaarten uit het spel.

In paragraaf 6.7 is al een begin gemaakt met een ordening van de elementaire deeltjes. We hebben de deeltjes in drie groepen verdeeld: leptonen, mesonen en baryonen. De gedachte dat al die elementaire deeltjes misschien weer bestaan uit nog kleinere deeltjes ligt voor de hand. Gell-Mann en Zweig spraken in 1962 die veronderstelling uit, en noemden die deeltjes *quarks*.

We zoeken nu een ordening van elementaire deeltjes, waarbij met zo weinig mogelijk quarks volstaan kan worden. We hebben een kaartspel ontworpen, om je te laten zien hoe een dergelijke ordening verloopt. Op elk kaartje staan de naam en de gegevens van één deeltje.

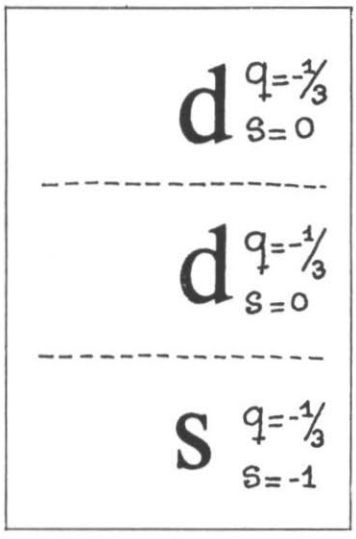
Op de voorkant van het kaartje vind je:

- de naam (meestal een Griekse letter);
- de lading (midden of rechtsboven);
- de massa *m* (in MeV);
- de vreemdheid *s*; deze eigenschap zegt iets over de levensduur van het deeltje.

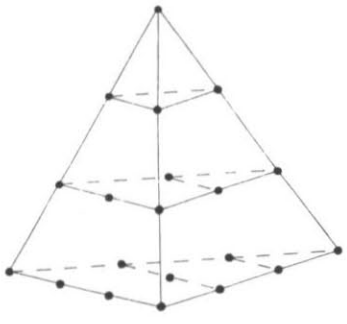
De andere eigenschappen van elementaire deeltjes laten we hier verder buiten beschouwing.

In het spel vind je groene en blauwe kaartjes. Op de blauwe kaartjes staan deeltjes die pas ná 1962 ontdekt zijn.

We beginnen met het ordenen van de baryonen, daarna bekijken we de mesonen en tenslotte de leptonen.



Achterkant van één van de kaarten uit het spel.



baryonen

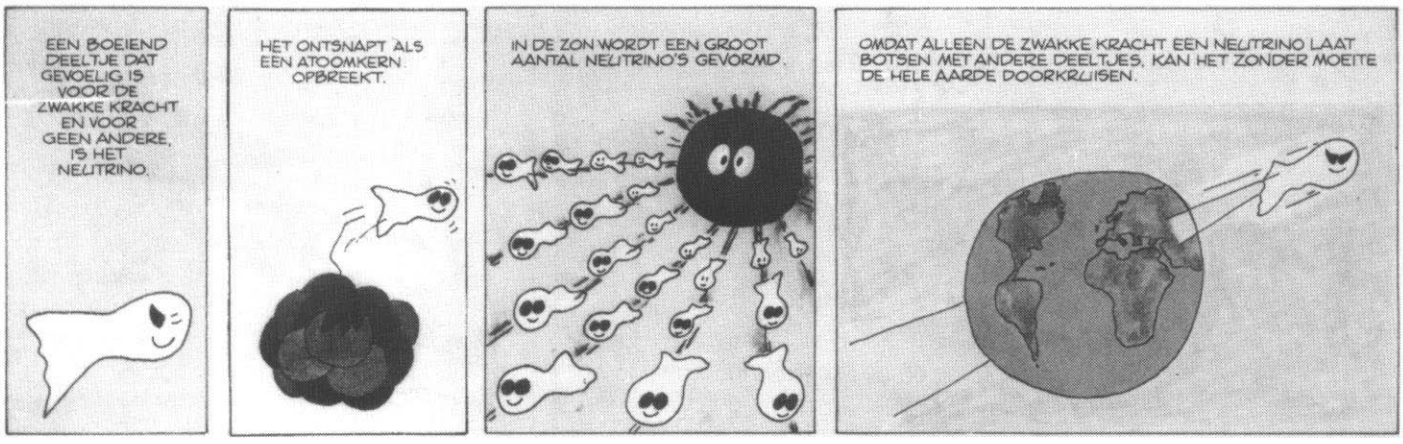
2. ORDENEN EN VOORSPELLEN
Zoek de rechthoekige kaartjes uit. Leg de blauwe kaartjes maar even apart.
a. Let nu even alleen op de lading en de vreemdheid. Probeer de kaartjes zó te leggen, dat lading en vreemdheid netjes geordend zijn. (Als lading en vreemdheid hetzelfde zijn, leg je ze maar op elkaar.) Teken je ordening na, door telkens de naam en de lading te noteren.
b. Uit de figuur zou je nu kunnen veronderstellen dat er nóg een deeltje moet zijn. Waar is de lege plaats? Kun je de lading en de vreemdheid van dat deeltje voorspellen?
c. Draai nu de kaartjes om, zonder de ordening te verstoren. Op de achterzijde vind je een driedeling in quarks, met in elk gedeelte:
– een symbool voor de desbetreffende quark: u, d en s;
– de lading;
– de vreemdheid;
Gell-Mann veronderstelde dat baryonen uit drie quarks zijn opgebouwd.
d. Controleer voor drie kaartjes of de lading en de vreemdheid van de quarks kloppen met de lading en vreemdheid van het deeltje.
e. Bekijk de ordening goed en beschrijf deze in woorden.
f. Uit welke quarks zou het nog ontbrekende deeltje samengesteld zijn?
g. In 1962 werd dat ontbrekende deeltje gevonden en Ω^--deeltje gedoopt. Zoek dat deeltje op bij de blauwe kaartjes, en ga na of de voorspelde eigenschappen kloppen.

3. DRIEDIMENSIONAAL ORDENEN
Na 1964 werden er nieuwe deeltjes ontdekt die in deze ordening niet pasten. Het model moest uitgebreid worden met een vierde quark, de c-quark. De driehoek werd nu een piramide.
a. Welk deeltje zou jij in de top van de piramide plaatsen?
b. Neem één van de zijvlakken van de piramide over, en teken die in je schrift. Schrijf de quarkcombinatie bij elk deeltje.
c. Pak nu de blauwe kaartjes erbij. Dat zijn de baryonen die na 1962 ontdekt zijn. Welke plaats hebben ze op de piramide?

mesonen
De mesonen pasten niet in dit model: daarvoor moest iets anders gevonden worden. De vierkante kaartjes stellen de mesonen voor. Een ordening op basis van de eigenschappen op de voorkant laten we nu achterwege, omdat die erg moeilijk is.

4.
a. Zoek de vierkante kaartjes uit en leg de blauwe weer even opzij. Je ziet dan dat elk meson in het model bestaat uit een quark en een anti-quark (aangegeven met een streepje, bijv. $\overline{u}$).
b. Orden de kaartjes in één of ander regelmatig opgebouwd patroon. Beschrijf je ordening. (Overigens: het hoeft geen driehoek te zijn.)
c. Neem nu ook de vierkante blauwe kaartjes erbij. Je ziet dat er niet alleen een c-quark maar ook nog een b-quark nodig was om het model rond te krijgen. Breid de figuur uit door ook deze kaartjes een plaats te geven.
d. Welke mesonen kunnen nu op grond van deze figuur voorspeld worden?

leptonen
De overgebleven driehoekige kaartjes stellen de leptonen voor. Men heeft nog geen idee hoe die zijn samengesteld en hoe hun relatie tot de quarks is. Dat zijn enkele van de vele vragen waarop nog een antwoord gevonden moet worden.



Er zijn drie verschillende neutrino's, en dus ook drie anti-neutrino's. Ze behoren alle tot de groep van de leptonen.

5. PROEFWERK UIT 1964

a. Hoeveel elementaire deeltjes bestaan er?

b. Hoe kun je nieuwe deeltjes maken?

c. Waaruit kunnen elementaire deeltjes bestaan?

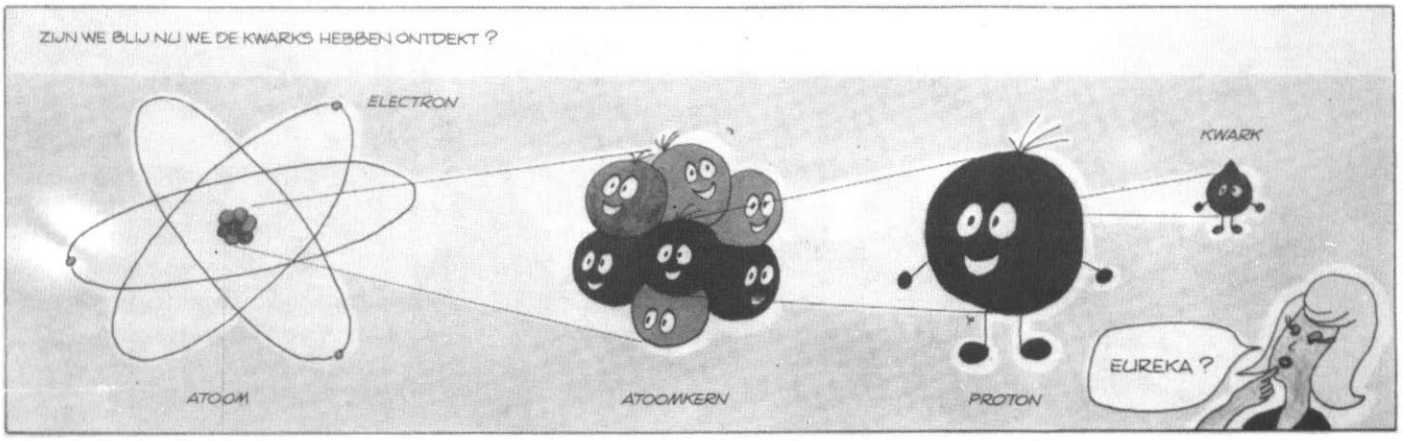
6.9 QUARKS NADER BESCHOUWD

In het kaartspel heb je gezien dat het ordenen van een groot aantal experimentele gegevens, in dit geval deeltjes, niet eenvoudig is. Daar bleek ook dat een goede ordening je op het spoor kan zetten van een theorie. In hun quark-theorie gingen de Amerikanen Gell-Mann en Zweig er vanuit dat alle hadronen opgebouwd zijn uit quarks. Om tot een bevredigende indeling te komen waren er zes quarks nodig: u (up), d (down) en s (strange) en hun antiquarks $\bar{u}$, $\bar{d}$ en $\bar{s}$. Ze namen aan dat een baryon bestaat uit drie quarks: bijv. het proton uit uud en het neutron uit udd.

Mesonen bevatten een quark en een anti-quark: bijv. π^+ bevat $u\bar{d}$. Zoals al op de kaartjes te zien was, is de lading van een quark niet een veelvoud van de elementaire lading, maar een gedeelte ervan.

De u- en de d-quarks zijn voldoende om de bouw van alle in de natuur voorkomende materiedeeltjes te beschrijven. Deeltjes met een s-quark noemt men 'vreemde' deeltjes. Het meest 'vreemde' deeltje heet Ω^-; het bestaat uit drie s-quarks. Rond 1963 was dit het zwaarste deeltje (m = 1671 MeV) dat bekend was.

