

Inhoudsopgave

Voorwoord	9
1. Het beste verhaal ooit	11
2. Op aarde zoals in de hemel	24
3. Er zij licht	34
4. Tussen de sterrenstelsels	44
5. Donkere materie	53
6. Donkere energie	66
7. De kosmos in het systeem	81
8. Ronde vormen	96
9. Onzichtbaar licht	105
10. Tussen de planeten	119
11. Exoplaneet aarde	128
12. Overpeinzingen over het kosmisch perspectief	139
Dankwoord	151
Index	153

Voorwoord

Er gaat nauwelijks een week voorbij zonder krantenkoppen over een of andere kosmische ontdekking. Misschien hebben diverse redacties belangstelling gekregen voor het universum, maar waarschijnlijk komt die extra aandacht doordat het publiek echt meer geïnteresseerd raakt in wetenschap. Je ziet het bijvoorbeeld aan de vele populair-wetenschappelijke tv-programma's met vooraanstaande acteurs en de succesvolle sciencefictionfilms uitgebracht door beroemde regisseurs en producers. Daarnaast is er een compleet nieuw genre films ontstaan in de vorm van biografieën van belangrijke wetenschappers. Over de hele wereld is er veel belangstelling voor wetenschapsfestivals, bijeenkomsten gewijd aan sciencefiction en wetenschappelijke documentaires op tv.

De lijst van meest succesvolle films aller tijden wordt aangevoerd door *Avatar*, een film van een beroemd regisseur met een verhaal dat speelt op een planeet bij een verre ster. Een beroemde actrice speelt er de rol in van een astrobioloog. Veel wetenschappen krijgen op het ogenblik meer belangstelling, maar astrofysica toch wel het meest. Ik denk dat ik weet waarom. Iedereen heeft ooit weleens opgekeken naar de nachthemel en zich afgevraagd wat dit allemaal betekende. Hoe werkt dit allemaal? En wat is mijn plaats in het universum?

Als je het te druk hebt om de kosmos te begrijpen door hierover lessen te volgen, leerboeken te lezen of documentaires te bekijken, maar toch een korte inhoudelijke inleiding in het vak wilt hebben, dan is *Sterrenkunde voor mensen met haast* misschien iets voor je. Met dit boek

kun je vertrouwd raken met de voornaamste ideeën en ontdekkingen waar ons huidige begrip van het universum op berust. Als ik slaag, ben je goed op de hoogte van wat er in mijn vak omgaat, en misschien krijg je wel trek in meer.

Het universum is niet verplicht iets voor jou te betekenen.

Neil deGrasse Tyson

1. Het beste verhaal ooit

*De wereld bestaat al vele jaren,
sinds ze in de juiste beweging werd gezet.
Daar volgt al het andere uit.*

Lucretius

Aanvankelijk, ongeveer 14 miljard geleden, was de hele ruimte en alle massa en alle energie van het bekende universum samengebald in een ruimte niet groter dan een biljoenste van de punt aan het eind van deze zin.

Het was toen zo heet dat alle fundamentele krachten die tezamen de natuur beschrijven verenigd waren. We weten nog niet hoe deze kosmos ontstond, maar dit onvoorstelbaar kleine spikkeltje kosmos kon alleen maar uitdijen. En snel. Dat noemen we tegenwoordig de oerknal of Big Bang.

Begin 1916 publiceerde Einstein zijn algemene relativiteitstheorie, die het moderne begrip gaf van hoe de zwaartekracht werkt. De aanwezigheid van massa en energie tezamen maakt dat het weefsel van ruimte en tijd gekromd is. Vanaf ongeveer 1920 werd de kwantummechanica ontwikkeld, en die verschafte ons een begrip van alles wat klein is: moleculen, atomen en nog kleinere deeltjes. Deze twee inzichten in hoe de natuur werkt, kloppen niet met elkaar. Dit leidde tot een wedstrijd onder natuurkundigen wie het eerst de theorieën van het hele kleine en hele grote met elkaar kon combineren in een enkele samenhangende theorie van kwantumzwaartekracht. Deze race is nog niet gelopen, maar we weten

