Meer dan 100 feiten over het heelal

AK 04
€ 12.95

Maar liefst 180 PAGINA'S

ALLES OVER HET UNIVERSUM

Reis 13 miljard jaar terug in de tijd

Ontdek de grenzen van het heelal

€ 12,95
BP8 710966 005323 01601 >
EL&

BUITENAARDS LEVEN • HOE EXPLODEREN STERREN • GEBOORTE VAN EEN PLANEET

COMPLETE GESCHIEDENIS VAN HET UNIVERSUM

Als je je ooit hebt afgevraagd wat er achter ons sterrenstelsel ligt, of hoe het heelal is ontstaan, heb je alle antwoorden hier in je handen. We hebben een aantal van de meest prominente astronomen gevraagd naar de fenomenen die we nog niet helemaal begrijpen zoals zwarte materie, wormgaten en zwarte gaten. Daarnaast lees je alles over de geschiedenis en de verwachte toekomst van het heelal, wat de grootste objecten in de ruimte zijn, hoe supernova's ontstaan, hoe de zoektocht naar buitenaards leven verloopt en ontrafelen we een aantal geheimen van het universum. Dankzij de Hubble hebben we prachtige beelden uit het heelal. Ga zitten en maak een reis door de tijd en ruimte.

Bron: NASA (https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html)

"We zijn maar een middelmatig apenras op een kleine planeet van een zeer gemiddelde ster. Maar we kunnen het universum begrijpen. Dat maakt ons zeer speciaal."

Stephen Hawking

Inhoud

In het begin

10 De geboorte van het universum
Het begin van alles

22 Hoe planeten ontstaan
Zo vormden de aarde en andere planeten zich uit stof en gas

30 De schepping van een sterrenstelsel
Exploreer de sterrenstelsels in het universum

Geheimen van het universum

40 100 ruimtewonderen
Ontdek de mooiste en bizarste objecten in de ruimte

54 De rand van het universum
Is er een grens aan de oneindigheid?

64 De 10 grootste structuren in de ruimte
Maak kennis met onmetelijke reuzen

74 De nieuwe zoektocht naar buitenaards leven
Bestaan er intelligente buitenaardse samenlevingen?

82 De grootste ontdekkingen van de Hubble
De verbazingwekkendste successen van de afgelopen 25 jaar

"Het mysterie achter zwarte materie houdt onderzoekers al meer dan 80 jaar bezig."

Reidar Hahn; Fermilab

Ruimtewetenschap

100 Wat is donkere energie?
Een zoektocht naar iets wat zelfs voor de slimsten ter aarde een mysterie is

110 50 feiten over zwarte gaten
Duik in de theorie over dit grote niets

122 Hoe werken planeetbanen?
Zo werkt de aantrekkingskracht die planeten in de juiste baan houdt

124 Donkere materie
Je ziet het niet, het is er wel. Maar wat is het?

132 Super-sterrenstelsels
Wat voor invloed hebben deze superstelsels op hun omgeving?

142 Het einde van een ster
Dit gebeurt er wanneer een ster explodeert

150 De zoektocht naar wormgaten
Wetenschap vs. science fiction

160 Hyperreuzen
Ontdek deze enorme kosmische monsters en hoeveel ze kapot kunnen maken

170 Grote ruimtestormen
Eeuwig durende stormen en meer ...

In het begin

Hoe het universum en alles dat we kennen ontstond

10 De geboorte van het universum
Het begin van alles

22 Hoe planeten ontstaan
Zo vormden de aarde en andere planeten zich uit stof en gas

30 De schepping van een sterrenstelsel
Exploreer de sterrenstelsels in het universum

10
De geboorte van het universum

©NASA; ESA; Wikimedia Commons

"Het zwarte gat in het midden van de Melkweg heeft vier keer zoveel massa als de zon."

30
De schepping van een sterrenstelsel

22
Hoe planeten ontstaan

Geboorte van het UNIVERSUM

We spreken de wetenschappers die op zoek zijn naar het antwoord op de vraag: 'Hoe ontstond ons universum?'

De experts

Naam: Richard Davis
Rol: Professor
Hij is hoofd Technologie bij Jodrell Bank, dat door hem betrokken raakte bij de Planck-missie.

Naam: David Evans
Rol: Professor
Hij leidt het team van de Universiteit van Birmingham, dat bij de deeltjesversneller van CERN aan ALICE werkt.

Naam: Dan Coe
Rol: Astronoom
Stafastronoom bij STScI en bestudeert clusters sterrenstelsels, zwaartekrachtlenzen en donkere materie.

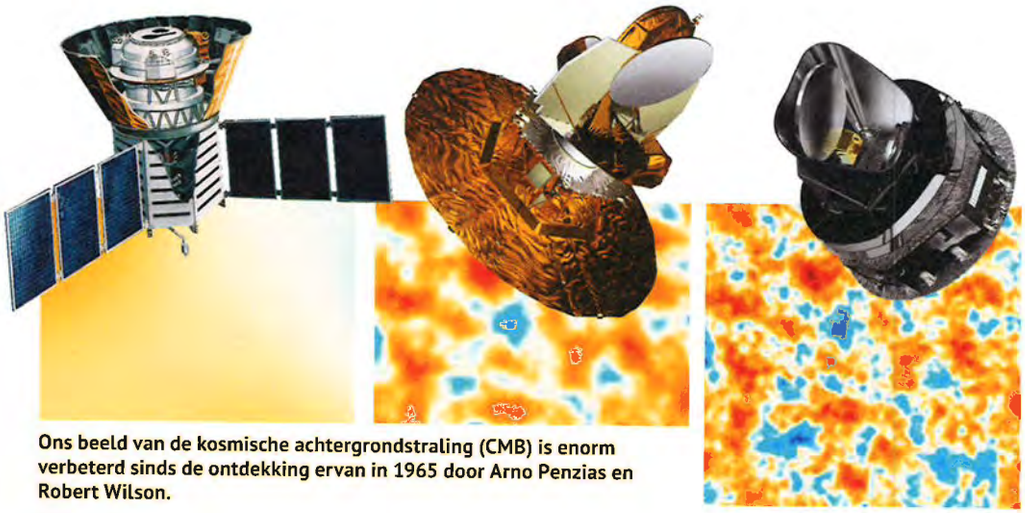
"De evolutie van de wereld kan vergeleken worden met een zojuist geëindigde vuurwerkshow: een paar rode staartjes, as en rook" **Georges Lemaître**

In het begin

Het universum lijkt wel uit het niets te zijn ontstaan. Een mengsel van hoge temperaturen en een dikke soep van vreemde deeltjes breidde zich razendsnel uit – in verschillende fases en onder veranderende omstandigheden – om uiteindelijk 13,8 miljard jaar later het universum te vormen zoals we het nu kennen. De oerknal als schepper van tijd en ruimte; dat is tenminste wat onze huidige kennis van het ontstaan van het universum ons laat geloven.

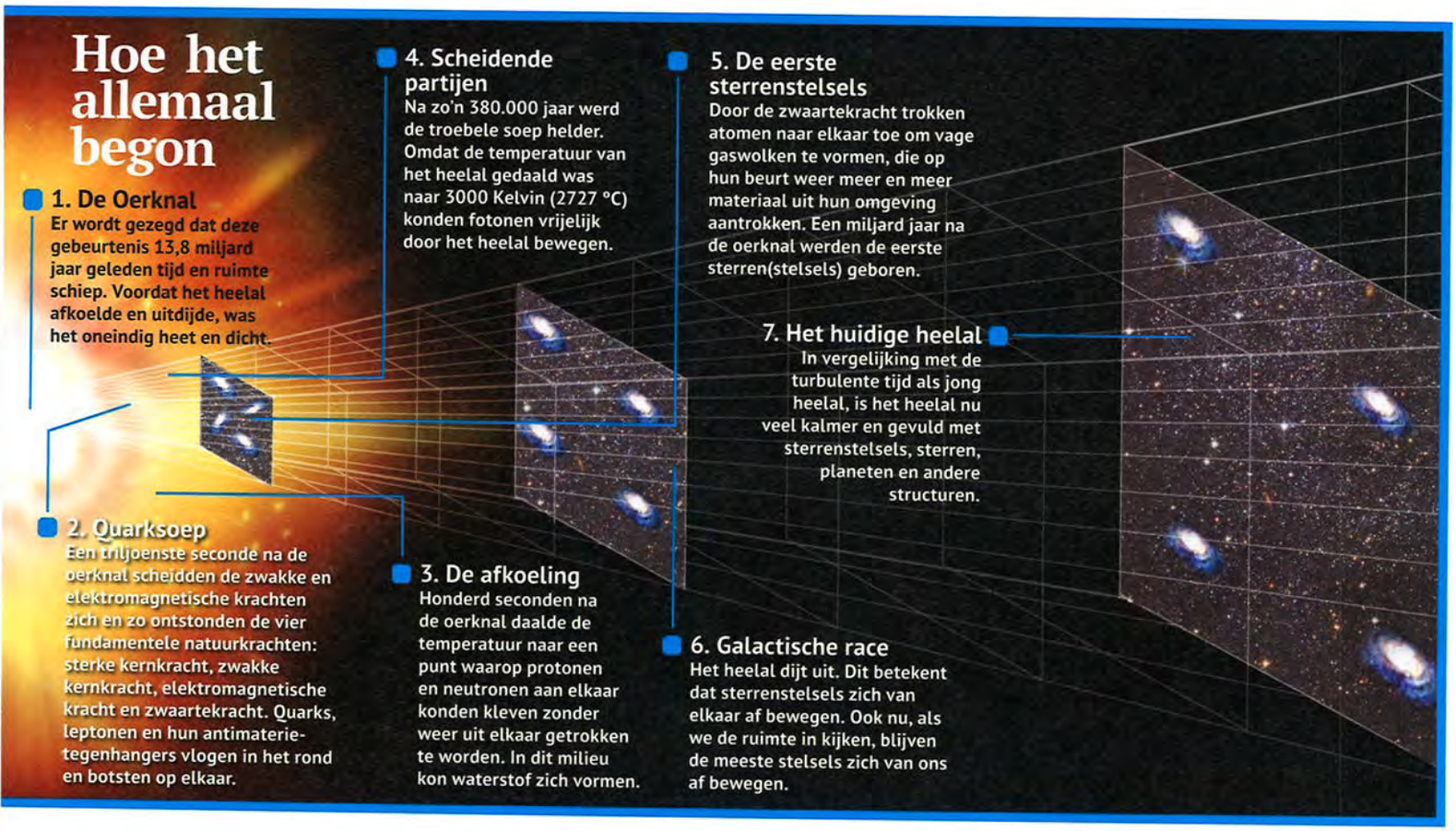
Maar wat we nu weten over het verleden van de kosmos was niet zo vanzelfsprekend in de tijd van Georges Lemaître, de man die later de 'vader van de oerknaltheorie' genoemd werd. Op basis van zijn oplossingen van de vergelijkingen van Albert Einstein vermoedde de Belgische priester, astronoom en natuurkundeprofessor in 1927 dat het universum op één punt tot leven moet zijn gekomen, waarna het zich razendsnel uitbreidde. "De evolutie van de wereld kan vergeleken worden met een zojuist geëindigde vuurwerkshow: een paar rode staartjes, as en rook", zei Lemaître over ons ontstaan. "Vanaf een afgekoeld kooltje kijken we naar het langzaam uitdoven der zonnen en proberen we de verdwijnende pracht van het ontstaan van de werelden terug te halen." Maar Lemaîtres genie werd pas later erkend; hij publiceerde zijn werk in een obscuur Belgisch wetenschappelijk tijdschrift en weinig wetenschappers lazen het. Lemaîtres kans om geschiedenis te schrijven was verkeken.

Maar in Amerika verzamelde een astronoom de data die Lemaîtres theorie ondersteunde. Edwin Hubble en zijn assistent Milton Humason keken door een 2,5 meter grote telescoop bij het Mount Wilson Observatorium in Californië om spiraalnevels te bestuderen. Men dacht dat ze onderdeel waren van onze eigen Melkweg, maar Hubble bewees dat de nevels zelf geïsoleerde



Ons beeld van de kosmische achtergrondstraling (CMB) is enorm verbeterd sinds de ontdekking ervan in 1965 door Arno Penzias en Robert Wilson.

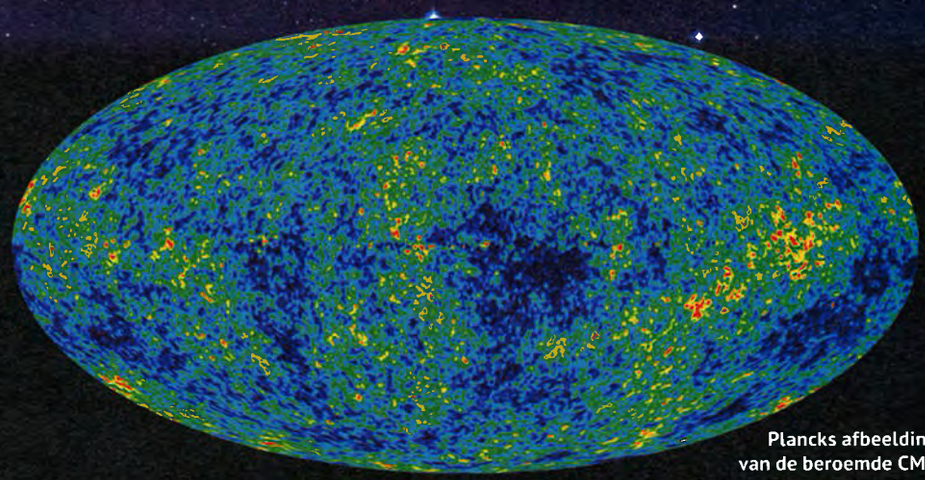
"De foto die de CMB ons oplevert, is dat van een baby-universum; we kijken terug in de tijd naar het begin van tijd en ruimte."



Het begin zien

Astrofysicus Richard David legt uit hoe we de oerknal gemeten hebben

De nu uitgeschakelde Planck-sonde overtrof alle verwachtingen bij het bestuderen van de CMB.



Plancks afbeelding van de beroemde CMB (kosmische achtergrondstraling).

En toen was er licht; dat is eigenlijk hoe ons heelal ontstond. Een punt dat alles bevatte, begon uit te dijen en doet dat nu nog. In die tijd werden de eerste sterren en sterrenstelsels gemaakt, op lichtjaren afstand van elkaar. Ondanks de naam was de oerknal geen soort van explosie die materie, energie, tijd en ruimte uitspoot. Het wordt vergeleken met een oneindig oprekkende ballon die oorspronkelijk een ongelofelijk hete en dichte oersoep bevatte, die afkoelde en verdunde gedurende miljoenen tot miljarden jaren.

Ook dit roept weer veel vragen op en de enige manier om te proberen terug in de tijd te kijken, zijn ruimtemissies die antwoorden zoeken. Deze apparatuur zal ons de heilige graal geven: een foto van ons pasgeboren universum. Verschillende missies zijn de uitdaging aangegaan, zoals de in oktober 2013 beëindigde Planck-missie, een samenwerking van ESA en NASA. Planck borduurde voort op en verbeterde de observaties van de steunmissie van NASA, de WMAP-satelliet (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), die nu na negen jaar dienst werkloos rond de zon draait.

Het hoofddoel van Planck was het meten van de kosmische achtergrondstraling (CMB), de straling die vlak na de oerknal uitgezonden werd. Hieruit is op te maken hoe het heelal er zo'n 400.000 jaar na de oerknal uitzag. Om de beste meetresultaten te krijgen, moest de satelliet ver onder het vriespunt gehouden worden. "Door drie koelingen en passieve koeling werd Planck naar -273,05 °C afgekoeld, waardoor het de koudste plek in het universum werd", zegt Richard Davis van de universiteit van Manchester. Hij stond aan het hoofd van de Britse bijdrage aan een van de instrumenten aan boord van de satelliet. "Het had ook de gevoeligste geluidssensors aan boord, die een zachter geluid dan ooit tevoren detecteerden."

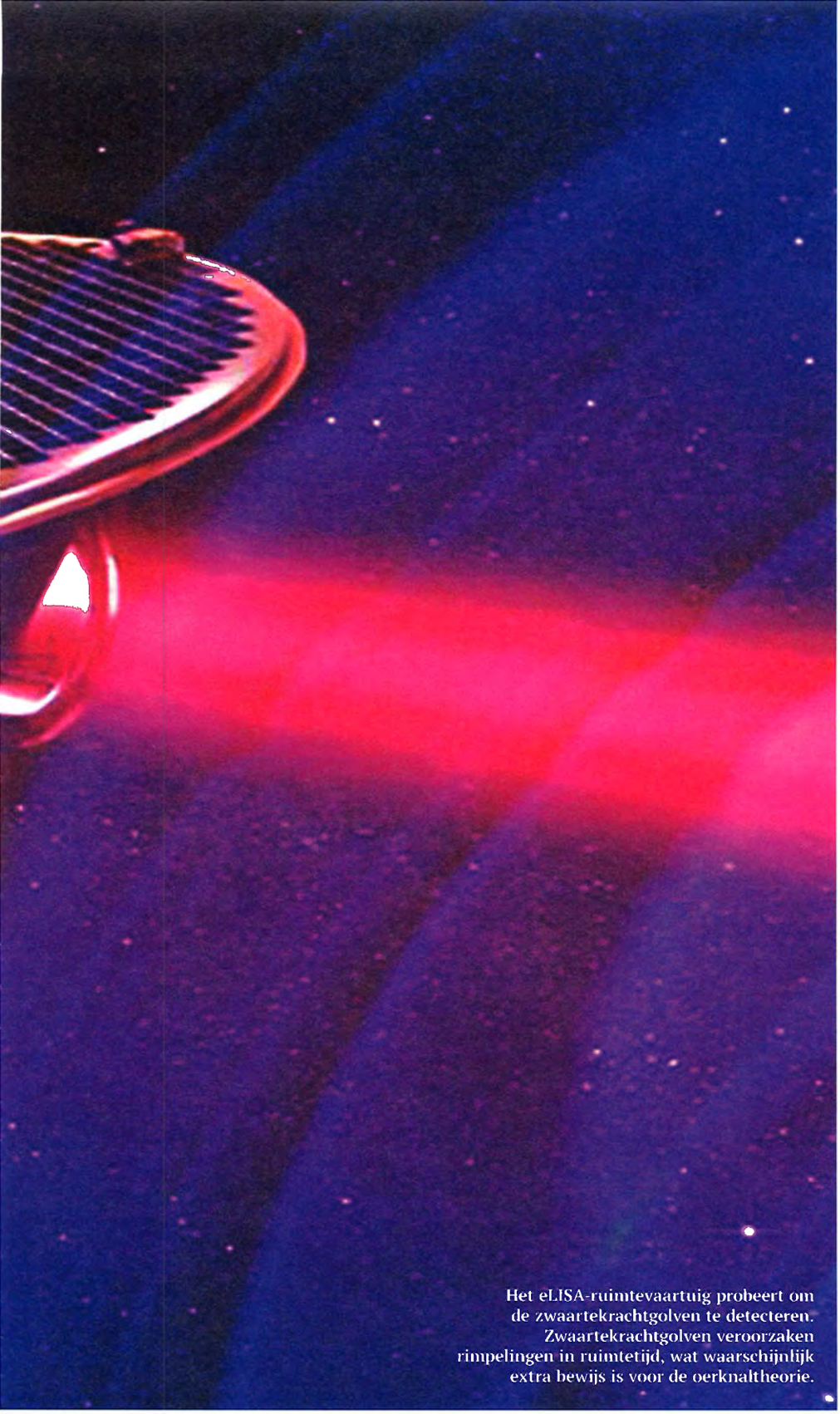
> "Planck heeft alle verwachtingen en soms zelfs zijn doelen overtroffen, dus het was fantastisch." **Richard Davis**

Een belangrijke eigenschap van de CMB is dat het op geen enkele wijze gelijkmatig is; het is een rommeltje van verschillende temperaturen. Door het opnemen van deze oude straling kon Planck zelfs de meest subtiele temperatuurverschillen opmerken. Davis geeft toe dat dit de missie veel opleverde. "De temperatuurmetingen zijn soms maar 2 microKelvin (0 Kelvin is -273,15 °C, het absolute nulpunt, red.)", zegt hij. "Planck heeft alle verwachtingen en soms zelfs zijn doelen overtroffen, dus het was fantastisch."

Een van de vele prestaties van de satelliet is het in kaart brengen van de hele hemel, dat ons heeft voorzien van de beste beelden van het oudste licht in het universum. Verder kon hij de leeftijd van het universum beter vaststellen, op 13,8 miljard jaar, 100 miljoen jaar ouder dan we eerst dachten. En ook al is de satelliet inmiddels met pensioen, Davis verzekert ons dat Planck nog steeds de sleutel in handen kan hebben die ons een beter begrip van ons babyheelal kan bieden. "De komende tien jaar zijn we nog bezig alle data te analyseren, dus er is nog veel te ontdekken. De komende jaren zullen we de data vrijgeven."

sterrenstelsels waren – net zoals de Melkweg, maar dan miljoenen lichtjaren ver weg. Hij bestudeerde de nevels door hun roodverschuiving te meten. Dit werkt net zoals een politiesirene die langs je heen racet. Als de politieauto op je afkomt, zorgt het dopplereffect ervoor dat de geluidsgolven dichter op elkaar komen te staan (hogere frequentie), waardoor de toon hoger wordt. Als de politieauto voorbij is en zich verder van je af beweegt, wordt de ruimte tussen de geluidsgolven groter, waardoor de toon en frequentie dus lager worden. Dit werkt ook bij licht. In de ruimte worden de lichtstralen van objecten die op ons afkomen samengedrukt tot 'blauwere' frequenties, terwijl objecten die van ons af bewegen een lagere 'rodere' frequentie laten zien. Vandaar de naam roodverschuiving. Hubble ontdekte dat bijna alle stelsels roodverschuiving hebben. Ze moesten zich dus allemaal van ons af bewegen. Dit werd de Wet van Hubble genoemd. Maar als alle sterrenstelsels zich van elkaar af bewegen, hebben ze dan misschien ooit veel dichter bij elkaar gelegen en zijn ze dan wellicht ontsproten uit een grote knal?

Toen sir Arthur Eddington in 1931 Lemaîtres werk ontdekte, bracht hij het onder de publieke aandacht, maar tegen die tijd had Hubble zijn ontdekkingen al gedaan. Einstein geloofde het eerst niet, maar veranderde van gedachten toen hij Hubbles bewijs zag. Een grotere criticus was Fred Hoyle, astronoom aan de universiteit van Cambridge, die de denigrerend bedoelde naam 'Big Bang' bedacht. Hoyle geloofde in zijn eigen



Het eLISA-ruimtevaartuig probeert om de zwaartekrachtgolven te detecteren. Zwaartekrachtgolven veroorzaken rimpelingen in ruimtetijd, wat waarschijnlijk extra bewijs is voor de oerknaltheorie.

"Planck wist de kosmische achtergrond-straling gedetailleerder dan ooit weer te geven."

Steady State-theorie, die uitging van een eeuwig en stabiel universum.

Tegenwoordig wordt de oerknaltheorie breed geaccepteerd, maar we hebben geen fotoalbum van hoe het universum opgroeide van baby tot de kosmische veteraan dat het nu is. Astronomen begrepen dat ze vindingrijk moesten zijn en elke minimale aanwijzing die ze konden vinden moesten combineren met wiskundige modellen. Het universum heeft zo haar eigen manieren om de aanwijzingen te communiceren: van achtergrondruis (CMB, cosmic microwave background) tot zwaartekrachtgolven die tussen de verschillende sterrenstelsels bewegen.

Het kosmische reliek

Het universum vertelt ons veel over zijn verleden. De CMB was niet te missen toen het in 1965 storingen veroorzaakte bij de experimenten van Arno Penzias en Robert Wilson. Hun apparaat heette de Hormdel Hoorn Antenne, een radiotelescoop om naar het universum te luisteren. Maar hoe ze de telescoop ook draaiden, overal hoorden ze een ongewenste ruis. Het was vergelijkbaar met het geluid dat te horen is als er 'sneeuw' op de televisie is. Pas nadat ze alle andere mogelijkheden hadden geëlimineerd, accepteerden ze dat het signaal wellicht uit de ruimte kwam en ook nog eens uit alle richtingen. Ze begrepen dat het de gezochte kosmische achtergrondstraling was waarvan geleerden enkel nog het bestaan vermoedden. Als ons universum een begin had, waren daar waarschijnlijk nog sporen van in de vorm van microgolven. Momenteel is de temperatuur in ons universum slechts 2,7 graden boven het absolute nulpunt (-270 °C), dus het is nogal frisjes nu. Vroeger was het juist heel heet, maar het universum koelde tijdens het uitbreiden af.

De CMB was oorspronkelijk zo'n 380.000 jaar na de oerknal uitgezonden, toen de temperatuur daalde naar circa 3000 graden. Bij deze temperatuur konden atoomkernen de vrije elektronen, die door het universum snelden, opnemen. Nu de elektronen weg waren, konden straling en licht vrijelijk door de ruimte schieten zonder af te ketsen op elektronen. Dit licht is de CMB. De CMB laat ons dus niet de oerknal zelf zien, maar is wel zwaar beïnvloed door wat er gebeurde tijdens de oerknal, zoals een

korte periode van uitzetting, waarbij delen van het universum sneller dan het licht uit elkaar bewogen. De 'foto' die de CMB ons oplevert, is dat van een baby-universum; we kijken terug in de tijd naar het begin van tijd en ruimte.

De hemel in kaart brengen

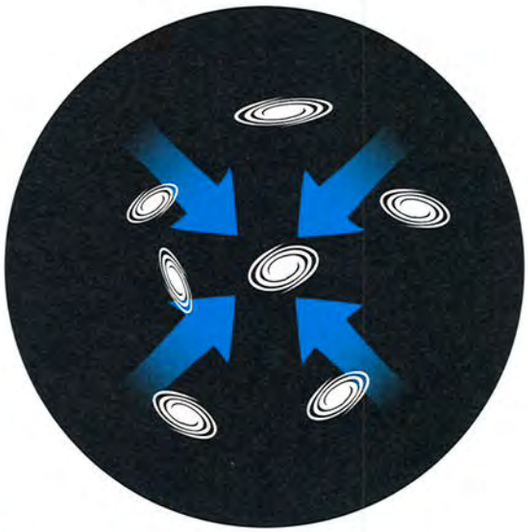
Penzias en Wilson kregen de Nobelprijs voor hun ontdekking, maar er was nog veel te ontdekken over de microgolven; we wilden een kaart. De eerste missie die dit probeerde was de Cosmic Background Explorer (COBE) van NASA. Die begon de CMB te fotograferen zodra het in de ruimte geschoten was. Na vier jaar dienst gaf COBE ons de eerste kaart van de hete en koude plekken van het CMB. Deze werden veroorzaakt door het vroege zwaartekrachtveld dat later het begin vormde van enorme sterrenstelsels van honderden miljoenen lichtjaren groot. De hoofdwetenschapper van COBE won ook de Nobelprijs, maar vlak na COBE volgde de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). Deze ruimtesonde had een betere resolutie en begon de hele hemel in kaart te brengen. Hij wist daarbij temperatuurverschillen tot een 25 miljoenste van een graad vast te leggen. WMAP's ontdekkingen vertelden de astronomen ook veel over de vorm van het universum. Omdat de grootste fluctuaties in temperatuur maar één graad verschilden, concludeerden de wetenschappers dat we in een plat universum leven.

WMAP had een baanbrekende basis gelegd, maar in 2010 eindigde het WMAP-project na negen jaar informatie verzamelen. Terwijl WMAP met pensioen ging, wachtte een nieuw observatorium in de coulissen – klaar om de kennis over het vroege universum verder uit te breiden: ESA's Planck Observatory-satelliet. Dankzij meetapparatuur voor microgolven en infrarood beloofde Planck nog preciezer te zijn dan WMAP en antwoorden uit de verste delen van het universum te kunnen halen. De belofte werd waarheid en Planck wist de CMB gedetailleerder dan ooit weer te geven. In oktober 2013 eindigde de missie, maar we hebben nu een preciezer beeld van het universum en een duidelijker tijdstip van de start van de oerknal. Maar de ruis van de microgolven is niet de enige manier waarop het universum ons vertelt hoe het begon. Er zijn nog meer bewijzen waar we gebruik van kunnen maken.

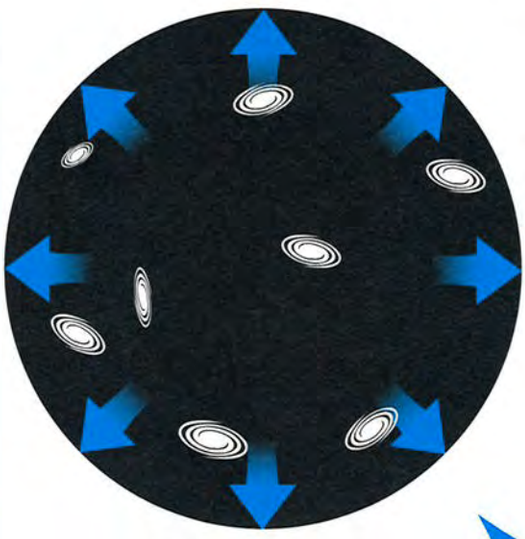
Die bewijzen zijn de rimpelingen in ruimtetijd: zwaartekrachtgolven. Deze lastig vindbare trillingen zijn een van de gaten in Einsteins relativiteitstheorie. Zwaartekrachtgolven kunnen door allerlei gigantische objecten gemaakt worden, maar sommige ervan zijn tijdens de oerknal gevormd en bewegen zich nog steeds voort door het universum. Het probleem is dat ze niet direct waar te nemen zijn, maar dat betekent ook dat ze vrijwel niet beïnvloed kunnen worden. Dit zou betekenen dat de golven de enige informatiebronnen zijn die ons ongeschonden bereiken vanuit de tijd van de oerknal. Om ze te vangen moet je extreem gevoelige apparatuur hebben, en dat is precies

Hoe het zal eindigen

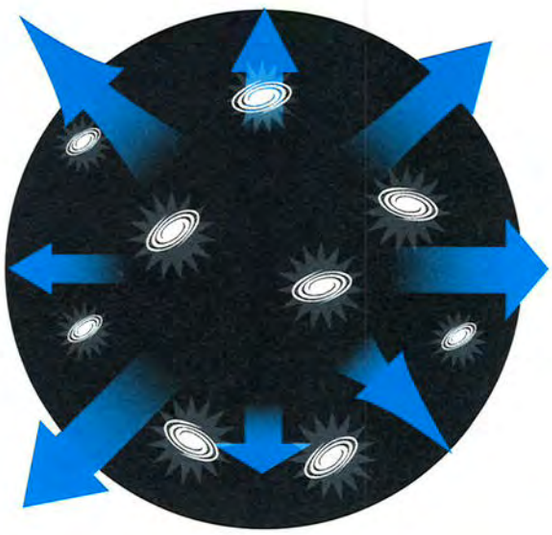
Er zijn drie theorieën over het einde van het heelal. Een ervan is de Big Crunch, waarbij zwaartekracht het overneemt en alles op één punt samenbalt. Daar tegenover staat de Big Rip, waarbij het uitdijen van het heelal steeds versnelt, tot sterren, planeten, sterrenstelsels en de ruimte zelf uit elkaar worden gereten. Tussen deze twee extremen in zit het aannemelijke scenario waarbij de uitdijing niet sterk genoeg is voor een Big Rip en de zwaartekracht niet sterk genoeg is voor een Big Crunch. Het universum zal in plaats daarvan rustig blijven uitdijen en koud en levenloos worden. Dit wordt de Big Freeze genoemd.



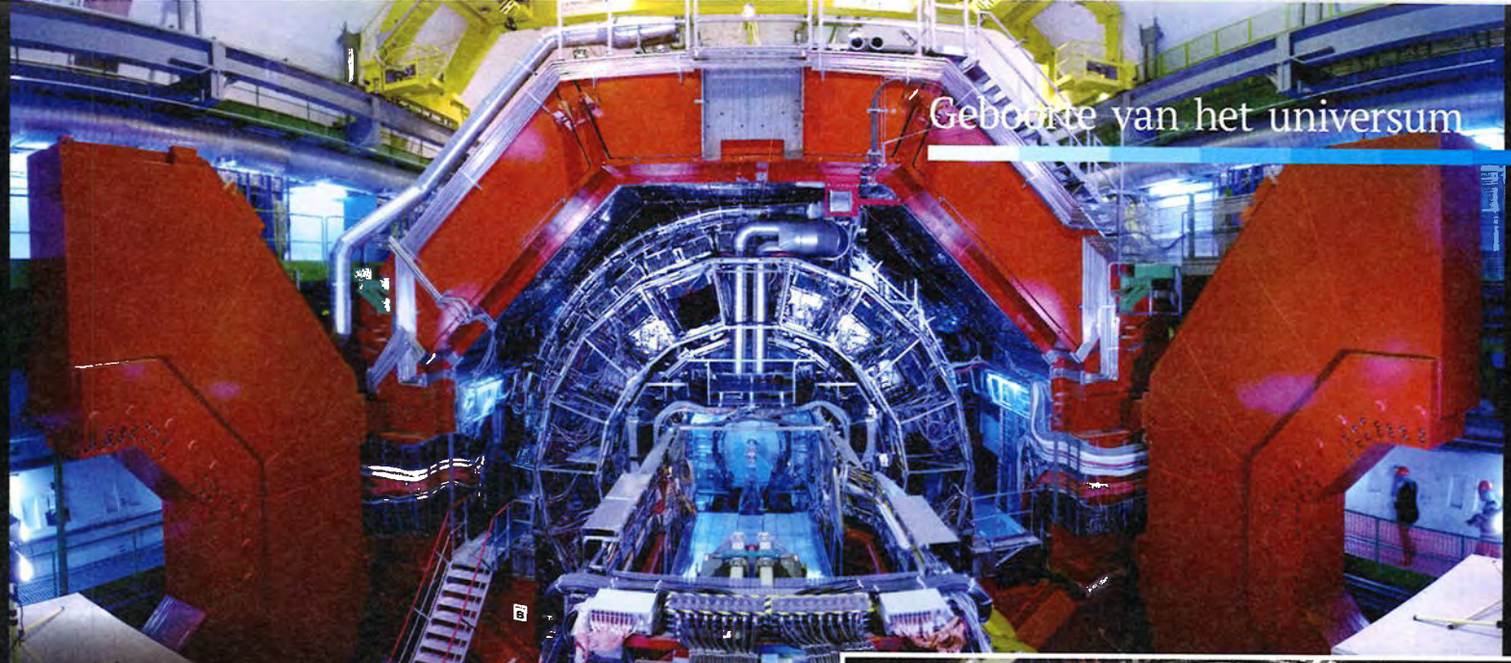
Gesloten universum
De dichtheid van het universum is hoger dan vijf waterstofatomen per kubieke meter. Er is geen afstotend effect van donkere energie en de zwaartekracht stopt uiteindelijk de uitdijing. Al de materie in het universum trekt samen in 1 punt; de Big Crunch.



Open universum
Als de ruimte open en gebogen is, blijft het universum voor eeuwig uitdijen. Donkere energie drijft de expansie mede aan. Het resultaat? Hittedood, de Big Freeze of de Big Rip kan elk moment beginnen. De dichtheid van het heelal is hierbij lager dan de kritieke dichtheid.



Vlak universum
Zonder donkere energie blijft een vlak universum zich voor eeuwig uitdijen, maar wel steeds langzamer. Met donkere energie vertraagt de uitdijing eerst dankzij zwaartekracht, om vervolgens te versnellen. Het lot van het vlakke universum is hetzelfde als van het open universum. Dichtheid en kritieke dichtheid zijn gelijk.



A Large Ion Collider Experiment (ALICE) is een van de zeven detectorexperimenten in de LHC bij CERN. Men denkt dat de botsing van looddeeltjes op hoge snelheid genoeg is om een quarksoep te maken.

David Evans, hoofd van het ALICE-experiment, onderzoekt de binnenkant van de detectiekamer.

De oerknal nabootsen

David Evans, professor in hoge-energiefysica, maakt baby-universums

Verstopt onder de dichtbevolkte Zwitserse stad Genève ligt de deeltjesversneller, Large Hadron Collider (LHC) genaamd, gebouwd door de Europese Organisatie voor Nucleair Onderzoek, beter bekend als CERN. Deze laat deeltjes versnellen tot net onder de lichtsnelheid. Het doel? Om te proberen na te bootsen hoe het universum eruit heeft kunnen zien enkele minuten na de geboorte. In de deeltjesversneller zitten vijf detectors, twee daarvan (LHCb en ALICE) zijn bedoeld om momenten tijdens de groei van ons universum te meten. Het geheel werkt als een soort oerknalmaker. Het verschil is dat de knal op een veel kleinere schaal plaatsvindt en de wetenschappers er iets meer controle over hebben.

Het doel van het ALICE-project is looddeeltjes op elkaar te laten botsen om zo een plasma te creëren dat een tienmiljoenste seconde na de oerknal bestond. "Alle 82 elektronen worden van een loodatoom gehaald en de positief geladen kernen worden vervolgens in de LHC versneld tot 99,9999% van de lichtsnelheid", zegt David Evans van de universiteit van Birmingham. Hij is het hoofd van het team dat aan het ALICE-experiment werkt. De loodkernen botsen dan op elkaar in de enorme ALICE-sensor en creëren, heel kort, een superhete en dichte subatomaire vuurbal."

De resultaten laten zien dat deze vuurballen (nog veel kleiner dan één atoom) een temperatuur van zes miljard °C kunnen bereiken. Dat is ruim 300.000 keer de temperatuur van onze zon en daarnaast wordt een dichtheid bereikt van vijftig keer die van een neutronenster. De laatste keer dat zulke temperaturen en dichtheden bereikt werden, was een miljoenste seconde na de oerknal. Onder deze omstandigheden smelten protonen en neutronen (de bouwstenen van een atoomkern) samen tot een soep van fundamentele deeltjes, quarks en gluons genaamd. De soep heet een quark-gluonplasma."

Evans denkt dat het plasma dat ze maken in ALICE een redelijke weergave is van de brij in het vroege universum. "Maar de vuurbal die wij maken, is veel kleiner dan die van het vroege universum en zal dan ook veel sneller afkoelen," zegt Evans, om daarna toe te voegen dat de resultaten van de detector indicaties zijn van doorbraken in onze kennis over de vroege kosmos. "Hoewel we net begonnen zijn, laten onze resultaten zien dat het quark-gluonplasma zich gedraagt als de meest perfecte vloeistof die ooit gemaakt is. Dus het lijkt erop dat het universum voortkomt uit een perfecte vloeistof."

Een andere verrassing waren de sterke krachten in het plasma, waarbij hoge-energiedeeltjes, die normaal door metersdik sensormateriaal heen vliegen, nu geabsorbeerd worden door iets wat amper dikker is dan een atoomkern.

Op het moment van dit schrijven was de LHC stilgelegd voor reparaties en stonden Evans en zijn team te wachten op de nieuwe start in het begin van 2015. Evans vertelde over zijn plannen: "We zullen looddeeltjes kunnen laten botsen met dubbel de energie, waardoor er nog hetere en dichtere vuurballen ontstaan. We staan pas aan het begin van een fantastisch avontuur waarbij we de eigenschappen van het quark-gluonplasma ontdekken en ik verwacht onderweg veel verrassingen tegen te komen."

Ondertussen wordt nog steeds gewerkt aan het antwoord op de vraag waarom er ongelijke hoeveelheden materie en antimaterie waren in het begin. En natuurlijk heeft de Large Hadron Collider de vondst van het Higgs-boson opgeleverd: het deeltje dat alle materie massa geeft.

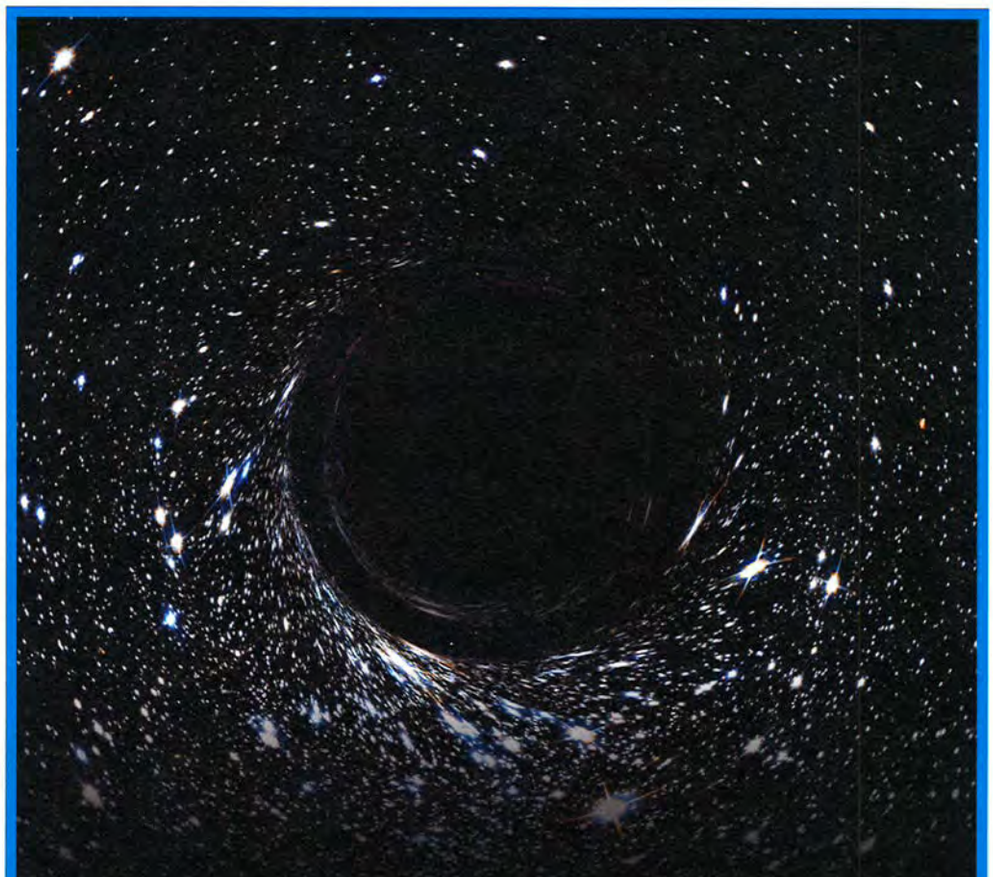
> "Het quark-gluonplasma lijkt zich te gedragen als de meest perfecte vloeistof die ooit gemaakt is." David Evans

wat wetenschappers gaan doen. In tegenstelling tot de veelvoorkomende elektromagnetische golven kunnen zwaartekrachtgolven (het resultaat van enorme gebeurtenissen zoals de fusie van superzware zwarte gaten) zich door alle soorten materie heen bewegen.

Er zijn verschillende pogingen ondernomen om zwaartekrachtgolven te detecteren. De eerste Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) was een grootschalig maar vruchteloos project, maar de verbeterde versie wist in september 2015 voor het eerst een zwaartekrachtgolf te detecteren. Momenteel werkt ESA samen met NASA aan de Evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLisa), een grootschalig ruimteproject dat uit drie satellieten bestaat en niet alleen de zwaartekrachtgolven detecteert, maar ook het hele universum dankzij deze golven vast kan leggen. Hiermee krijgen we meer informatie over de vorming van sterrenstelsels, hoe sterren groeien en het vroege universum. De ontwikkelaars van eLISA beweren trots dat het ons ook meer kan vertellen over de structuur en aard van ruimtetijd, over zwarte gaten en andere onbekende objecten. Om de apparatuur te testen is op 3 december 2015 de LISA Pathfinder gelanceerd. Deze ene satelliet is de voorloper en testversie van de uiteindelijke eLISA-missie, die in 2019 gelanceerd zal worden.

Het lijkt erop dat we, dankzij de samenwerking tussen de wetenschappers achter de missies en theorieën, een redelijk goed fotoalbum (of tijdlijn) kunnen samenstellen van het 13,8 miljard jaar oude universum. In het vroegste begin was er niets anders dan plasmasoep. Het universum was extreem heet en de deeltjes materie als antimaterie (de tegenpool van materie) schoten alle richtingen uit. Toen begon het af te koelen en schiep het gelijke hoeveelheden materie en antimaterie, die elkaar al snel vernietigden. Gelukkig voor ons, maar om een voor ons nog onbekende reden, was er aan het einde nog wat materie over. Terwijl het universum vertraagde en afkoelde, begonnen de eerste deeltjes (de bouwstenen van materie) zich te vormen. De eerste sterren vormden zich zo'n 400 miljoen jaar na de oerknal, gevolgd door de eerste sterrenstelsels. De oudst bekende sterrenstelsels zijn wel 13,2 miljard jaar oud.

Hoewel we er zeker van zijn dat de oerknal plaatsvond, blijft het universum een reeks fundamentele en existentiële vragen oproepen. Waar kwam het universum vandaan? Waarom ontstond het eigenlijk? Waarom was er meer materie dan antimaterie in het vroege universum? Waarom versnelt donkere energie de uitdijing van het heelal? Wat we wel weten is dat de oerknal geen explosie in iets was. Het gebeurde overal, waardoor de CMB overal is. Ook weten we dat het uiteindelijke lot van het universum afhangt van wat er wint in de grote kosmische strijd: zal de zwaartekracht het heelal weer doen krimpen, of zal de donkere energie de uitdijing voor altijd versnellen? Deze vragen blijven onbeantwoord.



Gaten in de theorie

Het is dan misschien wel de belangrijkste theorie om het ontstaan van het universum mee te verklaren, maar de oerknaltheorie heeft nog wel wat onopgeloste gaten.

1. Verdwijnende antimaterie

In het begin waren er gelijke hoeveelheden materie en antimaterie. Als deze twee met elkaar botsen, vernietigen ze elkaar. Waarom hebben we dan nu vooral materie?

2. Het horizonprobleem

Liggen de regio's van het heelal te ver uit elkaar om te communiceren? Als ze geen invloed op elkaar kunnen uitoefenen, snappen wetenschappers niet waarom de temperatuur overal hetzelfde is.

3. Een vlak probleem

Bewijs wijst erop dat het huidige universum redelijk vlak is. Experts denken dat de huidige vorm een onwaarschijnlijk resultaat is van de evolutie van het heelal vanaf de oerknal.

4. Formatie van sterrenstelsels

Willekeurige hobbels in het uitdijende heelal zijn wellicht niet genoeg om sterrenstelsels te vormen. In een snel uitdijend heelal verliest de zwaartekracht aan invloed, waardoor deze structuren niet gevormd kunnen worden.

5. Het monopoolprobleem

De oerknaltheorie voorspelt dat er veel 'magnetische monopolen' gevormd zouden moeten zijn. Maar ze zijn nooit gezien, dus als ze al bestaan, zijn ze veel zeldzamer dan voorspeld!

Bestuderen van de nasleep

Astronoom Dan Coe bestudeert de gevolgen van de oerknal in de interstellaire ruimte

Daar zijn we dan, 13,8 miljard jaar later. Alle sterren, planeten en sterrenstelsels hangen rustig in een eindeloos zwart vacuüm. Het is moeilijk te geloven dat er een tijd was waarop de omstandigheden in het universum chaotisch en constant in beweging waren. Maar het bewijs is overal, zoals te zien is in het Hubble Deep Field, een stuk interstellaire ruimte gefotografeerd door de Hubbletelescoop.

"Het Hubble Deep Field liet verre sterrenstelsels zien die heel anders lijken dan sterrenstelsels in onze buurt", legt Dan Coe, astronoom aan het Space Telescope Science Institute in het Amerikaanse Maryland, uit. "Ze zijn meestal dichter opeengepakt, minder ordelijk en ze moeten nog spiraal- of ellipsvormig worden."

Dit kleine fotootje (vergelijkbaar met een tennisbal van 65 millimeter die op 100 meter afstand gehouden wordt) is een mozaïek van dagenlange waarnemingen en bevat 3.000 objecten, waarvan de meeste sterrenstelsels zijn. Enkele van deze structuren zijn de jongste en verst gelegen bekende stelsels. Hierdoor kunnen we terug in de tijd kijken, naar het moment dat het universum nog jong was. "Verre sterrenstelsels lijken roder," zegt Coe. "Deze 'roodverschuiving' is te wijten aan de uitdijing van het universum. Toen het heelal uitbreidde, werd het licht mee uitgerekt tot langere, rodere golflengtes. Ultraviolet sterrenlicht dat miljarden jaren geleden uitgezonden werd uit verre stelsels, is qua golflengte zo ver uitgerekt als het bij ons komt, dat wij het zien als rood of zelfs infrarood licht.

De installatie van een nieuwe infraroodcamera aan boord van de Hubbletelescoop gaf astronomen de kans om in de geschiedenis van het heelal te kijken en zo steeds verder liggende stelsels te ontdekken met grotere roodverschuivingen. "Zelfs als onze ogen net zo groot waren als de Hubbletelescoop, zouden we deze sterrenstelsels niet zien", zegt Coe. "We denken dat het verst gelegen stelsel in het Ultra Deep Field zo'n 500 miljoen jaar na de oerknal ontstond, dus het is ruim dertien miljard jaar oud."

Maar Coe en zijn collega's kijken nog verder. Coe: "Het Hubble Ultra Deep Field was ongeveer twee keer zo groot als het originele Deep Field. We beginnen nu aan een groots nieuw Hubbleprogramma, waarbij we twaalf nieuwe Ultra Deep Fields, verspreid in de lucht gaan bekijken." Het programma waar Coe het over heeft, is een nieuw programma genaamd Frontier Fields waarmee we andere stukken ruimte kunnen vergelijken met het Ultra Deep Field, waardoor we kunnen controleren of de ruimte inderdaad in alle richtingen uitdijt. "Het zal ook gebruik maken van lenzen die we zwaartekrachtlenzen noemen. Hiermee kunnen we het verre universum vergroten en nog verder kijken." De ruimtelescopen Spitzer en Chandra zullen tegelijk infrarood- en röntgenfoto's nemen van de Frontier Fields.

Coe herinnert ons eraan dat telescopen op aarde al grote delen van de nachtelijke hemel hebben vastgelegd en ontdekt hebben dat het universum er in alle richtingen ongeveer hetzelfde uitziet. "Gedurende miljarden jaren heeft zwaartekracht een kosmisch web van donkere materie geweven. Via dit web wordt gas verplaatst dat sterren en sterrenstelsels vormt en stelsels samentrekt om grote clusters van sterrenstelsels te vormen", legt Coe uit. "Het originele Ultra Deep Field ligt wellicht op een dichte kosmische knoop of een kosmische leegte. Daarom hebben we meer Ultra Deep Fields nodig. Om meer te leren over de verre kosmos."

> "Het Hubble Ultra Deep Field was ongeveer twee keer zo groot als het originele Deep Field." **Dan Coe**

Coe en zijn collega Jennifer Lotz, een assistent-astronoom die ook werkt bij het Space Telescope Science Institute. Dit instituut leidt het Frontier Fields-programma.

© ESA; John Vogel, STFC; NASA AEI/MM; exozet GW simulation: C. Henze

PROBEER NU

BBC
MAKEN WE OOIT EEN EINDE AAN KANKER?
NIEUW IN NEDERLAND
4,95 euro
SCIENCE WORLD
HOE TECHNOLOGIE ONZE HERSENEN VERBETERT
Roboracers
De eerste competitie voor zelfrijdende race-auto's
Wordt de mens steeds gewelddadiger?
Q&A
Waarom kraken gewrichten?
Van wie is de maan?
Hoe komen Eskimo's aan fruit?
UITGELEGD:
ELEMENTAIRE DEELTJES
Zo werd ontdekt waar materie uit bestaat
WAAROM HONDEN BETER ZIJN DAN KATTEN
Sorry Dikkie Dik, maar de wetenschap heeft gesproken
50
0 29074 77573 7
#Uitgave 1 | Prijs € 4,95
DEC 2016 sciencefocus.com

NIEUW

SCIENCE WORLD

3X VOOR SLECHTS

€12,50

STOPT AUTOMATISCH

Science World is hét magazine voor iedereen met een nieuwsgierige geest. Het doet je verwonderen en brengt je nieuwe kennis bij. Op 100 pagina's wisselen we boeiende verhalen, tegendraadse inzichten, korte wetenswaardigheden en technologische ontwikkelingen af met ontdekkingen over het brein en antwoorden op lezersvragen.
Science World ligt vanaf 6 december in de winkel.

GA SNEL NAAR:

www.fnl.nl/scienceworldabo

DE VORMING VAN EEN PLANEET

Ontdek hoe onze thuisplaneet, net zoals haar buren in ons zonnestelsel en alle andere planeten in het heelal, geboren is uit een chaotische wolk van stof en gas.

Eigenlijk is de geboorte van een planeet een onderdeel van een grotere gebeurtenis: de geboorte van een ster. Sterren ontstaan uit een nevel: enorme gaswolken van vooral waterstof en helium. Soms zorgt een verstoring in een nevel ervoor dat een deel van het gas en stof samentrekt tot een compacte knoop van materie. Als de knoop groot en dicht genoeg is, oefent het voldoende aantrekkingskracht uit, waardoor het implodeert. Het enorme volume aan extreem compact gas concentreert zich in het centrum van de knoop en door de zwaartekracht wordt het opgewarmd tot een protoster. Bij voldoende massa wordt de energie in de protoster steeds hoger, wat uiteindelijk tot een kernfusiereactie leidt. Als dit gebeurt, is het een volwassen ster geworden.

Volgens de theorie van de zonnenevel vormt zich tegelijkertijd uit het omliggende gas en stof een protoplanetaire schijf (proplyd) rond de protoster. Als de protoster zich net begint te vormen is het materiaal eromheen nog steeds verzameld in een chaotische, woelige wolk. Maar dankzij de groeiende aantrekkingskracht van de protoster begint de wolk steeds sneller om het centrum te draaien. Terwijl deze draaiende massa versnelt, wordt het steeds platter en vormt het een dunne schijf, gevuld met al het materiaal dat uiteindelijk samen zal klonteren tot planeten.

De zonneneveltheorie verklaart niet alleen hoe planeten zich vormen, maar ook waarom zonnestelsels allemaal hetzelfde georganiseerd zijn. De planeten draaien allemaal in dezelfde richting rond een centrale ster op hetzelfde niveau, omdat dat de plek was waar de materieschijf vroeger om de protoster draaide.

Hoe dit allemaal precies gebeurt, staat nog ter discussie. Er zijn misschien wel veel verschillende processen van planeetvorming. Het belangrijkste idee, het accretiemodel, gaat er vanuit dat planeetvorming begint als kleine deeltjes samenklonteren tot grotere brokken. Dit model lijkt in ieder geval te gelden voor rotsachtige planeten als de aarde en Mars, die gevormd worden uit silicaten en zware metalen zoals ijzer en nikkel.

Astronomen zijn het in principe erover eens dat een planeet als de onze begint als een onzichtbaar stofdeeltje. Microscopische korreltjes in de schijf groeien door condensatie, net zoals bij sneeuwvlokvorming. Hierbij plakken individuele atomen of moleculen vast aan een stofje, waardoor deze snel groeit tot een substantieel vast deeltje.

Als de deeltjes erg klein en licht zijn, worden ze door woelige gasturbulenties meegesleept en de proplyd uit geslingerd. Maar als ze genoeg massa krijgen, zijn ze zwaar genoeg om te nestelen in de relatief dunne schijf. In de stevig gevulde schijf botsen deeltjes vaker op elkaar, waardoor de brokken steeds groter worden.

Als zo'n brok een kilometer in doorsnee is geworden, wordt het een planetesimaal genoemd. Deze is groot genoeg om met de eigen aantrekkingskracht kleinere brokjes aan te trekken, waardoor de groei versnelt. Uiteindelijk hou je een redelijk klein aantal planetesimalen over die constant kleinere brokjes en

deeltjes in de schijf opvangen.

Als een aardse planetesimaal groot genoeg is, zorgt de energie van de botsingen er samen met het verzamelde radioactieve materiaal voor dat alles naar het smeltpunt wordt gebracht. Als gesmolten massa kan de structuur van de planetesimaal hervormen. De zwaartekracht concentreert alle zware metalen in een kern, die vervolgens omgeven wordt door een mantel van gesmolten steensilicaten. Dit proces heet differentiatie en resulteert in een protoplaneet, een asteroïde-achtige massa met duidelijke lagen. Uiteindelijk strijkt de zwaartekracht de protoplaneet glad, waardoor het bolvormig wordt.

Een aardse planeet kan door gasuitstoot een atmosfeer vormen. De hitte van de planeetkern zorgt dan dat de opgesloten gassen naar de oppervlakte komen. Ook botsingen met andere planeten kunnen hieraan bijdragen.

Zoals in ons zonnestelsel is te zien, is er een grote variatie aan atmosfeersoorten. Elke soort atmosfeer is een precieze mix van het materiaal waar de planeet van gemaakt is, de grootte van de planeet en de afstand tot de ster. Omdat de kleine planeet Mercurius vlak om de zon draait, wordt elke atmosfeer daar weggeblazen door de zonnestraling en blijft er slechts een kale rots over. Mars daarentegen ligt zo ver van de zon, dat al het water daar opgesloten is in ijs. Maar net iets dichterbij de zon heeft zich een planeet gevormd die de juiste grootte heeft en op de juiste afstand van de zon staat om een stabiele atmosfeer en leven te ontwikkelen: de aarde.

