

Jan de Boer

## De toekomst van theoretische natuurkunde

*Er heerst onder sommige natuurkundestudenten nogal wat onrust: "Is er straks nog wel wat te doen voor mij in de theoretische fysica?" is een veel gestelde vraag. Daarom heeft de Scoop prof. Jan de Boer, stringtheoreticus aan het front, gevraagd naar zijn visie over de toekomst van de theoretische natuurkunde.*



Figuur 1 - Jan de Boer.

Hoe ziet de toekomst van de theoretische natuurkunde eruit? Dat is een ontzettend moeilijke vraag. In de hele verre toekomst ziet het er in ieder geval niet al te best uit. Volgens recente waarnemingen dijt het heelal steeds sneller uit en over tien miljard jaar zijn er waarschijnlijk geen theoretisch fysici in het heelal meer te bekennen. Ook geen andere fysici overigens, dit probleem is niet specifiek aan een bepaalde tak van wetenschap gekoppeld.

Dus laten we een wat minder lange termijn nemen, zeg vijfhonderd jaar. Vijfhonderd jaar geleden bestond theoretische natuurkunde als vak nog niet eens. Het is dus zeer de vraag of het er over vijfhonderd jaar nog wel zal zijn. De centrale vraagstelling van de theoretische natuurkunde: "beschrijf kwantitatief de werking van de natuur", zal ongetwijfeld nog niet in zijn geheel beantwoord zijn, maar het is goed mogelijk dat de methode van werken behoorlijk zal verschillen van die van tegenwoordig. Maar aangezien ondergetekende geen familie van Nostradamus is zal ik mij beperken tot de meer nabije toekomst.

### De stand van zaken

Waar staan we nu in de theoretische natuurkunde? Staan we midden in een opwindende periode waarin van alles gebeurt, of heeft de theoretische natuurkunde zijn beste tijd gehad? Dat laatste is een gevaarlijke conclusie om te trekken. Een soortgelijk idee circuleerde aan het einde van de 19e eeuw, toen het leek alsof de toen bekende natuurkunde alles wel zo'n beetje kon verklaren, op een paar onbeduidende details na. Die onbeduidende details zouden later aanleiding geven tot de speciale en algemene relativiteitstheorie, en de quantummechanica. We moeten dus vooral geen ondoordachte uitspraken doen en zorgvuldig nagaan of er ergens nog niet wat onbeduidende details op ons liggen te wachten.

Hoe staat het bijvoorbeeld met de gecondenseerde materie? Een vraag die direct in het oog springt is of er al een verklaring is gevonden voor hoge  $T_c$

supergeleiding. Het antwoord daarop is nee. Interessant is dat er wel een microscopisch model bestaat, het zogenaamde Hubbard-model, waarvan velen geloven dat het in principe in staat is om hoge  $T_c$  supergeleiding te verklaren, maar nog niemand heeft dat echt kunnen bewijzen. (Ik moet uitkijken met wat ik hier zeg, dit vakgebied is vol controverse en werd door een collega vergeleken met "swimming in a toilet"). Dit brengt ons bij een nogal onbevredigende situatie, die ook elders in de theoretische natuurkunde voorkomt. Aan de ene kant menen we een precieze beschrijving van een stuk natuurkunde te hebben, maar aan de andere kant kunnen we dat stuk natuurkunde er niet exact of zelfs numeriek uithalen. Dat kan te maken hebben met de onmacht van ons fysici; de vergelijkingen kunnen te ingewikkeld zijn om op te lossen en de huidige computers zijn niet snel genoeg om de vergelijkingen betrouwbaar numeriek op te lossen. Het kan ook zijn dat de fysica een heel ingewikkeld collectief fenomeen is in een simpele onderliggende theorie, waarvoor de taal die gebruikt wordt om de onderliggende theorie te beschrijven volstrekt ontoereikend is. In dat geval moeten er een nieuwe taal en een nieuw model gevonden worden die wel toepasbaar zijn. Hoge  $T_c$  supergeleiding lijkt in deze laatste categorie te vallen, en het is nog steeds een formidabele uitdaging om deze nieuwe taal te vinden.

Er zijn natuurlijk ook systemen waarvoor zo'n nieuwe taal gewoon niet bestaat. Dat zijn chaotische systemen, en alhoewel die ook aan diverse wetmatigheden voldoen is het precies voorspellen van het langetermijngedrag van zo'n systeem totaal onmogelijk. Het meest bekende voorbeeld hiervan is het weer. Met de komst van steeds krachtigere computers worden de voorspellingen weliswaar steeds ietsje beter, maar echte goede langetermijnvoorspellingen zullen er waarschijnlijk nooit komen.

