



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Deeltjesfysica: verrassend onvoorspelbaar?

Bentvelsen, S.

Publication date

2009

Document Version

Final published version

License

CC BY-NC-ND

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Bentvelsen, S. (2009). *Deeltjesfysica: verrassend onvoorspelbaar?* (Oratiereeks). 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.

Stan Bentvelsen

Deeltjesfysica:
verrassend
onvoorspelbaar?

Deeltjesfysica: verrassend onvoorspelbaar?

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

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

ISBN 978 90 5629 534 9
e-ISBN 978 90 4850 664 4
© 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^o 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: verrassend onvoorspelbaar?

Rede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
hoogleraar Large Hadron Collider Physics
aan de Universiteit van Amsterdam
op donderdag 15 februari 2007

door

Stan Bentvelsen

 VOSSIUSPERS UVA

*Mijnheer de Rector Magnificus,
Zeer geachte collega's en toehoorders,
Beste vrienden en familie,*

De spanning stijgt. Nog één jaar en dan draait de krachtigste deeltjesversneller ooit op volle toeren. Dan zijn wereldwijd natuurkundigen, waaronder ikzelf en mijn collega Els Koffeman, bezig de meetgegevens te begrijpen – een vooruitzicht waarnaar ik met spanning uitkijk. We zullen vragen stellen als: Zien we nieuwe vormen van materie? Zo ja, welke? Begrijpen we de meetapparatuur eigenlijk wel? Straks verkeren we in de bevoorrechte positie de wereld van de elementaire deeltjes op zijn kop te zetten en mogelijk een verklaring te vinden voor de donkere materie in ons heelal. ‘Jullie zijn de moderne ontdekkingsreizigers’ wordt over ons, experimentele deeltjesfysici, gezegd. Niemand weet of er werkelijk nog wat te ontdekken valt. Maar we zijn op weg en over anderhalf jaar weten we of er zicht is op een nieuwe wereld en of die wereld een heel nieuw continent is of niet meer dan een klein eilandje in de oceaan.

Ons vak is een nooit eindigende ontdekkingstocht naar nog diepere structuren van de materie waaruit wij, de wereld om ons heen en het heelal zijn opgebouwd. Ik wil u het komende halve uur vertellen waar die spanning vandaan komt, welk land ik hoop te ontdekken met deze unieke deeltjesversneller, en wat mijn onderzoeksstrategie is. Mijn collega Els Koffeman zal u hierna meenemen naar de wereld van het zien, het observeren.¹ Maar eerst neem ik u mee terug in de geschiedenis.

Elementaire bouwstenen

Waar houdt de deeltjesfysica zich mee bezig? De naam zegt het al. Wat zijn de kleinste bouwstenen van de materie en hoe gedragen ze zich onderling? Het is een vraag die al lang geleden werd gesteld, in ieder geval al in de Griekse oudheid.

STAN BENTVELSEN

In onze moderne tijd voert de reis naar het kleine eerst naar de moleculen: die vormen het kleinste deel van een stof dat nog alle eigenschappen van die stof bezit. Ga je nog kleiner, dan is de stof niet meer herkenbaar. Er zijn miljoenen soorten moleculen; scheikundigen, medici en biologen bestuderen hun gedrag.

Natuurkundigen, en vooral elementaire deeltjes fysici, hebben de onbedwingbare neiging de materie nog verder op te breken. Moleculen op hun beurt zijn opgebouwd uit atomen. Dat zijn de kleinste deeltjes die nog chemische eigenschappen bezitten. We kennen een honderdtal verschillende atomen, ook wel bekend als de elementen, die zijn gerangschikt in het periodieke systeem.² Zuurstof, koolstof en waterstof zijn de bekendste atomen. Zij vormen de bestanddelen voor het gros van de moleculen van het leven, zoals DNA en alcohol.

Hoe ziet het atoom er uit? Aan het begin van de twintigste eeuw is door middel van een experiment aangetoond dat het bestaat uit een harde kern met een positieve lading. Daaromheen zwermt een aantal negatief geladen elektronen. Ernest Rutherford is de man die deze structuur van het atoom heeft aangetoond. Deze gentleman uit Nieuw Zeeland deed in 1911 zijn beroemde experimenten in Manchester³ in de tijd dat Amundsen voor het eerst de Zuidpool bereikte en Mahler zijn laatste symfonie schreef. Rutherford liet een sproeier van energetische alpha-deeltjes tegen goudatomen schieten. In veel gevallen schoten de kleine alphadeeltjes dwars door de goudatomen heen. Tot zijn verbazing zag hij dat af en toe één enkel alphadeeltje terugketste, alsof het in het atoom een harde pit raakte. Rutherford noemde deze observatie de meest ongelooflijke ervaring uit zijn carrière. 'Het is', zei hij, 'alsof je een vijftien inch granaat op een wc-papiertje afvuurt en de granaat daarop afketst en naar je terugkomt.' Deze waarneming, concludeerde Rutherford terecht, was het experimentele bewijs van het bestaan van een harde kern in het atoom, die bij het eenvoudigste atoom bestaat uit een enkel proton.

In de jaren vijftig van de vorige eeuw, in de tijd dat de Europese Unie werd gevormd en CERN werd opgericht,⁴ werd in een serie experimenten de grootte van het proton gemeten. Deze experimenten werden uitgevoerd door Robert Hofstadter, de vader van de auteur van het boek *Gödel, Escher, Bach* waarmee ik als student wegliep. Vader Hofstadter liet zien wat de afmeting van het proton is.⁵

Om u een idee van deze afmeting te geven: stelt u zich het proton, de kern van het waterstofatoom, voor als deze tomaat. Om de verhouding van het atoom in het juiste perspectief te zien, is in deze vergelijking het elektron een onmeetbaar

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

kleine pit. Deze pit zwermt rondom deze tomaat met een straal van ongeveer drie kilometer. Dat wil zeggen dat de pit een baan beschrijft langs de rand van de stad, via het IJ over het Nikhef instituut naar de zuidas, vandaar door naar de Baarsjes en vervolgens weer terug. Het atoom is zo goed als leeg. Het is een wonder dat de kern ooit is gevonden.

