De eerste sterrenstelsels

Op zoek naar het verleden

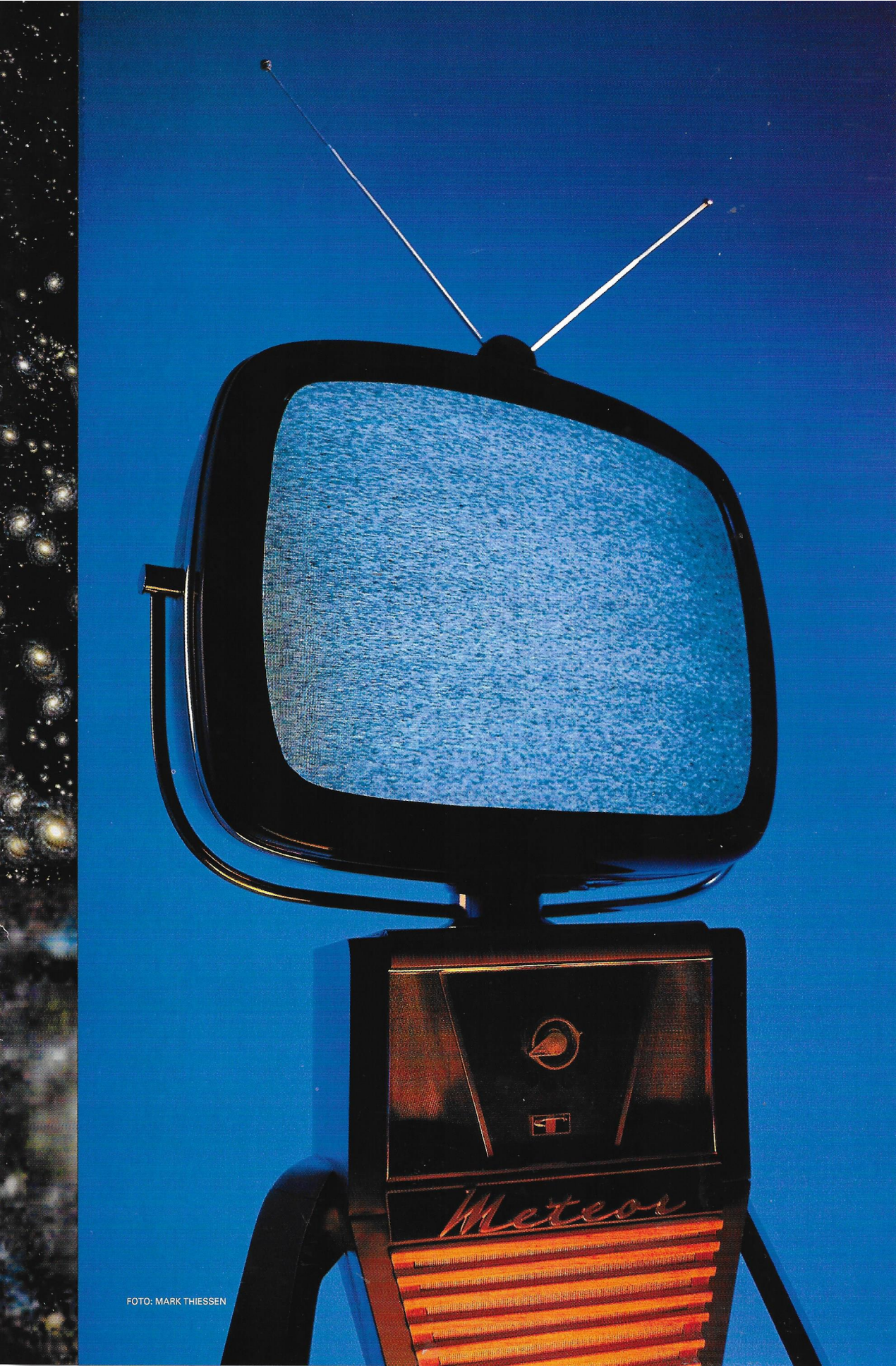


FOTO: MARK THIESSEN

Dit computermodel met liefst 200.000 sterrenstelsels berust op gegevens van het Sloan Digital Sky Survey, een ambitieus project om een kwart van het heelal in kaart te brengen. Het model bestaat uit beelden van het Apache Point Observatory in New Mexico, en toont met sterk vergrote opnamen de posities van nabije sterrenstelsels. Daarachter liggen nog eens 100 miljard sterrenstelsels, die ieder vele miljarden sterren bevatten. Waar is al die materie waar deze sterrenstelsels uit zijn ontstaan, vandaan gekomen? Met hulp van krachtige telescopen en computers komen onderzoekers steeds dichter bij het antwoord.

BEELD: MARK SUBBARAO, UNIVERSITY OF CHICAGO, SLOAN DIGITAL SKY SURVEY

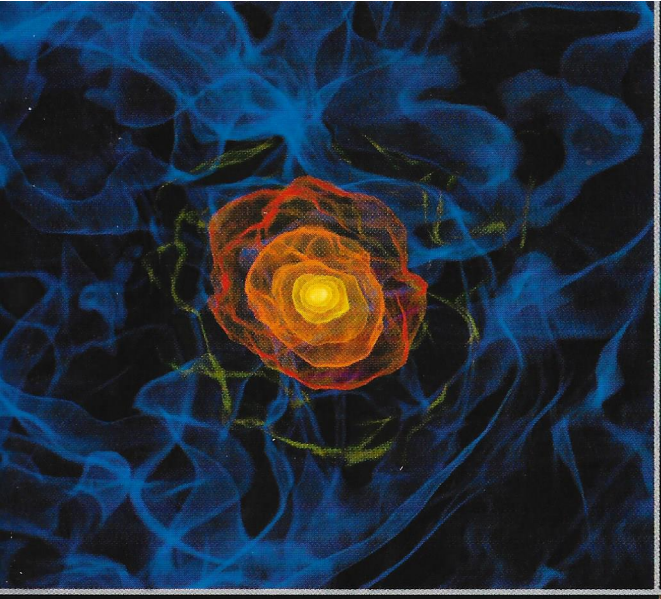
AFSTEMMEN: Ruis op een televisie wordt veroorzaakt door achtergrondstraling, een restant van de oerknal 14,5 miljard jaar geleden. Ongeveer honderd miljoen jaar later ontstond er een microsterrenstelsel. Deze computersimulatie geeft de dichtheid van het sterrenstelsel in verschillende kleuren weer. Groen stelt de buitenrand voor. Diep in deze kolkende wolk van waterstof en helium vormt zich een dichte kern. Door de zwaartekracht zal deze ineenstorten en veranderen in een vurige zon.

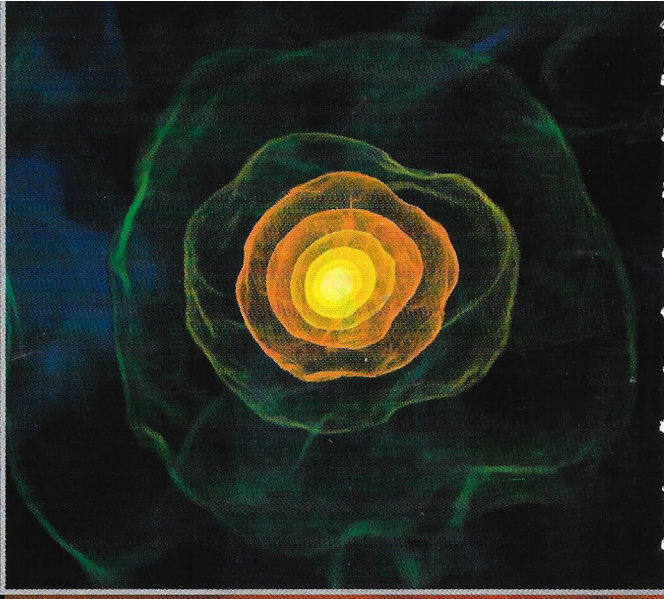
Tekst: Ron Cowen

Stelt u zich een heelal voor zonder sterren, zonder sterrenstelsels en zonder licht: een aardedonker brouwsel van oergassen in een zee van onzichtbare materie. Een paar honderdduizend jaar na de oogverblindende flits van de oerknal werd het heelal gedurende bijna een half miljard jaar in duisternis gestort. Toen gebeurde er iets wat alles veranderde – iets wat niet alleen de vorming van sterren en sterrenstelsels tot gevolg had, maar ook leidde tot het ontstaan van planeten, mensen, begonia's en hagedissen. Wat zou dat geweest kunnen zijn?

Van alle kanten komen nieuwe gegevens binnen die deze vraag – een van de meest fundamentele in de kosmologie – kunnen helpen beantwoorden. Theoretici hebben met behulp van simulaties op supercomputers nagebootst hoe de

FOTO: RALF KÄHLER, ZUSE-INSTITUT BERLIN (ZIB) / MAX-PLANCK-INSTITUT (MPI) FÜR GRAVITATIONSPHYSIK, EN TOM ABEL, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY (PSU)





Volgens Abel werd de eerste ster zo'n 14 miljard jaar geleden geboren, in een mysterieuzer maar

DE EERSTE STER was volgens een simulatie van Tom Abel, astrofysicus aan de Pennsylvania State University, reusachtig en helder, en vormde zich als een parel in een schelp van kolkende gaswolken.

Als we steeds dieper doordringen in een microsterrenstelsel met een massa van een miljoenste van die van de melkweg, zien we een protoster (boven) van waterstof en helium (rechts) met een massa die uiteindelijk zal uitgroeien tot honderd keer de massa van onze zon. Tijdens een proces dat ongeveer een miljoen jaar in beslag nam, koelde het gas af en klonterde samen, tot de kern in elkaar stortte. Dit zette de kernfusie van waterstof in werking – en de eerste ster begon te schijnen. De eerste sterren hadden een korte levensduur. Binnen enkele miljoenen jaren explodeerden ze in supernova's (links), die nieuwe, zwaardere elementen, zoals koolstof en zuurstof, de ruimte in slingerden – de basis voor toekomstige sterren, planeten en leven.

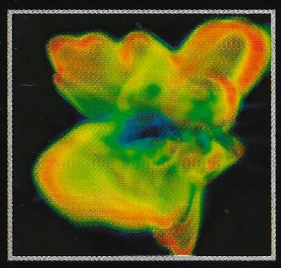
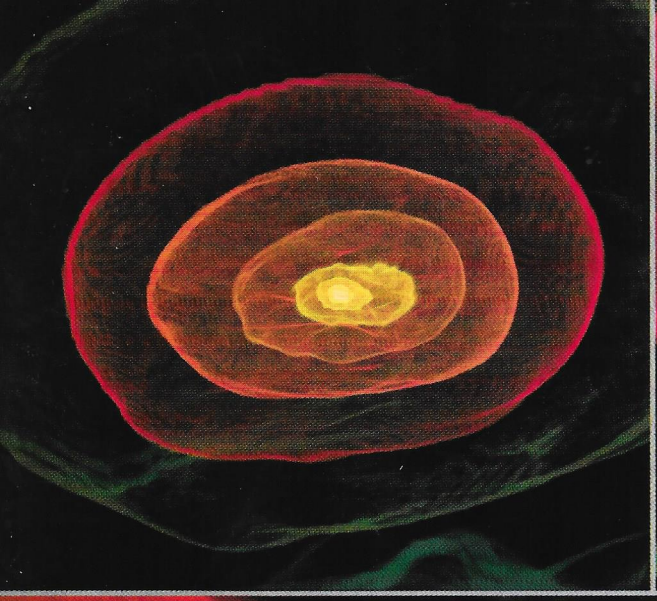


FOTO: RALF KÄHLER, ZIB/MPI, EN TOM ABEL, PSU



ook eenvoudiger universum dan het onze.

eerste sterren en sterrenstelsels werden gevormd. Sterrenkundigen turen door reusachtige nieuwe telescopen en reizen daarmee terug in de tijd op zoek naar de eerste sterrenstelsels. Onderzoekers die beelden van de Hubble-ruimtetelescoop bestuderen, hebben een adembenemende diversiteit aan stelsels ontdekt. Gigantische spiralen die het stralende blauwe licht van pasgeboren sterren uitzenden, vervormde rugbyballen die nog nagloeien van het roodbruine licht van miljarden jaren oude sterren, en gerafelde stelsels die lange slierten sterren achter zich aanslepen – het resultaat van botsingen met andere sterrenstelsels.

