

Gevonden!

STEVEN
STROEYKENS
GEVONDEN!
HOE HET
HIGGS-DEELTJE
ONZE WERELD
VERANDERDE



9	VOORWOORD
11	1. NEE AAN ZWARTE GATEN! <i>Kennismaking met het LHC en het Higgs-deeltje</i>
21	2. DE MATERIE ONDER HET MES <i>De ontdekking van het atoom</i>
35	3. SCHIETEN OP EEN KRENTENKOEK <i>Het elektron en de atoomkern</i>
43	4. MANOEUVRES IN HET DONKER <i>Het mysterieuze neutrino</i>
59	5. LICHT IN PAKKETJES <i>Fotonen of lichtdeeltjes</i>
71	6. DE VOORDELEN VAN TE VEEL OPLOSSINGEN <i>De ontdekking van de antimaterie</i>
83	7. VIER NATUURKRACHTEN... <i>Kennismaking met de vier fundamentele interacties</i>
103	8. ... OF LIEVER EEN KRACHTJE MINDER? <i>Natuurkundigen willen krachten 'verenigen'</i>
111	9. VERDWAALD IN HET OERWOUD <i>Het muon, het pion, het kaon...</i> <i>Fysici ontdekken meer deeltjes dan ze de baas kunnen.</i>
119	10. DEELTJES MET SMAAK EN KLEUR <i>De ontdekking van quarks brengt orde in de chaos</i>
135	11. INVENTARIS VAN DE DEELTJESDIERENTUIN <i>Alle bekende deeltjes op een rij</i>

- 141 12. DE WORSTELING MET ONEINDIG
*Het blijkt moeilijker dan gedacht om elektronen
en fotonen te begrijpen*
- 153 13. IEDER ZIJN SYMMETRIE
Ijkttheorieën verklaren waar natuurkrachten vandaan komen
- 163 14. BOSONEN UIT BRUSSEL
Robert Brout en François Englert geven deeltjes massa
- 183 15. DE KRONKELWEG
NAAR HET STANDAARDMODEL
De goede theorie speelt verstoppertje, maar wordt toch gevonden
- 199 16. HET NIET-THATCHER-DEELTJE
Wat is eigenlijk dat Higgs-boson?
- 211 17. DE STRIJD VAN DE VERSNELLERS
Europa en de Verenigde Staten hopen het Higgs-deeltje te vinden
- 221 18. DE SUPERLATIEVENMACHINE
Over CERN en de LHC
- 231 19. KIJK UIT, EEN MUON!
De detectoren van de LHC
- 241 20. HET EINDE VAN DE WERELD UITGESTELD
Kan de LHC zwarte gaten opwekken?
- 251 21. DE JACHT OP 5 SIGMA
Het Higgs-boson wordt eindelijk gevonden
- 267 22. DE KATER NA HET BOSON?
Fysici zoeken een betere theorie dan het standaardmodel
- 281 23. DE LAATSTE DEELTJESVERSNELLER?
De toekomst van de deeltjesfysica

287	BIJLAGE 1. Over massa en andere gewichtige kwesties
295	BIJLAGE 2. Over renormalisatie
297	BIJLAGE 3. De deeltjes van het standaardmodel
300	BRONNEN EN AANBEVOLEN LECTUUR

DE TOCHT VAN DE QUARK

De avonturen van een elementair deeltje in de LHC

17	ETAPPE 1. In de fles waterstof
33	ETAPPE 2. Weg uit de protonenbron
41	ETAPPE 3. In de greep van de eerste versnellers
57	ETAPPE 4. Vol energie naar de derde versneller
69	ETAPPE 5. Met Einstein in de vierde versneller
81	ETAPPE 6. Kwantumcapriolen in de versneller
99	ETAPPE 7. Eindelijk de grote ring in!
107	ETAPPE 8. Een ontmoeting met boodschapperdeeltjes
117	ETAPPE 9. Een rondedans onder de grond
131	ETAPPE 10. De quark toont zijn karakter
139	ETAPPE 11. De quark heeft gezelschap
151	ETAPPE 12. Opgepasst voor spookrijders in de versneller
161	ETAPPE 13. De quark ploetert door het Brout-Englert-Higgs-veld
181	ETAPPE 14. Een botsing dreigt
197	ETAPPE 15. Onzekerheid voor de klap
209	ETAPPE 16. Frontale botsing!
219	ETAPPE 17. Er verschijnt een Higgs-boson
229	ETAPPE 18. Het Higgs-deeltje valt uit elkaar
239	ETAPPE 19. Weg van de plaats van de botsing
249	ETAPPE 20. De detector in
265	ETAPPE 21. Een deeltje maakt vonken
279	ETAPPE 22. Het einde van de reis

VOORWOORD

Zelden heeft een elementair deeltje op zo'n manier furore gemaakt. Kranten wijdden er hun voorpagina's en speciale katernen aan. Tv-programma's probeerden in beelden uit te leggen wat het voor iets was, dat Higgs-boson dat Europese fysici zonet ontdekt hadden. Blijkbaar was het belangrijk, dat 'goddelijke deeltje'. Het werd 'het laatste puzzelstukje' van de natuurkunde genoemd, of zelfs de 'heilige graal'.

Al die soundbites en analogieën en infografieken en zelfs krantenartikelen zullen veel kijkers en lezers toch met vragen hebben laten zitten. Wat is dat deeltje nu precies? Wat betekent het dat het nu gevonden is? En vooral: waarom is het zo belangrijk? Die vragen echt beantwoorden, vergt wat meer uitleg dan de tv of de krant eraan kunnen besteden. In een boek kan dat gelukkig wel.

Je maakt in dit boek kennis met de natuurkundigen die het deeltje ontdekt hebben, en met de reusachtige machines die ze daarvoor nodig hadden. Zo zie je welke plaats het deeltje inneemt, diep in het hart van de wonderlijke theorie waarmee fysici vandaag de natuur beschrijven. Om te komen tot die theorie, moesten eerst heel wat puzzelstukjes op hun plaats vallen — en een van de belangrijkste was het fameuze Higgs-boson. Dat verhaal is nog maar gedeeltelijk verteld, en tot nu toe nooit vanuit het perspectief van François Englert en Robert Brout, de twee Belgische fysici die in 1964 als eersten het cruciale puzzelstukje vonden. Dat hiaat wil ik opvullen.

Het hart van de theorie waarin het pas ontdekte deeltje zo'n belangrijke rol speelt, is een wiskundig hart. Dat maakt het tot een uitdaging om het begrijpelijk uit te leggen, want ik wil geen wiskundigen van mijn lezers maken. Wat ik wel wil is: de lezer laten meekijken over de schouders van de onderzoekers, terwijl die proberen de geheimen van de natuur te ontraadselen. Alle details volgen van wat ze doen, is niet mogelijk. Maar ik wil wel laten zien welke de puzzelstukjes zijn, en welk totaalbeeld ze samen vormen.

Het eerste deel van het boek is een kennismaking met de elementaire deeltjes waaruit de natuur is opgebouwd. Ik vertel het verhaal van hun ontdekking — niet zozeer als een poging tot geschiedschrijving, maar om de deeltjes ‘persoonlijkheid’ mee te geven. Daarna komen enkele hoofdstukken waarin ik afdaal tot diep in de theorieën waarmee fysici de werkelijkheid proberen te begrijpen. Wanneer je met de deeltjes én met de theorieën hebt kennism gemaakt, ben je klaar om het werk van Brout en Englert te begrijpen, en de betekenis van het Higgs-deeltje. Daarna volgt het verhaal van de speurtocht naar het deeltje, met de grote deeltjesversneller LHC in Genève, culminerend in de ontdekking van het boson in 2012. En ten slotte ga ik na wat die ontdekking betekent voor ons begrip van de natuur en blik ik vooruit naar de toekomst.

Al die hoofdstukken worden afgewisseld met tweeëntwintig korte episodes die samen het verhaal vertellen van één elementair deeltje op zijn reis door de deeltjesversneller LHC, in het experiment waarmee het Higgs-boson ontdekt is. In die episodes vertel ik de gebeurtenissen voor één keer niet vanuit het gezichtspunt van de wetenschappers of van hun theorieën of apparaten, maar vanuit het perspectief van een deeltje.

Ik wil graag de fysici Alexander Sevrin, Dirk Ryckbosch, Pierre Van Mechelen en Jorgen D’Hondt bedanken, voor de tijd die ze voor me gemaakt hebben, voor de informatie die ze bezorgd hebben, en vooral omdat ze zo vriendelijk zijn geweest om delen van de tekst na te lezen. Het spreekt vanzelf dat ik de verantwoordelijkheid opeis voor alle fouten die desondanks in het boek zijn blijven staan. Maar de meeste dank ben ik verschuldigd aan François Englert, die zo geduldig was om zich herhaaldelijk uitgebreid te laten interviewen. En natuurlijk aan mijn echtgenote Laura, die zelfs op de meest onmogelijke plaatsen en tijdstippen nog kans zag om teksten na te lezen, en aan mijn kinderen, die telkens weer vol belangstelling kwamen vragen of het boek nog niet klaar was, en waarom er geen prentjes in stonden.

1. NEE AAN ZWARTE GATEN!

Kennismaking met de LHC en het Higgs-deeltje

Een revolutie in de fysica? Nee, waarschijnlijk is het niet dát wat de betogers in gedachten hebben, terwijl ze postvatten voor het Roemeense kantoor van de Europese Commissie in Boekarest. De opkomst is niet slecht — een dertigtal mensen — en de actie krijgt nog meer gewicht door de aanwezigheid van een senator, Marius Marinescu van de kleine Conservatieve Partij, en van Codrin Stefanescu, de vicevoorzitter van de partij. Het is 9 september 2008, en ze staan er om te protesteren tegen de geplande ingebruikneming, een dag later, van de Large Hadron Collider (LHC), een reusachtige nieuwe deeltjesversneller, in het Europese laboratorium voor deeltjesfysica CERN, bij Genève.

Zijn ze bang dat de LHC iets onverwachts zal ontdekken en daarmee de handboeken fysica naar de prullenmand zal verwijzen? Nee, zegt de senator, de LHC gaat een gigantische explosie veroorzaken, een explosie die de hele aarde zal vernielen. De vicevoorzitter ziet het anders; volgens hem zal de planeet niet ontploffen maar opgezogen worden door een zwart gat. ‘Voor zover ik het begrijp,’ zegt hij, ‘en volgens wat ik gelezen heb, en rekening houdend met wat sommige wetenschappers zeggen, zal het experiment mislukken en een zwart gat creëren.’ En een zwart gat, dat is algemeen bekend, zuigt de hele aarde op.

