

Deze bespreking is geschreven voor de Academische Boekengids ABG. Een verkorte versie zal binnenkort verschijnen.

Radiatoris en de kosmos

Piet van der Kruit

COSMIC NOISE: A HISTORY OF EARLY RADIO ASTRONOMY, door *Woodruff T. Sullivan, III*, xxi + 542 pag., 144.00\$ (Hardback), Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-76524-4, 2009

DE SITTER: EEN ALTERNATIEF VOOR EINSTEINS HEELALMODEL, door *Jan Guichelaar*, 159 pag., 34.50€ (gebonden), Veen Magazines, 2009

FINDING THE BIG BANG, door *P.J.E. Peebles, L.A. Page, jr. & R.B. Partridge*, xvi + 571 pag., 76.00\$ (Hardback), Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-51982-3, 2009

Er is geen Nobelprijs voor de sterrenkunde. Maar er zijn wel degelijk Nobelprijzen voor de natuurkunde uitgereikt voor theoretische, aan de astronomie verwante onderwerpen, zoals bijvoorbeeld voor de verklaring van de energieproductie in sterren aan Hans Bethe in 1967, of werk aan de structuur en evolutie van sterren en hun compacte resten en de theorie van het ontstaan van de chemische elementen (Subrahmanyan Chandrasekhar en William Fowler in 1983). Maar de klassieke astronomie is tot op de dag van vandaag geen onderwerp geweest van een Nobelprijs. Als dat wel het geval zou zijn geweest dan zouden de Nederlanders als Jacobus C. Kapteyn, Willem de Sitter en Jan H. Oort die ook zeker gekregen hebben.

Er zijn wel recente, astronomisch getinte Nobelprijzen geweest voor *observationeel* werk, met name in de radio-astronomie en/of de kosmologie. In 1974 kregen Martin Ryle en Anthony Hewish de prijs voor het principe van apertuursynthese –het principe waarmee ook de Westerbork Synthese Radio Teleskoop WSRT werkt– en voor de ontdekking van de pulsar; in 1978 Arno Penzias en Robert Wilson (de halve prijs) voor de ontdekking van de kosmische microgolf achtergrondstraling (hieronder CMB naar de Engelse benaming); in 1993 Joseph Taylor en Russell Hulse voor aanwijzingen van gravitatiestraling in een pulsar-dubbelster en in 2006 John Mather en George Smoot voor de precieze bepaling van het karakter van en fluctuaties in de CMB. In het spoor van de eerdere prijzen voor het openen van nieuwe ‘vensters’ op het heelal past de prijs van 2002 aan Raymond Davis, Masatoshi Koshiba en Riccardo Giacconi voor de ontdekking van kosmische neutrino’s en Röntgenbronnen.

Je kunt je afvragen waarom wel een Nobelprijs voor de ontdekking van de pulsars, maar niet voor Maarten Schmidt voor die van de quasars? Of waarom wel voor de ontdekking van de CMB, en vervolgens het karakter en structuur daarin, maar niet aan Edwin Hubble voor de minstens net zo fundamentele ontdekking van de expansie van het heelal? Of waarom wel voor het bevestigen van de door Einsteins algemene relativiteitstheorie voorspelde gravitatiestraling in een dubbel-pulsar, maar niet voor de voor de acceptatie van die theorie zo belangrijke test door Arthur S. Eddington en Frank W. Dyson van de afbuiging van licht door het zwaartekrachtsveld van de zon? Deze waarneming van de positie van sterren vlak bij de zon tijdens de zonsverduistering van 1919 is overigens geheel ten onrechte verdacht geworden door een opmerking van Stephen Hawking in zijn veel gelezen en invloedrijke boek ‘*A Brief History of Time*’, waarin hij zegt dat de nauwkeurigheid van het experiment te slecht was om de meting te doen en dat Eddington in zijn analyse waarschijnlijk

naar het antwoord heeft toegewerkt. Ter gelegenheid van de honderdste geboortedag van Einstein is het fotografische materiaal met moderne meetapparatuur opnieuw gemeten en ik gebruik deze uitgelezen (mag je dit woord gebruiken in een boekengids?) gelegenheid graag om onder de aandacht te brengen dat dit overtuigend heeft aangetoond dat Hawking hier de plank flink heeft misgeslagen (zie de literatuurverwijzingen).

De niet met een Nobelprijs geëerde ontdekkingen, die ik noemde, zijn alle op het terrien van klassieke astronomie en gebruik van *optische* telescopen. Of er een Nobelprijs komt voor de ontdekking van (aard-achtige) exoplaneten valt nog te bezien, want dat betreft toch ook optische waarnemingen, alhoewel deels vanuit de ruimte.

Kosmologie is de studie van de structuur, het ontstaan en de evolutie van het heelal. Het is recent uitgemond in wat wordt genoemd het ‘concordantie model’ van het heelal, d.w.z. een standaard model dat het heelal beschrijft als ontstaan in een ‘Big Bang’ (of oerknal) ongeveer 13.7 miljard jaar geleden, en dat in ronde getallen bestaat uit een procent of 5 gewone materie als waar u en ik uit bestaan, zo’n 25% donkere materie die samen met de gewone materie de uitdijing afremt en voor zo’n 70% donkere energie, die de expansie juist versnelt. Mijn collega Ed van den Heuvel heeft dit beschreven in zijn artikel *Einsteins blunder*’ in ABG 82. Met de concordantie wordt bedoeld, dat dit standaard model het resultaat is van uitsluiting van een groot aantal modellen, die volgens de algemene relativiteits theorie van Einstein wel mogelijk moeten zijn, maar door diverse lijnen van onderzoek worden uitgesloten. Zo blijft er een meest waarschijnlijk model over dat consistent is met al onze kennis. De radiosterrenkunde heeft daarin een belangrijke rol gespeeld, want uiteindelijk is daaruit de studie voortgekomen van de kosmologische achtergrondstraling, een overblijfsel van de vroege, hete fase van het heelal kort na de Big Bang, en de daarin aanwezige vingerafdrukken van de eerste structuur in het heelal. De details van die structuur zijn, samen met de ontdekking van de versnelling van de expansie met behulp van supernovae, van bepalend belang geweest bij de totstandkoming van deze concordantie. Deze ontwikkelingen zijn van relatief recente tijd. De versnelling van de expansie is ontdekt in de loop van de jaren negentig (van de vorige eeuw, moet je er dan altijd achter zetten, alhoewel dat evident is) en de meting van de structuur in die achtergrondstraling op voldoende kleine schaal stamt van kort na de milleniumwisseling.

Al lang daarvoor was het vast komen te staan dat alles wat we wisten erop wees, dat het heelal is ontstaan in de Big Bang, dat na afloop van die hete fase de eerste structuur was ontstaan en de materie (bijna) uitsluitend in de vorm van waterstof en helium was en dat de verdere chemische elementen in sterren zijn ontstaan. Dit artikel gaat over de geschiedenis van deze fundamentele inzichten aan de hand van drie te bespreken boeken. Deze gaan over het ontstaan en de vroege geschiedenis van de radiosterrenkunde, de realisatie dat de relativiteitstheorie expansie toeliet, het besef dat er een oerknal geweest moet zijn en de ontdekking van het resterende stralingsveld en de aanwezigheid van structuur daarin.