Elektronen

De volgende vraag is of we de pit en de tomaat nog verder kunnen ontleden. Voor de onmeetbaar kleine pit, het elektron, is dit vooralsnog onmogelijk. Er is op dit moment geen enkele experimentele aanwijzing dat het elektron is opgebouwd uit nog kleinere deeltjes. Een aantal theoretisch natuurkundigen oppert dat het elektron in feite een klein trillend touwtje is,⁶ maar ik houd mij graag aan de experimentele feiten: vooralsnog is het elektron een zogenaamd puntdeeltje, een deeltje zonder afmetingen. Daarmee is het elektron het eerste echte elementaire deeltje van dit verhaal.

Anti-materie

Voor ik verder de inhoud van de tomaat bespreek, moet ik even een aantal zaken met u doornemen.

Allereerst blijkt er voor elk deeltje dat is gevonden in de natuur een ‘partner’ te bestaan met eigenschappen die precies omgekeerd zijn aan die van het deeltje zelf. We noemen dit ‘anti-materie’. De voorspelling voor het bestaan van anti-materie is een prachtig voorbeeld van de theorie die vooraf ging aan het experiment. Gebaseerd op de relativiteitstheorie van Einstein voorspelde de quantumfysicus Paul Dirac in 1926 het bestaan van anti-materie. Pas later, rond 1932, terwijl Sergej Prokofiev zijn *Peter en de Wolf* componeerde, werd het eerste anti-deeltje experimenteel waargenomen bij een simpel maar zeer doeltreffend experiment van Carl Anderson.⁷

We weten nu dat elk deeltje een corresponderend anti-deeltje heeft. Zo bestaat er voor het elektron een anti-elektron met een tegengestelde lading. En zo bestaat

er voor de pit ook een anti-pit en zijn er anti-tomaten, al komen die niet veel voor in onze dagelijkse kost.

Natuurwetten

Ten tweede weten we sinds Einstein dat energie en massa in elkaar overgaan. Immers, $E=Mc^2$. In deze beroemde formule staat E voor energie en M voor massa. C is de lichtsnelheid. Als we voldoende energie bij elkaar bundelen, geeft deze formule aan dat nieuwe deeltjes kunnen worden gecreëerd. En precies dat wordt waargenomen in deeltjesversnellers, waar bij botsingen veel energie samenkomt.

Dit 'creëren' van nieuwe materie – nieuwe deeltjes – is voor ons, experimentele hoge-energiefysici, de essentie van ons vak. We bundelen energie samen en maken nieuwe deeltjes, met hun bijbehorende anti-deeltjes. Hoe meer energie er wordt samengebundeld, des te zwaarder de nieuw gecreëerde deeltjes kunnen worden. Zie $E=Mc^2$. Als een deeltjesfysicus bij de belastingbetaler zeurt om een nog grotere deeltjesversneller, wil hij niets anders dan nog meer energie samenbundelen om te ontdekken of er nog zwaardere, vooralsnog onbekende deeltjes worden geproduceerd. Want dat is exact wat wij doen: wij ontdekken nieuwe deeltjes. Ze worden niet bedacht of uitgevonden en in een machine gebakken, zoals een bakker een brood bakt door de juiste ingrediënten bij elkaar te voegen. Nee, het recept van een deeltjesfysicus is eenvoudiger: bundel voldoende energie zodat nieuwe deeltjes zichtbaar worden. Als ze in versnellers kunnen worden gecreëerd, zullen ze ook elders in het heelal bestaan. Daarnaast onderzoekt de elementaire deeltjesfysica welke krachten de onderlinge relaties tussen die deeltjes bepalen: de natuurwetten.

In het proton

Terug naar de tomaat, de kern van het waterstofatoom. In tegenstelling tot het elektron (de pit) heeft de tomaat *wel* een bepaalde afmeting. Dan rijst de vraag: wat zit erin?

Rond mijn geboortjaar, halverwege de jaren zestig, zijn veel botsingsexperimenten uitgevoerd, waarbij een groot aantal tomaatachtige 'deeltjes' werden ont-

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

dekt: allemaal deeltjes van ongeveer dezelfde afmeting als het proton, geen puntdeeltjes en dus niet elementair. Het voert te ver om hier nu verder in detail op in te gaan, maar neemt u van mij aan dat de wereld van de deeltjes in die tijden zeer ondoorzichtig was.⁸ Er werd druk gezocht naar patronen in deze myriade van deeltjes... die ook werden gevonden. Twee theoretici, Murray Gell-Mann en George Zweig, maakten aannemelijk dat die nieuwe deeltjes op hun beurt weer bestonden uit nog kleinere deeltjes. Gell-Mann gaf ze de curieuze naam 'quarks' en veronderstelde dat daarvan verschillende soorten bestaan.⁹

Maar bestonden deze quarks nu ook echt of slechts in het brein van deze theoreticus? Het antwoord op deze vraag kwam eind jaren zestig, toen experimenteel werd aangetoond dat in het proton inderdaad kleine harde pitjes zitten. Het was een fantastische ontdekking die doet denken aan het experiment van onze gentleman uit Nieuw Zeeland, Rutherford. Een groep experimentatoren, onder leiding van Taylor, Friedman en Kendall, was in staat het bestaan van quarks experimenteel aan te tonen. En om maar meteen de rest van het verhaal te vertellen: nee, we hebben niet nóg kleinere vormen van materie gevonden. Vooralsnog zijn de quarks echte puntdeeltjes, elementaire deeltjes, net als de elektronen.

Zeus

In de jaren hierna werd ons beeld van het proton ingewikkelder. Het proton is een samenspel van een aantal quarks die kriskras door elkaar heen zwermen, maar tegelijk bijeengehouden worden door gluonen, een soort lijmdeeltjes, de dragers van de sterke kernkracht.

