

Zeven biljoen elektronvolt is
goed voor u

Zeven biljoen elektronvolt is goed voor u

Rede

uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
hoogleraar Experimentele Hoge Energie Fysica
aan de Universiteit van Amsterdam
op donderdag 4 november 2010

door

Paul de Jong

 VOSSIUSPERS UVA

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

Dit is oratie 384, 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 670 4
e-ISBN 978 90 4851 430 4

© Vossiuspers UvA, Amsterdam, 2011

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.

*Mijnheer de rector magnificus,
Geachte leden van het curatorium,
Geachte leden van het bestuur van het Genootschap tot Bevordering van
Natuur-, Genees- en Heelkunde,
Zeer gewaardeerde toehoorders,*

Een heelal is niet vanzelfsprekend. Voor hetzelfde geld heb je gewoon geen heelal, of een miljoen heelallen. En heb je eenmaal een heelal, dan hoeft dat helemaal niet groot te zijn, of het hoeft helemaal geen structuur te hebben. Sterren hoeven helemaal niet te bestaan, net zo min als planeten of zware elementen. De kans dat u of ik bestaan in een heelal als het onze is onvoorstelbaar klein. Door nieuwsgierigheid gedreven wetenschap is niets anders dan een rationele poging om iets van orde te scheppen in deze waanzin.

Er is niets bijzonders aan de menselijke maat – waarbij ik met menselijke maat de afstand- of grootte maat van pakweg 1 à 2 meter bedoel – behalve dat dat toevallig onze eigen afmeting is. De natuur kent vele andere schalen, veel groter dan de meter – denk aan de aarde, het zonnestelsel of het universum – of ook veel kleiner dan de meter, zoals de schaal van bacteriën of moleculen en atomen. Voor de wetenschap zijn al die schalen niet gelijk, maar wel gelijkwaardig en onderwerp van studie. Ik wil u vandaag in deze rede iets vertellen over mijn onderzoek, de subatomaire fysica, oftewel de fysica van dingen die nog kleiner zijn dan atomen, en mijn natuurlijke route is dus om de kant van het kleinere op te gaan, naar de allerkleinste afstanden die wij kunnen onderzoeken. Nu is het mooie van de natuurkunde dat er vaak onverwachte dwarsverbanden bestaan tussen verschillende vakgebieden, waarin ontwikkelingen in een gebied plotseling relevant blijken te zijn voor een ander. Zo is nu aan het licht gekomen dat de studie van het allerkleinste cruciaal is om het allergrootste, het heelal, te begrijpen.¹ Zeker de vroege ontwikkeling van het heelal, maar ook hedendaagse verschijnselen, kunnen niet begrepen worden zonder kennis over het gedrag van de allerkleinste deeltjes. Die moeten dus onderzocht worden! De Universiteit van Amsterdam brengt dat mooi in beeld met een plaatje waar de twee uitersten elkaar weer tegenkomen.²

Ik wil u iets vertellen over mijn onderzoek met de nieuwe deeltjesversneller in Genève, de Large Hadron Collider, of LHC, en waarom wij daar enthousiast over zijn. Zeven biljoen elektronvolt is goed voor u, alleen wist u dat misschien

nog niet. Een elektronvolt is een maat voor energie. Om precies te zijn is het de energie die een deeltje met de elektrische lading van een elektron krijgt of verliest als het een elektrisch spanningsverschil van één Volt doorloopt. Een typische batterij levert een spanning van anderhalf of drie Volt, en de elektronen in een stroomkring met een dergelijke batterij hebben dus een energie van anderhalf of drie elektronvolt. Elektronen uit een stopcontact bij u thuis hebben, simpel gezegd, 230 elektronvolt energie, energie die ze als licht of warmte weer kunnen afgeven. De deeltjes in onze nieuwste apparaat, de LHC, hebben een energie van zeven biljoen, of zeventuizend miljard, of zeven miljoen miljoen elektronvolt.

Misschien kent u het filmpje *Powers of ten* dat alweer zo'n 40 jaar geleden werd gemaakt.³ In een park in Chicago ligt een man te slapen op een kleed, na een overdadige picknick. De camera zoemt eerst uit en later weer in, steeds in stappen, zodanig dat het beeld tien keer zo groot wordt of tien keer zo klein. Bij het uitzoomen zien we na twee stappen dus een veld van 100 bij 100 meter, na vier stappen zien we 10 bij 10 km, dus Chicago zelf, en na nog drie stappen zien we bijna de hele aarde. Gaan we door met uitzoomen, dan zijn we na elf stappen bij de aardbaan om de zon, na 21 stappen bij ons hele melkwegstelsel en na 27 stappen aan de rand van het ons bekende heelal.⁴

Maar we kunnen natuurlijk ook inzoomen op onze slapende man in het park en precies de andere kant uitgaan. Iedere stap betekent dan een beeldveld dat qua absolute afmeting iedere keer tien keer kleiner is dan het vorige beeldveld. Na iedere stap kunt u steeds tien keer kleinere dingen onderscheiden: wat u in de eerste stappen nog niet ziet omdat het te klein is, ziet u na verdere stappen wel. Vanaf een origineel beeldveld van 1 meter zijn we dus in twee stappen op 1 centimeter. Nog drie stappen, dan kijken we in de cellen in ons lichaam, nog een stap en we zijn op de typische schaal van bacteriën. Met een goede elektronenmicroscop kunt u nog vier stappen van factoren 10 maken en inzoomen tot 10^{-10} meter, kleiner dan de afmeting van moleculen en ongeveer de grootte van atomen.⁵

Wilt u nog kleiner dan atomen, dan heeft u deeltjes of licht met nog meer energie nodig. Met alfadeeltjes van zo'n tien miljoen elektronvolt zag Ernest Rutherford dat het atoom een structuur heeft: een elektronwolk en een kleine kern, nog vier stappen van tien kleiner dan het atoom zelf.⁶ Een bekende analogie hiervoor is het beeld van een vlieg in een kathedraal:⁷ de kathedraal is het atoom, van binnen een grote leegte, met alleen dat vliegje als atoomkern. Nog een stap verder en we zien waar de atoomkern uit bestaat: protonen en neutronen. Om nog kleiner te kunnen kijken, moeten ook alfadeeltjes, of andere deeltjes, versneld worden tot hogere energie, en dat doen we in deeltjesversnellers. Van de eerste versnellers,⁸ en via zogenaamde cyclotrons,⁹ komen we bij de grote versnellersmachines van onze tijd, de zogenaamde synchrotronmachi-

nes.¹⁰ Met de nieuwe LHC-machine zijn we bij 10^{-19} meter,¹¹ negentien stappen van factoren 10 inzoomen vanaf de slapende man.

Hoe ziet de wereld er daar uit? We kijken nu heel diep in de protonen en neutronen in de atoomkern. We zien de bouwstenen van de protonen, de zogenaamde quarks, en we zien dat de quarks onophoudelijk met elkaar interacties aangaan en transformeren onder invloed van elektromagnetische en kernkrachten.

