

Het Heelal heeft haast

Nobelprijs 2011

Vincent Icke

Een bolletje koolstof zo klein als de Aarde en een lap ruimte zo groot als het Heelal ontmoeten elkaar in de Nobelprijs voor Natuurkunde 2011. Dit jaar ontvangt Saul Perlmutter de helft, en Brian Schmidt en Adam Riess elk een kwart van de prijs voor hun onderzoek aan supernova's, waaruit bleek dat ons Heelal niet alleen sneller uitdijt dan gedacht, maar ook in de toekomst steeds sneller zal gaan expanderen.

Om de strekking van hun werk te begrijpen moeten we dus drie onderwerpen toelichten: de evolutie van het Heelal op zeer grote schaal; het gedrag van ontploffende sterren; en het verband daartussen. Speciaal voor natuurkundigen is daarnaast van belang dat de achterliggende diepere fysica voor honderd procent een raadsel is.

De evolutie van onze kosmos als geheel wordt vaak ruwweg aangeduid met “de uitdijning van het Heelal”, of ook wel “het oerknal-model”. Dat laatste is een vreselijk slechte benaming, die ik dan ook niet wil gebruiken. Het woord ‘uitdijning’ houdt in, dat de evolutie van het Heelal geen kwestie is van een beweging van materie door een reeds bestaande lege ruimte, maar draait om de dynamica van de ruimte zelf.

Waar de kosmologie tot 1916 zich bezighield met de beweging van dingen *door* de ruimte, ging het daarna over de beweging *van* de ruimte. In dat jaar publiceerde Einstein zijn algemene relativiteitstheorie (ART), waarin de dynamica van tijd en ruimte werd beschreven. In 1905 had hij in zijn speciale relativiteitstheorie laten zien dat de invariantie van de lichtsnelheid, in 1887 ontdekt door Michelson en Morley, neerkomt op een symmetrie van tijd en ruimte: de *Lorentz-symmetrie*. Tien jaren van noeste arbeid later breidde hij die theorie uit tot *locale Lorentz-symmetrie*, waarin tijd en ruimte een centrale rol spelen als een actief veld door middel van de *metrische tensor* $g_{\mu\nu}$, vergelijkbaar met de door Faraday en Maxwell ingevoerde electromagnetische velden.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

Fig.1 De Einstein-vergelijking

Vertaald in het Nederlands zou de Einsteinvergelijking van de ART als volgt luiden. Links staat: ‘de structuur en dynamica van ruimte en tijd’. Rechts: ‘de verdeling van massa, energie en impuls’. Voegen we het = teken daartussen in, dan lezen we: *de structuur en dynamica van ruimte en tijd wordt bepaald door de verdeling van massa, energie en impuls*.

Door Friedmann en Lemaître werd deze extreem ingewikkelde tweede-orde partiële differentiaalvergelijking sterk vereenvoudigd door te veronderstellen dat ruimte en materie isotroop en homogeen zijn: overal hetzelfde en zonder voorkeursrichting. De rol van $g_{\mu\nu}$ wordt dan overgenomen door een scalaire variabele a : de schaalfactor van het Heelal. De eerste Friedmann-vergelijking is

$$\left(\frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi}{3}G\rho a^2 - kc^2 + \frac{\Lambda}{3}a^2$$

Fig.2 De eerste Friedmann-vergelijking

Het linkerlid, overblijfsel van de linkerzijde van de Einsteinvergelijking, beschrijft de evolutie van a , anders gezegd de uitdijing of inkrimping van het Heelal. Merk op dat het hierbij gaat om *een verandering van de structuur van de ruimte zelf*, waarin er steeds meer ruimte bijkomt als da/dt positief is, en niet een beweging van materie door de ruimte, zoals die vermaledijde term ‘oerknal’ suggereert. Omdat de golflengte van het licht met de ruimte mee uitrekt, is a direct waarneembaar door de *kosmische roodverschuiving* z , middels de relatie $1+z=1/a$.

