

## NOG GEEN THEORIE VAN ALLES

*Gerard 't Hooft (1946) is hoogleraar theoretische natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Utrecht. Hij is sinds 1982 lid van de Akademie van Wetenschappen.*

**D**e theoretische natuurkunde heeft in het recente verleden spectaculaire resultaten geboekt. Het 'standaardmodel', een van die resultaten, is een model voor alle elementaire bouwstenen van de materie, waarin hun gedragingen met zeer veel precisie door wiskundige formules worden voorgeschreven. Praktisch alle natuurverschijnselen in dit heelal kunnen worden gezien als uitvloeisels van dit standaardmodel. De toekomstverwachtingen van dit vak zijn daarom heel hoog gespannen. Enerzijds verwacht men nu dat de theoretisch natuurkundige uitspraken kan doen over alle submicroscopisch kleine zowel als astronomisch grote objecten, en anderzijds dat hij zijn standaardmodel nog verder kan gaan vervolmaken.

Daar komt nog bij dat sommige collega's, vooral aan de andere kant van de oceaan, een naar mijn gevoel forse hypotheekschuld op zich hebben genomen door wat prematuur aan te kondigen dat ze de *Theory of Everything* al aan zagen komen. Om zoiets te kunnen zeggen heb je een geestesgesteldheid nodig die door Ed Regis in zijn boek *The Great Mambo Chicken* heel aardig als 'hubris' wordt omschreven: een ongebreideld optimisme ten aanzien van wat wetenschappelijk en technisch mogelijk zal zijn in de nabije toekomst. Maar wat ze op z'n best hiermee kunnen bedoelen, als ze eerlijk zijn, is dat er een theorie denkbaar is die met oneindige precisie de gedragingen van de kleinste materiedeeltjes vastlegt, uitsluitend in termen van wiskundige formules. Dat betekent in ieder geval niet dat je dan ook alle natuurver-

schijnselen automatisch 'begrijpen' kunt; je kunt alleen maar aangeven welke krachten er 'in principe' voor verantwoordelijk moeten zijn. Het verschijnsel dat we 'chaos' noemen zorgt ervoor dat de meeste natuurverschijnselen nooit 'exact' door te rekenen zijn. Zelfs als je de 'basisvergelijkingen' van een systeem helemaal kent, kunnen de details in zijn gedragingen over wat langere tijd toch geheel onvoorspelbaar worden.

Dat er een alomvattende theorie denkbaar is voor de allerkleinste materiedeeltjes, is al heel lang geleden gesuggereerd door zowel natuurkundigen als filosofen, en ook ik hecht geloof aan die mogelijkheid, zodat men mij ook verwijten mag dat ik een hypotheek op de toekomst leg. Maar ik heb er altijd bij gezegd dat die hypotheek misschien pas over vele honderden jaren en misschien wel nooit zal worden afgelost.

Wat de theoretisch natuurkundige doet is altijd: pogen algemeen geldige regels te vinden om bepaalde natuurverschijnselen te omschrijven en te verklaren, uitgaande van een bepaalde set van meer fundamentele natuurwetten waaraan de basisbestanddelen voldoen. Je kunt dit dan op twee manieren aanwenden. Je kunt hetzij die basis-natuurwetten als bekend beschouwen en dan is je doelstelling de onderzochte verschijnselen beter te begrijpen, bijvoorbeeld als je het hebt over sterren en gaswolken, over supergeleiders of over het inwendige van een kernreactor; of je probeert juist die basis-natuurwetten te achterhalen, en dan doe je meestal elementaire-deeltjesfysica. Het is dus denkbaar dat we hier over enige honderden jaren 'klaar' mee zullen zijn, maar voorlopig blijft dit een boeiende tak van de theoretische natuurkunde.

De theoretische natuurkunde kan dit niet alleen, we hebben experimentele gegevens nodig. Het wordt steeds moeilijker onze honger te stillen, want hoe dieper je in de materie wilt kijken, dat wil zeggen hoe kleiner de structuren die je wilt bestuderen, des te groter en duurder worden de apparaten die je daartoe nodig hebt. Gelukkig was wat betreft de elementaire deeltjes Europa al verenigd in de jaren vijftig, toen men in Genève het Europese centrum voor subnucleair onderzoek, het CERN oprichtte. Het nieuwste apparaat dat men daar nu heeft, bevindt zich in een cir-

kelvormige tunnel met een omtrek van 27 km en heet LEP (*Large Electron-Positron Collider*). LEP werkt buitengewoon goed en heeft ons verteld dat ons standaardmodel tot ongeveer een honderdste van de protondiameter nog zeer nauwkeurig werkt. Eigenlijk vonden velen van ons dat een beetje jammer, want we hadden gehoopt meer afwijkingen te vinden die ons intellect verder op de proef zouden stellen.