De Large Hadron Collider

Ik zie het als een groot privilege om met dat prachtige apparaat dat de LHC¹² is aan de slag te mogen gaan. Diep onder de velden tussen het vliegveld van Genève en het Juragebergte loopt een ringvormige tunnel, 27 kilometer lang, en in die ring staan grote, supergeleidende magneten in een lange rij. Ze omsluiten twee vacuümbuizen die elk de hele ring omspannen, maar elkaar kruisen op enkele plekken in de ring. In de buizen kunnen deeltjes, tot dusverre protonen,¹³ geïnjecteerd worden, en de magneten leiden de protonen keurig in een baan de ring rond, zelfs vele malen, urenlang. Op één plek krijgen de protonen steeds een duw in de rug, en gedurende vele rondjes worden ze versneld tot hoge energie: 7 biljoen elektronvolt. Waar de bundels elkaar kruisen, kunnen de protonen met elkaar botsen. Hun energie is dan geconcentreerd in een piepklein volume, en in dat volume heersen helse omstandigheden – omstandigheden zoals die slechts een 10-miljardste seconde na de oerknal in het heelal heersten.¹⁴ Grote detectoren omsluiten de botsingspunten om te meten wat er gebeurt.

Een van de detectoren rondom zo'n botsingspunt heet ATLAS,¹⁵ en dat is de detector waarmee mijn collega's en ik hun onderzoek doen. ATLAS is zelf een complex geheel van subdetectoren die elk een specifiek doel hebben in het ontrafelen van die botsingen. Duizenden technici, ingenieurs en fysici, uit 38 landen over de hele wereld, hebben meegedacht en meegebouwd aan ATLAS.

Hoe gaat het met de LHC en met de detectoren? Voor zover we nu kunnen zien: heel goed. De eerste bundels protonen werden in de LHC geïnjecteerd op 10 september 2008, en binnen een paar uur was de machine dermate ingeregeld dat de bundels moeiteloos rondjes maakten. Negen dagen later, echter, gebeurde wat niemand had voorzien: een elektrisch defect in een verbinding tussen twee magneten leidde tot het vrijkomen van helium onder druk, dat explosief zijn weg naar buiten zocht en lokaal, in het gedeelte van de tunnel onder de Jura, veel schade aanrichtte. De daaropvolgende inventarisatie, reparatie en aanpassingen aan het ontwerp hebben tot een jaar vertraging geleid, wat vooral tragisch was voor onze jongere medewerkers met een tijdelijk con-

tract. De aanpassingen werken echter en geven ons nu een betrouwbare machine. Uit voorzichtigheid en in afwachting van de laatste aanpassingen werkt hij op halve energie, maar ook dat is nog ruim voorbij eerdere versnellers.

Op 20 november 2009 werd de LHC opnieuw gestart en op 30 maart 2010 vonden de eerste hoge-energie proton-protonbotsingen plaats. Aanvankelijk was de bundelintensiteit laag, maar gedurende 2010 is die gestaag toegenomen met een factor 100.000, tot een waarde die overeenkomt met de gestelde doelen voor 2010.¹⁶ Dat geeft reden tot optimisme over de uiteindelijk te bereiken intensiteit.¹⁷ Ook de detectoren, zoals ATLAS, werken over het algemeen als een zonnetje. Op 22 juli 2010, minder dan vier maanden na de start, konden de eerste resultaten publiekelijk bekendgemaakt worden.¹⁸ Deze resultaten stellen limieten op nieuwe deeltjes,¹⁹ en deze limieten zijn beter dan die van alle andere eerdere experimenten vóór de LHC. Vele nieuwe resultaten zullen binnenkort volgen.

Limieten op nieuwe deeltjes? Daar doen we het natuurlijk niet voor: we willen nieuwe deeltjes ontdekken!

Om te beginnen: het beruchte Higgsdeeltje, of misschien, politiek correcter: het Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-mechanisme.²⁰ Stelt u zich voor: onze beste theorie van subatomaire fysica, het Standaard Model, is een machtig bouwwerk, laten we zeggen het Koninklijk Paleis op de Dam. Een machtig bouwwerk moet stevige fundamenten hebben, en in Amsterdam betekent dat: veel palen.²¹ Stel: u bent van de bouwinspectie en u gaat op zoek naar de staat van het fundament. En wat blijkt: u kunt het fundament niet vinden. Waar u ook kijkt: geen palen. Het paleis lijkt te zweven. Dat is de staat van het Standaard Model: een prachtige theorie, goed in overeenstemming met experimentele data, maar zwevend zonder fundament. Het Standaard Model geeft een beschrijving van fundamentele krachten die heersen in het atoom en brengt met name de krachten van elektriciteit en magnetisme, en de zogenaamde zwakke kernkracht, onder één noemer.²² Maar in het dagelijks leven zijn dit twee heel verschillende verschijnselen, en de symmetrie van de vergelijkingen is niet aanwezig in de fysische wetten op onze schaal: de symmetrie is gebroken. Het achterliggende mechanisme in het Standaard Model is het Higgsmechanisme, en de meest zichtbare uiting is het Higgsdeeltje. Dat Higgsdeeltje is echter nog nooit waargenomen, ook niet na vele speurtochten bij eerdere versnellers,²³ en zijn massa wordt niet voorspeld. Het Higgsmechanisme is het fundament van het Standaard Model, en het vinden ervan is doel nummer één van de LHC. Productie van Higgsdeeltjes is echter zeldzaam²⁴ en het detecteren ervan kost tijd, of liever gezegd: veel data. Maar de LHC doet het goed. In de loop van 2011 verwachten we even gevoelig²⁵ te zijn voor het Higgsdeeltje als de concurrentie bij het Tevatron, een oudere versneller in Chi-

cago. Ik ben optimistisch over een detectie binnen enkele jaren, of we zullen het paleis onbewoonbaar moeten verklaren.

Maar zelfs als we de fundamenteën van het Standaard Model vinden, zou ik wel eens een indringend gesprek willen hebben met de architect, en wel om twee redenen. Ten eerste begrijpen we de architectuur niet: het hoe en waarom van het gebouw is ons een raadsel. Het Standaard Model heeft in zekere zin een mate van willekeur in zich: in de vrije parameters,²⁶ in de kwantumgetallen van quarks en leptonen, in de symmetrieën onderliggend aan de krachtvelden en in het gebrek aan beschrijving van de zwaartekracht. Dat is wel erg onbevredigend voor een fundamentele theorie.

Ten tweede: hoewel het Standaard Model de experimentele tests in de afgelopen jaren in het algemeen zeer goed doorstaan heeft, blijken er nu toch wel scheuren in de muren te ontstaan die steeds groter worden en om inspectie vragen. Het onderzoek op dit gebied vind ik het interessantste, en daarom wil ik hieraan de komende jaren tijd en inspanning besteden. De scheuren zijn experimentele tekens aan de wand dat er een nieuwe theorie nodig is. Om in te gaan op twee van dergelijke scheuren:

- Het universum toont een grote asymmetrie tussen materie en antimaterie, die als zodanig niet verklaard lijkt te kunnen worden uit het Standaard Model.²⁷ Maar als die asymmetrie er niet zou zijn, zouden wij niet bestaan: alle materie zou dan allang vernietigd zijn door botsingen met antimaterie. Kan nieuwe fysica voor een dergelijke asymmetrie zorgen?
- De energie die is gaan zitten in alle ons bekende materie in het heelal is maar 4% van alle energie die er moet zijn.²⁸ Wat en waar is de andere 96% van het heelal? Grote vragen die alles te maken hebben met de verbijsterende observatie dat het heelal steeds sneller uitzet²⁹ door iets wat we ‘donkere energie’ noemen, en met de constatering dat er extra materie nodig is in het heelal, fundamenteel anders dan quarks en leptonen, de zogenaamde ‘donkere materie’.³⁰ Waarschijnlijk vormen nieuwe deeltjes de donkere materie, en mogelijk zelfs kunnen we die deeltjes gaan maken door middel van botsingen in de LHC.