NOG GEEN EEUW geleden kenden sterrenkundigen slechts één sterrenstelsel, de melkweg, en ze dachten dat die ongeveer honderd miljoen sterren bevatte. Tot waarnemers zich realiseerden dat sommige vage vlekjes zich niet binnen ons eigen melkwegstelsel bevinden, maar aparte sterrenstelsels zijn – verzamelingen van door zwaartekracht met elkaar verbonden sterren, gassen en stof.

Tegenwoordig weten we dat de melkweg ongeveer honderd miljard sterren bevat en dat het heelal bestaat uit ongeveer honderd miljard sterrenstelsels.

Onze kijk op het universum is ingrijpend aan het veranderen, zegt kosmoloog Carlos Frenk, en dat komt vooral door ons nieuwe inzicht in het ontstaan van sterrenstelsels, die elk een reusachtig aantal sterren bevatten. "Het is niet overdreven om deze periode te vergelijken met de Copernicaanse revolutie."

De jonge kosmoloog Tom Abel meent te hebben ontdekt hoe de allereerste ster werd geboren. Op een middag in april zat hij bij het zwembad van een hotel in Cozumel, Mexico. Niet afgeleid door het voortdurende gezoem van de blender waarmee pina colada's werden gemaakt, staarde hij geconcentreerd naar de beelden op het scherm van zijn laptop. Enkele minuten later toonde hij de beelden aan zijn collega's, die in het hotel bijeen waren voor een van de grootste wetenschappelijke symposia over de oorsprong van sterrenstelsels die ooit zijn gehouden.

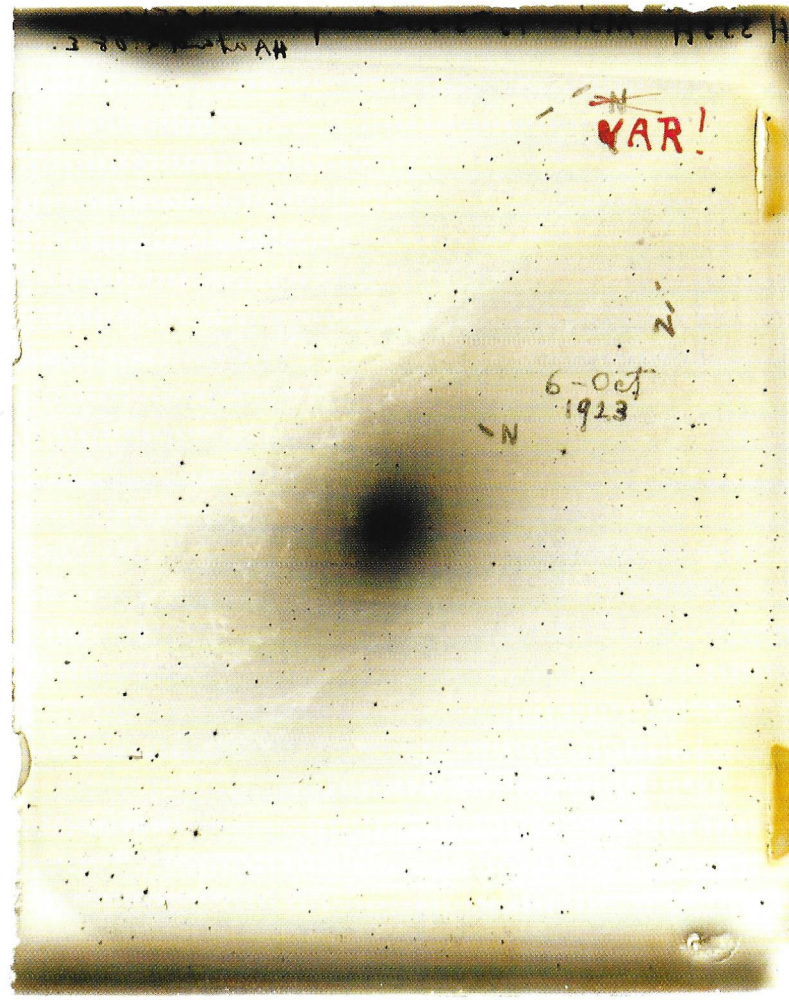
Volgens Abel werd de eerste ster ongeveer veertien miljard jaar geleden geboren in een mysterieuzer maar ook veel eenvoudiger universum dan het onze. Het was kleiner en compacter, pikdonker en bevatte vooral waterstof, helium en een beetje lithium. De afgelopen jaren heeft Abel samen met Michael L. Norman en Greg L. Bryan op supercomputers simulaties ontworpen die laten zien hoe uit deze gassen sterren werden gevormd.

Volgens deze simulaties werd de aanzet tot stervorming gegeven toen gas door de zwaartekracht tot diffuse wolken werd samengetrokken. Naarmate de gassen afkoelden, groeiden ze in het centrum van iedere wolk samen tot een klont niet groter dan onze zon. Door het aantrekken van omringend gas groeide de klont verder. Zo ontstond er een reusachtige bal van ongeveer honderd keer de massa van de zon. Uiteindelijk, enkele miljoenen jaren nadat dit proces was begonnen, werd door de enorme druk een echte ster gevormd – en er was licht.

Elders in het heelal begon ditzelfde proces in andere gaswolken die Abel microsterrenstelsels noemt – miniatuurversies van de huidige stelsels die slechts één ster bevatten. Al snel werd de duisternis doorbroken door het licht van deze reusachtige sterren. Ze brandden hevig, maar kwamen na enkele miljoenen jaren alweer aan hun einde in gigantische explosies die supernova's worden genoemd. Tijdens hun korte leven zorgden deze eerste sterren voor veranderingen in het universum die grote gevolgen hadden voor de toekomstige vorming van sterrenstelsels. Ze verhitten de gassen om hen heen en bombardeerden deze met ultraviolette straling. Toen deze sterren explodeerden, werd het heelal – en de volgende generatie sterren – voorzien van de eerste golf zware elementen, waaronder de zuurstof die wij inademen.

Het begrip 'donkere materie' bestaat al

Na hun explosieve dood lieten de sterren mogelijk zeer compacte resten achter, de eerste zwarte gaten van het heelal. Bovendien gingen de supernovaexplosies mogelijk gepaard met flitsen hoogenergetische straling – uitbarstingen van gammastraling die miljarden malen helderder zijn dan de lichtkracht van de zon. Als dit waar is, zijn sommige van de reeds waargenomen uitbarstingen van gammastraling wellicht veroorzaakt door de eerste sterren.



IN 1923 bewees Edwin Hubble met een fotonegatief van de Andromedanevel het bestaan van andere sterrenstelsels dan de melkweg. Hubble schreef VAR! bij een ster met een variabele helderheid. Zo'n ster kan worden gebruikt om afstanden in het heelal te meten, in dit geval om aan te tonen dat het Andromeda-stelsel zich ver buiten de melkweg bevindt.

tientallen jaren. Niemand wilde geloven dat 'gekke Fritz' gelijk had.

"We zouden enorm boffen als blijkt dat de eerste sterren tevens de helderste waren," aldus Abel.

Zijn presentatie in Cozumel was een groot succes. Wetenschappers beschouwen zijn simulaties van het ontstaan van de eerste sterren als het overtuigendste scenario tot nu toe. De simulaties zijn gebaseerd op het bestaan van een soort mysterieuze, onzichtbare materie. Deze zogenoemde 'donkere materie' is goed voor op z'n minst 90 procent van alle materie in het heelal. Sterrenstelsels zijn slechts heldere vlekjes in een zee vol donkere materie. Zonder de extra aantrekkingskracht van de donkere materie, zeggen sterrenkundigen, zou er niet genoeg zwaartekracht zijn om materiaal tot sterrenstelsels te laten samenklonteren, of zelfs maar de eerste ster te vormen.

Het concept van de donkere materie bestaat al

(Vervolg op pagina 54)

FOTO: CARNEGIE OBSERVATORIES, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

EEN VIRTUELE MELKWEG. We bevinden ons zevenduizend lichtjaar boven de kern. Dit driedimensionale model stelt een close-up voor van ons spiraalvormig melkwegstelsel. Met telescopen op aarde is het onmogelijk dit beeld te verkrijgen. Ons zonnestelsel bevindt zich in een afgelegen buitenwijk van de melkweg, ergens halverwege een gebied met oudere en deels afgekoelde rode sterren tussen de spiraalarmen. De meeste hete jonge sterren worden in de armen geboren.

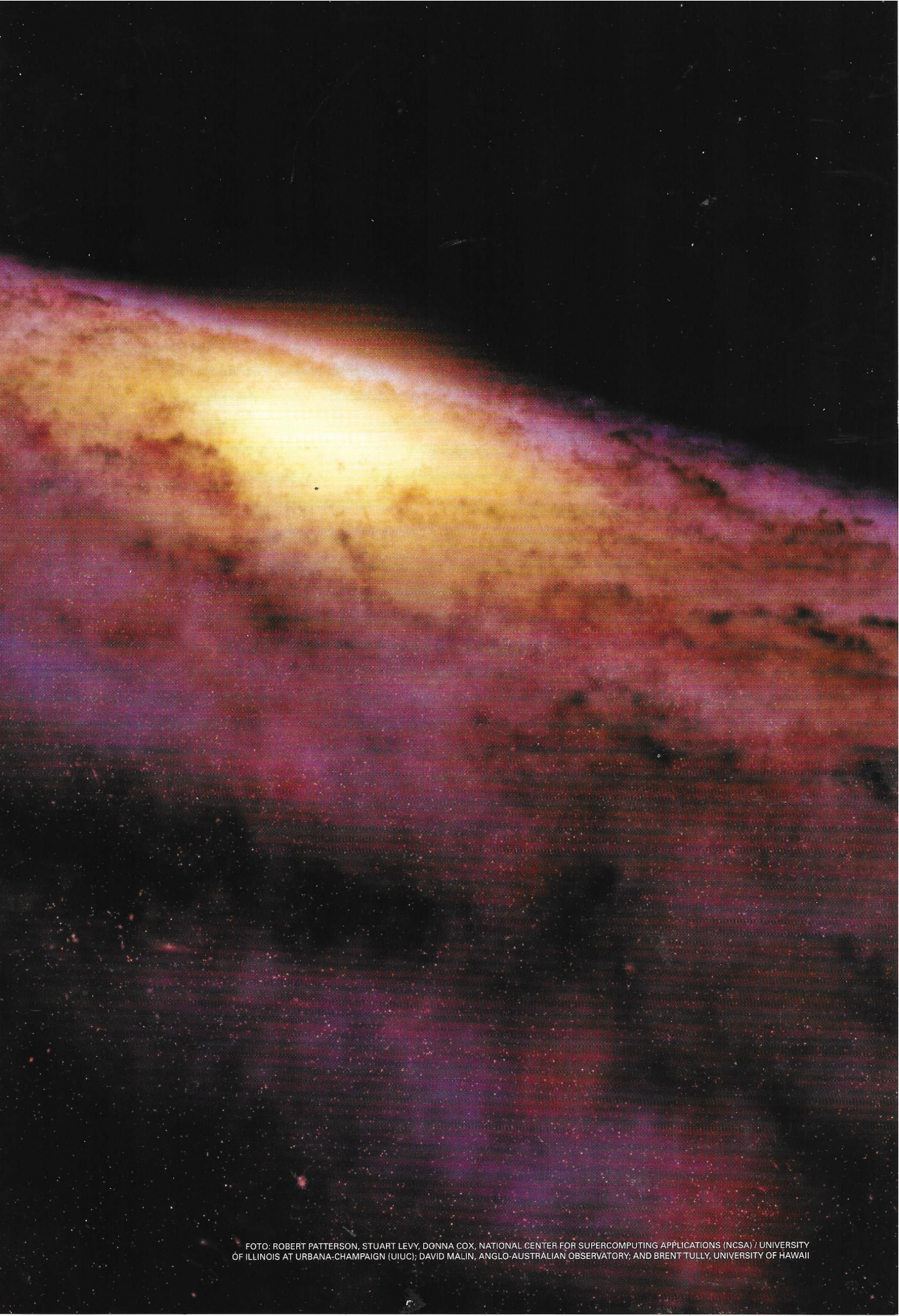
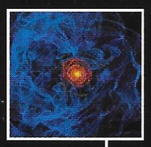