Marinescu en Stefanescu hebben het een en ander over het hoofd gezien. Om te beginnen op politiek gebied — toch hun vak, mag je aannemen. De Europese Commissie heeft niets te maken met CERN en de LHC, en is helemaal niet bevoegd om bevelen te geven aan een internationaal laboratorium met hoofdkwartier in niet-lidstaat Zwitserland. Van de fysica hebben ze nog minder kaas gegeten, zoals een dag later blijkt, wanneer de LHC wordt aange-

zet en Genève noch door mega-explosies noch door zwarte gaten wordt opgeschrikt. De Britse krant *The Sun* vat het resultaat in zijn kop netjes samen: ‘Succes! De wereld is niet vergaan.’ Het moet een van de weinige keren zijn dat het Britse tabloid het feit dat er niets bijzonders is gebeurd, een kop met een uitroepteken waard vindt.

Niemand kan ontkennen dat de LHC een indrukwekkende machine is. 1624 magneten van elk meer dan 27 ton zwaar, geplaatst in een 27 kilometer lange cirkelvormige ondergrondse tunnel, aangevuld met detectoren met de omvang van een fabriekshal, een elektriciteitsverbruik van 200 tot 300 megawatt — meer dan de stad Genève — en een totale kostprijs van naar schatting 7,5 miljard euro. Maar de wereld doen ontploffen, dat is toch wat hoog gegrepen. Voor zover al die magneten en al die megawatts elektriciteit een destructief doel dienen, is dat een erg beperkt destructief doel. Het enige wat de fysici van CERN met de LHC willen vernielen zijn enkele protonen: onzichtbaar kleine materiedeeltjes — en niet bepaald een bedreigde soort, want alleen al in het topje van een menselijke pink zitten er ongeveer driehonderd biljoen miljard.

De LHC werkt door de protonen op te jagen tot steeds hogere snelheden, tot ze bijna met de snelheid van het licht (een klein miljard kilometer per uur) door de 27 kilometer lange ring razen. En dat in twee tegenovergestelde richtingen: één bundel protonen gaat met de klok mee de ring rond, een andere bundel tegen de klok in. De machine is zo ontworpen dat de beide tegengesteld bewegende bundels elkaar op vier punten snijden. Rondom die punten staan de fysici klaar met hun detectoren en meetinstrumenten; als ramptoeristen bij de te verwachten frontale botsingen. Dat is een al lang beproefde manier van werken in de deeltjesfysica. Uit botsingen tussen materiedeeltjes valt veel te leren. Door zorgvuldig de wegspattende brokstukken te observeren bij een dergelijke botsing, kunnen fysici niet alleen de kleinste bouwstenen van de materie opsporen, ze kunnen ook de krachten bestuderen die in de wereld van de materiedeeltjes aan het werk zijn, en soms kunnen ze nieuwe, nog niet eerder waargenomen soorten deeltjes betrappen.

Dat laatste is het hoofddoel waarvoor de LHC gebouwd is: om enkele nieuwe deeltjes op te sporen, waarvan het bestaan wel vermoed werd, maar nog niet bewezen was. Het belangrijkste van die nog niet ontdekte deeltjes was het zogenaamde Higgs-boson of Higgs-deeltje, en dat heeft de LHC in 2012 gevonden.

Het bestaan van het Higgs-boson werd voorspeld door een buitengewoon succesvolle natuurkundige theorie, waar de natuurkundigen erg trots op zijn, maar die ze met gevoel voor understatement (ofbijgebrek aan fantasie) gewoon het ‘standaardmodel’ noemen. Het standaardmodel is niet het werk van één geniale Einstein, maar een collectieve schepping, en het is niet ontstaan in één flits van inzicht, maar verspreid over zowat een halve eeuw. Het model verenigt in één theorie een groot deel van wat natuurkundigen sinds de tijd van Galilei en Newton hebben weten te verwezenlijken, en het beschrijft met grote precisie zowat alles wat deeltjesfysici in hun deeltjesversnellers zien gebeuren.

Het standaardmodel heeft in de voorgaande decennia reeds het bestaan van verscheidene nog niet ontdekte soorten deeltjes voorspeld, en die zijn vervolgens ook allemaal echt gevonden. Alleen één voorspeld deeltje ontbrak tot voor kort nog, het Higgs-deeltje. En dat was niet zomaar een deeltje, maar wel eentje dat een cruciale rol speelde in de wiskundige machinerie van het standaardmodel. Het Higgs-deeltje was het laatste ontbrekende puzzelstukje van de theorie.

Dat wil niet zeggen dat de fysica nu compleet zou zijn met de vondst van het Higgs-deeltje. De fysici denken al na over wat er ná het standaardmodel moet komen. Het mag dan grote verdiensten hebben, het vertoont immers ook onmiskenbare hiaten — zo heeft het standaardmodel bijvoorbeeld niets te vertellen over de zwaartekracht, of over ruimte en tijd. Als het standaardmodel de bekroning is van de twintigste-eeuwse fysica, dan staat er op het verlanglijstje voor de eenentwintigste eeuw een nog betere, nog meer omvattende, en als het even kan ook elegantere theorie. En ook daarin speelt de LHC een grote rol. De versneller moest niet alleen het Higgs-deeltje vinden en daarmee het laatste puzzel-

stukje van het standaardmodel op zijn plaats leggen, er wordt ook gehoopt dat hij nieuwe deeltjes zal ontdekken, of nieuwe fenomenen zal waarnemen die niet passen in het standaardmodel en die zo de weg wijzen naar een vollediger theorie van de natuur.

Het protest tegen het starten van de Large Hadron Collider in 2008 was maar een van de vele ups-and-downs die het project al heeft doorgemaakt. De feestelijke ingebruikneming kwam er pas na de voor dergelijke grote internationale ondernemingen gebruikelijke jarenlange lijdensweg van budgetproblemen. En amper negen dagen na het inwijdingsfeestje, waarvoor CERN de wereldpers in Genève bij elkaar had geroepen, moest het lab met het schaamrood op de wangen aan dezelfde pers meedelen dat de nieuwe versneller getroffen was door een storing. Een vrij ernstige storing. Een soort ontploffing eigenlijk. Als gevolg van slordigheden bij de constructie was het koelsysteem geëxplodeerd. De herstellingswerkzaamheden duurden meer dan een jaar. Pas in november 2009 circuleerden er opnieuw protonen door de grote ondergrondse ring van de LHC.

Door de vertraging dreigde CERN zelfs even de hoofdprijs mis te lopen, want ook in de Verenigde Staten waren fysici op zoek naar het Higgs-deeltje. Fermilab, een deeltjeslab bij Chicago, zat CERN op de hielen. De Amerikanen worstelden niet met de kinderziekten van een nieuwe, superkrachtige deeltjesversneller, zoals de LHC. Ze probeerden het laatste restje energie te persen uit een oude, al afgeschreven versneller, de Tevatron. Die machine was minder krachtig dan de LHC, maar ze had wel al lang haar betrouwbaarheid bewezen.

Uiteindelijk was het toch in CERN dat het Higgs-deeltje zich liet betrappen. In het voorjaar van 2012 begonnen de geruchten aan te zwellen dat de twee teams die op dat moment onafhankelijk van elkaar de deeltjesbotsingen in de LHC analyseerden, allebei 'iets' gevonden hadden. En uiteindelijk kon CERN op een feestelijk symposium op 4 juli 2012 de ontdekking aankondigen van een nieuw deeltje dat verdacht sterk op het langverwachte Higgs-deeltje leek. Het deeltje dat door de media weleens als het 'god-

delijke deeltje' of 'God-deeltje' wordt omschreven — tot ergernis van de meeste fysici — was eindelijk gevonden.

Tussen de natuurkundigen die op dat symposium in 2012 naar de resultaten van het speurwerk luisterden, zat ook — op een ereplaats — de Belgische theoretisch fysicus François Englert. Samen met zijn in 2011 overleden collega Robert Brout was Englert in 1964 de eerste die het theoretische idee publiceerde waaruit het bestaan van het Higgs-deeltje volgt. De Brit Peter Higgs kwam rond dezelfde tijd onafhankelijk van Brout en Englert op hetzelfde idee, en publiceerde het kort na de Belgen ook — maar door een ongelukje van de geschiedenis is het zijn naam die met het deeltje verbonden is gebleven. Fysici (vooral in België) die graag meer erkenning zouden willen zien voor de rol van Brout en Englert spreken liever over het Brout-Englert-Higgs-boson of BEH-boson.

Niet dat Englert te klagen heeft over een gebrek aan erkenning door zijn collega's natuurkundigen. Integendeel, de laatste jaren valt hem de ene na de andere internationale prijs te beurt. Hij kreeg in 2004 al de felbegeerde Wolf-prijs en in 2010 de Sakurai-prijs voor theoretische fysica. De naam van het deeltje, die lijkt echter nog hardnekkig 'Higgs-boson' te blijven.

Eén onderscheiding, de meest prestigieuze van allemaal, heeft Englert nog niet gekregen. Dat is de Nobelprijs, de enige wetenschappelijke prijs die ook buiten de wetenschappelijke wereld echte weerklank krijgt. Nu het idee van Brout en Englert uit 1964 zo fraai bevestigd is door het experiment, lijkt Englert een goede kans te maken om binnenkort ook de Nobelprijs aan zijn palmares te mogen toevoegen (Nobelprijzen worden niet postuum toegekend, dus Brout komt niet meer in aanmerking). François Englert zou daarmee de allereerste Belg worden die een Nobelprijs voor natuurkunde wint, en de eerste Belgische Nobellaureaat sinds Ilya Prigogine in 1977 de prijs voor scheikunde kreeg.

Ik vertel het verhaal van de elementaire deeltjes, van het Higgs- of Brout-Englert-Higgs-deeltje, van de lange aanloop naar de ontdekking ervan, en het verhaal van François Englerts rol daarin. Als

GEVONDEN!

we ooit echter willen begrijpen wat dat Higgs-boson precies is en waarom de natuurkundigen het per se wilden ontdekken, moet ik eerst een diepe duik nemen in de geschiedenis.

ETAPPE 1. IN DE FLES WATERSTOF

Voor de quark maakt het geen verschil. Hij merkt er niets van, wanneer het atoom waarin hij zit, verminkt wordt. Wanneer zijn molecule verscheurd wordt. De quark leeft in een snellere, meer gewelddadige wereld, het binnenste van een proton. Een wereld van bliksemsnelle gedaanteverwisselingen en immense krachten, waarbij vergeleken de chemische krachten die moleculen stukmaken kinderspel zijn.

Als de wereld van atomen en moleculen een statige balzaal is, waar gedanst wordt op het ritme van een klassieke wals, dan zijn de quarks in het proton hardcore punkers. Ze stormen op elkaar af, botsen, worden weer weggeduwd, allemaal op het ziedende, verzengende ritme van een natuurkracht die fysici de 'sterke interactie' noemen. Niets blijft ook maar één miljardste van één miljardste van een seconde op zijn plaats in de wereld van de quark. Daarmee vergeleken is de wals van de moleculen een dans in slow motion.