Ik doe mijn onderzoek bij ATLAS in het kader van een speurtocht naar zogenaamde supersymmetrie,³¹ waarvan ik denk dat het een elegante oplossing zou kunnen betekenen voor een aantal van deze problemen. Toch is supersymmetrie voor mij geen doel op zich: ik voel me geen hogepriester van de supersymmetrie, en onze experimentele speurtochten moeten model-onafhankelijk zijn, dat wel zeggen gevoelig voor welke nieuwe deeltjes dan ook. Graag neem ik ook studenten en promovendi mee op deze speurtocht naar de scheuren van het Standaard Model. Ik verheug me op de sloopwerkzaamheden.

Misschien nog wel het allerbelangrijkste van de LHC is dat we daarmee echt nieuw gebied gaan ontginnen, en wie weet wat we daarmee nog zullen tegenkomen. In haar oratie gaf mijn collega Els Koffeman³² hiervoor een mooie analogie die ik graag herhaal: stel dat een buitenaards wezen het aardoppervlak vanaf een hoogte van 10 kilometer bekijkt, zoals uit een vliegtuig. De *alien* ziet van alles, ook menselijke voortbrengselen, bijvoorbeeld wegen en gebouwen, en hij kan allerlei theorieën ontwikkelen om deze te verklaren. Maar op het idee dat mensen hierin de hand hebben gehad, komt hij waarschijnlijk niet, want mensen zie je niet vanaf 10 kilometer hoogte; die zie je pas vanaf misschien 100 meter hoogte. Inzoomen kan dus je hele wereldbeeld radicaal veranderen.

Een veel gestelde vraag is: wat hopen jullie van de LHC te leren? Ik denk dat het belangrijk is om die vraag zo open en eerlijk mogelijk te beantwoorden, en geen overdreven en onhaalbare claims te doen. Nee, we weten straks niet wat de oorzaak van de oerknal is, we zullen geen ‘theorie van alles’ hebben en we zullen ‘the mind of God’ niet kennen.³³ Naast het genoemde verrassingselement zijn er concrete dingen die we willen bereiken met de LHC: klopt het Higgsmechanisme echt? Is donkere materie een supersymmetrisch deeltje? Zien we aanwijzingen voor nieuwe fysica voorbij het Standaard Model? Het beantwoorden van elk van deze vragen is immens bevredigend, want elk antwoord is een stap van een pionier.

Nieuwe uitdagingen

Ik zou graag het inzoomen op de hand van de slapende picknicker in een andere analogie willen gieten, namelijk in die van een wandeling door onbekend terrein. U bent een ontdekkingsreiziger en u dringt terra incognita binnen; de kaart is leeg. Iedere kilometer van uw wandeling komt neer op inzoomen op de hand van de slaper met een factor 10. Na 5 kilometer op uw wandeling, ofwel vijf keer met een factor 10 inzoomen, bent u aangekomen op de schaal van menselijke cellen, en na 10 kilometer op de schaal van atomen. Nog 5 kilometer verder kijkt u in de atoomkern en ten slotte, na 19 kilometer, bent u beland bij de LHC. Tot zover de gebaande paden; vanaf hier is er alleen nog wildernis met daarin, ergens, de antwoorden op uw vragen. Naast opgewonden wordt u misschien ook wat nerveus. Hoever moeten we eigenlijk nog lopen? Is er wel een einde?

De details van de komende tocht kennen we nog niet, maar wat we wel weten is dat we een paar fenomenale mijlpalen op ons verdere pad zullen tegenkomen. Ten eerste: er komt een punt op ons pad waar de natuurwetten zoals wij die kennen de mist ingaan: namelijk als de zwaartekracht even sterk

wordt als andere krachten binnen het atoom. En dat is bij kilometer 35 op ons pad, bij een afstandschaal die we de Planckschaal noemen.³⁴ Ik vergelijk dat punt met een machtige berg aan de horizon: Mount Planck. Voor die tijd, bij kilometer 32, komen we al op een ander belangrijk punt: daar waar de andere krachten even sterk worden, het terrein van de Grand Unified Theories,³⁵ waar de omstandigheden overeenkomen met condities in het heelal tijdens een periode die inflatie heet en waarin het heelal waarschijnlijk een periode van enorme uitdijning beleefde.³⁶

We zijn opgewonden over de volgende kilometer die we gaan afleggen en waarvan we denken dat een aantal van onze vragen beantwoord zullen worden, maar ongetwijfeld niet alle. De antwoorden die we zullen vinden, zullen waarschijnlijk ook weer nieuwe vragen oproepen. We willen dus verder. Sterker nog: ik wil naar Mount Planck. Ik wil naar die berg toe en het liefst naar de top. En ook al gaan wij dat in mijn generatie niet halen, dan maar een volgende generatie. En als we de top niet halen, dan maar zo ver mogelijk, maar richting berg moeten we. Laten we ons geen illusie maken dat we de volgende kilometers wel kennen of dat er toch niets te halen valt. Alles wat we menen te weten over de volgende kilometers is speculatie. Misschien is Mount Planck zelf wel een illusie.³⁷

Wanneer we even niet verder kunnen lopen, wat dan te doen? Ten eerste kunnen we natuurlijk proberen vanaf onze huidige standplaats met goede verrekijkers ten minste zo veel mogelijk te zien van de komende kilometers. Misschien hebben we wel een onbemand spionagevliegtuigje. Zo mogen we hopen details te zien van het landschap voor ons: de geologie, de flora en fauna, en daarmee stukjes antwoorden op onze vragen te verkrijgen. Met deze analogie doel ik op het vak van de astrodeeltjesfysica.³⁸ De LHC is voornamelijk de versneller met de hoogst haalbare energie op aarde, maar misschien kunnen we gebruikmaken van versnellers in het heelal, waarin processen aan het werk zijn die zeker leiden tot deeltjes met energieën die veel hoger zijn dan die van de LHC; denk aan exploderende sterren of botsende zwarte gaten.³⁹ Er zijn al individuele deeltjes uit de kosmos gemeten met de bewegingsenergie van een tennisbal, geserveerd door Roger Federer.⁴⁰ Met astrodeeltjesfysica hebben we toegang tot ultrahoge energie, maar dergelijke deeltjes zijn zeer zeldzaam en onvoorspelbaar, en bovendien hebben we geen controle over de bron. We zijn observatoren, maar we kunnen de omstandigheden niet naar onze hand zetten: we kunnen het beestje wel zien in de verte, maar niet aanraken.