Op theoretische gronden voorspelde vervolgens Glashow dat er nog een vierde quark zou bestaan: c (charm = tover). In 1974 werd deze theorie bevestigd door de ontdekking van het J/ψ-deeltje (Gipsy genaamd). Dit is een meson $c\bar{c}$ met een massa van 3100

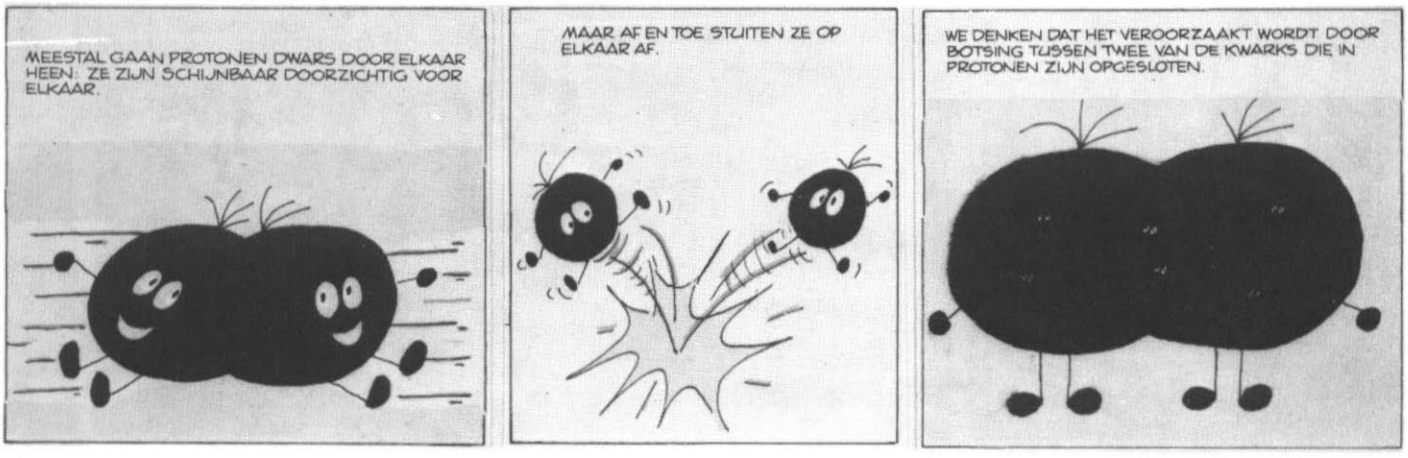


Alsmaar kleiner en alsmaar moeilijker voorstelbaar. En weer neemt het aantal deeltjes toe. Zouden er dan nóg kleinere deeltjes bestaan?

MeV. Daarna zijn nog verschillende andere toverdeeltjes ontdekt; alle deeltjes met tenminste één c-quark.
Inmiddels neemt men aan dat er nóg twee quarks bestaan: b (bottom) en t (top), en dus ook de anti-quarks $\bar{b}$ en $\bar{t}$. In 1978 werd het eerste deeltje met een b-quark gevonden: het υ(upsilon)-deeltje $b\bar{b}$ met een ongekend hoge massa van 9460 MeV. Het t-quark is nog niet aangetoond, waarschijnlijk omdat het zeer zwaar is en de huidige versnellers voor het ontstaan daarvan nog niet voldoende energie kunnen leveren.

de speurtocht naar quarks

Wat is nu eigenlijk een quark, hoe ziet het er uit en komt het ook geïsoleerd voor? Door elektronen met zeer hoge energie te laten botsen met protonen kwam Ferguson in 1968 tot de conclusie dat er zich 'harde pitten' in de protonen zouden moeten bevinden. Dat zouden dan de quarks kunnen zijn. Er is ook veel gezocht naar vrije quarks: in kosmische straling, met versnellers, in aardse materie, in maanrotsen, op de oceaanbodem enz. Ondanks al die onderzoekingen is het nog nooit gelukt een vrije quark aan te tonen. Vele onderzoekers zijn nu van mening dat het onmogelijk is om quarks vrij te maken. Daarvoor zouden dermate hoge energieën nodig zijn, dat zich onmiddellijk nieuwe deeltjes zouden vormen. Toch gaat de speurtocht naar quarks onverminderd voort en worden er nieuwe, steeds krachtiger versnellers gebouwd. Een overzicht daarvan vind je op blz. 65.

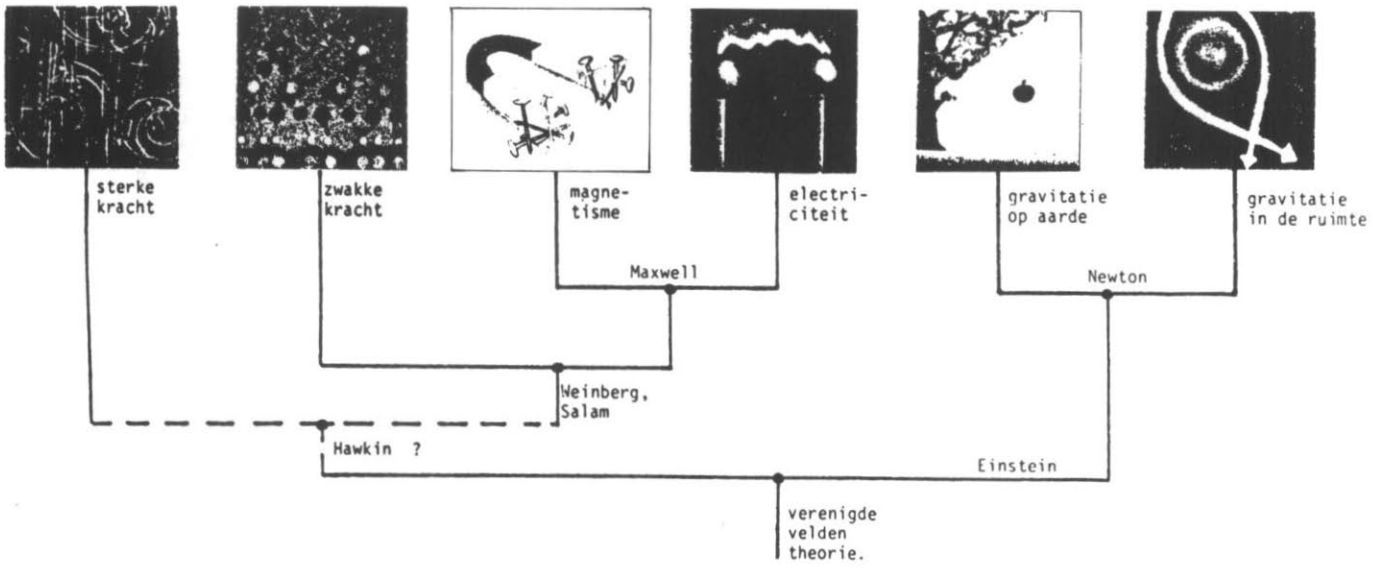


BESTAAN QUARKS EIGENLIJK ECHT?
Niemand heeft ooit een quark gezien en vele natuurkundigen geloven dat een quark ook nooit zichtbaar gemaakt zal kunnen worden. Bestaan quarks dan wel? Gell-Mann zei daarover: 'Het doet er niet toe of je in het bestaan van quarks gelooft of niet, het werkt óók als je er niet in gelooft.' Hij bedoelt daarmee dat de quark-theorie een groot aantal verschijnselen verklaart, en in staat is bij vele experimenten de resultaten juist te voorspellen. Meer dan dat kan de natuurkunde niet doen. De natuurkunde kan alleen de werkelijkheid om ons heen zo goed mogelijk waarnemen en een model opstellen. Dat model moet die werkelijkheid zo goed mogelijk weergeven en zo nauwkeurig mogelijk voorspellingen doen. Zo vormt de theorie van Newton geen bewijs voor het 'bestaan' van de zwaartekracht: het is niet meer dan een model met een grote voorspellende kracht.
Albert Einstein zei er het volgende van:
'Natuurkundige modellen zijn vrije scheppingen van de menselijke geest en ze worden niet, hoewel dit soms zo lijkt, uitsluitend bepaald door de buitenwereld. In ons streven de werkelijkheid te begrijpen lijken we een beetje op de man die het mechanisme van een gesloten horloge probeert te doorgronden. Hij ziet de wijzerplaat en de bewegende wijzers, hij hoort het zelfs tikken, maar hij is niet in staat om het instrument te openen. Als hij vindingrijk is, kan hij zich een beeld vormen van een mechanisme dat verantwoordelijk is voor alles wat hij waarneemt, maar hij zal er nooit helemaal zeker van zijn dat zijn voorstelling de enige is die zijn waarneming verklaart. Nooit zal hij in staat zijn zijn voorstelling van zaken te vergelijken met het echte mechanisme en hij kan zich zelfs de mogelijkheid van de betekenis van zo'n vergelijking niet voorstellen.'

6.10 VERDER ONDERZOEK

In deze paragraaf proberen we je een overzicht te geven van de resultaten van de huidige hoge-energie-fysica. Misschien zul je niet alles begrijpen. Dat is ook niet nodig om een indruk te krijgen van de richting waarin het onderzoek zich beweegt. We beperken ons hier tot de beschrijving van de krachtwerkingen en een tabel van elementaire deeltjes.

krachtwerkingen
In paragraaf 6.6 ben je vier basiskrachten tegengekomen. De onderstaande figuur geeft een mooi beeld van het streven van natuurkundigen het aantal verschillende krachten



zoveel mogelijk te beperken. Men streeft naar één theorie, die in staat is álle krachtwerkingen te beschrijven. In het begin van de figuur zie je zes verschillende krachten. Het heeft al veel onderzoek gekost om zover te komen. Zo is het niet voor de hand liggend dat je de kracht van een permanente magneet en die van een elektromagneet met één theorie kunt beschrijven.

1.
Waarom zouden natuurkundigen zo verbeten streven naar het vinden van één basiskracht?

2.
Dat streven naar één basiskracht is niet iets van de laatste tijd. Newton leefde in de 17e en Maxwell in de 18e eeuw.
a. Wat was de rol van Newton in dit proces?
b. En wat was de rol van Maxwell?

De Britse fysicus Stephen Hawkin lijdt aan een ongeneeslijke ziekte, waardoor bij bijna volledig is verlamd. Al zijn berekeningen moet hij uit het hoofd doen en deze aan zijn naaste medewerkers dicteren. Op deze manier heeft hij baanbrekende ontdekkingen gedaan op het gebied van de zwaartekracht.

De laatste 25 jaar van zijn leven heeft Einstein gewerkt aan de vereniging van de zwaartekracht en de zwakke kracht in één theorie. Het mislukte.
In 1935 publiceerde de Japanse natuurkundige Yukawa een artikel waarin hij de krachtwerking op een geheel nieuwe manier beschreef. Tot dan toe werd krachtwerking beschreven met een *veld*. Yukawa stelt dat krachtwerking plaatsvindt door het uitwisselen van deeltjes, de zogenaamde *wisselwerkingsdeeltjes*. Zo trekken bijvoorbeeld het elektron en het proton in een waterstofkern elkaar aan door voortdurend deeltjes uit te wisselen. Elke krachtwerking heeft zijn eigen wisselwerkingsdeeltjes. Zo zijn er voor de sterke kracht acht verschillende *gluonen*, voor de zwakke kracht drie verschillende *bosonen*, voor de elektromagnetische kracht is er het *foton* en tenslotte voor de zwaartekracht het nog nooit aangetoonde *graviton*.
Weinberg en Salam werkten in 1969 een theorie uit, waarin zowel de bosonen als het foton prima pasten. Nadat de Nederlandse natuurkundige 't Hooft in 1971 de laatste problemen opgelost had, was de theorie voor de *elektrozwakke kracht* geboren. En toen waren er nog maar drie.
De Britse fysicus Hawkin werkt nu aan een theorie die misschien weer een stap verder is op de weg naar die ene theorie, het droombeeld van vele fysici.

elementaire deeltjes
Het totale aantal deeltjes is weer behoorlijk groot, zoals je in onderstaande tabel kunt zien. In totaal zijn het er 37. Voorlopig zal men dan ook blijven zoeken naar nieuwe structuren, zodat met minder deeltjes volstaan kan worden. De nieuwe versnellers zullen in dit proces een belangrijke rol spelen.

quarks		anti-quarks	leptonen		anti-leptonen	wisselwerkings deeltjes	
up	u	$\overline{u}$	elektron	e^-	$\overline{e}^+$	gluon (8 soorten)	g
down	d	$\overline{d}$	neutrino	ν_e	$\overline{\nu}_e$	boson	W^+
strange	s	$\overline{s}$	muon	μ^-	$\overline{\mu}^+$	boson	W^-
charm	c	$\overline{c}$	neutrino	ν_μ	$\overline{\nu}_\mu$	boson	Z°
bottom	b	$\overline{b}$	tau	τ^-	$\overline{\tau}^+$	foton	γ
top*	t	$\overline{t}$	neutrino*	ν_τ	$\overline{\nu}_\tau$	graviton*	

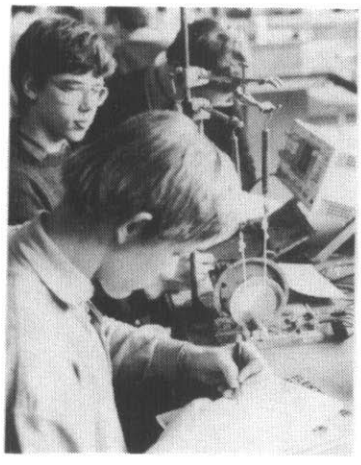
* nog niet aangetoond, wel theoretisch voorspeld.