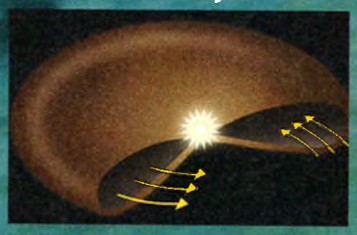
Hoewel astronomen het erover eens zijn dat rotsachtige planeten zich ongeveer zo gevormd moeten hebben, zijn ze minder zeker over de grote Joviaanse gasplaneten als Jupiter en Saturnus.

Eén mogelijkheid is dat ze hetzelfde beginnen als aardeachtige planeten. Als ze als protoplaneet groot genoeg (vijftien keer de grootte van de aarde) zijn, oefenen ze genoeg aantrekkingskracht uit om waterstof- en heliumgassen te vangen. De gasachtige massa blijft dan gassen aantrekken en groeit door tot een Joviaanse kolos.

Er is een relatief kleine voorraad aan zware metalen en silicaten in een proplyd, waardoor het onwaarschijnlijk is dat een protoplaneet genoeg metaal

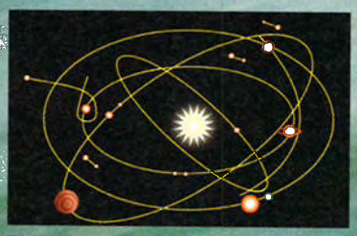
Oorsprong van een zonnestelsel

Gasreus, het accretiemodel

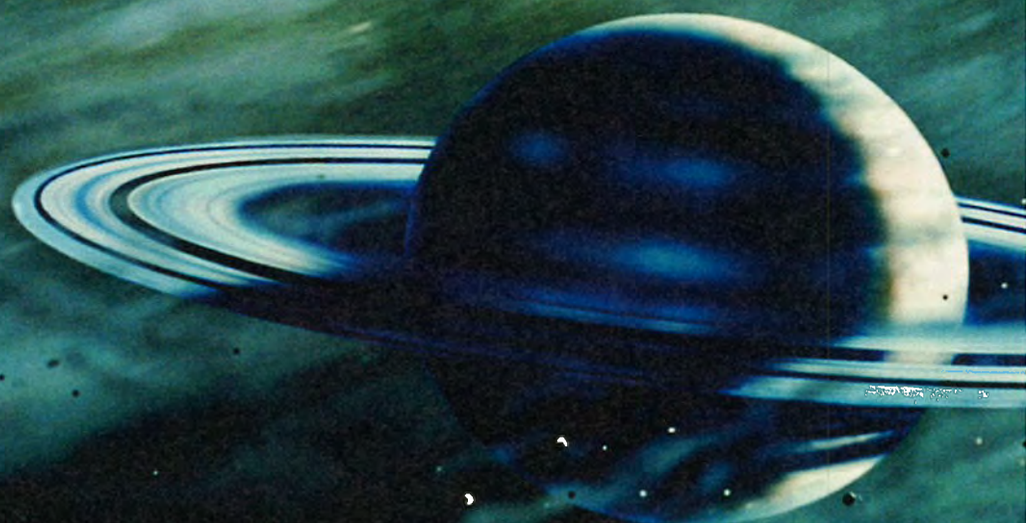


Vuile sneeuwballen
Stofdeeltjes en stukjes bevroren waterstofverbindingen condenseren, botsen en hechten aan elkaar, waardoor steeds grotere ijzige planetesimalen ontstaan.

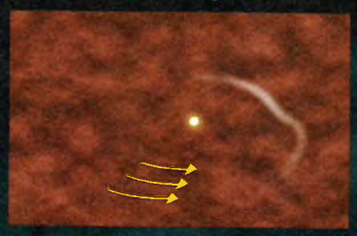
Gas vangen
Sommige planetesimalen worden zo groot dat hun aantrekkingskracht waterstof en heliumgas uit de protoplanetaire schijf vangt.



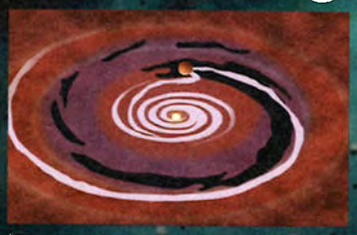
Te groot om te falen
De gasreuzen verzamelen een enorm deel van het waterstof- en heliumgas in de schijf. De overgebleven planetesimalen worden opgeslokt of verpulverd door de enorme zwaartekracht van de gasreuzen.



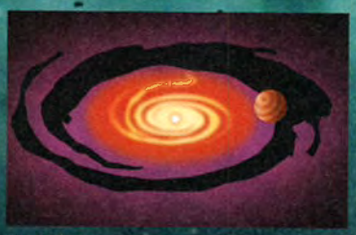
Gasreus, het ineenstortingsmodel



Concentraties in de schijf
In de schijf van gas en stof rond een protoster veroorzaakt de dynamiek van de schijfrotatie een ongelijke verdeling van waterstof- en heliumgas.



'Plotse' planeet
Een klompje gas van hoge dichtheid stort door zijn eigen zwaartekracht ineen en vormt zo een gasachtige planeet. De nieuwe planeet verzamelt stof en ijs, dat klontert samen tot een vaste kern.



Gulzige gaseter
Terwijl de planeet door de schijf beweegt, verzamelt diens aantrekkingskracht nog meer gas waardoor ze blijft groeien.

Een ster wordt geboren

Astronomen denken dat het zonnestelsel begon toen een deel van een nevel (een moleculaire gas- en stofwolk) onder zijn eigen zwaartekracht ineenstortte. Hierdoor werd een dichte, hete kern gevormd: de protoster.

Aardse planeten

Dichter bij de ster hechten deeltjes van zwaardere metalen en mineralen aan elkaar. Deze vormen alsmaar groeiende brokken die uiteindelijk planeten worden.

Gasreuzen

Verder weg van de ster vormen waterstofverbindingen ijs, waardoor meer planeetvormend materiaal voorradig wordt. De aantrekkingskracht van veel grotere planeten houdt waterstof- en heliumgas vast, waardoor gasreuzen als Jupiter en Saturnus ontstaan.

De protoplanetaire schijf

Tijdens het ontstaan van een ster zorgt de zwaartekracht van die ster ervoor dat de omliggende deeltjeswolk een roterende materieschijf wordt die uiteindelijk zal evolueren tot planeten.

De geboorte van een aardse wereld

Groepsvorming

Minerale en metalen deeltjes botsen in de moleculaire wolk tegen elkaar en hechten zich aan elkaar, waardoor grotere rotsachtige deeltjes vormen.

Kosmische race

Triljoenen van deze deeltjes draaien rondom de zich ontwikkelende ster. Ze botsen en vormen door accretie nog grotere asteroïde-achtige stenen.

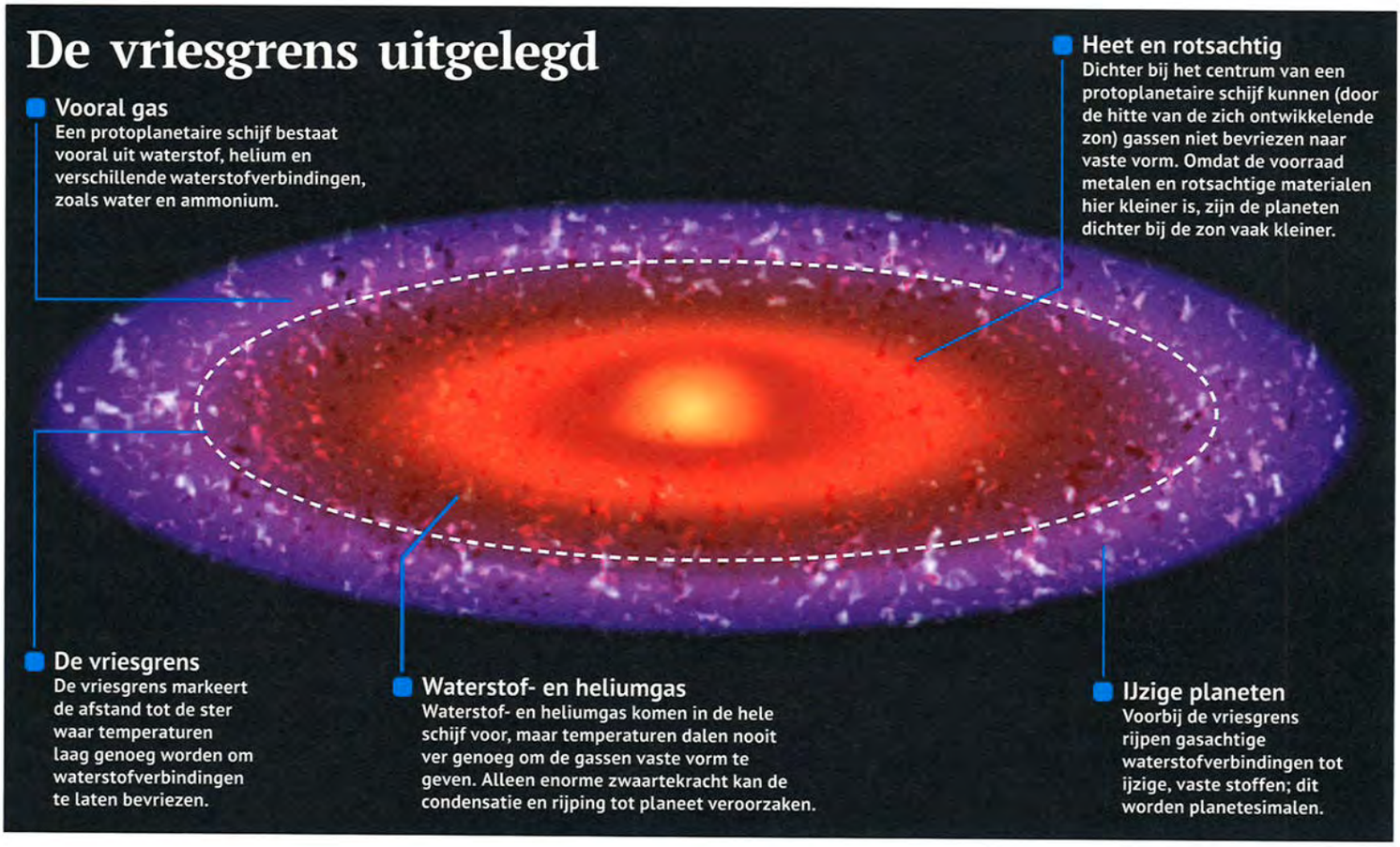
Vorming van een planetesimaal

Als een rotsachtig stuk circa één kilometer in doorsnee is geworden, kan diens zwaartekracht andere stukken aantrekken, waardoor het accretieproces versneld wordt.

Promotie tot protoplaneet

Intense hitte laat het steen smelten. Door het smelten, zakken elementen als ijzer en nikkel naar het centrum van de planeet, waardoor hij gescheiden lagen krijgt.

De vriesgrens uitgelegd



en rotsachtig materiaal weet te verzamelen om waterstof- en heliumgas vast te houden. In plaats daarvan wordt volgens dit model de eerste kern van een Joviaanse planeet gevormd uit bevroren waterstofverbindingen zoals methaan, ammonium en water. In het centrum van een proplyd zorgt de hete protoster ervoor dat waterstofverbindingen niet kunnen bevriezen. Ze blijven in gasvorm, waardoor ze niet aan ontwikkelende planetesimalen kunnen blijven kleven. Maar verder van de protoster af, voorbij de zogeheten vriesgrens, daalt de temperatuur ver genoeg om waterstofverbindingen te bevriezen. Door de overvloedige aanwezigheid van vaste materie kunnen er zich grote ijzige protoplaneten vormen die het waterstof- en heliumgas kunnen vangen.

De indeling van ons zonnestelsel ondersteunt deze theorie. De binnenste planeten, Mercurius, Venus, de aarde en Mars, zijn allemaal relatief klein en rotsachtig. Dit impliceert dat de vorming van grote ijs- of gasplaneten dicht bij de zon niet mogelijk was. De buitenste planeten, Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus, zijn veel groter.

Het belangrijkste argument tegen het accretiemodel van Joviaanse planeten is timing. In goed onderbouwde modellen van de evolutie van het zonnestelsel is er simpelweg te weinig tijd om enorme ijskernen te vormen voordat het grootste deel van de aanwezige waterstof- en heliumgassen opgebruikt is.

Hoewel de lichtere gassen in een jonge proplyd domineren, duurt dat niet lang. In het geval van ons eigen zonnestelsel zorgde de energie van kernfusie waarschijnlijk voor sterke zonnewinden die het overgebleven gas uit de proplyd bliezen. Dit gebeurde slechts tien miljoen jaar nadat de zon een protoster werd, dus er was weinig tijd om Joviaanse gasreuzen te laten ontstaan.

Door naburige sterren zou dit tijdslot zelfs nog kleiner kunnen worden. Astronomen denken dat sterren zich doorgaans vormen in clusters die grote, hete sterren bevatten. Berekeningen laten zien dat de straling van die sterren de verdamping van gassen in nabijgelegen proplyds versnellen, waardoor de periode waarin er voldoende waterstof en helium is, krimpt naar 100.000 tot een miljoen jaar. Dat lijkt te weinig tijd voor een Joviaanse gasreus om zich te vormen via het accretiemodel, maar observaties van verre zonnestelsels wijzen erop dat deze gasreuzen veel voorkomen.

Soorten planeten

Aardse planeet

Aardse planeten zoals de aarde en Mars zijn rotsplaneten met metalen kernen en een hoge dichtheid. Ze zijn kleiner dan gasreuzen en draaien langzamer om hun as. Door hun kleine omvang is de kans op een maan kleiner.

Gasreus

Omdat ze verder van de centrale ster liggen, kunnen gasreuzen meer materie door accretie opnemen. Hierdoor krijgen ze een grote omvang en massa. Jupiter is bijvoorbeeld elf keer groter dan de aarde met een volume dat 1300 keer hoger is.

Dwergplaneet

Hij is kleiner dan een echte planeet, maar door de vorm is hij geen asteroïde. Een dwergplaneet moet genoeg massa hebben om hydrostatisch evenwicht te bereiken, waardoor hij een bol wordt.

Planetair werk in uitvoering

De dichtstbijzijnde kraamkamer voor sterren is de Orionnevel, een enorme wolk van stof en gas op zo'n 1500 lichtjaar afstand. De prachtige nevel is met het blote oog te zien en ziet er adembenemend uit door de Hubble-ruimtetelescoop. De scherpe beelden van Hubble, zoals deze uit 2009, hebben 42 protoplanetaire schijven (proplyden) onthuld waar nu planeten worden gevormd. Theta 1 Orionis C, de helderste ster in de nevel, verhit de nabijgelegen proplyden, waardoor deze helder oplichten. Proplyden die verderop vormen, zijn te zwak verlicht om te zien, maar hun stof blokkeert de heldere nevel. Daardoor steekt het silhouet af en kunnen astronomen dat bestuderen.

132-1832
Dit is een van de donkerdere proplyden en hij ontwikkelt zich vêr van Theta 1 Orionis C.

206-446
Astronomen denken dat de opvallende 'staart' aan deze heldere proplyd een straal materie is die uit het midden van de schijf spuit.

180-331
Proplyd 180-331, een andere heldere schijf in de buurt van Theta 1 Orionis C, heeft ook een stromende straal van materie, waardoor hij een kikkervisachtige vorm heeft.

106-417
De zonnewind van Theta 1 Orionis C reageert met gas, waardoor hij een schokgolf veroorzaakt rond deze oorvormige proplyd.

181-825
Maar de beste schokgolfsculptuur is de kwalvorm van 181-825.

231-838
Net zoals 106-417 is deze heldere proplyd omgeven door een schokgolf die hem een boemerangvorm geeft.

"De oorsprong van Joviaanse gasreuzen, zoals Jupiter en Saturnus, is minder zeker."

Een andere theorie, het gasinstortingsmodel, geeft een sneller vormingsscenario. Volgens dit model vormen gasreuzen zich direct uit het rondvliegende waterstof en helium. Als er voldoende gas dicht genoeg op elkaar gepakt wordt, zorgt de dichtheid van die massa ervoor dat hij implodeert en een enorme gasbal vormt. Eigenlijk is een gasreus een mislukte ster. Hij ontwikkelt zich op dezelfde wijze als een protoster, maar heeft te weinig massa en energie om een kernfusiereactie op te wekken.

Vanaf dat moment neemt de aantrekkingskracht van de planeet-in-wording het over en slokt enorme hoeveelheden gas en alle vaste materie in haar buurt op. Het opgeslokte ijs en de metalen condenseren in het centrum van de planeet en vormen zo een solide kern nádat de gassen verzameld zijn, en niet ervoor. Het hele proces kan zich binnen enkele honderden jaren voltrekken.

Observaties van Joviaanse exoplaneten (planeten buiten ons eigen zonnestelsel) hebben dit model enigszins onderbouwd, of minstens het accretiemodel op de tocht gezet. In de afgelopen 25 jaar zijn er heel veel nieuwe exoplaneten ontdekt en een van de grootste verrassingen waren de zogeheten 'hete Jupiters'; Joviaanse gasreuzen die dicht bij hun zon staan. Dit gaat recht tegen het idee in dat gasreuzen zich allemaal buiten de vriesgrens vormen. Maar ze zouden zich daar ook hebben kunnen vormen om vervolgens dichter naar hun zon te migreren.

De verschillende ontdekkingen van exoplaneten hebben astronomen een beter beeld gegeven van het spectrum van planeetvormen, wat weer nieuwe aanwijzingen opleverde over hoe planeten zich vormen. Maar een voltooide planeet geeft maar beperkte informatie. Gelukkig gaan we nu het tijdperk in waarin we proplyden direct kunnen observeren. De nieuwe Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) radiotelescoop in Chili heeft al ongekende plaatjes van planeetvorming in uitvoering opgeleverd. Naarmate er meer ontdekt wordt, verwachten astronomen de puzzel steeds verder in te kunnen vullen. Zo leren we steeds meer over hoe onze planeet (en dus ook wij) is ontstaan.

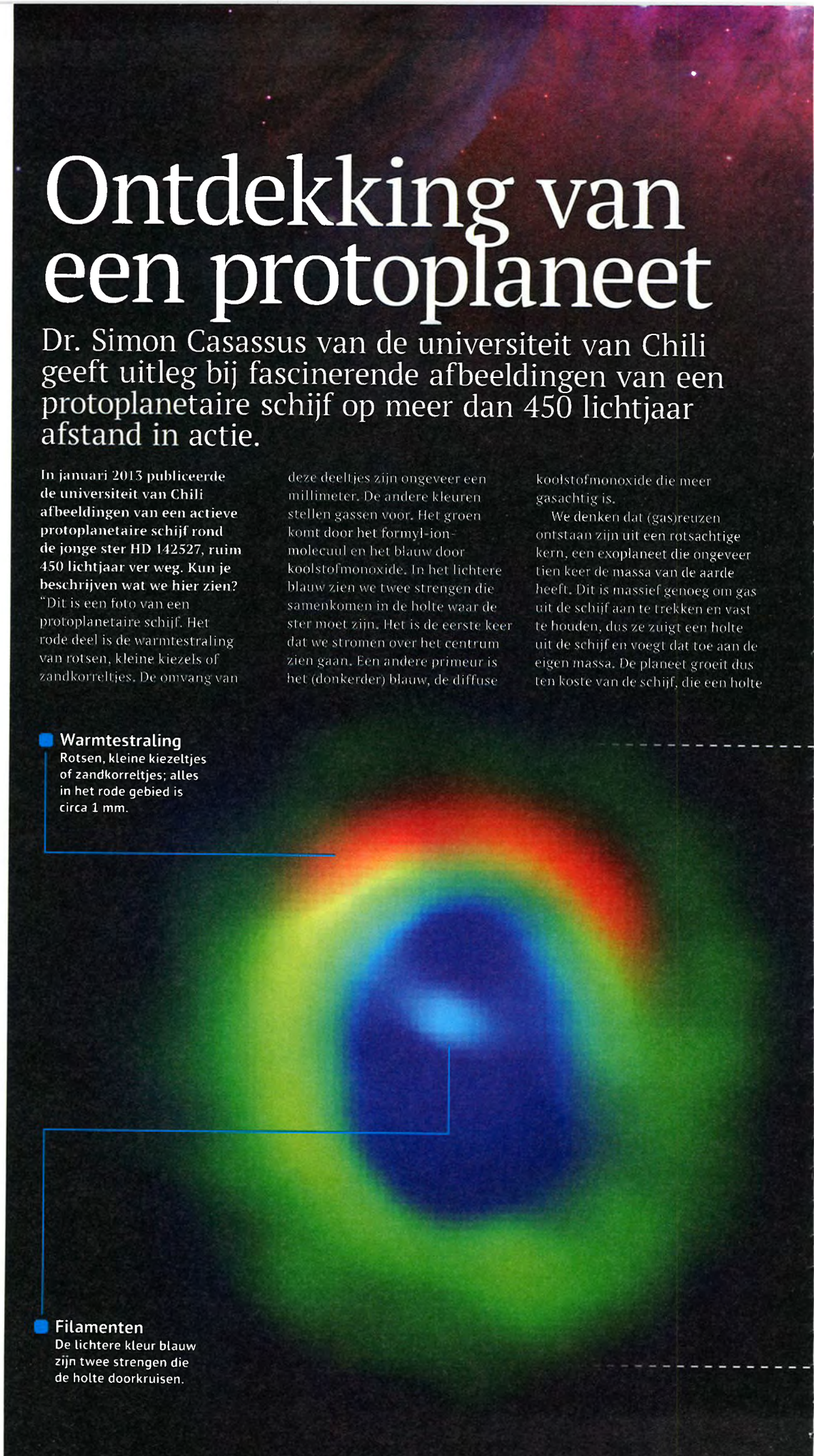
Ontdekking van een protoplaneet

Dr. Simon Casassus van de universiteit van Chili geeft uitleg bij fascinerende afbeeldingen van een protoplanetaire schijf op meer dan 450 lichtjaar afstand in actie.

In januari 2013 publiceerde de universiteit van Chili afbeeldingen van een actieve protoplanetaire schijf rond de jonge ster HD 142527, ruim 450 lichtjaar ver weg. Kun je beschrijven wat we hier zien?

"Dit is een foto van een protoplanetaire schijf. Het rode deel is de warmtestraling van rotsen, kleine kiezels of zandkorreltjes. De omvang van deze deeltjes zijn ongeveer een millimeter. De andere kleuren stellen gassen voor. Het groen komt door het formyl-ion-molecuul en het blauw door koolstofmonoxide. In het lichtere blauw zien we twee strengen die samenkomen in de holte waar de ster moet zijn. Het is de eerste keer dat we stromen over het centrum zien gaan. Een andere primeur is het (donkerder) blauw, de diffuse koolstofmonoxide die meer gasachtig is.

We denken dat (gas)reuzen ontstaan zijn uit een rotsachtige kern, een exoplaneet die ongeveer tien keer de massa van de aarde heeft. Dit is massief genoeg om gas uit de schijf aan te trekken en vast te houden, dus ze zuigt een holte uit de schijf en voegt dat toe aan de eigen massa. De planeet groeit dus ten koste van de schijf, die een holte



krijgt. Door de grootte van deze holte denken we dat het door meerdere planeten is veroorzaakt; dit wijzen hydrosimulaties uit. Het is nu zaak om deze exoplaneten te ontdekken en zo de theorie te bevestigen.

De planeet groeit en zuigt tegelijkertijd deze holte leeg. Door materiaal uit de buitenste gebieden te blijven zuigen, blijft ze groeien. Dit materiaal valt op de ster en kruist de planeten op hun weg; door hun aantrekkingskracht blijft een deel van het materiaal op de planeten liggen. De rest van het materiaal vliegt door en bereikt de binnenste schijf, wat de andere kant van de holte is. De grootte van de materiaalstroom is hier voldoende om constante groei te verzekeren."

Is dit een goed voorbeeld van wat er meestal gebeurt bij planeetvorming, of is dit uitzonderlijk?
"We weten het niet. Voordat we dit kunnen extrapoleren naar andere planeten, en voordat we met zekerheid kunnen zeggen dat ons eigen zonnestelsel er vroeger ook zo uitzag, moeten we eerst andere voorbeelden zien.

Dit is de eerste keer dat we deze radiale stromen en dit overgebleven gas binnen een holte hebben gezien. Deze waarnemingen zijn al op het randje van de mogelijkheden van ALMA in het eerste jaar. Dus nu moeten we het eerst beter bestuderen en vergelijkbare data bij andere jonge sterren verzamelen."

Waren er data in je bevindingen die tegen bestaande planeetvormingsmodellen ingingen?
"Dat is een moeilijke vraag, want er zijn zo veel modellen van planeetvorming. Maar er zijn enkele modellen die de vorming van planeten heel langzaam laten verlopen, langzamer dan tientallen miljoenen jaren, en deze heeft er twee miljoen jaar over gedaan."

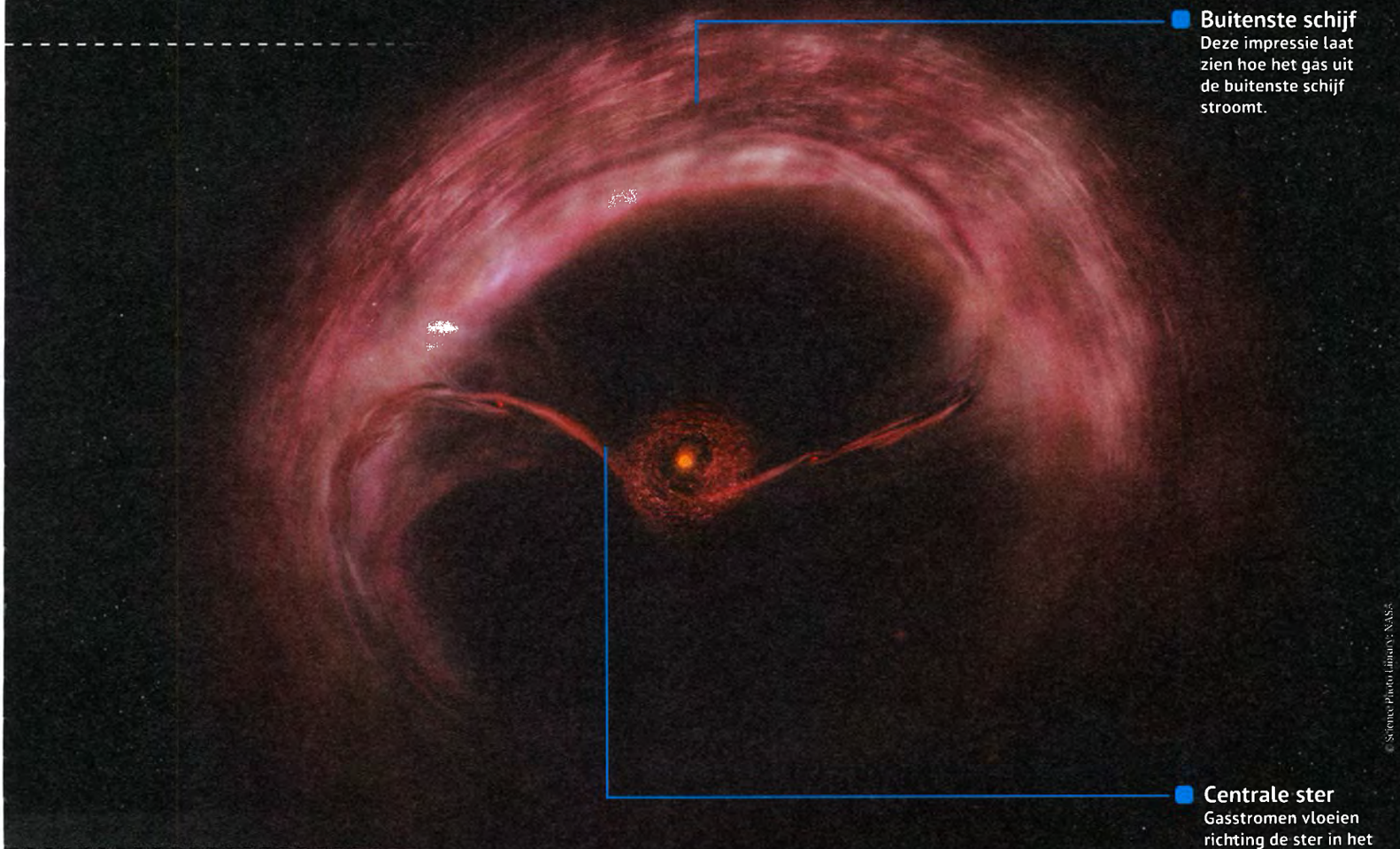
Is het mogelijk dat ons eigen zonnestelsel iets vergelijkbaars heeft doorgemaakt?

> "Dit is de eerste keer dat we deze radiale stromen door de holtes zien gaan."

"Zou kunnen. Dat is juist zo verbazingwekkend. Als je kijkt naar deze nevel: het is een proplyd rond de ster HD 142527. In dit systeem vormen planeten zich heel ver van de ster vandaan. Volgens onze hydrosimulaties vormen de protoplaneten zich zo'n 100 AU (astronomische eenheid; 1 AU is de afstand tussen aarde en de zon, red), terwijl Jupiter op 5 AU van de zon staat. Is dit systeem dan vergelijkbaar met het onze? In eerste instantie zou je 'nee' zeggen, omdat dit systeem veel groter is. Maar je moet ook planeetmigratie in acht nemen. Nieuwe planeten verhuizen nog wel eens. Een gasreus kan van 100 AU naar 5 AU migreren."

Zijn er andere theoretische fenomenen die je in de toekomst hoopt te observeren?
"Ja. Er zijn mogelijk protolunaire schijven – schijven die rond een planeet draaien en een protomaan vormen – die we hopen te ontdekken. Op deze manier kunnen we ook de locatie van protoplaneten vaststellen."

Wat is de volgende stap voor jouw team?
"We zijn nog steeds deze data aan het analyseren. Daarna verwacht ik de rest van de ALMA-data en ondersteunende infrarood-observaties. We hopen door het gebruik van verschillende technieken de protoplaneten te detecteren."



© Science Photo Library; NASA

Schepping van een sterrenstelsel

De bouw van deze uit miljarden sterren bestaande constructies hebben astronomen decennialang voor een raadsel gesteld. In deze tekst voltooien we deze puzzel van miljarden stukjes.

Het universum zit tjokvol sterrenstelsels. Overal waar we kijken en op vrijwel elk moment in de geschiedenis liggen de sterrenstelsels opeengepakt in de kosmos, in clusters en in grote velden die kriskras in de ruimtetijd verspreid liggen. De verst van ons verwijderde sterrenstelsels die we ooit gezien hebben, zijn waargenomen door de Hubble-ruimtetelescoop en liggen wel 13,2 miljard lichtjaar van ons vandaan. Dat zijn niet eens de verst verwijderde galactische structuren; het zijn enkel de verst verwijderde die wij tot nu toe hebben kunnen detecteren. Met de infraroodcamera van de James Webb-ruimtetelescoop kunnen we terug in de tijd kijken en stelsels zien zoals ze zich ontwikkelden, slechts 300-400 miljoen jaar na de oerknal.

Ontdekken hoe sterrenstelsels zich vormen, is een beetje als het maken van een puzzel, waarbij elk sterrenstelsel een puzzelstukje is. Omdat sterrenstelsels zo oud zijn en zich langzaam ontwikkelen, is elke blik op een sterrenstelsel slechts een klein kiekje, een kort moment in hun lange leven. Maar omdat elk stelsel zich in een andere ontwikkelingsfase bevindt, kunnen we al deze kiekjes bij elkaar leggen en zo een volledig beeld schetsen. Zo zien we hoe stelsels zoals onze eigen Melkweg zicht ontwikkelden tot de enorme bouwsels van gas, stof, sterren en donkere materie die het nu zijn.

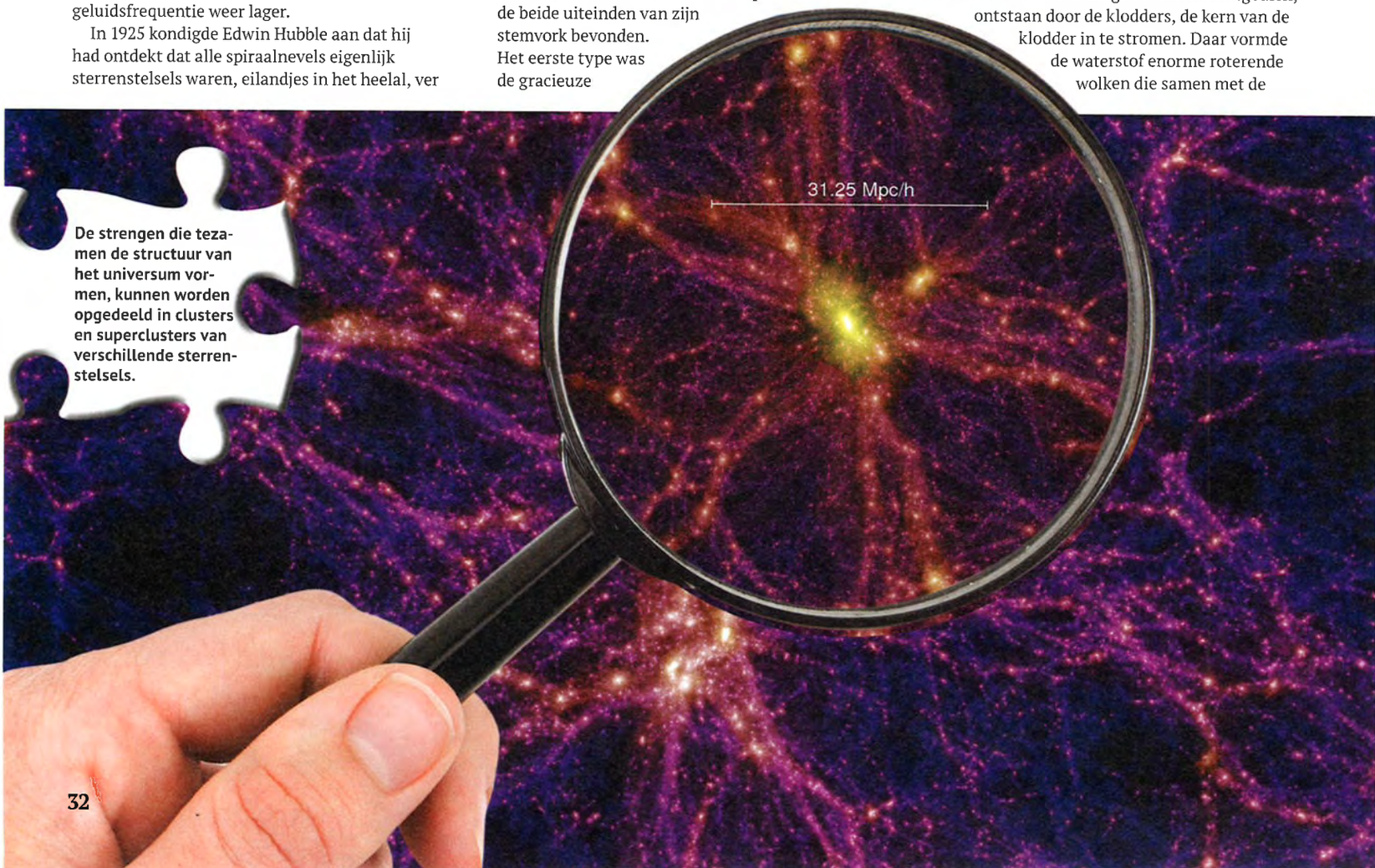
We weten pas minder dan een eeuw dat er zich buiten de Melkweg nog meer sterrenstelsels bevinden. Voor die tijd dachten astronomen dat die vreemde 'spiraalnevels' onderdeel van ons eigen stelsel waren. Hun telescopen waren niet sterk genoeg om individuele sterren te kunnen onderscheiden in deze nevels. Maar toen astronomen keken naar het licht dat de spiraalnevels uitzonden, hadden ze alle bewijs dat ze nodig hadden. In 1912 ontdekte de Amerikaanse astronoom Vesto Slipher dat het door de nevels uitgezonden licht steeds roder werd, wat betekende dat de objecten van ons af bewogen. Dopplerverschuiving is de verhoging of juist verlaging van de lichtfrequentie als een object respectievelijk naar ons toe of juist van ons af beweegt. Dit effect kom je zelf vaak tegen bij het geluid van een sirene; als bijvoorbeeld een ambulance naar je toe komt, klinkt de sirene steeds hoger en als hij voorbij is wordt de geluidsfrequentie weer lager.

In 1925 kondigde Edwin Hubble aan dat hij had ontdekt dat alle spiraalnevels eigenlijk sterrenstelsels waren, eilandjes in het heelal, ver van onze eigen Melkweg. Dit kon hij doen dankzij de (toen) grootste telescoop ter wereld; de Hooker-spiegeltelescoop van 2,5 meter doorsnee op Mount Wilson in Californië. Hubble kon ook individuele sterren onderscheiden, waaronder een specifiek type, de pulserende Cepheïden. Dankzij dit type ster, aanwezig in het Andromedastelsel, konden astronomen de afstand tussen ons en Andromeda meten; 2,5 miljoen lichtjaar. Door dit te combineren met de ontdekking van Vesto Slipher (dat stelsels van ons af bewegen), realiseerden wetenschappers zich al snel dat ze ooit dus veel dichter bij elkaar gestaan moeten hebben dan voorheen gedacht.

"Hubble dacht dat de elliptische stelsels voorlopers waren van de spiraalstelsels en dat de armen later zouden ontwikkelen."

De volgende stap van Hubble was het systematisch rangschikken van alle stelsels, in een poging ze zo goed mogelijk te begrijpen. Op basis hiervan ontwikkelde hij zijn beroemde stemvorkdiagram. Het handvat van de stemvork bestaat uit elliptische, eivormige stelsels; Hubble noemde dit 'vroege stelsels' omdat hij dacht dat alle sterrenstelsels als ellipsen begonnen, voordat ze zich gingen differentiëren tot een van de twee typen spiraalstelsels, welke zich op de beide uiteinden van zijn stemvork bevonden. Het eerste type was de gracieuze vorm, waarbij de lange armen sierlijk uitwaaieren uit de kern. De stelsels van het tweede type waren balkspiralen, waarbij de armen voortkwamen uit een 'balk' die over het centrum van het stelsel lag.

Hubble dacht dat de elliptische stelsels voorlopers waren van de spiraalstelsels en dat de armen later zouden ontwikkelen. Maar gedurende de 20e eeuw veranderden astronomen dit idee toen ze sterrenstelsels beter bestudeerd hadden. Ze ontdekten dat de elliptische stelsels zich vormen als twee of meer spiraalstelsels botsen en fuseren. De spiraalstelsels waren de echte voorlopers. De vraag is: hoe vormen de spiralen zich? De hoofdingrediënten zijn gas (vooral waterstof) en de mysterieuze donkere materie. Niemand weet wat donkere materie is, maar we weten dat het in enorme klodders in het universum rondzweeft. Sommige van deze klodders zijn groot genoeg om clusters van duizenden sterrenstelsels te bevatten. De donkere materie ontstond als eerste en vormde deze klodders, ook wel halo's genoemd, vlak na de oerknal. De zwaartekracht van deze halo's begon waterstofgas aan te trekken. De waterstof begon als een soort rivieren langs zwaartekrachtgeulen, ontstaan door de klodders, de kern van de klodder in te stromen. Daar vormde de waterstof enorme roterende wolken die samen met de

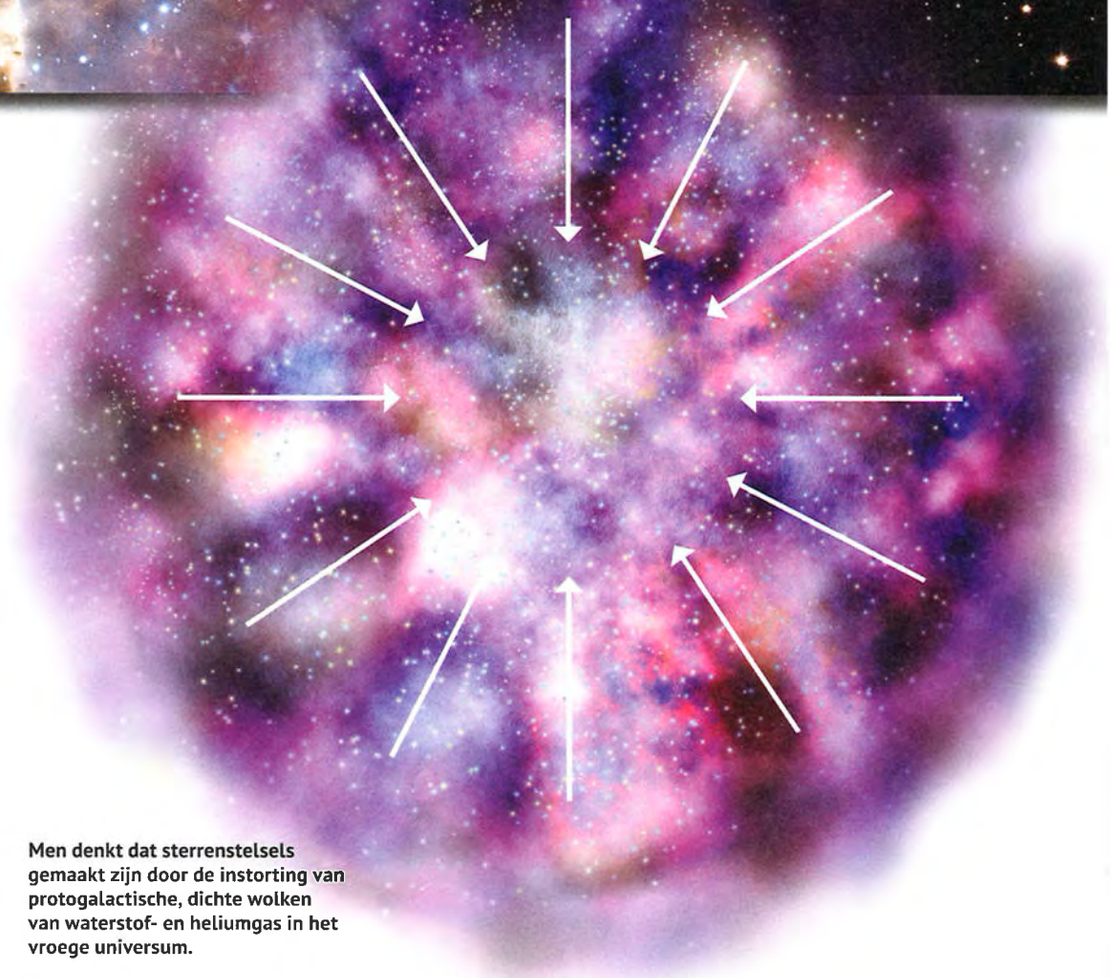


De strengen die tezamen de structuur van het universum vormen, kunnen worden opgedeeld in clusters en superclusters van verschillende sterrenstelsels.

De sterren komen voort uit gas- en stofwolken die door hun eigen zwaartekracht ineenstorten.

donkere materie het embryo van een sterrenstelsel vormden. Dit is te vergelijken met een ei, waarbij het eiwit de donkere materie vormt en het eigeel de waterstof.

Omdat de mix van waterstof en donkere materie zo snel roteerde, werd het langzaam een platte schijf die de eigenschappen van een spiraalstelsel begon te vertonen. Ondertussen stortten kleinere concentraties waterstof ineen en vormden zo de allereerste sterren. Deze sterren waren gigantisch, honderden keren groter dan onze relatief kleine zon, en explodeerden vrij snel in krachtige supernova's. Sterren kunnen in hun kern nieuwe elementen vormen en de explosie van een ster kan weer andere elementen creëren. Toen de eerste sterren ontploften, verspreidden ze hun inhoud over het piepjonge sterrenstelsel waar ze onderdeel van waren en verrijkten het zo met zware elementen. Na verloop van tijd hechtten genoeg van deze elementen aan elkaar om asteroïden, planeten en manen te vormen. Als we nu naar sterrenstelsels kijken, inclusief onze eigen Melkweg, zien we enorme hoeveelheden zwart stof, bestaande uit elementen die gemaakt zijn in de nucleaire ovens van sterren en dat soms net zo oud is als de eerste sterren, zo'n 13,5 miljard jaar. Tegenwoordig weten we dat de oudste gedeelten van een spiraalstelsel zich in de centrale 'bult' bevinden. In dit centrale gedeelte is het merendeel van het gas opgebruikt. De aanwezige sterren zijn dicht opeengepakt en geven meer rode kleur dan alle sterren in de spiraalarmen tezamen. Deze armen worden dan weer gedomineerd door hete, jonge sterren. Rondom het zwarte gat dat het centrum van elk grote stelsel vormt, ligt een gebied van enkele tientallen lichtjaren breed dat een uitzondering is op het voorgaande. Hier is het gas



Men denkt dat sterrenstelsels gemaakt zijn door de instorting van protogalactische, dichte wolken van waterstof- en heliumgas in het vroege universum.

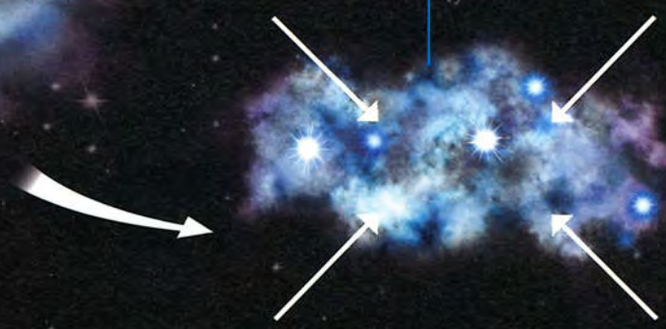
"Het zwarte gat in het centrum van de Melkweg heeft vier miljoen keer de massa van de zon."

Galactische evolutie

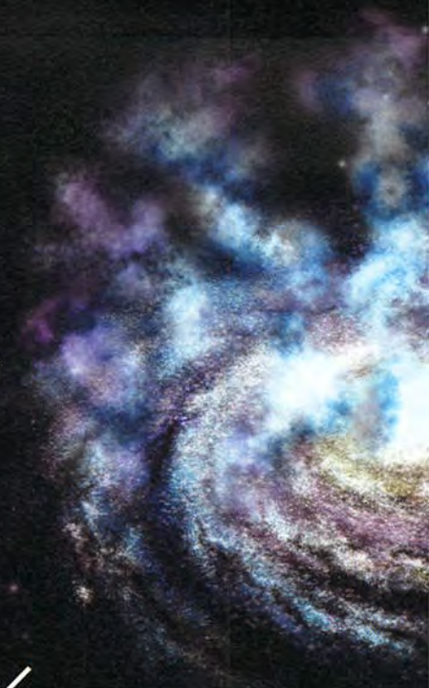
Hoe de omvang van een sterrenstelsel de uiteindelijke vorm beïnvloedt.

Kleine stelsels

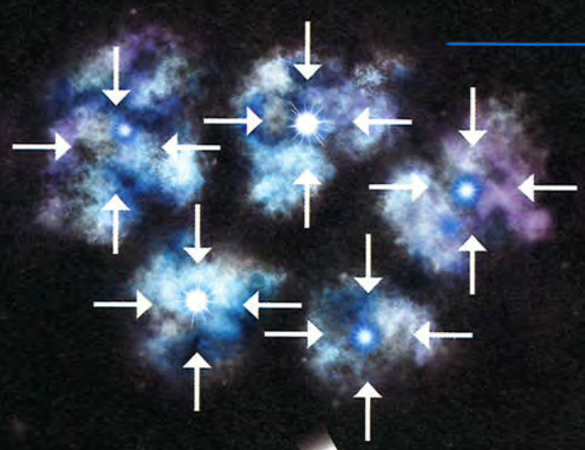
Een eenzame wolk gas
Om een (in astronomische termen) 'klein stelsel' te vormen, is er een relatief grote en geïsoleerde gaswolk nodig.



Sterrenfabriek
Omdat het gas te weinig tegendruk geeft op de zwaartekracht die het in elkaar wil drukken, stort de wolk in. In dit gevecht tussen druk en zwaartekracht vormen de eerste babysterren zich.

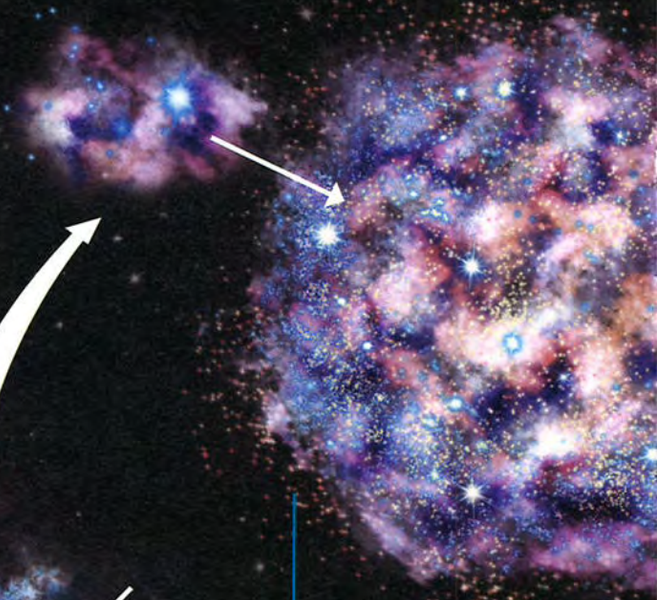


Grote stelsels



Een groep gaswolken
Relatief kleine gaswolken storten al vroeg in en vormen de eerste sterren in het stelsel.

Een partij sterren
Deze gaswolken met hun pas gevormde sterren klonteren samen om een grote wolk te vormen met verschillende sterren erin.



Gasachtige toevoegingen
Er vindt weinig rotatie plaats bij de vorming van een nieuw stelsel. Door de fusie met nabijgelegen gaswolken is er geen kans op de vorming van een schijf.

Schepping van een sterrenstelsel

dicht genoeg om nieuwe sterrenclusters te vormen, bestaande uit enorme sterren.

De zwarte gaten in het midden van sterrenstelsels zijn enorm. Het zwarte gat in het midden van de Melkweg is vier miljoen keer groter dan onze zon. In andere stelsels kan het zwarte gat zelfs tien tot honderden miljoenen keren groter zijn. De grootste sterrenstelsels, de ellipsen die zich in het midden van sterrenstelselclusters bevinden, hebben zwarte gaten die tot wel een miljard keer zwaarder zijn dan de zon. Een voorbeeld hiervan is het stelsel M87, in het hart van het sterrenbeeld Maagd.

Iedereen weet dat zwarte gaten graag materie opslurpen; zo groeien ze. Maar zwarte gaten kunnen niet alles opnemen wat in hun buurt komt en soms 'spugen' ze materie uit. Als gas richting een zwart gat stroomt, draait het om een schijf materie heen die ook naar het zwarte gat getrokken wordt. Maar dit gas brengt een magnetisch veld met zich mee dat terechtkomt in een accretieschijf. Op een gegeven moment kan het magnetisch veld zo sterk worden, dat het ervoor zorgt dat geladen deeltjes in een straalstroom, ook wel een 'jet' genoemd, naar buiten worden gespoten. Deze jets hebben zo veel energie dat ze zich bijna met lichtsnelheid van het zwarte gat af bewegen. De jet die uit M87 komt, kunnen we zelfs zien. De mate van activiteit van een zwart gat hangt af van vele factoren, zoals de massa van het zwarte gat en de hoeveelheid gas die erin valt. Het superzware gat in onze eigen Melkweg is bijvoorbeeld heel rustig en er valt bijna geen gas in. Andere spiraalstelsels hebben actievere zwarte gaten in hun centrum, waarbij sommige sterke radiosignalen uitzenden. De actiefste zwarte gaten noemen we quasars, waarvan de dichtstbijzijnde 2,4 miljard lichtjaar ver weg is. De meerderheid bestond al meer dan 10 miljard jaar geleden.

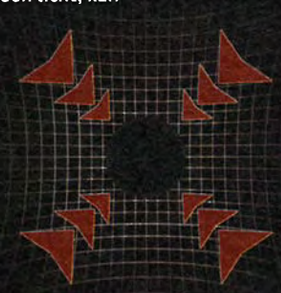
Quasars worden op twee manieren met gas gevoed. De ene manier is dat intergalactische gaswolken simpelweg in een zwart gat vallen. Dit zijn wolken van gas en donkere materie die zijn overgebleven na de vorming van sterrenstelsels, zo'n 13 miljard jaar geleden. De andere manier is wat heftiger. Als twee sterrenstelsels op elkaar af vliegen en botsen, vallen enorme wolken interstellair gas en sterren in een zwart gat. Soms schampen de stelsels elkaar alleen. De zwaartekracht van elk stelsel trekt sterren en gaswolken aan in lange stromen die astronomen vloedstromen noemen. Deze stromen kunnen honderdduizenden lichtjaren lang zijn.

Als sterrenstelsels botsen, verandert dit de toekomst van de betrokken stelsels. Door 13 miljard jaar terug in de tijd te kijken, ziet de Hubble-telescoop hoe de eerste stelsels groeiden door kleiner stelsels op te slokken. Dit intergalactische kannibalisme gaat nu nog steeds door, maar op een veel lagere snelheid. Zelfs de Melkweg is nu kleinere stelsels aan het opslokken, maar omdat deze niet in de buurt van ons zwarte gat komen, blijft het centrum van ons stelsel rustig. Het sterrenstelsel Canis Majoris ligt bijvoorbeeld op slechts 25.000 lichtjaar afstand van de aarde en fuseert met ons stelsel. Het bevat weinig sterren omdat de meeste eraan onttrokken zijn door de zwaartekracht van de Melkweg.

De kosmische vuurtoren

Quasars zenden straling uit die vanaf de andere kant van het heelal gezien kan worden.

Het 'rustige' zwarte gat
Als een zwart gat rustig in het centrum van zijn stelsel ligt, verstoort het meestal de structuur van het universum om hem heen. Het vormt een deuk in de ruimtetijd, waaruit niets, zelfs geen licht, kan ontsnappen.

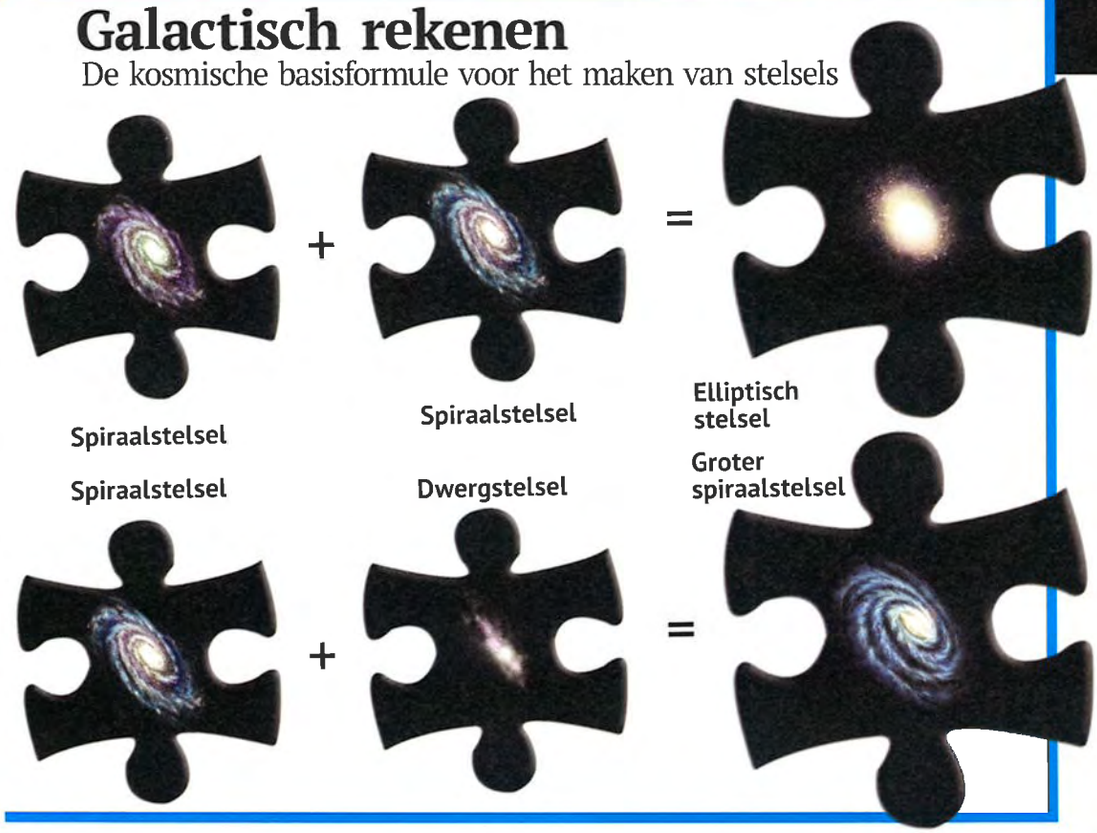


Een rondtollende wolk van stof en gas
Een accretieschijf van gas en stof cirkelt om het zwarte gat. Als het zwarte gat niet erg actief is, valt er geen materie in.