Deeltjesfysica met versnellers en astrodeeltjesfysica complementeren en inspireren elkaar. Dit geldt zowel voor deeltjesfysici, die zien dat hun vak voortgaat door observatie van deeltjes uit het heelal, als voor astronomen die een nieuwe blik op het universum kunnen werpen voorbij het elektromagnetische spectrum. De UvA heeft dit erkend in de vorm van steun voor het universitaire

onderzoekszwaartepunt *GRAPPA*, Gravity and AstroParticle Physics Amsterdam,⁴¹ waarin de instituten IHEF (hoge-energie fysica), ITFA (theorie) en het Anton Pannekoek Instituut (astronomie) samenwerken ter doorgroning van het heelal in heden en verleden. Ik vind dit zeer goed nieuws en ik verheug me erop om me hiervoor de komende jaren ook in te zetten. Het is overigens amusant je te realiseren hoe volwassen de rol van het vak kosmologie is geworden. Dat is niet altijd zo geweest. In 1863 produceerde de net opgerichte universiteit van Massachusetts haar ‘red book’, een handleiding voor de *faculty* om te bepalen wat een universiteit wel was, en wat niet. Twee vakken die volgens het red book zeker niet in een universitair curriculum thuishoorden, waren hekserij en kosmologie.⁴²

Wat kunnen we nog meer doen als we even niet verder kunnen lopen? We kunnen proberen om meer informatie te halen uit de kilometers die we al hebben afgelegd: waarschijnlijk bevatten de details van de vorige kilometers hints voor de volgende. Dat is het doel van precisie-experimenten in de deeltjesfysica, ofwel experimenten die niet meteen de hoogste energie nodig hebben, maar wel hoge statistiek en grote nauwkeurigheid. Denk hierbij aan metingen van elektrische dipoolmomenten, of het anomale magnetische moment van het muon, of zeldzame deeltjesvervalen.⁴³ Overigens is in dit domein ook een belangrijke rol weggelegd voor experimenten die wel degelijk in een labruimte op een universiteit passen, bijvoorbeeld metingen van atomaire pariteitschending.⁴⁴ In plaats van deeltjes echt te maken met voldoende energie, laten we de kwantummechanica in de vorm van Heisenbergs onzekerheidsprincipe⁴⁵ het werk doen: te zware deeltjes kunnen wel degelijk, via een tunneleffect, metingen beïnvloeden. Ook dat is een uitstekende manier. Maar stel dat u wat merkwaardigs ziet, een afwijkende meting, wat dan? Het is zeer lastig om de precieze oorzaak te identificeren: we hebben als het ware de sporen gezien, maar het beestje zelf niet.

Ik denk niet dat we aan een derde oplossing kunnen ontkomen: nieuwe manieren verzinnen om toch die extra kilometers te kunnen lopen, met versnellers op maximale energie. Alleen versnellers geven ons die microscoop die we zelf kunnen controleren. Maar juist hier staan in ons in de nabije toekomst, als we de LHC willen overtreffen, grote uitdagingen te wachten. De LHC is op dit moment de grens van wat technisch, praktisch en financieel haalbaar is. Tussen de jaren vijftig van de vorige eeuw en de LHC is de maximaal haalbare deeltjesenergie in versnellers met een factor 1000 omhooggegaan,⁴⁶ en dat was het verschil tussen het bestuderen van atoomkernen in de jaren vijftig en Higgs deeltjes, en misschien donkere materie nu. Binnen een jaar of vijftien zou eventueel een factor 2 in energie te winnen zijn met dezelfde techniek als de LHC, maar geen factoren 10 of 100.⁴⁷ Om dergelijke factoren in energie te winnen, is een grote fundamentele technische doorbraak nodig.

Een eerste stap is de nieuwe technologie van de CLIC-versneller waarnaar nu op CERN onderzoek wordt gedaan.⁴⁸ Met CLIC gaat de toename van de deeltjesenergie per meter versneller een stuk omhoog,⁴⁹ maar het principe van een ring wordt opgegeven, en om hoge energieën te halen, hebben we toch een lange versneller nodig.⁵⁰ Technisch zal CLIC binnenkort haalbaar zijn, maar praktisch en financieel is er nog wel het een en ander te optimaliseren. Ik vrees echter dat er op de echt lange termijn nieuwe technieken van een heel andere orde nodig zijn, ideeën als *wake-field acceleration*⁵¹ met plasma's of met lasers, of andere technieken. Deze technieken staan nog in de kinderschoenen, en ik denk dat we hun verdere ontwikkeling moeten zien als een uitdaging met de hoogste prioriteit, misschien ook wat meer voor Nederlandse universiteiten en instituten. We hebben ze nodig voor de volgende kilometer in *terra incognita*.

Deeltjesversnellers en infrastructuur

Zeven biljoen elektronvolt is goed voor ons als onderzoekers, maar waarom is onderzoek aan deeltjesversnellers goed voor u als u geen subatomaire fysica bedrijft? Welnu, versnellers zijn veel meer dan speelgoed voor deeltjesfysici. Naar schatting zijn er nu zo'n 30.000 deeltjesversnellers in gebruik in de wereld,⁵² en dan tel ik de ouderwetse televisietoestellen niet mee. Om een kleine doorsnede te geven: wereldwijd zijn versnellers in gebruik voor bestraling van tumoren, het doorlichten van verdachte lading op vliegvelden en in havens, het in kaart brengen van de structuur van eiwitten, diagnose van ziektes, productie van medicijnen, reduceren van radioactief afval, ontdekking van kunstvervalsingen, vervaardiging van halfgeleiders in de chipindustrie, of het dateren van archeologische opgravingen.⁵³ Minder dan 1% van die 30.000 versnellers wordt gebruikt voor subatomair onderzoek. Zo'n 45% van de versnellers is in gebruik voor radiotherapie doeleinden, dus het bestralen van tumoren, en 40% van de versnellers is in gebruik in de halfgeleiderindustrie.⁵⁴ Naar schatting wordt elk jaar voor 500 miljard dollar aan producten gemaakt, bewerkt of geïnspecteerd door bundels van deeltjesversnellers.⁵⁵ Een bijproduct van hoge-energie deeltjesversnellers is synchrotron-straling, het felste licht op aarde dat gebruikt wordt in biologisch onderzoek en in het doorgronden van chemische reacties op atomair niveau, in real-time.⁵⁶

Voor verreweg de meeste van deze versnellers is de allerhoogste energie niet interessant. Wel interessant is een zekere mate aan hoge energie, gekoppeld aan een hoge bundelstroom, een compact ontwerp dat in een labruimte of in een ziekenhuis past, gebruikersgemak en een bescheiden prijskaartje. Met name voor versnellers in de energiesector en voor synchrotronstralingstoepassingen is hoge bundelstroom belangrijk, terwijl beperkte afmetingen en be-

trouwbaarheid interessant zijn voor medische toepassingen en mobiele detectorsystemen.⁵⁷ Ook voor de subatomaire fysica is hoge bundelstroom belangrijk: hoge stroom geeft hoge luminositeit, in de LHC,⁵⁸ maar ook voor een toekomstig fysicaprogramma met onderzoek naar zeldzame deeltjesvervalLEN, of onderzoek met neutrino bundels.⁵⁹ Verdere opvoering van de bundelstroom vereist fundamenteel onderzoek naar het gedrag van deeltjesbundels. Hoge bundelenergie vereist hoge magneetvelden, en onderzoek naar nieuwe supergeleidende ontwerpen kan interessant zijn voor toepassingen in efficiënt energietransport tussen elektriciteitscentrale en consument.⁶⁰ Hoge energie vereist ook hoge versnellingsgradiënten, en dat is weer interessant voor compacte ontwerpen van commerciële versnellers.

