

# De oerknal en de betekenis van de fysische kosmologie

Christian Maes

Instituut voor Theoretische Fysica, K.U.Leuven

Tekst bij het gesprek van 24 november 2005, Emeritforum K.U.Leuven

Fysische kosmologie is een poging om met de methodes en de kennis van de natuurwetenschappen, in het bijzonder van de fysica, verklaringen te vinden voor het gedrag en de aard van de natuur op bijzonder grote schaal. Het is de wetenschappelijke studie van de kosmos en opereert onder gelijkaardige omstandigheden als de astronomie; je kan naar de hemel kijken, maar hem niet aanraken.

Fysische kosmologie is pas goed begonnen met de publicatie *Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie* uit 1917 van Albert Einstein. De algemene relativiteitstheorie (1915) is een uitbreiding van de speciale relativiteitstheorie (1905), beide vooral gecreëerd door Einstein, waarin de zwaartekracht een zeer belangrijke rol speelt. Deze theorie heeft ons beeld over ruimte en tijd grondig veranderd en vormt een hoeksteen van de hedendaagse kosmologie. De zwaartekracht lijkt ook de meest belangrijke wisselwerking op de schaal van het universum voor de beweging van de grote massa's. Dat is niet altijd en overal zo geweest; ook andere interacties spelen een rol, zoals het elektromagnetisme en de kernkrachten. Denk bijvoorbeeld aan de processen binnen sterren. Bovendien is de wetenschap van de kosmos een bij uitstek interdisciplinaire aangelegenheid. Ook geologie, biologie, scheikunde en wiskunde zullen een belangrijke inbreng hebben, telkens op de gepaste schalen van tijd en ruimte.

De tijden, de afstanden en de energieomzettingen waarvan sprake in de kosmologie zijn meestal onvoorstelbaar groot. Het is voor de leek reeds moeilijk om zich de grote klimatologische en geofysische ontwikkelingen op aarde voor te stellen. In dat perspectief is het verschijnen van de mens op aarde nog wel zeer recente geschiedenis. Nochtans is dat alles niets in verhouding met de evoluties op kosmische schalen. Het universum zou zo een 13 tot 15 miljard jaar oud zijn; het zonnestelsel moet zowat 4,5 miljard jaar zijn (en de aarde dus ook een 4 miljard jaar oud) terwijl de soort mens nog maar een paar miljoen jaren hier rondloopt.

Ons hulpmiddel bij de studie van de kosmos, de algemene relativiteitstheorie, voegt daar een aantal onvertrouwde concepten aan toe. Ruimte is gekromd; tijdsduur is relatief, enzovoort. Daarom zullen onze intuïties en onze eerste gedachten ons mogelijks of dikwijls misleiden. Het is te voorzien dat we de verkeerde vragen stellen, en moeilijk onze aardse ervaringen kunnen overstijgen. Ook het meten van tijden en afstanden in het universum vraagt bijzondere aandacht en krijgt slechts een heel specifieke betekenis binnen de algemene relativiteitstheorie.

In kosmologie ben je bovendien best bijzonder voorzichtig omdat mensen, ook wetenschappers dus, immers uitgesproken en emotionele reacties kunnen geven en antwoorden verzinnen, vooral op vragen naar de oorsprong van het universum. Deze reacties zijn soms rechtstreeks of onrechtstreeks verbonden met religieuze voorkeuren.

Dat is uiteraard heel natuurlijk want kosmologie wil zich ook buigen over de allereerste vragen: waarom is er iets en hoe is het er gekomen?

### Het standaardmodel van de fysische kosmologie

“De wetenschap over het verleden van het universum is oneindig veel interessanter dan het verleden van de wetenschap over het universum.”

(Y. Zeldovich, astrofysicus en exponent in de hernieuwde aandacht voor kosmologie in de jaren 1960.)

Ik beperk me hier tot het samenvatten van het standaard wereldbeeld van de hedendaagse kosmologie.