FOTO: ROBERT PATTERSON, STUART LEVY, DONNA COX, NATIONAL CENTER FOR SUPERCOMPUTING APPLICATIONS (NCSA) / UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN (UIUC); DAVID MALIN, ANGLO-AUSTRALIAN OBSERVATORY; AND BRENT TULLY, UNIVERSITY OF HAWAII



Simulatie van de vorming van microsterrenstelsels 100 tot 300 miljoen jaar na de oerknal.

Oer-knal

Miljarden jaren

1

5

A

B

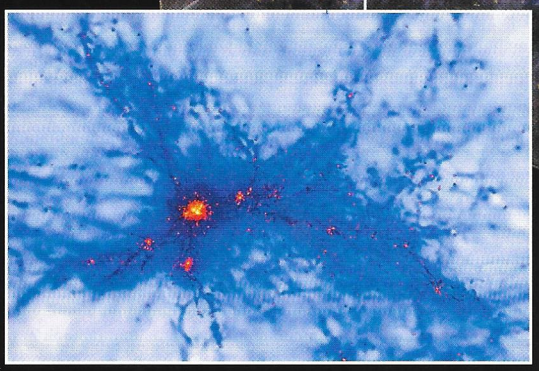
A DE KRAAMKAMER

De zijden van deze kubus stellen ieder 466 miljoen lichtjaar voor. De simulatie laat zien dat donkere materie na één miljard jaar genoeg zwaartekracht uitoefende om grote gaswolken aan te trekken. De dichtste wolken werden door de zwaartekracht samengeperst tot de eerste generatie sterren en sterrenstelsels.

DETAIL

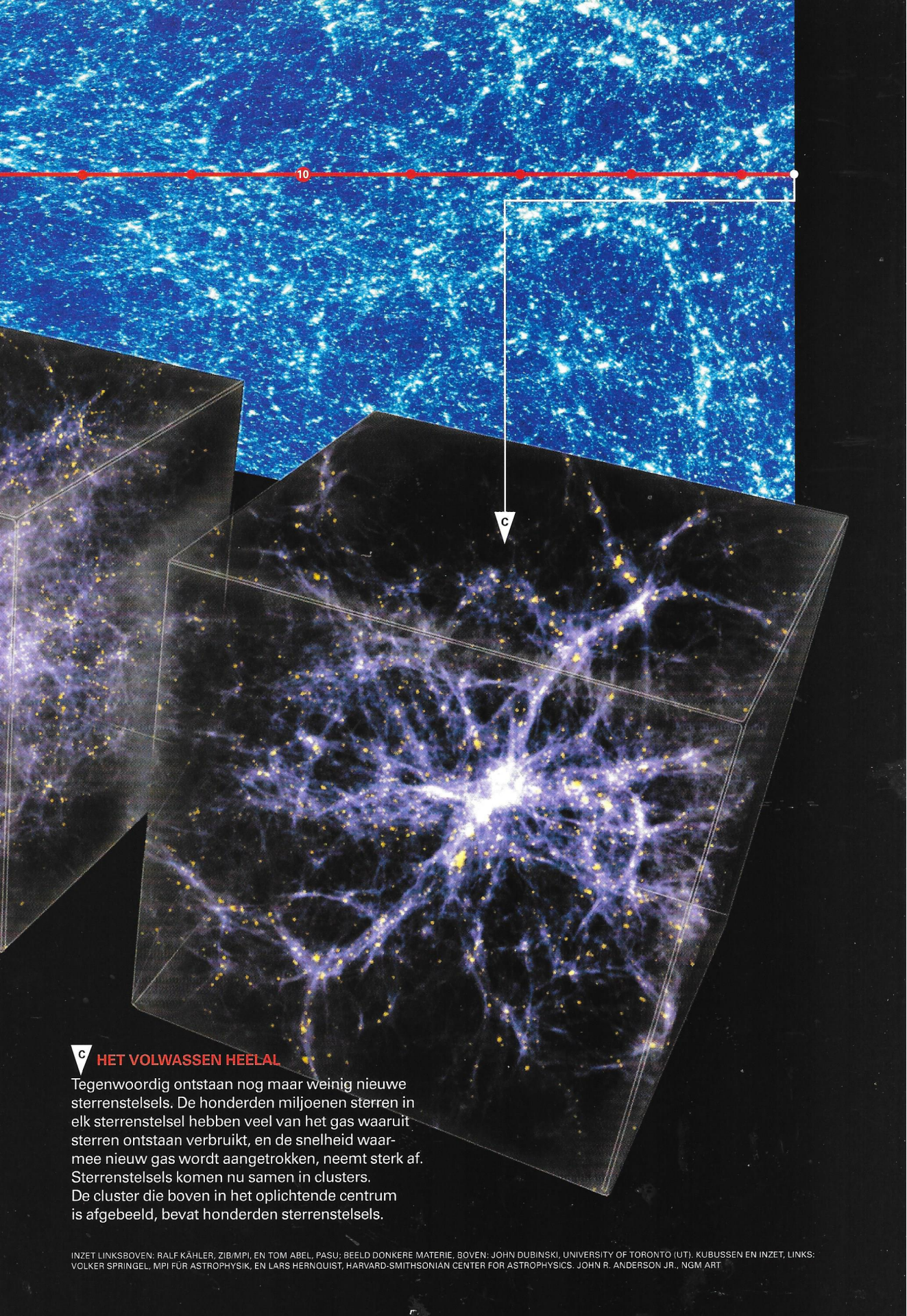
In de greep van de donkere materie

DE OVERTUIGENDSTE THEORIE van het ontstaan van sterrenstelsels is gebaseerd op onzichtbare deeltjes. Deze 'donkere materie' trekt gewone materie in zijn web van zwaartekracht. Gewone materie is goed voor slechts 10 procent van de massa van het heelal, de rest is donkere materie. Deze kubussen verbeelden drie perioden in de evolutie van het heelal, en tonen de vezelachtige structuur van de gewone materie (boven). Een computergegenereerde afbeelding (geheel boven) laat zien hoe donkere materie (wit) zich in de loop van de tijd over het uitdijende heelal verspreidde.



B DE GOUDEN EEUW

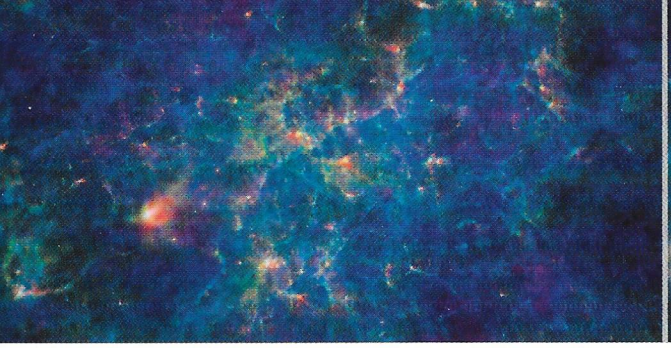
De ontwikkeling van sterrenstelsels bereikte haar hoogtepunt toen het heelal ongeveer drie miljard jaar oud was. De inzet laat zien hoe in een gasnevel een groep sterrenstelsels ontstaat. In deze periode werden de stelsels steeds groter door botsingen en het accumuleren van gas.



C **HET VOLWASSEN HEELAL**

Tegenwoordig ontstaan nog maar weinig nieuwe sterrenstelsels. De honderden miljoenen sterren in elk sterrenstelsel hebben veel van het gas waaruit sterren ontstaan verbruikt, en de snelheid waarmee nieuw gas wordt aangetrokken, neemt sterk af. Sterrenstelsels komen nu samen in clusters. De cluster die boven in het oplichtende centrum is afgebeeld, bevat honderden sterrenstelsels.

INZET LINKSBOVEN: RALF KÄHLER, ZIB/MPI, EN TOM ABEL, PASU; BEELD DONKERE MATERIE, BOVEN: JOHN DUBINSKI, UNIVERSITY OF TORONTO (UT). KUBUSSEN EN INZET, LINKS: VOLKER SPRINGEL, MPI FÜR ASTROPHYSIK, EN LARS HERNQUIST, HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS. JOHN R. ANDERSON JR., NGM ART



'We zouden enorm boffen als blijkt dat de

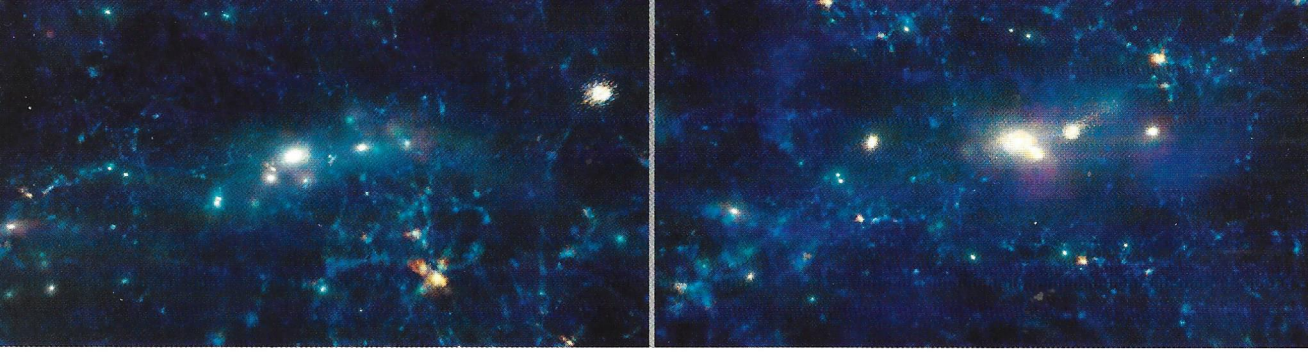
tientallen jaren, maar het duurde lang voordat kosmologen het aanvaardden. Misschien wel omdat een van de eerste mensen die het bestaan ervan suggereerden de in 1898 geboren Fritz Zwicky was, een briljant maar onaangenaam genie. In 1933 bestudeerde hij een nabijgelegen cluster van sterrenstelsels, de Comacluster, en kwam tot de conclusie dat die eigenlijk niet kon bestaan. De sterrenstelsels in de Comacluster draaien zo snel rond dat de zwaartekracht van het zichtbare deel van de cluster nooit groot genoeg kan zijn om de groep intact te houden. Maar Zwicky had een oplossing. Hij stelde dat de zichtbare materie in de cluster slechts een schijntje van het totaal was. Het onzichtbare, overgrote deel noemde hij donkere materie. Niemand wilde geloven dat 'gekke Fritz' gelijk had.

