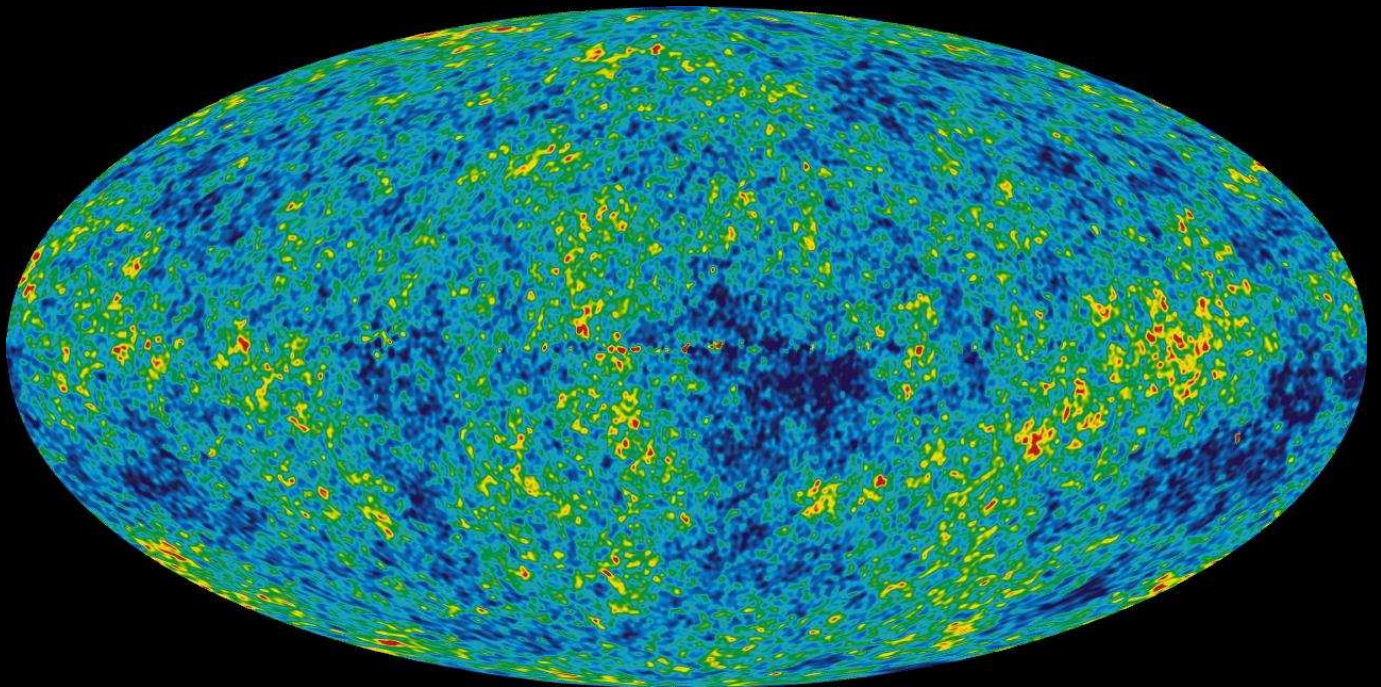


OORSPRONG

Over mens en heelal, wetenschap en religie,
samenhang en toeval, de weg en de herberg

Pieter C. van der Kruit



Tiende J.H. van Oosbreelezing

OORSPRONG

Over mens en heelal, wetenschap en religie,
samenhang en toeval, de weg en de herberg

P.C. van der Kruit

Versie XXL

Tiende J.H. van Oosbreelezing
5 april 2008

Omslag voorkant:

Deze figuur toont de allereerste structuur in het heelal. Het is een kaart van de hele hemel, gemaakt met de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) en laat fluctuaties zien in de radiostraling die het restant is van de hete fase na de Oerknal. Deze cosmologische achtergrondstraling, die correspondeert met het tijdstip toen het heelal zo'n 380.000 jaar oud was, heeft nu een temperatuur van 2.7 K (Kelvin, dus 2.7 'graden' boven het absolute nulpunt) en vertoont minieme fluctuaties, in de figuur blauw voor een beetje koeler, rood voor een beetje warmer. Die variaties tonen een maximale afwijking van slechts ± 0.2 milliKelvin t.o.v. het gemiddelde. Dit correspondeert met fluctuaties in de dichtheid in het heelal op dat tijdstip van de orde van 0.01%. De minieme verdichtingen zijn de kiemen van waaruit alle structuur in het heelal gevormd is: van die op grootste schaal tot melkwegstelsels, sterren, planeten, de aarde, planten, dieren en mensen; kortom we zien hier onze *Oorsprong!* (credit: see fig. 20)

Omslag achterkant:

Fotomozaïek van de handtekening van de auteur, bestaande uit individuele opnamen van melkwegstelsels. De handtekening zelf bestaat vooral uit plaatjes van spiraalstelsels op hun kant, een belangrijk onderwerp van zijn studie.

Onder auspiciën van de Stichting J.H. van Oosbreelezing wordt een jaarlijkse lezing georganiseerd. De Website van de stichting is www.apgen.nl/web/show/id=41226/langid=43.

Dit document omvat een uitgebreide tekst geschreven naar aanleiding van de tiende J.H. van Oosbreelezing op 5 april 2008 te Amersfoort. Deze versie wordt aangeduid als XXL in analogie van kledingmaten.

De Stichting J.H. van Oosbreelezing heeft een verkorte uitvoering (M-versie) doen verschijnen bij Academische Uitgeverij Eburon, Delft onder ISBN 978-90-5972-265-1.

Voor een overzicht van eerdere lezingen zie www.apgen.nl/web/show/id=61744/framenoid=40931/langid=43 of www.eburon.nl/products_search.php?search_category_id=0&search_string=Oosbree&s_tit=1&s_sds=1&s_fds=1&search=+Go+.

© P.C. van der Kruit, Groningen, MMVIII

Geproduceerd door de auteur in L^AT_EX.

Inhoud

Inhoud	i
1. Achtergronden	1
2. Enkele autobiografische opmerkingen	9
3. Machten van tien	17
Naar de kleinere schalen van moleculen, atomen en quarks	18
Naar de grotere schalen van sterren, melkwegstelsels en het heelal	27
4. De geschiedenis van het heelal	31
Het vroege heelal	31
Melkwegstelsels	34
Sterren en chemische elementen	38
Het zonnestelsel en andere planetenstelsels	47
Samenvatting	49
5. De toekomst van het heelal op lange termijn	51
6. Toeval in de kosmische evolutie	55
7. Het antropisch principe	61
8. Leven in het heelal	65
9. En hoe nu verder?	71
Literatuur	75
Index	77
Curriculum vitae	81

*Hoe zijn wij hier geland,
waartoe... vanwaar...
ligt ergens aan het strand
dat vreemde schip nog klaar?
en als het anker is gelicht,
naar waar... naar waar...?*

A. Roland Holst
Uit het gedicht *Dit Eiland*
'Voorbij de Wegen' (Roland Holst 1920)

1. Achtergronden

As we look out into the universe and identify the many accidents of physics and astronomy that have worked together to our benefit, it almost seems as if the universe must in some sense have known that we were coming.

Freeman J. Dyson.

Waarom is alles zoals het is? Wat is de zin van de schepping? En van het leven? Zijn er grenzen aan de wetenschap? Als inleidende opmerkingen geef ik een aantal zaken aan die de achtergrond vormen van wat ik te zeggen heb.

1. Mensen hebben altijd de sterrenhemel en het heelal in verband gebracht met hun religieus gevoel en de daaraan verwante vraag naar de oorsprong en bestemming van de mens. Arthur Koestler beschrijft dit op prachtige wijze in de eerste alinea van zijn schitterende boek *The Sleepwalkers* (Koestler 1959) als volgt:

“We can add to our knowledge, but we cannot subtract from it. When I try to see the Universe as a Babylonian saw it around 3000 B.C., I must grope my way back to my own childhood. At the age of about four I had what I felt to be a satisfactory understanding of God and the world. I remember an occasion when my father pointed his finger at the white ceiling, which was decorated with a frieze of dancing figures, and explained that God was up there, watching me. I immediately became convinced that the dancers were God and henceforth addressed my prayers to them, asking for their protection against the terrors of day and night. Much in the same manner, I like to imagine, did the luminous figures on the dark ceiling of the world appear as living divinities to Babylonians and Egyptians. The Twins, the Bear, the Serpent were as familiar to them as my fluted dancers to me; they were thought to be far away, and they held power over life and death, harvest and rain.”

2. De afbakening van wetenschap en religie is voor ieder anders. De Franse wiskundige en astronoom Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827) wordt beschouwd als de grondlegger van het mechanistisch-deterministische wereldbeeld. Beroemd is zijn *Essai philosophique sur les probabilités*, waarin hij stelt dat als je op zeker moment alle posities en snelheden van alle deeltjes in het heelal zou kennen, het dan mogelijk moet zijn dat ook voor elk moment in de toekomst te bepalen. Maar je moet wel een ‘*Intelligence*’ zijn om dat in de praktijk te kunnen. Laplace zegt, dat dit voor ons mensen onmogelijk is, maar dat we het wel met de kansrekening kunnen benaderen. Een veelgeciteerde tekst in dit verband is:

*“Nous pouvons considérer l’état actuel de l’univers comme l’effet de son passé et la cause de son futur. Une intelligence qui à un instant déterminé devrait connaître toutes les forces qui mettent en mouvement la nature, et toutes les positions de tous les objets dont la nature est composée, si cette intelligence fut en outre suffisamment ample pour soumettre ces données à analyse, celle-ci renfermerait dans une unique formule les mouvements des corps plus grands de l’univers et des atomes les plus petits; pour une telle intelligence nul serait incertain et le propre futur comme le passé serait évident à ses yeux.”*¹

Er is ook de volgende anecdote. Napoleon verwonderde zich over het feit, dat Laplace in een boek over de astronomie een uitvoerige beschrijving geeft van hoe de wereld in elkaar zit en aan welke wetten het onderhevig is, maar dat hij desondanks niet één keer naar God verwijst: *“Comment, vous faites tout le système du monde, vous donnez les lois de toute la création et dans*

¹We kunnen de huidige toestand van het heelal beschouwen als het gevolg van haar verleden en de oorzaak van haar toekomst. Een intelligent wezen dat op een zeker moment alle krachten zou weten die bewegingen in de natuur beschrijven, en alle posities van alle objecten waaruit de natuur bestaat, en als dat intelligent wezen groot genoeg zou zijn om deze gegevens te kunnen analyseren, dan zou het de bewegingen van de grootste hemellichamen en die van de kleinste atomen in een enkele formule kunnen omvatten; voor zo’n intelligent wezen zou niets onzeker zijn en het zou de toekomst net zo helder voor ogen hebben als het verleden. (Vertaling PCvdK)

tout votre livre vous ne parlez pas une seule fois de l'existence de Dieu." Laplace zou geantwoord hebben: "*Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse-là*". Laplace ziet het als een onnodige hypothese en verwerpt het bestaan van God. Zijn wereldbeeld houdt in, dat alles wat in de wereld gebeurt autonoom plaatsvindt en dat de toekomst **eenduidig** zou zijn af te leiden uit het heden. De vraag rijst dan wat er overblijft van de vrije wil en de eigen verantwoordelijkheid iets van je leven te maken. Ik vind de zienswijze van Laplace claustrofobisch.

3. De wetenschap accepteert het scheppingsverhaal in Genesis niet als een overtuigende beschrijving van het ontstaan van heelal, aarde en leven. In Het Apostolisch Genootschap² is het een gangbaar en ook bruikbaar uitgangspunt, dat dit een boeiende beschrijving is, doch die niet letterlijk genomen hoeft te worden. In de eerste jaren van Apostel L. Slok is dit onder woorden gebracht in de Cantate 'Wording en Ontplooiing' (Bouman & Westerveld 1949). Het is zinvol hier een relevant deel van de tekst te memoreren (geredigeerd naar een enigszins gemoderniseerde vorm):

O, wondere God, wiens majesteit geen mens kan peilen; wiens diepste wezen onze geest slechts vluchtig kust!

O, Enige, wiens onvermoeibaar werken het ganse heelal omvat, het zij slapend of bewust.

Gij, die geen grenzen kent en geen beperking, doch die uw scheppingsdrang aan eeuwige wetten bond, waardoor Ge opnieuw ontelbare facetten tot schoner en heerlijker verschijning van uw wezen vond!

Uw streven om te 'zijn' versmolt met tijd en ruimte, onzichtbaar samen; verwerkelijkte zich in 'stof';

en het licht, de zon, de bron der elementen, vond haar ontstaan; haar gloed vermeldt Uw lof!

Haar kleine kind, de aarde, schonk het leven een mogelijkheid te scheppen zonder grens.

Zo bouwde Gij uzelf het orgaan voor het hoogst verschijnen uit het schijnbare niets: uw kroonjuweel, de Mens.

Een wondere schepping, in schoonheid zonder weerga!

Het Bijbelse scheppingsverhaal is hiermee vervangen door een beschrijving, die meer in overeenstemming is met moderne inzichten over ontstaan van de aarde en het leven en van de biologische evolutie. De scheppingskracht verwezenlijkt zichzelf en schept mogelijkheden voor verdere ontwikkeling. Voor wat hierna volgt wijs ik vooral op twee aspecten. De eerste is, dat de schepping voorgesteld wordt als in dienst van het verschijnen van de mens. In de tweede plaats wordt deze vervolgens het 'Kroonjuweel' genoemd. Dit duidt op een vooropgesteld 'Heilsplan' met een vaststaande uiteindelijke bestemming en is dus een *teleologisch* standpunt, d.w.z. geordend ten behoeve van een doel. In dat opzicht is deze cantate langzamerhand naar mijn gevoel nogal gedateerd geworden.

4. Er is een citaat van Freeman Dyson, dat ik bij de titel van dit hoofdstuk heb gezet: "*As we look out into the universe and identify the many accidents of physics and astronomy that have worked together to our benefit, it almost seems as if the universe must in some sense have known that we were coming*", waarin hij wijst op de toevalligheden in de natuurwetenschap, die voor het ontstaan van leven als hier op aarde essentieel zijn. Dit zal een belangrijk thema zijn in het onderstaande.

Sterk gerelateerd daaraan zijn de vragen die variaties zijn op de fundamentele vraag: "*Waarom is alles zoals het is?*"

Enkele hiervan zijn de volgende. Waarom zijn de natuurwetten zoals ze zijn? Waarom is het heelal zo groot als het is? Waarom is het heelal zo oud als het is? Waarom heeft de biologische evolutie miljarden jaren moeten duren? Waarom leven we eigenlijk in een *drie*-dimensionale ruimte?

Maar ook: Wat is de toekomst van het leven op aarde? Is er elders in het heelal ander 'intelligent' leven? Wat is de toekomst van het heelal? Als het heelal een begin gehad heeft, heeft

²Voor meer informatie over Het Apostolisch Genootschap zie www.apgen.nl en voor de Stichting J.H. van Oosbreelezing www.apgen.nl/web/show/id=41226/langid=43.

het dan ook een einde? Waarom heeft de tijd eigenlijk een richting en is er verschil tussen verleden en toekomst?³

En: In hoeverre zijn gebeurtenissen voorspelbaar? Is er een ‘wet van oorzaak en gevolg’ en waarop is die dan toepasbaar? Staat de toekomst al in alle detail vast? Wat zijn de grenzen van de wetenschap?

Of: Is er een ‘Heilsplan Gods’? Is de mens de ‘Kroon der Schepping’, een Kroonjuweel? Hebben we als mensheid een ‘bestemming’? Is er überhaupt een ‘universele zin’ in het leven? En bestaat er een absolute waarheid? En wie heeft die dan?

Vragen houden een ieder bezig. Op een iets ander vlak blijkt dat uit de grote belangstelling die bestsellers over bepaalde onderwerpen genieten. Ik kan het niet laten een paar voorbeelden te noemen van enige relatief recente boeken, die ik zelf ook fascinerend heb gevonden en die ik iedereen van harte aanbeveel. ‘Waarom is het Europa geweest dat de wereld koloniseerde gesteund door een sterk ontwikkelde wetenschap en technologie?’ Dit is wel eens naar voren gebracht als een bewijs van de superioriteit van het blanke ras. Jared Diamond heeft er een fascinerend boek over geschreven: *Guns, Germs and Steel* (Diamond 1998) en ontkracht daarin die zienswijze. Of *Collapse* van dezelfde schrijver (Diamond 2005), waarin de kwestie besproken wordt waarom sommige beschavingen wel en andere niet zichzelf ten gronde hebben gericht. ‘Waar zal in de komende tijd de voortgang van de wetenschap plaatsvinden? *What remains to be discovered* (Maddox 1998) werpt hierop een interessant licht. Bill Bryson schrijft een bestseller, waarin hij als niet-wetenschapper op onnavolgbare wijze de stand van de wetenschap samenvat in *A short History of Nearly Everything* (Bryson 2003). Mijn collega Mario Livio (2002) uit Baltimore schrijft in *The Golden Ratio* over de vraag of er significantie valt toe te kennen aan de zogenaamde ‘Gulden Snede’ (en concludeert van niet). Of denk eens aan de spraakmakende televisieseries en boeken naar aanleiding daarvan van Wim Kayzer, waarin vragen werden besproken als: ‘hoe heeft de biologische evolutie plaats gevonden en hoe is de mens ontstaan?’ (*Een Schitterend Ongeluk*; Kayzer, 1993) of ‘hoe werkt het geheugen?’ (*Vertrouwd en o zo Vreemd*; Kayzer, 1995) en ‘wat maakt het leven de moeite waard?’ (*Van de Schoonheid en de Troost*; Kayzer, 2001). Boeiende vragen!

Mijn collega Ed van den Heuvel vertelde mij eens, dat men uit de opgaven van favoriete studies door aankomende studenten voor de universiteit van Amsterdam een interessante waarneming had gedaan. De studies die de eerste keus waren van de scholieren, waren (zoals je zou verwachten) ongeveer net zo verdeeld als de echte eerstejaars inschrijvingen, maar onder de tweede keuzen kwamen de studies astronomie en theologie – studies die zich richten op de ‘grote vragen’ – onevenredig vaak voor. De astronomie verheugt zich ook in grote groepen amateurs, aandacht in wetenschapsbijlagen van kranten en in documentaires.

De sterrenhemel is trouwens ook een dankbaar object van humor, zij het vaak met een serieuze ondertoon. Neem de cartoon van Sydney Harris in fig. 1 (ik zal verderop nog enkele Sydney Harris cartoons gebruiken). Hoe alles is ontstaan was al een vraag die opkwam in de Oudheid als mensen naar de sterren keken, maar één die nog steeds gesteld wordt. De bouwers van Stonehenge richtten dit monument op in relatie met de sterren en wellicht zelfs om zons- en maansverduisteringen te voorspellen (zie van der Kruit 2001). Ook de strips van Charles M. Schulz in de *Peanuts* serie in fig. 2 zijn goede voorbeelden (Michaelis 2007).

Of wat te zeggen van dit citaat van Havank (1960) over zijn hoofdpersoon ‘de Schaduw’: “‘Rommelig’, besloot mijnheer Charles C.M. Carlier. ‘En slordig!’ Het was, als je ’t goed naging, eigenlijk allemaal nogal rommelig, slordig eigenlijk, en onafgewerkt; – de schepping en zo, de sterrenhemel en zo, zelfs al was het de zomerse sterrenhemel van zijn geliefde Provence. ‘Typisch haastwerk’, zei mijnheer Charles C.M. Carlier. [...] In plaats dat sterren en kometen en planeten behoorlijk gerangschikt stonden, soort bij soort, als werkwoorden in een grammatica, partijen in een

³Zie mijn bijdrage over ‘Tijd’ (van der Kruit 2000).

COSMOLOGY MARCHES ON



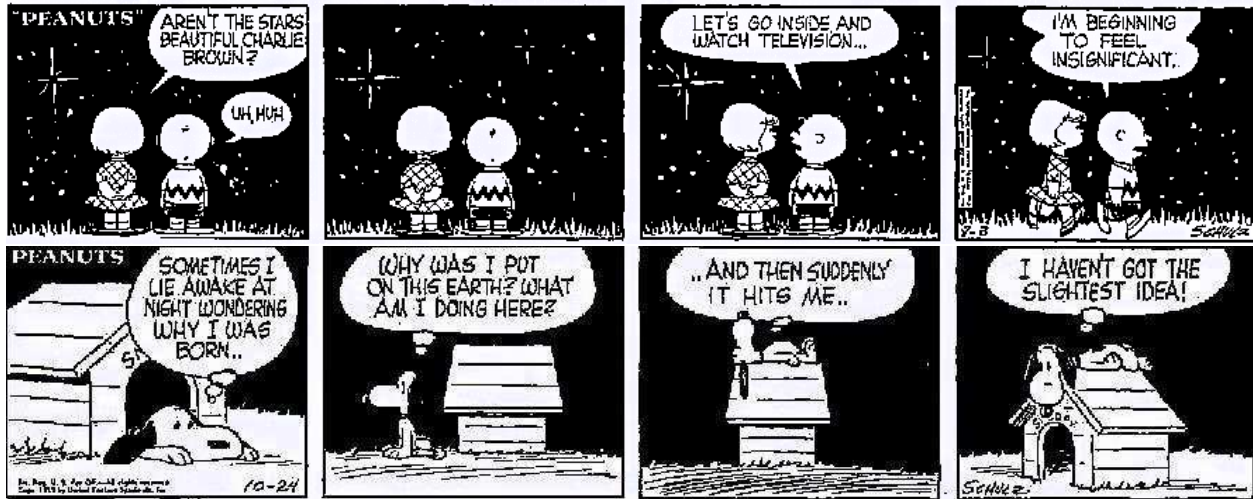
Figuur 1. Een cartoon van Sydney Harris (Harris 2008).

parlement, kazen in een pakhuis, of als standen in een vochtig land dat hij toevallig eens bezocht had, lag het allemaal maar woest en kris kras door elkaar alsof er geen geleide economie aan te pas was gekomen. 'Of juist wèl,' zei mijnheer Charles C.M. Carlier."

5. De natuurwetenschap heeft voor veel beoefenaren als doel de natuur te 'begrijpen', maar soms wordt dat wel op een heel absolute wijze gepresenteerd. In zekere zin was de deterministische benadering van Laplace al een voorbeeld van absolutisme. Omstreeks de 'fin de siècle' eind negentiende eeuw was er de algemene opvatting dat de ultieme oplossing van de natuurwetenschap nabij was. In de natuurkunde werd dit wreed verstoord door de quantummechanica en de algemene relativiteitstheorie, die een fundamenteel nieuwe kijk op de natuurkunde noodzakelijk maakten. Komt de wetenschap ooit af? Mijn collega Vincent Icke bracht het ongeveer onder woorden door de fysicus te beschrijven die thuis kwam en tegen zijn vrouw aankondigde dat hij voortaan zou koken, want de natuurkunde was af.

Onthutsende resultaten kwamen uit de wiskunde en informatica. Kurt Gödel bewees in 1931 zijn incompleetheidstheorema, dat inhield dat in elke consistente rekenkundige theorie beweringen bestaan die waar zijn maar niet bewezen kunnen worden. Ik ben geen wiskundige en ga dit niet in detail bespreken⁴, en verwijs daarom naar de boeiende beschrijving van dit en verwante zaken door Hofstadter (1979, 2007). Vergelijkbaar is het werk van Alan Turing over computer programma's, waarvoor hij stelde dat er geen systematische manier is om te besluiten of een gegeven programma dat data verwerkt ooit zal stoppen. John Casti beschrijft in zijn boek *Searching for Certainty* (Casti 1991), hoe het komt dat de wetenschap slechts in beperkte mate in staat is het weer te begrijpen en voorspellen, of het uitbreken van oorlogen of de fluctuaties op de beurs te beschrijven. Het is duidelijk, dat er grenzen zijn aan begrip en voorspelling, niet omdat onze kennis onvoldoende is, maar dat dat om veel dieper liggende redenen onmogelijk is. De mogelijkheid de toekomst te voorspellen is kennelijk fundamenteel beperkt. Niels Bohr zei het al: "*Prediction is very difficult, especially about the future*".

⁴Zodat u niet kunt zeggen: "*Hij spreekt met de stelligheid van een leek*".



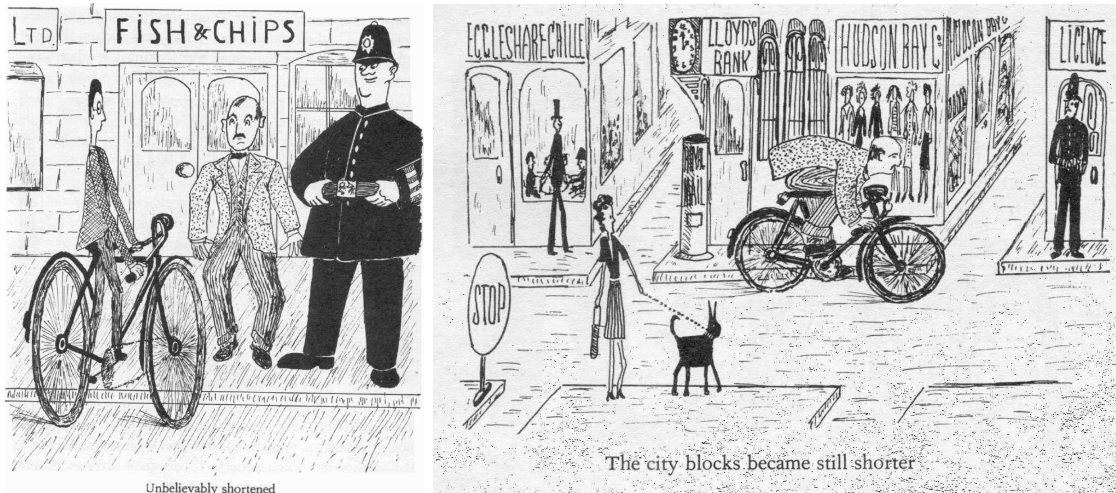
Figuur 2. Twee peanuts-cartoons van Charles M. Schulz (Michaelis 2007).

6. Einstein beleefde zijn grootste successen in zijn ‘*annus mirabilis*’ 1905, toen hij niet alleen zijn speciale relativiteitstheorie publiceerde, maar ook zijn verklaring van het fotoelectrische effect (waarvoor hij later de Nobelprijs zou krijgen) en van de zogenaamde Brownse beweging van moleculen. In 1915 volgde zijn algemene relativiteitstheorie, die in feite een theorie van de zwaartekracht was; een verbetering van de gravitatiewetten van Newton. De rest van zijn leven (Einstein overleed in 1955) hield hij zich bezig met het definiëren van een universele veldentheorie die in staat zou moeten zijn om zowel de zwaartekracht als de elektrische en magnetische krachten in een enkele theorie te vangen (Einstein 1950). Dit is hem niet gelukt.

Recenter is het streven een ‘*Theory of Everything*’ of TOE te formuleren, die naast zwaartekracht en electromagnetische interacties ook de zogenaamde zwakke en sterke wisselwerkingen die gelden op het sub-atomaire niveau, samen in een enkele theorie of formalisme zou moeten kunnen vangen. Theorieën die zowel de electromagnetische wisselwerking als de sterke en zwakke wisselwerking omvatten bestaan al en zijn algemeen geaccepteerd. De quantumelectrodynamica of QED, en de daaruitvolgende theorie van de electrozwakke wisselwerkingen, brengt de electromagnetische en de zwakke wisselwerking bijeen in een enkele theorie en de quantumchromodynamica QCD daarbij de sterke wisselwerking. Deze krachten of wisselwerkingen werken middels uitwisseling van speciale deeltjes en samen met de fundamentele deeltjes, waarin de materie zich kan manifesteren, vormt dat het zogenaamde ‘*Standaard Model*’ van deeltjes en interacties. De Engelse versie van het betreffende artikel in *Wikipedia*⁵ is een goede introductie (Wikipedia 2008a), alhoewel om deze theorie te begrijpen men al snel erg technisch moet worden. De zwaartekracht laat zich nog niet samen in zo’n Theorie van Alles opnemen, alhoewel men het hypothetische deeltje dat door zwaartekracht wordt uitgewisseld alvast maar ‘graviton’ genoemd heeft.

Maar men verwacht nog meer. De natuur heeft fundamentele grootheden (‘constanten’), die eigenlijk in alle theoretische concepten als gegevens van buiten worden beschouwd. Voorbeelden daarvan zijn de waarde van de elektrische lading van het electron of de grootte van de zwaartekrachtconstante. De eerste bepaalt de sterkte van elektrische velden of stromen en de tweede de sterkte van de zwaartekracht. Als de laatste bijvoorbeeld duizend keer zo groot zouden zijn dan waren zulke krachten ook duizend keer zo groot. Een ander voorbeeld is de lichtsnelheid. Er zijn twee zeer gemakkelijk boekjes uit de jaren veertig, *Mr Tompkins in Wonderland* en *Mr Tompkins*

⁵Wikipedia is een initiatief, dat bij aanvang veel bedenkingen genereerde. Sommige stukken zijn inderdaad beneden de maat, maar op vele, waaronder het hier geciteerde, valt weinig aan te merken.



Figuur 3. Gamow beschrijft een wereld in een droom van Mr Tompkins, waarbij de lichtsnelheid 10 mijl per uur is. Als hij stilstaat (links) lijkt een voorbijgaande fietser korter en als hij op de fiets zit zijn de huizenblokken verkort.

explores the Atom, van de fysicus George Gamow waarin hij de speciale relativiteitstheorie en de quantummechanica bespreekt. Via een droom van Mr C.H.G. Tompkins beschrijft hij b.v. de wereld als de lichtsnelheid geen 300.000 kilometer per seconde, maar 10 mijl per uur zou zijn. Het gevolg is dat effecten uit de speciale relativiteitstheorie in het dagelijks leven merkbaar worden (zie fig. 3). Vanaf zijn fiets ziet Mr Tompkins de huizenblokken korter worden en als hij stilstaat ziet hij een langrijdende fietser verkort. Voor de effecten van de quantummechanica vergroot hij de constante van Planck vele machten van tien (ruim 26 tot 1 erg.sec). Mr Tompkins merkt dan bij het biljarten, dat de ballen nadat ze een botsing hebben ondergaan, uitspreiden tot wolken van waarschijnlijkheidsverdelingen. De boekjes zijn samengebracht in *Mr Tompkins in Paperback* (Gamow 1965)⁶.

Er is lang de hoop geweest –en voor sommigen bestaat die nog– dat een TOE zou kunnen geconstrueerd, waarbij de waarden van die fundamentele constanten uit de theorie zelf zouden volgen en niet als gegevens van buitenaf gezien hoefden te worden. Het leek erop, dat een vorm van zo'n Theorie van Alles succesvol geformuleerd werd in de zogenaamde 'String Theory', (in het Nederlands wel snaar-theorie genoemd) die nog niet compleet is. Een goede algemene, maar voor de outsider waarschijnlijk toch moeilijk te volgen beschrijving van de stand van de fundamentele fysica en de snaar-theorie is een bestseller, waarvan ik me afvraag hoeveel van de kopers van het boek het ook daadwerkelijk tot het eind gelezen hebben, laat staan begrepen; *The Elegant Universe* van Brian Greene (1999). Maar die hoop op een definitieve theorie die alles verklaart wordt steeds kleiner, zoals bijvoorbeeld toegankelijk beschreven door Leonard Susskind, één van de grondleggers van de snaar-theorie, in een recent verschenen boek *The Cosmic Landscape* (Susskind 2005), dat veel aandacht heeft gekregen. Ik kom in onderstaande op dit opmerkelijke boek terug.

7. De kwestie van de grootte van fundamentele natuurconstanten is maar één aspect van de vraag waarom alles eigenlijk is zoals het is. Het blijkt dat er een scala van schijnbare toevalligheden zijn in de natuur, die bij nadere beschouwing essentieel zijn voor het ontstaan van leven zoals wij het kennen. Dat zijn o.a. die natuurconstanten, maar er zijn ook details in de structuur van de materie die vereist zijn voor onze aanwezigheid. Dat heeft aanleiding gegeven tot de formulering van het

⁶Een samenvatting van het boekje *Mr Tompkins in Wonderland* is beschikbaar op het Web met boomeria.org/physicslectures/secondsemester/relativity/tompkins.html.

zogenaamde ‘Antropisch Principe’, dat in eenvoudige woorden zegt dat alles noodzakelijkerwijs is zoals het is, omdat wij er anders niet zouden zijn om die vraag te stellen. De achtergronden van dit principe en een gedetailleerde discussie van deze schijnbare toevalligheden en de verschillende vormen en implicaties ervan zijn beschreven in een gedegen boek *The Anthropic Cosmological Principle* (Barrow & Tipler 1986), maar zie ook *The Constants of Nature* (Barrow 2004).⁷

In eerste instantie werd het antropisch principe met argwaan ontvangen. Het leek onwetenschappelijk om dit zo te stellen en een zwakgebod om vooral maar geen verklaring te hoeven geven. Een deel van de weerstand heeft ook te maken gehad dat het teleologisch leek en dat het er vanuit lijkt te gaan dat het heelal en de schepping een doel hebben. In recentere tijden valt men meer en meer op het antropisch principe terug. De reden is dat het er steeds meer op begint te lijken dat een complete Theorie van Alles niet mogelijk is (Susskind 2005) en dat er grenzen zijn aan de natuurkunde vergelijkbaar met de incompleteidstheorema’s van Gödel in de wiskunde en Turing in de informatica. Voor wetenschappers als Susskind en anderen is het dan aanvaardbaarder het antropisch principe te omarmen, in een visie waarin ons heelal één van de mogelijke heelallen is uit een enorme collectie, die een ‘multiversum’ of ‘cosmic landscape’ genoemd wordt. Het aantal verwijzingen in de wetenschappelijke literatuur naar het antropisch principe neemt snel toe.

8. Ik werd per 1 juni 1987 benoemd tot hoogleraar sterrenkunde aan de Rijksuniversiteit Groningen, welk ambt ik met een oratie of inaugurele rede⁸ traditioneel aanvaardde op 26 januari 1988. De rede was getiteld *Welke Ster is nu de Mijne?* (van der Kruit 1988). Ik sprak erover hoe het heelal in elkaar zit, wat we kunnen zeggen over de toekomst ervan, waarom het is zoals het is, bracht het antropisch principe ter sprake en besprak de vraag of er elders in het heelal intelligent leven zou kunnen zijn. Dat is inmiddels 20 jaar geleden en het leek me tijd eens te zien hoe het er wat betreft de onderwerpen die ik behandelde nu uitziet, wat er veranderd is en hoe ik nu over de zaken denk, die ik toen besproken heb. Ik heb de uitnodiging om de tiende J.H. van Oosbreelezing te houden aangegrepen om deze onderwerpen nog eens de revue te laten passeren, te zien wat er aan verandering in inzichten en vooruitgang te bespeuren is en vooral hoe mijn eigen kijk op deze onderwerpen nu is.

Ik zal geen aandacht besteden aan het eerste onderwerp in mijn oratie, namelijk de astrologie. Het was toen actueel, omdat de Groningse Commissie Studium Generale er een reeks voordrachten over had georganiseerd en dat vond ik niet passen aan een universiteit. Er is inmiddels veel meer over geschreven en voor zover ik het gevolgd heb, is mijn conclusie over het ontbreken van een wetenschappelijke onderbouwing van de astrologie alleen maar versterkt. Er is absoluut geen enkele statistische verificatie voor de geldigheid van astrologische voorspellingen. Ik vermeldde, dat er een verklaring tegen astrologie bestaat ondertekend door een groot aantal wetenschappers (op initiatief van de van oorsprong Nederlandse astronoom Bart J. Bok), die astrologie in scherpe bewoordingen veroordeelt. Deze verklaring is met ondersteunende achtergrond teksten verschenen als een boek *Objections to Astrology* (Bok & Jerome 1975).⁹ Ik vind het terecht hier te bekennen, dat ik niet op de hoogte was van het feit, dat de verklaring in het Nederlands was uitgegeven met een voorwoord van Prof. Bernard Delfgaauw, emeritus hoogleraar filosofie aan de Rijksuniversiteit Groningen. Prof. Delfgaauw stuurde mij een exemplaar, nadat hij mijn oratie had gelezen.

⁷John Barrow is niet alleen een origineel denker; hij is ook een uitstekend popularisator van wetenschap. Een J.H. van Oosbreelezing wordt ‘beloond’ met een flinke boekenbon. Daarvan heb ik o.a. een recent uitgekomen boek van Barrow aangeschaft, *Cosmic Imagery*, waarin hij aan de hand van beroemde beelden een prachtige beschrijving geeft van belangrijke wetenschappelijke vooruitgang en innovaties (Barrow 2008).

⁸Deze J.H. van Oosbreelezing is eigenlijk geen echte lezing, want ik lees geen complete tekst voor. De enige keer dat ik in die letterlijke zin echt een ‘lezing’ heb gehouden, was deze oratie; en net die wordt als een ‘rede’ aangeduid.

⁹De verklaring zelf, voor het eerst verschenen in het tijdschrift ‘*The Humanist*’ van september/oktober 1975, is te lezen op www.americanhumanist.org/about/astrology.html.



Figuur 4. De lege bladzijden in deze tekst (althans die leeg zouden blijven omdat ik hoofdstukken op een rechter pagina laat beginnen) gebruik ik om enige foto's van de tiende J.H. van Oosbreelezing te tonen. Ze zijn genomen door Nico Boerboom. Deze is genomen voor aanvang van de lezing.

2. Enkele autobiografische opmerkingen

*Aan allen, die de moeilijke vraag verkiezen
boven het gemakkelijke antwoord en
de weg stellen boven de herberg.*
J.H. Rush.

*Geef mij
maar een vraag en geen antwoord*
Rutger Kopland.