Opwarming
Als materiaal dat in het zwarte gat valt en de waarnemingshorizon (het punt waarna ontsnapping onmogelijk is) bereikt, ontstaat er veel wrijving. Dit verhit de atomen enorm en trekt ze uit elkaar.

Galactisch rekenen

De kosmische basisformule voor het maken van stelsels



Astronomen noemen zulke botsingen kleine fusies en het eindresultaat is dat het kleinere sterrenstelsel volledig wordt opgenomen door het grotere stelsel, dat daardoor groeit. Aan de andere kant van het spectrum staan de grote fusies, die plaatsvinden tussen grote stelsels van vergelijkbare grootte. Als twee spiraalstelsels op deze manier botsen, worden beide spiraalvormen vernietigd en vormen ze één enorm elliptisch sterrenstelsel. Dit is het tegenovergestelde van wat het stemvorkdiagram van Edwin Hubble voorspelt. Tijdens zo'n botsing van sterrenstelsels botst geen enkele ster met een andere ster, omdat de ruimte tussen de sterren zó groot is, dat de kans nihil is dat twee sterren elkaar aan zullen trekken. Dit betekent dat wanneer onze Melkweg over 4 á 5 miljard jaar met het Andromedastelsel botst, onze zon niet in botsing kan komen met een ster van Andromeda. Wat wel zal botsen, zijn de enorme wolken van interstellair gas die zich in de spiraalarmen van de beide sterrenstelsels bevinden. Deze zullen ontsteken in een enorme explosie aan sterrenvorming. Zo'n stellaire 'babyboom' kan al het gas in een stelsel opgebruiken. Daarom hebben de meeste elliptische sterrenstelsels (die voortkomen uit botsingen) geen stervormend gas meer over en zijn daar lange tijd

Schepping van een sterrenstelsel

Een actief stelsel
Als je het sterke magnetische veld van een superzwaar zwart gat combineert met het uiteenvallen van atomen en superhoge temperaturen, krijg je een extreem actief stelsel. Elektronen die uit de atomen gerukt zijn, worden bijeengebracht door het magnetisch veld.

Het actieve zwarte gat
Als een zwart gat begint te draaien, sleept het de ruimtetijd met zich mee. De structuur van ruimtetijd wordt in het zwarte gat vervormd.

Galactische jets
Het zwarte gat creëert trechters waardoor deeltjes naar binnen worden gezogen. Deze worden versneld door elektrische stroom om vervolgens als dunne stralen van geladen deeltjes en straling naar buiten te worden geblazen.

geen nieuwe sterren ontstaan. Al hun kortlevende jonge sterren zijn al lang geleden geëxplodeerd. Daarom zien elliptische stelsels er rood en stoffig uit met hun oudere, koele sterren.

Momenteel worden er geen nieuwe sterrenstelsels gevormd. Alle galactische bouwwerkzaamheden vonden 13 miljard jaar geleden plaats. Sindsdien kan beter gesproken worden van galactische evolutie in plaats van galactische vorming. We missen nog wat belangrijke puzzelstukjes, zoals de antwoorden op vragen als: zijn eerst zwarte gaten ontstaan en daarna de omringende stelsels of andersom? Waarom verandert een schijf in spiraalarmen en waarom rollen de armen zich niet op rond het centrum van het stelsel? Sommige wetenschappers denken dat de spiraalarmen geen vaste verbindingen zijn, maar golven van hoge dichtheid waar sterren en gas opeengepakt zitten. Dit is te vergelijken met een file op de weg; zodra enkele sterren op de rem trappen, vertragen ze ook alle andere sterren en gaswolken achter zich.

Hoewel de kosmische puzzel nog niet compleet is, wordt het eindresultaat wel steeds duidelijker. Misschien kunnen we niet alles zien, maar we zien genoeg om te begrijpen wanneer en waar sterrenstelsels ontstaan zijn.

> “Als twee spiraalstelsels botsen, wordt hun spiraalvorm vernietigd en fuseren ze tot een enorm elliptisch stelsel.”

Stelsels kunnen na fusie vreemde vormen aannemen, zoals Arp 142; het lijkt op een pinguïn dat een ei bewaakt.

© Alamy; ESA; NASA; Sayo Studio; Tobias Roestch

Geheimen van het universum

Verwonder je over de fascinerendste aspecten van ons universum

40 100 ruimtewonderen
Ontdek de mooiste en bizarste objecten in de ruimte

54 De grens van het universum
Is er een grens aan de oneindigheid?

64 De 10 grootste structuren in de ruimte
Maak kennis met onmetelijke reuzen

74 De nieuwe zoektocht naar buitenaards leven
Bestaan er intelligente buitenaardse samenlevingen?

82 De grootste ontdekkingen van de Hubble
De verbazingwekkendste successen van de afgelopen 25 jaar

82
De grootste ontdekkingen van de Hubble

© NASA, JPL-Caltech

74
De nieuwe zoektocht naar buitenaards leven

64
De grootste objecten in de ruimte

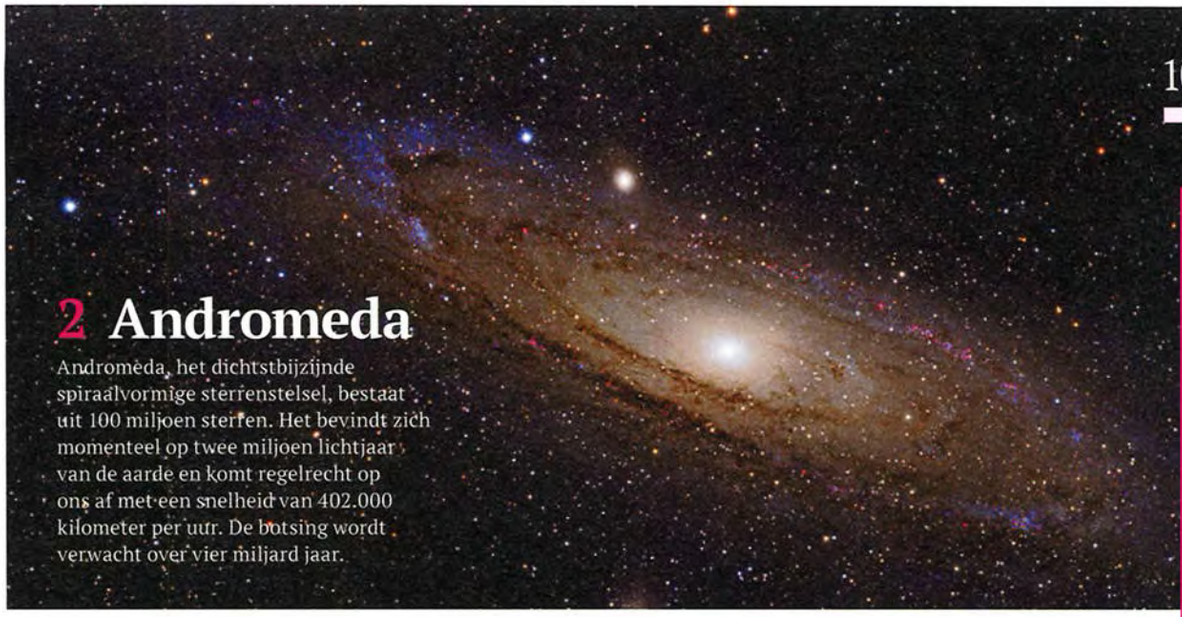
"De zoektocht naar intelligent buitenaards leven (SETI of Search for Extraterrestrial Intelligence) is altijd een randwetenschap geweest."

100 ruimte-wonderen

Van reusachtige kraters tot superzware zwarte gaten en exoplaneten – verken onze favoriete plekjes in de kosmos.

1 De ringen van Saturnus

De ringen van Saturnus zijn voor het eerst waargenomen in 1610 door Galileo Galilei. Deze opmerkelijke structuren zijn 'flinterdun' en meten van onder tot boven slechts één kilometer. Ze bestaan uit miljarden ijs- en rotsdeeltjes, waarvan sommige zo groot zijn als een berg en andere te klein om met het blote oog te kunnen waarnemen. Men weet niet precies hoe oud de ringen zijn of hoe ze zijn ontstaan, maar het is mogelijk dat de fragmenten delen zijn van uiteengespatte manen, vernietigd tijdens botsingen in een niet al te ver verleden.

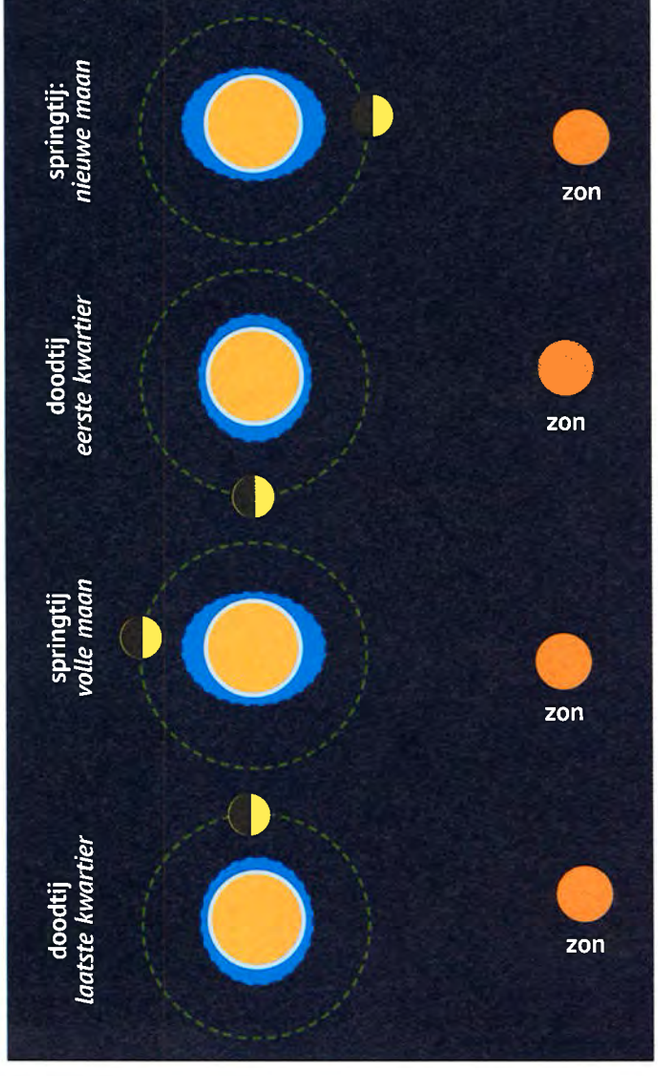


2 Andromeda

Andromeda, het dichtstbijzijnde spiraalvormige sterrenstelsel, bestaat uit 100 miljoen sterren. Het bevindt zich momenteel op twee miljoen lichtjaar van de aarde en komt regelrecht op ons af met een snelheid van 402.000 kilometer per uur. De botsing wordt verwacht over vier miljard jaar.

3 De maan

De maan is een waar ruimtewonder. Tijdens zijn baan rond de aarde trekt zijn zwaartekracht aan onze zeeën. Dit veroorzaakt een meetbare uitstulping die we getijden noemen. De zon heeft een vergelijkbaar, maar minder sterk effect. Eens in de veertien dagen, als de maan en de zon met de aarde op één lijn staan, versterken hun aantrekkende krachten elkaar. Dit zorgt op aarde voor 'springtij'. De vloedstanden zijn dan hoger dan normaal en de ebstanden lager.



4 De pijlers van de schepping

Deze spectaculaire zuilen van gas en stof zijn voor het eerst door de Hubble gefotografeerd in 1995. In 2015 zijn nieuwe opnames gemaakt in HD. De pijlers, die gebombardeerd worden door ultraviolette straling van zware, jonge sterren, worden onafgebroken nieuw vormgegeven, verhit en geërodeerd. Verborgen in het binnenste zijn de infrarode sporen van jonge sterren.

5 De Sombreronevel

De Sombreronevel, die zijn naam te danken heeft aan de hoedachtige vorm, is een sterrenstelsel in een sterrenstelsel. De platte schijf die we vanaf de aarde van de zijkant zien, is het opvallendste kenmerk. Als je echter in het infraroodspectrum kijkt, zie je een veel groter elliptisch sterrenstelsel waarin de centrale schijf volledig is opgenomen.

6 Leven

Voor zover we weten is de aarde de enige planeet die levende organismen huisvest. Het is echter mogelijk dat het universum veel meer planeten als de onze herbergt.

7 Grote Rode vlek

De Rode vlek van Jupiter heeft een diameter van twee aardes en is veruit de grootste storm in ons zonnestelsel. De rode kleur wordt veroorzaakt door het effect van uv-licht op de wolken.

8 De Leoniden

Deze meteorenzwerm is altijd te zien in november, als de aarde het stof en de gassen passeert die eens in de 33 jaar door de komeet Tempel-Tuttle worden uitgestoten wanneer hij zijn baan rond de zon heeft gedraaid.

9 Methaanzeeën

Weer bestaat niet alleen op waterwerelden als de onze. Op Titan, een maan van Saturnus, vinden we zeeën, wolken en regens van vloeibaar methaan.

10 Superklif

De hoogste klif in het zonnestelsel bevindt zich op Miranda, een maan van Uranus. Verona Rupes is twintig kilometer diep en als je er vanaf springt, ben je pas na twaalf minuten beneden.

11 Zuuratmosfeer

De atmosfeer van Venus bestaat voor 96 procent uit kooldioxide en de druk op het oppervlak is 90 keer die van de aarde. Er is nauwelijks water en de wolken bestaan uit agressief zwavelzuur.

12 Accretieschijf

Een zwart gat wordt omringd door een spiraalvormige schijf van in zijn zwaartekracht gevangen materie. De schijf blijft rondcirkelen tot hij ergens door wordt verstoord en de leegte in wordt gezogen.

13 Vestia's reuzenberg

De berg in het inslagbekken Rheasilvia op de planetoïde Vesta heeft een top van tweeëntwintig kilometer en overtreft daarmee de vulkaan Olympus Mons op Mars als hoogste berg in het zonnestelsel.

14 Valles Marineris

Valles Marineris is de Grand Canyon van Mars, maar dan groter. Dit 'litteken' in het planeetoppervlak heeft een lengte van 3000 kilometer, is 8 kilometer diep en 600 kilometer breed. De canyon is ongeveer 3,5 miljard jaar geleden gevormd.

15 Hellas Planitia

Hellas Planitia is een oude inslagkrater met een diameter van 2000 kilometer en een diepte van 4 kilometer. Dit enorme litteken op het zuidelijk halfrond is de grootste volledige krater van Mars en is ongeveer 4 miljard jaar geleden gevormd tijdens de inslag van een planetoïde.

16 Olympus Mons

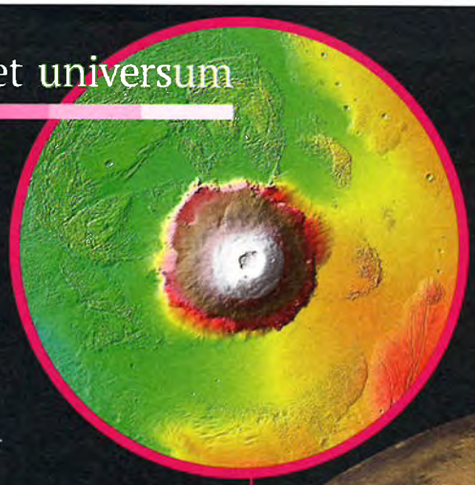
Deze imposante berg is met 25 kilometer de hoogste vulkaan in ons zonnestelsel, ruim 18 kilometer hoger dan de hoogste vulkaan op aarde, Ojos del Salado. Door het statische oppervlak van de planeet beweegt de uitgespuwde lava van Olympus Mons zich in één richting, met als gevolg een reusachtige vulkaan.

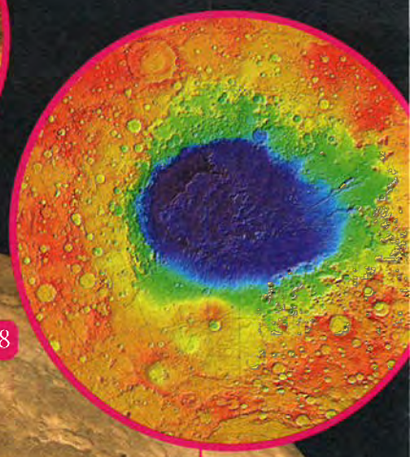
17 Gezichten op Mars

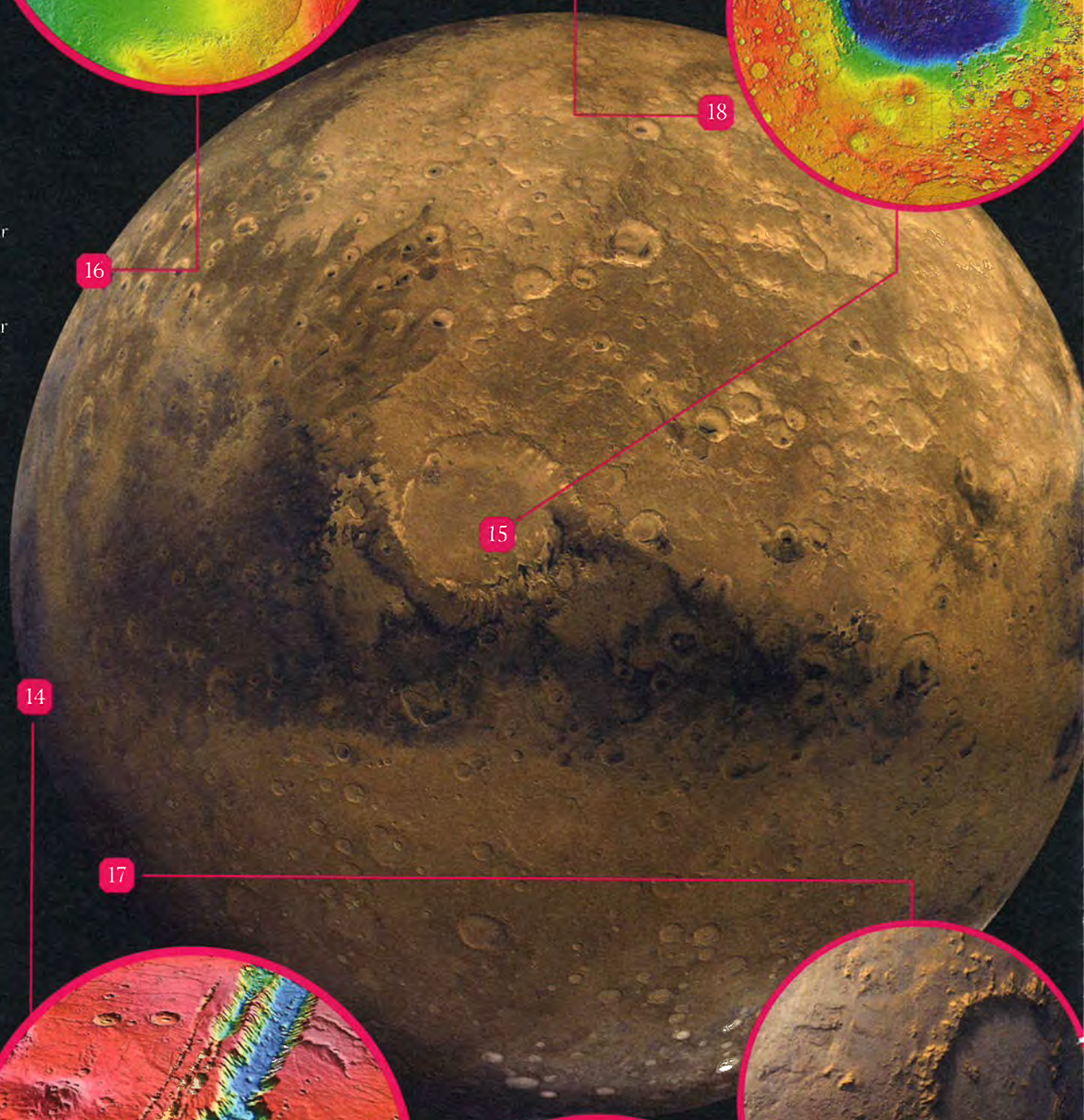
Tijdens zijn missie naar Mars in de jaren 1970 stuitte de Viking 1 op een merkwaardig schouwspel: vanaf het kale rotslandschap staarden twee gezichten omhoog. Latere high-res opnames onthulden echter dat deze landschapselementen een natuurlijke oorsprong hadden en niet door intelligent leven waren uitgehouwen.

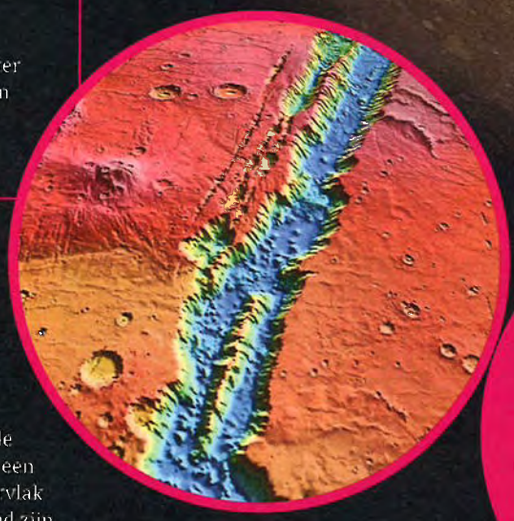
18 Utopia Planitia

Deze inslagkrater op Mars bevat zogenoemde thermokarsten: landvormen met geometrische lijnen en lager gelegen delen met geschulpte randen. Toen in 1979 de Viking 2 arriveerde, trof de sonde een dunne, bevroren laag op het oppervlak aan. De lijnen erin zouden gevormd zijn door wigvormig blokken ondergronds ijs.









19 Martiaanse stofstormen

De planeet Mars, die met een laag fijn, magnetisch stof is bedekt, wordt soms door extreem weer geteisterd. Warme lucht in het laaggelegen Hellasbekken kan stormen veroorzaken die zich over de hele planeet verspreiden.

20 Rode Vierkantnevel

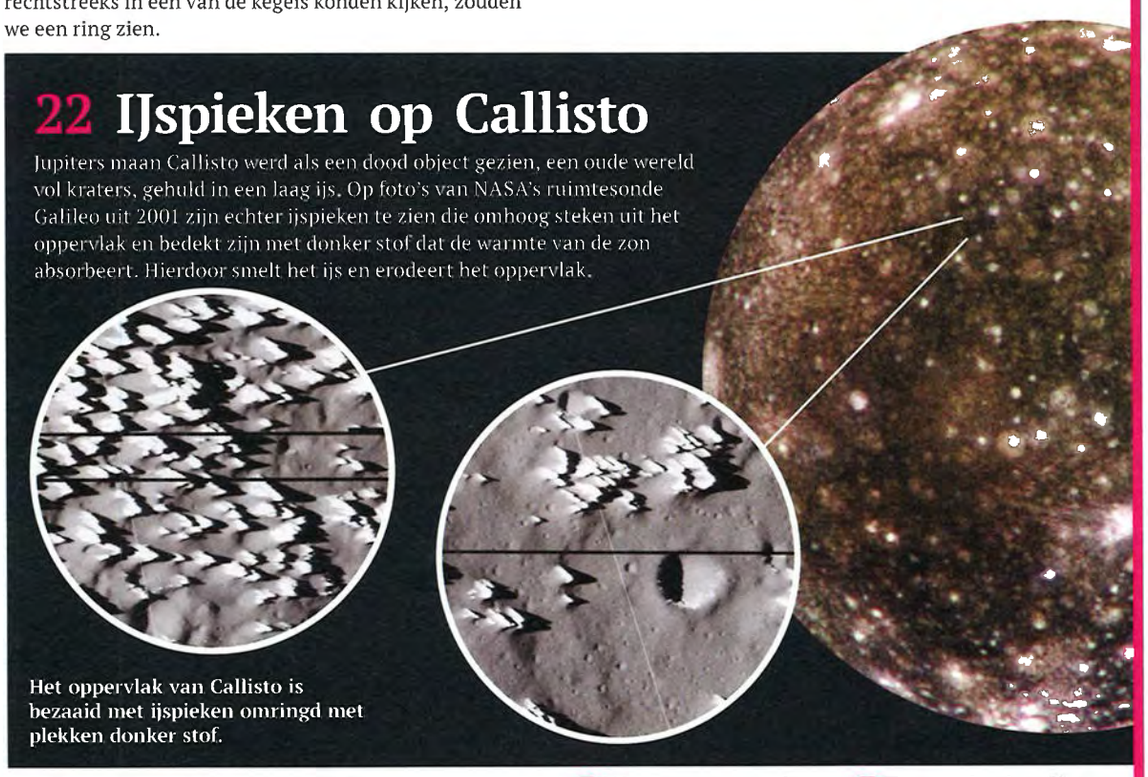
De ongebruikelijke geometrische vorm van deze nevel in het sterrenbeeld Serpens blijft een astronomisch mysterie. Volgens de geldende theorie zouden we naar de zijkant van een aantal gaskegels kijken die zijn uitgestoten door de ster – of de sterren – in het centrum. Omdat de kegels in een rechte hoek ten opzichte van elkaar staan, zien we een vierkant. Als we een standpunt konden kiezen waarbij we rechtstreeks in een van de kegels konden kijken, zouden we een ring zien.

21 De diamantring

Op het eerste gezicht lijkt deze foto van de Very Large Telescope (VLT) van het European Southern Observatory (ESO) in Chili op een kosmische diamantring. In werkelijkheid zien we echter een interactie tussen twee objecten. De ring zelf wordt gevormd door de blauwe planetaire nevel Abell 33, ontstaan toen een oude ster zijn buitenste lagen wegblies in een enorme kosmische bel. De 'diamant' is een heldere ster op de voorgrond.

22 IJspieken op Callisto

Jupiters maan Callisto werd als een dood object gezien, een oude wereld vol kraters, gehuld in een laag ijs. Op foto's van NASA's ruimtesonde Galileo uit 2001 zijn echter ijspieken te zien die omhoog steken uit het oppervlak en bedekt zijn met donker stof dat de warmte van de zon absorbeert. Hierdoor smelt het ijs en erodeert het oppervlak.



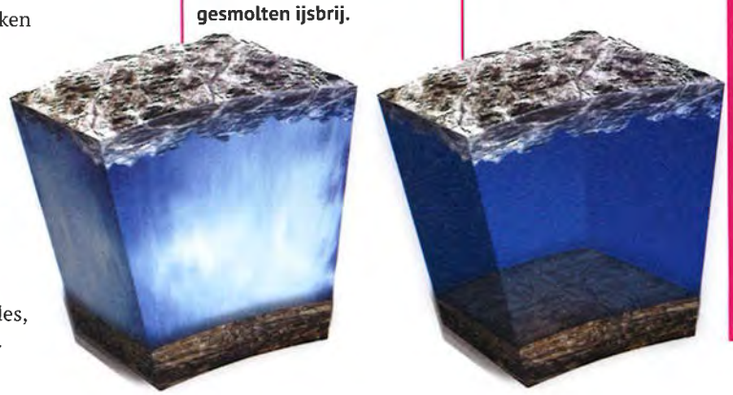
Het oppervlak van Callisto is bezaaid met ijspieken omringd met plekken donker stof.

23 Zeeën onder het oppervlak

Onder het oppervlak van schijnbaar bevroren manen bevinden zich mogelijk immense hoeveelheden vloeibaar water. In de uithoeken van ons zonnestelsel is de temperatuur erg laag, maar de gravitatie-interactie tussen een maan en zijn moederplaneet heeft wrijving tot gevolg, waardoor het ijs onder het oppervlak kan smelten en verborgen zeeën kunnen ontstaan. De getijdenbeweging van deze zeeën zou kunnen bijdragen aan het vloeibaar blijven van het water. De beste kandidaten voor dit soort zeeën in ons zonnestelsel zijn de Jupitermanen Europa, Callisto en Ganymedes, en de Saturnusmanen Mimas en Enceladus.

Warmteconvectie
Europa heeft een magnetisch veld, wat erop wijst dat iets beneden het oppervlak elektriciteit geleidt. Een verklaring is misschien een deels gesmolten ijsbrij.

Zee onder het ijs
De kern van Europa is nog warm. Het is daarom mogelijk dat het water onder het ijs vloeibaar is en een zoute zee vormt.



24 Donkere nevels

Deze wolken van gas en stof hebben een zo hoge dichtheid dat ze al het licht absorberen, waardoor het lijkt alsof de ruimte gaten heeft.

25 Vallende sterren

Al sinds de oudheid is de mens in de ban van deze hemelwonderen – in werkelijkheid zijn het gewoon stofjes en steentjes die verbranden als ze in de aardatmosfeer terechtkomen.

26 Stellaire magneten

Magnetars zijn neutronensterren met een extreem krachtig magnetisch veld. Deze schaarse, onvoorspelbare objecten kunnen plotseling gammaflitsen uitzenden om vervolgens weer tot rust te komen.

27 Titan

Saturnusmaan Titan is uniek binnen ons zonnestelsel. Het is de enige maan met een eigen atmosfeer en zijn oppervlak is bedekt met zeeën van vloeibaar ethaan en methaan.

28 Ster op theetemperatuur

De nabijgelegen bruine dwerg CFBDSIR 1458+10B maakt deel uit van een binair sterrenstelsel en heeft ongeveer dezelfde temperatuur als een vers kopje thee.

29 Hypersnelle sterren

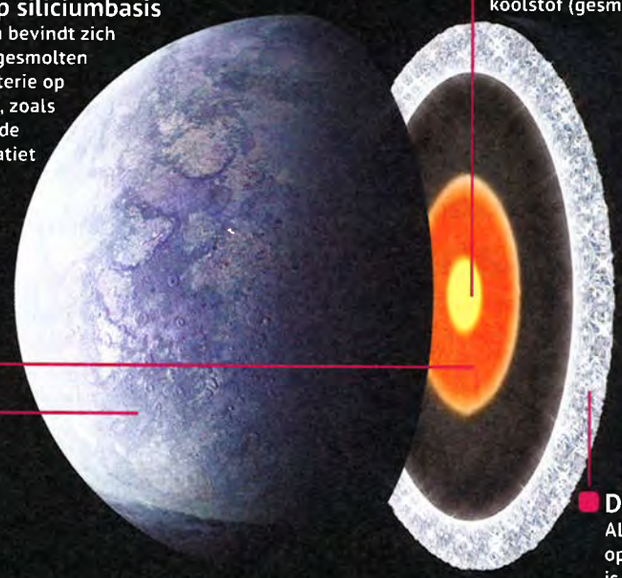
Sommige sterren verplaatsen zich met snelheden van meer dan 3,2 miljoen kilometer per uur, snel genoeg om aan de aantrekkingskracht van hun eigen stelsel te kunnen ontsnappen.

30 Himiko

Het oude, immense sterrenstelsel Himiko – een zogenoemde Lyman Alpha Blob – is zo ver van de aarde verwijderd dat we het zien zoals het 800 miljoen jaar geleden was.

31 Het Hamburgerstelsel

Dit spiraalstelsel, dat met de zijkant naar ons toe ligt, lijkt op een platte, roodoranje schijf van sterren en donker stof die qua vorm enigszins aan een hamburger doet denken.



32 Diamanten planeten

In ons zonnestelsel overheerst het element zuurstof en de terrestrische (aardeachtige) planeten die er voorkomen, bestaan uit gesteente dat op silicium is gebaseerd (silicaten). Elders in het universum gelden echter andere regels. Sommige planeten in door koolstof gedomineerde stelsels zouden wel eens uit diamant kunnen bestaan. Een van de eerste kandidaten is 55 Cancri E. Deze superaarde ligt op 40.000 lichtjaar, is twee keer zo groot als de aarde en heeft een bijna 8 keer zo hoge massa. Onder het oppervlak van grafiet zouden volgens wetenschappers een dikke laag edelstenen en andere kristalstructuren schuil kunnen gaan.

33 Immens waterreservoir

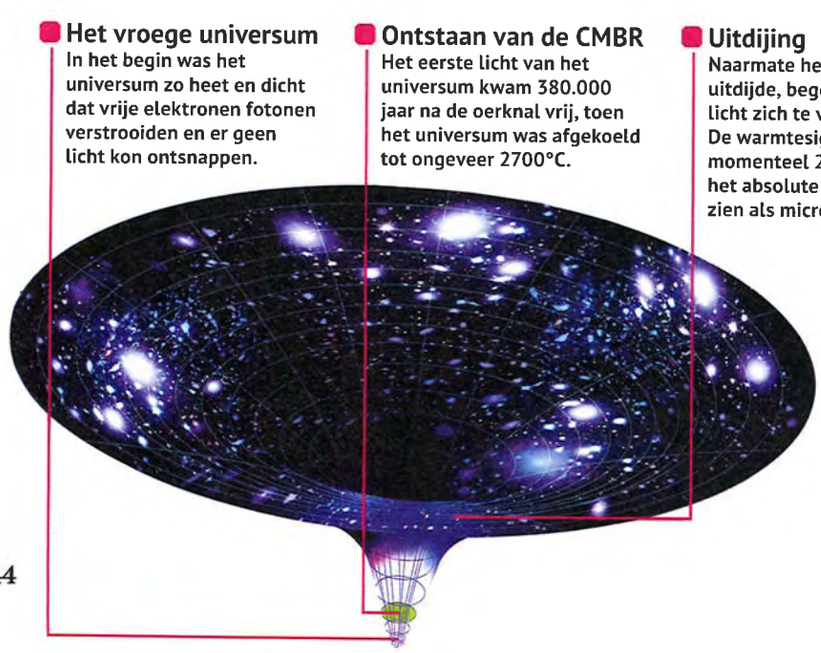
In de quasar APM 08279+5255 bevindt zich een zwart gat van 20 miljard zonmassa's en een primordiale waterwolk. De gassen rond het zwarte gat bevatten 140 triljoen keer zoveel water als de zeeën op aarde.

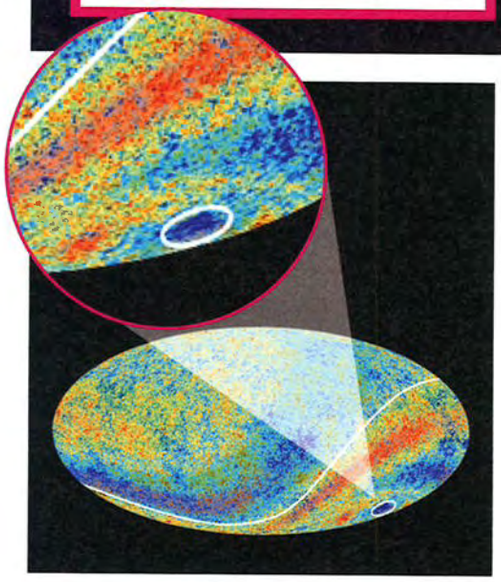
34 Gamma-flitsen

Je kunt gemiddeld één keer per dag ergens aan de hemel een krachtige uitbarsting van gammastraling zien. Men denkt dat deze zogenoemde gammaflitsen het laatste vuurwerk zijn van een ineenstortende superzware ster

35 Kosmische achtergrondstraling

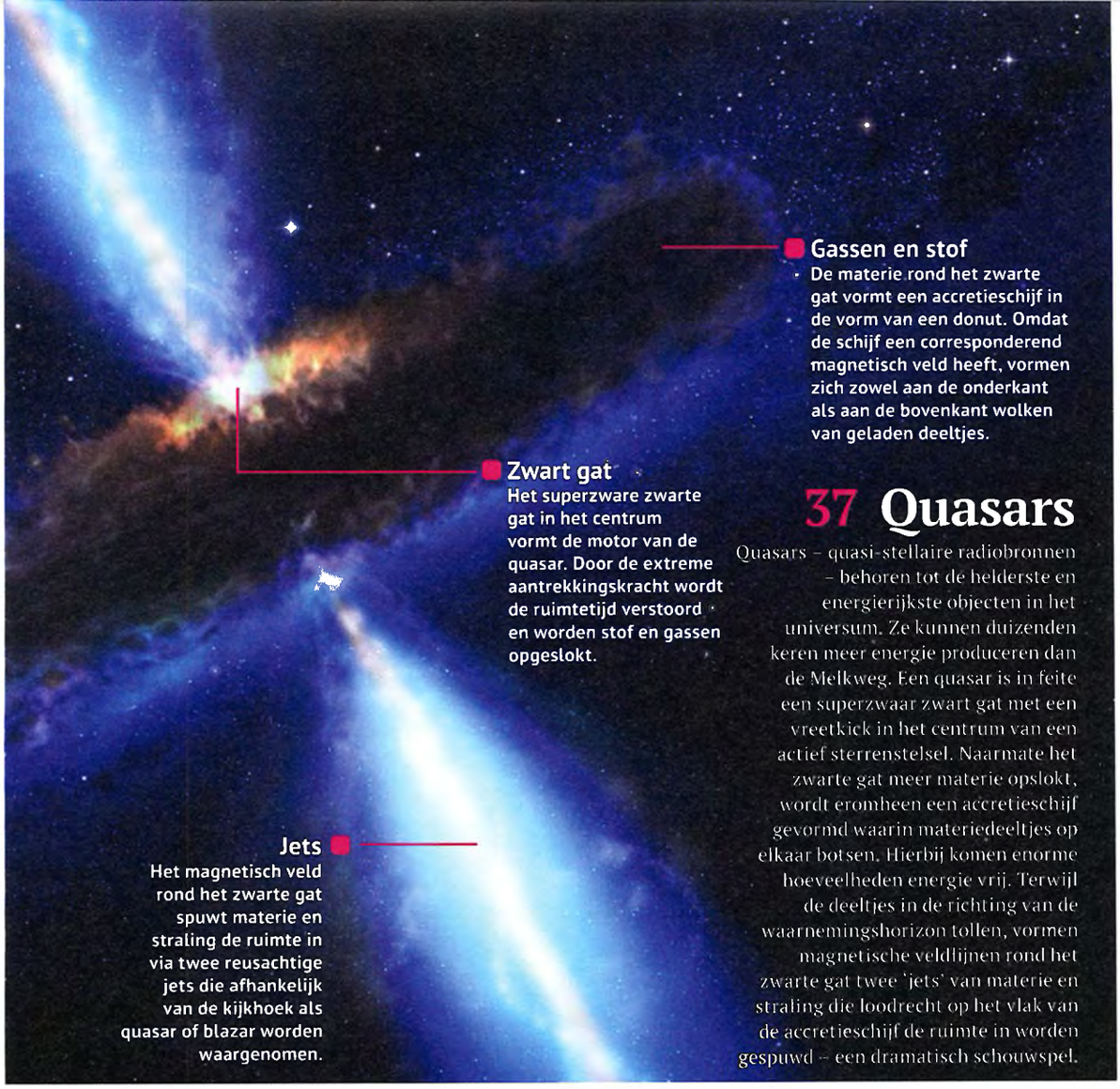
De kosmische achtergrondstraling (Cosmic Microwave Background Radiation of CMBR) die overal in het heelal kan worden waargenomen, wordt als bewijs gezien voor de oerknal (Big Bang). Deze microgolfstraling is in de jaren 1960 ontdekt door Bell Telephone Laboratories en werd oorspronkelijk vooral als ergerlijk ervaren omdat ze de radiocommunicatie verstoorde. Al snel werd echter duidelijk dat het om een bijzonder soort straling ging. De CMBR is het oudste licht in het universum dat kort na de oerknal werd uitgezonden. De temperatuur en de dichtheid van het vroege universum waren extreem hoog. Gedurende de afgelopen 13,8 miljoen jaar is het heelal echter uitgedijd en afgekoeld en de warmtesignatuur heeft een zichtbare vingerafdruk achtergelaten: een uniforme laag microgolfstraling die zich gelijkmatig verspreidt.





36 De koude plek

De kosmische achtergrondstraling – de warmtestraling van de oerknal – is overal aan de hemel relatief uniform. Er bestaat echter een opmerkelijke, koude plek (rechtsonder op de afbeelding). De kans op een dergelijk fenomeen is ongeveer 1 op 100 en kosmologen breken zich er het hoofd over. Mogelijke verklaringen zijn een immense superholte, een defect in de structuur van de kosmos of zelfs de aanwezigheid van een parallel universum.

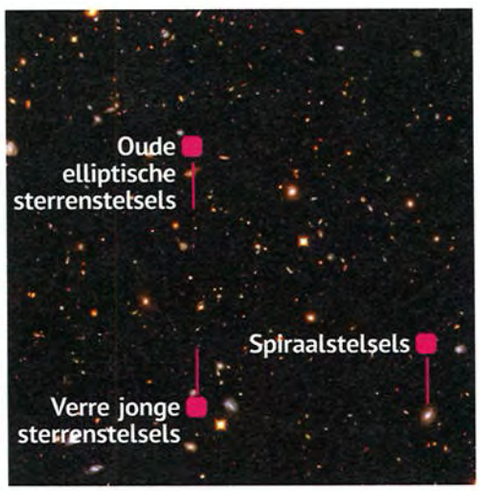


37 Quasars

Quasars – quasi-stellaire radiobronnen – behoren tot de helderste en energierijkste objecten in het universum. Ze kunnen duizenden keren meer energie produceren dan de Melkweg. Een quasar is in feite een superzwaar zwart gat met een vreetkick in het centrum van een actief sterrenstelsel. Naarmate het zwarte gat meer materie opslokt, wordt eromheen een accretieschijf gevormd waarin materiedeeltjes op elkaar botsen. Hierbij komen enorme hoeveelheden energie vrij. Terwijl de deeltjes in de richting van de waarnemingshorizon tollen, vormen magnetische veldlijnen rond het zwarte gat twee 'jets' van materie en straling die loodrecht op het vlak van de accretieschijf de ruimte in worden gespuwd – een dramatisch schouwspel.

38 Hubble Deep Field

Een van de verbazingwekkendste feiten van de ruimte ontdekken we als we een telescoop op het niets richten. In 2003 en 2004 werd de Hubble Space Telescope op een leeg stukje hemel gericht in het sterrenbeeld Fornax. Dit werd gedurende acht opeenvolgende jaren herhaald, met als resultaat een uiterst gedetailleerd beeld van een zee van sterrenstelsels die 13,2 miljard lichtjaar teruggaan in ruimte en tijd, bijna tot aan de geboorte van het universum.



39 Het Kwintet van Stephan

Dit cluster van vijf sterrenstelsels werd in de 19e eeuw ontdekt en demonstreert op monumentale schaal de gevolgen van de zwaartekracht. Drie van de stelsels bevinden zich zo dicht bij elkaar dat hun structuur zichtbare veranderingen heeft ondergaan als gevolg van de extreme zwaartekrachtgetijden. Een botsing is dan ook onvermijdelijk. Het blauwe sterrenstelsel aan de linkerkant is eigenlijk een buitenstaander. Het bevindt zich op 240.000 lichtjaar van de andere vier en maakt dus in feite geen deel uit van de groep.

40 Donkere energie

We weten weinig over donkere energie, behalve dat de uitdijing van het heelal erdoor wordt versneld. Donkere energie zou tussen de 68 en 71 procent van het heelal uitmaken.

41 Donkere materie

Tussen de 24 en 27 procent van het heelal zou uit donkere materie bestaan. Donkere materie is opgebouwd uit subatomaire deeltjes die nauwelijks met 'gewone' materie samenwerken.

42 Schaarse materie

Slechts 5 procent van het universum bestaat uit 'normale' atomaire materie – protonen en neutronen. De rest wordt gevormd door donkere materie en donkere energie, die geen van beide ooit rechtstreeks zijn waargenomen.

43 Rode dwergen

Deze kleine sterren branden zo zwak dat hun levensduur waarschijnlijk veel hoger zal zijn dan de huidige leeftijd van het universum. Geen ervan is dus al oud genoeg om te sterven.

44 Planetoïdengordel

Tussen Mars en Jupiter bevindt zich een gebied met restanten uit de begintijd van ons zonnestelsel. Het zijn ofwel overblijfselen van een planeet die uiteindelijk niet is gevormd, of fragmenten van een uiteengevallen exemplaar.

45 Oortwolk

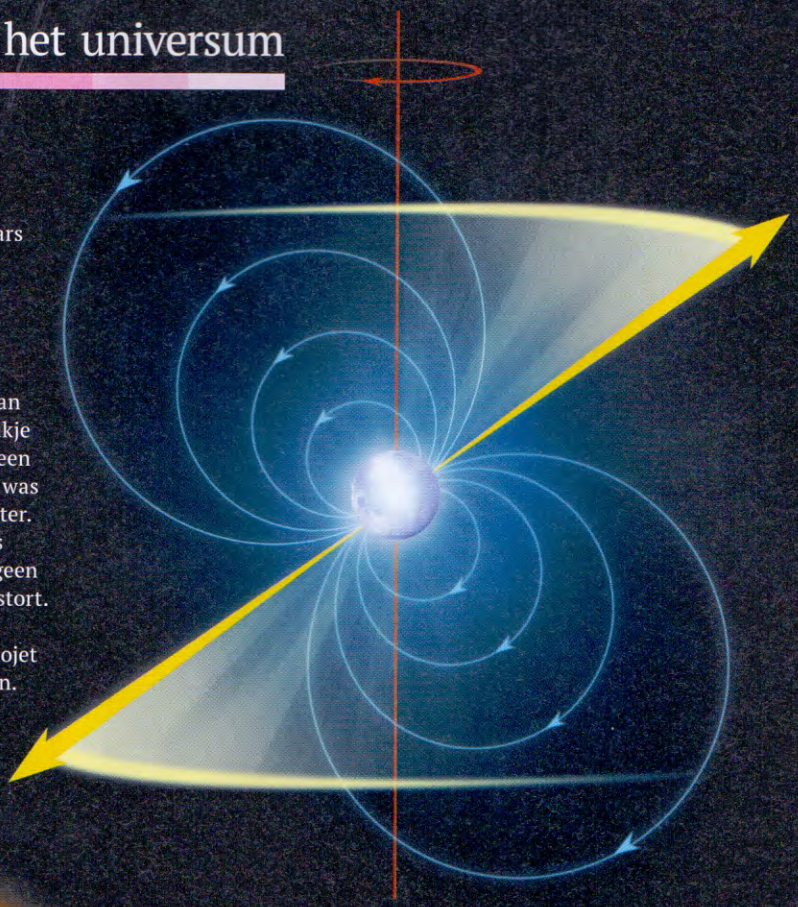
Ons zonnestelsel wordt omringd door een wolk van ijsachtige objecten die de Oortwolk wordt genoemd. De zwaartekracht van de zon is op die afstand zo zwak dat passerende objecten ze gemakkelijk als kometen ons zonnestelsel in kunnen slingeren.

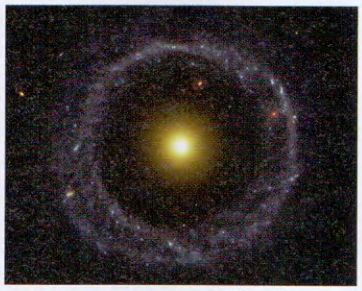
46 Tegengestelde rotatie

De armen van spiraalstelsels wijzen altijd tegen de draairichting in. Bij NGC 4622 is echter het omgekeerde het geval. Dit is mogelijk het gevolg van een botsing.

47 Pulsars

Toen ze in 1967 de eerste pulsars ontdekte, dacht Jocelyn Bell dat ze wellicht berichten van een buitenaardse beschaving had opgevangen. Tijdens haar speurtocht naar het hoogenergetische twinkelen van deze objecten viel haar een stukje hemel op dat elke 1,3 seconde een radiopuls uitzond. Het signaal was afkomstig van een neutronenster. Neutronensterren ontstaan als een ster met 8-25 zonmassa's geen brandstof meer heeft en ineenstort. Door het ronddraaien van de neutronenster zal ook zijn radiojet met regelmatige pulsen draaien.



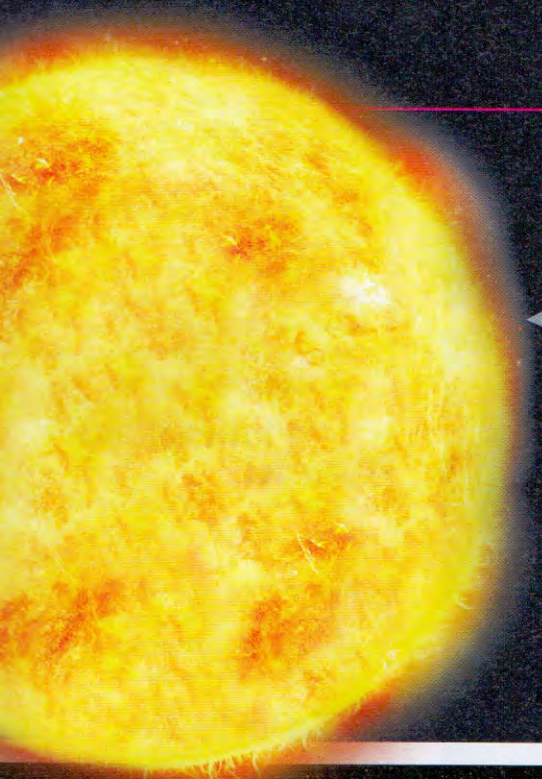


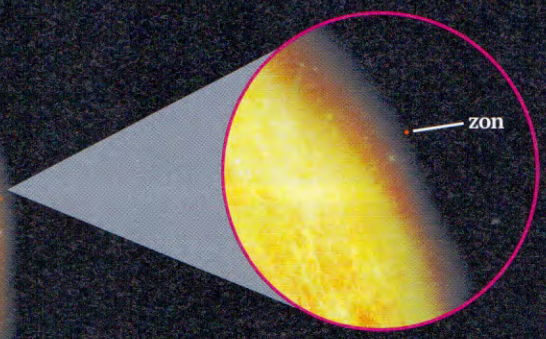
48 Object van Hoag

Dit ongebruikelijke object is een ringstelsel, een van de zeldzaamste sterrenstelsels in het universum. In het centrum bevindt zich een bolvormige groep oude oranjerode sterren en langs de rand zien we een ring van jonge hete sterren met een felblauwe kleur. Van andere ringstelsels wordt vermoed dat ze tijdens een botsing zijn gevormd of door een snel draaiende centrale balk. De oorsprong van het Object van Hoag is echter onbekend. Als je door de ring kijkt, zie je op grote afstand nóg een ringstelsel.

49 Spirograaf-nevel

De ster in deze nevel van geometrische wervelingen was ooit vergelijkbaar met onze eigen zon, maar enkele duizenden jaren geleden raakte zijn brandstof op en stortte hij ineen tot een rode dwerg. Inmiddels zijn de buitenste lagen van de atmosfeer sterk uitgedijd. De witte dwerg die zich nu in het centrum begint te vormen is onvoorspelbaar. Wetenschappers denken dat de vreemde patronen in zijn nevel door wispelturige winden worden veroorzaakt.





50 Supergrote ster

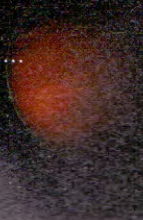
VY Canis Majoris is een van de grootste sterren in de Melkweg: 2000 keer zo groot als de zon en 30-40 keer zijn massa. Over hooguit enkele tientallen miljoenen jaren zal VY Canis Majoris ineenstorten en een supernova vormen die water, silicium en koolstof de ruimte in zal slingeren. Hierna zal een nieuwe generatie kleinere sterren ontstaan die meer op onze zon lijken.

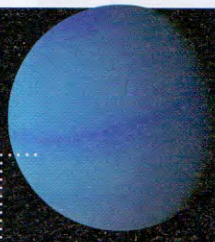
51 Exoplaneten

Tot 1994 kenden we alleen de planeten van ons zonnestelsel, hoewel werd aangenomen dat er ook andere konden zijn. De eerste exoplaneet werd gevonden in een baan rond een pulsar, en een jaar later, in 1995, werd een tweede exoplaneet ontdekt in een baan rond een zonachtige ster. Inmiddels heeft NASA's JPL het bestaan van 3388 exoplaneten bevestigd, terwijl er nog eens 4696 kandidaten zijn.

Hete Jupiters
HD 189733b
Deze enorme gasreuzen staan vrij dicht op hun moederster. Tijdens een planeetovergang wordt het licht van de ster deels onderschept, wat detectie eenvoudig maakt. Sommige hete Jupiters, zoals HD 189733b, hebben een nog kortere omloopbaan dan Mercurius.

Chthoniaanse planeten
Osiris (HD 209458b)
Gasreuzen met een korte omloopbaan worden met straling en zonnewind gebombardeerd en verdampen snel. Chthoniaanse planeten zijn de hypothetische rotsachtige overblijfselen.



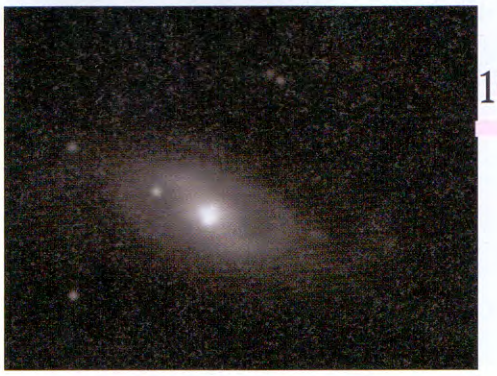


Hete Neptunussen
Gliese 436b
Deze planeten ter grootte van Neptunus bevinden zich dicht op hun moederster zodat een jaar er snel voorbij is. Dit maakt ze gemakkelijk te detecteren.

Waterwerelden
Kepler 22b
Deze groep oceaanplaneten bestaat grotendeels uit water. Sommige hebben een dichte atmosfeer en vloeibaar oppervlaktewater, terwijl andere heet zijn, over een dampkring van stoom beschikken en instabiel zijn.

52 Paardenkopnevel

Deze opmerkelijke zuil van dichte gas- en stofwolken heeft zijn naam te danken aan zijn vorm. Het object, ook bekend als Barnard 33, is zichtbaar tegen een roze achtergrond dankzij vijf heldere sterren van het sterrenbeeld Orion. De Paardenkopnevel maakt deel uit van een groter nevelcomplex waarin nieuwe sterren met een lage massa worden gevormd.

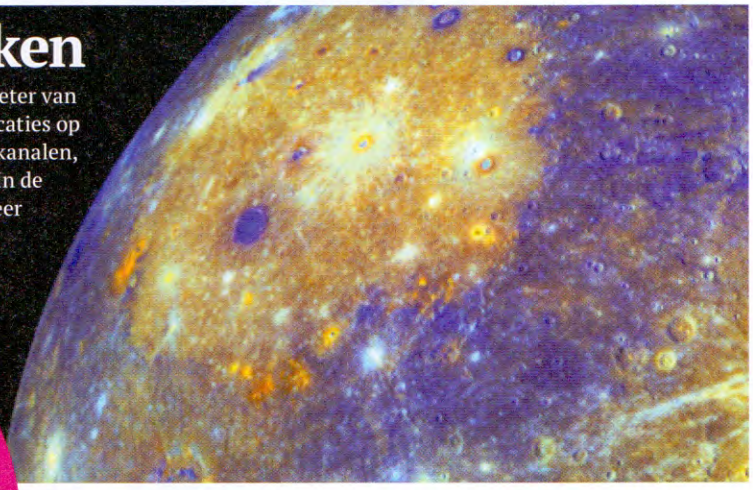


53 Einsteinkruis

Eén van Albert Einsteins belangrijkste ideeën was dat het universum uit een weefsel zou bestaan dat hij 'ruimtetijd' noemde en door massa kon worden vervormd. Voor het bewijs hoeven we alleen maar door een telescoop te kijken. Het Einsteinkruis is een quasar die eruitziet als vier afzonderlijke objecten. Ervóór staat namelijk een sterrenstelsel dat de ruimtetijd vervormt en als 'zwaartekrachtlens' optreedt. Alles wat zich erachter bevindt, wordt hierdoor gedupliceerd.

54 Calorisbekken

Dit enorme inslagbekken met een diameter van 1500 kilometer is een van de heetste locaties op Mercurius. De rand is bezaaid met lavakanalen, die hier als oranje vlekken te zien zijn. In de krater zelf bevinden zich honderden meer recente inslagkraters.



55 Zonsopgang op Mercurius

Dicht bij de zon is de snelheid van Mercurius zo hoog dat de rotatie gaat achterlopen. Nadat de zon is ondergegaan, komt hij weer op om vervolgens opnieuw onder te gaan.

56 Poollicht

De aurora borealis en de aurora australis behoren tot de spectaculairste natuurwonderen op aarde. De zon slingert grote hoeveelheden geladen deeltjes de ruimte in – de zonnewind. Deze deeltjes komen in de magnetosfeer rond onze planeet terecht en botsen op gasmoleculen, die hierdoor in een 'aangeslagen' (hoogenergetische) toestand raken en oplichten. De kleuren van het poollicht zijn afhankelijk van de hoogte waarop de moleculen zich bevinden en het soort gas dat wordt geraakt.