Mag ik nog een andere vergelijking maken? Het inwendige van het proton is de flitsende wereld van Wall Street of de Londense City, van miljardentransacties, *high frequency trading*, virtueel geld, grote risico's, grote marges en plotselinge crashes. De wereld buiten het proton, die van atomen en moleculen, is de gewone wereld van betalen bij de bakker, van de maandelijkse huur en van spaargeld bij de bank om de hoek. Ik stel me zo voor dat een bankier die de hele dag met miljarden goochelt en razend is omdat zijn collega een paar miljoen bonus méér heeft gekregen, zich ook niet zo scherp bewust is van meer alledaagse financiële beslommeringen zoals de prijs van een mobiele telefoonabonnement.

In de wereld van de quarks gaat het niet om miljoenen euro's, maar om miljoenen elektronvolt. Dat is de eenheid waarin deeltjesfysici energie uitdrukken. Een handvol elektronvolt (eV) is de hoeveelheid energie die omgaat bij een chemische reactie, of bij het stukmaken van een molecuul of een atoom. Dat is een peulschil in vergelijking met de transacties in de wereld van de quarks, waar gerekend wordt in mega-elektronvolt (MeV), dat wil zeggen in miljoenen elektronvolt. Als het er echt ruw aan toe gaat, wordt de giga-elektronvolt (GeV) gebruikt (dat is een miljard elektronvolt) of zelfs de tera-elektronvolt (TeV), een biljoen of duizend miljard elektronvolt.

Hoe graag de bankier in de City of de geplaagde mobiele telefoonklant het ook zouden willen, geld kun je niet zomaar bijmaken. En het gaat ook niet zo vaak gewoon verloren. Met het 'geld' van de quarks, hun energie, is het net zo. Alleen is de regel daar veel strikter. Energie kan absoluut niet worden bijgemaakt, en gaat absoluut niet verloren. De totale hoeveelheid blijft altijd dezelfde. Dat heet 'de wet van energiebehoud' — en 'wet' betekent hier niet 'regel die je niet mag overtreden', maar 'regel die je niet *kunt* overtreden'. Als er ook maar een elektronvoltje verloren lijkt te zijn, dan is dat stiekem afgevoerd door het een of ander elementair deeltje. En energie winnen kan de quark alleen als hij ze krijgt van een ander deeltje.

Het lijkt misschien een avontuurlijk bestaan. De quark zit echter gevangen in het proton. Erbinnen mag hij dan wild tekeergaan; hij kan met geen mogelijkheid ontsnappen. De sterke interactie houdt hem stevig gebonden aan de andere quarks in het proton. De gevangenis is ongeveer één biljoenste, dus één duizendste van een miljardste van een millimeter groot. Aan die gevangenschap van de quark verandert niets wanneer het proton plots beroofd wordt van zijn elektron. Dat is een piepklein elementair deeltje, dat tot een ogenblik geleden nog rondom het proton zweefde — op de immens grote afstand (vergeleken met het proton zelf) van een tien

miljoenste millimeter. Samen met het proton vormde dat elektron een waterstofatoom, en maandenlang heeft dat waterstofatoom comfortabel vastgehangen aan een tweede identiek waterstofatoom, zodat ze met zijn tweeën een waterstofmolecule vormden. Die molecule zat binnenin een gasfles, in een laboratorium in Genève.

Nu is de rust verstoord — al merkt de quark daar vooralsnog niet veel van. De molecule en het atoom zijn uiteengescheurd, en het grote experiment met de Large Hadron Collider of LHC is begonnen.

2. DE MATERIE ONDER HET MES

De ontdekking van het atoom

Urenlang moesten ze in het pikdonker zitten, de assistenten van professor Rutherford, om hun ogen te laten wennen aan diepe duisternis. Toen dat gebeurd was, begonnen ze, nog steeds in het donker, te turen naar fosforescerende schermen waarop misschien hier en daar een miniem, nauwelijks te onderscheiden lichtvlekje zou oplichten. Dan moesten ze precies optekenen waar het lichtschijnsel zich voordeed, en wachten op het volgende vlekje. De medewerkers van professor Davis daarentegen begaven zich onder de grond. Anderhalve kilometer diep in een oude goudmijn. Daar vulden ze een tank met de afmeting van een zwembad met een chemisch reinigingsmiddel. Om te kijken of er daar, in het duister diep onder de grond, na lang wachten misschien enkele chlooratomen uit het reinigingsproduct zouden veranderen in argonatomen. Elke twee weken moesten ze helium door de tank laten borrelen in de hoop daarmee een handvol argonatomen te verzamelen.

De jonge fysici die meewerken aan de experimenten met de LHC zitten niet in het duister of onder de grond, maar net als de assistenten van Rutherford turen ze naar schermen — computerschermen deze keer, waarop ze de gegevens analyseren die uit de gigantische detectoren van de LHC komen gestroomd. Die gegevens zijn zo talrijk — het zijn de registraties van vele miljarden deeltjesbotsingen — dat er duizenden fysici nodig zijn om ze te onderzoeken. En dat is dan mét al de computerhulp die de moderne technologie te bieden heeft; anders zouden een miljoen fysici het werk nog niet gedaan krijgen. Het speciale netwerk of *grid* dat geconstrueerd is om die gegevens verspreid over universiteiten en instituten overal ter wereld te kunnen onderzoeken, heeft de internettechnologie weer een stap vooruit geholpen.

Allemaal hebben ze gemeen dat ze meewerken of meewerkten aan een eeuwenoud onderzoeksprogramma, de zoektocht naar de kleinste bouwstenen van de materie en naar de krachten en natuurwetten die het gedrag van die bouwstenen bepalen en ervoor zorgen dat ze de materie vormen die we kennen.

Het idee dat er dergelijke bouwstenen zouden kunnen bestaan, is al meer dan tweeduizend jaar oud. Misschien zou het een goede kandidaat zijn voor de titel van ‘wetenschappelijke hypothese die er het langst op heeft moeten wachten voor ze door experimenten bevestigd werd’. Drieëntwintig eeuwen heeft de mens erover gedaan om te constateren dat de Griekse filosoof Democritus (of Demokritos) het bij het rechte eind had toen hij stelde dat de materie was opgebouwd uit vreselijk kleine, niet verder onder te verdelen onderdeeljes, die hij ‘atomen’ noemde (van het Griekse *atomos*, wat betekent ‘niet te snijden’ of ‘ondeelbaar’). Democritus’ idee bewijzen was dan ook geen gemakkelijke opgave. Geen kwestie van een heel scherp mes nemen en een stukje materie in steeds kleinere stukjes snijden tot je op de finale bouwblokjes stuit. Als het zo simpel was, dan zou al lang vóór Democritus bekend zijn geweest hoe het heelal in elkaar zat. In werkelijkheid was het een lange, moeizame zoektocht. Niet alleen met technische moeilijkheden, maar ook met ondoordringbaar rekenwerk, theoretische dwaalsporen, dubbelzinnige experimentele resultaten en indirecte aanwijzingen die juist geïnterpreteerd moesten worden. En met een onverwacht resultaat. Dit hoofdstuk vertelt over de eerste stappen in die kronkelige zoektocht naar de kleinste bouwstenen van de materie.

Over Democritus zelf is er maar weinig uit de eerste hand bekend. Hij werd geboren in Abdera in Thracië in het noorden van Griekenland, naar schatting rond 460 voor het begin van onze jaartelling. Van zijn omvangrijke oeuvre, dat onder meer boeken over fysica, wiskunde, muziek en ethiek omvat moet hebben, is geen enkel werk bewaard gebleven. Zijn ideeën (en zijn leven) zijn bekend uit wat latere auteurs over hem geschreven hebben.

De ‘atoomtheorie’ waarmee Democritus’ naam tegenwoordig vooral verbonden is — en die hem een obligate eerste paragraaf oplevert in zowat elke geschiedenis van de deeltjesfysica — was in werkelijkheid misschien niet eens echt zijn verdienste. Mogelijk had hij het idee van zijn leermeester of oudere collega Leucippus. Zeker is dat echter niet: sommige geleerden (ook al in de oudheid) hebben er zelfs aan getwijfeld of Leucippus wel echt bestaan heeft. In de negentiende eeuw woedde er zelfs een tijdlang een verhit debat onder classici over die *Leucipp-Frage* (Leucippus-vraag), een debat dat niet tot een duidelijke conclusie lijkt te hebben geleid. In een recente studie besluit Daniel Graham van de Brigham Young University in Utah dat Leucippus waarschijnlijk wel degelijk bestaan heeft, en dat het zelfs mogelijk is in de literatuur een onderscheid te maken tussen zijn bijdrage tot de atoomtheorie en die van Democritus. Die discussie zal ik verder echter aan de classici overlaten en het voorzichtigheidshalve hebben over de atoomtheorie van Leucippus en/of Democritus — in het goede gezelschap van auteurs uit de oudheid, onder wie Aristoteles, die Democritus en Leucippus meestal in één adem vermelden als ze het over de atoomtheorie hebben.

Democritus en/of Leucippus stelde zich voor dat materie bestond uit onzichtbaar kleine, volstrekt onbreekbare en onverslijtbare ‘atomen’, die rondzweefden in de leegte. Ze hadden diverse vormen en afmetingen en konden zich, als ze tegen elkaar botsten en in elkaar bleven haken, tot grotere gehelen groeperen, die weer konden uiteenvallen door een botsing met andere atomen. Het geheel doet denken aan een grote, rommelige hoop bewegende Lego-onderdeeltjes die af en toe aan elkaar vastklikken. Behalve dan dat Democritus’ atomen geen kleuren hadden. De kleuren van voorwerpen schreef hij toe, net als al hun andere kenmerken, aan de vormen van de atomen waaruit ze waren opgebouwd, of aan de manier waarop de atomen gerangschikt waren. Zo zouden vormen met veel hoeken en gaten waarin schaduw viel, de kleur zwart opwekken. IJzer moest zijn gemaakt van atomen met stevige haken, die onwrikbaar aan elkaar vast zaten. Het immer beweeglijke

vuur moest daarentegen opgebouwd zijn uit bolvormige atomen, en de ziel was gemaakt van heel fijne, ronde atomen.

Democritus' beeld van de materie doet merkwaardig modern aan, op de speciale atomen van de ziel en nog zo'n paar details na, maar het was niet gebaseerd op enig diepgaand onderzoek van de natuur. Het was eerder een 'toevalstreffer', volgens de twintigste-eeuwse filosoof Bertrand Russell. De 'niet te snijden' atomen van Democritus of Leucippus waren bedoeld als antwoord op het werk van Parmenides en Zeno, die geargumenteed hadden dat verandering en beweging onmogelijk waren. Er kon immers geen leegte bestaan om in te bewegen, want leegte was 'niets' of 'niet zijn', en bestond dus niet. Evenmin kon de materie volgens hen uit onderdelen zijn opgebouwd, want er was niets om die van elkaar te scheiden. Leucippus en Democritus stelden daartegenover dat de werkelijkheid twee ingrediënten had, het 'zijnde', namelijk de atomen, en het 'niet zijnde', de leegte, die de atomen van elkaar scheidde en het ze mogelijk maakte om te bewegen. Zoals verderop zal blijken, stelt de leegte of het vacuüm ook de hedendaagse fysici nog steeds voor raadsels. Ze vragen zich niet meer af of het wel kan bestaan, maar er zijn nieuwe vragen in de plaats gekomen. Het vacuüm blijkt niet zo leeg te zijn als gedacht werd, en het heeft menig fysicus grijze haren bezorgd bij een poging om zijn eigenschappen wiskundig te beschrijven.