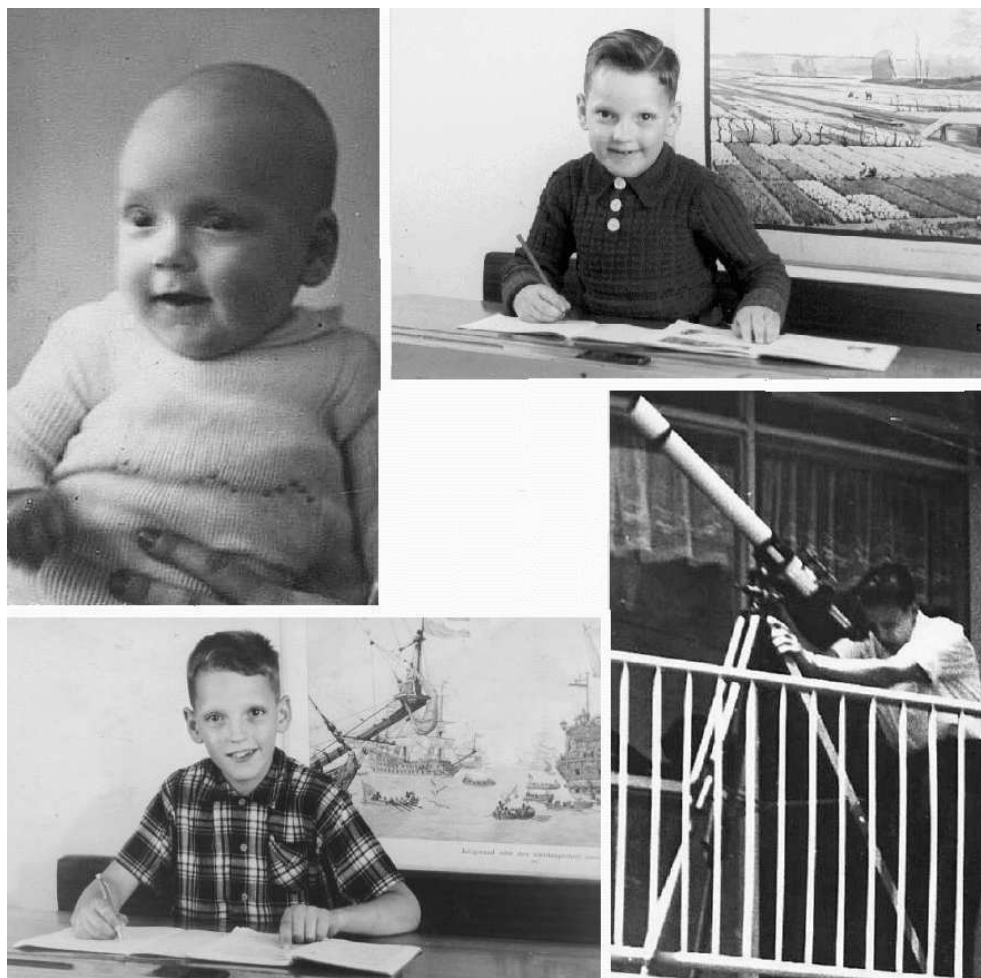
Ik begin met een aantal autobiografische zaken waardoor ik enig inzicht hoop te verschaffen over mijzelf zowel als astronoom en persoon als achtergrond bij wat ik verder ga zeggen. Overigens moet je voorzichtig zijn met herinneringen. Freeman Dyson, een fysicus die in Engeland is opgegroeid, maar als promovendus naar de V.S. vertrok, vertelt het volgende verhaal. Regelmatig schreef hij als jonge man naar zijn ouders in Engeland over zijn belevenissen en wat er zo allemaal gebeurde. Later na de dood van zijn ouders vond hij al die brieven terug; ik stel me zo voor in een speciale doos met een lintje erom en netjes chronologisch geordend. Bij het lezen viel het hem op, dat er zaken waren gebeurd die toen ze plaatsvonden kennelijk van groot belang voor hem waren, maar die hij zich nu nauwelijks meer kon herinneren. Nog verbluffender was, dat er gebeurtenissen waren, die die hij zich levendig herinnerde, maar die bleken nooit te zijn gebeurd! Hoe dan ook en voor wat het waard is, ik begin met twee herinneringen aan mijn ‘jonge jaren’.

Ik weet niet precies wat mijn oudste herinnering is. Er zijn er een paar die teruggaan naar toen ik een jaar of vier/vijf was. Maar ik kan die niet onderling chronologisch ordenen. De volgende is van belang om hier te noemen. Het moet op een vroege avond in de winter geweest zijn; het was donker en alleen in de winter was ik dan nog niet naar bed. Mijn vader had me meegenomen om een brief op de post te doen. Dat was niet eens ver van ons huis op de Singel in Schiedam, vlakbij het station. Het was onbewolkt en mijn vader zal me geweest hebben op de sterren, die je toen nog goed zien kon in de stad; in ieder geval we stonden er samen naar te kijken, ik met m'n hand in die van mijn vader. Ik weet nog hoe ik ervan onder de indruk was. Natuurlijk weet ik de conversatie niet letterlijk meer. Maar ik weet wel dat ik mijn vader vroeg of al die sterren ook een naam hadden. Dat wist hij niet. Ik herinner me, dat ik me toen heb voorgenoemen het dan later uit te zoeken als ik groot zou zijn. Misschien heb ik dat ook wel gezegd.

Ik herinner me ook, dat er veel opwindig was over een zonsverduistering op een zomerse dag in de jaren vijftig. Ik moet op de lagere school gezeten hebben. Het kan niet anders dan 30 juni 1954 geweest zijn. Dat was een woensdag en ik was thuis, dus het zal al wel zomervakantie geweest zijn. De zonsverduistering was –dat is natuurlijk allemaal na te rekenen– zodanig dat tijdens het maximum, in Schiedam om 13:41 uur (we hadden toen geen zomertijd¹⁰), 81% van het zonsoppervlak achter de maan verdwenen was. Dat is vrij zeldzaam vanaf een bepaalde lokatie¹¹. Het was warm en zonnig weer en ik herinner me hoe mijn moeder druk in de weer was om glasplaatjes

¹⁰Tot 1940 hadden wij Amsterdamse tijd (de middelbare zonnetijd voor de lengtegraad van Amsterdam), maar tijdens de Tweede Wereldoorlog heeft de Duitse bezetter de Middel-Europese Tijd ingevoerd met sinds 1942 een zomertijd. Het heeft lang geduurd voordat de zomertijd, die met de bezetting geassocieerd werd, weer acceptabel werd; pas in 1977 is die weer ingevoerd als deel van een Europese maatregel als reactie op de oliecrisis. Ik herinner me een tv-programma rond 1970 toen de discussie al woedde, waarin een reporter een mevrouw in een winkelstraat vroeg wat ze vond van zomertijd. “*Wat is dat?*”, vroeg de vrouw. “*Dat de zon een uur eerder opkomt*”, zei de reporter. In onvervalst Rotterdam zei de vrouw: “*Maar dat heb je toch niet in de hand?*” Er is overigens ook een anecdoten dat tijdens discussies over zomertijd in de V.S. begin twintigste eeuw er in het congres werd voorgesteld tegelijk ook maar de thermometers bij te stellen, zodat de winters wat milder en de zomers wat koeler zouden worden.

¹¹In Nederland was er een gedeeltelijke zonsverduistering op 1 augustus 2008. De volgende kunnen we pas zien op 4 januari 2011 en 20 maart 2015. Voor meer informatie zie hemel.waarnemen.com/zon/zonsverduisteringen_2000-2099.html of www.dekoepel.nl/zenit/eclipsweb/. Maansverduisteringen zijn vaker te zien; zie hemel.waarnemen.com/moon/lunareclipses_2000-2049.html.

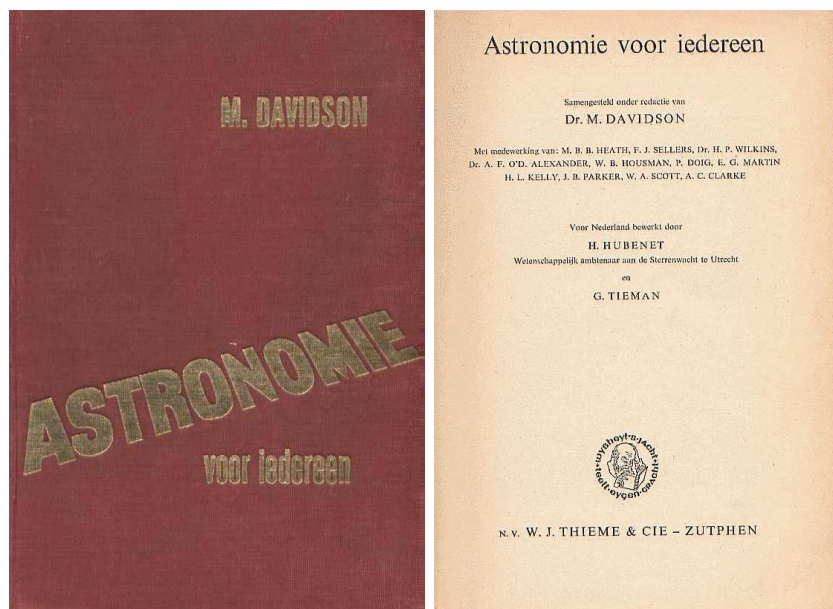


Figuur 5. Foto's van mijzelf toen ik respectievelijk een aantal maanden, 6 jaar, ongeveer 10 jaar en 19 jaar was.

te beroeten met een kaars om naar de verduisterde zon te kunnen kijken. Er waren nog meer volwassenen in de kamer en het was een rep en roer. Ik weet nog dat ik niet begreep hoe de maan voor de zon kon komen. De maan was toch voor 's nachts en alleen de zon voor overdag.¹²

Ik was twaalf jaar toen ik in de Gemeentelijke Bibliotheek van Schiedam een boek leende over astronomie (zie fig. 6). Het was een flink boek, *Astronomie voor Iedereen* geheten (Davidson 1953), en dat fascineerde me zo enorm dat ik daarna altijd aan de sterrenkunde verslingerd ben gebleven. Voor mijn veertiende verjaardag –we waren toen net naar een flat in de Schiedamse nieuwbouwwijk Nieuwland verhuisd– vroeg en kreeg ik een kleine teleskoop. Het was een zeer bescheiden 4-cm kijkertje op een tafelstatief, dat ik gebruikte door de driepoot op het punt waar de poten bijeen kwamen te laten leunen op het hek van het balkon van de flat, dat op het zuidoosten gericht was (hetzelfde hek als in fig. 5, rechtsonder). Ik zag ermee de manen van Jupiter, de ringen van

¹²Inmiddels heb ik tweemaal een volledige zonsverduistering gezien; in 1999 in Bulgarije en in 2002 in Zuid-Afrika. Het is zonder meer één van de meest indrukwekkende schouwspelen die ik ooit heb gezien. Ik kan me heel goed voorstellen hoe primitieve volkeren, die niet begrepen wat er aan de hand was, daarover in paniek raakten. Ik vond het (vooral de eerste keer) een zeer emotionele ervaring en voelde ondanks dat ik wist wat er aan de hand was toch een zekere opluchting toen de zon weer te voorschijn kwam.



Figuur 6. Omslag en titelpagina van mijn eerste boek over sterrenkunde (Davidson 1953).

Saturnus, de poolkappen van Mars, dubbelsterren, sterrenhopen, enz. Later, nadat ik eindexamen HBS gedaan had, heb ik een aantal weken op een kantoor zomerwerk gedaan en van de verdiensten een 6-cm kijker op een groot statief gekocht. Ook die gebruikte ik voornamelijk vanaf het balkon van de flat (zie fig. 5), later in Leiden vanuit het balkon van het studentenhuis waar ik woonde.

Toen ik in 1962 eindexamen HBS-B had gedaan ben ik aan de Rijksuniversiteit Leiden¹³ sterrenkunde gaan studeren. Leiden lag voor de hand, want daar was Neerlands beroemdste astronoom ooit, Professor Oort. Die was een neef van de directeur van mijn HBS. Ik kon niet vermoeden dat later Prof. Oort mijn promotor zou worden. Mijn vader was kapper en had een kapperszaak, waar hij in de heren-afdeling werkte en mijn moeder in de dames-kapsalon. Om geld ter besparen heb ik $2\frac{1}{2}$ jaar gespoord naar Leiden, waarmee een goede verbinding met de trein bestond. Ik had nog gearzeld of ik sterrenkunde zou gaan studeren of natuurkunde en de astronomie als hobby houden. Maar ik besloot toch dat het sterrenkunde moest worden. Ik weet nog de reactie van mijn vader toen ik hem dat vertelde. *“Kun je daar dan wel je brood mee verdienen?”*, vroeg hij. Ik zei dat ik dat eigenlijk niet wist. Het vak hield me toen al zo bezig, dat dat niet bij me was opgekomen. Laat staan dat ik besepte dat het in zou houden veel te reizen en van de wereld te zien.

Ik heb er nooit meer over getwijfeld. Meer van het heelal leren en bezig te zijn met de fundamentele vragen erachter heeft me altijd in de greep gehouden. Dit lijkt misschien afstandelijk van de samenleving in een ivoren toren, maar de zuivere wetenschap heeft een nadrukkelijke maatschappelijk functie, namelijk een onderneming van alle bij het onderzoek betrokkenen om de nieuwsgierigheid van de mens te bevredigen. Terugkoppelen naar de samenleving, b.v. door populaire lezingen of artikelen, is dan ook een deel van de taak van de universitaire onderzoeker en ik vind ook veel bevrediging in het geven van onderwijs aan de universiteit en het enthousiasmeren

¹³De Rijksuniversiteit Leiden heet inmiddels Universiteit Leiden, omdat Rijksuniversiteit wellicht vertaald wordt door ‘State University’. Sommige van zulke universiteiten, met name van de kleinere staten, worden in de V.S. vaak als tweederangs universiteiten beschouwd en daar wil men in Leiden absoluut niet mee geassocieerd worden. In Groningen hebben we dat opgelost (ik was bij die discussie betrokken als decaan van de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen midden jaren negentig) door statutair te bepalen dat de Rijksuniversiteit Groningen in het Engels gewoon ‘University of Groningen’ heet.



Figuur 7. Twee boeken, Jones et al. (1956) en Rush (1957), die op mij zeer veel indruk hebben gemaakt en veel invloed hebben gehad.

van jonge onderzoekers. Het is dus werk van mensen en voor mensen.¹⁴ Ik beantwoord de vraag over wat het nut van de sterrenkunde is wel met de tegenvraag ‘wat is het nut van een opera?’. Of van de Nachtwacht?

Verder noem ik een zeer indringende ervaring, die stamt uit de tijd dat ik naar Leiden verhuisde om op kamers te gaan wonen in het ‘Apostolisch studentenhuis Morsstraat 4’. In 1951 was uitgeverij ‘Het Spectrum’ (Utrecht) begonnen met de Prisma-reeks, een reeks pocketbooks in het Nederlands. De eerste ‘Prisma’s’ waren boeken van Dickens. Tijdens mijn HBS-tijd lasen we klassikaal Prisma pocket nr. 53, de *Camera Obscura* van Hildebrand (Nicolaas Beets) en de meesten van mijn klasgenoten (en ikzelf) hadden woordenboeken uit de Prisma-reeks. Er werden ook wel populair wetenschappelijke boeken uitgegeven, zoals het boek *Van Atoom tot Heelal* (Jones et al. 1956); zie fig. 7. Naast de Prisma-reeks werd in 1957 begonnen met de ‘Aula-reeks’. Dit was een serie populair-wetenschappelijke pocketbooks en ik was daar zeer op gesteld en met mijn bescheiden financiële middelen kocht ik af en toe een boek uit die reeks. Zo ook, naar mijn herinnering niet lang nadat ik voorjaar 1965 naar Leiden was verhuisd, kocht ik Aula nummer 167. Het heette *De Oorsprong van het Leven* en was geschreven door J.H. Rush (1957, zie fig. 7). Het was een boek over het ontstaan van het leven en dat interesseerde me. Thuisgekomen las ik de opdracht voorin het boek en ik herinner me nog het kippenvel, dat ik erbij kreeg:

*“Aan allen, die de moeilijke vraag verkiezen
boven het gemakkelijke antwoord
en de weg stellen boven de herberg.”*

De gedachte achter deze opdracht sprak mij meteen enorm aan. Vanaf dat moment is het eigenlijk een soort Leitmotiv geworden. Het gaat niet om het voor de hand liggende antwoord. Het gaat uiteindelijk überhaupt niet eens om het antwoord; het stellen van de vraag is veel belangrijker dan

¹⁴Ik verzet mij dus tegen de opmerking van mensen die zich niet aangetrokken voelen tot exacte wetenschappen en dan zeggen, dat ze liever ‘met mensen werken’. Wij werken namelijk ook met mensen.

het vinden van het antwoord.¹⁵ Vanaf dat moment besepte ik, dat ik liever leef met vragen dan met antwoorden en dat is altijd zo gebleven.

Ik heb dat algemene gevoel van onderweg zijn ofwel zoeken naar mogelijkheden, maar niet hoeven te leven met absolute zekerheden, in die tijd ook teruggevonden in de songs van Paul Simon en Art Garfunkel en van Bob Dylan. Of in het weliswaar zeer gedateerde, maar destijds nogal invloedrijke boek *On the Road* van Jack Kerouac (1957). Als ik mijn huidige kijk op zaken in wetenschap en overtuiging vergelijk met zoals die vroeger waren, dan is toch wel zeer van toepassing de tekst van Paul Simon in de Simon-Garfunkel song ‘The Boxer’: “*After changes upon changes, we are more or less the same.*”

Het boek *The Sleepwalkers* (Koestler 1959), dat ik al eerder aanhaalde (zie fig. 8), heeft daarbij ook een belangrijke rol gespeeld. Ik las het voor het eerst toen ik nog niet lang in Groningen werkte, dus 1975 of iets later. Het thema van de ‘slaapwandelende’ onderzoeker, die zijn weg tastend zoekt en de voortgang van de wetenschap, die Koestler vergelijkt met een meanderende rivier, die dan weer langzaam stroomt, dan weer in een stroomversnelling komt, spreekt mij sterk aan. Dat geldt ook voor het beeld dat hij schetst van de wetenschapper die dan weer reikhalzend uitziet naar nieuwe inzichten, dan weer zich angstig vasthoudt aan oudere paradigma’s, bang en onzeker bij elke verandering. “*Alles woelt hier om verandering; en betreurt die dag aan dag. Hunkert naar hetgeen hij zien zal, wenst terug wat hij eens zag.*” Ik denk inderdaad dat de ontwikkeling van de wetenschap zo gegaan is. Ik heb de gewoonte mijn promovendi bij hun promotie een exemplaar van dit boek te geven.

In de wetenschap is het zo, dat wat we nu als de waarheid zien, over niet eens zo lange tijd volkomen verouderde denkbeelden kunnen zijn. Wat is dan eigenlijk de waarheid? Is er wel een absolute waarheid¹⁶, die we alsmaar dichter benaderen? Ik kan me niet herinneren ooit in een absolute waarheid te hebben geloofd, of zelfs in een ‘plan’ voor de Schepping, waarbij alles al tevoren vaststond en onherroepelijk tot het nu moest leiden. De mens is niet een overmijdelijk gevolg van de evolutie en ook niet een eindpunt. Onze kennis van nu bepaalt onze verwondering van nu. We zijn onderweg.

Je kunt natuurlijk altijd zeggen, dat de waarheid van nu geen waarde heeft, omdat die over enige tijd toch zal blijken onjuist te zijn. Of dat, wat de wetenschap nu als inzicht verkondigt, onbelangrijk voor je is, omdat onderzoekers er over enige tijd toch weer anders over zullen denken. Maar een absolute waarheid heb je niet; en als je de waarheid van nu niet omarmt, heb je niets. Wel moet je meegaan met de tijd en verouderde denkbeelden loslaten. Alles is tenslotte relatief. Toen twee mannen op hun weg een beer tegenkwamen, zie de één tegen de ander: “*Rennen!*”. Waarop de ander zei: “*Waarom? Je kunt toch nooit harder lopen dan een beer.*”. “*Dat klopt.*”, zei de eerste, “*Maar ik hoef alleen maar harder te lopen dan jij.*”¹⁷

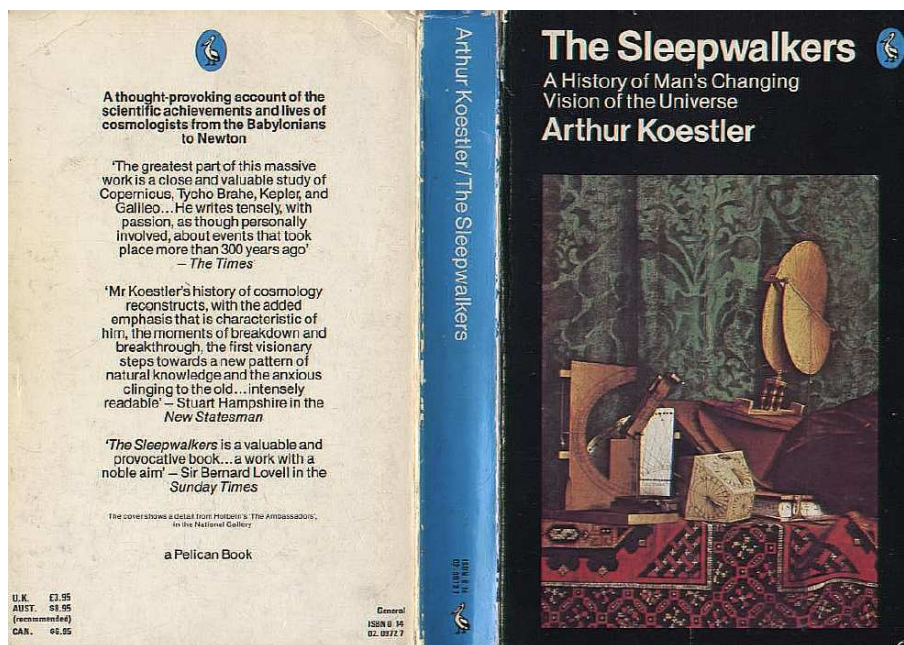
Ik heb me altijd vragen gesteld en ben me altijd vragen blijven stellen. Toen ik als scholier op de lagere school voor het eerst het verhaal las van Faust in de vorm, waarbij Faust zijn ziel verkocht aan de Duivel in ruil voor zeven wensen, vroeg ik mij onmiddellijk af waarom niemand op het heldere idee was gekomen als eerste wens te wensen dat je oneindig veel wensen mocht doen¹⁸.

¹⁵Ik heb me vaak afgevraagd hoe de oorspronkelijke Engelse tekst was. Bij het voorbereiden van deze lezing heb ik via amazon.com een oorspronkelijk exemplaar van het boek in pocketvorm bemachtigd. De tekst is “*For all those who have thought the hard question a better companion than the easy answer, and the road better than the inn.*”

¹⁶In 1998 is de encyclopedie *Fides et Ratio* van de Paus (Johannes Paulus II) verschenen; hij schrijft daarin over de absolute waarheid, ‘de waarheid zelf’ (zie b.v. www.katholieknieuwsblad.nl/actueel/kn1603d.htm).

¹⁷Einstein zei het als volgt: “*Als je je hand één minuut op een hete kachel legt, lijkt het een uur. Als je een uur met een mooie vrouw vertoeft, lijkt het een minuut. Dat is relativiteit.*”

¹⁸In de versie van dit verhaal van Goethe gaat het over een zekere periode waarin Faust wensen mag doen, maar ik denk dat dan mijn eerste wens zou zijn dat die periode oneindig lang duurt



Figuur 8. De omslag van het boek van Koestler (1959), dat veel invloed heeft gehad op mijn denken.

Of, waar ik als jongeman uren over heb nagedacht, waarom verwisselt een spiegel wel links en rechts, maar niet boven en onder.¹⁹

Ik heb eens een artikel *Harmonie* in *Ons Maandblad* (van der Kruit 1993) geschreven, waarin ik inga op harmonie in de geschiedenis van de natuurwetenschap, muziek en planeetbanen. Wie dit leest zal zeker veel herkennen van wat ik hierboven schreef. Het hebben van onbeantwoorde vragen en geen universeel doel hebben paste niet in ieders optiek in de Apostolische zienswijze en ik heb er destijds ook kritische opmerkingen over gekregen. Maar er waren ook instemmende reacties op dat stuk. Ik heb me, bewust of onbewust, altijd het recht voorbehouden om te leven met vragen en niet met antwoorden.

Mijn promotie vond plaats op 6 oktober 1971 aan de Rijksuniversiteit Leiden. Mijn promotor was prof. J.H. Oort en het betrof een onderzoek naar de expansies in de centrale delen van ons Melkwegstelsel, dat wellicht te maken had met een explosie zo'n tien miljoen jaar geleden. Het was gedeeltelijk gebaseerd op waarnemingen met de radiotelescoop te Dwingeloo en berekeningen met de eerste grote computer van de Leidse universiteit. De omslag is te zien in fig. 9. Daar zien we een weergave van een toen zeer recente waarneming met de nieuwe radiotelescoop te Westerbork die ik toonde tijdens een conferentie. Mijn hand reikt naar de centrale delen van het waargenomen melkwegstelsel als een soort poging te begrijpen wat er in de centrale delen gebeurt. De foto is gemaakt door toen mede-promovendus en nu collega Vincent Icke. Mijn paranimfen waren mijn zeer goede vriend Manfred Horstmanshoff en mede-student, mede-promovendus en nu collega Peter Katgert. De opdracht was; "*Aan mijn ouders, aan mijn vrienden: Om in de kast te zetten*". Ik had geen illusie dat mijn ouders of niet-astronomen het zouden begrijpen, maar als ze me de eer deden mijn proefschrift in hun boekenkast te zetten, dan was ik daar zeer content mee. Na mijn promotie heb ik eerst nog een jaar in Leiden gewerkt met de Westerbork Synthese Radio

¹⁹Een spiegel verwisselt voor en achter! Onze hersenen kijken naar ons spiegelbeeld, alsof er aan de andere kant van de spiegel een mens staat, die een halve slag heeft gemaakt om een verticale as. En dan zijn links en rechts verwisseld. Maar het is een (virtueel) persoon die op mij lijkt, maar waarvan voor en achter zijn verwisseld.



Figuur 9. De omslag van mijn proefschrift met een paar foto's van de promotie. Rechtsboven sta ik met Prof. Oort, linksonder zit ik met mijn paranimf Manfred Horstmanhoff en mijn vader, en rechtsonder sta ik met mijn ouders.

Teleskoop en daarna ben ik bijna twee-en-een-half jaar postdoctoral fellow geweest van de Carnegie Institution of Washington aan de Mount Wilson and Palomar Observatories in Pasadena, California. Daar werkte ik met optische telescopen, met name de 200-inch Hale teleskoop op Palomar Mountain, die toen de grootste (werkende) ter wereld was en die de troetelnaam had 'the Big Eye'. Per 1 januari 1975 ben ik aangesteld aan de Rijksuniversiteit Groningen om te werken aan het Kapteyn Laboratorium (nu het Kapteyn Instituut), waarvan ik ook meer dan tien jaar lang directeur ben geweest. Ik heb begin jaren tachtig nog een jaar gewerkt aan de Mount Stromlo and Siding Spring Observatories in Canberra, Australië. Nog steeds maak ik regelmatig werkbezoeken aan deze sterrenwacht, aan het Space Telescope Science Institute in Baltimore, USA en recentelijk de European Southern Observatory in Santiago, Chili.²⁰

Het werk van een wetenschapper aan de universiteit bestaat naast onderzoek ook uit belangrijke, en soms omvangrijke taken in onderwijs en bestuur.²¹ Met name onderwijs geven en jonge mensen enthousiasmeren voor mijn vak, is iets wat ik graag doe. Ik heb o.a. vele jaren een inlei-

²⁰Mijn wetenschappelijk curriculum vitae en publicatielijst houd ik bij via mijn homepage op het Web: www.astro.rug.nl/~vdkruit/homepage/cveng.pdf. Een promovendus van mij heeft onze academische genealogie (promotor van je promotor, enz.) eens uitgezocht. Ik heb die uitgebreid en het resultaat is ook op mijn homepage te vinden: www.astro.rug.nl/~vdkruit/boomstam.html. Beide documenten zijn in het Engels.

²¹Zie bijvoorbeeld mijn artikeltje *Astronoom van Beroep* (van der Kruit 1987).

dend college gegeven aan eerstejaars studenten sterrenkunde, maar ook wel gevolgd door studenten natuur-, wis- en scheikunde, dat eerst ‘Sterrenkunde I’ heette, later ‘Inleiding Sterrenkunde’ en nu ‘Sterren en Melkwegstelsels’. Ik besluit die college-reeks altijd met een ‘toegift’ (een college dat geen tentamenstof bevat) met als onderwerp: “*Waarom is het 's nachts donker?*”²². Dit lijkt een overbodige vraag waarvan het antwoord wel zeer voor de hand ligt, maar die blijkt dan verstrekkende achtergronden te hebben. Het wordt de moeilijke vraag, waarvan het stellen veel meer inzicht biedt dan het geven van het gemakkelijke antwoord: ‘*omdat de zon dan onder is*’. Dat deze vraag verre van triviaal is werd al door Johannes Kepler ingezien en het heet inmiddels ‘Olbers Paradox’. De reden blijkt te zijn, dat het (expanderende) heelal een eindige leeftijd heeft. Het is 's nachts donker omdat het heelal een begin heeft gehad! Edward Harrison (1987) heeft er een uitstekend boek over geschreven.

Ik heb altijd graag gedichten gelezen. Liefelingsdichters waren vele jaren (en nog steeds) J.J. Slauerhoff en met name A. Roland Holst. Later is daar Rutger Kopland bij gekomen en van hem komen in dit stuk een paar gedichten voor. Rutger Kopland is ook de enige belangrijke Nederlandse dichter, die ik ooit persoonlijk ontmoet heb. In het dagelijks leven heet hij Rudi van den Hoofdakker en is emeritus-hoogleraar psychiatrie aan de Groningse universiteit. Hij was voorzitter van het bestuur van een onderzoekschool aan de universiteit, die wetenschappelijk werk in de gedrags- en cognitiewetenschappen coördineert. Daarin doen ook enkele delen van mijn faculteit mee (met name de gedragsbiologen) en als decaan had ik daardoor bestuurlijk regelmatig met hem te maken. Verder was hij soms aanwezig bij relevante promoties in mijn faculteit, die ik dan leidde, en bij een paar gelegenheden raakten wij in gesprek tijdens de receptie daarna, als hij (zoals uit zijn gedichten voorspelbaar) een glas jenever dronk. Ik was bij die gelegenheden getroffen door zijn persoonlijkheid, die overigens klopte met wat ik daarvan uit zijn gedichten meende te weten. Eigenlijk niet eerlijk; ik kende hem al bij voorbaat veel beter dan hij mij. Neem eens zijn gedicht *De God in mijn Hersenen* uit de bundel *Een Man in de Tuin* (Kopland 2004), waarin hij zegt dat jezelf de enige bent die je in de weg kunt staan (in dit geval over wel of niet in God te geloven).

Toen ik al bijna ontwaakt was herinnerde ik mij
dat ik die nacht in het verleden had geleefd
en zonder de geringste verbazing weer
geloofd had dat God bestond

ik wilde hem eindelijk wel eens spreken
het is een bijzonder aardige man zei iemand
je kunt hem gerust bellen

ik belde en er klonk een stem, een heel lieve stem
zodat ik mij een lieve gevleugelde vrouw voorstelde
zoals je wel ziet op felicitatiekaarten

wilt u god, werd er gezegd, toets dan één
wilt u god niet, toets dan niet
ik toetste één

en dezelfde gevleugelde vrouw zei: er is nog
één wachtende voor u en die ene bent u

ik herinnerde mij dat ik hier eindeloos over
moest nadenken tot ik ontwaakte en God weer
was verdwenen, ergens in mijn hersenen

Deze J.H. van Oosbreelezing heeft wat betreft tijd en ruimte (5 april 2008, Amersfoort) ook een ander heel speciaal aspect in de persoonlijke sfeer. Op 21 maart (dit jaar Goede Vrijdag) was het precies 5 jaar geleden dat Corry en ik in Amersfoort in het huwelijk traden. Op onze huwelijksaankondiging stond ook een gedicht van Rutger Kopland uit de bundel *Een Lege Plek om te Blijven* (Kopland 1975):

Ga nu maar liggen liefste in de tuin,
de lege plekken in het hoge gras, ik heb
altijd gewild dat ik dat was, een lege
plek voor iemand, om te blijven.

²²De bijbehorende presentatie is te vinden op www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/inleiding11.pdf.

3. Machten van tien

*There are only two truly infinite things: the universe and human stupidity.
But I am not sure about the universe.*
Albert Einstein.

*Interestingly, according to modern astronomers, the universe is finite.
This is a very comforting thought, especially for people,
who can never remember where they left things.*
Woody Allen.

In dit en het volgende hoofdstuk bespreek ik, weliswaar in grote lijnen, maar toch zo volledig mogelijk, hoe het heelal volgens huidige inzichten in elkaar zit en hoe we denken dat dat allemaal ontstaan is. Tijdens de J.H. van Oosbreelezing in Amersfoort heb ik de documentaire *Cosmic Voyage* van Bayley Silleck en Morgan Freeman uit 1996 getoond. Deze film is gemaakt in opdracht van de Smithsonian Institution's National Air and Space Museum en is in 1997 genomineerd voor een Oscar Award in de categorie Best Documentary Short Subject.²³ Als u met de astronomie vertrouwd bent, kunt u verder gaan met hoofdstuk 5. U kunt naast de beschrijving in dit en het volgende hoofdstuk ook mijn recente lezing *Neem Nou het Heelal* gebruiken.²⁴

We gaan het hebben over relatieve schalen en afmetingen om daarmee te zien hoe de natuur in elkaar zit. Een fascinerend manier om dit te doen is met behulp van de methode in het bekende boek *The Powers of Ten* van Philip & Phyllis Morrison en the Charles and Ray Eames Offices (Morrison et al. 1977) and de bijbehorende film. Er zijn diverse online versies²⁵ beschikbaar. Het idee om schalen op deze wijze te illustreren komt oorspronkelijk van de Nederlandse civiel ingenieur en leraar Kees Boeke uit Bilthoven. Boeke was een onderwijsvernieuwer (en pacifist), die in 1952 het boekje *Wij in het Heelal, een Heelal in Ons* uitgaf. Het is met name bekend geworden in de Engelse uitgave (Boeke 1957), waarvan ik de omslag toon in fig. 10. Hierin begon hij met een plaatje van een meisje met een poes op schoot en hij ging vervolgens in stappen naar een volgende schaal van steeds een factor tien groter.

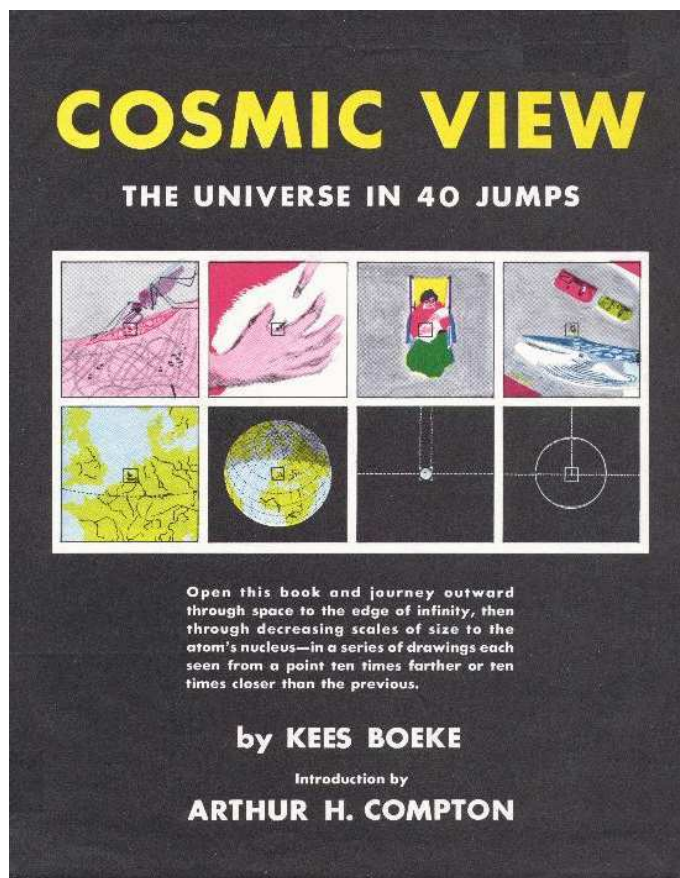
De eerste stappen in deze fascinerende publicatie zijn geïllustreerd in fig. 11. Linksboven is een gebied van 1.5 bij 1.5 meter. De tweede (rechts ernaast) is 15 bij 15 meter, enz. Zo ging hij door tot de grootste schalen in het heelal (groepen van melkwegstelsels). Vervolgens begon hij weer met hetzelfde plaatje van het meisje met de poes en ging dan omlaag in 14 stappen naar de kleinste schaal (in zijn geval de kern van een natrium-atoom). Het verhaal gaat dat Boeke de vergrotingen en verkleiningen uitvoerde op grote vellen tekenpapier op de vloer van de gymnastiekzaal van zijn school (de experimentele Werkplaats Kindergemeenschap) met een vernuftig instrument dat pantograaf heet. Ik heb zelf zo'n instrument ooit nog gebruikt (maar dan om het oppervlak binnen onregelmatige contouren te meten); tegenwoordig zie je pantografen natuurlijk niet meer, maar in de jaren vijftig zat er voor Boeke niet veel anders op.

Een heel bruikbare site voor een machten-van-tien-presentatie (die ik ook in lezingen heb gebruikt) is *From Quasars to Quarks* van Bruce Bryson (Bryson 2005). Op deze site staat ook

²³De film is uitgebracht op dvd en wordt verkocht door internet winkels als Amazon.com. Een complete Google Video .mp4 versie (voor iPod, PSP of MP4-speler, maar ook afspeelbaar op een laptop in de browser) is op het Web te vinden via video.google.com/videoplay?docid=5757507304603419799. Al deze versies zijn *niet* ondertiteld. Nederlandse ondertitels zijn op het Web te vinden via www.ondertitel.com/ondertitels/info/Imax-Cosmic-Voyage/2729.html.

²⁴De beamer-presentatie behorende bij die lezing is in L^AT_EX-beamer en is beschikbaar in pdf-format op mijn homepage met www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/Neemnou.pdf.

²⁵Een wellicht illegale versie met de originele figuren is te vinden op de Koreaanse site csaweb.yonsei.ac.kr/~rhee/2000/universe/power10.html



Figuur 10. Omslag van de Engelse versie (1957) van het boek van Kees Boeke, waarop de bekende *Machten van Tien* illustratie van schalen in de natuur is gebaseerd.

veel interessante en gedetailleerde informatie. Ik zal de figuren ook hier gebruiken en ze hieronder verzamelen op dezelfde manier als in fig. 11.