57 Supernova's

Als zware sterren sterven, doen ze dat met een spectaculaire explosie. Daarbij komt in een fractie van een seconde evenveel energie vrij als onze zon gedurende zijn hele leven uitstraalt.

58 Zuidpool-Aitkenbekken

Op de zuidpool van de maan bevindt zich een reusachtige inslagkrater met een diameter van 2600 kilometer en een diepte van 13 kilometer.

59 Tsjeljabinsk-meteoriet

Deze planetoïde met een diameter van 19 meter explodeerde in 2013 boven Rusland. Een dergelijke gebeurtenis vindt ongeveer eens in de 30 jaar plaats.

60 Cataclysmische veranderlijke sterren

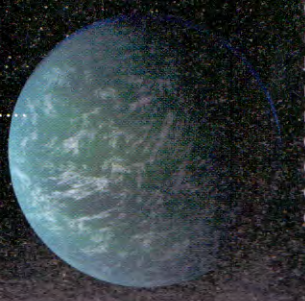
In sommige binaire stelsels draaien een witte dwerg en een grotere ster op korte afstand rond elkaar. De witte dwerg voedt zich met de energie van zijn begeleider, waardoor een oplichtende accretieschijf ontstaat.

61 Totale zonsverduistering

Deze zeldzame gebeurtenis is alleen mogelijk omdat de maan vanaf de aarde gezien precies even groot is als de zon. Een totale zonsverduistering doet zich voor als de maan precies tussen de zon en de aarde staat.

Superaardes
HIP 116454b

De massa van deze planeten is groter dan die van de aarde, maar kleiner dan die van Neptunus. Niet alle superaardes lijken op onze planeet. Sommige zijn verzengend heet, andere extreem koud of zelfs gasvormig.



Gasreuzen
GJ 540b

Deze enorme planeten hebben net als Jupiter en Saturnus een massa die een veelvoud is van die van de aarde. Ze bestaan grotendeels uit gas en hebben een kern van gesmolten gesteente of metaal.

Terrestrische planeten
55 Cancri e

Deze planeten bestaan net als de aarde grotendeels uit gesteente of metalen. Men denkt dat misschien alleen al in de Melkweg 40 miljard bewoonbare terrestrische planeten zijn.

Bruine dwergen
Teide 1

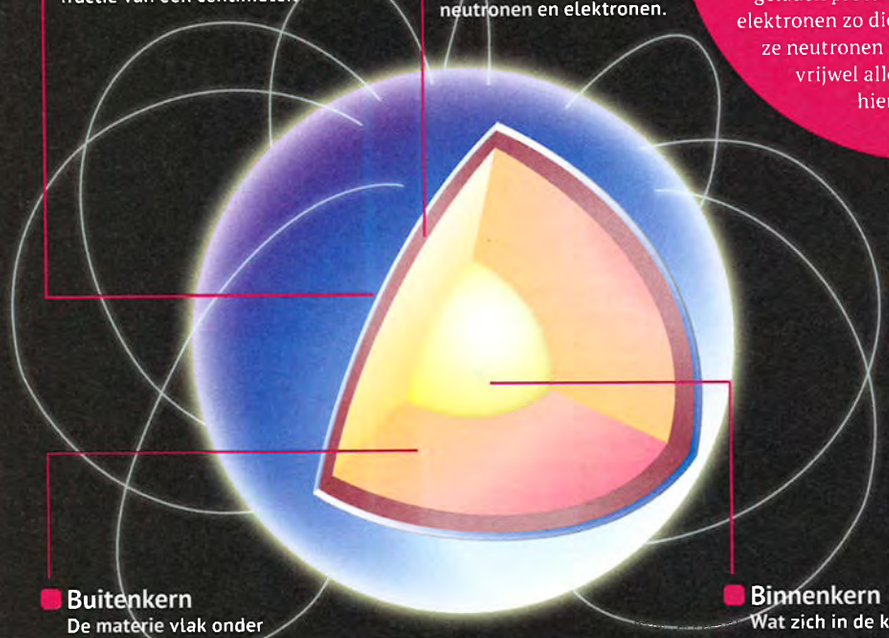
Deze objecten zijn groter dan planeten, maar kleiner dan sterren. Als gevolg van hun te lage massa kon geen proton-protonfusie op gang komen om een ster te vormen. Bruine dwergen worden ook wel 'mislukte sterren' genoemd.

Planeten op drift
WISE 0855-0714

Op drift geraakte planeten draaien niet om hun moederster, maar om het centrum van hun sterrenstelse Ze worden verwarmd door hun gesmolten kern, maar zijn vaa in ijs gehuld.

62 Neutronen

Neutronen zijn subatomaire deeltjes met een neutrale elektrische lading. In normale materie vinden we ze in atoomkernen tussen positief geladen protonen. In een neutronenster zullen de atomen door de immense druk echter uiteenvallen. Daarbij worden de positief geladen protonen en negatief geladen elektronen zo dicht op elkaar gedrukt dat ze neutronen vormen en uiteindelijk vrijwel alle materie in de ster hieruit bestaat.



63 Neutronensterren

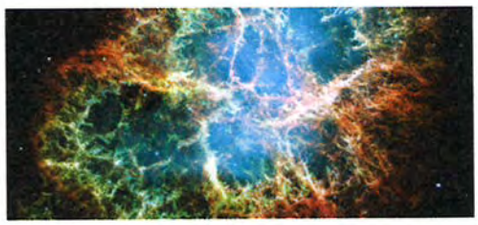
Als een zware ster zonder brandstof raakt, zal de naar buiten gerichte explosieve kracht, die de binnenwaarts gerichte zwaartekracht in balans houdt, verdwijnen. Hierdoor zal de ster binnen een fractie van een seconde ineenstorten. De grootste sterren imploderen tot zwarte gaten, maar kleinere exemplaren doen het rustiger aan en evolueren tot neutronenster. Een neutronenster heeft de omvang van een flinke stad, maar de massa van ongeveer 500.000 aardes. De dichtheid is zo hoog dat een theelepeltje materie 10 miljoen ton zou wegen.

64 Miernevel

Dit object vertoont een opvallende gelijkenis met de kop en het borststuk van een mier. Als je echter goed kijkt, zie je precies tussen de twee segmenten een stervende ster die enigszins op onze zon lijkt. Astronomen breken zich het hoofd over de vorm van de nevel, die zich niet uniform naar alle richtingen uitspreidt, maar uit twee symmetrische 'diamanten' bestaat. Men denkt dat er wellicht een tweede ster is die het gas met zijn zwaartekracht beïnvloedt, of dat de immense draaikolken door de rotatie van de stervende ster worden veroorzaakt.

65 Meerlingen

Ongeveer 85 procent van de sterrenstelsels in de Melkweg bestaat uit groepjes van twee of meer sterren. We spreken dan van binaire, respectievelijk meervoudige stelsels, waarin de sterren rond een gemeenschappelijk zwaartepunt draaien. Sommige van deze stelsels zijn gemakkelijk met een telescoop te onderscheiden, terwijl andere eruitzien als één heldere ster. In dat geval kunnen ze worden herkend aan lichtfluctuaties die worden veroorzaakt als een van beide sterren voor de andere langsgaat, met als gevolg een vanaf de aarde meetbare eclips.



66 De Orionnevel

Door zijn spectaculaire kleuren is de Orionnevel een van de bekendste objecten aan de nachthemel. De gloeiende, rode wolk van geïoniseerd waterstof bevindt zich op 1500 lichtjaar van de aarde en wordt gedomineerd door een groep van vier reusachtige sterren die samen ook wel het Trapezium worden genoemd. De Orionnevel is pas 50.000 jaar oud en staat bekend als een zeer actieve sterrenkraamkamer. De sterren van het hete, jonge Trapezium hebben een gat in hun stofsluier geblazen en verlichten de omringende wolk.

67 De Krabnevel

Deze nevel met een diameter van 5 lichtjaar bestaat uit de overblijfselen van een supernova-explosie die in het jaar 1054 te zien was vanaf het zuidelijk halfrond. De gaswolk dijt uit met een snelheid van zo'n 1800 kilometer per seconde en vormt een gloeiende regenboog. De blauwe en groene filamenten in het inwendige bestaan uit zuurstof en zwavel. De oranje en rode kleuren dichter bij de rand zijn waterstof en zuurstof. In het centrum lichten elektronen blauw op tijdens hun dans in het magnetisch veld van een neutronenster.

68 De Draaikolknevel

Deze bijna perfecte draaikolk is een klassiek voorbeeld van een spiraalvormig melkwegstelsel. Net als in onze eigen melkweg worden in de reusachtige armen felblauwe sterren gevormd rond een centrale verdikking van oudere, oranjerode sterren in de laatste fase van hun bestaan. Aan weerszijden van de spiraalarmen zien we stofbanen van donker silicium en koolstof, evenals rood oplichtende waterstofwolken die door de straling van de jonge sterren in een aangeslagen toestand worden gebracht.

69 Ruimte-vulkanen

Ons zonnestelsel krioelt van vulkanische activiteit. De grootste vulkaan, Olympus Mons, bevindt zich op Mars. Venus is de planeet met de meeste vulkanen: ruim 1600. Hoewel recentelijk nergens activiteit is waargenomen, wil dat niet zeggen dat alle vulkanen dood zijn. Jupiters maan Io vertoont meer vulkanische activiteit dan de aarde, en zowel op Neptunus' maan Triton, als op Saturnus' maan Enceladus vinden we 'cryovulkanen' (ijsvulkanen) die geen lava uitspuwen, maar 'ijsmagma'. Door de aantrekkingskracht van hun moederplaneet vervormen deze planeten waardoor hun inwendige smelt en flexibel wordt. Dit resulteert in spectaculaire erupties.

70 Io

Jupiters op twee na grootste maan, Io, is het vulkanisch actiefste hemellichaam in ons zonnestelsel. Hij spuwt zijn lava soms 300 kilometer de lucht in. Io's atmosfeer is ijl en zwavelhoudend en het oppervlak wordt onafgebroken geëffend en veranderd door lavastromen. De maan fungeert opmerkelijk genoeg als bliksemafleider en tijdens zijn reis door het magnetisch veld van Jupiter worden stromen tot 3 miljoen ampère opgewekt die in de richting van de gasreus worden geschoten.

71 Lichtecho's

Begin 2002 werd de ster V838 Monocerotis plotseling extreem helder, om vervolgens weer weg te zakken. Astronomen stonden perplex. Gedurende het fenomeen, dat 'lichtecho' wordt genoemd, nam de diameter van de ster enorm toe. In tegenstelling tot bij andere oude sterren werden de buitenste lagen echter niet afgestoten. Sterker nog, ze koelden af tot bijna 'kamertemperatuur'. Het uitgezonden licht werd gereflecteerd door stof waarvan de ster zich al had ontdaan. Daarbij werden vele wervelende lagen onthuld die eerder onzichtbaar waren geweest.

72 Bolhopen

Bolhopen of bolvormige sterrenhopen bestaan uit dicht op elkaar staande primordiale roodoranje sterren. Deze substelsels binnen sterrenstelsels zouden 13 tot 15 miljard jaar geleden zijn gevormd.

73 Reflectienevel

Deze nevels verspreiden zelf geen licht, maar reflecteren dat van nabijgelegen sterren, wat hun diffuse contouren zichtbaar maakt.

74 Planetoïden-manen

Niet alleen planeten hebben satellieten. Ongeveer 16 procent van de grote Near Earth Asteroids hebben een of zelfs twee manen.

75 Kosmische leegten

De structuur van het universum lijkt op een soort driedimensionaal web, waarin de meeste sterrenstelsels in clusters en filamenten zijn gerangschikt. Daartussenin bevinden zich uitgestrekte leegten of holtes.

76 Wolf-Rayets-terren

Deze hete, zware sterren, genoemd naar de astronomen Charles Wolf en Georges Rayet, zijn aan het einde van hun levenscyclus en verliezen snel massa door hun krachtige zonnewind.

77 Ceres

Ceres is het grootste object in de planetoïdengordel. De groei van de dwergplaneet werd belemmerd door de zwaartekracht van Jupiter en met zijn diameter van 950 kilometer wordt Ceres ook wel een embryonale planeet genoemd.

78 Grote quasar-groep

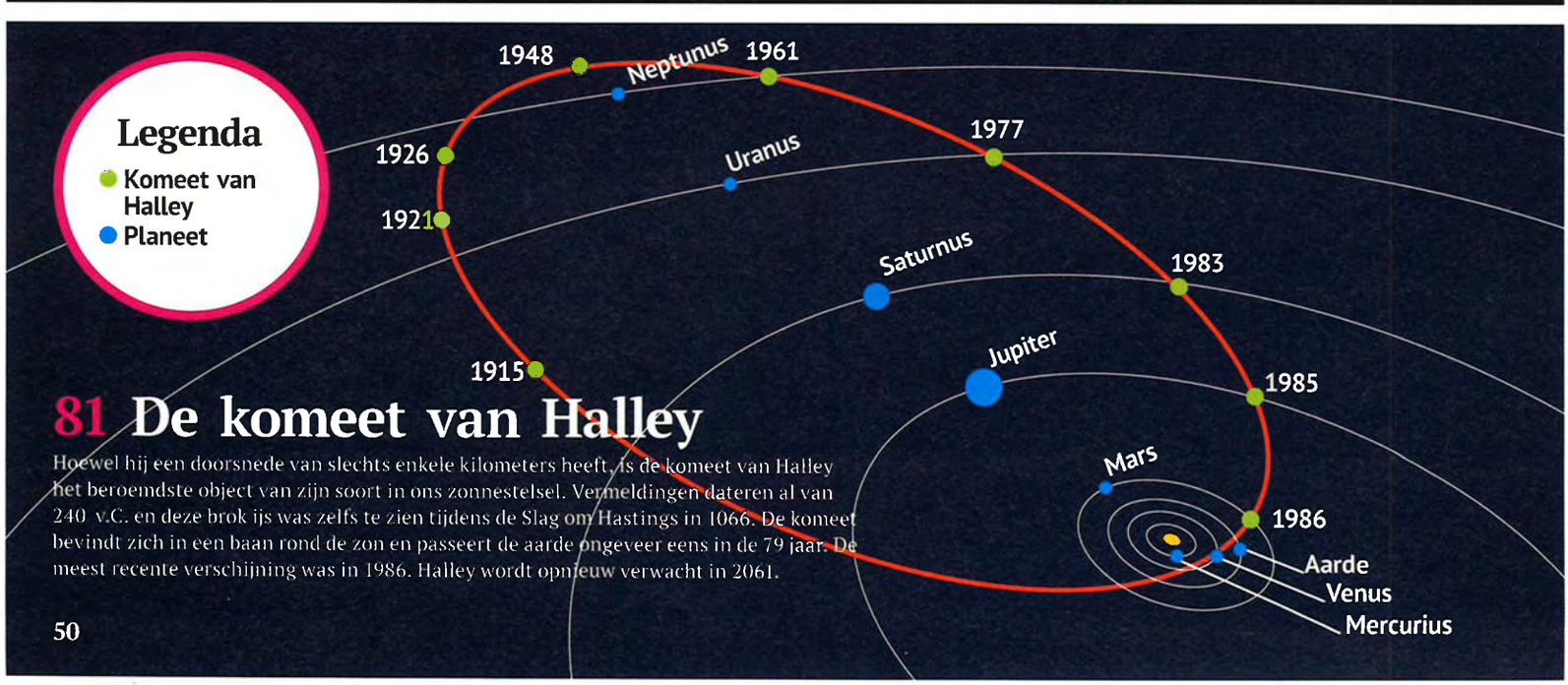
De grootste structuur in het bekende universum, de LQG, is een cluster van quasars – de heldere kernen van ver verwijderde sterrenstelsels – met een breedte van 4 miljard lichtjaar.

79 Zonnevlammen

Bij plotselinge erupties van elektromagnetische energie op het oppervlak van de zon komt 10 miljoen keer meer energie vrij dan tijdens een vulkaanuitbarsting.

80 Zonnemaximum

Hoewel de zon een constante factor aan onze hemel is, is hij niet zo onveranderlijk als hij lijkt. De magnetische flux van de ster doorloopt een cyclus van elf jaar en op het hoogtepunt – het zonnemaximum – zijn op het oppervlak vrijwel onafgebroken zonnevlekken te zien. Zonnevlekken ontstaan op plaatsen waar het magnetisch veld het sterkst is en de temperatuur daalt. De diameter kan oplopen tot 50.000 kilometer. De periode met de meeste zonnevlekken noemen we een zonnemaximum. Zonnevlekken vinden we in twee banden aan weerszijden van de equator. Deze actieve regionen worden vaak geassocieerd met zonnevlammen en coronale massa-ejecties (CME's), die zich vaker voordoen naarmate een zonnemaximum achter de rug is.



81 De komeet van Halley

Hoewel hij een doorsnede van slechts enkele kilometers heeft, is de komeet van Halley het beroemdste object van zijn soort in ons zonnestelsel. Vermeldingen dateren al van 240 v.C. en deze brok ijs was zelfs te zien tijdens de Slag om Hastings in 1066. De komeet bevindt zich in een baan rond de zon en passeert de aarde ongeveer eens in de 79 jaar. De meest recente verschijning was in 1986. Halley wordt opnieuw verwacht in 2061.

82 Sigaarstelsel

Deze van de zijkant gefotografeerde spiraal wordt wel een starburststelsel genoemd omdat hier op zeer hoog tempo stervorming plaatsvindt. De jonge sterren worden van brandstof voorzien door supernova's, waarvan er de afgelopen decennia al verschillende zijn waargenomen, de laatste in 2014.

83 Hartnevel

De Hartnevel, IC 1805, is vanwege zijn overduidelijke hartvorm een favoriet ruimteobject op Valentijnsdag. De gas- en stofwolken danken hun vorm aan Melotte 15, een relatief jonge sterrenhoop die pas 15 miljoen jaar oud is.

84 Botsende sterrenstelsels

Het Antennestelsel – een starburststelsel – bestaat uit twee stelsels die in een nietsontziende confrontatie verwikkeld zijn geraakt, een chaotische dans die enkele honderden miljoenen jaren geleden is begonnen. De zwakke, oranje kernen zijn nog duidelijk zichtbaar, maar de armen voeren strijd. Hierbij ontstaan op hoge snelheid nieuwe sterren, wat op veel plaatsen het waterstofgas roze doet oplichten.

85 Micro zwarte gaten

Deze hypothetische zwarte gaten zouden zich vroeg in de geschiedenis van het universum hebben gevormd en de massa bezitten van een berg met de omvang van slechts één atoom.

86 Neutrino's

Deze subatomaire deeltjes ontstaan tijdens krachtige explosies. Ze hebben echter geen massa en geen lading en ze gaan door alles heen. Detectie is moeilijk en vindt vaak diep onder de grond plaats.

87 Hete ijsplaneten

De temperatuur op de planeet GJ 436b ligt ruim boven het kookpunt van water, maar de druk is er zo hoog dat hier een exotische vorm van ijs is ontstaan.

88 Duinenvelden

Ondanks hun verschillen komen de aarde, Venus, Mars en Titan op één punt overeen: door wind in de atmosfeer zijn op veel plaatsen golvende duinen ontstaan.

89 Het gat in de ruimte

Wij bevinden ons in een gat in het interstellair medium dat de Lokale Bubbel wordt genoemd en ongeveer 10 miljoen jaar geleden is gevormd door een groep exploderende supernova's.

90 Poolsterren

De huidige Poolster is Polaris. De ster bevindt zich vrijwel precies in het verlengde van de aardas. Aangezien de aardas eens in de 25.770 jaar een kegelvorm krijgt, vervullen meerdere sterren de rol van Poolster in de loop der tijd.

91 Rumwolk

Sagittarius B2, een wolk nabij het centrum van de Melkweg, bevat 1027 liter alcohol, alsmede ethylformiaat, dat naar rum ruikt.

92 Dinosaurus-krater

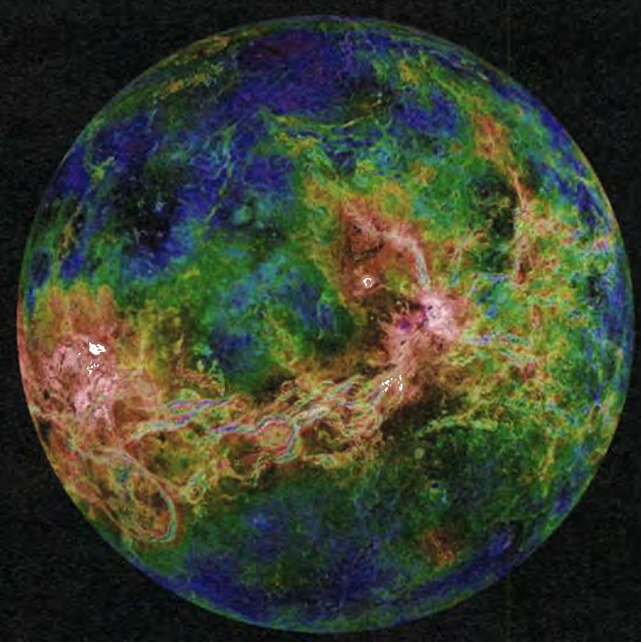
Chicxulub is een 66 miljoen jaar oude inslagkrater in Yucatán, Mexico. De planetoïde die hier is ingeslagen, zou verantwoordelijk zijn geweest voor de massale uitsterving van de dinosaurussen.

93 Immense canyon

Op Saturnusmaan Tethys vinden we een 2000 kilometer lange canyon genaamd Ithaca Chasma, die driekwart van de omtrek van de planeet beslaat. De ontstaansgeschiedenis is onbekend, maar men denkt dat het 100 kilometer brede ravijn gevormd kan zijn tijdens het afkoelen van de maan. Het is ook denkbaar dat de inslag waarbij de reusachtige krater Odysseus is gevormd hier een rol heeft gespeeld.

94 Reusachtige rivierbedding

Baltis Vallis is een 6800 kilometer lang 'kanaal' op Venus. Het is de langste in het zonnestelsel en heeft alleen serieuze concurrentie van de rivier de Nijl (6650 kilometer). Gezien de breedte – tussen de 1 en 3 kilometer – denkt men dat Baltis Vallis door snelstromende lava is gevormd. De manier waarop het kanaal zich door het landschap kronkelt, doet aan een rivier denken.



95 Beschilderde maan

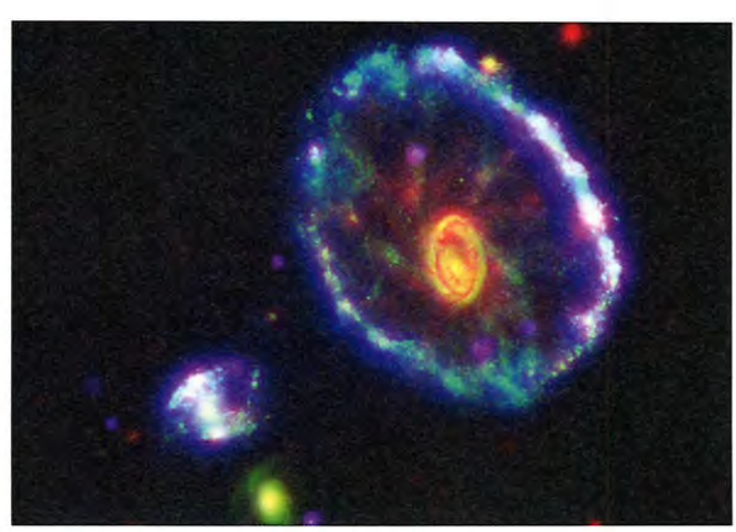
Het oppervlak van Iapetus is half zwart en half wit, wat de Saturnusmaan de bijnaam 'beschilderde maan' oplevert. De vreemde verkleuring zou zijn veroorzaakt door puin dat door andere manen over het oppervlak is verspreid. Als het donkere materiaal door de zon wordt verwarmd, verdampt eventueel aanwezig ijs. Alleen het roetkleurige puin blijft achter en voorkomt dat helder ijs zich op de 'verflaag' zal afzetten.

96 Tarantulanevel

De sliertarmen van de Tarantulanevel bestaan uit gedeeltelijk geïoniseerd waterstofgas dat in een hoogenergetische toestand is gebracht door een supercluster van zware sterren genaamd R136. Het is het grootste stervormingsgebied in de nabije ruimte en er gaan meer dan 800.000 jonge sterren in schuil. Hun energetische activiteit blaast gaten in de omringende wolken, dat geeft de nevel zijn kantachtige structuur.

97 Het Karrenwielstelsel

Dit spiraalstelsel heeft een frontale botsing achter de rug die tot ringen van stervorming heeft geleid vanuit het centrum. Ultraviolet- en röntgenlicht van jonge sterren en turbulente zwarte gaten zijn op deze foto paars en blauw. Het groene licht toont de spaken van het karrenwiel en onthult aanwijzingen over de vorm die het sterrenstelsel vóór de botsing moet hebben gehad.



98 Juwelendoos

De nevel NGC 3603 herbergt de grootste jonge sterrenhopen in de Melkweg. De slechts 20.000 lichtjaar verwijderde open sterrenhoop met in de kern drie superzware Wolf-Rayetsterren wordt door de NASA als 'stellaire juwelendoos' omschreven. De hete, jonge sterren hebben hun stofomhulsel weggeblazen en bombarderen het omringende waterstofgas met ultraviolette straling, waardoor de wolken oplichten.

99 Reusachtige maan

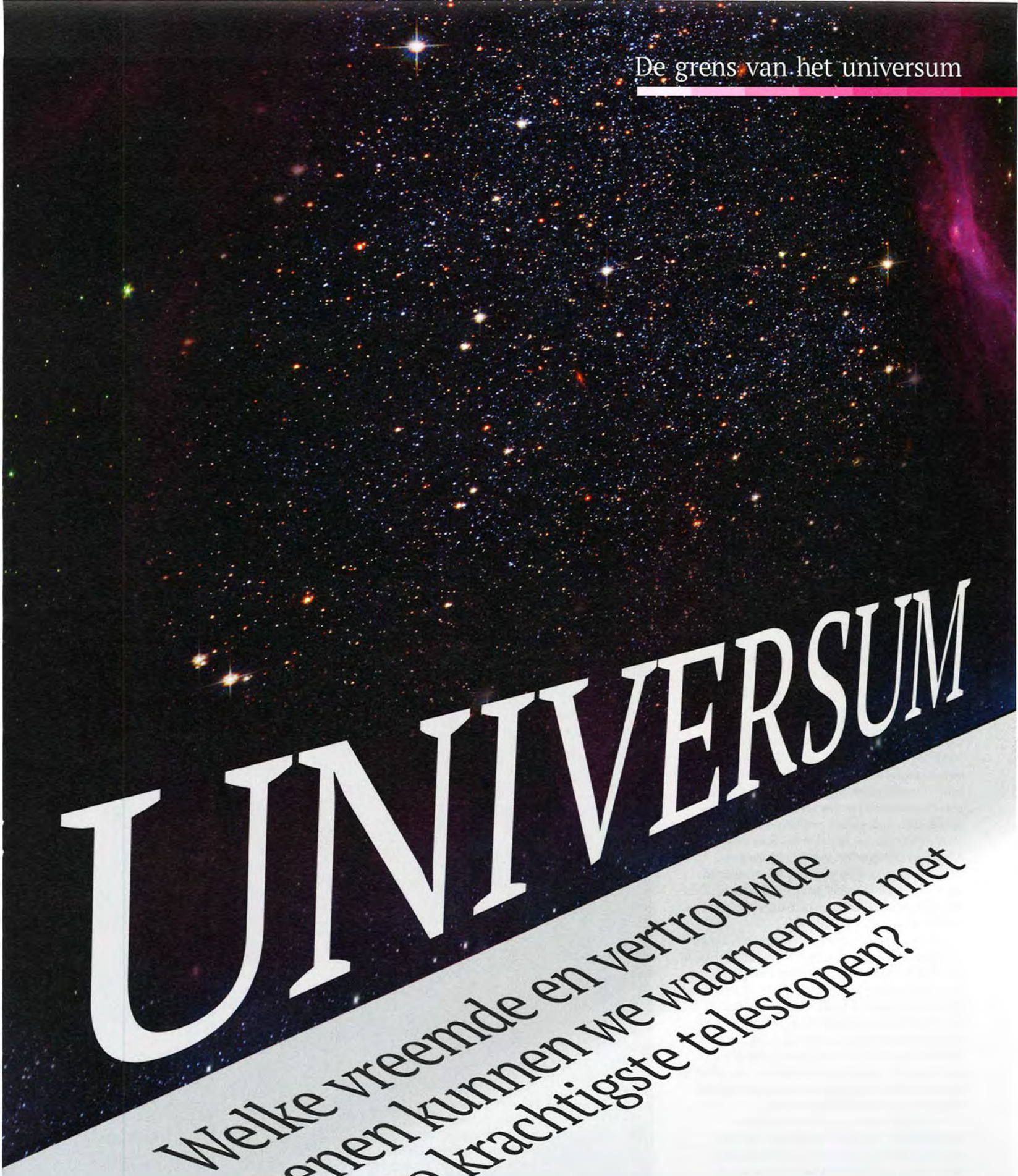
Pluto, lang bekend als negende planeet, werd in 2006 tot 'dwergplaneet' gedegradeerd. Ondanks zijn geringe omvang is Pluto nog steeds een ruimtewonder. Hoewel het uit gesteente en ijs bestaande hemellichaam binnen de Verenigde Staten past, slaagt Pluto erin vijf manen aan zich te binden. De grootste, Charon, heeft bijna de helft van Pluto's omvang en is daarmee relatief gezien de 'grootste' maan in ons zonnestelsel.

© NASA; Adam Evans ; Tyrogthekreeper; ESA; ESO; Tobias Roetsch; Planck Collaboration; Ken Crawford; ESO/F. Courbin et al; Arizona State University; JPL-Caltech; Peter Tuthill & James Lloyd; DLR (German Aerospace Centre); Steveroche; Cassini Imaging Team; SSI;

100 Zesvoudige ster

De dubbelster Castor in het sterrenbeeld Tweelingen is niet wat hij lijkt. Het gaat hier in werkelijkheid om een complex stelsel bestaande uit zes afzonderlijke sterren. Castor A en B vormen een binair stelsel. Rond elk van beide sterren draait echter een dwergster, Castor Aa en Castor Bb. Rond dit stelsel van vier sterren draait op zijn beurt nog een binair stelsel van dwergsterren, bekend onder de naam Castor C.

DE GRENS van het



UNIVERSUM

Welke vreemde en vertrouwde fenomenen kunnen we waarnemen met onze krachtigste telescopen?

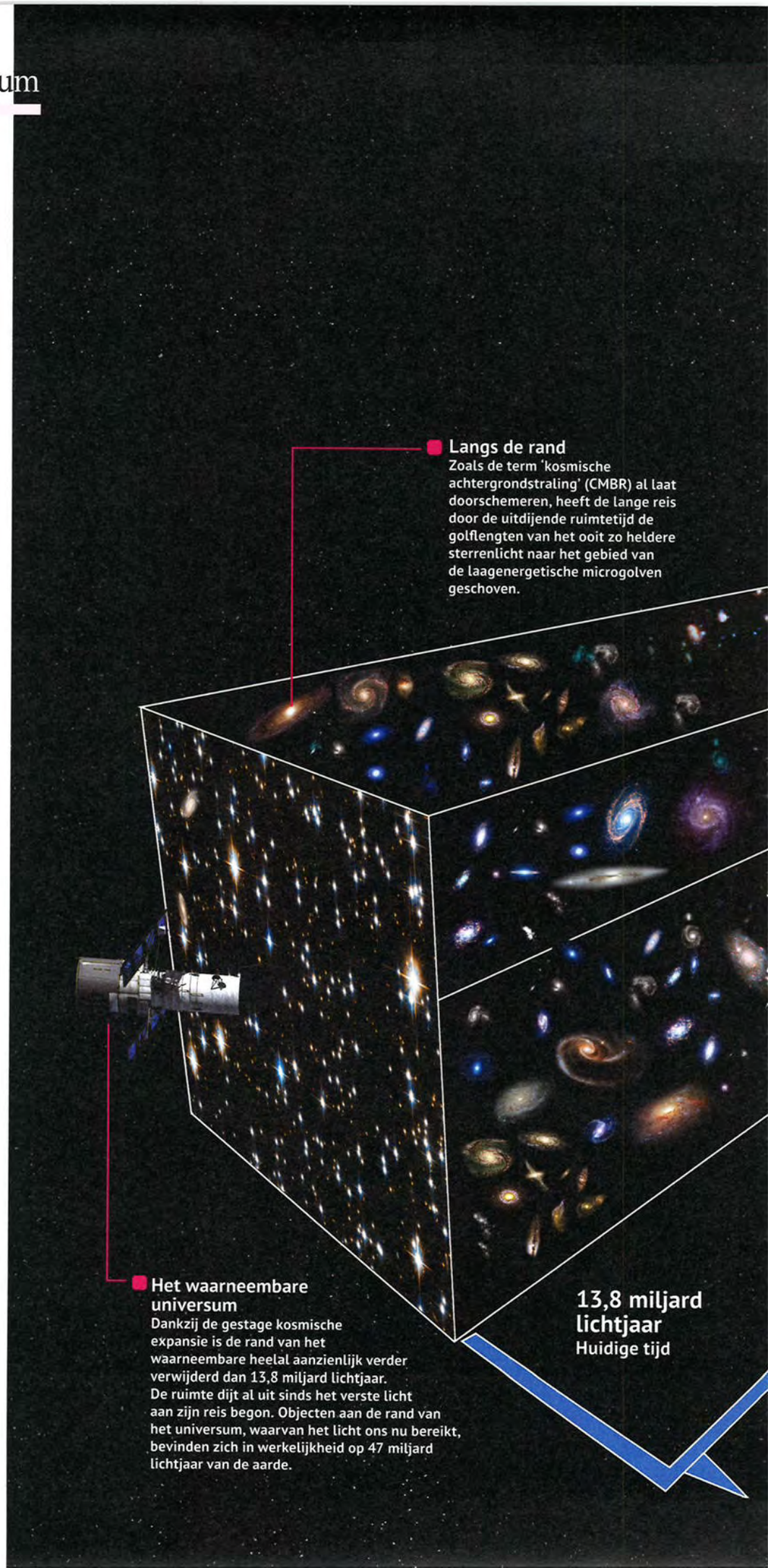
In december 1995 startten astronomen die met de Hubble Space Telescope werkten een opmerkelijk experiment. Ze richtten de krachtige telescoop op een schijnbaar leeg stukje hemel in het sterrenbeeld Ursa Major en maakten een opname met een 'belichtingstijd' van meer dan 100 uur. De resulterende foto onthulde talloze sterrenstelsels en zou later de eerste Hubble Deep Field-afbeelding worden genoemd. De Diep-Field-foto's onthullen de verste uithoeken van het heelal met steeds meer detail.

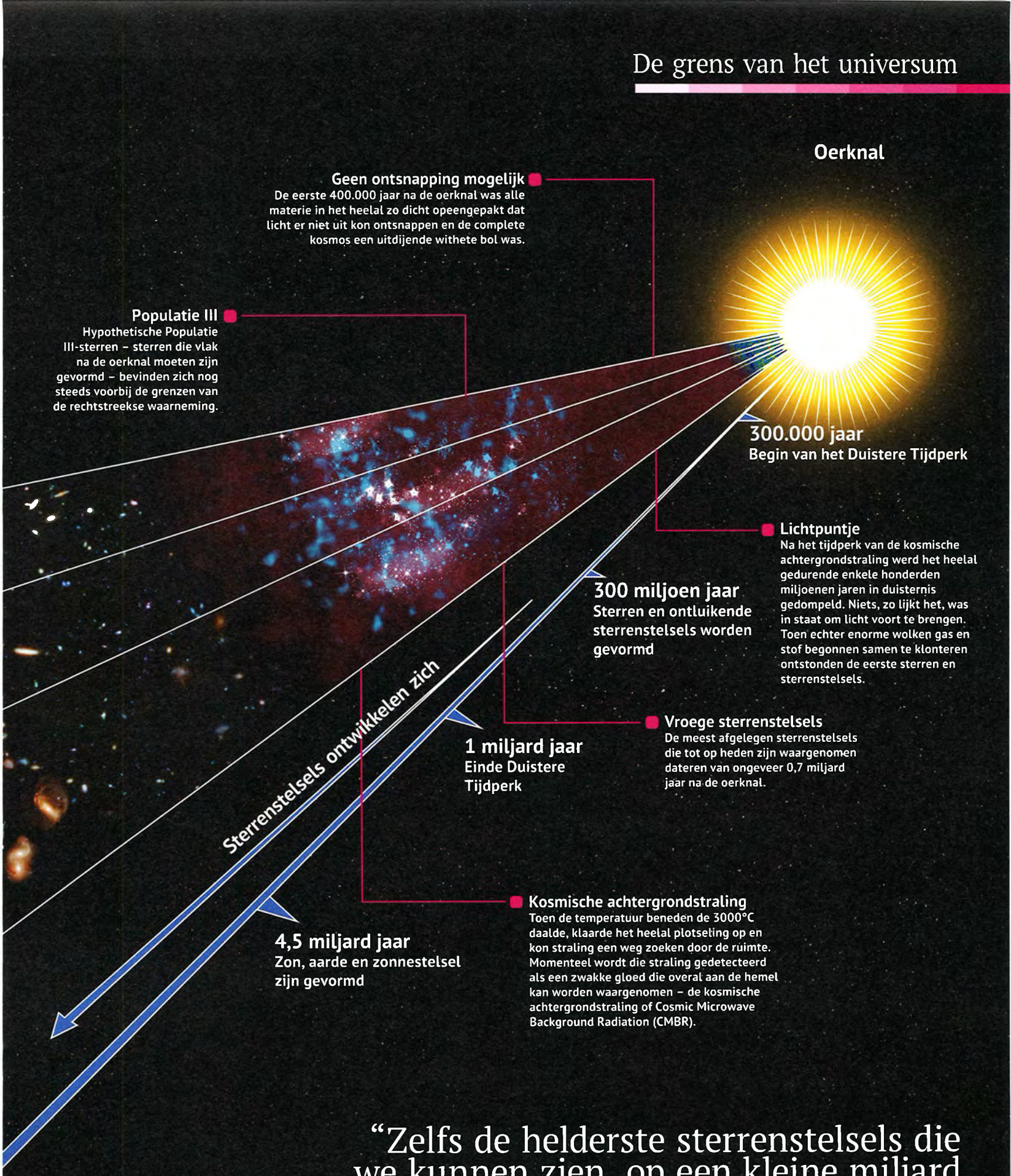
Vanaf de aarde is de kosmos een reusachtige tijdmachine. Niets gaat sneller dan het licht, maar zelfs 300.000 kilometer per seconde valt in het niet bij de immense afstanden tot andere sterren en sterrenstelsels. Als we de ruimte in kijken, kijken we ook terug in de tijd, en omdat de telescopen steeds krachtiger worden, kunnen we steeds verder terugkijken.

Naarmate de telescopen groter worden en steeds langere belichtingstijden mogelijk zijn, zou je verwachten steeds meer sterrenstelsels te zien die zich op een steeds grotere afstanden van de aarde bevinden. De fysica van de kosmos stelt echter een limiet aan onze ambities. Er is overweldigend bewijs voor de theorie die stelt dat het heelal ongeveer 13,8 miljard jaar geleden tijdens de oerknal is ontstaan en sindsdien uitdijt. Er kan daarom geen licht zijn geweest dat zijn reis vóór die tijd is begonnen. Vanuit ons standpunt gezien ligt de aarde in het centrum van een bel van ruimte en tijd die in alle richtingen uitdijt, tot aan een buitengrens waarvandaan het licht ons nog maar net heeft bereikt – het waarneembare universum. Gelukkig zien de meeste astronomen de kosmische tijdmachine niet als een belemmering, maar als een uiterst informatief hulpmiddel. Een van deze astronomen, dr. Daniel Mortlock van het Londense Imperial College, stelt: "De reden dat mensen zoveel energie steken in het vinden van zulke ver verwijderde objecten is niet echt omdat ze ver van ons af staan. Het is eerder omdat we ze kunnen zien zoals ze lang geleden waren. Voor zover we weten is het heelal overal waar we kijken in grote lijnen hetzelfde. Met behulp van deze waarnemingen kunnen we vooral leren begrijpen hoe het heelal er miljarden jaren geleden uitzag. Deze vorm van astronomie kan in bepaalde opzichten met archeologie worden vergeleken."

Zoeken naar deze afgelegen objecten is een enorme uitdaging, aldus professor Steve Finkelstein van de Universiteit van Texas. "Deze sterrenstelsels staan onvoorstelbaar ver weg, dus hoe je het ook wendt of keert, het observeren ervan kost veel tijd. Zelfs de helderste sterrenstelsels die we kunnen zien, op een kleine miljard jaar na de oerknal, zijn erg zwak. De zwakste ster die met het blote oog kan worden waargenomen, is nog steeds 40 miljoen keer helderder dan het helderste afgelegen sterrenstelsel. Daarom hebben we enorme telescopen nodig."

Het uitdijen van de ruimte heeft nóg een belangrijk effect op hoe we afgelegen objecten zien: de golflengten van het waargenomen licht nemen toe – een fenomeen dat bekendstaat als dopplerverschuiving. "Door het uitdijende heelal is al het ultraviolette en zichtbare licht van deze sterrenstelsels naar het infrarood verschoven," vervolgt professor Finkelstein. "Hoewel we een

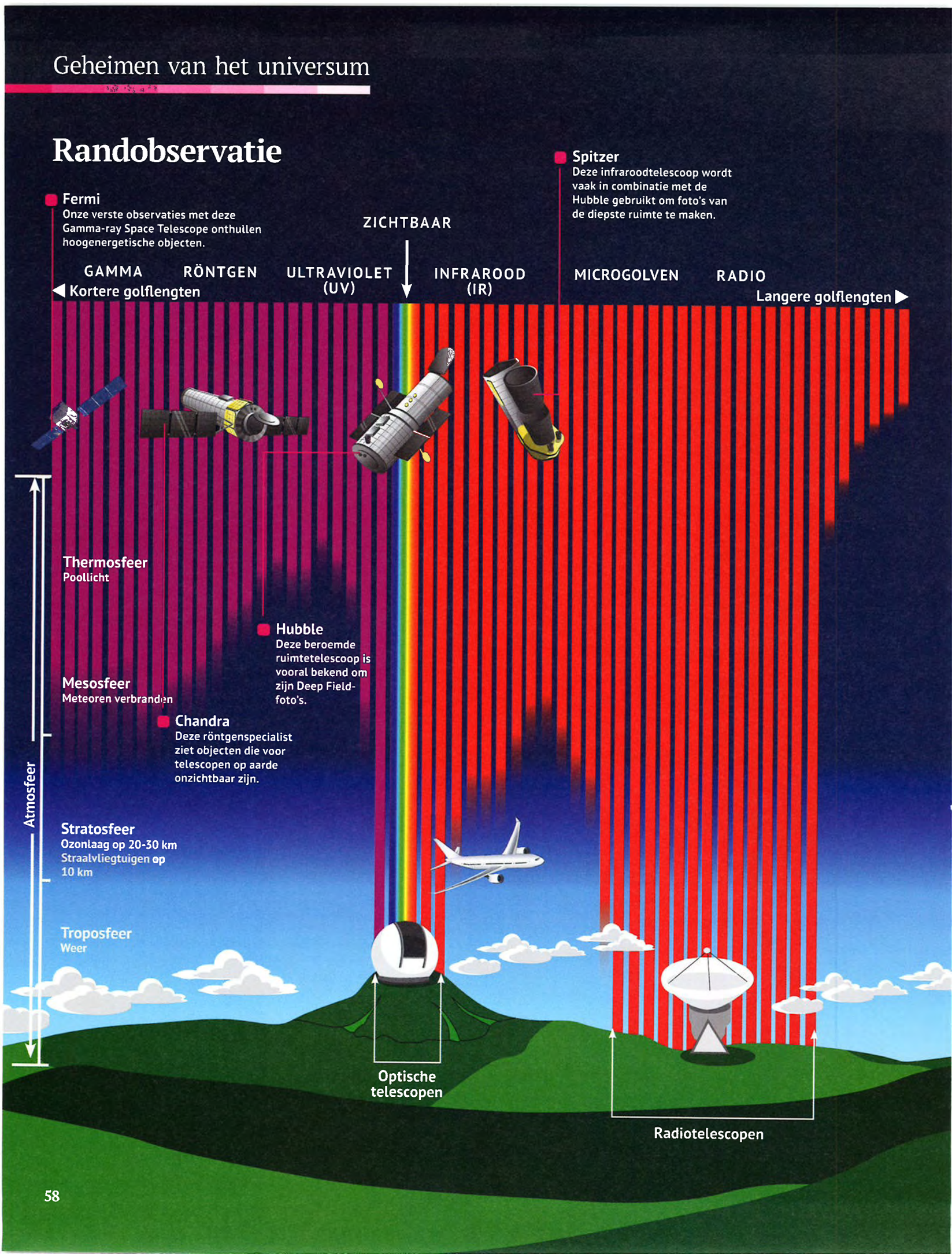


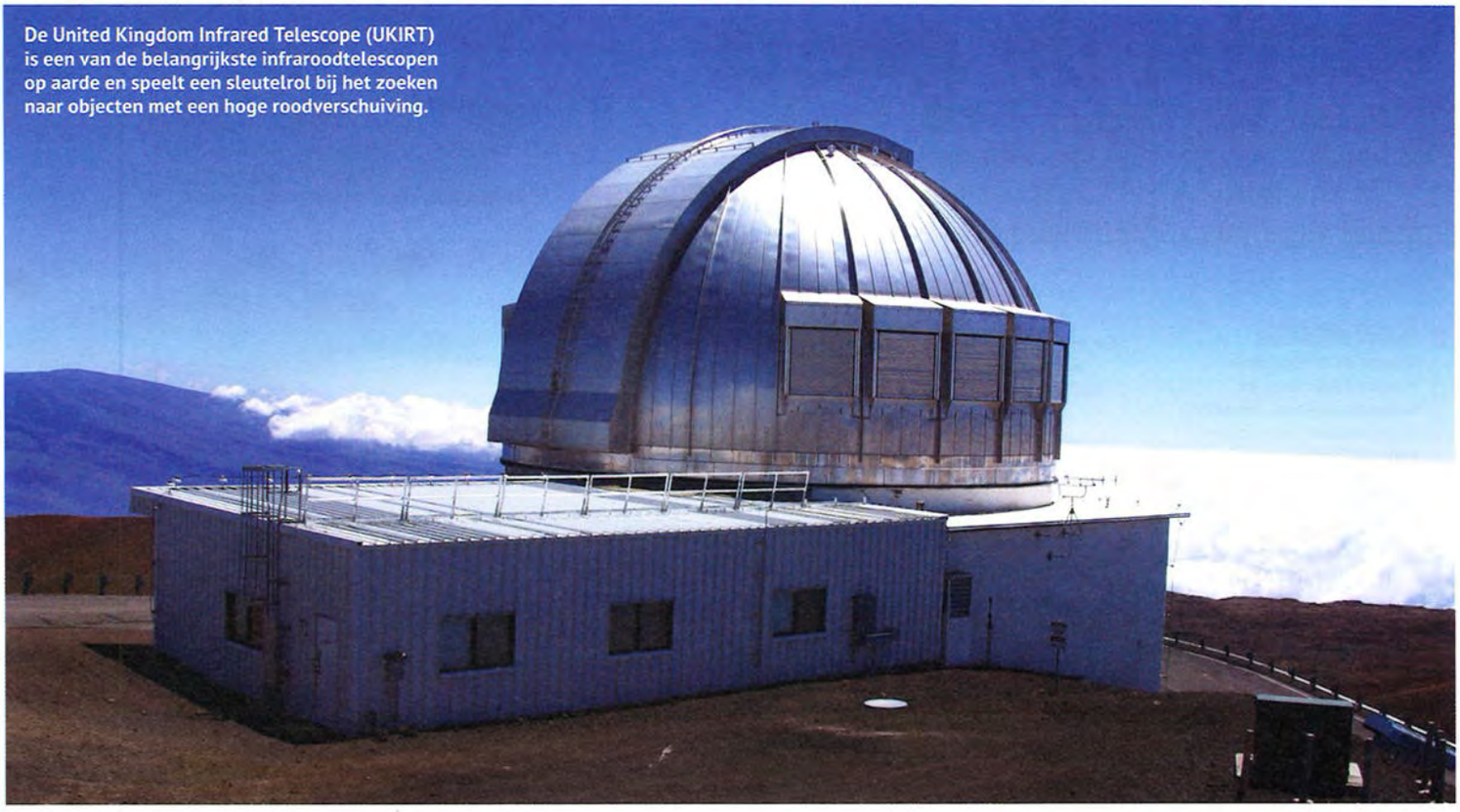


"Zelfs de helderste sterrenstelsels die we kunnen zien, op een kleine miljard jaar na de oerknal, zijn erg zwak."

Professor Steve Finkelstein, University of Texas

Randobservatie





De United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) is een van de belangrijkste infraroodtelescopen op aarde en speelt een sleutelrol bij het zoeken naar objecten met een hoge roodverschuiving.

aantal van deze golflengten vanaf de aarde kunnen waarnemen, staat de technologie nog in de kinderschoenen." Daarbij verspreidt ook de aardatmosfeer infrarood licht, wat de zwakke straling van afgelegen objecten versluiert en observatie onmogelijk maakt.

Het feit dat de straling van afgelegen objecten een roodverschuiving vertoont, is een belangrijke aanwijzing voor astronomen die naar de allereerste sterrenstelsels op zoek zijn. Donkerrode stelsels verschijnen op Hubble-foto's als vlekjes van een paar pixels breed en worden vaak waargenomen in de buurt van zwaartekrachtlenzen. Deze natuurlijke, kosmische zoomlenzen in de vorm van dichterbij gelegen zware sterrenhopen, vervormen en versterken het licht van afgelegen objecten.

In 2013 ontdekten professor Finkelstein en zijn team met behulp van de Hubble het meest afgelegen sterrenstelsel tot dan toe: z8_GND_5296. "Spectrale waarnemingen van het Keck-observatorium op Hawaï wezen op een zeer hoge verwijderingssnelheid in combinatie met een immense afstand, corresponderend met een oorsprong van 700 miljoen jaar na de oerknal," legt Finkelstein uit. "Toen we aan de hand van onze observaties de fysieke eigenschappen van het stelsel probeerden af te leiden, ontdekten we bovendien dat er op extreem hoge snelheid stervorming plaatsvond. De hoeveelheid gas die jaarlijks door z8_GND_5296 in nieuwe sterren wordt omgezet, is vergelijkbaar met 300 zonmassa's. Dat is 150 keer meer dan in de Melkweg."

Onderzoekers vermoedden dat de stervorming in dergelijke afgelegen jonge stelsels in een hoog tempo zou verlopen, maar z8_GND_5296 was nog 30 keer sneller dan verwacht. Finkelsteins team toonde

"Als Populatie III-sterren bestaan, moet hun licht op reis zijn vanaf de uiterste rand van het bekende universum"

aan dat het vroege universum veel vergelijkbare sterrenstelsels huisvest. "Simulaties van het vroege universum bevatten dat soort stelsels niet. Door observatie ontdekken we spectaculaire zaken."

Professor Finkelstein en zijn team richten zich op sterrenstelsels in het vroege universum. Dit zijn echter niet de enige interessante objecten voor astronomen die de rand van de kosmos willen onderzoeken. Zo houden dr. Mortlock en zijn collega's zich bezig met de zoektocht naar quasars. Dit zijn actieve galactische kernen met een reusachtig zwart gat in het centrum dat materie opslokt en de omgeving verhit. Dit resulteert in een intens heldere centrale regio die honderdduizenden keren helderder kan zijn dan zijn moedersterrenstelsel.

"Deze onvoorstelbare lichtkracht is ook de reden dat we quasars van zo'n grote afstand kunnen waarnemen," aldus dr. Mortlock. "Zelfs de verst bekende quasar, ULAS J1120+0641, die we momenteel zien zoals hij was toen het universum nog maar 0,8 miljard jaar oud was, is een relatief

Het dwergstelsel z8_GND_5296 is een minuscule rode vlek in deze afbeelding van ruimtetelescoop Hubble.

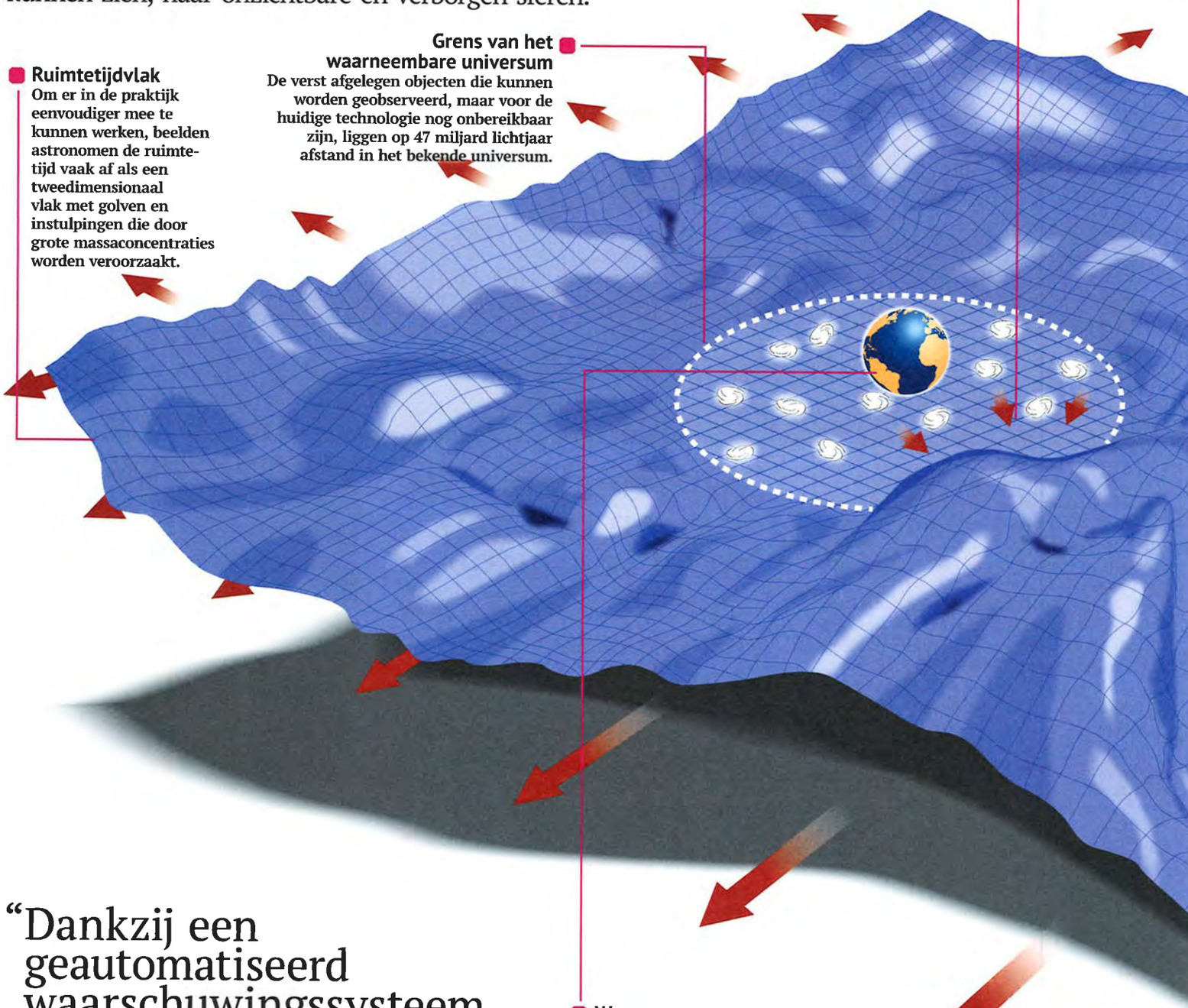
heldere astronomische bron. Hij is ongeveer 10.000 keer helderder dan normale sterrenstelsels op een vergelijkbare afstand."

Dr. Mortlocks team ontdekte het ULAS-object tijdens een onderzoek met behulp van de 3,8-meter United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) op de Mauna Kea op Hawaï. "Het universum is ongeveer acht keer zo groot geworden sinds het licht is uitgezonden dat we nu van ULAS J1120+0641 zien, en hetzelfde geldt voor de golflengte van dat licht. Met andere woorden: het ultraviolette licht van deze quasars wordt nu door ons waargenomen in het infrarode deel van het spectrum."

Dit afgelegen object blijkt verrassend genoeg sterk overeen te komen met andere, relatief nabijgelegen quasars. "We zien een vergelijkbare combinatie van elementen en ruwweg eenzelfde soort spectrum. Dat maakt het relatief eenvoudig om de fysieke eigenschappen van het ULAS-object te bepalen en

Voorbij de grens

De waarneembare kosmos is voor ons begrensd. Dat betekent echter niet dat erbuiten een oneindig niets is. Het universum strekt zich ver uit voorbij hetgeen we kunnen zien, naar onzichtbare en verborgen sferen.