Democritus' atoomtheorie was in zijn eigen tijd niet zo'n groot succes. De filosoof werd doodgezwegen of over het hoofd gezien door de veel invloedrijkere Plato. Aristoteles verwierp de atoomtheorie. Het idee werd wel opgepikt door Epicurus en later door Lucretius, maar het leidde toch vooral een sluimerend bestaan in de marge, tot het in de voorbije paar eeuwen in een heel nieuwe gedaante zijn intrede deed in de moderne wetenschap — en men daadwerkelijk op zoek ging naar de bouwstenen die voor de Grieken altijd puur theoretisch waren gebleven.

Voor ik Democritus achter me laat, nog één citaat over hem, van de derde-eeuwse biograaf Diogenes Laërtius: 'Favorinus vermeldt dat Democritus over Anaxagoras zegt dat diens ideeën over de zon en de maan niet origineel van hemzelf zijn, maar oud en

geplagieerd. Hij sprak geringschattend over Anaxagoras' theorieën over de kosmos en de geest, en hij stond vijandig tegen hem omdat die hemzelf niet als student had toegelaten.' Anders gezegd: Democritus zou zich meteen thuis voelen in het ook niet altijd even vriendschappelijke academische leven van vandaag.

Toen wetenschappers vanaf de zeventiende eeuw op aanwijzingen begonnen te stuiten dat de materie écht uit kleine bouwsteentjes was opgebouwd, moesten ze meteen aan Democritus denken. Waren ze misschien de ondeelbare atomen van de Griekse denker op het spoor? Het zou echter nog eeuwen duren voor die vraag een duidelijk antwoord kreeg. Voorlopig bleef het behelpen met indirecte aanwijzingen.

Robert Boyle (1627–1691) constateerde bij zijn proeven met druk en gassen dat gassen zoals lucht vlot konden worden samengeperst. Dat was gemakkelijk te begrijpen als het beeld dat Democritus had geschetst van de bouw van de materie althans voor gasen correct was: kleine deeltjes die van elkaar gescheiden waren door leegte. Door een gas samen te drukken, werden de deeltjes dichter bij elkaar geduwd, en was er dus minder leegte tussen. Een echt bewijs was dat natuurlijk niet, en het zei niets over vloeistoffen en vaste stoffen, maar het was toch suggestief. Tegen het einde van de achttiende eeuw waren er sterkere aanwijzingen. Scheikundigen hadden toen opgemerkt dat chemische stoffen in vaste verhoudingen met elkaar combineerden tot verbindingen.

Om maar meteen het allerbekendste voorbeeld te nemen van een chemische verbinding: water kun je maken uit waterstof en zuurstof, en omgekeerd kun je water weer ontbinden tot waterstof en zuurstof. Dat gaat echter niet in om het even welke verhouding. Water ontbinden levert altijd één deel waterstof en acht delen zuurstof op. En ook omgekeerd: één gram waterstof laat zich combineren met acht gram zuurstof tot negen gram water. Nooit kun je één gram waterstof combineren met negen gram zuurstof om tien gram water te maken (ook niet een beetje 'zuurstofachtiger' water). De verhouding van één op acht ligt vast. Komt dat misschien door de bouwstenen waaruit stoffen bestaan?

Bestaat de kleinste eenheid water misschien uit één 'blokje' waterstof en acht 'blokjes' zuurstof? Of is het één blokje zuurstof en één blokje waterstof, waarbij het blokje zuurstof dan acht keer zo zwaar is als het blokje waterstof? Of is het één blokje zuurstof en twee blokjes waterstof, waarbij het blokje zuurstof zestien keer zo zwaar is? Het was die laatste mogelijkheid. Zoals iedereen tegenwoordig op school leert is water H_2O , een molecule die bestaat uit twee atomen waterstof (H) en één atoom zuurstof (O).

Dat is vandaag gemeengoed. Twee eeuwen geleden was het idee dat bouwsteentjes de vaste verhoudingen in chemische reacties konden verklaren echter nog niet meer dan een gewaagde hypothese. De oude theorie van Leucippus en Democritus indachtig, noemde de Britse scheikundige John Dalton de hypothetische bouwsteentjes 'atomen'. De groepjes van aan elkaar geklikte atomen werden later moleculen gedoopt. Al moet erbij verteld worden dat het in werkelijkheid niet zo eenvoudig ging met het geven van die namen. Gedurende een groot deel van de negentiende eeuw heerste er verwarring over de terminologie. De 'moleculen' van de ene scheikundige waren de 'atomen' van de andere. Op een van de eerste internationale wetenschappelijke conferenties, het congres van scheikundigen in Karlsruhe in 1860, stond bovenaan op de agenda een discussie over de vraag: 'Dient er een onderscheid te worden gemaakt tussen de uitdrukkingen "molecule" en "atoom"?' Pas geleidelijk raakte de moderne terminologie algemeen geaccepteerd, waarbij de atomen de bouwblokken zijn, die samen moleculen vormen.

Helaas bleek het veel later een beetje voorbarig te zijn geweest om voor die scheikundige bouwstenen de term 'atoom' (of 'onsnijdbaar') te gebruiken. De 'atomen' die de scheikundigen ontdekt hadden, zijn helemaal niet ondeelbaar. Tegen de tijd dat dat duidelijk werd, was het woord 'atoom' echter al helemaal ingeburgerd. Als je eenmaal met een ongelukkig gekozen naam zit opgescheept, raak je er niet meer zo gemakkelijk van af, en dat lijkt ook voor het Higgs-boson te gelden — maar dat is een verhaal voor een later hoofdstuk.

In de negentiende eeuw waren atomen een zeer interessante hypothese, maar het bleek niet zo gemakkelijk om hard te maken dat ze ook echt bestonden. Ze waren in elk geval veel te klein om ze te kunnen zien, zelfs met de allerbeste microscopen. Menig natuurkundige of scheikundige beschouwde atomen en moleculen slechts als een handig wiskundig trucje of geheugensteuntje, dat hielp bij berekeningen, maar dat niet te letterlijk genomen moest worden. De bekende fysicus en filosoof Ernst Mach zei in 1897 nog: 'Ik geloof niet dat atomen bestaan.' Mach hamerde er eindeloos op dat alle wetenschap gebaseerd moest zijn op directe waarnemingen; voor de hypothetische atomen die nooit rechtstreeks konden worden geobserveerd was er geen plaats in zijn visie.

Bewijzen dat atomen reëel waren, is een lang proces geweest, waar vele wetenschappers hebben toe bijgedragen. Het ging moeizaam, omdat atomen hardnekkig weigerden om zich gewoon te laten zien in microscopen. Steeds meer aanwijzingen uit heel diverse domeinen van fysica en chemie begonnen echter allemaal in dezelfde richting te wijzen, dat atomen en moleculen echt bestonden. Wat veel wetenschappers heeft overtuigd, is dat er slimme manieren werden bedacht om uit te rekenen hóé klein die minuscule atomen dan wel precies waren. En die verschillende schattingen van de grootte van atomen lagen allemaal verdacht goed in dezelfde buurt (de moderne waarde voor de diameter van een typisch atoom is zo'n 0,1 nanometer of één tien miljoenste van een millimeter). Toen Mach zich in 1897 tegen atomen uitsprak, voerde hij al een achterhoedegevecht, maar pas in het begin van de twintigste eeuw werd het pleit definitief beslecht.

Uit de vele wetenschappers die daartoe hebben bijgedragen, zal ik er één uitkiezen: Albert Einstein. Die is natuurlijk veel bekender voor zijn relativiteitstheorie en voor zijn bijdragen tot de kwantumfysica (die allebei verderop nog volop zullen terugkomen). Zelfs als die relativiteitstheorie en de kwantumfysica er nooit geweest waren, dan zou Einstein alleen al door zijn inbreng in de discussie over atomen een bekend fysicus zijn geworden.

Het is 1905 en Albert Einstein beleeft zijn *annus mirabilis*, zijn wonderjaar. Hij werkt op dat moment als technisch expert in het Zwitserse patentkantoor en in zijn vrije tijd schrijft hij het ene na het andere baanbrekende natuurkundige artikel. In een ervan introduceert hij de relativiteitstheorie, in een tweede lanceert hij de roemruchte formule $E = mc^2$ (al komt die eigenlijk niet letterlijk in die vorm in het artikel voor; ze is bekend geworden in een latere formulering), voor nog een derde artikel (over kwantumtheorie) zal hij later de Nobelprijs krijgen. Tussendoor voltooit Einstein ook zijn proefschrift, en elf dagen daarna stuurt hij een artikel naar het vakblad *Annalen der Physik*, dat veel mensen ervan zal overtuigen dat atomen echt bestaan.

Als een vloeistof echt uit heel kleine atomen of moleculen bestaat die allemaal kriskras door elkaar bewegen, zo redeneert Einstein in het artikel, dan zou dat te merken moeten zijn als je een heel klein stofdeeltje in de vloeistof brengt en onder de microscoop toekijkt hoe het rondrijft. Onophoudelijk moeten er dan aan alle kanten moleculen tegen het stofdeeltje botsen, en die moeten het nu eens de ene, dan weer de andere kant op stoten. Stel dat er in een korte tijdsspanne 50 moleculen tegen de linkerkant van het stofje botsen (en het dus naar rechts duwen), terwijl er toevallig 52 moleculen tegen de rechterkant botsen (en het naar links duwen), of dat de botsingen aan de rechterkant toevallig iets krachtiger zijn. Dan zou het stofje naar links bewegen. Een oogwenk later is het misschien aan de andere kant dat er het meest gebotst wordt, en dan krijgt het stofje een stoot in de andere richting. Onder de microscoop zou dan te zien moeten zijn hoe het stofje een schokkerige zigzagbaan beschrijft, de speelbal van de botsende moleculen — zelfs al zijn de moleculen véél kleiner dan het stofje, en zelf niet zichtbaar. Einstein gaat nog verder en werkt wiskundig uit welke soort zigzagbeweging het stofje precies moet beschrijven. En hij vindt een verband tussen de snelheid waarmee het stofje zich moet verwijderen van zijn beginpunt, en de grootte van de moleculen in de vloeistof (voor de liefhebbers: hij legt een verband met het beroemde 'getal van Avogadro', dat zelf weer in verband staat met de massa en de grootte van de moleculen).