3.
Bestudeer het krantenartikel op blz. 80. Heb je alles begrepen? Welke punten uit dit artikel ben je in dit hoofdstuk tegengekomen? Begrijp je het artikel nu beter dan voordat je dit hoofdstuk gedaan had?

Z-deeltje

Een internationaal team van 126 onderzoekers in het Europese onderzoekcentrum voor hoge energie fysica CERN bij Genève lijkt voor de tweede keer in enkele maanden een elementair deeltje te hebben gevonden, waarvan het bestaan op theoretische gronden werd voorspeld en dat een rol speelt bij een van de vier fundamentele krachten in de natuur. Het gaat om het zogeheten Z^0 (Z-nul) deeltje, een van de drie dragers van de zogeheten zwakke kracht, die ten grondslag ligt aan radioactiviteit en de nucleaire processen die de zon en andere sterren doen branden. Afgelopen februari ontdekte dezelfde groep in Genève het W+ en W- deeltje die eveneens de zwakke kracht overbrengen.
Tot dusver is in de reusachtige deeltjesversneller in Genève slechts één gebeurtenis waargenomen die op een Z^0 deeltje wijst. Het CERN-team blijft dan ook voorzichtig met de conclusie dat het werkelijk het lang gezochte deeltje is. Een van de leiders, dr Carlo Rubbia van de Harvard Universiteit, zei deze week dat de groep graag nog een paar waarnemingen meer wil doen voordat ze met een definitieve aankondiging van de vondst komt. Maar dr Abraham Pais, een theoretisch fysicus van de Rockefeller Universiteit die de resultaten van de waarneming heeft gezien, heeft weinig twijfels. Hij noemde de ontdekking een van de grote momenten in de fysica van de 20ste eeuw en schatte een kans van drie tegen één dat het waargenomen deeltje inderdaad Z^0 is.
Het CERN-experiment werd gedaan in het Super Proton Synchrotron (SPS), een cirkelvormige machine met een omtrek van 7 kilometer die 40 meter onder de grond gedeeltelijk onder Zwitsers en gedeeltelijk onder Frans gebied is gebouwd. In deze deeltjes-racebaan worden protonen en antiprotonen in tegengestelde richtingen tot bijna-lichtsnelheid versneld, waardoor hun massa enorm toeneemt. Wanneer men de protonen en antiprotonen vervolgens op elkaar laat botsen vernietigen ze elkaar in een flits van energie waaruit allerlei andere deeltjes ontstaan. Bij een van deze botsingen werden de karakteristieken van een Z^0 deeltje waargenomen.
Wordt de ontdekking van het Z^0 deeltje bevestigd dan betekent dat een belangrijke steun voor het vermoeden van theoretische fysici dat de verschillende natuurkrachten — de elektromagnetische kracht, de zwakke kernkracht, de sterke kernkracht en misschien ook de zwaartekracht — in één theorie moeten kunnen worden verenigd. In tegenstelling tot het eerder gevonden W-deeltje past het Z^0 deeltje alleen in een verenigingstheorie. In elk geval geeft het bestaan er van een verdere bevestiging van de theorie dat de elekromagnetische kracht, die zowel een fietslamp doet branden als atomen en moleculen bij elkaar houdt, en de zwakke kernkracht uitingen zijn van één onderliggende „elektrozwakke" kracht.

De Volkskrant, 21-5-1983.



4. PROEFWERK UIT 19NU

a. Hoeveel quarks en andere elementaire deeltjes ken je?

b. Tot welke vier krachten kun je alle bestaande krachten herleiden?

c. Welke verbanden bestaan er tussen deze krachten?

5. PROEFWERK UIT 2010

Bedenk zelf drie vragen die in de natuurkundelessen van je (eventuele) kinderen gesteld zouden kunnen worden op een proefwerk.

6. DE MATERIE-TIJDBALK

In dit hoofdstuk hebben we met nóg meer details van materie kennisgemaakt. De bijbehorende categorie is die van 'het samengestelde nucleon' (nucleon = bouwsteen van de nucleus of kern).

a. Selecteer drie belangrijke jaartallen voor het ontstaan en de bevestiging van de quark-theorie.

b. Welke andere takken van wetenschap zijn van groot belang voor de huidige fase in het onderzoek naar de materie?

c. Probeer nu, op eenzelfde manier als het vervoervoorbeeld in hoofdstuk 1, de historische ontwikkeling van het denken over materie vast te leggen in een tijdbalk. Gebruik de volgende categorieën:

- vier elementen model;
- atoommodel;
- het samengestelde atoom;
- de samengestelde kern;
- het samengestelde nucleon.

d. Geef met behulp van arcering aan wat in de loop der tijd het overheersende materie-model in de wetenschap is geweest.

hoofdstuk 7

WIE ZAL DAT BETALEN

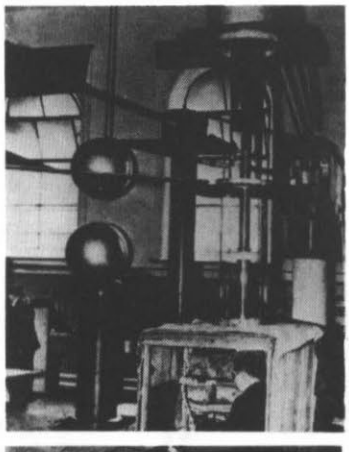
inhoud

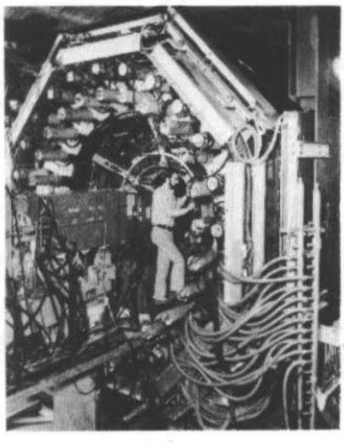
		blz.
7.1	veranderingen in het natuurkundig onderzoek	82
7.2	het belang van fundamenteel onderzoek	83
7.3	voor en tegen afwegen.	85

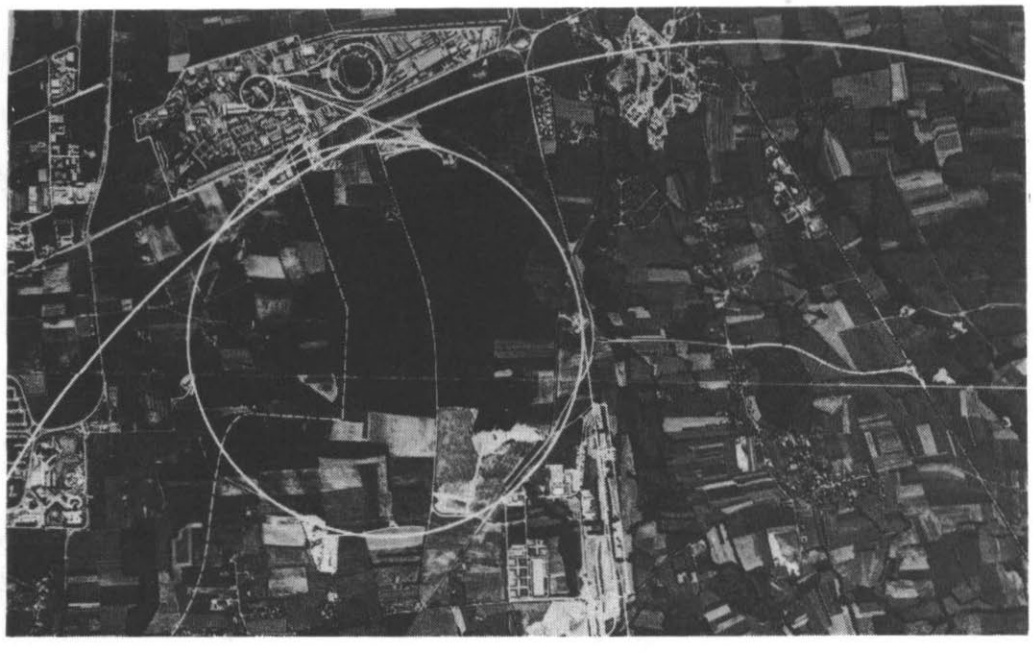
wie zal dat betalen

De huidige hoge-energie-fysica is een dure tak van onderzoek. Waarom doet men dat? Wat heeft fundamenteel onderzoek naar materie in het verleden opgeleverd? Kun je het hedendaagse onderzoek nog wel vergelijken met dat van vijftig tot honderd jaar geleden? Moeten we er mee doorgaan?

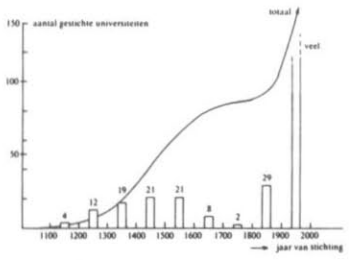
Dit hoofdstuk geeft een aantal natuurkundige en maatschappelijke argumenten bij het zoeken naar antwoorden op dit soort vragen. Aan het eind van het hoofdstuk wordt gevraagd deze argumenten tegen elkaar af te wegen.







7.1 VERANDERINGEN IN HET NATUURKUNDIG ONDERZOEK



De blokjes in het diagram geven het aantal gestichte universiteiten in Europa per eeuw. De getrokken lijn geeft het totaal aantal universiteiten in Europa.

In het vorige hoofdstuk heb je de historische ontwikkeling van het denken over materie in een tijdbalk vastgelegd. juist in de laatste honderd jaar is die ontwikkeling snel gegaan. Honderd jaar geleden werd er nog getwijfeld aan het bestaan van atomen. Nu is het atoom tot in onvoorstelbare details ontleed.
Deze vooruitgang was alleen mogelijk doordat de omvang van het onderzoek naar materie sterk is uitgebreid. De manier waarop gewerkt wordt is daarbij sterk veranderd. Een hedendaags laboratorium lijkt helemaal niet meer op dat van enkele eeuwen geleden.

$$y = \frac{Qdm}{2\pi r^3 \sin\phi \,.\, d\phi} = \frac{nt b^2 \,.\, Q \,.\, \mathrm{cosec}^4 \phi/2}{16 r^2} \quad . \; . \; . \quad (5)$$

(a)

(a) "My thanks are due to Mr. W. Kay for his assistance in counting and in all the experimental work." (Profesor Ernest Rutherford, April 1919.)