In de nabije toekomst zal het belang van versnellers in een aantal gebieden zonder twijfel toenemen. Voor biologisch en materiaalonderzoek met synchrotronstraling worden wereldwijd laboratoria gebouwd.⁶¹ Radioactieve tracerisotopen voor het maken van scans in ziekenhuizen werden tot voor kort in kernreactoren gemaakt, bijvoorbeeld in Petten, maar zullen in de toekomst steeds meer geproduceerd worden met behulp van versnellers.⁶² Bestraling met protonen of zwaardere ionen hebben grote voordelen bij het behandelen van bepaalde tumoren, en op verschillende plekken in de wereld worden of zijn behandelcentra ingericht die hiermee werken.⁶³ Versnellers zullen in de toekomst ingezet kunnen worden bij het onschadelijk maken van hoog radioactief afval.⁶⁴ Het blijven doen van onderzoek op het gebied van de versneller-techniek is belangrijk voor de ontwikkeling van steeds betere versnellers, voor onderzoek en samenleving.

Het onderzoek in de subatomaire fysica vindt plaats op een groot aantal instituten en universiteiten over de hele wereld, maar de grotere experimentele faciliteiten zijn noodgedwongen geconcentreerd op enkele plekken met de juiste infrastructuur. Voor de LHC-experimenten is dat CERN, het Europese laboratorium voor deeltjesonderzoek in Genève.⁶⁵ CERN is zonder twijfel een bijzondere plek. Het is opgericht in de jaren vijftig van de vorige eeuw om de braindrain vanuit Europa naar de Verenigde Staten te stoppen, in een tijd waarin ook de Europese samenwerking op andere gebieden tot stand kwam. En met succes. Nationaliteiten spelen een ondergeschikt rol op CERN. Op CERN houden Israëlische en Palestijnse zomerstudenten gezamenlijk barbecues. Met de LHC heeft CERN zich verder ontwikkeld tot het toonaangevende wereldlaboratorium van de deeltjesfysica. Iedereen die op CERN werkt, ervaart dit als een bron van inspiratie: in de wandelgangen van CERN gonst het als de LHC draait. CERN is vooral ook een plek waar vooruitgekeken wordt naar de subatomaire fysica in de toekomst.⁶⁶ CERN is een plek waar we trots op kunnen zijn, en zuinig op moeten zijn.

Studies uit het verleden hebben laten zien dat voor elke geïnvesteerde euro in *high-technology* er drie à vier terugkomen.⁶⁷ Voor elke euro die naar CERN gaat, gaat ongeveer 25 cent naar hightech-industrieën in Europa⁶⁸ (ook in Nederland), en die genereren voor die bedrijven dus weer 75 cent tot één euro omzet in hoogtechnologische waar. Doorgaans helpen CERN en nationale instituten als Nikhef in de Research en Development (R&D) van grensverleggende nieuwe technologie, en vervolgens vindt er dan een transfer van kennis naar de industrie plaats. Dat het world-wide-web op CERN bedacht is⁶⁹ wist u vast wel, maar wist u ook dat het eerste touchscreen, nu op uw mobiele telefoon of iPad, op CERN is ontwikkeld?⁷⁰ Als opvolger van het web, leidt CERN 's werelds grootste multidisciplinair *Grid computing*-project,⁷¹ gefinancierd door de Europese Unie. De impact buiten subatomaire fysica omvat onder meer: onderzoek naar nieuwe medicijnen, betere voorspellingen van natuurrampen, geofysische analyse voor het zoeken naar olie, en analyse van waardevolle oude manuscripten.⁷² Ook in Amsterdam, in het Science Park, hebben we een dergelijk top-Grid computercentrum.⁷³

De maatschappelijke context

Maar de vraag is niet alleen wat een investering in versnellers of in CERN oplevert voor de Nederlandse maatschappij, maar ook wat überhaupt de plaats is van fundamenteel onderzoek in onze samenleving. We leven in een wereld met uitdagende problemen: klimaatverandering, duurzame energie, duurzame voedselvoorziening, gezondheid. Moeten we niet allemaal werken aan nieuwe medicijnen tegen kanker, of aan de oplossing van het energieprobleem? Of zouden we als wetenschappers misschien dienstbaarder moeten zijn aan de BV Nederland? Ik denk dat van alle vragen die je als fundamenteel onderzoeker krijgt, deze wel het lastigst te beantwoorden is, omdat het antwoord lang en complex is, en niet past in oneliners en sound bites.⁷⁴

Het is een misvatting om te denken dat er een tweedeling bestaat tussen fundamenteel onderzoek en toepassingsgericht onderzoek, en gelukkig gaan steeds meer mensen, ook beleidsmakers, dat beseffen. Grote innovaties zijn voortgekomen uit fundamenteel onderzoek, en belangrijke fundamentele ontdekkingen zijn gedaan in toepassingsgericht onderzoek. Maar wie denkt wel toe te kunnen met toepassingsgericht onderzoek alleen, die mist een basaal aspect van wat echt innovatie en vooruitgang is, namelijk het inslaan van totaal andere paden. Honderd jaar geleden starden fysici naar spectra van gassen en concludeerden daaruit dat de natuurwetten van het heel kleine fundamenteel anders waren dan de wetten op de menselijke schaal.⁷⁵ Niets leek verder weg en nuttelozer. Nu vormt dit de basis van computers, dataopslag en

-transport, en onze informatiemaatschappij. Röntgenstraling in medische toepassingen is niet uitgevonden door doktoren op zoek naar betere methoden voor diagnostiek, maar door fysici.⁷⁶ Henry Ford, de man aan de basis van de moderne auto-industrie zei: ‘Als ik de mensen gevraagd had wat ze wilden, dan zouden ze gezegd hebben: snellere paarden.’⁷⁷ Wie alleen maar betere versies van hetzelfde wil hebben, die heeft geen fundamenteel onderzoek nodig. Maar dat zou voorbijgaan aan de echte innovatie, de grote technologische sprongen, die dan niet bedacht worden omdat de context om ze te bedenken ontbreekt. Einstein zei al: ‘Je kunt de problemen niet oplossen door dezelfde manier van denken toe te passen als die de problemen veroorzaakt heeft.’⁷⁸ Innovatie ontstaat waar twee schijnbaar ver uiteenliggende vakgebieden, met andere denkwijzen, elkaar raken en elkaar bevruchten. Ik denk overigens dat wij, wetenschappers, soms meer dat contact buiten ons eigen expertisegebiedje zouden moeten opzoeken en dat UvA en FOM dat nog meer zouden kunnen faciliteren.