De basiselementen van het standaardmodel bestaan uit een viertal punten:

1. De verdeling van de massa is ongeveer homogeen wanneer men gemiddeldes neemt over heel grote afstanden;
2. Het universum expandeert;
3. De dynamica van het universum wordt beschreven binnen de algemene relativiteitstheorie;
4. Het universum is geëxpandeerd vertrekkend van een zeer hete toestand met zeer grote dichtheid.

Ad 1. Dat de massa homogeen verdeeld is, is een conceptueel eenvoudige want symmetrische aanname die door de observaties goed wordt ondersteund. Voor zover we kunnen zien en tellen, is het universum, bekeken op grote schaal, homogeen en isotroop. Vanuit elk punt lijkt het universum hetzelfde. Dat noemen we het kosmologisch principe; er bestaat geen voorkeur voor een bepaalde richting of plaats in het universum. Dat kan wel eens ongewoon klinken voor bewoners van de Melkweg en natuurlijk lijkt ons bureau niet op de huiskamer of op de kelder van de buurman. Zoals met alles in kosmologie, spreken we hier natuurlijk over gemiddeldes op grote schaal waarin lokale oneffenheden normaal zijn.

Ad 2. Dat het universum expandeert, hebben we geleerd uit een combinatie van observatie en theorie. Reeds vroeg in de 20<sup>ste</sup> eeuw zag men hoe sterrenstelsels zich van elkaar verwijderen. Men vond die mogelijkheid op expansie of contractie ook in de wiskundige vergelijkingen van Einstein. De expansie verwijst naar het feit dat de eigenlijke fysische afstand tussen van elkaar afgezonderde galaxieën toeneemt met de tijd. De galaxieën gaan uit elkaar. Een systeem dat gebonden is zoals bijvoorbeeld clusters van sterren allerhande expandeert niet. Het beeld is dat van een ballonoppervlak waarop muntstukjes zijn gekleefd; bij het opblazen verwijderen zich de muntjes van elkaar.

Ad 3. De relativiteitstheorie van Einstein geeft een wiskundige beschrijving van de koppeling tussen de meetkundige eigenschappen en de energie van de ruimte. Ruimte en tijd vormen geen absoluut en onveranderlijk decor en zijn ook niet onafhankelijk van elkaar. Hoe je lokaal afstanden of de kromming van de ruimte kan berekenen, wordt verbonden met de materiële inhoud van het universum. Gravitatie, de theorie van de zwaartekracht, krijgt zo een meetkundige inhoud; met het adagio van Kepler *ubi materia, ibi geometria*.

Ad 4. We kunnen proberen om de dynamica van Einstein te extrapoleren naar het verste verleden. Vanuit de data vandaag, vinden we dan een zeer hete toestand met een enorme dichtheid in een verleden dat we situeren rond de 12 à 14 miljard jaar geleden. De aard van die toestand is zodanig dat de hedendaagse fysica er niet voorbij kan. We botsen op een singulariteit. Dat noemen we de oerknal of de big bang. Het is geen gebeurtenis die aan de oorsprong van de expansie zou liggen en het is alleszins geen start die ergens gelocaliseerd in de ruimte ligt.

Het standaardmodel vertrekt van de vergelijkingen van Einstein maar afhankelijk van initiële waarden kan je andere oplossingen krijgen. Het geheel van modellen dat aan bovenstaande condities voldoet, noemen we Friedman-Lemaître-Robertson-Walker modellen, naar hun berekenaars. Omwille van het vierde knallende punt staat de standaardtheorie ook bekend als de oerknaltheorie.

### Oerknal

“De evolutie van de wereld kan vergeleken worden met een vuurwerkspektakel dat net voorbij is; hier en daar wat rode strepen, as en rook. Vanop een afgekoelde sintel zien we het zachte nagloeien van de zonnen, en we proberen ons de verdwijnende schittering van de oorsprong van de werelden voor te stellen.” (G. Lemaître, Leuvens wiskundige natuurkundige die als één der eersten de implicaties van de theorie van Einstein voor de kosmologie begreep.)

Volgens de oerknaltheorie was het universum zo een 12 à 14 miljard jaren geleden in een enorm samengedrukte en hete toestand. Deze toestand van zeer grote materiedichtheid bij enorme temperaturen noemt men de hot big bang. Wat daarvoor komt, is onbekend, maar men kan eventueel denken aan een eerdere big bang. We zijn geneigd om te spreken over het ontstaan van het universum uit een enorme explosie die alles heeft weggeslingerd, de big bang als het ogenblik waarop de expansie begon.

