

Prof.dr. G. 't Hooft

Oneindig klein

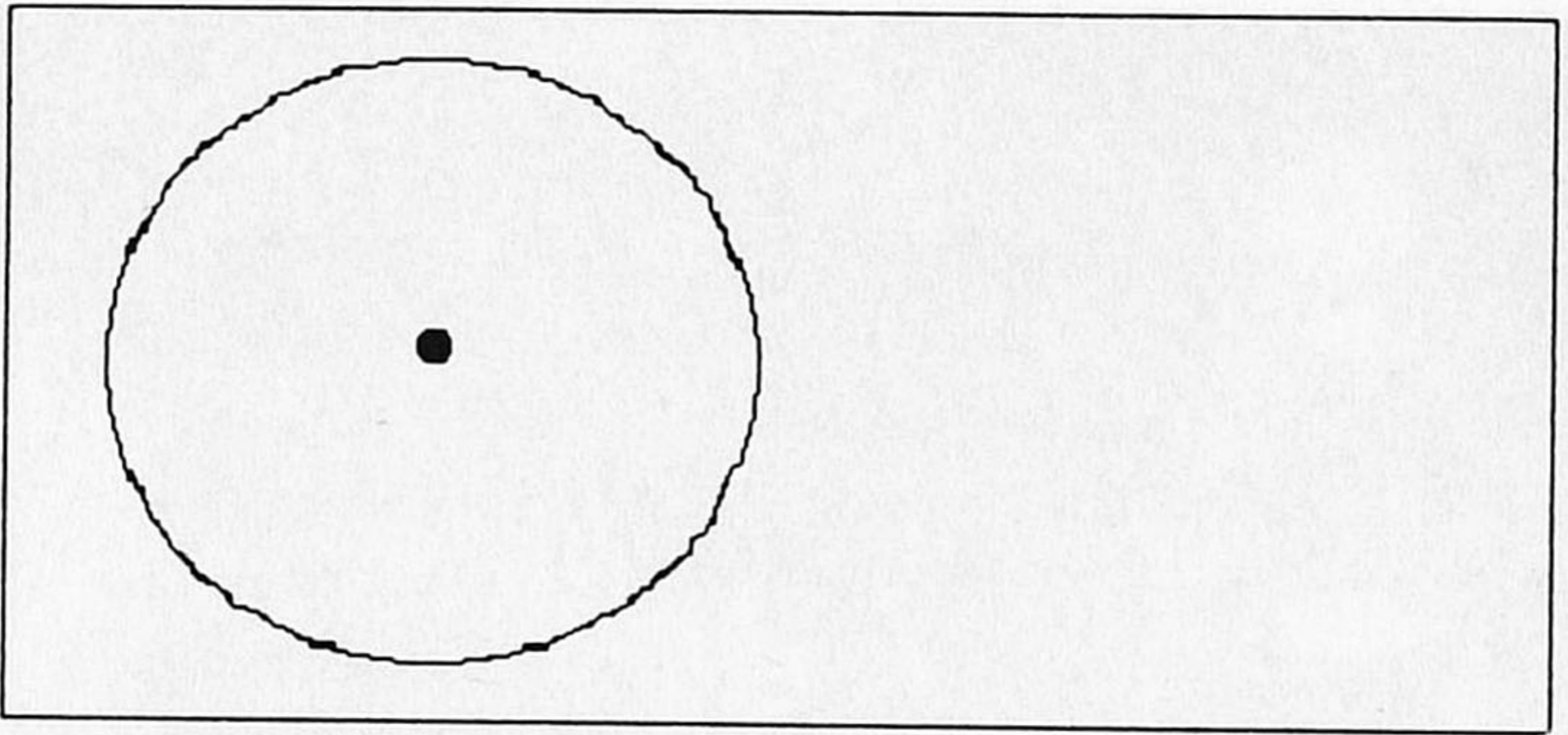
Over de kennis van elementaire deeltjes

Sinds Antoni van Leeuwenhoek ontdekte dat je met een microscoop meer ziet dan met het blote oog, zijn er steeds betere microscopen ontwikkeld. Maar de volmaakte microscoop bestaat niet. Er is altijd een grens aan de vergroting, ook al doen wij, natuurkundigen, nog zo ons best om die grens steeds maar te verleggen.

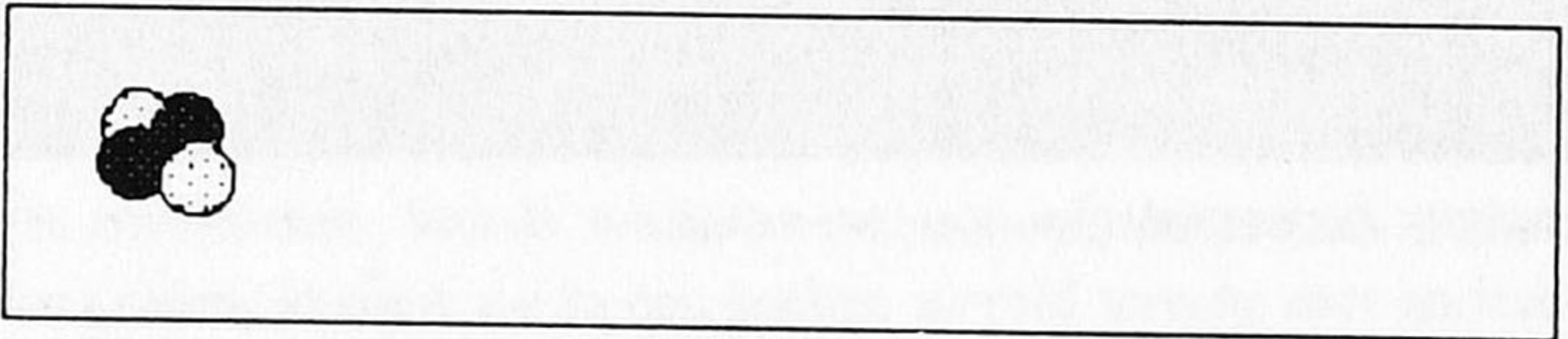
Waar ligt de grens ondertussen? Een muis kunnen we met het blote oog zien en meten in centimeters.

Laten we nu de muis eens van dichtbij bekijken. Met een moderne microscoop die 1000 maal vergroot, krijgen we een kijkje in de wereld van de bacteriën waar wat eerst een centimeter was nu een tiental 'micron' is. Een micron is een duizendste millimeter. Steeds wanneer we 100 of 1000 maal sterker vergroten, komen we in een andere wereld terecht met andere natuurwetten en andere natuurkrachten. Een muis die met zijn dunne pootjes tegen steile muren klimt heeft weinig last van de zwaartekracht. Een bacterie merkt van de zwaartekracht niets, maar kan niet op eigen kracht uit een druppel water komen. Voor de bacterie zijn de krachten die de druppel bij elkaar houden te groot.

Voor nog verdere vergrotingen gebruikt men tegenwoordig de elektronenmicroscoop, die dankzij de kortere golflengte van elektronen — en nu loop ik enigszins vooruit op de zaken — een groter oplossend vermogen heeft. In 1986 ontving Ernst Ruska de Nobelprijs voor zijn bijdrage aan de ontwikkeling van de elektronenmicroscoop. Hij deelde die met Gerd Binnig en



zit een kleine pit, de atoomkern. En uit de gegevens over de kern moeten we opmaken dat die op zijn beurt weer bestaat uit bolletjes van twee types, de protonen en neutronen. Als we die deeltjes 10.000.000.000.000, tien biljoen maal vergroten en er tekeningen van maken — ze zijn zo klein dat niemand ze ooit heeft gezien of op de foto heeft gezet — dan is wat we als een centimeter zien in werkelijkheid een ‘femtometer’, een tienbiljoenste centimeter.



Past de elektronenmicroscop nog in een kamer, de apparaten waarmee de fysicus nu werkt om in de atoomkernen te kijken omvatten hele buitenwijken. Op diverse plaatsen in de wereld hebben de natuurkundigen tunnels van tientallen kilometers gebouwd, die tientallen meters onder de grond liggen. De ruimtes staan boordevol instrumenten. De apparatuur is soms tientallen meters in doorsnede. Aan een experiment in een dergelijk laboratorium werken honderden mensen mee.

Het huidige onderzoek behelst voornamelijk het binnenste van de protonen en neutronen. Dankzij de grootste ‘deeltjesversnellers’, de apparaten waarover ik hierboven heb gesproken, kun-

nen we ons een voorstelling maken van de elementaire deeltjes die we in de protonen en neutronen aantreffen. Zouden we daar afbeeldingen van maken, dan is een centimeter in werkelijkheid een..., er is geen woord voor, maar we bedoelen het duizendbiljoenste van een centimeter. We hebben 1.000.000.000.000.000.000 duizendbiljoen maal vergroot.

