



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Krachten tussen groot en klein

Holten, J.W. van

Citation

Holten, J. W. van. (2011). *Krachten tussen groot en klein*. Leiden: Universiteit Leiden. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/19606>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/19606>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Prof.dr. J.W. van Holten

Krachten tussen groot en klein



Universiteit Leiden

Krachten tussen groot en klein

Oratie uitgesproken door

Prof.dr. J.W. van Holten

bij de aanvaarding van het ambt van bijzonder hoogleraar op het gebied van

Theorie van Superzwaartekracht en Kosmologie

aan de Universiteit Leiden

vanwege de Stichting Lorentz Fonds

op maandag 18 april 2011.



Universiteit Leiden

Meneer de rector, leden van het curatorium van het Lorentz Fonds, geachte toehoorders,

De Engelse wiskundige Hardy, die wel hield van een beetje provoceren, heeft eens beweerd dat de wereld van de wiskunde werkelijker is, dichter bij de directe ervaring staat, dan die van de natuurkunde. Zijn argument kwam er op neer, dat iedereen bij een elementaire wiskundige grootheid als het getal 2 of 317 onmiddellijk exact weet waar het over gaat, maar dat wij aanzienlijk minder directe kennis hebben van stoffelijk voorwerpen in het algemeen, en in het bijzonder van elementaire vormen van materie als een atoom of een elektron.

Mijn collega's die experimentele wetenschap bedrijven zullen hier van alles tegen in kunnen brengen, maar de beoefenaren van de theoretische natuurkunde, waar ik mijzelf toe reken, leven in beide werelden tegelijk en kunnen sympathie voor het ene zowel als het andere standpunt opbrengen. Ons vak bestaat er namelijk uit deze twee werelden, die van de wiskunde en die van de natuur, met elkaar in verband te brengen en een wiskundige beschrijving te geven van natuurlijke verschijnselen. Dat dat kan is opmerkelijk op zichzelf, en soms een aanleiding voor verbazing. Maar dat de wiskunde zeer nuttig en succesvol is in het beschrijven van de natuur staat vast. Zoals Galileo vierhonderd jaar geleden al opmerkte: *het boek van de natuur is geschreven in de taal van de wiskunde*.

Nu is het niet zo dat de wiskunde die daarvoor nodig is altijd zo maar klaar staat. Soms moet de wiskundige taal die nodig is om een nieuw gebied van de natuurkunde in kaart te brengen nog geheel of deels ontwikkeld worden. Dat was zo in de tijd van Galileo, Huygens en Newton bij de ontwikkeling van de klassieke mechanica en optica, en dat gebeurt in onze dagen bij voorbeeld op het gebied van de quantumtheorie waarmee deeltjes en hun wisselwerkingen worden beschreven. Wanneer zo'n nieuwe tak van wiskunde krachtig genoeg is, ontstaan er nieuwe ideeën hoe de natuur in elkaar zou kunnen zitten, wat aanleiding geeft tot nieuwe experimenten, experimenten die voorheen ondenkbaar waren omdat de vraag die zij proberen te beantwoorden eerder nog niet gesteld kon

worden. Zo krijgt de verhouding tussen theorie en experiment het karakter van die tussen kip en ei, waarbij ik in het midden laat wie welke rol speelt. In ieder geval kunnen theorie en experiment niet zonder elkaar.

De opbouw van de materie

De innige verstrengeling tussen wiskunde en natuurkunde maakt het niet altijd makkelijk in woorden uit te leggen wat er aan het front van de natuurwetenschap gebeurt. Deze gelegenheid nodigt mij echter uit het toch te proberen. De centrale vragen in de natuurkunde betreffen de aard van de materie en de wisselwerkingen tussen verschillende vormen van materie, die ervoor zorgen dat de wereld in beweging is en blijft. De antwoorden hangen deels af van de schaal waarop je kijkt. Je kunt materie bij voorbeeld indelen in vaste stoffen, vloeistoffen en gassen. Daarin spelen zich processen af zoals trillingen, stromen en wervels. Ook zijn er overgangen mogelijk van vaste stof naar vloeistof en gas onder invloed van temperatuur en druk. In natuurkundige taal noemen we dat faseovergangen.

Als je op kleinere schaal gaat kijken zijn zulke stoffen onafhankelijk van hun verschijningsvorm opgebouwd uit moleculen. Bij een faseovergang veranderen die moleculen niet, maar wel hun collectief gedrag. Moleculen zelf zijn bouwsels van een of meer atomen. Een atoom is de kleinste eenheid van een scheikundig element zoals waterstof, zuurstof of ijzer. In de natuur komen maar 92 elementen voor, en dus maar 92 soorten atomen. Ieder atoom bestaat uit een kern omgeven door een wolk van elektronen. Het lichtste atoom, waterstof, heeft maar een elektron en het zwaarste atoom in de natuur, uranium, bezit 92 elektronen. Die elektronen bewegen permanent om de kern, omdat ze een negatieve elektrische lading dragen, terwijl de kern positief geladen is. Positieve en negatieve lading trekken elkaar aan, zodat atomen onder normale aardse omstandigheden niet spontaan uit elkaar vallen in een kern en elektronen.