wel precies waar de hoge horden staan. Eén horde is het 'Planck-tijdperk' van het universum. Dat is de eerste 10^{-43} seconde van het heelal, dat toen nog geen 10^{-35} meter groot was. In woorden: een tien miljoenste van een triljoenste van een triljoenste seconde en tien triljoensten van een triljoenste meter. Deze onvoorstelbaar kleine grootheden (namelijk de Planck-tijd en de Planck-lengte) zijn genoemd naar de Duitse natuurkundige Max Planck, die als eerste op het idee kwam dat energie gekwantiseerd is en daarom door velen beschouwd wordt als de vader van de kwantummechanica.

Het conflict tussen zwaartekracht, dat wil zeggen de algemene relativiteitstheorie, en kwantummechanica heeft geen praktische gevolgen in ons huidige universum. Astrofysici gebruiken ze allebei, maar voor totaal verschillende problemen. Maar helemaal in het begin, in het Planck-tijdperk, was het grote klein en we denken dat de twee een gedwongen huwelijk sloten. Helaas hebben we nog steeds geen flauw idee welke huwelijksbeloften er toen werden afgelegd. Wat we weten van natuurkundige wetten geeft ons geen enkel betrouwbaar idee van wat er toen gebeurde.

Niettemin denken we dat de zwaartekracht zich tegen het eind van het Planck-tijdperk losmaakte van de andere natuurkrachten, die nog steeds verenigd zijn, en dat ze zich van toen af netjes gedroeg volgens onze huidige theorieën. Na het Planck-tijdperk bleef het universum uitdijen, de energie werd minder geconcentreerd en de overgebleven verenigde krachten splitsten zich verder in de zogeheten elektrozwakke kracht en de sterke kernkracht. Nog later splitste de elektrozwakke kracht zich in de elektromagnetische en de zwakke kernkracht. Op

dat ogenblik stonden onze geliefde vier krachten op eigen benen: de zwakke kernkracht, waar we alleen wat van merken bij radioactief verval, de sterke kernkracht die de atoomkernen bij elkaar houdt, de elektromagnetische kracht die voor de moleculen zorgt en de zwaartekracht die grote massa's zoals planeten, sterren en sterrenstelsels bij elkaar houdt.

*

Nu is er een biljoenste seconde voorbij.

*

Tot dan toe was er onophoudelijk interactie tussen materie in de vorm van elementaire deeltjes en energie in de vorm van fotonen. Dat zijn porties lichtenergie zonder rustmassa, die zowel deeltje als golf zijn. Het universum was zo heet dat fotonen spontaan overgingen in deeltjesparen (een materie- en een antimateriedeeltje) die dan meteen weer annihilierden en weer overgingen in fotonen. Jazeker, antimaterie bestaat echt; ze is door ons fysici gevonden, niet door sciencefictionschrijvers bedacht. Deze overgangen zijn volledig in lijn met de beroemdste vergelijking van Einstein: $E = mc^2$. Dat is een recept dat twee kanten uit werkt, namelijk hoeveel massa jouw energie waard is en vice versa. De c^2 staat voor het kwadraat van de lichtsnelheid. Dat is een enorm groot getal en als je dat met de massa vermenigvuldigt, weet je hoeveel energie een omzetting van massa oplevert.