Nu is het op het moment dat Einstein zijn berekeningen maakt al lang bekend dat heel kleine stofjes (kleiner dan pakweg een duizendste millimeter) in een vloeistof inderdaad op een willekeurige, schokkerige manier in het rond bewegen. Dat staat bekend als de 'Brownse beweging', naar de botanicus Robert Brown die het in 1827 heeft vastgesteld toen hij onder de microscoop pollen in water in het rond zag dansen. Er is al veel onderzoek gedaan naar die Brownse beweging, en sommige wetenschappers vermoeden dat ze veroorzaakt wordt door botsende moleculen, maar niemand heeft dat hard kunnen maken en nog niemand heeft, zoals Einstein, een duidelijk wiskundig verband gelegd tussen de waargenomen eigenschappen van de beweging aan de ene kant, en de eigenschappen van de moleculen aan de andere kant.

Einstein is in 1905 niet goed op de hoogte van al het voorgaande werk over de Brownse beweging, en hij weet niet of er recente metingen bestaan van de snelheid waarmee een stofje ronddwarrelt in een vloeistof. Als die metingen er zijn, dan kan die snelheid aan de ene kant worden ingevuld in Einsteins formules, om aan de andere kant tot de grootte van moleculen te komen. En dan kan gekeken worden of die overeenkomt met andere schattingen van de afmetingen van moleculen. Einstein, die in 1905 geen gemakkelijke toegang heeft tot een goede wetenschappelijke bibliotheek (en misschien ook niet het temperament om zich daar langdurig in te begraven) beperkt zich in zijn artikel tot de opmerking: 'Het is mogelijk dat de hier besproken bewegingen identiek zijn met de zogenaamde Brownse moleculaire beweging; de referenties die over dat onderwerp tot mijn beschikking staan zijn echter zo onnauwkeurig dat ik me daar geen opinie over heb kunnen vormen.' Wanneer andere wetenschappers, zoals Jean Perrin van de Sorbonne in Parijs, na de publicatie van Einsteins artikel de nodige metingen doen, blijkt al snel dat de stofdeeltjes zich precies gedragen volgens Einsteins theorie, en dat de grootte van de moleculen die eruit volgt mooi overeenstemt met de andere schattingen daarvan.

Allemaal verschillende manieren om te schatten hoe groot en hoe zwaar atomen zijn, leiden tot dezelfde waarde. Dat suggereert

sterk dat atomen en moleculen méér zijn dan een wiskundige fictie. Dankzij Einsteins onderzoek naar de Brownse beweging kunnen wetenschappers voor het eerst een fenomeen dat iedereen door een microscoop kan zien en meten, direct in verband brengen met de eigenschappen van atomen. De chemicus Wilhelm Ostwald, een van de laatste leiders van het antiatoomkamp, en de auteur van invloedrijke handboeken waarin geen plaats was voor atomen, maakt in 1909 zijn 'bekering' tot de atoomtheorie bekend. Later zegt hij dat het artikel van Einstein was dat hem ten slotte over de streep heeft getrokken. Mach blijft tot zijn dood in 1916 de atoomtheorie bekampen.

Vandaag, in de eenentwintigste eeuw, bestaat er over de realiteit van atomen en moleculen al lang geen twijfel meer: ze kunnen nu wel degelijk 'gezien' worden, dat wil zeggen gefotografeerd of zelfs in detail afgetast door speciale microscopen. In 1990 slaagden onderzoekers van computerfabrikant IBM erin het woord 'IBM' te spellen door individuele atomen één voor één op de goede plaats te leggen, en vervolgens een plaatje te maken van het resultaat. Misschien zouden ze op die manier zelfs Ernst Mach hebben kunnen overtuigen. En voor het geval de boodschap nog niet duidelijk genoeg was, is IBM in 2013 nog een stap verder gegaan. Onderzoekers van het bedrijf hebben nu na elkaar een hele reeks tekeningetjes gemaakt met atomen, die allemaal gefotografeerd (zowat honderd miljoen maal vergroot) en ze gemonteerd tot een animatiefilmpje. Heel passend van een jongetje dat speelt met een atoom. Een paar tientallen atomen vormen telkens de contouren van het jongetje, en het atoom waarmee hij speelt is gewoon een atoom. 'De kleinste film ter wereld', noemt de persdienst van IBM het. Overigens zijn de tekeningetjes niet gewoon gefotografeerd. De microscoop waarmee de beelden gemaakt zijn, werkt in feite door het oppervlak waarop de atomen liggen in microscopisch kleine stapjes af te tasten, waarna de computer op het beeldscherm een beeld van het afgetaste gebied toont.

In de hedendaagse wetenschap spelen atomen een zodanig vitale rol dat de fysicus Richard Feynman in 1963 kon schrijven dat als door een of andere ramp al onze wetenschappelijke kennis verloren zou gaan, en er kon maar één zin worden doorgegeven aan de volgende generaties, dat die zin dan zou moeten luiden: 'Alle dingen zijn gemaakt van atomen — kleine deeltjes die onophoudelijk rond bewegen, elkaar aantrekkend als ze zich op enige afstand van elkaar bevinden, maar elkaar afstotend als ze tegen elkaar geduwd worden.'

ETAPPE 2. WEG UIT DE PROTONENBRON

Er wordt getrokken aan de quark. En geen klein beetje ook — met een hoogspanning van negentigduizend volt. Dat komt doordat er ginds in de verte in een stuk metaal een overschot aan elektronen is. En elektronen hebben een speciale eigenschap: ze zijn ‘elektrisch geladen’. Meer bepaald heeft elk elektron een lading die gelijk is aan -1 (in de speciale eenheid die deeltjesfysici gebruiken voor elektrische lading). Negatief dus. De quark heeft ook een elektrische lading: $+2/3$. Positief dus. En dat betekent dat de quark en een elektron zich tot elkaar aangetrokken voelen. Niet in de amoureuze zin van het woord, maar letterlijk. Ze ondervinden een kracht die ze naar elkaar toe trekt. Zo is de regel voor elektrische ladingen en krachten: ladingen met tegengesteld teken (dus positief en negatief) trekken elkaar aan, ladingen met hetzelfde teken (positief en positief of negatief en negatief) stoten elkaar af.

De quark ondervindt niet slechts de aantrekkingskracht van één elektron, maar van vele miljarden van die deeltjes. Allemaal trekken ze hem dezelfde kant op. De quark trekt ook terug natuurlijk, maar de elektronen kunnen niet zijn kant op komen, die zitten vast in het metaal. De quark kan ook niet zonder meer naar de elektronen snellen, want hij zit gevangen in het proton. Daar hangt hij vast aan nog twee andere quarks — en dat is met de stevige banden van de sterke interactie, een heel andere kracht dan de elektrische, een kracht waaraan echt niet te tornen valt. Als de quark dus naar de lokkende elektronen in de verte toe wil, dan zal hij zijn twee collega’s moeten meenemen en met het hele proton op reis gaan.

Een van de twee andere quarks in het proton heeft een elektrische lading van $-1/3$. Dat is negatief. Die wil dus wég van de negatieve elektronen. De derde quark heeft net als de eerste echter een positieve lading van $+2/3$. De positieve ladingen winnen het dus. De totale lading van het proton is $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$. Positief, dus het proton als geheel voelt netto een aantrekkingskracht naar de elektronen. De ene negatieve quark zou misschien liever van de elektronen wegvluchten, maar hij heeft geen keus. De sterke interactie die hem aan zijn twee collega's bindt, is veel sterker dan de afstoting van de elektronen. Dus zet het proton zich in beweging, steeds sneller. In een fractie van een seconde heeft het proton al een snelheid van veertien miljoen kilometer per uur. Dat is vierduizend kilometer per seconde, of zowat 1,4 procent van de snelheid van het licht. Met die snelheid stormt het trio quarks een apparaat uit dat fysici een 'protonenbron' noemen. En het ziet er naar uit dat die snelheid van veertien miljoen kilometer per uur nog maar een begin is. Want het volgende apparaat waar het proton nu in terecht komt, heet een 'versneller'.

3. SCHieten OP EEN KRENTENKOEK

Het elektron en de atoomkern

De Britse fysicus Joseph John Thomson is in 1897 verdiept in een ingewikkeld experiment met een mysterieuze soort straling die bekendstaat als 'kathodestraling'. Het zijn hoogtijdagen voor het bestuderen van mysterieuze stralingen. Een jaar eerder heeft de wereld dankzij Henri Becquerel voor het eerst van radioactiviteit gehoord, en nog een jaar eerder, in 1895, heeft Wilhelm Conrad Röntgen de x-stralen of röntgenstralen ontdekt. Er is in 1897 al een en ander bekend over de kathodestrallen die J.J. Thomson onderzoekt. Ze worden opgewekt als je twee metalen contacten in een luchtledig gezogen glazen fles monteert, en ze onder hoogspanning zet. De stralen vertrekken dan vanuit het negatieve contact (de zogenaamde kathode waaraan de straling haar naam te danken heeft) en ze vliegen in de richting van het positieve contact. Als ze ergens het glas raken, geeft dat een lichtvlek, zeker als het glas ook nog bedekt wordt met een laagje fosforescerend materiaal.

Thomson wil weten wat de kathodestrallen zijn. Misschien een soort golven, zoals licht of radiogolven? Of bestaan ze uit materiedeeltjes, uit atomen misschien, die uit de kathode zijn losgemaakt, of uit atomen van het ijle gas dat nog in de leeggepompte fles is achtergebleven? De golven vallen af, want Thomson kan de stralen afbuigen met een magneet of met elektrische krachten, en dan reageren ze net als elektrisch geladen materiedeeltjes. Hij herhaalt zijn experimenten met kathoden gemaakt van verschillende metalen, en met verschillende soorten ijle gassen in de fles. Telkens blijkt de straling uit identiek dezelfde deeltjes te bestaan. Het zijn

dus geen atomen uit het gas of de kathode (want dan zouden het er telkens andere moeten zijn).

Na twee jaar werk is Thomson erin geslaagd de massa van de deeltjes te meten, en wat blijkt: ze zijn veel lichter dan zelfs het lichtste atoom (bijna tweeduizend keer lichter volgens de recente waarde). Thomson heeft iets ontdekt dat lichter en kleiner is dan atomen. Hij vermoedt (correct) dat zijn deeltjes onderdelen zijn van atomen. Ze komen vrij uit de atomen van de kathode wanneer die onder spanning gebracht wordt. En het is een universeel soort onderdeel, want uit al de verschillende soorten atomen voor de kathode komen identieke deeltjes tevoorschijn. Thomson noemt zijn deeltjes aanvankelijk 'corpuscles', maar al snel worden ze omgedoopt tot 'elektronen'.