Tientallen jaren later nam de weerstand tegen Zwicky's ideeën af. Sterrenkundigen namen steeds vaker hun toevlucht tot de donkere materie om allerlei ongrijpbare fenomenen te verklaren. In 1973 beweerden kosmologen Jim Peebles en Jerry Ostriker dat de mysterieuze materie nodig is om te voorkomen dat spiraalvormige sterrenstelsels, zoals onze eigen melkweg, uit elkaar vallen. Enkele jaren later kwam Vera Rubin tot de conclusie dat de spiraalvormige stelsels die zij en haar collega's hadden bestudeerd, zich in een halo van donkere materie moesten bevinden. Alleen zo valt te verklaren, aldus Rubin, dat de sterren aan de rand van de spiraalstelsels even snel bewegen als die in het midden.

Met donkere materie kon bovendien een essentiële vraag over de vorming van sterrenstelsels worden beantwoord: hoe kon het heelal veranderen van een gelijkmatige, hete soep van deeltjes, in een wirwar van sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels? Al in het begin moeten er klonten geweest zijn. Deze oerklonten konden niet zijn voortgekomen uit gewone materie – protonen, elektronen en neutronen. Er was niet genoeg van die materie aanwezig, en het klonteren kon pas beginnen nadat het heelal was afgekoeld. Donkere materie daarentegen was in overvloed aanwezig en bijna ongevoelig voor alle krachten behalve de zwaartekracht. Bijna direct na de geboorte van het universum kon de donkere materie gaan samenklonteren, waardoor gewone materie een raamwerk kreeg om sterrenstelsels te vormen, zelfs toen de uitdijing van het heelal ze uit elkaar probeerde te trekken.

In 1992 werden bewijzen gevonden voor deze 'soep-met-klontjestheorie'. NASA-satelliet Cosmic Background Explorer ontdekte minuscule hete en koude plekken in de ruimte. Dit ondersteunde het idee dat de eerste sporen van sterrenvorming – de door donkere materie gevormde oerklontjes die in het jonge heelal al aanwezig waren – uiterst kleine temperatuurverschillen in de kosmische achtergrondstraling achterlaten. De befaamde kosmoloog Stephen Hawking noemde de vondst 'de ontdekking van de eeuw, misschien zelfs van de geschiedenis'.

EDWIN HUBBLE zette de eerste stap in het huidige onderzoek naar de vorming van sterrenstelsels met zijn ontdekking dat de melkweg niet alleen is. Op 6 oktober 1923 fotografeerde hij in alle vroegte vanuit het Mount Wilson Observatory in Californië een wazige, spiraalvormige sterrennevel die bekendstaat als M31 of de Andromeda-nevel. De meeste sterrenkundigen dachten dat die deel uitmaakte van de melkweg. Maar Hubble ontdekte een klein juweel in de nevel: een cepheïde. Dit type veranderlijke ster heeft de handige eigenschap dat zij met de regelmaat van de klok in helderheid af- en toeneemt. Hoe langer de periode van lichtwisseling, hoe groter de absolute helderheid. Dit betekent dat de ster kan worden gebruikt om



eerste sterren tevens de helderste waren,' aldus Abel.

afstanden in de ruimte te bepalen. Door de absolute helderheid van de cepheïde in M31 te vergelijken met de schijnbare helderheid aan de hemel, kon Hubble de afstand tussen aarde en ster vaststellen.

Hij ontdekte dat de ster en de nevel waarin deze zich bevindt, één miljoen lichtjaar van ons zijn verwijderd – drie keer de destijds geschatte diameter van het hele universum! Het was duidelijk dat deze sterrennevel ver buiten de grenzen van de melkweg lag. Maar als Andromeda een afzonderlijk sterrenstelsel was, dan waren vele andere nevels aan de nachtelijke hemel dat misschien ook wel.

Kort daarop ontdekte Hubble dat er drie soorten stelsels zijn. De elliptische, waarin het meeste gas al lang geleden in sterren is veranderd, lijken op vervormde rugbyballen. Spiraalvormige stelsels, zoals onze eigen melkweg, vormen twee derde van de ons bekende sterrenstelsels. Deze bevatten ook een bolvormige hoop van oude sterren, net als de elliptische stelsels, maar de kern wordt omringd door een schijf van slanke, spiraalvormige armen, waarin zich pasgeboren sterren bevinden. Ten slotte zijn er nog de onregelmatige sterrenstelsels, de ploeteraars, die schijnbaar vanaf hun geboorte in hetzelfde trage tempo nieuwe sterren hebben gemaakt.

Dat er verschillende stelsels bestaan, is terug te voeren op een turbulent verleden, meent Julio Navarro. Net als Abel verlaat Navarro zich op computersimulaties om de evolutie van sterrenstelsels te bestuderen. Hij concentreert zich echter op de latere fasen van hun levenscyclus wanneer ze de neiging hebben tegen elkaar aan te botsen en ze propvol sterren zitten. Recent onderzoek van Navarro en Matthias Steinmetz laat zien hoe dergelijke botsingen het uiterlijk van een sterrenstelsel kunnen veranderen tijdens zijn twaalf miljard jaar durende reis door de kosmische geschiedenis.

DIT MODEL TOONT hoe gas (rood) en nieuwe sterren (wit) samen kleine sterrenstelsels vormen die met elkaar versmelten en steeds groter worden. Het laatste beeld toont het heelal op middelbare leeftijd, ongeveer zeven miljard jaar geleden, toen enorme sterrenstelsels (geel) rondcirkelden in nevels van donkere materie (groen).

Volgens Navarro waren de eerste sterrenstelsels schijfvormig als gevolg van de hoge rotatiesnelheid en de invloed van de zwaartekracht. Doordat de schijf tegen die van een ander stelsel botste en daarmee versmolt, raakten de omloopbanen van de sterren verward. De gehavende schijven bolden op tot een kolkende, fonkelende bal van gas en sterren – een elliptisch sterrenstelsel. Het stelsel begon langzaam nieuwe slierten gas naar zich toe te trekken, en zo werd de bal het verouderende centrum van een veel grotere schijf met spiraalarmen. Een volgende botsing verwoestte ook deze structuur en creëerde een nog grotere bal. Bij iedere botsing veranderde het sterrenstelsel zo van vorm, als een blok klei dat steeds in andere vormen werd geboetseerd, en tevens groeide. De meest geaccepteerde versie van de donkere-materie-theorie gaat ervan uit dat sterrenstelsels klein begonnen en in de loop van de tijd steeds groter werden door botsingen en de langzame accumulatie van materie uit de omgeving.

Het was niet de gelijkmatige vorm van volwassen sterrenstelsels die veel indruk maakte op sterrenkundige Chuck Steidel, maar de rommelige vorm van jonge sterrenstelsels. Zijn werk leidde tot de ontdekking van ruim tweeduizend

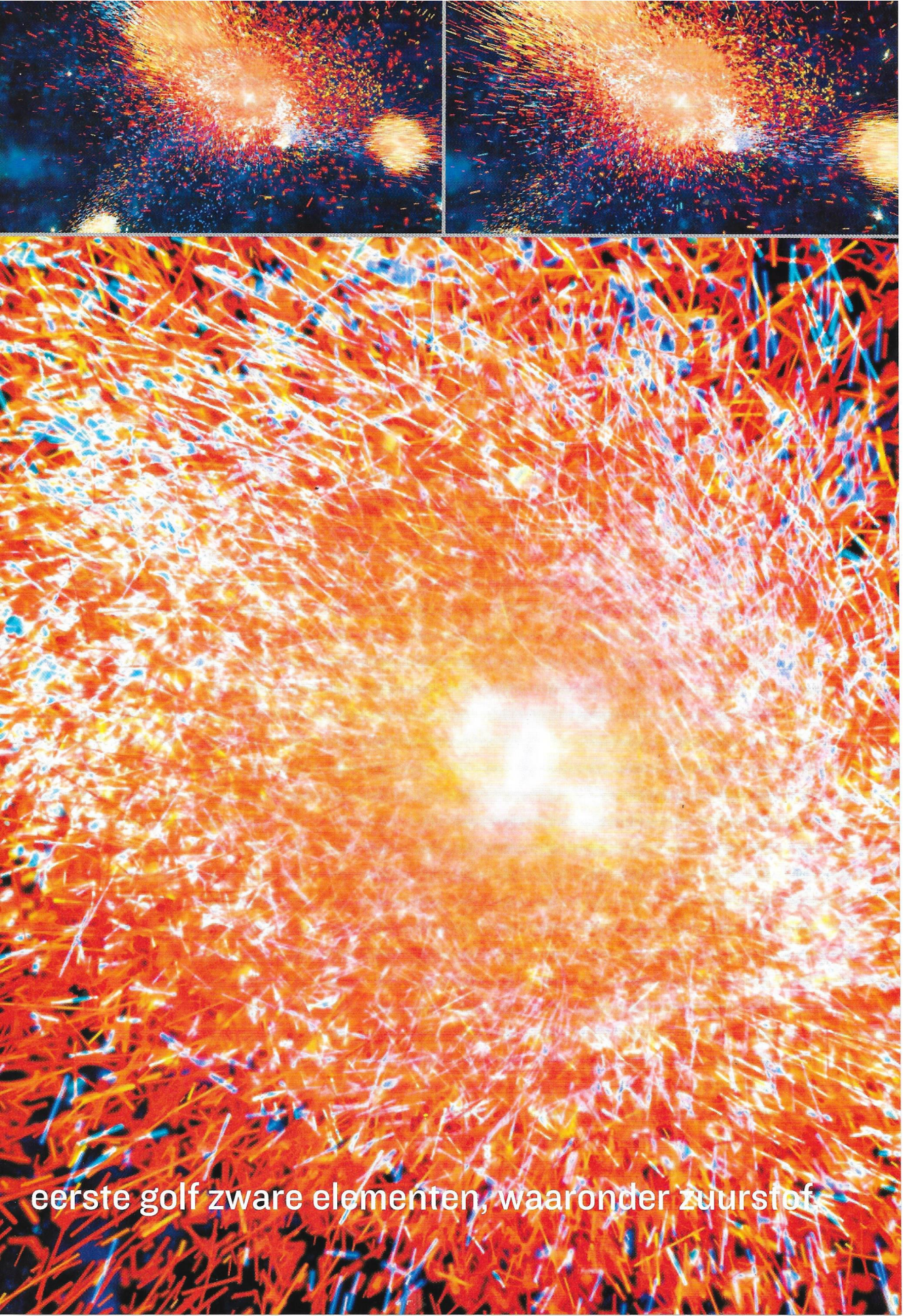
(Vervolg op pagina 60)