Europa hoopt zijn positie ten opzichte van de Verenigde Staten binnenkort verder te verstevigen door te gaan bouwen aan de opvolger van LEP, de LHC (*Large Hadron Collider*), die, gebruik makend van dezelfde tunnel, protonen tegen elkaar laat botsen ieder met een energie van circa acht tera-elektronvolt, wat zou corresponderen met een elektrische spanning van acht biljoen Volt. Dan kun je structuren zien bij een duizendste van de protondiameter. De Amerikanen zien dit met lede ogen aan. Zij hebben hun plannen voor een nog groter apparaat, de SSC (*Superconducting Supercollider*), al klaar. Dit is een nog veel grotere machine die in Texas zal komen en in de buurt van de twintig tera-elektronvolt per deeltje zal komen. Maar de bouw van dit ding zal aanzienlijk langer duren. De tunnel moet nog gegraven worden en de kosten zullen een veelvoud zijn van LHC; men kampt met aanzienlijke budgetproblemen. Bijgevolg zal LHC voor de eeuwwisseling al ruimschoots in bedrijf kunnen zijn, maar SSC nog niet. Dit is een gezonde competitie tussen Europa en Amerika waar wij deeltjesfysici wel bij varen.

Dat de huidige machines zoals LEP geen afwijkingen konden vinden van het standaardmodel kwam niet als een verrassing. Maar het model begint te wankelen. Bij een duizendste van de protondiameter wordt het pas echt onbevredigend, van wiskundig oogpunt bezien. Het is daarom dat wij zeer benieuwd zijn naar de bevindingen van LHC en SSC.

Wij voorzien twee mogelijkheden. Deeltjes die nu nog 'fundamenteel' lijken te zijn zouden een verdere substructuur kunnen bezitten, doordat ze zijn opgebouwd uit nog kleinere bouwstenen—in een boek dat binnenkort uitkomt zet ik uiteen waarom deze bouwstenen "quinks" zouden moeten heten. Met name zouden we dit verwachten bij het Higgsdeeltje. Dat is het deeltje dat zodanige wisselwerkingen met de rest van de deeltjes onder-

gaat dat ze deze meer 'asymmetrisch' maken, en ons standaardmodel is zodanig geformuleerd dat alleen daardoor de deeltjes massa kunnen hebben. Maar we hebben nog een lange weg te gaan, want het Higgsdeeltje zelf is nog steeds niet ontdekt. Het zal al heel belangrijk zijn als we zijn massa kunnen bepalen. Nu weten we slechts dat dit een getal is tussen de vijftig en duizend tera-elektronvolt. Nu lijkt de aanname van een nieuwe "laag" van fundamentele bouwstenen erg voor de hand liggend, maar dat is ze niet, want die bouwstenen zouden door hun kleine afmetingen heel zwaar moeten zijn, terwijl de objecten die ervan gemaakt moeten worden veel lichter zijn. Alsof je van loodzware stalen balken een hyperlichte racefiets probeert te construeren. Wiskundig is dat heel moeilijk en dit soort theorieën zien er erg gekunsteld uit.

We hebben een eleganter alternatief. Er is een nieuw soort symmetrie. Men vermoedt dat we 'supersymmetrie' zullen krijgen. Dit is een symmetrie-relatie tussen deeltjes die met verschillende snelheden om hun as tollen. We hebben deeltjes met spin 1, deeltjes met spin 1/2, en deeltjes met spin 0 (de laatste draaien niet). In ons huidige standaardmodel zijn deze deeltjes heel verschillend. Supersymmetrie vereist een relatie tussen deeltjes met spin 1/2 en deeltjes met heeltallige spin. Ik heb zelf enige moeite met deze symmetrie omdat ik niet kan begrijpen waarom we er nog steeds helemaal niets van gemerkt hebben. Alle nu bekende deeltjes moeten 'superpartners' hebben, dat zijn deeltjes waarvan de spin een halve eenheid anders is, maar van geen van de bekende deeltjes is de superpartner bekend. Dit vind ik zorgwekkend.