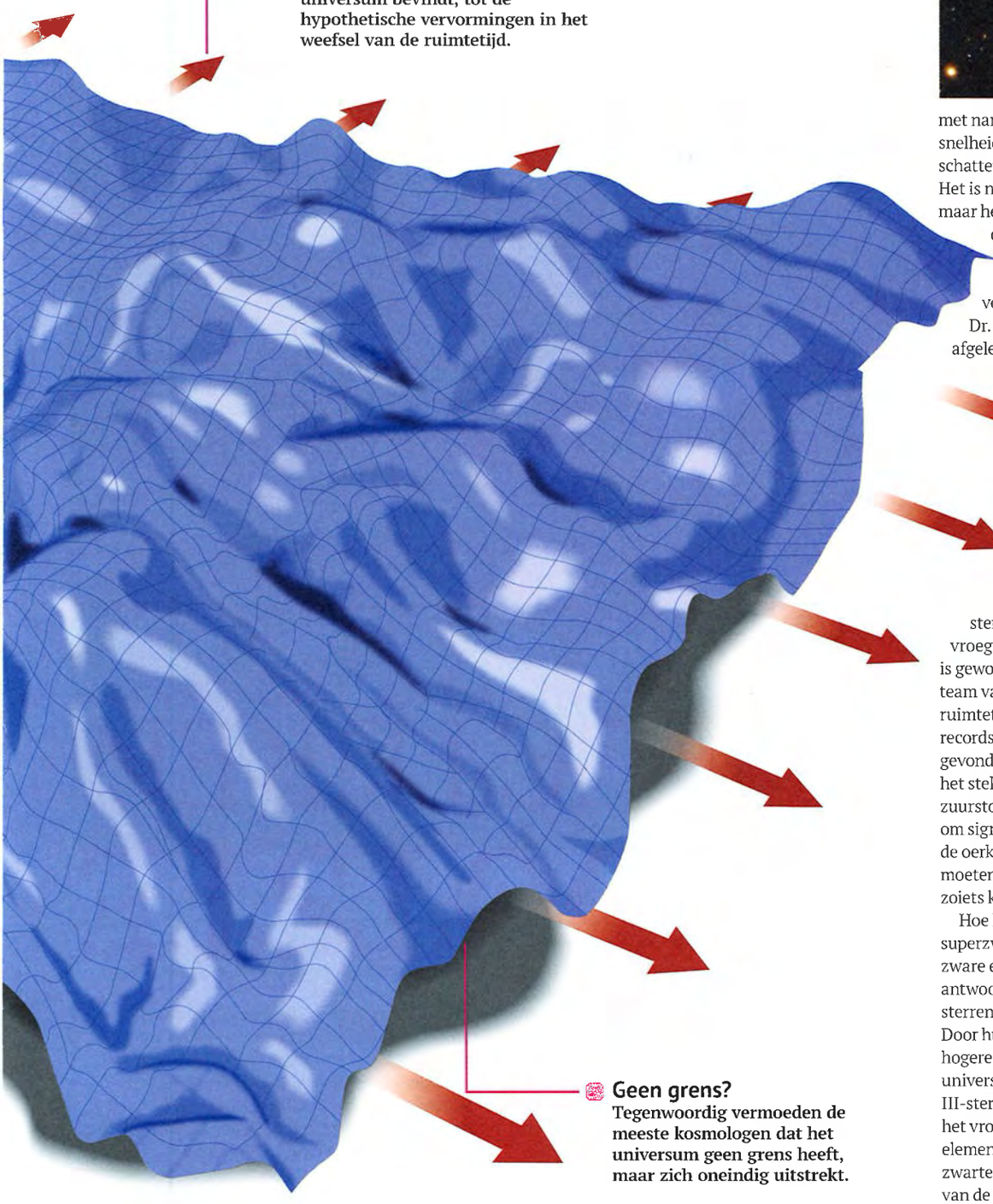
Donkere vloed
De donkere vloed zou een grootschalig bewegingspatroon zijn dat hele clusters sterrenstelsels in een bepaalde richting trekt. De hiervoor verantwoordelijke krachtbron ligt buiten het waarneembare universum.

Grens van het waarneembare universum
De verst afgelegen objecten die kunnen worden geobserveerd, maar voor de huidige technologie nog onbereikbaar zijn, liggen op 47 miljard lichtjaar afstand in het bekende universum.

Ruimtetijdvlak
Om er in de praktijk eenvoudiger mee te kunnen werken, beelden astronomen de ruimtetijd vaak af als een tweedimensionaal vlak met golven en instulpingen die door grote massaconcentraties worden veroorzaakt.

Waarnemer
Omdat de grens van het waarneembare universum afhankelijk is van de tijd waarin het licht een bepaalde locatie bereikt, is die rand voor elke waarnemer anders.

"Dankzij een geautomatiseerd waarschuwingssysteem was Tanvirs team in staat om de gammaflits binnen 25 minuten te observeren."



Bron van de duistere vloed
De oorzaak van de duistere vloed is nog onduidelijk. De mogelijkheden variëren van een immens, dicht supersupercluster van sterrenstelsels dat zich buiten het waarneembare universum bevindt, tot de hypothetische vervormingen in het weefsel van de ruimtetijd.

Geen grens?
Tegenwoordig vermoeden de meeste kosmologen dat het universum geen grens heeft, maar zich oneindig uitstrekt.

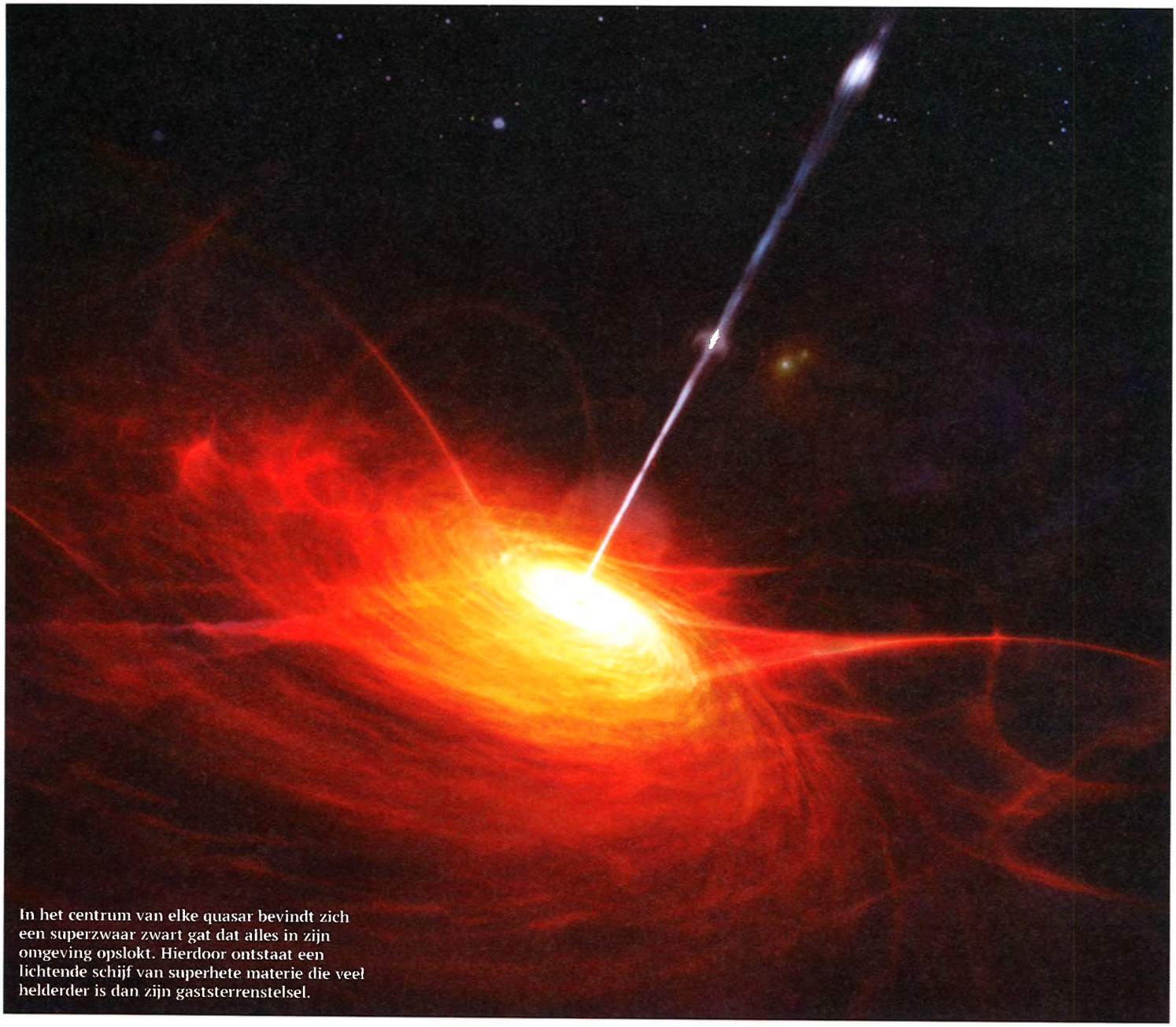
Een lang belichte opname van de diepe ruimte, zoals het *Hubble Deep Field*, onthult talloze sterrenstelsels nabij de rand van het universum.

met name de massa van het zwarte gat. Naar de snelheid van de ronddraaiende gassen te oordelen, schatten we dat die 2 miljard zonmassa's bedraagt. Het is niet het zwaarste zwarte gat dat we kennen, maar het is wel het vroegste superzware zwarte gat dat ooit is gevonden."

De ontdekking van objecten als de ULAS-quasar heeft belangrijke implicaties voor de ideeën over het vroege universum. Dr. Mortlock zegt daarover: "Het bestaan van afgelegen quasars – en met name de superzware zwarte gaten die ze van energie voorzien – is eigenlijk een mysterie. Eenvoudige modellen die de vorming en de aanwas van zwarte gaten beschrijven, impliceren dat dergelijke monsters niet zo kort na de oerknal konden voorkomen. Het is geen verrassing dat we ze miljarden jaren later tegenkomen, maar 0,8 miljard jaar lijkt niet realistisch."

Opmerkelijk genoeg lijken ook sterrenstelsels als z8_GND_5296 te wijzen op een vroeg universum dat aanzienlijk sneller volwassen is geworden dan aanvankelijk werd gedacht. Het team van professor Finkelstein werkte met de ruimtetelescoop Spitzer om het spectrum van hun recordsterrenstelsel te bepalen. Daarbij werd bewijs gevonden voor grote hoeveelheden zuurstof. "Hoewel het stelsel minder zware elementen (koolstof, zuurstof, ijzer) bevat dan onze melkweg, gaat het om significante hoeveelheden. De korte afstand tot de oerknal is daarbij verrassend. Zware elementen moeten in vroege sterrengeneraties zijn ontstaan en zoiets kost tijd."

Hoe kunnen dan zo kort na de oerknal al superzware zwarte gaten en grote hoeveelheden zware elementen zijn gevormd? Een mogelijk antwoord vinden we bij de hypothetische vroege sterrengeneraties met een korte levensduur. Door hun eenvoudige samenstelling was een veel hogere stermassa mogelijk dan we in het huidige universum zien. Deze zogenaamde Populatie III-sterren (1000 zonmassa's of meer) zouden het vroege universum in hoog tempo met zware elementen hebben verrijkt en bovendien enorme zwarte gaten hebben achtergelaten die de kiem van de eerste sterrenstelsels zouden hebben gevormd. Als Populatie III-sterren bestaan, zou hun licht worden uitgezonden vanaf de rand van het waargenomen universum en een veel grotere



In het centrum van elke quasar bevindt zich een superzwaar zwart gat dat alles in zijn omgeving opslokt. Hierdoor ontstaat een lichtende schijf van superhete materie die veel helderder is dan zijn gaststerrenstelsel.

roodverschuiving vertonen dan zelfs de meest afgelegen bekende sterrenstelsels. Met de huidige technologie kunnen we ze niet waarnemen, maar ze staan boven aan het prioriteitenlijstje van het team van de James Webb Space Telescope (JWST), het enorme infraroodobservatorium dat eind 2018 wordt gelanceerd.

Een andere belangrijke klasse van objecten aan de rand van het bekende universum behoort misschien wel tot de meest ongrijpbare van allemaal – de intense, maar kortdurende uitbarstingen van elektromagnetische energie die gammaflitsen (GRB's) worden genoemd. GRB's zijn ontdekt in de jaren 1960 en hebben decennialang tot de wildste speculaties geleid. "Het licht dat in dertig seconden wordt uitgezonden, is equivalent aan de lichtopbrengst van de zon tijdens zijn volledige 10 miljard jaar durende bestaan," aldus professor Derek Fox van Penn State University.

GRB's lijken binnen verschillende, duidelijk afgebakende categorieën te vallen die gebaseerd zijn op de kracht en de duur van de flits. Een belangrijke groep, de zogenoemde long duration GRB's, waarvan de flits langer dan twee seconden duurt, zou tijdens de ineenstorting van zware sterren worden geproduceerd.

Nial Tanvir van de University of Leicester legt het als volgt uit: "Het lijkt erop dat sommige sterren van 30-40 zonmassa's die aan het einde van hun leven komen, instorten als gevolg van de zwaartekracht. Daarbij stoten ze een extreem krachtige plasma-jet uit. We denken dat deze energie uiteindelijk wordt omgezet in elektromagnetische straling, met name energierijke gammastraling, maar ook minder krachtige, zoals röntgenstraling, optisch licht, infraroodlicht en radiogolven. Als de jet in de richting van de aarde wijst, resulteert dit in een extreem heldere beginflits, gevolgd door een langzaam uitstervende nagloed.'

Tanvir en Fox hebben enkele van de meest afgelegen GRB's ontdekt die tot op heden zijn gevonden. Ze deden dit aan de hand van straling die tijdens de Swift Gamma-Ray Burst-missie was geregistreerd. "Satellieten zoals de Swift communiceren nieuwe ontdekkingen automatisch naar de aarde, waar de informatie zonder vertraging naar waarnemers wordt doorgestuurd. Op zo'n moment moet snel worden besloten hoe interessant een bepaalde gammaflits is en welke telescopen direct tot observatie kunnen overgaan," legt professor Tanvir uit.

De meest afgelegen gammaflits staat bekend als GRB 090423, een naam die verwijst naar de ontdekkingsdatum: 23 april 2009. Dankzij een geautomatiseerd waarschuwingssysteem was Tanvirs team in staat om de flits binnen 25 minuten te observeren met behulp van de UKIRT. Het team van Fox voegde al snel zijn eigen observaties toe van diens grotere buurman, de 8,2-meter Gemini North Telescope. "Van de meest afgelegen gammaflitsen valt uit de data nauwelijks iets op te maken over de afstand. Het is dan ook cruciaal om zo snel mogelijk zowel optische als infraroodwaarnemingen te doen, het liefst binnen een uur."

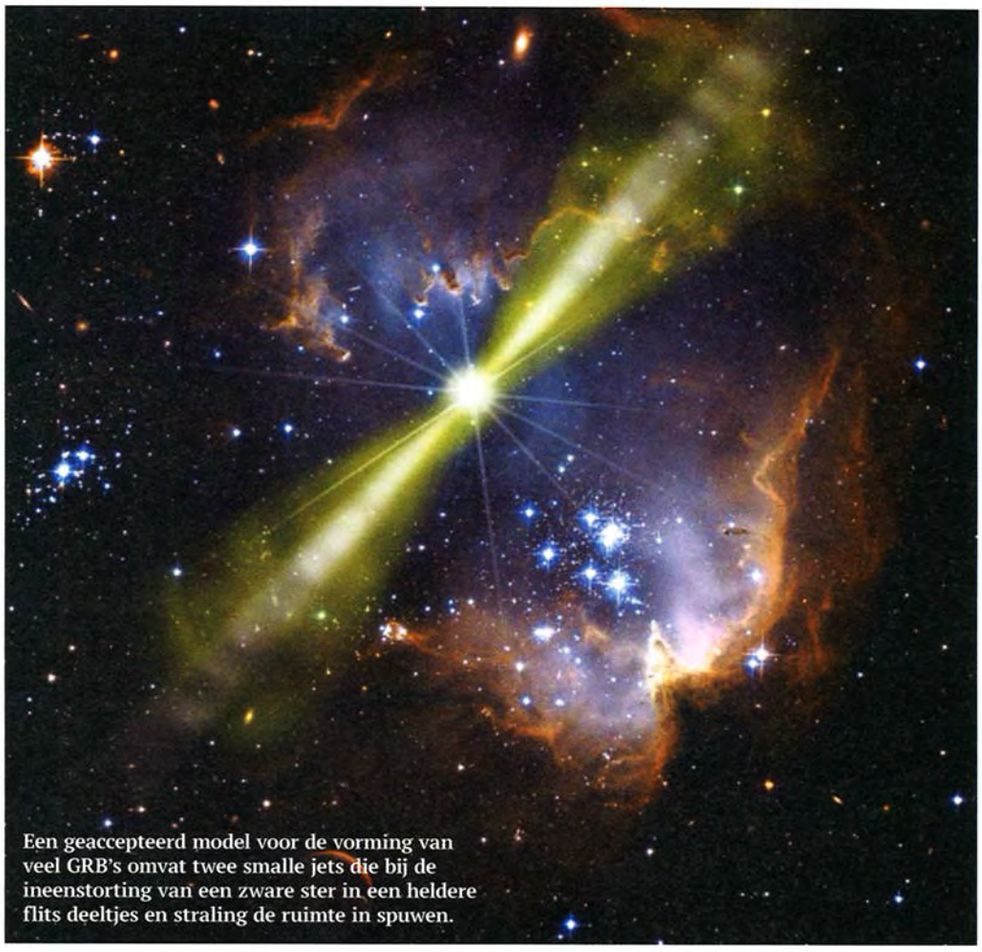
Waarom zowel optisch als infrarood? Professor Tanvir vertelt: "Neutraal waterstof, dat overal in het universum voorkomt, is heel effectief in het absorberen van ultraviolet licht. Voor afgelegen explosies geldt dat de golflengte via het optische spectrum helemaal naar het infrarood wordt verschoven. Een afgelegen gammaflits is dus niet via een optische telescoop te zien, maar wel in het infrarood. Aan de hand van de roodverschuiving kunnen we berekenen dat GRB 090423 zich op 13,1 miljard lichtjaar bevindt. Met andere woorden: de GRB was een ster die pas 630 miljoen jaar na de oerknal ineen is gestort."

Enkele dagen later werd een nieuwe flits, GRB 090429B, nog sneller waargenomen. "Het gebeurde om half twee 's nachts," herinnert professor Fox zich. "Mijn team was met GRB-werk bezig via de Gemini North Telescope op de Mauna Kea. Plotseling zagen we dat Swift een röntgen-nagloed had gevonden, maar er was geen optische of uv-emissie. We moesten dus in het rood en het nabije infrarood gaan zoeken naar een flits met een hoge roodverschuiving. Samen met professor Nial Tanvir en zijn collega's vonden we een relatief heldere nagloed in het nabije infrarood – zonder optisch licht. Bingo! De volgende nacht hebben we meer beeldmateriaal opgevraagd. Dat hebben we gebruikt om het vervagen van de door ons waargenomen bron te kunnen bevestigen. Het ging inderdaad om de nagloed van de flits. We zijn er alleen niet in geslaagd om het spectrum te bepalen."

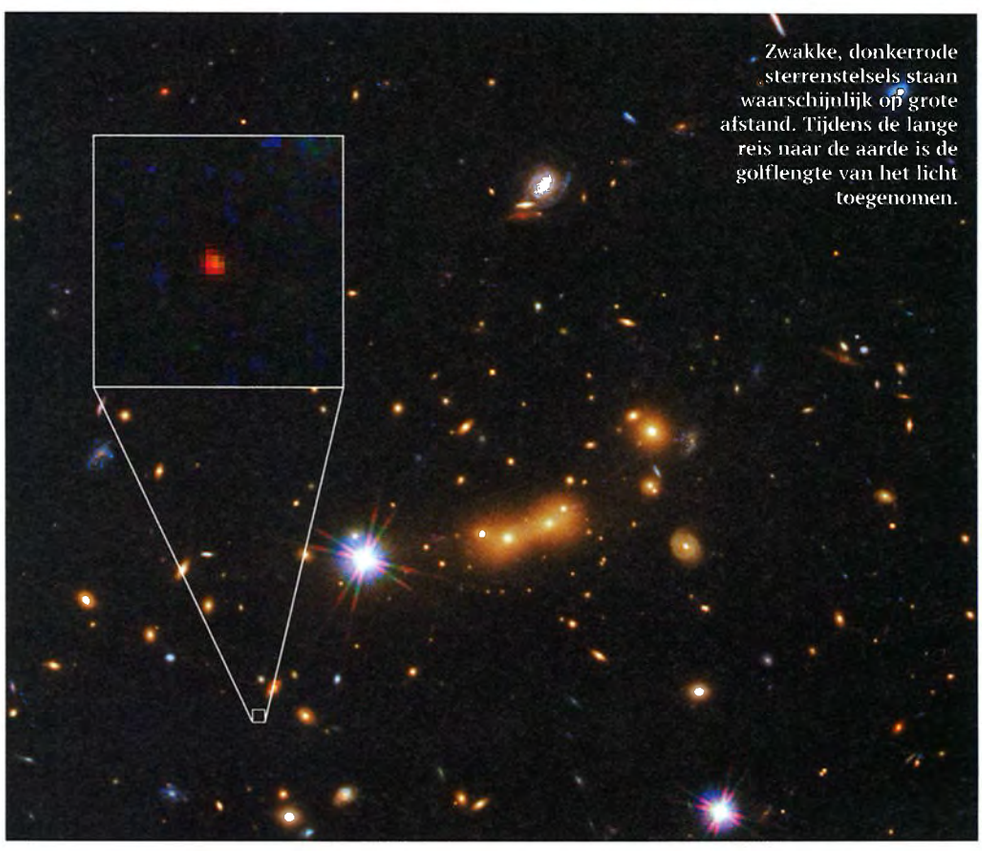
Als gevolg daarvan waren schattingen van de afstand van GRB 090429B uiterst onnauwkeurig. Het leek er echter op dat de roodverschuiving nog sterker was, wat impliceerde dat de ster ongeveer 100 miljoen jaar eerder was geëxplodeerd dan GRB 090423.

"Zelfs beperkte informatie kan belangrijke gevolgen hebben. Het feit dat de Hubble tot nu toe geen van de GRB-gaststelsels met een vergelijkbare roodverschuiving heeft gevonden, wijst erop dat vroege stervorming voor het grootste deel plaatsvindt in sterrenstelsels die zelfs voor de Hubble te klein en te zwak zijn om te worden waargenomen."

De komende jaren zullen ongetwijfeld interessant worden voor astronomen die de rand van het waarneembare universum onderzoeken. Momenteel lijken deze grensregionen misschien nog op een oude zeekaart waarin mysterieuze monsters zijn getekend waarvan zelfs het bestaan onduidelijk is. Na de lancering van de JWST zullen echter de vroege sterrenstelsels en misschien zelfs de allereerste Populatie III-sterren in beeld komen. Dat zal ons een uniek beeld geven van de diepe ruimte en een cruciale blik op het ontstaan van de kosmos.

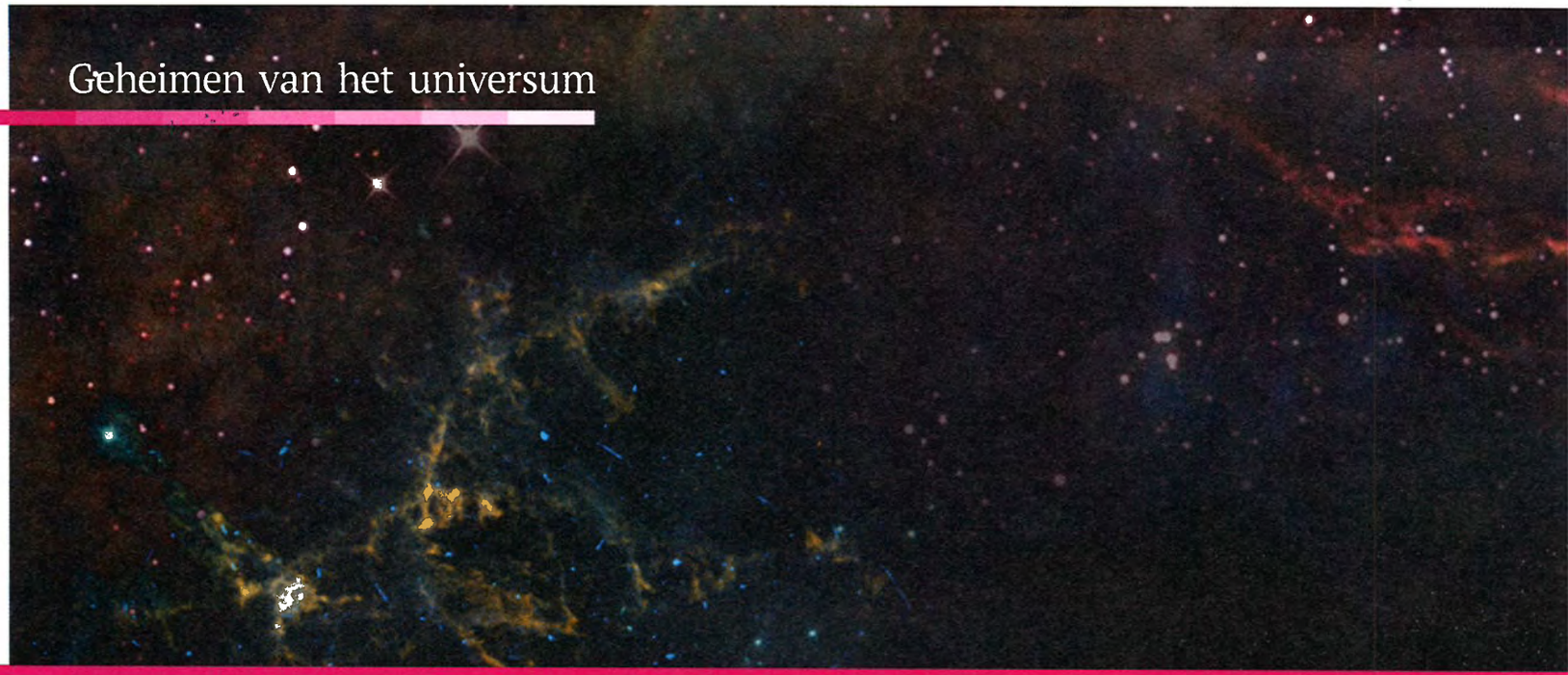


Een geaccepteerd model voor de vorming van veel GRB's omvat twee smalle jets die bij de ineenstorting van een zware ster in een heldere flits deeltjes en straling de ruimte in spuwen.

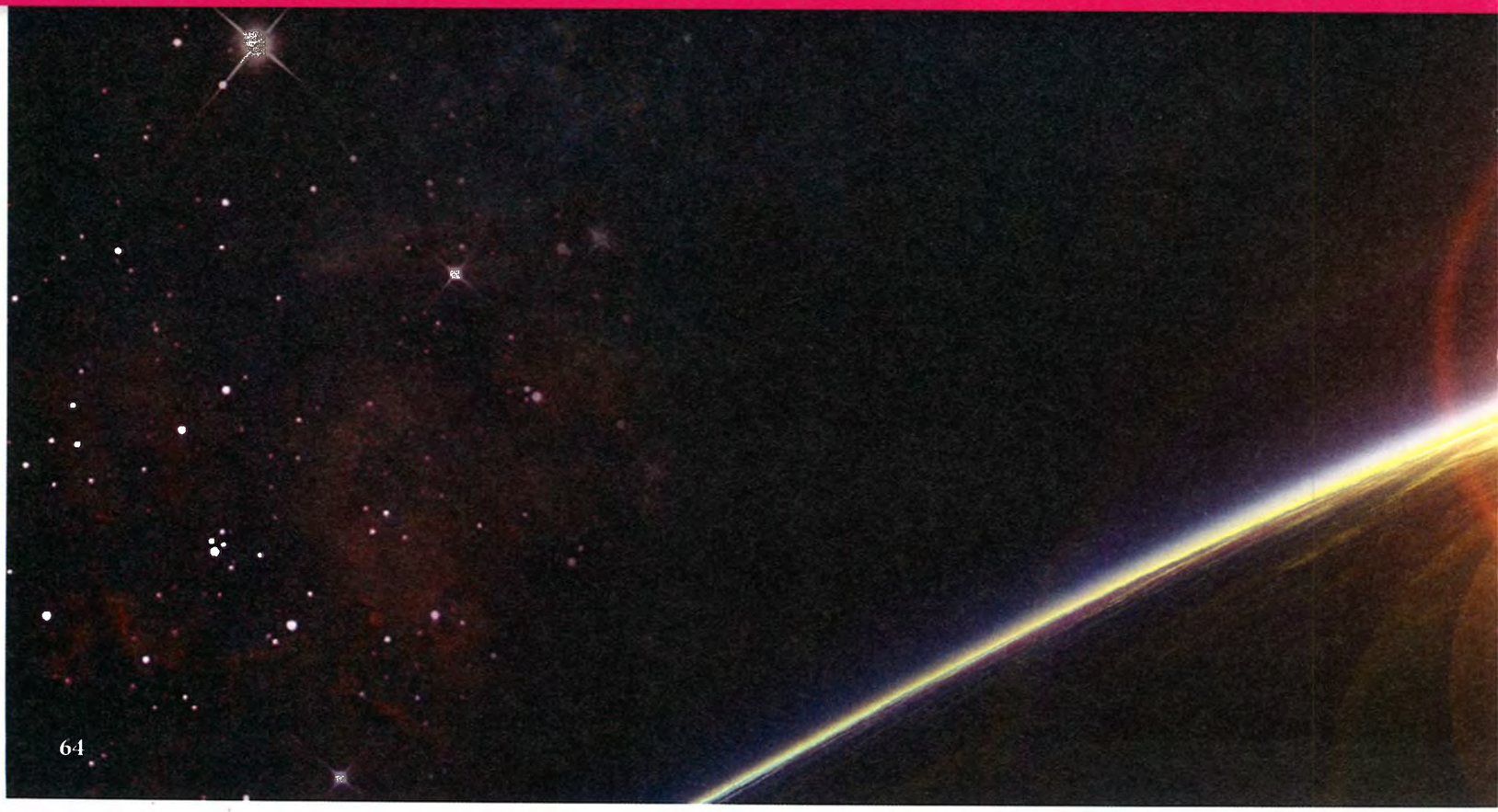


Zwakke, donkerrode sterrenstelsels staan waarschijnlijk op grote afstand. Tijdens de lange reis naar de aarde is de golflengte van het licht toegenomen.

© UKIRT/JAC; Hubble; Ian Moores; NASA ESA en M. Postman en D. Coe (Space Telescope Science Institute) en het CLASH-team



DE 10 GROOTSTE RUIMTESTRUCTUREN

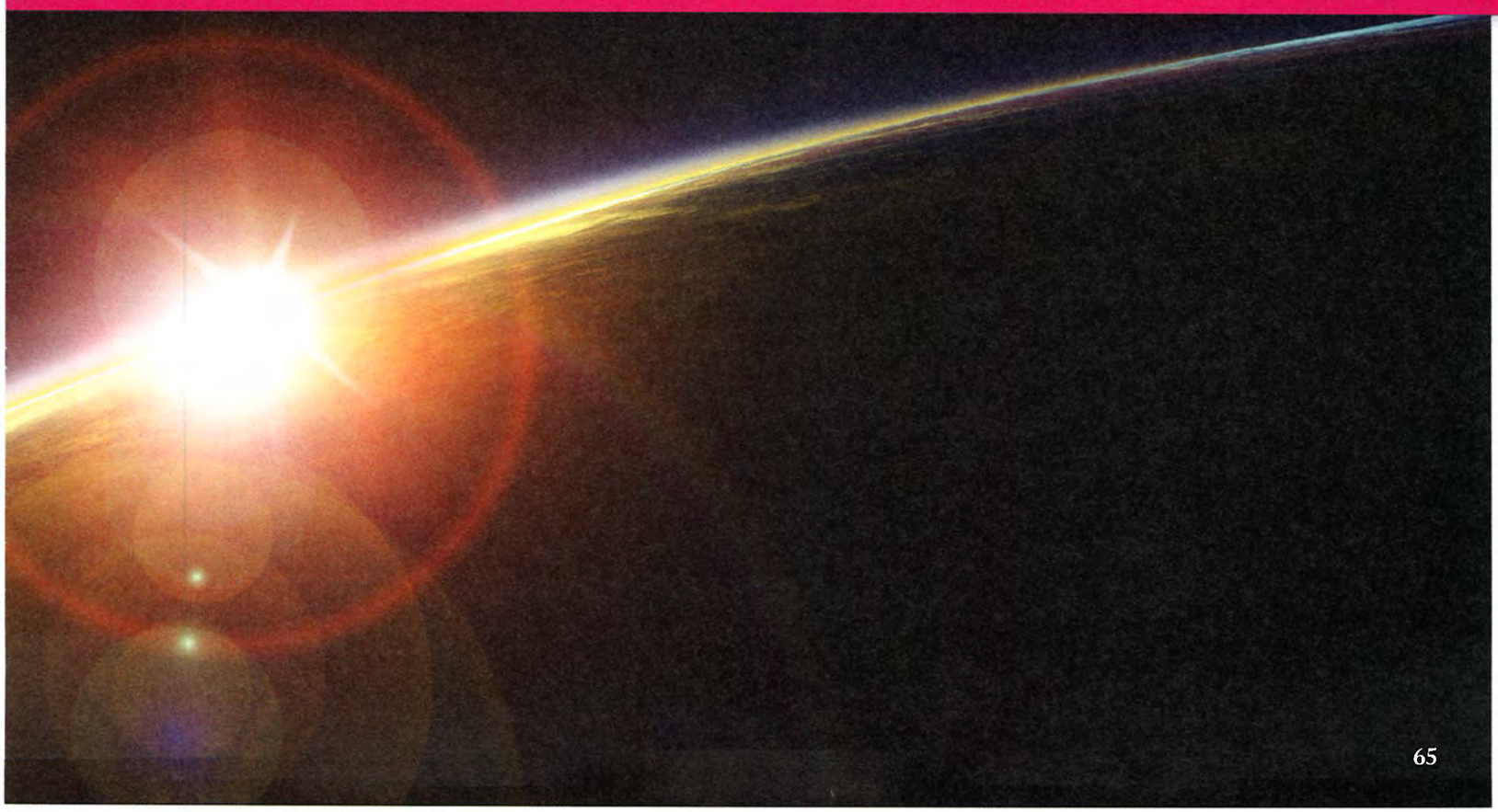


Maak een reis door de immense uitgestrektheid van de ruimte en ontdek gigantische planetoïden, reusachtige sterren, uitgestrekte sterrenstelsels en de grootste structuur in de kosmos ...

Het grootste zichtbare 'ding' in de ruimte is het kosmische web van het waarneembare heelal: de driedimensionale configuratie van galactische structuren die we met onze instrumenten kunnen waarnemen. Onlangs is een nauwkeurige schatting gemaakt van de omvang. Hiervoor zijn data gebruikt van de Planckruimtemissie. Die missie moet de hemel volledig in kaart brengen. Door het meten van de kosmische achtergrondstraling – de nagloed van de oerknal – hebben wetenschappers kunnen vaststellen dat de verst afgelegen objecten die we vanaf de aarde kunnen zien, zich op een afstand van ongeveer 13,8 miljard lichtjaar bevinden. Maar tot hoe ver daarbuiten strekt het universum zich eigenlijk uit?

De zaak wordt er niet duidelijker op als je de grens nadert van wat we kunnen waarnemen en we het over de feitelijke grootte van het universum gaan hebben. De algemene wetenschappelijke consensus is dat de doorsnede van het universum ongeveer 93 miljard lichtjaar bedraagt. Omdat het universum sinds de oerknal onafgebroken uitdijt, en vanwege de eindige lichtsnelheid, zijn we echter niet in staat om licht te zien van objecten voorbij een bepaald punt. Sommige wetenschappers stellen dat het heelal wel honderd biljard keer groter is dan datgene wat we vanaf de aarde kunnen waarnemen. Andere zeggen dat het juist kleiner is dan het zichtbare universum omdat het licht van de verst verwijderde sterrenstelsels een duplicaat zou zijn van dat van dichterbij gelegen stelsels.

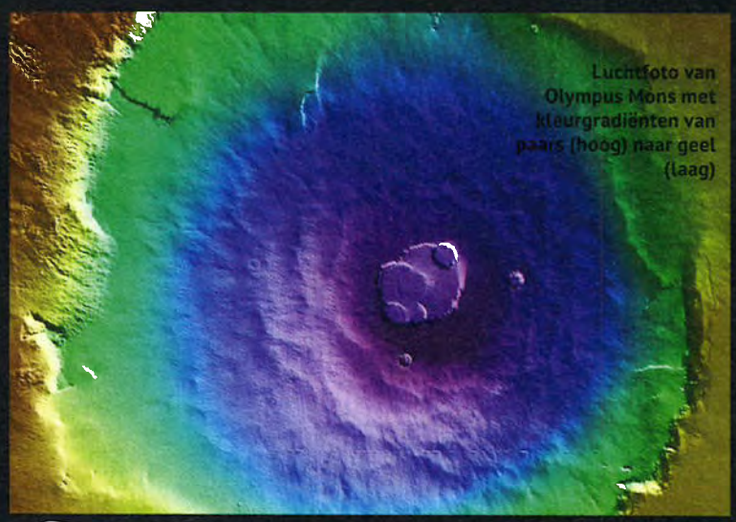
Binnen de waarneembare bovengrens van ons hemelgewelf bevinden zich echter veel objecten waarvan de omvang heel goed is vast te stellen; objecten die dermate groot zijn dat ons hoofd gaat tollen als we ze vergelijken met de planeten, sterren en zelfs sterrenstelsels waarbij we ons wel iets kunnen voorstellen. Hier volgen tien van de grootste structuren in het universum.



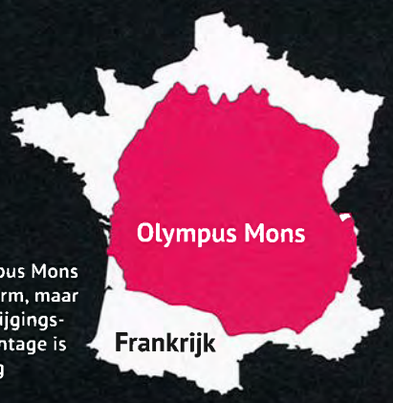
GROOTSTE VULKAAN
Olympus Mons

Laten we relatief klein beginnen met de grootste vulkaan in ons zonnestelsel. Olympus Mons ligt op Mars in een gebied dat Tharsis Montes heet. De vulkaan heeft een top van 25 kilometer en een doorsnede van 624 kilometer. De diameter van de krater bedraagt 80 kilometer. Olympus Mons steekt ver boven de hoogste bergen op aarde uit, zoals de Mount Everest (8,8 kilometer) en de Mauna Kea (10 kilometer, gemeten vanaf de zeebodem). Onze grootste vulkanen vallen erbij in het niet. Het volume van Olympus Mons is 100 keer dat van dede Mauna Loa-vulkaan op Hawaï keer 100.

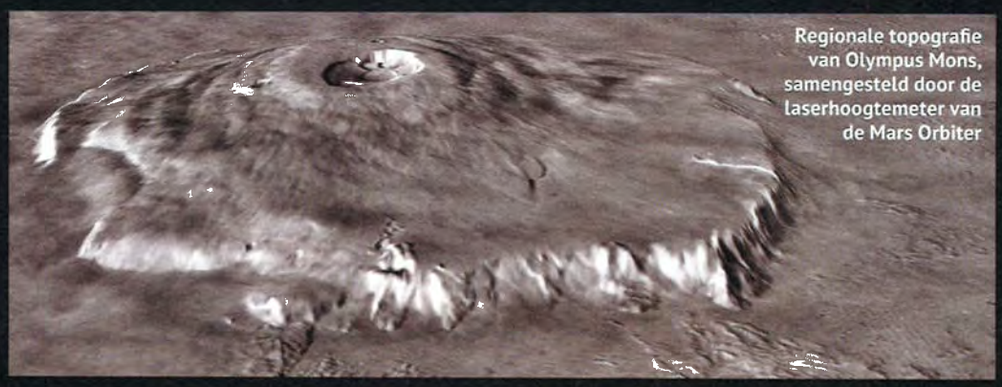
In de vulkaanregio Tharsis Montes vinden we enkele van de grootste vulkanen in ons zonnestelsel, waaronder Ascraeus Mons en Elysium Mons, respectievelijk 14,9 en 12,6 kilometer hoog. Het feit dat Mars zo veel grote vulkanen telt, heeft te maken met de geologie en de zwaartekracht van de planeet. Op aarde schuiven tektonische platen onafgebroken over elkaar heen en onder elkaar door. Daardoor wordt de lava over een uitgestrekt gebied naar een groot aantal vulkanen verplaatst. Op Mars beweegt de planeetkorst op een andere manier. De lava verzamelt zich daardoor op één plek. Vanwege de lagere zwaartekracht op Mars en het vaker voorkomen van uitbarstingen, duren de lavastromen bovendien veel langer.



Luchtfoto van Olympus Mons met kleurgradiënten van paars (hoog) naar geel (laag)



Olympus Mons is enorm, maar het stijgingspercentage is gering



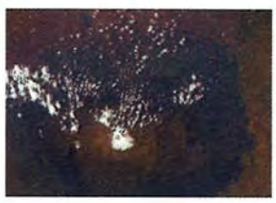
Regionale topografie van Olympus Mons, samengesteld door de laserhoogtemeter van de Mars Orbiter

De 5 hoogste bergtoppen op aarde

Mount Everest
(8848 m)
De hoogste berg op aarde maakt deel uit van het Himalayagebergte in Azië.

Aconcagua
(6960 m)
De hoogste berg in Zuid-Amerika is bijna een kilometer lager dan de Everest.

Denali
(6194 m)
De Denali in Alaska is de hoogste berg die van de voet tot aan de top boven zeeniveau ligt.



Kilimanjaro
(5895 m)
Deze Afrikaanse berg heeft drie vulkanen: twee uitgedoofde en een slapende.

Elbroes
(5642 m)
De hoogste Russische berg is de slapende vulkaan Elbroes in de Kaukasus.

GROOTSTE PLANEET WASP-17b

WASP-17b is met twee keer de omvang van Jupiter een reusachtige planeet. Hij draait op 1000 lichtjaar van de aarde rond een geelwitte dwergster die vergelijkbaar is met onze zon. WASP-17b wordt een 'hete Jupiter' genoemd omdat zijn omloopbaan extreem dicht bij zijn moederster ligt. De dichtheid is met ongeveer de helft van die van Jupiter een van de laagst bekende planeetdichtheden. Men vermoedt dat de verzengende hitte en de getijdekrachten van de nabijgelegen ster verantwoordelijk zijn voor de enorme omvang en de lage dichtheid.

De diameter van WASP-17b wordt geschat op ruim 136.000 kilometer, wat de planeet groter maakt dan sommige kleine sterren uit de hoofdreeks, zoals OGLE-TR-122B, een kleine ster met een massa die maar net voldoende is om waterstoffusie mogelijk te maken. OGLE is maar half zo groot als de reusachtige exoplaneet, maar zijn dichtheid is 50 keer groter.

WASP-17b is ontdekt in 2009 en hoewel de hete Jupiter door zijn omvang al een fascinerend object is, geldt zijn omloopbaan als uniek in het stelsel. De richting ervan is namelijk tegengesteld aan die van zijn moederster. Zo'n retrograde omloopbaan kan veroorzaakt zijn door een ontmoeting met een ander object, dat de planeet een slinger in de tegenovergestelde richting heeft gegeven.

GROOTSTE PLANETOÏDE Pallas

Ultravioletafbeelding van Pallas, gemaakt door de Hubble

Door de omvang van de planetoïden en de beperkingen van de huidige observatietechnologie kunnen we alleen spreken over objecten die zich in ons eigen zonnestelsel bevinden. Bovendien is het een definitiekwestie: met een diameter van 950 kilometer en ongeveer een derde van de totale massa van de planetoïdengordel, gold Ceres altijd als het grootste object in die regio. In 2006 is Ceres echter tot 'dwergplaneet' bevorderd. Als gevolg daarvan is Pallas tegenwoordig de grootste bekende planetoïde.

Met een gemiddelde diameter van 544 kilometer is Pallas allesbehalve klein. De eerstvolgende rivaal voor de toppositie is Vesta, die een geringere omvang heeft dan Pallas, maar wel zwaarder is. Samen zijn ze goed voor ongeveer 16 procent van de totale massa van de planetoïdengordel. Men dacht ooit dat beide objecten lang geleden deel uitmaakten van een veel grotere, 'verdwenen' planeet die ooit tussen Mars en Jupiter stond en op een gegeven moment is vernietigd. Die theorie is sindsdien ontkracht en tegenwoordig weten we dat Ceres, Pallas en hun metgezellen samen met de rest van de planetoïdengordel de restanten vormen van een protoplanetaire schijf die verstoord werd door de zwaartekracht van Jupiter en er daardoor niet in slaagde planeten te vormen.

Pallas zou gemakkelijk in de Vredefortkrater in Zuid-Afrika passen – het grootste inslagbekken op aarde met een diameter van 300 kilometer. De planetoïde is ruim 30 keer groter dan de meteoriet die 1,8 miljard jaar geleden het Sudburybekken in Canada vormde en 100 keer groter dan planetoïde 1998 QE2, die in maart 2013 de aarde passeerde en bij een inslag grote verwoestingen zou hebben aangericht.

De 3 grootste kraters in het zonnestelsel

Utopia Planitia (3300 km)
De verweerde topografie van Mars maakt niet alleen aanspraak op de hoogste top, maar ook op de grootste inslagkrater van ons zonnestelsel. Gezien de nabijheid van Mars tot de planetoïdengordel is het niet verwonderlijk dat de krater hier te vinden is.

Hellasbekken (2300 km)
Deze reusachtige inslagstructuur op het zuidelijk halfrond van Mars is de grootste zichtbare krater in het zonnestelsel. Halverwege de jaren 1970 werd door de Viking orbiters een gedetailleerde compositie-opname gemaakt van Hellas Panitia.

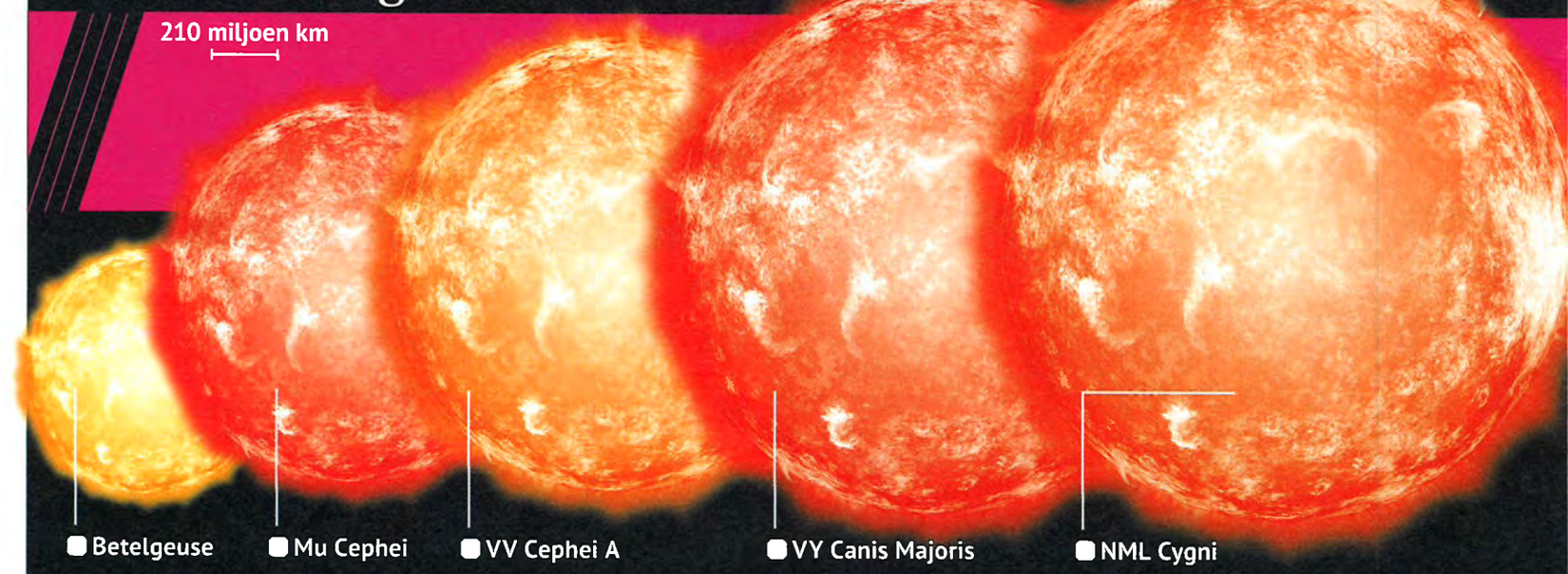
Calorisbekken (1550 km)
De op twee na grootste inslagkrater in het zonnestelsel vinden we op het gloeiend hete oppervlak van Mercurius. Het Calorisbekken is omgeven door een 2 kilometer hoge bergketen. Tot op een afstand van 1000 kilometer is weggeslingerd materiaal te vinden.

GROOTSTE STER NML Cygni

We begeven ons in het rijk der giganten en bekijken de allergrootste sterren in het universum. In tegenstelling tot planeten, planetoïden en andere hemelobjecten die te donker en te klein zijn om op grote afstand hun aanwezigheid kenbaar te maken, kunnen deze kolossale waterstofreactoren een nauwelijks te bevatten omvang bereiken. Daarbij blazen ze multispectrale straling de ruimte in en maken ze hun exacte locatie bekend door de enorme gravitatiekrachten die ze op hun omgeving uitoefenen.

Alleen de Melkweg bevat naar schatting al 100 tot 400 miljard sterren. Veel ervan zijn vrij gemakkelijk te vinden. Daarom hebben we er een paar uitgezocht die kunnen meedingen naar de kwalificatie 'grootste ster'. VY Canis Majoris is een monster – onze zon is in vergelijking ermee maar een speldenprikje. De ster bevindt zich op 5000 lichtjaar van de aarde, heeft een diameter van 1420 keer die van de zon en werd ooit als het grootste en helderste stellaire object aan de hemel gezien. In 2009 werd echter een nog grotere ster ontdekt. Met een diameter van 2,3 miljard kilometer – 400 miljoen kilometer meer dan VY Canis Majoris – is NML Cygni een ware intergalactische zwaargewicht. Als deze reuzenster in het centrum van ons zonnestelsel zou worden geplaatst, zou hij het complete binnengebied in beslag nemen, inclusief de planetoïden en Jupiter. Het oppervlak zou tot halverwege Jupiter en Saturnus reiken. In NML Cygni passen één miljard aardes en dan is er nóg ruimte over. Ook wat zijn massa betreft, is de ster nogal uit de kluiten gewassen – 50 zonmassa's, meer dan genoeg om aan het einde van zijn levenscyclus een spectaculaire supernova te vormen. De zwaarste ster die we kennen is de Wolf-Rayetster R136a1. Hij bevindt zich in R136, een cluster zware sterren in de Grote Magelhaense Wolk op 165.000 lichtjaar van de aarde. Met een omvang van slechts 30 keer die van de zon is het geen NML Cygni. Zijn massa is echter 265 keer die van de zon en zijn helderheid is een miljoen keer zo groot. Als deze ster in ons zonnestelsel zou worden geplaatst, zou de helderheid die van de zon overtreffen in dezelfde mate waarin de zon die van de maan overtreft. R136a1 zou nóg zwaarder zijn geweest, 320 zonmassa's, maar de ster heeft sinds zijn ontstaan een groot deel hiervan verloren. Als we echter over massa op galactische schaal spreken, wordt de show gestolen door de objecten die achterblijven na het ineenstorten van zware sterren.

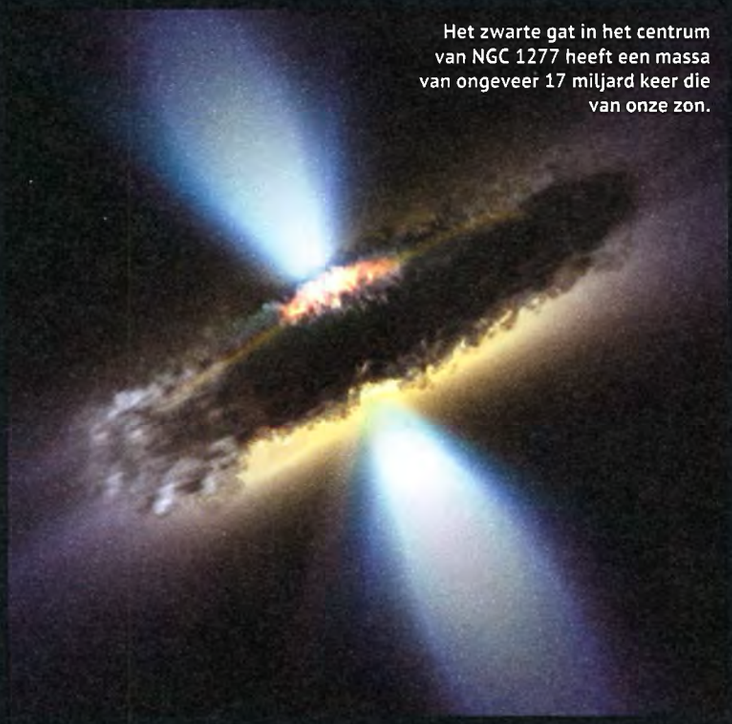
> "Er passen een miljard aardes in NML Cygni en dan is er nóg ruimte over."



Omvang versus massa voor beginners

Je kunt gemakkelijk in de war raken als wetenschappers het over de omvang van een object en zijn massa hebben. Van grote hemellichamen als sterren en met name zwarte gaten wordt gezegd hoeveel zonmassa's ze hebben, maar hun fysieke afmetingen worden vaak niet genoemd. In tegenstelling tot het gewicht van een object, dat relatief is, is de massa een vaste eigenschap, een maat voor de totale hoeveelheid materie, die alleen onder extreme fysieke omstandigheden kan veranderen. Een hoge massa betekent niet per definitie een enorme omvang – dat is afhankelijk van de dichtheid. Zo is de dichtheid van de grootste neutronenster (PSR J1614-2230) bijna 200 biljoen keer zo hoog als die van water. Met twee zonmassa's heeft het object echter een diameter van slechts 26 kilometer. Vooral grote, stellaire objecten worden omschreven in termen van zonmassa's, onder andere omdat daarmee de ontwikkeling van sterren beter kan worden weergegeven. Zonachtige sterren veranderen aan het einde van hun levenscyclus vaak in rode reuzen en vervolgens in witte dwergen, terwijl superreuzen vanaf 20 zonmassa's zwarte gaten vormen.

Neutronensterren hebben een extreem hoge dichtheid, wat deze kleine objecten superzwaar maakt.



Het zwarte gat in het centrum van NGC 1277 heeft een massa van ongeveer 17 miljard keer die van onze zon.

GROOTSTE ZWARTE GAT
NGC 1277

Het grootste zwarte gat waarvan de massa enigszins betrouwbaar is vastgesteld, ligt in het hart van NGC 1277, een sterrenstelsel op 250 miljoen lichtjaar van de aarde in het sterrenbeeld Perseus. Het is een kanjer: 17 miljard zonmassa's! Ter vergelijking: het centrale zwarte gat in onze eigen melkweg wordt op 4,1 miljoen zonmassa's geschat.

Astronomen vinden zwarte gaten in afgelegen sterrenstelsels door de omloopbaan van de sterren eromheen te bepalen. Er zijn er inmiddels talloze gevonden, met miljoenen of zelfs miljarden zonmassa's. Normaal gesproken geldt dat een zwart gat ongeveer 0,1 procent van de totale massa van het moedersterrenstelsel bezit – hoe groter het stelsel, des te groter het zwarte gat. In 2012 kondigde een team onder leiding van Remco van den Bosch van het Duitse Max Planck Institute for Astronomy echter de ontdekking aan van 'superzware' zwarte gaten in relatief kleine sterrenstelsels. NGC 1277 is tot op heden het indrukwekkendste voorbeeld. Het sterrenstelsel zelf bevat met 120 miljoen zonmassa's veel minder materie dan onze melkweg. Dat betekent dat het centrale zwarte gat over maar liefst 14 procent van de totale massa van het stelsel beschikt. De diameter bedraagt ongeveer 4 lichtdagen – ruwweg 11 keer de diameter van Neptunus' omloopbaan rond de zon.

Astronomen hebben nog steeds geen werkbare theorie ontwikkeld om deze superzware zwarte gaten te verklaren. Het record van NGC 1277 zal waarschijnlijk niet lang standhouden, aangezien het veel grotere elliptische sterrenstelsel NGC 4888 een zwart gat bevat van tussen de 6 en 37 miljard zonmassa's. Astronomen zullen waarschijnlijk op korte termijn een manier vinden om de massa nauwkeuriger vast te stellen.