Op een moment dat nog niet eens alle wetenschappers overtuigd zijn dat atomen echt bestaan, heeft Thomson er al een onderdeel van ontdekt. Het atoom is dus niet het 'onsnijdbare' oerdeeltje van Democritus. Eigenlijk zou het elektron meer aanspraak kunnen maken op die titel, want voor zover in 2013 bekend is, bestaat dat niet uit nog kleinere onderdelen; het is daarom wat vandaag een *elementair* deeltje genoemd wordt.

Thomsons kathodestraalbuis, waarin een bundel elektronen met grote snelheid van het ene naar het andere uiteinde gejaagd wordt, is een vroege voorloper van twee apparaten met een grote toekomst: de tv-beeldbuis en de deeltjesversneller. In tv's van de vorige generatie (die nog niet de vorm hadden van een plat scherm, zoals vandaag, maar van een grote zware doos) was er binnenin net zo'n elektronenbundel aan de slag, onophoudelijk heen en weer gaand om lichtpuntjes op het beeldscherm te tekenen. Die bundel bewoog door een vacuümgezogen 'beeldbuis', en werd bestuurd met metaalplaatjes onder elektrische spanning. De deeltjesversneller, het apparaat dat zo'n grote rol gespeeld heeft in de twintigste-eeuwse deeltjesfysica, werkt volgens een soortgelijk principe: een bundel elektronen of andere deeltjes wordt met elektrische en magnetische krachten versneld en bestuurd.

Thomson heeft nu vastgesteld dat atomen elektronen bevatten, die er met wat trekken en sleuren (bijvoorbeeld verhitting of elektriciteit) uit tevoorschijn gehaald kunnen worden. Verder is echter alles nog onduidelijk. Op welke manier zitten die elektronen normaal in het atoom? En waaruit bestaat de rest van het atoom? Als er in een atoom negatieve elektronen zitten, dan moet het atoom ook positief geladen onderdelen hebben, want atomen als geheel zijn (meestal) elektrisch neutraal. Die positief geladen 'rest' van het atoom moet bovendien veel zwaarder zijn dan de vederlichte elektronen, en wellicht ook veel groter. Thomson stelt zich voor dat de elektronen in een atoom kleine deeltjes zijn die ingebed zitten in een soort zware, positief geladen pasta. Hij vergelijkt het zelf met de krenten in een *Christmas pudding*. Dat 'krentenkoekmodel' houdt echter niet lang stand. Het bezwijkt onder een bombardement in het laboratorium van Ernest Rutherford in 1909 aan de universiteit van Manchester.

Rutherford (1871–1937), geboren in Nieuw-Zeeland, is een imposante verschijning, extravert, luidruchtig, met een walrussnor en een stentorstem. Er wordt gezegd dat hij door zijn luide stem overal in het lab de gevoelige apparatuur ontregelt, maar in feite is hij een begenadigd experimentator. Zelf schijnt hij van mening te zijn dat luid vloeken een gunstige invloed heeft op fysische experimenten. Rutherford heeft in 1908 de Nobelprijs gekregen voor zijn onderzoek naar radioactiviteit. Zijn grootste ontdekking moet dan nog komen.

In 1909 heeft Rutherford samen met zijn assistenten, onder wie Hans Geiger (bekend van de Geigerteller, een radioactiviteitsmeter), een slim experiment opgezet om de inwendige structuur van atomen te bestuderen. Dat willen ze doen door atomen als doelwit te gebruiken, en ze te beschieten met snelle projectielen. Het doelwit is een dun laagje goudfolie (vol met goudatomen). De projectielen zijn 'alfadeeltjes', zware en positief geladen deeltjes die spontaan worden uitgezonden door radioactief radon (in de moderne terminologie kun je alfadeeltjes ook heliumkernen of He^{2+} -ionen noemen). Het radioactieve radon zit in een loden kist met aan één kant een klein gaatje in de wand, zodat er een

dunne bundel alfadeeltjes uit de kist schiet. Rutherford wil weten wat er met de alfadeeltjes gebeurt nadat ze de goudfolie getroffen hebben. Daarom heeft hij eromheen schermen met zinksulfide opgesteld, die heel zwakjes oplichten als er een alfadeeltje op terecht komt. Dat is de reden waarom hij zijn assistenten in het donker zet en waarom ze tijdens het experiment onafgebroken naar de schermen moeten turen en optekenen waar er lichtflitsjes te zien zijn.

Als het model van Thomson correct is, dan zou de beschieting van de goudfolie met alfadeeltjes weinig spectaculaire gevolgen mogen hebben. Wanneer een positief geladen alfadeeltje een goudatoom treft, dan zou het er dwars door moeten bewegen en een beetje van zijn rechte pad afbuigen omdat het wordt afgestoten door de positieve 'pasta' die het atoom vult. Dat is echter niet wat er in werkelijkheid gebeurt. In de plaats daarvan zien Rutherford en zijn medewerkers dat de meeste alfadeeltjes volstrekt ongestoord dwars door de goudatomen bewegen, maar dat er af en toe eentje brutaal wordt weggekegeld in een willekeurige richting. Sommige alfadeeltjes worden zelfs teruggekaatst in de richting vanwaar ze gekomen waren. Dat is onverwacht, althans volgens Thomsons krentenkoekmodel. 'Het was bijna alsof je een 15-duims granaat afvuurde op een velletje vloeiend papier en ze keerde terug en raakte je', zegt Rutherford later. Of alsof je kogels afvuurt op een *Christmas pudding*, en af en toe kaatst er een kogel naar je terug. Er moet dus iets in het atoom zitten dat alfadeeltjes kan terugkaatsen. De elektronen kunnen het niet zijn, die zijn zo licht dat ze door een aanstormend alfadeeltje gewoon uit de weg worden geduwd. In de plaats daarvan moet het iets hard en zwaars zijn, dat de klap van een alfadeeltje kan weerstaan. En het moet iets heel kleins zijn, zodat de meeste alfadeeltjes het missen en gewoon rechtdoor bewegen.

Zo ontstaat het idee van de atoomkern. Blijkbaar zit het overgrote deel van de massa van een atoom geconcentreerd in die piepkleine kern. Het nieuwe model van het atoom dat Rutherford in 1911 op basis van zijn analyse van het experiment voorstelt, doet wel wat denken aan het zonnestelsel. In het midden zit de zware

kern, die ondanks zijn kleine afmetingen het hele atoom domineert, zoals de zon het hele zonnestelsel beheerst. De kern is positief geladen. Eromheen wentelen de negatief geladen elektronen, als planeten om de zon. Ze worden niet door de zwaartekracht in hun banen gehouden, maar door de elektrische aantrekkingskracht van de positief geladen kern. De diameter van de kern van het goudatoom blijkt maar zowat één vijfendertigduizendste van de diameter van het hele goudatoom te zijn. Te vergelijken met een erwt in het midden van een sportstadion. De elektronen zijn in die vergelijking dan fruitvliegjes (of kleiner) die er in een grote ijle zwerm ter grootte van het stadion omheen cirkelen. Daarmee is de zoektocht naar de kleinste bestanddelen van de materie echter nog lang niet voorbij. Het elektron is dan wel 'onsnijdbaar', de atoomkern is dat allerminst.

Radioactiviteit is de eerste aanwijzing dat de atoomkern niet zo ongenaakbaar is als de zon in het midden van haar planetenstelsel. Sommige stoffen, zoals radium en uranium, zenden spontaan en onophoudelijk een zeer krachtige straling uit, zoals de alfastraling waarmee Rutherford zijn goudatomen bekogelt (voorts zijn er ook nog bètastraling en gammastraling). Het zijn stralen met veel te veel energie om afkomstig te kunnen zijn uit de tamelijk rustige elektronenzwerm van het atoom. Daar treden alleen bescheiden krachten op, en is er maar een beetje energie beschikbaar.

Tijdens een conferentie in Brussel in 1911 (de eerste van de beroemde reeks 'Solvay-conferenties') zegt de gevierde onderzoekster van de radioactiviteit, Marie Curie, dat de meeste kenmerken van atomen, zoals hun chemische, thermische en optische eigenschappen, verklaard kunnen worden door wat er zich aan hun buitenkant afspeelt (dat wil zeggen aan de buitenkant van de elektronenwolk), maar 'radioactieve verschijnselen vormen een wereld apart, zonder enig verband met het voorgaande. Het lijkt er daarom op dat radioactieve fenomenen voortkomen uit een diepere regio van het atoom.' De atoomkern, die net in 1911 door Rutherford aan de wereld wordt gepresenteerd, is precies de diepere regio die Curie zich voorstelt. Het zal echter nog twintig jaar puz-

zelswerk vergen voor duidelijk wordt hoe atoomkernen precies zijn opgebouwd.

De eenvoudigste atoomkern lijkt die van waterstof te zijn, het lichtste atoom. Die kern wordt in die tijd een 'positief elektron' of een 'H-deeltje' genoemd, maar ik zal hier even vooroplopen en alvast de moderne naam gebruiken: *proton*. Een waterstofatoom lijkt te bestaan uit een proton, waar één elektron omheen draait. Het is een redelijke veronderstelling dat de kernen van zwaardere atomen een aantal van die protonen bevatten, en dat er een aantal elektronen omheen wentelen.

Eerst denken de fysici dat atoomkernen opgebouwd zijn uit de enige twee bestanddelen die ze al kennen: protonen en elektronen. Rutherford denkt bijvoorbeeld dat de kern van een heliumatoom bestaat uit vier protonen en twee elektronen — en rondom die kern draaien dan nog eens twee elektronen in de wolk. De ware toedracht komt pas aan het licht nadat James Chadwick in 1932 een heel nieuw soort deeltje heeft ontdekt. Het wordt door sommige atomen afgegeven als ze door alfastraling getroffen worden. Volgens de metingen van Chadwick is het ongeveer even zwaar als een proton, maar dan elektrisch neutraal in plaats van met een positieve lading. Het krijgt de naam 'neutron'. Met de ontdekking van het neutron valt alles op zijn plaats in de atoomkern. Atoomkernen bestaan uit een mengsel van positieve protonen en neutrale neutronen (op de waterstofkern na, die gewoon één proton is). Rondom de kern draaien in de elektronenwolk evenveel negatieve elektronen als er in de kern positieve protonen zitten, zodat het atoom als geheel elektrisch neutraal is.

De opheldering van de bouw van de atoomkern heeft grote gevolgen. De protonen en neutronen in kernen oefenen veel sterkere krachten op elkaar uit dan de atomen in moleculen. Daardoor kan er ook veel meer energie vrijkomen wanneer er iets verandert in een kern dan er vrijkomt bij een verandering in een molecule (een chemische reactie). En precies die grote hoeveelheid energie wordt benut in kerncentrales en in kernwapens.