Nu we het toch over computers hebben, computers spelen een steeds belangrijkere rol in de wetenschap. Als er gerekend moet worden zijn computers veruit superieur aan de mens. Met behulp van computers kunnen gecompliceerde resultaten uit simpele modellen verkregen worden, en op deze manier kan een model aan de werkelijkheid getoetst worden. Critici zouden kunnen aanvoeren dat je op deze manier nooit de resultaten en dus de fysica echt goed kunt "begrijpen", maar het is duidelijk vooruitgang als we een model in ieder geval numeriek kunnen verifiëren.

Wat nog in de kinderschoenen staat is het gebruik van computers om exacte symbolische manipulaties uit te voeren. Programma's zoals Maple en Mathematica kunnen dat tot op zekere hoogte, maar er is nog een lange weg te gaan voordat programma's ook zelfstandig oplossingen kunnen leveren voor wiskundige of fysische vraagstukken. Wellicht zullen computers nooit de menselijke geest en zijn creativiteit kunnen evenaren, maar mocht dat wel het geval zijn dan zal er een moment komen dat we de wetenschap maar beter aan

computers kunnen overlaten. Met wat fantasie leidt dit tot science fiction-achtige beelden van computers die de wereld overnemen en dat is niet de kant die ik met dit betoog op wil. Voor een interessante discussie zie [www.wired.com/wired/archive/8.04/joy\\_pr.html](http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy_pr.html).

De ontwerper van Mathematica, Stephen Wolfram, is overigens van mening dat computers van fundamenteel belang zijn. Hij probeert in een recent verschenen zeer dik boek "A New Kind of Science" (met, het dient gezegd, prachtige plaatjes erin) te beargumenteren dat de toekomst van de theoretische fysica ligt in zogenaamde cellulaire automaten. Dat zijn relatief eenvoudige discrete systemen die zich via eenvoudige regels in de tijd voortplanten. Een van de simpelste niet-triviale voorbeelden is het spelletje life. Hij illustreert in zijn boek dat je met simpele regels al heel ingewikkeld gedrag kunt creëren, wat vooral goed te zien is in computersimulaties. Hij gaat echter zover om te stellen dat dit uiteindelijk de manier is om over de wereld na te denken. Volgens hem zijn situaties waarin we wel goede vergelijkingen hebben om dingen te beschrijven, zoals de algemene relativiteitstheorie, een toevalstreffer, en bestaan zulke regels in het algemeen niet. Er is op de wereld met zeer matig enthousiasme op dit idee gereageerd. De theorieën die de natuurkunde heeft voortgebracht zijn toch echt te mooi om allemaal toevalstreffers te zijn, bovendien lijkt zijn belangrijkste bewijsmateriaal uit mooie plaatjes te bestaan. Het is echter goed om toch af en toe bij dit soort mogelijkheden stil te staan. Interessant genoeg is één van Neerlands bekendste fysici, Nobelprijswinnaar 't Hooft, zelf ook aan het nadenken over cellulaire automaten in een poging een theorie te vinden die nog fundamenteler is dan de quantummechanica. Waarvan quantummechanica slechts een nadering is.

Na deze zijsprong naar computers keren we weer terug naar het oorspronkelijke verhaal. Ik heb al iets gezegd over gecondenseerde materie, maar hoe zit het in andere disciplines in the theoretische natuurkunde? Een trend die duidelijk zichtbaar is de neiging om meer multidisciplinair onderzoek te gaan doen, zoals biofysica, levenswetenschappen en dergelijke. Dit zijn bij uitstek voorbeelden van vakgebieden waar modelvorming cruciaal is. Als we bijvoorbeeld willen begrijpen hoe een moleculaire motor werkt, dan is de precieze microscopische theorie in principe voorhanden, het is echter onmogelijk om daaruit de werking van een moleculaire motor te destilleren en de kunst is om een eenvoudig model te vinden dat het essentiële mechanisme beschrijft. Ook hierbij speelt de computer weer een belangrijke rol. Een enkele purist zou kunnen klagen dat dit niets meer met de fundamentele oorspronkelijke doelstellingen van de theoretische natuurkunde te maken heeft. Zonder deze discussie te willen aangaan laten we daarom de rest van de theoretische natuurkunde nu achter ons en kijken naar de discipline die wellicht de meest fundamentele vragen pretendeert te bestuderen, namelijk de theoretische hoge-energiefysica.