BEELDEN: MICHAEL L. NORMAN, BRIAN O'SHEA, UNIVERSITY OF SAN DIEGO, SAN DIEGO (UCSD), EN DONNA COX, ROBERT PATTERSON EN STUART LEVY, NCSA/UIUC. WGBH BOSTON, *NOVA*: 'RUNAWAY UNIVERSE'

De sterren explodeerden, en het heelal – alsmede de volgende generatie sterren – werd voorzien van de

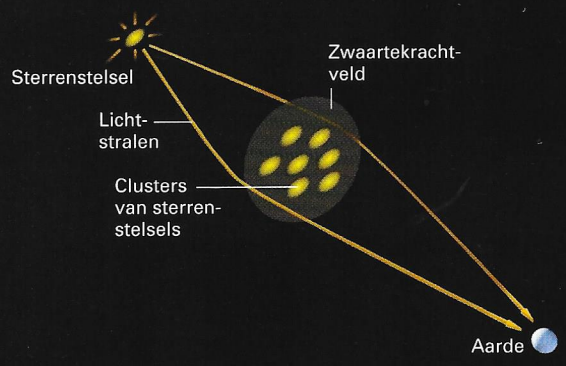
DIT ZIJN BEELDEN uit een één minuut durende animatiefilm van Michael L. Norman, hoogleraar natuurkunde aan de University of California in San Diego. Ze laten de botsing zien tussen twee sterrenstelsels, een onderdeel uit zijn baanbrekende computersimulatie van de geschiedenis van het heelal die Norman 'beelden van de theorie' noemt. De driedimensionale beeldenreeks over het gedrag van sterren komt in veel opzichten overeen met recente Hubble-opnamen. De simulatie beslaat een periode van enkele miljarden jaren en begint met de gewelddadige versmelting van twee grote sterrenstelsels – beide het resultaat van eerdere botsingen – en zoomt vervolgens in op de actieve kern van het nieuwe sterrenstelsel dat aan het ontstaan is. De oudere sterren, herkenbaar aan hun koelere temperaturen (rood), worden uit hun omloopbaan gestoten en als verf naar alle kanten gespetterd. De helderwitte en gele gebieden stellen de zwermen jonge, hetere sterren voor die ontvlammen in een woeste werveling van gas. De beschikbaarheid van supercomputers stimuleert het creëren van dergelijke realistische simulaties. Die computers maken gebruik van tientallen met elkaar verbonden processoren, en gebruiken technieken uit kernwapenlaboratoria. "Lijken beelden van de theorie op beelden van de natuur?" vraagt Norman. "Jazeker."

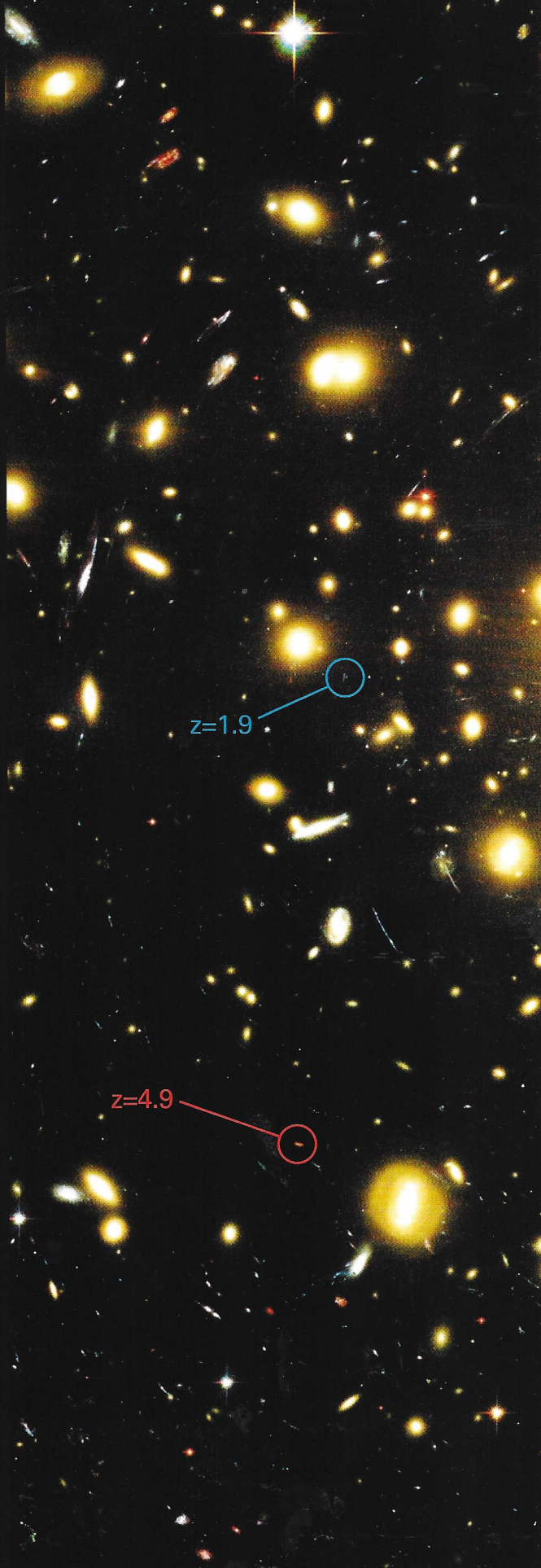
FOTO: MICHAEL L. NORMAN EN BRIAN O'SHEA, UCSD, EN DONNA COX, ROBERT PATTERSON, STUART LEVY, NCSA/UIUC. WGBH BOSTON, *NOVA*: 'RUNAWAY UNIVERSE'


eerste golf zware elementen, waaronder zuurstof

Oerlicht

CLUSTER ABELL 1689 (rechts) vergroot als een natuurlijke telescoop het zwakke licht van vroege sterrenstelsels. Dit oeroude licht is op deze recente foto van de Hubble-ruimtetelescoop te zien als gebogen strepen. Als lichtstralen van een ver stelsel het zwaartekrachtveld van het Abellcluster met zijn sluier van donkere materie raken, worden ze als door een lens gebogen en gebundeld (diagram onder). Door de roodverschuiving van de strepen te meten – de mate waarin de golflengte van het licht is opgerekt door de uitdijing van het heelal – kunnen astronomen de tijd en afstand berekenen die het licht heeft afgelegd. "Het kan zijn dat we nog nooit zo diep zijn doorgedrongen in het zichtbare heelal," zegt Narciso Benítez van de Johns Hopkins University.





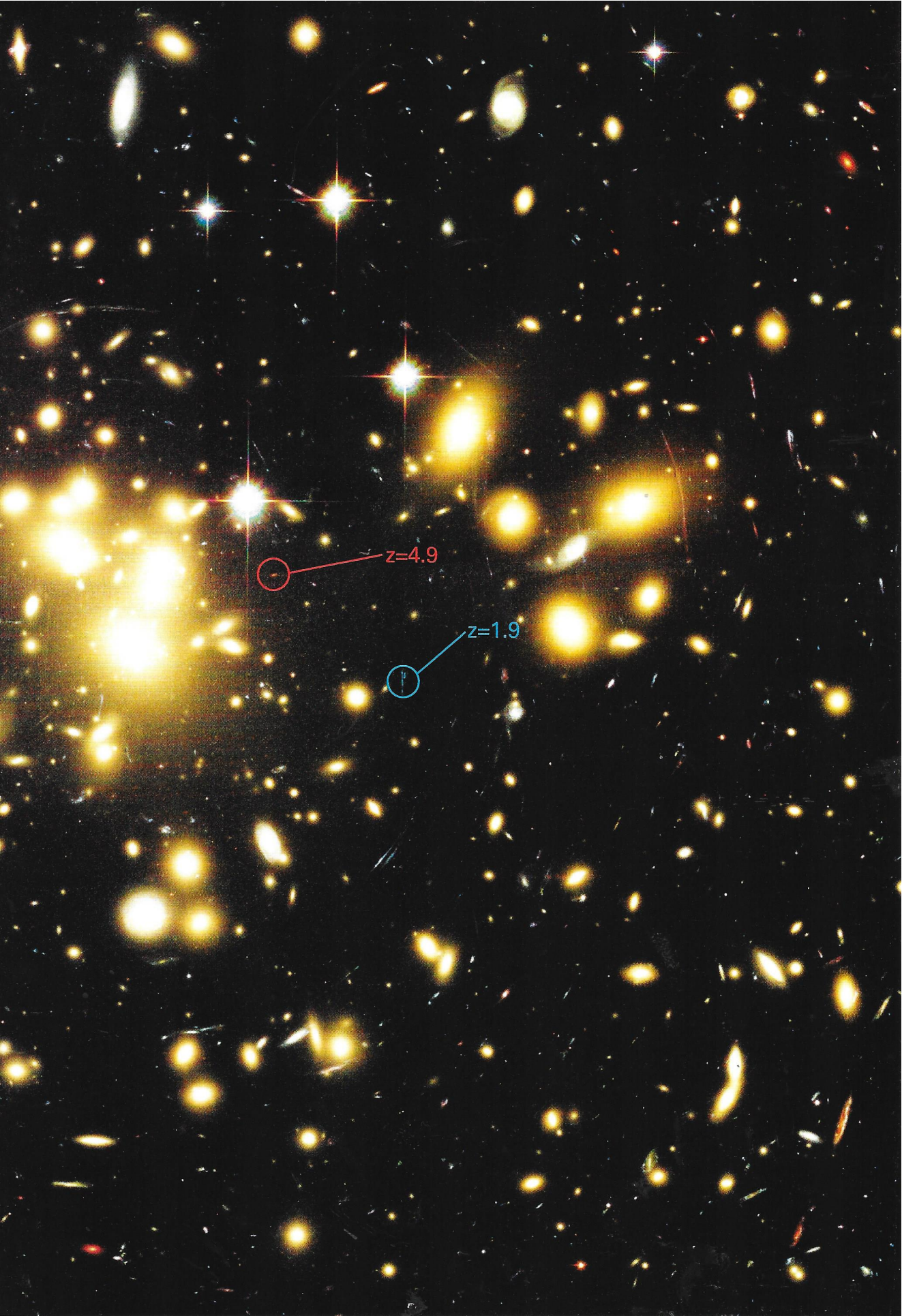
z=4.9

Hoe groter de roodverschuiving, oftewel z, hoe verder weg – gemeten in tijd en ruimte – een zichtbaar object van de aarde is verwijderd. Voor dit verafgelegen sterrenstelsel, dat in tweevoud zichtbaar is doordat het licht werd gesplitst door een cluster van sterrenstelsels, geeft meting aan dat het licht 1,3 miljard jaar na de oerknal is uitgezonden. Dit maakt het een van de verst verwijderde sterrenstelsels die ooit zijn waargenomen.

z=1.9

Het licht van dit sterrenstelsel, dat eveneens is verdubbeld, is afkomstig uit een tijd dat er veel nieuwe sterrenstelsels werden gevormd. Het heelal was toen 3,6 miljard jaar oud.