RADIOSTERRENKUNDE

Woodruff (‘Woody’) Sullivan is een Amerikaanse radio-astronoom, die een zeer belangwekkend boek, *‘Cosmic Noise’*, heeft geschreven over de vroege geschiedenis van de radiosterrenkunde. Hij heeft over dit project 37 jaar gedaan, alhoewel hij intussen wel enkele deelstudies heeft gepubliceerd. In 1971 is hij begonnen om met een taperecorder interviews op te nemen met mensen die de vroege ontwikkeling hebben meegemaakt. Van 1971 tot 1973 was hij postdoc in Groningen en vele Nederlandse astronomen kunnen zich dat nog herinneren; zoals later bleek (zoals hij zelf zegt) wat naïef, want het uitwerken en de bijkomende research was veel tijdrovender dan hij vermoedde. Hij heeft indrukken en herinneringen vastgelegd van 115 belangrijke spelers, waarvan wel inmiddels

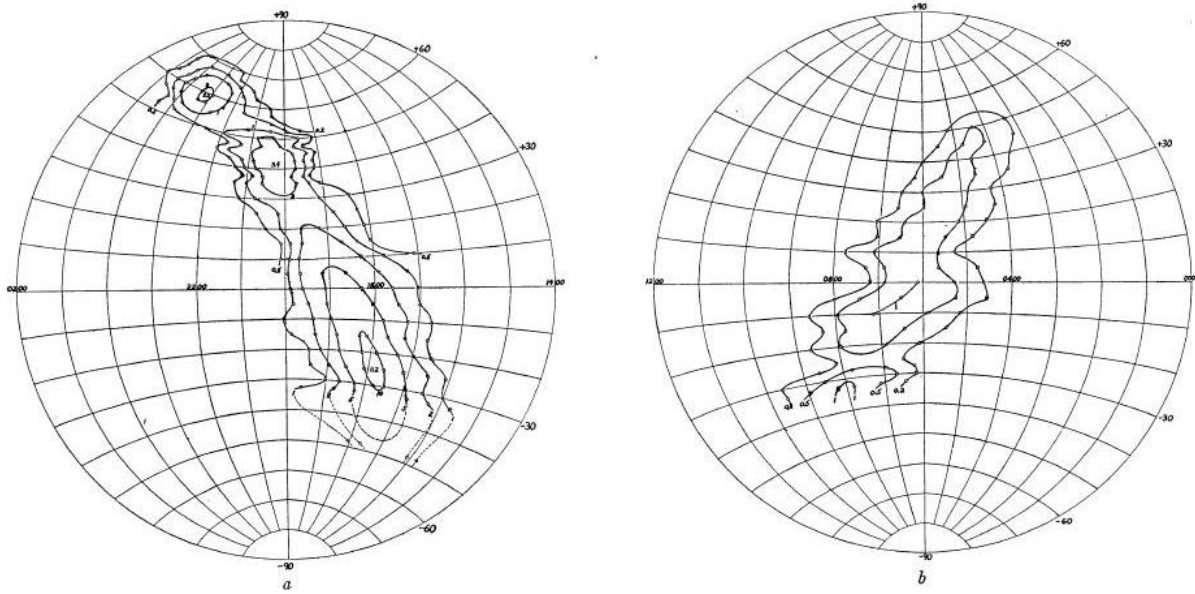


Figure 1: De kaart van de radiostaling over de hemel, zoals die door Reber in de jaren veertig is bepaald. De twee panelen zijn de twee tegenovergestelde helften van de ‘hemelbol’; in beide gevallen ligt de noordpool van de hemel bovenaan en de equator midden horizontaal. De onderste delen kunnen vanaf het noordelijk halfrond niet worden gezien. De verdeling valt samen met de Melkweg; het centrum ervan is het heldere deel rechtsonder in het linker paneel.

omstreeks 60% is overleden. Maar na bijna vier decennia ligt er dan ook een uitstekend boek, waarop weinig valt aan te merken. Het behandelt de radio-astronomie van de opkomst tot ongeveer 1953. Jammer, dat hij Nederland bijna altijd vertaalt met ‘Holland’ in plaats van het correcte ‘the Netherlands’. Ook de prijs van dit boek is hoog, maar daar staat tegenover, dat het uitstekend is geïllustreerd en uitgevoerd.

De geboorte van de radio-astronomie wordt meestal gelegd bij het werk van Karl Jansky, die voor de Bell Telephone Laboratories in New Jersey in 1932 een eenvoudige draaibare antenne construeerde om de horizon af te zoeken. Dit om de oorsprong van voor radio-communicatie storende signalen op te sporen. Al eerder, reeds eind negentiende eeuw nadat radiostraling zelf ontdekt was, hadden radio-ingenieurs tevergeefs gezocht naar zulke straling van de zon. Bij een frequentie van 20 MHz (golflengte zo’n 15 meter) had Jansky een ‘bundel’ –de hoek waarover de antenne signalen kan onderscheiden en lokaliseren– van een graad of 30! Hij merkte op dat de signalen een buitenaardse oorsprong hadden; alleen kwamen ze niet dagelijks terug met een 24-uurs klok, zoals je zou verwachten als die van de zon kwamen, maar met een ritme van 23 uur en 56 minuten. Dit is de tijd waarin de aarde een volledige omwenteling maakt ten opzichte van de sterrenhemel. Jansky vond dat de door hem gevonden radiostraling het sterkst was in de richting van het centrum van ons Melkwegstelsel, maar zich verder uitspreidde over de gehele Melkweg. Jansky werd door zijn werkgever niet in staat gesteld om dit werk aan ‘star static’ voort te zetten; Sullivan geeft wel aan dat Jansky er zonder meer genoeg mee nam.

De voortzetting komt op naam van de Amerikaanse electro-ingenieur Grote Reber. In zijn vrije tijd en op eigen kosten bouwde hij een 9.4 meter schotel in zijn achtertuin in Wheaton, Illinois, en stelde zich allereerst ten doel te bevestigen dat Jansky’s straling ook op hogere frequenties te ontdekken viel. Hij maakte een kaart van de straling over de hemel en publiceerde zijn resultaten in twee artikelen (in 1940 en 1944) in een astronomisch vaktijdschrift. Ook registreerde hij later radiostraling van de zon. Maar door zijn eigenaardige persoonlijkheid (hij werkte uitzonderlijk

individualistisch) is zijn invloed eigenlijk beperkt gebleven.

Het begon allemaal pas echt tijdens de tweede wereldoorlog, voornamelijk in relatie tot de ontwikkeling en toepassing van radar. De Engelsman Stanley Hey was betrokken bij de radar installaties aan de Britse kust, die regelmatig overstemd werden door een mysterieus signaal. Het bleken niet de Duitsers te zijn, maar de zon. Dat bleef natuurlijk geheim, maar vergelijkbaar onderzoek werd (zo bleek later) ook elders gedaan. Hey was na de oorlog in staat om zijn door het leger gefinancierde onderzoeksgroep bij elkaar te houden tot 1948, maar toen was het door de Koude Oorlog toch afgelopen. Wel had hij inmiddels de straling van het Melkwegstelsel van Jansky en Reber onderzocht en de eerste discrete, geïsoleerde bron van radiostraling gevonden in het sterrenbeeld Zwaan, Cygnus A.

Na de oorlog werd de radio-astronomie ook opgepakt door een andere groepen, met name in Engeland (Martin Ryle in Cambridge en Bernard Lovell in Manchester) en Australië (Edward Bowen en Joseph Pawsey in Sydney). In groot detail, maar zeer boeiend en uitstekend gedocumenteerd en geïllustreerd, laat Sullivan ons zien, hoe dit ontwikkelde in de studies van de zon, meteorsporen (via radar), de straling van de Melkweg en van nabije melkwegstelsels als de Andromedanevel en in groeiende mate de studie van de ‘radiosterren’. De laatste waren dermate geïsoleerd dat het specifieke objecten moesten zijn, maar ze bleken niet eenvoudig met bekende astronomische objecten te associëren. Alleen enkele van de helderste bleken overeen te stemmen met bekende, zij het uitzonderlijke objecten. Bijvoorbeeld Taurus A bleek samen te vallen met de Krabnevel (restant van een supernova die in 1054 was waargenomen), Virgo A met het helderste stelsel in de nabije Virgo-cluster van melkwegstelsels, Cassiopeia A bleek ook een supernovarest te zijn en Centaurus A is geassocieerd met een nabij reuzenstelsel met een merkwaardige stofbaan. Cygnus A, de helderste bron aan de hemel, bleef lang niet identificeerbaar,

