



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Deeltjesfysica: onvoorstelbare waarnemingen?

Koffeman, E.

Publication date

2009

Document Version

Final published version

License

CC BY-NC-ND

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Koffeman, E. (2009). *Deeltjesfysica: onvoorstelbare waarnemingen?* (Oratiereeks; No. 318). Vossiuspers UvA.


General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

Els Koffeman



Deeltjesfysica:
onvoorstelbare
waarnemingen?

Deeltjesfysica: onvoorstelbare
waarnemingen?

Vossiuspers UvA is een imprint van Amsterdam University Press.
Deze uitgave is totstandgekomen onder auspiciën van de Universiteit van Amsterdam.

Dit is oratie 318, verschenen in de oratiereeks van de Universiteit van Amsterdam.

Omslag: Crasborn BNO, Valkenburg a/d Geul
Opmaak: JAPES, Amsterdam
Foto omslag: Carmen Freudenthal, Amsterdam

ISBN 978 90 5629 533 2
e-ISBN 978 90 4850 663 7

© Vossiuspers UvA, Amsterdam, 2009

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

Voorzover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974, St.b. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, St.b. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

Deeltjesfysica: onvoorstelbare waarnemingen?

Rede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
bijzonder hoogleraar Instrumentatie in de deeltjesfysica
aan de Universiteit van Amsterdam
op donderdag 15 februari 2007

door

Els Koffeman

 VOSSIUSPERS UVA

*Mijnheer de rector magnificus,
Mijnheer de decaan,
Leden van de Stichting Hoge Energie Fysica,
Geachte aanwezigen,*

Dit jaar zal op CERN in Genève een nieuwe versneller in première gaan. Deeltjes worden met hogere energie en met een hogere intensiteit dan ooit tevoren versneld. De versneller dient de zoektocht naar onvoorstelbaar kleine deeltjes. Onvoorstelbaar?

Een botsing tussen twee protonen die een zó hoge snelheid hebben dat er misschien een nieuw deeltje wordt gemaakt. Een botsing tussen twee protonen die een zó hoge snelheid hebben dat er misschien een Higgs-deeltje wordt gemaakt. Op dit moment is het voor iedereen in deze zaal nog moeilijk voorstelbaar of het zo zal lopen, en daarmee is de achterstand van de leken of niet-natuurkundigen die hier aanwezig zijn meteen fors gerelativeerd: niemand weet op dit moment wat er gaat gebeuren als de Large Hadron Collider (LHC) dit jaar van start gaat.

Om de een of andere reden schijnt de zoektocht naar planeten, sterren en sterrenstelsels meer tot de publieke verbeelding te spreken dan de zoektocht naar het allerkleinste. Ik verzeker u echter dat de reis naar het kleinste van het kleinste zeker zo fascinerend is.

Stel je voor dat je als ruimtewezen de aarde kon bestuderen. Stel je voor dat je dit doet met een heel goede telescoop en dat je objecten kon waarnemen die tientallen meters groot zijn. Je zou geen mensen zien maar wel gebouwen, wegen, fabrieken. Het model dat je van de aarde zou maken, zou waarschijnlijk geen mensen bevatten. Stel je voor dat je in staat zou zijn een telescoop te maken die honderd maal beter is: er zou letterlijk een wereld voor je opengaan. Hopelijk staat ons een dergelijk verrassing te wachten bij de start van de nieuwe versneller, dit jaar op CERN in Genève.

Wat er bij de voorbereiding en bij de uitvoering van dit experiment komt kijken, is zó immens complex en groot(s), dat het alleen volbracht kan worden door

de inspanning van duizenden wetenschappers en technici uit de hele wereld. Niet alleen zal de snelheid, en daarmee de energie van de protonen hoger dan ooit tevoren zijn, ook de intensiteit van de proton-proton-botsingen zal tot zeer grote hoogte stijgen. Dit betekent dat er vele botsingen per seconde zullen plaatsvinden.

Toch draait het bij een deeltjesversneller altijd om de analyse van individuele botsingen. Het draait weliswaar om het produceren van heel veel botsingen, maar altijd om het meten, het opslaan en het interpreteren van enkele botsingen tussen twee deeltjes. Soms zijn dergelijke botsingen zo geslaagd dat alle energie van de twee deeltjes omgezet wordt in nieuwe materie. In het ultieme geval is dat nieuwe materie die nog nooit eerder is waargenomen. Dan is de ontdekking van een nieuw deeltje een feit.