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{4\pi(s-m^2)^2}\Bigg[\frac{|\sin\theta_t|^2(1+\cos 2\varphi_\gamma)|t-(Y+m)^2||t|^{-1}|\gamma_{k\,k}{}^K|^2(s/s_0)^{2(\alpha_K-1)}\alpha_K{}^2}{|\Gamma(\alpha+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_K|^2} + (1-\cos 2\varphi_\gamma)$$

$$\times|\sin\theta_t|^2(t-m_K{}^2)^2|t-(m-Y)^2|\Bigg(\frac{\alpha_\tau{}^2|t|^{-1}|\gamma_{k\,k}{}^\tau|^2(s/s_0)^{2(\alpha_\tau-1)}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau|^2} + \frac{\alpha_\nu{}^2|t|^{-1}|\gamma_{k\,k}{}^\nu|^2(s/s_0)^{2(\alpha_\nu-1)}}{|\Gamma(\alpha_\nu+1)\cos\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\nu|^2}$$

$$+\frac{\alpha_\tau{}^2|t|^{-1}|\gamma_{k\,k}{}^\tau|^2(s/s_0)^{2(\alpha_\tau-1)}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau|^2} + \frac{2\alpha_\tau\alpha_\nu\sin\tfrac{1}{2}\pi(\alpha_\nu-\alpha_\tau)\gamma_{k\,k}{}^\tau\gamma_{k\,k}{}^\nu(s/s_0)^{\alpha_\tau+\alpha_\nu-2}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\Gamma(\alpha_\nu+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau\cos\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\nu|}$$

$$+\frac{2\alpha_\tau\alpha_\tau\gamma_{k\,k}{}^\tau\gamma_{k\,k}{}^\tau\cos\tfrac{1}{2}\pi(\alpha_\tau-\alpha_\tau)(s/s_0)^{\alpha_\tau+\alpha_\tau-2}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\Gamma(\alpha_\tau+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau|}\Bigg) + (1+\cos^2\theta_t-\cos 2\varphi_\gamma\sin^2\theta_t)$$

$$\times\frac{\alpha_K{}^4|t-(m+Y)^2|t-^2|\gamma_{k-k}{}^K|^2(s/s_0)^{2(\alpha_K-2)}}{|\Gamma(\alpha_K+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_K|^2} + (1+\cos^2\theta_t+\cos 2\varphi_\gamma\sin^2\theta_t)(t-m_K{}^2)^2$$

$$\times|t-(m-Y)|^2\Bigg(\frac{|\gamma_{k-k}{}^\tau|^2(s/s_0)^{2(\alpha_\tau-1)}\alpha_\tau{}^2|t|^{-2}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau|} + \frac{\alpha_\nu{}^2|\gamma_{k-k}{}^\nu|^2(s/s_0)^{2(\alpha_\nu-1)}}{|\Gamma(\alpha_\nu+1)\cos\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\nu|} + \frac{\alpha_\tau{}^2|\gamma_{k-k}{}^\tau|^2(s/s_0)^{2(\alpha_\tau-1)}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau|^2} + 2\sin\tfrac{1}{2}\pi$$

$$\times(\alpha_\nu-\alpha_\tau)|t|^{-1}\frac{\gamma_{k-k}{}^\tau\gamma_{k-k}{}^\nu(s/s_0)^{\alpha_\tau+\alpha_\nu-2}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\Gamma(\alpha_\nu+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau\cos\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\nu|} + \frac{2\cos\tfrac{1}{2}\pi(\alpha_\tau-\alpha_\tau)\,\gamma_{k-k}{}^\tau\gamma_{k-k}{}^\tau(s/s_0)^{\alpha_\tau+\alpha_\tau-2}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\Gamma(\alpha_\tau+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau\cos\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau|}\Bigg) + 4\cos\theta_t(t-m_K{}^2)$$

$$\times\Big[(t-(m+Y)^2\Big][t-(m-Y)^2]|^{1/2}\gamma_{k-k}{}^K(s/s_0)^{\alpha_K-1}\alpha_K{}^2\Bigg(\frac{\Gamma^{-2}\gamma_{k-k}{}^\tau\alpha_\tau\cos\tfrac{1}{2}\pi(\alpha_K-\alpha_\tau)(s/s_0)^{\alpha_\tau-1}}{|\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\tau\Gamma(\alpha_\tau+1)\Gamma(\alpha_K+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_K|}$$

$$+\frac{\Gamma^{-1}\sin\tfrac{1}{2}\pi(\alpha_\nu-\alpha_\tau)\alpha_\nu{}^2\gamma_{k-k}{}^\nu(s/s_0)^{\alpha_\tau-1}}{|\Gamma(\alpha_K+1)\Gamma(\alpha_\nu+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_K\cos\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\nu|} + \frac{\Gamma^{-1}\alpha_\tau\gamma_{k-k}{}^\tau\cos\tfrac{1}{2}\pi(\alpha_K-\alpha_\tau)(s/s_0)^{\alpha_\tau-1}}{|\Gamma(\alpha_\tau+1)\Gamma(\alpha_K+1)\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_K\sin\tfrac{1}{2}\pi\alpha_\nu|}\Bigg)\Bigg]. \quad (75)$$

(b)

(b) "We wish to thank Professor J. Steinberger who participated in the design and in the earlier part of this experiment, and Professors W. Paul, P. Preiswerk and K. Faissner for support and encouragement. We acknowledge the assistance of Mr. J. Daub and Dr. P. Zanella who made the measurement of the events on Luciole possible. Dr. L. Caneschi has helped in the running of the experiment. The detection apparatus was built with the help of the Messrs. F. Blythe, K. Bussmann, J. M. Fillot and G. Maratori. Finally we would like to thank Dr. G. Petrucci, the CPS staff and especially Dr. L. Hoffmann for the setting up and operation of the slow ejected proton beam." (A. Bohm, P. Darriulat, C. Grosso, V. Kaftarev, K. Kleinknecht, H. K. Lynch, C. Rubbia, H. Ticho, and K. Tittel, May 30, 1968.)

1. WAT IS ER VERANDERD

a. Bekijk van elk van de hierna genoemde factoren hoe ze veranderd zijn tussen 400 voor Chr. en 2000 na Chr.:
- het samenwerken met anderen;
- de kosten van het experiment;
- de plaats van de wiskunde;
- het belang van de theorie;
- de invloed van de religie.

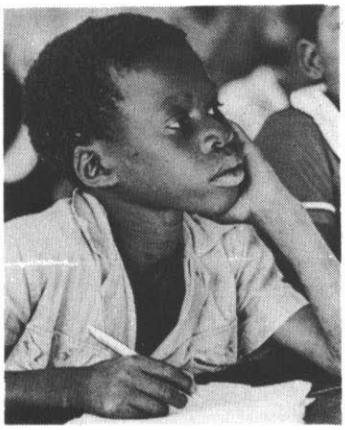
b. Wat kun je zeggen over de snelheid waarmee die veranderingen plaatsvinden?

c. In de figuur hiernaast is uit onderzoeksrapporten uit respectievelijk 1919 en 1968 zowel een van de gebruikte formules als het dankwoord van de auteur(s) opgenomen. Welke twee veranderingen in de aard van het onderzoek worden uit deze figuur duidelijk?

Vóór 1600 werd de wetenschap beoefend door individuele geleerden met een klein eenvoudig laboratorium. Voor hun levensonderhoud waren ze meestal afhankelijk van een vorst of van de orde waar ze toe hoorden. Hun wetenschap was voornamelijk gebaseerd op overlevering, en de kennis werd hoger gewaardeerd naarmate deze ouder was. Er was nauwelijks sprake van communicatie.

In een latere periode groeiden deze laboratoria uit en verplaatste het onderzoek zich naar universiteiten. Ook de onderlinge communicatie werd sterker. Deze ontwikkeling is uitgemond in de huidige grootschalige wetenschapsbeoefening. Het onderzoek vindt plaats in grote instituten, die door de staat of door een multinationale onderneming gefinancierd worden. Er vindt een zeer intensieve uitwisseling plaats door publicaties in tijdschriften.
Parallel aan deze ontwikkeling groeide ook de invloed van de wetenschap op het dagelijks leven van de burger. Wetenschap werd onderdeel van het regeringsbeleid en speelt een zeer belangrijke rol in de huidige maatschappelijke ontwikkelingen. Er wordt veel geld besteed aan natuurkundig onderzoek, waaronder fundamenteel onderzoek. In de volgende paragraaf besteden we aandacht aan het nut van dergelijk onderzoek.

7.2 HET BELANG VAN FUNDAMENTEEL ONDERZOEK



'Achthonderdmiljoen gulden naar het CERN?'

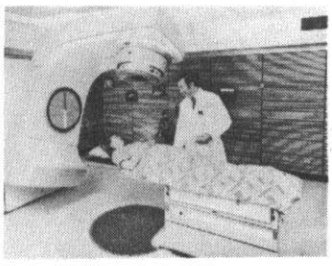
In 1896 werd in de hele wereld naar schatting vijf miljoen gulden uitgegeven aan fundamenteel onderzoek. In 1982 bedroeg alleen de begroting van het Europese onderzoekscentrum CERN te Genève ruim achthonderdmiljoen gulden. De samenleving is kennelijk bereid zeer grote bedragen te besteden aan onderzoek, waarvan de praktische bruikbaarheid niet direct duidelijk is.
Op blz. 65 werd een schatting gegeven van de kosten van een aantal nog te bouwen versnellers. Die kosten zijn zeer hoog. Waarom wordt daar zoveel geld en menskracht aan besteed? Kunnen wij ons die luxe veroorloven, terwijl twee-derde van de wereldbevolking arm is, terwijl ook onze ekonomie stagneert en iedereen moet inleveren?
In 1983 zijn de schoolklassen gemiddeld groter gemaakt om geld te besparen. Hoe bevalt dat? Men had natuurlijk ook wat minder aan quarks kunnen besteden. Zijn alle belangen, naar jouw idee, goed afgewogen?
Om op dit soort vragen een antwoord te kunnen geven, zullen we eerst nog eens op een rijtje zetten welke belangen met fundamenteel onderzoek gediend zijn. Aanwijzingen daarvoor kunnen we voor een deel ook in het verleden vinden.

toepassingen

1.
Zoals je gezien hebt in de biografie van Röntgen, was het nut van röntgenstraling vrijwel onmiddellijk na de ontdekking ervan duidelijk.
a. Op welk fundamenteel onderzoek uit het verleden bouwde Röntgen voort bij zijn onderzoek?
b. Was het onderzoek van Röntgen ook fundamenteel van aard? Of was hij op zoek naar röntgenstraling?

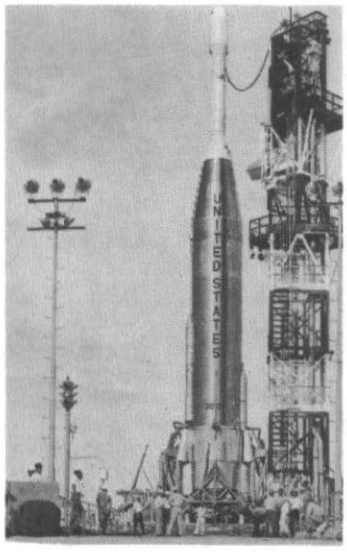
2.
In 1930 verklaarde Rutherford dat hij geen enkele praktische toepassing van kernfysisch onderzoek zag. Welke toepassingen zijn er nu?

3.
a. Welke argumenten vóór het besteden van geld aan fundamenteel onderzoek kun je uit het voorgaande afleiden.
b. Kun je een toepassing bedenken van het huidige elementaire-deeltjes-onderzoek.



Stralingstherapie voor kankerpatiënten.

Iemand die met fundamenteel onderzoek bezig is, gaat meestal uit van één of enkele hypotheses. Wat het onderzoek precies aan kennis zal opleveren is niet te voorspellen. Het is al helemaal onmogelijk te voorzien hoe die nieuwe kennis ooit toegepast kan worden. Toch leert het verleden dat de resultaten van vroeger fundamenteel onderzoek na een zekere tijd geleid hebben tot meer toegepast onderzoek, tot technische ontwikkelingen en uiteindelijk tot een uitgebreid scala van artikelen.
Zonder onderzoek aan kathodestralen zijn röntgenstraling, radio, radar, TV en TL-buizen ondenkbaar. Zonder onderzoek naar radioactiviteit zouden de kankerbestrijding, de kernenergie en de militaire vernietigingskracht in ieder geval minder ver gevorderd zijn.
Het fundamenteel onderzoek blijkt vaak ook bijprodukten op te leveren die bruikbaar zijn in andere wetenschappen. Vaak leiden die bijprodukten ook tot praktische toepas-



De eerste Franse waterstofbom explodeerde op 3 juni 1970 boven het koraaleiland Mururoa.

singen. Het onderzoek naar elementaire deeltjes heeft al heel wat 'bijprodukten' afgeleverd. De foto's in het bellenvat leidden tot een driedimensionale fototechniek, die ook in de medische wereld bruikbaar is. De precisie die bij het opstellen van de versnellers nodig was, blijkt ook in veel andere situaties zijn vruchten af te werpen. De zeer verfijnde detectiemethoden voor straling zijn nu ook in gebruik voor medische doeleinden en bij de bagagedoorlichting in luchthavens. Dit soort bijprodukten wordt vaak de *spin-off* van het onderzoek genoemd. Overigens moet daarbij niet vergeten worden, dat deze toepassingen door gericht onderzoek vaak goedkoper en sneller bereikt hadden kunnen worden.

4.

a. Wat is het verschil tussen de toepassingen uit het eerste deel van deze paragraaf en spin-off?

b. Ken je een voorbeeld van spin-off van ruimtevaartonderzoek?