Ter rechterzijde staan de resten van de ‘energie-impuls-tensor’ $T_{\mu\nu}$. We herkennen G als Newton’s gravitatieconstante. Het getal ρ is de dichtheid van de massa in de ruimte, en Λ de dichtheid van de energie. De constante k geeft de kromming van de ruimte aan; omdat astronomische waarnemingen laten zien dat zeer waarschijnlijk $k=0$ laten we die verder buiten beschouwing, hoewel dat eigenlijk wel een verklaring behoeft.

Lemaître liet zien dat, als $\Lambda=0$, de uitdijing van het Heelal in de loop van de tijd steeds langzamer gaat. Deze oplossing werd algemeen aanvaard, eigenlijk omdat de meeste kosmologen en fysici geen raad wisten met de term Λ , die de energiedichtheid van de lege ruimte weergeeft. De enige die Λ serieus nam was Willem de Sitter, die dapper concludeerde dat het Heelal exponentieel kan uitdijen, zoals direct is in te zien uit bovenstaande vergelijking.

Wanneer zowel ρ als Λ worden meegenomen krijgen we een oplossing waarin het Heelal eerst wordt gedomineerd door materie, waardoor de uitdijing vertraagt. Later neemt de energie van de ruimte de zaak over en gaat de ruimte steeds sneller expanderen. Die mogelijkheid echter werd door de meeste astronomen van de hand gewezen als onwaarschijnlijk en onnodig.

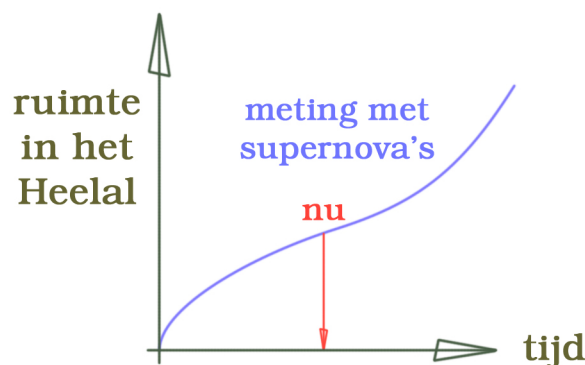


Fig.3 De schaalfactor (“hoeveelheid ruimte”) in een heelalmodel dat zowel materie als vacuüm-energie bevat

Men kan de schaalfactor a direct bepalen uit $a=1/(1+z)$, maar als functie van wat? Liefst zou je direct $a(t)$ willen hebben, maar koekoeksklokken zijn schaars in het Heelal. Doch als je $a(r)$ zou kunnen vinden, waarin r de metrieke afstand, dan is dat net zo goed omdat het licht altijd met dezelfde snelheid beweegt. Het is dus zaak om de roodverschuiving van verre kosmische objecten te koppelen aan hun afstand: $z(r)$.

Daar zit hem nu net de grootste moeilijkheid, die de sterrenkunde vanaf haar oerbegin heeft geteisterd: hoe ver staat iets bij ons vandaan? Bepalingen met behulp van de *parallax* (vergelijkbaar met het stereo-zien van onze ogen) zijn ver buiten de Melkweg onmogelijk.

En daar komen dan die supernova's in beeld, dramatisch eindproduct van de evolutie van sterren. Een ster is verwickeld in een onophoudelijke strijd tussen de zwaartekracht, die de ster wil doen krimpen, en de druk van gas en straling, die de ster doet zwellen. Tussen zwaarte en druk bestaat een soort gewapende vrede, die vele miljarden jaren kan duren. De straling van de ster betekent energieverlies, en ondermijnt de inwendige druk. Zolang energie kan worden geleverd door kernfusie in het binnenste van de ster, blijft de druk hoog genoeg om ineenstorting te voorkomen. De fusie maakt helium uit waterstof, koolstof uit drie heliumkernen, en soms nog zwaardere elementen. maar de fusie 'brandstof' raakt ooit op, en uiteindelijk wint de zwaartekracht. De pit van de ster stort ineen en de buitenlagen worden weggeslingerd.