DIAGRAM: JOHN R. ANDERSON, JR., NGM ART. NARCISO BENITEZ, HOLLAND FORD, JOHN BLAKESLEE, EN ZLATAN TSVETANOV, JOHNS HOPKINS UNIVERSITY (JHU); TOM BROADHURST, RACAH INSTITUTE OF PHYSICS, HEBREW UNIVERSITY; GARTH ILLINGWORTH, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA CRUZ/LICK OBSERVATORY (UCSC/LO); MARK CLAMPIN, GEORGE HARTIG, AND ZOLT LEVAY, SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE (STSCI); NASA


z=4.9
z=1.9

jonge sterrenstelsels – soms wel honderd per nacht – die belangrijke gegevens opleverden voor theoretici als Abel en Navarro. Het begon allemaal met een tocht naar een afgelegen bergtop in Hawaï.

Met drie collega's reed Steidel over de smalle, hobbelige weg naar de 4205 meter hoge top van Mauna Kea, in het besef dat ze kans maakten de geheimen van het vroege heelal te ontrafelen. Als de lucht helder bleef, zouden ze de hemel kunnen bekijken door de Keck-telescoop, de grootste optische telescoop ter wereld.

Het was 30 september 1995 en Steidel, pas 32 jaar, hoopte te bereiken wat tot dusver nog niemand was gelukt – het vinden van een groot aantal sterrenstelsels die zo ver verwijderd zijn dat het licht dat zij twaalf miljard jaar geleden uitzonden, nu pas de aarde bereikt. Dan zou hij de stelsels te zien krijgen zoals ze er in hun jeugd uitzagen. Als Steidel en zijn medewerkers genoeg van deze jonkies konden vinden, zouden ze wellicht niet alleen onthullen hoe sterrenstelsels zijn ontstaan, maar tevens hoe ze zich mettertijd ontwikkelden en zich door het heelal verspreidden.

Tot dat moment hadden sterrenkundigen weinig vooruitgang geboekt in het vinden van verafgelegen sterrenstelsels. De meeste kosmologen dachten dat ze grotere telescopen nodig hadden om deze zwakke objecten te kunnen vinden. Maar Steidel dacht het volgende: misschien waren deze sterrenstelsels allang ontdekt, maar was niemand erin geslaagd ze te herkennen tussen de duizenden andere objecten op sterrenkaarten.

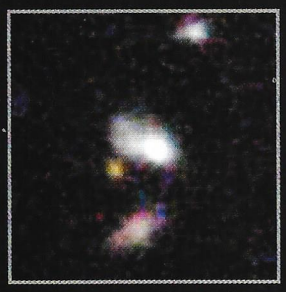
Net als een paar sterrenkundigen vóór hem besefte Steidel dat verre sterrenstelsels specifieke kenmerken hebben. Ze bevatten net als de intergalactische ruimte tussen deze stelsels en de aarde grote hoeveelheden waterstof. Als de hoeveelheid ultraviolette straling die door sterren in sterrenstelsels wordt uitgezonden een bepaald energieniveau bereikt, wordt die straling door waterstofgas geabsorbeerd. Het licht bereikt daardoor nooit de aarde. Dus vóór Steidel en zijn medewerkers er zelfs maar over droomden naar de Mauna Kena te komen, stelden ze een lijst op van sterrenstelsels die helder zichtbaar zijn door rode en groene filters, maar onzichtbaar door een ultraviolet filter. Zulke sterrenstelsels noemden zij 'Lyman-grens sterrenstelsels', naar Theodore Lyman, een natuurkundige die begin twintigste eeuw baanbrekend onderzoek had gedaan naar ultraviolet licht. Op grond van deze test moesten de lichtzwakke sterrenstelsels die Steidels team voor zijn komst naar de Mauna Kea had gevonden, ver in het heelal liggen. Maar klopte dit wel?

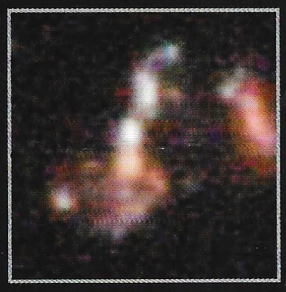
Om afstanden te meten, moeten kosmologen vaststellen in hoeverre het licht van een sterrenstelsel is uitgerekt, of 'roodverschoven', door de uitdijing van het heelal. Hoe groter deze roodverschuiving, hoe groter de afstand tot de aarde. Als een sterrenstelsel bijvoorbeeld een roodverschuiving van drie heeft, komt dat overeen met een afstand van ongeveer twaalf miljard lichtjaar.

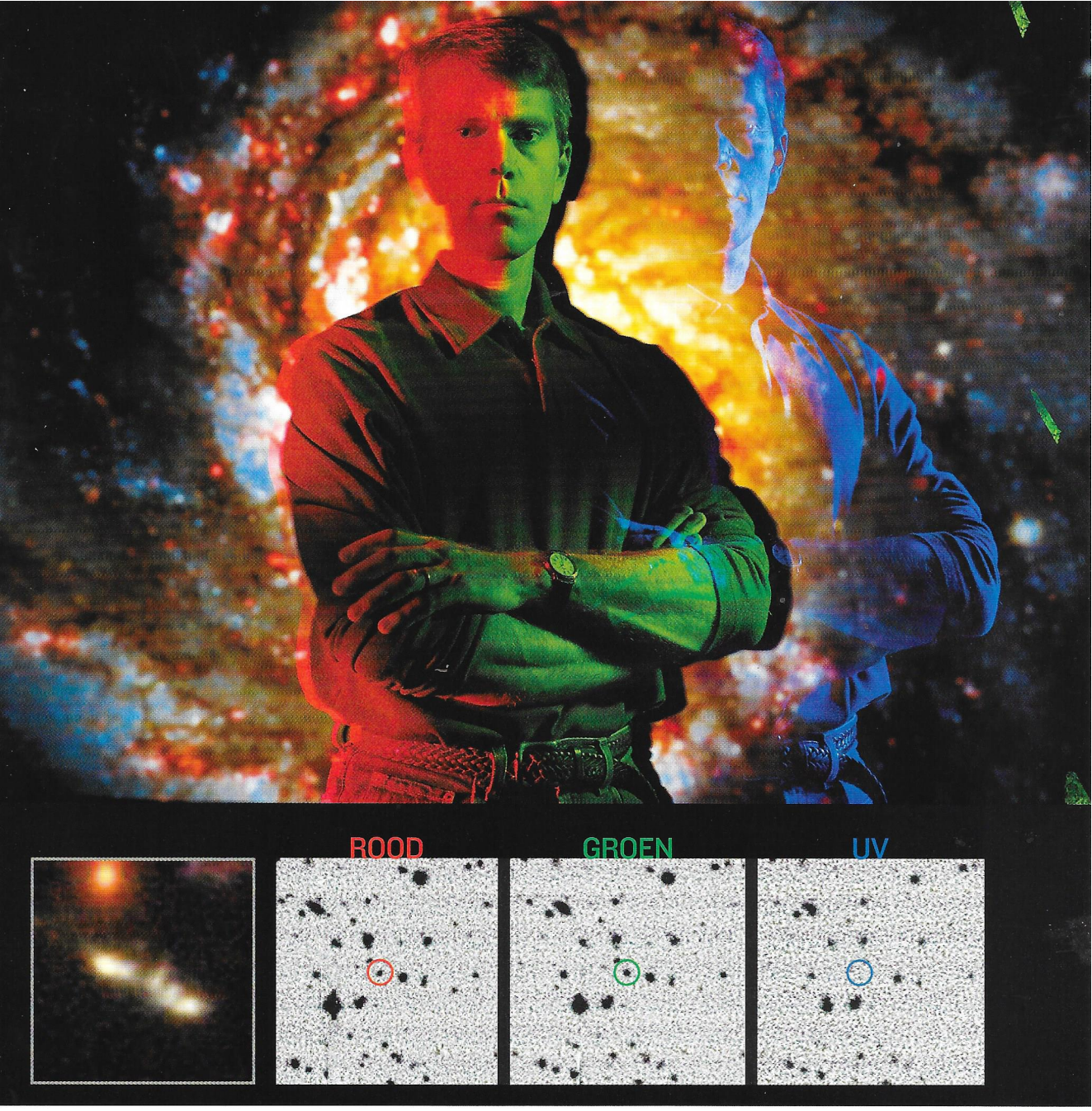
Bij zwakke sterrenstelsels kan de roodverschuiving alleen worden vastgesteld met een zeer

Kosmische pionier

STERRENKUNDIGE Chuck Steidel van het California Institute of Technology is zeer succesvol in het vinden van pas gevormde sterrenstelsels uit het vroege heelal. Steidel en zijn collega's deden hun ontdekkingen door met behulp van aardse telescopen sterrenstelsels te bestuderen, gezien door rode, groene en ultraviolette filters (afbeeldingen rechtsonder). Ze zagen dat sommige sterrenstelsels uit beeld verdwenen als ze door een ultraviolet filter werden bekeken. Steidel besefte dat dit vroege, zeer verre sterrenstelsels moesten zijn; het waterstofgas dat in het vroege universum in grote hoeveelheden aanwezig was, absorbeerde het uv-licht. Met de krachtige Keck-telescoop in Hawaï heeft hij nu meer dan tweeduizend sterrenstelsels gevonden uit de eerste twee miljard jaar van het heelal. De Hubble-telescoop heeft opnamen gemaakt van enkele van deze babysterrenstelsels (onder).







krachtige telescoop als de Keck. Als Steidels team kon aantonen dat hun kleurenmethode werkte, dan hadden ze een waterdichte manier gevonden om niet slechts één of twee, maar wel tientallen of zelfs honderden verafgelegen sterrenstelsels te ontdekken.

Enkele jaren eerder hadden Steidel en zijn medewerkers hun eerste doelwit al gekozen. In het sterrenbeeld Eridanus ontdekten ze een Lyman-grens sterrenstelsel, het helderste stelsel dat ze tot op dat moment hadden gevonden. "We dachten dat áls we al kans van slagen hadden, het met dit object moest zijn," herinnert Steidel zich. Aan de andere kant besefte hij dat dit sterrenstelsel vanaf de Mauna Kea slechts één uur per nacht boven de horizon verscheen.

Het uurtje dat de Keck op het sterrenstelsel gericht was, bleek echter voldoende. Precies zoals Steidel had voorspeld, bleek uit het spectrum dat het sterrenstelsel zich op twaalf miljard lichtjaar van de aarde bevond. Steidel was verrukt dat met zijn methode een zo ver verwijderd sterrenstelsel kon worden gevonden.

Tijdens hun tweede nacht op de Mauna Kea probeerden de sterrenkundigen een nog stoutmoediger plan uit te voeren. Ze maakten ten volle

FOTO BOVEN: MARK THIESSEN; HUBBLE-BEELDEN LINKSBOVEN: MARK DICKINSON, STSCI; BEELDEN VAN AARDSE TELESCOPEN BOVEN: CHUCK STEIDEL, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

gebruik van de mogelijkheden van de krachtige spectrograaf van de Keck door in hetzelfde stuk hemel tegelijkertijd de afstand tot meerdere sterrenstelsels te bepalen. Daartoe gebruikten zij een masker, een stuk aluminium ter grootte van een bakplaat, waar nauwkeurig enkele smalle spleten in waren gemaakt. Elke spleet kwam precies overeen met de positie van het gezochte sterrenstelsel. Dankzij het masker bereikte alleen het licht van de gewenste stelsels de spectrograaf. Tegen de ochtend hadden de jonge sterrenkundigen vijftien sterrenstelsels met een roodverschuiving groter dan drie gevonden.