De opbouw van atomen wordt dus beheerst door elektrische krachten. Je kunt je dan wel afvragen waarom atomen

niet instabiel zijn voor het tegenovergestelde proces, waarbij elektronen naar de kern worden getrokken en erdoor worden opgeslokt. Het antwoord daarop wordt gegeven door de quantumtheorie. En daar begint ons intuïtieve beeld van de natuur al enigszins vertroebeld te raken. In de quantumtheorie wordt met een deeltje zoals een elektron een golf geassocieerd, waarvan de golflengte wordt bepaald door de energie: hoe lager de energie, hoe langer de golflengte. Omdat de baan van een elektron minimaal één golflengte lang is, betekent een langere golflengte dat het elektron verder van de kern moet bewegen. Maar tegelijk probeert het elektron onder invloed van de aantrekking door de kern juist zo dicht mogelijk bij de kern te komen. Het evenwicht tussen deze twee tegengestelde invloeden bepaalt op welke afstand het elektron zich in de toestand van laagste energie bevindt. De stabiliteit van atomen wordt daarom gewaarborgd door het golfkarakter van de elektronen.

4 Naast de elektrische kracht zijn er dieper in het atoom, in de kern, nog twee andere vormen van wisselwerking tussen deeltjes actief. Een kern bestaat namelijk uit twee soorten kerndeeltjes: positief geladen protonen en ongeladen neutronen, waarin nog kleinere bouwstenen zitten, de quarks. De positief geladen protonen zouden elkaar afstoten en de kern zou uiteenvallen als er naast de elektrische krachten niet nog een andere, sterkere kracht was die de afstoting tegenwerkt en de deeltjes bijeenhoudt. Wat protonen en neutronen aan elkaar bindt, en op dieper niveau de quarks, wordt kortweg de sterke wisselwerking genoemd.

De andere vorm van wisselwerking die een rol speelt tussen deeltjes in het atoom is juist nogal zwak, en totaal anders van aard: hij manifesteert zich vooral in transmutaties tussen verschillende soorten deeltjes. Een standaardvoorbeeld is de overgang van een neutron in een proton en een elektron, waarbij overigens nog een derde superlicht ongeladen deeltje vrijkomt: een neutrino; neutrino's zijn een soort broertjes van het elektron, maar zonder lading en bijna zonder massa. Neutrino's zijn dus een product van het verval van een neutron in een proton, een proces dat een atoomkern van het ene

element spontaan doet overgaan in die van een ander element. Dit is de basis van de vorm van radioactiviteit die bekend staat als β -verval.

De sterke en zwakke wisselwerkingen zijn beide ook essentieel voor het proces van kernfusie, waarbij lichte kernen versmelten tot zwaardere. Dat gebeurt diep binnen in sterren, zoals in de zon, waar onder grote druk waterstofkernen worden omgezet in helium. Kernfusie is het proces dat de zon laat schijnen, letterlijk. Maar aan de kernkrachten danken we niet alleen licht en warmte. Ook de scheikundige elementen zelf, alles zwaarder dan waterstof of helium, zijn ooit via kernfusie in het binnenste van sterren gemaakt. Zonder kernfusie zou er in het heelal geen koolstof, geen zuurstof of ijzer zijn; sterren zijn de ovens waarin de natuur de elementen smeedt, de bouwstenen van onze planeet en van al het leven. Daarom zouden sterren, de aarde en het leven op aarde zonder de sterke en zwakke wisselwerking niet kunnen bestaan.

Gravitatie

Elektromagnetische, sterke en zwakke wisselwerkingen bepalen de structuur van de materie op atomaire en subatomaire schaal. Op de grootste afstandschalen, die van sterren en planeten, wordt de structuur en de verdeling van de materie in het heelal beheerst door de vierde fundamentele wisselwerking die we in de natuur kennen, de zwaartekracht. De zwaartekracht is op een aantal manieren anders dan de krachten die binnen in de materie, in het atoom en in de kern hun werk doen. Ten eerste kennen we de zwaartekracht alleen als macroscopisch verschijnsel, in tegenstelling tot de kernkrachten die alleen op microscopische schaal actief zijn. Er is nog nooit op atomaire schaal of daaronder iets van directe zwaartekrachtwerking waargenomen. De belangrijkste reden voor dit gebrek aan gegevens over microscopische zwaartekracht is, dat deze wisselwerking tussen subatomaire deeltjes tientallen orden van grootte zwakker moet zijn dan de andere krachten, zodat de effecten, zelfs als ze er zijn, onmeetbaar klein zijn. Als je de bijdrage van de zwaartekracht aan de binding van het elektron in het waterstofatoom zou willen bepalen, dan zou