Het compacte overblijfsel is ofwel een witte dwerg, of een neutronenster, of een zwart gat. In een witte dwerg wordt de druk niet geleverd door de thermische beweging van atomen en electronen zoals in een ster, maar door de Pauli-regel, die electronen verbiedt dezelfde quantumtoestand te hebben. De modale witte dwerg bestaat grotendeels uit koolstof, en is ongeveer zo groot als planeet Aarde. Ook neutronensterren worden tegen ineenstorting behoed door Pauli, maar in dat geval zijn het de neutronen die de toestand van de stermaterie bepalen. Beide typen noemt men 'gedegenererde sterren'. Chandrasekhar bewees dat de massa van zo'n ster niet groter kan zijn dan 1,4 maal de massa van de Zon, een ontdekking waarvoor hij in 1938 de Nobelprijs kreeg. Is het overblijfsel van een ster zwaarder dan die Chandrasekhar-limiet, dan helpt helemaal niets meer en stort de ster ineen tot een zwart gat.

Sterren staan niet alleen in de ruimte; de meeste maken deel uit van een dubbelster. Omdat zware sterren sneller evolueren dan lichte, zal altijd een van de twee ontploffen voordat de andere daar aan toe is. Zo kan een dubbelster ontstaan die een min of meer gewone ster paart aan een witte dwerg. Is de baan van de dubbelster klein genoeg, dan zal die dwerg gas gaan opnemen uit de buitenlagen van zijn grotere compagnon. Zodoende neemt de massa van de dwerg toe, totdat uiteindelijk de fatale Chandrasekhar-limiet wordt bereikt.

Men zou kunnen denken dat daardoor de witte dwerg uiteindelijk zo wordt vetgemest dat hij tot een zwart gat ineenstort. Maar uit theoretische berekeningen volgt dat door het toenemen van de massa de inwendige temperatuur zo snel toeneemt dat de ster convectief wordt: er ontstaan turbulente stromingen in het binnenste. Die woelingen mengen de stermaterie dooreen, zodat meer koolstof in de extreem hete centrale pit van de ster kan komen.

Zodoende kunnen de koolstofkernen hun fusieproces hervatten en energie gaan leveren. Een gewone ster zou dan gaan uitdijen totdat weer evenwicht is ontstaan tussen gasdruk en zwaartekracht, maar in een gedegenererde ster is de 'Pauli-druk' onafhankelijk van de temperatuur. Dus blijft de ster in eerste instantie zo klein als hij was en loopt de fusie uit de hand. Een reusachtige explosie van fuserende koolstof en zuurstof baant zich in enkele seconden een weg door de witte dwerg: een supernova is geboren, die vijf miljard maal meer licht uitzendt dan de Zon.

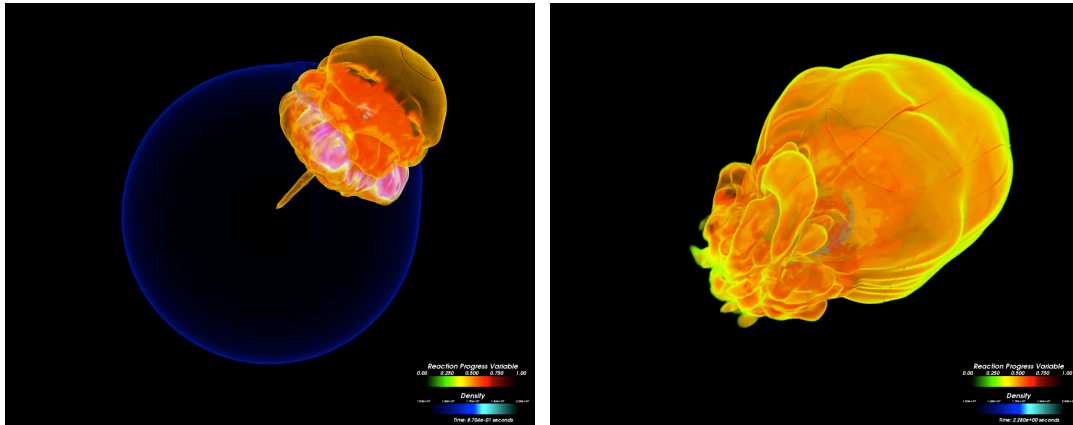


Fig.4 Twee stadia van de ontploffing van een Type Ia supernova. De blauwe cirkel toont het oppervlak van de witte dwerg, ongeveer zo groot als de Aarde. Een zeer hete pluim van fuserende koolstof stijgt op naar het oppervlak van de ster. Daarboven breidt de explosie zich uit voordat de rest van het binnenste aan de kernexplosie gaat deelnemen. De schaal van het plaatje links is ongeveer zesmaal kleiner dan rechts.