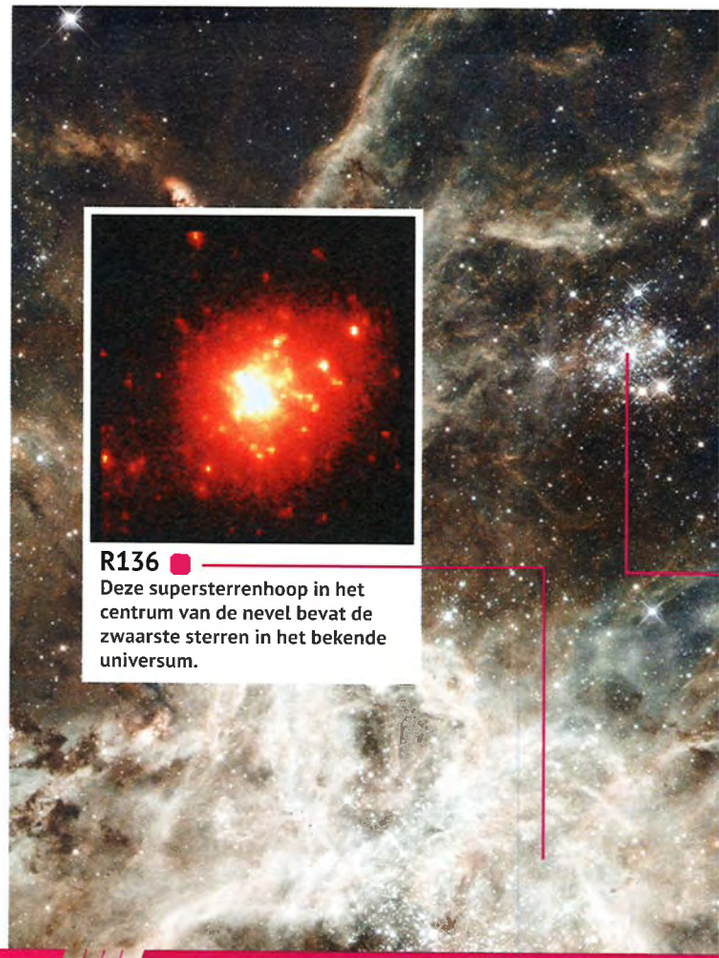
NGC 1277
diameter 4 lichtdagen

GROOTSTE IJSWOLK

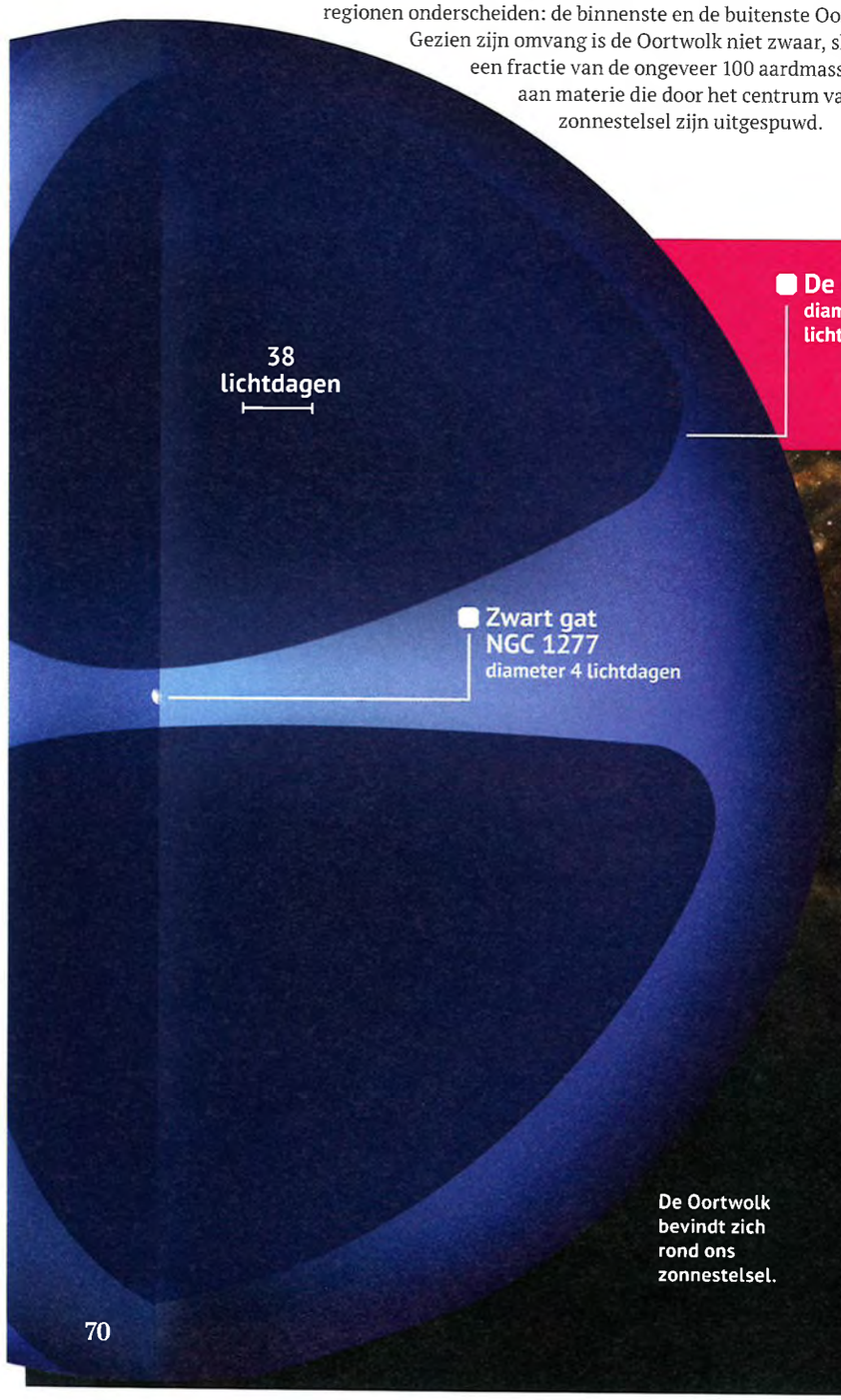
De Oortwolk

Het lijkt ondenkbaar dat een zwart gat zo groot zou zijn dat licht vier dagen nodig zou hebben om van de ene naar de andere kant te reizen. Ver voorbij de baan van Neptunus ligt echter iets veel groters: de Oortwolk. Deze uitgestrekte ruimteregio bevindt zich voorbij de buitenplaneten op een afstand van 3000 tot 100.000 astronomische eenheden (AE) van de aarde. De afstand tussen de verst van elkaar verwijderde punten bedraagt ongeveer 2 lichtjaar. De sonde New Horizons van de NASA, die in 2006 werd gelanceerd, zou er met zijn topsnelheid van 58.536 kilometer per uur 20.000 jaar over doen om er te komen.

De Oortwolk bestaat uit water, ammoniak en methaan in de vorm van ijsdeeltjes en talloze grotere lichamen. Men vermoedt dat veel van de kometen in ons zonnestelsel hier hun oorsprong vinden en dat ook sommige trans-Neptuniaanse objecten (objecten met een grotere gemiddelde omloopbaan dan Neptunus) deel uitmaken van de Oortwolk. De wolk bevat biljoenen kometen met een diameter groter dan een kilometer. Er worden twee regionen onderscheiden: de binnenste en de buitenste Oortwolk. Gezien zijn omvang is de Oortwolk niet zwaar, slechts een fractie van de ongeveer 100 aardmassa's aan materie die door het centrum van het zonnestelsel zijn uitgespuwd.



R136
Deze supersterrenhoop in het centrum van de nevel bevat de zwaarste sterren in het bekende universum.



De Oortwolk bevindt zich rond ons zonnestelsel.

De Oortwolk
diameter 2 lichtjaar (in vergelijking met de Tarantulanevel)

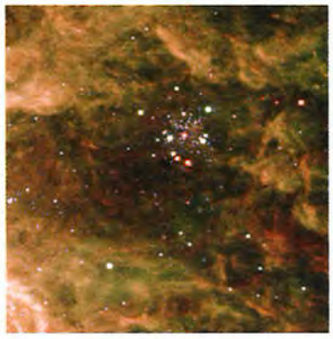
GROOTSTE NEVEL

Tarantula

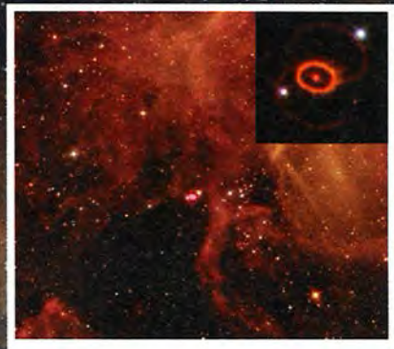
De grootste bekende nevel in het universum is vele malen groter dan de Oortwolk en bovendien een stuk zwaarder. Alleen de sterrenhoop in de kern 'weegt' al 450.000 zonmassa's. De Tarantulanevel (ook wel 30 Doradus of NGC 2070 genoemd) bevindt zich bij wijze van spreken bij ons op de stoep in de Grote Magelhaense Wolk (GMW), een van meerdere satellietsterrenstelsels in een baan rond de Melkweg. Met een diameter van ruwweg 1000 lichtjaar is de Tarantulanevel een kolkende ketel van stervorming met miljoenen zonmassa's materie op ongeveer 160.000 lichtjaar van de aarde. De nevel is zo helder dat hij, als hij op de plaats van de beroemde Orionnevel zou staan, de halve hemel in beslag zou nemen en zelfs schaduwen zou werpen.

De Tarantulanevel dankt zijn naam aan de spinachtige vorm van zijn helderste regionen. De eerste astronomen die hem observeerden, zagen hem voor een ster aan. De nevel ligt vóór de onregelmatig vormgegeven GMW en is zo groot vanwege de compressie

De Tarantulanevel bevindt zich 160.000 lichtjaar van de aarde.



Hodge 301
Hodge 301 is een 20 miljoen jaar oude sterrenhoop op ongeveer 150 lichtjaar van het centrum van de Tarantulanevel.



Honingraatnevel
In 1987 werd supernova 1987A ontdekt in de Honingraatnevel in de Grote Magelhaense Wolk.

Tarantulanevel
diameter 1000 lichtjaar

NGC 2060
Een overblijfsel van een supernova, geassocieerd met een ouder en losser cluster met veel jonge sterren.

van de gassen en het stof in het intergalactisch medium rond de Melkweg. Het resultaat is een uitgestrekte starburstregio, waarin stervorming op een veel hoger tempo plaatsvindt dan in de meeste andere sterrenstelsels.

Zoals alle stervormende nevels dankt de Tarantulanevel zijn helderheid aan fluorescentie. Hoogenergetische, ultraviolette straling afkomstig van hete, jonge sterren, brengt de atomen van waterstof en andere gassen in een hoogenergetische toestand. Bij terugkeer naar hun normale toestand zenden ze zichtbaar licht uit. Op plaatsen in de Tarantulanevel waar licht wordt geabsorbeerd door stof, ontstaan donkerdere regionen tegen de helderdere achtergrond.

De meeste energie die de nevel verlicht, is afkomstig van twee grote sterrenhopen in de buurt van het centrum: Hodge 301 en R316. Hodge 301 is de oudste van het stel en is sinds zijn ontstaan 20 miljoen jaar geleden ongeveer 150 lichtjaar afgedreven. Het cluster bevat tientallen zware sterren waarvan de hete stellaire winden openingen maken in het omringende gas. R136 ligt in het diepste gedeelte van de stervormingsregio en is pas 1 tot 2 miljoen jaar oud. De sterrenhoop wordt gedomineerd door zeldzame blauwwitte sterren met een zo hoge massa en dermate korte levenscyclus, dat ze zich normaal gesproken al een paar miljoen jaar na hun ontstaan tot supernova zouden moeten ontwikkelen. De sterren in het centrum van dit cluster staan zo dicht op elkaar dat ze in het verleden voor één enorme ster werden aangezien. De afgelopen jaren hebben astronomen echter ontdekt dat het om een cluster in een cluster gaat. De helderste component is onze favoriete Wolf-Rayetster R136a1. Het cluster heeft overigens een massa die zo hoog is dat het zich volgens astronomen niet aan de normale regels voor clusterontwikkeling zal houden. In plaats van uit te dijen, zal het door zijn zwaartekracht waarschijnlijk één geheel blijven en uiteindelijk een dichte bol vormen van duizenden zwakkere sterren met een langere levenscyclus: een bolvormige sterrenhoop of bolhoop.

Omdat de Tarantulanevel zo veel zware sterren bevat, is het geen wonder dat supernova's er relatief vaak voorkomen. De laatste die met het blote oog kon worden waargenomen, in 1987, vond aan de rand plaats. De gassen worden vormgegeven door de nog steeds uitdijende schokgolven van eerdere explosies.

GROOTSTE STERREN-STELSEL IC 1101

De grootste sterrenstelsels in het universum zijn ellipsen – reusachtige wolken die biljoenen sterren bevatten en waarvan de overlappende omloopbanen een enorme kluwen vormen met een nevelige rand. Deze monsters kunnen tien keer zo groot worden als de Melkweg, maar zelfs naar díe maatstaven is IC 1101 een uitzondering: de diameter bedraagt meer dan 50 keer die van de Melkweg en de massa is 2000 keer zo groot.

IC 1101 werd in 1790 ontdekt door William Herschel en bevindt zich in het centrum van sterrenstelselcluster Abell 2029, op ruim één miljard lichtjaar van de aarde. Het cluster heeft een massa van ongeveer 100 biljoen zonnen, hoewel het grootste deel ervan uit onzichtbare donkere materie bestaat. Alleen de centrale regio van IC 1101 is helder genoeg om in het zichtbare spectrum te kunnen worden waargenomen. Ondanks de relatieve helderheid en de vroege ontdekking werd de ware omvang van IC 1101 pas in 1990 duidelijk, toen astronomen voor het eerst de zwakke sterren in de periferie ontwaarden. Meer recente afbeeldingen van de Hubble Space Telescope hebben bevestigd dat het stelsel een diameter heeft van ruwweg 5 miljoen lichtjaar. Het Chandra X-Ray Observatory heeft bovendien in dezelfde regio een enorme halo van hete gassen onthuld.

Reuzen zoals IC 1101 worden alleen aangetroffen in het centrum van oude, dicht opeengepakte sterrenstelselclusters. Astronomen denken dat ze ontstaan door het botsen en vervolgens samengaan van kleinere stelsels. Een superzwaar zwart gat in het centrum van het sterrenstelsel zorgt voor een 'zwaartekrachtanker' waar de sterren omheen draaien. De totale massa van deze immense sterrenwolk is nog steeds voldoende om de omringende hete gassen in de buurt te houden. Rond het immense elliptische sterrenstelsel in het centrum van het cluster ontstaat zodoende een halo van materie die röntgenstraling uitzendt.

IC 1101 is een reusachtig elliptisch sterrenstelsel met een diameter van 50 keer die van de Melkweg

Peter Eisenhardt

Projectwetenschapper WISE

Gedragen clusters en superclusters zich als één geheel?
"Groepen zijn met elkaar verbonden door zwaartekracht. Dan heb je clusters, vaak tientallen keren groter dan groepen. Dat zijn de grootste door zwaartekracht verbonden structuren. Als ik 'door zwaartekracht verbonden' zeg, bedoel ik dat op de manier waarop de aarde en de planeten met de zon zijn verbonden. Er is alleen niet echt sprake van een centraal en dominant equivalent van de zon."

Kunnen superclusters groter worden dan de LQG?
"De verdeling van sterrenstelsels is niet overal gelijk. Neem bijvoorbeeld de afstand tussen onze melkweg en het Comacluster – 300 miljoen lichtjaar. Op die schaal is het heelal 'klonterig', ongelijk verdeeld. Maar we weten ook dat die klonterigheid weer verdwijnt als je de schaal gaat vergroten. Dat hebben we uitgezocht voor afstanden die veel groter zijn dan 300 miljoen lichtjaar. Op een schaal van één miljard lichtjaar is het universum overal zo'n beetje hetzelfde, waar je ook kijkt. Een belangrijk punt is dat we door de grotere structuren hebben leren inzien dat zwaartekracht grotendeels van donkere materie afkomstig is. Die structuren zijn belangrijk om de geschiedenis van het heelal te begrijpen, omdat we uit de grootte ervan kunnen opmaken wat er sinds het ontstaan is gebeurd."

Tussen de clusters zitten holtes, maar zijn die echt leeg?
"Ik wil niet zeggen dat er niks in zit, maar holtes hebben wel een veel lagere dichtheid. Anderzijds vind je overal in het universum geïoniseerd waterstof – protonen en elektronen. De dichtheid daarvan varieert niet enorm, dus de holtes zijn niet extreem veel leger dan de clusters."

Wat is 'groot' voor een kosmoloog?
"Een afstand van 300 miljoen lichtjaar is geen blokje om, maar het is nog wel in de buurt. Een miljard lichtjaar jaar begint interessant te worden. Aan de andere kant: de dichtstbijzijnde ster staat hier vier lichtjaar vandaan en dat is nog steeds erg ver. Het is eigenlijk verbijsterend hoeveel we tegenwoordig weten zonder dat we ook maar een fractie van die afstand hebben afgelegd."

GROOTSTE SUPERHOLTE

Boötes-leegte

Een van de grootste bekende structuren in het universum bestaat opmerkelijk genoeg uit niets. Tussen sterrenstelsels vinden we normaal gesproken een intergalactische ruimte, gevuld met gassen, stof en geïoniseerde deeltjes. In de meeste gevallen is de afstand tussen die stelsels relatief klein. Het gaat weliswaar over honderden of duizenden lichtjaren, maar op kosmische schaal is dat niet echt indrukwekkend. Er zijn echter locaties in ons universum waar min of meer een vacuüm heerst – uitgestrekte delen van de ruimte waarin nagenoeg niets te vinden is. We noemen dit superholtes, en de grootste die we kennen is de bolvormige Boötes-leegte op 700 miljoen lichtjaar van de aarde in de buurt van het sterrenbeeld Boötes.

De diameter van deze superholte bedraagt 250 miljoen lichtjaar en de inhoud is maar liefst 236.000 kubieke megaparsec. Om je een idee te geven hoeveel dat is: 1 kubieke megaparsec is het equivalent van 3 liter met 70 nullen erachter. Anders gezegd: we bestuderen al honderden jaren sterrenstelsels (ook al wisten we destijds niet echt wat dat waren), maar als onze melkweg zich in het centrum van de Boötes-leegte had bevonden, hadden we pas in de jaren 1960 het bestaan van andere sterrenstelsels ontdekt. De Boötes-leegte is overigens niet helemaal leeg – er zijn 60 sterrenstelsels gevonden. Anderzijds: een gedeelte van de ruimte dat zo groot is, zou normaal gesproken iets van 10.000 sterrenstelsels moeten bevatten. Ter vergelijking: alleen al in de buurt van de Melkweg staan bijna 30 sterrenstelsels in een stukje ruimte dat een fractie is van de Boötes-leegte.

Wetenschappers bestuderen deze onmogelijk grote leegte in de ruimte.

Het LQG-model: elk van deze witte bollen staat voor een superheldere quasar.

GROOTSTE SUPERSTRUCTUUR

Quasargroep LQG

Onze laatste reus is een van de vele superstructuren in het bekende, waarneembare universum. Deze groep van galactische superclusters bestaat uit kleinere clusters en groepen die relatief dicht bij elkaar staan en zich door hun onderlinge aantrekking gezamenlijk verplaatsen.

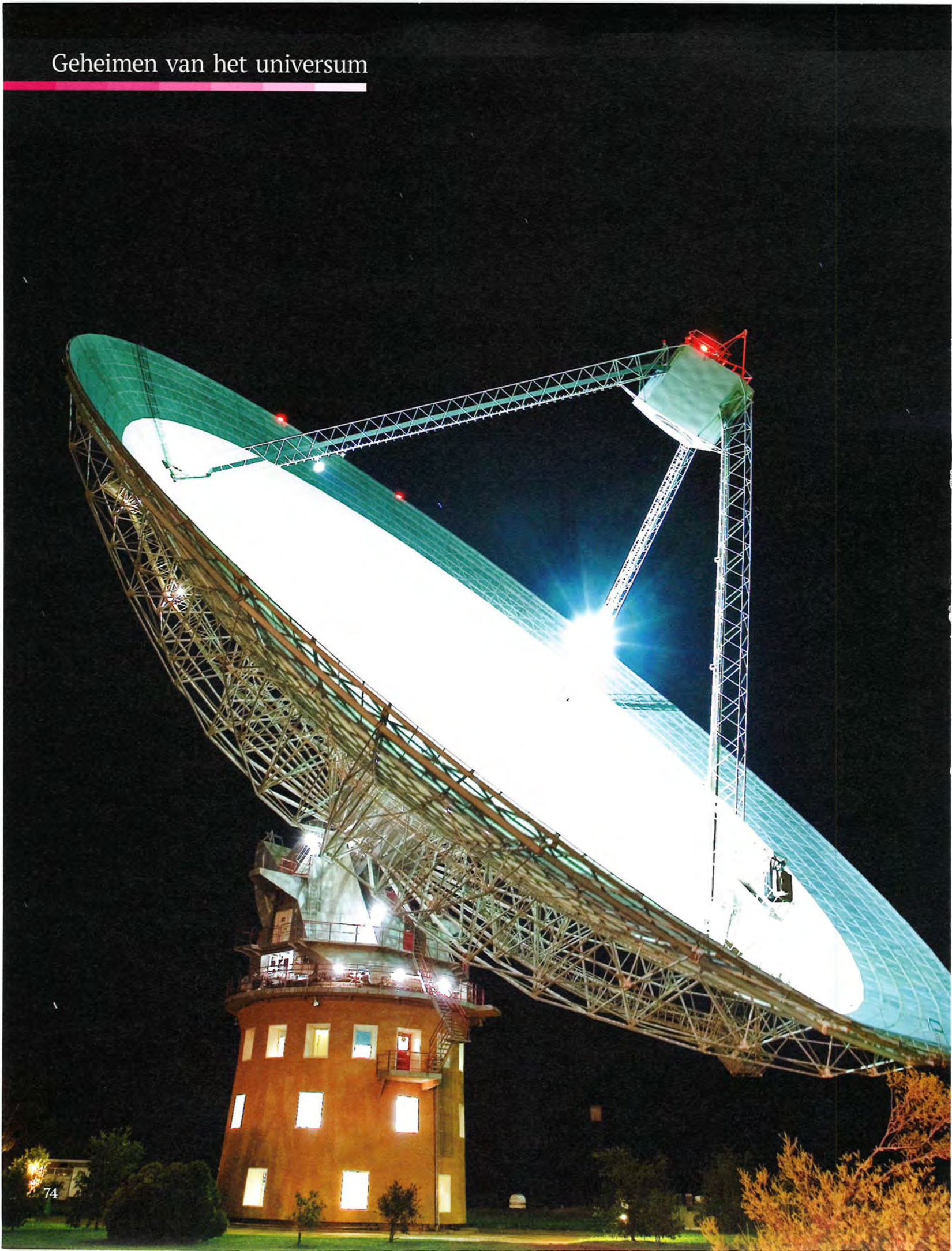
Eén enkel supercluster bevat duizenden individuele sterrenstelsels. Zo behoort onze melkweg tot de Lokale Groep, die uit ruim vijftig stelsels bestaat en op zijn beurt weer deel uitmaakt van het veel grotere Virgo Supercluster. Dit bevat meer dan honderd groepen en clusters met in totaal tienduizenden sterrenstelsels. Het Virgo Supercluster heeft een diameter van ongeveer 100 miljoen lichtjaar, ongeveer een zevende van de diameter van de tot voor kort als grootste beschouwde superclusters.

Recentelijk heeft een team van wetenschappers echter de grootste structuur in het universum ontdekt met behulp van data van het Sloan Digital Sky Survey. De structuur strekt zich 4 miljard lichtjaar uit en is zo immens, dat hij strijdig lijkt met de gevestigde wetenschappelijke theorie over de ontwikkeling van het universum. De Large Quasar Group (LQG) bestaat uit 73 quasars, dat zijn extreem heldere kernen rond superzware zwarte gaten in het centrum van enorme sterrenstelsels. De LQG bevindt zich 9 miljard lichtjaar van de aarde en is meerdere malen groter dan wat tot voor kort als de bovengrens voor de grootste kosmische structuren werd gezien (1,2 miljard lichtjaar). Men denkt dat deze primordiale giganten een vroege fase van galactische ontwikkeling in het moderne universum en de LQG representeren, een rudimentair stukje superclusterontwikkeling.

In de voorbije eeuwen, en met name de afgelopen decennia, hebben we veel geleerd over de omvang en de beginselen van het universum. Het is nauwelijks voor te stellen dat de Griekse filosoof Anaxagoras ooit beschuldigd werd van 'goddeloosheid' omdat hij zou hebben gezegd dat de zon een bol van roodgloeiend metaal was die groter was dan de Peloponnesos (het Griekse schiereiland met een oppervlak van 20.000 vierkante kilometer)! Met het voortschrijden van de observatietechnologie en de ontwikkeling van nieuwe telescopen, zoals de James Webb Space Telescope, is het een kwestie van tijd voordat het volgende superrecord wordt verpulverd en we onze denkbeelden over het universum opnieuw moeten herzien.

De LQG is zo groot dat hij wetenschappers hoofdbrekens bezorgt.

© NASA; SXC.hu; ESA; ESO



De zoektocht naar BUITENAARDS LEVEN

De komende tien jaar kunnen cruciaal zijn voor de jacht naar een intelligente buitenaardse beschaving.

De zoektocht naar intelligent buitenaards leven of SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) is heel lang een randwetenschap geweest. Sinds de opkomst ervan halverwege de 20e eeuw, hebben degenen die op dit terrein werkzaam waren alles uit de kast moeten halen om hun onderzoek gefinancierd te krijgen. Daarbij werd er niet zelden door zowel het publiek als de media de draak mee gestoken omdat het als een zinloze missie werd gezien. Dankzij een Russische miljardair is SETI echter niet langer een buitenbeentje. Het project staat op het punt om zijn plek in de bovenste regionen van de astronomie in te nemen en mocht er een ontdekking worden gedaan, dan zouden wetenschappers die altijd in de marge hebben gewerkt voor de verandering wel eens in de schijnwerpers kunnen komen te staan.

In 2015 werd bekend dat investeerder Yuri Milner, met onder andere Facebook, Twitter en Alibaba op zijn cv, 100 miljoen dollar (90 miljoen euro) in een project steekt met de naam Breakthrough Listen. Het moet de tot nu toe meest uitgebreide zoektocht worden naar leven buiten ons zonnestelsel. Het tien jaar durende project gaat van de beste telescopen ter wereld gebruikmaken en zal qua reikwijdte en omvang zijn weerga niet kennen.

Statistisch gezien is de kans dat we alleen zijn in het universum uitermate klein. Alleen al in de Melkweg bevinden zich waarschijnlijk honderden miljarden aardeachtige planeten, en dan zijn er ook nog eens honderden miljarden andere sterrenstelsels. Is het mogelijk dat slechts één planeet, de aarde, leven heeft voortgebracht? Dat is de vraag waarop we een antwoord willen – en misschien wel móéten – weten.

Dat betekent echter niet dat die zoektocht per definitie een succes wordt. Astronoom Sara Seager, professor aan het Massachusetts Institute of Technology (MIT), acht de kans op het vinden van buitenaards leven 'gering'. Desondanks gelooft ze dat het onderzoeksproject de moeite waard is. Ze zegt daarover: "Waarom zouden we het niet doen? Stel dat er overal aliens zijn, maar dat we te afwachtend zijn om zelfs maar een poging te wagen?"

En dat is precies waarom deze speurtocht naar leven zo belangrijk is. Sterker nog: exact

Breakthrough Listen

Een baanbrekend project op zoek naar intelligent leven buiten het zonnestelsel.

diezelfde opvatting vinden we in een van de eerste artikelen waarin wordt voorgesteld om naar buitenaards leven te gaan zoeken. In Searching for Interstellair Communications (september 1959) schrijven astrofysici Giuseppe Cocconi en Philip Morrison: "De kans op succes is lastig in te schatten, maar als we nooit op zoek gaan, is hij hoe dan ook nul."

Sindsdien is de zoektocht naar leven een proces van hollen en stilstaan, geplaagd door problemen en teleurstellingen. In 1960 startte astronoom Frank Drake onder de naam Project Zuma de eerste rechtstreekse zoekactie met de Tatel-radiotelescoop in Green Bank. Drake onderzocht frequenties aan de waterstofkant van het spectrum omdat hij daar vanwege de dopplerverschuiving eventuele transmissies dacht te kunnen aantreffen. Het project liep op niets uit. Het jaar erop ontwikkelde de astronoom zijn beroemde vergelijking van Drake om de kans op intelligent leven in de Melkweg te kunnen berekenen. Hierover later meer.

Gedurende de rest van de jaren zestig werd de zoektocht naar buitenaards leven door de Sovjet-Unie gedomineerd. Daarbij werden grote delen van de hemel in één keer geobserveerd. In de jaren zeventig nam de interesse van de Sovjets af. Een team van experts in de VS nam het stokje over. Deze experts schreven een studie getiteld Project Cyclops for NASA's Ames Research Center in Mountain View, California, waarin uitgebreid werd ingegaan op de vraag hoe naar signalen van intelligente beschavingen moest worden gezocht. Het is ook tegenwoordig nog een richtlijn voor veel SETI-werk.

Na jaren van onderzoek en planning had NASA in 1992 eindelijk een definitieve strategie om aan SETI te beginnen. Helaas stelde het Amerikaanse congres geen financiële middelen beschikbaar. Maar SETI leefde voort in de vorm van het SETI Instituut, een non-profitorganisatie in Californië. Bovendien begonnen wereldwijd andere initiatieven van de grond te komen. In 2007 werd bij het Californische Hat Creek Radio Observatory de Allen Telescope Array gebouwd, waar veel van het huidige SETI-werk wordt gedaan. Het tekort aan financiële middelen blijft echter een probleem.

Waarnaar is gezocht? Signalen. Sinds de Tweede Wereldoorlog heeft de aarde gecodeerde elektromagnetische straling het universum in gestuurd, en als er binnen een straal van 75

"Breakthrough Listen wordt de meest gedetailleerde, uitvoerige en fundamentele speurtocht naar intelligent leven die ooit is ondernomen." **Andrew Siemion, Universiteit van California, Berkeley**

Buiten de Melkweg
Er zal ook naar signalen worden gezocht in de 100 dichtstbijzijnde sterrenstelsels – 100.000 tot 11 miljoen lichtjaar bij ons vandaan.

Melkweg
Ook het centrum van ons sterrenstelsel en het complete galactische vlak zoals we dat van de aarde kunnen zien, zullen op radiosignalen worden onderzocht.

Dichtbij zoeken
De twee radiotelescopen – in een later stadium misschien bijgestaan door andere – onderzoeken de dichtstbijzijnde 1 miljoen sterren op radiosignalen van intelligent leven.

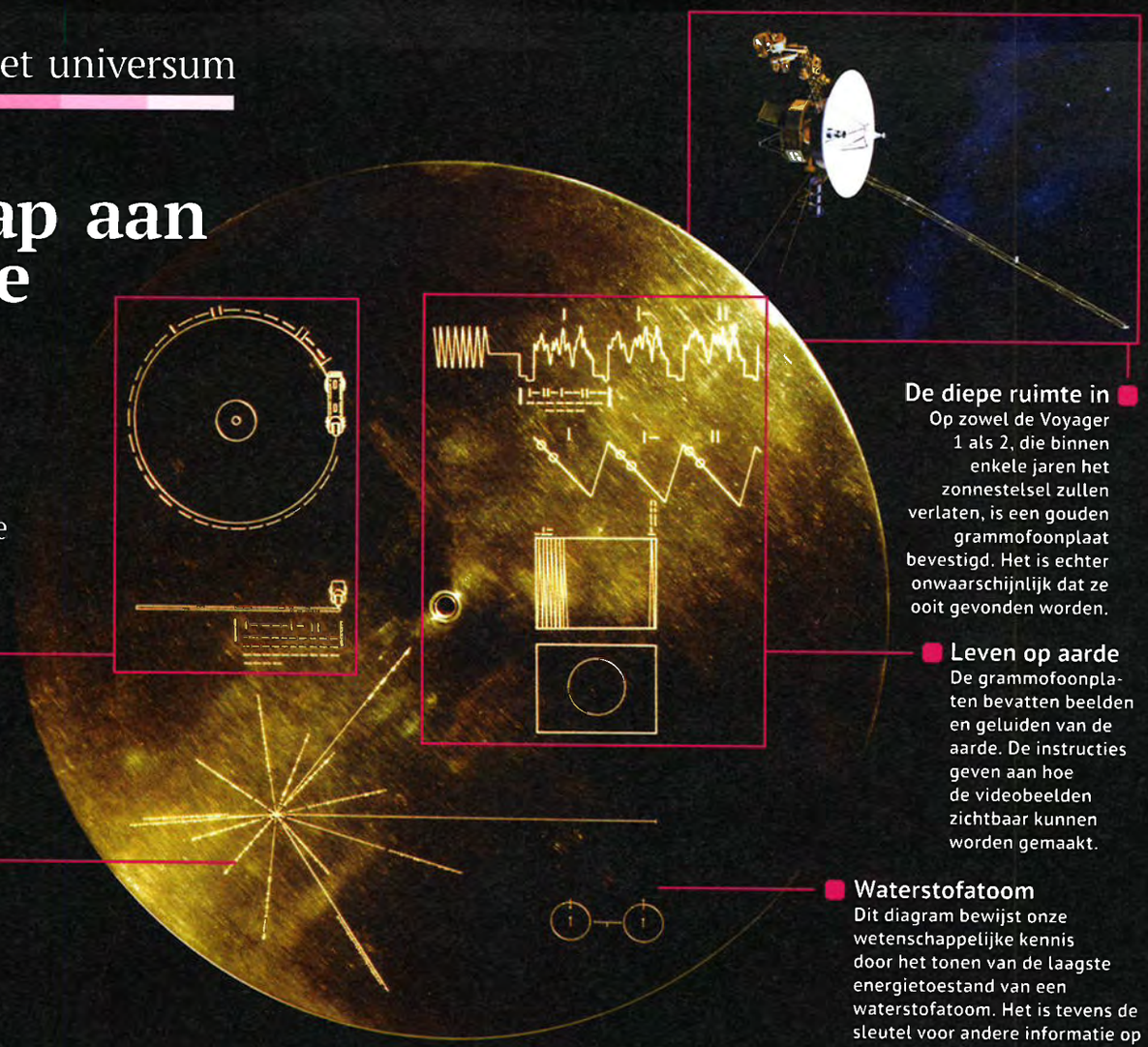
De pleitbezorgers van Breakthrough Listen. Van links naar rechts: Yuri Milner, Stephen Hawking, Martin Rees, Frank Drake, Ann Druyan en Geoff Macy.

lichtjaar ook maar iemand is die met vergelijkbare technologie in de richting van de aarde heeft gekeken, moet bekend zijn dat hier intelligent leven is. Het ligt voor de hand dat eventueel verder ontwikkeld intelligent leven dezelfde technologische stadia heeft doorlopen als wij en ooit op een vergelijkbare manier moet hebben gecommuniceerd. Er bestaan misschien andere communicatievormen die wij nog moeten ontdekken, maar voorlopig is dit alles wat we weten. Het is dus logisch om op zoek te gaan naar andere signalen die we kennen. "We gaan ervan uit dat andere intelligente beschavingen denken als wij en vergelijkbare technologie gebruiken voor langeafstandscommunicatie in de ruimte," aldus Seager. "In het gunstigste geval maken intelligente levensvormen zelf gebruik van radiosignalen en sturen ze een bericht rechtstreeks naar de aarde."

En als we een signaal ontdekken, wat dan? Sturen we dan een bericht terug? Dat zou geen unicum zijn. Afgezien van de gouden grammofoonplaten die op de ruimtesondes Voyager 1 en 2 zijn bevestigd en de aarde in detail beschrijven, zenden we al bijna een eeuw lang informatie uit. Verder is in 1974 het zogenoemde Arecibobericht de ruimte in gestuurd, een gecodeerde boodschap met informatie over de aarde. De bestemming was de grote bolhoop in Hercules, M13, op 25.000 lichtjaar afstand. Verder organiseert Yuri Milners 'Breakthrough Initiatives' een prijsvraag om het publiek te laten aangeven wat voor bericht we een eventuele

Boodschap aan de ruimte

De gouden grammofoonplaten op de Voyagers zijn een voorbeeld van communicatie met behulp van wiskunde en astronomie.



De diepe ruimte in
Op zowel de Voyager 1 als 2, die binnen enkele jaren het zonnestelsel zullen verlaten, is een gouden grammofoonplaat bevestigd. Het is echter onwaarschijnlijk dat ze ooit gevonden worden.

Afspelen
Instructies om de gouden grammofoonplaten af te spelen met een diamantnaald die zich aan boord van beide ruimtesondes bevindt.

Leven op aarde
De grammofoonplaten bevatten beelden en geluiden van de aarde. De instructies geven aan hoe de videobeelden zichtbaar kunnen worden gemaakt.

Wij zijn hier
Dit diagram toont de locatie van de zon in relatie tot 14 pulsars – snel roterende neutronensterren – die als baken fungeren.

Waterstofatoom
Dit diagram bewijst onze wetenschappelijke kennis door het tonen van de laagste energietoestand van een waterstofatoom. Het is tevens de sleutel voor andere informatie op de grammofoonplaten.

Zo praat je met aliens

Breakthrough Message
Deze prijsvraag in samenwerking met Breakthrough Listen is als aanzet bedoeld voor een discussie over berichten die aan andere beschavingen kunnen worden verstuurd.

Geen garantie
Er is geen plan om de berichten daadwerkelijk te versturen. Het gaat om de discussie.

Prijzengeld
Voor de beste ideeën wordt een prijs van in totaal 1 miljoen dollar beschikbaar gesteld.

Communicatie
Deelnemers moeten manieren ontwikkelen om in een universele taal te communiceren, zoals wiskunde.

Het gaat om de inhoud
De digitale berichten moeten representatief zijn voor de mensheid en de planeet aarde.

Neem hier deel aan de prijsvraag
breakthroughinitiatives.org/Initiative/2

intelligente beschaving zouden moeten sturen.

Er is alleen één probleem: waar zijn al die aliens? Als er zo veel bewoonbare planeten zijn, hadden we dan ondertussen niet wat moeten horen? Deze kwestie staat bekend als de Fermiparadox en er zijn inmiddels verschillende mogelijke oplossingen voor bedacht. Misschien is de ruimte te uitgestrekt voor zinvolle communicatie. Misschien blazen beschavingen zichzelf op voor ze de kans krijgen om met elkaar te communiceren. Of misschien zijn we toch alleen in dit immense universum. Het beste wat we momenteel kunnen doen is systematisch alle sterren afzoeken naar kunstmatig voortgebrachte signalen. Dat is alleen een ontzettend traag proces: momenteel is nog maar een fractie van alle sterren in de Melkweg onderzocht.

En dat is waar Breakthrough Listen om de hoek komt kijken. Waar SETI tot op heden slechts over beperkte mogelijkheden beschikte, kan Milner grote hoeveelheden observatietijd inkopen bij de krachtigste telescopen ter wereld. "Met Breakthrough Listen willen we de Silicon Valley-benadering toepassen op de zoektocht naar intelligent leven in het universum," aldus Milner. "We kiezen bij het verzamelen van de data voor een open benadering, waarbij we ons voordeel doen met het probleemoplossend vermogen van sociale netwerken." Van de 100 miljoen dollar wordt een derde besteed aan het inkopen van duizenden uren observatietijd bij radiotelescopen. Nog eens een derde wordt gebruikt voor het financieren van onderzoek naar en de ontwikkeling van nieuwe technologieën. Van de rest worden astronomen ingehuurd. Er is twee miljoen dollar gereserveerd voor 20 procent van de observatietijd in 2016 van 's werelds grootste, volledig bestuurbare radiotelescoop, de Robert C. Byrd Green Bank Telescope (GBT) in West Virginia. Met behulp van extra middelen wordt 25 procent van de jaarlijkse observatietijd van de Australische Parkes Radio Telescope ingekocht.

Er is ook ruimte voor observatietijd van andere telescopen om op systematische wijze sterren en bekende exoplaneten op signalen te onderzoeken. Als er in de buurt

> "Met Breakthrough Listen willen we de Silicon Valley-benadering toepassen op de zoektocht naar intelligent leven in het universum."
> Yuri Milner

van een van de miljoen geselecteerde sterren aardeachtige signalen worden uitgezonden, komen we erachter. "Breakthrough Listen wordt de meest gedetailleerde, uitvoerige en fundamentele speurtocht naar intelligent leven die ooit is ondernomen," aldus Andrew Siemion, directeur van het SETI Research Center aan de Universiteit van Californië in Berkeley, en een van de projectleiders van Breakthrough Listen. "We onderzoeken een groter deel van het radiospectrum dan tijdens alle eerdere experimenten en bovendien met een hogere gevoeligheid." Siemion voegt eraan toe dat Milners enthousiasme voor SETI 'een complete verrassing' was.

De kracht en de omvang van de gebruikte telescopen zijn zodanig dat dit project 50 keer zo gedetailleerd wordt genoemd als enig voorafgaand SETI-project. Het onderzochte hemelgebied is 10 keer groter, terwijl een 5 keer zo groot deel van het radiospectrum zal worden bestudeerd – en dat alles 100 keer zo snel. Zo kunnen zelfs beschavingen worden gevonden rond een van de dichtstbijzijnde 1000 sterren die ons een signaal stuurt met de sterkte van een gemiddelde vliegtuigradar. Parallel aan het radio-onderzoek wordt de Automated Planet Finder Telescope van het Lick Observatory in Californië ingezet voor optische lasertransmissies. Hiermee kan op een afstand van vier lichtjaar de energieopbrengst van een gewone gloeilamp worden geregistreerd. Het project blijft echter niet beperkt tot ons eigen sterrenstelsel. Behalve de 1 miljoen dichtstbijzijnde sterren, het centrum van de Melkweg en het complete galactische vlak, onderzoekt Breakthrough Listen ook de 100 sterrenstelsels die zich het dichtst bij de Melkweg bevinden op berichten van intelligente beschavingen.

> "Op dit moment schieten er berichten van de sterren door dit vertrek, door ons allemaal. Ik krijg nog steeds een rilling over mijn rug bij die gedachte."
> **Frank Drake**

Het project heeft inmiddels veel interesse gewekt. Adviseurs en pleitbezorgers zijn onder andere Stephen Hawking, de Britse koninklijk astronoom Martin Rees, Seth Shostak van het SETI Instituut, astronoom Frank Drake en Ann Druyan, die getrouwd was met de in 1996 overleden kosmoloog Carl Sagan. Alle door het project verzamelde data zullen voor iedereen toegankelijk zijn zodat geïnteresseerden zelf naar eventuele signalen op zoek kunnen gaan. Ook bestaande initiatieven, zoals SETI@home, worden ingelijfd. "Op dit moment schieten er berichten van de sterren door dit vertrek – door ons allemaal. Ik krijg nog steeds een rilling over mijn rug bij die gedachte," aldus Drake. "De zoektocht naar intelligent leven is een groots avontuur, en Breakthrough Listen geeft die zoektocht een enorme steun in de rug."

Maar laten we eerlijk zijn – de kans dat het project slaagt is gering. Dat kan allerlei redenen hebben. De meest voor de hand liggende is de mogelijkheid dat ander intelligent leven op een manier communiceert die wij niet begrijpen. Het is ook denkbaar dat dat leven geen, of een andersoortige technologie heeft ontwikkeld. Maar de meest opzienbarende reden zou toch wel zijn dat we gewoon alleen zijn.

Misschien is leven zo uniek dat alleen de aarde precies de juiste omstandigheden bood. Zoals de schrijver Arthur Clarke ooit zei: "Er zijn twee mogelijkheden: we zijn óf alleen in het universum, óf niet. Beide alternatieven zijn even beangstigend." Als we alleen zijn, zou dat verstrekkende gevolgen kunnen hebben. Niemand zou zoiets graag ontdekken. Aan de andere kant zou het misschien onderstrepen hoe belangrijk en uniek de aarde eigenlijk is. "Ook hier geldt zoals altijd: als iets niet kan worden bewezen, bewijst dat niet dat het niet bestaat," merkt Siemion op. "Maar als we straks na tien jaar zoeken niks hebben gevonden, zullen we ons misschien toch eens moeten afvragen of onze technologie niet

Een bericht voor buitenaards leven

Het Arecibobericht werd in 1974 opgesteld door onder andere Frank Drake en Carl Sagan en in de richting van M13 gezonden, ongeveer 25.000 lichtjaar van de aarde.

Het Arecibo-observatorium in Porto Rico

Getallen
De getallen 1 tot en met 10 in binaire vorm.

DNA
De atoomnummers van de elementen waaruit DNA bestaat.

Formules
De chemische formules van de koolhydraten en de basen in DNA.

Dubbele spiraal
De structuur van DNA.

De mens
De gemiddelde lengte van een mens en het aantal aardbewoners in 1974.

Zonnestelsel
Ons zonnestelsel en de planeet waarvan het bericht afkomstig is.

Arecibo-telescoop
De afmetingen van de radioschotel waarmee het bericht is verzonden.

wat al te apart is – en hoe we de toekomst van onze unieke primatensoort kunnen verzekeren."

Wat het speuren naar leven betreft, is Breakthrough Listen niet het enige interessante project. Zo worden momenteel nieuwe missies ontwikkeld die moeten onderzoeken of sommige relatief bereikbare locaties ooit bewoonbaar zijn geweest of misschien nog zijn. Van Mars weten we nu bijvoorbeeld vrij zeker dat de planeet ongeveer een miljoen jaar geleden water bezat en geschikt was voor leven. De volgende stappen zijn een rover van de NASA in 2020 en vervolgmissies om te zoeken naar feitelijk bewijs van leven, nu of in het verleden.

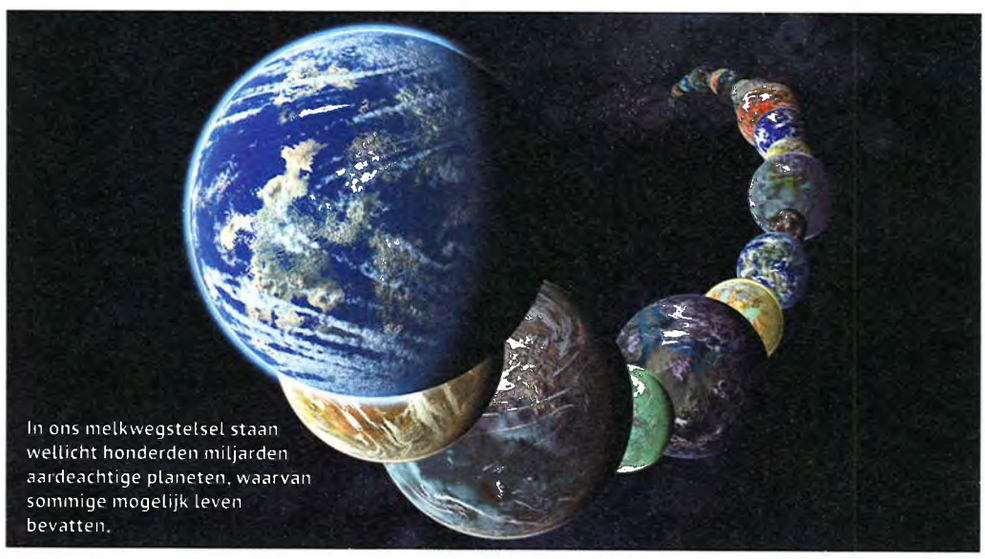
Ook andere bestemmingen beginnen interessant worden. Zo onderzoekt de NASA een missie naar Jupiters ijsmaan Europa, die op zijn vroegst in 2024 zou moeten starten. Het vermoeden bestaat dat onder het ijs van Europa een immense oceaan schuilgaat, die meer water bevat dan we hier op aarde hebben en volgens sommigen zelfs microbieel leven kan bevatten. Ook andere manen in het Jupiterstelsel, waaronder Ganymedes, zijn potentiële kandidaten voor leven en zullen in 2030 bezoek krijgen van de Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) van de Europese Ruimtevaartorganisatie ESA. En dat is nog niet alles. De Saturnusmanen Enceladus en Titan zouden eveneens microbieel leven kunnen huisvesten. Ook hiervoor zijn nieuwe missies aangekondigd.

Uiteindelijk zal alles wat we in ons zonnestelsel vinden microbieel van omvang zijn. Het is de rest van de Melkweg waarop we onze hoop hebben gevestigd en afgezien van Breakthrough Listen zijn er andere dingen om naar uit te kijken. Zo blijven astronomen naar terrestrische planeten zoeken in de leefbare zones van sterren. Nieuwe telescopen, zoals de Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) van de NASA, die in 2017 wordt gelanceerd, vergroten onze mogelijkheden. De atmosfeer van een aantal van deze werelden zal door de krachtigste telescopen die ons ter beschikking staan worden bestudeerd. Een daarvan is de James Webb Space Telescope (JWST) van de NASA, die eind 2018 in de ruimte zal worden gebracht.

Een ding is in elk geval zeker: SETI timmert stevig aan de weg, en als er de komende tien jaar een ontdekking wordt gedaan, is de tijd van financiële krapte achter de rug. Milner heeft al gezegd dat hij de Breakthrough Initiatives ook na de eerste tien jaar zal blijven ondersteunen, zelfs als het project niets oplevert. Het zal echter een grote teleurstelling zijn als er niets wordt gevonden.

Om met Carl Sagan te spreken: "Als we alleen zijn, is dat een enorme verspilling van ruimte."

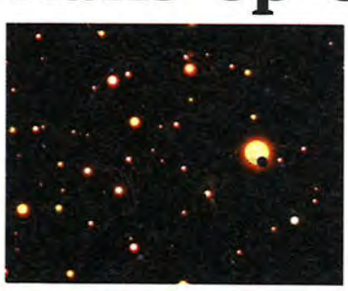
"In het gunstigste geval maken intelligente levensvormen zelf gebruik van radiosignalen en sturen ze een bericht rechtstreeks naar de aarde."
Sara Seager, MIT



In ons melkwegstelsel staan wellicht honderden miljarden aardeachtige planeten, waarvan sommige mogelijk leven bevatten.

Kans op contact

De vergelijking van Drake wordt gebruikt om de kans op het bestaan van buitenaards leven te schatten:



N

Het totale aantal beschavingen in de Melkweg waarvan de elektromagnetische emissies detecteerbaar zijn.

$=$

R^*

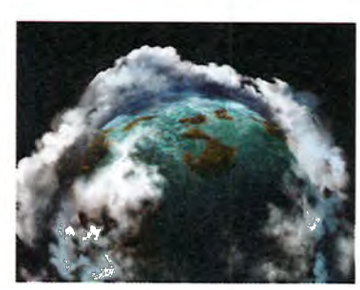
Het jaarlijks gevormde aantal sterren dat geschikt is voor leefbare planeten.

$\times$

f_p

Het gedeelte van die sterren met planeten.

$\times$



n_e

Het aantal planeten per zonnestelsel dat geschikt is om te leven.

$\times$

Wat gebeurt er als we contact maken?

Seth Shostak, directeur van het SETI Institute, legt uit wat er kan gebeuren als er een signaal wordt gevonden.

Wat is de procedure als we buitenaards leven vinden?
"In het geval van SETI krijgen we met een aantal protocollen te maken. Die protocollen zijn de afgelopen jaren aangepast door de voorzitter van een internationale commissie. Het komt erop neer dat je voldoende tijd moet nemen om het signaal te controleren en de betrokken personen op de hoogte te stellen, en dat je zonder internationale toestemming nergens op reageert. Dat is het wel zo'n beetje.
In de praktijk werkt het alleen niet zo. Dat weten we omdat je bij een vals alarm kunt zien wat er werkelijk gebeurt. SETI kent geen geheimhoudingsplicht. Als je een signaal binnenkrijgt en het ziet er interessant uit en je denkt dat dit het weleens zou kunnen zijn, ga je mensen bij andere observatoria bellen met de vraag: "Hé, zou je dit even kunnen nagaan?" Even later zie je dan dat mensen erover gaan schrijven op hun blog, een e-mail naar een vriend of vriendin doen of een tweet de wereld in sturen. En plotseling is zo'n signaal ineens groot nieuws voordat überhaupt bekend is of het werkelijk iets is – wat trouwens dagen kan duren. In 1997 hadden we een signaal dat bijna een hele dag goed leek, en aan het einde van de dag kreeg ik een telefoontje van de New York Times."

Wat gebeurt er daarna?
"Als je er echt zeker van bent dat het ET is, wordt elke telescoop op aarde op de locatie gericht waar het signaal vandaan komt. Je wilt natuurlijk zo veel mogelijk te weten komen, bijvoorbeeld of het een ster is waar planeten omheen draaien. Radiotelescopen kunnen de frequentieveranderingen van het signaal bestuderen. Dat levert bijvoorbeeld informatie op over de omloopbaan en de rotatie van de planeet en de lengte van het jaar.
Dat zijn de dingen die meteen gebeuren. Als je extra signalen wilt vinden, moet je waarschijnlijk veel grotere antennes bouwen en vervolgens kijken of je iets van modulatie in het signaal kunt vinden – een bericht –, want dat zou het pas echt interessant maken. Maar dan hebben we het over een immens project en een kolossale antenne. Aan de andere kant weet je dan in elk geval hoe je naar andere signalen moet zoeken, want als er eenmaal één schaap over de dam is, volgen er meer, daar ben ik van overtuigd."

Moeten we een bericht terugsturen?
"Als je een signaal opvangt, heb je natuurlijk ontzettend de neiging om iets terug te sturen. Ik denk dat je zoiets gewoon niet tegen kunt houden. Veel mensen zouden het gewoon doen. Niet dat ik daarmee zit. We sturen al signalen de ruimte in sinds de Tweede Wereldoorlog en veel daarvan zijn behoorlijk heftig. Het zou dus hooguit wat extra informatie zijn. Je zou je natuurlijk wel afvragen wat je zou moeten zeggen. Alleen de goede dingen? Of ook de slechte? Ik vergelijk het maar met de oorspronkelijke bewoners van de Caraïben, die zich afvroegen wat ze tegen Columbus moesten zeggen toen hij aan land kwam."

Zou het volgens u de grootste ontdekking aller tijden zijn?
"Ik heb wel eens aan een aantal wetenschapsjournalisten gevraagd wat de impact van zo'n verhaal zou zijn, iedereen had het over het belangrijkste nieuws ooit. Ik wil dat niet tegenspreken. Het zou hoe dan ook een sensatie zijn."

Als de planeet dichtbij staat, moet er dan een missie komen?
"Ik ben ervan overtuigd dat zoiets serieus besproken wordt, maar echt praktisch is het niet. Zelfs met onze beste raketten doen we bijna 10 miljoen jaar over een afstand van 50 lichtjaar. Het lijkt me eerlijk gezegd beter om te communiceren via signalen."

Hoe zeker bent u dat we iets vinden?
"Ik durf met iedereen met wie ik dit heb besproken om een kop koffie te wedden dat het binnen 25 jaar zover is."

f_l

Het gedeelte van die geschikte planeten waarop zich leven ontwikkelt.

×

f_i

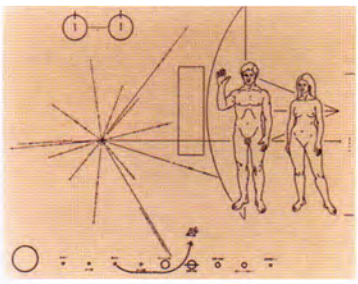
Het gedeelte van de planeten met leven waarop zich intelligent leven ontwikkelt.

×

f_c

Het gedeelte van die beschavingen met een technologie die meetbare elektromagnetische signalen de ruimte in brengt.

×



L

De tijdsduur waarin deze beschavingen meetbare elektromagnetische signalen de ruimte in brengen.

© Getty Images; Tobias Roetsch; Breakthrough Initiatives; ESO; JPL-Caltech; NASA; SETI Institute

DE GROOTSTE ONTDEKKINGEN VAN DE HUBBLE

De mooiste afbeeldingen van deze iconische ruimtetelescoop.

Hubble Ultra-Deep Field

INTERVIEWBIO

Dr. Mario Livio
Hoofdastrofysicus aan het Hubble Space Telescope Science Institute
Astrofysicus Mario Livio specialiseert zich in avontuurlijke onderwerpen als zwarte gaten, neutronensterren, witte dwergen en supernova-explosies. Livio werkt sinds 1991 aan het Hubble Space Telescope Science Institute en heeft meer dan 400 wetenschappelijke artikelen en vijf populair wetenschappelijke boeken op zijn naam.