je de bindingsenergie minstens tot op 40 cijfers achter de komma nauwkeurig moeten kunnen meten. Een ander belangrijk verschil tussen de zwaartekracht en andere wisselwerkingen is, dat de zwaartekracht universeel is, terwijl de andere krachten alleen tussen bepaalde vormen van materie werken. Wat ik daarmee bedoel is het volgende. Krachten als de elektrische of sterke wisselwerkingen werken via verschillende soorten lading. Deeltjes met een elektrische lading ondervinden een kracht in een elektrisch of magnetisch veld, maar ongeladen deeltjes zoals bij voorbeeld een neutrino ondergaan daar geen enkele invloed van. Evenzo bezitten de deeltjes diep in de atoomkern een soort lading waar de sterke kracht op werkt, maar die bij elektronen en neutrino's ontbreekt. Zwaartekracht werkt echter op alles, alles wat massa heeft of op een andere manier energie mee kan dragen, zoals licht. Er is geen vorm van materie die neutraal is onder de werking van de zwaartekracht. Bovendien is niet alleen alles aan de zwaartekracht onderworpen, het is ook nog zo dat verschillende voorwerpen in hetzelfde zwaartekrachtsveld even hard vallen. Bij dezelfde beginsnelheid volgen ze daarom dezelfde baan, ongeacht hun massa. Dat zorgt er bijvoorbeeld voor, dat de maan en de aarde samen om de zon kunnen draaien, zonder door de zon uit elkaar getrokken te worden. Mogelijk herinnert u zich nog een proefje op de middelbare school, waarbij een kogeltje en een veertje in het luchtledige even snel beneden zijn; dat is een illustratie van hetzelfde principe.

De Algemene Relativiteitstheorie

Een elegante interpretatie van deze universaliteit van de zwaartekracht werd bijna honderd jaar geleden door Einstein gegeven. Hij stelde dat de zwaartekracht niet een echt krachtsveld is, zoals elektrische en magnetische velden, maar dat zwaartekracht een schijnbare kracht is die het effect is van kromming van de ruimte en tijd. Wat moet u zich daarbij voorstellen? Laten we de aarde als voorbeeld nemen; de aarde is in goede benadering een bol. De kortste weg langs het aardoppervlak van de Noordpool naar de evenaar is daarom niet een rechte lijn, maar een stuk van een grote cirkel, een meridiaan. Of je

nu per schip, met een trein of per vliegtuig reist, je zult altijd dezelfde meridiaan volgen met dezelfde kromming. Evenzo vervormt de massa van de aarde de ruimte om de aarde heen, zodat een meteor of een satelliet in vrije val in de buurt van de aarde geen rechte lijn volgt, maar een gebogen baan. Als de meteor van ver komt met een behoorlijke vaart, dan wordt hij door de vervorming van de ruimte rond de aarde afgebogen en vliegt na de aarde te zijn gepasseerd in een andere richting verder. Een satelliet die met relatief kleine snelheid in een baan rond de aarde gebracht is, kan niet uit de put komen, maar zal daarin blijven ronddraaien, in eerste benadering in een cirkel- of ellipsbaan. Omdat alle meteorieten of satellieten in dezelfde mate worden afgebogen, ongeacht hun massa, brengen hun bewegingen in feite de kromming van de ruimte rond de aarde in kaart. Zo krijgt de universaliteit van de zwaartekracht een eenvoudige meetkundige verklaring.

Als deze verklaring juist is, moeten niet alleen satellieten en planeten in hun beweging de kromming van de ruimte volgen, maar bij voorbeeld ook licht. Als licht langs een object met grote massa scheert, zoals een ster, dan zal de kromming van de ruimte rond de ster ervoor zorgen dat het licht wordt afgebogen. Dat verschijnsel is intussen vele malen waargenomen. De eerste keer tijdens een zonsverduistering, waarbij sterren die eigenlijk al achter de verduisterde zon verdwenen hadden moeten zijn toch nog te zien waren, omdat het licht door de massa van de zon in onze richting werd afgebogen. Een grote massa werkt voor licht dus als een soort lens. Tegenwoordig wordt het effect o.a. gebruikt om de massa van sterrenstelsels of clusters van sterrenstelsels ver weg in het heelal te schatten: de mate van afbuiging van licht van nog verder weg gelegen bronnen, wat je de sterkte van de lens zou kunnen noemen, is daarbij een maat voor de totale massa van het sterrenstelsel. Die studies leveren een opmerkelijk resultaat: het blijkt dat de massa van sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels systematisch ruim vijf maal groter is dan je zou schatten op grond van de hoeveelheid licht die ze produceren, zelfs als je er rekening mee houdt dat niet alle materie in sterren zit. Er bevindt zich dus een grote hoeveelheid donkere

materie tussen de sterren. De aard en oorsprong van deze donkere materie is nog volledig ongewis en aanleiding voor allerlei nieuw onderzoek.

De crux van Einstein's theorie van de zwaartekracht is natuurlijk het idee dat massa's de ruimte en tijd om zich heen veranderen. Dat impliceert dat de meetkunde die op onze wereld van toepassing is niet de eenvoudige meetkunde van het platte vlak is, zoals die meer dan tweeduizend jaar geleden door Euklides uiteengezet werd. De meetkunde van ruimten met kromming werd in de 19e eeuw ontwikkeld door Riemann en andere wiskundigen. Einstein gaf een heel precies voorschrift hoe je die kunt toepassen op ons universum.