Inmiddels waren ook elders groepen zich gaan bezig houden met de radiostraling. De eerste Nederlander die we als waarnemer tegenkomen is Jakob Houtgast van Utrecht, die in Meudon bij Parijs reeds in de jaren veertig met Marius Laffineur uitbraken van radiostraling door de zon onderzocht. De lijn naar Nederland liep langs de weg van astronomen en niet van radio-ingenieurs. Jan Hendrik Oort had in de oorlog de publicaties van Reber gezien en vroeg Hendrik C. van de Hulst te zien of er een spectraallijn in het radiogebied zou zijn om studies te maken van de verdeling en bewegingen van interstellair gas in het Melkwegstelsel. Van de Hulst voorspelde dat een spectraallijn van neutrale waterstof bij een golflengte van ongeveer 21 cm waarneembaar zou moeten zijn. Na de oorlog schreef Oort aan Reber om te vragen wat de kosten zouden zijn van een radioteleskoop als de zijne, maar uiteindelijk werd (zoals overigens ook elders) een Würzburg schotel van de Duitse radar installaties omgebouwd en de 21-cm lijn van neutrale waterstof in Kootwijk waargenomen, alhoewel de ontdekking net iets eerder plaatsvond door Harold Ewen en Edward Purcell van Harvard in de V.S. (en kort erna bevestigd werd door Chris Christiansen en J.V. Hindman in Australië). Het ontstaan van de Nederlandse radio-astronomie is overigens ook uitstekend beschreven door Hugo van Woerden en Richard Strom.

Woody Sullivan sluit zijn zeer leesbare en boeiende boek af met een discussie over de sociologische aspecten van de opkomst van de radiosterrenkunde. De beoefenaars waren oorspronkelijk geen astronomen, maar zochten wel aansluiting daarmee en werden op den duur ‘radio-astronomen’, daarbij de ‘astronomen’ forcerend de nieuwe aanduiding ‘optische astronoom’ te accepteren. Het staat overigens model voor de opening van andere golflengtegebieden (infrarood, Röntgen, etc.), waaruit ook takken van astronomie ontstonden. Dit gebeurde overigens geleidelijk en zonder veel weerstand, zodat je het eerder het ontstaan van een ‘nieuwe astronomie’ dan een revolutie in de klassieke zin van het woord kan noemen. Sullivan classificeert het als de vierde van zulke transformaties van de sterrenkunde na de uitvinding van de teleskoop (17e eeuw), Herschels gebruik van grote spiegeltelescopen (18e eeuw) en de opkomst van fotografie en spectroscopie (19e eeuw).

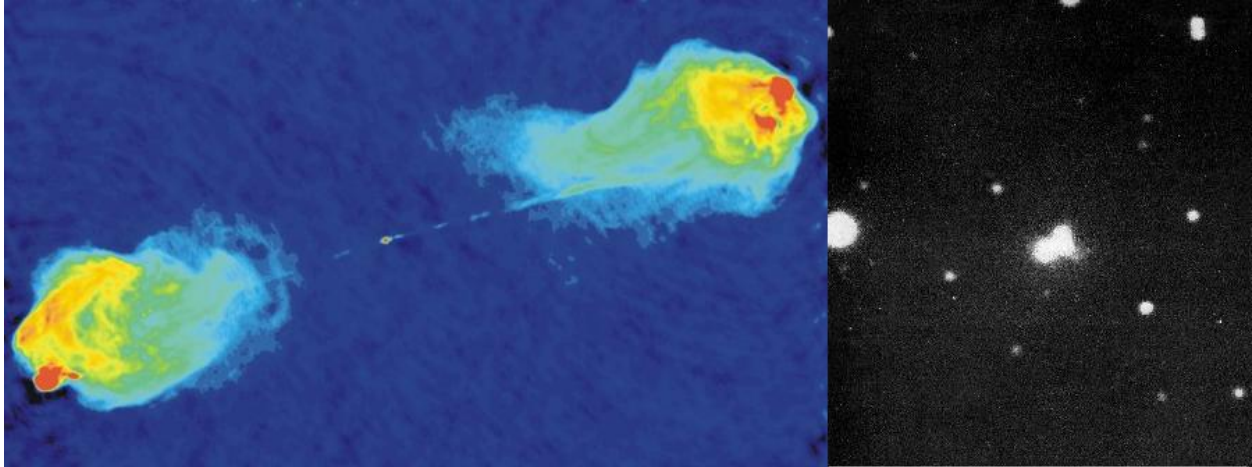


Figure 2: De radiobron Cygnus A in het sterrenbeeld Zwaan. Links een moderne opname met de Very Large Array in de V.S., een grote radioteleskoop als die te Westerbork. Rechts de identificatie met een zeer verweg gelegen melkwegstelsel. Het valt samen met het centrale puntbronnetje in het radiobeeld. De twee radio-‘lobben’ bestaan uit plasma –d.w.z. magneetvelden en geladen deeltjes met zeer hoge energieën– die door de kern van het stelsel zijn uitgestoten. De kern bevat waarschijnlijk een massief zwart gat, dat het plasma in ‘jets’ uitstoot. De vrijkomende energie is dermate groot dat zulke radiobronnen over grote afstanden in het heelal kunnen worden gezien, soms zo ver van ons vandaan dat in het optisch alleen de kern goed zichtbaar is (een quasar) of het stelsel in het geheel niet geïdentificeerd kan worden.

Opmerkelijk is dat de radio-astronomie in de V.S. later ontwikkelde dan elders, volgens Sullivan mede door de kracht daar van de optische sterrenkunde en ondanks de inspanningen van prominente astronomen als Jesse Greenstein.

De radiosterrenkunde lijdt als gevolg van de veel langere golflengten aan zeer slecht oplossend vermogen, het vermogen details te zien. In het optisch is het van de orde van een boogseconde, maar voor een radioteleskoop als te Dwingeloo (25 meter diameter) is het bij 21 cm golflengte een halve graad of vergelijkbaar met de volle maan. Al spoedig werden technieken van interferometrie, d.w.z. het combineren van signalen van radioteleskopen om beter details te kunnen zien, ontwikkeld. Dit leidde tot apertuursynthese en Ryle’s Nobelprijs. Ook werd gebruik gemaakt van scintillaties van kleine, compacte bronnen die ontstaan als de straling door het plasma van de geladen deeltjes van de zonnewind beweegt. Daarvoor is registratie van snelle veranderingen in de tijd nodig en dat leidde tot de ontdekking van de pulsar en de Nobelprijs van Hewish.

KOSMOLOGIE EN DE SITTER

De radiobron Cygnus A werd in 1951 geïdentificeerd door Walter Baade en Rudolph Minkowski met de grote 200-inch teleskoop op Palomar Mountain, nadat radio-astronomen als Francis Graham Smith een voldoende nauwkeurige positie hadden gemeten. Het bleek een zeer verweg gelegen object te zijn, dat leek op twee melkwegstelsels in botsing. Het werd duidelijk dat zelfs de sterkste radiobronnen op grote, kosmologisch interessante afstanden konden staan. Ook al rond 1953, als de geschiedschrijving van Sullivan stopt, was er een nieuw inzicht ontstaan, met name in Cambridge, waar de groep van Martin Ryle vond, dat de verdeling van de radiobronnen over de hemel een sterke component had, die uniform over de hemel verdeeld was en dus met het heelal op grote schaal kon worden geassocieerd. Een belangrijke studie in die ontwikkeling was een artikel van Martin Ryle en Peter Scheuer in 1955 over *‘The Spatial Distribution and Nature of Radio Stars’*, waarin zij het aannemelijk maakten, dat het objecten zijn ver in het heelal en dat de tellingen aangeven dat

hun aantallen veranderen met afstand en er dus evolutie met de kosmische tijd optrad. Dat zou in tegenspraak zijn met de ‘steady-state theorie’ van Fred Hoyle en anderen, waarbij het heelal op grote schaal juist niet verandert en er continue creatie is van nieuwe materie om de door de expansie afnemende dichtheid te compenseren. In zo’n model zou de populatie van radiobronnen ook niet evolueren.