Instrumentatie in de hoge-energiefysica, of deeltjesfysica, draait uiteindelijk om het waarnemen van deze nieuwe deeltjes. Hoe direct is zo'n waarneming nu eigenlijk, hoe echt of hoe abstract? En waar doe je het voor? Mijn wetenschappelijke ambitie is het om deeltjes te meten op een schaal die kleiner is dan we ons nu kunnen voorstellen: onvoorstelbaar klein. Mijn ambitie op korte termijn is in deze voordracht het onvoorstelbaar kleine op de een of andere manier voorstelbaar te maken. Mijn persoonlijke motivatie ligt in het besef dat, hoewel onze rol in de ruimte en tijd miniem is, wij toch in staat zijn om de grenzen van die onmeetbare ruimte en tijd af te tasten.

De stand van zaken

De aarde bestaat voor een belangrijk deel uit water. Het watermolecuul bestaat uit een zuurstofatoom en twee waterstofatomen. Het waterstofatoom bestaat uit een proton en een elektron. Het proton bestaat uit twee soorten quarks. Uit deze twee soorten quarks en het elektron kan trouwens alle ons bekende materie worden opgebouwd, niet alleen op aarde maar ook in planeten en sterren: verbluffende eenvoud.

De krachten tussen quarks onderling en tussen quarks en elektronen zijn te verdelen in zwakke en sterke kernkrachten en de elektromagnetische kracht. Deze krachten worden goed beschreven door het Standaardmodel. De theorie die aan dit model ten grondslag ligt, maakt echter gebruik van het Higgs-mechanisme. Voor deeltjesfysici is het moeilijk voorstelbaar dat het Standaardmodel aan de ene

DEELTJESFYSICA: ONVOORSTELBARE WAARNEMINGEN?

kant excelleert in het voorspellen van precisieingen, terwijl het aan de andere kant toch fout zit waar het het Higgs-mechanisme betreft, alsof alle gevolgen kloppen maar de oorzaak ontbreekt. Dankzij de nieuwe versneller zal het experiment in deze kwestie het laatste woord hebben.

De aarde, de lucht en de oceanen zijn opgebouwd uit moleculen en atomen. Het merendeel van onze alledaagse waarnemingen berust op het zien of voelen van grote groepen van deze moleculen of atomen in vertrouwde verschijningsvormen, zoals vloeistoffen, gassen en vaste stoffen. Moleculen zijn klein. Om hiervan een voorstelling te maken, gebruiken we een factor duizend. Zelfs kleine kinderen weten wat een factor duizend is: Sneeuwwitje is immers duizendmaal mooier dan de boze koningin. Maar misschien kan een ander meer met het verschil tussen duizend euro en een miljoen euro.

Terug naar het molecuul. Een millimeter is duizendmaal kleiner dan een meter; deze maten zijn beide zichtbaar en voorstelbaar voor ons. Een micrometer is duizendmaal kleiner dan een millimeter. Niet meer echt zichtbaar, maar voor instrumentmakers en technici (zeker die van het Nikhef) kan een micrometer een beslissende rol spelen in toleranties van mechanische passingen. Een micrometer is voor het blote oog net niet meer waarneembaar. Een molecuul is nogmaals duizendmaal kleiner: een nanometer, en dan heb je het zelfs over een van de grootste moleculen die er bestaan. Ja, er zijn wel grotere moleculen (zoals polymeren) maar die gedragen zich niet als een golf! Dit is een belangrijke opmerking die uitleg verdient; die zal echter later aan de orde komen.

Van microscoop naar deeltjesversneller

In de huidige maatschappij denken de meesten van ons bij ‘deeltjes’ aan fijn stof en bij ‘detectie’ aan de poortjes bij de douane op Schiphol. Ik denk bij ‘deeltjesdetectie’ aan iets heel anders. Andere deeltjes, andere detectie. Ten eerste zijn de deeltjes waar wij naar zoeken nog eens en nog eens duizendmaal kleiner (een soort van micro-nanometer) dan ons molecuul. Hoe is het mogelijk om zo’n klein deeltje waar te nemen? Te detecteren? Zijn de deeltjes die ik bedoel werkelijk zichtbaar?

Als wij een voorwerp zien, betekent dit dat het licht dat op het voorwerp valt, wordt gereflecteerd. Deze reflectie kun je opvatten als een interactie tussen het licht en het voorwerp. Licht is een van de vele vormen van elektromagnetische

ELS KOFFEMAN

energie. De hoeveelheid energie die in een veld kan worden overgedragen, is niet oneindig klein maar is gekwantiseerd; de energieuitwisseling gaat in stapjes of pakketjes. Het pakketje in het elektromagnetische veld is een foton, bijvoorbeeld een 'zichtbaar licht'-foton. Een foton kan beschreven worden als een deeltje of als een golf.