Het is mogelijk een idee te geven van de vervorming van de ruimte om de aarde aan de hand van het GPS systeem, het satellietstelsel dat de navigatieapparatuur in uw auto van informatie voorziet. De GPS satellieten bewegen in een cirkel op een afstand van 27.000 km van het middelpunt van de aarde. Om de omtrek van de baan te berekenen zou je volgens de elementaire meetkunde 2π maal de straal van de baan moeten nemen, dat is ongeveer 170.000 km. In werkelijkheid is die baan echter ongeveer een meter korter. En niet alleen afstanden veranderen, ook de tijd verloopt anders: een klok aan boord van een GPS satelliet loopt een fractie sneller dan dezelfde klok op aarde. Dat is wat we bedoelen als we zeggen dat gravitatie niet slechts de ruimte, maar ook de tijd verandert. De effecten zijn, zelfs bij een massa als die van de aarde, erg klein. Maar mocht U denken dat dit in de praktijk niet veel uitmaakt, dan hebt u het mis: als de GPS software niet voor dit soort effecten zou corrigeren dan zou de navigatie van uw auto al na een paar minuten afwijkingen van tientallen meters gaan vertonen en u op de verkeerde plek naar links of rechts sturen.

Gravitatiegolven

Nu is de verdeling van massa en energie in het heelal niet onveranderlijk: planeten, sterren en hele sterrenstelsels zijn voortdurend in beweging. Dat betekent dat de vorm van de ruimte voortdurend meeverandert: de ruimte is geen vast

toneel waarop de natuurlijke verschijnselen zich afspelen, maar een dynamisch medium dat in directe wisselwerking met materie en straling vorm krijgt. Een van de voorspellingen die uit Einstein's theorie valt af te leiden is dan ook, dat veranderingen in de ruimte en tijd zich kunnen voortplanten door het universum, een soort rimpels die door de ruimte lopen, met de snelheid van het licht. We spreken dan van gravitatiegolven. Zulke gravitatiegolven nemen energie mee, zodat de sterren of andere lichamen die de golven veroorzaken energie verliezen. Dat laatste is ook daadwerkelijk waargenomen. Er zijn dubbelsterren, stelsels waarin twee sterren om elkaar heen draaien, waarvan sterrenkundigen hebben kunnen bepalen dat ze precies in overeenstemming met de voorspellingen van Einstein's theorie energie kwijt raken, met als gevolg dat die sterren steeds dichter naar elkaar toe kruipen. Daarom proberen nu verscheidene groepen onderzoekers op verschillende plekken in de wereld deze gravitatiegolven direct zichtbaar te maken. Dat houdt in dat ze proberen te bepalen of de standaarden van lengte en tijd hier op aarde af en toe met een heel klein bedrag veranderen omdat er een gravitatiegolf voorbij komt. Een aanzienlijke moeilijkheid daarbij is, dat de ruimte als medium ontzettend stijf is: zelfs als een gravitatiegolf heel intens is, dus heel veel energie meedraagt, is de bijbehorende verandering in de ruimte uiterst minimaal: op iedere kilometer is de verandering typisch kleiner dan een duizendste van een atoomkern. Het meten van zulke veranderingen is een technische uitdaging van de hoogste orde.

De uitdijende kosmos

Dat ruimte en tijd dynamische grootheden zijn blijkt ook nog op een heel andere manier. Zo'n tien jaar nadat Einstein zijn theorie van de zwaartekracht opstelde, ontdekte Edwin Hubble in Amerika een verschijnsel dat het best valt te karakteriseren als *de vlucht van de sterrenstelsels*. Die vlucht houdt in, dat sterrenstelsels gemiddeld in alle richtingen van elkaar af bewegen met een snelheid die toeneemt met de onderlinge afstand. Je kunt dat ook zo interpreteren, dat de ruimte uitzet, terwijl de sterrenstelsels op hun plaats blijven. Dat is de manier waarop

we er volgens Einstein's theorie tegenaan moeten kijken: het heelal dijt uit, waarbij de gemiddelde afstand tussen melkwegstelsels steeds verder toeneemt. Ook hier zien we dus weer dat de ruimte geen vaste achtergrond vormt waarop het spel tussen krachten en materie zich afspeelt, maar dat de ruimte en tijd zelf aan dat spel meedoen.

Een belangrijke vraag is, wat die uitdijning drijft, en of we de waargenomen expansiesnelheid kunnen verklaren. Wat ons bij het beantwoorden van die vraag zeer veel helpt, is dat het licht zich niet oneindig snel uitbreidt. Het licht reist met de grote, maar eindige snelheid van 300.000 km/sec. Dat betekent, dat we een lichtbron zoals een ster of een sterrenstelsel niet zien zoals hij nu is, maar zoals hij was op het ogenblik dat het licht werd uitgezonden. Hoe verder weg zo'n bron, hoe langer het licht er over heeft gedaan en hoe langer geleden het op reis ging. Als we naar verre sterrenstelsels kijken, kijken we als het ware terug in de tijd.