ETAPPE 3. IN DE GREEP VAN DE EERSTE VERSNELLERS

Het proton met de quark erin wordt opnieuw aangetrokken en versneld door een opeenhoping van elektronen. Voor heel eventjes. Zodra het voorbij de plaats schiet waar de elektronen waren, voelt het proton in de plaats daarvan achter zich een afstotende kracht, van een stuk metaal met een tekort aan elektronen. En voor zich voelt het weer de aantrekking van elektronen. Dat herhaalt zich, tot het proton uit de 'versneller' tevoorschijn schiet. En meteen komt het in een nieuwe versneller terecht. De eerste heette Linac 2, de nieuwe heet 'Proton Synchrotron Booster'.

Daar voelt het proton een nieuwe kracht. Het vliegt langs een krachtige magneet, en die doet het afbuigen van zijn rechte baan. Daarna komt een tweede magneet, die het proton weer een stukje doet afbuigen, en dan weer een, en weer een. Zo gaat het verder, tot het helemaal rond is gevlogen, op een ruwe cirkelbaan. Het proton komt zo herhaaldelijk weer in een zone waar het de aantrekking van elektronen voelt en versneld wordt. En dan gaat het weer de cirkel van magneten in, die het opnieuw terugvoeren naar de zone voor de versneling. En zo verder in het rond, vele keren per seconde. Het apparaat waar een elektrische kracht het proton versnelt, noemen de fysici een 'radiofrequentiecaviteit', en de cirkel van magneten die het proton telkens naar dezelfde plaats terugbrengt, dient om dezelfde caviteit telkens opnieuw te kunnen gebruiken, om het proton telkens een nieuw stootje in de rug te geven en het *nóg* wat meer te versnellen. Waarom zou je een miljoen caviteiten bouwen als je een proton ook een miljoen keer langs dezelfde caviteit kunt laten passeren?

Hoe kan het proton (en de quark erin) eigenlijk het effect voelen van die magneten, of van de elektronen in de caviteit, zonder ze aan te raken? Het antwoord is dat een magneet (of een elektron) in de ruimte rondom zich een verandering opwekt, wat fysici een 'veld' noemen. Dat veld, een magnetisch veld of een elektrisch veld, oefent vervolgens een kracht uit op alles wat erin komt. Het proton voelt niet 'door het niets' een kracht van de magneet, het komt terecht in een veld dat de magneet al gemaakt had, en zodra het proton in dat veld zit, voelt het een kracht. Er zijn niet alleen elektrische en magnetische velden. De zwaartekracht heeft ook een veld. Als je in het zwaartekrachtveld van de aarde een appel loslaat, dan valt hij naar beneden doordat het veld erop inwerkt. Je kunt de zwaartekracht, of elektrische of magnetische krachten, ook beschrijven zónder het begrip veld, met alleen maar krachten, maar de beschrijving met velden werkt beter, hebben fysici ondervonden.

Een proton ondervindt niet alleen de invloed van velden, het wekt zelf ook velden op. Het heeft zelf een elektrisch en een magnetisch veld — of je zou beter kunnen zeggen dat het bijdraagt tot het totale elektrische en magnetische veld in zijn omgeving. Een kenmerk van al deze velden is dat ze kunnen trillen en golven. Als een elektron heel snel heen en weer beweegt, doet het een golf door het elektrische en magnetische veld lopen (als je met je hand het uiteinde van een touw heen en weer beweegt kun je daar ook een golf door laten lopen). De soort golf die een heen en weer bewegend elektron maakt, heet een elektromagnetische golf. Radiogolven zijn een voorbeeld van dergelijke elektromagnetische golven, maar ook doodgewoon licht — het verschil ligt eraan hoe snel het veld trilt in de golf. Gaat de sterkte van het veld zowat een miljoen miljard keer per seconde op en neer, dan kun je de golf zien met je ogen. Is het minder dan enkele honderden miljoenen keren per seconde, dan kun je de golf opvangen met een antenne.

4. MANOEUVRES IN HET DONKER

Het mysterieuze neutrino

Misschien zijn kopers van ondergrondse zwembaden allemaal wel een beetje excentriek. Om een zwembad te willen dat honderden meters onder de grond ligt en waar het pikdonker is als het in gebruik is, of dat gevuld is met reinigingsproduct in plaats van met water, daarvoor moet je echter meer dan een gewone portie excentriciteit hebben. En om dan ook nog te geloven dat een dergelijk onder honderden meters massieve rots verborgen zwembad de ideale plek is om het binnenste van de zon te bestuderen, of om ver weg in het heelal sterren te zien ontploffen, moet je een fysicus zijn.

Eerst in de jaren zestig in de Verenigde Staten, op bijna anderhalve kilometer diepte in de oude Homestake-goudmijn in South Dakota, en later ook in Europa en Japan, hebben natuurkundigen zwembadgrote tanks met water en andere vloeistoffen geplaatst, met de bedoeling *neutrino's* te observeren, spookachtige elementaire deeltjes.

Het neutrino deed zijn intrede in de natuurkunde in 1930. Fysici braken zich toen het hoofd over het zogenaamde bètaverval, een bijzondere vorm van radioactiviteit. Bij bètaverval verandert een atoomkern spontaan in een kern van een ander type — hij 'vervalt', in het jargon — en daarbij zendt hij een elektron uit. Een kern van een koperatoom kan bijvoorbeeld plots veranderen in een kern van zink, en daarbij een elektron wegschieten. Het leek een proces waarbij één voorwerp (de koperkern) uiteenviel in twee andere, namelijk de zinkkern en het elektron. Natuurkundigen waren er-

van overtuigd dat ze wel een en ander begrepen van dergelijke processen. Ze konden bijvoorbeeld uitrekenen dat het elektron uit het 'verval' tevoorschijn moest komen met een welbepaalde hoeveelheid energie, en dus een welbepaalde snelheid. Dat was een gevolg van de eis dat er geen energie kon worden bijgemaakt of verloren kon gaan, de zogenaamde wet van 'energiebehoud': er moest na het verval van de koperkern precies evenveel energie zijn als tevoren.

Wat er werd waargenomen was echter iets helemaal anders: uit bètaverval kwamen elektronen met heel diverse hoeveelheden energie tevoorschijn. Heel soms hadden ze ongeveer de verwachte hoeveelheid energie, maar bijna altijd was het minder, en soms zelfs veel minder. Het leek alsof er energie in het niets verdween. De beroemde Deense fysicus Niels Bohr stelde voor om de wet van energiebehoud op te geven: blijkbaar werd energie niet behouden in nucleaire processen zoals bètaverval. Wolfgang Pauli uit Oostenrijk dacht er echter anders over.

Pauli (1900–1958) was de schrik van de natuurkunde. Later ging onder fysici het verhaal dat toen Pauli gestorven was en hij in de hemel arriveerde, hij wegens zijn wetenschappelijke verdiensten een speciale wens mocht doen. Pauli vroeg om Gods grote boek met de geheimen van de schepping en de ultieme verklaring van de natuur te mogen inzien. God overhandigde hem het boek en Pauli begon verrukt te lezen. Na enkele minuten verscheen er echter een frons op zijn gelaat, en niet veel later riep hij ontstemd uit: *'Aber das ist ganz falsch!'* ('Maar dat is helemaal verkeerd!'). Pauli had de gewoonte om, als hij in het publiek zat in een lezing over fysica, in niet mis te verstane bewoordingen duidelijk te maken wanneer hij het niet eens was met de spreker.

Hij was zijn carrière als wonderkind begonnen, en hij was het altijd moeilijk blijven hebben met gewone stervelingen met tragere hersens dan hijzelf. Hij maakte op zijn negentiende al indruk met een diepgaand en 237 pagina's lang technisch artikel over de toen nog nieuwe en niet door alle fysici goed begrepen algemene relativiteitstheorie van Einstein. Op latere leeftijd werd hij met zijn ongezouten kritiek en zijn genadeloze perfectionisme zo'n

beetje het geweten van de fysica. Victor Weisskopf, die een tijdlang zijn assistent was, zei dat je Pauli altijd iets kon vragen zonder je zorgen te moeten maken of het misschien een idiote vraag was, want Pauli vond alle vragen idioot. Toch moet hij ook af en toe in een mildere bui zijn geweest, want toen hij eens, terwijl hij zelf nog student was, een lezing van Einstein bijwoonde, stond hij na afloop op en begon zijn commentaar met 'Weet je, wat Einstein zegt is zo dom nog niet.' Toen hij op een conferentie kennismakte met de oudere fysicus Paul Ehrenfest, die onder de indruk was van Pauli's artikel over de relativiteitstheorie, zou die al na enkele minuten conversatie gezegd hebben: 'Ik denk dat ik uw werk meer waardeer dan ik uzelf waardeer.' Waarop Pauli repliceerde: 'Vreemd. Over u denk ik precies het omgekeerde.'

De uitroep dat een theorie 'ganz falsch!' was, was echter niet de zwaarste veroordeling in Pauli's repertoire. Het ergste was het als Pauli minachtend zei, zoals hij eens tegen Weisskopf deed, dat een idee 'niet eens verkeerd' was. Dat wil zeggen, zo halfbakken of slordig geformuleerd dat het niet eens viel uit te maken of het waar was of niet. En dat betekende volgens Pauli dat het geen plaats had in de fysica.

Pauli was niet zo snel als Bohr bereid om energiebehoud, een van de meest onwankelbare natuurwetten, zomaar op te geven. Daarom stelde hij in 1930 een andere oplossing voor van het raadsel van het bètaverval. Volgens hem kwam er bij bètaverval niet alleen een elektron tevoorschijn, maar ook nog een ander deeltje, een deeltje dat tot dusver in alle experimenten aan de aandacht was ontsnapt. Dat onopvallende deeltje ging er telkens met een deel van de energie vandoor, en daarom had het elektron minder energie dan verwacht. Het mysterieuze deeltje moest klein en licht zijn, en elektrisch neutraal (anders zou het sporen hebben nagelaten in de experimenten, en zou de 'ladingsbalans' niet kloppen: er zou door het verval lading bijgemaakt of verdwenen zijn, en dat is al evenmin toegelaten als het bijmaken of verdwijnen van energie). Pauli stelde voor om het deeltje 'neutron' te noemen. Zijn hele idee vond echter niet meteen bijval — er waren in 1930 nog

niet veel deeltjes bekend, en een nieuw deeltje introduceren zonder ijzersterk bewijsmateriaal was niet vanzelfsprekend. Erger nog, er leek geen manier te bestaan om het voorgestelde deeltje ook echt waar te nemen. Pauli moet zich geplaagd hebben gevoeld door de geest van Ernst Mach, want hij zei: 'Ik heb iets verschrikkelijks gedaan. Ik heb een deeltje gepostuleerd dat niet gedetecteerd kan worden.' Gelukkig zou later blijken dat hij te pessimistisch was geweest; de nieuwe deeltjes zijn wel degelijk te detecteren, het is alleen uitermate moeilijk.