Ieder foton wordt gekarakteriseerd door zijn energie: voor infrarood licht is de energie per foton heel erg laag. Voor ultraviolette straling is deze energie per foton heel hoog. De energie van het foton is echter ook evenredig met de frequentie van de golf waarmee die wordt beschreven. Als je een springtouw sneller wil laten draaien, moet je er meer energie in stoppen. Een golf met hoge frequentie heeft ook veel energie.

Een golf kun je, in plaats van met zijn frequentie, ook karakteriseren met zijn golflengte. Denk hierbij aan golven aan de oppervlakte van de oceaan: als je met een boot voor anker ligt, verandert je eigen positie niet en ga je met een bepaalde frequentie op en neer. Als je vanuit een vliegtuig een foto maakt van diezelfde golven (op een vast tijdstip) zie je echter een patroon waarin je de afstand tussen twee golftoppen zou kunnen bepalen. Als je bootje langzaam schommelt op de golven, zal je een lange golflengte meten. Deze eigenschap is algemeen: ook een elektromagnetische golf met hoge frequentie heeft een kleine golflengte.

Licht is trouwens niet de enige manifestering van elektromagnetische straling. Ook hierbij kunnen we de factor duizend mooi illustreren. Radiogolven zijn golven met golflengtes van 1000 meter (lange golf) tot een meter (ultrakorte golf). GSM-netwerken reiken tot golflengtes van millimeters. Zichtbaar licht heeft golflengtes in micrometers en met röntgenstralen bereiken we nanometers. Daarmee zijn we weer terug bij de maat van het molecuul.

Een lopende golf wordt niet erg sterk beïnvloed door structuren die veel kleiner zijn dan de golflengte. Een eilandje in zee zal golven weerkaatsen, maar een badeendje zal geen meetbare invloed hebben. Wetenschappelijk uitgedrukt vindt er geen interactie of wisselwerking plaats. De golf gaat onverstoord verder zonder enige reflectie of verstrooiing.

Aan de hand van dit principe kan een aantal alledaagse verschijnselen verklaard worden: Waarom is de lucht blauw? Blauw licht heeft een korte golflengte, vergelijkbaar met de afmeting van deeltjes in de lucht. Hierdoor is er veelvuldig interactie tussen het blauwe licht en deze deeltjes: van al het licht dat de zon uitstraalt, wordt het blauwe licht door deze interactie naar alle richtingen verstrooid. Het

DEELTJESFYSICA: ONVOORSTELBARE WAARNEMINGEN?

blauwe licht lijkt daarom niet langer direct van de zon te komen: als je naast de zon kijkt is het niet donker maar blauw.

Waarom lijkt de zon rood bij zonsondergang? Er is nauwelijks interactie tussen de deeltjes in de lucht en rood licht (dat een lange golflengte heeft). Het rode licht van de zon gaat daardoor ongehinderd naar de waarnemer. 's Avonds is dit effect groter omdat de luchtdaag dikker is: de zon gaat rood onder.

Van een popconcert hoor je op enige afstand alleen de lage tonen, inderdaad omdat deze lage tonen (met een lange golflengte) niet worden verstrooid door bomen, huizen en dergelijke.

Microscopen maken gebruik van zichtbaar licht dat op een voorwerp valt. Beter gezegd, van heel veel licht dat op heel veel moleculen valt. Met lenzen wordt er een voor het oog zichtbare afdruk of afbeelding van gevormd. Hoe kleiner het voorwerp, hoe meer lenzen er nodig zijn om deze afbeelding te realiseren. De microscoop wordt groter, tot het punt waarop het voorwerp kleiner is dan de golflengte van het licht. Er is geen reflectie, er valt niets meer af te beelden, ongeacht het aantal lenzen.

We begrijpen nu waarom zelfs de grootste microscoop niet in staat is elementaire deeltjes te zien. Zelfs de golflengte van het blauwste licht is groter dan de afmeting van een atoom. Licht schiet dus tekort (of liever niet kort genoeg) bij het doen van onderzoek naar de nog veel kleinere, elementaire deeltjes.

Wat is er kleiner dan de kleinste lichtgolf? Zeer intense elektromagnetische straling, zoals X-rays en gammastraling, maar dit is slechts uitstel van executie. De elementaire deeltjes zijn nog veel kleiner. Dat is dan ook de belangrijkste reden om een deeltjesversneller te bouwen. Door elementaire deeltjes op elkaar te laten botsen, kunnen we ook leren hoe ze er 'uitzien'. Zelf hebben ze immers precies de juiste grootte.

Door de alomtegenwoordigheid van vaste stoffen leven wij in de sterke veronderstelling dat atomen zich op een vaste, aanwijsbare plaats bevinden. Maar zoals een lichtgolf kan worden beschreven als een deeltje (het foton), kan een deeltje worden beschreven als een golf. Ook treedt er vergelijkbaar gedrag op: een deeltje met hoge energie heeft een kleine golflengte.