Dat bood belangrijke nieuwe perspectieven. Als radiosterren objecten op zulke grote afstanden zijn, dan zouden ‘bron-tellingen’, d.w.z. de toename van het aantal radiobronnen als je zwakker en zwakker waarneemt, informatie kunnen bevatten over de structuur van het heelal. Tijdens een ‘Solvay-conferentie’ uit 1958 over *‘La Structure et l’Évolution de l’Univers’* te Brussel, vatte Oort het werk aan de verdeling van optische melkwegstelsels samen en concludeerde, dat het heelal op kleinere schaal verre van uniform gevuld is met stelsels, maar wel uniform op grote schaal is. Er was weliswaar geen aanwijzing voor verandering in de dichtheid van stelsels met groeiende afstand, maar dit betrof afstanden die klein waren vergeleken bij die corresponderend met tijdschalen van miljarden jaren. Er ontstond een discussie over de vraag of de telling van de radiobronnen fundamentele informatie konden geven over de structuur van het heelal op grote schaal. Oort bleek daarover er een optimistische opvatting op na te houden. Dit zien we later terug in het feit dat volgens hem zulke tellingen een belangrijk onderwerp van studie zouden moeten zijn met (en ook een belangrijke motivering vormde voor de bouw van) de Westerbork radioteleskoop. Uiteindelijk hebben de studie van deze tellingen van radiobronnen en –na de ontdekking ervan– ook van de quasar aangetoond dat die niet verenigbaar zijn met de steady state theorie; echter het bleek dat deze tellingen primair informatie geven over hun kosmologische evolutie (aantal en helderheid als functie van de tijd) en weinig over de structuur van het heelal.

Kosmologie is onlangs uitstekend besproken in de ABG door mijn collega Ed van den Heuvel in *‘Einsteins Blunder’*. De Nederlandse astronoom Willem de Sitter heeft een belangrijke rol gespeeld in het ontwikkelend begrip van de kosmologie. Zijn recente biografie *‘De Sitter: Een alternatief voor Einsteins heelalmodel’* van J. Guichelaar, is door Ed al genoemd, evenals de mooie bespreking ervan door de onlangs overleden nestor van de Nederlandse sterrenkunde Adriaan Blaauw: *‘Huisvader van de Sterrenkunde’*. Hier verdient dit boek meer aandacht, in het kader van de andere twee te bespreken boeken, maar ook omdat een biografie van de Sitter en een appreciatie van zijn plaats in het geheel niet bestond, maar wel zeer ontbeerd werd.

Guichelaars biografie van Willem de Sitter is zeer de moeite waard; het is gedegen, zeer leesbaar en uitstekend geïllustreerd. Het is in het Nederlands geschreven, maar het zou bepaald niet misstaan om een Engelse versie te publiceren. De schrijver is zelf natuurkundige van huis uit en geeft een duidelijke uitleg van de fysische achtergronden, die door een ontwikkelde leek eenvoudig te volgen moet zijn. In de ondertitel verwijst hij naar de Sitters kosmologische werk, alhoewel diens studie van de banen van het stelsel van satellieten van Jupiter een eveneens zeer fundamentele bijdrage leverde. Guichelaar geeft ook aan dat de Sitter zelf dit waarschijnlijk zijn meest belangrijke werk heeft gevonden. In een bespreking van zijn biografie mag een korte uitwijding over dit werk niet ontbreken.

De vier grote satellieten van Jupiter (ook wel de Galileïsche, omdat Galilei ze in 1610 ontdekte met de pas uitgevonden teleskoop) beïnvloeden elkaars banen en een beschrijving ervan is veel ingewikkelder dan van individuele banen rond de planeet. Er bestaan alleen algemene oplossingen voor een systeem van twee lichamen (de Keplerbanen van de planeten), maar voor meer dan twee lichamen zijn strikte oplossingen er alleen in speciale gevallen. De Sitter koos als basis-model voor het Jupiter systeem het bijzondere geval van het vier-lichamen probleem, waarin de massa van één van de lichamen (Jupiter) verreweg de grootste is en de andere er in hetzelfde vlak omheen draaien in banen waarvan de omlooptijden in resonantie zijn, dus verhoudingen zijn van kleine getallen. De verstoringen van die kleinere lichamen op elkaar zijn dan periodiek. Dit slaat op de binnenste



Figure 3: De Sitter heeft veel werk gedaan aan de stelsel van grote, Galileïsche satellieten van Jupiter. Boven zien we de aanblik van het stelsel door een amateur teleskoop. Links onder het stelsel van de banen ‘van boven’ gezien; de binnenste drie hebben omlooptijden die zeer nauwkeurig in een verhouding staan van 1:2:4 (van buiten naar binnen) en beïnvloeden elkaars banen aanzienlijk door hun zwaartekracht. De vierde maan staat op iets grotere afstand. Rechts onder opnamen van de manen met ruimtevoertuigen

drie satellieten (Io, Europa en Ganymedes), en de resonantie daarvoor is 1:2:4. Daarop werden dan verstoringen in rekening gebracht voor de iets verschillende vlakken van de banen, de vierde satelliet (Callisto) en de zon. Dit was voor zijn tijd een bijzondere prestatie van de Sitter. Het is zeer instructief de Sitters ‘Darwin Lecture’ uit 1931 ‘*Jupiter’s Galilean Satellites*’ te lezen, alhoewel het nogal technisch is.

In de kosmologie heeft de Sitter een fundamentele rol gespeeld in de toepassing van Einsteins relativiteitstheorie. Hij was daarbij in een uitstekende positie, omdat hij (evenals zijn leermeester Kapteyn en door zijn verblijf in Kaapstad, waar hij zijn proefschrift onderzoek aan de manen van Jupiter deed) voor die tijd sterk Anglo-Saksisch geïntereerd was, hetgeen begin twintigste eeuw ongebruikelijk was. Daardoor kon hij het in het Duits gepubliceerde werk van Einstein begrijpelijk maken voor de Engels sprekende wereld, en (ook tijdens de Eerste Wereldoorlog wegens de Nederlandse neutraliteit) als een *trait d’union* optreden met de astronomen in Engeland en de V.S. Einstein had uit zijn veldvergelijkingen afgeleid, dat het heelal niet statisch kon zijn en had zijn ‘Lambda-term’ (Einsteins blunder) ingevoerd om een statische oplossing (‘Model A’ in de Sitters woorden) te bewerkstelligen. De Sitter vond in 1917, dat die veldvergelijkingen ook een ander model toelieten. Dit ‘Model B’ heeft systematische beweging (uitdijing), maar in de Sitters oplossing bevatte het geen materie en hij stelde daarom, dat als het leeg is, er niets is om dit aan te zien. Later, toen de expansie van het heelal ontdekt was, bleek het op grond van het werk van de Belgische astronoom en priester George Lemaître zinvol te denken, dat het heelal niet statisch was en correspondeerde met een model met een groeiende afmeting of straal zoals in de Sitters Model B. Einstein en de Sitter combineerden hun modellen en beschreven hun opvattingen in een artikel

PROCEEDINGS
OF THE
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

Volume 18 March 15, 1932 Number 3

ON THE RELATION BETWEEN THE EXPANSION AND THE
MEAN DENSITY OF THE UNIVERSE

BY A. EINSTEIN AND W. DE SITTER

Communicated by the Mount Wilson Observatory, January 25, 1932

In a recent note in the *Göttinger Nachrichten*, Dr. O. Heckmann has pointed out that the non-static solutions of the field equations of the general theory of relativity with constant density do not necessarily imply a positive curvature of three-dimensional space, but that this curvature may also be negative or zero.

There is no direct observational evidence for the curvature, the only directly observed data being the mean density and the expansion, which latter proves that the actual universe corresponds to the non-static case. It is therefore clear that from the direct data of observation we can derive neither the sign nor the value of the curvature, and the question arises whether it is possible to represent the observed facts without introducing a curvature at all.

Historically the term containing the "cosmological constant" λ was introduced into the field equations in order to enable us to account theoretically for the existence of a finite mean density in a static universe. It now appears that in the dynamical case this end can be reached without the introduction of λ .