Pauli's voorstel leidde een sluimerend bestaan, en in 1932 werd de naam 'neutron' ingepikt door een heel ander pas ontdekt deeltje, het neutrale protonachtige deeltje van Chadwick (hoofdstuk 3). In 1933 blies de Italiaanse fysicus Enrico Fermi Pauli's idee nieuw leven in. Hij publiceerde een nieuwe gedetailleerde theorie van het bètaverval, die voortbouwde op Pauli's voorstel. En omdat de naam 'neutron' inmiddels al aan een ander deeltje was gegeven, stelde Fermi voor om het mysterieuze deeltje van het bètaverval 'neutrino' te noemen, of 'neutraaltje' in het Italiaans.

Wat er bij bètaverval gebeurt, is zoals nu bekend is, dat er in de atoomkern plots een neutron verandert in een proton, en daarbij een elektron en een neutrino wegslingert (strikt genomen een zogenaamd *antineutrino*, om redenen die pas lang na 1933 duidelijk zijn geworden). Om nog nooit gedetecteerd te zijn (en ook in de jaren ná 1933 zou dat nog niet meteen lukken) moesten neutrino's wel héél onopvallend zijn. Ze negeren gewone materie vrijwel volkomen. Ze passeren atomen zonder er ook maar de minste notie van te nemen. Er wordt weleens gezegd dat neutrino's dwars door een muur van massief lood van een lichtjaar dik zouden kunnen vliegen, en dat is *niet* overdreven. Neutrino's passeren ongehinderd dwars door de aarde en dwars door je lichaam, zonder dat je er iets van merkt. Dat wil echter niet zeggen dat neutrino's absoluut nooit worden tegengehouden door gewone materie. Het is uitermate onwaarschijnlijk dat een neutrino iets merkt van een atoom, maar het is niet onmogelijk. De kans dat een neutrino zijn aanwezigheid laat voelen is uiterst klein, maar niet helemaal nul.

Daarom is het, hoewel moeilijk, toch mogelijk om neutrino's te detecteren. In 1956 is dat voor het eerst gelukt. Clyde Cowan en Frederick Reines en hun medewerkers konden toen neutrino's uit een kernreactor betrappen. Het was een kwestie van geduld en massale aantallen. Uit de reactor kwamen miljarden malen miljarden (anti)neutrino's. Per seconde passeerden er volgens de berekeningen vijftigduizend miljard door elke vierkante centimeter van de detector. En van dat indrukwekkende aantal konden Cowan en Reines er twee à drie per uur verschalken.

Neutrino's ontstaan bij bètaverval en bij allerhande andere nucleaire processen. Dat bracht de fysici op het idee dat ook de zon ze zou moeten uitzenden. Toen fysici rond het midden van de vorige eeuw kernreacties goed gingen begrijpen, gingen ze ook begrijpen hoe de zon en andere sterren werken. In het midden van de zon treedt 'kernfusie' op, waarbij kernen van waterstof (protonen) via enkele tussenstappen versmelten tot kernen van helium. Bij die reacties moesten er neutrino's worden uitgezonden, en die neutrino's zouden ongehinderd vanuit het midden van de zon kunnen ontsnappen en de ruimte in vliegen. Neutrino's waren dus een unieke manier om direct te kunnen waarnemen wat er zich in het midden van de zon afspeelde, en de theorieën over de bouw van de zon en de kernfusiereacties op de proef te stellen. Als de astrofysici gelijk hadden met hun model van de zon, dan moest de mens hier op aarde onophoudelijk blootgesteld zijn aan een intense stroom van neutrino's (waar je vrijwel nooit iets van merkt). De neutrino's van de zon zouden er evengoed 's nachts als overdag moeten zijn — 's nachts bestoken ze ons gewoon van onderen, dwars door de aarde.

Het is om die theorie te testen dat de Amerikaan Raymond Davis van het Brookhaven National Laboratory eind jaren zestig het plan opvat voor zijn ondergrondse 'zwembad'. Hij wil proberen de neutrino's van de zon te betrappen. Om te beginnen heeft hij een grote detector nodig: een apparaat van vele honderden tonnen zwaar, om genoeg kans te maken om af en toe één neutrino te van-

gen. Een neutrino zou zijn aanwezigheid kunnen verraden door een bepaalde soort kernreactie op te wekken, maar soortgelijke reacties kunnen ook worden veroorzaakt door allerlei andere oorzaken, zoals de zogenaamde kosmische straling, de protonen en andere deeltjes die onophoudelijk uit de ruimte op ons neer regenen. Daar weet Davis echter wat op: de detector wegstoppen op een plaats waar alleen neutrino's hem kunnen bereiken: diep onder de grond. Alle kosmische stralingsdeeltjes worden dan tegengehouden door de rotsen boven het laboratorium; alleen neutrino's dringen door tot de detector.

Dat is de reden waarom Davis zijn detector diep in een goudmijn in South-Dakota bouwt. Blijft alleen nog de vraag waaruit de detector gemaakt moet worden. Om de neutrino's te detecteren wil de onderzoeker een kernreactie gebruiken waarbij neutrino's een kern van chloor treffen en die veranderen in een argonkern. Davis' plan is om een vloeistof met chloor enkele maanden lang bloot te stellen aan de (veronderstelde) neutrino's, en ze dan helemaal door te spoelen en na te gaan of er misschien een minieme hoeveelheid argon in verschenen is. Wat hij dus nodig heeft is een vloeistof die veel chloor bevat, en die zo goedkoop mogelijk is, want hij heeft er heel veel van nodig, een tank ter grootte van een zwembad. De oplossing is een veel gebruikt reinigingsmiddel, tetrachlooretheen ($\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$), dat toegepast wordt in stomerijen, om kleren schoon te maken. Davis beschikt over de berekeningen van een jonge astrofysicus, John Bahcall van het California Institute of Technology, die precies heeft uitgerekend hoeveel neutrino's de zon moet uitzenden, als kernfusie inderdaad verantwoordelijk is voor haar energieproductie. Toen Bahcall nog student was, vond hij een fout in een klassiek artikel over kernreacties in het binnenste van sterren. Hij schreef er een brief over, en daarop ontving hij per kerende post een jobaanbieding; hij mocht bij een van de auteurs van het artikel als assistent aan de slag.

Het resultaat van Davis' proef in de goudmijn is een complete verrassing. Ja, er worden neutrino's waargenomen. Alleen zijn het er een stuk minder dan verwacht volgens Bahcalls berekeningen,

zowat één derde. Het is duidelijk dat er ergens iets mis is: in het experiment, in de theorie van de astrofysici over de zon, of in de theorie van de natuurkundigen over neutrino's. Aan het experiment ligt het niet, zo blijkt spoedig. Andere onderzoekers herhalen het experiment met andere detectietechnieken, en het resultaat blijft telkens hetzelfde: een hardnekkig tekort aan zonneneutrino's. Op de theorieën over de zon lijkt ook niet veel aan te merken. Door alle mogelijke andere aanwijzingen worden ze telkens bevestigd, zoals door de studie van 'zonnebevingen' (waarmee het inwendige van de zon bestudeerd kan worden, net zoals geologen uit aardbevingen veel kunnen leren over het binnenste van de aarde). Alle gegevens kloppen precies met de modellen van de zon, op één uitzondering na, de neutrino's. Als er niets mis is met de modellen van de zon, speculeert de sciencefictionschrijver Arthur C. Clarke in zijn roman *Songs of Distant Earth*, dan is er misschien wel iets mis met de zon. In Clarkes verhaal is het tekort aan neutrino's het eerste teken van het naderende einde van de zon, maar in werkelijkheid is gelukkig ook dat niet de verklaring voor het neutrinotekort. De echte fout ligt bij de theorieën van de natuurkundigen over neutrino's. Die zijn in de jaren zestig van de twintigste eeuw nog veel te eenvoudig. Later blijken er drie verschillende soorten neutrino's te bestaan, die spontaan in elkaar kunnen overgaan (elektronneutrino, muonneutrino en tauneutrino gedoopt). De kernreacties in het midden van de zon zenden precies het berekende aantal 'gewone' of elektronneutrino's uit, maar onderweg verandert een deel van die neutrino's van type. Omdat het experiment van Davis alleen gevoelig is voor elektronneutrino's, merkt hij niets van de neutrino's die de gedaante van muon- en tauneutrino's hebben aangenomen. Pas wanneer fysici veel later detectoren kunnen bouwen die gevoelig zijn voor alle types neutrino's, blijkt de boekhouding te kloppen.

Uit die experimenten blijkt ook dat neutrino's een zeer kleine massa hebben, in plaats van helemaal geen massa, zoals aanvankelijk gedacht werd. Anders zouden de waargenomen gedaanteveranderingen van de neutrino's niet te verklaren zijn, zo blijkt uit de wiskunde van neutrinotheorie.

Davis gebruikt bij zijn experiment de anderhalve kilometer rots boven zijn ondergrondse detector als schild om alle deeltjes tegen te houden die zijn metingen zouden kunnen verstoren. Andere neutrino-onderzoekers hebben vroeger al andere maar even indrukwekkende soorten afscherming gebruikt. Toen Leon Lederman en zijn collega's in 1962 het eerste experiment deden waarbij duidelijk werd dat er twee soorten neutrino's bestonden (de derde soort volgde pas later), hadden ze een schild nodig dat alles zou tegenhouden behalve neutrino's. Ledermans team kocht duizenden tonnen staal op, afkomstig van gesloopte schepen van de Amerikaanse marine. De roestige blokken staal stapelden ze op tot een twaalf meter dikke muur. Lederman vertelde ooit per vergissing aan een Amerikaanse journalist dat al het staal afkomstig was van één schip, de USS Missouri (in werkelijkheid bestaat dat schip nog, het heeft zelfs nog deelgenomen aan de Golfoorlog in 1991; nu is het een museumschip in Pearl Harbor in Hawaï). Hij voegde er voor de grap aan toe dat hij aan de marine had moeten beloven het schip opnieuw in elkaar te zetten in geval van oorlog. Dat verhaal ging een eigen leven leiden, volgens Lederman, en het leidde tot het gerucht dat het Pentagon het neutrino-experiment had opgeëist voor oorlogsdoeleinden. Lederman voegt in zijn boek *Het goddelijke deeltje* nóg een marineanekdote aan het verhaal toe. Het team had een oud scheepskanon op de kop getikt, waarvan de loop, met een diameter van dertig centimeter, bruikbaar was om een collimator te maken, een toestel om een deeltjesstraal te focuseren. De kanonsloop moest aan de binnenkant behandeld worden met staalwol en beryllium. Lederman vond een erg magere student die hij in het kanon deed kruipen. Het wilde echter niet lukken, en na een uur gaf de student er de brui aan. Wat Lederman de gelegenheid gaf om uit te roepen: 'Waar moet ik een andere student vinden van jouw kaliber?'

Uiteindelijk konden Lederman en zijn team negenentwintig muonneutrino's detecteren van de naar schatting honderd biljoen die door de muur van slagschepenstaal moeten zijn gepasseerd.