In 2015 vierde de Hubble Space Telescope (HST) zijn 25e jaar in de ruimte. Gedurende tweeënhalf decennium heeft de telescoop meer dan een miljoen observaties gedaan en data geleverd voor ruim 10.000 wetenschappelijke publicaties. Daarbij heeft de HST ons vanuit zijn positie voorbij de sluier van de aardatmosfeer een adembenemende blik geschonken op de verste uithoeken van het universum.

De Hubble is het geesteskind van de Amerikaanse astrofysicus Lyman Spitzer jr. De constructie van de telescoop, die in 1985 voltooid was, nam bijna tien jaar in beslag. De reis naar de ruimte verliep echter niet zonder complicaties. De lancering liep vertraging op door de ramp met de spaceshuttle Challenger in 1986, waarbij zeven astronauten om het leven kwamen. Toen de HST in april 1990 eindelijk in een baan rond de aarde was gebracht, waren de eerste foto's onscherp. Tot ontzetting van het team bezat de met veel zorg vervaardigde 2,4-meterspiegel een sferische aberratie: een microscopische fout die tot gevolg had dat de lichtstralen niet in één brandpunt samenvielen.

De Hubble was ontworpen om aan de spaceshuttle te worden gekoppeld, zodat reparaties en upgrades in de ruimte konden worden uitgevoerd. Onverschrokken astronauten hebben in 1993 tijdens een missie van één week een corrigerend lenzenstelsel geplaatst, waarmee het probleem was verholpen. Sinds de reparatie heeft de telescoop vier upgrades gehad en duizenden spectaculaire foto's op hoge resolutie gemaakt.

De Hubble is verantwoordelijk voor enkele van de belangrijkste wetenschappelijke ontdekkingen in het ruimtetijdperk. Zo hebben wetenschappers met behulp van HST-data kunnen aantonen dat donkere energie de uitdijing van het heelal versnelt en dat de leeftijd ervan ongeveer 13,8 miljard jaar bedraagt. Tevens is aangetoond dat zich in het centrum van vrijwel elk sterrenstelsel een superzwaar zwart gat bevindt.

Gedurende zijn 25 illustere jaren in de ruimte is de Hubble erin geslaagd om een aantal van de meest iconische foto's van de kosmos te maken.

De galactische roos

Deze spectaculaire afbeelding is vrijgegeven als onderdeel van de 21e verjaardag van de Hubble in 2011. De kosmische roos in het centrum wordt gevormd door twee interagerende sterrenstelsels die samen als Arp 273 bekendstaan. De afbeelding is gemaakt met behulp van de Wide Field Camera 3 (WFC3) en vervolgens gefilterd om onderscheid te kunnen maken tussen ultraviolet, blauw en rood licht. Een klein sterrenstelsel, UGC 1813, dat vanaf de zijkant te zien is, vormt de steel van de roos, terwijl de bloem zelf het sterrenstelsel UGC 1810 is, dat vijf keer groter is. Astronomen denken dat het grotere stelsel zijn bloembladvorm heeft gekregen door een botsing. De ring rond UGC 1810 geeft aan dat het kleinere stelsel tijdens de botsing regelrecht door het centrum van de spiraal is gegaan, waarbij de armen een ring hebben gevormd. Als gevolg van de botsing is het centrum van het kleine stelsel gaan oplichten en zijn uit de chaos in het grotere stelsel zware, hete blauwe sterren gevormd. Rechtsboven in het grotere stelsel zien we een minispiraal met een blauwe uitbarsting van jonge, actieve sterren.

De Sombreronevel

Deze ongelooflijk gedetailleerde foto van M104 is gemaakt door de Advanced Camera for Surveys. Het is een van de grootste afbeeldingen die de Hubble ooit heeft vastgelegd, bestaande uit zes afzonderlijke opnames die later zijn samengevoegd. Om de foto in natuurlijke kleuren te kunnen weergeven zijn een rood-, een groen- en een blauwfilter gebruikt.
Het sterrenstelsel, dat zijn bijnaam dankt aan zijn hoedachtige vorm, is een van de zwaarste objecten in het Virgocluster. Oorspronkelijk dacht men dat het om een ster ging, maar het object beweegt zich van ons af met een snelheid van 1127 kilometer per seconde en inmiddels weten we dat de diameter 50.000 lichtjaar bedraagt. De Sombreronevel heeft ongeveer dezelfde leeftijd als de Melkweg en bevat bolvormige sterrenhopen die 10 tot 13 miljard jaar oud zijn.
In het centrum bevindt zich een tweede schijf die een hoek lijkt te maken met de hoofdschijf van het stelsel. Hij zendt heldere röntgenstraling uit en maakt waarschijnlijk deel uit van een superzwaar zwart gat dat een miljard zonmassa's 'weegt'.

INTERVIEW

"Dit visueel verbluffende sterrenstelsel staat op ongeveer 28 miljoen lichtjaar van de aarde en wij kijken min of meer tegen de zijkant aan. Ik vind deze foto vooral zo bijzonder omdat de Hubble de stofbanen in de ring rond de centrale verdikking op zo'n hoge resolutie heeft weten vast te leggen, dat het resultaat bijna driedimensionaal werkt. Rond het sterrenstelsel zie je tussen de 1000 en 2000 bolhopen. Dat is ongeveer tien keer meer dan het aantal bolhopen rond de Melkweg."

Het poollicht van Saturnus

In 2003 werkte de Hubble met ruimtesonde Cassini samen bij het bestuderen van het poollicht in de atmosfeer van Saturnus. De Advanced Camera for Surveys van de Hubble maakte de zichtbaar-licht-opnames van de planeet, terwijl de Space Telescope Imaging Spectrograph de ultraviolette gloed van de aurora's vastlegde. Er werd poollicht geregistreerd dat dagenlang aanhield en onafgebroken helder oplichtte.
Door de hulp van de Cassini weten we nu dat het poollicht ontstaat door drukveranderingen in de atmosfeer van Saturnus. Wanneer de zonnewind aanwakkert, lichten de aurora's op en neemt hun diameter af.
Hoewel het poollicht op deze afbeelding een heldere, ijzig blauwe kleur heeft, zou het spektakel er vanaf het oppervlak van Saturnus heel anders uitzien. Als het blauwachtige uv-licht de atmosfeer binnendringt, worden de waterstofatomen in een hoogenergetische toestand gebracht, waardoor ze rood oplichten. Op aarde zien we iets vergelijkbaars, zij het dat in onze door stikstof en zuurstof gedomineerde atmosfeer de kleuren groen en blauw zijn.

INTERVIEW

"Deze opnames in ultraviolet tonen hoe het poollicht van Saturnus in de loop van enkele dagen verandert. Poollicht ontstaat doordat geladen deeltjes uit de ruimte met het magnetisch veld van de planeet botsen. Dit resulteert in flitsen die veroorzaakt worden door gassen in de atmosfeer. De emissies doen zich voor in de vorm van radiogolven en ultraviolet licht. Een toename in intensiteit zal de emissiering doen krimpen. Het poollicht van de aarde gedraagt zich op dat punt overigens anders dan dat op Jupiter."

De stormvlekken van Jupiter

De Wide Field Planetary Camera 2 van de Hubble is op Jupiter gericht en registreert de stormen rond de evenaar. Jupiters grootste storm, de Grote Rode Vlek, heeft wereldwijde faam verworven en maakt al 200-350 jaar de atmosfeer onveilig. Hij is echter niet alleen. Deze afbeelding uit 2008 toont zijn twee kleinere metgezellen. De grootste – de Rode Vlek jr. – was al in 2006 ontdekt, maar de derde – de Baby Rode Vlek – was nieuw. Ze zijn allebei hun leven begonnen als witte vlek en hebben later een rode kleur gekregen toen ze deels boven de methaanatmosfeer werden uitgetild en aan ultraviolet licht werden blootgesteld. Kort na deze foto werd Baby Rode Vlek opgeslokt door zijn grote broer om voorgoed te verdwijnen. Dit kan een verklaring zijn voor het feit dat de grote storm na al die tijd nog steeds bestaat. Sinds de eerste metingen van de Voyager-ruimtesondes in de jaren 1970 is de Grote Rode Vlek overigens dramatisch geslonken. De Wide Field Camera 3 van de Hubble blijft de situatie in de gaten houden.

Kometen, sterren en sterrenstelsels

De ster op deze Hubble-foto is niet echt een ster, maar de voorbijsnellende komeet ISON op zijn laatste reis in de richting van de zon, met in zijn kielzog een staart van verdampend materiaal. ISON, die als zonscheerder bekendstond, brak in december 2013 in stukken als gevolg van de verzengende hitte. De komeet eindigde zijn reis op 1,9 miljoen kilometer van de zon.
Op het eerste gezicht lijkt de achtergrond bezaaid met sterren, maar als je beter kijkt, zie je een zee van sterrenstelsels. Deze fantastische afbeelding, gemaakt door de Wide Field Camera 3, is een combinatie van opnames met verschillende belichtingstijden, waardoor een verbazingwekkende dieptewerking ontstaat. De komeet bevond zich op slechts een paar honderd miljoen kilometer van de aarde. De dichtstbijzijnde sterren op de foto staan 60.000 keer verder weg, terwijl de dichtstbijzijnde sterrenstelsels meer dan 30 miljard keer verder weg staan.

Een kosmische spelonk

Deze onvoorstelbaar nevelige holte is 'uitgehouwen' door enkele van de zwaarste sterren in het bekende universum. Op deze afbeelding, een samenvoeging van meerdere afzonderlijke opnames van de Wide Field and Planetary Camera 2 en de Advanced Camera for Surveys, worden de architecten van dit grootse kosmische paleis onthuld.
De heldere sterren boven in deze afbeelding maken deel uit van de open sterrenhoop Pismis 24 en behoren tot de helderste en zwaarste sterren in het universum. Hun gezamenlijke emissies hebben enorme structuren doen ontstaan in de nevel NGC 6357 eronder. De reusachtige zuilen in de gaswolk zijn vormgegeven door zwaartekracht, interstellaire winden, stralingsdruk en magnetische velden. Aan de onderkant van de afbeelding, in de nevel zelf, bevindt zich nog een zware ster die bezig is een kolossale holte uit te houwen in het oplichtende waterstofgas.
De sterren die voor dit spectaculaire schouwspel hebben zorg gedragen zijn werkelijk reusachtig, maar inmiddels heeft de Hubble nieuwe aanwijzingen over hun structuur onthuld. Hoewel hij ooit tot een van de zwaarste sterren in het bekende universum werd gerekend, is nu bekend dat de grootste ster in dit cluster een binair stelsel is dat uit twee kleinere sterren bestaat.

INTERVIEW

"Deze afbeelding toont de nevel NGC 6357, die bestraald wordt door de zware sterren in Pismis 24. De nevel staat op een afstand van ongeveer 8000 lichtjaar van de aarde. Van één van de heldere sterren in het Pismiscluster werd ooit gedacht dat hij meer dan 200 keer zo groot was als de zon. De scherpe ogen van de Hubble hebben echter onthuld dat het object in werkelijkheid uit twee sterren bestaat van elk ongeveer 100 zonmassa's. Door de intense straling van de sterrenhoop licht de nevel niet alleen op, maar worden ook de gassen en het stof geërodeerd, waardoor alleen de gedeeltes met de hoogste dichtheid als zuilen overblijven en in de richting van de sterrenhoop wijzen."

De perfecte spiraal

Deze indrukwekkende afbeelding van spiraalstelsel M74 is samengesteld uit gegevens die in twee verschillende jaren zijn vastgelegd door de Advanced Camera for Surveys. Door de informatie met beelden van twee telescopen op aarde samen te voegen, kon de structuur van het spiraalstelsel in hoge resolutie worden weergegeven. Vanaf de aarde zien we M74 van boven. Dit levert een prachtig beeld op van de complexe wervelingen van spiraalstelsels zoals onze melkweg, zij het op kleinere schaal.
M74 is een bijna perfecte tweearmige spiraal met donkere stofbanen die naar buiten draaien vanuit het centrum. Met behulp van filters op de camera zijn blauw en infrarood licht zichtbaar gemaakt, waardoor langs de randen ketens van heldere, jonge sterren te zien zijn. De Hubble toont ook concentraties van waterstofgas, dat roze oplicht omdat het ultraviolette schijnsel van deze hete jonge sterren de moleculen in een aangeslagen toestand brengt – een ideale omgeving voor stervorming.

INTERVIEW

"Het sterrenstelsel M74 bevindt zich op een afstand van ongeveer 32 miljoen lichtjaar van de aarde en bevat ongeveer 100 miljard sterren. Het is een spiraalstelsel met de structuur van een pannenkoekachtige platte schijf en vanaf de aarde kijken we er van boven tegenaan – of van onderen, het is maar wat je wilt. De spiraalstructuur, die wordt veroorzaakt door de dichtheidsgolven (rimpels) van de galactische schijf, is daardoor prachtig te zien. In de armen worden nieuwe sterren gevormd die de gassen verhitten en doen oplichten. Er zijn in M74 drie supernova's ontdekt. Eén in 2002, één in 2003 en één in 2013."

Hete jonge sterren

Deze opname van de Advanced Camera for Surveys toont een nevelig stervormingsgebied in de Kleine Magelhaense Wolk, een dwergsterrenstelsel op 200.000 lichtjaar van de aarde. In het centrum staan de hete jonge sterren van de open sterrenhoop NGC 602. Ze zijn pas vijf miljoen jaar oud en worden nog omringd door het stof en de gassen waaruit ze zijn ontstaan, maar hun energie-uitbarstingen hebben een reusachtig gat in de wolk geslagen. De gassen eroderen geleidelijk en vormen enorme zuilen die naar binnen wijzen, naar de bron. Ook in de turbulente periferie beginnen zich nu steeds meer nieuwe sterren te vormen, waardoor de wolk langzaam maar zeker wordt weggeblazen. De hogeresolutiecamera van de Hubble onthult tevens sterrenstelsels op de achtergrond, waaronder een spiraalstelsel vlak boven deze tekst.

Het centrum van de Melkweg

In 2008 werden de instrumenten van de Hubble met die van de Spitzer Space Telescope gecombineerd om een kijkje te nemen in het centrum van de Melkweg. Na 144 rondjes om de aarde en 2304 afzonderlijke opnames werden de beelden samengevoegd tot dit schitterende mozaïek. De Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer (NICMOS) heeft objecten geregistreerd met een omvang tot wel 20 keer die van ons zonnestelsel. Het resultaat is de scherpste infraroodopname die ooit van het centrum van de Melkweg is gemaakt. Hierbij zijn zware sterren onthuld, waarvan de hevige stellaire winden gaten in de omringende gassen slaan en de gloed tonen van geïoniseerd waterstof in de omgeving. De opname van de Hubble werd over een kleurenkaart gelegd die was samengesteld door de Infrared Array Camera van de Spitzer. De resolutie van die kaart bedroeg slechts een tiende van die van de Hubble, maar dat was voldoende om de verschillende golflengten van infrarood licht op kleur te kunnen scheiden.

Een ijle spiraal

Dit ijle spiraalstelsel bevindt zich op slechts 46 miljoen lichtjaar van de aarde en is in 2010 gefotografeerd door de Wide Field Camera 3 (WFC3) van de Hubble. Er zijn vier verschillende filters gebruikt om de structuur te onthullen. In het centrum staat een geelwitte kern met sterren van middelbare leeftijd. Eromheen liggen ijle spiralen van donkere stofbanen die bezaaid zijn met jongere blauwe sterrenhopen. NGC 2841 is een zwaar spiraalstelsel dat met een diameter van 150.000 lichtjaar groter is dan de Melkweg. De stervorming binnen de ijle spiralen staat echter zo goed als stil, omdat de energieke 'jonkies' het grootste deel van de omringende gassen in hun omgeving hebben weggeblazen. Er zijn nog steeds concentraties van roze stervormingsregio's zichtbaar, maar al met al is dit ijl uitziende sterrenstelsel relatief rustig in vergelijking met andere spiraalstelsels zoals het onze.

De Vlindernevel

Deze vlindervormige nevel is overgebleven na de dood van een ster die vijf keer zo groot was als onze zon. De foto die je ziet, is een van de eerste opnames van de Wide Field Camera 3 (WFC3), die in mei 2009 werd geïnstalleerd. De ster in het centrum is in een dichte stofring gehuld, die is ontstaan nadat hij tot rode reus was opgezwollen. De vleugels hebben een 'spanwijdte' van ruim twee lichtjaar. Ze zijn in een later stadium gevormd door extreme stellaire winden, veroorzaakt door de oplopende rotatiesnelheid van de ster. De samenstellende gassen van de nevel zijn zichtbaar gemaakt met behulp van de filters op de camera.

INTERVIEW

"Ik ben er trots op deel te hebben uitgemaakt van deze fantastische wetenschappelijke onderneming."

Hoe bent u betrokken geraakt bij de Hubble?
"Kort na de lancering in 1990 ben ik benaderd door een collega die werkte aan het Space Telescope Science Institute (STSI), dat verantwoordelijk is voor het wetenschappelijke programma van de Hubble. Hij vroeg of ik zin had om bij het instituut te komen werken. Ik was er in 1986 al een keer geweest, dus ik wist er het een en ander van en ik kende ook heel wat astronomen die er werkten. Ik heb gezegd dat ik erover na zou denken."

Hubble kende een moeizame start: hoe was de sfeer bij het STSI toen de fout in de spiegel werd ontdekt?
"Ik werkte nog niet op het instituut toen de sferische aberratie werd ontdekt, maar ik schrok er enorm van. Toen ik in 1991 uiteindelijk besloot om voor het STSI te gaan werken, verklaarden mijn collega's me voor gek dat ik met een mislukte telescoop aan de slag ging. Er was inderdaad een flink risico omdat we op dat moment nog niet wisten of de fout kon worden verholpen."

Had u op dat moment verwacht dat de Hubble zo'n groot succes zou worden?
"Absoluut niet. Ik was eerlijk gezegd bang dat de Hubble de geschiedenis in zou gaan als een van de grootste wetenschappelijke mislukkingen aller tijden. Een die in principe het hele concept van grote, ambitieuze wetenschappelijke projecten in gevaar kon brengen. Het gevaar bestond dat mensen de Hubble als voorbeeld zouden gebruiken om aan te tonen dat complexe, wetenschappelijke missies gedoemd zijn om te mislukken."

Hoe veranderde de stemming nadat het probleem was verholpen?
"Dat valt haast niet te beschrijven. Je zou de euforie kunnen vergelijken met gevoel dat je hebt bij de geboorte van een kind. Het drama heeft natuurlijk wel bijgedragen aan de iconische status van de telescoop. Het was een fantastische demonstratie van wat je kunt bereiken als je de vindingrijkheid van

De Pijlers van de schepping

Sommige astronomen denken dat deze kosmische wolk in de beroemde Adelaarsnevel inmiddels is weggeblazen door een nabijgelegen supernova. Vanwege de afstand tot de aarde (7000 lichtjaar) zullen we dat de komende 1000 jaar echter nog niet kunnen zien.

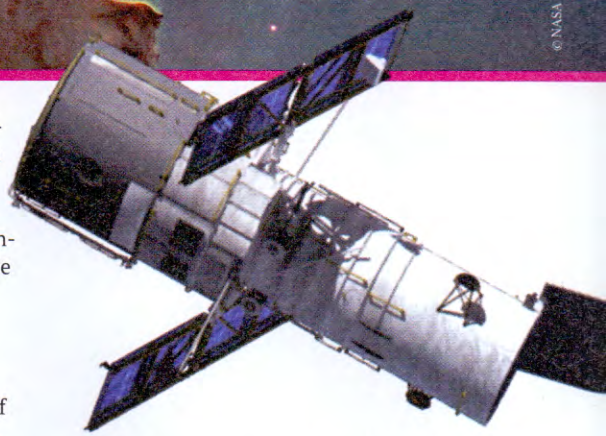
© NASA

wetenschappers en ingenieurs met de moed van astronauten combineert."

Wat is volgens u de meest iconische foto die de Hubble heeft gemaakt, en wat is uw persoonlijke favoriet?
"Het is wel duidelijk dat de foto van de Adelaarsnevel de meest iconische is. In het kader van het 25-jarig jubileum in 2015 hebben we het gebied in HD gefotografeerd. De nieuwe afbeelding is echt overweldigend. Mijn favoriet is de foto die we 'Mystic Mountain' noemen en waarop je de pilaren van gas en stof ziet waarin nieuwe sterren worden gevormd."

Wat hoopte u in de Hubble Deep Field-beelden te zien?
"De verschillende Hubble Deep Fields hebben ons een heel jong heelal getoond van nog geen 500 miljoen jaar oud, terwijl de huidige leeftijd 13,8 miljard jaar bedraagt. Daarbij hebben ze ons de geschiedenis van de kosmos gegeven. Zo kennen we nu bijvoorbeeld de snelheid waarmee het heelal door de geschiedenis heen nieuwe sterren heeft gevormd. Door ons duizenden sterrenstelsels te tonen in een hemelregio die je zou zien als je door een rietje zou kijken, hebben de Deep Fields gedemonstreerd hoe onbeduidend ons fysieke bestaan is in vergelijking met de uitgestrektheid van de ruimte. Niemand wist in eerste instantie wat hij van de Deep Fields moest verwachten, maar uiteindelijk bleken ze een indrukwekkende demonstratie van kosmische archeologie."

Hoe heeft de Hubble de harten van het grote publiek gestolen?
"Er zijn verschillende elementen die de Hubble min of meer uniek maken in de geschiedenis van de wetenschap. De telescoop heeft de opwinding van de ontdekking – die in het verleden alleen aan wetenschappers was voorbehouden – in de huizen gebracht van mensen verspreid over de hele wereld. Zelfs het drama met de spiegelfout en de spectaculaire reparatie hebben aan de populariteit van de Hubble bijgedragen. Ook de indrukwekkende onderhoudsmissies van de shuttleastronauten hebben tot de verbeelding gesproken. En dan is er natuurlijk de lange levensduur van de Hubble: 25 jaar opzienbarende wetenschappelijke resultaten en spectaculaire beelden, waarvan enkele door een kunstcriticus 'de meest opmerkelijke kunstwerken van onze tijd' zijn genoemd."



Hoe ziet de toekomst van de Hubble eruit?
"We hopen dat de Hubble in elk geval tot 2020 operationeel zal blijven. Er is dan een paar jaar overlap met de James Webb Space Telescope. Als de telescoop in 2020 nog steeds wetenschappelijk productief is, hoop ik dat hij het nog een tijdje uithoudt. Uiteindelijk zal er een voortstuwingsmodule aan de telescoop worden bevestigd waarmee we hem in zee kunnen laten storten. Ik ben ervan overtuigd dat de Hubble in de komende jaren nog een aantal belangrijke ontdekkingen zal doen. En ik ben er in elk geval trots op deel te hebben uitgemaakt van deze fantastische wetenschappelijke onderneming."

Duik in de wereld van de ruimtewetenschap

Hier bestaat de ruimte uit ...

100 Wat is donkere energie?
Een zoektocht naar iets wat zelfs voor de slimsten ter aarde een mysterie is

110 50 feiten over zwarte gaten
Duik in de theorie over dit grote niets

122 Hoe werken planeetbanen?
Zo werkt de aantrekkingskracht die planeten in de juiste baan houdt

124 Donkere materie
Je ziet het niet, het is er wel. Maar wat is het?

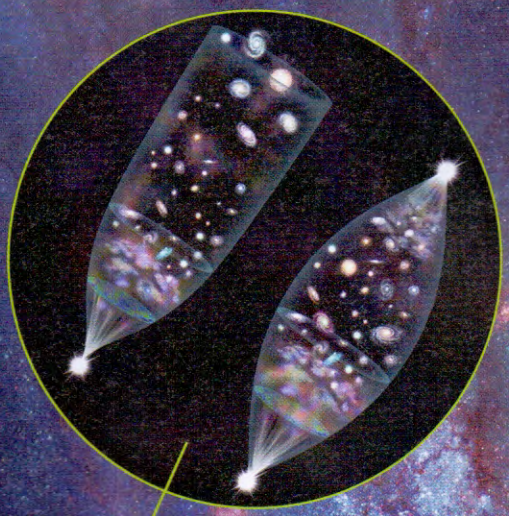
132 Super-sterrenstelsels
Wat voor invloed hebben deze superstelsels op hun omgeving?

142 Het einde van een ster
Dit gebeurt er wanneer een ster explodeert

150 De zoektocht naar wormgaten
Wetenschap vs. science fiction

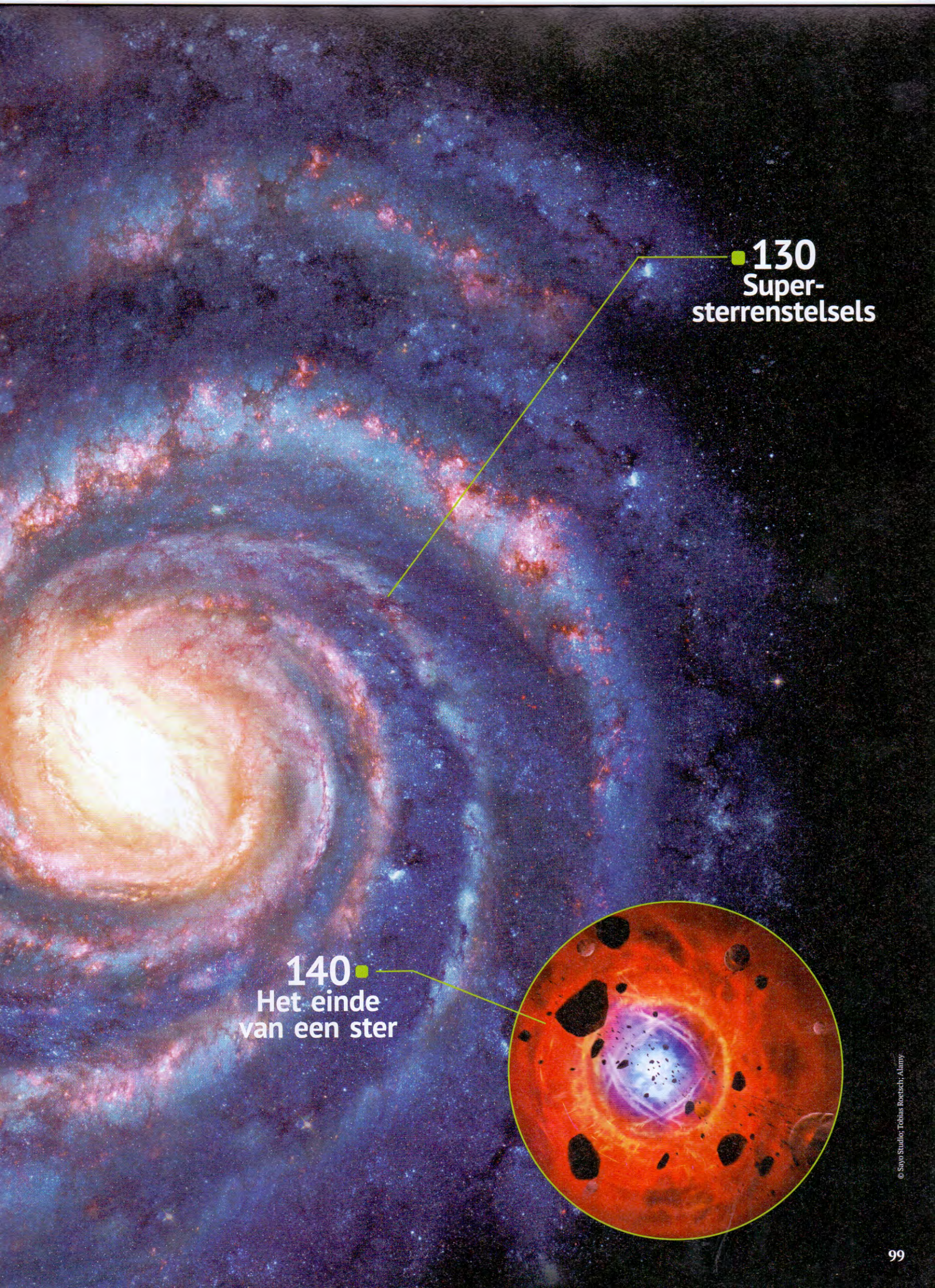
160 Hyperreuzen
Ontdek deze enorme kosmische monsters en hoeveel ze kapot kunnen maken

170 Grote ruimtestormen
Eeuwig durende stormen en meer ...



124 Donkere materie

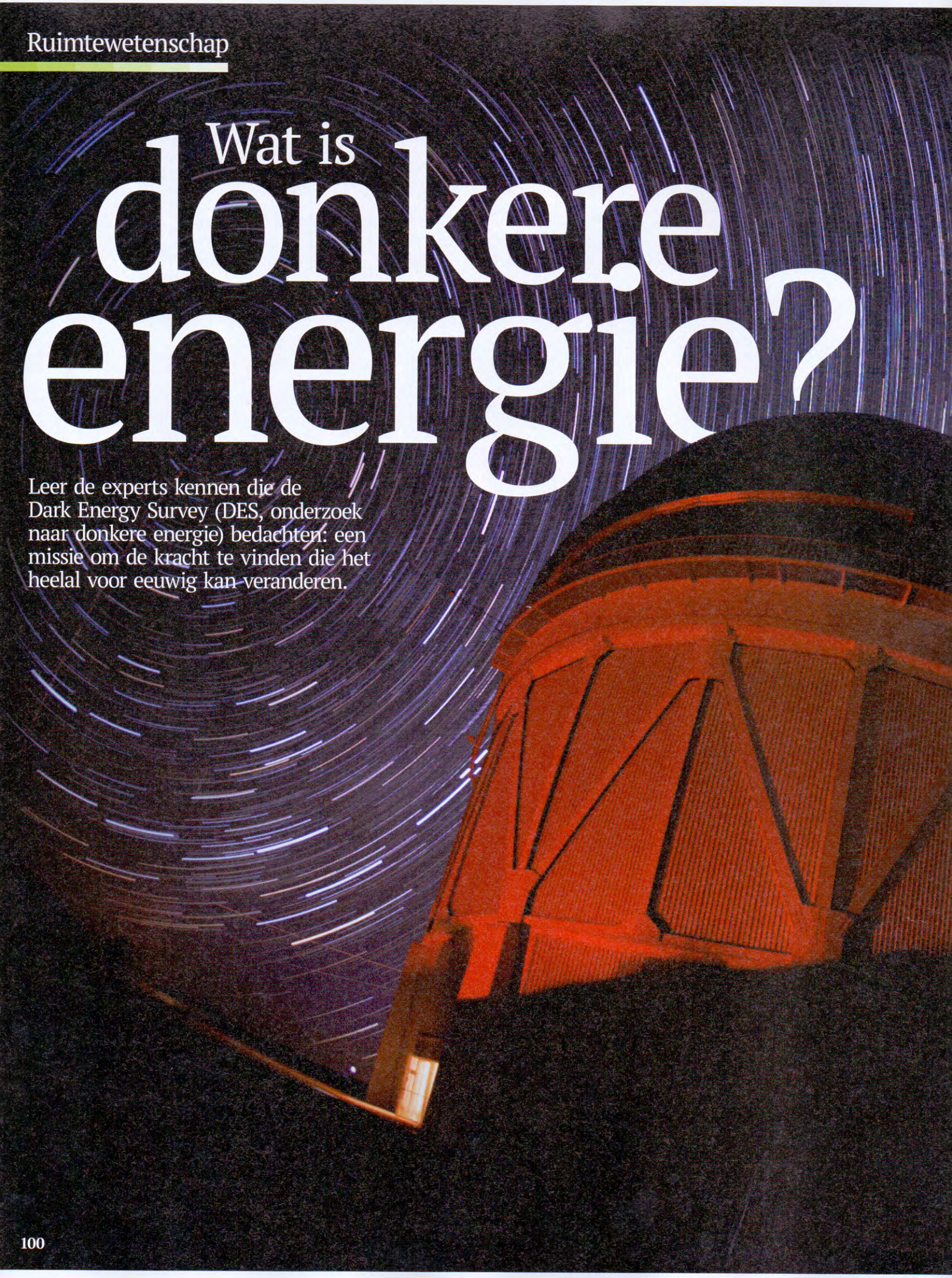
"Onze zon zet per seconde meer dan 600 miljoen ton waterstof om in helium."



© Sayo Studio; Tobias Roetsch; Alamy

Wat is donkere energie?

Leer de experts kennen die de Dark Energy Survey (DES, onderzoek naar donkere energie) bedachten: een missie om de kracht te vinden die het heelal voor eeuwig kan veranderen.



Wat is donkere energie?

Het bevindt zich in de kleinste hoekjes en gaatjes in het heelal; energie die door alles heen gaat. Hoewel hij overal lijkt te zijn, gedraagt deze 'donkere energie' zich welhaast als een mythisch beest dat onzichtbaar blijft voor onze meetapparatuur. Deze mysterieuze kracht lijkt de sterrenstelsels in het universum uiteen te drijven en jaagt zo de uitdijing van tijd en ruimte aan, al vanaf het moment dat alles wat we kennen, begon met de oerknal.

Belangrijk is dat hij zorgt dat de uitdijing versnelt. Het heelal dijt steeds sneller uit in plaats van steeds langzamer. Omdat de oerknal 13,8 miljard jaar geleden was, gaat dit tegen alle logica in. Donkere energie zou zelfs het uiteindelijke lot van het heelal bepalen: als het zo doorgaat, liggen alle sterrenstelsels binnen drie biljoen jaar zo ver van de Melkweg af, dat we ze niet meer kunnen zien; buiten de sterren in ons eigen stelsel zal het heelal donker lijken. Als donkere energie zijn greep op het heelal versterkt, kan het niet alleen sterrenstelsels uit elkaar trekken, maar wellicht ook de ruimtetijd zelf, tot op atoomniveau; de gevreesde 'Cosmic Rip'.

Hoewel maar liefst 68,3% van alle energie in het heelal bestaat uit donkere energie, weten we nog steeds niet wat het is. We weten alleen dát het er is, omdat de supernova's, sterrenstelsels en de kosmische achtergrondstraling dit allemaal impliceren. Wetenschappers zoeken dan ook op die plekken naar de energie die zolang voor hen verborgen bleef. Maar aanwijzingen leveren weer vragen op en dit zijn geen eenvoudige puzzels. Wat het heelal aan het doen is (steeds sneller uitdijen), is een botsing tussen de realiteit en de algemene relativiteitstheorie van Einstein. Volgens Einsteins theorie moet zwaartekracht alles juist vertragen. Met dat in het achterhoofd zoeken we naar de energie die onze overtuigingen in de war schopt. We moeten het heelal, dat zich steeds verder van ons verwijdert, onderzoeken om de ware aard van donkere energie te vinden. En we hebben de objecten in dat heelal daarvoor nodig.

De DECam van de Dark Energy Survey kan foto's van 570 megapixels maken bij de zoektocht naar donkere energie.

Hoog in de Andes staat het apparaat waarvan astronomen hopen dat het hun troefkaart zal zijn. Aan de telescoop van vier meter doorsnede bij Cerro Tololo Inter-American Observatory hebben ze de DECam gekoppeld. Dit is een hooggevoelige donkere-energie-camera die de Dark Energy Survey (DES) uitvoert.

In september 2012 was de DES de nieuwste poging om donkere energie te begrijpen. Hiervoor werd samengewerkt met de Zuidpooltelescoop op Antarctica, de Sloan Digital Sky Survey (SDSS) in het observatorium in New Mexico en de Vista Hemisphere Survey bij ESO's Cerro Parranal Observatorium in Chili. En werken meer dan 100 kosmologen van 23 instituten uit landen als Groot-Brittannië, Spanje, Brazilië en de VS aan het project.

De DECam, het belangrijkste onderdeel van de Dark Energy Survey, is een manusje-van-alles als het gaat om zoeken naar aanwijzingen. De multi-getalenteerde pixels kunnen zich niet alleen op één soort aanwijzing van donkere energie richten, maar op verschillende soorten, namelijk de supernova's, sterrenstelsels, kosmische achtergrondstraling en andere verscholen aanwijzingen. Om dit te bewerkstelligen, hebben de onderzoekers niet zomaar een handycam geïnstalleerd. De DECam beschikt over 570 megapixels, waardoor hij bij een groot deel van de zuidelijke hemel diep in de ruimte kan kijken. Door een bepaald deel van de ruimte zeer gedetailleerd in kaart te brengen, proberen wetenschappers te ontdekken wat de strijd zal winnen; de immer versnellende uitdijing of de algemene relativiteitstheorie.

De DECam is sinds augustus 2013 aan het werk. Hij zal 5 seizoenen (een seizoen duurt van augustus tot februari) lang circa 105 nachten per seizoen foto's maken van de sterrenhemel. "We kijken naar deze enorme galactische kaart als een manier om bewijs voor donkere energie te vinden en de aard ervan te ontrafelen," aldus het hoofd van de Dark Energy Survey wetenschappelijk comité, Ofer Lahav van University College London. "Een nog uitdagender doel voor de DES is verklaren of de versnelling van de uitdijing van het heelal inderdaad door donkere energie komt."

Toen de ontdekking van donkere energie eind jaren 1990 werd aangekondigd, was dit een schok voor wetenschappers die zich bezighielden met de uitdijing van het heelal. Astronomen wisten dat het heelal uitdijde na de oerknal, maar men dacht dat dit na bijna 14 miljard jaar wel trager ging. Er moest worden onderzocht hoe snel de uitdijing gaat, omdat dit cruciaal kan zijn voor de toekomst van het heelal. Dus begonnen twee teams van astronomen, het ene geleid door Saul Perlmutter en het andere door Brian Schmidt en Adam Riess, de uitdijingssnelheid proberen te meten door gebruik te maken van een specifiek type supernova.

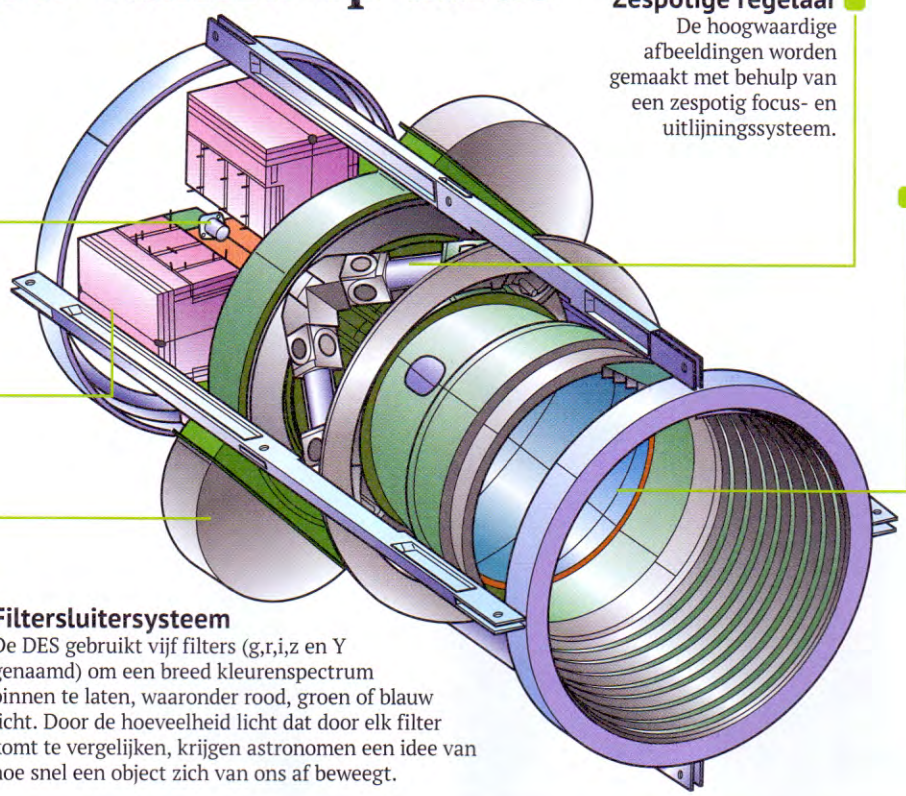
De soort supernova waar ze in geïnteresseerd waren, was er een van de categorie Type Ia; twee sterren die voorheen in een eeuwige dans verstrikt waren, waarbij een dode ster (witte dwerg) materiaal van zijn grotere en massievere metgezel opslokt en zijn eigen massa vergroot. Na verloop van tijd overschrijdt het de maximale massa die een witte dwerg kan hebben. Dit veroorzaakt een enorme explosie: de supernova die het pad naar meer kennis over donkere energie verlicht.

Het bijzondere van dit type Ia supernova's is dat ze altijd dezelfde helderheid hebben, omdat de limiet waarop een witte dwerg explodeert altijd dezelfde massa is: 1,4 keer de massa van onze zon. Dit maakt ze ideale standaardkaarsen vergelijkbaar met constante, identieke bakens die langs een kosmische weg staan en zo als ijkpunten voor afstandmeting kunnen dienen. Als je weet wat de lichtsterkte van elke supernova moet zijn en je zet dat af tegen hoe sterk of zwak het licht voor ons lijkt, kun je berekenen hoe ver ze van elkaar af staan.

De teams maten de roodverschuivingen van de supernova's. Dit vertelde hen in hoeverre het licht

> "We kijken naar deze enorme galactische kaart als een manier om bewijs voor donkere energie te vinden." **Ofer Lahav**

De krachtigste camera op aarde



570 megapixel CCD
Met CCD's (fotochips) die tien keer zo dik zijn als conventionele CCD's, kan de DECam niet alleen grote delen van de hemel bekijken, maar ook zwak rood licht van verre sterrenstelsels detecteren.

Zespotige regelaar
De hoogwaardige afbeeldingen worden gemaakt met behulp van een zespotig focus- en uitlijningssysteem.

Correctielenzen
Door de 5 lenzen, waarvan de grootste 98 cm in doorsnee is en 172 kg weegt, geeft het optische correctiesysteem een blikveld van 2,2 graden, maar hoeft het weinig bij te dragen aan de beeldkwaliteit

Uitlees-elektronica
Een complete digitale foto kan binnen 17 seconden uitgelezen en opgeslagen worden, terwijl de Blanco-telescoop in dezelfde tijd zich op een volgend punt in de hemel kan richten.

Filtersluitersysteem
De DES gebruikt vijf filters (g,r,i,z en Y genaamd) om een breed kleurenspectrum binnen te laten, waaronder rood, groen of blauw licht. Door de hoeveelheid licht dat door elk filter komt te vergelijken, krijgen astronomen een idee van hoe snel een object zich van ons af beweegt.

Interview

De super-nova-fotograaf

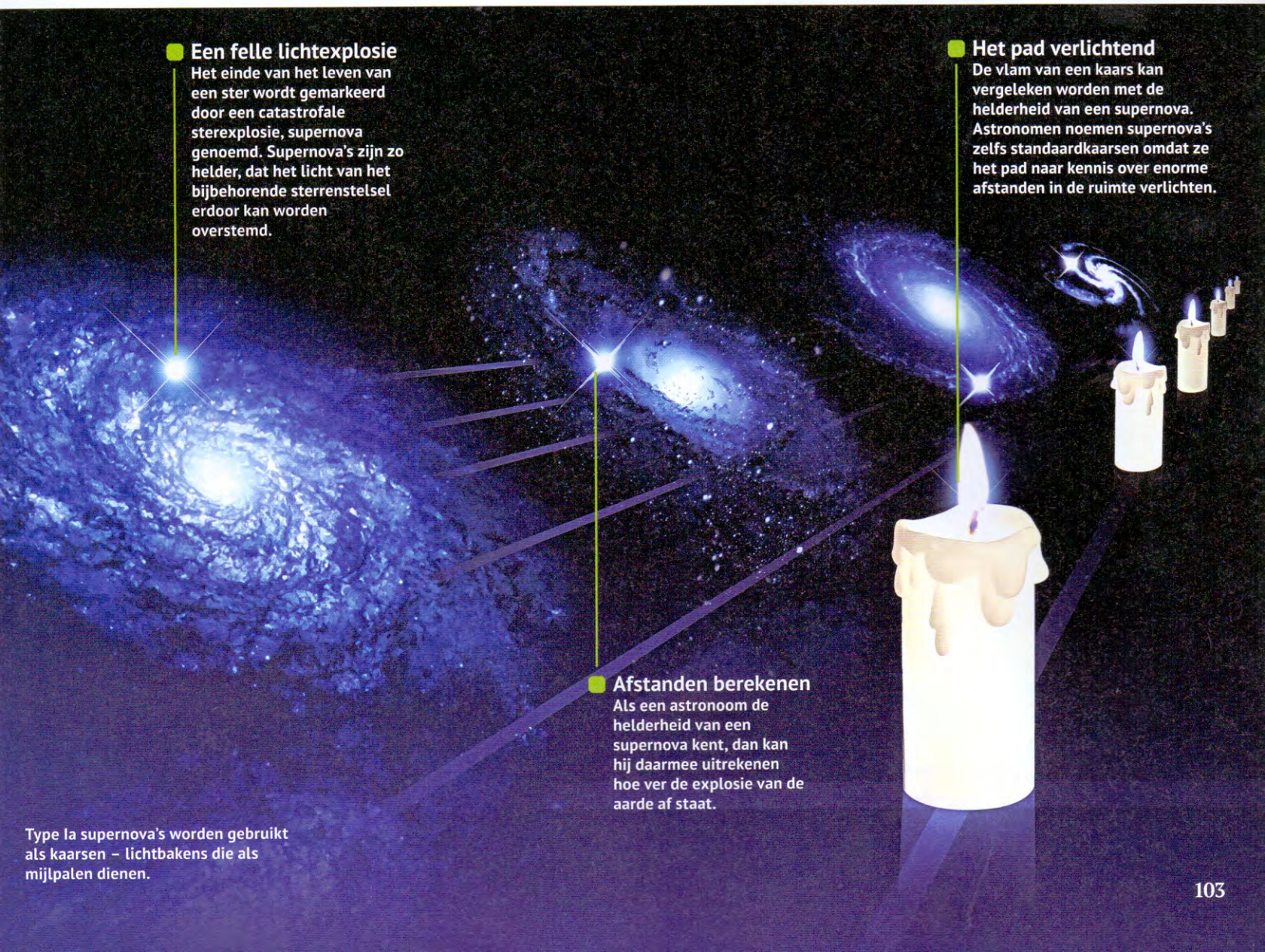
Prof. Bob Nichol, universiteit van Portsmouth

Hoe kan de DECam licht van verre supernova's opvangen en dit omzetten naar informatie over donkere energie?
"Een Type Ia supernova is de totale vernietiging van een koolstof-zuurstof witte dwergster, die alle massa in licht omzet. Omdat we weten hoeveel massa er ongeveer aanwezig is, kunnen we voorspellen hoe fel het licht zou moeten zijn. Dit betekent dat we ze kunnen gebruiken als 'standaardiseerbare kaarsen', wat betekent dat we ze zo kunnen manipuleren dat ze allemaal dezelfde felheid hebben op het hoogtepunt van de explosie. Zodra we de felheid op het hoogtepunt weten, kunnen we bepalen hoe ver weg ze staan. Daardoor kunnen we weer bepalen in welke mate de afstand na verloop van tijd veranderd is.
Astronomen hebben circa 1.000 Type Ia supernova's tot hun beschikking om afstanden in het heelal te meten, maar het is tijd dat we meer en betere supernova's verzamelen. De DECam is hier perfect voor omdat hij een groter blikveld heeft en betere sensors waarmee we dieper de ruimte in kunnen kijken. We vinden supernova's door elke paar dagen een foto van hetzelfde stuk hemel te nemen. Supernova-explosies veranderen in de loop van de tijd, dus zoeken we naar iets dat steeds feller wordt, een hoogtepunt bereikt en vervolgens vervaagt."

Hoe zeker zijn we ervan dat donkere energie achter de uitdijing van het heelal zit?
"Ik ben 100 procent zeker van de versnellende uitdijing van het universum. De oorzaak is een ander verhaal. Donkere energie is 1 verklaring en waarschijnlijk de populairste, maar we zijn nog geen stap dichter bij het begrijpen van wat donkere energie kan zijn."

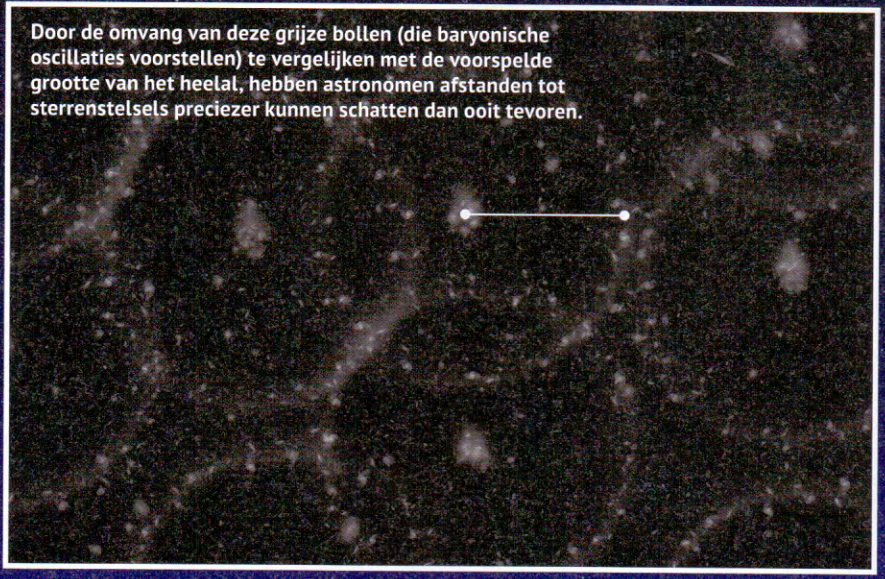
Welke problemen kom je tegen als je de DECam gebruikt om naar supernova's te kijken?
"Het grootste probleem is het classificeren van de supernova zodra we hem hebben gevonden. Het moet een Type Ia supernova zijn om hem als meetpunt voor afstanden te gebruiken. Helaas werd deze classificatie voorheen gedaan met een spectrumanalyse. Dit kan niet voor alle supernova's gedaan worden omdat er te veel zijn. Dus hebben we nu een fotometrische methode om supernova's te classificeren. Recentelijk werk in Portsmouth laat zien dat we de 'besmetting' van andere types terug kunnen brengen tot minder dan 3 procent."

Wat is er tot dusver bereikt met de DECam en de Dark Energy Survey?
"We hebben 100 nachten aan telescooptijd weten te bemachtigen bij de Engels-Australische telescoop. Dit is essentieel voor het succes van het onderzoek. We hebben ook onze eerste superheldere supernova gevonden. Deze is 1.000 keer zeldzamer dan Type Ia supernova's en lijkt 100 keer feller dan elke andere supernova."



Type Ia supernova's worden gebruikt als kaarsen – lichtbakens die als mijlpalen dienen.

Sloan Digital Sky Survey (SDSS)



Door de omvang van deze grijze bollen (die baryonische oscillaties voorstellen) te vergelijken met de voorspelde grootte van het heelal, hebben astronomen afstanden tot sterrenstelsels preciezer kunnen schatten dan ooit tevoren.

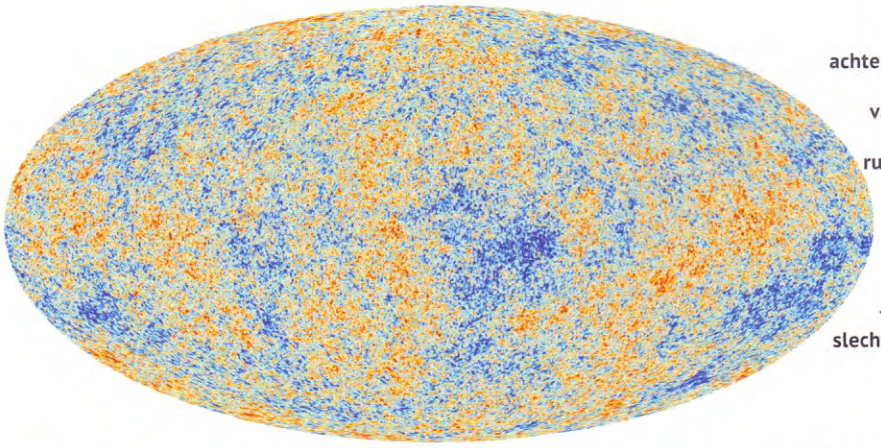
Groothoektelescoop
De Sloan Digital Sky Survey (SDSS) heeft een 2,5 meter brede optische groothoektelescoop om het Baryon Oscillatie Onderzoek (Baryon Oscillation Survey, BOSS) uit te voeren als onderdeel van het SDSS III-project.

Multi-filter camera
Om ruim 35% van de hemel te scannen, is de camera van de telescoop uitgerust met 30 CCD-chips die samen 120 megapixels resolutie opleveren. Vijf filters (u, g, r, z en i genaamd) zorgen dat de camera verschillende golflengtes kan vastleggen.

Drift scanning
Hoewel de telescoop niet kan bewegen, kan hij toch de hemel scannen. Door gebruik te maken van de draaiing van de aarde kan hij kleine strookjes van het gekozen gebied vastleggen.

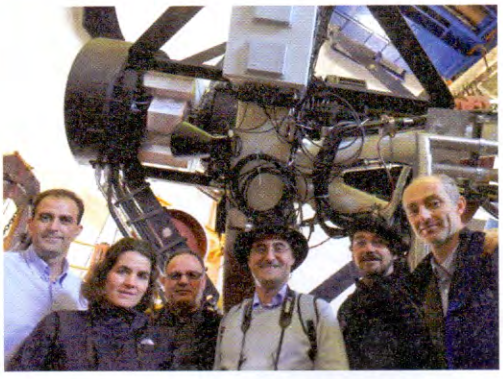
door de uitdijing uitgerekt was in langere, rodere golflengtes. Ze ontdekten dat de supernova's verder weg lagen dan het geval zou moeten zijn als de uitdijing van het heelal inderdaad vertraagde. Dit kon enkel betekenen dat de uitdijing van het heelal niet langzaam stopte, maar juist versnelde. Niemand wist wat deze versnelling veroorzaakte, dus noemden ze deze mysterieuze kracht 'donkere energie'. Hoewel ze niet wisten wat de donkere energie was, wilden beide teams als eerste hun resultaten publiceren en zo het andere team verslaan. Uiteindelijk wonnen ze, ondanks dat geen van beide teams wist wat donkere energie was, gezamenlijk de Nobelprijs voor hun ontdekking. Ook nu staan supernova's onder de aandacht van de DECam.

Zover we nu weten, was het vroege universum gevuld met het geluid van kosmische trillingen. Een van de manieren waarop de DECam donkere energie meet, is door verband te leggen tussen het verafgelegen, oude heelal en het heelal dat we nu om ons heen zien. Na de oerknal was het universum een bloedhete soep van deeltjes; zaken als sterrenstelsels, sterren en planeten bestonden nog niet. Enorme drukgolven (eigenlijk geluidsgolven) golfden door deze plasmasoep en op de golfpieken was het plasma dichter dan in de golfdalen. Toen het universum door uitdijing afkoelde, bevroren deze golven ter plekke en astronomen vonden ze verborgen in de kosmische achtergrondstraling die 370.000 jaar na de oerknal werd uitgezonden. Tussen toen en nu heeft het dichtere materiaal



De kosmische achtergrondstraling, zoals in 2013 vastgelegd door de Planck-ruimtetelescoop. Het is een foto van het oudste licht in ons heelal, uitgezonden toen het heelal slechts 370.000 jaar oud was.

Groepsfoto van de medewerkers aan de Dark Energy Survey, voor de DECam. Enrique Gaztañaga is de derde van rechts in de middelste rij.



Spaanse DES-wetenschappers staan voor de Blanco telescoop. V.l.n.r.: Juan de Vicente, Laia Cardiel-Sas, Ramon Miquel, Juan García-Bellido, Enrique Gaztañaga en Francisco Castander.

Interview

Luisteren naar microgolven

Dr. Enrique Gaztañaga, professor kosmologie, Instituto de Ciencias del Espacio

Waar komen de baryonische akoestische oscillaties, ook wel BAO's genoemd, vandaan?
"Ze komen uit de vroegste momenten van het heelal, toen het gedomineerd werd door straling. Doorgaans versterkt de zwaartekracht kleine, dichte opeenpakkingen van oermaterie of energieverstoringen; hoe meer materie of energie, hoe sterker de zwaartekracht. Aantrekkingskracht is het basismechanisme achter de groei van structuren in het heelal (zoals sterrenstelsels of sterren). Maar in die vroegste tijd werkte stralingsdruk de zwaartekracht tegen. Dit veroorzaakte oscillaties die vergelijkbaar zijn met geluidsgolven of golven in de zee."

Over welke eigenschappen van donkere energie kunnen de BAO's ons iets vertellen?
"We willen vooral meten wat de dichtheid van donkere energie is en hoe het zich ontwikkelt in de loop der tijd. Dit kan nieuwe inzichten over de aard van donkere energie opleveren. Gecombineerd met andere metingen, zoals de groeiratio van de structuren, wat we ook kunnen meten met de DES, kunnen we bepalen of het model van donkere energie klopt met de data. Zo niet, dan moeten we de natuurwetten herschrijven, zoals de wet van zwaartekracht op grote schaal."