If we suppose the curvature to be zero, the line-element is

$$ds^2 = -R^2(dx^2 + dy^2 + dz^2) + c^2 dt^2, \quad (1)$$

where R is a function of t only, and c is the velocity of light. If, for the sake of simplicity, we neglect the pressure p ,¹ the field equations without λ lead to two differential equations, of which we need only one, which in the case of zero curvature reduces to:

$$\frac{1}{R^2} \left(\frac{dR}{cdt} \right)^2 = \frac{1}{3} \kappa \rho. \quad (2)$$

The observations give the coefficient of expansion and the mean density:

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{cdt} = h = \frac{1}{R_B}; \quad \rho = \frac{2}{\kappa R_A^3}$$

Therefore we have, from (2), the theoretical relation

$$h^2 = \frac{1}{3} \kappa \rho \quad (3)$$

or

$$\frac{R_A^3}{R_B^3} = \frac{2}{3} \quad (3')$$

Taking for the coefficient of expansion

$$h = 500 \text{ km./sec. per } 10^6 \text{ parsecs,} \quad (4)$$

or

$$R_B = 2 \times 10^{27} \text{ cm.,}$$

we find

$$R_A = 1.63 \times 10^{27} \text{ cm.,}$$

or

$$\rho = 4 \times 10^{-28} \text{ gr. cm.}^{-3}, \quad (5)$$

which happens to coincide exactly with the upper limit for the density adopted by one of us.²

The determination of the coefficient of expansion h depends on the measured red-shifts, which do not introduce any appreciable uncertainty, and the distances of the extra-galactic nebulae, which are still very uncertain. The density depends on the assumed masses of these nebulae and on the scale of distance, and involves, moreover, the assumption that all the material mass in the universe is concentrated in the nebulae. It does not seem probable that this latter assumption will introduce any appreciable factor of uncertainty. Admitting it, the ratio h^2/ρ , or R_A^3/R_B^3 as derived from observations, becomes proportional to Δ/M , Δ being the side of a cube containing on the average one nebula, and M the average mass of the nebulae. The values adopted above would correspond to $\Delta = 10^6$ light years, $M = 2.10^{11} \odot$, which is about Dr. Oort's estimate of the mass of our own galactic system. Although, therefore, the density (5) corresponding to the assumption of zero curvature and to the coefficient of expansion (4) may perhaps be on the high side, it certainly is of the correct order of magnitude, and we must conclude that at the present time it is possible to represent the facts without assuming a curvature of three-dimensional space. The curvature is, however, essentially determinable, and an increase in the precision of the data derived from observations will enable us in the future to fix its sign and to determine its value.

¹ It seems certain that the pressure p in the actual universe is negligible as compared with the material density ρ . The same reasoning, however, holds good if the pressure is not neglected.

² *Bull. Astronom. Inst. Netherlands, Haarlem*, 6, 142 (1931).

Figure 4: Het twee pagina's tellende artikel van Einstein en de Sitter uit 1932, waarin zij het expanderende Einstein-de Sitter heelal voorstelden.

van twee volle pagina's (Guichelaar zegt ten onrechte één) 'On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe'. De kosmologische term werd onnodig verklaard en de oplossing die zij presenteren is bekend geworden als het 'Einstein-de Sitter heelal'. Kosmologie is uiteindelijk de meest blijvende en zichtbare bijdrage van de Sitter.

Inmiddels was er een discussie ontstaan over de aard van het begin van de expansie vanuit een mathematisch punt. Was het heelal misschien periodiek, zodat de expansie stopt en het heelal weer inkrimpt, wat zich vervolgens cyclisch herhaalt? In 1933 (het jaar voor zijn dood) publiceerde de Sitter nog een artikelen over het heelal ('On the Expanding Universe and the Time-Scale'), waarin hij zich op 'esthetische gronden', evenals Eddington, uitsprak tegen een oscillerend heelal. Aan de andere kant was Lemaître juist een groot voorstander van een oscillerend heelal. De Sitter vond, dat de sterren ouder zijn dan het heelal (!), althans sinds de tijd van het begin van de expansie. Het zogenaamde begin van de wereld moest dan slechts een overgangssituatie zijn geweest, waarin de melkwegstelsels veel dichter bij elkaar stonden dan nu. Maar daarin zag hij niets paradoxaals.

CHEMISCHE ELEMENTEN EN DE KOSMOLOGISCHE ACHTERGRONDSTRALING

De vraag was verder hoe het heelal eruit zou hebben gezien bij het begin van de expansie. Is het heet geweest of juist niet? In de jaren veertig werd dit in verband gebracht met het ontstaan van de chemische elementen. George Gamow stelde voor dat in een vroege, hete fase van het heelal vrije neutronen door samengaan in kernreacties verantwoordelijk waren voor de vorming

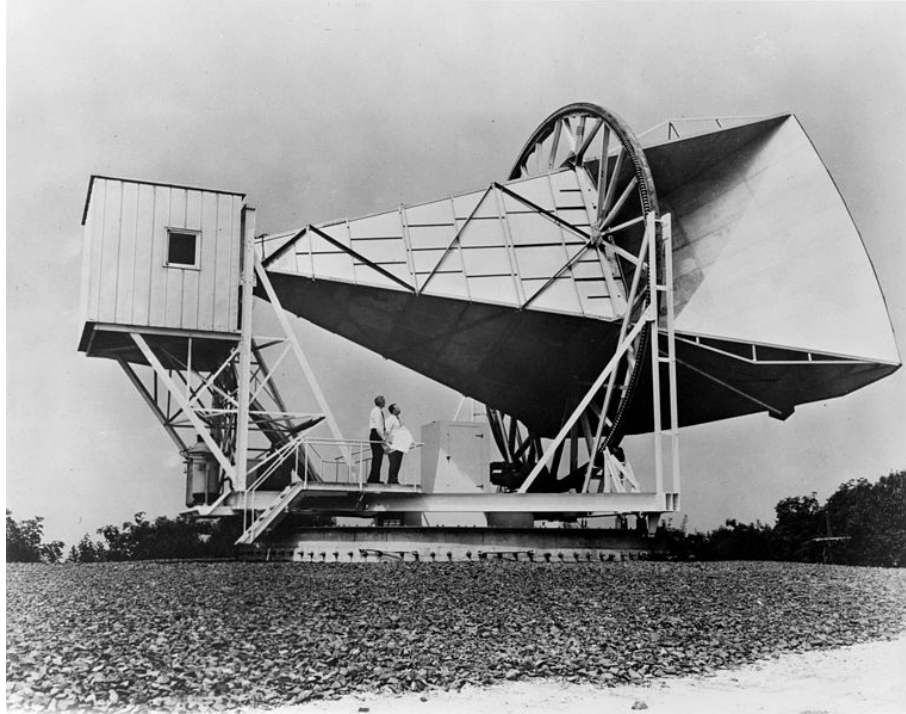


Figure 5: De ‘hoorn’ constructie die Penzias en Wilson gebruikten om de kosmologische microgolf achtergrondstraling te detecteren.

van zwaardere atoomkernen en zijn student Ralph Alpher werkte dit verder uit, resulterend in een beroemd artikel in 1948 door Alpher, Bethe en Gamow (Hans Bethe was toegevoegd om de gelijkenis met de eerste drie letters van het Griekse alfabet te bewerkstelligen). Later is gebleken, dat dit niet kon werken, o.a. vanwege het ontbreken van stabiele atomen bestaande uit samen 5 of 8 protonen en neutronen en werd het duidelijk, dat er alleen helium in die vroege fase kon vormen en de verdere zwaardere elementen in sterren worden geproduceerd. Dit werd uitgewerkt door Margaret en Geoffrey Burbidge, William Fowler en Fred Hoyle in een artikel uit 1957, dat een echte klassieker is geworden. Overigens was hun interesse in dit onderwerp ontstaan uit de wens om aan te tonen, hoe elementen gevormd kunnen worden in een steady state heelal. Het werd ook duidelijk, dat sterren veel meer helium bevatten (ongeveer een kwart van hun massa is in de vorm van helium) dan verklaard kon worden door vorming in sterren, want daarvoor is al niet genoeg massa aanwezig en verder zou er dan zoveel energie moeten zijn geproduceerd dat dit als een achtergrond van sterlicht zichtbaar zou zijn. De oudste sterren hebben al zoveel helium, zodat alles erop wijst, dat helium in de vroege fase van het heelal gevormd moest zijn voor de vorming van melkwegstelsels en de eerste sterren (zie ook *‘The First Three Minutes’* van Steven Weinberg).