Supernova's kunnen ook op andere manieren ontstaan, maar het hier beschreven witte-dwerg-dubbelster type (door Minkowski en Zwicky omstreeks 1940 "Type Ia" genoemd, afgekort tot SNIa) heeft de bijzondere eigenschap dat de opgebrachte energie vrij scherp bepaald is. Dat komt doordat de Chandrasekhar-massa bijna niet afhankelijk is van de samenstelling van de gedegenereerde materie.

Aldus zijn SNIa voortreffelijke kosmische bakens: bijna zo helder als een heel sterrenstelsel, dus tot op enorme afstand zichtbaar; en met een lichtkracht die maar zwakjes afhankelijk is van de verdere details van de ster. Na ijking en correctie voor zulke details (chemische samenstelling, duur van de explosie en dergelijke) kunnen SNIa dienen als 'standaard lichtbron' waarvan de afstand kan worden bepaald met gewone astronomische technieken.

Een groep astronomen onder leiding van Perlmutter was in 1988 begonnen met het opsporen van SNIa-types om hun licht te gebruiken als maatstaf voor de diepte van het Heelal. Zes jaar later ondernamen Schmidt en Riess een soortgelijke zoektocht met iets andere waarneemmethoden, allen op zoek naar de functies $z(r)$ en $a(t)$.

Kijken naar kosmologisch verre objecten is niet zomaar moeilijk, het is extreem lastig. De schijnbare helderheid van een lichtbron neemt kwadratisch af met de afstand: tienmaal zo ver, honderd maal zo zwak. Niet zo in het diepe Heelal: vanwege de uitdijing van de ruimte neemt daar de schijnbare helderheid ongeveer af met de vierde macht van de afstand! Daarom hebben kosmologen steeds gevoeliger detectoren nodig, zoals ccd's, en enorme kijkers. De vier VLT-telescopen van de Europese sterrenwacht op Cerro Paranal in Chili hebben elk een doorsnede van 8 meter, en de European Extremely Large Telescope (E-ELT) zal een doorsnede hebben van maar liefst 38 meter.

Je moet ze vinden te midden van veel andere variabele of ontploffende sterren, en pas nadat je de lichtkromme hebt gemeten weet je of het een bruikbare supernova was. Dus zijn er veel en grote telescopen nodig. Ook is het mooi dat de commissies die de waarneemtijd verdelen hebben ingezien hoe belangrijk dit werk is, en tijd hebben toegekend ondanks de enorme druk van andere onderzoeksprojecten.

In hun waarneemprojecten vonden Perlmutter, Schmidt en Rees (met hun talrijke medewerkers) een stuk of 50 Type-Ia supernova's die goed genoeg waren om het verband tussen de kosmische roodverschuiving en de metrische afstand te bepalen. Hiermee kon worden vastgesteld wat de relatieve bijdrage is van de verschillende termen in de

Friedmann-vergelijking. Gebruik makend van nog andere gegevens over de uitdijning van het Heelal, in het bijzonder die welke volgen uit de eigenschappen van de kosmische microgolf achtergrondstraling (CMBR), de ‘gloed van de oerknal’, vonden zij tot hun verbazing dat de Λ -term dominant is: het Heelal dijt dus niet alleen sneller uit dan gedacht, maar zal in de toekomst steeds sneller gaan expanderen totdat de schaalvergroting uiteindelijk exponentieel wordt. Bovendien bevestigden zij dat de massa in ρ ongeveer acht maal groter is dan die welke geleverd wordt door sterren: het mysterieuze ‘donkere spul’ (men zegt wel ‘donkere materie’, maar we weten niet eens of het hier om ‘materie’ gaat of iets anders). Ook blijkt dat de ‘donkere energie’ die overeenkomt met Λ zowat tweemaal groter is dan ρ .

Zelden hebben kosmologen, die toch wel wat revoluties gewend zijn, hun wereldbeeld zo moeten aanpassen als in dit geval.