Maar er is een derde mogelijkheid, die ik niet kan voorzien, namelijk het onverwachte. Het zou bijvoorbeeld kunnen dat er een stortvloed van nieuwe deeltjes op ons af zal komen die we niet thuis zullen kunnen brengen. Of het omgekeerde, namelijk dat er helemaal niets gebeurt en het standaardmodel geldig blijft zelfs als dat, 'logisch beredeneerd', niet verwacht mocht worden. Onze *educated guess* is dat deze dingen niet zullen gebeuren, maar helemaal zeker kunnen we er niet van zijn.

Wij zijn er uiteraard heel benieuwd naar welk van deze mogelijkheden gerealiseerd zal zijn. LHC en SSC zullen waarschijnlijk

nog lang niet alle antwoorden kunnen geven. We zullen nog maar een glimp van die 'nieuwe fysica' te zien krijgen, en dat als alles meezit. Waarschijnlijk zullen de machines ons voor nieuwe raadsels plaatsen, en het is nog maar de vraag of het antwoord daarop wederom een 'standaardmodel' zal zijn waar we met evenveel tevredenheid op zullen kunnen terugzien als ons huidige model.

LHC en SSC zullen nog lang niet het eind betekenen van deze tak van fysica. Men heeft weleens berekend hoeveel energie je kunt bereiken, per deeltje, als je uitgaat van experimentele technieken die nu bekend zijn, en eventjes niet let op de prijs. Het antwoord komt dan uit op ongeveer tweehonderd tera-elektronvolt, dus nog tienmaal verder dan SSC. De Italiaanse fysicus Antonino Zichichi probeert zijn collega's ervan te overtuigen dat het bouwen van zo'n apparaat werkelijk mogelijk is. Hij heeft al ideeën voor een cirkelvormige tunnel die net onder het eiland Sicilië kan en waarin deeltjes tot tweehonderd tera-elektronvolt versneld kunnen worden. En, zegt hij, als de wil er is komt het geld ook wel. Nino schijnt nogal bezorgd te zijn over de toekomst van de wereld. Hij denkt dat zijn machine waarschijnlijk de laatste zal zijn. De islam rukt al op.

Toch lijkt het mij in de praktijk verstandiger als je niet ineens zo'n grote stap probeert te maken, maar steeds een nieuw apparaat ontwerpt dat een factor twee, vijf, of hoogstens tien verder komt dan het vorige. En daar moeten we dan maar de tijd voor nemen. Maar het is belangrijk dat er mensen rondlopen met visies voor de wat verdere toekomst. Wat de meesten van ons hopen is dat er nieuwe en verbeterde technieken zullen komen om deeltjes efficiënter, dus voor minder geld, tot nog hogere energieën te versnellen.

Maar ja, ik verwacht wel dat er een limiet zal zijn waar men niet meer bovengaan zal kunnen komen. We zijn al niet zo heel ver meer af van het punt waarop het onredelijk duur zal worden om te proberen een nog hogere energie te bereiken. En zelfs als men onbeperkt veel geld zou spenderen aan dit soort onderzoek, stelt de techniek ons voor limieten. Het is wat al te naïef te denken dat 'de wetenschap' almaar nieuwe verbeteringen zal weten te ver-

zinnen die ons verder zullen helpen. Ja misschien zullen nieuwe methodes ons voorbij die tweehonderd tera-elektronvolt van Zichichi kunnen brengen, maar niet zo heel veel verder. Je kunt de natuurwetten niet buiten werking stellen zoals een dictator een grondwet buiten werking stellen kan. Misschien halen we ooit wel eens duizend TeV of zo, maar dan heb je het vrees ik wel gehad.

Theoretici zouden veel verder willen komen. Er is een heel belangrijk gebied bij 10.000.000.000.000.000 tera-elektronvolt. Daar gaat de onderlinge zwaartekrachtwerking belangrijker worden dan alle andere krachten, en we weten nog helemaal niet hoe dat wiskundig moet worden behandeld. Het is hier dat men een 'fundamentele natuurwet' mag verwachten omdat je dan bij de allerkleinst denkbare structuren terecht bent gekomen. Er is dus een enorme 'getalbarrière' en het is heel erg de vraag of we ooit in staat zullen zijn met theoretisch denkwerk die te doorbreken. Ik zie hier een geweldige uitdaging aan het adres van de theoretisch fysici. Wat is de fundamentele natuurwet? De komende tientallen jaren mogen we nog steeds nauwkeurige aanwijzingen verwachten afkomstig van experimenten met dure machines, maar het is te verwachten dat we daarna steeds meer aangewezen zullen zijn op theorievorming en rekenwerk. Misschien wel met hyper-krachtige computers, want op dat gebied zal er nog heel veel mogelijk zijn. En we hebben ook altijd nog de 'kosmologie', het bestuderen van de beginfase van ons heelal. Die kun je zien als een eenmalig uitgevoerd 'experiment', vijftien miljard jaar geleden. De deeltjes die daarbij vrijkwamen vliegen ons nu nog om de oren, en doordat astronomen ons heelal zoals het er nu uitziet nauwkeurig bestuderen, bereiken ons ook steeds weer interessante gegevens.