3.1. Naar de kleinere schalen van moleculen, atomen en quarks

We volgen de machten van tien eerst naar kleinere schalen. Bryson begint met een foto van waterlelies in een vijver (zie fig. 12) en daarop zit een wesp. De afmeting van de eerste foto correspondeert met 1 meter bij 1 meter. Na **3** stappen (afmeting 1 millimeter) zien we de facetten in het oog van het insect met daarop een stuifmeelkorrel (**4** stappen) en daarop een bacterie (**5** stappen). Na **6** stappen (1 micrometer) zien we op de bacterie een virus, dat zelf het beeld vult na **7** stappen.

Na **9** stappen (1 nanometer; het eerste plaatje van fig. 13) kunnen we de individuele atomen in het DNA van het virus onderscheiden. Bij de volgende stap zien we afmeting van de wolk van elektrisch negatief geladen electronen van een koolstof-atoom. Na **12** stappen (1 picometer) zijn we binnen de electronenwolk en zien we heel klein in het midden de atoomkern, die na **14** stappen het beeld vult. We zien dan dat de atoomkern uit deeltjes bestaat, die we elektrische positief geladen *protonen* en elektrisch neutrale *neutronen* noemen. Na **15** stappen (1 femtometer) zien we dat de protonen (en neutronen) uit drie kleinere deeltjes bestaan, de zgn. *quarks*. Die quarks worden door *gluonen* bij elkaar gehouden en de structuur die daarbij hoort is die na **17** stappen (10 attometer). We moeten ons beseffen dat de voorstelling van de electronenwolk en die van bolvormige protonen

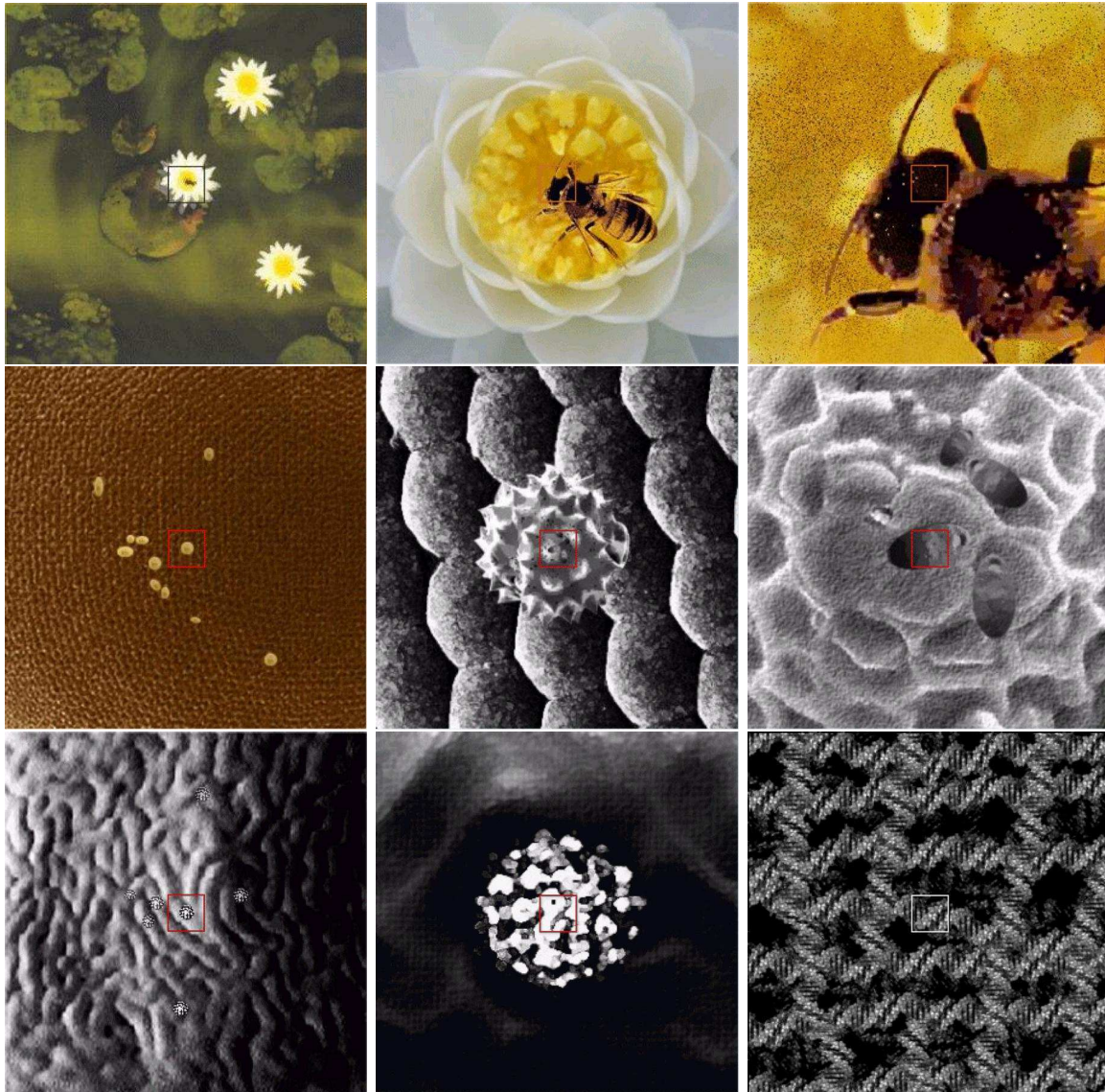


Figuur 11. De negen eerste plaatjes van Kees Boeke. Linksboven meet 1.5 bij 1.5 meter en de volgende worden telkens een factor tien groter, zodat rechtsonder 150,000 bij 150,000 kilometer beslaat. (credit: nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Boeke/frames.html)

en neutronen in een atoomkernen en van quarks en gluonen slechts illustratief is en vooral niet letterlijk genomen moet worden.

In deze tekst behandel ik enige malen onderwerpen in meer detail dan voor de loop van het betoog strikt noodzakelijk is. Deze zijn wellicht niet voor ieder te volgen. Maar ze zijn meestal niet essentieel voor de algehele lijn. Ik identificeer waar men in zo'n geval tekst kan overslaan en waar men dan de draad weer kan oppakken. Het onderstaande is het eerste voorbeeld van zo'n gedeelte en wie dit wil overslaan kan de draad weer oppakken bij het teken ♡ op pagina 22.

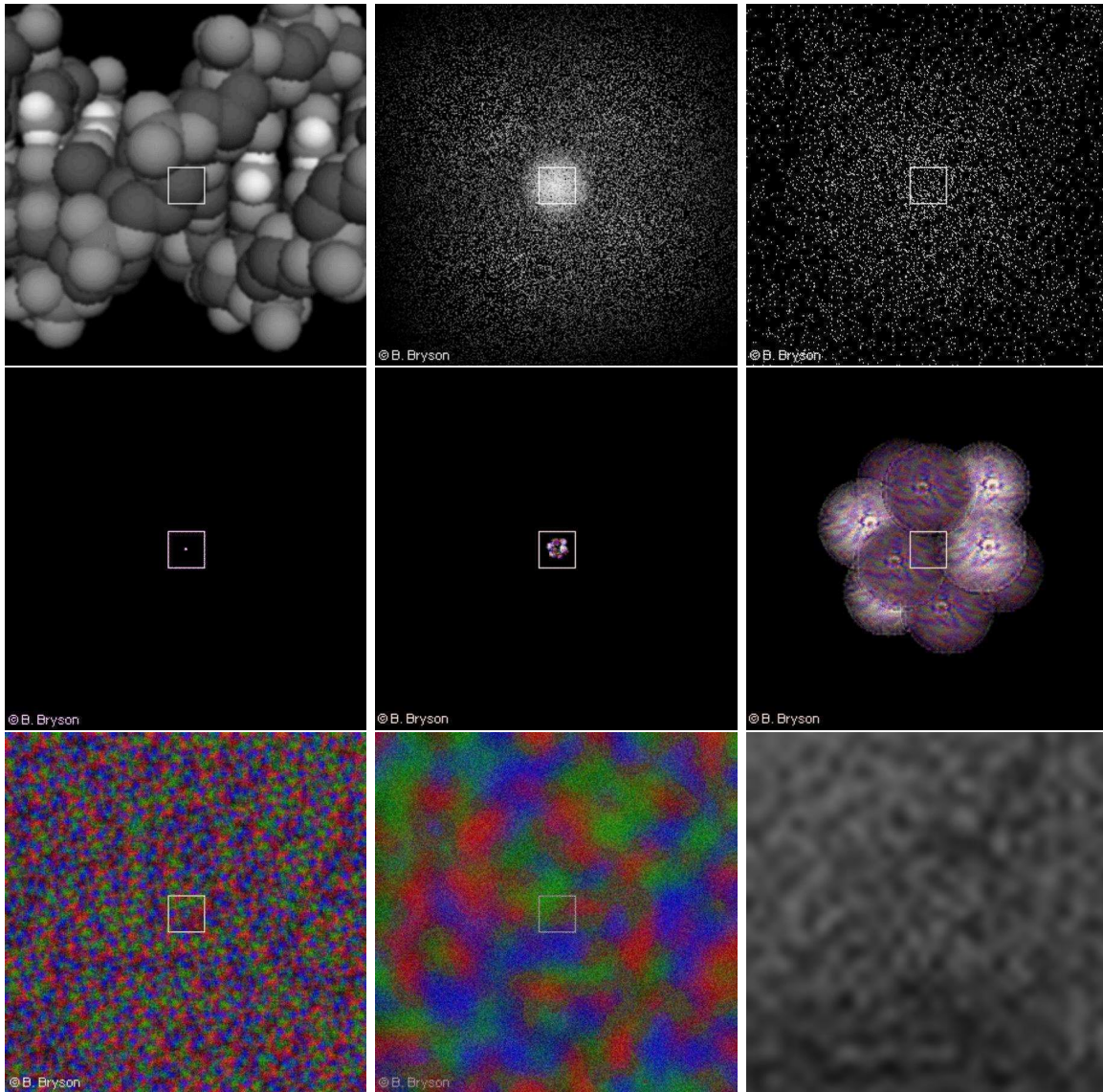
Het begrip van de natuur op het meest fundamentele niveau wordt thans beschreven met het zogenaamde 'Standaard Model'. In dit model bestaat de materie uit slechts vier verschillende deeltjes, onderverdeeld in twee quarks en twee leptonen. De leptonen zijn het electron (met een



Figuur 12. De machten van tien volgens Bryson (2005) van de schaal van 1 meter bij 1 meter tot die van 10 nanometer (10^{-8} meter). Het begint met een waterlelie met daarop een wesp. Op het oog daarvan ligt een stuifmeelkorrel met daarop een bacterie en weer daarop een virus. In het laatste plaatje zien we het DNA van het virus. (credit: Bruce Bryson; www.wordwizz.com/pwrsof10.htm)

electrische lading $-e$) en het neutrino (aangeduid met ν), dat geen electrische lading heeft en ook nagenoeg geen massa. Het neutrino beweegt daarom met bijna de lichtsnelheid en vertoont nauwelijks interactie met de rest van de materie. Er zijn twee quarks, ‘up’ met een electrische lading $+\frac{2}{3}e$ (dus in de eenheid van de lading van het electron e , maar dat wordt meestal weggelaten) en ‘down’ met lading $-\frac{1}{3}$. De benaming ‘up’ en ‘down’ heeft geen diepere betekenis; het is slechts om onderscheid te maken en een naam te geven.

Van alle deeltjes bestaan ook zogenaamde anti-deeltjes, die o.a. de tegengestelde electrische lading hebben (bijvoorbeeld een positron is het anti-deeltje van het electron en heeft een electrische lading $+e$). Drie quarks kunnen samen een proton (twee up en één down met dus een totale electrische lading $+e$) of een neutron (één up en twee down en geen electrische lading) vormen.



Figuur 13. De machten van tien volgens Bryson (2005) van de schaal van 1 nanometer (10^{-9} meter) tot die van 10 attometer (10^{-17} meter). We zien linksboven de atomen in een DNA molecuul, vervolgens de electronenwolk rond een koolstof-atoom daarin, dalen af naar de afmeting van de atoomkern en daarin uiteindelijk die van de quarks. (credit: see fig. 12)

Dit heten dan baryonen. Er zijn ook deeltjes (mesonen), die bestaan uit twee quarks (een gewoon quark en een anti-quark).

De vorming van deeltjes uit quarks wordt beschreven door de sterke wisselwerking middels uitwisseling van deeltjes die gluonen heten. Dit wordt beschreven door de quantumchromodynamica QCD. De term chromo (of kleur) komt van de beschrijving hoe quarks samen een deeltje kunnen vormen. Een proton en neutron bijvoorbeeld bestaan uit *drie* quarks. Vergelijk even met de elektrische krachten, waarbij een neutraal atoom uit *twee* delen met verschillende elektrische lading bestaat (die men om te onderscheiden, maar dat is eigenlijk volkomen willekeurig, '+' en '-' noemt). Bij de sterke wisselwerking zijn er drie verschillende 'ladingen' nodig en men neemt als aanduidingen dan de drie primaire kleuren (rood, groen en blauw) en noemt dat 'kleurladingen'. Drie quarks van verschillende kleurlading samen geven dan 'wit', net als bij elektrische krachten + en - samen

neutraal geven. Anti-quarks hebben dan de kleurladingen van de primaire anti-kleuren cyaan, geel en magenta; dus een quark en een anti-quark zijn ook weer samen ‘wit’.²⁶ Deze kleuren zijn dus geen gewone kleuren, maar dienen slechts als een conceptuele aanduiding.

Van die quarks en leptonen zijn er verder drie ‘generaties’, d.w.z. dezelfde soort deeltjes, maar dan zwaarder. Men vond deeltjes die niet pasten in het destijds geldende schema en noemde die ‘strange’. Later bleek het te associëren met een derde quark en al snel bleek er een vierde quark te bestaan, en omdat dat de symmetrie herstelde bedacht men er de naam ‘charm’ voor. Dus de tweede generatie heeft een ‘strange’ quark (lading $-\frac{1}{3}$) en een ‘charm’ quark (lading $+\frac{2}{3}$), en verder is er een muon (μ) (een soort zwaar electron dus) en een bijbehorend neutrino (ν_μ). Bij de derde generatie zijn er zo ‘top’ en ‘bottom’ (soms ook wel ‘truth’ en ‘beauty’ genoemd) quarks en is er het tau-deeltje (τ) en het tau-neutrino (ν_τ). Al die deeltjes zijn in experimenten met deeltjesversnellers vastgesteld en het is bewezen, dat er in de natuur slecht drie van die generaties zijn. De gewone materie bestaat alleen uit deeltjes uit de eerste generatie; de andere kunnen wel in hoog-energetische versnellers worden geproduceerd, alhoewel die niet lang leven. Deeltjes uit verschillende generaties kunnen ook samen andere deeltjes vormen, waardoor er in deeltjesversnellers een enorme verscheidenheid aan deeltjes waargenomen is.

De interactie tussen de quarks en de leptonen gaat via de zwakke wisselwerking en de electromagnetische wisselwerking. De deeltjes die uitgewisseld worden zijn fotonen als het om electromagnetisme gaat en de theorie daarbij heet quantumelectrodynamica of QED. Bij de zwakke wisselwerking kunnen ook elektrische ladingen worden uitgewisseld. Het gaat dan om drie deeltjes, die intermediaire vectorbosonen heten, en dat zijn de W^+ of W^- (met lading $+1$ of -1) of het elektrisch neutrale Z^0 . De electromagnetische en zwakke wisselwerkingen zijn samengebracht in de theorie van de electrozwakke wisselwerkingen.

Naast deze drie krachten is er de zwaartekracht, die beschreven wordt door de algemene relativiteitstheorie. Men speculeert, dat als die ondergebracht wordt samen met de andere wisselwerkingen in een enkele theorie, dat er dan ook sprake is van uitwisseling van een deeltje, dat men hypothetisch al het graviton heeft genoemd.

Het Standaard Model kent dus vier deeltjes (maar in drie generaties) en hun anti-deeltjes plus vier wisselwerkingen die door uitwisseling van vier soorten deeltjes worden overgebracht. De gewone materie bestaat uit de vier deeltjes in de eerste generatie: het up en down quark, het electron en het electron-neutrino. De andere deeltjes (en alle anti-deeltjes) komen op aarde alleen voor bij kernreacties in deeltjesversnellers.



De materie om ons heen bestaat uit atomen. In de atoomkern komen positief geladen protonen en elektrisch neutrale neutronen voor (dat ze uit quarks bestaan is hier niet belangrijk). De kern wordt bij elkaar gehouden door de sterke wisselwerking tussen quarks, maar het is mogelijk het eenvoudig voor te stellen alsof de neutronen de protonen, die omdat ze dezelfde (positieve) elektrische lading hebben elkaar afstoten, in de atoomkern bij elkaar houden. Rond de kern is een wolk van veel kleinere en lichtere electronen, die dezelfde waarde van elektrische lading hebben als protonen, maar dan negatief. Er bestaan ook neutrino’s, die geen lading en bijna geen massa hebben.

Er zijn in de natuur slechts een beperkt aantal soorten atomen of chemische elementen. Ze zijn te rangschikken in het zogenaamde periodiek systeem, ontdekt door Ivanovich Mendeleev in 1869 (fig. 14). Welk chemisch element een atoom is hangt af van het aantal protonen, dat het bevat. Is er 1 proton dan hebben we waterstof (aangeduid als H; zie linksboven in fig. 14); maar

²⁶In een televisie scherm bestaat elk beeld-elementje of pixel uit drie lichtgevende puntjes met de drie primaire kleuren rood, groen en blauw. Zijn ze alle drie even helder, dan zie je wit. Men noemt dit additieve (optellende) kleurmenging. Kijk je naar een schilderij dan neemt de verf juist licht weg uit het erop vallende witte licht. Bij deze subtractieve kleurmenging spelen dus de primaire anti-kleuren een rol. Vandaar dat men bijvoorbeeld in de schilderkunst rood, geel en blauw als primaire kleuren neemt. Fysisch gezien moeten rood en blauw dus eigenlijk magenta en cyaan zijn.

	1																	18	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43) Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57-71 Lan	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Act	(104) Rf	(105) Db	(106) Sg	(107) Bh	(108) Hs	(109) Mt	(110) Ds	(111) Rg	(112) Uub	(113) Uut	(114) Uuq	(115) Uup	(116) Uuh	(117) Uus	(118) Uuo	
Lanthaniden	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61) Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
Actiniden	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93) Np	(94) Pu	(95) Am	(96) Cm	(97) Bk	(98) Cf	(99) Es	(100) Fm	(101) Md	(102) No	(103) Lr				

Chemische reeksen van het Periodiek Systeem

Alkalimetalen	Aardalkalimetalen	Overgangsmetalen	Hoofdgroepmetalen	Metalloïden
Niet-metalen	Halogenen	Edelgassen	Lanthaniden	Actiniden

Figuur 14. Het periodiek systeem der chemische elementen. Het getal in elk vakje geeft het aantal protonen aan. Elementen in dezelfde verticale kolom hebben vergelijkbare chemische eigenschappen. (credit: nl.wikipedia.org/wiki/Periodiek_systeem)

waterstof kan ook voorkomen als 1 proton met 1 neutron en dan heet het zware waterstof. Die twee vormen worden aangeduid als ^1H en ^2H . Twee protonen wordt helium (He, rechtsboven in fig. 14). Men spreekt dan van helium-3 of ^3He (2 protonen en 1 neutron), dat heel weinig voorkomt, en helium-4 of ^4He (2 protonen en 2 neutronen). Voor elk element komen er in de natuur atomen voor met verschillende aantallen neutronen. Men noemt dat isotopen en die gedragen zich in chemisch opzicht op precies dezelfde wijze. Belangrijk voor leven zijn koolstof (aangeduid met C; 6 protonen en in het meest voorkomende isotoop met ook 6 neutronen), stikstof (N; 7 protonen en meestal ook 7 neutronen) en zuurstof (O; 8 protonen en meestal ook 8 neutronen). Maar ook metalen als aluminium (Al), ijzer (Fe), lood (Pb), zilver (Ag), goud (Au), kwik (Hg), enz. zijn elementen en die zijn ook terug te vinden in fig. 14.

Eigenlijk zijn de elementen zwaarder dan bismuth (Bi; 83 protonen) al niet stabiel meer; ze vallen uiteen op kortere of langere tijdschalen. Het zwaarste element in de natuur is uranium (U); dit heeft 92 protonen en tussen de 141 en 146 neutronen. In de natuur is meer dan 99% in de vorm van uranium-338 (^{338}U) met 146 neutronen, maar ^{235}U met 143 neutronen komt ook voor en dat isotoop is juist van belang voor kerncentrales. Het duurt gemiddeld bij een ^{238}U atoom 4.5 miljard jaar voor dat het uiteen valt; omdat van een zekere hoeveelheid van zulke atomen er dus na die tijd de helft over is, noemt men dit de halfwaardetijd. Voor uranium-238 is dat net zolang als de leeftijd van de aarde; dus van het uranium, dat bestond toen de aarde werd gevormd, bestaat

Tabel 1. Relatief voorkomen (in procenten gewicht) van chemische elementen in de zon, de aardkorst, oceanen, atmosfeer en in ons lichaam.

element		#	zon	aardkorst	oceanen	atmosfeer	mens
waterstof	H	1	73.9	0.14	10.8	10.1	9.5
helium	He	2	24.0	0.000	0.000	0.000	0.000
koolstof	C	6	0.46	0.02	0.003	18.0	18.5
stikstof	N	7	0.10	0.002	0.000	2.9	3.3
zuurstof	O	8	1.07	46.1	85.4	65.1	65.0
neon	Ne	10	0.13	0.000	0.000	0.000	0.000
magnesium	Mg	12	0.06	2.3	0.13	0.05	0.05
silicium	Si	14	0.07	28.2	0.000	0.000	0.002
zwavel	S	16	0.04	0.04	0.09	0.2	0.25
calcium	Ca	20	0.004	4.1	0.04	1.5	1.5
ijzer	Fe	26	0.11	5.6	0.05	0.000	0.006
rest			0.06	13.4	3.5	2.2	1.9

ongeveer de helft nog.²⁷ Zwaardere elementen bestaan en zijn ook in deeltjesversnellers gemaakt door atomen met grote snelheid op elkaar te laten botsen, maar die zijn niet stabiel; de neutronen kunnen de protonen niet bij elkaar houden en de atomen vallen uiteen: ze worden radio-actief.

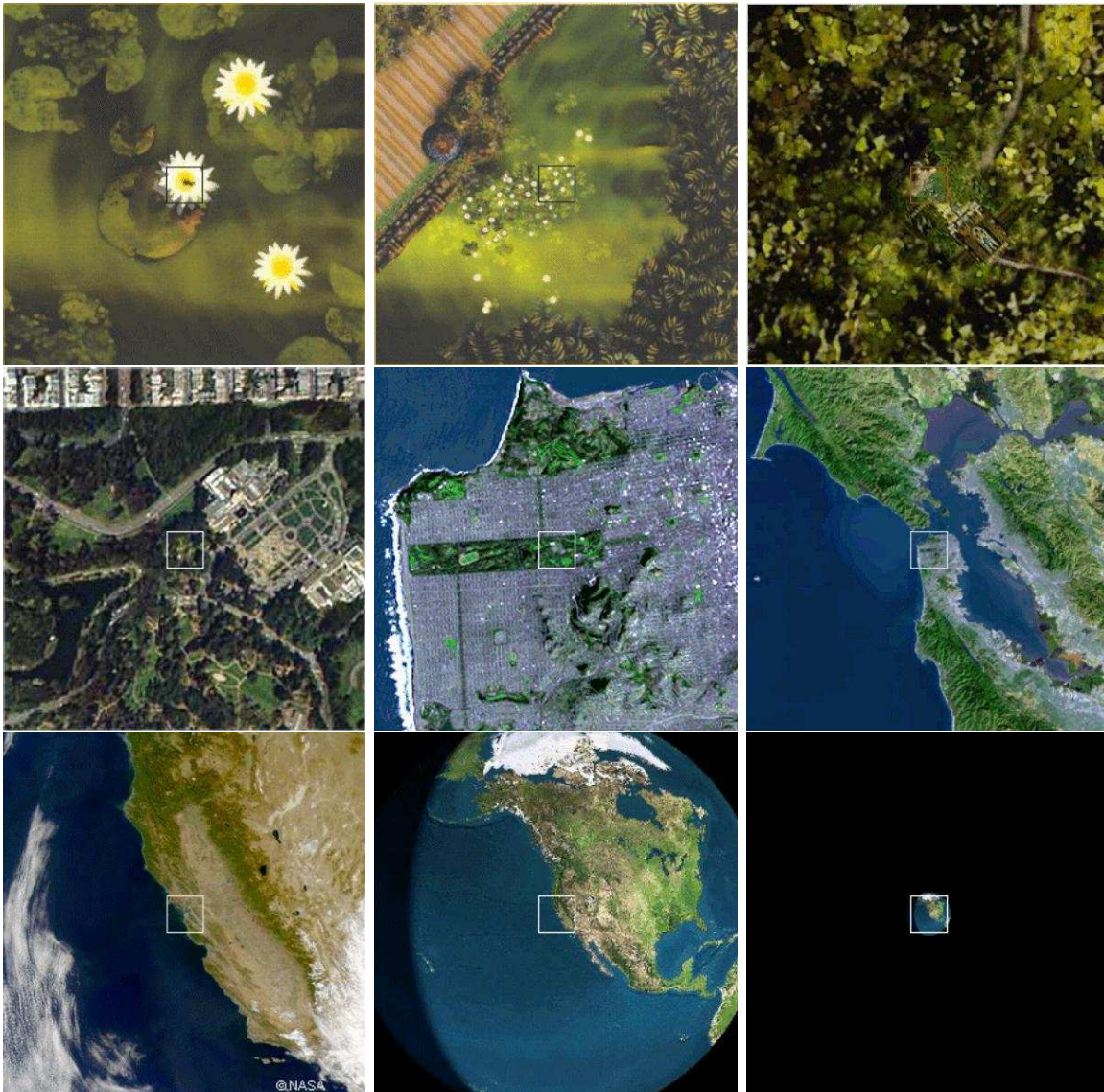
In energetische deeltjesversnellers zijn vele atoomkernen zwaarder dan uranium gemaakt, maar die blijven maar heel kort bestaan. De zwaarste is naar mijn weten van element 118, dat voorlopig Ununoctium wordt genoemd; ²⁹⁴Uuo heeft een halfwaardetijd van ~ 0.89 milliseconde.

Atomen kunnen moleculen vormen; dat doen ze door electronen in de buitenkanten van hun electronenschillen te delen. Electronen zijn geordend rond het atoom in schillen en de atomen streven ernaar precies gevulde schillen te hebben. Bijvoorbeeld heeft natrium (Na; 11 protonen) een binnenste volle schil met 2 electronen, een volgende (eveneens) volle schil met 8 electronen en dan 1 enkel electron in een derde schil. Chloor (Cl; 17 protonen) heeft 7 electronen in die derde schil en dat is juist 1 minder dan gevuld. Dus neemt het chloor-atoom het buitenste electron van het natrium over en beiden hebben dan effectief precies gevulde schillen. Alleen is natrium dan elektrisch positief en chloor negatief en dus trekken ze elkaar aan. Dan krijgen we een molecuul, in dat geval van keukenzout of natriumchloride (NaCl). Op dezelfde manier neemt zuurstof (2 electronen te kort in de tweede schil) electronen over van twee waterstof-atomen en dan krijgen we water (H₂O). Dit verschijnsel heet chemische bindingen tussen atomen. Er kunnen heel ingewikkelde moleculen ontstaan tot DNA met vele duizenden atomen.

We keren terug naar het periodiek systeem in fig. 14. De horizontale rijen corresponderen met de schillen in de electronenwolken. Elementen boven elkaar hebben vaak vergelijkbare chemische eigenschappen, zoals bijvoorbeeld koolstof (C) en silicium (Si) of zuurstof (O) en zwavel (S).²⁸ De meest rechtse elementen hebben precies gevulde schillen en kunnen dus geen moleculen vormen of chemische reacties aangaan. Dit heten de 'edelgassen', waarvan helium (He) de lichtste is, maar waartoe o.a. ook neon (Ne) en argon (Ar) behoren. Dit is een opmerkelijke 'verspilling' in de natuur; een kwart of zo van de materie in het heelal (helium; zie onder) is in de vorm van atomen, die helemaal geen scheikundige verbindingen aan kunnen gaan en volkomen inactief zijn.

²⁷Eigenlijk is plutonium het zwaarste natuurlijke element. Het komt in extreem kleine concentraties voor (met name in uranium-erts); het minst instabiele isotoop ²⁴⁴Pu heeft namelijk een halfwaardetijd van 80 miljoen jaar.

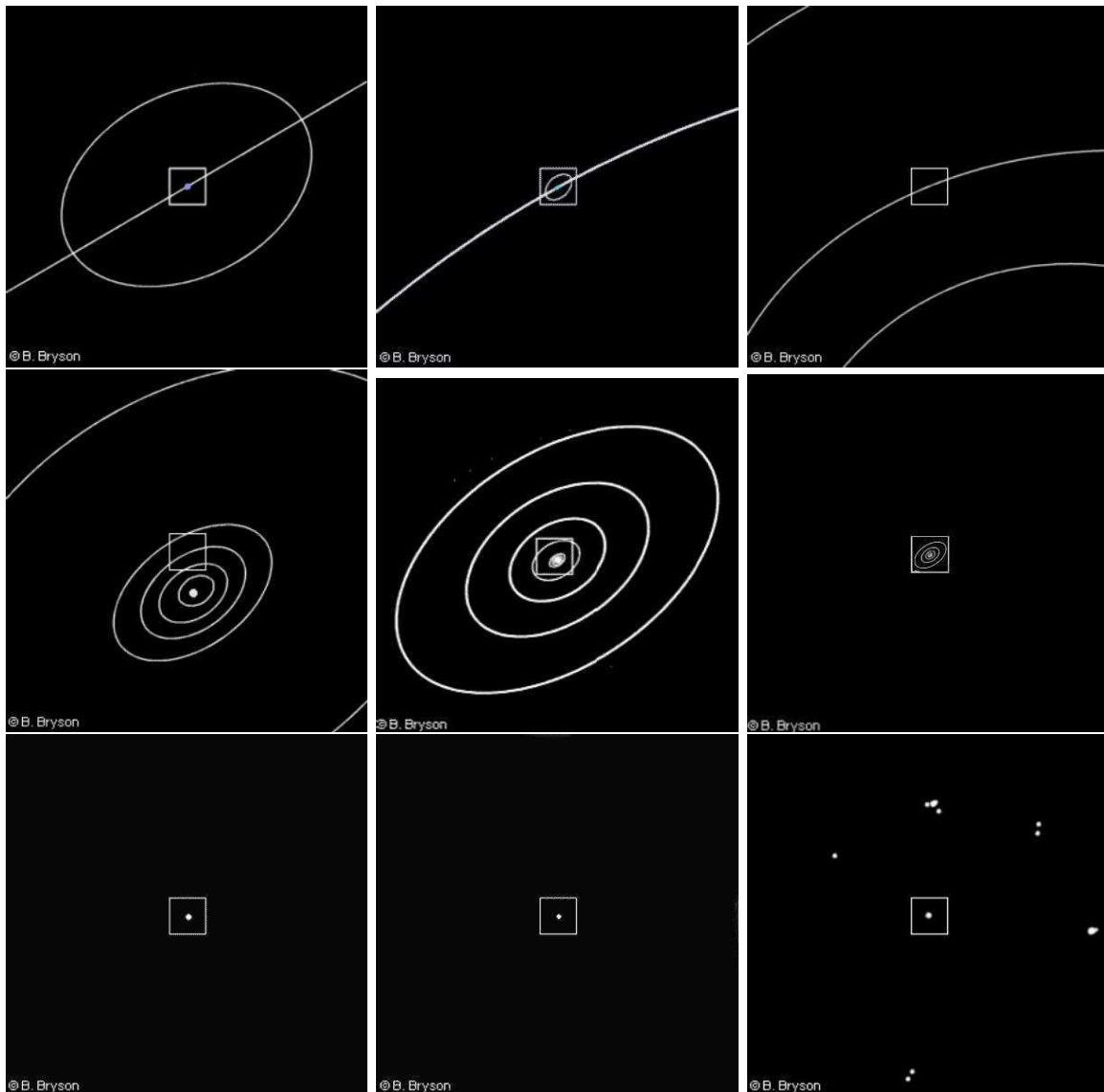
²⁸Zuurstof en zwavel kunnen bijvoorbeeld beide op dezelfde manier chemische verbindingen aangaan met waterstof; dan resulteert respectievelijk water (H₂O) en het bij rottende eieren vrijkomende zwavelwaterstof (H₂S).



Figuur 15. De machten van tien volgens Bryson (2005) van de schaal van 1 meter bij 1 meter tot die van 100,000 kilometer (10^8 meter). We zien de lelie in een vijver in het Golden Gate Park in San Francisco en uiteindelijk de aarde. (credit: see fig. 12)

Atomen en moleculen zijn dus heel klein, maar ook omvangrijk in aantal. Dat wordt uitgedrukt in het getal van Avogadro. Men spreekt van een ‘grammolecuul’ (of gram-atoom) en dat is (ruwweg) van een stof evenveel gram als er protonen plus neutronen zitten in een enkel molecuul of atoom. Dus voor water is het 18 gram (twee keer waterstof is 2 protonen en zuurstof heeft 8 protonen plus 8 neutronen), enz. Het getal van Avogadro is 6.022142×10^{23} , d.w.z. een 6 met nog 23 cijfers voor de komma. Een manier om dit ‘voor te stellen’ is de volgende: Nederland heeft een oppervlak van 41.528 km^2 ; als je dit zou bedekken met evenveel zandkorrels als het getal van Avogadro en als die korrels een diameter zouden hebben van 0.25 mm (en dat is behoorlijk fijn zand) dan zou je een laag met een dikte van zo’n 200 meter nodig hebben.

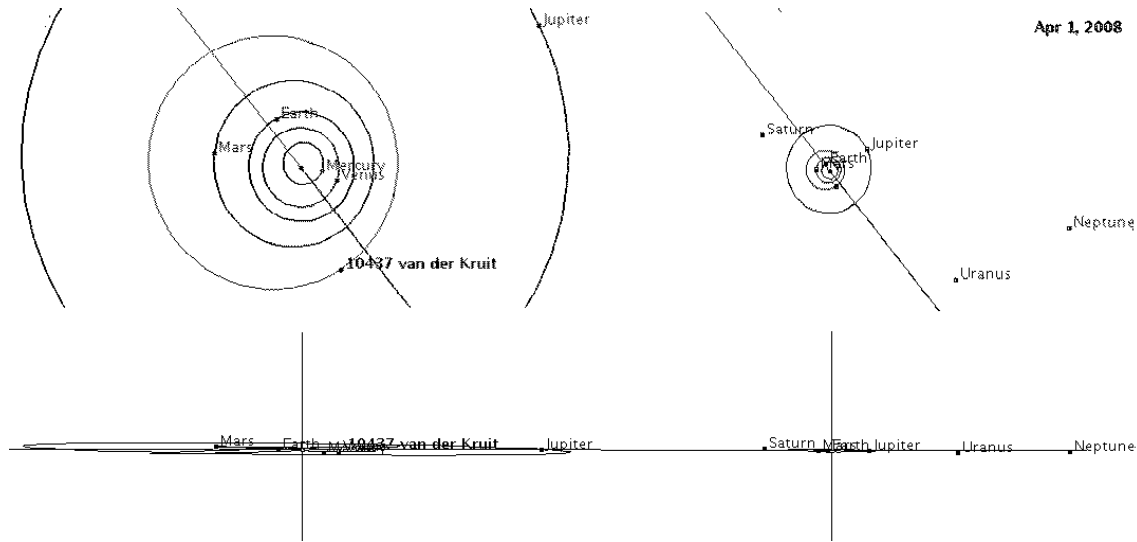
Er is nog iets heel vreemds, maar ook belangrijks, met chemische elementen. Overal in sterren en het gas tussen de sterren in het heelal komen de elementen en hun isotopen relatief in



Figuur 16. De machten van tien volgens Bryson (2005) van de schaal van een miljoen kilometer (10^9 meter) tot die van 100 biljard kilometer (10^{17} meter). Het is beter dit uit te drukken in lichtjaren en de laatste schaal is dan ongeveer 10 lichtjaar. Ik heb uit de plaatjes van het zonnestelsel de baan van Pluto verwijderd. (credit: see fig. 12)

(ongeveer) dezelfde verhouding voor, behalve voor de lichtste elementen. Ongeveer driekwart is waterstof en bijna één kwart helium en overall is 0.00000001% in het derde element lithium, altijd in deze verhouding. Dit is een overblijfsel van de Big Bang, het begin van het heelal. In onze zon is verder ongeveer 2% in de vorm van andere elementen, maar dat is minder in vele sterren en soms ook wel meer. Maar het werkwaardige is dat onafhankelijk van de totale hoeveelheid zwaardere elementen al die elementen en hun isotopen weer in dezelfde verhouding voorkomen.²⁹ Van die 2%

²⁹Op aarde is 'differentiatie' geweest en daarom is de chemische samenstelling anders geworden. Bijvoorbeeld veel waterstof en al het oorspronkelijke helium waren al verdwenen uit dat deel van het vroege zonnestelsel, waar de aarde uit is ontstaan, door de werking van het zonlicht. Waterstof bleef nog wel over in scheikundige verbindingen, maar



Figuur 17. Het planetenstelsel, links tot en met de baan van Jupiter (inclusief de planetoïde ‘van der Kruit’, die niet meer dan zo’n 5 km in diameter is), en rechts tot en met Neptunus. De bovenste plaatjes zijn recht ‘van boven’ en we zien dat de banen ellipsen zijn die weinig afwijken van cirkels (ook voor Saturnus, Uranus en Neptunus, waarvan de banen niet getekend zijn). Onder zien we het planetenstelsel van opzij. De planeten liggen bijna precies in één vlak. Boven is de schuine lijn de richting aarde-zon op 21 maart en een half jaar later; onder loodrecht op het vlak van de aardbaan. De planeetposities zijn voor 1 april 2008 en deze figuur is geproduceerd met de site neo.jpl.nasa.gov/orbits/.

in de zon is het merendeel koolstof en zuurstof, juist de elementen waaruit ons lichaam en DNA voornamelijk bestaat (zie tabel 1). We zien in die tabel ook, dat er een enorme differentiatie heeft plaatsgevonden op de aarde naar aardkorst, atmosfeer en oceanen. Maar de mens en de atmosfeer zijn heel goed te vergelijken.

Wat zijn de belangrijkste punten uit het bovenstaande?