De zware elementen, die alleen in sterren kunnen zijn gevormd, vormen het basismateriaal voor nieuwe generaties sterrenstelsels.

De winden maken het verhaal van Tom Abel, dat sterrenstelsels zijn geëvolueerd uit een simpel universum vol donkere materie en primaire gassen, een stuk ingewikkelder. Zonder die winden kunnen we het ontstaan van het huidige, zichtbare heelal niet gemakkelijk verklaren.

Sandra Faber ging verder waar Steidels team ophield. Zij staat op het punt om nieuwe ontdekkingen te doen in haar studie naar het ontstaan van sterrenstelsels. Samen met haar medewerkers hoopt ze erachter te komen hoe Steidels babysterrenstelsels zich konden ontwikkelen tot de huidige sterrenstelsels die ons omringen.

'We maken een fotoalbum van het leven van het universum, en verzamelen foto's van het heelal als baby, tiener en volwassene.'

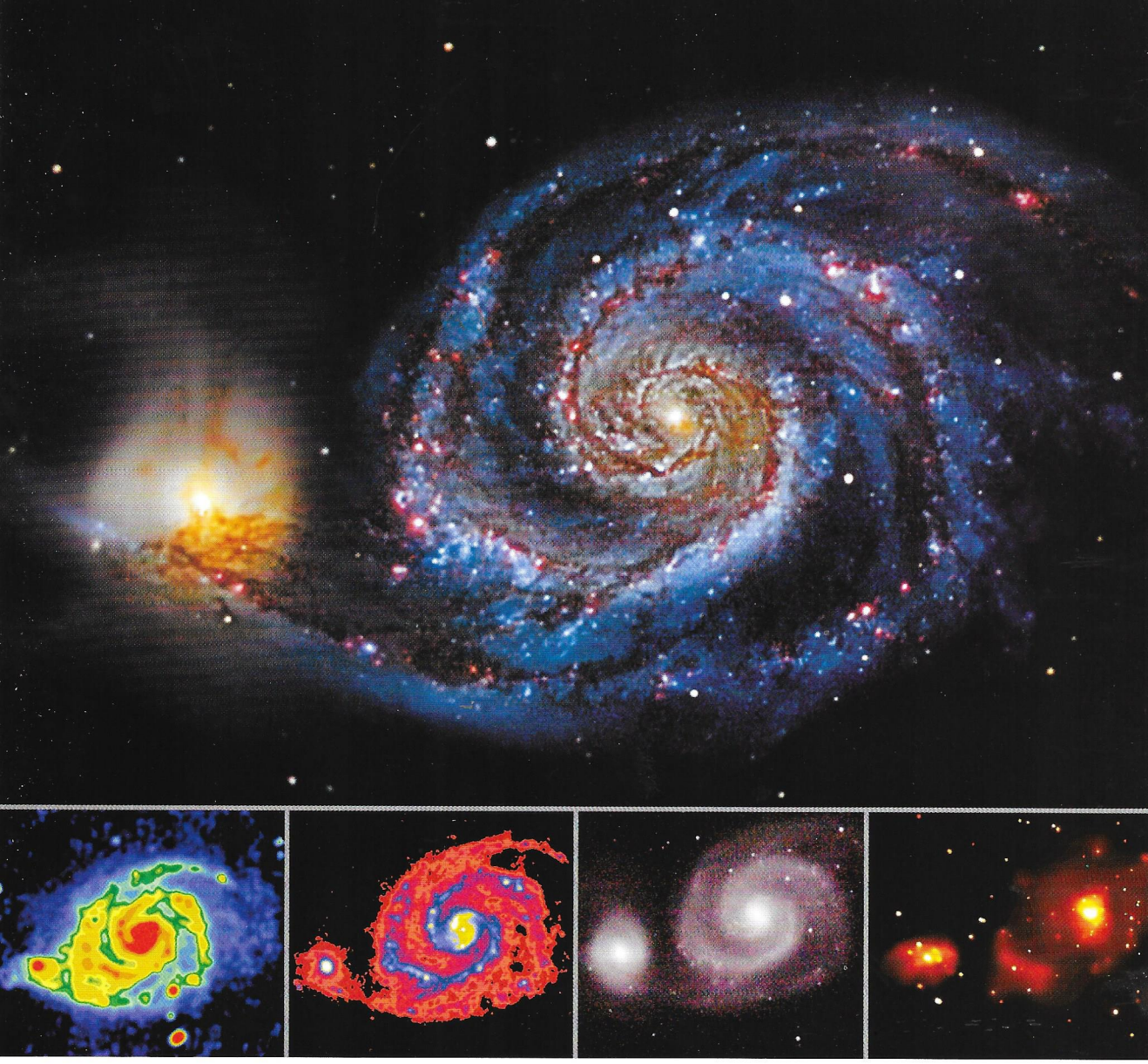
Tot 1997 ontdekte Steidels team nog eens 250 Lyman-grens sterrenstelsels, en er tekende zich een intrigerend patroon af. Tot hun verwondering waren die verafgelegen stelsels geclusterd op een manier die onthulde hoe donkere materie is verspreid. De eerste sterrenstelsels ontstonden in de dichtste delen van het universum. In het algemeen vallen die samen met de huidige dichtste gebieden in het heelal, waar we grote groepen sterrenstelsels en clusters vinden. Naarmate de tijd verstreek en de zwaartekracht onverbiddelijk haar invloed deed gelden, ontstonden ook in de minder dichte delen van het heelal sterrenstelsels vol nieuwe sterren.

MINSTENS ZO BELANGRIJK was een andere ontdekking van Steidel en Kurt Adelberger in 2001: niet alleen de donkere materie speelt een rol bij de vorming van sterrenstelsels, er blazen ook krachtige winden uit de Lyman-grens stelsels die worden veroorzaakt door de explosies van supernova's. Deze winden zijn zo krachtig dat de gewone materie tijdelijk kon ontsnappen aan de donkere materie die zelf niet door deze winden wordt beïnvloed. Ze blazen niet alleen een groot bolvormig gebied schoon rond het sterrenstelsel waaruit zij afkomstig zijn, maar voeren tevens waterstof en andere elementen mee de ruimte in.

In maart 2002 liep zij door de kille ruimten van het Keck II-observatorium. Dit werd in 1996 geopend en staat naast de eerste telescoop. Ze was op de Mauna Kea om de ultramoderne Deep Imaging Multi-Object Spectrograph (DEIMOS) te installeren die zij samen met haar team had ontworpen. Dit negenduizend kilo wegende gevaarte, dat met behulp van metalen rails in de juiste stand moet worden gezet, kan het licht van wel 130 verre stelsels tegelijk analyseren.

"We maken een fotoalbum van het leven van het universum, en verzamelen foto's van het heelal als baby, tiener en volwassene." De sterrenkundigen maken zelfs foto's van hoe het heelal eruitzag vóór de geboorte van sterrenstelsels. Als we hun geboorte als referentiekader nemen, aldus Faber, dan zijn de hete en koude plekjes in de kosmische achtergrondstraling de prenatale foto's.

Faber komt steeds meer te weten over de vorming van sterrenstelsels vanaf hun pubertijd tot de vroege volwassenheid. Bij een roodverschuiving van drie waren de sterrenstelsels vaag en onregelmatig van vorm. Bij een roodverschuiving van één, wat overeenkomt met de periode dat het heelal iets meer dan de helft zo oud was als nu,

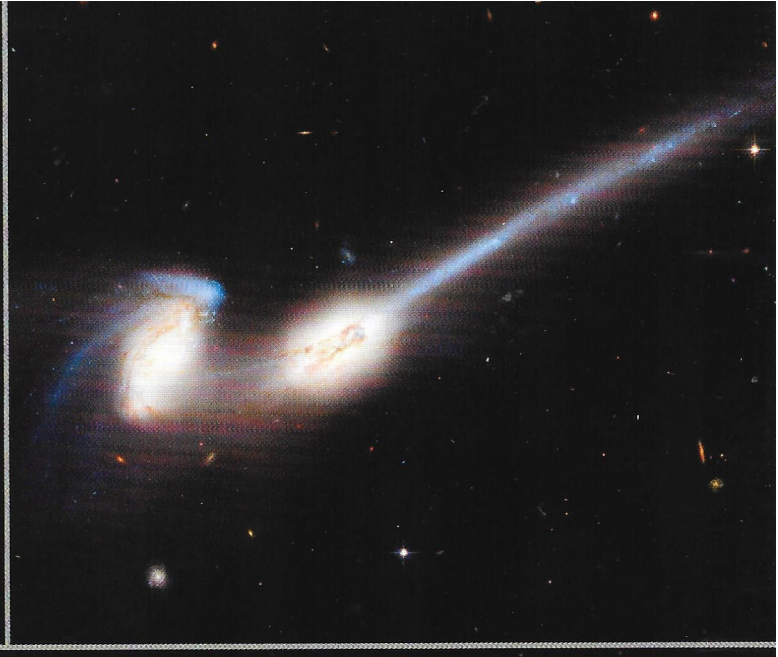


STERRENSTELSEL M51, op 28 miljoen lichtjaar van de aarde, is dichtbij genoeg om bij zichtbaar licht in detail waar te nemen. Radiogolven (geheel links) verraden de krachtige magnetische velden langs de spiraalarmen. Een mid-infraroodopname (tweede van links) maakt stofwolken en nieuwe sterren zichtbaar, terwijl een nabij-infraroodopname (derde van links) het uit oude sterren bestaande fundament van het sterrenstelsel laat zien. Röntgenfoto's tonen gebieden met hete gassen (geel).

verschijnen de eerste vormen zoals Hubble ze beschreef. Daartussen ligt de periode van twaalf tot acht miljard jaar geleden waarbinnen erg moeilijk sterrenstelsels zijn te vinden. Tijdens deze grotendeels nog niet in kaart gebrachte periode, werden sterrenstelsels volwassen, kregen ze hun uiteindelijke massa en namen ze hun nu bekende vormen aan. Een doel van DEIMOS is deze periode zichtbaar te maken.

"Het spectrum van de nachtelijke hemel zélf is de grote vijand," vertelt Faber. "Het is een enorm hek van gloeiende spectraallijnen" – het heldere licht dat door atomen en moleculen op specifieke golflengten wordt uitgezonden. Dit hekwerk in de atmosfeer van de aarde maakt het zwakke infraroodlicht van de sterrenstelsels die haar team wil bestuderen bijna onzichtbaar. Maar de astmosferische spectraallijnen zijn dun, terwijl die van de verafgelegen sterrenstelsels veel breder zijn. Daarom heeft Fabers team de DEIMOS zo

FOTO BOVEN: TONY HALLAS. VAN LINKS NAAR RECHTS: RAINER BECK, MPI FUR RADIO ASTRONOMIE AND NATIONAL RADIO ASTRONOMY OBSERVATORY/ASSOCIATED UNIVERSITIES, INC./ NATIONAL SCIENCE FOUNDATION; MARC SAUVAGE, SPACE AGENCY (ESA)/INFRARED SPACE OBSERVATORY; THOMAS JARRET, INFRARED PROCESSING AND ANALYSIS CENTER, CALTECH, 2MASS PROJECT; ANDREW WILSON AND YUICHI TERASHIMA, UNIVERSITY OF MARYLAND, AND NASA/CHANDRA X-RAY CENTER (CXC)



We weten dat de melkweg ongeveer 100 miljard sterren bevat en dat het heelal bestaat uit

DE MELKWEG en het Andromeda-stelsel stuiven met vijfhonderdduizend kilometer per uur op elkaar af. Hun botsing zal nog enkele miljarden jaren op zich laten wachten, maar astrofysicus John Dubinski van de University of Toronto heeft een simulatie van de gebeurtenis gemaakt. Op het moment dat de twee stelsels contact maken (boven, links) zal de melkweg dwars door het Andromeda-stelsel 'vliegen' en daarbij een spoor van sterren achterlaten (links). De beelden komen overeen met een Hubble-foto van een botsing tussen twee stelsels (boven, tweede van links). Door de zwaartekracht zullen de melkweg en het Andromeda-stelsel elkaar weer aantrekken (derde van links) en uit de twee spiralen zal een enorme elliptische structuur ontstaan (boven). Ons zonnestelsel wordt veilig de ruimte in geslingerd – of vernietigd door de straling van supernova's.

ongeveer 100 miljard sterrenstelsels.