Dit is de kern van een deeltjesversneller: door deeltjes te laten versnellen, krijgen ze meer energie, en meer energie is vergelijkbaar met een kleinere golflengte. Een kleine golflengte stelt ons in staat om kleine structuren te observeren. Met de energie die bij de Large Hadron Collider bereikt kan worden, kunnen we structu-

ren zien op een schaal van een attometer (nano-nanometer). Dat is het zout op de tomaat van Bentvelsen (zie de oratie van S. Bentvelsen)!

Het waarnemen van deze attometer is gebaseerd op de registratie van alle deeltjes die bij de botsing zijn betrokken. De deeltjes worden gedetecteerd door verschillende sensoren. De veelal elektronische signalen uit deze sensoren worden opgeslagen met behulp van computers. Door achteraf alle gegevens te reconstrueren, kunnen de fysische eigenschappen van een deeltje, zoals de massa en lading, worden bepaald. Hoewel deze eigenschappen ter visualisatie gebruikt worden in grafische computerprogramma's, blijft het elementaire deeltje zelf onzichtbaar. De detectie van een deeltje is echter wel concreet en niet abstract. Dat is waar ik aan denk bij deeltjesdetectie.

Botsingen in een deeltjesversneller

Als twee biljartballen op elkaar botsen, is er niet veel uit af te leiden, anders dan dat de ballen rond zijn. De reden hiervoor is dat het om een elastische botsing gaat. De deelnemers aan zo'n botsing kunnen alleen van snelheid en richting veranderen. Veel interessanter is de inelastische botsing, duidelijk te illustreren aan de hand van een botsing tussen een biljartbal en een ei. Bij dit type botsingen wordt veel meer prijsgegeven over de structuur van de objecten.

Dat een proton bestaat uit quarks is experimenteel vastgesteld door veel inelastische botsingen te bestuderen. De HERA-versneller in Hamburg, waar S. Bentvelsen over sprak, heeft laten zien dat de structuur van een proton zeer complex is en bovendien onderhevig aan voortdurende verandering. Nog steeds is het veel beter mogelijk de structuur van een proton te bepalen met behulp van experimenten dan met theoretische modellen.

Ik kwam zelf pas in een later stadium bij het ZEUS-experiment bij HERA terecht. Het accent van de metingen kwam toen te liggen op de rol van zware quarks in het proton. Om het ZEUS-experiment ook voor deze metingen goed uit te rusten, werd een nieuwe detector ontworpen. Hoewel de HERA-versneller niet zoveel protonbotsingen heeft geproduceerd als we verwacht hadden, heeft de detector die wij in 2001 geïnstalleerd hebben tot op de dag van vandaag onafgebroken goed gefunctioneerd. Ik heb zelf van 1997 tot 2005 aan dit project gewerkt, en vele promovendi met mij.

DEELTJESFYSICA: ONVOORSTELBARE WAARNEMINGEN?

Naast elastische en inelastische botsingen zijn er bij botsingen tussen elementaire deeltjes nog extra mogelijkheden: twee op elkaar botsende deeltjes kunnen annihilieren. Door de omzetting van massa in energie en omgekeerd, is het bijvoorbeeld mogelijk dat er, na een botsing tussen een elektron en zijn tegenpool – het positron –, andere deeltjes worden geproduceerd. Mits dit proces voldoet aan allerlei behoudswetten, zoals ladingsbehoud en energiebehoud, mag een botsing tussen een positief en een negatief geladen deeltje bijvoorbeeld een nieuw neutraal deeltje opleveren.

Bij de Large Elektron Positron versneller (LEP) die tot het jaar 2000 op CERN in gebruik was, werden deze metingen met zeer hoge precisie uitgevoerd. Het doel van dit experiment was het bestuderen van de zwakke wisselwerking, een kracht die wordt uitgeoefend door (o.a.) het Z-boson. Dit neutrale boson, waaraan ik tijdens mijn promotie metingen heb verricht, is bijzonder: het heeft een hele korte levensduur en valt uit elkaar in twee nieuwe deeltjes. Het Z-deeltje zal zelf nooit in staat zijn om welk detectiepoortje dan ook te bereiken. Door echter het spoor te volgen van de vervalsproducten van het deeltje, kun je als het ware een stelsel vergelijkingen vormen met maar één onbekende. Op deze manier heeft men de eigenschappen van het Z-deeltje gemeten.

Het Z-deeltje kan vervallen in verschillende soorten deeltjesparen. Hoewel er een statistische onzekerheid is in de uitkomst van een botsing tussen twee elektronen, is exact te voorspellen hoe vaak de verschillende eindtoestanden zullen voorkomen. De overeenkomsten tussen de metingen bij de LEP-versneller en de voorspellingen op basis van het Standaardmodel waren verbluffend: er was geen spoor van anomalieën en er waren geen nieuwe deeltjes.