- Materie bestaat uit atomen en die kunnen moleculen vormen.
- Atomen zijn heel klein en er zijn er dus ongelooflijk veel.
- Wij bestaan uit moleculen en die weer uit atomen en wel vooral waterstof, koolstof en zuurstof.
- Het heelal bestaat bijna uitsluitend uit waterstof en helium in een verhouding van ongeveer 3 op 1. De overige chemische elementen vormen samen hooguit een paar procent van de materie (2% in het gas waaruit de zon en de planeten ontstonden), maar komen daarbinnen overal (in en tussen de sterren) in ongeveer dezelfde onderlinge verhoudingen voor.

3.2. Naar de grotere schalen van sterren, melkwegstelsels en het heelal

We gaan nu naar grotere schalen dan ons dagelijks leven en gaan terug naar de lelies in de vijver van Bruce Bryson en hun eigen vierkante meter (zie fig. 15). Na de eerst stappen blijkt deze vijver te liggen in het Golden Gate Park in San Francisco. Dat zien we na **3** stappen als we een gebied van 1 kilometer zien. Nog **3** stappen verder en we zien op een schaal van 1000 km continenten. De gehele aarde is in beeld na **7** stappen.

helium kan dat niet. En zelfs als er al (vrije) waterstof en helium waren overgebeleven in de atmosfeer van de jonge aarde, dan zou dat door het zonlicht zeker verdampt zijn. Het helium waar we over beschikken is niet een overblijfsel van de Big Bang, maar ontstaat bij radio-actief verval als er alfa-deeltjes (dat zijn helium-kernen) vrijkomen bij het uiteenvallen van zware, instabiele atoomkernen.



Figuur 18. De machten van tien volgens Bryson (2005) van de schaal van ongeveer 100 lichtjaar (10^{18} meter) tot die van ongeveer een miljard lichtjaar (10^{25} meter). We zien dat we in een melkwegstelsel leven en dat het heelal vol met zulke stelsels is. Melkwegstelsels hebben afmetingen van tienduizenden tot honderdduizend lichtjaar en onderlinge afstanden van miljoenen lichtjaren. Ze groeperen zich in groepen en clusters en die weer in superclusters, filamenten, enz. met grote lege ruimten daartussen (voids). De laatste schaal is over een afstand waarover het licht ongeveer een tiende van de leeftijd van het heelal doet. Tot op deze schaal is er structuur in het heelal. (credit: see fig. 12)

Als we verder gaan en op **9** stappen zijn aangekomen (miljoen kilometer) dan zien we de baan van de maan (zie eerste plaatje van fig. 16), maar de aarde en maan zelf zijn al te klein geworden om nog gezien te kunnen worden. Na **12** stappen (dus een schaal van een miljard kilometer) zien we ook de zon, de baan van de aarde eromheen (en die van Mercurius, Venus en Mars) en past de baan van de grootste planeet Jupiter er net in (zie ook fig. 17, links). Tussen Mars en Jupiter ligt een ‘gordel’ van brokstukken van een planeet, die door de getijdenwerking van de zwaartekracht van Jupiter uiteengetrokken is. Van deze planetoiden (of asteroiden) zijn de grootsten nog enkele



Figuur 19. Het dichtstbijzijnde melkwegstelsel, de Andromedanevel, met twee begeleiders. De nevel staat op een afstand van ongeveer 2 miljoen lichtjaar. Deze foto was Astronomy Picture of the Day op 26 november 2006. (antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap061126.html; credit: Robert Gendler, robgendlerastropixs.com.)

honderden km in diameter, maar er zijn vele kleinere.³⁰ Nog een stap (dus **13** bij elkaar) en we zien

³⁰De International Astronomical Union, I.A.U., heeft in 2001 één daarvan ‘van der Kruit’ genoemd. De toenmalige rector magnificus van de Groningse universiteit, Doeko Bosscher, hoogleraar eigentijdse geschiedenis, stuurde mij een felicitatie email. Ik was in Australië en was nog niet op de hoogte van de vernoeming. Hij vroeg me vervolgens om aan te geven, wat ik zou opnemen in een grondwet voor ‘van der Kruit’. Ik emailde terug dat ik niet van plan was een grondwet te schrijven: “... *maar als ik het zou doen, dan zou ik erin vastleggen dat, omdat wetenschap er een integraal deel van is, het woord cultuur niet exclusief geclaimd mag worden voor kunst. Dus een ouderwets ministerie van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen en niks OCW, zoals we nu hebben. Mag ook een ministerie van onderwijs en cultuur zijn, want iedereen weet dan dat wetenschap daarbij inbegrepen is. Ook mag op van der Kruit een krant als NRC-Handelsblad dan niet meer een cultureel supplement onder die naam uitbrengen als er daarnaast ook boeken-*

het planetenstelsel met de banen van Saturnus en Uranus en van de buitenste planeet Neptunus (als rechts in fig. 17).³¹

Als we verder naar grotere schalen gaan, zien we eigenlijk alleen maar leegte. Op schalen van **15** stappen (biljoen kilometer; het een-na-laatste plaatje van fig. 16) zien we nog steeds niets meer dan lege ruimte, terwijl ons zonnestelsel ingekrompen is tot een puntje. Bij **16** stappen wordt het zinvol een andere maat te nemen dan de kilometer. Dat is het *lichtjaar*. Dat is de afstand die het licht aflegt in een jaar. Het licht gaat 300.000 km per seconde (vergelijkbaar met $7\frac{1}{2}$ keer per seconde rond de aarde) en een jaar heeft ruim 31 miljoen seconden. Een lichtjaar is 9.5 biljoen (9.5×10^{12}) kilometer. De eerste nabije sterren zien we dan na **17** stappen (enkele lichtjaren) (zie eerste plaatje van fig. 18) en na **18** stappen (~ 100 lichtjaar) zien we dat de ruimte gevuld is met vele sterren op onderlinge afstanden van de orde van lichtjaren.

Na **21** stappen (honderdduizenden lichtjaren) zien we dat we in een Melkwegstelsel leven, dat overigens zelf weer biljoenen sterren bevat, waarvan de zon er één is. Een nabij voorbeeld van een melkwegstelsel is de ‘buur’ van ons Melkwegstelsel, die er veel op lijkt en die de Andromedanevel wordt genoemd (zie fig. 19)³². Na **24** stappen zijn we op schalen van honderden miljoenen lichtjaren en zien we dat het heelal gevuld is met melkwegstelsels als het onze, die concentraties vormen, die we clusters noemen. Die melkwegstelsels bewegen systematisch van elkaar af. Hoe verder weg ze staan, hoe sneller ze zich van ons verwijderen. De Amerikaanse astronoom Edwin Hubble heeft dit in de jaren twintig (van de vorige eeuw) ontdekt. Dat heet het uitdijend heelal. Vanuit elk ander melkwegstelsel lijkt het precies zo. De expansie is zodanig dat alles ruim 10 miljard jaar geleden bij elkaar was. Dat wordt geïdentificeerd met het begin van het heelal; men noemt dat de Big Bang of Oerknal en die is inmiddels nauwkeurig gedateerd op 13.7 miljard jaar geleden.

Wat zijn de belangrijkste punten uit het bovenstaande?

- We wonen op een planeet, die aarde heet.
- De aarde gaat rond de zon samen met 7 andere planeten en dat zonnestelsel is ongeveer 4.5 miljard jaar oud.
- De zon is een gewone ster en sterren staan op afstanden van lichtjaren van elkaar.
- Sterren zijn deel van ons Melkwegstelsel; het is tienduizenden lichtjaren in doorsnede en er zijn wel 10^{12} (miljoen maal miljoen) sterren in dat stelsel.
- In het waarneembare heelal zijn minstens net zoveel melkwegstelsels.
- Het heelal dijt uit en er is een begin geweest, gedateerd op 13.7 miljard jaar geleden, dat de Big Bang genoemd wordt.

en wetenschapsbijlagen zijn. Alle cultuur in een enkele bijlage, eventueel met diverse onderdelen. Verder zou ik voorschrijven, dat de kampioenschappen langebaan-schaatsen om en om linksom en rechtsom zullen gaan. Omdat het 2.37 keer zover van de zon altijd koud is worden die kampioenschappen zeven keer per van der Kruit-jaar (3.65 aardse jaren) gehouden en eens per jaar zijn er Olympische Spelen, die met één van die kampioenschappen samenvallen. Komt mooi uit, dan rijden ze de Olympische wedstrijden ook om en om in tegenovergestelde richting.” Hij heeft hieruit uitgebreid geput bij de rectorale rede bij de opening van het academisch jaar in september 2001.

³¹Tijdens de algemene vergadering van de I.A.U. in 2006 in Praag is Pluto ‘afgevoerd’ als reguliere planeet. Ik heb destijds voor de betreffende resolutie gestemd. De baan van Pluto past niet bij die van de andere planeten, die vrijwel cirkelvormig zijn en allemaal bijna precies in hetzelfde vlak liggen, terwijl die van Pluto langerekter is en in een volkomen ander vlak ligt. Het betreffende persbericht van de I.A.U. is te vinden op www.iau.org/public_press/news/release/iau0603/. Pluto blijkt nu een eerste voorbeeld te zijn van een grote zwerm planeetachtige lichamen in een schil aan de buitenzijde van ons zonnestelsel. Inmiddels heeft de I.A.U. daarvoor de naam *Plutoïden* aangenomen; zie www.iau.org/public_press/news/release/iau0804/. Het heeft nogal wat stof op doen waaien in Praag, waar sommige Amerikanen heftig protesteerden tegen het wegnemen van de planeet-status van de enige in de V.S. ontdekte planeet. Inmiddels heeft de Amerikaanse staat New Mexico, waar de ontdekker van Pluto, Clyde Tombaugh, jaren in Las Cruces heeft gewoond, een wet aangenomen waarbij Pluto in New Mexico weer planeet is en de dag van het wereldkundig maken van de ontdekking in 1930 (13 maart) wordt uitgeroepen tot ‘Pluto Planet Day’.

³²Deze foto is een voorbeeld van een zogenaamde ‘Astronomy Picture of the Day’; de site van ‘APOD’ (onderhouden door NASA) op antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ wordt elke dag een astronomische foto getoond met uitleg.

4. De geschiedenis van het heelal

*We find that we live on an insignificant planet of a humdrum star
lost in a galaxy tucked away in some forgotten corner of the universe
in which there are far more galaxies than people.*
Carl Sagan

We zijn nu gereisd naar steeds grotere afstand. Maar dat is ook terug in de tijd. Tijd is overigens een merkwaardig iets, waarover je veel kunt zeggen (van der Kruit 2000). Het heeft kennelijk een begin gehad en je kunt niets zeggen over wat er ‘voor’ de Big Bang was. Het heeft ook een richting; er is verschil tussen verleden en toekomst. En dit fundamentele verschil zit *niet* in fundamentele wetten als de zwaartekracht. Je kunt de tijd in gedachten omdraaien en het zonnestelsel dat je dan krijgt is helemaal in overeenstemming met de zwaartekrachttheorie van Newton of de algemene relativiteitstheorie van Einstein. Maar op het niveau van moleculen van een gas geldt wel, dat ze zich altijd vanuit een concentratie verspreiden over de ruimte en niet andersom. Een hete kop thee neemt de temperatuur van de omgeving aan, maar een koude kop thee wordt niet spontaan warmer dan de omringende lucht. De tijd heeft geen einde; we zullen hieronder zien, dat de expansie van het heelal nooit zal ophouden. We kunnen terugkijken (maar niet terugreizen) in de tijd en tijd beleef je relatief.

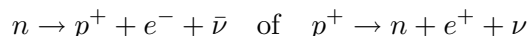
4.1. Het vroege heelal

De studie van de geschiedenis en de beschrijving van de structuur van het heelal op grote schaal wordt de *kosmologie* genoemd. Het is tegenwoordig een actief raakvlak tussen natuur- en sterrenkunde geworden, omdat veel over de fundamentele van de natuur bestudeerd kan worden door naar het heelal op grote schaal te kijken en de vroege fasen te bestuderen.

Het heelal is 13.7 miljard jaar oud en is begonnen als een explosie vanuit een onmeetbaar klein volume. Men neemt aan dat in de eerste 10^{-33} seconde (d.w.z. eerst 32 nullen na de komma) er een enorm snelle expansie is geweest die inflatie wordt genoemd en waarbij het heelal tot op grote nauwkeurigheid uniform is geworden, zodat het ook nu nog er in alle richtingen in grote lijnen hetzelfde uitziet. Toen dit was uitgewerkt bleef het expanderende heelal over. Maar het was toen veel heter dan nu (d.w.z. de bewegingen waren veel sneller en het stralingsveld van licht en andere elektromagnetische straling was veel energetischer).³³ Heel kort na deze Big Bang of Oerknal was het heelal zo heet, dat er alleen de meest fundamentele elementaire deeltjes waren, de quarks en leptonen. Wel vormden uit de quarks na enige tijd protonen en neutronen, maar het bestaan van atomen of atoomkernen was nog niet mogelijk. Deeltjes botsten door de grote dichtheid frequent en daarbij met zeer hoge energie. Pas na *3 minuten* ontstonden atoomkernen door het samensmelten van protonen en neutronen, maar daarbij vormden effectief alleen waterstof en helium.³⁴

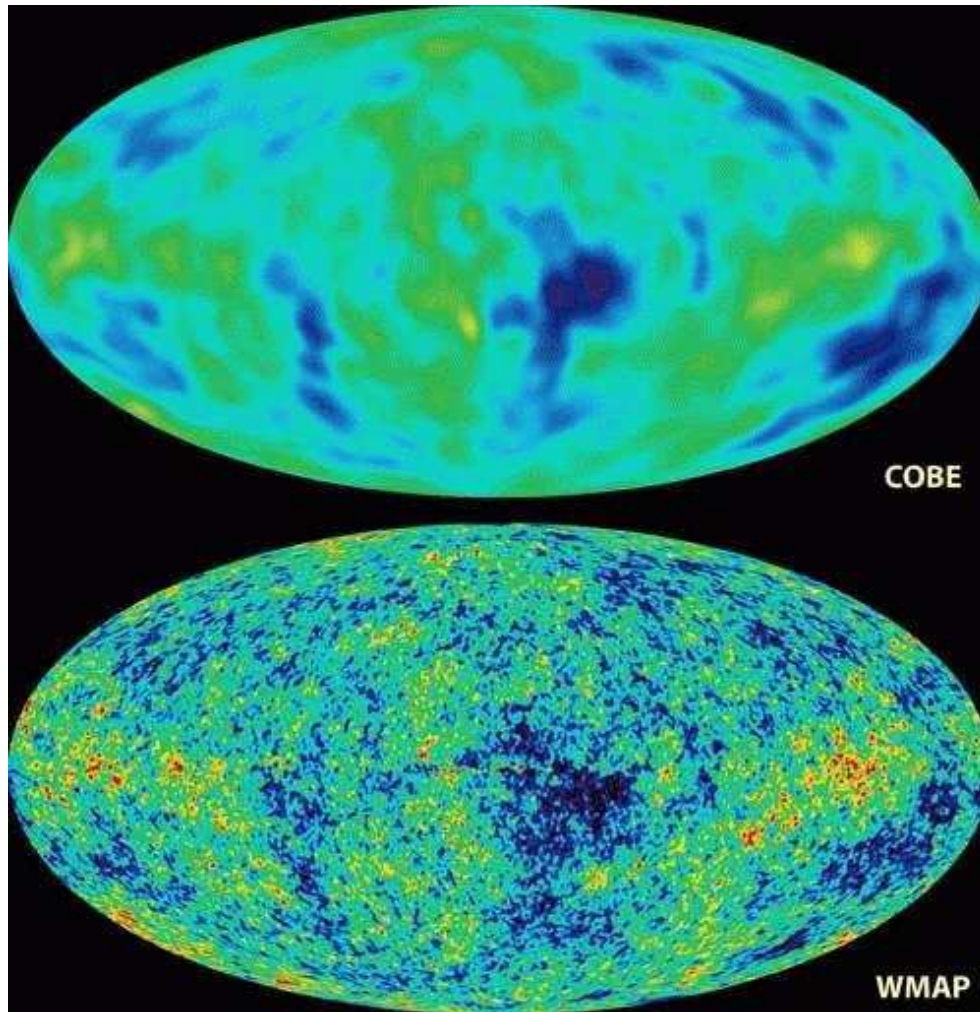
De reden dat het niet verder ging ligt hierin. Als ${}^4\text{He}$ een proton of neutron invangt ontstaat ${}^5\text{He}$ of ${}^5\text{Li}$, maar dat is allebei heel instabiel. Als twee ${}^4\text{He}$ kernen samengaan, ontstaat ${}^8\text{Be}$ en dat is ook heel instabiel. In de natuur bestaan geen stabiele atoomkernen die samen 5 of 8 protonen en neutronen hebben. In de praktijk vormt er een zeer minieme fractie ${}^7\text{Li}$, maar verder niet. Het blijkt dat alle andere chemische elementen later gevormd zijn in sterren.

De zwakke wisselwerking beschrijft hoe protonen, neutronen en elektronen energie en lading kunnen uitwisselen. Een neutron kan daardoor een proton worden door uitzending van een elektron en een neutrino, of omgekeerd (het is dan een positief geladen electron, dat positron wordt genoemd):



³³We weten dat als een gas uitzet, het afkoelt. Dat gebruiken we in koelkasten met gassen die dat heel effectief kunnen, zoals de cfk's die nu vanwege het ozongat verboden zijn. Op dezelfde wijze is het heelal in de loop der tijd koeler geworden en doet dat nog steeds, als direkt gevolg van de uitzijing.

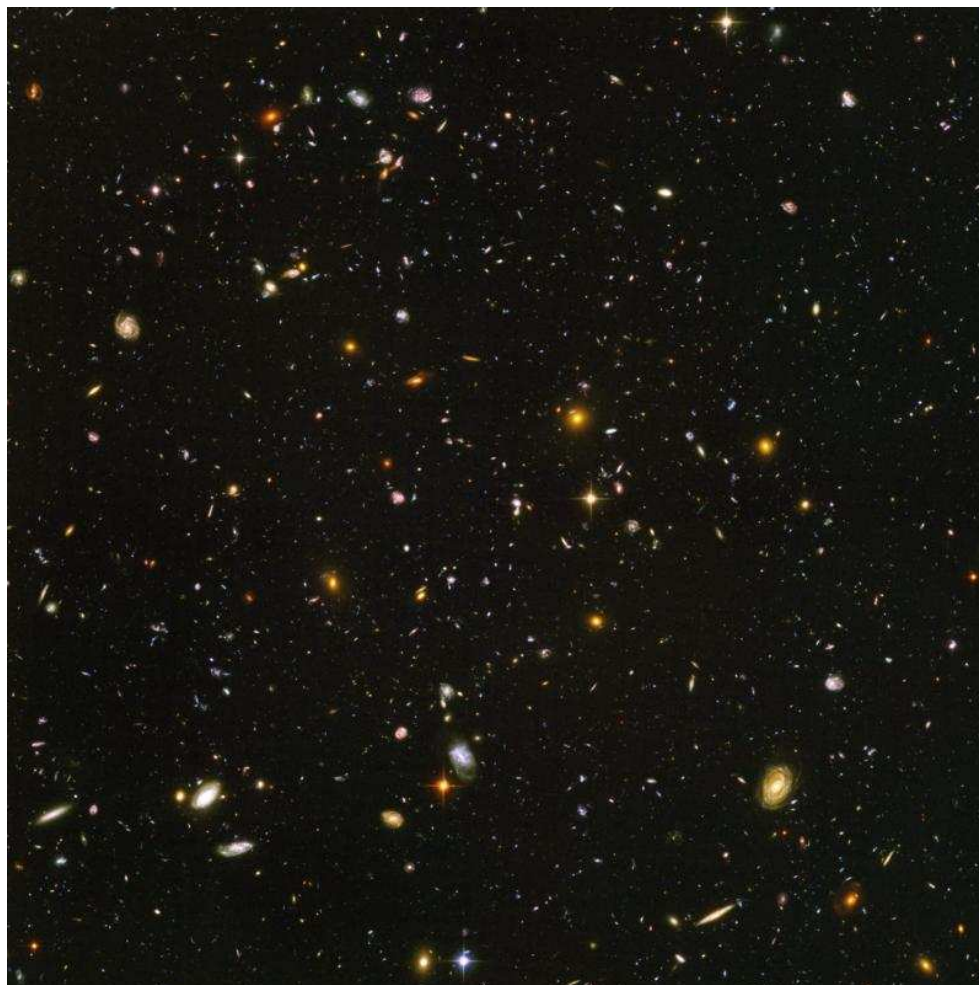
³⁴Behalve een minimale fractie ($\sim 10^{-10}$) lithium-7.



Figuur 20. Dit is een kaart van de fluctuaties in de helderheid van de kosmologische achtergrondstraling. We zien de hele hemel opengeklapt net als een kaart van de hele aarde. De fluctuaties zijn op het niveau van ongeveer 0.01% en tonen de eerste structuur in het heelal. Het bovenste plaatje is begin jaren negentig gemaakt met de satelliet Cosmic Background Explorer COBE, wat de Nobelprijs heeft opgeleverd. Onder een meer recente bepaling met de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe WMAP. (credit: The National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the WMAP Science Team; zie map.gsfc.nasa.gov/media/080997/index.html)

Bij de toen heersende dichtheden en temperaturen kan uit de theorie van de zwakke wisselwerkingen worden berekend, dat na 3 minuten de verhouding tussen protonen en neutronen ruwweg 7 : 1 moet zijn geweest. Als daaruit waterstof en helium-4 wordt gevormd volgt er meteen uit dat de resulterende verhouding van waterstof en helium ongeveer 75%-25% moet zijn. En dat is wat men overal in het heelal vindt, tot in de oudste sterren toe. Ook de fractie deuterium en de isotopen van helium en lithium zijn voorspelbaar en kloppen uitstekend met de waarnemingen. Dus we kunnen in detail 'begrijpen' wat de samenstelling van de materie in het heelal was toen het 3 minuten oud was! De vorming van elementen in het jonge heelal wordt wel de Big Bang nucleosynthese genoemd.

Electronen konden nog niet met de kernen samen atomen vormen als gevolg van het intense stralingsveld, dat onmiddellijk electronen weer lossloeg van de waterstof- of heliumkernen. Na 380.000 jaar was het heelal koel genoeg voor vorming van atomen. Daarvoor was het ook zo, dat het

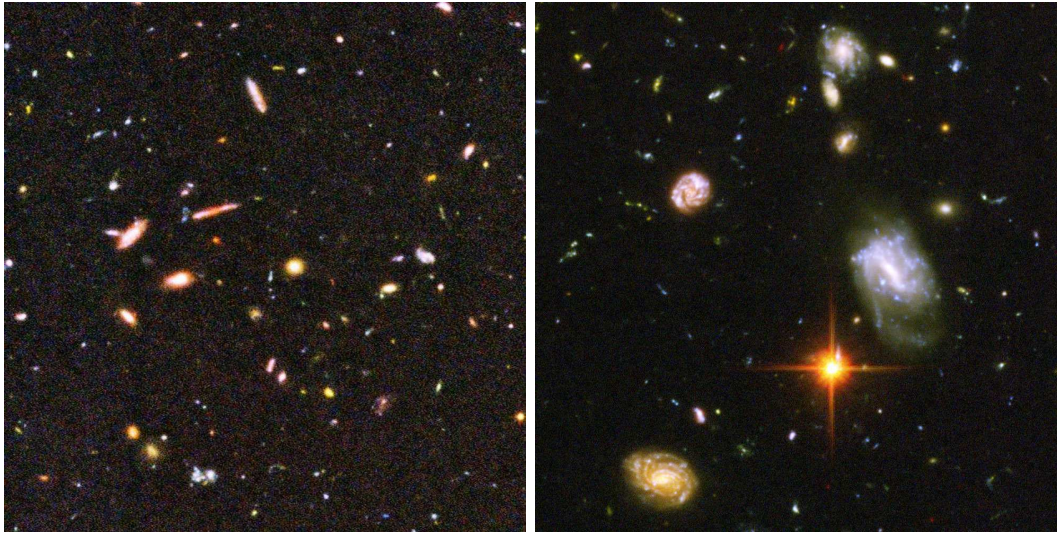


Figuur 21. De ‘Ultra-Deep Field’; een opname met de Hubble Space Telescope met een totale belichtingstijd van meer dan 11 dagen. Dit veld meet slechts 6 boogminuten langs elke zijde; ter vergelijking: de maan (en overigens ook de zon) heeft aan de hemel een diameter van een halve graad ofwel 30 boogminuten. (hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2004/07/image/a/; credit: The Space Telescope Science Institute STScI, which operates the Hubble Space Telescope HST on behalf of the National Aeronautics and Space Administration NASA and the European Space Agency ESA.)

ondoorzichtig was. Als een atoom energie uitstraalde in de vorm van straling (een foton dus)³⁵ werd het bijna onmiddellijk door een ander deeltje (meestal een vrij electron) opgevangen. Maar na die 380.000 jaar waren de electronen niet meer vrij aanwezig en werd het heelal transparant. En omdat de uitdijing voortgaat, worden fotonen meteen helemaal niet meer geabsorbeerd door materie. Men refereert daarbij naar het ‘moment van laatste verstrooiing’ of ‘tijdperk van recombinitie’³⁶.

³⁵Electromagnetische straling kan opgevat worden als pakketjes energie, die quanta of fotonen genoemd worden. Hoe korter de golflengte –bijvoorbeeld Röntgen straling–, hoe meer energie per foton. Dus we hebben steeds minder energie per foton als we via ultraviolet naar zichtbaar licht gaan en dan via infraroodstraling naar radiostraling.

³⁶‘Epoch of recombination’: Dit is eigenlijk slecht taalgebruik; het was eigenlijk combinatie, want het gebeurde voor het eerst. Aan de andere kant wordt het combineren van electronen met atomen altijd recombinitie genoemd. Het ‘moment of last scattering’ is de laatste interactie van betekenis tussen stralingsveld en materie.



Figuur 22. Details in de UDF. De zwakste rode stelsels zien we op een moment dat het heelal pas een miljard jaar of zo oud was. Rechts zien we enkele stelsels, die misschien een miljard lichtjaar of zo van ons vandaan staan. Het heldere, rode object is een ster in ons Melkwegstelsel; het is effectief een punt, maar door straalbreking van het licht in de telescoop structuur van de Hubble Space Telescope zien we zogenaamde ‘spikes’ erom als een kruis. (credit: STScI.)

Het stralingsveld is vervolgens afgekoeld tot een huidige waarde van 2.7 Kelvin. Er zijn fotonen die na al die miljarden jaren toevallig onze aarde treffen, maar de kans dat zulke fotonen sterren of planeten treffen is zo klein, dat je met zeer grote nauwkeurigheid kunt stellen dat alle fotonen uit het vroege heelal er nog steeds zijn. Dat heet de kosmologische achtergrondstraling, die te ontdekken is als radiostraling bij golflengten van een millimeter of zo. Die straling is enorm uniform (dus even helder in alle richtingen als je corrigeert voor de beweging van de aarde). Recent heeft men er structuur in gevonden en wel (zie fig. 20) fluctuaties in de helderheid ervan van zo’n 0.01%.³⁷ Daaruit zijn later sterren en melkwegstelsels, planeten en mensen ontstaan. Als er toen niet een begin van structuur was geweest zou er nooit iets gevormd zijn; geen melkwegstelsels, geen sterren, geen planeten, geen bomen, geen planten, geen dieren, geen mensen.

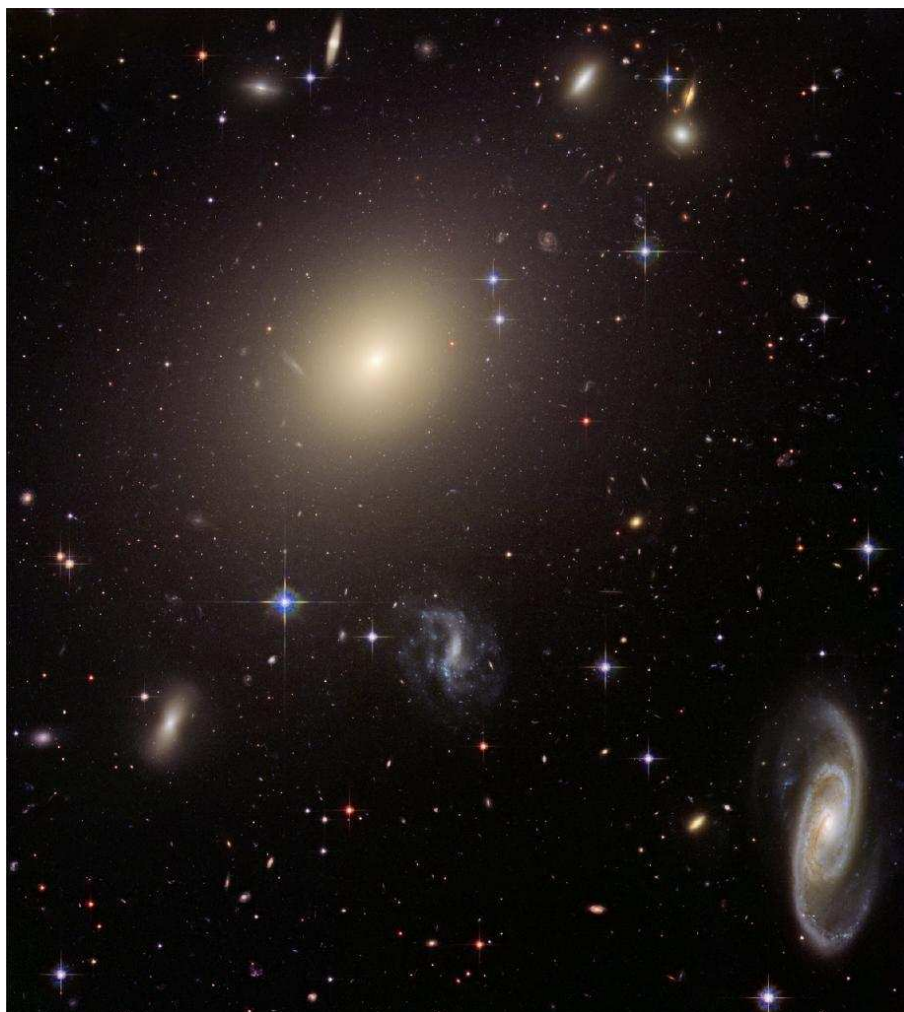
De kleine fluctuaties in dichtheid zijn van groot belang. Door de eigen zwaartekracht werd lokaal de expansie van het heelal afgeremd en gestopt, waarna samentrekking volgde. Zo vormden de eerste melkwegstelsels en sterren. Dit is ongeveer een miljard jaar na de Big Bang. We kunnen op de diepste opnamen met de Hubble Space Telescope stelsels zien kort na hun vorming; in het zogenaamde *Hubble Ultra-Deep Field* UDF³⁸, dat gemaakt is door meer dan 11 dagen naar dit stuk van de hemel te kijken. In fig. 21 zien we de uiteindelijke opname en in fig. 22 een paar details. De zwakste melkwegstelsels, die te zien zijn, zijn zo ver van ons vandaan, dat we ze zien toen het heelal tussen 1 en 2 miljard oud was. In totaal zijn wel 10.000 stelseltjes geteld in deze opname.

4.2. Melkwegstelsels

De vorming van structuur in het heelal is een zeer actief veld van onderzoek op dit moment. Het is waarschijnlijk zo, dat de eerste structuur die ontstond correspondeert met wat nu de structuur

³⁷Voor de ontdekking van de kosmologische achtergrondstraling hebben Arno Penzias en Robert Wilson in 1978 de helft van de Nobelprijs voor de natuurkunde gekregen. Pas nog, in 2006 hebben John Mather en George Smoot die prijs gekregen voor de ontdekking van de structuur erin met de satelliet COBE.

³⁸Zie voor de press release hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2004/07/.



Figuur 23. Melkwegstelsels groeperen zich in zogenaamde clusters. We zien hier een opname van Hubble Space Telescope van de cluster Abell S0740, die op een afstand staat van ongeveer 450 miljoen lichtjaar. De twee grootste stelsels tonen dat er in grote lijnen twee typen melkwegstelsels zijn: de elliptische (als linksboven) die al lang geen sterren meer vormen en de spiraalstelsels, waar ster-
vorming nog steeds plaatsvindt. (hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2007/08/image/a/; credit: STScI.)

op de grootste schaal is. Dat zijn niet individuele melkwegstelsels, maar eerder grote zwermen daarvan. Ook nu nog zien we die als zogenaamde clusters van melkwegstelsels. Eigenlijk zijn die clusters op schalen van tientallen miljoenen lichtjaren nog verder georganiseerd in superclusters en in enorme platte structuren of lange een-dimensionale filamenten, die zich uitstrekken over soms wel honderden miljoenen lichtjaren. Op 200 miljoen lichtjaar van ons ligt zo de zogenaamde 'Great Wall', die een afmeting heeft van 500 miljoen bij 300 miljoen lichtjaar terwijl het maar 15 miljoen lichtjaar dik is. En daartussen zijn enorme lege ruimten, 'voids', die ook diameters van een paar honderd miljoenen lichtjaren kunnen hebben.

Samentrekkende gaswolken in die clusters, waarin de eerste sterren ontstonden, vormden de aanzet tot de vorming van melkwegstelsels. Deze wolken kregen gingen ronddraaien. De oorsprong van die rotatie is waarschijnlijk gelegen in het feit, dat andere gaswolken in de buurt er getijde-
werking op uitoefenden. De vormende melkwegstelsels stonden ook dicht bij elkaar, zodat ze veel



Figuur 24. Dit stelsel zien we min of meer op de kant. We zien, dat het uit twee componenten bestaat; een oude, weinig afgeplatte structuur van diffuus sterlicht en een platte schijf met stof, jonge en oudere sterren en gas. Deze nevel heet de Sombroeronevel. Deze opname is gemaakt met de Very Large Telescope VLT op de Paranal Sterrenwacht van ESO in Chili. (www.eso.org/gallery/d/4269-1/phot-07a-00.jpg; credit: the European Southern Observatory ESO, which operates the La Silla Paranal Observatory in the Atacama desert in Chile, on behalf of its European member states.)

interactie met elkaar hadden en vaak ook wel samenklonterden tot grotere stelsels. Waarnemingen met de Hubble Space Telescope bevestigen dit.

Er zijn in grote lijnen twee soorten melkwegstelsels. Het is ook Edwin Hubble geweest, die een classificatie deed van melkwegstelsels en daarbij twee hoofd-typen onderscheidde. Deze heten de elliptische stelsels en spiraalstelsels. Het is heel duidelijk te zien in fig. 23, hetgeen een opname met Hubble Space Telescope is van een relatief nabij cluster. Het blijkt dat de elliptische stelsels (zoals linksboven in fig. 23), geheel uit oude sterren bestaan en ruimtelijk weliswaar over het algemeen niet bolvorming zijn, maar enigszins afgeplat. Er is ook geen gas meer aanwezig om sterren uit te vormen. De spiraalstelsels hebben naast een dergelijke weinig afgeplatte structuur met alleen oude sterren (meestal halo genoemd) een duidelijke, sterk afgeplatte schijf. Soms is die halo zeer prominent en de schijf minder geprononceerd als bijvoorbeeld in de Sombroeronevel (zie fig. 24). In ons eigen Melkwegstelsel en een stelsel als NGC 891, dat er erg op lijkt (zie fig. 25), is de schijf veel dominerender in de licht- en massaverdeling.

In die schijf zien we wel duidelijk de aanwezigheid van stof en het blijkt dat er ook veel gas is en dat er stervorming tot op de dag van vandaag plaatsvindt. Als je de schijf ‘van boven’ ziet is er zogenaamde spiraalstructuur te zien. Het stelsel in fig. 26 ziet er ongeveer uit als ons eigen Melkwegstelsel als we dat zo konden waarnemen. De spiraalareem zijn duidelijk blauwer en dat komt omdat daar stervorming plaatsvindt. We zullen hieronder zien, dat zware sterren heel heet



Figuur 25. Links een wijdhoekfoto van de gehele zuidelijke hemel. De rand van de opname is de horizon. We zien de Melkweg met rechts de Magelhaense Wolken, die begeleidertjes zijn van ons eigen Melkwegstelsel. Ook zien we op deze opname links de komeet Hyakutake. Deze foto is gemaakt in maart 1992 en was Astronomy Picture of the Day op 10 maart 2002. (antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020310.html; credit: Gordon Garradd (www.panoramio.com/photo/3233228) Rechts het melkwegstelsel op z'n kant NGC 891, waar ik veel onderzoekingen aan heb gedaan en ook heb benadrukt dat het heel veel op ons eigen stelsel lijkt. (www.cfht.hawaii.edu/HawaiianStarlight/English/Poster-NGC891.html; credit: The Canada-France-Hawaii Telescope CFHT, which is operated by the National Research Council of Canada, the Centre National de la Recherche Scientifique of France and the University of Hawaii.)

zijn (en dus blauw van kleur) en maar heel kort leven. Blauwe gebieden zijn dus aanwijzingen voor recente vorming van sterren.³⁹

De vorming van melkwegstelsels wordt schematisch geïllustreerd in fig. 27. In een samentrekkende wolk gas vormden sterren. Wellicht zijn meerdere, kleinere gaswolken, waarin dit gebeurde, samengeklonterd. In ieder geval bleef uiteindelijk een ruwweg bolvormige structuur over, waarin de sterren en groepen sterren kriskras door elkaar heen bewegen. Maar er bleef naast sterren ook gas over en dat trok samen in een schijf. De gaswolken botsten en op die manier werden hun onderlinge snelheden kleiner. Door de rotatie komt al dat gas dan tot rust in een afgeplatte, draaiende schijf. In de overblijvende, weinig afgeplatte structuur, die dus allemaal oude sterren bevat, is dan geen

³⁹Spiraalstelsels en met name de schijven zijn de specialisatie in mijn wetenschappelijk onderzoek. Hun structuur, vorming en evolutie en het voorkomen van de spiraalstructuur zijn daarbij onderwerpen waaraan ik veel gewerkt heb en nog werk. In dat kader heb ik o.a. veel onderzoek gedaan aan het stelsel NGC 891 in fig. 25 en daarbij heb ik regelmatig gewezen op de grote gelijkenis met ons eigen Melkwegstelsel.