De deeltjesversnellers zijn onze beste microscopen. Daarmee zijn we aan de grens van ons technisch kunnen. Maar niet van onze fantasie. We willen nog grotere deeltjesversnellers, nog betere microscopen dan de beste van nu om de resultaten van onze fantasie uit te testen en nog dichterbij het onbereikbare ideaal 'oneindig klein' te komen.

Het is bijzonder moeilijk om over elementaire deeltjes te spreken. Net al merkten we dat voor een bepaalde maat geen aanduiding bestond. Zelfs bij gesprekken van natuurkundigen onder elkaar kan dat problemen opleveren. Daarom maken zij gebruik van een taal die de spreektaal vervangt: de wiskunde. Dit is een zeer ingewikkelde taal waarin je met symbolen werkt en voortdurend moet opletten wat ze betekenen en hoe je ze moet hanteren.

Spijtig genoeg gaat bij de vertaling van wiskunde naar de spreektaal een groot deel van de charme van dit vak verloren, maar ik hoop daarvan iets goed te maken door te proberen mijn enthousiasme voor het onderzoek van de laatste jaren over te brengen. Van de lezer vraag ik enig geduld, of om met de woorden van Rip te spreken 'opschorten van ongeloof', want hoe samenhangend onze theorieën ook zijn, in de spreektaal krijgen ze iets onwerkelijks en ongeloofwaardigs. Maar dat zijn ze niet.

Het jaar 1900 was niet alleen een breukvlak in de tijd maar ook in de ontwikkeling van de moderne natuurkunde. Vóór die tijd beschouwde men licht als een elektromagnetisch golfverschijnsel dat gehoorzaamde aan de wetten van Maxwell. Het

leed geen twijfel dat de lichtgolven zich net als alle andere golven rechtlijnig en continue voortplantten. De energie en golflengte van lichtgolven zouden iedere willekeurige waarde kunnen hebben.

Maar Max Planck opperde in 1900 een andere gedachte. Om te kunnen verklaren dat voorwerpen bij verhitting eerst rood en later witgloeiend worden zag Planck zich genoodzaakt aan te nemen dat het uitzenden en opvangen van licht aan een strikte beperking is onderworpen. Het licht dat je aan een object kunt onttrekken of toevoegen heeft het karakter van golfpakketjes. De grootte van de pakketjes hangt af van de golflengte, of liever, de frequentie van de golf. Planck noemde de pakketjes 'quanten'. Lijkt dit beeld op het eerste gezicht eenvoudig en weinig hemelschokkend, er is een belangrijke klasse natuurwetten uit zijn idee voortgekomen, de quantummechanica, die zich zo fantastisch heeft ontwikkeld dat ik vermoed dat Planck als hij dat allemaal had kunnen meemaken, langer gearzeld had om zijn theorie naar voren te brengen.

Een tweede belangrijke groep wetten, die in die tijd ontstond, is de relativiteitstheorie waarmee, zoals u weet, de naam Albert Einstein onlosmakelijk verbonden is. Deze twee theorieën veroorzaakten een revolutie in de natuurkunde van toen.

Voor het gebied van de atomen en nog kleinere deeltjes is de theorie van de quantummechanica zo mogelijk ingrijpender geweest dan de relativiteitstheorie. Velen van u hebben wel eens iets gelezen over de bizarre consequenties van de relativiteitstheorie. Een staaltje daarvan zult u tegenkomen in het hoofdstuk van De Jager over het oneindig grote, waarvoor juist die theorie van belang is. Maar ik kan u verzekeren dat de quantummechanica nog veel idioter is en de lichtpakketjes van Planck slechts het topje van een ijsberg zijn.

De quantummechanica vertelt wat er gebeurt, wanneer je op deeltjes krachten uitoefent. Als ik een gewoon deeltje een duw geef, is het ons intuïtief duidelijk waar dat toe leidt: het deeltje zal zich met een zekere snelheid in een zekere richting verplaat-

sen. De quantummechanica beschrijft het gedrag van de allerkleinste deeltjes, als daarop krachten worden uitgeoefend. En hoe kleiner de deeltjes, hoe vreemder de door de theorie voorspelde verschijnselen. In de wereld van het atoom, het proton, het neutron of de nog kleinere deeltjes wijkt het gedrag volstrekt af van dat van steentjes, biljartballen of bakken water. Als twee deeltjes 'botsen' — later volgt een beschrijving van hoe wij ons dat voorstellen — is het soms volgens de quantummechanica mogelijk dat de twee deeltjes niet van elkaar af bewegen, als biljartballen, maar juist naar elkaar toe, als... elementaire deeltjes.

Daarbij stuiten we op een groot probleem. De theorie stelt dat een meting aan een botsing van twee elementaire deeltjes van invloed is op het gedrag van de deeltjes. Bij een meting verstoort je de gang van de deeltjes, alsof je een omvallende emmer water tegenhoudt om te kijken waar het water heen zal stromen, en dus de emmer niet valt. Als je probeert steeds nauwkeuriger de beginsituatie van een deeltje te meten, ontkracht je eerdere metingen want door de nieuwe meting verandert de snelheid van het deeltje of komt het op een andere plaats terecht. Door de meting wordt het deeltje anders dan het was, is er ingegrepen in de toekomst van het deeltje. Metingen veroorzaken dus een bepaalde onzekerheid.

Bovendien moet je goed oppassen met de betekenis van het woord 'deeltje' in de quantummechanica. Bij een experiment wordt een deeltje vaak even gemaakt om dan weer snel te verdwijnen. Soms noemen we zulke deeltjes zelfs 'virtueel', denkbeeldig of schijnbaar aanwezig. Het deeltje bestaat dan wel in zekere zin, maar het is niet een echt deeltje dat los bestaat. In de gewone omgangstaal schieten woorden te kort om de quantummechanica goed te vertalen.

Nu dreig ik in een val te lopen, die veel van mijn collega's ook op hun weg tegenkomen. Door een poging te doen om de quantummechanica in termen van de omgangstaal en her-

kenbare verschijnselen weer te geven bereik je het omgekeerde van wat je wilt: je laat een gevoel van diep mysterie achter en je vergroot de verwarring. De theorie lijkt wazig, niet scherp gedefinieerd en vol innerlijke tegenstrijdigheden. Of in gewone woorden: 'De natuurkundigen kletsen maar wat uit hun nekharen. Hun theorie kan onmogelijk goed zijn, want er wordt voortdurend gesproken over onzekerheid.' Maar, zoals gezegd, dat is niet de bedoeling en het is ook niet zo.

De quantummechanica is juist een uiterst nauwkeurige theorie, alleen is heel moeilijk uit te leggen waarom. Als we het gedrag van één deeltje willen voorspellen, is er inderdaad sprake van een bepaalde mate van onzekerheid. Als ik een deeltje een duw geef, kan het álle kanten opgaan in plaats van één zoals we in het dagelijks leven gewend zijn. Het is volgens de theorie onmogelijk om ooit precies de loop van zo'n deeltje te voorspellen.

Maar het mooie aan de quantummechanica is nu dat er 'zekerheid is in de onzekerheid'. Je kunt heel nauwkeurig de kans berekenen dat een deeltjes in één van de mogelijke richtingen gaat, en zelfs de kans dat van die eerste kans wordt afgeweken. Dit betekent dat als een experiment heel vaak herhaald wordt, de verdeling van alle deeltjes over de verschillende mogelijke richtingen door de quantummechanica met willekeurig welke precisie berekend kan worden.

En hiermee is de theorie zo precies en nauwkeurig dat ik de illusies van sommigen omtrent meer mystieke 'toepassingen' moet wegnemen. We lezen immers weleens over pogingen het 'vreemde' gedrag van elementaire deeltjes zoals de quantummechanica dat formuleert in verband te brengen met 'paranormale verschijnselen'. Het gedrag van de deeltjes zou ruimte open laten voor het verwerken van mystieke informatie. Volgens mij wordt er dan echter onzorgvuldig omgesprongen met het begrip 'informatie'. Als we aannemen, wat het eigenlijk vanzelfsprekend hoort te zijn, dat ook onze hersencellen aan de wetten van de quantummechanica gehoorzamen, kan informatie alleen via de daarin geformuleerde en bekende kanalen wor-

den overgebracht. Daarom vrees ik dat 'bovennatuurlijke' verklaringen van paranormale verschijnselen praktisch nooit te rijmen zijn met de quantummechanica. Evenmin is de theorie zomaar 'bij te stellen'.

We accepteren de quantumtheorie in zijn geheel of niet. Een tussenweg zie ik niet.