Nu ontvangen we het licht niet precies zoals het is uitgezonden: onderweg verandert het licht van kleur, afhankelijk van de snelheid waarmee de bron t.o.v. ons beweegt: hoe sneller hij zich van ons verwijderd, hoe roder de kleur van het licht. Dit effect staat bekend als het Dopplereffect, dat ook optreedt bij geluid: hoe sneller een geluidsbron van ons af beweegt, hoe lager de toon. Door het combineren van de afstand en de snelheid van sterrenstelsels kunnen we de geschiedenis van de kosmische expansie in kaart brengen. Weliswaar is het van sterrenstelsels zelf vaak niet zo makkelijk te zeggen hoe ver ze van ons verwijderd zijn, maar in sommige sterrenstelsels zien we supernova's die we als baken kunnen gebruiken. Supernova's zijn enorme uitbarstingen van stervende sterren, sterren die aan het eind van hun kernfusiecyclus een implosie ondergaan en onder hun eigen gewicht ineensinken. Daarbij worden in korte tijd grote hoeveelheden licht, Röntgenstraling en vooral neutrino's geproduceerd. De energie die daarbij vrijkomt is tamelijk goed bekend, zodat een vergelijking van de waargenomen helderheid met de te verwachten lichtkracht een maat voor de afstand levert. De uitkomst van deze waarnemingen aan supernova's is buitengewoon verrassend: het blijkt dat de expansiesnelheid

van het heelal na 9 miljard jaar lang steeds te zijn afgenomen, in de laatste 3 miljard jaar weer aan het *toenemen* is.

De enige manier om dit in het raamwerk van Einstein's theorie te verklaren is, door aan te nemen dat de kosmos is gevuld met een gelijkmatige substantie - of misschien een soort krachtveld - met positieve energie die tegelijk een negatieve druk uitoefent. Die negatieve druk zorgt ervoor dat ondanks de uitdijning van het heelal de energie per kubieke centimeter niet of nauwelijks afneemt, en de expansie met toenemende snelheid doorgaat. Aangezien normale gassen en vloeistoffen zulke eigenschappen in het geheel niet vertonen, moet het om een vreemde, ons tot nu toe onbekende substantie gaan. En omdat we het bestaan van die substantie tot nu toe alleen uit de kosmische expansie kunnen afleiden, wordt deze eenvoudig aangeduid met de term *donkere energie*. We hebben in het heelal dus zowel donkere materie als donkere energie, waarvan we in beide gevallen niet weten wat het is. En om het nog mysterieuzer te maken: deze donkere materie en donkere energie zijn absoluut niet zeldzaam. Samen vertegenwoordigen ze op dit moment ongeveer 95% van alle vormen van massa en energie in het heelal. Zoals zo vaak in de geschiedenis van de wetenschap: naarmate we beter leren kijken zien we meer, en blijkt er meer te weten en te begrijpen te zijn.

7

De kosmische achtergrondstraling

Uit de waarneming dat het heelal in alle richtingen uitdijt volgt, dat het in het verleden veel compacter moet zijn geweest, met kleinere afstanden tussen de sterrenstelsels en een grotere dichtheid van de materie. Onder zulke omstandigheden verwacht een natuurkundige direct, dat ook de gemiddelde temperatuur in het heelal in het verleden hoger moet zijn geweest. Door terug te rekenen vanuit de huidige situatie volgt, dat ongeveer 13,5 miljard jaar geleden, toen de afstanden in het heelal in alle richtingen ruim duizend keer kleiner waren dan nu, de temperatuur meer dan 3000° K bedroeg. Gassen als waterstof en helium gaan bij die temperaturen gloeien en hun atomen worden instabiel: de elektronen krijgen zoveel energie dat ze los van de kern kunnen bewegen. Het heelal moet in

een eerdere fase daarom gevuld zijn geweest met een plasma van positief geladen kernen en negatief geladen elektronen in voortdurende wisselwerking met licht en warmtestraling. De dichtheid van dit plasma was zo groot dat die straling niet zo maar vrij door de ruimte kon reizen: zij werd voortdurend verstrooid door botsingen met vrije of los gebonden elektronen. Onder die omstandigheden was het heelal dan ook niet transparant: het plasma werkte als een mist waar licht en radiogolven niet makkelijk doorheen konden komen. Pas toen de temperatuur door uitdijning van de kosmos daalde tot onder de 3000°K , voegden elektronen en kernen zich samen tot complete atomen, en konden licht en warmtestraling vrij door de ruimte gaan reizen.

Als dit verhaal klopt, moet er nog een overblijfsel van die oergloed terug te vinden zijn: een vorm van warmtestraling waarvan de temperatuur door de universele uitdijning inmiddels dan wel tot een paar graden boven het absolute nulpunt gedaald moet zijn. Die warmtestraling is inderdaad gevonden: het universum blijkt te zijn gevuld met microgolven, dezelfde soort straling die u kent van de magnetron, met een temperatuur van 2.73°K . Deze zwakke gloed staat bekend als de kosmische achtergrondstraling, in 1964 ontdekt door Penzias en Wilson. Het is een sterke aanwijzing voor onze reconstructie van de geschiedenis van het uitdijende heelal.

Dit verhaal heeft echter ook een keerzijde. Omdat het hete plasma van waterstof en helium in het vroege heelal niet transparant was, is het niet mogelijk met een telescoop of een radiotelescoop signalen te ontvangen van voor de tijd waarin de kosmische achtergrondstraling ontstond. Het is niet mogelijk door de mist van het atomaire plasma heen te kijken en structuren te ontdekken die misschien al in dat plasma aanwezig waren. Eigenlijk is dat niet zo veel anders dan dat we niet door het oppervlak van de zon heen kunnen kijken om te zien wat daar binnenin gebeurt.