Nieuwe deeltjes?

Geen nieuwe deeltjes dus en ook geen Higgs-deeltjes. En daarom wordt dan nu de Large Hadron Collider gebouwd. Het experiment dat collega Bentvelsen en ik (met vele collega's) bij deze versneller zullen uitvoeren, heet ATLAS.

De meeste deeltjes die interessant zijn voor verdere studie zijn zeer kort levend. Wederom moet ik het uiterste van uw voorstellingsvermogen vragen. De levensverwachting van sommige van die deeltjes is duizendmaal duizendmaal duizendmaal duizend keer kleiner dan een seconde. 'Hun' voordeel is wel dat deze

ELS KOFFEMAN

levensverwachting niet afhangt van hoe oud ze al zijn. Het is zuivere statistiek en zoals u weet heeft het toeval geen geheugen, maar dat terzijde. De korte levensduur betekent dat we deze deeltjes niet direct kunnen waarnemen. De dochters waarin een dergelijk deeltje uiteenvalt, zullen hun eigenschappen echter onder elkaar verdelen. Door alle dochters te volgen, kunnen de eigenschappen van het deeltje waar we in eerste instantie naar zochten, gereconstrueerd worden. Deze achtervolging is gecompliceerd want de dochters gaan er vandoor met snelheden die dichtbij de lichtsnelheid liggen. En toch kan het, en dat is waar het om draait: deeltjes meten die met de lichtsnelheid door een detector razen.

En ook nu zien we deze deeltjes niet echt, maar ze laten wel een echt spoor achter. Een spoor van verwoesting zelfs, hoewel op zeer kleine schaal. Wel degelijk leidt de passage van zo'n klein snel deeltje tot het losmaken van elektronen, die immers aanwezig zijn in vrijwel alle materie om ons heen. Als het Higgs-deeltje bestaat, zou het uit elkaar kunnen vallen in twee zware quarks. Deze quarks zullen op hun beurt vervallen en recombineren, met als resultaat een geconcentreerde fontein van secundaire deeltjes. Ieder deeltje zal op zijn weg door de hele detector een spoor achterlaten van miljoenen vrijgemaakte elektronen. Met de juiste technieken is dit spoor vast te leggen, voor het verdwijnt: zoals voetsporen in het strandzand bij de branding, wordt het signaal steeds overspoeld. Het ATLAS-experiment wordt veertig miljoen keer per seconde overspoeld met nieuwe deeltjes.

Om ons stelsel vergelijkingen zo compleet mogelijk te maken, willen we als het even kan ook het tijdstip van aankomst en de snelheid klokken. Er zijn heel veel manieren om dit soort metingen te doen. Sommige sensoren zijn goed in snelheidsbepaling, andere vooral efficiënt in energiebepaling en weer andere vooral goed in de selectie van bepaald type deeltjes. Instrumentatie in de deeltjesfysica draait om het bedenken, toepassen en combineren van bestaande en nieuwe technieken en technologie, met als resultaat een experiment van het formaat ATLAS. Misschien is ATLAS een detectorcomplex waarvan geen enkel individu de volledige werking kan doorgronden.

Sporen van instabiele deeltjes: de eerste stapjes

Mijn specialiteit is de routebepaling en in het bijzonder het precies vaststellen van het vertrekpunt van een deeltje. Bij de proton-protonbotsingen die wij aan het eind van dit jaar gaan bestuderen, zullen deze metingen de eerste sleutel vormen tot het vastpinnen van het Higgs-deeltje. Van honderden deeltjesroutes moeten we eerst vaststellen welke hetzelfde vertrekpunt hebben. Een punt waar twee of meer sporen bij elkaar komen, kan erop duiden dat er op dat punt een deeltje uit elkaar gevallen is. Dat punt heet ‘oorsprong’ of ‘vertex’.

We willen een detectiepoortje, ofwel een *sensor* maken voor een geladen deeltje met een hoge snelheid. De sensor kan gevormd worden door een dun laagje materiaal. Laten we even terugkeren naar de atoomkernen. De atoomkernen zijn een miljoen keer kleiner dan de atomen zelf en daardoor lijkt het dan ook alsof een laagje materiaal hoofdzakelijk uit een dunne, ijle elektronenwolk bestaat. Een deeltje kan deze elektronenwolk passeren, zonder dat het zelf noemenswaardig afremt of van richting verandert en zonder dat het de eigenschappen van het laagje materiaal erg verandert.