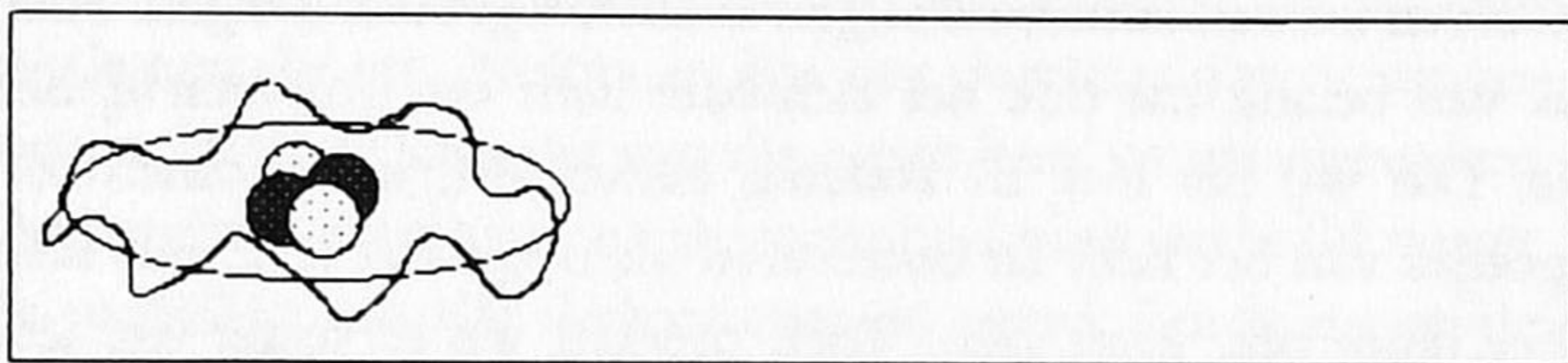
Golfmechanica wordt niet alleen op elementaire deeltjes toegepast. Als we van boven af naar een varend schip kijken, zien we zowel aan de boeg als aan de achtersteven golfpatronen, die eruit zien als een samenstel van lijnen, die steeds een andere hoek met het schip maken. De vorm van het golfpatroon is precies te berekenen: wetten van zwaartekracht, wetten van de vloeistofmechanica en wiskundige vergelijkingen schrijven voor dat de golven zich maar op één manier kunnen gedragen, en dat zien we dan ook gebeuren.

Golven komen natuurkundigen in allerlei gebieden tegen. Hier is van belang dat ook het zichtbare licht een golfverschijnsel is. Dat wij het niet als zodanig herkennen, komt omdat de golfjes van het licht zo ontzettend klein zijn dat je ze niet met het blote oog kunt zien. Toch merken we er soms wel iets van. In een preparaat dat we onder een lichtmicroscop gelegd hebben, zien we geen details die kleiner zijn dan de golven van het licht; voor zulke details hebben we elektronen nodig, die zoals we gauw zullen zien, ook als een golfverschijnsel beschouwd kunnen worden en nog kleinere golven zijn dan licht.

Het bijzondere van Planck is nu dat hij lichtgolven niet zag als een geluidsgolf die zich in alle richtingen continu voortplant, of als de kringen in het water waar je een steen in gegooid hebt, maar als een verzameling energiepakketjes. En bovendien zouden die pakketjes niet willekeurig welke hoeveelheid energie kunnen bevatten, maar alleen hele bepaalde hoeveelheden.

De Fransman Louis Victor de Broglie keerde de gedachte van Planck later nog om. Als golven energiepakketjes zijn, dan zou

je aan ieder energiepakketje ook het karakter van een golf kunnen toekennen. Elementaire deeltjes zijn energiepakketjes, dus golven, was de conclusie van De Broglie. En zo spreekt de quantummechanicus nu eens over deeltjes, dan weer over golven, maar vooral over energie, als hij het heeft over wat hij ziet. Deze rare suggestie had verstrekkende gevolgen, want het bleek inderdaad de juiste manier te zijn om tegen de quantummechanica aan te kijken. Kleine deeltjes gedragen zich óók als golven. Zo kan een elektron, dat een cirkelbaan om de atoomkern trekt, beschouwd worden als een golfpatroontje, dat ook nog eens een heel bepaalde energie-inhoud heeft en niet willekeurig welke. Zo'n golfpatroontje kun je net als bij het schip heel nauwkeurig beschrijven in wiskundige formules en dan zie je dat het elektron maar enkele banen kan doorlopen, want de baan moet bestaan uit een aantal gehele golven, een tussenweg is niet mogelijk en dat zul je het elektron dan ook niet zien doen.



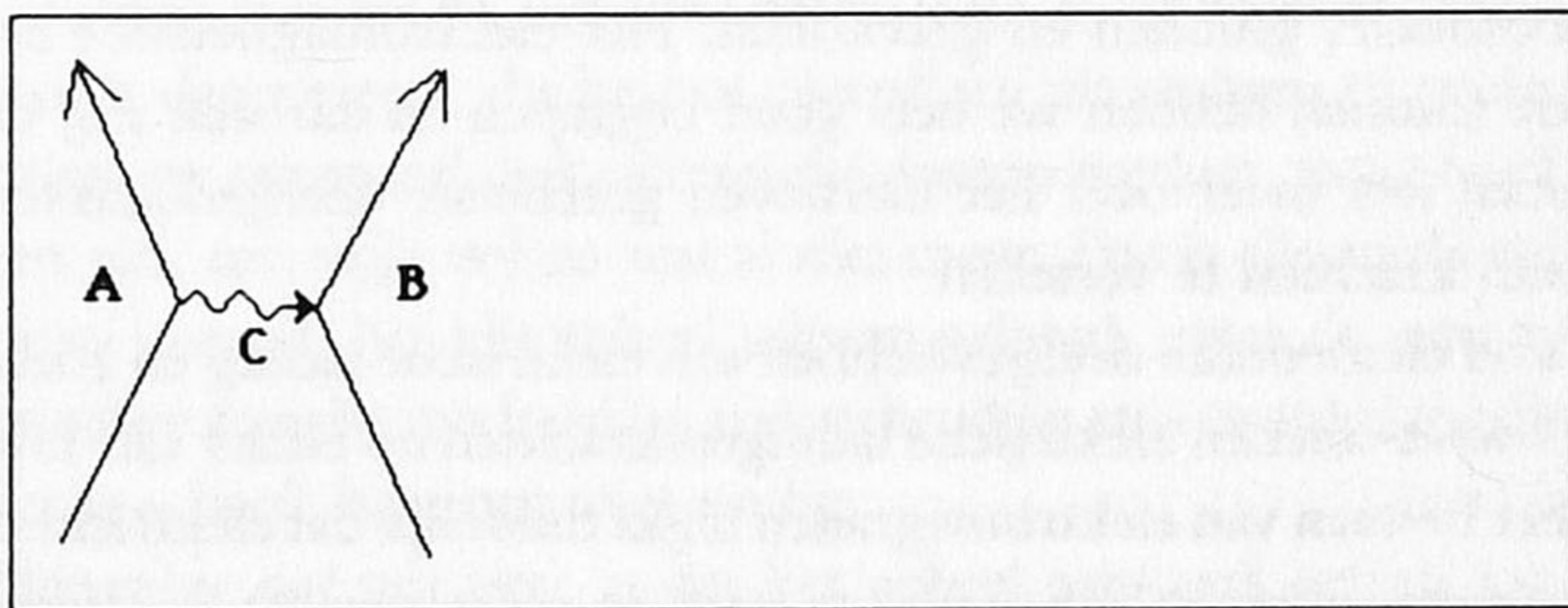
Dit bleek de verklaring te zijn van de regels die Niels Bohr had gevonden voor de energie van het elektron in een atoom. Bohr formuleerde een model van het atoom dat enorm succesvol werd, omdat allerlei eigenschappen van atomen die tot dan toe onverklaarbaar waren, ermee begrepen konden worden, vooral merkwaardige verschijnselen bij het uitzenden van licht door een atoom.

Dit klinkt allemaal vaag. In gewone taal kan ik het niet duidelijker over laten komen dan het is, want dan zou ik een onjuiste indruk van de theorie achterlaten, maar ik kan u verzekeren dat het de precisie van ons werk ten goede komt dat wij de verschijnselen én als deeltjes én als golven kunnen beschouwen.

Voor we straks eindelijk de atoomkern induiken, moet ik nog één heel belangrijke constatering van de quantummechanica uitleggen. Ik heb al eerder benadrukt dat elementaire deeltjes elkaar op een andere wijze beïnvloeden dan biljartballen of stenen. Ik heb toen ook benadrukt dat je van één deeltje slechts de kansen kunt uitrekenen dat iets bepaalds gebeurt, maar dat je van een heleboel deeltjes precies kunt uitrekenen hoe ze zich bij een gebeurtenis over de verschillende mogelijkheden verdelen. Ik heb erop gewezen dat metingen aan elementaire deeltjes de loop van de deeltjes beïnvloeden. En tenslotte zien wij deeltjes als deeltjes, maar ook als golven.