Er zijn verschillende klassen van evidentie voor deze oerknal. Ten eerste is er precies de expansie van het heelal. De expansie moet zijn vertrokken uit een primaire toestand waarin alle materie en energie van het universum was opgeslagen. Die expansie kunnen we goed meten en voldoet aan de zogenaamde wet van Hubble (1929). De theoretische beschrijving of voorspelling van de expansie vanuit de theorie van Einstein was oorspronkelijk vooral het werk van Friedmann (1922) en van de Leuvense professor Mgr. George Lemaître (1927). Niemand weet wat er vooraf gebeurd is, maar de algemene relativiteitstheorie voorziet daar een zogenaamde gravitationele singulariteit, waar de vergelijkingen van Einstein stoppen wiskundig zinvol te zijn. Een tweede evidentie voor het oerknalmodel is te vinden in de preciese reconstructie van het ontstaan van de (lichte) scheikundige elementen via kernreacties. We spreken over de theorie van de nucleosynthese waarin de elementen waterstof en helium werden gevormd. Dat was vooral het werk van George Gamov in de jaren 1940. Ten slotte is er de zogenaamde kosmische achtergrondstraling die een verre echo brengt van het schouwspel bij de oerknal en die het oerknalmodel tot standaardmodel heeft verheven (1965, Arno Penzias en Robert Wilson).

Belangrijke vooruitgang in de oerknaltheorie werd gemaakt tijdens het laatste decennium. Vooral de verbeteringen in observationele mogelijkheden (technologie van telescopen en satellieten) hebben toegelaten om de parameters van de oerknal te berekenen met een grotere precisie en hebben ook laten zien dat de expansie van het universum blijkt te versnellen. Dat heeft dan weer te maken met de problematiek van de donkere materie en met de vraag naar donkere energie, ook gekend als het probleem van de kosmologische constante.

De oerknal spreekt natuurlijk tot de verbeelding en wel vooral omwille van wat niet wordt gezegd. De oerknal is een ruimte-tijd singulariteit en onze hedendaagse theorieën zijn niet in staat die te behandelen. Samen met veel andere wetenschappers geloof ik dat een bepaalde en aangepaste vorm van theorie van kwantumgravitatie daarvoor nodig zal zijn. Dat past in de unificatie van de kwantumfysica met de algemene relativiteitstheorie, maar waarin misschien ook andere ingrediënten een voorname rol kunnen spelen (zoals ideeën over zelf-organisatie, complexiteit,...). Sommigen zien in de oerknal de uiteindelijke oorsprong van de tweede wet van de thermodynamica, dat entropie, wanorde in zekere zin, altijd naar een maximum streeft of dus de oerknal als de bestaansreden van de thermodynamische tijd.

### Kosmologische modellen

“Astrofysici zijn dikwijls verkeerd, maar nooit verlegen.”  
(Lev Landau, fysicus en nooit te verlegen voor een snijdende opmerking.)

Het standaardmodel van de fysische kosmologie zoals hierboven ingeleid, bevat een aantal vrije parameters. Bijvoorbeeld hebben we graag een idee over de materiedichtheid: hoeveel massa is er in het universum? Naargelang de waarde van die en andere grootheden krijg je een paar submodellen als oplossingen van de vergelijkingen van Einstein. Men moet zich hier indenken dat er een competitie is tussen twee min of meer tegengestelde tendensen, namelijk de expansie van het universum en anderzijds de zwaartekracht. Wat de bovenhand haalt, bepaalt de toekomst van het heelal. Een wiskundige parameter die afhangt van die fysische waarden en waarmee een classificatie van modellen kan worden gemaakt, is de ruimtelijke kromming.