Er gebeurt natuurlijk wel iets. Het materiaal bestaat uit geordende laagjes atomen. De elektronen die zich in de baan van het passerende deeltje bevinden, zullen een zet krijgen. Bewegende elektronen zijn elektrische stroompjes. Die stroompjes zijn meetbaar. De sterkte van de stroom is te meten met een ampèremeter. Na enige tijd zullen de elektronen hun oude routine hervatten. Maar het passerende deeltje heeft een klein deel van zijn energie verloren en het heeft zijn route verraden.

Een belangrijk deel van het ATLAS-experiment is gebaseerd op sensoren die bestaan uit laagjes silicium. Deze siliciumsensoren registreren helemaal binnenin het experiment wat er de eerste paar picoseconden na een botsing gebeurt. Hoewel de deeltjes die bij een botsing ontstaan met de snelheid van het licht van het botsingspunt afvliegen, zullen ze in een picoseconde nog geen millimeter afgelegd hebben.

Toch gebeurt er juist in deze eerste millimeter heel veel interessants. Bij het zoeken naar nieuwe deeltjes in het algemeen en het Higgs-deeltje in het bijzonder, spelen zware quarks namelijk een belangrijke rol. De zwaarste van de zes quarks die we kennen zijn het top- en het beautyquark. Beide zijn niet stabiel en zullen onder invloed van bijvoorbeeld zwakke en sterke wisselwerkingen uit elkaar val-

len. Dit verval is een zeer dynamisch proces dat zich vooral de eerste paar picoseconden na de botsing afspeelt. Voor alle metingen die bij de LHC uitgevoerd gaan worden, is het van groot belang dat dit proces nauwkeurig wordt gemeten. Het zijn als het ware de eerste stapjes van de deeltjes die bij een botsing vrijkomen. U zult begrijpen, die mogen we niet missen!

Om de metingen correct uit te voeren, maken we gebruik van het feit dat de deeltjes met de lichtsnelheid gaan. Het meten van een picoseconde is erg complex en niet nauwkeurig. Maar de afstand die het deeltje in een picoseconde aflegt, is een derde millimeter en dat is wel meetbaar. Met de siliciumsensoren waaraan ik werk, kunnen we zelfs nog wel een factor honderd nauwkeuriger meten: een afstand van een paar micrometer, oftewel tien femtoseconden van een deeltje dat met de lichtsnelheid beweegt.

Het lastige van het onderzoek dat wij doen bij deeltjesversnellers is dat we deze nauwkeurigheid willen inzetten op grote schaal. Waar ik zojuist opmerkte dat we profiteren van het feit dat de meeste deeltjes een zeer hoge snelheid bereiken, zijn er ook wat nadelen aan verbonden. Om de snelheid (of eigenlijk de impuls: de massa maal de snelheid) van een deeltje te bepalen, wordt de afbuiging gemeten in een magneetveld. Net zoals een stroomvoerende draad een Lorentz-kracht voelt, voelt ook een individueel deeltje deze kracht. De baan of route van het deeltje wordt in een magneetveld dan ook krom, en de kromming is een maat voor de snelheid. Hoewel in ATLAS een van de sterkste magneten ter wereld wordt gebruikt, zijn er nog steeds vele meters nodig om dit effect waar te nemen. De grootste onderdelen in het ATLAS-experiment zijn de magneten. Om alle fragmenten van de energierijke botsingen te kunnen meten, zijn veel grote detectoren nodig.

Heel veel van de tijd die nodig is voor het maken van een onderdeel voor een supergroot experiment als ATLAS gaat zitten in het nadenken over de vereiste nauwkeurigheid. Wat is de nauwkeurigheid die uiteindelijk nodig is? Zo nauwkeurig mogelijk is ondenkbaar; voor een ingenieur zou dit betekenen dat hij oneindig veel tijd en oneindig veel geld aan het project zou besteden.

Maar we zijn er wel op uit om iets nieuws te ontdekken, en als je niet weet wat je zoekt, hoe weet je dan hoe precies je het wil meten? U kunt zich voorstellen dat hieraan menige discussie wordt gewijd. Uiteindelijk leidt dat ertoe dat voor ieder onderdeel vele lange lijsten van specificaties worden opgesteld. Dat sommige on-

DEELTJESFYSICA: ONVOORSTELBARE WAARNEMINGEN?

derdelen in samenwerking met de industrie worden gebouwd, maakt het er niet altijd makkelijker op.