Wat ik echter nog niet gezegd heb, is dat wij krachten ook als deeltjes zien. In de begintijd van de quantummechanica was dat niet zo. Toen werden de verschillende krachten die op de deeltjes werken zonder meer als uitgangspunt gebruikt. Ze zouden van buitenaf aan de deeltjes zijn opgelegd. Men werkte met het begrip kracht zonder de oorsprong ervan nader te omschrijven, maar kwam niettemin tot goede resultaten. Inmiddels weten wij dat de oorzaak van de krachten de deeltjes zelf zijn. Dat kun je als volgt zien.

Stel dat een deeltje, A, botst tegen een ander deeltje, B, en daarbij afbuigt. Deeltje B doet hetzelfde, dus A en B verwijderen zich na de botsing van elkaar. In onze theorieën gaan we er in zo'n geval van uit dat deeltje A een deeltje, C, maakt dat in een korte, maar meetbare tijd, dus niet in een oneindig korte tijd, de weg naar deeltje B aflegt en deeltje B van richting doet



veranderen. Deeltje C heeft niet genoeg energie om te blijven bestaan, maar net genoeg om even te ontstaan en dan weer te verdwijnen. Deeltjes van het type C — en daar zijn maar een paar soorten van — noemen we krachtvoerende deeltjes en zijn verantwoordelijk voor het overbrengen van krachten tussen andere deeltjes.

Krachtvoerende deeltjes kunnen, mits zij van een bepaald type zijn, inderdaad afbuiging van andere deeltjes veroorzaken, net als in de ons bekende wereld. Als twee biljartballen botsen, rollen ze van elkaar weg. Maar het grappige en bijzondere van de quantummechanica is nu, dat er ook krachtvoerende deeltjes zijn die bij uitwisseling tussen deeltje A en B ervoor zorgen dat die twee naar elkaar toe bewegen, een ervaring die haaks staat op onze dagelijkse werkelijkheid. Ook dit heeft weer te maken met die nauwkeurig te bepalen onzekerheid in het gedrag van de deeltjes A en B en met het feit dat je de betreffende krachtvoerende deeltjes soms niet ziet, terwijl ze er zo nu en dan wel zijn. Dan komen ze van ver weg, uit het niets, en het deeltje dat zij raken, stuurt dan een krachtvoerend deeltje in het niets, maar net de andere kant op, en — ik geef toe het is een moeizame beschrijving — het netto resultaat is dat het eerste krachtvoerende deeltje aantrekking van het geraakte deeltje veroorzaakt heeft.

In de wereld van de elementaire deeltjes rekenen we met vier krachten: de elektromagnetische kracht, de zwakke kracht, de sterke kracht en de zwaartekracht. De namen van de bijpassende krachtvoerende deeltjes zijn: fotonen, 'intermediaire vector-bosonen', gluonen en gravitonen. Het elektromagnetisme en de fotonen hebben we heel goed begrepen en dat stelt mij in staat iets meer over het hierboven geschetste deeltjeskarakter van krachten te vertellen.

Veel elementaire deeltjes hebben een elektrische lading en zoals u weet oefenen elektrische ladingen krachten op elkaar uit. Uit het bestaan van elektromagneten blijkt duidelijk dat elektriciteit iets met magnetisme te maken heeft en we weten dat ook daar-

bij sprake is van aantrekking en afstoting. Welnu, aantrekkende en afstotende krachten die over grote afstanden kunnen werken, zijn heel nauwkeurig omschreven en in formules gestopt, door James Clark Maxwell in de 19de eeuw als eerste. Tussen een positieve en negatieve elektrische lading is sprake van aantrekking, ontstaat een krachtveld, dat je je op twee manieren kunt voorstellen. Op de middelbare school wordt onderwezen dat er tussen die ladingen veldlijnen gedacht moeten worden, die je niet ziet maar er wel zijn. Je ziet alleen dat de ladingen elkaar aantrekken. De tweede manier is dat we zeggen dat er tussen de ladingen een deeltje is uitgewisseld, het foton. Dat is een elementair deeltje met een aantoonbaar golfkarakter.

Dit zijn twee verschillende manieren om quantummechanische verschijnselen in een voor ons begrijpelijke taal te formuleren. De exacte taal is de wiskunde maar die zou mijn boodschap onverstaanbaar maken.

Staat u mij op dit moment een filosofisch uitstapje toe. De ervaring heeft ons natuurkundigen geleerd dat de wereld heel goed te analyseren is door haar in stukjes te knippen. Als we willen weten hoe het geheel zich gedraagt, kijken we naar één elementair deeltje en proberen alle krachten die daarop werken, te begrijpen. Als we nu al die deeltjes met alle daarop werkende krachten bij elkaar nemen, zullen we het geheel ook begrijpen. Dit is een gedachte die de natuurkunde beheerst, maar door de jaren heen op veel weerstanden is gestuit. Ook nu horen we steeds meer stemmen opgaan, die zeggen dat je het geheel niet mag zien als de som der delen. Kijk maar naar de mens, wordt dan gezegd, die bestaat niet alleen uit atomen en moleculen, en eventueel de krachten die daarop werken, maar heeft een ziel, een vrije wil en wat al niet meer. Dat is allemaal heel mooi gezegd, het klinkt heel wijs en geleerd, maar de natuurkundige kan die mededeling niet gebruiken en — wat belangrijker is — heeft haar ook niet nodig.

Het enige dat wij zien, is dat het geheel juist wél gezien kan

worden als de som van de delen. Daarom moet ik waarschuwen tegen populaire ideeën als die van Capra, een van de profeten van het holisme, ideeën die mooi klinken maar geen hout snijden. We hebben gezien dat je het geheel juist wel heel goed kunt begrijpen als je het eerst in stukjes knipt, die onderzoekt en ze dan weer bij elkaar voegt.

En dat is dan ook precies de drijfveer om de natuur te verknippen tot de allerkleinste stukjes materie die we ons kunnen voorstellen, de elementaire deeltjes.

In het begin van de eeuw leek het erop dat het knippen in de natuur eindelijk iets heel eenvoudigs had opgeleverd. In de 19de eeuw hadden de scheikundigen een wereld geformuleerd met wel 80 verschillende soorten atomen, die onmogelijk op één noemer waren te brengen en zeker niet in elkaar konden worden omgezet. Goud was goud, en lood was lood. Maar rond 1900 wees van alles erop dat zulke overgangen wel mogelijk waren, hoewel dat enorme hoeveelheden energie zou kosten. Toch was men in staat enkele van die overgangen te bewerkstelligen, waarbij u moet bedenken dat toen weliswaar het een en ander over straling en energie uit atoomkernen bekend was, maar de technieken op dat gebied beperkt waren. Uit het onderzoek naar de overgangen van het ene element naar het andere bleek dat de 80 verschillende soorten atomen wel degelijk allemaal uit een beperkt aantal fundamentele bouwstenen zijn opgebouwd.

Toen ging het er fraai uitzien: er waren maar drie fundamentele deeltjes. Planck had het foton gepostuleerd, Thomson al eerder het elektron, Rutherford het proton in de atoomkern en Bohr had er een mooi model van gemaakt, waarin de atoomkern bestond uit protonen en elektronen en in een beperkt aantal cirkelbanen om de kern ook nog elektronen bewogen. Alle atomen van de verschillende elementen zouden uit die bouwstenen bestaan.

Maar er waren twee redenen waarom er toch iets meer moest

zijn dan die drie deeltjes. Als de atoomkernen uit protonen bestaan moet toch een gedeelte van hun elektrische lading gecompenseerd zijn door tegengestelde ladingen. Zouden er elektronen in de atoomkern zitten? Volgens de quantummechanica was het onmogelijk dat er in de atoomkern zulke uiterst lichte deeltjes als elektronen zouden zitten. Het was al moeilijk te begrijpen dat er krachten waren die de protonen in de kern bij elkaar hielden, maar dat er nog sterkere krachten zouden zijn die de elektronen in de kern zouden vasthouden, was onaanvaardbaar en onhoudbaar. De tweede reden voor het zoeken naar een vierde deeltje was het bestaan van isotopen, atomen van één soort, dus met dezelfde scheikundige eigenschappen, maar een verschillend gewicht. De natuurkundigen vermoedden dat er in de atoomkern een vierde deeltje moest zijn, dat bijna net zo zwaar was als het proton maar een andere elektrische lading had. Het proton heeft een positieve lading en het nieuwe deeltje zou neutraal zijn. Dat was ook de reden waarom de natuurkundigen dit deeltje alvast het 'neutron' noemden, terwijl het nog niet eens was aangetoond.

Na lang zoeken vond James Chadwick uiteindelijk het neutron. Nu was het model van Bohr beter in overeenstemming met de noodzakelijkheden van de quantummechanica: de atoomkern bestaat uit protonen en neutronen, en ver buiten de kern cirkelen de elektronen in hun banen.

Maar toch waren er nog problemen. Ik zei al dat het moeilijk te begrijpen was dat er krachten in de kern waren die de positief geladen protonen bij elkaar konden houden. Positieve ladingen stoten elkaar immers af en neutronen verhelpen dat niet. Er moest een heel sterke kracht zijn die de onderlinge afstoting van de protonen kon overwinnen.