Omstreeks de tijd dat de sterke kracht zich afscheidde, en ook daarna nog, was het heelal een heksenketel van quarks,

leptonen, hun antideeltjes en deeltjes die de krachten – dus de interacties tussen de deeltjes – bemiddelen. De krachtbemiddelende deeltjes zijn bosonen. Deze deeltjes kunnen niet worden opgesplitst in nog kleinere of nog fundamentele deeltjes. Het is wel zo dat er van elk type meerdere varianten zijn. Fotonen, die de elektromagnetische kracht bemiddelen, zijn dus bosonen. Het elektron is voor niet-natuurkundigen het bekendste lepton en ook neutrino's zijn leptonen. De bekendste quarks zijn, tja, er zijn geen bekende quarks. Er zijn zes soorten quarks, die namen hebben die geen enkel taalkundig, wijsgerig of pedagogisch doel dienen, behalve dan om ze van elkaar te onderscheiden: *up* en *down*, *strange* en *charmed*, *top* en *bottom*. En dan zijn er nog anti-up, anti-down enzovoorts – ook zes.

Bosonen heten trouwens naar de Indiase natuurkundige Satyendra Nath Bose. Of iets een boson is of niet heeft te maken met de hoeveelheid draaiing van het deeltje. Het woord lepton komt van het Griekse *leptos*, dat fijn, dun of zwak betekent. Quark heeft een literaire en veel beeldender oorsprong. De fysicus Murray Gell-Mann stelde ze in 1964 voor als de samenstellende delen van protonen en neutronen, die elk drie van deze delen bevatten. Hij ontleende de naam aan een raadselachtige regel uit *Finnegans Wake* van James Joyce: 'Three quarks for Muster Mark!' Eén voordeel van quarks is dat ze allemaal eenvoudige namen hebben. Dat spelen scheikundigen, biologen en vooral geologen niet klaar als ze hun eigen spul van een naam moeten voorzien.

Quarks zijn curieuze snuiters. Protonen hebben een positieve lading die precies het tegengestelde is van die van een elektron. De lading van een quark is echter $1/3$ of $2/3$ of het tegengestelde daarvan. Je kunt nooit een quark

in zijn eentje tegenkomen, hij is altijd gebonden aan een andere quark in de buurt. In feite wordt de kracht die twee of meer quarks samenbindt sterker naarmate je ze verder uit elkaar trekt, alsof ze met een soort elastiek aan elkaar zitten. Als je ze te ver uit elkaar trekt, knapt het elastiek en creëert de vrijkomende energie via $E = mc^2$ een nieuwe quark aan elk eind en dan heb je opnieuw quarks met een andere quark vlakbij.

In de tijd dat het universum nog uit leptonen en quarks bestond, was de dichtheid zo groot dat alle quarks vlak op elkaar zaten. Onder die omstandigheden was het onduidelijk welke buurquarks precies aan elkaar gebonden waren, wat erop neer kwam dat ze vrijelijk konden bewegen, hoewel ze als collectief allemaal aan elkaar gebonden waren. Dat een dergelijke toestand kan bestaan, een soort quarksoep, werd in 2002 gemeld door een team natuurkundigen van Brookhaven National Laboratories, op Long Island in de staat New York.

Er zijn sterke theoretische aanwijzingen dat op een gegeven ogenblik in het zeer vroege universum, misschien op het tijdstip dat een van de krachten zich afscheidde, het universum opmerkelijk asymmetrisch werd: het evenwicht tussen materie en antimaterie werd verbroken. Op elke miljard deeltjes antimaterie waren er een miljard plus één materiedeeltjes. Zo'n klein verschil zou nauwelijks opgemerkt kunnen worden in die baai van gedurige schepping, annihilatie en herschepping van quarks, antiquarks, elektronen en anti-elektronen (beter bekend als positronen), en neutrino's en antineutrino's. De ene vrijgezel had massa's gelegenheid om een partner te vinden om er samen mee te annihileren, net als trouwens alle andere.

Maar dat duurde niet lang meer. Naarmate de kosmos uitdijde tot de afmeting van ons zonnestelsel koelde hij ook snel af tot onder de biljoen kelvin.¹

*

Er is nu een miljoenste seconde voorbij.