Maar als het jonge heelal heet was, moet er dan nu straling van die hete fase overgebleven zijn. Dat is het onderwerp van het derde te bespreken boek, *‘Finding the Big Bang’* van Jim Peebles, Lyman Page and Bruce Partridge. Ook dit is zonder meer een aan te raden boek. Het bestaat uit een uitstekende beschrijving van de situatie tot in de jaren zestig en besluit met een samenvatting van de voortgang sindsdien. Dit is ongeveer een derde van het boek en het middelste deel is een verzameling zeer belangwekkende persoonlijke herinneringen van de belangrijkste spelers bij de achtergronden, ontdekking en vroege studie van de CMB.

Als het heelal een vroege, hete fase van het heelal heeft gekend, waarin de helium is gevormd, dan moet het bijbehorende stralingsveld nog steeds bestaan, zij het dat het door de expansie moet

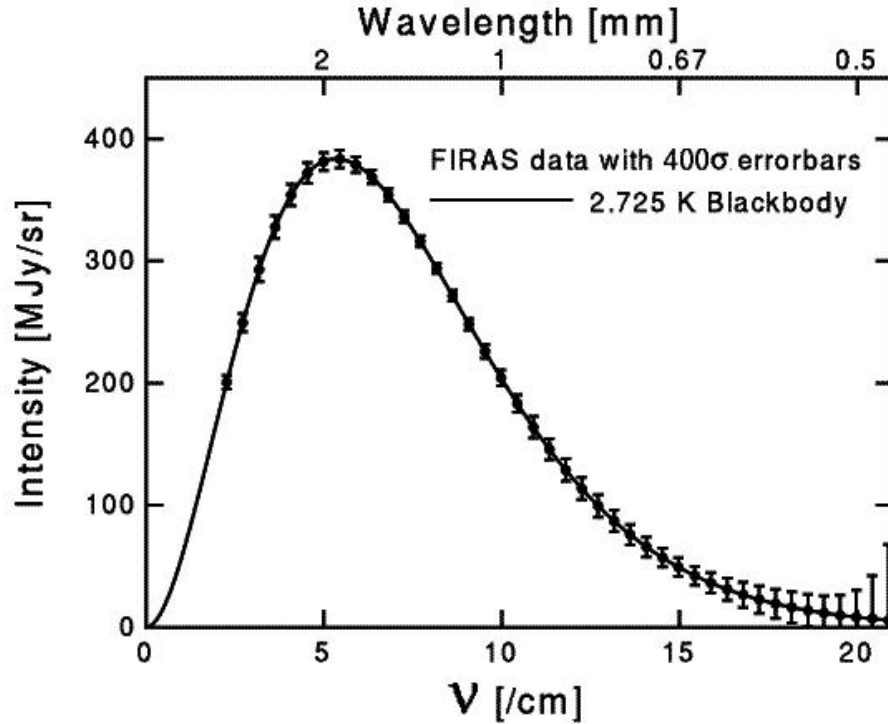


Figure 6: Met de satelliet Cosmic Background Explorer COBE is de temperatuur van de kosmologische achtergrondstraling met grote nauwkeurigheid gemeten. De intensiteit is hier gegeven als functie van frequentie (onder; de eenheid is ‘1/cm’, hetgeen correspondeert met 30 GHz) en golflengte (boven, in millimeter). De lijn is die van de theoretische ‘zwarte-lichaamstraling’, dat elk lichaam heeft als gevolg van zijn temperatuur, in dit geval voor een temperatuur van 2.725 Kelvin. De fouten op de metingen zijn getekend met een vergroting van een factor 400!

zijn afgekoeld. Immers, de energie in het stralingsveld moet zich over een groeiend volume verdelen. Gamow's medewerkers Alpher en Robert Herman kwamen tot de conclusie, dat zo'n stralingsveld een huidige temperatuur zou moeten hebben van de orde van 5 Kelvin (5 graden boven het absolute nulpunt). Deze voorspelde waarde, gepubliceerd in 1949 in een artikel *Remarks on the Evolution of the Expanding Universe*, blijkt echter in eerste instantie geheel in de vergetelheid te zijn geraakt. De uiteindelijke ontdekking van de CMB (temperatuur 2.7 Kelvin) door Penzias en Wilson was zeker geen rechtstreeks gevolg ervan. Het is fascinerend te zien, hoe diverse lijnen van onderzoek bijeen zijn gekomen.

Robert H. Dicke speelde daarbij een fundamentele rol. Als jong, net-gepromoveerd kernfysicus kwam hij in 1941 te werken bij het ‘Radiation Lab’ van het Massachusetts Institute of Technology M.I.T., waar onderzoek werd gedaan naar radio (en radar) technieken bij hogere frequenties. Hij trachtte de helderheid van de atmosfeer te meten en introduceerde daarvoor een techniek, waarbij de ontvanger snel heen-en-weer schakelde tussen het signaal van de hemel en dat van een bron in de ontvanger zelf. Met een ‘hoorn’ constructie (in plaats van een schotel) was de invloed van straling van de grond en dergelijke minimaal. Als je dan de straling van de atmosfeer meet op verschillende hoogten boven de horizon, kun je extrapoleren wat die zou zijn als er geen atmosfeer zou zijn. Dat bleek een boven-limiet van 20 Kelvin op te leveren. Hij schijnt dit resultaat later (volgens diverse bijdragers aan het boek) zelf vergeten te zijn. Ook schijnt het werk van Gamow, Alpher en Herman een paar jaar later aan hem voorbij te zijn gegaan.