Op dit moment in de geschiedenis van het kernonderzoek durfde een Japanner, Hideki Yukawa, voor het eerst tegen een kracht aan te kijken op een manier, waarvan ik eerder het beweerd dat die nu gemeengoed is onder natuurkundigen: een kracht is een deeltje dat wordt uitgewisseld. Toen hij dat

bedacht had, was hij in staat om een aantal eigenschappen van de kracht, die de protonen bij elkaar zou houden, om te rekenen in een aantal eigenschappen van een nieuw te vinden deeltje. Als de krachten tussen de protonen zich over kleine afstanden doen gelden, moet het deeltje tamelijk zwaar zijn, dacht hij, want hij wist dat de elektromagnetische kracht over een grote afstand werkt en de daarbij betrokken fotonen haast niets wegen. Dus kleine afstand, zwaar deeltje. Yukawa berekende dat de massa van het deeltje groter moest zijn dan die van het elektron, maar kleiner dan die van het proton. En noemde het nog onbekende deeltje daarom 'mesotron', en later 'meson'. Inderdaad werd korte tijd later in de kosmische straling een nieuw deeltje ontdekt, maar vergeleken met de voorspellingen van Yukawa klopte alleen de massa van het deeltje en verder niets. De natuurkundigen waren er onzeker over of de theorie nu helemaal fout was of enigszins moest worden bijgesteld. Later bleek dat het nieuw ontdekte deeltje niet het meson van Yukawa was. Men noemde het nieuwe deeltje 'muon'. Ook bleek dat het muon vrij makkelijk kon ontstaan uit alweer een ander deeltje, dat men 'pion' doopte. En dat pion voldeed wel aan de beschrijving van Yukawa, zodat hij toch nog gelijk kreeg. De onverwachte vondst van het muon ontlokte niet alleen aan Isidor Rabi de uitroep 'Wie heeft dát besteld?', maar stelt ons eigenlijk tot de dag van vandaag voor een groot raadsel omtrent de herkomst. Bovendien luidde het een periode in, waarin deeltje na deeltje werd ontdekt. Kort na de Tweede Wereldoorlog kenden we al fotonen, elektronen, protonen, muonen, pionen en antideeltjes, zoals het door Dirac voorspelde en later ook gevonden positron. In de jaren vijftig groeide de lijst aan tot een aantal, dat niet meer op één bladzijde paste en weinig samenhang vertoonde.

In een periode van 50 jaar was de eenvoud die het werk van Thomson, Rutherford en Bohr leek te hebben geschapen, weer te niet gedaan. In 1960 was het aantal elementaire deeltjes van dezelfde grootte-orde als in 1860 het aantal elementen. Het werd

tijd om te zoeken naar dieperliggende structuren.

De bezoekers van de lezing in Paradiso hebben muonen kunnen zien. Ik maak even een uitstapje naar de praktische kant van ons vak. Een muon is natuurlijk te klein om met het blote oog te zien, maar er staan ons indirecte methodes ter beschikking om de banen van deeltjes zichtbaar te maken. We verzadigen de atmosfeer in een ruimte met een damp, bijvoorbeeld alcohol damp. Een verzadigde damp is een damp die op het punt staat vloeistof te worden, maar het net niet wordt. Tenzij er iets onverwachts gebeurt, dan zal de damp op de plek van de gebeurtenis vloeibaar worden en de kleine druppeltjes die daarbij ontstaan, kunnen we met het blote oog zien of fotograferen. Het passeren van een deeltje door de damp is zo'n gebeurtenis. We zien overal waar het deeltje langs is gekomen druppeltjes. Het deeltje trekt een spoor, zoals een vliegtuig hoog in de lucht, waar de atmosfeer verzadigd is met waterdamp, een spoor van waterdruppeltjes trekt, dat wij als een witte streep zien. Zo'n ruimte met verzadigde damp noemen we een nevelkamer.

De vorm van het spoor, dat het deeltje trekt, vertelt ons welk type deeltje het is. Soms gebeurt er onderweg iets met het deeltje, het botst tegen een andere deeltje of het valt uiteen, en dan kunnen we aan de sporen zien wat er precies heeft plaatsgevonden.

Deeltjes kunnen op verschillende manieren gemaakt worden, maar we moeten ons goed realiseren, dat ze alom aanwezig zijn in de vorm van straling waarvan we de bron in het heelal moeten zoeken. Deze straling noemen we kosmische straling. Zij dringt door alles heen en bevat onder andere muonen, die we in een simpele nevelkamer sporen zien trekken.

De nevelkamer in Paradiso was niet groter dan een schoenen-doos, maar de 'detectieruimtes' die we in het echte onderzoek gebruiken, zijn beduidend groter. Op basis van een ander, maar vergelijkbaar principe als de nevelkamer werkt de 'bellenka-

mer'. Daarvan staan er in de deeltjesversneller van het CERN in Genève zestien. Ieder van die zestien bevat 50.000 liter vloeibare waterstof van min $243\text{ }^{\circ}\text{C}$ en ligt tientallen meters onder de grond om zo min mogelijk last van kosmische straling te hebben. De belletjessporen worden gefotografeerd en de uitvergroete foto's worden door analisten nauwkeurig onderzocht. Maar ook dit type detectieruimtes is alweer verouderd. Tegenwoordig werken we met 'vonkdetectoren' die vele malen gevoeliger zijn dan de bellenkamer en bijvoorbeeld bundels muonen kunnen verwerken. Het zijn ruimtes van vijf meter breed, zes meter lang en drie en een halve meter hoog waarin een patroon van metalen draden is gespannen, die onder een elektrische spanning staan. Als er een deeltje in de buurt komt, springt er een vonk over en wordt een stroompje afgegeven, dat elektronisch wordt geregistreerd. De detectieruimte is aangesloten op een grote computer, die de resultaten in de vorm van grafieken op een beeldscherm laat zien. Het is dan niet meer nodig om vele analisten jaren lang over foto's gebogen te laten zitten.

Het mag de organisatoren van Paradiso niet euvel worden geduid dat de vonkdetector niet gedemonstreerd is.

Nu weer terug naar de jaren zestig en de theorie. Het aantal elementaire deeltjes was zo groot geworden dat het noodzakelijk werd om te kijken of er een onderliggende structuur aan ten grondslag lag. De bekende deeltjes werden gerangschikt als puzzelstukjes op een tafel en verschoven tot een patroon zichtbaar werd. Door de eigenschappen van alle deeltjes goed in kaart te brengen en overeenkomsten en verschillen nauwkeurig te interpreteren ontstond een schitterend motief, dat in een wiskundige formulering weer te geven was.

Aan dit werk zijn de namen verbonden van Murray Gell-Mann en Yuval Ne'eman, die onafhankelijk van elkaar tot dezelfde oplossing kwamen. Gell-Mann concludeerde bovendien dat er een stukje van de puzzel ontbrak en er dus nog een deeltje

moest zijn. Hij noemde het 'omega-minus', voorspelde heel precies de eigenschappen van het deeltje en kreeg gelijk: omega-minus werd gevonden en voldeed aan de verwachtingen. Het meest frappante echter was dat men in het patroon driehoekige figuren zag. Als spoedig raakte Gell-Mann ervan overtuigd dat die driehoeken in feite drie deeltjes van een geheel nieuw type waren. Hij vermoedde dat deze deeltjes de nieuwe fundamentele bouwstenen van de materie waren.



Het verhaal gaat dat de zeer belezen Gell-Mann zich na zijn ontdekking veel moeite getroostte om voor het nieuwe type elementaire deeltjes een prachtige, latijnse naam te verzinnen, maar daar niet in slaagde. Hij klaagde daar eens over tegen Feynmann en kreeg als antwoord: 'Ach kom, je moet niet zo ingewikkeld doen. Verzin een kort maar pakkend woord.' Waarop Gell-Mann zich ineens een regel uit *Finnegans Wake* van James Joyce herinnerde, die luidde: 'Three quarks for Muster Mark!' Wat het ook voorstelde, het waren er drie en daarom koos Gell-Mann voor het nieuwe type deeltje de naam 'quark'. Om u een indruk te geven van het werken met quarks kan ik het voorbeeld nemen van twee deeltjes die de revue al gepasseerd zijn: het proton en het neutron, de bouwstenen van de atoomkern. Wij denken ons het proton opgebouwd uit twee quarks met een positieve lading van tweederde en één met een negatieve lading van één derde, drie quarks dus die een proton vormen met een positieve lading van één. Het neutron is opgebouwd uit twee quarks met een negatieve lading van één derde en één met een positieve lading van twee derde, dus met een

totale lading van nul, zoals vereist.

Wat de sterke kracht betreft — daarover ging het sinds ik Yukawa's oplossing voor het vraagstuk van de aanwezigheid van meerdere protonen in één atoomkern te berde heb gebracht — wil ik het voorlopig hierbij laten.