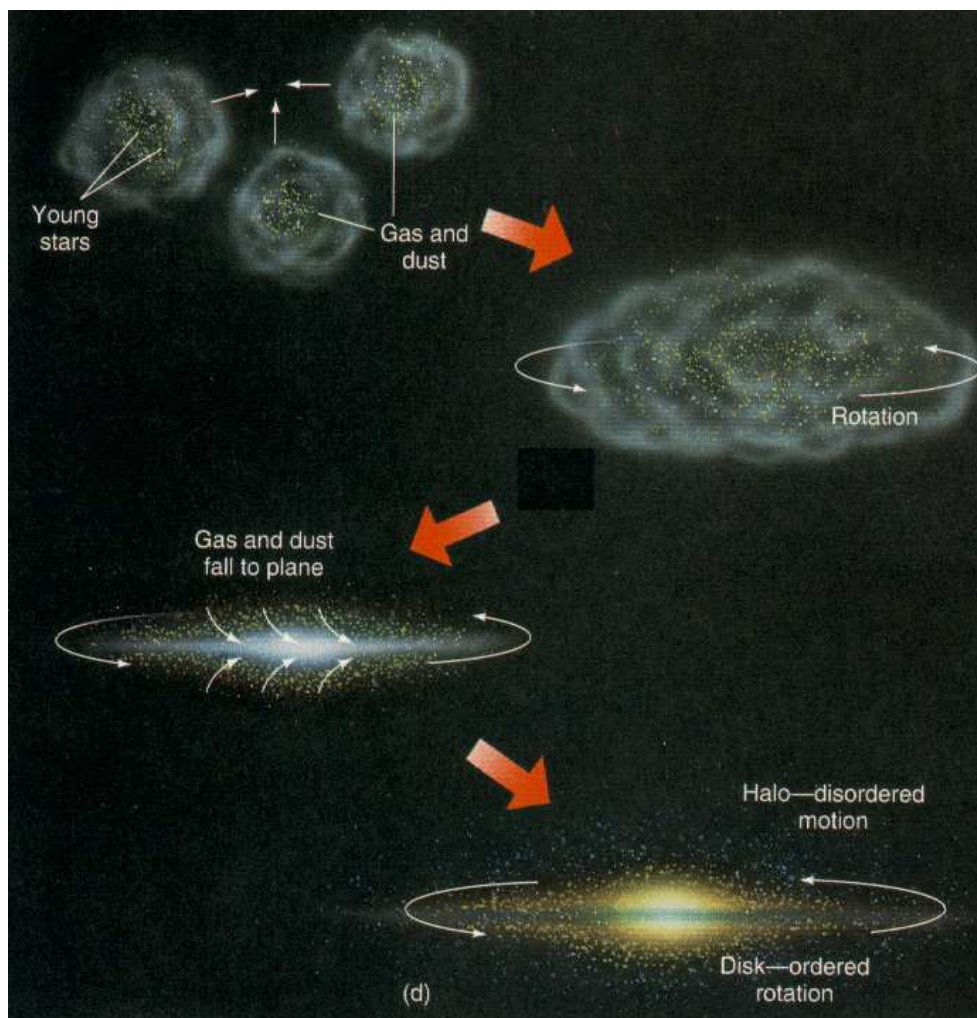
Figuur 26. Dit stelsel zien we van boven en toont hoe ons Melkwegstelsel er ongeveer uit zal zien als we het zo konden waarnemen. Het is het stelsel NGC 1232, opgenomen met de Europese Very Large Telescope VLT in Chili. (www.eso.org/gallery/d/4429-2/phot-37d-98.jpg; credit: ESO.)

gas meer over en daarom zijn daar alle sterren oud. Maar in de schijf is al het overgebleven gas verzameld, waar vervolgens ook sterren uit zijn gevormd en nog steeds vormen.

Ook ons eigen Melkwegstelsel is zo'n spiraalstelsel met een schijf, waarin onze zon en het planetenstelsel met de aarde zo'n 4.5 miljard jaar geleden gevormd zijn. Wij zitten (bijna precies) in het vlak van de schijf en die zien we dus (althans als het donker genoeg is en dat is het op veel plaatsen tegenwoordig niet meer) als een lichte band aan de hemel die de 'Melkweg' genoemd wordt. In fig. 25 zien we dat geïllustreerd in een foto met een wijdhoeklenz, zodat we de hele hemel zien. Deze foto is genomen vanaf het zuidelijk halfrond, waar de Melkweg veel helderder en spectaculairder is dan bij ons, vooral doordat het heldere centrum van ons Melkwegstelsel bij ons vandaan alleen heel laag boven de horizon zichtbaar is. We zien er ook de begeleiders van ons Melkwegstelsel, de Magelhaense Wolken, die op het zuidelijk halfrond met het blote oog te zien zijn.

4.3. Sterren en chemische elementen

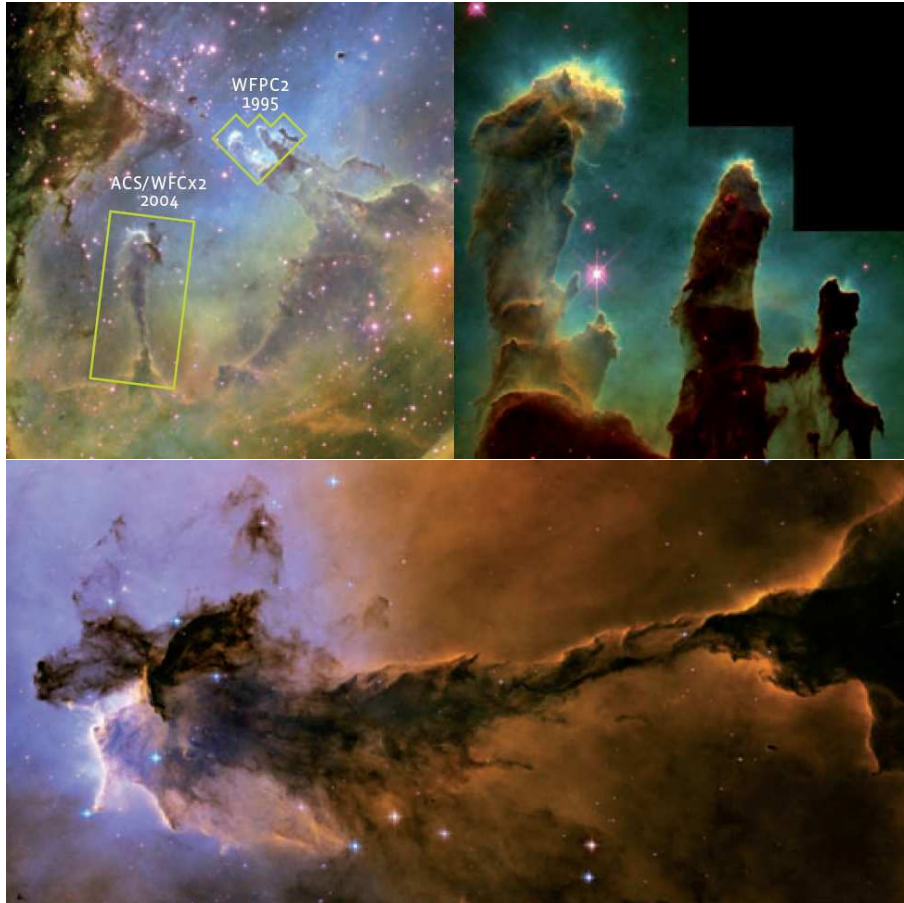
De eerste sterren bestonden uitsluitend uit waterstof en helium, want voordat er sterren waren gevormd, waren er in het heelal geen andere chemische elementen aanwezig. Die elementen zijn



Figuur 27. Structuur en vorming van melkwegstelsels. In deze figuur zien we een schematische illustratie van hoe de vorming van een spiraalstelsel verloopt. Voor uitleg en meer details verwijst ik naar de tekst.

later in sterren gevormd; men noemt dit *stellaire nucleosynthese* en ik kom daar hieronder nader op terug. Het is dus in stelsels als het onze zo, dat de sterren in de weinig afgeplatte, oude halo bijna uitsluitend bestaan uit waterstof en helium. Het percentage van de massa, die in chemische elementen zwaarder dan helium is, ligt op 0.1% of vaak nog veel minder (voor onze zon is het 2%). Maar ze zijn er wel voor verantwoordelijk geweest dat het gas waaruit de schijf vervolgens vormde wel een paar procent in de vorm van zulke zwaardere elementen bevatte en dat het gas waaruit 4.5 miljard jaar geleden de zon ontstond, planeten kon vormen, waarop vervolgens (althans op aarde) leven ontstond.

Sterren ontstaan door samentrekking van een gaswolk. In de praktijk is die heel groot, zodat die in stukken opbreekt en een sterrenhoop van tienduizenden sterren of meer vormt. Die sterrenhoop valt meestal snel uiteen. Gebieden met sterrenvorming openbaren zich, doordat er hele hete, zware (en daardoor kortlevende en dus jonge) sterren aanwezig zijn, die het interstellair gas doen oplichten. We zien dat bijvoorbeeld heel goed in gebieden als de Arend-nevel. In fig. 28 zien we linksboven een overzicht foto en verder twee gebieden opgenomen met de Hubble Space Telescope.



Figuur 28. Vorming van sterren in de zogenaamde Arend-nevel. Deze nevel (linksboven) is een kraamkamer van sterren, die in grote getale op dit moment vormen. Onder de jonge sterren zijn er, die veel zwaarder zijn dan de zon en zulke jonge sterren zenden veel ultraviolet licht uit, waardoor het gas gaat gloeien. We zien het dan afsteken tegen het stof in deze opnamen rechtsboven en onder met Hubble Space Telescope. De nevel ligt 6500 lichtjaar bij ons vandaan. (heritage.stsci.edu/2005/12b/supplemental.html; credit STScI.)

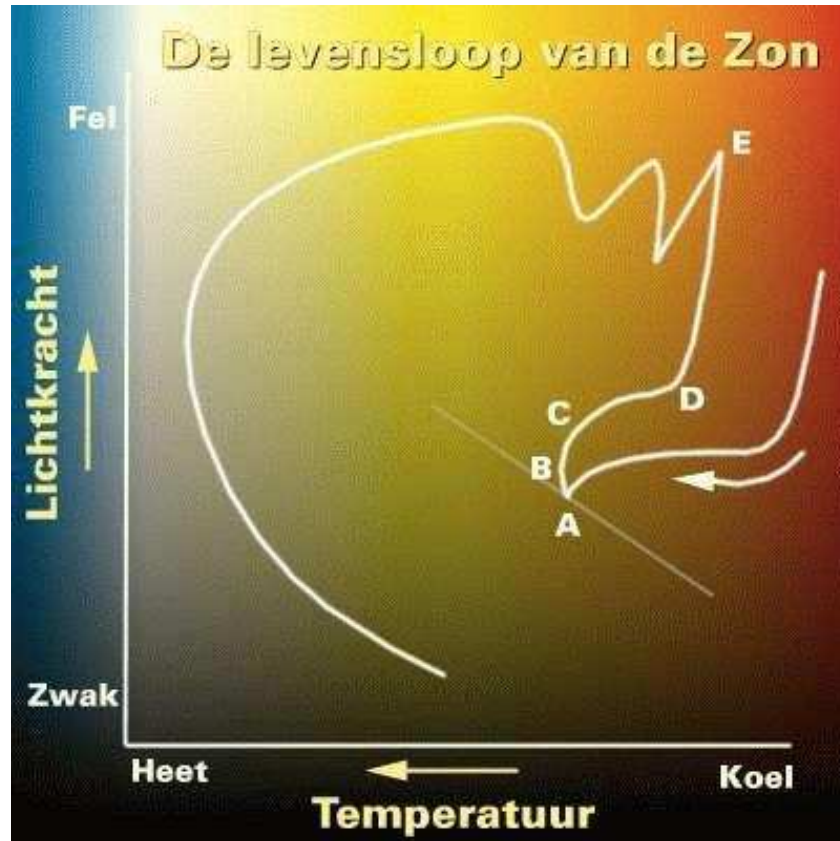
Een ander mooi voorbeeld van zo'n gebied van stervorming is de Orion-nevel (zie fig. 30), die we 's winters aan de hemel kunnen zien.⁴⁰

We kijken nu naar de evolutie van sterren. Als u dit te gedetailleerd vindt, kunt u verder lezen hieronder bij het teken ♠ op pagina 46.

Ik begin met de evolutie van de zon⁴¹ en we volgen die aan de hand van fig. 29. Hierin staat op de verticale as de totale lichtkracht (dus ook de totale energie-productie) en op de horizontale as de temperatuur van het oppervlak. Dit heet een *Hertzsprung-Russell diagram* en wordt gebruikt om de eigenschappen van sterren systematisch te bestuderen.

⁴⁰Dat geldt natuurlijk voor het noordelijk halfrond. Op het zuidelijk halfrond is het sterrenbeeld Orion ook zichtbaar, maar dan is dan het daar zomer. We zien het dan (en ook de andere sterrenbeelden in fig. 30) overigens ook ondersteboven.

⁴¹De tijdschalen, die ik hieronder citeer zijn die in wat gezien wordt als de beste berekening van de evolutie van de zon. Het betreffende gedetailleerde artikel in de vakliteratuur is Sackmann et al. (1993).

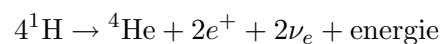


Figuur 29. Het spoor van de evolutie van de zon. In dit diagram, dat een Hertzsprung-Russell diagram heet, staat van een ster (hier dus de zon) langs de horizontale as de temperatuur aan het oppervlak, gemeten aan de kleur van het licht. Verticaal staat de totaal uitgestraalde energie. De letters geven stadia aan, die in de tekst worden besproken.

Tijdens de samentrekking worden de centrale delen van de gaswolk, die uiteindelijk de ster zal worden, steeds heter totdat bij zo'n tien miljoen graden kernreacties optreden. Bij toenemende temperatuur worden alle elektronen losgemaakt van de atoomkernen en dus hebben we op den duur positief geladen atoomkernen (natuurlijk voornamelijk van waterstof, dat een enkel proton is, en helium). Om kernreacties te kunnen laten plaatsvinden moet de temperatuur erg hoog zijn, want dan bewegen de protonen snel genoeg en hebben ze voldoende energie om de onderlingen afstotende elektrische krachten te kunnen overwinnen.

Positie A. Hier kwam de zon na de samentrekking, toen ze energie ging produceren en ging stralen. Midden in de zon was het zo'n tien miljoen graden en dan treden kernreacties op. De meeste sterren liggen langs de schuine lijn (bekend als de Hoofdreeks); als ze zwaarder zijn dan de zon meer naar linksboven en als ze lichter zijn rechtsonder.

Positie B. Dit is waar de zon nu ongeveer is (4.5 miljard jaar na op positie A te zijn aangekomen). Nog steeds treden kernreacties op waarbij via een aantal stappen 4 protonen samen een helium-4 kern vormen. Daarbij komen ook positronen (positief geladen elektronen), neutrino's en vooral energie vrij:



Die energie is in de vorm van straling en die kan de zon niet zomaar verlaten, want de materie is veel te compact om straling door te laten. De fotonen worden vele malen opgevangen door atoomkernen en dan weer uitgezonden en langzaam diffundeert het daardoor naar buiten. De temperatuur neemt daarbij af. Uiteindelijk wordt het als licht overeenkomstig de temperatuur aan



Figuur 30. Foto van de zuidelijke winterhemel op het noorderlijk halfrond. Rechts onder zien we het sterrenbeeld Orion (klemtoon op ‘ri’). Orion valt op door de drie sterren op een rechte lijn. Eronder zien we een rood-achtig vlekje; dit actieve gebied van stervorming is de Orion-nevel en kan met het blote oog gezien worden. De rode ster linksboven in Orion (midden van de foto) heet Betelgeuse; deze is een rode superreus zo’n 14 keer zo zwaar als de zon. De ster helemaal middenonder is Sirius; op een afstand van ruim 8 lichtjaar één van de meest nabije sterren. Sirius is ongeveer tweemaal zo zwaar als de zon, maar veel jonger (waarschijnlijk nog geen miljard jaar); het heeft als (onzichtbare) begeleider een witte dwerg. Het heldere object linksboven het midden is geen ster, maar de planeet Saturnus die daar bij deze opname toevallig stond. De twee sterren links ervan zijn Castor en Pollux in de Tweelingen. De rode ster rechts is Aldebaran in de Stier; een rode reus van zo’n tien maal de massa van de zon op ongeveer 65 lichtjaar. Rechtsboven staat het Zevengesternte of Plejaden, waarvan de helderste sterren met het blote oog te zien zijn. Deze sterrenhoop staat op ruim 400 lichtjaar; de sterren erin zijn even oud en wel van de orde van 100 miljoen jaar. Vertikaal door de foto loopt de Melkweg. (www.allthesky.com/constellations/big/winhex-b.jpg; credit: T.Credner & S.Kohle, AlltheSky.com)

het oppervlak uitgestraald. Het licht dat we nu zien heeft ruim 8 minuten geleden de zon verlaten, maar is energie zie zo’n honderdduizend jaar geleden in de centrale delen is geproduceerd uit deze *waterstof-verbranding*.⁴²

⁴²Ook worden er in de binnenste van de zon grote hoeveelheden positronen en neutrino’s geproduceerd. De positronen ontmoeten elektronen en annihileren hiermee tot nog meer energie in de vorm van fotonen. Maar de neutrino’s

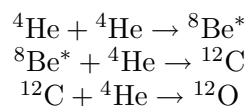


Figuur 31. De 'Ringnevel', een voorbeeld van een planetaire nevel, op een opname met de Hubble Space Telescope. Dit object staat op een afstand van ongeveer 2300 lichtjaar. (heritage.stsci.edu/1999/01/images/9901a.jpg; credit: STScI.)

Positie C. Hier is de zon als over zo'n zes miljard jaar de waterstof in de centrale delen op raakt (de zon is dan 10.9 miljard jaar oud). Dan wordt er minder energie geproduceerd, waardoor de kern verder samentrekt. Waterstof-verbranding treedt nog wel op in een bolschil eromheen.

Positie D. De zon is hier 11.6 miljard jaar oud. Doordat een nieuw evenwicht moet worden ingesteld zet de zon uit. Daardoor koelen de buitendelen af, waardoor de energie er sneller uit kan en daardoor wordt de zon helderder.

Positie E. Hier is de zon 12.2 miljard jaar oud en de kern van de zon is nu verder samengetrokken en daardoor heter geworden. De buitendelen zijn behoorlijk afgekoeld door de uitzetting. Dit stadium wordt rode reus genoemd; rood omdat de ster relatief koel is geworden en reus omdat ze groot is. Nu kunnen bij de hogere temperaturen in het binnenste ook helium-atomen botsen. Hierbij kan, in tegenstelling tot wat mogelijk was in de Big Bang, de helium verbranden tot koolstof en een klein deel van de koolstof zelfs tot zuurstof. Deze 'helium-verbranding' gebeurt bij ruwweg 100 miljoen graden:



bewegen ongehinderd door de materie naar buiten. Door elke vierkante centimeter van ons lichaam gaan elke seconde ongeveer 70 miljard neutrino's (70 duizend miljoen!). Van alle neutrino's, die op ons lichaam vallen, raakt slechts eens in de 5 minuten of zo één neutrino een atoom of molecuul in ons lichaam en doet daar dan eigenlijk niet eens kwaad.

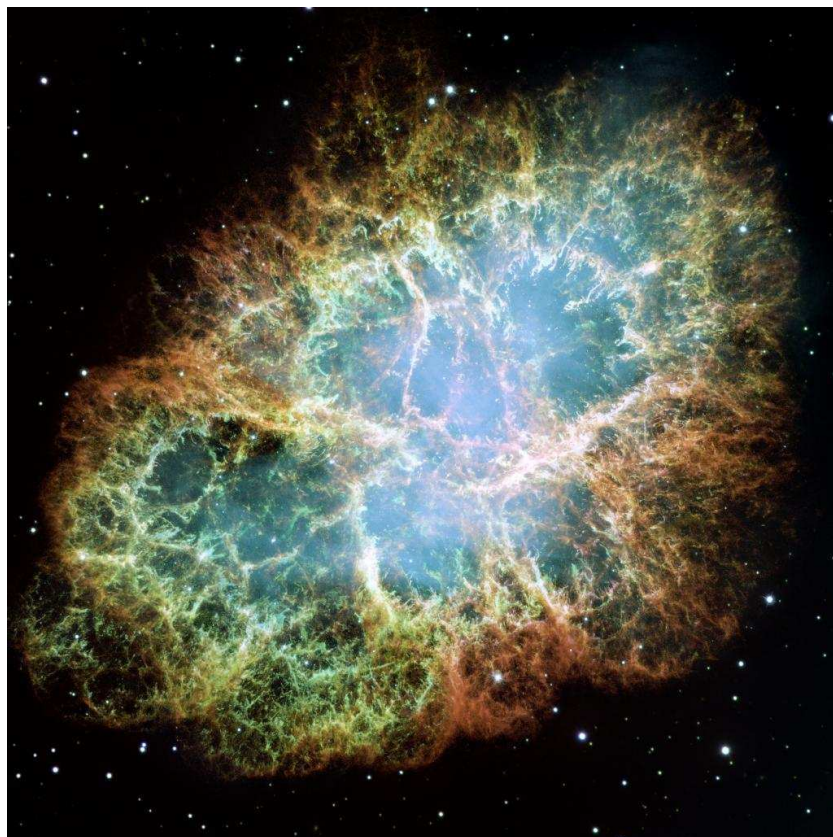


Figuur 32. Supernova 1987A in de Grote Magelhaense Wolk; links kort na de explosie, rechts een opname enkele jaren ervoor. (credit: Anglo-Australian Observatory)

Dat dit nu –in tegenstelling tot kort na de Big Bang– wel kan, komt doordat de dichtheid nu veel groter is dan toen na de Big Bang de helium vormde. Er bestaat bij de geldende temperatuur een speciale toestand (‘resonantie’) van beryllium-8 (aangeduid als ${}^8\text{Be}^*$), waarbij die atomen zo net lang genoeg kunnen blijven bestaan (van de orde van 10^{-16} seconde) dat ze een behoorlijke kans hebben om een heliumkern in te vangen voordat ze uiteengevallen zijn. Dus in sterren wordt het mogelijk om chemische elementen te vormen zwaarder dan helium door deze speciale eigenschap van beryllium-8 en de condities in zulke sterren.

Uiteindelijk zal de zon stoppen met kernreacties (als de zon 12.37 miljard jaar oud is) en zal ze samentrekken en afkoelen tot een zogenaamde witte dwerg (de boog links in fig. 29), die voornamelijk uit koolstof bestaat. Het is als het ware letterlijk een ‘*diamond in the sky*’. Zo’n object is enorm compact en heeft een dichtheid van enkele miljoenen kilogram per cm^3 . Het object trekt niet verder samen door zgn. degeneratiedruk. De electronen zitten zo dicht op elkaar dat ze binnen de onzekerheidsrelatie van Heisenberg net nog kunnen voldoen aan het uitsluitingsprincipe van Fermi. Nog verder samentrekken zou betekenen, dat meerdere electronen in dezelfde quantum-toestand zouden geraken en ononderscheidbaar zouden worden en dat is volgens dit principe uitgesloten.

In sterren zwaarder dan de zon gebeurt de waterstof-verbranding op een iets andere manier, waarbij koolstof en zuurstof mede een rol spelen (dit geldt dus niet voor de eerste sterren, maar voor latere generaties wel). In feite is het zo, dat een koolstof-12 atoom herhaaldelijk een proton invangt (hetgeen soms onder uitzending van een positron een neutron wordt) totdat na drie keer stikstof-15 ontstaat. Als dat weer een proton invangt dan valt het resultaat meteen uiteen in koolstof-12 en een helium-4 atoom. Het resultaat is hetzelfde zoals boven voor het binnenste van de zon beschreven, maar het betekent wel dat er op elk moment een zekere hoeveelheid stikstof zal zijn naast de aanwezige koolstof en zuurstof. Uiteindelijk gaan in zulke sterren (tot ongeveer een paar keer zo zwaar als de zon) de processen net zo door tot de helium-verbranding. Maar ze hebben meer zwaartekracht en worden daarom heter; ze springen daardoor ook veel minder zuinig met hun brandstof om en leven daardoor veel korter. Ze stoten soms hun buitendelen af als in een *planetaire nevel* (zie fig. 31). Wat we daar zien is heet, lichtend gas dat als een schil uitzet. De naam planetaire nevel is ontstaan omdat in primitieve telescopen de nevel er als een planeet uitzag. Hierbij kunnen met name koolstof en zuurstof, dat in de ster is gevormd, in het gas tussen de sterren komen. De ster in deze zogenaamde Ringnevel (fig. 31) is maar een klein beetje zwaarder dan de zon. Ze staat 2300 lichtjaar bij ons vandaan en de expansie van de schil is zo’n 1500 jaar geleden begonnen. Zulke sterren met massa’s tot een paar keer die van de zon, doven ook op den



Figuur 33. Massieve sterren leven kort en blazen zichzelf op aan het eind van hun leven als een supernova, waarbij ze de chemische elementen die ze gevormd hebben aan het gas tussen de sterren toevoegen. Hier zien we de zogenaamde ‘Krab-nevel’, wederom met Hubble Space Telescope. Het is het restant van een supernova explosie die op aarde in 1054 met het blote oog zichtbaar was. (hubblesite.org/gallery/album/nebula_collection/pr2005037a/; credit: STScI.)

duur uit. Ze worden een witte dwerg als de overblijvende ster lichter is dan ongeveer 1.5 keer de zon. Is ze zwaarder dan dat, dan is de zwaartekracht zo groot, dat de electronen en de protonen als het ware in elkaar worden gedrukt tot neutronen. De resulterende neutronenster⁴³ is zo dicht (effectief de dichtheid in een atoomkern), dat ze een straal heeft van slechts zo’n 10 km. Door de grote samentrekking draaien ze in perioden van seconden om hun as. We zien dit met name in de vorm van regelmatige pulsen van radiostraling in objecten, die pulsars genoemd worden.

Nog zwaardere sterren (enkele tot tientallen keren zo zwaar als de zon) kunnen in hun bin-
 nenste nog heter worden en na afloop van de helium-verbranding ‘verbranden’ ze hun koolstof en
 zuurstof tot nog zwaardere elementen. Dit stopt bij het element ijzer, omdat dat het stabielste
 element is. Atomen met meer protonen dan ijzer hebben minder ”bindings-energie”, zodat verder
 ‘verbranden’ van elementen tot zwaardere atomen dan ijzer energie gaat *kosten* in plaats van dat er
 energie vrijkomt. De kern van de ster (die dus helemaal uit ijzer bestaat) trekt dan samen en vormt
 een neutronenster. Daarbij komen grote hoeveelheden neutrino’s met grote hoeveelheden energie
 vrij. De buitendelen van de ster storten nu ook in, want ze worden niet meer daartoe verhinderd
 door de energie-productie van binnenuit, en vallen met grote snelheid op de ‘neutronenster’ in het

⁴³Ook dan wordt verdere samentrekking weer verhinderd door degeneratiedruk, maar het zijn dan de neutronen die
 gedegenerereerd zijn.



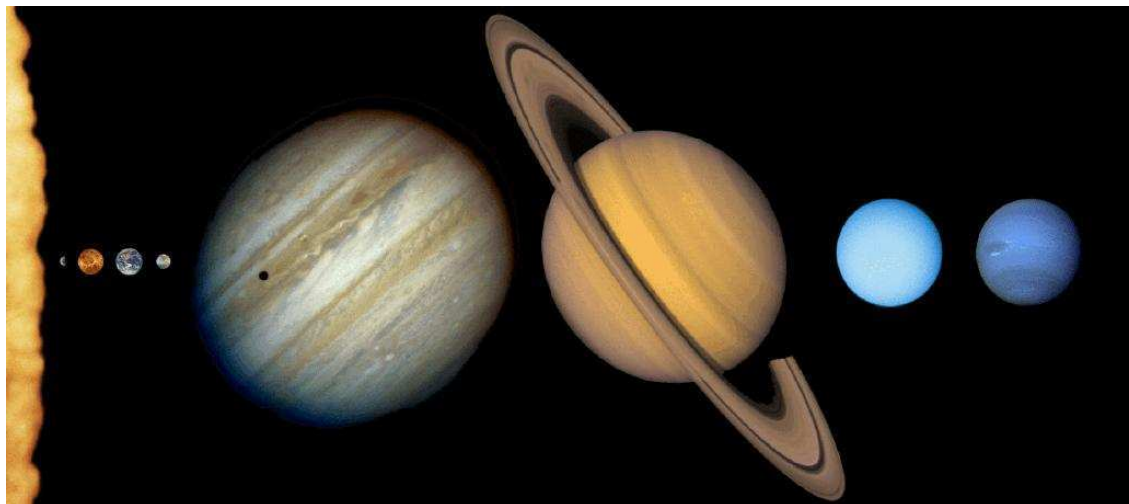
Figuur 34. De 'Sluier-nevel', het restant van een supernova, die zo'n tienduizend jaar geleden is ontploft. De afstand is 1400 lichtjaar en dit object beslaat een gebied van 2 graden diameter aan de hemel. (www.skyfactory.org/veil/veil.htm)

centrum. Daarbij ontstaat er een enorme schokgolf en de dichtheid in die schok is zo groot, dat zelfs de neutrino's er niet doorheen kunnen. Daardoor kan veel van de in de ster aanwezige energie, die voornamelijk in de neutrino's zit, er niet uit en de ster blaast zich dan op als een supernova. Als de overblijvende neutronenster zwaarder is dan zo'n 5 keer de zon, dan is de zwaartekracht zo groot, dat het instort tot een zwart gat. Dit is zo compact (als de zon zou samentrekken tot een zwart gat is de straal maar 2.7 km) dat de zwaartekracht aan het oppervlak zo groot is, dat er een snelheid groter dan die van het licht nodig is om te ontsnappen. Dus ook electromagnetische straling kan niet aan het zwarte gat ontkomen.

Supernovae worden voor enige maanden net zo helder als een heel melkwegstelsel. Fig. 32 laat supernova 1987A in de Grote Magelhaense Wolk zien. Deze was in 1987 vanaf het zuidelijk halfrond met het blote oog te zien, ondanks het feit, dat deze 170 duizend lichtjaar van ons af staat. Door de vele kernreacties zijn er veel vrije neutronen met veel energie en die kunnen gemakkelijk in andere atoomkernen doordringen. Als de neutronen door uitzending van een electron proton worden ontstaan zo de chemische elementen zwaarder dan ijzer, tot aan uranium toe. Bij de explosie voegen supernovae dan de elementen die ze gevormd hebben toe aan het gas tussen de sterren (zie bijvoorbeeld de 'Krab-nevel' in fig. 33). In fig. 34 zien we ook het restant van een supernova-explosie, die zo'n tienduizend jaar geleden plaatsvond. We zien een expanderende schil, die oplicht door interactie met het interstellaire gas. Het is van belang te realiseren dat zware sterren dit hele proces heel snel doorlopen; bijvoorbeeld voor een ster van 10 keer zo zwaar als de zon gaat de evolutie van geboorte tot supernova in enkele tientallen miljoenen jaren!



Kort samengevat verloopt de evolutie van een ster dus als volgt. Bijna de gehele tijd brengt de ster door in een fase waarbij in het centrum waterstof wordt omgezet in helium. Dat is ook de fase waarin onze zon zich bevindt. Aan het eind daarvan trekken de centrale delen, waar geen energie



Figuur 35. De planeten van ons zonnestelsel op dezelfde schaal in afmeting, maar niet in afstand tot de zon. Ze staan wel op de goede volgorde, namelijk van binnen naar buiten Mercurius, Venus, aarde, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus (klemtoon op de eerste lettergreep) en Neptunus. Ik heb Pluto uit deze foto verwijderd. (sse.jpl.nasa.gov/multimedia/gallery/solarsys_scale.jpg; credit: The Jet Propulsion Laboratory JPL of the National Aeronautics and Space Administration NASA at the California Institute of Technology Caltech.)

meer wordt geproduceerd, samen en wordt de temperatuur hoger. Dan wordt er helium omgezet in koolstof. De dichtheden in die centrale delen van sterren zijn zodanig dat in tegenstelling tot na de Big Bang er nu wel mogelijkheden zijn om zwaardere elementen dan helium te vormen. De buitendelen van de ster zetten uit en koelen af, maar de energie kan er gemakkelijker uit en de ster wordt helder. Dit stadium heet een rode reus. Een ster als de zon dooft dan vervolgens uit en wordt een zogenaamde witte dwerg. Dit hele proces duurt voor de zon ongeveer 10 miljard jaar en de zon is dus ongeveer op de helft daarvan.

Een zwaardere ster volgt eerst dezelfde stadia, alleen veel sneller. Voor een ster enkele tientallen malen zwaarder dan de zon is het zelfs beduidend minder dan een miljard jaar, dus heel kort op de tijdschaal van kosmische evolutie. Door de grotere massa dooft de ster na die fase van rode reus en helium verbranding niet uit. De temperatuur in de centrale delen worden op den duur zo hoog, dat verdere vorming van zware elementen voorkomt. Uiteindelijk blaast zo'n ster zich op als een supernova, waarbij de buitendelen de ruimte in geslingerd worden. Dit is heel belangrijk, want de in de ster gevormde chemische elementen komen zo in de interstellaire ruimte en latere generaties van sterren bevatten dus meer en meer zwaardere chemische elementen dan waterstof en helium.

4.4. Het zonnestelsel en andere planetenstelsels

In fig. 35 zien we de acht planeten van ons zonnestelsel (en de zon zelf) op dezelfde schaal, zodat we hun relatieve afmeting kunnen zien. Jupiter en Saturnus domineren het planetenstelsel.

Terugverwijzend naar fig. 17 benadruk ik dat de planeten in banen om de zon gaan, die ellipsen zijn volgens de wetten van Kepler. Deze bleken later in overeenstemming met de zwaartekrachtwetten van Newton. Echter de afwijkingen van de banen van cirkels zijn relatief klein en de banen liggen allemaal ongeveer in hetzelfde vlak. Verder gaan ze ook allemaal in dezelfde richting rond de zon. Dit duidt erop, dat ze ontstaan zijn uit de restanten van de samentrekkende gaswolk, waaruit de zon ontstond en die eerst een roterende schijf vormde. Later zijn de planeten, waaronder de aarde, dan ontstaan als klontering van de materie in die schijf. Daarbij hebben de onderlinge aantrekkingskrachten er wel voor gezorgd dat ze in resonanties zijn gekomen, waarbij de verhouding

van hun omlooptijden in de baan zich verhouden tot die van kleine, gehele getallen. Bijvoorbeeld Jupiter en Saturnus (5 : 2) en Uranus en Neptunus (2 : 1), maar ook Venus en de aarde (5 : 3). Dat is weliswaar niet precies, omdat er ook storende effecten zijn van andere planeten.

Omdat ik verderop aandacht zal besteden aan de vraag in hoeverre ons planetenstelsel uniek is, zal ik eerst het een en ander zeggen over hoe men denkt dat de vorming van de planeten in z'n werk is gegaan. Dit deel kan weer worden overgeslagen tot het teken \diamond op pagina 49.

Er is een duidelijke tweedeling in ons zonnestelsel tussen de kleine planeten in het binnen-deel (Mercurius tot en met Mars) en de grote planeten (Jupiter tot en met Neptunus) op grotere afstand van de zon. Men noemt die ook wel respectievelijk de aardse of terrestrische en de reuzen- of Joviaanse planeten. De eerste zijn rotsachtig en bestaan voor een groot deel uit mineralen en gesteenten. De reuzenplaneten daarentegen hebben naast een kern vooral een gasvormige samenstelling. Ze bestaan voor een groot gedeelte uit waterstof en helium (als de wolk waaruit het planetenstelsel is ontstaan) en ander moleculen in ijs-vorm.

Het uitgangspunt bij de theorie van de vorming van het zonnestelsel is het feit, dat de planeten allemaal in cirkelbanen in dezelfde richting en in ruwweg hetzelfde vlak om de zon draaien. Dit duidt op een ontstaan uit een schijf van gas en stof rond de zich vormende zon. Op een of ander manier, nog niet goed begrepen, verliest het merendeel van de materie zijn hoekmoment (draaiing), waardoor dat kan samentrekken tot een ster. Een klein deel van de materie bevat dan bijna al het hoekmoment en trekt samen in een schijf die door de rotatie sterk afgeplat wordt. De vroege theorieën beschreven dan de vorming van planeten als volgt. Zo'n nevel krijgt onherroepelijk onregelmatigheden in de massa-verdeling, waardoor gebieden van hogere dichtheid steeds meer materie naar zich toe trekken en daardoor groeien. Zo vormen dan door dit proces van gravitationele instabiliteit en fragmentatie de planeten. Deze gedachte wordt meestal de Kant-Laplace zonnenevel hypothese genoemd, omdat Immanuel Kant (1724 – 1804) en Laplace die hebben uitgewerkt. Eigenlijk gaat het idee terug tot de Zweed Emanuel Swedenborg (1688 – 1772).

Een goede theorie moet ook verklaren waarom de terrestrische planeten klein en rotsachtig zijn en de Joviaanse groot en gasvormig. Dat duidt op een fundamenteel verschil in hun ontstaan. De huidige theorie zegt, dat in de zonnenevel of protoplanetaire schijf zodra de zon begon te stralen er een differentiatie optrad, waarbij de gassen door het zonlicht zo werden verhit, dat ze naar buiten werden getransporteerd. Dus gassen als waterstof, water, helium, methaan, enz. werden uit het binnendeel van de protoplanetaire schijf verwijderd. Wat overbleef waren stofdeeltjes, die vooral uit silicaten en metalen (ijzer, nikkel, enz.) bestaan. De grens zal bij ongeveer 4 à 5 A.E.⁴⁴ van de zon gelegen hebben; net binnen de huidige baan van Jupiter. In de binnendelen, waar ook de aarde zou zijn ontstaan, is dan alle helium verdwenen en de waterstof, zuurstof en stikstof, die essentieel zijn voor ontstaan van leven, overleven alleen in chemische verbindingen in de stofdeeltjes.

In die binnenste delen klonteren stofdeeltjes, die op elkaar botsen, samen en vormen zo in de loop van een paar miljoen jaar objecten van enkele kilometers afmeting. Die klonterden weer samen tot grotere objecten, de zogenaamde planetesimalen en zo werden op den duur de terrestrische planeten gevormd. Men schat dat dit tot enkele honderden miljoenen jaren geduurd heeft.