Bij positieve kromming (zoals een baloppervlak) zal de expansie ooit omdraaien. Dan krimpt het universum om tenslotte samen te vallen in een eindkrak, de big crunch die net het tijdsinverse is van de big bang. Bij negatieve kromming lijkt het universum op een zadeloppervlak en is het universum open; de expansie blijft duren. Een randgeval krijg je bij een kromming gelijk aan nul waar het universum vlak is. Dat komt wat overeen met de mogelijke banen van een steen die weggeworpen wordt van de aarde (ellips, parabool of hyperbool). Niet alleen de energie en materie-inhoud van het universum bepaalt de mogelijke evolutie op kosmologische schaal. Er is ook de zogenaamde kosmologische constante, een bepaalde term in de vergelijkingen van Einstein onder wiens invloed de expansie versneld wordt.

Er is groeiende evidentie dat ons universum of open of ruimtelijk vlak zou zijn (in tegenstelling met gesloten): voor altijd expansie en zelfs steeds sneller. Dat betekent dat het universum oneindig is en, voor zover we weten, dat altijd is geweest. Dat alles werkt natuurlijk onder de hypothese dat het universum homogeen is op een globale schaal.

### Speculaties

Niet alles wat duister is, is ook diep.  
(bekende waarheid)

Voor de leek is het dikwijls moeilijk om via populariserende literatuur en internet-materiaal het onderscheid te blijven maken tussen wat speculatie, wat observatie, wat model en wat theorie is. Bovendien mag men niet vergeten dat ook binnen de gemeenschap van de specialisten controverses en afwijkende gedachten bestaan. Men kan moeilijk aan de wetenschappelijke ambitie verwijten dat nog niet alles is gekend en dat veel waarschijnlijk nooit zal begrepen worden. Mijn verstand is alleszins traag en beperkt. Men mag ook niet verwachten de moeilijkste vragen over de kosmos het eerst beantwoord te zien. Veel is langzaam duidelijker geworden, maar daar gaat bijna altijd veel studietijd overheen.

Bij de belangrijkste speculaties in de wetenschappelijke wereld die betrekking kunnen hebben op kosmologie, horen het zogenaamde inflatiemodel en de snarentheorie. Het inflatiescenario spreekt over een fase in de evolutie van het universum met versnelde expansie. Terwijl de resultaten van de theorie wel eens kunnen kloppen en zelfs overeenkomst vertonen met meer recente observaties, toch zijn de argumenten en de motivaties bron van controverse. Ook daarover bestaat trouwens onenigheid. Snarentheorie is momenteel een belangrijke kandidaat in de unificatie van de relativiteitstheorie (gravitatie) en de kwantummechanica. De schaal waarop de oerknal moet bestudeerd worden, zal ongetwijfeld kwantummechanische beschouwingen impliceren. Tot dusver is die theorie er echter niet en weten we zelfs niet goed hoe we ooit experimentele verificaties kunnen krijgen.

### Antropisch principe

“Had God wel een keuze?”  
(A. Einstein)

Het antropisch principe, in zwakke vorm, poneert de zelf-evidentie dat elke ware theorie van het universum consistent moet zijn met het leven zoals het is. Leven zoals we dat hier en nu kennen met complexe wezens zoals de mens en gebaseerd op een specifieke scheikunde, stelt eisen aan de kosmologie. Bijvoorbeeld moet het universum oud genoeg zijn om leven gebaseerd op koolstof mogelijk te maken en te laten evolueren. Het nut van deze evidentie, bijvoorbeeld in de bepaling van constanten in de kosmologische modellen, is twijfelachtig. Gebrek aan fantasie en koolstof-chauvinisme kunnen ons

parten spelen. Een sterkere versie van het antropisch principe stelt dat de keuze of de basis van ons specifieke universum zo is dat leven ooit ergens mogelijk is. Het is als het ware een antwoord op de vraag van Einstein *Had God wel een keuze?* Het zogenaamde finaal antropisch principe zal zelfs stellen dat het universum bovendien moet voldoen aan dergelijke condities dat het leven nooit zal verdwijnen.