Aan twee van de vier krachten die in ons vakgebied een rol spelen, heb ik nu aandacht besteed: de elektromagnetische kracht, die over grote afstanden werkt, gedragen wordt door het lichte foton en onder andere de elektronen van een atoom in hun baan om de kern houdt; de sterke kracht, die over korte afstanden werkt, gedragen wordt door het zware pion en de protonen en neutronen in de atoomkern bij elkaar houdt. U dient zich hierbij te realiseren dat de woorden groot, klein, licht en zwaar van een andere orde zijn dan in het dagelijks leven.

De kracht die de quarks op hun beurt bijeenhoudt in het proton of het neutron moet nog sterker zijn dan de al langer bekende kernkrachten. Deze kracht heeft in principe een grote reikwijdte zodat de quarks te allen tijde bijeengehouden worden. De draager van deze kracht noemen we tegenwoordig 'gluon'. Het gluon is licht, net als het foton. Omdat het pion zelf ook uit quarks bestaat gaat deze voormalige sterke kernkracht geheel op in de nieuwe formulering van de sterke kracht met het krachtvoerend deeltje 'gluon'.

Er zijn echter deeltjes die immuun zijn voor de elektromagnetische en de sterke kracht. Die deeltjes zijn ongeladen, dus ongevoelig voor elektromagnetisme. Ze kunnen dwars door de aarde of zelfs een pijp lood van een lichtjaar lang heen gaan zonder gestoord te worden door de ontelbare atoomkernen die ze tegenkomen. Deze deeltjes zijn de 'neutrino's' en de enige kracht die daarop werkt is de zwakke kracht.

De zwakke kracht brengt eigenlijk alleen een soort overgangen teweeg in de deeltjes waar hij op werkt. Dat zijn niet alleen neutrino's. Die noemde ik slechts om aan te geven dat de zwakke kracht een afzonderlijk gegeven is. Nee, door de

zwakke kracht kan bijvoorbeeld een muon spontaan overgaan in een elektron en twee neutrino's of een proton kan een elektron vangen en dan overgaan in een neutron en een neutrino. Wat wij radioactiviteit noemen, is vaak het gevolg van een gebeurtenis in de atoomkern, waar de zwakke kracht bij betrokken is. Dit soort overgangen konden moeilijk verklaard worden en ik kan slechts tastenderwijs proberen uit te leggen wat het probleem was.

We hadden bij die overgangen te maken met verschijnselen die bij benadering als volgt beschreven kunnen worden. Als we met een fikse vaart bepaalde deeltjes lieten botsen, vonden we een aantal brokstukken die samen groter waren dan de oorspronkelijke deeltjes. Aan de andere kant hadden we hele kleine deeltjes, 'leptonen', die in de buurt van die grote deeltjes alleen maar reageerden op lading, er veelal dwars doorheen gingen en rare overgangen vertoonden. Iets van deze verschijnselen had wel te maken met de eerder genoemde relativiteitstheorie, die immers stelt dat er een bepaalde equivalentie tussen massa en energie bestaat, zodat toename van de massa geweten kan worden aan de toegevoegde energie, maar echt precies formuleren wat er bij die overgangen als gevolg van de zwakke kracht gebeurde, konden we niet.

Als we alle krachten tussen elementaire deeltjes goed wilden formuleren moesten we wetten uit de quantummechanica en de relativiteitstheorie met elkaar in overeenstemming brengen en dat lukte alleen met een uiterste gecompliceerde wiskundige structuur. Vooral de zwakke kracht liet zich moeilijk beschrijven. De wiskunde bracht ons ertoe aan te nemen dat er, u zou het ondertussen kunnen raden, ons onbekende deeltjes moesten zijn. Een aantal van de eigenschappen van die deeltjes konden we goed voorspellen.

De zwakke kracht werkt alleen over een hele kleine afstand. Om een voorbeeld te geven, alleen als een neutrino echt heel dichtbij een elementair deeltje in de atoomkern komt, vindt er een gebeurtenis plaats, maar dat gebeurt maar heel zelden,

meestal gaat een neutrino dwars door een atoomkern heen. Volgens de ijzeren wetten van de quantummechanica moet het krachtvoerende deeltje, dat ten grondslag ligt aan de zwakke kracht, daarom heel zwaar zijn. Verder wisten we dat de zwakke kracht vaak gepaard gaat met verschijnselen die op lading wijzen, zoals ik net beschreef bij overgangen die leptonen maken, zodat we vermoedden dat de nieuwe deeltjes geladen waren. We doopten de nog niet ontdekte, maar wel te verwachten deeltjes W^+ en W^- .

Maar de echte wiskundige puristen onder ons wisten dat de kous hiermee niet af was. Zij wezen er op dat er naast de geladen W^+ en W^- -deeltjes nog een ongeladen deeltje moest zijn dat we Z^0 noemden. Maar zij hadden moeilijke en abstracte argumenten en vele natuurkundigen vroegen zich af of de ingeslagen weg ook maar bij benadering de goede was.

Theoretisch was de zwakke kracht met deze drie krachtvoerende deeltjes prachtig beschreven, maar het had nogal wat voeten in de aarde om ook experimenteel het bestaan te bevestigen van een ongeladen krachtvoerend deeltje voor de zwakke kracht en de daaruit voortvloeiende nieuwe interacties.

Maar het lukte wel.

Eén van de voorwaarden voor het slagen van de experimenten was dat de experimenten zeer nauwkeurig moesten worden uitgevoerd en de waarnemingen zeer zorgvuldig geïnterpreteerd moesten worden. Daarvoor waren gevoelige detectoren nodig, waarmee de banen van de deeltjes zichtbaar gemaakt worden. In een vorig praktisch intermezzo heb ik verteld dat zulke detectoren er zijn, de vonkdetectoren, die op een computer aangesloten zitten en ons op beeldschermen de resultaten van de experimenten tonen.

Indirect werd het Z^0 -deeltje in 1973 al waargenomen. Toen werden bundels van enorme aantallen neutrino's door een detector gestuurd. Op een enkeling na te gaan al die neutrino's ongestoord aan de andere kant van de detector weer naar buiten

want, zoals gezegd, zelfs een lichtjaar lood houdt neutrino's nog niet tegen. Maar een enkele neutrino heeft de pech wel ergens tegenaan te botsen in de detectieruimte. Dan zijn we nog niet tevreden, want het moet ook nog een botsing zonder ladingsoverdracht zijn.

Op een bepaald moment vond Helmut Faissner dat een elektron even met de bundel neutrino's meeraasde en daarna weer gauw zijn snelheid verloor. Toen hadden we gevonden wat we zochten. Dat elektron had een duw gekregen van een neutrino, was daarbij niet van lading veranderd en verloor weer gauw zijn snelheid, terwijl het neutrino zelf zijn weg ongestoord vervolgde. Dit moest een werking van de zwakke kracht zijn tussen neutrino en elektron, waarbij geen lading werd uitgewisseld.

In vakjargon wordt dit verschijnsel 'de neutrale stroom' genoemd. De neutrale stroom kan alleen door het krachtvoerende deeltje Z^0 opgewekt zijn.

Maar het was veel moeilijker om direct deeltjes als W^+ , W^- en Z^0 aan te tonen. Voordat zo'n deeltje vrijkomt moet er heel veel energie in gestopt worden. In grammen en centimeters, dus naar onze gewone maatstaven, is die energie nog altijd klein maar in verhouding tot de afmetingen van de elementaire deeltjes is die energie enorm. Alleen met hele grote apparatuur zijn we in staat die energie in één deeltje te stoppen. Het zou in dat geval het beste zijn protonen tegen anti-protonen te laten botsen, omdat dan ook quarks tegen antiquarks botsen. Dat gaat met zoveel energie dat dan de genoemde deeltjes zouden moeten vrijkomen.