Nieuwe deeltjesversneller

De Large Hadron Collider (LHC) op CERN zal niet alleen protonen laten botsen met een hogere snelheid, maar ook met een veel hogere intensiteit dan ooit te voren. Dat betekent veel botsingen per seconden. Dit is nodig omdat de uitkomst van een proton-protonbotsing statistisch bepaald is. Dat is niet hetzelfde als onvoorspelbaar. Om uit te vinden of een dobbelsteen helemaal eerlijk is, zul je heel vaak moeten gooien, en dit komt heel dicht bij de werkelijkheid van het analyseren van de proton-protonbotsingen. Van heel veel proton-protonbotsingen weten we de uitkomst al, maar we zoeken naar een verborgen vlakje waarvan het Standaardmodel voorspelt dat het er is. De kans dat dit vlakje een keer bovenkomt, is in ieder geval heel klein (veel minder dan één op een miljoen), maar bij de LHC zullen er honderden miljoenen botsingen plaatsvinden. Het zou nog veel mooier zijn wanneer zou blijken dat we zo hard kunnen gooien dat we de dobbelsteen van binnen kunnen bekijken.

Op CERN zal dit jaar een versneller gaan draaien die protonen versnelt tot 0.999999 keer de lichtsnelheid. Het gevolg is dat materie bestudeerd kan worden op een kleinere schaal dan ooit te voren: duizendmaal kleiner dan het molecuul, nog duizendmaal kleiner en nog duizend keer kleiner: nano-nano.

Het is welhaast zeker dat de huidige theorie niet toereikend is om te beschrijven wat er dan gebeurt. Om van alle beeldspraak af te stappen: er is een goede kans dat zich botsingen zullen voordoen met een uitkomst die niet door het Standaardmodel wordt voorspeld. Ik denk niet dat dit ertoe zal leiden dat het Standaardmodel wordt verworpen, want het model is zo succesvol in de beschrijving van de fundamentele krachten dat het niet zal vergaan, net zoals de relativiteitstheorie de tekortkomingen van de klassieke mechanica heeft aangetoond, maar de klassieke mechanica nog altijd in gebruik is. Op dezelfde manier voorzie ik dan ook een veilige toekomst van het Standaardmodel, maar ik verheug mij op de uitzondering. Ik hoop op iets onvoorstelbaars. Per slot van rekening wordt een theorie pas bijzonder als deze bevestigd wordt door een experiment, maar wordt een experiment pas echt bijzonder als hij niet verklaard kan worden door een theorie.

Met deze versneller gaat er dit jaar een fantastisch project van start dat voor vele jaren werk aan wetenschappelijke analyse zal opleveren. Ik verwacht dat de prestaties ervan al snel onze verwachtingen zullen overstijgen. In dat geval zullen we heel hard moeten werken om onze meetapparatuur op peil te houden. Er zal ook ruimte nodig zijn om bepaalde onderdelen te vervangen door detectoren die op nieuwere technologie zijn gebaseerd. Instrumentatie in de deeltjesfysica, daar zal ik mij aan blijven wijden.

Naast deze taak zijn er een tweetal zaken binnen de wetenschap die mij na aan het hart liggen...

Onderwijs en voorlichting

In het kerstnummer van de *NRC* in 2006 zat een bijlage die speciaal gewijd was aan taboes in Europa. Tussen bijdragen over zwaarwegende problematiek bevond zich ook een ingezonden brief van een student over het grootste taboe in Nederland, in ieder geval in de collegebanken: laten merken dat je iets niet begrepen hebt. De brieven schrijver schetst een angstaanjagend beeld van een professor in een collegezaal vol met studenten, van wie het volgens hem vaststaat dat geen enkeling van hen er nog iets van begrijpt. Niemand durft een vraag te stellen. Dit is persoonlijk mijn grootste schrikbeeld en helaas soms herkenbaar bij het bijwonen van voordrachten en congressen. Dat alleen de grootste experts en wetenschappelijke kopstukken vragen hebben, is een teken aan de wand (waren zij de enigen die het konden volgen of durven zij te laten zien dat ze het ook niet hebben begrepen?).

Voor een goede uitleg gelden een aantal voorwaarden. De uitlegger moet het durven om dingen te vereenvoudigen zonder daarbij een verkeerde voorstelling van zaken te geven. De 'uitleg-ontvanger' moet vragen durven te stellen, zodat de degene die de uitleg geeft zijn betoog voortdurend kan aanpassen. Colleges, workshops en ook werkbesprekingen mogen niet over de hoofden van de aanwezigen gaan. Zowel docenten als studenten dragen hiervoor de volle verantwoordelijkheid. Voor de wetenschappers en docenten in deze zaal: durf uit te leggen. Voor iedereen: durf te vragen.

Vrouwen in de natuurkunde

Ik begon in 1986 als een van de tien procent vrouwen aan een studie technische natuurkunde. Dit was een veelbelovende stijging na een jarenlange promotie van het vak. De jaren daarna daalde het percentage vrouwen weer. Hoe verder mijn loopbaan vorderde, hoe lager het aandeel vrouwen werd dat technische natuurkunde ging studeren. De tien procent vrouwen uit mijn studiejaren vond ik niet meer terug.