### **Hoge-energiefysica: de ultieme vragen**

De centrale doelstelling van de theoretische hoge-energiefysica is om een beschrijving te geven van alle fundamentele deeltjes en krachten in de natuur, waaruit alles verder is opgebouwd. In principe, maar absoluut niet in de praktijk, zou alle bekende hedendaagse fysica uit deze fundamentele ingrediënten af te leiden moeten zijn.

Voor drie van de vier natuurkrachten, namelijk elektromagnetisme en de zwakke en sterke kernkracht, bestaat een uitstekende theorie, het zogenaamde standaardmodel. Dit model is met zeer grote precisie experimenteel geverifieerd, nauwkeuriger dan welke andere theorie dan ook. Met enige regelmaat verschijnen berichten in de media dat er een meting is gedaan waarvan het resultaat niet met het standaardmodel overeenkomt, het laatste voorbeeld hiervan is een meting van het anomale magnetische moment van het muon in Brookhaven. Deze discrepantie is nog niet helemaal weggewerkt, maar bleek voor het grootste gedeelte te liggen aan een minteken in een computerprogramma. Vooralsnog staat het standaardmodel als een huis.

De experimenten die gedaan worden om het standaardmodel te testen maken gebruik van grote en erg dure versnellers. Om telkens hogere energieën te kunnen bereiken zijn steeds grotere en duurdere versnellers nodig. Op dit moment lopen grote experimenten in Desy bij Hamburg in het Fermilab bij Chicago. De eerstvolgende stap in energie wordt niet voor 2007 verwacht, wanneer de LHC (Large Hadron Collider) in CERN in werking gesteld zal worden. Er zijn plannen om een tiental jaren later ergens een grote lineaire versneller te bouwen, maar het is niet ondenkbaar dat het daarna economisch niet meer op te brengen valt om nog een stap verder te gaan. Het einde van de experimentele hoge-energiefysica en daarmee ook van de theoretische?

Ook dat is een wat overhaaste conclusie. Er zijn goede redenen om te verwachten dat de komende versnellers resultaten zullen produceren die niet door het standaard model verklaard kunnen worden, "physics beyond the standard model". Er zijn grofweg drie types resultaten te verwachten.

Het eerste heeft te maken met het Higgs-deeltje. Dit deeltje is een cruciaal onderdeel van het standaardmodel, het is nodig om symmetrieën te breken en massa's aan andere deeltjes te geven, maar het is nog niet waargenomen. Het gedeelte van het standaardmodel dat het Higgs-deeltje beschrijft is het meest lelijke gedeelte van het model, we weten bijvoorbeeld niet of er slechts één Higgs deeltje is of meer, en of het wel echt een fundamenteel deeltje is. Wellicht zullen deze vragen in de nabije toekomst beantwoord worden.

Het tweede type resultaat heeft te maken met supersymmetrie. Dat is een symmetrie die bosonen en fermionen aan elkaar relateert, en in de natuur nog niet is waargenomen. Eén van de fascinerende eigenschappen van het standaardmodel is dat als je het zodanig uitbreidt dat het supersymmetrisch wordt, de drie krachten die het beschrijft een gemeenschappelijke oorsprong lijken te hebben. Zo'n unificatie van krachten is esthetisch erg aantrekkelijk, en er is goede hoop dat supersymmetrie de komende jaren experimenteel aangetoond kan worden.

Het derde type resultaat kan samengevat worden als ??????. We meten iets, maar de resultaten zijn erg exotisch. In de context van stringtheorie, waarover zodadelijk meer, is het denkbaar dat onze wereld ingebed is in een hogerdimensionale ruimte. Wij kunnen niet ontsnappen in die extra dimensies, maar energie wel. Als we dus in een experiment bijvoorbeeld energie in het niets zien verdwijnen zou dat een aanwijzing kunnen zijn voor dit scenario. Een gerelateerde mogelijkheid is dat in versnellers zwarte gaten in de hogere dimensies gecreëerd kunnen worden, en ook dit zou duidelijke experimentele consequenties hebben. Kortom, de wonderen zijn de wereld nog niet uit.