Onze theorieën kunnen altijd getoetst worden, simpelweg door te kijken hoe goed ze werken. Het standaardmodel zoals dat er nu uitziet bevat ongeveer twintig fundamentele getallen, 'natuurconstanten', die je uit de gegeven eigenschappen van de deeltjes kunt bepalen, maar waarvan we niet weten waarom ze de waarden hebben die ze hebben. Iedere theorie die op een geloofwaardige manier een of meer van die getallen kan 'afleiden' zullen we omhelzen.

Zelfs als we ooit tegen die ene fundamentele natuurwet aan zullen lopen, en zouden kunnen zeggen dat we de basiswetten van de natuur kennen, dan nog zal de natuurkunde (uiteraard) nooit 'af' zijn. Ten eerste zal men altijd wel blijven twijfelen of de formulering echt wel goed is en zal men allerlei tests en berekeningen willen blijven uitvoeren. Ten tweede moet men goed bedenken dat dit slechts één van de takken van de theoretische natuurkunde is. Theoretische kernfysica, vaste-stoffysica, plasmafysica en noem maar op zijn takken van de fysica waarvan misschien wel de 'basiswetten' bekend mogen worden geacht, maar waar het er om gaat de gedragingen van die systemen te formuleren en te verklaren met behulp van een heleboel wiskunde. Al die takken van de fysica zullen niet of nauwelijks door de bevindingen van de deeltjesfysica worden beïnvloed.

Overigens zal een fundamentele basiswet uit twee gedeeltes moeten bestaan: enerzijds de basiswetten op, zeg maar, microscopisch niveau, die vertellen hoe de fundamentele materiedeeltjes op elkaar inwerken, en ten tweede een formulering van de 'randvoorwaarden': hoe ziet de 'rand' van het heelal eruit? Of, wat aannemelijk is, is het heelal 'rond' zodat het als een cirkel aan zichzelf grenst? Zo ja, hoe zit dat dan precies? En voorts: hoe begon het heelal, en eventueel: zal het eindigen? Hoe?

Een aantal jaren geleden dachten sommigen met de zogeheten 'Superstringtheorie' het antwoord op al deze vragen 'bijna' te kunnen leveren. Dat was voorbarig en naïef. Die intuïtie was gebaseerd op een aantal nogal opmerkelijke wiskundige aspecten van dat systeem, waar men door geïntrigeerd werd. Maar ik vind die theorie wiskundig een gedrocht, en ik hoop niet dat de uiteindelijke versie van de theoretische deeltjesfysica er zo zal gaan uitzien. Het is nu heel erg stil rond de superstring. Een soort rouwstemming.

Ik geloof niet in vragen die 'nooit opgelost kunnen worden', maar wel in vragen die verkeerd zijn gesteld. Daar zijn er natuurlijk legio van.

Een van de allerbelangrijkste vragen nu is hoe we de wetten van de quantummechanica kunnen rijmen met de wetten van de zwaartekracht. Deze vraag dwingt je je nogmaals te bezinnen op

de aloude vraag hoe we de quantummechanica moeten interpreteren. In de geschiedenisboekjes lezen we dat de discussie tussen Albert Einstein en Niels Bohr nu ten gunste van Bohr is beslecht. Volgens deze is het onmogelijk de onzekerheid die de quantummechanica in de gedragingen van de deeltjes teweegbrengt in een deterministische theorie te elimineren (zoals Einstein dat wou). Dit baseert men op de *no-go theorems* van John Bell. Maar ik ben daar nog niet van overtuigd. Als je de zwaartekracht onderzoekt krijg je sterk het gevoel dat er een uitweg moet zijn en dat Einstein uiteindelijk toch gelijk zal krijgen. Maar hoe rijmen we dat met de theorema's van Bell? Zal het mogelijk zijn de onbepaaldheden en onzekerheden van de quantummechanica toe te schrijven aan 'chaos' in de micro-wereld? Ik heb daar zo mijn ideeën over. Voor mij is deze zestig jaar oude vraag nog steeds actueel.