Bijzondere aandacht verdienen de *militaire toepassingen*. Enerzijds is het voor het machtsevenwicht in de wereld belangrijk dat de supermachten wat betreft wetenschappelijke ontwikkeling elkaar niet teveel ontlopen. Dan zullen ook de militaire mogelijkheden zo goed mogelijk in evenwicht blijven. Anderzijds heeft het onderzoek naar radioactiviteit geleid tot kernwapens. Tengevolge van de onvoorstelbare vernietigingskracht van deze wapens zijn mensen in staat een einde te maken aan al het leven op aarde. Dit dilemma wordt duidelijk geïllustreerd in het latere leven van Albert Einstein.

Einstein vluchtte in 1933 vanuit Duitsland naar de Verenigde Staten. In 1938 ontdekten Otto Hahn en Fritz Strassmann in Berlijn het splijten van uranium. Einstein voorzag in 1939 de mogelijkheden hiermee een splijtingsbom te ontwikkelen 'in staat een hele haven en een deel van het omringende land te vernietigen'. In een brief raadde hij de Amerikaanse president Roosevelt aan geld voor de ontwikkeling van zo'n bom vrij te maken. Dit met name omdat Hitler in Duitsland wel eens hetzelfde zou kunnen doen.
Na de eerste proefexplosie van de splijtingsbom (A-bom) in de VS probeerden een aantal ontwikkelaars de regering te weerhouden van het gebruik van deze wapens tegen Japan. Volgens hen zou een demonstratie van de ontploffingskracht van de A-bom en het dreigen met het gebruik ervan voldoende zijn om de Japanse capitulatie te bewerkstelligen. Hun verzoek was tevergeefs.
Na de verwoesting van Hiroshima en Nagasaki kregen onder andere Einstein, Oppenheimer en Fermi spijt van hun stimulerende rol in de ontwikkeling van de A-bom. 'Niet verder', was hun devies. Voor het behoud van het leven op aarde moest een nieuwe weg worden gevonden. Het oplossen van conflicten zou men nooit meer door dreiging of gebruik van deze wapens mogen nastreven.

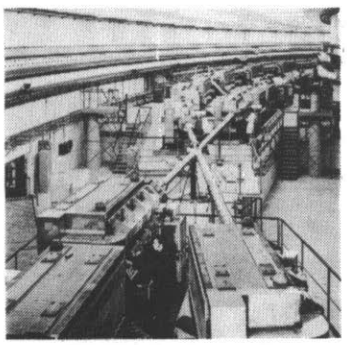
Einstein en Oppenheimer. Oppenheimer was nauw betrokken bij de ontwikkeling van de Amerikaanse atoombommen. Evenals Einstein heeft hij later spijt gekregen van zijn stimulerende rol.

internationale samenwerking

Geheimhouding speelt bij fundamenteel onderzoek een minder belangrijke rol. Daardoor is er een vrijere communicatie tussen de wetenschappers van verschillende landen en politieke blokken. Het onderzoek naar elementaire deeltjes gebeurt in zeer grote, soms internationale, instituten waar wetenschappers uit vele landen samenwerken. Zo werken er zowel Russen als Amerikanen bij het CERN en treffen zij elkaar regelmatig tijdens internationale conferenties.

culturele betekenis

Het is niet eenvoudig de culturele waarde van fundamenteel onderzoek aan te geven. Volgens haar beoefenaars is dat vooral te vinden in het onderzoek dat de grenzen van onze kennis over de materie en de kosmos probeert te verleggen. Hoge-energie-fysica beantwoordt aan een 'oerinstinct' van de mens: het openmaken van dingen om te kijken wat erin zit. De resultaten spreken dan ook brede lagen van de bevolking aan. Er verschijnen regelmatig artikelen over hoge-energie-fysica in kranten en weekbladen. De



Snijpunt van twee opslagringen voor protonen bij het CERN. Op één zo'n snijpunt werkten tegelijkertijd onderzoekers uit Liverpool en Rutherford (Engeland), M.I.T. (VS), Orsay (Frankrijk) en uit Scandinavië.

aanpak, gedegenheid en intellektuele eisen van het fundamentele onderzoek dienen vaak als voorbeeld voor andere onderzoekers. Daarmee treedt het fundamentele onderzoek op als bewaker van het algemene wetenschappelijke niveau.

werkgelegenheid

Alleen al binnen het CERN te Genève werken 3400 mensen. Er zijn meestal zo'n 1500 onderzoekers voor kortere of langere tijd aan het centrum verbonden.
De afkorting CERN staat voor 'Centre Européenne pour la Recherche Nucleaire'. Het wordt bekostigd door twaalf Westeuropese landen, waaronder Nederland. De onderzoekers komen niet alleen uit de deelnemende landen, maar ook uit de VS, de Sowjet Unie en China. Ook binnen Nederlandse universiteiten zijn onderafdelingen hoge-energie-fysica te vinden, en er zijn nationale onderzoekscentra zoals het NIKHEF (Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energie-Fysica) in Amsterdam. Deze instituten zijn voor een deel van het experimentele werk op het CERN aangewezen en werken dan ook nauw samen.
Tenslotte zijn een groot aantal mensen werkzaam bij bedrijven die apparatuur leveren en soms speciaal ontwikkelen voor dit soort onderzoek. Andere bedrijven graven ondergrondse tunnels voor steeds grotere versnellers.
Kortom, heel wat mensen verdienen hun dagelijks brood dankzij deze tak van fundamenteel onderzoek. Natuurlijk kan men met achthonderdmiljoen gulden per jaar ook een heleboel mensen aan heel andere taken laten werken.

7.3 VOOR EN TEGEN AFWEGEN

In deze paragraaf zijn twee discussie-spelen opgenomen. In zo'n spel bespreek je met je klasgenoten de argumenten vóór en tégen het beoefenen van hoge-energie-fysica. Je probeert dan óók tot een afweging te komen.
Bij deze afweging speelt je positie in de samenleving een rol. Een wetenschapper zal die afweging waarschijnlijk anders maken dan jij dat doet.

1.
In dit thema heb je een indruk kunnen krijgen van het werk van een aantal natuurkundige onderzoekers. Welke van de volgende motieven zijn belangrijk voor deze mensen?
- nieuwsgierigheid
- plezier in het werk
- een aangeboren drift
- een goed salaris
- toepassingen in het dagelijks leven
- beroemdheid
- concurrentie met andere/buitenlandse instituten
- andere, namelijk ...

De bijdrage van de deelnemende landen aan het CERN in procenten.

Oostenrijk	*2,53%*
België	*4,66%*
Denemarken	*2,49%*
Frankrijk	*21,70%*
Duitsland	*25,00%*
Griekenland	*0,36%*
Italië	*12,73%*
Nederland	*6,18%*
Noorwegen	*1,79%*
Zweden	*4,30%*
Zwitserland	*4,13%*
Groot Brittannië	*14,13%*

Nederland betaalt 50 miljoen gulden per jaar voor onderzoek door het CERN.
Het onderzoek dient een strikt wetenschappelijk en fundamenteel karakter te dragen. Het mag geen betrekking hebben op militaire doeleinden. Alle experimentele en theoretische resultaten moeten worden gepubliceerd. De vrije en open gedachtenwisseling tussen de onderzoekers speelt in het centrum dan ook een zeer grote rol.

2. ADVIESCOMMISSIE
Stel je eens voor dat je gevraagd wordt zitting te nemen in een commissie die de Nederlandse regering moet adviseren over het al of niet voortzetten van de subsidie aan het CERN.
a. Verzamel argumenten vóór en tégen het voortzetten van de subsidie.
b. Je hebt 10 punten tot je beschikking. Verdeel die over de argumenten, zodanig dat het argument dat naar jouw mening het belangrijkst is ook het grootste aantal punten krijgt. Het argument dat iets minder van belang is krijgt dan ook minder punten. Je kunt de punten over positieve én negatieve argumenten verdelen.
c. Tel de punten in je groepje op. Wat zou het advies van jouw groepje worden? Omkleed het advies met argumenten.

Vat ik uw betoog goed samen, professor, als ik zeg dat u nog meer subsidie voor nog grotere gebouwen met nog krachtigere machines wilt, om steeds kleiner en kleinere deeltjes te kunnen vinden?

Als een lid van het groepje het niet eens kan worden met de meerderheid, kan hij of zij een apart standpunt naar buiten brengen. Dat heet dan een 'minderheidsstandpunt'.

3. STELLINGEN

Hieronder staan een aantal stellingen over het beoefenen van de hoge-energie-fysica. De stellingen zijn bedoeld om discussie uit te lokken. Door zo'n discussie krijg je een helderder inzicht in je eigen standpunten.

– Indien de mensheid wil overleven, kan zij zich niet veroorloven het fundamenteel onderzoek van de materie op een laag pitje te zetten.

– Iedere belangrijke technologische vernieuwing is gebaseerd op fundamenteel onderzoek. Fundamenteel onderzoek vormt dan ook het fundament van de technologische vernieuwing.

– Het besteden van miljarden guldens aan fundamenteel onderzoek in een wereld waar zovelen honger lijden is niet menswaardig.

– Natuurkundige onderzoekers moet je geld geven en ze hun gang laten gaan; dan komt er vast wel iets bruikbaars uit.

– Natuurkundig onderzoek mag zich niet bezig houden met terreinen die de vrede in gevaar brengen.

– Natuurkundige onderzoekers moeten méér tijd besteden aan voorlichting over het soort werk dat ze doen.

– Het is erg belangrijk dat onderzoekers uit de verschillende politieke blokken samenwerken; daartoe moeten er meer centra zoals het CERN gesticht worden.

– Fundamenteel onderzoek is van groot belang voor de samenleving, maar het onderzoek naar elementaire deeltjes is te duur geworden en moet worden afgeremd.

– De specialisatie in de wetenschap is zó ver gevorderd dat leken, inclusief politici, gevolgen van nieuwe vindingen niet kunnen overzien. Wetenschappers hebben de plicht in het openbaar te wijzen op de gevaren van nieuwe ontwikkelingen.

index

alchemie 13
α-straling 44, 45, 53, 57
anode 23
anti-deeltje 69
anti-proton 66, 69
anti-quark 76
atoom 11
atoomkern 54
atoommassa (relatieve –) 15, 58
atoommodel (– van Rutherford) 46, 54
(– van Thomson) 41, 52
atoomnummer 58

baryon 72, 76
bellenvat 67
β-straling 45
boson 79

centripetale kracht 29
cirkelbeweging (eenparige –) 29
cirkelstraalbuis 30
coulomb 22
(wet van –) 22

elektrische cel 21
elektrische lading 21
elektrische veldlijn 22
elektrisch veld 22
elektrode 23
elektrolyse 23
elektron 33, 40, 41
elektron-emissie 34
elektronvolt (eV) 57
elektroscoop/-meter 21
element 10, 15
elementaire-deeltjes-fysica 61
elementaire lading 57

fluorescentie 42
foton 79
fundamenteel onderzoek 5, 83

γ-straling 58
gasontladingsbuis 24
gluon 79
graviton 79

hadron 72, 76
hoge-energie-fysica 61

ion 23
ionisatie 34

kathode 23
(gloei–) 23
kathodestraalkanon 26, 28
kathodestralen 25
kerndeeltje 59
kernfysica 61
kernsplijting 45, 61
kracht (elektrische –) 21, 27
(elektromagnetische –) 70
(elektrozwakke –) 79
(lorentz–) 28
(sterke– of kern–) 70
(zwaarte–) 70
(zwakke –) 70

lading-massa-verhouding 23
lepton 72
levensduur 67
lichtsnelheid 68

massa 68, 69
meson 72, 76
model 10
muon 62

nucleon 80
neutrino 71
neutron 46, 58

oerstof 10

periodiek systeem 17
piëzo-elektriciteit 48
pion 62
positron 62
proton 46, 57, 69

quark 74, 76
(bottom–) 77
(charm–) 76
(down–) 76
(strange–) 76
(top–) 77
(up–) 76

rechterhandregel 28
relativiteitstheorie 69
rustmassa 69

spanning (afbuig–) 28
(buis– of versnel–) 24, 28
(gloei–) 24
spin-off 84
straling (kosmische –) 61
(radioactieve –) 44, 48, 58
(röntgen–) 42, 44, 48
supergeleiding 64
synchrotron 63, 64

thermozuil 35
thomsonbuis 31
torsiebalans 21
torsiehoek 21

vandergraaff-generator 24
veldspoel 29
verbinding 15
versneller 61, 63
(enkelvoudige –) 63
(lineaire –) 63
verstrooiingsexperiment 53
verval 62
vlamboog 24

wisselwerkingsdeeltje 79

namenregister

Anderson 62
Aristoteles 10, 12, 14

Becquerel 44, 45, 48
Bohr 46, 71

Chadwick 46, 58
Copernicus 14
Coulomb 21
Crookes 25, 26
Curie-Sklodowska, M. 45, 47
Curie, P. 45, 47