Daarom wilde men gaan werken met versnelde anti-protonen, maar volgens de theorie is de beweging van antiprotonen te chaotisch om ze in onze deeltjesversnellers gevangen te houden. Gelukkig liet de Nederlander Simon van der Meer zich door onze theoretische inzichten er niet van weerhouden om met elektronische hulpmiddelen toch een oplossing voor dit probleem te vinden. Hij ontwierp voor de deeltjesversnellers van

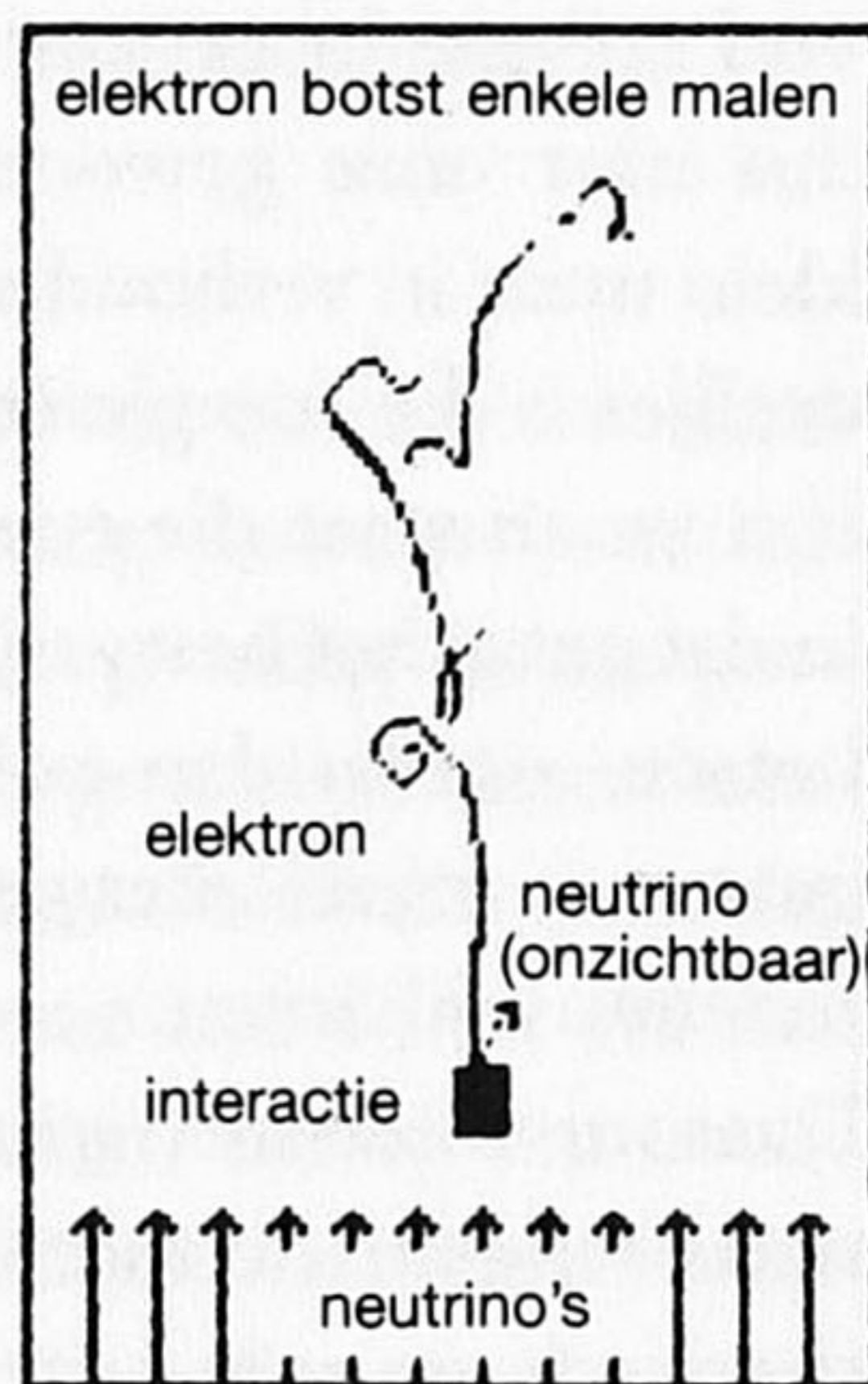
het CERN in Genève een elektronisch besturingsmechanisme, waarmee antiprotonen die uit de bundel dreigden te ontsnappen weer in het gareel konden worden gebracht.

En een laatste voorwaarde was dat de deeltjesversnellers groter werden dan ze waren, een kwestie van tijd en geld.

In het begin van de jaren tachtig was aan al deze voorwaarden voldaan. In 1984 werden onze denkbeelden over de zwakke kracht beloond met een Nobelprijs voor Carlo Rubbia en Simon van der Meer.

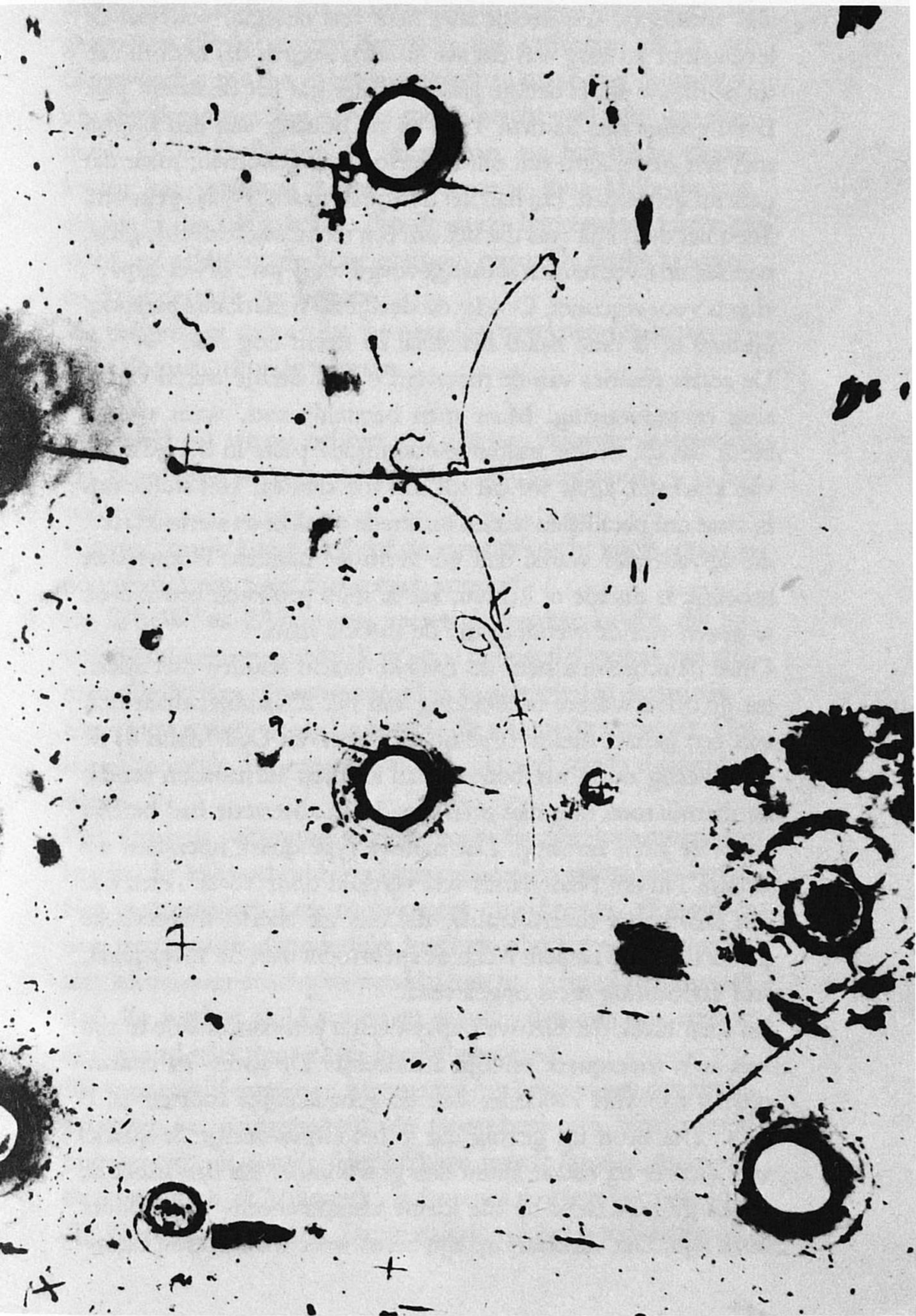
Hiermee was het plaatje van de zwakke kracht heel fraai geworden. We hadden dezelfde mathematische precisie bereikt als in de veel oudere theorie van de elektromagnetische kracht. Het verhaal van de sterke kracht, dat we hebben lagen liggen bij Gell-Manns quarks, heeft nog enige toelichting, omdat de experimentatoren in 1974 iets hadden ontdekt dat onze theorieën grondig zou beïnvloeden.

Burton Richter ontdekte bij een botsing van een elektron en



De indirecte waarneming van het Z^0 -deeltje. Een bundel neutrino's beweegt zich door de detectieruimte (op de foto van onder naar boven) en er vond een interactie tussen een neutrino en een elektron plaats zonder ladingsoverdracht. De interactie wordt weergegeven met de vergelijking:

$$e + \nu_e \rightarrow e + \nu_e$$



zijn antideeltje een deeltje met heel veel energie, waarvan de levensduur zo lang was dat we konden zeggen dat het om een totaal nieuw soort deeltje ging. Richter gaf het de naam 'psi'. Even eerder had Samuel Ting bij de botsing van een proton met een atoomkern een zelfde deeltje waargenomen, maar dat geheim gehouden. Hij had het deeltje de naam 'J' (jay) gegeven. Toen het duidelijk was dat het om één en hetzelfde deeltje ging, werden de twee namen samengevoegd tot 'J-psi', ofwel 'gipsy', engels voor zigeuner. Omdat dit deeltje zo'n markante persoonlijkheid is, is deze naam helemaal zo slecht nog niet.