Het vroege heelal

Toch is er een mogelijke oplossing voor dit probleem. Zoals ik eerder heb uitgelegd, vindt diep in de zon kernfusie plaats,

waarbij behalve licht of Röntgenstraling ook neutrino's vrijkomen. Omdat deze superlichte deeltjes geen elektrische lading hebben, worden ze niet verstrooid door licht of aanverwante vormen van straling. Neutrino's vliegen met vrijwel de snelheid van het licht ongehinderd dwars door de zon naar buiten. Die neutrino's zijn ook op aarde waargenomen. Dat is niet makkelijk, want juist omdat die neutrino's bijna nergens gevoelig voor zijn, doen ze ook bijna niets in een meetinstrument. Toch is het gelukt de aanwezigheid van neutrino's en hun energie vast te stellen door ze te laten reageren met gewone materie, zoals water, waarin ze heel af en toe een geladen deeltje maken. We weten nu dat er inderdaad neutrino's uit de zon komen, en hoeveel. In het hete plasma dat het vroege heelal vulde moeten ook grote aantallen neutrino's aanwezig zijn geweest. Sterker, we zijn er eigenlijk van overtuigd dat die neutrino's er nog steeds zijn. Sommige van die neutrino's kunnen informatie dragen over de processen die zich in de hete oersoep van deeltjes en straling hebben afgespeeld. Als we die neutrino's zouden kunnen vangen, dan hebben we een middel om door te dringen tot een periode in de geschiedenis van de kosmos die verder terug gaat dan de kosmische achtergrondstraling, tot de tijd dat de temperatuur in het heelal misschien wel 10 miljard $^{\circ}\text{K}$ bedroeg. Op dit moment is dat nog toekomstmuziek, maar er wordt aan gewerkt ook door onderzoekers verbonden aan deze universiteit.

Bij temperaturen boven de 10 miljard $^{\circ}\text{K}$ was het heelal zelfs voor neutrino's niet meer transparant. De omstandigheden die in de eerste paar minuten van de kosmische expansie hebben geheerst waren zo extreem dat ook atoomkernen die niet zouden overleven. In dat milieu kunnen alleen losse protonen en neutronen bestaan naast hoogenergetische elektronen en neutrino's, gammastraling en zelfs vormen van antimaterie. In de voortdurende botsingen tussen deze deeltjes worden bovendien op grote schaal allerlei kortlevende instabiele vormen van materie gemaakt, in de vorm van bijvoorbeeld mesonen en muonen, deeltjes die we kennen uit experimenten met deeltjesversnellers zoals de LHC van het CERN in Genève.

of het Tevatron in Chicago. De sterke en zwakke wisselwerkingen tussen kerndeeltjes hebben in deze fase van het heelal ongetwijfeld een hoofdrol gespeeld. Onderzoek op het gebied van de deeltjesfysica en van de kosmologie vult elkaar hier dus naadloos aan; in het ene vakgebied worden de wisselwerkingen tussen individuele deeltjes in veel detail bestudeerd en in kaart gebracht, in het andere treden de eigenschappen en het collectief gedrag van grote aantallen van hoogenergetische deeltjes naar voren.

Open vragen

Wat we over deze fase van het heelal zouden willen weten is in de eerste plaats de samenstelling. De aantallen protonen en neutronen bepalen bij voorbeeld hoeveel waterstof, waar alleen protonen in zitten, en helium, waarin ook neutronen voorkomen, er uiteindelijk worden gevormd. Volgens onze berekeningen zou de verhouding van oorspronkelijke hoeveelheden waterstof en helium 3:1 moeten bedragen, wat heel goed overeenkomt met de waarnemingen van astronomen aan overgebleven gaswolken tussen de sterrenstelsels. Je zou kunnen zeggen dat de atomaire materie in het heelal voor een groot deel fossiel materiaal is waaruit we de geschiedenis van vroegere perioden kunnen reconstrueren.

Een andere vraag waar we het antwoord op zoeken is, hoe groot de lokale variaties in dichtheid en temperatuur in het heelal waren. Deze bepalen namelijk waar er later sterrenstelsels ontstaan, hoeveel en hoe groot. In het ontstaan van die variaties speelt ook de hoeveelheid donkere materie een belangrijke rol. Donkere materie oefent immers via de zwaartekracht invloed uit op de verdeling van alle materie, en omdat er zoveel donkere materie is, is die invloed groot. De variaties in dichtheid en temperatuur zijn voor een deel te herleiden uit de variaties in intensiteit en golflengte van de kosmische achtergrondstraling. Maar meer informatie zou verkregen kunnen worden uit de waarneming van gravitatiegolven. De wisselwerking van gravitatiegolven met materie is zo zwak, dat ze zelfs door een superheet en superdicht plasma heen kunnen dringen. De informatie die gravitatiegolven kunnen leveren gaat daarom nog veel verder

terug in de tijd dan die van neutrino's. In het patroon van de gravitatiegolven zouden we in principe de afdruk kunnen zien die structuren in het oerplasma van deeltjes hebben achtergelaten op de ruimte en tijd zelf. Zo zou de zwaartekracht, die de grootschalige structuur van het heelal bepaalt, ons uiteindelijk iets fundamenteels kunnen leren over de allervroegste tijden waarin de kernkrachten nog over de materie heersten.