Dalton 15
Democritus 11
Dirac 62

Edison 23
Ehrenhaft 56
Einstein 68, 69, 78, 79, 84
Empedocles 10

Faraday 23, 41
Ferguson 77
Fermi 71, 84
Franklin 21

Geiger 46, 53
Geissler 23
Gell-Mann 74, 76
Glashow 76

Hahn 45, 84
Hawkin 78, 79
Heisenberg 58
Hertz 56
Hittorf 25
't Hooft 79

Joliot-Curie, I. 50, 58
Joliot, F. 50, 58

Kay 46

Lavoisier 14
von Lenard 56

Mach 56
Marsden 53
Maxwell 70, 78
Mendelejev 16
Millikan 26, 41, 55

Newton 14, 78

Oppenheimer 84

Pauli 71
Perrin 26
Plücker 26

Rayleigh 39
Röntgen 41
Royds 57
Rutherford 40, 41, 44, 49, 54, 57, 58

Salam 78, 79
Schuster 26, 31
Strassmann 84

Thomson, J.J. 26, 31, 39, 44, 46, 52

Volta 21

Weinberg 78, 79
Wilson 61

Yukawa 79

Zweig 74, 76

Begeleidingscommissie S.V.O.-project 0213 (vooronderzoek voor het PLON, 1972-1974)

F. van de Maesen (voorzitter tot 1973); hoogleraar natuurkunde Technische Hogeschool Eindhoven
N.J. Heijkoop (voorzitter 1973-1974); inspecteur voortgezet onderwijs
W.P.J. Lignac (secr.); secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
S. Auer, algemeen didacticus Universiteit van Amsterdam
F. Balkema, inspecteur voortgezet onderwijs
H.P. Hooymayers, lector natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
H.J.L. Jongbloed (1972-1973), mediadeskundige NIAM
J. Schweers, leraar natuurkunde havo/vwo
J. Smit, inspecteur voortgezet onderwijs
E. Warries, hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
M. van Wieringen (1973-1974), mediadeskundige NIAM

Stuurgroep PLON (1974-heden)

H.P. Hooymayers (voorzitter), hoogleraar natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
W.P.J. Lignac (secr. tot 1978), secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
A.A.M. Agterberg (secr. sedert 1978), secretaris Advies Commissie voor de Leerplan Ontwikkeling Natuurkunde in oprichting
P. Broekman (sedert 1980), hoofd afdeling Bèta en Gammavakken CITO
F. Dekkers (sedert 1979), hoofddocent natuurkunde Moller Instituut
H. Lengkeek (tot 1977), leraar natuurkunde mavo
D.A. Lockhorst (tot 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
J. Schipper (sedert 1980), medewerker A.P.S.
M. Sjamaar (sedert 1982), rector Niels Stensen College te Utrecht
A. Snater (tot 1980), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
F.J. Steenbrink (tot 1978), leraar natuurkunde vwo
J.M.F. Teunissen (tot 1975), onderwijskundige Rijks Universiteit Utrecht
W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo te Putten
R. de Vries (sedert 1980), leraar natuurkunde havo/vwo, namens de NVON
E. Warries (tot 1975), hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
S.A. Wouthuysen (tot 1976), hoogleraar natuurkunde Universiteit van Amsterdam

Kerngroep PLON havo-bovenbouw

G. Buisman (sedert 1978), leraar natuurkunde hts
P.G. Hogenbirk (1981-1982), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Holl (1982-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
J. de Jong (sedert 1983), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Maarschall (1978-1981), leraar natuurkunde hts
H. Poorthuis (1978-1981), leraar natuurkunde havo-top pedagogische academie
J. Scherrenburg (sedert 1978), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
W.J.G. Schraven (1978-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
M. van Woerkom (sedert 1982), leraar natuurkunde havo/vwo

PLON-team havo-bovenbouw

H.M.C. Eijkelhof (sedert 1981)
R. van Eyck (1981-1982)
A.C.L. van Gameren (sedert 1977)
D. van Genderen, Rijks Universiteit Utrecht
F.L. Gravenberch (1978-1983)
P.G. Hogenbirk (1981-1983)
E. Holl (sedert 1983)
T. Jörg (sedert 1982)
W.H. Kamphuis (sedert 1978)
P.T. Kloek (sedert 1983)
J. Kortland (sedert 1982)
P.L. Lijnse, Rijks Universiteit Utrecht
F.A. v.d. Loo, Rijks Universiteit Utrecht
B. Pelupessy (sedert 1978)
T. Römgens (1979-1981)
P. Verhagen (sedert 1983)
H. Vermeulen (1981-1983)
R.F.A. Wierstra (sedert 1978)

PLON-administratie

E. van den Broek (1976-1979)
R. Lindeman (1977-1980)
M. Rolff van den Baumen (1974-1979)
N. Rotteveel (sedert 1982)
A.G. Schwering (1980-1982)
B. Schillert (sedert 1980)
H. Veurink (tot 1974)

Tekeningen

A. Lurvink (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)
H. de Waal (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)

Foto's

A.C.L. van Gameren (PLON)
W.H. Kamphuis (PLON)

PLON-CITO (namens CITO)

F. Boessenkool
P. Broekman
C. Hellingman
T. Heuvelmans
H. Vonken

Proefscholen 1983-1984

Ashram College te Alphen a/d Rijn
S.G. Nijmegen Oost te Nijmegen
Chr. S.G. Revius te Deventer
S.G. Oost Betuwe te Bemmel
Hertog Jan College te Valkenswaard
Marnix College te Ede
Niels Stensen College te Utrecht
Eemland College Noord te Amersfoort
Chr. S.G. Jan van Arkel te Hardenberg
S.G. Huizermaat te Huizen
Chr. Lyceum en Havo te Veenendaal

Overzicht van PLON-thema's voor havo-bovenbouw

VOOR DE 4e KLAS

- Vergelijken
- Weersveranderingen
- Muziek
- Verkeer
- Elektrische Machines
- Energie en Kwaliteit

VOOR DE 5e KLAS

- Materie
- Lichtbronnen
- Ioniserende Straling
- Elektronica

- Repeteerthema

Tevens zijn beschikbaar:

- docentenhandleidingen (AVOL's) en apparatuurgidsen bij elk thema

QUARKSPEL

LERARENHANDLEIDING

Dit quarkspel vormt een onderdeel van het PLON-thema *Materie*, bedoeld voor gebruik in 5-HAVO.
De quark-kaartjes zijn afgedrukt op drie groene en één blauwe kaart (zelf uitknippen). Op de witte kaart staat de paragraaf uit het themaboek, waarin de leerlingopdrachten voor het quarkspel staan beschreven.
Het bij deze paragraaf behorende gedeelte uit de lerarenhandleiding bij het thema *Materie* staat hieronder.

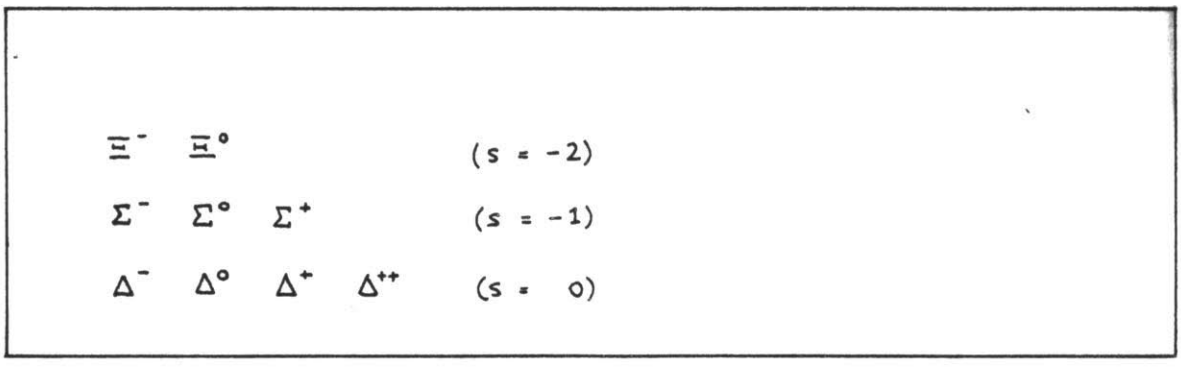
6.8 ORDENING VAN ELEMENTAIRE DEELTJES

Het begrip 'ordenen' is voor leerlingen niet zonder meer duidelijk. Daaraan moet eerst aandacht besteed worden met een aantal voorbeelden van al bekende ordeningen (opdracht 1).

Het quark-kaartspel is in dit thema opgenomen:
- om leerlingen meer vertrouwd te maken met de verschillende deeltjes;
- om leerlingen zelf te laten ervaren dat het mogelijk is de deeltjes te ordenen middels symmetrische patronen;
- om te laten zien dat de quarktheorie een aannemelijke hypothese is in het licht van de ordening van deeltjes.

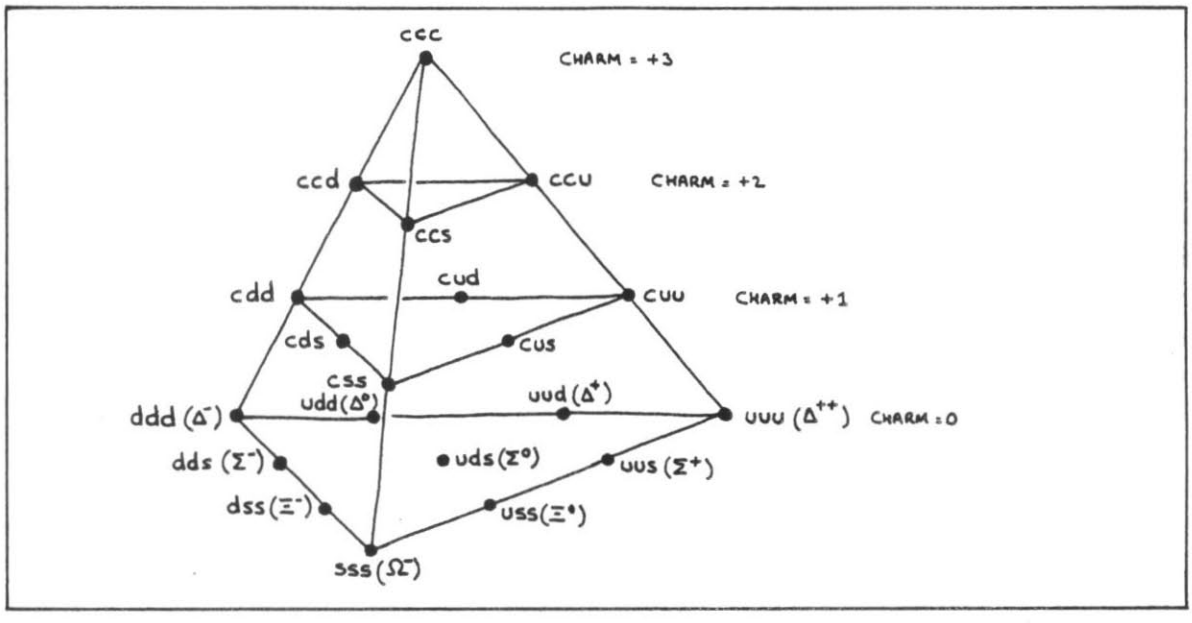
Ervaringen met proefpersonen hebben aangetoond dat mensen op uiteenlopende manieren de diverse ordeningsopdrachten uitvoeren. Sommigen kijken alleen maar, net zo lang tot ze een patroon bedacht hebben. Anderen beginnen terstond te schuiven met de kaartjes. De tijd waarbinnen de opdrachten uitgevoerd worden, loopt sterk uiteen. Af en toe een aanwijzing geven, kan de tijdsduur aanmerkelijk bekorten.
Het spelen van het quarkspel past niet binnen één lesuur. Dat lukt wèl bij het uitvoeren van alleen de eerste drie opdrachten. Overigens hangt het tempo van het spel sterk af van de voorbereiding, dat wil zeggen de mate waarin leerlingen de functie van het quarkspel duidelijk is.

opdracht 2
Het uitvoeren van deze activiteit levert een driehoek op. Die kan er bijv. als volgt uit zien:



Het Ω-deeltje werd met deze ordening voorspeld, en in 1962 gevonden. Dit deeltje zit dan ook bij de blauwe kaartjes.

opdracht 3
Door het ontdekken van een nieuwe quark werd de driehoek een piramide. Wijs erop dat in die piramide vlakken aangewezen kunnen worden van gelijke lading of gelijke vreemdheid.