*

Het universum was zo lauw en ijl geworden dat de quarksoep ophield te bestaan. Alle quarks vonden een danspartner (meestal telkens drie bij elkaar) en zo ontstond een blijvende familie van zware deeltjes die we hadronen noemen (van het Griekse *hadros*, sterk, degelijk, flink of rijp). Die overgang van quarksoep naar hadronen resulteerde snel in het ontstaan van protonen en neutronen, en andere, minder bekende zware deeltjes, allemaal bestaande uit diverse combinaties van quarks. In Zwitserland (we zijn nu even terug op aarde) is een organisatie, CERN² genaamd, die een grote versneller gebruikt waarmee men bundels hadronen op elkaar

1 Noot van de vertaler: in de natuurkunde wordt temperatuur in kelvin gemeten. Een temperatuurverschil van 1 kelvin is gewoon een verschil van één graad Celsius, maar 0 kelvin is per definitie het absolute nulpunt, 273,15 graden Celsius onder nul. De afkorting van kelvin is K. Een halve eeuw geleden was de aanduiding 'graad Kelvin' nog gangbaar.

2 CERN staat voor Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Europese raad voor kernonderzoek). Er wordt, anders dan de oorspronkelijke naam suggereert, geen kernonderzoek gedaan, maar onderzoek naar elementaire deeltjes.

laat botsen om de toestand van het vroege universum te herscheppen. Die versneller is de grootste ter wereld en heet weinig verrassend Large Hadron Collider (LHC), wat staat voor ‘grote hadronen-botser’.

De minuscule onbalans tussen materie en antimaterie in de quark-en-leptonsoep bleef bestaan in het hadronische tijdperk, maar met buitengewone gevolgen.

Terwijl het universum verder afkoelde, daalde ook de hoeveelheid energie die beschikbaar was om elementaire deeltjes te creëren. In het hadrontijdperk hadden de rondvliegende fotonen niet meer voldoende E om via $E = mc^2$ voldoende m op te brengen om er quark-antiquarkparen mee te maken. Ook de fotonen die ontstonden uit annihilaties raakten energie kwijt. Dat kwam door de voortdurende uitdijing van het heelal. Daardoor konden ze geen nieuwe hadron-antihadronparen meer maken. Elke miljard annihilaties liet een miljard fotonen achter plus één enkel hadron. Die eenzame achterblijvers zouden uiteindelijk het meeste plezier hebben. Ze waren de uiteindelijke bron van alle materie die melkwegstelsels, sterren, planeten en petunia’s zou vormen.

Zonder die onbalans van een miljoenste van een promille tussen materie en antimaterie zou alle massa in het universum zichzelf hebben geannihileerd. Er zou een kosmos zijn overgebleven geheel bestaande uit fotonen *en verder niets* – het ultieme ‘er zij licht’-scenario.

*

Nu is er een seconde voorbij.

*

Het universum inmiddels al gegroeid tot een paar lichtjaar³ in diameter, ongeveer de afstand van de zon tot haar buursterren. De temperatuur is een miljard graden. Dat is nog behoorlijk warm, en elektronen en positronen ontstaan en vergaan aan de lopende band. Maar het universum blijft maar uitdijen en afkoelen, dus hun dagen – eigenlijk seconden – zijn geteld. Het loopt met hen net zo af als met de quarks en hadronen. Uiteindelijk overleeft er per één miljard elektronen maar één. De rest annihileert samen met hun anti-vriendjes de positronen, en verandert in een zee van fotonen.

Op dit ogenblik hebben we precies een elektron per proton over, bevroren als het ware. De kosmos koelt nog verder af tot onder de honderd miljoen graden. Protonen fuseren met neutronen (de vrije neutronen beginnen te vervallen tot protonen en elektronen) en er ontstaat een universum van losse atoomkernen. Negentig procent daarvan zijn waterstofkernen, tien procent helium, en er zijn kleine beetjes deuterium (zwaar waterstof), tritium (superzwaar waterstof, met een halfwaardetijd van twaalf jaar) en lithium.