Uit hoeveel quarks en gluonen bestaat een proton dan? Dit was in essentie de onderzoeksvraag tijdens mijn promotie, eind jaren tachtig. Ik was bij de start van een deeltjesversneller in Hamburg, waar deze vraag aan de natuur werd voorgelegd. Mijn collega Els Koffeman was ook bij dit onderzoek betrokken. Deze HERA-versneller, in een ondergrondse tunnel met een omtrek van 6 kilometer, schiet met grote snelheid elektronen tegen protonen. Anders gezegd: we lieten harde pitten op zachte tomaten botsen om te achterhalen wat er precies in de tomaat zit.

Bij deze versneller registreerde de ZEUS-detector de botsingen van elektronen met de quarks in de protonen. We observeerden de sporen van de botsingen tus-

sen de elektronpit en de pitjes van de tomaat. Zo achterhaalden we de hoeveelheid quarks en gluonen in een proton. In mijn proefschrift vindt u een van de eerste metingen hiervan. En wat bleek? Het is druk in het proton, erg druk. Het proton is een wonderlijk samenspel van een *grote* hoeveelheid quarks en gluonen, voornamelijk deeltjes die heel kort bestaan en dan weer verdwijnen. Ze gedragen zich volgens de wetten van de quantummechanica, maar de theoretische beschrijving van het proton als *geheel*, als stabiel deeltje, is nog altijd een grote uitdaging voor theoretici.

Het standaardmodel

We maken even pas op de plaats. In het proton zitten dan wel veel quarks, maar het aantal *typen* quarks is klein. De twee meest voorkomende soorten quarks heten ‘up’ en ‘down’. Deze twee quarks vormen de dagelijkse materie om ons heen: protonen en neutronen, waarmee samen met elektronen de atomen worden opgebouwd. Er is nog een vierde elementair deeltje dat een rol speelt, het neutrino, maar daar wil ik het hier niet verder over hebben.

De natuur heeft *nog* een aantal verassingen in petto. Het bleek dat de vier zojuist genoemde deeltjes niet de enige elementaire bouwstenen zijn. Voor elk van deze vier deeltjes bestaat een kopie; een serie van vier nieuwe ‘look-alike’-deeltjes: twee quarks, een soort elektron en een neutrino. Alle deeltjes van deze tweede ‘generatie’ onderscheiden zich van de eerste generatie door hun grotere massa. Deze zwaardere varianten worden gemaakt als voldoende energie wordt samengebald. Ze worden gecreëerd maar blijven niet lang bestaan. Zij vallen uiteen in deeltjes met een kleinere massa en verliezen daarmee hun identiteit. In de gewone dagelijkse materie komen deze deeltjes niet voor.

Om de zaak nog verder te compliceren, werden er nog meer deeltjes ontdekt. Zo is nog een derde generatie van elementaire deeltjes gevonden, weer met twee typen quarks, een type elektron en een neutrino. Dit maakt in totaal zes typen quarks. De deeltjes uit de derde generatie zijn weer zwaarder dan die van de eerste twee. Ongeveer 10 jaar geleden werd het zogenaamde ‘top-quark’ ontdekt, het allerswaarste quark uit de derde generatie van elementaire deeltjes. Eén top-quark is even zwaar als 175 complete protonen bij elkaar.

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

Al deze deeltjes voelen elkaars aanwezigheid door een aantal krachten. De deeltjes en krachten samen worden beschreven door een aantal natuurwetten die we simpelweg het ‘standaardmodel’ noemen.¹⁰ Over het standaardmodel wil ik hier drie stellingen pomen. Hoewel ze tegenstrijdig lijken te zijn, vatten ze voor mij de betekenis van het standaardmodel goed samen.

Mijn eerste stelling luidt: ‘Het standaardmodel is de meest succesvolle theorie ooit.’ Alle metingen aan vernoemde families van elementaire deeltjes zijn getoetst aan het standaardmodel. De nauwkeurigheid waarmee op basis van dit model voorspellingen gedaan worden, is in sommige gevallen ongelooflijk. Een voorbeeld: elektronen draaien om hun eigen as. De rotatiesnelheid wordt voorspeld door de theorie en is ook experimenteel vastgesteld. De nauwkeurigheid waarmee de theorie en het experiment met elkaar overeenkomen, is te vergelijken met een voorspelling van de afstand van de aarde tot de maan, die blijkt te kloppen met een nauwkeurigheid tot op de millimeter.¹¹ Je krijgt vertrouwen in zo’n theorie. Ook hier hoort een persoonlijk verhaal bij.

Na mijn promotie heb ik een jaar of zes bij ‘mijn tweede versneller’ gewerkt, de LEP-versneller op Cern in Genève. Deze cirkelvormige versneller bevindt zich in een tunnel van 27 kilometer. Hier liet men elektronen op hun anti-partners botsen, ofwel pitten tegen anti-pitten. Bij deze botsingen worden uit de samen-gebalde energie vrijwel alle deeltjes van het standaardmodel gecreëerd, met uitzondering van het top-quark, want die is zo zwaar dat zelfs de LEP-versneller hiervoor niet genoeg energie kan produceren. Mijn onderzoek bij de OPAL-detector, die deze botsingen waarnam, richtte zich onder andere op subtiele quantum-fluctuaties van quarks. Dit gedrag bleek kwantitatief keurig beschreven te zijn in het standaardmodel. Ook in ander onderzoek hebben mijn collega’s en ik gezocht naar afwijkingen van het model. Hiervoor hebben we miljoenen botsingen zeer nauwkeurig bestudeerd.¹² Toch zijn we er met 12 jaar onderzoek niet in geslaagd het standaardmodel omver te werpen; de voorspellingen van het model zijn uiterst nauwkeurig getest en het standaardmodel heeft al die tests glansrijk doorstaan.