Er zijn nog veel meer onbeantwoorde vragen over de vroegste geschiedenis van het heelal in samenhang met de deeltjesfysica: waarom bestaat onze wereld uit materie en niet uit anti-materie? Is er een verband tussen de verschillende fundamentele wisselwerkingen van de materie, en hoe past de zwaartekracht daar dan in? Is er een rol voor zwarte gaten in de deeltjesfysica? Wat is donkere energie en speelt deze een rol bij het ontstaan van het heelal? Alles wat we op dit moment over deze vragen kunnen zeggen is gebaseerd op wiskundige argumenten, extrapolatie van de succesvolle theorieën waar we nu mee werken. Die extrapolaties gaan in verschillende richtingen, maar een van de meest bestudeerde uitbreidingen van de beschrijving, die ik van materie en krachten heb gegeven, is die van een supersymmetrische wereld. Supersymmetrie is een wiskundig principe dat verband legt tussen de deeltjes waaruit de materie is opgebouwd en de wisselwerkingen tussen die deeltjes. Net zo goed als de materie golfeigenschappen heeft, kent de quantumtheorie aan wisselwerkingen deeltjeseigenschappen toe. Zo bestaat licht uit fotonen, en worden de zwakke wisselwerkingen overgebracht door zware *W*- en *Z*-deeltjes. Supersymmetrie legt een verband tussen zulke krachtdeeltjes en materiedeeltjes. Het idee is elegant, maar de uitwerking blijkt al gauw heel ingewikkeld, en voorspelt het bestaan van een groot aantal nog onontdekte, zij het meest instabiele vormen van materie. Een stabiele vorm van supersymmetrische materie zou mogelijk de donkere materie in het heelal kunnen verklaren. Of dit scenario werkt, zullen we over een paar jaar weten als de LHC zo goed blijft werken als hij nu doet. In ieder geval kunnen we om al onze open vragen te beantwoorden weliswaar een heel landschap aan wiskundige

werelden schetsen, maar of een van die werelden ook onze natuurkundige werkelijkheid beschrijft, en welke dat is, zullen we moeten afwachten.

Onderzoek en onderwijs

Dames en heren, ik heb u een nogal compact overzicht gegeven van het onderzoek dat tot mijn vakgebied behoort. Ik heb het voorrecht een belangrijk deel van mijn tijd te kunnen besteden aan fundamenteel, vrij onderzoek. Zulk onderzoek is voor een universiteit van levensbelang. Het trekt goede, vaak de beste, studenten aan. Het biedt een context waarin zij hun talenten kunnen ontwikkelen. Maar ook aan de aanbodzijde zorgt het voor beter onderwijs: een docent die als onderzoeker op de hoogte moet zijn van de laatste ontwikkelingen blijft ook in zijn of haar onderwijs meegroeien en scherp. Plezier en enthousiasme voor het vak werken bovendien aanstekelijk, naar studenten en naar collega's. Docenten en studenten motiveren elkaar om die extra stappen te zetten die nodig zijn om aan het front van de wetenschap te belanden.

Zeker in de natuurwetenschappen geldt het primaat van het participeren. Iedere student werkt ter afronding van de opleiding enige tijd mee in een onderzoeksgroep, en pas daar leer je de kneepjes van het vak. Je wordt meegenomen in een nieuwe ideëenwereld, en je leert om achter de formele onderzoeksverslagen te kijken. En je krijgt de gelegenheid ook zelf je vleugels uit te slaan. Soms komt het briljantste idee van de jongste onderzoeker. Wetenschap, zeker die waar ik over heb gesproken, is zelden het werk van eenling, maar vergt samenwerking, discussies, problemen bespreken en ook fouten maken en elkaar corrigeren. Onderzoek is in vele opzichten een sociale bezigheid, maar wel een waarin mensen elkaar uitdagen om het beste in zichzelf boven te brengen.

Het is goed deze aspecten van het wetenschapsbedrijf in het middelbaar onderwijs ook te belichten. Natuurlijk moeten leerlingen daar de nodige basisbegrippen en feitenkennis meekrijgen, en moeten er standaardsommen worden geoefend. Maar in aanraking komen met echte wetenschap, zelf ontdekken, gegevens verzamelen en interpreteren en samen

problemen oplossen kunnen op HAVO en VWO, zeker in de hogere leerjaren, het onderwijs in de natuurwetenschappen op een hoger plan tillen en leiden tot een beter geïnformeerde studie- en beroepskeuze.

Wat geldt voor het academisch onderwijs, geldt op het eigen niveau ook voor het middelbaar onderwijs: participatie in onderzoek is een middel voor verdieping en verbetering van het onderwijsaanbod. Een aantal jaren geleden hebben wij met een aantal collega's daarom het initiatief genomen voor een project waarin docenten en leerlingen van de hoogste klassen van HAVO en VWO hun onderzoeksvaardigheden kunnen ontwikkelen of opfrissen, in directe samenwerking met academische onderzoekers. Dat project draagt de naam HiSPARC, en het richt zich op onderzoek van de kosmische straling. Met het aanvaarden van mijn bijzonder hoogleraarschap aan de Universiteit Leiden heb ik ook op mij genomen dit project vanuit Leiden voor het gebied van Zuidwest Nederland te coördineren.