*

Er zijn nu twee minuten verlopen sinds het begin.

*

3 Een lichtjaar is geen eenheid van tijd maar van afstand, namelijk zover als het licht in één jaar aflegt, ofwel bijna tien biljoen kilometer.

Dan gebeurt er ongeveer 380.000 jaar lang niks bijzonders met onze deeltjesoep. De temperatuur blijft dalen, maar is toch nog zo hoog dat alle elektronen vrij rondvliegen en heftige interacties hebben met de fotonen.

Hun vrijheid is afgelopen als de temperatuur van het universum onder de 3000 kelvin zakt. Dat is ongeveer de helft van de temperatuur aan de oppervlakte van onze zon. De elektronen combineren met de kernen en maken neutrale atomen. Hun huwelijk resulteert in een alomtegenwoordig bad van zichtbaar licht, dat een onuitwisbaar patroon in de hemel schept dat precies aangeeft waar alle materie op dat ogenblik was. De vorming van deeltjes en atomen in het oeruniversum is op dat ogenblik voltooid.

*

De eerste miljard jaar gaat het universum door met uitdijen en afkoelen. De materie begint door de zwaartekracht te klonteren in wat we nu melkwegstelsels noemen. Daarvan ontstaan er iets van honderd miljard. In die stelsels gaat het klonteren door, wat leidt tot zo'n honderd miljard sterren in elk stelsel. Diep binnenin elk van die sterren vindt fusie plaats. In sterren die meer dan tien keer zo zwaar als de zon zijn, lopen druk en temperatuur zo ver op dat er vele tientallen elementen zwaarder dan waterstof in ontstaan, inclusief de elementen die nodig zijn voor de vorming van planeten en eventueel leven daarop.

Aan die elementen zou je bijzonder weinig hebben gehad als ze op de plek waren gebleven waar ze ontstonden. Maar gelukkig exploderen zware sterren op een gegeven ogenblik, waardoor hun verrijkte ingewanden door hun melkwegstelsel verstrooid worden. Na negen miljard jaar

van zulke verrijking gebeurde het dat in een onbeduidend deel van het universum (het buitenste deel van de Virgo Supercluster), in een onbeduidend melkwegstelsel (het onze), in een onbeduidend gebied (de Orion Arm) een onbeduidende ster (onze zon) werd geboren.

De gaswolk waaruit de zon ontstond, bevatte nogal wat zware elementen. Die konden samenklitten en zo een rijk gevarieerd assortiment objecten vormen in een baan rond de nieuwe ster: rotsachtige planeten en planeetjes, gasplaneten, honderdduizenden planetoiden en miljarden kometen. De eerste paar honderd miljoen jaar werden grote hoeveelheden los puin in afwijkende banen ingevangen door de grotere lichamen. Elke vangst gaf een enorme klap vanwege de hoge snelheid van tientallen kilometers per seconde. Daardoor smolt de oppervlakte van de rotsachtige planeten en konden er geen ingewikkelde moleculen ontstaan.

Toen het losse puin opraakte, begonnen de planeetoppervlakken af te koelen. De planeet die we aarde noemen, had het geluk dat ze zich net op de goede afstand tot de zon bevond, zodat oceanen er vloeibaar konden zijn. Iets dichters bij de zon zouden de oceanen verdampt zijn, en iets verder weg zouden ze dichtgevroren zijn. In beide gevallen zou leven zoals wij dat kennen zich niet ontwikkeld kunnen hebben.