Voor de Joviaanse planeten ligt de situatie geheel anders, want daar zijn wel gassen aanwezig. Er zijn nog steeds twee theorieën hiervoor die in aanmerking komen. De eerste is in feite die van Laplace, waarbij de zonnenevel fragmenteert en de fragmenten vervolgens samentrekken. De andere theorie is dat die planeten eveneens vormen door samenklontering van stofdeeltjes wat uiteindelijk een rotsachtig object oplevert van de massa van de aarde of enige keren dat. Alleen die kunnen ook gas aantrekken en daardoor groeien ze door. Uiteindelijk is er dan een rotsachtige kern met een enorme gasbol eromheen. In beide hypothesen wordt het verschil in samenstelling tussen de binnenste en buitenste planeten verklaard. Als vervolgens de zon de overblijvende restanten van de protoplanetaire nevel opslokt of door de straling de ruimte in blaast, blijft een zonnestelsel over met

⁴⁴De A.E. of Astronomische Eenheid is de afstand van de aarde tot de zon; zo'n 150 miljoen kilometer.

planeten in ruwweg cirkelvormige banen. Het nadeel van de tweede theorie is, dat het niet zeker is of die kernen van de planeten wel snel genoeg gevormd kunnen worden (de dichtheid aan stof in de nevel is er lager dan in de binnendelen waar de terrestische planeten vormen). Dat moet namelijk gebeurd zijn voordat de zon een echte ster wordt en de overblijfselen van de protoplanetaire schijf verdwenen zijn. De hypothese met de fragmentatie en samentrekking heeft het voordeel dat de tijdschaal relatief kort is.

Het is waarschijnlijk geen toeval dat Jupiter net voorbij het punt ligt waar de gassen konden overleven in de zonnenevel. Die hoopten zich daar op, zodat Jupiter een zeer zware planeet kon worden. De planetoïdengordel wordt gedacht te zijn ontstaan onder de invloed van Jupiter (en misschien Saturnus), waarbij resonanties (als hierboven genoemd voor de banen van Jupiter en Saturnus) de vorming van een uiteindelijke planeet verhinderden en de banen van veel brokstukken dermate verstoord werden dat ze uit het zonnestelsel geworpen werden. In de buitendelen van het zonnestelsel ontstonden kometen uit overgebleven gassen en omdat ze voor een groot deel uit (water)ijs bestaan wordt wel gedacht dat, als ze door onderlinge botsingen of verstoringen van buitenaf in banen komen, waarbij ze de binnendelen van de het zonnestelsel kunnen bereiken, ze op planeten botsen en op den duur ervoor gezorgd hebben dat er weer water op de aarde kwam.

Een kritische fase is in de laatste stadia van de vorming van Jupiter en Saturnus. Die twee planeten moeten ongeveer cirkelvormige banen hebben en dat wordt gedacht het resultaat te zijn van de weerstand (als een soort wrijving) van de overblijvende gasnevel als de planeten daar doorheen gaan. Het proces stabiliseert als ze in een stabiele (in ons geval 5 : 2; misschien oorspronkelijk 2 : 1) resonantie zijn gekomen. Het is overigens onduidelijk waar precies Uranus en Neptunus zijn gevormd (wellicht tussen Jupiter en Saturnus), maar die zijn in ieder geval onder invloed van de Jupiter en Saturnus naar hun huidige banen bewogen in de bijbehorende resonanties. Hoe dan ook, er is zeker een afstemming nodig tussen hoe snel de kern van met name Jupiter (en Saturnus) vormt en de snelheid waarmee de zon de restanten van de protoplanetaire schijf verwijdert. Ik kom hier later op terug. Overigens neemt men aan dat ook de terrestrische planeten in ruwweg cirkelbanen zijn gekomen door de ‘wrijving’ van het resterende gas in de zonnenevel.

◇

Er zijn nu 250 *exoplaneten* bekend rond andere sterren. Tot nu toe zijn die bijna allemaal veel zwaarder dan de aarde, want alleen dan zijn ze met de huidige technieken te vinden. Men gebruikt er in grote lijnen twee methoden voor. De eerste is de afwijking in de snelheid van de ster rond het gemeenschappelijk zwaartepunt van het planetenstelsel. De tweede methode meet heel nauwkeurig de helderheid van de ster en die wordt een minieme fractie minder als een planeet er voorlangs gaat. Beide methoden zijn nog niet gevoelig genoeg om planeten zo klein als de aarde en de tijdschalen te kort om planeten met omlooptijden van meer dan 10 jaar te vinden, maar dat zal niet al te lang meer duren. In tegenstelling tot ons zonnestelsel blijken er veel exoplaneten te zijn, die een massa hebben vergelijkbaar met Jupiter, maar die veel dichter bij hun ster staan dan wij bij onze zon. Deze zogenaamde ‘hete Jupiters’, die ook gevonden worden rond sterren die vergelijkbaar zijn met onze zon, kunnen daar nooit ontstaan zijn en moeten hun banen aanzienlijk hebben veranderd.

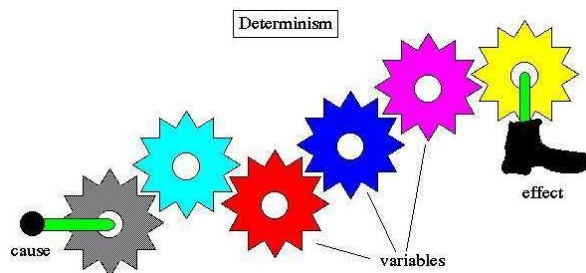
4.5. Samenvatting

De belangrijkste punten in dit hoofdstuk zijn de volgende:

- Drie minuten na de Big Bang was er alleen waterstof en helium.
- Na ongeveer 380.000 jaar ontstond er structuur in het heelal.
- Na een miljard jaar of zo ontstonden de eerste sterren en de melkwegstelsels.
- De sterren stralen omdat ze waterstof ‘verbranden’ in helium en een ster als onze zon kan dat meer dan tien miljard jaar volhouden.
- Zware sterren doen dat heel snel en blazen zichzelf op als supernovae; daarbij maken ze de elementen, waaruit wij en alles om ons heen bestaat.
- Zo’n 4.5 miljard jaar geleden zijn de zon, de aarde en de andere planeten ontstaan.



Figuur 36. Op deze foto van Nico Boerboom tijdens de tiende J.H. van Oosbreezing ben ik bezig de processen van vorming van chemische elementen in sterren uit te leggen.



Figuur 37. Voorstelling van het determinisme. Elke ‘oorzaak’ aan de linkerkant heeft onherroepelijk hetzelfde effect tot gevolg. (credit: David Schombert, abyss.uoregon.edu/~js/.)

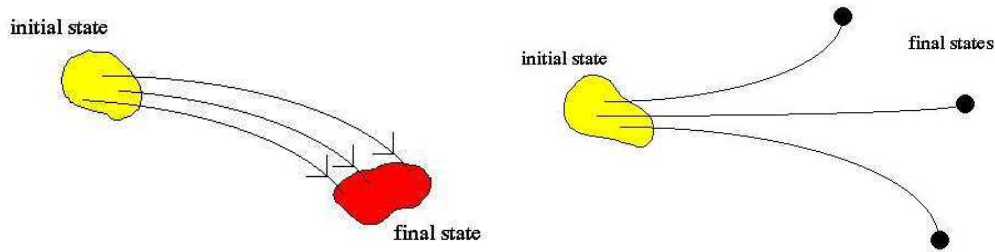
desondanks altijd interessante fysische gebeurtenissen zouden zijn in het heelal (Dyson 1979; zie ook 1988). Ik heb dat artikel besproken in mijn oratie. Dyson schrijft: “*If my view of the future is correct, it means that the world of physics and astronomy is also inexhaustable; no matter how far we go into the future, there will always be new things happening, new information coming in, new worlds to explore, a constantly expanding domain of life, consciousness and memory.*” Interessant is dat Dyson tot het nadenken hierover is gekomen vanwege een zin in het boek *The First Three Minutes* van Nobelprijswinnaar voor de natuurkunde Steven Weinberg, waarin hij zegt: “*The more the universe seems comprehensible, the more it also seems pointless*” (Weinberg 1977).

Hoe anders wordt daar nu over gedacht. Inmiddels zijn er zeer overtuigende aanwijzingen, dat weliswaar de zwaartekracht van de melkwegstelsels (inclusief hun donkere materie) de expansie afremt, maar dat er ook een nieuwe, nog geheimzinniger component in het heelal is, de ‘donkere energie’, die de expansie doet *versnellen!* Dit kan in de vorm zijn van een zogenaamde *kosmologische constante*, die Einstein introduceerde en later zijn grootste blunder noemde.⁴⁵ De aanwijzingen voor die toenemende uitdijing zijn heel sterk en komen uit een aantal volkomen onafhankelijke richtingen. En dat heeft enorme consequenties. We bevinden ons in de sterrenkunde in de situatie dat we van de inhoud van het heelal van slechts 4% weten wat het is, namelijk de gewone materie zoals we die kennen in sterren, planeten, interstellair gas en stof, enz. Daarnaast is 22% in de vorm van donkere materie, waarvan we alleen weten, dat het zwaartekracht uitoefent en de expansie vertraagt, en 74% in de vorm van deze donkere energie, die de expansie versnelt en op den duur de evolutie van die uitdijing van het heelal geheel zal bepalen.

Vroeger nam men aan, dat door de afnemende expansie van het heelal steeds meer delen binnen onze ‘horizon’ zouden komen⁴⁶ en dat we daardoor steeds nieuwe delen van het heelal zouden kunnen zien. Dat is nu volkomen anders geworden. In een versnelde expansie *verdwijnen* juist steeds meer delen van het heelal *over* onze horizon. Over zo’n 100 miljard jaar kunnen we niets meer zien van het heelal dan wat nu de zogenaamde ‘Lokale Groep’ van melkwegstelsels is, een klein groepje dat gedomineerd wordt door twee grote spiraallevels: ons Melkwegstelsel en de Andromedanevel (zie fig. 19). Kort na hun ontstaan hebben ze door hun onderlinge aantrekkingskracht hun relatieve snelheid, waarmee ze zich op grond van de kosmologische expansie van elkaar verwijderden, kunnen

⁴⁵Toen Einstein in 1915 zijn algemene relativiteitstheorie formuleerde was de uitdijing van het heelal nog niet ontdekt. Hij vond dat het heelal niet stabiel kon zijn en moest samentrekken en postuleerde daardoor een extra term in zijn vergelijkingen die als een afstoting zou werken om het heelal in evenwicht te houden. Toen Hubble de expansie van het heelal ontdekte in de jaren twintig, was deze term natuurlijk niet meer nodig. Overigens heeft onze landgenoot Willem de Sitter, leerling van de grondlegger van mijn instituut Jacobus C. Kapteyn en vele jaren directeur van de Leidse Sterrewacht, daar in die tijd nog een belangrijke rol bij gespeeld; er is dan ook een veel gebruikt heelal-model als oplossing van Einstein’s veldvergelijkingen, dat het Einstein-de Sitter model wordt genoemd.

⁴⁶Wij kunnen de expansie waarnemen tot deze gelijk wordt aan de lichtsnelheid en delen van het heelal, die we nu niet kunnen zien, zouden dan binnen die horizon komen. Dit klinkt misschien vreemd, want volgens Einstein kan materie niet sneller bewegen dan de lichtsnelheid. Echter de ruimte kan wel sneller expanderen dan het licht. Melkwegstelsels bewegen in de expansie met de ruimte mee en gaan ten opzichte daarvan dus altijd wel langzamer dan het licht.



Figuur 38. Aan de linker kant zien we dat een kleine verandering van een beginconditie een klein verschil uitmaakt in het resultaat. In het rechter plaatje veroorzaakt een klein verschil in de situatie aan het begin enorme verschillen in de uitkomst. Als deze verschillen exponentieel groeien met de afwijking in de begin-situatie heet zo'n systeem chaotisch. (credit: David Schombert, abyss.uoregon.edu/~js/.)

afremmen, waarna ze naar elkaar toe zijn gaan vallen en ze komen nu met een snelheid van ongeveer 120 kilometer per seconde op elkaar af. Al over zo'n 2 of 3 miljard jaar zullen ze 'botsen' en vervolgens in een enkel stelsel opgaan, dus in een tijd nog voordat de zon aan het eind van haar leven is. Zo'n botsing gaat overigens op een heel enkele, zeer hoge uitzondering na *niet* gepaard met botsingen van sterren. Op de lange duur blijft het waarneembare heelal beperkt tot wat over is van de samenklontering van deze twee melkwegstelsels.⁴⁷

Ik keer nu terug naar de kwestie van de voorspelbaarheid van de toekomst. Laplace, die we al eerder zagen als de grote pleitbezorger van het determinisme, bewees dat het zonnestelsel stabiel is, d.w.z. dat de kleine storingen, die de planeten op elkaar uitoefenen niet op de lange duur bij elkaar optellen, maar juist elkaar opheffen, waardoor de banen van de planeten wel in detail aan verandering onderhevig zijn, maar in grote lijnen dezelfde blijven.

Op die grond ook kon hij zijn deterministische gedachte onderbouwen dat de toekomst van het planetenstelsel op lange termijn berekenbaar zou zijn. Zijn determinisme kan schematisch geïllustreerd worden met fig. 37. Als je het handvat links beweegt, gaat onherroepelijk de schoen aan de rechterkant bewegen. Er is een strikte 'wet van oorzaak en gevolg'. Maar er zijn ook andere situaties. Kijk eens naar fig. 38. Links zien we een illustratie van een begin-toestand en die na enige tijd. De drie lijnen illustreren dat als de begin-situatie een klein beetje veranderd wordt, de toestand na enige tijd ook een klein beetje anders is. Maar dat hoeft niet altijd zo te zijn. Aan de rechterkant zien we wat een *chaotisch* systeem genoemd wordt. Verander je de begintoeestand een heel klein beetje dan kan dat na enige tijd enorm grote verschillen tot gevolg hebben. Formeel spreekt men van chaotische systemen zodra het om een exponentieel groeiend effect gaat. Dus maak je de afwijking in het begin zeg tweemaal zo groot dan is die in de latere toestand verschillend met een veelvoud van twee. Zulke systemen worden dan op den duur onvoorspelbaar.⁴⁸

Men illustreert de chaos-theorie wel met het volgende Engelse gedichtje (*'proverbial rhyme'*):

*For want of a nail the shoe was lost.
 For want of a shoe the horse was lost.
 For want of a horse the rider was lost.
 For want of a rider the battle was lost.
 For want of a battle the kingdom was lost.
 And all for the want of a horseshoe nail.*

⁴⁷Voor wie een gedetailleerde fysische discussie kan volgen verwijst ik naar het artikel van Cox & Loeb (2007) en referenties daarin.

⁴⁸Fysisch wordt het als volgt uitgedrukt. Als we in de beginconditie een verandering Δx_0 aanbrengen en als die na een tijd t aanleiding geeft tot een afwijking Δx_t , dan is de Lyapunov-coëfficiënt λ gedefinieerd als $\Delta x_t \sim \exp(\lambda t) \Delta x_0$. De Lyapunov-tijd is gelijk aan $1/\lambda$; deze is eindig voor chaotische en oneindig voor stabiele systemen.

Een bekend voorbeeld van een chaotisch systeem is het weer en, omdat het chaotisch is, is het zo moeilijk voorspelbaar. Hieraan is de naam van een van de grondleggers van de chaostheorie, Edward Lorenz (net op 16 april 2008 op negentig jarige leeftijd overleden) verbonden. Men doet het met computermodellen op grond van metingen aan de toestand van de atmosfeer. Maar zulke metingen zijn incompleet en hebben een beperkte mate van nauwkeurigheid. Men rekent dan verschillende modellen uit met kleine verschillen in de begin-toestand binnen de onzekerheden van die incompleetheid en onnauwkeurigheid van de metingen. Dan blijken de voorspellingen voor het weer voor enkele dagen later soms enorme verschillende uitkomsten te geven. Na een dag of tien zijn de verschillen zo groot, dat een redelijke voorspelling effectief onmogelijk wordt.

Voor de lange-termijn toekomst van het planetenstelsel, maar ook voor het ontstaan en de evolutie van leven op aarde is de stabiliteit van het planetenstelsel van belang en daarmee verbonden de vraag of de planeetbanen misschien ‘chaotisch’ zijn. Laplace stelde dat het planetenstelsel stabiel was en hij bedoelde daarmee, dat de banen en de storingen daarvan zodanig waren dat de planeten niet zouden botsen of een planeet uit het zonnestelsel zou kunnen worden geworpen. Men kan dit soort zaken nu accuraat bestuderen met computer simulaties. Die zijn overigens niet zo triviaal; afrondingen in vele decimalen na de komma kunnen zich vertalen in groeiende afwijkingen. Berekeningen zijn gedaan voor posities van de planeten tot enkele miljarden jaren in de toekomst.

De resultaten van zulke berekeningen geven aan, dat planeetbanen door de onderlinge aantrekking van de planeten inherent chaotisch zijn. Echter in ons zonnestelsel uit zich dat *niet* in een grote verandering van de banen zelf. Maar het komt wel tot uiting in de onmogelijkheid de positie in de grotendeels stabiele banen te voorspellen. Dit is iets anders voor de kleine, binnenste planeten (Mercurius, Venus, de aarde en Mars) dan voor de grote, zware buitenste planeten (Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus). Voor de binnenste planeten vindt men, dat de *posities* in die banen niet verder in de toekomst voorspeld kunnen worden dan zo’n 20 miljoen jaar. Voor de grote planeten is het minder zeker. De banen zelf zijn zeker wel weer praktisch stabiel, maar of de posities in die baan wel of niet chaotisch zijn is onzeker en het is dus onduidelijk hoe ver in de toekomst we die posities kunnen berekenen.⁴⁹

Ons zonnestelsel blijkt bijzonder robuust te zijn. De buitenste planeten, die het zwaarst zijn, domineren de evolutie van de banen, ook die van de binnenste planeten. Deze grote planeten vormen een dergelijk robuust systeem, omdat ze in ‘resonanties’ opgesloten zitten. De tijd voor Jupiter om 5 keer rond de zon te gaan is bijna precies gelijk aan de tijd voor Saturnus om dat 2 keer te doen. Voor Uranus en Neptunus geldt een dergelijke resonantie van 2 op 1. Tot op 1.5 procent nauwkeurig zijn de resonanties van de vier grote planeten 28 : 11 : 4 : 2. Dit resulteert in een zeer regelmatig terugkeren van dezelfde onderlinge configuratie en dat doet het zonnestelsel in zekere zin ‘op slot’.

In zekere zin had Laplace dus gelijk. Het planetenstelsel is bijzonder stabiel, maar het is tenminste gedeeltelijk chaotisch, waardoor een zinvolle voorspelling van de precieze onderlinge posities van de planeten op lange termijn onmogelijk wordt.

Blijft de vraag: ‘*In hoeverre is de toekomst voorspelbaar?*’ Het antwoord is, dat het in systemen met een chaotisch karakter fundamenteel onmogelijk is onbeperkt toekomstige situaties uit te rekenen uit de huidige. Dat betekent ook, dat de toekomst niet vast staat! Althans niet in alle detail. Als ergens een toevallige fluctuatie ontstaat kan die in zo’n omgeving in sommige, zeldzame gevallen uitgroeien tot een significante factor. Lorenz heeft in 1972 voordracht gegeven met de titel: “*Predictability: Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?*” De kans dat dit gebeurt is uiterst klein, maar niet nul.

⁴⁹Voor de binnenste planeten is de Lyapunov-tijd van de orde van 20 miljoen jaar. Voor de grote planeten is het onzeker; er zijn simulaties waar het meer dan 200 miljoen jaar is.

6. Toeval in de kosmische evolutie

If you come to a fork in the road, take it.
Yogi Berra.

*Mijn buurvrouw:
"Dit jaar ga ik voor de dertiende keer naar Lourdes.
Maar gelukkig ben ik niet bijgelovig."*
Freek de Jonge.

Er zijn een groot aantal ‘toevalligheden’, die van essentieel belang zijn geweest om leven als het onze in het heelal mogelijk te maken. We gaan eerst terug naar de vorming van de chemische elementen. De eerste hypothesen daarover hadden te maken met de hete fase van het vroege heelal en daaraan is de naam van George Gamow (1904 – 1968) verbonden. Hij beschreef als eerste de situatie, waarin het vroege, hete heelal uitsluitend uit protonen en neutronen (plus natuurlijk electronen) zou hebben bestaan, die vervolgens samen atoomkernen vormden. Zijn theorie wordt wel aangeduid als de $\alpha\beta\gamma$ theorie, omdat hij die publiceerde in een artikel dat als auteurs had Ralph Alpher, Hans Bethe en hijzelf en de achternamen lijken veel op de eerste drie letters uit het Griekse alfabet.⁵⁰ Helaas voor hen bleek dat niet te werken door de reeds genoemde afwezigheid van elementen met massa-getal 5 en 8 en we weten nu dat in het vroege heelal alleen waterstof en helium zijn gevormd. Men noemt dit nu de kosmologische nucleosynthese.

De overige chemische elementen zijn gevormd in sterren. De theorie van deze stellaire nucleosynthese is opgesteld door Margaret en Geoffrey Burbidge, Willy Fowler en Fred Hoyle, afgekort B²FH, en onafhankelijk door Alistair Cameron. Dat we het voorkomen van de chemische elementen in detail kunnen verklaren uit de kennis van kernreacties, bouw van atomen en van de structuur en evolutie van sterren vind ik persoonlijk een fascinerende demonstratie van de kracht van de wetenschap.⁵¹ De lange tijdschaal van deze vorming van elementen vergt een heelal met een lange leeftijd. Wikipedia heeft ook hierover een uitstekend artikel (Wikipedia 2008b).

Ik ga nu deze vorming van chemische elementen in wat meer detail behandelen om de toevallige, maar precieze afstemming van de bepalende krachten en processen te illustreren. Materie bestaat uit atomen en die atomen hebben een zware atoomkern met eromheen lichte, elektrisch negatieve electronen. De atoomkern bestaat uit positief geladen protonen en elektrisch neutrale neutronen. De neutronen houden via de sterke wisselwerking de protonen in de kern bij elkaar. Kort na de Big Bang was het te heet om atomen te vormen en bestond het heelal uit protonen, neutronen en electronen. Na drie minuten konden de protonen en neutronen samensmelten tot atoomkernen. De zwakke wisselwerking bepaalde hoeveel protonen en neutronen er bij de toen heersende temperatuur en dichtheid waren en wel in een verhouding van ongeveer 7 : 1. Door herhaalde invang ontstaat hieruit helium-4 (⁴He), dat bestaat uit twee protonen en twee neutronen totdat alle neutronen daarvoor zijn gebruikt. Er blijven dan flink wat protonen over en het geheel resulteert dan in een verhouding waterstof tot helium van 75% : 25%, vanwege de zojuist genoemde verhouding in het voorkomen van protonen en neutronen.

Atoomkernen worden bij elkaar gehouden door de sterke wisselwerking. Eigenlijk wordt die beschreven door de krachten tussen quarks, waaruit de protonen en neutronen bestaan, via de uitwisseling van gluonen, maar dat is hier niet van belang. Je kunt het voorstellen alsof de elektrisch neutrale neutronen de afstotende protonen bij elkaar houden. Voor lichte atomen heb je ongeveer

⁵⁰Gamow stond bekend als een groot liefhebber van practical jokes. Er wordt beweerd dat hij de theorie eigenlijk had uitgewerkt met zijn promovendus Alpher, maar Hans Bethe (die de Nobelprijs heeft gekregen voor zijn verklaring van energie productie in de zon en sterren als gevolg van kernreacties) had gevraagd zijn naam op het artikel te zetten om dat alfa-bèta-gamma effect te krijgen.

⁵¹Het zou een Nobelprijs hebben moeten opleveren voor de ontdekkers, maar het Nobel testament sluit uit dat meer dan drie personen die delen. Fowler heeft later voor zijn werk in het kader hiervan wel een (gedeelde) Nobel-prijs gekregen.

evenveel neutronen nodig als protonen. Voor zwaardere elementen zijn *meer* neutronen nodig. Bijvoorbeeld: lood heeft 82 protonen en 122 tot 126 neutronen en is stabiel. Uranium-238 heeft 92 protonen en 146 neutronen, maar bestaat desondanks gemiddeld niet langer dan 4.5 miljard jaar voordat het uit elkaar valt. Tot de meest robuuste atoomkernen in de natuur behoren die lichte atomen met een even aantal protonen en neutronen, zoals helium-4, koolstof-12, zuurstof-16, neon-20, magnesium-24. Ze kunnen worden gedacht te zijn opgebouwd uit helium-kernen en worden alfa-atomen genoemd. Alleen beryllium-8 is een merkwaardige uitzondering op die regel; het is zeer instabiel. Doordat ^8Be en ^5Li zo instabiel zijn, vormen er in de Big Bang geen elementen zwaarder dan helium!⁵² En dit komt door de details van de wetten die de zwakke en sterke wisselwerkingen beschrijven. Alle andere elementen moeten dus later gevormd zijn in sterren.

Sterren brengen het grootste deel van hun leven door met ‘verbranden’ van waterstof in helium in hun centrale delen. Als de temperatuur zo’n tien miljoen graden is, kunnen protonen met elkaar reacties aangaan, omdat ze dan genoeg energie hebben om de onderlinge electrostatische afstoting te overwinnen. Onze zon kan deze waterstof-verbranding zo’n 10 miljard jaar volhouden. Een zwaardere ster doet dat veel sneller, b.v. een ster 15 keer zo zwaar als de zon doet er maar 10 miljoen jaar over om in de centrale delen alle waterstof te verbranden.

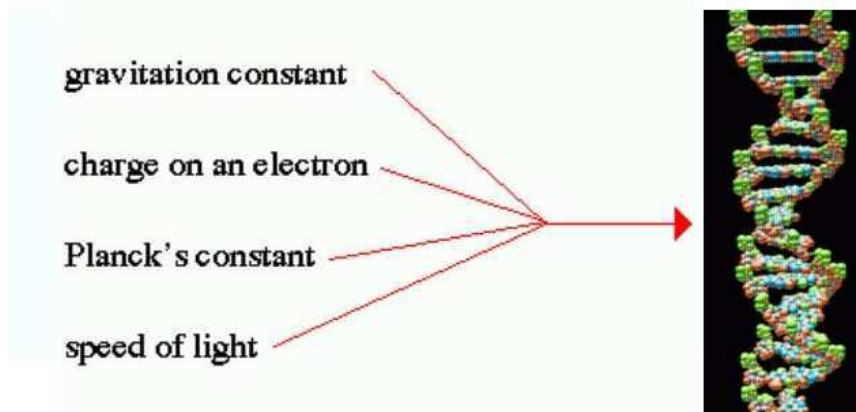
Als de waterstof opgebruikt is en er geen energie meer wordt geproduceerd, trekt de kern, die nu uit helium bestaat, samen en daar wordt het dan veel heter. Helium atomen zullen dan kunnen botsen als ze bij honderd miljoen graden of zo hun onderlinge afstoting kunnen overwinnen door hun grotere snelheden. Bij de dan heersende dichtheid en temperatuur bestaat er een toestand van beryllium-8 die net lang genoeg ($\sim 10^{-16}$ sec) bestaat om een redelijke kans te hebben nog een helium atoom in te vangen, zodat koolstof-12 wordt gevormd. Hierbij worden in kernreacties overigens ook zuurstof en andere elementen geproduceerd, met name de alfa-elementen die we boven zagen. Een ster als onze zon zal na deze fase van helium-verbranding wel verder samentrekken, maar de temperatuur wordt nooit hoog genoeg voor verdere samensmelting van atoomkernen. De zon dooft langzaam uit als witte dwerg.

We kijken nu eens naar een ster die beduidend zwaarder is dan de zon. In het centrum van zo’n ster wordt uiteindelijk alles omgezet in zwaardere elementen. Daarbij komt veel energie vrij. Maar het stopt als alles ijzer is geworden, want om nog zwaardere elementen te maken blijkt er energie nodig te zijn in plaats van dat er energie vrijkomt. Die kern dooft dan uit en stort in onder invloed van zijn eigen zwaartekracht. De ijzer-atomen worden daardoor zeer dicht op elkaar gedrukt. Uiteindelijk worden door de grote dichtheid de protonen en electronen ‘samengeperst’ tot neutronen. Daarbij komen neutrino’s met heel veel energie vrij. De materie, die dan alleen uit neutronen bestaat, is dan net zo compact als in een atoomkern en verder samentrekken kan niet.

De buitendelen van de ster storten nu ook in, want ze worden niet meer daartoe verhinderd door de energie-productie in de ster, en vallen met grote snelheid op de ‘neutronenster’ in het centrum. De dichtheid van materie wordt zo groot, dat er een sterke schokgolf ontstaat. De dichtheid in die schok is zo enorm groot, dat zelfs de neutrino’s er niet doorheen kunnen en dus kan veel van de in de ster aanwezige energie, die voor een flink deel in de neutrino’s zit, niet naar buiten. Het is weer de zwakke wisselwerking, die bepaalt, dat de neutrino’s niet door de schokgolf kunnen. Het resultaat is dat de ster explodeert en zich opblaast als een supernova. Daarbij treden ook kernreacties op en zo vormen kleine hoeveelheden van de zwaardere elementen. En door de explosie worden die en de reeds eerder gevormde elementen toegevoegd aan het interstellair medium.

Het is dus zo dat er voor de vorming van de chemische elementen in het vroege heelal en in sterren een en ander aan bijzondere omstandigheden nodig is geweest.

⁵²Ongeveer een honderdduizendste (10^{-5}) van de materie was in de vorm van ‘zware waterstof’ (^2H) en helium-3 (^3He). Verder was 10^{-10} in de vorm van lithium-7 (^7Li) en 10^{-12} lithium-6 (^6Li). Ook vormde tritium (^3H) en beryllium-7 (^7Be), maar die atomen zijn instabiel en vervallen op tijdschalen van respectievelijk jaren en dagen in helium-3 en lithium-7.



Figuur 39. De natuurconstanten zijn precies zo, dat leven als het onze kan ontstaan. (credit: David Schombert, abyss.uoregon.edu/~js/.)

- Als de zwakke wisselwerking een beetje zwakker was geweest, dan waren er veel meer neutronen geweest en zou in de Big Bang alle materie helium zijn geworden en zou er geen waterstof meer over zijn geweest. Verder zou de schokgolf in de pre-supernova transparant geweest zijn voor neutrino's en zouden er geen supernova explosies zijn geweest.
- Als die een beetje sterker was geweest, dan zou er in de Big Bang weliswaar geen of weinig helium zijn gevormd, maar zouden in de zware sterren vlak voor de supernova-fase de neutrino's niet aan de instortende kern ontsnapt zijn. Dan zouden er ook geen supernova explosies hebben kunnen plaatsvinden en zouden er geen elementen als koolstof en zuurstof in het interstellair medium zijn geweest. In beide gevallen zouden er dus geen bouwstenen voor leven als het onze aanwezig zijn geweest in het heelal.
- De sterke wisselwerking is precies zo, dat beryllium-8 zeer instabiel is. Anders zouden er na de Big Bang alleen de zwaarste elementen zijn geweest.
- En die is ook precies zo, dat er een toestand van beryllium-8 is waarbij juist in sterren koolstof kan worden gevormd en ook tegelijkertijd zo, dat niet onmiddellijk alle materie zuurstof en nog zwaardere elementen wordt.

Dus de fundamentele wisselwerkingen in de natuur zijn precies zo, dat er (1) waterstof overblijft na de Big Bang, (2) er elementen nodig voor het ontstaan van leven worden gevormd en (3) die elementen ook aan het gas tussen de sterren worden toegevoegd.

Een andere manier om afstemming te illustreren is de volgende. Er is een door theorieën onbepaalde verhouding tussen de sterkte van de zwaartekracht en de elektrische krachten. Als die anders zou zijn geweest dan die nu is, zou de leeftijd van sterren volkomen anders zijn geweest. De verhouding is nu zo, dat levensduren van sterren als onze zon van de orde van miljarden jaren zijn. Aan de andere kant is de tijdschaal van biologische evolutie ook van de orde van miljarden jaren. Er zijn wel schattingen gemaakt van hoeveel toevallige, evolutionaire stappen er nodig zijn om menselijk DNA te krijgen. Misschien niet erg betrouwbaar, maar wel opmerkelijk dat zulke heel ruwe schattingen aangeven dat er minstens van de orde van miljarden jaren voor nodig zijn. Er blijkt een afstemming te zijn, die ontwikkeling van leven als het onze absoluut vereist: tussen fundamentele natuurkundige constanten en tussen de tijdschalen van de expansie van het heelal, de vorming van zwaardere chemische elementen, de vorming van sterren en planetenstelsels, de levensduur van sterren als de zon en de biologische evolutie. Ik ga enkele aspecten hiervan op een meer gedetailleerde, fysische manier illustreren. Wie niet de achtergrond heeft om dit te volgen kan dit overslaan en verder lezen bij het symbool ♣ op pagina 60.

Laten we eerst een kijken naar natuurconstanten. Allereerst de gravitatieconstante G . Als je zwaartekracht F tussen twee lichamen met massa M_1 en M_2 (bijvoorbeeld in kilogram) op afstand r (in meters) wilt uitrekenen vermenigvuldigt je die twee massa's en deelt ze door de afstand in het kwadraat. Maar om de kracht zelf te krijgen is er een getal G (de gravitatieconstante van Newton) nodig:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

en $G = 2.997 \times 10^8 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-2}$. Dit getal is experimenteel bepaald en volgt (vooralsnog?) niet uit een ultieme, alles overkoepelende Theorie van Alles.

Licht van frequentie ν (trillingen per seconde = Herz) kan gezien worden als bestaande uit pakketjes energie van $E = h\nu$ Joule. Hierbij is h de constante van Planck en dat is weer een slechts experimenteel te bepalen grootte. Meestal gebruikt men $\hbar = h/2\pi$ en dat is $1.05 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ sec}^{-1}$. Een deeltje met massa m kan omgekeerd als een golf worden opgevat en de bijbehorende golflengte (de zgn. Compton golflengte) is $\lambda = h/mc$, waarbij c de lichtsnelheid is. Deze is $2.997 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$.

De electrostatische kracht wordt beschreven met een vergelijkbare formule als voor de zwaartekracht; de wet van Coulomb

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

met de ladingen Q in eenheden Coulomb (C)⁵³. In bovenstaande formule is k de constante van Coulomb, die meestal geschreven wordt als op de tweede manier met de di-electrische constante $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-2} \text{ C}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ sec}^2$. Deze constante verbindt de dynamische eenheden van massa, lengte en tijd met de electromagnetische.

De constante van Newton G , de constante van Planck h , de lichtsnelheid c en de di-electrische constante ϵ_0 zijn natuurconstanten die uitgedrukt worden in fundamentele eenheden als meter, seconde, kilogram, Coulomb, enz. Hun numerieke waarde hangt dus af van het eenhedenstelsel, dat we gebruiken, alhoewel dat de constanten zelf natuurlijk niet beïnvloed. Ze kunnen ook gecombineerd worden tot dimensieloze constanten.

De electromagnetische wisselwerking wordt gekarakteriseerd met de 'fijnstructuur constante'. Deze is een voorbeeld van zo'n *dimensieloze* grootte en is gerelateerd aan de verhouding van enerzijds de energie die nodig is om b.v. twee electronen tegen hun electrostatische afstoting in van oneindige afstand tot die van hun Compton golflengte te brengen en anderzijds hun energie in massa (volgens $m_e c^2$). Met de lading e van het electron kan de fijnstructuur constante geschreven worden als

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c 2\pi\epsilon_0} = 7.297 \times 10^{-3} \sim 1/137.$$

In de quantumelectrodynamica is α belangrijk als een 'coupling constant', die bepalend is voor de sterkte van de interactie van fotonen en electronen. De waarde van de fijnstructuur constante α is bepalend voor het optreden van essentiële processen in de stellaire nucleosynthese.

Tenslotte noem ik nog een andere fundamentele, dimensieloze grootte, die ook niet uit een theorie is af te leiden en in zekere zin dus ook uit de lucht komt vallen; dit is de verhouding van de massa van een electron en een proton: $\beta = m_e/m_p \sim 1/1836$.

Deze constanten kunnen met de massa van een proton $m_p = 1.67 \times 10^{27} \text{ kg}$ worden gecombineerd in een dimensieloos getal

$$\alpha_G = \frac{G m_p^2}{\hbar c} \sim 10^{-39}$$

⁵³De definitie van de Coulomb is dat het de elektrische lading is die door een draad per seconde stroomt als de stroomsterkte 1 Ampère is.



Figuur 40. Een cartoon van Sydney Harris (Harris 2008).

Deze constante is een maat voor de relatieve sterkte van de electromagnetische kracht en de gravitatie en ongeveer gelijk aan de verhouding van de *electrische* aantrekkingskracht en de *zwaartekracht* tussen een proton en een electron.

Volgend op werk van Arthur Eddington (1882 – 1944), die fundamenteel werk aan de structuur van sterren deed, heeft de fysicus Paul Dirac (1902 – 1984) het volgende opgemerkt. De verhouding van de leeftijd van het heelal en de tijd die het licht erover doet om een waterstof-atoom te kruisen is uiteraard een dimensieloze constante en de waarde ervan is $\sim 10^{39}$. Dat is dezelfde orde-grootte als α_G . Dit is opmerkelijk en werd dus als niet toevallig gezien. Het heet wel de *Large Number Hypothesis*. Er is geen enkele reden voor dat deze fundamentele (dimensieloze) getallen binnen een factor 10 gelijk zouden zijn.⁵⁴

Er is een zeer leesbaar boek van Sir Martin Rees⁵⁵, *Just Six Numbers* (Rees 1999), waarin hij zes kosmologische getallen de revue laat passeren, die precies zijn ‘afgestemd’ om ons bestaan mogelijk te maken. Ze betreffen naast de α_G van hierboven ook een getal dat de balans kenmerkt tussen zwaartekracht en expansie van het heelal, de hoeveelheid materie in het heelal t.o.v. de expansie, de hoeveelheid donkere energie t.o.v. de gewone en donkere materie, de verhouding tussen gravitationele bindingsenergie van een willekeurige structuur en de massa energie ervan (mc^2) ervan, hetgeen ontstaan van structuur bepaalt, en de drie-dimensionaliteit van de ruimte. Hij laat zien dat deze allemaal de waarden moeten hebben die ze hebben om het mogelijk te maken dat sterren, planeten en mensen ontstaan.

⁵⁴Overigens had Eddington er nog aan toegevoegd, dat hij berekende dat het aantal deeltjes in het heelal 10^{79} zou zijn, dus ruwweg het kwadraat van 10^{39} .

⁵⁵Martin Rees is Astronomer Royal, d.w.z. hij is het aanspreekpunt voor de Britse koningin in zaken van astronomie en verwante zaken. Oorspronkelijk was de Astronomer Royal ook de directeur van de Royal Greenwich Observatory; deze sterrenwacht bestaat niet meer. Wel bestaat nog de Royal Observatory Greenwich bij Londen, dat een museum herbergt op de Greenwich nul-meridiaan.