De tweede bewering over het standaardmodel vormt de kern van het onderzoek met de toekomstige deeltjesversneller en luidt: ‘Het standaardmodel voorspelt het bestaan van het Higgs-deeltje.’

Higgs fysica

Er is één aspect van de theorie waar we nog niet de vinger op hebben kunnen leggen: de massa van deeltjes. Natuurlijk weet u wat massa is: een treinwagon op de spoorrails is moeilijker in beweging te krijgen dan een hockeypuck op een gladde ijsbaan. Dat komt omdat de trein meer *massa* heeft dan de puck. De massa van de treinwagon is groter omdat er meer elementaire deeltjes in zitten, en elk elementair deeltje draagt bij aan de totale massa.

Toch is er iets vreemds aan de hand met de massa van elementaire deeltjes. De natuurwetten die de krachten tussen de elementaire deeltjes beschrijven, blijken dit in de meest ongecompliceerde vorm alleen te kunnen voor deeltjes die *geen* massa hebben. Zij schieten tekort in de beschrijving van deeltjes die wel een massa hebben. Zo'n theorie kan dus nooit een goede beschrijving geven van de elementaire deeltjes omdat die impliceert dat de hockeypuck op het ijs en de treinwagon op de rails geen enkele massa hebben en met de lichtsnelheid zouden bewegen.

Theoretici hebben een oplossing voor deze problemen bedacht. Via een wiskundig mechanisme worden de massa's van de elementaire deeltjes bij wijze van spreken 'door de achterdeur' weer in het model gebracht. Dit klinkt misschien badinerend, maar dit mechanisme past de natuurwetten die de krachten beschrijven als een handschoen. In plaats van een directe massa wordt de oorsprong van de massa van deeltjes bepaald door een extra wisselwerking; zie het alsof de deeltjes een *schijnbare* massa krijgen. We noemen dit het 'Higgs-mechanisme'.¹³ Hierdoor worden de problemen opgelost en hebben de hockeypuck en de trein een massa zoals we gewend zijn. Dit is wat we het 'standaardmodel' noemen.

De wiskundige truc is niet zonder gevolgen. Het Higgs-mechanisme voorspelt het bestaan van een nieuw deeltje: het Higgs-deeltje. De eigenschappen van dit deeltje liggen vast om het wiskundige mechanisme goed te laten werken. Helaas ligt alleen de massa van het Higgs-deeltje zelf niet vast. Dit is nu net de enige eigenschap waarover de theorie zich niet uitlaat.

Het Higgs-mechanisme betreft elk elementair deeltje. Daarmee is het veronderstelde Higgs-deeltje niet zomaar een ontbrekende bouwsteen; het levert de kern van ons begrip van het standaardmodel.

Dus gaan wij experimentatoren op zoek naar dit Higgs-deeltje. We zoeken een deeltje dat vastomlijnde eigenschappen heeft, alleen weten we niet hoeveel energie we moeten samenbundelen om het te vinden. Er wordt al vele jaren naar dit

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

Higgs-deeltje gezocht, maar het is nog nooit waargenomen.¹⁴ Ook bij de LEP-versneller hebben we er tevergeefs naar gezocht. Blijkbaar had deze versneller niet voldoende energie om het Higgs-deeltje te maken.

LHC en Atlas

Maar nu is de krachtigste deeltjesversneller ooit in aanbouw: de Large Hadron Collider ofwel LHC-versneller.¹⁵ Deze versneller wordt op dit moment gebouwd op CERN, 's werelds grootste laboratorium waar wetenschappers uit meer dan vijftig verschillende landen fundamenteel deeltjesonderzoek doen. Nederland is goed voor ongeveer 5 procent van het onderzoek op CERN. Het is een uniek onderzoekslaboratorium, o.a. omdat het een van de eerste plaatsen ter wereld is waar, na de Tweede Wereldoorlog, Russen, Chinezen en Amerikanen met elkaar samenwerkten. Nu kun je er een Israëliër zien samenwerken met een Palestijn.

CERN heeft in de loop der jaren een schat aan wetenschappelijke resultaten geboekt met fundamenteel onderzoek waarvan nieuwsgierigheid de drijfveer is. Maar CERN produceert ook veel 'spin-off'. Neem het world wide web: dat is vandaag de dag niet meer uit ons leven weg te denken en vond zijn oorsprong op CERN toen fysici beter en sneller met elkaar wilden communiceren.

Hier in Nederland wordt het fundamentele onderzoek naar elementaire deeltjes georganiseerd door het Nikhef,¹⁶ het Nationaal instituut voor subatomaire fysica. Het Nikhef is een samenwerkingsverband van vier Nederlandse universiteiten (waaronder de Universiteit van Amsterdam) en de Stichting FOM (Fundamenteel Onderzoek der Materie). Dankzij het Nikhef heeft een klein land als Nederland een zeer goede reputatie op CERN.

Vanaf begin volgend jaar gaat de LHC van start. Deze wordt gebouwd in de oude LEP-tunnel, de cirkelvormige versneller met een omtrek van 27 kilometer. Bij LHC worden protonen op elkaar gebotst met ongekende energie, vele malen groter dan ooit werd bereikt en met een intensiteit die grenst aan het ongelofelijke. Bij deze versneller worden, om even terug te gaan naar mijn eerdere metafoor, tomaten met reusachtige snelheden op andere tomaten geknald, veertig miljoen keer per seconde. De totale energie in deze botsende bundels protonen komt overeen met de bewegingsenergie van 140 vrachtwagens afgeladen met tomaten

die met hoge snelheid op elkaar inrijden. De botsingen bij LHC resulteren in een enorme soep.

Rond de plaats van de botsingen wordt een detector neergezet om de botsingsproducten waar te nemen. Een van de detectoren is Atlas.¹⁷ Dit gevaarte wordt op het moment in hoog tempo in elkaar gezet door een groep van ongeveer 2000 natuurkundigen en technici afkomstig van 153 instituten uit 50 landen. De uiteindelijke afmetingen van Atlas zijn ongeveer gelijk aan die van het Paleis op de Dam, hier verderop. Het is een immense operatie om alle miljoenen onderdelen te ontwerpen, produceren en installeren. Ook Nikhef werkt hier volop aan mee. Sinds een paar jaar verkeer ik in de bevoorrechte positie dat ik mag leidinggeven aan de Nederlandse bijdrage.