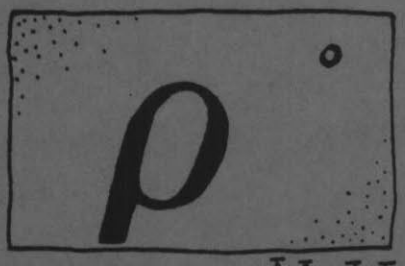
opdracht 4
Ondanks de opmerking: "Het hoeft geen driehoek te zijn", kan het voorkomen dat het veel moeite kost het idee van een driehoek te verlaten. Een enkele hint zal dan wel voldoende zijn om op het goede pad te geraken.
Een mooie ordening is bijv.:

$u\bar{u}$	$d\bar{u}$	$s\bar{u}$	.	.	
$u\bar{d}$	$d\bar{d}$	$s\bar{d}$	.	.	
$u\bar{s}$	$d\bar{s}$	$s\bar{s}$	.	.	
.	.	.	$c\bar{c}$	.	
.	.	.	.	$b\bar{b}$	

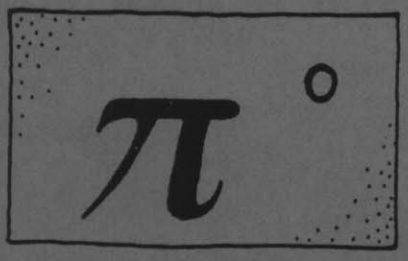
De nieuwe quarks kunnen gemakkelijk in het model ingepast worden. Als extra opdracht kan het voorspellen van de eigenschappen van nog onbekende deeltjes gegeven worden. Laat de leerlingen voor zo'n deeltje een eigen naam verzinnen.

d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$
$\bar{s}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=+1$	$\bar{d}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=0$	$\bar{u}$ $q=-\frac{2}{3}$ $s=0$
s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$
$\bar{u}$ $q=-\frac{2}{3}$ $s=0$	$\bar{d}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=0$	$\bar{u}$ $q=-\frac{2}{3}$ $s=0$
s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$
$\bar{s}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=+1$	$\bar{d}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=0$	$\bar{s}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=1$
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$
d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$

kwarkspel kaart 1 achterkant

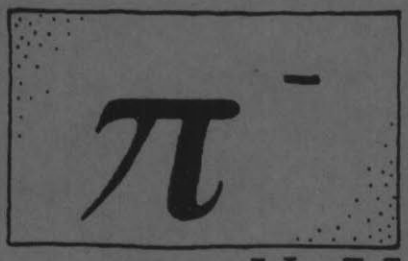


$m = 770\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$

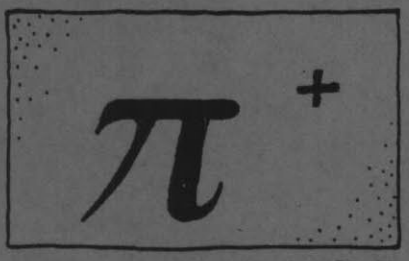


$m = 135\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$

$m = 498\ \mathrm{MeV}$
$s = 1$



$m = 140\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$

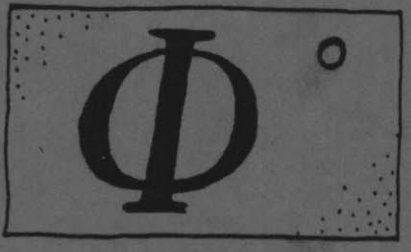


$m = 140\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$

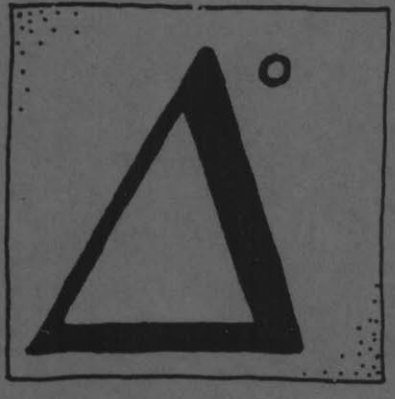
$m = 494\ \mathrm{MeV}$
$s = -1$

$m = 494\ \mathrm{MeV}$
$s = 1$

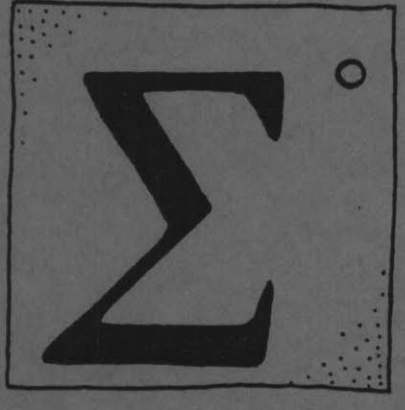
$m = 498\ \mathrm{MeV}$
$s = -1$



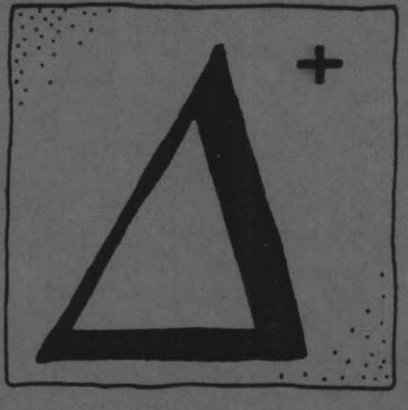
$m = 1020\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$



$m = 1236\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$



$m = 1193\ \mathrm{MeV}$
$s = -1$



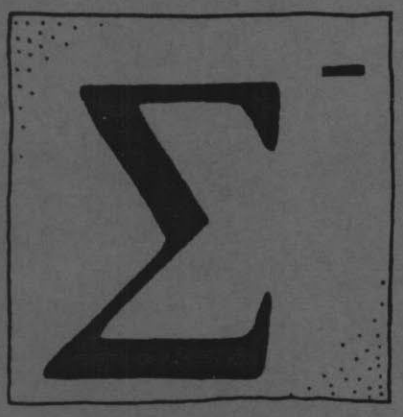
$m = 1236\ \mathrm{MeV}$
$s = 0$

kwarkspel kaart 1 voorkant

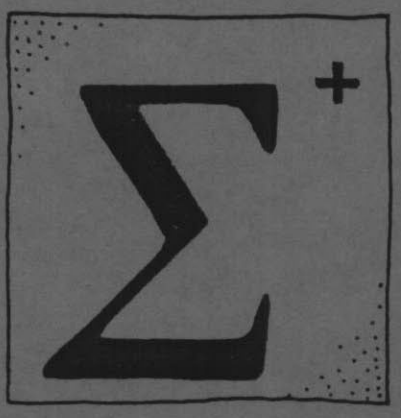
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$
s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$
s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$
s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$
u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$
d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$

kwarkspel kaart 2 achterkant

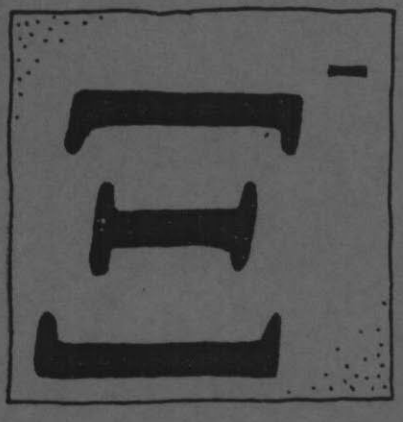
$m = 1116\,\mathrm{MeV}$
$s = -1$



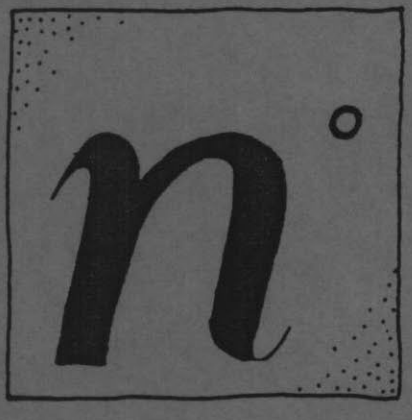
$m = 1197\,\mathrm{MeV}$
$s = -1$



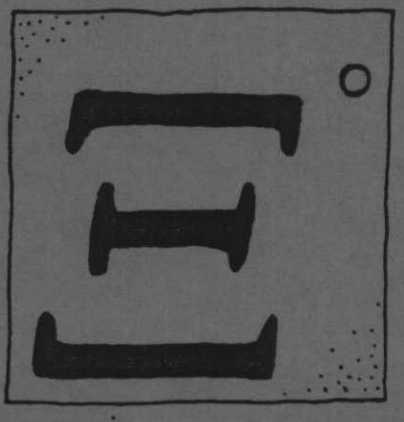
$m = 1189\,\mathrm{MeV}$
$s = -1$



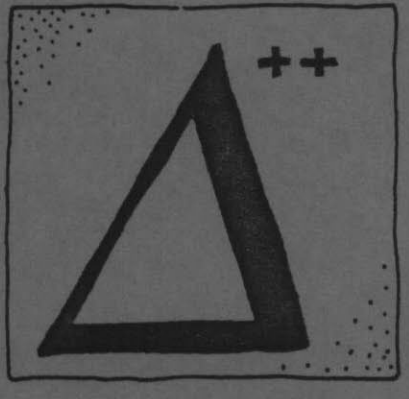
$m = 1321\,\mathrm{MeV}$
$s = -2$



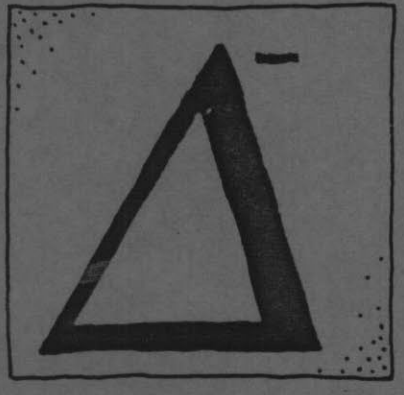
$m = 940\,\mathrm{MeV}$
$s = 0$



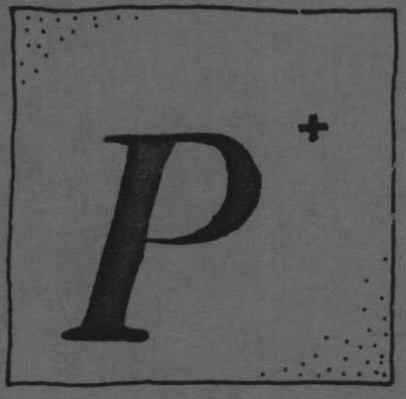
$m = 1315\,\mathrm{MeV}$
$s = -2$



$m = 1236\,\mathrm{MeV}$
$s = 0$



$m = 1236\,\mathrm{MeV}$
$s = 0$



$m = 938\,\mathrm{MeV}$
$s = 0$

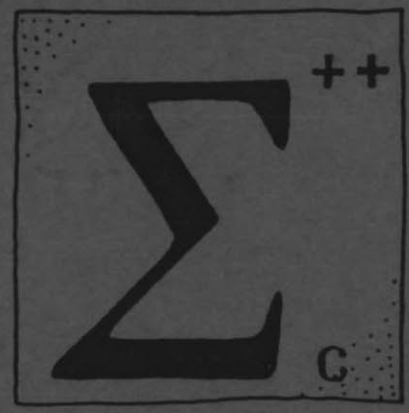
kwarkspel kaart 2 voorkant

c $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$
$\bar{d}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=0$	u $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	d $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$
c $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	c $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	c $q=\frac{2}{3}$ $s=0$	s $q=-\frac{1}{3}$ $s=-1$
$\bar{u}$ $q=-\frac{2}{3}$ $s=0$			
b $q=-\frac{1}{3}$ $s=0$	c $q=\frac{2}{3}$ $s=0$		
$\bar{b}$ $q=\frac{1}{3}$ $s=0$	$\bar{c}$ $q=-\frac{2}{3}$ $s=0$		