Waar staat fundamenteel onderzoek in de Nederlandse economie? Wetenschapsbeleid in Nederland is op zijn zachtst gezegd ambivalent. De woorden zijn groot: wij willen in de top vijf van de mondiale kenniseconomieën staan, maar onze investeringen blijven daarbij achter.⁷⁹ Het helpt niet echt dat een aantal van onze grote bedrijven en multinationals denken wel zonder fundamenteel onderzoek toe te kunnen: dat denken ze wel ergens te kunnen kopen als het nodig is, desnoods in China. Maar China heeft ons straks echt niet nodig om kennis te gelde te maken. Ook zijn er mensen die zeggen dat Nederland heel goed alleen maar een transportland zou kunnen zijn, gespecialiseerd in distributie. Dat is feitelijk fout, want 70% van de Nederlandse export bestaat uit *high-technology*.⁸⁰ Zoals de NWO-strategienota⁸¹ al zegt: welvaart en welzijn van de Nederlandse samenleving zijn voor een belangrijk deel het resultaat van wetenschappelijke vernieuwing. Voor veel bedrijven is innovatie moeilijk te managen. Hoewel het historisch rendement zeer goed is, is er geen garantie dat een specifieke investering oplevert wat je ervan verwacht. Wetenschap volgt geen rechte lijn, maar een route met kronkels en doodlopende paden. Dat is inherent aan onderzoek aan de grenzen van kennis. In het huidige aandeelhouders-/hedgfondsklimaat is dat blijkbaar onacceptabel. Daar heerst het kortetermijndenken; het gebrek aan verantwoordelijkheidsgevoel op langere termijn is stuitend.

Daaraan gekoppeld is de paradoxale situatie van de Nederlandse fysica. Economen zouden lovend moetend zijn over de Nederlandse fysica: met een minimale investering is tot nu toe een maximaal rendement behaald. Het aantal onderzoekers in de Nederlandse beroepsbevolking komt overeen met de Europese middenmoot, maar het Nederlands Observatorium van Wetenschap en Technologie⁸² heeft becijferd dat Nederlandse onderzoekers, en fysici in het

bijzonder, tot de productiefste ter wereld behoren. Maar op de lange termijn kan dit niet zo blijven. De universiteiten staan onder zware druk en de UvA is daarop geen uitzondering. Er moet hard bezuinigd worden, en dat gaan we voelen.

Een grote en niet te onderschatten taak van fundamenteel onderzoek is het opleiden van mensen en het ontwikkelen van methodes, algoritmes en processen. Methodes uit de fysica zijn met succes gebruikt in zeer uiteenlopende toepassingen, zoals het begrijpen van de migratie van mensen tijdens het neolithicum, het opsporen van huidkanker, het modelleren van verkeersstromen en filevorming, of het verklaren van menselijk gedrag tijdens verkiezingen.⁸³ Fundamenteel onderzoek investeert in mensen, uitgaande van optimisme over het menselijk vermogen om oplossingen te vinden voor uitdagingen. Verreweg de meeste studenten die afstuderen of promoveren in de natuurkunde aan Nederlandse universiteiten en instituten gaan naar de industriële en dienstverlenende sector.⁸⁴ Gewaardeerd worden:

- analytisch denken en systematische aanpak van complexe problemen
- documentatie en presentatie van gedaan werk
- ervaring in het werken in multiculturele teams
- een kritische houding ten opzichte van informatiebronnen

Ook bedrijven als Philips en ASML zeggen tegen mijn werkgever, de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie, die soms wel eens worstelt met de balans tussen fundamenteel en toegepast onderzoek: 'FOM: je belangrijkste product, dat zijn mensen.'⁸⁵

Het is fantastisch dat veel fysici werken aan actuele problemen, en dat moet zeker gestimuleerd worden. Maar niet alle wetenschap die we bedrijven, hoeft elke dag gemotiveerd te worden door de uitdagingen van onze maatschappij: ik hoef niet vandaag naar mijn werk te gaan om te werken aan het ontwikkelen van duurzame energie, want dan loop ik het risico om niets anders te maken dan een sneller paard. Ik ga naar mijn werk om goede wetenschap te bedrijven, uit nieuwsgierigheid naar de werking van de subatomaire wereld. Ik weet zeker dat dat werk ook zijn bijdrage zal leveren aan oplossingen voor de huidige uitdagingen.

Door nieuwsgierigheid gedreven onderzoek is een van de motoren van de kennis-technologie spiraal, juist omdat het zich begeeft aan de grenzen van de wetenschap. Het onderzoek naar het allerkleinste is een onlosmakelijk onderdeel van dat soort onderzoek; onderzoek met versnellers met maximale energie en bundelstroom is een onmisbaar onderdeel van de subatomaire fysica. Het verder ontwikkelen van versnellers voor onderzoek is uitstekend verenigbaar met de ontwikkeling van versnellers voor industriële en medische toepassingen. Daarom is zeven biljoen elektronvolt goed voor u.

Ten slotte

Ik heb de afgelopen jaren met veel plezier met studenten gewerkt en ik hoop dat nog vele jaren te mogen doen. De huidige generatie van studenten is wel degelijk gemotiveerd om het niet gemakkelijke traject van een natuurkunde-studie in te gaan, meer dan je zou verwachten van de uitstroom van middelbare scholen die in de vooropleiding nog wel eens wat steekjes laten vallen. Het talent en de nieuwsgierigheid van de studenten staat ook wat haaks op hun taalgebruik van ‘chill’, ‘relaxed’ en de topdooddoener ‘doe kalm aan’. Voor jullie ligt een maatschappij met grote uitdagingen: zoek ze op! ‘Relaxed’ is goed, maar zeven biljoen elektronvolt is beter.

Ik zou deze rede willen afsluiten met enkele woorden van dank.

Ik dank het College van Bestuur van de Universiteit van Amsterdam, de faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica, en het Genootschap tot bevordering van Natuur-, Genees- en Heelkunde voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik wil ook de curatoren van mijn leerstoel, de hoogleraren Wiegerinck, Linde en Koffeman, van harte bedanken. Verder gaat mijn dank uit naar het Instituut voor Hoge Energie Fysica aan de UvA, en met name de directeur ervan, Stan Bentvelsen.

Het is een grote eer om te mogen werken op het Nikhef, het Nationaal Instituut voor Subatomair Fysica.⁸⁶ Het Nikhef heeft een goede naam hoog te houden in het competitieve vakgebied van de subatomair fysica. Dat komt door zijn hoog gemotiveerde en gekwalificeerde medewerkers, met uitstekend ook de ontwerpers, technici en informatici, en het ondersteunend personeel. Mijn werkgever, de stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie, FOM, dank ik voor alle steun. NWO, de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek, steunt mij in de vorm van een VICI-beurs, waarvoor dank.

Ik dank mijn mentoren en collega's in heden en verleden: Wim Caspers aan de Universiteit Twente, helaas begin dit jaar overleden, en mijn promotor, Armin Tenner, die mij als eerste op het Nikhef aan het werk zette, alle leden van de ZEUS-groep waarin ik terecht kwam, de leden van de L3-groep, alle leden van de ATLAS/D0-groep in Amsterdam en in Nijmegen, en alle Nikheffers met wie ik samenwerk.

Tot slot: mijn familie. Mijn vader zat in het onderwijs, eerst als onderwijzer, daarna als leraar en ten slotte als schooldirecteur. Hij stond bekend als streng doch rechtvaardig en sprong altijd in de bres voor de zwakkere leerlingen. Dat

sierde hem enorm, al denk ik dat je de goede leerlingen ook moet blijven uitdagen. Af en toe zei hij tegen mij dat ik ook in het onderwijs terecht zou komen. Dat kon ik niet geloven. Maar hij heeft gelijk gekregen, al heeft hij het zelf niet meer mogen meemaken. Ik dank mijn moeder, mijn broer en mijn zus, en last, maar zeker not least, mijn echtgenote, Suzanne.

Ik heb gezegd.