Onze groep heeft grote verantwoordelijkheden binnen het Atlas-project. Zo ben ik er trots op te zien hoe de installatie van de Nikhef muonkamers in Atlas vordert. Deze detectoronderdelen kunnen de sporen van het Higgs-deeltje waarnemen. Het is een enorme inspanning om de kamers aan de praat te krijgen. Je kunt in het muonsysteem van Atlas rondwalen tussen eindeloze kabels, pijpen, stellingen en gevoelige apparatuur. Het is een futuristische wereld waar James Bond niet zou misstaan. Ik trok er niet zo lang geleden een luik open en trof daar in een kleine ruimte zeven of acht Russische technici aan die als een gek bezig waren kabels te installeren. Onze Nikhef-medewerkers hebben alle onderdelen geïnstalleerd en samen met promotiestudenten bewezen dat de apparatuur goed werkt.

Ook de assemblage en installatie van alle andere detectoronderdelen en uitleesapparatuur verloopt voorspoedig. Heel binnenkort zal een Nikhef-onderdeel, dat zeer nauwkeurig het uiteenspatten van de protonen registreert, aan de Atlas-detector worden toegevoegd. Ook dit is een waar huzarenstuk waar onze promovendi hard aan meewerken.

Met het voltooien van de installatie breekt een nieuwe fase in het Atlas-project aan: het zwaartepunt van de Nikhef-activiteiten ligt nu bij de analyse van de botsingen. Om u enig idee te geven van de omvang van de data: de totale informatie die Atlas gedurende een jaar produceert, komt overeen met een stapel cd-romschijfjes van ongeveer 20 kilometer hoogte. Het is een flinke klus om tussen al deze gegevens het Higgs-deeltje te vinden. Het is alsof je zoekt naar een speld in 10 miljoen hooibergen. De zoektocht, waaraan veel Atlas-auteurs zullen meedoen, kan wel een paar jaar duren.

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

Het is mijn ambitie om met het Nikhef vooraan te staan wanneer de eerste resultaten binnenkomen en ons gezamenlijk doel is om als eerste relevante analyses te maken. Dat is niet eenvoudig. Het gaat om de juiste balans tussen kennis van de detector, computing en een fijne neus voor fysica.

‘No lose’ theorema van LHC

In dit scenario ga ik er *wel* van uit dat het Higgs-deeltje bestaat. Is dat nu wel zo? Zit de natuur werkelijk zo in elkaar als de theoretici denken? Ik ben daar niet zo zeker van en daarin sta ik niet alleen. Er zijn voorbeelden genoeg te noemen waaruit blijkt dat de theoretici het bij het rechte eind hadden, maar er zijn in de geschiedenis van ons vak ook talloze voorbeelden te geven waarbij zij er helemaal naast zaten. We weten werkelijk niet of het Higgs-mechanisme de deeltjes massa geeft. Het antwoord op deze vraag is wat mij betreft dus nog open; het woord is aan het experiment.

De LHC-versneller geeft uitsluitsel over het al dan niet bestaan van het Higgs-deeltje. Bij deze versneller wordt genoeg energie samengebracht om de condities te scheppen waarbinnen het Higgs-deeltje zich volgens de theorie *moet* voordoen. Als het Higgs-deeltje zich niet laat zien, dan bestaat het niet en dat betekent dat de natuur zich anders aan ons zal openbaren. Als dat gebeurt, dan staan wij er bovenop.

Samengevat staan we voor de volgende situatie: ofwel we observeren het Higgs-deeltje, met alle gevolgen van dien over ons begrip van het standaardmodel, ofwel we zien het Higgs-deeltje niet.¹⁸ In dat geval zit het standaardmodel ernaast en kunnen we aan hand van *andere* observaties bij de LHC zien hoe de natuur de problemen rond de massa van elementaire deeltjes oplost.

Samen met een promovendus en een collega uit Nijmegen onderzoeken we alvast hoe deze alternatieve, spannende mogelijkheid geobserveerd zou kunnen worden.

Problemen in het standaardmodel

Eerder heb ik u beloofd *drie* stellingen te geven over het standaardmodel. Mijn eerste stelling was: het standaardmodel is de meest succesvolle theorie ooit. Mijn tweede stelling ‘Het standaardmodel voorspelt het bestaan van het Higgs-deeltje’ hebben we zojuist besproken. Nu wil ik u een derde contrasterende visie geven: ‘Het standaardmodel is niet compleet, zit niet mooi in elkaar en laat veel vragen onbeantwoord.’¹⁹ Laat ik deze stelling toelichten aan hand van een paar voorbeelden.

Het standaardmodel geeft geen antwoord op de vraag waarom de eigenschappen van de deeltjes, zoals massa en sterkte van wisselwerkingen, zijn zoals ze zijn. Het model heeft geen voorspellende waarde over 21 van dit soort eigenschappen. Een model dat 21 parameters nodig heeft om voorspellingen te kunnen doen, is niet erg handig. Deugt dat model dan nog wel?

Het model heeft een groot probleem met het beheersbaar houden van quantumeffecten op het Higgs-deeltje. Deze in principe subtiele effecten hebben een grote invloed op de massa van het Higgs-deeltje en stuwen de Higgs-massa op naar grote hoogten. Alleen met een ongelooflijk precieze afstemming van de parameters, tot op 17 cijfers nauwkeurig, wordt dit effect opgeheven. Bestaat er geen achterliggend verklarend mechanisme?

Het model zegt helemaal niets over de volgende observatie: het Higgs-mechanisme heeft tot gevolg dat de ruimte opkrult. Volgens de theorie zou dit leiden tot een heelal ter grootte van slechts een voetbal. U zult het met me eens zijn dat dit niet strookt met onze waarneming. Hoe is dit te verklaren?