kwarkspel kaart 3 achterkant

m = 1672 MeV
s = -3

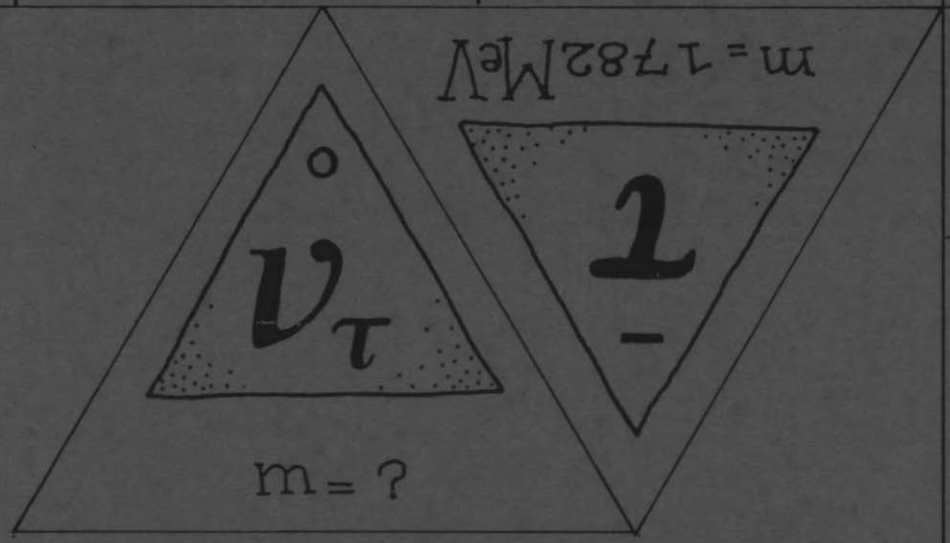
m = 2260 MeV
s = 0



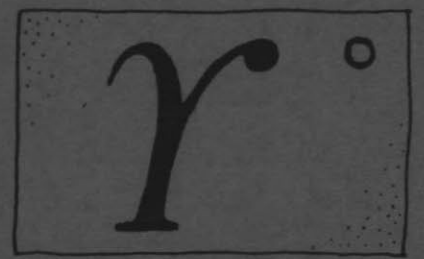
m = 2420 MeV
s = 0

m = 1868 MeV
s = 0

m = 1863 MeV
s = 0



m = 3100 MeV
s = 0

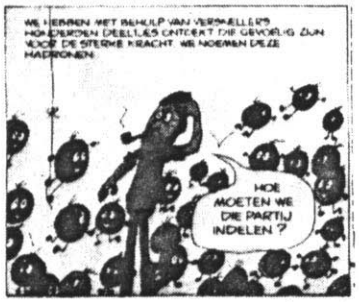


m = 9460 MeV
s = 0

kwarkspel kaart 3 voorkant

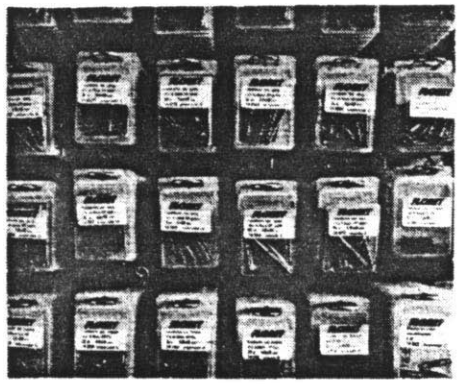
ν_e
$m \sim 0$ MeV
ν_μ
$m \sim 0$ MeV
e^-
$m = 0{,}5$ MeV
μ^-
$m = 106$ MeV

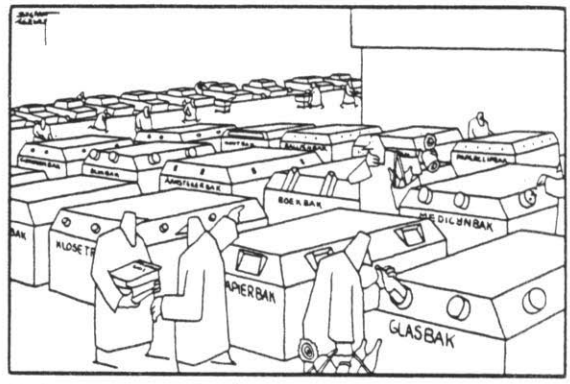
6.8 ORDENING VAN ELEMENTAIRE DEELTJES



De ontdekking van het periodiek systeem in 1842 werd toen begroet als een zeer welkome *ordening* van de elementen die in de loop van de jaren ontdekt waren. Op grond van die ordening werden een aantal nieuwe elementen *verondersteld*, en later ook gevonden. Het zoeken wordt aanzienlijk eenvoudiger als je weet waar je op moet letten.
Inmiddels zijn er meer dan 200 elementaire deeltjes ontdekt, en ook hier is een ordening dringend noodzakelijk. Ordenen doe je op grond van *eigenschappen*. Als je de schoolboeken ordent, kun je ze per vak bij elkaar zetten. Dat is het handigste. Je kunt ook alle boeken van dezelfde kleur bij elkaar zetten. Dat is misschien het mooiste. En als de planken van de boekenkast niet dezelfde afstand hebben, zet je de grote boeken op de ene en de kleine boeken op de andere plank. Hoe je ze ordent, hangt dus af van het doel dat je met de ordening hebt.

Ordenen op alfabet.

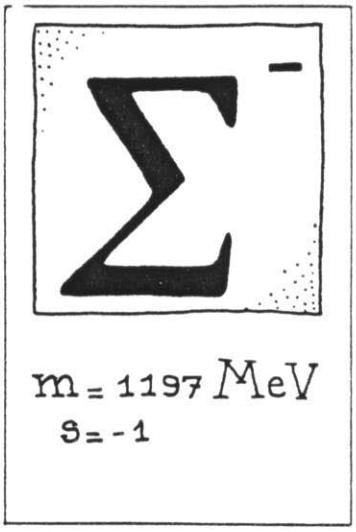

Ordenen naar afmeting.



Ordenen naar grondstof.

1.
De leerlingen van een school zijn geordend in klassen. Binnen de klas kun je de leerlingen weer opnieuw ordenen, bijv. voor het doen van groepswerk.
a. Op welke eigenschap zou jij de leerlingen ordenen om:
- naar de film te kijken in de gymzaal;
- een wedstrijd te spelen voor het schoolvolleybaltoernooi;
- het vormen van discussiegroepjes over verliefdheid.

b. Geef nog vijf andere manieren om de leerlingen te ordenen.

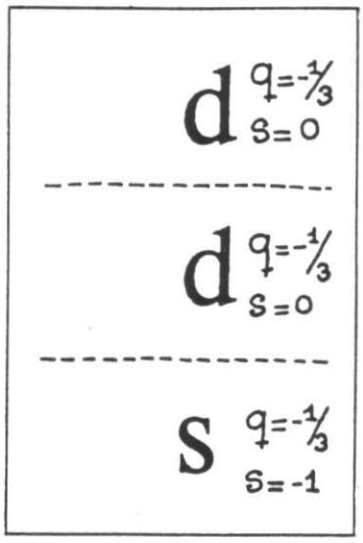


Voorkant van één van de kaarten uit het spel.

In paragraaf 6.7 is al een begin gemaakt met een ordening van de elementaire deeltjes. We hebben de deeltjes in drie groepen verdeeld: leptonen, mesonen en baryonen. De gedachte dat al die elementaire deeltjes misschien weer bestaan uit nog kleinere deeltjes ligt voor de hand. Gell-Mann en Zweig spraken in 1962 die veronderstelling uit, en noemden die deeltjes *quarks*.
We zoeken nu een ordening van elementaire deeltjes, waarbij met zo weinig mogelijk quarks volstaan kan worden. We hebben een kaartspel ontworpen, om je te laten zien hoe een dergelijke ordening verloopt. Op elk kaartje staan de naam en de gegevens van één deeltje.
Op de voorkant van het kaartje vind je:
- de naam (meestal een Griekse letter);
- de lading (midden of rechtsboven);
- de massa *m* (in MeV);
- de vreemdheid *s*; deze eigenschap zegt iets over de levensduur van het deeltje.

De andere eigenschappen van elementaire deeltjes laten we hier verder buiten beschouwing.
In het spel vind je groene en blauwe kaartjes. Op de blauwe kaartjes staan deeltjes die pas ná 1962 ontdekt zijn.
We beginnen met het ordenen van de baryonen, daarna bekijken we de mesonen en tenslotte de leptonen.

baryonen



Achterkant van één van de kaarten uit het spel.

2. ORDENEN EN VOORSPELLEN

Zoek de rechthoekige kaartjes uit. Leg de blauwe kaartjes maar even apart.

a. Let nu even alleen op de lading en de vreemdheid. Probeer de kaartjes zó te leggen, dat lading en vreemdheid netjes geordend zijn. (Als lading en vreemdheid hetzelfde zijn, leg je ze maar op elkaar.) Teken je ordening na, door telkens de naam en de lading te noteren.

b. Uit de figuur zou je nu kunnen veronderstellen dat er nóg een deeltje moet zijn. Waar is de lege plaats? Kun je de lading en de vreemdheid van dat deeltje voorspellen?

c. Draai nu de kaartjes om, zonder de ordening te verstoren. Op de achterzijde vind je een driedeling in quarks, met in elk gedeelte:

- een symbool voor de desbetreffende quark: u, d en s;
- de lading;
- de vreemdheid;

Gell-Mann veronderstelde dat baryonen uit drie quarks zijn opgebouwd.

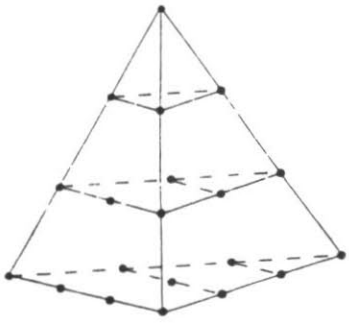
d. Controleer voor drie kaartjes of de lading en de vreemdheid van de quarks kloppen met de lading en vreemdheid van het deeltje.

e. Bekijk de ordening goed en beschrijf deze in woorden.

f. Uit welke quarks zou het nog ontbrekende deeltje samengesteld zijn?

g. In 1962 werd dat ontbrekende deeltje gevonden en Ω^--deeltje gedoopt. Zoek dat deeltje op bij de blauwe kaartjes, en ga na of de voorspelde eigenschappen kloppen.

3. DRIEDIMENSIONAAL ORDENEN



Na 1964 werden er nieuwe deeltjes ontdekt die in deze ordening niet pasten. Het model moest uitgebreid worden met een vierde quark, de c-quark. De driehoek werd nu een piramide.

a. Welk deeltje zou jij in de top van de piramide plaatsen?

b. Neem één van de zijvlakken van de piramide over, en teken die in je schrift. Schrijf de quarkcombinatie bij elk deeltje.

c. Pak nu de blauwe kaartjes erbij. Dat zijn de baryonen die na 1962 ontdekt zijn. Welke plaats hebben ze op de piramide?

mesonen

De mesonen pasten niet in dit model: daarvoor moest iets anders gevonden worden. De vierkante kaartjes stellen de mesonen voor. Een ordening op basis van de eigenschappen op de voorkant laten we nu achterwege, omdat die erg moeilijk is.

4.

a. Zoek de vierkante kaartjes uit en leg de blauwe weer even opzij. Je ziet dan dat elk meson in het model bestaat uit een quark en een anti-quark (aangegeven met een streepje, bijv. $\bar{u}$).

b. Orden de kaartjes in één of ander regelmatig opgebouwd patroon. Beschrijf je ordening. (Overigens: het hoeft geen driehoek te zijn.)

c. Neem nu ook de vierkante blauwe kaartjes erbij. Je ziet dat er niet alleen een c-quark maar ook nog een b-quark nodig was om het model rond te krijgen. Breid de figuur uit door ook deze kaartjes een plaats te geven.

d. Welke mesonen kunnen nu op grond van deze figuur voorspeld worden?

leptonen

De overgebleven driehoekige kaartjes stellen de leptonen voor. Men heeft nog geen idee hoe die zijn samengesteld en hoe hun relatie tot de quarks is. Dat zijn enkele van de vele vragen waarop nog een antwoord gevonden moet worden.