Wat is kosmische straling? De aarde wordt voortdurend gebombardeerd door energetische deeltjes uit de ruimte, van deels onbekende oorsprong: protonen (de kernen van waterstof), α -deeltjes (de kernen van helium) en zwaardere atoomkernen zoals koolstof of ijzer. Wanneer die deeltjes in de atmosfeer op een stikstof- of zuurstofatoom botsen veroorzaken ze lawines van nieuwe deeltjes, waarvan sommigen het aardoppervlak kunnen bereiken. De energieën van deze kosmische deeltjes lopen uiteen van zo weinig dat ze door het magneetveld van de aarde kunnen worden ingevangen, tot energieën een miljoen keer groter dan in versnellers als de LHC worden bereikt. Van de laatste categorie zijn er maar heel weinig, maar hun lawines beslaan meestal meer dan 100 vierkante kilometer op het aardoppervlak.

Om meer over deze kosmische deeltjesregen te weten te komen werkt HiSPARC aan een netwerk van deeltjesdetectoren die over heel Nederland verspreid op universiteiten en middelbare scholen staan. De detectoren worden door scholieren gebouwd, vaak in het kader van een profielwerkstuk voor het eindexamen. De gegevens van deze detectoren worden centraal verzameld en kunnen worden gebruikt voor weten-

schappelijke analyse, maar ook voor praktische opdrachten en profielwerkstukken op middelbare scholen.

Inmiddels zijn er tussen de zeventig en tachtig middelbare scholen die aan HiSPARC deelnemen. Mijn werkgever, de stichting FOM, stelt ook ieder jaar een aantal docenten in de gelegenheid om een dag in de week aan een wetenschappelijk aspect van HiSPARC te werken. Dat is voor het project van grote waarde gebleken. Docenten die zelf met het onderzoek bezig zijn geweest blijken daarna ook veel meer met het project in hun onderwijs te kunnen. Dat is precies wat ik hiervoor betoogde toen ik zei dat ook in het VWO deelname aan academisch onderzoek het onderwijs kan verdiepen en verbeteren. Ik wil FOM vanaf deze plek graag lof toezwaaien voor dit initiatief.

Dankwoord

Alvorens deze rede af te ronden wil ik graag nog een enkel woord van dank en waardering uitspreken voor diegenen die het mij mogelijk hebben gemaakt hier vandaag te staan. Velen van u weten, dat ik bijna elf jaar geleden al een openbare rede heb gehouden bij de aanvaarding van een bijzonder hoogleraarschap aan de Vrije Universiteit in Amsterdam. Bij die gelegenheid heb ik een groot aantal mensen bedankt die mij geholpen hebben het pad van de wetenschap te betreden en te volgen. Mijn dank aan hen blijft onverminderd groot. Ik wil voorts mijn waardering uitspreken voor mijn collega's aan de Vrije Universiteit in wier midden ik tien jaar lang met plezier heb vertoefd. Mijn bijzondere erkentelijkheid gaat uit naar de hooggeleerde Mulders voor zijn langdurige collegialiteit en voor de inzet waarmee hij de theoretische fysica op de Vrije Universiteit en in den lande bevordert. Tenslotte wil ik het Lorentz Fonds en het Leids Universiteits Fonds bedanken voor mijn benoeming in deze functie. Weer terug te mogen keren op mijn Alma Mater geeft een gevoel van thuiskomen. Ik zal mij inspannen het in mij gestelde vertrouwen naar beste vermogen waar te maken.

Ik heb gezegd.

PROF.DR. J.W. VAN HOLTEN



De bekende wisselwerkingen tussen verschillende vormen van materie zijn allemaal terug te brengen tot vier basiskrachten: zwaartekracht, elektromagnetisme en de zwakke en sterke wisselwerking. De laatste twee spelen vrijwel uitsluitend op subatomair niveau. Gravitatie is daarentegen juist vooral op macroscopische en kosmische schaal relevant.

Volgens de algemene relativiteitstheorie is gravitatie niet een echte kracht, maar een manifestatie van het dynamische karakter van ruimte en tijd. Deze uit zich bij voorbeeld in gravitatiegolven, rimpels in de ruimte die zich voortplanten met de snelheid van het licht. De dynamica van ruimte en tijd uit zich ook in de uitdijng van het heelal.

Het begin van de uitdijng ligt ruim dertien en een half miljard jaar terug in de tijd. In die begintijd was het heelal gevuld met een extreem heet, energetisch gas van elementaire deeltjes. De evolutie van het heelal werd vooral bepaald door

de wisselwerkingen tussen die deeltjes. Bij het bestuderen van de subatomaire materie vullen experimenten met deeltjesversnellers en kosmologische waarnemingen elkaar daarom aan. Zo wordt bij de LHC van het CERN gezocht naar deeltjes die de donkere materie in het heelal kunnen verklaren, terwijl informatie over de allervroegste geschiedenis van het heelal gevonden kan worden in neutrino's en gravitatiegolven.

De wiskundige beschrijving van de subatomaire materie en haar wisselwerkingen wordt geleverd door de quantumtheorie van velden. Deze theorie is nog in ontwikkeling, met als open vragen onder andere de asymmetrie tussen materie en antimaterie en de quantumtheoretische beschrijving van gravitatie. Nieuwe ontdekkingen in de kosmologie en astrofysica zouden inzicht in de oplossing van deze vragen kunnen leveren. Zo verbindt de subatomaire fysica de allergrootste met de allerkleinste structuren in het heelal.



Universiteit Leiden