Het standaardmodel is niet compleet: de zwaartekracht, een van de fundamentele krachten, is volledig buitenspel gelaten. De zwaartekracht is vele malen zwakker dan de krachten tussen de elementaire deeltjes zoals beschreven in het standaardmodel. Toch zal voor een complete theorie van het universum ook *deze* kracht tussen elementaire materie beschreven moeten worden.

Nieuwe fysica

Deze problemen rond het standaardmodel inspireren theoretisch natuurkundigen tot het maken van nieuwe modellen van elementaire deeltjes. In de loop der jaren

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

is een veelvoud aan nieuwe modellen uitgedacht, die elk de raadselen rond het standaardmodel proberen te ontsluiten. Zo is er de ‘Supersymmetrie’-theorie, volgens welke een grote hoeveelheid nieuwe, supersymmetrische, deeltjes wordt voorspeld. Er zijn modellen met ‘large extra dimensions’, die stellen dat zwaartekracht doordringt in meerdere, nieuwe dimensies en tot gevolg heeft dat we wellicht kleine zwarte gaten zullen observeren in de protonbotsingen bij de LHC. We hebben de ‘Technicolor-modellen’ die beweren dat er nog meer typen quarks zijn, enzovoort.

Wat al deze theorieën met elkaar gemeen hebben – en wat uiterst fascinerend is –, is dat ze nieuwe vormen van materie voorspellen: exotische supersymmetrische deeltjes, nieuwe typen quarks, zware bosonen, mini zwarte gaten, et cetera. Tot dusver is nog geen enkele van deze nieuwe vormen van materie waargenomen; hun massa zou te groot zijn.

Kosmologie

De bewering dat het standaardmodel niet volledig is, wordt ook ondersteund vanuit een heel andere hoek: de kosmologie, de wetenschap van het heelal. Spectaculaire observaties, grotendeels verzameld gedurende de afgelopen decennia, hebben geleid tot een zeer bizar beeld van ons heelal. Ze geven aan dat het heelal is begonnen met een oerknal, ongeveer 13,7 miljard jaar geleden. Het heelal evolueerde, en nu vinden we er sterren, stelsels van miljarden sterren en zelfs clusters van honderden van deze sterrenstelsels. Bovendien worden in het heelal enorme gaswolken met materie gevonden. Deze gaswolken bevatten wel een factor zes meer materie dan alle sterren bij elkaar. Het levert prachtige beelden op.

Al de elementaire deeltjes van het standaardmodel waarover ik vanmiddag met u gesproken heb, de quarks, de elektronen en neutrino’s, zijn de bouwstenen van de sterren en deze gaswolken. Maar er is iets heel vreemds aan de hand. Al deze deeltjes samen zijn goed voor niet meer dan 4 procent van *alle* aanwezige energie en materie van het heelal. Het overgrote deel van ons heelal bestaat uit spul waarvan we geen idee hebben wat het is. Uit arrenmoede noemen we dit ‘donkere energie’ en ‘donkere materie’. Terwijl de ‘donkere energie’ uniform over het heelal is verdeeld, hoopt de ‘donkere materie’ zich op rond de clusters van ster-

renstelsels. De ‘donkere materie’, in totaal 26 procent van het heelal, verraadt zijn aanwezigheid door effecten van de zwaartekracht.²⁰

Wat is deze ‘donkere materie’? Er zijn aanwijzingen dat die bestaat uit elementaire deeltjes. Het gaat daarbij om vooralsnog onbekende deeltjes die zo massief en talrijk zijn, dat hun bijdrage aan ons heelal vele malen groter is dan alle bekende deeltjes van het standaardmodel bij elkaar.

Strategie

Terug naar de immens complexe apparatuur van de LHC-versneller en de ATLAS-detector. De speurtocht naar het Higgs-deeltje is als een ontdekkingsreis naar een eiland in een oceaan. Maar ik heb laten zien dat de reis mogelijk veel verder voert en dat we wellicht een nieuw continent ontdekken. Zullen wij bij LHC volstrekt nieuwe vormen van materie ontdekken, exotische deeltjes zoals supersymmetrische neutralinos? Deeltjes die niet alleen een verklaring geven voor de problemen rond het standaardmodel, maar tegelijkertijd licht werpen op de oorsprong van de ‘donkere materie’ van het heelal?

Uiteindelijk zal volledige helderheid over de oorsprong van de donkere materie in ons heelal vanuit de deeltjesfysica moeten komen. Het is de ultieme droom van een experimentele deeltjesfysicus om dit te bewerkstelligen – in ieder geval die van mij.

De vraag die mij daarbij bezighoudt, is hoe we de nieuwe vormen van materie tussen de miljarden botsingen bij de LHC kunnen onderscheiden. Hoe weten we of we nieuwe materie observeren, of dat de detector niet helemaal functioneert zoals wij aannemen?

Ik ben er ten stelligste van overtuigd dat we allereerst de deeltjes moeten herontdekken waarvan we weten dat ze bestaan en welke eigenschappen ze hebben. In mijn onderzoek, waarvoor ik recentelijk een NWO-subsidie heb mogen ontvangen, stel ik voor dit te doen aan hand van het top-quark. Bij de LHC zullen straks miljoenen top-quarks worden geproduceerd die zeer complexe, maar herkenbare sporen in de detector zullen achterlaten. Top-quarks zijn ideaal om het gedrag van de detector in detail te begrijpen.

We moeten daarbij wel heel precies de voorspellingen van het standaardmodel kennen voor de productie en het gedrag van top-quarks bij de botsingen van de

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

LHC. Dit is het werk voor zowel experimentele fysici als onze fenomenologische theoretische collega's – waarvan we er in Nederland meer nodig hebben.