Wetenschappelijke voorspellingen over hoe het percentage vrouwelijke natuurkundigen met een loopbaan in de wetenschap zal verlopen, zijn niet te maken. Geloof mij dat het al heel lastig is om uit te vinden hoeveel eerstejaarsstudenten natuurkunde er staan ingeschreven bij de UvA. Maar ik wil u toch graag enkele observaties en een mogelijke verklaring voorleggen.

Het aandeel van vrouwen in de natuurkunde is uitzonderlijk laag en neemt af met het salaris en niveau van de functie. Het aantal vrouwen met een baan is in Nederland, vergeleken met andere landen in Europa, daarentegen hoog. Het aantal vrouwen met een parttimefunctie is hoger dan waar ook ter wereld. Een factor die daarbij een belangrijke rol speelt, is de relatief hoge welvaart in Nederland. Er bestaat, zeker voor hoog opgeleiden, nauwelijks een economische noodzaak voor twee fulltimebanen binnen één huishouden, en natuurkunde wordt niet gezien als een vak dat je parttime kan doen.

Er is nog een factor die een rol zou kunnen spelen bij het lage aantal vrouwen in deze sector: wis- en natuurkunde worden geïntroduceerd op het moment dat scholieren 13 à 14 jaar oud zijn. Hoewel ik hier niet al te diep wil ingaan op de verschillen tussen mannen en vrouwen is het zeker dat de puberteit bij jongens en meisjes asynchroon verloopt. De kennismaking met natuur en techniek ligt voor meisjes op een ongunstige leeftijd. Met de verschuivingen die zich op het moment voordoen in de ontwikkeling van kinderen is dit misschien ook waarheid aan het worden voor jongens.

Of een persoon succesvol is in een vak, hangt volgens mij voor een groot deel af van talent, motivatie en de kansen die er liggen. Ik denk dat het mogelijk is om de kansen voor een bepaalde groep actief te vergroten, wat overigens niet hetzelfde is als het stellen van lagere eisen aan talent en motivatie. Dit is mijn inziens dan ook een valide middel om deze scheve verhouding recht te trekken.

Dankwoord

Tot slot wil ik nog even terugkeren naar de onvoorstelbaar kleine deeltjes. De kans dat al die onvoorstelbaar kleine deeltjes waaruit wij zijn opgebouwd hier vandaag in deze formatie bij elkaar zouden zijn, was waarlijk onvoorstelbaar klein. Toch is het gelukt en we realiseren ons dat ook nog. Met deze wonderlijke paradox wil u allen bedanken voor uw aanwezigheid.

Ik dank het College van Bestuur en de faculteit voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik wil ook mijn thuisbasis, het Nikhef en mijn werkgever, de Stichting FOM, bedanken. Zij maken het mij mogelijk om dit bijzondere hoogleraarschap te aanvaarden.

Er zijn heel veel leraren en docenten die mij op wat voor wijze dan ook geprikkeld en gemotiveerd hebben om verder te studeren. De invloed van leraren op de middelbare school is voor mij heel groot geweest en waarschijnlijk bepalend voor het verloop van mijn studie en loopbaan. Tijdens mijn studie natuurkunde ben ik met grote waarschijnlijkheid veel sneller afgestudeerd dankzij de opmerkingen van enkele ouderejaars dat ik het nooit zou redden.

Mijn liefde voor het vak werd aangewakkerd door mijn hooggeschatte promotoren, de professoren Duinker, Linde en Merk, ieder op zijn geheel eigen wijze. Na mijn postdoc-periode in München kwam ik bij Nikhef in de ZEUS-groep, waar ik sinds 1999 in vaste dienst ben. Hoewel de ZEUS-groep inmiddels, zeer tot mijn spijt, uit elkaar gevallen is, heb ik hier een geweldige tijd gehad. Ik denk niet dat er onderwerpen of personen onbesproken zijn gebleven in de ontelbare gesprekken met Henk Tiecke. Henk, ik vind het nog steeds jammer dat je met pensioen bent gegaan.

Een aantal mensen heeft een bijzondere bijdrage geleverd aan mijn zelfvertrouwen en dat betekent nog steeds heel veel voor mij. Jos Engelen, Karel Gaemers en Ger van Middelkoop; ik ben jullie zeer dankbaar.

Ik ben ook heel dankbaar dat mijn schaamteloos trotse vader en mijn moeder dit allemaal nog mogen meemaken.

En Marcel, jij gelooft dat ik dit allemaal op eigen kracht heb bereikt, maar zonder jou zou het schip zijn gestrand. Lieve Paula en Saskia, aan jullie de schone taak om de kunst van het vragen voor de toekomst te behouden.

Ik heb gezegd.