Laten we ook eens kijken naar tijdschalen. De leeftijd van het heelal is 1.37×10^{10} (13.7 miljard) jaar. Dit is direct gerelateerd aan de grote waarde van α_G . Denk eens aan een situatie waar de electromagnetische krachten hetzelfde waren (zodat de atomen en wij dus net zo zijn als we nu zijn), maar α_G enkele ordegrootten groter zou zijn, dan zou de expansie van het heelal veel sneller afgeremd zijn en het heelal weer ingestort zijn voordat leven had kunnen ontstaan.

Het blijkt mogelijk te zijn een schatting te maken van de tijd waarop een ster als de zon dus kan blijven stralen als gevolg van waterstof-verbranding, uitgedrukt in de fundamentele constanten die de revue zijn gepasseerd. Deze is

$$T_\star \sim \frac{\alpha^2 \hbar}{\beta^2 \alpha_G m_p c^2} \sim 10^{10} \text{jaar.}$$

Ik verwijs voor meer detail naar het reeds genoemde, uitvoerige boek over *The Anthropic Cosmological Principle* (Barrow & Tipler 1986) en artikelen van Carr & Rees (1979), Carter (1983), Hogan (2000) en Barrow (2001). Deze publicaties zijn wel zeer fysisch en mathematisch.



Dus fundamentele fysische constanten *dicteren* dat sterren als de zon levensduren van de orde van miljarden jaren moeten hebben. Nogmaals, *het is opmerkelijk maar voor het ontstaan van leven essentieel, dat de leeftijd van het heelal, de tijd die sterren als de zon kunnen leven, de tijd nodig om de chemische elementen in sterren te vormen en de tijd nodig voor de biologische evolutie op aarde allemaal van dezelfde ordegrootte (d.w.z. gelijk binnen een factor 10) zijn.*

De discussie in deze sectie geeft dus aan, dat de natuurwetten precies zo zijn, dat de chemische elementen in die verhouding zijn gevormd die noodzakelijk is om leven te doen ontstaan (met name relatief grote hoeveelheden van het essentiële waterstof, koolstof en zuurstof). Verder zijn de natuurwetten precies zo, dat de leeftijd van het heelal, de tijdschaal van vorming van de chemische elementen en de levensduur van sterren als de zon allemaal van de orde van miljarden jaren zijn, net als de benodigde tijdschaal voor biologische evolutie. Dit betekent dus, dat er zeer veel ‘toevallige’ overeenkomsten zijn, die wel weliswaar precies zo hadden moeten zijn om leven te kunnen laten ontstaan, maar waar we geen fundamentele verklaring voor hebben waarom het zo is. Er is dus een afstemming van fysische wetten en grootheden op elkaar, die laat zien, dat er een grote mate van samenhang is. Die constatering betekent overigens nog niet dat er dus een vooropgezet ontwerp, laat staan een doel of bedoeling achter moet zitten.

In dit kader is het zinvol even de zogenaamde GAIA-hypothese van James Lovelock te beschouwen. Lovelock stelde in 1972 voor, gebaseerd op onderzoeken aan de planeet Mars en diens atmosfeer, dat het systeem aarde dat bestaat uit geologische en biologische componenten, te beschouwen als een soort zelf-regulerend super-organisme. Op zich is zijn conclusie dat de ontwikkeling van de aarde alleen goed begrepen kan worden als de rol van zowel levende organismen als niet-levende bestanddelen beide erbij worden betrokken, niet onjuist. Ook hier is samenhang en afstemming fundamenteel. Een sterkere vorm van de GAIA-theorie, waarbij het super-organisme door Lovelock wordt omschreven als ‘*the largest living creature*’, is controversieel. Daardoor krijgt de theorie dan een metafysische en teleologische betekenis en deze uitbreiding van het GAIA concept is voor mij een overbodige en ook onnodige stap. Het belang van GAIA is dat het aandacht vraagt voor de samenhang van de dode en levende materie voor het voortbestaan van de aarde. Mijn collega Ton Schoot Uiterkamp, hoogleraar milieukunde en directeur van het Centrum voor Energie- en Milieukunde IVEM aan de Groningse universiteit, kenmerkt de GAIA-hypothese op een aansprekende wijze als (niet meer dan) een “krachtige metafoor”.

7. Het antropisch principe

*“Contrarywise”, continued Tweedledee, “If it was so, it might be,
and if it were so, it would be; but as it isn’t, it ain’t.”*
Lewis Carroll.

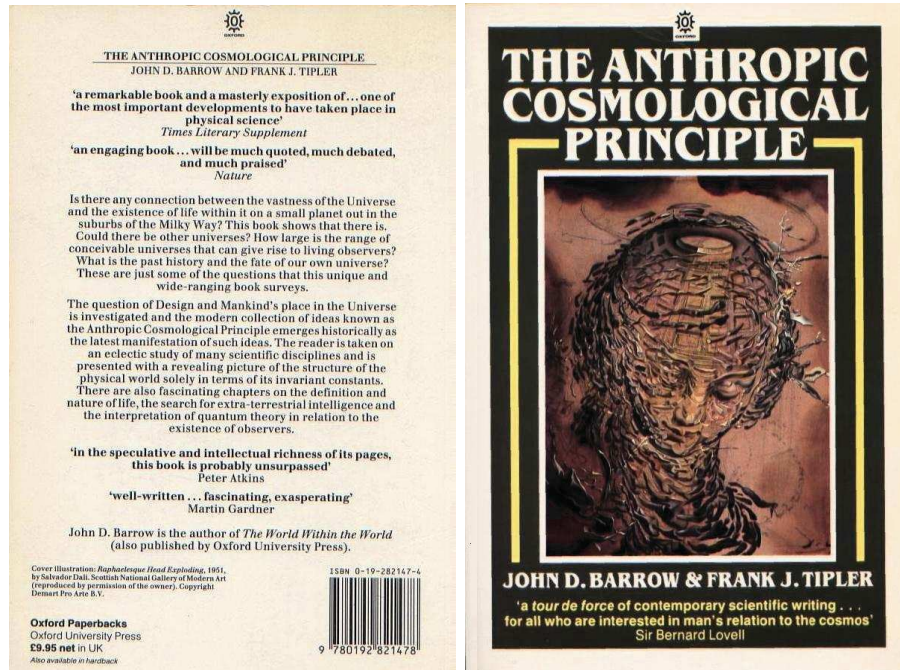
Het Antropisch Principe legt een verband tussen de manier waarop het heelal in elkaar zit en onze aanwezigheid erin om het waar te nemen en de vraag te stellen, waarom het heelal is zoals het is. Het voert terug tot Robert H. Dicke en is verder ontwikkeld door Brandon Carter, Martin Rees en in groot detail verder uitgewerkt en samengevat door John D. Barrow en Frank J. Tipler (Barrow & Tipler 1986).

Het stelt in de meest algemene vorm, dat om intelligent leven *als het onze* en de bestudering en waarneming van het heelal zoals wij doen mogelijk te maken, het heelal wel moest zijn zoals het is. In de definitie van Barrow & Tipler (1986): *“The observed values of all physical and cosmological quantities are not equally probable but they take on values restricted by the requirement that there exist sites where carbon-based life [als het onze dus] can evolve and by the requirements that the Universe be old enough for it to have already done so.”* Dit hangt samen met de suggestie, die soms gemaakt wordt, dat de constanten uit de natuurkunde misschien helemaal niet constant zijn, maar wellicht variëren met de leeftijd van het heelal of zelfs dat er andere delen van het heelal zouden zijn waar ze andere waarden hebben en waar dus leven als het onze niet mogelijk is.⁵⁶ Er zijn ook modellen, waarin men poneert, dat er wellicht andere heelallen zijn, die samen een *multiversum* vormen. Tegenstanders verwerpen het antropisch principe als nietszeggend, omdat het onderliggende idee principieel onbewijsbaar en onweerlegbaar is en dus niet zou passen in de methode van de natuurwetenschap. Een ander bezwaar is dat er mogelijke andere vormen van intelligent leven zouden kunnen zijn dan het onze, bijvoorbeeld met erfelijk materiaal dat niet gebaseerd is op DNA dat een ruggengraad van koolstofatomen heeft.

Er is ook een vorm die men het *sterke antropisch principe* noemt. Dit stelt dat *“the Universe must have those properties which allow life [in welke vorm dan ook] to develop within it at some stage in its history”* (Barrow & Tipler 1986). Hierin zit iets meer van een doel of bedoeling. Het kan betekenen dat (1) er maar één heelal bestaat dat juist zo in elkaar zit, dat ‘waarnemers’ als wij mogelijk (of misschien zelfs onvermijdelijk) zijn of (2) dat er een heel scala van heelallen bestaat waarvan het onze die (of één van die) is waar leven mogelijk is (het multiversum dus). Barrow & Tipler definiëren nog een *witeindelijk antropisch principe*, dat erop neerkomt dat in een heelal als het onze leven onherroepelijk moet ontstaan en als het er eenmaal is ook niet meer uitsterft. Deze laatste vorm is meer metafysisch en teleologisch en ik laat die verder buiten beschouwing.

Voor de duidelijkheid wijs ik erop dat het antropisch principe iets anders is dan *‘intelligent design’*. Dit is de opvatting dat de eigenschappen van het heelal en organismen alleen verklaard kunnen worden als het werk van een intelligente ‘ontwerper’. Bij intelligent design wordt ervan uitgegaan dat de complexiteit van levende organismen nooit tot stand heeft kunnen komen als gevolg van *ongeleide* evolutie. Volgens sommige aanhangers zijn levende systemen *‘onherleidbaar complex’* (irreducibly complex), d.w.z. dat alle onderdelen nodig zijn om het te laten functioneren. Als maar één onderdeel niet werkt, werkt het hele systeem niet, en men stelt dan dat het ontstaan van zulke systemen alleen mogelijk is als gevolg van een gerichte evolutie. Een ander begrip in de context van intelligent design is *specifieke complexiteit* (specified complexity). Het gebruikelijke voorbeeld om te illustreren wat men daaronder verstaat is dat een enkele letter van het alfabet specifiek is, maar niet complex en een willekeurige reeks letters wel complex maar niet specifiek. Maar een geschreven tekst als een samenhangend en leesbaar boek is zowel complex als specifiek.

⁵⁶Uit metingen van spectraallijnen van quasars, die op afstanden van miljarden lichtjaren staan, is gevonden dat binnen het waarneembare heelal over de leeftijd van het heelal de fijnstructuur constante α constant is geweest tot op een niveau van tenminste één op een miljoen.



Figuur 41. Het toonaangevende boek van Barrow & Tipler (1986) over het antropisch principe.

DNA, dat de erfelijke code bevat, is dat ook. Men stelt dan dat dit niet door willekeurige processen tot stand heeft kunnen komen en dat er dus een ontwerp aan ten grondslag moet hebben gelegen. Aanhangers van de Darwinse evolutie stellen juist dat de complexiteit het gevolg is van *ongeleide* natuurlijke selectie, waarbij vormen met minder gunstige eigenschappen minder kans hebben zich te vermenigvuldigen en daardoor uit de populatie verdwijnen.

Intelligent design kan, maar hoeft niet, gezien te worden als een moderne vorm van het teleologisch argument voor het bestaan van God. Specifieker is ‘*creationisme*’, waarin men stelt, dat het ontstaan van het heelal, zon, aarde, leven en de mens het gevolg zijn van een scheppingsdaad, zoals bijvoorbeeld beschreven in de Bijbel. Dit wordt dan letterlijk genomen en dat kan zover gaan als de Ierse geestelijke James Ussher (1581 – 1656), die aan de hand van *Genesis* heeft bepaald, dat de schepping heeft plaatsgevonden op 23 oktober 4004 v. Chr.

De vraag naar het waarom de wereld is zoals die is gaat ver terug. Van Koning Alfons X ‘de Wijze’ van Castilië (1221 – 1281), die ook astronoom⁵⁷ was, wordt vermeld dat hij verzucht zou hebben, dat als de Almachtige God hem om advies zou hebben gevraagd alvorens de Schepping uit te voeren hij wel iets eenvoudigers zou hebben aanbevolen.

Er is een anecdote, dat Einstein de vraag gesteld zou hebben: “*Hoeveel keus had God eigenlijk toen Hij de wereld schiep?*” In zijn boek *A Brief History of Time* schrijft Stephen Hawking, dat als je naar de huidige fysica kijkt volgens hem het antwoord is dat er helemaal niets te kiezen was (Hawking 1988). Dat past natuurlijk in de traditie dat de natuurkunde op het punt stond in een Theorie van Alles alle fysische wetten vanuit fundamentele principes te verklaren. In een recent interview in de ‘Wetenschap en Onderwijs’ bijlage van NRC-Handelsblad van 21 juli 2007, zegt de Nederlandse theoretische fysicus Eric Verlinde: “*Mja, maar men is nog steeds op zoek naar die ene*

⁵⁷ Alfons liet tafels (tabellen) opstellen, die de posities van de planeten aangeven, die bekend staan als de ‘Alfonsinische tafels’ en lange tijd in gebruik zijn geweest. Ze waren gebaseerd op berekeningen op grond van het oude geocentrische model van het zonnestelsel, dat door Ptolemaeus (87 – 150) was opgesteld en op dat moment al meer dan een millennium werd gebruikt, maar was aangepast met nauwkeuriger metingen in de tijd van Alfons.

formule om, zeg maar, alles samen te vatten.” Op de vraag van de interviewer (Karel Knip) of we die gaan vinden, antwoordt hij: *“Ik hoop het wel. Ik hoop ook degene te zijn, die hem vindt. Feit is dat ergens een principe ligt dat we nog niet gevonden hebben en dat alles mooi in elkaar past.”* En als hem gevraagd wordt wat de snaar-theorie ons dan uiteindelijk gaat leren zegt hij na enige aarzeling: *“Vooruit maar, [de] snaar-theorie gaat ons een antwoord geven op de vraag hoe de oerknal tevoorschijn is gekomen.”* Dit is allemaal wel erg absoluut.

Susskind (2005) meent dat er een crisis is in de snaar-theorie, omdat die een aantal oplossingen toelaat van maar liefst 10^{500} (!), d.w.z. een getal met 500 cijfers voor de komma.⁵⁸ Susskind poneert nu dat er een ‘*Cosmic Landscape*’, een soort kosmisch landschap, is waarin al die mogelijkheden gerealiseerd zijn. Ons heelal correspondeert dan met die ene, waarin de natuurwetten juist zo zijn als we waarnemen en waar wij kunnen ontstaan om die waarnemingen te doen. Een vorm van het antropisch principe dus. Dat lijkt een poging om de dans te ontspringen dat er een intelligente ontwerper of een vooropgezet doel zou zijn geweest. Vandaar zijn terugverwijzen naar de woorden van Laplace die ik in de inleiding aangehaald heb, dat hij geen noodzaak ziet voor de hypothese, dat er een God bestaat. Ik verbaas mij erover, dat dit Cosmic Landscape zo gemakkelijk wordt geaccepteerd als alternatief van een Theorie van Alles, waaruit de natuurconstanten met grote nauwkeurigheid zouden worden verklaard. Immers ons heelal lijkt zeker antropisch te zijn, maar ik kan me heel goed voorstellen, dat er intelligent leven zou kunnen zijn in een heelal waar die constanten alleen maar een klein beetje anders zouden zijn geweest.

Het is overigens ook zo, dat er wetenschappers zijn, die het antropisch principe categorisch verwerpen als zijnde onwetenschappelijk. Het heeft ook wel iets van een cirkel-redenatie in zich. Immers, wij mensen bestaan, en dat kan alleen als het heelal er uit ziet zoals het er uitzien, want als het anders was geweest dan hadden we nooit bestaan. Dat klinkt onwetenschappelijk en tautologisch en lijkt geen enkele diepere betekenis te hebben. Als Goethe Faust tegen de ‘Geest’ laat zeggen: *“Der du die weite Welt umschweifst, Geschäftiger Geist, wie nah fühl ich mich dir!”* volgt als antwoord van de Geest: *“Du gleichst dem Geist, den du begreifst, nicht mir!”*. Faust denkt dat hij de geest begrijpt, maar in feite gelooft hij in zijn eigen projectie en voorstelling ervan.⁵⁹ Ik stel daar echter tegenover, dat de essentie van het antropisch principe juist is, dat er een diepgaande samenhang is, waarvan de diepgang en reikwijdte open staan voor wetenschappelijk onderzoek.

Ik heb in bovenstaande de structuur van het heelal geschetst en aangegeven hoe melkwegstelsels, sterren en planeten worden gedacht te zijn ontstaan en hoe ze evolueren. Ik heb voorbeelden gegeven, alhoewel niet uitputtend, hoe de precieze afstemming van de natuurwetten en -constanten in vele gevallen essentieel zijn voor het ontstaan van leven als het onze. Ik zet nog even enige van de meest in het oog lopende zaken op een rij:

- Als de zwaartekracht veel zwakker zou zijn t.o.v. electromagnetisme zouden sterren veel kleiner zijn en veel sneller hun waterstof verbanden. En omgekeerd. Als die twee krachten vergelijkbaar zouden zijn in sterkte dan zouden sterren al ineengestort zijn voordat leven een kans had te ontstaan.
- De verhouding tussen de zwaartekracht en dus ook de hoeveelheid donkere materie in het heelal ten opzichte van de expansie is zodanig dat het heelal miljarden jaren oud kan worden. De hoeveelheid donkere energie in het heelal is klein genoeg om de expansie dermate langzaam te versnellen, dat melkwegstelsels konden ontstaan waarin sterren chemische elementen vormen en het intersterstellaire medium verrijken.

⁵⁸In de snaar-theorie is de wereld tien-dimensionaal en moeten er dus zes dimensies ‘opgerold’ worden om onze vier-dimensionale ruimte-tijd wereld te krijgen. Er zijn kennelijk (het is niet mijn specialiteit) zoveel mogelijkheden om dit te doen.

⁵⁹Ik dank Manfred Horstmanshoff voor dit bruikbare citaat.

- De sterkte van de zwaartekracht t.o.v. de energie in materie (volgens $E = mc^2$) is zo, dat in het vroege heelal precies voldoende structuur kon ontstaan.
- De sterke wisselwerking is veel sterker dan de zwaartekracht en als ze nog sterker zou zijn geweest zou al de waterstof in het heelal al heel snel zijn omgevormd tot helium. Als het veel sterker was geweest dan is het mogelijk dat er überhaupt geen atomen zouden zijn gevormd.
- De zwakke wisselwerking wordt voor een deel bepaald door de verhouding van de massa tussen electronen en protonen. Een andere verhouding zou hebben kunnen betekenen dat er geen neutronen of juist alleen maar neutronen zouden zijn geweest. Het massaverschil tussen een neutron en een proton is groter dan de massa van een electron. Als dit niet zo zijn geweest waren neutronen stabiel en zouden er geen zwaardere elementen zijn gevormd.
- De vorming van chemische elementen in de Big Bang is gestopt bij helium. Anders was er wellicht geen waterstof meer over geweest.
- De condities in het binnenste van helium-verbrandende sterren is precies zo, dat een aangeslagen toestand van beryllium-8 kan voorkomen, dat de vorming van koolstof en zuurstof mogelijk maakt. De fijnstructuur constante moet nogal nauwkeurig de waarde hebben die het heeft om dit mogelijk te maken.
- De zwakke wisselwerking is zodanig, dat supernova explosies mogelijk worden en de producten van nucleosynthese aan het interstellaire gas kunnen worden toegevoegd.
- De verhouding van de electromagnetische kracht en de zwakke wisselwerking is zodanig, dat sterren als de zon een levensduur van miljarden jaren hebben. De tijdschalen van de expansie van het heelal, van de vorming van chemische elementen door sterren, de levensduur van sterren als onze zon en de tijdschaal nodig voor biologische evolutie zijn precies zo, dat leven als het onze kan ontstaan.

Het feit, dat wij er zijn, het heelal waarnemen en de vraag stellen waarom het heelal is zoals het is, heeft geen fundamentele verklaring vanuit de fysische wetten en hun constanten. Hier komt het antropisch principe te hulp. De kennelijke toevalligheden en precieze afstemmingen zijn nodig, omdat wij er anders niet zouden zijn geweest. De toevalligheden worden dan uitingen van een enorme samenhang, die nodig was om leven in het heelal op tenminste één plek te laten ontstaan.

Eén van de gedichten van Rutger Kopland heet *I cavalli di Leonardo*, hetgeen zonder Italiaans te kennen wel te begrijpen is als *de paarden van Leonardo*. Het is duidelijk over wie het gaat (er staat trouwens ook nog *Florence* boven). Het is uit de bundel *Voor het verdwijnt en daarna* uit 1985. Het zegt iets over hoe het alsmat bestuderen iets wel begrijpelijker maakt maar tegelijkertijd ongrijpbaarder:

Al die schetsen die hij naliet—	hij moet hebben willen weten hoe een paard wordt gemaakt, en hebben gezien dat dat niet kon,
eindeloze reeksen herhalingen: spierbundels, pezen, knoken, gewrichten, die hele machinerie van drijfriemen en hefboomen waarmee een paard beweegt,	hoe het geheim van een paard zich uitbreidde onder zijn potlood. Maakte de prachtigste afbeeldingen, bekeek ze, verwierp ze.
en uit duizenden haarfijne lijntjes haast onzichtbaar zacht in het papier verdwijnende huid van oorschelpen, oogleden, neusvleugels, huid van de ziel—	

“*Hoe het geheim van een paard zich uitbreidde onder zijn potlood.*” Hoe meer we het heelal bestuderen, hoe groter zowel de omvang als de verwondering worden over de samenhang en afstemming.

8. Leven in het heelal

*Sometimes I think we're alone; sometimes I think we're not.
In either case, the thought is staggering.*
Arthur C. Clarke.

De vraag wordt vaak gesteld of er ander intelligent leven in het heelal is. *Zijn we alleen?* Is leven als het onze regel of uitzondering? Dit is een fascinerende vraag en, zoals science-fiction auteur Arthur C. Clarke (net enige weken voor mijn J.H. van Oosbreelezing overleden) in bovenstaand citaat zo treffend zegt, het antwoord is even verbijsterend of het nu ‘ja’ of ‘nee’ is.

Vanaf de jaren zeventig van de twintigste eeuw heeft de *Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI)* veel aandacht gekregen, mede door een effectieve lobby van voorstanders van grote investeringen in apparatuur om de bewust of onbewust uitgezonden radiostraling van buitenaardse beschavingen op te vangen. Het uitgangspunt was, dat het enorme aantal sterren in het heelal (10^{11} melkwegstelsels met elk 10^{12} sterren geeft 10^{23} sterren) wel moet betekenen dat het niet alleen op deze aarde kan zijn geweest dat leven ontstond. Men nam aan, dat een redelijke fractie van de sterren als onze zon wel een planetenstelsel zou hebben met dan meestal een planeet als de aarde en als dat zo was, dan was het ontstaan van leven en biologische evolutie eigenlijk onvermijdelijk. Er waren schattingen op die grond dat de dichtstbijzijnde intelligente beschaving die in staat zou zijn radiosignalen uit te zenden misschien ‘slechts’ 100 lichtjaar of zo van ons verwijderd zou zijn. Overigens is er een experiment, waaraan iedereen kan deelnemen met zijn computer, waarbij waarnemingen met een radioteleskoop worden geanalyseerd om te zien of er regelmatige patronen in te ontdekken zijn die van buitenaardse beschavingen afkomstig zouden kunnen zijn. Deze zijn verkregen met een extra ontvanger, die als een lifter meegaat met het waarneemprogramma van de grote Arecibo radioteleskoop in Puerto Rico (zie fig. 42). Dit project heet *SETI@home* (zie setiathome.berkeley.edu/) en in Nederland *SETI@Netherlands* (www.seti.nl/).

Tot nu toe hebben deze zoektochten nog niets opgeleverd en ik vermoed –zoals uit onderstaande zal blijken–, dat het voorlopig ook niet zal gebeuren. Maar dat nog is geen reden het niet te doen! Wat dat betreft ben ik het eens met mijn collega Jill Tarter, die tijdens de laatste (2006) *General Assembly* van de Internationale Astronomische Unie in Praag in een zogenaamde ‘Invited Discourse’, die in principe door alle 2000 of zo aanwezige astronomen kon worden bijgewoond, aanspoorde een uitgebreid waarneemproject te gaan uitvoeren met een speciaal daarvoor te bouwen radioteleskoop. Zij schaaft zich (en daarin ben ik het dus niet met haar eens) onder die astronomen, die het standpunt verdedigen dat leven waarschijnlijk welig tiert in het heelal. Zij besloot haar lezing met: *“SETI might succeed in my lifetime, or in my granddaughter’s, or never. There is no satisfactory way to make an estimate. The wisest summary still remains: [...] The probability of success is difficult to estimate, but if we never search the chance of success is zero.”*(Tarter 2007)

Voor leven, althans zoals wij het kennen, is een planeet nodig. Het is de laatste tijd uit uitgebreide studies duidelijk geworden dat veel sterren planetenstelsels hebben. Echter tot nu toe kunnen we (op een enkele uitzondering na) alleen planeten zien, die ongeveer zo zwaar zijn als Jupiter, maar de meeste staan ook op kleinere afstand van hun ster dan de aarde van de zon staat. Planeten als de aarde zijn nog niet ontdekt. Dat is niet verbazend, want dat is heel moeilijk; planeten met een massa als die van Jupiter of de andere grote planeten ontdekken nadert de grens van de huidige mogelijkheden. Er is eerlijk gezegd wel één planeet ontdekt met vergelijkbare condities als op aarde, maar die is wel vijf keer zwaarder dan de aarde en de ster, waar die omheen draait, is veel lichter en zwakker dan de zon en de planeet staat dus veel dichterbij haar ster dan wij bij de zon.

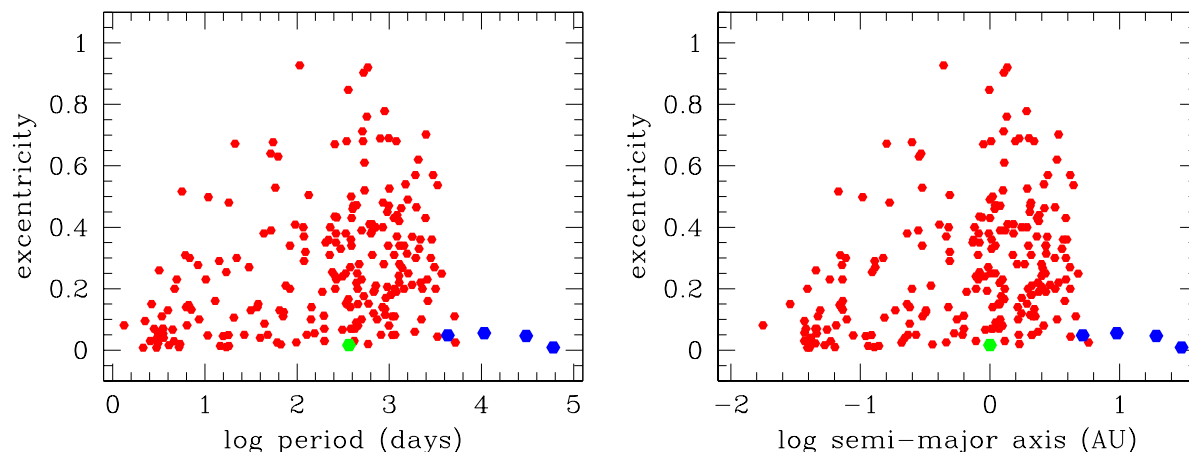
Tot nu toe zijn de andere planetenstelsels over het algemeen *niet* als het onze; de banen zijn veel langgerechter. In fig. 43 zien we de verdeling van de excentriciteit van alle in januari 2008 bekende planeten als functie van de omlooptijd om de ster (links) en van de afstand ervan (rechts).



Figuur 42. De radioteleskoop te Arecibo, Puerto Rico, die naast het ‘gewone’ wetenschappelijke onderzoek gebruikt is om te zoeken naar signalen van buitenaardse beschavingen. Dit gebeurt zonder het reguliere waarneemprogramma te verstoren. De teleskoop kijkt min of meer recht omhoog en is gebouwd in een ruwweg sferisch dal van zo’n 300 meter diameter. (www.nsf.gov/news/mmg/media/images/arecibo3.jpg; the Arecibo Observatory is part of the National Astronomy and Ionosphere Center NAIC, a national research center operated by Cornell University under a cooperative agreement with the National Science Foundation NSF.)

Sites als exoplanets.org of exoplanet.eu houden dit bij. In de figuur zien we de excentriciteit van de baan, d.w.z. in hoeverre die afwijkt van een cirkel. Is de excentriciteit 0 dan is de baan cirkelvormig, neemt die toe dan wordt de baan steeds langgerechter tot excentriciteit 1, waarbij het een lijn is geworden waarlangs de planeet heen en weer beweegt. Dit laatste is in dat extreme geval niet fysisch en komt dus ook niet voor. Planeten met omlooptijden boven drieduizend dagen of zo (of meer dan vijf keer zover van hun ster dan wij van de zon) kunnen nog niet gevonden zijn, omdat dit soort werk pas een jaar of tien mogelijk is. Fig. 43 laat zien, dat stelsels als het onze uitzonderlijk zijn. Onder de banen van de exoplaneten komen alle mogelijke excentriciteiten voor.⁶⁰ De blauwe punten corresponderen met de banen van grote planeten in ons zonnestelsel en die liggen allemaal juist bij hele kleine excentriciteiten. Ons planetenstelsel is wellicht niet uniek, maar wel zeer uitzonderlijk. Het groene punt is voor de baan van de aarde en die ligt ook op een uitzonderlijke plaats, alhoewel

⁶⁰Er is een tendens voor planeten met kleine afstand tot hun ster of kleine omlooptijd om meer cirkelvormige banen te hebben. Dit is waarschijnlijk het gevolg van getijdewerking van de ster op de planeet en met het feit, dat in sterk elliptische, kleine banen de planeten dicht bij hun ster komen en erdoor kunnen worden opgeslokt.



Figuur 43. De verdeling van parameters van de banen van de 239 exoplaneten, waarvoor die in januari 2008 bekend waren. De verticale as is de excentriciteit of afplatting van de vorm van de baan, d.w.z. '0' voor zuiver cirkelvormig en '1' voor een lijn. Links op de horizontale as de logaritme van de omlooperperiode rond de ster in dagen (dus '0' betekent 1 dag, '1' 10 dagen, '2' 100 dagen, enz.) en rechts idem voor de halve lange as van de baan (in 'Astronomische Eenheden'; dat is de gemiddelde afstand van de aarde tot de zon). De gegevens in deze figuur zijn ontleend aan *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* (exoplanet.eu/catalog.php). De grote planeten Jupiter tot en met Neptunus zijn weergegeven als de blauwe punten en de aarde in het groen.

we ons moeten realiseren, dat de planeten in de figuur zwaarder of veel zwaarder zijn dan de aarde.

Er zijn numerieke experimenten gedaan, die aangeven dat het te verwachten is dat de meeste planetenstelsels excentrische banen hebben. Niet alleen zijn de banen net als in ons zonnestelsel chaotisch, maar zulke planetenstelsels zijn ook dynamisch 'actief', d.w.z. dat de banen zelf voortdurend veranderen door de onderlinge verstoringen. Dit in tegenstelling tot ons planetenstelsel, dat dynamisch 'inactief' is. Het voorkomen van bijna cirkelvormige banen zou wel eens alleen onder bijzondere omstandigheden kunnen plaatsvinden, terwijl het de normale gang van zaken is, dat de onderlinge aantrekkingskrachten van de proto-planetten juist elkaar in elliptische banen dwingen. Ons zonnestelsel met z'n vrijwel cirkelvormige banen in één vlak zou dan een hoge uitzondering zijn.

Er is zeer recent (nadat ik de J.H. van Oosbreelezing gaf) een belangrijke studie verschenen (Thommes et al. 2008), waarin simulaties worden gedaan van de vorming van planetenstelsels. Het blijkt dat er twee belangrijke tijdschalen zijn, namelijk die waarop reuzenplaneten als Jupiter vormen en die waarop de protoplanetaire schijf van gas en stof verdwijnt (hetzij door vorming van planeten, opslokken door de zon of door wegblazen met een sterk stralingsveld). Is de massa van de schijf te klein, dan vormen er gewoon geen gasplaneten als Jupiter. Is de schijf massief, dan vormen meerdere grote gasplaneten en dat gebeurt snel. Als het gas verdwenen is is er veel interactie door deze zware planeten en het resultaat is dat ze elkaars banen sterk veranderen en bijna altijd worden die dan zeer langgerekt. In het geval dat de schijf niet te zwaar is, vormt een enkele of een paar reuzenplaneten en dat gebeurt dan op vergelijkbare tijdschaal als het verdwijnen van gas en stof. Het resultaat is dan een planetenstelsel met een paar Joviaanse planeten en die bewegen dan in banen met kleine afwijkingen van een cirkelvorm. Ons zonnestelsel is volgens deze studie eerder uitzondering dan regel en misschien wel hoogst zeldzaam.

We zagen, dat de grote planeten met hun bijna precies cirkelvormige banen en de resonanties tussen hun omlooptijden (en dus ook hun afstanden tot de zon) een uiterst stabiele situatie creëren,

die wel eens zeer uitzonderlijk zou kunnen zijn en wellicht juist noodzakelijk om de tijd te geven voor de biologische evolutie. Als Jupiter in een sterk elliptische baan zou zijn rondgegaan, zou de aarde (en zeker ook Mars) waarschijnlijk uit het zonnestelsel gegooid zijn door de zwaartekracht van Jupiter. Als een planetenstelsel sterk elliptische banen heeft zal het over het algemeen instabiel zijn en als het eenmaal zo is, wordt het ook nooit weer zo geordend als het onze.⁶¹ Overigens zou de biologische evolutie waarschijnlijk niet plaats hebben kunnen vinden als de aarde in een sterk elliptische baan om de zon zou gaan, alleen al door grote fluctuaties in temperatuur die daar het gevolg van zouden zijn geweest.

De lange-termijn stabiliteit van ons planetenstelsel is essentieel voor het ontstaan van leven en zo'n planetenstelsel is in dat opzicht kennelijk eerder uitzondering dan regel. Dat wij hier op deze aarde wonen in dit planetenstelsel heeft een antropische reden. Maar wat we nu weten van andere planetenstelsels wijst eerder op een zeldzaamheid van voorkomen van leven in het heelal dan van een veelvuldigheid.

Een ander punt dat opmerkelijk is betreft de verhouding van de massa's van de aarde en de maan. Deze is namelijk ongebruikelijk groot. De grote planeten hebben manen waarvan de grootste vergelijkbaar zijn met onze maan, terwijl die planeten zelf meer dan honderd keer zo zwaar zijn als de aarde. De andere kleine planeten hebben geen manen⁶². Opmerkelijk is ook, dat de maan en de zon aan de hemel praktisch even groot zijn, namelijk bijna precies een halve graad in diameter. Is dat toeval?

Het antwoord is: wellicht gedeeltelijk niet. Dat de aarde een relatief zware maan heeft stabiliseert namelijk de oriëntatie van de rotatie-as van de aarde (zoals numerieke experimenten hebben aangetoond). Daardoor zijn de seizoenen over geologische tijdschalen stabiel geweest en dat geeft aanleiding tot een relatief klein temperatuurverschil tussen polen en equator en minimaliseert in het algemeen klimaatveranderingen over deze lange tijdschalen. Daar komt nog bij, dat er ook de mogelijkheid is, dat de maan de aarde tot op zekere hoogte beschermt tegen invallen van grote meteorieten. De maan trekt zulke meteorieten uit hun baan en sommige computer experimenten geven aan dat dit vaker resulteert in een wegbuigen van de aarde dan andersom.⁶³ Dat de maan dus niet klein is t.o.v. de aarde heeft wellicht een antropische achtergrond. Dat de zon en maan bijna *precies* dezelfde hoekmaat hebben aan de hemel is dan wel toeval (of geluk).

Ik denk zelf, dat het voorkomen van leven uiterst schaars is in het heelal. Zoals Fermi heeft opgemerkt in wat de 'Fermi-paradox' is gaan heten, is het de vraag waarom er, als er zoveel intelligente beschavingen in het heelal zijn, geen duidelijke aanwijzingen voor zijn gevonden. Er is daarom volgens mij geen enkele reden te denken, dat als er ergens in het heelal, niet te ver van ons, intelligent leven zou zijn. Immers, de helft van zulke beschavingen is naar statistische verwachting slimmer dan wij of verder ontwikkeld en zouden wel weten hoe effectief onze aandacht te trekken. Als ze een manier zouden hebben uitgevonden om naar andere sterren te reizen en de aarde bezocht zouden hebben, zouden ze wel laten weten dat ze hier geweest zijn. Ik weet wel, dat er mensen zijn die beweren buitenaardse wezens te hebben ontmoet, maar dat is altijd onder merkwaardige omstandigheden. Vaak ook zijn het zonderlinge individuen die zulke claims uiten en nooit zijn er duidelijke en overtuigende bewijzen. Intelligent leven zou dat vast slimmer aanpakken en ervoor

⁶¹Door de tweede hoofdwet der thermodynamica neemt de entropie altijd toe en niet andersom.

⁶²De manen Phobos en Deimos van Mars zijn waarschijnlijk planetoïden, die zijn ingevangen lang nadat de planeten waren gevormd. Venus en Mercurius hebben helemaal geen manen.

⁶³De rol van inslag van grote meteorieten op de biologische evolutie is een actief veld van onderzoek, vooral na de wijdverbreide acceptatie van de theorie, dat de inslag van een object van enkele kilometers diameter in het gebied van Yucatan in het Caraïbisch gebied het massale uitsterven van leven, waaronder dinosauriërs 65 miljoen jaar geleden, zou hebben veroorzaakt. Er zijn verder aanwijzingen, dat eerdere zulke massale uitstervingen het resultaat zijn van enorme vulkanische activiteit. Onze aanwezigheid mag wellicht gefaciliteerd zijn door de inslag in Yucatan; het is daarom nog niet gezegd, dat deze catastrofale gebeurtenissen een essentiële, antropische rol spelen.