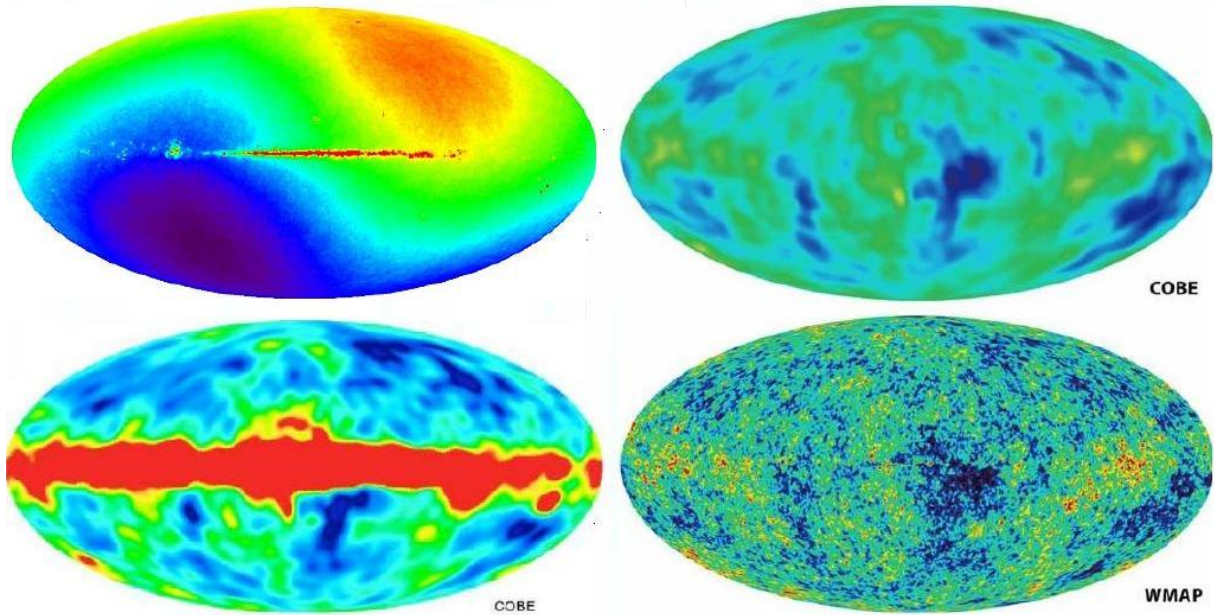


Figure 7: Karakteristieken van de verdeling van de kosmologische achtergrondstraling. De kleuren geven temperatuurverschillen aan, rood kouder en blauw warmer; door het Doppler effect is de straling in de richting waarin wij bewegen warmer en in de tegenoverliggende richting kouder. Linksboven de originele meting met de COBE satelliet, gecorrigeerd voor de beweging van de aarde rond de zon (30 km/s), van de zon ten gevolge van de rotatie van ons Melkwegstelsel (220 km/s) en van ons Melkwegstelsel t.o.v. de ‘Lokale Groep’, waarvan ons stelsel en de Andromedanevel de grootste zijn (ruim 100 km/s). Het resterende systematische patroon heeft hier een temperatuurverschil van maximaal 4 mK (milliKelvin of 0.001 K) De resterende beweging is die van de Lokale Groep t.o.v. het heelal; die zien we in de figuur hier als een ‘dipool’ en die bedraagt zo’n 600 km/s. Langs de centrale horizontale lijn zien we straling van de Melkweg. Linksonder het beeld na correctie voor de systematische beweging. De maximale afwijking is nu 100 μ K (microKelvin) ofwel 0.0001K. We zien hier vooral de radiostaling van ons Melkwegstelsel. Ook dit kan gecorrigeerd worden met behulp van metingen ervan in het infrarood, ook met COBE. De figuren rechts geven de uiteindelijke oneffenheden aan de de straling als gevolg van de eerste structuur in het heelal (boven met COBE begin jaren negentig, onder met de latere WMAP, de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, gelanceerd in 2001). De gemiddelde afwijking is enkele tientallen μ K.

Omstreeks dezelfde tijd ontstond er een probleem met de interpretatie van absorptie-lijnen in spectra van sterren door tussenliggend, interstellar cyaan (CN). De sterkte van verschillende lijnen van hetzelfde molecuul zeggen iets over de temperatuur van een stralingsveld op de verdeling van elektronen over de beschikbare energie-niveaus. De waarnemingen gaven aan dat er een stralingsveld moest zijn in ons Melkwegstelsel met een temperatuur van 2.3 Kelvin. Dit werk van Andrew McKellar kreeg ook weinig bekendheid; veel onderzoekers namen het niet serieus en vermoedden problemen met de waarnemingen of de interpretatie. Pas na de directe waarneming van de CMB werden de resultaten als correct geaccepteerd.

Begin jaren zestig had Robert Dicke een groep om zich heen opgezet in Princeton, die zich toelegde op de studie van diverse onderwerpen van fundamentele natuurkunde, waaronder gravitatie en kosmologie. Hij was geïnteresseerd in een hete Big Bang (alhoewel in het kader van een oscillerend heelal) en de mogelijkheid het nu resterende stralingsveld te detecteren. Hij vroeg zijn medewerkers Peter Roll en David Wilkinson om een ontvanger te bouwen volgens zijn (‘Dicke-switch’) methode om naar zulke straling te zoeken – kennelijk vergeten dat hij al eerder een limiet voor de temperatuur van die straling had bepaald. Aan Jim Peebles vroeg hij uit te zoeken wat de theoretische consequenties

zouden zijn als zulke straling bestond. Deze vond dat de temperatuur dan in het vroege heelal zeer hoog moest zijn geweest zodat er veel helium (en deuterium) gevormd werd, waarvan de noodzaak inmiddels duidelijk geworden was, en de temperatuur nu maximaal 15 Kelvin zou kunnen zijn. Dus in principe detecteerbaar. Vergelijkbaar werk in Rusland had overigens, onbekend in de V.S., tot eenzelfde conclusie geleid.

Intussen waren Penzias en Wilson op Bell Labs bezig een uiterst gevoelige antenne te bouwen voor radio-astronomisch onderzoek. Zij waren niet alleen zeer bekwaam in het bouwen van apparatuur daarvoor, maar waren radio-astronomen en geen ingenieurs van origine, gepromoveerd bij Columbia University (New York) en Caltech. In 1964 ontdekten zij (bij een golflengte van slechts 7 cm) dat er een onverklaarde component was met een temperatuur van ongeveer 3 Kelvin, die in alle richtingen aan de hemel precies even sterk was. Al snel kwamen zij in contact met Dicke en zijn groep en het resulteerde in een tweetal artikelen in de *Astrophysical Journal*, waarin eerst Dicke en medewerkers hun voorspelling en de voortgang van de bouw van een instrument om de straling te ontdekken bespraken en vervolgens een artikel van Penzias en Wilson met hun ontdekking ervan, zonder veel te zeggen over de interpretatie. Uiteindelijk kregen Penzias en Wilson de Nobelprijs en later Mather en Smoot voor het vervolg met een speciale satelliet *COBE* (spreek uit ‘Kobie’; COsmic Background Explorer), die de temperatuur tot enorme nauwkeurigheid bepaalde (2.725 ± 0.001 Kelvin) en variaties over de hemel daarin vond van 1 op 100.000 of zo, die de allereerste structuur in het heelal weerspiegelen. Alle mensen uit de omgeving van Dicke spreken hun teleurstelling erover uit dat hij niet in de Nobelprijs met Penzias en Wilson heeft gedeeld. Ik kan daarin komen.

Peebles rol wordt in het boek *‘The Very First Light’* van Mather en Boslough enigszins in een kwaad daglicht gezet, zoals Ed van den Heuvel in zijn bespreking al noemde. Hij zou stelselmatig de voorspelling van de CMB voor zichzelf opeisen en het werk van met name Gamow, Alpher en Herman hebben genegeerd. Met name Alpher wordt beschreven als een nogal verbitterde, miskende man, overigens ook door Penzias. Ik heb Peebles in 1974 voor het eerst ontmoet en leerde hem kennen als een sympathieke man, lang van stuk, met een bedachtzame spraak en een wat trage motoriek, die serieuze interesse had in mijn werk als jonge postdoc. In zijn bijdrage aan *‘Finding the Big Bang’* gaat Peebles op deze situatie in, evenals overigens in diverse interviews (zie verwijzingen voor twee voorbeelden van het Web) komt het ter sprake. Inderdaad geeft Peebles toe onvoldoende literatuur onderzoek te hebben gedaan, maar dat wel te hebben gecorrigeerd in latere publicaties en uitlatingen. En als leider van de groep zou Dicke (eerste auteur van het belangrijke artikel uit 1965) ook hiervoor de verantwoordelijkheid moeten dragen; volgens Peebles deed hij dat ook, maar de laatste acht zichzelf in eerste instantie verantwoordelijk. Inderdaad is het waar dat de bijdrage van Alpher en Herman vaak onderbelicht is gebleven, maar er zijn geen duidelijke aanwijzingen dat dit stelselmatig geschiedvervalsing is geweest.

Overigens is in het boek van Mather en Boslough een ander, wat mij betreft ernstiger geval van on-ethisch gedrag besproken, namelijk van Principal Investigator (P.I.) van een van de drie instrumenten in de COBE satelliet, George Smoot. Mather was de leider van het COBE project en van het instrument dat de precieze golflengte afhankelijkheid van de straling mat en Smoot van het instrument dat de fluctaties probeerde te vinden en in kaart te brengen. Toen de resultaten van COBE over de fluctuaties binnen kwamen, heeft Smoot duidelijk de afgesproken gedragscode voor publicaties en aankondigingen voor de pers gebroken en wel tot twee maal toe in ieder geval naar buiten toe de indruk hebben trachten te wekken, dat hij de ware ontdekker van de structuur in de kosmologische achtergrondstraling zou zijn. Waarschijnlijk was hij bang dat alle credit daarvoor naar Mather zou gaan. Uiteindelijk is dit recht gestreken en hebben Mather en Smoot de Nobelprijs samen gekregen. Ook hier is het voor velen een ommissie dat de P.I. van het derde instrument in de COBE satelliet, dat de zo belangrijke bijdrage van de Melkweg mat in het infrarood, hetgeen van groot belang was om de kaarten van de kosmologische straling ervoor te corrigeren, Mike Hauser,

niet mee heeft mogen delen in de Nobelprijs.