Ruwweg is het antropisch principe dus hetzij een evidentie hetzij een argument dat start van het feit dat het geobserveerde universum zo moet zijn dat het wezens kan produceren en onderhouden die het universum kunnen observeren. De condities van de wereld lijken ons dikwijls heel erg gelukkig. Als de condities van onze atmosfeer, de temperatuur en de vochtigheid, op onze aarde niet waren wat ze zijn, zouden we hier niet zijn. Het element koolstof lijkt een heel speciale plaats te bekleden - zonder konden we niet bestaan. Een ander voorbeeld van kosmisch geluk is het feit dat de massa van het neutron net iets groter is dan de massa van het proton. Het bestaan van een reeks stabiele kernen berust erop, en daarop bijna geheel de scheikunde van het leven. Dat soort zaken kan ons verleiden tot minstens twee gedachten (1) dat daaruit toch heel sterke gevolgen moeten kunnen worden afgeleid over de aard van onze kosmos en voor de fijnstelling van onze beste kosmologische modellen, (2) dat dit niet toevallig kan zijn en dat er een soort van *intelligent design* mee gemoeid is.

Bij (1) wil ik echter opmerken dat het niet zo duidelijk is welke condities eigenlijk speciaal nodig zijn voor ons of voor ander leven. Natuurlijk leven we in één universum en kunnen we moeilijk vergelijken met wat allemaal even goed mogelijk ware geweest. Trouwens, het kon natuurlijk nog veel veel straffer. Het zou nog veel specialer geweest zijn indien de initiële condities van het universum zo waren dat mensen direct uit heel specifieke en georchestreerde botsingen van stofdeeltjes (of klei) werden gevormd. Ik ken geen voorbeelden van rigoureuze bepalingen van natuurconstanten uit levensfeiten. Het lijkt me trouwens veel aantrekkelijker om deze constanten ooit beter en mathematisch te bepalen uit fundamentele theorieën. Bij (2) kom je gauw terecht in principes die moeten leiden naar een God als uiteindelijke verzekeraar van het leven. Deze God zal een *God of the gaps* zijn, een stoplapgod die bij elke verdere voortuitgang in het wetenschappelijk denken, een stap achteruit moet zetten. Het is niet méér fantasierijk dan de godsbewijzen zoals van John Mitchell in 1767; hij vond het bestaan van God bewezen door de volgens hem toch uiterst onwaarschijnlijke plaatsing van de sterren in de constellatie van de Pleiaden (425 lichtjaren ver, rechts boven Orion, nu zichtbaar in het zuiden).

Ongetwijfeld zijn er zeer bijzondere dingen in de geschiedenis van het universum. De oerknal in het begin, bij wijze van spreken, was al zeer speciaal (in de zin dat het initieel universum een bijzonder lage entropie moet hebben gehad). Ik stel echter voor dat we de wetenschappelijke en wiskundige weg bewandelen om deze zeer bijzondere aard van de big bang te verklaren.

## Betekenis

“Twee zaken zijn oneindig, de dwaasheid van de mens en het heelal. Over dat laatste heb ik trouwens mijn twijfels.”

(A.Einstein)

De laatste 100 jaar zijn er grote stappen gezet in het begrijpen van de kosmos. Het belangrijkste is wellicht te zien en te begrijpen dat de kosmos evolueert. Die evolutie leent zich tot wetenschappelijke analyse. Vast te stellen dat het heelal expandeert en de ontdekking van de kosmische achtergrondstraling behoren tot de grootste intellectuele verwezenlijkingen van de twintigste eeuw: het funderen van de oerknaltheorie. Het fundamentele denken over tijd en ruimte, over substantie en uitgebreidheid, over massa en energie,... is in de twintigste eeuw voorgoed tot het domein van de fysica gaan behoren. Terwijl Kant in 1755 nog succesvolle hypothesen over het ontstaan van het zonnestelsel kon maken, lijken invloedrijke stromingen in de filosofie van de 20<sup>ste</sup> eeuw gekozen te hebben voor beschouwingen op maat van de mens.

De kennis dat we leven in een dynamisch universum heeft waarschijnlijk niet veel belang voor ons dagelijks leven en zal hoogstens ons wereldbeeld aanvullen. Het kan ons eventueel beschermen tegen bepaalde vormen van bijgeloof. Het maatschappelijk debat of ons consumptiegedrag wordt voorlopig niet sterk beïnvloed door onze kennis over het heelal. Misschien zal in een zeer verre toekomst de vraag naar ruimte-exploitatie meer aan de orde komen en gebaat zijn met inzichten uit de fysische kosmologie.