De aardoceanen waren rijk aan chemicaliën. Koolstofhoudende moleculen maakten de overstap naar zichzelf kopiërend leven. Hoe precies weten we nog niet. In deze oersoep waren er alleen simpele bacteriën die geen zuurstof gebruikten. Er was helemaal geen zuurstof, behalve wat de bacteriën als chemisch actief afval uitscheidde. De atmosfeer in die tijd was rijk aan kooldioxide, maar door

die eencelligen kwam er zoveel zuurstof in de lucht dat er organismen konden ontstaan die al die zuurstof konden gebruiken. Uiteindelijk gingen die land en zee domineren. Zuurstof komt normaal in moleculen met twee atomen voor (O_2). In de hogere atmosfeer ontstaat onder invloed van ultraviolet zonlicht echter drieatomig ozon (O_3). Dat houdt vervolgens de molecuulvijandige ultraviolette fotonen tegen, zodat het aardoppervlak daartegen beschermd is.

Het leven op aarde is enorm divers, en elders in het universum zal dat niet anders zijn. We hebben dat te danken aan de ruime schaal waarop koolstof in de kosmos voorkomt, zowel als losse atomen als in talloze al dan niet ingewikkelde moleculen. Er zijn zonder twijfel meer moleculen met koolstof als voornaamste element dan alle andere soorten moleculen bij elkaar.

Maar het leven is kwetsbaar. Nog steeds wordt de aarde af en toe getroffen door grote kometen en planetoïden die de weg zijn kwijtgeraakt, al is het niet meer zo gewoon als lang geleden. Dan wordt een enorme ravage aangericht in ons ecosysteem. Nauwelijks 65 miljoen jaar geleden (minder dan twee procent van het verleden van de aarde) trof een planetoïde met een massa van tien biljoen ton de aarde op wat nu het Yucatan-schiereiland van Mexico is. Meer dan zeventig procent van alle planten en dieren op aarde verdween, inclusief al die beroemde grote dinosaurussen. Uitgestorven. Deze ecologische catastrofe stelde onze zoogdiervoorouders in staat de vrijgekomen plaatsen in te nemen in plaats van als hors-d'oeuvres te dienen voor *T. Rex*. Een tak van deze zoogdieren was die van de zogeheten primaten met hun grote hersenen. Daarbinnen evolueerde een geslacht en een soort (*Homo sapiens*) met voldoende intelligentie om wetenschappelijke methoden

en instrumenten uit te vinden en zo de oorsprong en de evolutie van het universum te achterhalen.

*

Wat gebeurde er voor dit alles? Wat gebeurde er voor het begin?

Astrofysici hebben geen flauw idee. Of beter: onze meest creatieve ideeën zijn niet of nauwelijks gebaseerd op experimentele gegevens. Sommige godsdienstige lieden antwoorden echter, met een tikje zelfgenoegzaamheid, dat iets alles in gang gezet moet hebben: een kracht groter dan alle andere krachten, een bron waaruit alles voortkomt. Een eerste beweging. In de verbeelding van zulke personen is dat iets natuurlijk God.

Maar als het universum er nu eens altijd was, in de een of andere toestand waar we nog achter moeten komen – bijvoorbeeld een multiversum dat voortdurend nieuwe universa geboren laat worden? En als het universum gewoon uit het niets tevoorschijn plopte? Of misschien is alles wat we weten en waar we van houden alleen maar een computersimulatie waar een superintelligente buitenaardse soort zich mee amuseert. Wat dan?

Dit soort filosofische grappen stemt niemand tevreden. Toch herinneren zulke ideeën ons eraan dat onwetendheid de natuurlijke geestestoestand is van een wetenschappelijk onderzoeker. Mensen die denken dat ze alles weten, hebben nooit de grens opgezocht tussen het bekende en onbekende in het universum, en ze zijn ook nooit toevallig bij die grens beland.

Wat we wel weten en zonder verdere aarzeling ook mogen stellen is dat het heelal een begin had. Dat het doorgaat

zich te ontwikkelen. En ja, elk atoom van ons lichaam is ontstaan bij de oerknal, dan wel in de thermonucleaire ovens van zware sterren die meer dan vijf miljard jaar geleden explodeerden.

Wij zijn sterrenstof dat tot leven is gebracht, en we hebben van het universum de macht gekregen om onszelf te ontcijferen – en we zijn nog maar pas begonnen.