Ten tijde van de Nobelprijs van 1978 was Gamow al overleden (hij is slechts 64 geworden), maar Dicke, Alpher en Herman leefden nog en alle drie zouden in aanmerking kunnen worden geacht voor meedelen in de prijs. Dan had er wel een keus moeten zijn gemaakt, omdat de prijs slechts door maximaal drie personen kan worden gedeeld. Daarnaast is het zo, dat dat jaar de andere helft van de prijs vergeven is op het gebied van de lage-temperatuur fysica. Alpher en Herman hebben diverse andere tekenen van eerbetoen ontvangen, zij het wel erg laat, zoals in 1993 de prestigieuze *Henri Draper Medal* van de National Academy of Sciences. Bob Dicke kreeg o.a. in 1970 de *National Medal of Science* van de President of the United States en in 1973 de *Comstock Prize in Physics* van de National Academy of Sciences. Gamow kreeg voor zijn populariserende *Mr. Tompkins* boeken over fysica in 1956 de *Kalinga Prize* van de Unesco, maar geen grote wetenschappelijke prijzen.

Peebles heeft vele belangrijke onderscheidingen gekregen, waaronder alle grote prijzen in de astronomie, zoals de *Catherine Wolfe Bruce Gold Medal* in 1996 en in 1998 de *Gold Medal* van de (Britse) Royal Astronomical Society. Inderdaad is de lijst van Peebles het meest indrukwekkend, maar hij heeft ook veel ander fundamenteel kosmologisch werk gedaan dan zijn (toch waarschijnlijk onafhankelijke) voorspelling van de CBR temperatuur. Radio-astronomen Penzias en Wilson wonnen de Nobelprijs, maar wie als eerste de waarnemingen verrichtte is relatief eenvoudig vast te stellen en de Nobelprijs voor de natuurkunde gaat inmiddels soms naar astronomisch werk, met name als er gebruik is gemaakt van radioteleskopen en/of als het gravitatie-theorie of kosmologie betreft.

Tenslotte. De hier besproken boeken zijn alle drie geschreven voor een algemener publiek dan de vakgenoten. En daar zijn ze naar mijn mening uitstekend in geslaagd (ook al ben ik geen buitenstaander), alhoewel gezegd moet worden dat technische details in de boeken van Sullivan en van Peebles *et al.* niet geschuwd worden en minstens het niveau van een lezer van Scientific American voorondersteld wordt. Deze laatste twee hebben een opmerkelijk kenmerk gemeen, namelijk dat de literatuurlijst ook de bladzij-nummers bevat waar de publicatie is aangehaald. Dit maakt ze uitermate gebruiksvriendelijk.

Prof. dr. P.C. van der Kruit (www.astro.rug.nl/~vdkruit) is Jacobus C. Kapteyn hoogleraar in de sterrenkunde aan de Rijksuniversiteit Groningen.

Overige literatuur (de NASA Astrophysics Data System ADS –www.adsabs.harvard.edu– maakt praktisch alle astronomische publicaties voor de invoering van elektronische tijdschriften gratis online beschikbaar; zie de links hieronder):

A BRIEF HISTORY OF TIME, door *Stephan W. Hawking*, Bantam Books, 1988, 1996.

Over het 1919 zonneclips experiment van lichtbuiging:

GRAVITATIONAL DEFLECTION OF LIGHT, A RE-EXAMINATION OF THE OBSERVATIONS OF THE SOLAR ECLIPS OF 1919, door *G.M. Harvey*, Observatory, 99, 195–198, 1979 (adsabs.harvard.edu/abs/1979Obs....99..195M).

RELATIVISTIC LIGHT DEFLECTIONS, door *P. Wayman & C.A. Murray*, Observatory, 109, 189–191, 1989 (adsabs.harvard.edu/abs/1989Obs...109..189W).

NOT ONLY BECAUSE OF THEORY: DYSON, EDDINGTON AND THE COMPETING MYTHS OF THE 1919 ECLIPS EXPEDITION, door *Daniel Kennefick*, 7th Conference on the History of General Relativity, 2005 (arxiv.org/abs/0709.0685v2).

THE BEGINNINGS OF RADIO ASTRONOMY IN THE NETHERLANDS, door *H. van Woerden & R.G. Strom*, Journal for Astronomical History & Heritage, 9(1), 3–20, 2006 (www.astron.nl/~leeuwen/video/dloo/JAHH9p3.pdf).

THE SPATIAL DISTRIBUTION AND THE NATURE OF RADIO STARS, door *M. Ryle & P.A.G. Scheuer*, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 230, 448–462, 1955 (www.jstor.org/stable/99791).

HUISVADER VAN DE NEDERLANDSE STERRENKUNDE, door *A. Blaauw*, NRC-Handelsblad, zaterdag 13 februari 2010.

EINSTEINS BLUNDER, door *E.P.J. van den Heuvel*, Acad. Boekengids, nr. 82, 7–10.

Algemene artikelen van de Sitter:

JUPITER'S GALILEAN SATELLITES, door *W. de Sitter*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 91, 706–738, 1931 (adsabs.harvard.edu/abs/1931Obs....54..205D).

THE SIZE OF THE UNIVERSE, door *W. de Sitter*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 54, 89–104, 1932 (adsabs.harvard.edu/abs/1932PASP...44...89D).

De Sitter en kosmologie:

ON THE RELATION BETWEEN THE EXPANSION AND THE MEAN DENSITY OF THE UNIVERSE, door *A. Einstein & W. de Sitter*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 18, 213–214, 1932 (www.pnas.org/content/18/3/213.full.pdf).

ON THE EXPANDING UNIVERSE AND THE TIME-SCALE, door *W. de Sitter*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 93, 628–634, 1933 (adsabs.harvard.edu/abs/1933MNRAS..93..628D).

THE FIRST THREE MINUTES: A MODERN VIEW OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE, door *Steven Weinberg*, Basic Books, 1977, 1993.

Ontstaan van de chemische elementen:

THE ORIGIN OF CHEMICAL ELEMENTS, door *R.A. Alpher, H. Bethe & G. Gamow*, Physical Review 73, 803–804, 1948 (prola.aps.org/abstract/PR/v73/i7/p803.1).

REMARKS ON THE EVOLUTION OF THE EXPANDING UNIVERSE, door *R.A. Alpher & R.C. Herman*, Physical Review, 75, 1089–1095, 1949 (adsabs.harvard.edu/abs/1949PhRv...75.1089A).

SYNTHESIS OF THE ELEMENTS IN STARS, door *E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler & F. Hoyle*, Reviews of Modern Physics 29, 547–650, 1957 (adsabs.harvard.edu/abs/1957RvMP...29..547B).

THE VERY FIRST LIGHT: THE TRUE INSIDE STORY OF THE SCIENTIFIC JOURNEY BACK TO THE DAWN OF THE UNIVERSE, door *John Matter & John Boslough*, Basic Books, 2008.

Ontdekking van de Kosmische Microgolf Achtergrondstraling CMB:

COSMIC BLACK-BODY RADIATION door *R.H. Dicke, P.J.E. Peebles, P.G. Roll & D.T. Wilkinson*, Astrophysical Journal 142, 414–491, 1965 (www.adsabs.harvard.edu/abs/1965ApJ...142..414D).

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 mc/s, door *A.A. Penzias & R.W. Wilson*, Astrophysical Journal 142, 414–491, 1965 (www.adsabs.harvard.edu/abs/1965ApJ...142..419P).

Oral interviews met Jim Peebles:

ORAL HISTORY TRANSCRIPTS, interview door *Martin Harwit*, American Institute of Physics (1984; www.aip.org/history/ohilist/ohilist/4814.html).

CONVERSATIONS WITH HISTORY, interview door *Harry Kreisler*, Institute of International Studies, Berkeley (2006; globetrotter.berkeley.edu/people6/Peebles/peebles-con0.html).