Noten

1. Zie bijvoorbeeld: S. Weinberg, *The first three minutes, a modern view of the origin of the universe*, Basic Books, New York.
2. Het bedoelde plaatje is het Leitmotiv van het boek van Sander Bais, *Keerpunten*, Amsterdam University Press, en ook een logo van de faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica van de Universiteit van Amsterdam.
3. Te vinden op de *Powers of Ten*-website: <http://www.powersof10.com/>.
4. De afstand tot de rand van het waarneembare heelal wordt geschat op zo'n 47 miljard lichtjaren; zie J. Gott III et al., *A Map of the Universe*, *The Astrophysics Journal* 624 (2). Overigens kan het niet-waarneembare deel van het heelal nog veel groter zijn.
5. Een maat voor de grootte van atomen is de typische afstand tussen atomen in een kristalrooster. Met röntgendiffractie blijkt dit in de orde van 10^{-10} m te zijn.
6. Ernest Rutherford, *The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom*, *Philos. Mag.* 21:669-688, May 1911.
7. De metafoor van de 'vlieg in een kathedraal' is tevens de titel van een boek van Brian Cathcart, uitgevers Farrar, Straus and Giroux.
8. J.D. Cockroft en E.T.S. Walton, *Proc. Roy. Soc. Londen* A137:229.
9. E. Lawrence, *Method and Apparatus for the Acceleration of Ions*, US Patent 1948384, <http://www.google.com/patents?vid=1948384>.
10. V. Veksler, *J. of Phys. USSR*, 9 (1945) 153; E.M. McMillan, *The synchrotron - a proposed high-energy particle accelerator*, *Phys. Rev. Letter to the editor*, 68 (1945) 1434.
11. Volgens de Broglie is de golflengte λ van een deeltje met impuls p gelijk aan h/p , waar h de constante van Planck is. Voor protonen in de LHC is dat zo'n 10^{-19} m.
12. L. Evans et al., *The LHC Machine*, *JINST* 3 (2008) S08001. Zie ook <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>.
13. Sinds de dag van het uitspreken van deze rede, 4 november 2010, worden ook loodkernen in de LHC versneld.
14. De LHC-energie komt overeen met een temperatuur van 10^{16} K, heersende 10^{-10} s na de oerknal.
15. G. Aad et al., *The ATLAS experiment at the CERN Large Hadron Collider*, *JINST* 3 (2008) S08003. Zie ook <http://atlas.ch/>.
16. Het voornaamste doel voor 2010 was het bereiken van een piekluminositeit van 10^{32} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Dat is met een factor 2 overtroffen.
17. De uiteindelijk te bereiken piekluminositeit is 10^{34} cm^{-2} s^{-1} . Het doel is het verzamelen van een geïntegreerde luminositeit van 300 fb^{-1} .
18. De eerste resultaten van ATLAS werden getoond op de 35e International Conference on High Energy Physics, ICHEP 2010, 22-28 juli 2010, in Parijs, zie <http://www.ichep2010.fr/>.
19. The ATLAS Collaboration, *Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC*, *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 161801.

20. P.W. Higgs, *Broken symmetries, massless particles and gauge fields*, Phys. Lett. 12 (1964) 132; P.W. Higgs, *Broken symmetries and the masses of gauge bosons*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508; F. Englert en R. Brout, *Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321; G.S. Guralnik, C.R. Hagen en T. W.B. Kibble, *Global conservation laws and massless particles*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.
21. Voor het Koninklijk Paleis op de Dam waren dat er 13.659.
22. S.L. Glashow, Nucl. Phys. 22 (1961) 579; S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264; A. Salam, in *Elementary Particle Theory*, ed. N. Svartholm (1968) 367; G. 't Hooft en M. Veltman, Nucl. Phys. B 44 (1972) 189.
23. De LEP-experimenten hebben gezamenlijk een Higgs-bosonmassa onder de 114.4 GeV uitgesloten met 95% CL, zie <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>. Onlangs is met de Tevatronexperimenten een Higgs-bosonmassa tussen 158 en 175 GeV uitgesloten, ook met 95% CL, zie <http://tevnpwg.fnal.gov/>.
24. The ATLAS Collaboration, *ATLAS sensitivity prospects for Higgs boson production at the LHC running at 7, 8 or 9 TeV*, ATLAS public note ATL-PHYS-PUB-2010-015 (2010).
25. Ibid.
26. Zie M. Rees, *Just Six Numbers*, Phoenix, Londen. Dit boek bevat een discussie over zes parameters die het universum vormen en wat er zou gebeuren als die parameters een andere waarde zouden hebben.
27. Voor een populaire uitleg, zie E. Sather, *The Mystery of the Matter Asymmetry*, Beam Line 26 (1999) 1.
28. W.L. Freedman en E.W. Kolb, *Cosmology*, in: *The New Physics for the 21st Century*, Gordon Fraser (red.), Cambridge University Press, p. 13.
29. A.G. Riess et al., *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*, Astronomical J. 116 (1998) 1009; S. Perlmutter et al., *Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae*, Astrophysical J. 517 (1999) 565.
30. F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, Helvetica Physica Acta 6 (1933) 110; F. Zwicky, *On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae*, Astrophysical J. 86 (1937) 217.
31. Y.A. Golfand en E.P. Likhtman, JETP Lett. 13 (1971) 323; A. Neveu en J.H. Schwartz, Nucl. Phys. B 31 (1971) 86; A. Neveu en J.H. Schwartz, Phys. Rev. D 4 (1971) 1109; R. Ramond, Phys. Rev. D 3 (1971) 2415; D.V. Volkov en V.P. Akulov, Phys. Lett. B 46 (1973) 109; J. Wess en B. Zumino, Phys. Lett. B 49 (1974) 52; J. Wess en B. Zumino, Nucl. Phys. B 70 (1974) 39.
32. E. Koffeman, *Deeltjesfysica: onvoorstelbare waarnemingen?* Oratie uitgesproken op 15 februari 2007, verschenen als oratie 318 in de oratiereeks van de Universiteit van Amsterdam, Vossiuspers UvA 2009.
33. De uitspraak 'For then we shall know the mind of God' is toegeschreven aan Stephen Hawking.
34. De Planck-energie is $\sqrt{(\hbar c^5/G)} \approx 10^{19}$ GeV. De corresponderende Planck-lengte is $\sqrt{(\hbar G/c^3)} \approx 10^{-35}$ m.
35. Grand Unified Theories proberen krachten en fundamentele deeltjes te unificeren in representaties van nieuwe symmetrie groepen. Eerste ideeën zijn geuit door J.