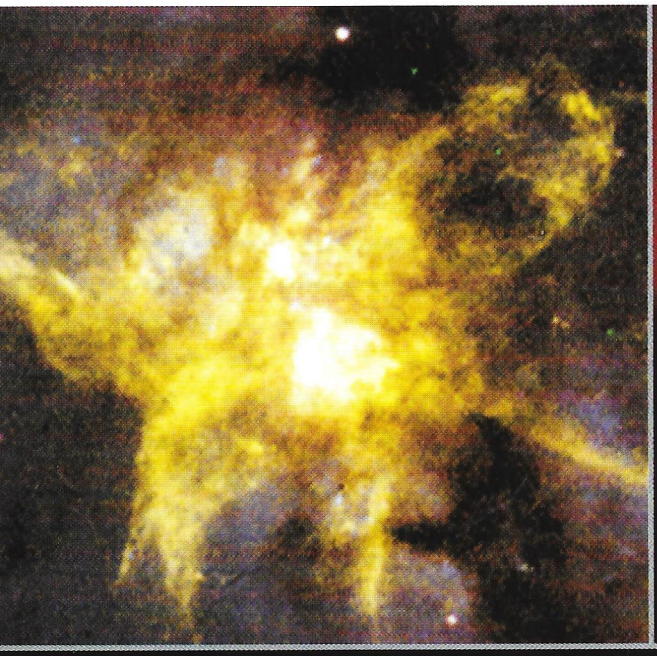
BEELD: JOHN DUBINSKI, UT; HUBBLE-OPNAME: HOLLAND FORD, JHU; GARTH ILLINGWORTH, UCSO/LO; MARK CLAMPIN EN GEORGE HARTIG, STSCI/ADVANCED CAMERA FOR SURVEYS TEAM; NASA; ESA

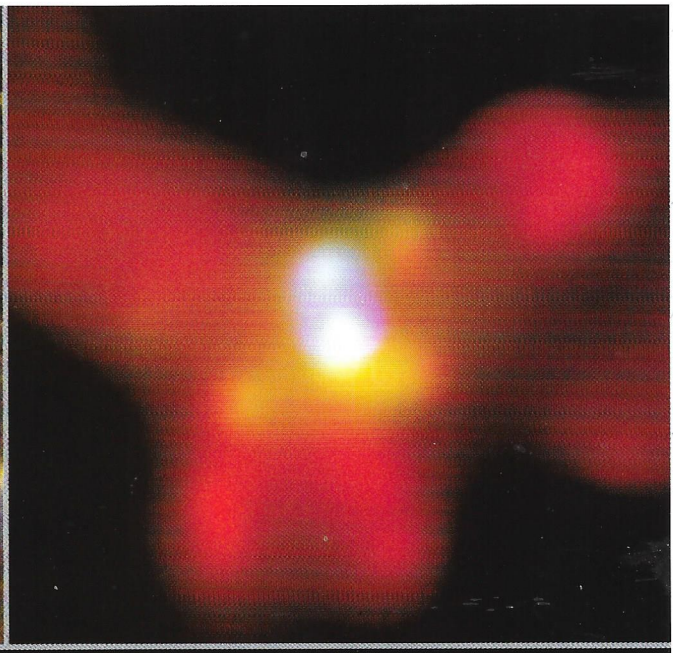
Maar wat er gebeurde tijdens die eerste cruciale

ontworpen dat het infraroodspectrum wordt uitgespreid. Zo kan het team tussen de spijlen van het hek door kijken en zich op het licht van de sterrenstelsels concentreren.

Vanaf dat moment wordt het leuk. De helderheid en de vormen van de stelsels bij verschillende roodverschuivingen – en ontelbare andere eigenschappen die dankzij DEIMOS kunnen worden waargenomen – laten zien hoe de kleine, onregelmatig gevormde sterrenstelsels uit het vroege heelal konden uitgroeien tot de bekende stelsels die Hubble in de jaren twintig beschreef.

Misschien is massa wel de belangrijkste van al deze eigenschappen, aldus Faber. Door de massa van sterrenstelsels die op verschillende plekken in het heelal zijn waargenomen te meten, hoopt Faber de fasen waarin sterrenstelsels samensmelten en groeien, aan het licht te brengen. Ze wil ook graag te weten komen hoe het kan dat spiraalvormige stelsels, die bij botsingen snel worden verstoord, zo veel voorkomen. Misschien wel doordat de spiralen in het nabije verleden niet





EEN TWEETAL SUPERZWARE zwarte gaten bevindt zich diep binnen sterrenstelsel NGC 6240, op vierhonderd miljoen lichtjaar van de aarde. Sterrenkundigen denken dat het ongewoon heldere, onregelmatige sterrenstelsel (beeld in zichtbaar licht, linksboven) werd gevormd door de botsing van twee kleinere stelsels die ieder een zwart gat bevatten. Binnen een paar honderd miljoen jaar zullen de twee om elkaar heen draaiende zwarte gaten (röntgenopname, rechtsboven) samensmelten. Een overzicht van samenstellingen (boven) toont hoe de omvang van zwarte gaten kan verschillen, afhankelijk van de aanwezige hoeveelheid sterrenstof. Hun massa overtreft soms die van de zon miljarden malen. Zulke ontdekkingen brengen sterrenkundigen dichter bij het ontcijferen van de blauwdruk van sterrenstelsels.

periode van sterrenvorming, de zogenoemde donkere eeuwen, is nog altijd niet ontsluierd.

zijn gegroeid door botsingen, maar door het geleidelijk aantrekken van materie. Als haar redenering klopt, zouden de spiraalvormige sterrenstelsels geleidelijk sterren moeten vormen en niet tijdens de met botsingen samenhangende groeispurten. De komende jaren moet DEIMOS uitsluitsel geven.

Sinds 1996 worden de Keck-telescopen bestuurd vanuit een gebouw in Waimea, 77 kilometer van Mauna Kea. In een van de controleruimten richtten Arjun Dey en zijn collega's Keck I op een verzameling zwakke sterrenstelsels. Ze hoopten dieper dan ooit in het heelal door te dringen en sterrenstelsels te vinden die een miljard jaar ouder zijn dan de door Steidel gevonden stelsels.

Deze zijn het duidelijkst zichtbaar als ze worden geobserveerd door filters die alleen licht met een bepaalde golflengte doorlaten. De golflengten komen overeen met een specifieke, door waterstofatomen uitgezonden ultraviolette straling, die door de uitdijing van het heelal sterk roodverschoven wordt. Dit gefilterde licht was een aanwijzing voor – maar geen bevestiging van – het idee dat deze stelsels zich aan de grens van het zichtbare heelal bevinden.

In de controleruimte ernaast probeerde ook George Djorgovski het verre heelal te bestuderen. Hij gebruikte Keck II om de spectra te analyseren van een van de verst verwijderde quasars – de heldere bakens die zich in het centrum van sommige sterrenstelsels bevinden – die tot nu toe zijn gevonden. De quasar ligt zo ver weg dat het licht dat nu de aarde bereikt, werd uitgezonden in de tijd dat het heelal nog blootstond aan de straling van de eerste generatie sterren.

In de controleruimte van Keck I tuurden Dey en zijn collega's naar een reeks kronkelige zwarte lijntjes op het computerscherm. Na enkele uren analyseren hadden ze overeenstemming bereikt. Het licht dat de Keck-telescoop bereikte, verliet het sterrenstelsel LALA J142546.76+352036.3 meer dan dertien miljard jaar geleden, bij een roodverschuiving van 5,74. Het leek erop dat ze het op twee na verste sterrenstelsel, van alle tot op dat moment waargenomen stelsels, hadden gevonden. Maar na een laatste controle brak er bij Dey en zijn collega's een nog bredere glimlach door. Want in de nacht van 13 maart 2002 hadden deze sterrenkundigen het op één na verste stelsel in het heelal gevonden – het verste is een met Keck ontdekt stelsel met een roodverschuiving van 6,56.

WAT BETEKENT dit allemaal? Hebben sterrenkundigen eindelijk ontraadseld hoe sterrenstelsels zijn ontstaan en geëvolueerd? Niet helemaal, meent William C. Keel van de University of Alabama. Maar het is waarschijnlijk dat sterrenkundigen de puzzelstukjes de komende tien jaar in elkaar zullen passen. Vandaag de dag kunnen wetenschappers met zeer grote, nieuwe instrumenten de dertien miljard jaar oude evolutie van het universum bestuderen.

Wat er gebeurde tijdens die eerste cruciale periode van stervorming, de zogenoemde donkere eeuwen, is nog altijd niet ontsluierd. De periode begon een paar honderdduizend jaar na de oerknal en eindigde waarschijnlijk een miljard jaar later. Aan het begin van dit tijdperk was het heelal echt donker. Maar een telescoop die krachtig genoeg is en gevoelig voor de juiste golflengten, moet het licht van de eerste sterren kunnen opvangen.

Keel en vele andere sterrenkundigen hebben hun hoop gevestigd op NASA's James Webb Space Telescope, de opvolger van de Hubble-ruimtetelescoop. De lancering staat gepland voor 2010. Met een spiegel die zes keer zo veel licht kan opvangen als de Hubble en met geavanceerde instrumenten voor infrarood- en zichtbaar licht, zal deze telescoop objecten kunnen ontdekken die veel lichtzwakker en verder weg liggen dan die met welke andere telescoop dan ook zijn waargenomen.

Dat zou onderzoekers in staat stellen te turen in de donkere eeuwen en het zwakke, warme licht op te vangen van de allereerste sterren en sterrenstelsels, objecten die nu alleen kunnen worden gezien met computersimulaties als die op Tom Abels laptop.

Tot dat moment blijft het geheim van het ontstaan van sterrenstelsels in de duisternis verborgen. □

ONLINE

Bezoek voor simulaties van het ontstaan van sterrenstelsels onze website **nationalgeographic.nl** of **be**.

BEELD LINKSBOVEN: ROELAND VAN DER MAREL EN JORIS GERSSEN, STSCI/NASA; OPNAME RECHTSBOVEN: STEFANIE KOMOSSA EN GÜNTHER HASSINGER, MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK, NASA/CXC; ILLUSTRATIE ONDER: ANN FIELD, STSCI/NASA EN DALE GLASGOW