Top-quarks kunnen voor verrassingen zorgen bij de LHC. Door hun hoge massa hebben zij in veel hypothetische modellen een sterke wisselwerking met nieuwe vormen van materie. Vooralsnog onbekende deeltjes zullen in veel gevallen uiteenvallen in top-quarks. Er zijn ook een flink aantal exotische deeltjes die experimenteel nauwelijks te onderscheiden zijn van top-quarks. Het zijn allemaal aanwijzingen voor het bestaan van nieuwe materie die zal worden ontdekt door de nauwkeurige bestudering van top-quarks. Dit is de onderzoekslijn waar ik mijn geld op inzet.

Nieuwe tijden?

Nog één anekdote. Een van mijn studenten maakte niet lang geleden tijdens mijn college een typerende opmerking, toen ik vertelde over de mogelijkheid om 'onzichtbare, extra dimensies' bij LHC te observeren. Ik vertelde dat deze ontdekking 'ons begrip van ruimte volledig op zijn kop zal zetten'. 'Waarom is dat zo bijzonder?' vroeg de student zich verbaasd af. 'We weten toch al dat er meerdere dimensies zijn? Volgens de stringtheorie zijn er tien dimensies!'

De theorie heeft het te lang zonder experiment moeten doen. Met de experimenten bij de LHC gaat de hoge-energiefysica een nieuw tijdperk in. Het is een triomf als de donkere materie in ons heelal geïdentificeerd wordt met nieuwe, vooralsnog onbekende elementaire deeltjes. Het zal ons begrip van het universum doen veranderen en de kosmologie en deeltjesfysica op een spectaculaire manier samenbrengen.

Onderwijs

Rest mij nog in het kort in te gaan op het onderwijs, maar meet het belang dat ik eraan hecht niet af aan het aantal woorden dat ik eraan wijd. Ik heb het voorrecht gehad inspirerende leermeesters te treffen die voor mij een wonderbaarlijke wereld hebben ontsloten. Het begon met een geweldige docent op de middelbare

STAN BENTVELSEN

school, het Stanislascollege te Delft. Ik kan niet recht doen aan iedereen die mij aan de universiteit heeft gemotiveerd en geïnspireerd, maar op deze plaats wil ik in het bijzonder noemen de professoren Sander Bais, Jan Hilgevoord, Jos Engelen en Martinus Veltman. Ik beschouw het als een groot voorrecht nu op mijn beurt colleges te mogen geven aan de jonge studenten van deze universiteit.

Het gaat mij er niet alleen om een nieuwe generatie studenten in te wijden in de geheimen van dit prachtige vakgebied in de hoop dat zij de fakkel overnemen en het vak verder brengen. Wat ik hun vooral hoop bij te brengen, is het openstaan voor verwondering. Ik hoop ze te leren *luisteren* naar de mensen, naar de wereld en naar de natuur.

Het is belangrijk jongeren te inspireren voor de wetenschap nog voordat ze naar de universiteit gaan: op de middelbare en zelfs op de basisschool. Ik beschouw het als een morele plicht voor iemand die het voorrecht geniet zo'n mooi onderzoek te doen als ik om het vak uit te dragen – ook *buiten* de universiteit. Universitair medewerkers moeten af en toe de boer op.

Daarbij gaat het me in eerste instantie niet om het belang van de Nederlandse economie, die baat heeft bij het grondig opleiden van slimme bètajongens en -meisjes, al is dat wel een prettige bijkomstigheid. Mij gaat het om het overdragen van de schoonheid en de verwondering. Dat kan alleen door kwalitatief goed onderwijs.

Goed onderwijs bestaat uit meer dan alleen het aanleren van competenties. Jongeren moeten meer weten dan hoe hun mobielte werkt. Je kunt alleen de juiste vragen stellen als je een degelijke basiskennis hebt. Door het uithollen van op elementaire basiskennis gericht onderwijs doen we niet alleen die kinderen tekort maar ook ons vak.

Dankwoord

Rest mij een paar woorden van dank uit te spreken. Allereerst jegens het College van Bestuur van de Universiteit van Amsterdam voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik ben aan deze universiteit begonnen als student, om er vervolgens te mogen promoveren. Even ging ik er tussenuit om onderzoek te doen op CERN en bij

DEELTJESFYSICA: VERRASSEND ONVOORSPELBAAR?

het FOM, maar nu ben ik terug op de mooiste positie aan de universiteit: die van hoogleraar.

Professor Karel Gaemers wil ik danken voor zijn vertrouwen in mij door mij te hebben benoemd als directeur van het Instituut Hoge Energie Fysica aan de faculteit der Natuurwetenschappen Wiskunde en Informatie van de Universiteit van Amsterdam. De collega's van dit instituut die het onderwijs verzorgen, zijn daarbij onmisbaar.

Er zijn meer mensen die ik met name wil bedanken. Allereerst mijn begeleider, professor Jan Willem van Holten, dan professor Jos Engelen, mijn promotor, die mij liet kennismaken met zoveel onderzoek, zoveel mensen en zoveel mooie verhalen. Jos, veel dank. Je had vertrouwen in me, inspireerde me en gaf precies op de juiste momenten aan hoe we verder moesten.

Ook veel dank ben ik verschuldigd aan mijn co-promotor professor Paul Kooijman: de tijd die we samen doorbrachten om de analyses te verbeteren, was geweldig. Verder was het een groot plezier met de ZEUS-groep samen te werken. Henk Tiecke, Andrej Dake, Paul de Jong, Malcolm Derrick: we werkten keihard tot diep in de nacht, zakten door en hadden vreselijk veel lol.

Daarna vloog ik uit naar CERN waar ik met Saskia veel langer zat dan de bedoeling was. Pas daar kreeg ik het vak echt in de vingers, door samen te werken met mensen als Rolf Heuer, David Plane en Terry Wyatt.