- Pati en A. Salam, Phys. Rev. D 10 (1974) 275, en H. Georgi en S.L. Glashow, Phys. Rev. Lett. 32 (1974) 438. Zie ook G. Ross, *Grand Unified Theories*, Westview Press.
36. A.H. Guth, *The inflationary universe: a possible solution to the horizon and flatness problems*, Phys. Rev. D 23 (1981) 347. Inflatie is de hypothese dat het heelal exponentieel in grootte toenam, met een factor van tenminste 10^{78} in volume, tussen 10^{-36} en 10^{-32} s na de oerknal. Dit zou de uniformiteit van ons huidige heelal kunnen verklaren: het hele waarneembare heelal zou zijn origine hebben in een kleine, causaal verbonden regio.
 37. In modellen met relatief grote extra dimensies, zoals die van N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos en G. Dvali, Phys. Lett. B 429 (1998) 263, is de grootte van de Planck-schaal een illusie, omdat gravitatie door de extra dimensies als het ware verdund wordt.
 38. De deeltjesfysica heeft al sinds het begin van de 20ste eeuw veel te danken aan studies van kosmische stralen. Een groot aantal nieuwe deeltjes zijn gevonden in ballonexperimenten, of in observatoria in het hooggebergte.
 39. S. Innoue, *Astrophysical Accelerators of Ultrahigh Energy Cosmic Rays*, AIP Conf. Proc. 1040 (2008) 175.
 40. Op 15 oktober 1991 detecteerde de 'Fly's Eye'-detector in Utah, USA, dit kosmische deeltje dat de bijnaam 'Oh-my-god particle' kreeg. Fly's Eye Collaboration, Phys. Rev. Lett., 22 november 1993 en G. Taubes, *Science* 262 (1994) 1649.
 41. Zie <http://www.grappa-uva.nl/>.
 42. Anekdote verteld door M. Turner tijdens de Academic Training Lectures op CERN, *The Dark Side of the Universe: Dark Matter and Dark Energy*, maart 2010.
 43. B.L. Roberts, *Precision Searches for Physics beyond the Standard Model*, arXiv:0910.5417 [hep-ex] (2009); D.W. Hertzog, *Precision muon physics updates*, La Thuile 2007, *Electroweak Interactions and Unified Theories* (2007) 445; M. Ciuchini, *Opportunities from precision flavour physics*, arXiv:1002.3266 [hep-ph] (2010).
 44. V.A. Dzuba en V.V. Flambaum, *Current trends in searches for new physics using measurements of parity violation and electric dipole moments in atoms and molecules*, arXiv:1009.4960 [physics.atom-ph] (2010).
 45. Een vorm van Heisenbergs onzekerheidsrelatie is: $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$. Hierin is \hbar de gereduceerde constante van Planck: $\hbar = \hbar/2\pi$.
 46. De bundelenergieën van enkele van de eerste synchrotrons: het Cosmotron in Brookhaven bereikte 3 GeV in 1953, het Bevatron in Berkeley 6 GeV in 1954, CERN's Proton Synchrotron 24 GeV in 1959, het AGS in Brookhaven 33 GeV in 1960.
 47. Een verdubbeling of verdrievoudiging van de LHC-bundelenergie zou magneten met velden van 16 tot 24 Tesla vereisen. Dergelijke velden zijn in laboratoriumcondities haalbaar, maar nog niet op industriële schaal.
 48. Zie <http://clic-study.org/>.
 49. De CLIC-layout werkt met een lage-energie hogestroom hulpbundel, die de hoge-energie lagestroom-hoofdbundel aandrijft. Netto moet een versnellingsgradiënt van 70 MV per meter worden bereikt.
 50. Om excessieve synchrotronstraling van een circulaire versneller te voorkomen, is CLIC een lineaire versneller met een lengte van ongeveer 20 km per arm.

51. Zie voor een populaire uitleg C. Joshi, *Plasma Accelerators*, Scientific American 294 (2006) 40.
52. *Symmetry Magazine*, augustus 2010. *Symmetry Magazine* is een uitgave van Fermilab (Chicago, Illinois, USA) en SLAC (Stanford, Californië, USA).
53. Ibid.
54. Ibid.
55. Ibid.
56. Ibid.
57. Ibid.
58. Het 'High-Luminosity LHC' voorstel beoogt een geïntegreerde luminositeit van 3000 fb^{-1} voor 2030, te bereiken met een aanpassing van de LHC tot piekluminositeiten van $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ na 2020.
59. R. Aymar et al., *Workshop on Physics with a Multi-Megawatt Proton Source Summary*, CERN-rapport CERN-SPSC-2004-024 (2004).
60. Zie <http://www.superconductors.org/>.
61. Een aantal laboratoria in aanbouw of recentelijk opgeleverd: SSRL op SLAC, ALBA in Barcelona, de Swiss Light Source op PSI, en XFEL op DESY, Hamburg.
62. Het TRIUMF-instituut in Vancouver, Canada (<http://www.triumf.ca/>) zet bijvoorbeeld hoog in op de productie van tracer isotopen bij versnellers in plaats van bij kernreactoren.
63. N. Pavel, *Medical Physics*, in: *The New Physics for the 21st Century*, Gordon Fraser (red.), Cambridge University Press, p. 444.
64. De pionier van deze technieken was C. Bowman in Los Alamos, en het meest geavanceerde project staat in Japan (J-PARC). In België staat het MYRRHA-project (<http://myrrha.sckcen.be/>) op de tekentafels.
65. CERN is de 'European Organization for Nuclear Research', <http://www.cern.ch/>.
66. Zie <http://cern.ch/council-strategygroup/>.
67. U. Amaldi, *Physics and Society*, in: *The New Physics for the 21st Century*, Gordon Fraser (red.), Cambridge University Press, p. 505.
68. Ibid.
69. T. Berners-Lee en R. Cailliau, *WorldWideWeb: Proposal for a HyperText Project*, CERN intern memorandum, <http://www.w3.org/Proposal.html>. J. Gillies en R. Cailliau, *How the web was born*, Oxford University Press.
70. B. Stumpe en C. Sutton, *The first capacitive touch screens at CERN*, CERN Courier, april 2010.
71. Zie <http://www.egi.eu/>.
72. Zie bijvoorbeeld T. Hey en A. Trefethen, *Collaborative Physics, e-Science and the Grid*, in: *The New Physics for the 21st Century*, Gordon Fraser (red.), Cambridge University Press, p. 370.
73. Zie <http://www.biggrid.nl/>.
74. Iedereen heeft hierover intuïtief een mening, maar het is niet gemakkelijk om die goed onder woorden te brengen. Het verdient aanbeveling om hieraan in de opleiding van studenten en promovendi aandacht te besteden.
75. Een fascinerend verslag is te vinden in A. Pais, *Inward Bound*, Oxford University Press.

76. W.C. Röntgen, *On a new kind of rays*, Sitzungsberichte der Würzburger Physik-med. Gesellschaft, 1895.
77. Deze quote wordt aangehaald in T. Kelley en J. Littman, *The ten faces of innovation*, Currency/Doubleday Publishers, 2005.
78. Het is niet helemaal zeker of Einstein dit precies op deze manier heeft gezegd; het kan een parafrase zijn. Zie <http://en.wikiquote.com/wiki/Einstein/>.
79. Veel interessante informatie over Nederlands en buitenlands wetenschapsbeleid is te vinden op de website van de Adviesraad voor het Wetenschaps- en Technologiebeleid, AWT, <http://www.awt.nl/>.
80. Ibid.
81. Het NOW-strategiedocument *Groeien met kennis* is te lezen op <http://www.nwo.nl/>. NWO is de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek.
82. NOWT: <http://www.nowt.nl/>.
83. U. Amaldi, *Physics and Society*, in: *The New Physics for the 21st Century*, Gordon Fraser (red.), Cambridge University Press, p. 505.
84. De stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie, FOM, houdt dit voor haar uitstroom bij in de sociale jaarverslagen, na te lezen op <http://www.fom.nl/>.
85. Gehoord op de FOM-strategiediscussie 'Soest-2010'.
86. Zie <http://www.nikhef.nl/>.