Figuur 44. Op 24 december 1968 maakten astronauten vanuit Apollo 8, de eerste mensen die om de maan cirkelden, deze beroemde foto van de opgaande aarde. Waarschijnlijk zijn het bestaan van planetenstelsels als het onze en van planeten als onze aarde en het voorkomen van intelligent leven uiterst zeldzaam in het heelal. (sse.jpl.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=1793; credit: JPL.)

zorgen dat er geen twijfel over zou bestaan en zou dus juist niet op mysterieuze wijzen contacten leggen met soms al merkwaardige personen. Ook zijn er geen signalen uit de ruimte opgevangen. Als er intelligente beschavingen op relatief nabije lokaties in het heelal zouden zijn, hadden ze vast wel kans gezien ons op een overtuigende wijze daarvan in kennis te stellen. Mijn standpunt is dus, dat aangezien er geen enkele aanwijzing voor zulk intelligent leven elders in het heelal is aangetroffen, dit niets anders kan betekenen dat het dan dus wel zeldzaam zal zijn.

Het antropisch principe heeft overigens ook rechtstreeks iets te zeggen over het voorkomen van buitenaards leven als het onze. We hebben gezien, dat de tijdschalen van het heelal, evolutie van sterren als de zon en van biologische evolutie miljarden jaren moeten zijn. Dan moet het heelal dus ook miljarden jaren oud zijn en dat kan alleen als het ook miljarden lichtjaren groot is. Het is heel goed mogelijk, dat het nodig is om alleen al aan de condities te voldoen zodat op z'n minst op één plek leven als het onze kan ontstaan, het heelal al zoveel sterren moet hebben als het nu heeft. Frank Tipler, één van de schrijvers van het boek in fig. 41 (Barrow & Tipler 1986), heeft een uitgebreide argumentatie gepresenteerd om aan te tonen dat wij alleen zijn in de kosmos (Tipler 1980). Ik zal niet uitsluiten dat er elders intelligente wezens als wij zijn in het heelal, maar ik geloof dat leven eerder uitzondering is dan regel en dus uiterst zeldzaam.



Figuur 45. Foto genomen tijdens de J.H. van Oosbreelezing. (credit: Nico Boerboom)

9. En hoe nu verder?

*If only God would give me a clear sign!
Like making a large deposit in my name at a Swiss bank.*
Woody Allen.

*If a man wants to be atheistic,
it is his God-given right to be an atheist.*
Michael Patton.

In het onderstaande geef ik mijn eigen synthese van het hier besprokene. Ik laat eerst als illustratie van het spanningsveld tussen wetenschap en religie een polemieek de revue passeren over het gebruik van Bijbelteksten in de officiële presentatie van mijn universiteit.

Het motto van mijn universiteit is een Bijbelse spreuk uit Psalm 119: “*Verbum domini lucerna pedibus nostra*”, voor niet-latinisten (als ik) vertaald als “*Het Woord des Heren is een licht voor onze voeten*”. Het staat ook in het wapen van de Rijksuniversiteit Groningen, zij het afgekort.

In de UK⁶⁴ van 13 september 2007 schrijft een studente filosofie en wiskunde, Clazina Wansbeek, dat een bijbelse tekst als deze niet past bij een openbare instelling. Ze vindt het veel passender dat dit wordt vervangen door de woorden van Immanuel Kant: *Sapere aude*” (Durf te denken). Immers, zegt ze: “*Het fundament van onze beschaving is de Verlichting*”. Een week later reageert promovendus economie en bedrijfskunde Jochen Mierau met het voorstel “*Vincit omnia veritas*” (De waarheid overwint alles), want “*we moeten immers de religieuze ketenen afwerpen en de wereld winnen met de waarheid*”. Weer een week later komt Daniel Overgaauw, student rechten, met steun voor het motto⁶⁵ door te stellen dat het deel is van de traditie van onze universiteit. Wetenschapsredacteur van de UK, René Franssen, meent dat “*het geen toeval is dat de wetenschap juist in het christelijke Europa is ontstaan*”, waar “*het beseft dat de wereld Gods schepping is en zelf niet goddelijk de Middeleeuwen de vrijheid gaf die wereld te onderzoeken*”. Gijs Bakker, student International Economics & Business en geschiedenis, vraagt zich af “*in hoeverre tradities behouden moeten blijven ten koste van vernieuwing*”. Wansbeek zelf weer, nu samen met Han Thomas Adriaenssen (student filosofie, Italiaans en Russisch), komt dan Franssen tegemoet met een voorstel dat recht doet aan de wetenschapsgeschiedenis, namelijk dat Bologna de eerste universiteit was en dus een citaat van Dante toepasselijk is: “*Lasciate ogni speranza, voi ch’entrate*” (Laat alle hoop varen, gij die hier binnentreedt). In de UK van 1 november neemt student filosofie en Nederlands Anton Jumelet het op voor ons motto: “*Cultuurhistorisch zijn we nog steeds christenen. [...] We gaan op zoek en lezen Kant, Dante of de Bijbel. Want het Woord des Heren is nog immer een lichtend baken op ons pad.*” En hiermee sluit de redactie van de UK de discussie.

Bovenstaande toont ons dat er over wetenschap en religie, universiteit en kerk, Kant, Dante of Bijbel geen overeenstemming valt te vinden; zelfs ons poldermodel biedt geen uitkomst. Er zijn mensen, die vinden dat religie en wetenschap streng gescheiden moeten worden gehouden. Ikzelf ben eigenlijk best tevreden met het motto; van mij mag het blijven.

Ik citeer, voordat ik mijn standpunt en conclusies toelicht, de laatste woorden van Leonard Susskind in *The Cosmic Landscape* (Susskind 2005):

“And what about the biggest question of all: who or what made the universe and for what reason? Is there a purpose to it all? I don’t pretend to know the answer. Those who would look at the Anthropic Principle as a sign of a benevolent creator have found no comfort in these pages. The

⁶⁴UniversiteitsKrant, een onafhankelijk weekblad van de Rijksuniversiteit Groningen. Naast informatieve gedeelten, agenda’s en dergelijke zijn er ook opiniërende stukken, interviews en ingezonden brieven.

⁶⁵En pareert de opmerking van Wansbeek over de Verlichting met erop te wijzen dat er voor 1650 zeker zoiets bestond als een Nederlandse beschaving.

laws of gravity, quantum dynamics, and a landscape, together with the laws of large numbers are all that's needed to explain the friendliness of our patch of the universe.

But on the other hand, neither does anything in this book diminish the likelihood that an intelligent agent created the universe for some purpose. The ultimate existential question: 'Why is there Something and not Nothing?' has no more or less of an answer than before anyone ever heard of String Theory. If there was a moment of creation, it is obscured from our eyes and telescopes by the veil of explosive Inflation that took place during the prehistory of the Big Bang. If there is a God, she has taken great pains to make herself irrelevant.

Let me then close this book with the words of Pierre-Simon Laplace that opened it: "I have no need of this hypothesis."

Susskind verwerpt de hypothese van het bestaan van een God als onnodig en kiest voor zijn kosmisch landschap, waarvan we alleen ons heelal kunnen zien en bestuderen. Maar, is dat Landscape echt wel zo rijk en is het wel een landschap met zoveel perspectief? Voor mij niet. Mijn eerste reactie op het concept van het 'Cosmic Landscape' of een 'Multiversum' was ongeveer gelijk aan diezelfde woorden van Laplace: *"Ik heb geen behoefte aan die hypothese"*. Ik zie een voor mij veel vruchtbaarder landschap, dat in mijn beleving niet zo wanhopig tracht het woord God of een andere beschrijving van het begrip schepper (laat staan het geloof erin) te vermijden en in mijn gevoel heel goed past in het apostolisch gedachtegoed. En dat heeft dan de volgende elementen:

- Voorspelbaarheid is in de natuurwetenschap een rekbaar begrip, dat afhangt van welke toepassing het betreft. De chaostheorie (en ook de quantummechanica) heeft hieraan een nieuwe betekenis gegeven. De toekomst is niet volledig bepaald en dat is maar goed ook, want anders was er voor ons in ons leven niet veel te kiezen of om verantwoordelijkheid voor te dragen.
- Het heelal zal nooit aan een einde komen, maar wel zullen de zon en op den duur alle sterren uitdoven en biologisch leven onmogelijk worden. Door de versnellende expansie zal het waarneembare deel van het heelal kleiner en kleiner worden. Dat past niet bij de gedachte dat er een bestemming of een einddoel bij de schepping hoort. Dan is er ook geen Heilsplan en er is geen diepere betekenis in de gedachte dat de mens de Kroon der Schepping zou zijn.
- Het is waarschijnlijk dat intelligent leven in het heelal uiterst zeldzaam is en we moeten ernstig met de mogelijkheid rekening houden, dat de kans dat we met andere beschavingen in contact komen verwaarloosbaar is. Maar dat is geen reden om SETI te stoppen.
- Als er geen absolute zin aan de schepping valt toe te kennen, blijft zingeving dus iets van hier en nu. We zijn onderweg, zoekend naar een zinvolle besteding van onze levenstijd. De weg, die wij volgen, kan wel op elk moment een richting gegeven worden, maar dat is iets anders dan het richten naar een uiteindelijk doel of bestemming. Het is als de meanderende rivier, waarvan de stroom uitsluitend door de lokale omstandigheden wordt bepaald.
- Desondanks is er wel een alles omvattende samenhang in de natuur en kennelijke toevalligheden zijn een absolute noodzaak voor onze aanwezigheid hier en nu. Het hele heelal zit precies zo in elkaar zodat –en niet noodzakelijk opdat– leven als op de aarde mogelijk is.
- Het is fascinerend om te zien hoe alles in het heelal precies op elkaar is afgestemd, hoe het heeft evolueert en hoe alles heeft samengewerkt om de vorming van melkwegstelsels, sterren, planeten, chemische elementen en uiteindelijk planten, dieren en mensen mogelijk te maken. Er is een groeiend besef van de verbanden en samenhang, die wetenschappelijk onderzoek voortdurend en in toenemende mate openbaart.
- Het antropisch principe is meer dan een simplistische benadering, een excuus om geen diepere fysische verklaringen te hoeven zoeken. Het leert ons, dat er 'waarom'-vragen zijn, die uit natuurwetenschappelijk onderzoek voortkomen, maar waarvoor het niet zinvol is die met dezelfde wetenschappelijke methoden te benaderen. Het vormt als het ware een afbakening van

de exacte wetenschap, waar voorbij het terrein van de religie, filosofie of levensbeschouwing ligt. De verbinding tussen die twee terreinen is voor mij de verwondering over de samenhang en daarbij blijkt het antropisch principe dan een krachtig hulpmiddel te zijn.

Voor mij is de zin van de vragen, waarover ik het gehad heb, gelegen in het stellen ervan en niet in het vinden van antwoorden. Het gaat dus om het onderweg zijn en niet om het bereiken van een einddoel of een uiteindelijke bestemming. Je hoeft geen absoluut doel voor ogen te hebben om je dagelijks leven zin te geven in onderlinge, liefdevolle verhoudingen tussen mensen. Vanuit de verwondering over de samenhang in de schepping ontstaat het gevoel verbonden te zijn met een groter geheel. Daaruit kun je “je uren goed besteden”⁶⁶.

Waarom zijn we dan hier? Zijn het heelal en onze aanwezigheid slechts een ‘schitterend ongeluk’? Daar heb ik geen allesomvattend antwoord op. Maar ik leef dan ook liever met vragen dan met antwoorden en verkies de weg boven de herberg.

Ik eindig met het gedicht van Rutger Kopland, waarvan ik de laatste regel aanhaalde bij de titel van hoofdstuk 2. Het komt uit de bundel *Een Lege Plek om te Blijven* (Kopland 1975).

Geef mij maar de brede, de trage rivieren,
de bewegingen die je niet ziet maar vermoedt,
de drinkende wilgen, de zinloze dijken,
een doodstille stad aan de oever.

Geef mij maar de winter, het armoedige
landschap, de akker zonder het teken van
leven, de kracht van krakende heide.

Geef mij maar de kat als hij kijkt voor
hij springt, om te vechten, te vluchten,
te paren, te jagen, als hij kijkt.

Geef mij maar een paard in galop, maar
op zijn zij in het gras. Geef mij

maar een vraag en geen antwoord.

⁶⁶Uit lied 38, Liedboek voor gemengd koor, Het Apostolisch Genootschap.



Figuur 46. Een cartoon van Sydney Harris (Harris 2008). Johannes Kepler is één van mijn grote voorbeelden (zie van der Kruit 1993). Hij formuleerde de ‘Kepler-wetten’ van de planeetbanen en bepaalde dat het ellipsen zijn met de zon in één van de brandpunten (zijn eerste wet). Kepler legde het fundament voor de experimentele wetenschap en doorbrak het bijna twee millennia oude dogma van Plato en Aristoteles, dat de planeten alleen op superposities van uniforme cirkelbewegingen zouden kunnen bewegen. Op grond van de wetten van Kepler kon Newton zijn zwaartekrachttheorie opstellen. Ik hoop niet, dat het het publiek en mij in deze lezing zo is vergaan als Kepler en zijn gehoor in deze cartoon.

De beamer-presentatie, behorende bij deze 10^e J.H. van Oosbreelezing, is in pdf-format beschikbaar op: www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/vanoosbreebeamer.pdf.

Literatuur

- Barrow, J.D., 2001, *Cosmology, Life and the Anthropic Principle*, Annals of the New York Academy of Sciences **950**, 139 (www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/118979485/pdfstart of www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/barrow.pdf)
- Barrow, J.D., 2004, *The Constants of Nature: From alpha to omega – the numbers that encode the deepest secrets of the Universe*, Random House, New York
- Barrow, J.D., 2008, *Cosmic Imagery; Key images in the history of science*, Random House, New York
- Barrow, J.D. & Tipler, F.J., 1986, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford
- Boeke, K., 1957, *Cosmic View: the Universe in 40 jumps*, John Day, London (www.vendian.org/mncharity/cosmicview/ of nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Boeke/frames.html)
- Bok, B.J. & Jerome, L.E., 1975, *Objections to Astrology*, Prometheus Books, Buffalo; in het Nederlands uitgegeven in 1976 als *De Mythe van de Astrologie*, voorwoord B. Delfgaauw, Wereldvenster, Baarn
- Bouman, B. & Westerveld, W., 1949, *Wording en Ontplooiing*, Cantate, Het Apostolisch Genootschap, Baarn (www.apgen.nl/web/show/id=45295/langid=43/contentid=402 t/m 404)
- Bryson, B. (Bruce), 2005, *A Question of Scale: Quarks to quasars*, www.wordwizz.com/pwrsof10.htm
- Bryson, W.M. (Bill), 2003, *A Short History of Nearly Everything*, Broadway books, New York
- Carr, B.J. & Rees, M., 1979, *The Anthropic Principle and the Structure of the Physical World*, Nature **278**, 605 (www.nature.com/nature/journal/v278/n5705/pdf/278605a0.pdf of www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/carr.rees.pdf)
- Carter, B., 1983, *The Anthropic Principle and its Implications for Biological Evolution*, Philosophical Transactions Royal Society London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, **310**, 347 (www.jstor.org/stable/pdfplus/37419.pdf of www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/carter.pdf)
- Casti, J.L., 1991, *Searching for Certainty*, William Morrow, New York
- Cox, T.J. & Loeb, A., 2008, *The Collision between the Milky Way and Andromeda*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **386**, 461 (www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/119396359/PDFSTART of arxiv.org/abs/0705.1170)
- Davidson, M., 1953, editor: *Astronomy for Everyman*, Dutton & Co. New York, in 1956 vertaald en bewerkt door H. Hubenet en G. Tieman als *Astronomie voor Iedereen*, Thieme, Zutphen
- Diamond, J., 1998, *Guns, Germs and Steel: A short history of everybody for the last 13,000 years*, Random House, London
- Diamond, J., 2005, *Collapse: How societies choose to fail or succeed*, Penguin Books, London
- Dyson, F.J., 1979, *Time without End: Physics and biology in an open universe*, Reviews of Modern Physics **51**, 447 (www.aleph.se/Trans/Global/Omega/dyson.txt of www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/dyson.jpg)
- Dyson, F.J., 1988, *Infinite in all directions*, Harper & Row, New York
- Einstein, A., 1950, *On the Generalized Theory of Gravitation*, Scientific American **182** (4), 13 (sami5001.buzznet.com/user/journal/10529/ of www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/Einstein.html)
- Gamow, G., 1965, *Mr Tompkins in Paperback*, comprising *Mr Tompkins in Wonderland* (1940) and *Mr Tompkins explores the Atom* (1945), Cambridge Univ. Press, London
- Gleick, J., 1988, *Chaos: Making a new science*, Penguin Books, New York
- Greene, B., 1999, *The Elegant Universe: Superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory*, Random House, New York
- Harris, S., 2008, *The Cartoons of S. Harris*, www.sciencecartoonsplus.com/gallery.html
- Harrison, E., 1987, *Darkness at Night: A riddle of the Universe*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Havank (H.F. van der Kallen), 1948, *Lijk Halfstok*, Zwarte Beertjes nr. 85, Bruna & Zoon, Utrecht
- Hawking, S., 1988, *A Brief History of Time: From the Big Bang to black holes*, Bantam Books, New York
- Hofstadter, D.R., 1979, *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*, Harvester Press, London; heruitgegeven door Penguin Books, 1980, Harmondsworth
- Hofstadter, D.R., 2007, *I am a Strange Loop*, Basic Books, New York
- Hogan, C.J., 2000, *Why the Universe is Just So*, Reviews of Modern Physics, **72**, 1149 (prola.aps.org/pdf/RMP/v72/i4/p1149_1 of arxiv.org/pdf/astro-ph/9909295v2)
- Jones, G.O., Rotbalt, J. & Whitrow, G.J., 1956, *Atoms and the Universe*, Eyre & Spottiswood, Londen; in het Nederlands uitgegeven als *Van Atoom tot Heelal*, Prisma reeks nr. **262**, 1957, Spectrum, Utrecht
- Karouac, J., 1957, *On the Road*, Viking Press, New York
- Kayzer, W., 1993, *Een Schitterend Ongeluk: Wim Kayzer ontmoet Oliver Sacks, Stephen Jay Gould, Stephan Toulmin, Daniel C. Dennett, Rupert Sheldrake en Freeman Dyson*, Contact, Amsterdam
- Kayzer, W., 1995, *Vertrouwd en o zo Vreemd: Over geheugen en bewustzijn*, Contact, Amsterdam
- Kayzer, W., 2001, *Het Boek van de Schoonheid en de Troost*. Contact, Amsterdam

- Koestler, A., 1959, *The Sleepwalkers: A history of Man's changing vision of the Universe*, Hutchinson, London; heruitgegeven door Penguin Books as a Pelican Book, 1964, 1968, Harmondsworth
- Kopland, R. (R.H. van den Hoofdakker), 1975, *Een Lege Plek om te Blijven*, Van Oorschot, Amsterdam
- Kopland, R. (R.H. van den Hoofdakker), 2004, *Een Man in de Tuin*, Van Oorschot, Amsterdam
- Kruit, P.C. van der, 1987, *Astronom van Beroep*, Zenit, **14**, 137 (www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/beroep.pdf)
- Kruit, P.C. van der, 1988, *Welke Ster is nu de Mijne?*, oratie Rijksuniversiteit Groningen (www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/oratie.pdf)
- Kruit, P.C. van der, 1993, *Harmonie*, Ons Maandblad **99**, nr. 11, 10, (www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/harmonie.pdf; zie ook www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/things.pdf)
- Kruit, P.C. van der, 2000, *Tijd*, bijdrage aan de kalender voor 2001, Het Apostolisch Genootschap, (www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/tijd.pdf)
- Kruit, P.C. van der, 2001, *Stonehenge*, De Stroom **103**, nr. 3, 26 (www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/stonehenge.pdf)
- Livio, M., 2002, *The Golden Ratio – The story of Phi, the world's most astonishing number*, Broadway Books, New York
- Madox, J., 1998, *What Remains to be Discovered: Mapping the secrets of the universe, the origins of life and the future of the human race*, MacMillan, London
- Morrison, P., Morrison, P. & the Office of Charles and Ray Eames, 1977, *Powers of Ten: A book about the relative size of things in the Universe and the effect of adding another zero*, Scientific American Library Paperback, see also: www.powersof10.com/
- Rees, M., 1999, *Just Six Numbers; The deep forces that shape the Universe*, Weidenfeld & Nicolson, London
- Roland Holst, A., 1920, *Voorbij de Wegen*, Van Dishoeck, Bussum
- Rush, J.H., 1957, *The Dawn of Life*, Hanover House, New York; in het Nederlands uitgegeven als *De Oorsprong van het Leven*, Aula-reeks **167**, 1964, Het Spectrum, Utrecht
- Michaelis, D., 2007, *Schulz and Peanuts: A biography*, HarperCollins, New York
- Sackmann, I.-J., Boothroyd, A.I. & Kraemer, K.E., 1993, *Our Sun. III. Present and Future*, Astrophysical Journal, **418**, 457 (articles.adsabs.harvard.edu/full/1993ApJ...418..457S)
- Susskind, L., 2005, *The Cosmic Landscape: String theory and the illusion of intelligent design*, Little & Brown, New York
- Tarter, J.C., 2007, *The Evolution of Life in the Universe: Are we alone?*, Highlights of Astronomy, **14**, 14 (journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=1430756 of www.astro.rug.nl/~vdkruit/jea3/homepage/tarter.pdf)
- Thommes, E.W., Matsumura, S. & Rasio, F.A., 2008, *Gas Disk to Gas Giant: Simulating the birth of planetary systems*, Science **321**, 814 (www.sciencemag.org/cgi/reprint/321/5890/814.pdf of arxiv.org/pdf/0808.1439)
- Tipler, F.J., 1980, *Extraterrestrial Intelligent Beings do not Exist*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society **21**, 267 (articles.adsabs.harvard.edu/full/1980QJRAS..21..267T)
- Weinberg, S., 1977, *The First Three Minutes: A modern view of the origin of the Universe*, Basic Books, New York.
- Wikipedia, 2008a, *The Standard Model*, en.wikipedia.org/wiki/Standard_model
- Wikipedia, 2008b, *Nucleosynthesis*, en.wikipedia.org/wiki/Nucleosynthesis

Sommige van de links hierboven zijn naar elektronische versies van tijdschriften. Deze zijn alleen beschikbaar vanaf servers die een elektronisch abonnement op het betreffende tijdschrift hebben. Ik heb dan tevens naar preprint-servers verwezen of het artikel beschikbaar gemaakt via mijn homepage met gebruikmaking van het abonnement van de Rijks-universiteit Groningen. Verdere verspreiding is in het laatste geval niet toegestaan.

De New York Academy of Sciences heeft in 1999 een symposium georganiseerd, *Cosmic Questions*, waarbij wetenschappers, filosofen, historici en theologen zich bogen over de vragen: “*Did the universe have a beginning? Is the universe designed? Are we alone?*” (o.a. Barrow, 2001). Weliswaar is er sinds 1999 veel gebeurd in het onderzoek op het gebied van de kosmologie en exoplaneten, maar het merendeel van de uitstekende bijdragen is nog steeds actueel. Zie *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. **950**, p. 1 – 319, www3.interscience.wiley.com/journal/118979481/issue?cretry=1&retry=0 (alleen beschikbaar via een elektronisch abonnement).

Index

- aarde
 - als planeet, 27, 28, 48, 54
 - einde van, 51
 - ontstaan, 47
- Alfons X van Castilië, 62
- Allen, Woody, 17, 71
- Ampère, 58
- Andromedanevel, 29, 30, 52
- anti-kleuren, 22
 - primair, 22
- antropisch principe, 7, 61, 63, 64, 68, 72
 - sterk, 61
 - uiteindelijk, 61
- Apollo 8, 69
- Arend-nevel, 39, 40
- astrologie, 7
- Astronomische Eenheid, 48
- atoom, 18, 22, 27, 55
- Aula-reeks, 12
- Avogadro, getal van, 25

- Barrow, John, 7, 60, 61, 69
- baryon, 21
- Berra, Yogi, 55
- beryllium, 44, 56, 64
- Betelgeuse, 42
- Bethe, Hans, 55
- Big Bang, 26, 30, 31
- Bijbel, 62, 71
- biologische evolutie, 2, 57, 60, 65, 68, 69
- Boeke, Kees, 17
- Bohr, Niels, 4
- Bok, Bart J., 7
- broeikas-effect, 51
- Bryson, Bill, 3

- Caroll, Lewis, 61
- Carter, Brandon, 60, 61
- Casti, John L., 4
- chaos-theorie, 53, 54, 72
- chemische elementen, 22, 24, 27, 44, 55, 63
- Clarke, Arthur C., 65
- cluster van melkwegstelsels, 35
- complexiteit
 - onherleidbaar, 61
 - specifiek, 61
- Compton golflengte, 58
- Cosmic Landscape, 63, 71, 72
- Coulomb, Charles-Augustin de, 58
- creationisme, 62

- de Jonge, Freek, 55
- Delfgaauw, Bernard, 7
- determinisme, 1, 4, 53
- di-electrische constante, 58
- Diamond, Jared, 3

- Dicke, Robert H., 61
- dimensie, 2, 58, 59, 63
- Dirac, Paul, 59
- DNA, 27, 57, 61, 62
- donkere energie, 52, 59, 63
- donkere materie, 51, 52, 59, 63
- Dwingeloo Radio Teleskoop, 14
- Dyson, Freeman J., 1, 2, 9, 51

- Eddington, Arthur S., 59
- edelgassen, 24
- Einstein, Albert, 5, 13, 17, 31, 52, 62
- electromagnetisme, 58, 63
- electron, 18, 19, 31, 55, 58
- electrostatistische kracht, 58
- entropie, 68
- European Southern Observatory, 36, 38
- exoplaneten, 49, 67

- Faust, 13, 63
- Fermi, Enrico, 44, 68
- fijnstructuur constante, 58, 61, 64
- foton, 22, 33, 58
- Frost, Robert, 51

- Gödel
 - incompleteidstheorema, 7
 - Kurt, 4, 7
- GAIA hypothese, 60
- Gamow, George, 6, 55
- gluon, 21
- gravitatieconstante, 58
- graviton, 22
- Great Wall, 35
- Groningen, Rijksuniversiteit, 7, 11, 15, 60, 71
- Grote getallen, hypothese van de, 59

- halfwaardetijd, 23
- harmonie, 14
- Harris, Sydney, 3, 59, 74
- Harrison, Edward, 16
- Havank, 3
- heelal
 - leeftijd, 16, 30, 31, 55, 59, 64, 69
 - structuur, i, 17, 28, 34
 - toekomst van de expansie, 51
 - uitdijning, 30, 31, 51, 52
- helium, 23, 24, 26, 27, 31, 32, 38, 41, 48
- herberg, 9, 12, 73
- Hertzsprung-Russell diagram, 40
- Het Apostolisch Genootschap, 2, 72
- hete Jupiter, 49
- Hofstadter, Douglas R., 4
- Hubble Space Telescope, 33–36, 39, 40, 45
- Hubble Ultra-Deep Field, 33, 34
- Hubble, Edwin, 30, 36, 52

- ijzer, 45
- inflatie, 31
- intelligent design, 61
- International Astronomical Union, 30
- isotoop, 23

- Jupiter, 10, 27, 28, 47–49, 54, 65, 67
 - hete, 49

- Kant, Immanuel, 48
- Kapteyn, Jacobus C., 52
- Kayzer, Wim, 3
- Kepler, Johannes, 16, 47, 74
- kleuren
 - primair, 21
- kleurlading, 21
- kleurmenging, 22
- Koestler, Arthur, 1, 13, 14
- koolstof, 23, 24, 27, 43–45, 57, 64
- Kopland, Rutger, 9, 16, 64, 73
- kosmologie, 31
- kosmologische achtergrondstraling, 34
- Krab-nevel, 45

- Laplace, Pierre-Simon, 1, 48, 53, 54, 63, 72
- Large number hypothesis, 59
- Leiden, Rijksuniversiteit, 11, 14
- lepton, 22
- leven in het heelal, 64, 65, 68, 69, 72
- lichtjaar, 30
- lichtsnelheid, 5, 6, 58
- lithium, 26, 31, 32, 56
- Livio, Mario, 3
- Lorenz, Edward N., 54
- Lovelock, James, 60
- Lyapunov-tijd, 53

- Machten van tien, 17
- Magelhaense Wolken, 38, 46
- Mars, 11, 27, 28, 47, 48, 54, 60, 68
- Mather, John C., 34
- Melkweg, 36–38, 42
- Melkwegstelsel, 14, 30, 38, 52
- melkwegstelsel, 30, 34
 - classificatie, 36
 - elliptisch, 35, 36
 - spiraalstelsel, 35, 36, 38, 39
 - spiraalstructuur, 36
 - structuur, 38
 - vorming, 35, 37, 39
- Mendeleev, Ivanovich, 22
- Mercurius, 27, 28, 47, 48, 54, 68
- meson, 21
- milieukunde, 60
- molecuul, 24, 27
- multiversum, 7, 61, 72

- Nachtwacht, 12
- natuurconstanten, 5, 6, 58

- natuurlijke selectie, 62
- Neptunus, 27, 30, 47–49, 54, 67
- neutrino, 20, 31, 41, 45, 56
- neutron, 18, 20, 31, 55
- neutronenster, 45, 56
- Newton, Sir Isaac, 5, 31, 47, 58, 74
- NGC 891, 36, 37
- nucleosynthese
 - Big Bang, 32, 55
 - stellaire, 38, 55

- Oerknal, 30, 31
- Olbers Paradox, 16
- Oort, Jan Hendrik, 11, 14, 15
- Orion, 42
- Orion-nevel, 40, 42

- Palomar Observatory, 15
- Patton, Michael, 71
- Paus Johannes Paulus II, 13
- Peanuts, 3
- Penzias, Arno, 34
- periodiek systeem der elementen, 22, 24
- Planck-constante, 6, 58
- planeetbanen, 27, 47
 - chaotisch?, 54
 - resonanties, 47, 49, 54
- planetaire nevel, 43, 44
- planetenstelsel, 27, 30, 47
 - stabiliteit, 53, 54, 68
 - vorming, 48
- planetoïde, 28, 49, 68
 - 6085P-L van der Kruit, 27, 29
- Plejaden, 42
- Pluto, 26, 30, 47
- positron, 20, 31, 41
- Powers of Ten, 17
- primaire kleuren, 21
- Prisma-reeks, 12
- promotie, 14
- proton, 18, 20, 31, 55
- Psalm 119, 71
- Ptolemaeus, Claudius, 62
- pulsar, 45

- quantumchromodynamica, 5, 21
- quantumelectrodynamica, 5, 22, 58
- quantummechanica, 6, 72
- quark, 18, 19, 55
- quasar, 61

- radio-activiteit, 24
- Rees, Sir Martin, 59–61
- relativiteitstheorie, 5, 6, 22, 52
- religie, 1, 71, 73
- Ring-nevel, 43
- rode reus, 42, 43, 47, 51
- Roland Holst, A., ii
- Rush, J.H., 9, 12

- Sagan, Carl, 31
 Saturnus, 11, 27, 30, 42, 47–49, 54, 67
 Schiedam, 9, 10
 Schulz, Charles M., 3
 SETI, 65, 69
 Sirius, 42
 Sitter, Willem de, 52
 Slok, L., 2
 Sluier-nivel, 46
 Smoot, George F., 34
 snaar-theorie, 6, 63
 Sombrero-nivel, 36
 spiegelbeeld, 14
 spiraalstelsel, 35, 36, 38, 39
 Standaard Model, 5, 19, 22
 ster, 38
 eindstadia, 44
 helium-verbranding, 43, 44, 56
 late stadia, 43
 levensduur, 60
 vorming, 37, 39
 waterstof-verbranding, 41, 42, 44, 56
 sterke wisselwerking, 5, 21, 55, 64
 Stonehenge, 3
 studierichtingen, 3
 supernova, 46, 47, 56
 supernova 1987A, 44
 Susskind, Leonard, 6, 7, 63, 71, 72
 Swedenborg, Emanuel, 48
- Tarter, Jill, 65
 teleologie, 2, 7, 60–62
 teleskoop, 10
 Theorie van Alles, 5–7, 58, 62, 63
 thermodynamica, 68
 tijd, 3, 31
 tijdschaal
 biologische evolutie, 57, 60, 64, 68, 69
 heelal, 55, 57, 59, 60, 64
 planetenstelsel, 68
 sterevolutie, 60, 64
 vorming van elementen, 55, 57, 64
 Tipler, Frank, 60, 61, 69
 toekomst, 2, 51, 53, 54, 72
 toeval, 6, 55
 Turing, Alan M., 4, 7
- uitdijend heelal, 30, 31, 51, 52, 59
 Uranus, 27, 30, 47–49, 54, 67
 Ussher, James, 62
- van der Kruit
 planetoïde 6085P-L, 27, 29
 van der Kruit, Krijn, 9, 11, 15
 van der Kruit–Arends, Corry, 16
 van der Kruit–van den Tol, Hermina, 9, 15
 Venus, 27, 28, 47, 48, 54, 68
 Verlinde, Eric, 62
 Very Large Telescope, 36, 38
- void, 35
 voorspelbaarheid, 54
- water op aarde, 49
 waterstof, 24, 26, 27, 31, 32, 38, 48
 Weinberg, Steven, 52
 Westerbork Synthese Radio Teleskoop, 14, 15
 Wilson, Robert W., 34
 witte dwerg, 42, 44, 45, 47, 56
 Wording en Ontplooiing, 2
- zomertijd, 9
 zon, 24, 26, 27, 30, 41, 42, 44, 48, 51, 56
 einde, 51
 evolutie, 40, 51
 zonnenevel hypothese, 48
 zonnestelsel, 30, 47, 53, 54
 uniek?, 54
 vorming, 48
 zonsverduistering, 9
 zuurstof, 23, 24, 27, 43–45, 57, 64
 zwaartekracht, 5, 22, 31, 59, 63
 zwakke wisselwerking, 5, 22, 31, 55, 64
 zwart gat, 46



Figuur 47. Het Bestuur van de Stichting J.H. van Oosbreelezing en ik na afloop van de tiende lezing in Amersfoort. Van links naar rechts: Manfred Horstmanshof, ikzelf, Arjen van de Kuijl, Nico de Pijper en Herman Kooreman. (credit: Nico Boerboom)

Curriculum vitae

Prof. dr Pieter Corijnus van der Kruit is geboren te Schiedam in 1944. Daar behaalde hij het diploma HBS-B in 1962 en ging vervolgens in Leiden sterrenkunde met bijvakken natuurkunde en wiskunde studeren, waar hij het doctoraal examen aflegde in 1968 en in 1971 promoveerde bij Prof. J.H. Oort tot doctor in de wiskunde en natuurwetenschappen. In 1972 ging hij naar de VS, waar hij werkte aan de Mount Wilson and Palomar Observatories in Pasadena, California. Per 1 januari 1975 is hij aangesteld aan de Rijksuniversiteit Groningen. In 1987 werd hij benoemd tot hoogleraar in de sterrenkunde. Tijdens sabbatical leaves werkte hij een jaar op de Mount Stromlo and Siding Spring Observatories (Canberra, Australië) en voor kortere perioden op het Institute of Astronomy (Cambridge, UK), het Space Telescope Science Institute (Baltimore, USA) en de European Southern Observatory (Santiago, Chili).

Zijn wetenschappelijk werk betreft de structuur, dynamica, vorming en evolutie van melkwegstelsels, met name spiraalstelsels. Zijn belangrijkste bijdragen betreffen de drie-dimensionale verdeling van sterren in schijven van zulke stelsels, de bewegingen, stabiliteit en spiraalstructuur daarin en de aanwezigheid van donkere materie. Hij gebruikt(e) daarvoor optische/nabij-infrarood telescopen te Palomar Mountain (VS), Mount Stromlo en Siding Spring (Australië), La Palma (Canarische Eilanden), La Silla, Paranal en Cerro Tololo (Chili), radioteleskopen te Dwingeloo, Westerbork (NL) en Narrabri (Australië) en de Hubble Space Telescope (NASA/ESA). Hij heeft meer dan 200 wetenschappelijke publicaties op zijn naam, die samen meer dan 5000 keer zijn geciteerd (zijn publicaties in internationale vaktijdschriften worden gemiddeld 2.5 tot 3 keer zo vaak geciteerd als een gemiddeld artikel wereldwijd; zijn meest geciteerde artikel liefst 25 keer zo vaak).

Hij heeft relatief veel bestuurlijk werk gedaan en zijn belangrijkste functies, die hij vaak vele jaren achtereenvolgend bekleedde of bekleedt, zijn:

- Voorzitter van het Bestuur van de Stichting Astronomisch Onderzoek in Nederland (ASTRON); beheert o.a. de radioteleskopen te Dwingeloo en Westerbork
- Chairman and vice-chairman of the Board van de Isaac Newton Group of Telescopes (ING); drie Brits-Nederlandse telescopen op de Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma, Canarische Eilanden
- Decaan van de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen van de Rijksuniversiteit Groningen (RUG); eindverantwoordelijk voor het onderwijs en onderzoek in de wiskunde, informatica, sterrenkunde, natuurkunde, scheikunde, milieukunde, biologie en farmacie
- Wetenschappelijk directeur van het Kapteyn Instituut van de RUG
- Lid van het Gebiedsbestuur Exacte Wetenschappen (GBE) van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO); financiering van onderzoek in de wiskunde, informatica, natuurkunde en sterrenkunde
- Voorzitter van het Bestuur van de Nederlandse Onderzoekschool voor Astronomie (NOVA); deze top-onderzoekschool coördineert het astronomisch onderzoek in Nederland
- Voorzitter van het Nederlands Comité Astronomie (NCA); het landelijk overlegorgaan in de sterrenkunde
- President of Council van de European Southern Observatory (ESO); een samenwerkingsverband van twaalf landen in Europa, die grote sterrenwachten beheert in Chili, waaronder de grootste telescoop ter wereld
- Chairman of the Board van de Atacama Large Millimeter Array (ALMA); een in aanbouw zijnde zeer grote millimeter telescoop op 5 km hoogte in de Andes in Chili; samenwerkingsverband van twaalf landen in Europa, de VS, Canada en Japan
- Voorzitter van het Koninklijk Natuurkundig Genootschap (KNG) te Groningen
- Voorzitter van het Groninger Universiteitsfonds (GUF).

Belangrijkste onderscheidingen:

- In 2001 vernoemde de International Astronomical Union planetoïde 6085P-L ‘van der Kruit’
- In 2003 werd hij op voordracht van de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen door de Rijksuniversiteit Groningen wegens “uitzonderlijke wetenschappelijke kwaliteiten” benoemd tot Jacobus C. Kapteyn hoogleraar in de sterrenkunde
- In 2006 ontving hij een koninklijke onderscheiding en werd hij benoemd tot Ridder in de Orde van de Nederlandse Leeuw