In al deze gevallen is er werk aan de winkel voor de theoretische hoge-energiefysica, en het kan heel lang duren voordat we het standaardmodel vervangen hebben door iets beters met een vergelijkbare voorspellende kracht. Zelfs als die stap gezet is, blijven er genoeg vragen over. Zijn alle parameters in zo'n model willekeurig of kunnen die verklaard worden in termen van een kleiner aantal parameters? Hoe reken je ingewikkelder grootheden, zoals de massa van het proton, uit in termen van deze parameters? Dit soort vragen alleen al biedt genoeg materiaal om de theoretisch fysici een groot gedeelte van de komende eeuw van de straat te houden. En afgezien van bovengenoemde versnellerexperimenten zijn er nog genoeg andere experimentele resultaten om mee te werken, zoals metingen van neutrinomassa's, kosmologische observaties, etc.

Het verhaal is echter nog lang niet af met alleen het standaardmodel. Een hele belangrijke fundamentele kracht, de zwaartekracht, is nog niet in het verhaal meegenomen. Er bestaat een hele goede theorie van zwaartekracht, de algemene relativiteitstheorie van Einstein. Ook deze theorie staat als een huis. Er is echter een conceptueel probleem, de algemene relativiteitstheorie is een klassieke theorie, terwijl het standaardmodel een quantumtheorie is. Het samenvoegen van deze twee theorieën gaat daarom niet. Voor experimenten die we op aarde kunnen doen is zo'n gecombineerde theorie niet nodig, maar als we hele extreme situaties in het heelal willen begrijpen, zoals zwarte gaten en de big bang, dan is zo'n theorie wel degelijk noodzakelijk. Een veel fundamenteelere vraag dan die van de oorsprong van het heelal is moeilijk denkbaar.

## Stringtheorie

Stringtheorie is een veelbelovende kandidaat theorie die zowel zwaartekracht alsmede de drie krachten zoals die in het standaardmodel voorkomen bevat. In het bijzonder is het een quantumtheorie van zwaartekracht. Het zou kunnen lijken of de theoretische natuurkunde hiermee af is, maar het tegendeel is waar, het is slechts het begin van een nieuw hoofdstuk in de natuurkunde. Stringtheorie heeft reeds een lange reeks conceptuele successen geboekt. We begrijpen nu veel meer van de vrijheidsgraden die een rol spelen in quantumgravitatie, van de manier waarop we een zwart gat moeten beschrijven, van processen waarbij de geometrie van ruimte-tijd verandert, van de verschillende manieren waarop een vrijheidsgraad zich kan manifesteren, soms als deeltje, soms als string, soms als membraan, enzovoorts. Er is echter heel veel dat we nog niet begrijpen. We begrijpen nog niet precies hoe we het standaardmodel uit stringtheorie moeten halen, of hoe het kan dat supersymmetrie geen exacte symmetrie van onze wereld is. Gek genoeg is er een nog fundamenteeler probleem: het is erg moeilijk om ons heelal met behulp van stringtheorie te beschrijven. Uit de recente waarnemingen waarnaar in het begin gerefereerd werd blijkt dat het heelal een positieve kosmologische constante heeft. Deze kosmologische constante, soms ook wel donkere energie genaamd, zorgt ervoor dat het heelal steeds sneller uitdijt. Het is relatief eenvoudig om in stringtheorie een negatieve kosmologische constante, of een constante gelijk aan nul te beschrijven. Maar een positieve kosmologische constante is zeer problematisch. Het zou kunnen zijn dat dit slechts een technisch probleem is, maar het zou er ook op kunnen wijzen dat de manier waarop we tegen stringtheorie aankijken nog niet helemaal deugt. Iets soortgelijks geldt voor singuliere situaties zoals de big bang. Het idee dat het heelal op een bepaald moment begon is waarschijnlijk veel te naïef. Een van de eigenschappen van een theorie van quantumzwaartekracht is dat ruimte en tijd quantumobjecten zijn, die net zoals alle andere quantumobjecten niet altijd een precieze betekenis hebben. Vooralsnog begrijpt niemand hoe we de begrippen tijd en ruimte los kunnen laten terwijl we nog wel zinnige fysica bedrijven.

Al met al is theoretische fysica een onderwerp dat volop in beweging is en nog lang niet af. Dat zal ook nog wel even zo blijven. Wat mij betreft ziet de toekomst van de theoretische fysica er dan ook zeer rooskleurig uit.