Altijd leuk, zo’n Nobelprijs, maar onderzoek is nooit af. Ook in dit geval blijven er vragen, en niet de minste. Voor mij als fysicus zijn er alvast twee. Ten eerste: waarom is er ruwweg evenveel donkere ‘materie’ als donkere ‘energie’? Uit de tweede Friedmann-vergelijking (hier niet getoond) is gemakkelijk af te leiden dat de massadichtheid ρ sterk afneemt als a toeneemt, terwijl Λ constant blijft. Het is dus een vreemd toeval dat het Heelal op dit moment net ‘op de wip’ zit: in de buurt van het buigpunt van de functie $a(t)$. Waarom zou de hele kosmos dat op dit moment doen, toevallig net een paar miljoen jaar nadat wij uit de Afrikaanse bomen zijn geklommen om sterrenkunde te gaan doen?

Ten tweede: nu blijkt dat we ρ en Λ beide nodig hebben in de Einsteinvergelijking, ligt het voor de hand om eens te gaan wroeten achter dat rare = teken. *De structuur en dynamica van ruimte en tijd wordt bepaald door de verdeling van massa, energie en impuls*. Hoezo, ‘wordt bepaald door’? Hoe gaat dat precies? Grof geformuleerd: hoe vertelt de Zon aan de ruimte eromheen dat-ie gekromd moet zijn? Iets fysischer: wat is de wisselwerking tussen deeltjes, ruimte en tijd?

Geen idee (anders zat ik zelf volgend jaar in Stockholm aan het diner). Maar zelfs als de vondst van de drie prijswinnaars iets heel anders zal blijken te zijn blijft het een zeer prijzenswaardig resultaat, want het ging regelrecht in tegen de verwachtingen, gevestigde modellen en interpretaties van bijna alle astronomen.

In zijn boek “Cosmos” schreef Carl Sagan: *Buitengewone beweringen vereisen buitengewone bewijzen*. Passen wij deze ‘Sagan Standaard’ toe op de mededeling dat ons Heelal over een paar miljard jaar zal beginnen exponentieel te ontploffen, dan ligt het astronomische bewijs vrij stevig vast. De metingen aan de CMBR zijn na tientallen jaren studie een van de meest solide van de sterrenkunde, en wordt nog steeds beter. De metingen aan SNIa gedaan door de laureaten zijn inmiddels op allerlei manieren herhaald en verbeterd, en veel twijfel over de resultaten is er op dit moment niet.

Blijven de problemen met de natuurkunde. Helemaal niets van de implicaties (gedrag van 95% van het Heelal) is fysisch begrepen, of zelfs maar als behoorlijke onderzoeksvraag geformuleerd. Met de bezweringsformules van de snaartheoretici kunnen wij vooralsnog helemaal niets: buitengewoon bewijs in die richting ontbreekt volkomen. Als astrofysicus zeg ik dus tegen mijn natuurkunde-collega’s: doe je best – er moge dan een financiële crisis zijn, de kas van Nobel is nog lang niet leeg.

Enkele URL's:

en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_supernova#Consensus_model

www.youtube.com/watch?v=gQ07sZKcUzs

Saul Perlmutter werd in 1959 geboren in Champaign-Urbana, Illinois (USA). Hij promoveerde in 1986 aan de Universiteit van Californië, Berkeley. Thans hoogleraar astrofysica aan diezelfde universiteit, en verbonden aan het Lawrence Berkeley National Laboratory.

Brian P. Schmidt, zowel Amerikaans als Australisch staatsburger, werd in 1967 geboren in Missoula, Montana (USA). Hij ontving zijn doctoraat in 1993 van de Harvard Universiteit, Cambridge USA. Thans hoogleraar sterrenkunde aan de Australian National University in Weston Creek, Australië.

Adam G. Riess werd in 1969 geboren in Washington DC (USA). Ook hij verkreeg zijn doctoraat van Harvard, in 1996. Op dit moment is hij hoogleraar sterrenkunde en natuurkunde aan de Johns Hopkins Universiteit. Ook is hij verbonden aan het Space Telescope Science Institute in Baltimore, USA.