Niet lang geleden stond in het *NRC Handelsblad* dat ik 'dat schroeven aan Atlas nu wel zat was'. Op die uitspraak volgde echter nog een andere, die helaas niet de krant haalde, namelijk dat ik een enorme bewondering heb voor alle mensen die Atlas realiseren, door eindeloos te ontwerpen, te schroeven, te installeren, te programmeren, enzovoorts. Op het Nikhef hebben we een paar geweldige afdelingen die dit allemaal voor elkaar krijgen – veel dank mensen.

Bijzonder erkentelijk ben ik professor Frank Linde. Zijn kennis, energie en enthousiasme zijn onuitputtelijk en aanstekelijk. Frank, zonder jou zou ik hier niet hebben gestaan. Ik hoop dat onze samenwerking nog lang inspirerend mag blijven. En oh ja, ik hoop dat je als Atlas-auteur *alle* Higgs-publicaties signeert.

Ook wil ik de mensen van de Atlas-groep hier vermelden. We vormen een veelzijdig team, dat te groot is om alle mensen daaruit op te noemen. Ik ben diep onder de indruk van jullie kennis, kunde... en eigenwijsheid.

Last but not least de promotiestudenten: jullie zijn degenen die het onderzoek uitvoeren, van jullie hangt het succes van de hele onderneming af. Wees je bewust

STAN BENTVELSEN

van deze verantwoordelijkheid, maar draag hem met plezier. Ik weet niet wat de toekomst brengt, maar met jullie enthousiasme belooft het heel mooi te worden.

De laatste dankwoorden zijn voor mijn naasten. Eerst mijn ouders, waar uiteindelijk de beste tomaten vandaan komen. Jullie hebben me met vertrouwen de wereld ingestuurd met het idee dat het wel goed zou komen, en dat komt het ook nog wel!

En ten slotte dank ik Saskia en de kinderen. Het is waar: werk en familie laten zich soms moeilijk combineren, maar ik ben dankbaar dat ik toch steeds de ruimte heb gekregen om te doen wat ik wilde. En lieve Bouke en Sander: door jullie is het leven een stuk vrolijker!

Waarde toehoorders, dank voor uw aandacht!

Ik heb gezegd.

Noten

1. De tekst van de oratie van prof. Els Koffeman is beschikbaar als een apart deel van deze reeks.
2. Hier wordt het periodieke systeem der elementen bedoelt, opgesteld in 1869 door Dimitri Mendeleev. Elk element wordt gekenmerkt door het specifieke aantal positief geladen protonen in de atoomkern.
3. Een uitstekende geschiedenis van de elementaire-deeltjesfysica vanaf begin 20ste eeuw is te vinden in het boek van de Nederlandse fysicus Abraham Pais: *Inward Bounds*, Oxford University Press (1986).
4. CERN, oorspronkelijk Centre Européenne Recherche Nucleair, is opgericht in 1954 door 16 Europese lidstaten. Inmiddels is het aantal lidstaten uitgegroeid tot 21 en nemen in totaal 63 landen deel aan het onderzoek. Zie www.cern.ch voor verdere informatie.
5. De diameter van het proton is ongeveer 10-13 cm.
6. De afmeting van de 'strings' is vele orden kleiner dan de experimentele resolutie die we met de huidige technieken kunnen bereiken. Om de strings te kunnen observeren, zou een versneller nodig zijn met een omtrek gelijk aan die van de baan van de aarde om de zon.
7. Anderson maakte kosmische straling zichtbaar in een bellenvat. Door dit meetinstrument in een magnetisch veld te plaatsen, toonde hij het bestaan aan van een deeltje met precies dezelfde massa als het elektron maar met een tegengestelde lading.
8. Het aantal deeltjes of 'resonanties' dat in de jaren 1950-1960 werd gevonden, loopt in de tientallen.
9. Met het quarkmodel werd het bestaan van nieuwe deeltjes voorspeld. Het meest pregnante voorbeeld is de voorspelling van Gell-Man van het omegadeeltje. De ontdekking ervan liet niet lang op zich wachten.
10. Over het standaardmodel valt natuurlijk veel meer te vertellen. Ik verwijs u naar de *Scientific American*. Ook heel aardig om te lezen is het boek van Martinus Veltman *Feiten en mysteries in de deeltjesfysica*, World Scientific.
11. Deze draaiing of 'spin' van het elektron en muon is zeer nauwkeurig gemeten in een aantal experimenten op CERN en op Brookhaven National Laboratory. De gemeten waarde voor het elektron, 2.0023318416 met een onzekerheid van 0.0000000013, komt goed overeen met de theoretisch voorspelde waarde van 2.0023318361.
12. Een samenvatting van alle LEP-resultaten is te vinden op het web in <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0110077v1>, maar ook bijvoorbeeld het boek *The physics of the W and Z bosons* door Tenchini en Verzegnassi (World Scientific) is uitstekend.
13. Het mechanisme is vernoemd naar Peter Higgs, die samen met de heren Brout en Englert in de jaren '60 dit mechanisme bedachten.

14. De huidige stand van zaken is dat het Higgs-deeltje als het bestaat een massa van ten minste $114.5 \text{ GeV}/c^2$ moet hebben. Deze massa is ongeveer 120 keer zo groot als die van het proton.
15. De Large Hadron Collider is de grootste deeltjesversneller ooit. Zie voor een beschrijving ervan bijvoorbeeld <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>.
16. De webpagina's van Nikhef en FOM zijn te vinden op respectievelijk www.nikhef.nl en www.fom.nl.
17. Meer informatie over Atlas is te vinden op de website www.atlas.ch.
18. Dit is het zogenaamde 'No Lose'-theorem van de LHC. Zie bijvoorbeeld het artikel van M.S. Chanowitz in *Physics at the LHC*, Wenen, 2004.
19. Zie bijvoorbeeld het boek van Brian Greene *The fabric of the cosmos* (2004).
20. Dit onderwerp verschijnt nogal eens in de pers. Een degelijke samenvatting is te vinden in het artikel van W. L. Freedman en Michael S. Turner, 'Measuring and understanding the universe', *Rev.Mod.Phys.* 75 (2003), p. 1433.