De eerste reacties van de theoretici op dit deeltje waren verbazing en verwarring. Maar men herstelde snel, want weldra bleek dat dit deeltje buitengewoon goed paste in het patroon van krachten, zoals we dat tot dan toe kenden. Het stelde ons in staat om parallellen te zien tussen de zwakke en sterke kracht, die opvallender waren dan we vermoed hadden. Hoewel het moeilijk is dit toe te lichten, zal ik toch proberen een indruk te geven van de wending die de theorie nam.

Onze denkbeelden over de zwakke kracht leidden niet alleen tot de onverwachte ontdekking van het Z^0 -deeltje, maar ook van een geheel nieuw type quark, waarvan Gell-Mann in de jaren zestig nooit het bestaan had kunnen vermoeden omdat de theorie toen nog niet zo'n graad van abstractie had bereikt als in de jaren zeventig. Dat nieuwe type quark noemden we 'charm', in het Nederlands wel vertaald door 'tover'. Het was een charmante toverformule, die ons uit allerlei theoretische problemen zou helpen. Maar de speurtocht naar de 'toverquark' had vooralsnog niets opgeleverd.

En toen bleek dat nieuwe Gipsy-deeltje een combinatie te zijn van zo'n toverquark en zijn antideeltje. De tover- of charm-quarks zijn veel zwaarder dan de gebruikelijke soorten 'u, d en s'. Dat heeft tot gevolg dat in het Gipsy-deeltje de quarks veel dichter bij elkaar zitten dan gewoonlijk. En dan moet de sterke gluon-kracht op die kleine afstand ineens veel minder sterk zijn. Dat verklaart op zijn beurt weer waarom een Gipsy-

deeltje zoveel stabiel is dan we zouden verwachten. Normaal gesproken elimineren een deeltje en zijn antideeltje elkaar, het Gipsy-deeltje zou dus moeten ontploffen, maar doet dat dankzij het afwijkende gedrag van de sterke kracht veel later dan normaal. De enige theorie die dit gedrag van een sterke gluonkracht kan verklaren is een zogenoemde Yang-Mills-theorie, die we bij andere krachten dan de sterke hanteerden. Hiermee werd een schitterende brug geslagen tussen de sterke krachten en de andere die we kennen.

We krijgen het gevoel dat we naar één overkoepelende theorie voor de natuurkunde toegaan.

Het beeld dat we nu hebben van alle ons bekende materie en krachten — we noemen dat wel het 'standaardmodel' — is het volgende.

Het graviton is het deeltje dat de zwaartekracht voert, maar is nog slechts een puur theoretisch concept.

De W^+ , W^- en Z^0 -bosonen voeren de zwakke kracht, die bijvoorbeeld verantwoordelijk is voor radioactief verval van atomen. De deeltjes zijn aangetoond en passen goed in de theorie.

Het gluon draagt de sterke kracht, die de quarks verbindt. Het is een moeilijk theoretisch concept, dat wel steeds duidelijker wordt.

Het foton is verantwoordelijk voor de elektromagnetische kracht, die bijvoorbeeld de elektronen aan de atoomkern bindt. Het is theoretisch zeer nauwkeurig omschreven. Hoewel er nog steeds twee afzonderlijke krachten zijn die we aanduiden als elektromagnetische en zwakke kracht, vermengen die zich wel. Ze werken altijd samen en worden dan ook wel eens in één woord 'elektrozwakke' kracht genoemd.

We kennen vijf quarks en vermoeden het bestaan van een zesde. Protonen en neutronen uit de atoomkern zijn bijvoorbeeld opgebouwd uit quarks. Het lijkt een mooie familie, maar van de zesde quark, de 'topquark', is de massa nog niet vastgesteld.

We kennen zes leptonen. De wiskunde van het standaardmodel

verlangt dat er evenveel leptonen als quarks zijn. Onder meer daarom zoeken we zo naarstig naar de topquark. Overigens is er geen strikte theoretische reden voor het getal 6. Het had evengoed 8 of 10 kunnen zijn. Dit is één van de mysteries die zich sinds de ontdekking van het muon hebben voorgedaan.

En nu komen we op het terrein van de speculatie, de verwachtingen voor de toekomst, de hoop op één alomvattende natuurkundige theorie. Wat dat laatste betreft, moet me van het hart dat de eerste pogingen veelbelovend zijn, maar de tekortkomingen erg groot. Eén van de tekorten is het ontbreken van de waarden van een handvol natuurconstanten, die nodig zijn om met onze sluitende wiskundige redeneringen heel nauwkeurig te beschrijven wat al deze deeltjes met elkaar doen. Overigens zouden we daarbij dan wel computers nodig hebben die beduidend groter zijn dan die waarover we nu beschikken, maar dat is een technisch probleem.

De huidige theorie zegt niet waarom al deze deeltjes er zijn en waarom het er zo veel zijn. Zelfs de verwachting van die ene theorie, waarin alle krachten een samenhang vertonen, is een speculatie, omdat er geen harde, theoretische argumenten voor zijn.

Nemen we de theorieën wat serieuzer dan eigenlijk gerechtvaardigd is, dan leidt dat tot de prachtige voorspelling, dat de sterke en de zwakke kracht voortkomen uit een nog fundamenteelere kracht waarbij een krachtvoerend deeltje past, dat veel zwaarder is dan de deeltjes die we tot nu toe hebben gezien en kunnen maken. Dat geeft al aan hoe speculatief het volgende is. Dit krachtvoerende deeltje, dat we 'X' noemen, zou zichtbaar kunnen worden bij vergrotingen waarvan ik het aantal nullen niet eens zou durven noemen. Zou je dat krachtvoerende deeltje uitwisselen met een deeltje, dat uit drie quarks bestaat, dan valt dat laatste soms uiteen in een elektron, een quark en een antiquark. Zoals u weet, bestaat een proton uit drie quarks en is het dus volgens de meer dan uiterste consequentie van de

theorie mogelijk dat een proton spontaan zou kunnen vervallen tot andere deeltjes. Dat zou betekenen dat de materie waaruit alles in ons heelal is opgebouwd, aan verval onderhevig is, en alleen daarom al het heelal tijdelijk. Het zou zeer opzienbarend zijn als dit experimenteel bevestigd werd. Naar dat protonverval wordt nu uitgebreid gezocht.

De theoretische verwachting voor de levensduur van een proton was 10^{29} jaar, overigens vele malen de leeftijd van ons heelal die op ongeveer achttien miljard jaar wordt geschat. Volgens de redenering van de experimentatoren zou dat protonverval waargenomen kunnen worden, als we in een ruimte een jaar lang 10^{30} protonen zouden controleren op verval en de voorspelde levensduur juist zou zijn. Op verschillende plaatsen in de wereld werd dit experiment uitgevoerd. In een doodlopend stuk van de verkeerstunnel onder de Mont Blanc bijvoorbeeld stelden natuurkundigen 1500 meter onder de top één miljoen kilo ijzer en één miljoen detectoren van het type geigermüller-teller op. Het moet zo diep onder de grond omdat kosmische straling in staat is protonen te doen vervallen en het de bedoeling was om spontaan verval van protonen te registreren. Maar tot nu toe is dit protonverval nog niet geconstateerd, zodat we wel moeten concluderen, dat, mocht het al bestaan, de levensduur van protonen in de buurt van 10^{32} jaar moet liggen en we onze theorie moeten herzien.

De allermooiste en alleridiotste theorie is de 'stringtheorie', waarin alle vier de krachten meespelen, dus ook de zwaartekracht. Deze theorie heeft het voordeel, dat hij zo omvattend is dat we niet steeds uit een aantal theorieën hoeven te kiezen. Maar om de uitkomsten ervan te testen, zouden we deeltjesversnellers nodig hebben, die nooit gebouwd kunnen worden. We zouden energieën moeten produceren die in het hele heelal niet te vinden zijn. De wiskundige vergelijkingen van de stringtheorie zijn ontzettend moeilijk en het beeld van de ruimte en de tijd wordt korrelig. De 'superstring-theorie' zegt dat de meeste deeltjes gezien kunnen worden als uiterst kleine touw-

tjes met een ingewikkelde structuur in de uiteinden. De touwtjes trillen en vibreren op verschillende manieren. Bij het graviton dat verantwoordelijk is voor het overbrengen van de zwaartekracht, zouden de uiteinden aan elkaar vastzitten en zou het touwtje dus een lus zijn.

Maar voor deze fantasie van schoonheid is het heelal te klein en de werkelijkheid te weerbarstig. Toch kunnen de theoretisch natuurkundigen het niet laten om zover door te denken, want dergelijke wiskundige fantasieën zijn tot nu toe altijd lonend geweest.

En we hebben het volste vertrouwen dat nauwkeurige wiskundige fantasieën altijd lonend zullen blijven.