De vraag naar de plaats van de mens in de kosmos, heeft nog steeds hetzelfde basisantwoord als gegeven door Copernicus. We zijn letterlijk (sterren)stofjes, die de waanzinnige ambitie hebben het geheel te begrijpen. De kennis van het heelal zal ons voorlopig niet troosten in onze moeilijkste momenten en ook impliceren de wetten van het universum op generlei wijze dat we bijvoorbeeld niet mogen liegen.

## Open vragen

“Quid est tempus? Wat is tijd? Als niemand het me vraagt, weet ik het. Als ik het wens uit te leggen aan wie het me vraagt, weet ik het niet!”

(Augustinus, Confessiones, XI, 14)

Het heelal ligt wijd voor ons open, net als de vele vragen die we nog hebben. Recent komt meestal in de aandacht dat we nog heel weinig weten over de aard en de hoeveelheid van materie of van energie in het universum. Daar spreekt men over het probleem van de *dark matter*, van de *dark energy* en de kosmologische constante. Dat zijn belangrijke dingen om te kunnen kiezen voor een bepaald submodel van kosmologische modellen en is beslissend voor de vraag naar de toekomst van het heelal. Gaat de expansie van het heelal versneld verder?

Aan de andere einder, bij het verste verleden van het heelal, komen we natuurlijk bij vragen terecht over de aard van de oerknal. Wat was er voor de oerknal, of in die

allereerste fracties van een seconde? Daar zullen kwantummechanica en algemene relativiteitstheorie elkaar moeten vinden, één van de grootste uitdagingen van de fysica van de 21<sup>ste</sup> eeuw.

Verder blijft een grote vraag hoe structuren zijn ontstaan. De vorming van sterrenstelsels en van sterren, de vorming van planeten en tenslotte, hoe het leven is ontstaan in het universum. We blijven tenslotte zeer nieuwsgierig naar het antwoord op de vraag of buitenaards leven bestaat.

### Achteraf

De fascinatie voor de kosmos en voor de sterrenhemel boven ons is van alle tijden. Naargelang de gissingen over de aard en het ontstaan van het heelal en over onze plaats daarin, ontwikkelden zich aparte mythes, ideologieën en godsdiensten, onze geschiedenis zeg maar. De westerse mens werd reeds vroeg gerust gesteld door het bijbelse scheppingsverhaal: de zon, de hemel en de aarde, het zijn geen goden maar slechts scheppingen, dus bestudeerbaar. We kunnen de evolutie van de kosmos zonder schroom proberen uit te tekenen. Een belangrijk idee (of is het een geloof?) leidt ons hierin: dat de natuur één is. Het behoort daarom tot het programma van de fysicus op zoek te gaan naar een volledige en unificerende verklaring of, om het toch maar weer bijbels te zeggen, naar het Woord dat was in den beginne.

### Bibliografie

Er zijn verschillende internet-plekken om over kosmologie te surfen. Zo krijg je een korte en heldere uitleg over de belangrijkste aspecten van fysische kosmologie bij de volkssterrenwacht Urania,

<http://www.urania.be/sterrenkunde/kosmologie/index.php>

Internationaal is de webpagina van de NASA een veelbezochte en goede plek, op

[http://map.gsfc.nasa.gov/m\\_uni.html](http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni.html)

De openbare homepage van de kosmologiegroep in Cambridge, UK, vind je op

[http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/cos\\_home.html](http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/cos_home.html)

Nederlandstalige boeken zijn bijvoorbeeld:

De evolutie van het heelal, Colin A. Ronan.

Het kleine boek van de oerknal, Craig J. Horgan.

De kode van de kosmos, Christoffel Waelkens.

En Engelstalig vind je bijvoorbeeld:

The Fabric of the Cosmos, Brian Greene.

The Extravagant Universe, Bob Kirshner.

The Origin and Evolution of the Universe, Eds. Zuckerman and Malkan.

The First Three Minutes, Steven Weinberg.