Waarom nemen we aan dat donkere energie de drijvende kracht is achter de uitdijing van het heelal?
"Met enkel de metingen van BAO's en supernova's is het moeilijk te bepalen dat donkere energie de drijvende kracht achter uitdijing is, omdat er veel mogelijke modellen voor donkere energie zijn. Maar we kunnen tenminste het simpelste model bevestigen of verwerpen: de kosmologische constante (de sterkte van de in het heelal aanwezige rauwe energie). Om de oorzaak van de kosmische versnelling te begrijpen, moeten we de resultaten van de BAO's en supernova's combineren met de metingen van de groeiratio van structuren in het heelal. Dit is hoe snel dichtheidsverstoringen groeien. We kunnen dit doen met de DES door het meten van het clusteren van sterrenstelsels, zwakke zwaartekrachtlenzen en de overvloed aan stelselclusters."

Heb je al iets belangrijks ontdekt?
"Tot nu toe heeft de DES te weinig data verzameld om BAO te meten, maar we testen de andere methoden uit om groei te meten en bereiden de analyse van BAO voor door systematische effecten te bestuderen die de BAO-meting kan beïnvloeden zodra we genoeg data hebben."

Is het meten van BAO's een eenvoudige meting?
"Er zijn verschillende effecten waar we rekening mee moeten houden om een goede BAO-meting te doen. Sommige hebben te maken met de kwaliteit van de data en de kalibratie. We moeten bijvoorbeeld de besmetting door voorgrondstraling van sterren en stof in ons eigen sterrenstelsel elimineren, de ruis van de atmosfeer van de aarde of van instrumentgeluiden en –schade (bijvoorbeeld kosmische stralen, satellietsporen of verstrooid licht). Sommige effecten hebben te maken met de vorm van de geobserveerde BAO-oscillaties, die weer onder invloed staan van andere effecten, zoals non-lineaire zwaartekrachtontwikkeling of de beïnvloeding van het zichtbare licht door de voor ons onzichtbare onderliggende massa."

in de golfpieken langzaamaan meer en meer materiaal aangetrokken, wat tot sterrenstelsels, clusters van sterrenstelsels en uiteindelijk enorme ketens van clusters, soms wel miljoenen lichtjaren lang, leidde. Door te kijken naar vage sterrenstelsels, kunnen astronomen kaarten van het heelal samenstellen waarop de enorme ketens staan die uit de golfpieken ontstonden. Astronomen hebben op supercomputers zelfs gigantische simulaties laten lopen die de evolutie van het universum en de groei van deze golven met leegtes ertussenin laten zien. Omdat deze golven, als je op hele grote schaal kijkt, eruitzien als vezels, spreken astronomen van het kosmische web.

Wat is dan het verband? Als de grootste structuren in het heelal uit deze golven ontstonden, die wetenschappers baryonische akoestische oscillaties (BAO's) noemen, dan zal de mate van uitdijing van het heelal bepaald hebben hoe groot deze structuren hebben kunnen groeien. Zo zijn ze eigenlijk een soort kosmische 'meetlatten' waarmee het universum gemeten kan worden, dus noemen wetenschappers ze 'standaardmeetlatten'. Ze worden bepaald door de afstand die de golven reisden voor ze ter plekke bevroren. Dit wordt de geluidshorizon genoemd; het is de snelheid van geluid vermenigvuldigd met 370.000 jaar (de leeftijd van het universum toen de golven bevroren). Door de uitdijing van het heelal zijn de golven naar circa 450 miljoen lichtjaar gegroeid. De DECam zal de ketens van sterrenstelselclusters waar deze golven uit bestaan bestuderen op verschillende tijdstippen in de levensloop van het heelal; dit is mogelijk omdat hoe verder je het heelal in kijkt, hoe verder je terugkijkt in de tijd. Zo kan de DECam de groei van de golven in verschillende stadia van het heelal meten en nagaan hoe sterk donkere energie vroeger was in vergelijking met vandaag.

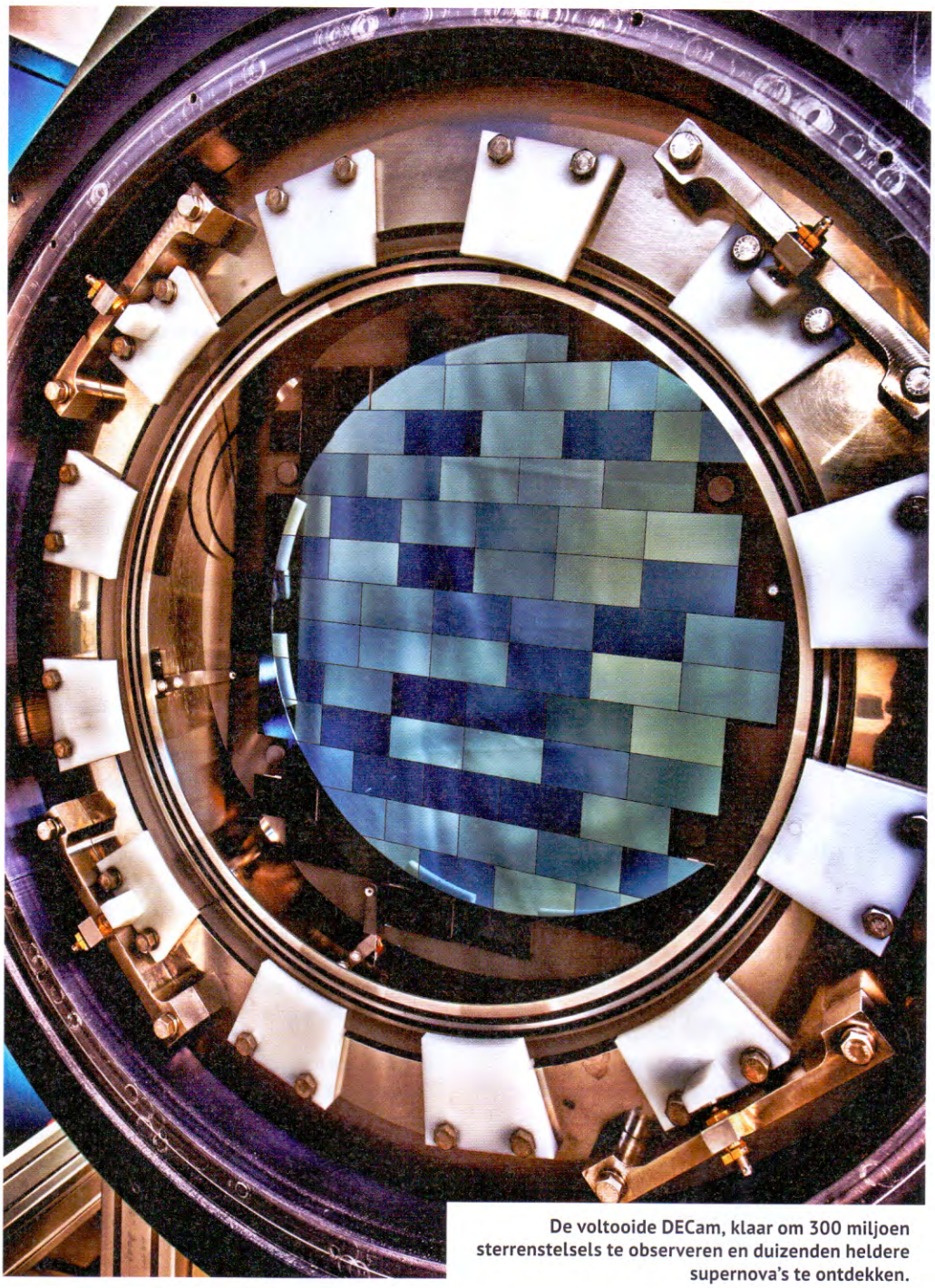
Bij het Apache Point Observatorium in New Mexico maakt een van de partners van de DECam, de SDSS III in de 2,5 meter telescoop van de Sloan Foundation, bij het zoeken van donkere energie ook gebruik van de BOA's. Bij de Sloan Foundation is het een onderdeel van hun Baryon Oscillatie Spectroscopisch Onderzoek (BOSS). Enkele jaren geleden bepaalde het onderzoek de afstand tot sterrenstelsels die meer dan 6 miljard lichtjaar ver liggen, met een nog nooit vertoonde precisie. Hierdoor werd het onderzoek naar donkere energie verder afgebakend.

Het onderzoek toont een vorm van donkere energie die constant blijft gedurende de geschiedenis van het heelal. "We weten nog niet wat donkere energie is," legt astronoom en directeur van de SDSS Daniël Eisenstein uit, "maar we kunnen de eigenschappen ervan meten." Er zijn overal sterrenstelsels in het heelal; sterrengroepen die bijeen worden gehouden door zwaartekracht en zo majestueuze structuren vormen. De zwaartekracht kan ze nog verder binden tot enorme verzamelingen van tientallen, honderden of zelfs duizenden sterrenstelsels; sterrenstelselclusters.

De DECam gaat een tijd deze clusters tellen en gaat daarbij terug naar het moment dat het universum de helft van zijn huidige grootte was. Maar hoe helpt dit astronomen bij het begrijpen van donkere energie? Ga maar na: zwaartekracht trekt stelsels naar elkaar toe, maar donkere energie werkt in tegengestelde richting en probeert de stelsels uit elkaar te drijven. Dus het is een intergalactische touwtrekwedstrijd; wint de zwaartekracht het van donkere energie of zal donkere energie stelsels uit elkaar drijven en zo de groei van clusters beperken?

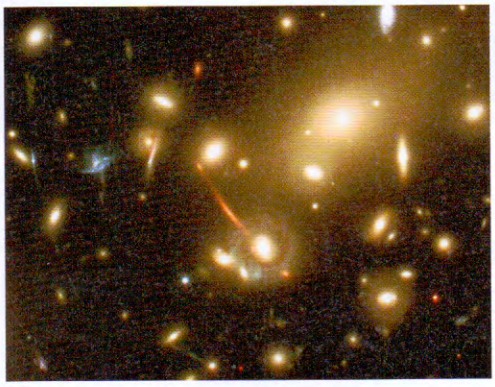
Het idee is dat de DECam sterrenstelsels onderzoekt in verschillende levensfases van het heelal, kijkt hoe groot ze waren en hoe snel ze groeiden op die verschillende momenten in de tijd. We weten dat donkere energie de strijd nu aan het winnen is, omdat het heelal uitdijt. Maar vroeger, toen het heelal kleiner was en alles dichter bij elkaar zat, had zwaartekracht een grotere invloed dan donkere energie. Daarnaast willen astronomen weten of de kracht van donkere energie altijd constant is geweest of dat dat veranderd is. Als de kracht verschilt, heeft dat gevolgen voor de toekomst, omdat het betekent dat de kracht van de donkere energie weer kan veranderen. Dat heeft weer invloed op de evolutie van het universum.

Met de technologie van vandaag kunnen wetenschappers de massa van sterrenstelselclusters meten. Door computersimulaties, gebaseerd op wat we



De voltooide DECam, klaar om 300 miljoen sterrenstelsels te observeren en duizenden heldere supernova's te ontdekken.

De Zuidpooltelescoop in Antarctica jaagt in samenwerking met de DECam op donkere energie.



Effect van de zwaartkrachtlens op het Abell 2218-cluster: verre stelsels lijken uitgerekt achter de lens.

> "We weten nog niet precies wat donkere energie is, maar we kunnen de eigenschappen ervan meten." **Daniel Eisenstein**

weten over het universum en donkere energie, berekenen ze wat de massa van clusters zou moeten zijn, maar we weten niet zeker dat dit ook zo in het echt is. Waar zoekt DECam dan naar? De fysieke omvang van clusters geldt niet als richtlijn, omdat sommige clusters een hogere dichtheid hebben dan andere. Het tellen van alle stelsels in een cluster voldoet ook niet, omdat het twee zaken negeert; ten eerste het hete gas dat de ruimte tussen stelsels in een cluster inneemt en ten tweede de beruchte en onzichtbare donkere materie.

De Zuidpooltelescoop in Antarctica onderzoekt hoe het hete gas in de clusters de fotons verspeidt die worden uitgezonden door de kosmische achtergrondstraling. Dit geeft astronomen een indicatie van de hoeveelheid gas in een cluster. Tegelijkertijd zal de Blanco Telescoop (waar de DECam in gemonteerd is) zoeken naar een fenomeen dat door Albert Einstein voorspeld is: zwaartekrachtlenzen.

Denk aan een enorme lens in de ruimte dat objecten erachter (zoals sterrenstelsels) vergroot. Maar hoe kan de ruimte als lens fungeren? Dit kan doordat objecten de ruimte ombuigen met hun zwaartekracht, waardoor (afhankelijk van hun massa) zij de lichtstralen van objecten achter zich ombuigen. Soms is de zwaartekrachtlens duidelijk en zien stelsels er veel helderder uit. Maar de lens is imperfect en de beelden van verder weg gelegen stelsels lijken verwrongen, vervaagd of verbogen of ze verschijnen op meerdere plekken omdat het licht in verschillende richtingen wordt afgebogen. De meest perfecte vorm van een zwaartekrachtlens wordt een Einsteinring genoemd. Het licht van het object wordt dan zo gebogen dat het een complete ring rond de lens vormt. Andere keren is het lenseffect heel klein, soms maar 2 procent. Sterrenstelselclusters zijn perfecte zwaartekrachtlenzen omdat ze zo massief zijn; hoe zwaarder het cluster, hoe meer licht er verbogen wordt. De DECam kan de massa van een cluster meten door te kijken naar hoe groot de zwaartekrachtlens is die het cluster veroorzaakt. Tegelijkertijd kan het 300 miljoen individuele sterrenstelsels onderzoeken. De DECam kan dus sterrenstelselclusters tellen en 'wegen', supernova's meten en de geluiden van het heelal in kaart brengen. Het onderzoeksinstrument lijkt dus een alleskunner. Maar of het donkere energie weet te vangen en zichtbaar te maken? Tijd zal het leren.

De DECam hoort bij de Cerro Tololo Inter-American Observatory, hoog in het Chileense Andesgebergte.

Interview

We praten met dr. Kathy Romer van de universiteit van Sussex over hoe ze sterrenstelsels gebruikt om donkere energie te onderzoeken

Hoe belangrijk is de Dark Energy Survey voor wetenschappers bij hun poging om donkere energie te begrijpen?
"De Dark Energy Survey gebruikt de DECam om miljoenen sterrenstelsels te lokaliseren in een groot deel van de zuidelijke hemel. Hij zal ook duizenden supernova's vinden. De stelsels en supernova's kunnen gebruikt worden als ijkpunten om de omvang, vorm en geschiedenis van het heelal te ontdekken. Dit zijn allemaal eigenschappen die onder invloed van donkere energie staan. Daarom komen we, door observaties met theoretische voorspellingen te vergelijken, steeds dichter bij het vinden van de juiste theorie over donkere energie.
Het sterrenlicht van de stelsels die we met de DECam observeren, is meer dan 10 miljard jaar oud (hoe verder het stelsel van ons af ligt, hoe ouder het licht is). Dus dit experiment is te vergelijken met een archeologische opgraving. We kunnen het gedrag van de stelsels niet beïnvloeden, maar door ze in detail te onderzoeken, leren we veel over het universum ten tijde van het moment dat het licht uitgezonden werd."

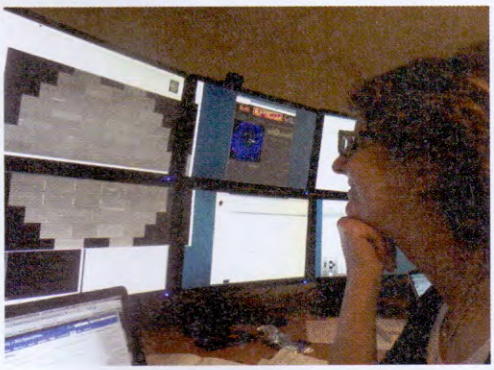
Kan donkere energie veranderd zijn sinds de tijd van het vroege universum?
"In de meeste modellen verandert donkere energie haar eigenschappen in de loop der tijd, maar bij slechts een paar modellen verandert het zijn eigenschappen naar gelang de locatie. In deze modellen blijft donkere energie constant in ruimte, maar niet in tijd. Er is echter één belangrijke uitzondering; het model dat de 'kosmologische constante' heet. Dit model werd circa 100 jaar geleden voor het eerst geopperd door Albert Einstein (en decennia voordat de versnelde uitdijing geregistreerd werd). Hierin is de donkere energie constant in zowel ruimte als tijd. Het is het simpelste model van donkere energie en wordt het meest ondersteund door de huidige observaties."

Hoe werkt de Zuidpooltelescoop samen met de DES bij het bestuderen van sterrenstelselclusters?
"Sterrenstelselclusters zijn niet alleen in het optische deel van het spectrum goed zichtbaar (het werkgebied van de DECam), maar ze worden ook gezien in het microgolfstralingsdeel van het spectrum (omdat ze enorme hoeveelheden heet, diffuus gas bevatten). De Zuidpool is bijna de enige plek op aarde waar straling van sterrenstelselclusters door kunnen dringen

tot grondniveau, omdat het de droogste plaats op aarde is. Op vrijwel alle andere plekken wordt de straling uit de ruimte geabsorbeerd door de watermoleculen in de atmosfeer (de magnetron in je keuken werkt ook op dit principe).
Een grote stralingstelescoop op de Zuidpool (de Zuidpooltelescoop) heeft de afgelopen jaren de hemel bekeken op zoek naar sterrenstelselclusters. Door sterrenstelseldata van de DES en stralingsdata van de SPT te combineren, kunnen we de massa van en afstand tot clusters veel preciezer bepalen dan wanneer we de data apart zouden bekijken."

Wat gebeurt er als Einsteins algemene relativiteitstheorie ontoereikend of te eenvoudig blijkt om kosmische versnelling te verklaren?
"Einsteins zwaartekrachttheorie is aantrekkelijk en is de afgelopen honderd jaar zo populair geweest omdat het zo eenvoudig is. Het kan zijn dat het té eenvoudig is en dat er, op basis van toekomstige ontdekkingen, wat verdieping aan toegevoegd moet worden.
Als we dat doen, hoeven we onze theorieën over de geschiedenis van het heelal niet radicaal te veranderen, maar het zal wel onze voorspellingen voor de kosmische toekomst veranderen: een versnellende uitdijing heeft de vervelende consequentie dat er uiteindelijk een Cosmic Rip plaatsvindt. Maar als zwaartekracht zich anders gedraagt dan dat we nu denken, is de toekomst wellicht minder catastrofaal."

"Supernova's kunnen gebruikt worden als ijkpunten om de kosmische geschiedenis na te gaan."



Dr. Kathy Romer staat naast de Blanco-telescoop met daarin de DECam (boven) en analyseert de resultaten (onder).

© Fermilab; NASA; David Kirkby; Peters & Zabransky; STFC; Reidar Hahn

50 ONGELOOFLIJKE FEITEN OVER ZWARTE GATEN

Er zijn weinig dingen die net zo ontzagwekkend en angstaanjagend zijn als zwarte gaten. Deze onzichtbare giganten zijn de grote architecten en vernietigers van het universum.

1 Veel zwarte gaten zijn begonnen als sterren

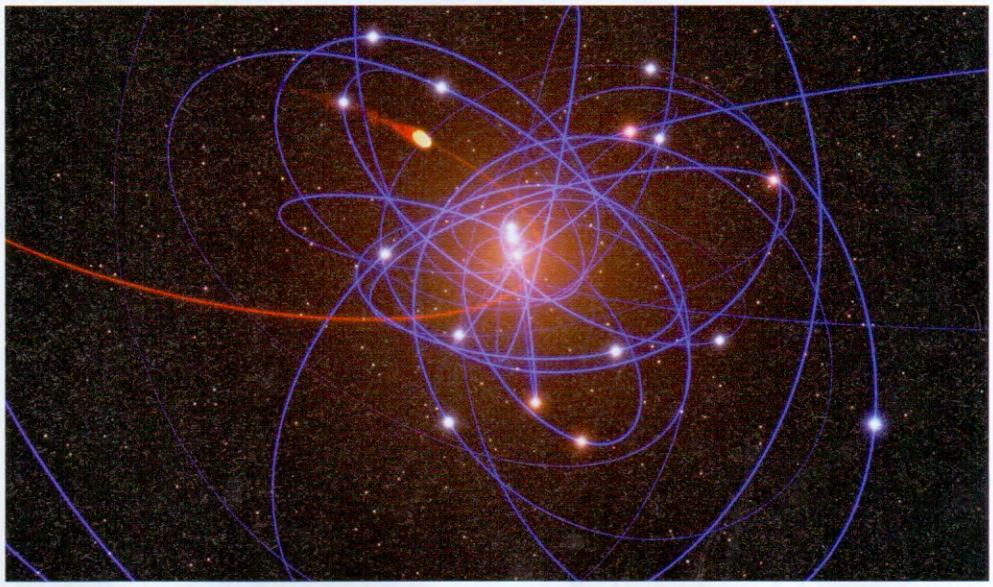
"Terwijl sterren ouder worden, raakt de brandstof uiteindelijk op."

Sterren vechten hun hele leven lang tegen hun eigen zwaartekracht. Hun enorme massa zorgt ervoor dat het gas constant naar de kern wordt getrokken, maar in plaats van in te storten, botsen de atomen op elkaar en fuseren, waardoor kernexplosies plaatsvinden. Straling drukt tegen de zwaartekracht in naar buiten, waardoor de ster een gloeiende gasbol blijft.

Naarmate sterren ouder worden, zijn er steeds meer atomen gefuseerd tot zwaardere elementen. Uiteindelijk zijn er te weinig kernexplosies die voor de straling zorgen, waardoor de zwaartekracht wint en de ster begint in te storten. Bij kleinere sterren, zoals onze zon, is zo'n instorting niet compleet en de afstotende krachten zijn nog afdoende om de laatste sintels in leven te houden als een witte dwerg. Voor een witte dwerg die groter is dan 1,4 keer de massa van onze zon (ook wel bekend als de Chandrasekhar-limiet) zijn deze krachten niet sterk genoeg. De ster blijft dan samentrekken tot een neutronenster met een hoge dichtheid, of een zwart gat.

2 Superzware zwarte gaten vernietigen niet alles om zich heen

Een actief superzwaar zwart gat is één van de gewelddadigste plekken in het heelal. Quasars slokken bovendien het equivalent van tienduizenden zonnen per jaar op, maar op een of andere manier verdwijnen de omliggende sterrenstelsels niet in de leegte. Ondanks de angstaanjagende reputatie, gedragen zwarte gaten zich niet heel anders dan andere zware objecten in het universum, tenzij je te dichtbij komt. Net zoals de aarde niet opeens in de zon zal storten, zullen objecten in een stabiele baan rond een zwart gat niet ineens opgeslokt worden.



3 Zwarte gaten vertragen de tijd

Voor een toeschouwer van buiten lijkt een object dat in een zwart gat valt te vertragen totdat het blijft hangen bij de rand.

4 Een zwart gat geeft geen aanwijzingen over wat het heeft opgeslokt

Als materie een zwart gat binnengaat, wordt het uitgerekt, uiteengetrokken en uiteindelijk vernietigd. Zelfs als er iets uit zou lekken, zou het op geen enkele manier nog herkenbaar zijn.

5 Ze kunnen oneindig groot worden

In theorie groeien zwarte gaten oneindig door, maar hoe groot ze kunnen worden, ligt aan de omgeving waarin ze zich bevonden.

6 Superzware zwarte gaten hebben dezelfde massa als het zonnestelsel

Superzware zwarte gaten bevatten de massa van minstens 100.000 zonnen, samengepakt in een ruimte die ongeveer zo groot is als ons zonnestelsel.

7 De grootte van een zwart gat doet ertoe, niet de massa

Zelfs enkele microgrammen aan materie kan een zwart gat veroorzaken, als het maar genoeg samengedrukt wordt.

8 Sommige sterrenstelsels bevatten wellicht ultrazware zwarte gaten

Het stelsel OJ 287 heeft twee zwarte gaten. Men denkt dat één ervan de massa van 18 miljard zonnen heeft.

9 Zwarte gaten trekken sterren aan, waardoor ze hun locatie onthullen

Zwarte gaten kunnen niet direct geobserveerd worden, maar het effect dat ze hebben op hun omgeving, verraadt hun aanwezigheid. In het sterrenbeeld zwaan wordt een blauwe superreus-ster in een druppelvorm getrokken, waardoor het licht van de draaiende ster lijkt te flikkeren. De ster draait in 5,6 dagen rond het zwarte gat, waarbij de buitenste gaslaag met 1500 km per seconde van de oppervlakte wordt getrokken, richting een onzichtbaar punt.

De superreus is onderdeel van een dubbelster en zit vast in een fatale dans met het zwarte gat Cygnus X-1. Het draaiende zwarte gat trekt ruimte en tijd met zich mee en stof en gas van de ster verzamelen zich in een enorme draaiende accretieschijf. Deeltjes vliegen in een spiraal richting de waarnemingshorizon, vergelijkbaar met een draaikolk. Door de frictie ontstaan er heldere flitsen en uitbarstingen van röntgenlicht.

Magnetische velden
Terwijl de zwarte gaten draaien, schieten de magnetische velden in de accretieschijf op en neer, waardoor een donutvormig magnetisch veld rond de schijf ontstaat.

Dubbelster
Sommige zwarte gaten zijn vroeger de helft van een dubbelster geweest en blijven sterk verbonden met de andere ster.

10 Zwarte gaten draaien sneller dan de ster waaruit ze zijn voortgekomen

Als een ster om zijn as draait terwijl hij sterft, blijft hij draaien als hij in een zwart gat verandert. Maar de omwenteling zal niet op dezelfde snelheid gaan. De ster is net als een kunstschaatser, die met uitgestrekte armen pirouettes draait. Als hij zijn armen intrekt, begint hij sneller te draaien. Dit komt door de wet van behoud van energie. Als de stervende ster instort en samentrekt, wordt de diameter verkleind (zoals bij het intrekken van de armen van de schaatser) en begint hij sneller te draaien.

Accretieschijf
Rond een draaiend zwart gat ligt een roterende schijf van materie, die versnelt als hij dichter bij de waarnemingshorizon getrokken wordt. De stof- en gasdeeltjes wrijven tegen elkaar aan en creëren zo een gloëdvolle straling.

Singulariteit
In het hart van het zwarte gat, buiten het zicht, wordt materie in 1 punt samengeperst. Natuurkundewetten gelden niet meer en ruimte en tijd houden op te bestaan.

Jets
Vanuit de polen van een draaiend zwart gat stuwen magnetische velden materiaal weg van de enorme aantrekkingskracht, om het in heldere straalstromen het universum in te spuiten.

Waarnemingshorizon
De waarnemingshorizon is het 'point of no return'. Vanaf dit moment is de benodigde snelheid om aan de aantrekkingskracht te ontsnappen, groter dan de lichtsnelheid.

11 Het centrum van een zwart gat kan een singulariteit bevatten

De waarnemingshorizon van een zwart gat kan duizenden kilometers in doorsnede zijn, maar zodra materie over de rand gaat, stopt het niet meer met bewegen. Men weet niet precies wat er daarbinnen gebeurt, maar volgens Einsteins relativiteitstheorie wordt binnen een zwart gat de ruimtetijd extreem verbogen en wordt alles naar één punt getrokken; dat punt wordt een singulariteit genoemd. Elke weg leidt naar het centrum, waar materie onherkenbaar samengeperst wordt. De singulariteit is oneindig klein en heeft een oneindig hoge dichtheid, waardoor een oneindige verbuiging van ruimtetijd gecreëerd wordt. Zodra iets de waarnemingshorizon overschrijdt, kan het niet meer ontsnappen aan de aantrekkingskracht van het centrum.

12 Sommige zwarte gaten hebben jets

Sommige zwarte gaten spuwen indrukwekkende hoeveelheden energie uit vanaf hun polen. Dit fungeert als een baken dat de plek van het zwarte gat verraadt. Als gas en stof naar de waarnemingshorizon getrokken worden, zorgen magnetische velden ervoor dat een deel van de energie naar buiten wordt gestoten in de vorm van twee energieke jets (straalstromen), zoals bij een deeltjesversneller. NASA's infrarood ruimtetelescoop WISE heeft twee zwarte gaten ontdekt die om elkaar heen draaien. Dit veroorzaakt zulke intense verstoringen in magnetisme en zwaartekracht, dat hun jets in spiraalvorm worden uitgestoten.

13 Ze lekken straling

Stephen Hawking bewees dat zwarte gaten energie konden uitstoten. Door deze 'Hawking-straling' wordt de samengeperste inhoud terug het heelal in gestuurd.

14 Het duurt miljoenen jaren om 1 omwenteling om ons eigen zwarte gat te maken

Sagittarius A* ligt circa 26.000 lichtjaar van ons zonnestelsel af. Het kost ons 225 miljoen jaar om 1 keer rond het centrum van ons sterrenstelsel te draaien.

15 Ze werden eerst donkere sterren genoemd

Het idee van zwarte gaten is al veel ouder dan de wetenschap die het bestaan ervan voorspelde; in de 18e eeuw werden ze 'donkerere sterren' genoemd.

16 Cygnus X-1 was het eerste ontdekte zwarte gat

Cygnus X-1 is een van de helderste radiobronnen in de hemel en is nu bezig met het opslokken van een blauwe superreus.

17 Zwarte gaten veroorzaken golven

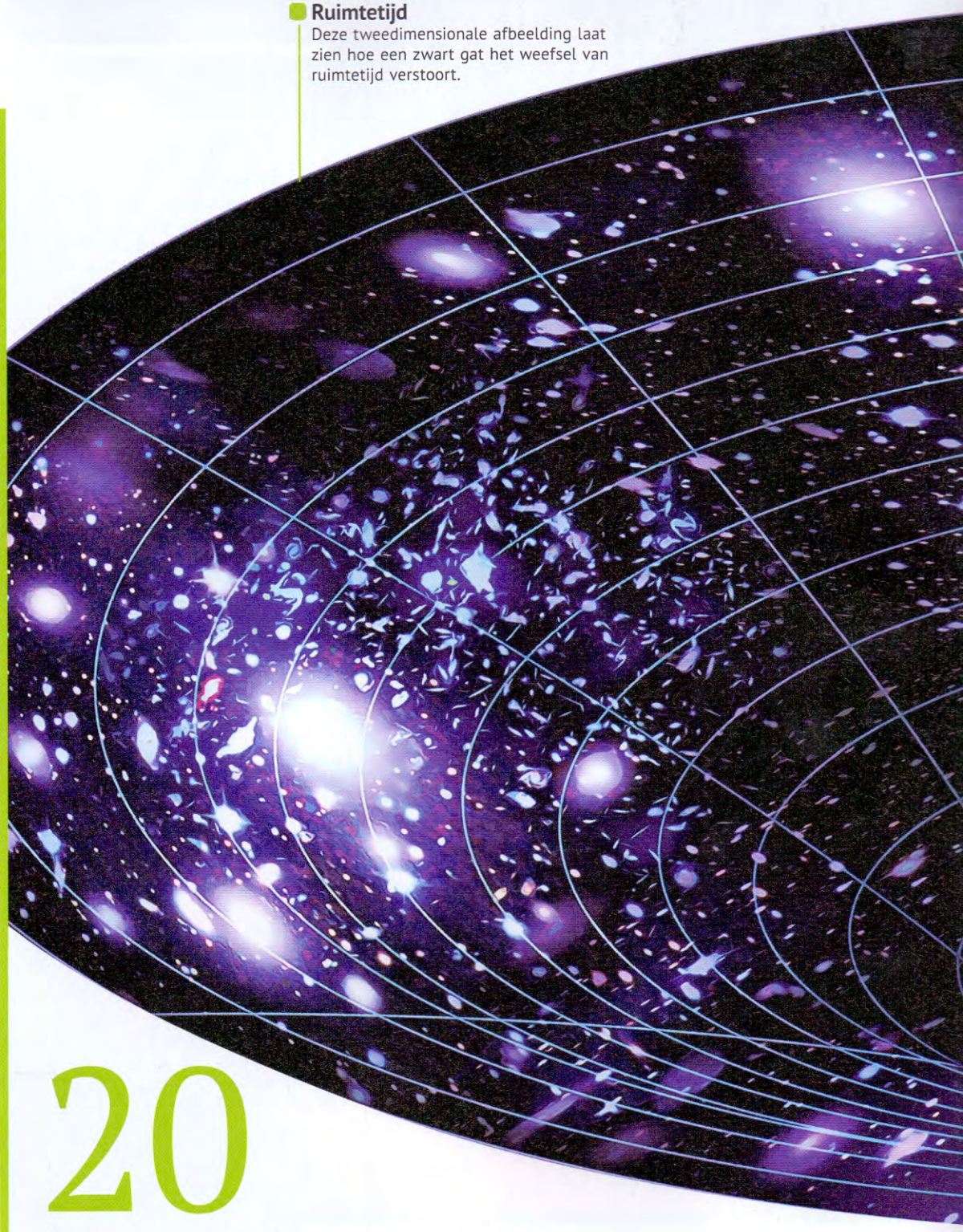
Einstein voorspelde dat als zware objecten (zoals zwarte gaten) door de ruimte bewegen, ze zwaartekrachtgolven veroorzaken die rimpelingen in de ruimtetijd veroorzaken.

18 Het universum is gevormd door zwarte gaten

Superzware zwarte gaten worden in het centrum van bijna elk groot sterrenstelsel gevonden en fungeren als de centrale as waar sterren en planetenstelsels omheen draaien.

19 Stellaire zwarte gaten hebben de massa van vijf of meer zonnen

Zwarte gaten die voortkomen uit stervende sterren bevatten meestal minimaal de massa van vijf zonnen. Dit is samengepakt in een gebied dat slechts enkele kilometers in doorsnede is.



Ruimtetijd
Deze tweedimensionale afbeelding laat zien hoe een zwart gat het weefsel van ruimtetijd verstoort.

20 Zwarte gaten verbuigen ruimtetijd

Albert Einstein bewees dat het universum gemaakt is van een weefsel dat ruimtetijd genoemd wordt. Net zoals een stuk stof kan ruimtetijd verbogen, verdraaid en uitgereikt worden. Zware objecten, zoals planeten en sterren, veroorzaken deuken in de ruimtetijd, vergelijkbaar met een bowlingbal op een trampoline. Hoe meer massa er in één gebied verzameld is, hoe groter de indruk op het weefsel en hoe meer energie er nodig is om aan de zwaartekracht van het object te ontsnappen.

Een object dat om een ander object draait, kan vergeleken worden met een indoor-fietser. De fietser wil in een rechte lijn fietsen, maar de gebogen vloeren dwingen hem om in cirkels te rijden. Als ze hard genoeg trappen, kunnen ze over de bovenste rand van de baan komen en als ze afremmen, worden ze weer naar het midden getrokken.

21 Zwarte gaten zijn bolvormig

Zwarte gaten worden vaak als trechters afgebeeld, maar deze tweedimensionale diagrammen worden alleen gebruikt om te laten zien hoe enorme objecten de ruimtetijd ombuigen. In werkelijkheid heeft de ruimte minimaal drie dimensies en de indruk die een zwart gat maakt op ruimtetijd is veel gecompliceerder. Het zwarte gat zelf is, zoals de meeste zware objecten, eigenlijk bolvormig. De zwaartekracht werkt in alle richtingen hetzelfde en de waarnemingshorizon is het punt waarop de zwaartekracht zo sterk wordt dat er niet meer aan valt te ontsnappen. De afstand van de horizon tot het centrum van het zwarte gat is in alle richtingen gelijk.

Interview

We spraken met het hoofd van het Nuker Team, Prof Douglas Richstone, over het ontstaan van zwarte gaten.

22 Bijna elk sterrenstelsel van formaat heeft een superzwaar zwart gat

Elk sterrenstelsel dat redelijk groot is en een 'normale' indeling kent (met een stelsel met een schijf en een uitstulping, en wellicht met spiraalarmen of een elliptisch stelsel dat er rond uitziet) heeft een zwart gat. De massa van het zwarte gat volgt de massa van het omringende stelsel en vormt ongeveer 1 duizendste van de stelselmassa. Deze zwarte gaten hebben 1 miljoen tot bijna 10 miljard keer de massa van de zon.

Maar bij kleine of ongewone stelsels (die bijvoorbeeld alleen een schijf zonder uitstulping hebben) is de zaak veel gecompliceerder. Sommige van deze stelsels lijken zwarte gaten te hebben en andere weer niet.

23 Rustige superzware zwarte gaten waren ooit quasars

We weten niet zeker hoe de hierboven genoemde zwarte gaten ontstaan, maar er is een aanwijzing. De hoeveelheid massa in stelsels die gekoppeld zijn aan zwarte gaten, is bijna exact de hoeveelheid massa die nodig is om quasars (waarschijnlijk zwarte gaten die materie opzuigen) van energie te voorzien toen het heelal nog een vijfde van de huidige leeftijd had. Dus het is niet gek om de zwarte gaten van nu te zien als overblijfselen van quasars.

24 Het is onmogelijk om ze direct te zien

Zwarte gaten reflecteren en zenden geen elektromagnetische straling uit (behalve Hawkingstraling), maar het effect van hun zwaartekracht is wel meetbaar.

25 Sommige zwarte gaten draaien met de helft van de lichtsnelheid

Door naar het patroon van röntgenstraling rondom een zwart gat te kijken, kan de rotatiesnelheid van het gat bepaald worden.

26 Er zijn twee soorten zwarte gaten

Schwarzschild-zwarte gaten zijn de simpelste; ze bestaan enkel uit een waarnemingshorizon en een singulariteit. Kerr-zwarte gaten roteren en hebben een derde onderdeel, de ergosfeer genoemd.

27 Zwarte gaten zijn lawaaierig

In 2003 onthulde de Chandra-röntgentelescoop van NASA dat een zwart gat in het cluster Perseus een geluid in de toonhoogte bes maakt.

28 We zullen nooit weten wat zich in een zwart gat bevindt

Licht kan niet voorbij de waarnemingshorizon van een zwart gat ontsnappen, waardoor we niet naar binnen kunnen kijken. Er komt dus geen definitief antwoord op wat er zich in een zwart gat afspeelt.

29 Ooit zullen zwarte gaten het heelal domineren

Zwarte gaten verdwijnen zo langzaam, dat ze nog zullen bestaan lang nadat de laatste sterren zijn uitgedoofd. Wetenschappers denken daarom dat zwarte gaten ooit als enige over zullen blijven.

30 Objecten worden als spaghettislierten uitgerekt als ze zwarte gaten naderen

Als een object een zwart gat nadert, wordt de zwaartekracht snel groter. De delen van het object die het dichtste bij het gat zijn, ondervinden een sterkere aantrekkingskracht dan de delen die er verder vanaf liggen. Hierdoor gaat de voorkant van een object sneller bewegen dan de achterkant en wordt het object uitgereikt tot een lange sliert; dit wordt 'spaghettificatie' of het 'noedeleffect' genoemd. De zwaartekracht rond een zwart gat is zo sterk dat alles uitgerekt kan worden, of het nou een ster of het kleinste atoom is. Als de rekkende kracht groter wordt dan de elasticiteit van het object, zal het materiaal uiteenvallen. Het proces gaat door en de delen worden steeds kleiner, tot alleen de elementaire deeltjes over zijn.

Spaghettificatie vindt op verschillende momenten plaats, afhankelijk van de soort en omvang van het zwarte gat. Bij

31 Als twee zwarte gaten botsen, fuseren ze tot een nog zwaarder zwart gat

Men denkt dat superzware zwarte gaten in de centra van sterrenstelsels zich waarschijnlijk in de vroege stadia van het heelal begonnen te ontwikkelen. Toen materie condenseerde en sterrenstelsels vormde, lag alles veel dichter bij elkaar en konden kleine zwarte gaten zich te goed doen aan stof en gas, waardoor ze snel groeiden. Verschillende zwarte gaten van 'gemiddelde' grootte zijn waarschijnlijk ontstaan binnen sterrenclusters, voordat ze door het superzware zwarte gat naar het centrum werden getrokken, ermee fuseerden en de superzware reuzen vormden die we nu zien.

6. Enorme fractie
De deeltjes in de schijf wrijven tegen elkaar aan, daarbij komt energie vrij en laten ze een brandend spoort achter terwijl de ster richting de waarnemingshorizon.

5. In de schijf
Terwijl de uiteengevallen ster naar de waarnemingshorizon toe groeit, begint hij samen te gaan met de accretieschijf.

7. X-ray emissies
In de minuten en uren die volgen na de eerste botsing, vallen de overblijfselen van de opgeslokte ster over de waarnemingshorizon en geven felle pieken röntgenstralen af.

8. Piekende gammastraling
Wanneer de neutronenster het zwarte gat bereikt, wordt het grootste deel meteen opgeslokt. Hierbij komt een enorme burst gammastraling vrij.

9. Pool jets
Tijdens een vreetbui spuugt het zwarte gat het teveel weer uit, terug de ruimte in weg van de polen in twee stralende jets.

kleine, stellaire zwarte gaten gebeurt het voordat objecten de waarnemingshorizon hebben overschreden. Bij superzware zwarte gaten zijn de krachten soms pas sterk genoeg als de horizon overschreden is.

32 Hoe groter het zwarte gat, hoe lager de dichtheid

Als de massa van een zwart gat verdubbelt, wordt het volume van de waarnemingshorizon ervan met factor 8 vergroot. Het wordt zo groter, maar de dichtheid verminderd.

De spons is groter en zwaarder dan de knikker, maar heeft een kleinere dichtheid.

Interview

33 Zelfs dwergstelsels kunnen superzware zwarte gaten bevatten

Prof. Anil Seth van de universiteit van Utah ontdekte enkele jaren geleden een superzwaar zwart gat in het centrum van een dwergsterrenstelsel.

Waarom is het superzware zwarte gat in het dwergstelsel M60-UCD1 zo'n interessante vondst?
We denken dat de meeste grote sterrenstelsels een superzwaar zwart gat hebben, maar M60-UCD1 is veel kleiner en minder zwaar dan elk ander stelsel met een superzwaar zwart gat erin. Superzware zwarte gaten spelen een belangrijke rol in de vorming van sterrenstelsels en dit geeft ons een nieuwe plek waarin we de zwarte gaten kunnen vinden. Momenteel weten we niet hoe ze ontstaan, omdat dat zo kort na het begin van het heelal gebeurd is.

Hoe heeft zo'n enorm zwart gat zich in zo'n klein stelsel kunnen vormen?
M60-UCD1 heet zo omdat het zich op slechts 22.000 lichtjaar afstand van het enorme elliptische stelsel M60 bevindt (kleiner dan de afstand tussen aarde en het centrum van de Melkweg). We denken dat M60-UCD1 om M60 heen draait en ooit een veel groter sterrenstelsel was. Toen het dicht langs het centrum van M60 kwam, werden de buitenste delen van het stelsel losgetrokken en bleven slechts de dichte kernen van sterren en het zwarte gat over.

34 Zwarte gaten werden in de 18e eeuw voor het eerst bedacht

Wetenschappers John Michell en Pierre-Simon LaPlace waren de eersten die nadachten over het bestaan van zwarte gaten. Zij bedachten dat na een bepaald punt de aantrekkingskracht van een zwaar object zo groot wordt, dat niets er nog aan kan ontsnappen. Het probleem was dat, volgens Isaac Newtons zwaartekrachttheorie, licht geen massa heeft en er dus niet door beïnvloed zou kunnen worden. Dus hoe zwaar een object ook was, licht moest eraan kunnen ontsnappen. Pas door Einsteins algemene relativiteitstheorie begon de natuurkunde achter zwarte gaten enigszins begrijpelijk te worden.

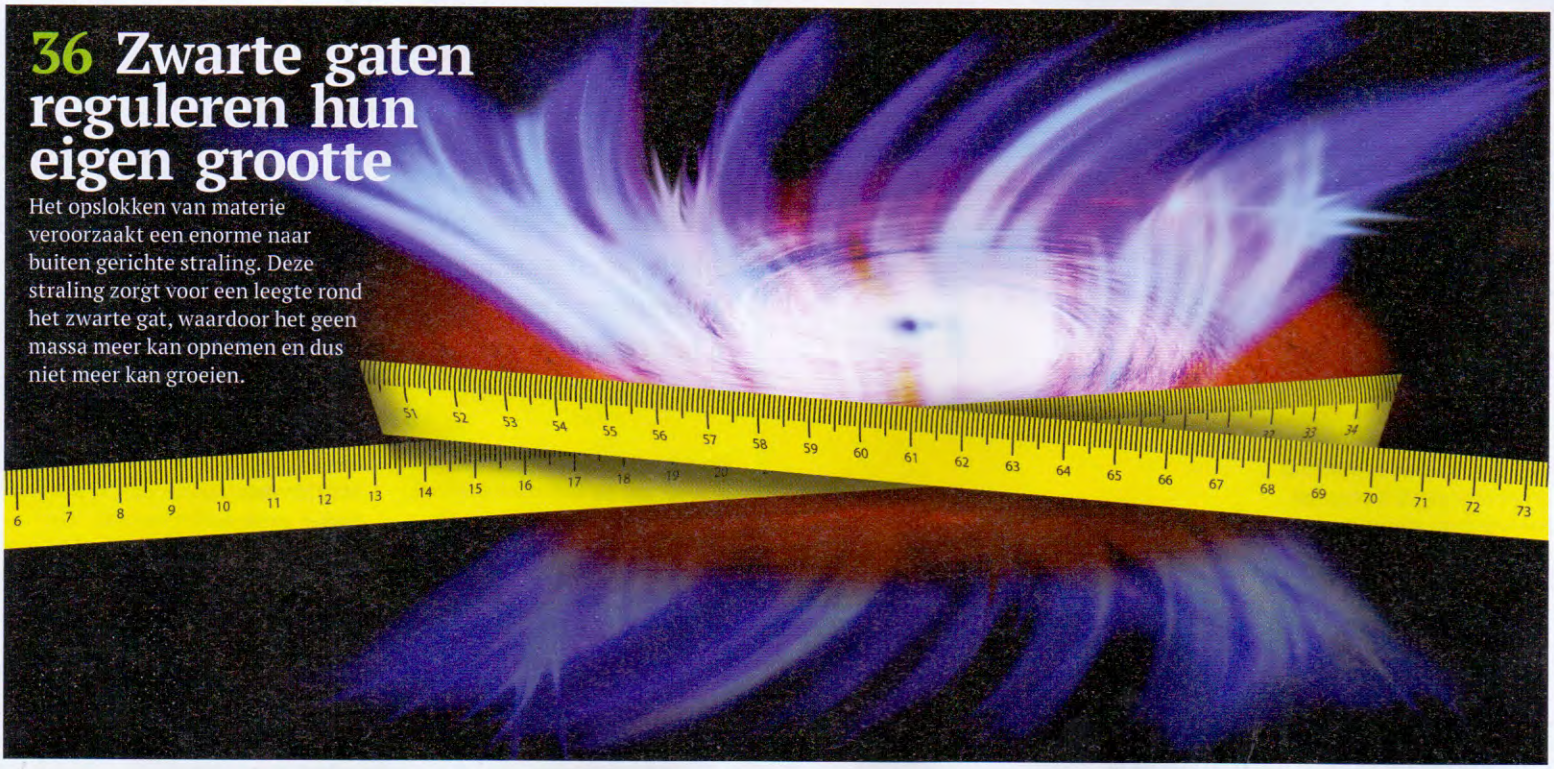
35 Zwarte gaten bestaan misschien niet

In 2014 stelde Stephen Hawking een controversiële theorie over zwarte gaten voor, namelijk dat ze helemaal niet bestaan. Tenminste niet op de manier waarop we ze ons nu voorstellen. De wetenschap achter zwarte gaten is gebaseerd op de algemene relativiteitstheorie van Einstein, maar er zijn nog grijze gebieden die niet lijken te kloppen. Een van de grootste problemen is de waarnemingshorizon.

Volgens Einstein is dat het punt waar materie het zwarte gat in getrokken wordt, gespaghetificeerd wordt en in de singulariteit terechtkomt. Maar volgens de kwantumtheorie is de waarnemingshorizon eigenlijk een 'firewall' van hoog-energetische deeltjes. De natuurkunde achter Einsteins theorie is in tegenspraak met de kwantumtheorie, maar Hawking heeft een nieuw antwoord: de waarnemingshorizon bestaat eigenlijk niet. Hawking zegt dat zwarte gaten geen bodemloze putten zijn die alles vasthouden, maar dat ze enkel tijdelijk materie vasthouden en kapot maken, alvorens het weer als straling de ruimte in te sturen.

36 Zwarte gaten reguleren hun eigen grootte

Het opslokken van materie veroorzaakt een enorme naar buiten gerichte straling. Deze straling zorgt voor een leegte rond het zwarte gat, waardoor het geen massa meer kan opnemen en dus niet meer kan groeien.



37 Zelfs een raket die op lichtsnelheid reist, kan niet ontsnappen aan een zwart gat

Hoe groter en zwaarder een object, hoe moeilijker het is om aan de aantrekkingskracht ervan te ontsnappen. Een raket die aan de aardse zwaartekracht moet ontsnappen, moet met 11,2 kilometer per seconde gelanceerd worden. Om aan onze zon te ontsnappen moet je 618 kilometer per seconde vliegen en ontsnappen aan een dichte witte dwerg vergt 5200 kilometer per seconde. Maar als een raket aangetrokken wordt door een zwart gat, is zelfs de lichtsnelheid (299.792 kilometer per seconde) niet voldoende om de raket te laten ontsnappen aan de enorme aantrekkingskracht.

38 Sommige zijn erg klein

De kleinste massa die een zwart gat theoretisch kan hebben is circa 22 microgram. Dit heet de Planckmassa.

39 Het dichtstbijzijnde zwarte gat ligt op 6.070 lichtjaar van de aarde

Het dichtstbijzijnde zwarte gat is Cygnus X-1 en ligt in een vertakking van de Sagittarius spiraalarm van de Melkweg. Het heeft 15 zonmassa's.

40 "Zwarte gaten hebben geen haar"

Deze beroemde uitspraak werd gedaan door wetenschapper John Wheeler om de eenvoud van zwarte gaten uit te leggen. Volgens hem hebben zwarte gaten alleen massa, lading en impulsmoment. In 2016 weerlegde onder andere Stephen Hawking dit door te zeggen dat zwarte gaten 'zacht' haar van fotonen en gravitonen hebben.

41 De zon kan nooit een zwart gat worden

Om een zwart gat te kunnen worden, moet een ster zo zwaar zijn dat hij volledig instort onder zijn eigen zwaartekracht. De zon is hier veel te klein voor en zal zijn leven dus eindigen als een witte dwerg.

43 Zwarte gaten hebben verschillende formaten

Stellaire zwarte gaten zijn soms maar enkele kilometers in doorsnee, terwijl superzware zwarte gaten het formaat van ons zonnestelsel kunnen hebben.

44 In het midden van de Melkweg ligt een superzwaar zwart gat

In het centrum van de Melkweg draaien de sterren in vreemde cirkels. Ze snellen richting een heldere radiobron, maken een haarspeldbocht en schieten weer de andere kant op. Door hun banen te volgen, is men erachter gekomen dat deze banen op 1 punt overlappen; Sagittarius A*.

De regio is omgeven door een dikke gas- en stofwolk, waardoor hij moeilijk te observeren is. Maar om deze scherp elliptische banen te verklaren, moet Sagittarius A* zo'n vier miljoen zonmassa's hebben, samengepakt in een bal van ongeveer 25 miljoen kilometer doorsnee, hebben astronomen berekend. Met andere woorden: het is een superzwaar zwart gat.

45 Sommige zwarte gaten zijn de bron van de helderste objecten in het heelal

In de jaren 1960 zag astronoom Allan Sandage een enorm helder object ver in de ruimte. Vanaf de aarde leek het een nabijgelegen ster, maar door de enorme afstand moest het honderden keren meer energie uitstoten dan alle sterren in de Melkweg bij elkaar. Deze objecten worden quasars genoemd. Het zijn de helderste objecten in het heelal en vertegenwoordigen actief materie opslokkende superzware zwarte gaten. Er zijn duizenden quasars ontdekt, die allemaal helder oplichten terwijl materie op hun accretieschijf valt en röntgenstralen en zichtbaar licht de ruimte in geslingerd worden, samen met sterke straalstromen vanuit de polen van de quasar.

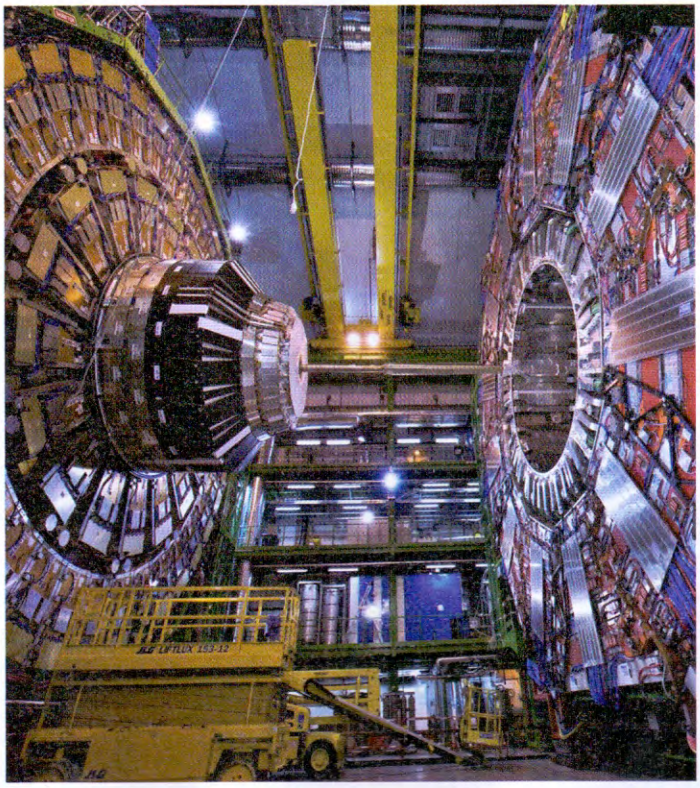
Er gebeuren vreemde dingen rond het superzware zwarte gat Sagittarius A*.

© NASA; ESO; Adrian Chesterman; Science Photo Library; ESA; JPL-Caltech; CXC; STScI; Alamy

46 Deeltjesversnellers kunnen microzwarte gaten creëren

Toen de Large Hadron Collider bij CERN in 2008 aangezet werd, maakten sommige wetenschappers zich zorgen dat de deeltjes, die bijna op lichtsnelheid bewogen, miniatuur zwarte gaten zouden veroorzaken. Tot nu toe zijn zulke gaten nog niet ontstaan, maar in theorie is het zeker mogelijk.

Maar ook al zou er zo'n microscopisch zwart gat ontstaan, is er weinig reden tot zorg. Het zwarte gat zou zo klein zijn dat het miljarden jaren zou duren voor het ook maar een gram materie opgeslokt zou hebben. Bovendien, als Stephen Hawking gelijk heeft en zwarte gaten inderdaad straling lekken, dan zal het zwarte gat al uiteenvallen voor het zover is.



47 De ruimte rond een draaiend zwart gat is verstoord

Draaiende zwarte gaten vervormen de ruimtetijd tot een draaikolk die de ergosfeer genoemd wordt. Binnen dit gebied beweegt de ruimte zelf sneller dan het licht.

48 W49B is het jongste bekende zwarte gat in de Melkweg

Een asymmetrisch overblijfsel van een supernova is het enige wat er over is van een ster die pas 1000 jaar geleden explodeerde. Er is geen bewijs van een neutronenster in de kern van de explosie, dus denken astronomen dat het een jong zwart gat bevat.

49 Draaiende zwarte gaten hebben een donutvormig magnetisch veld

Terwijl materie in de accretieschijf van een zwart gat rond wervelt, structureert het magnetisch veld zich in een donutvorm met de waarnemingshorizon als het gat in het midden.

50 Kleine sterrenstelsels bevatten zwarte gaten van gemiddelde omvang

Eerst dacht men dat zwarte gaten twee verschillende groottes konden hebben; gaten van stellaire zwaarte en superzware zwarte gaten. Maar onderzoekers hebben op basis van de data van de röntgentelescopen Rossi en Chandra een zwart gat gemeten in Messier 82 dat zo'n 400 zonsmassa's zwaar is. Deze 'middelgrote zwarte gaten' bevatten tussen 100 en 10.000 zonsmassa's.

Waarom draaien planeten om de zon?

Welke krachten houden de planeten van het zonnestelsel in hun baan rond de zon?

Als de zon morgen zou verdwijnen, wordt de aarde al snel een koude en donkere planeet en vliegt hij uit zijn baan. Hij zou een rechte lijn in plaats van een gebogen lijn volgen en eenzaam het heelal in vliegen.

Gelukkig gaat dit voorlopig niet gebeuren. Hoewel de aarde in een rechte lijn vooruit wil gaan, zorgt de aantrekkingskracht van de zon ervoor dat dit niet gebeurt en de aarde in een baan rond de zon blijft gaan. Dit geldt ook voor alle andere planeten, dwergplaneten, kometen en asteroïden in het zonnestelsel.

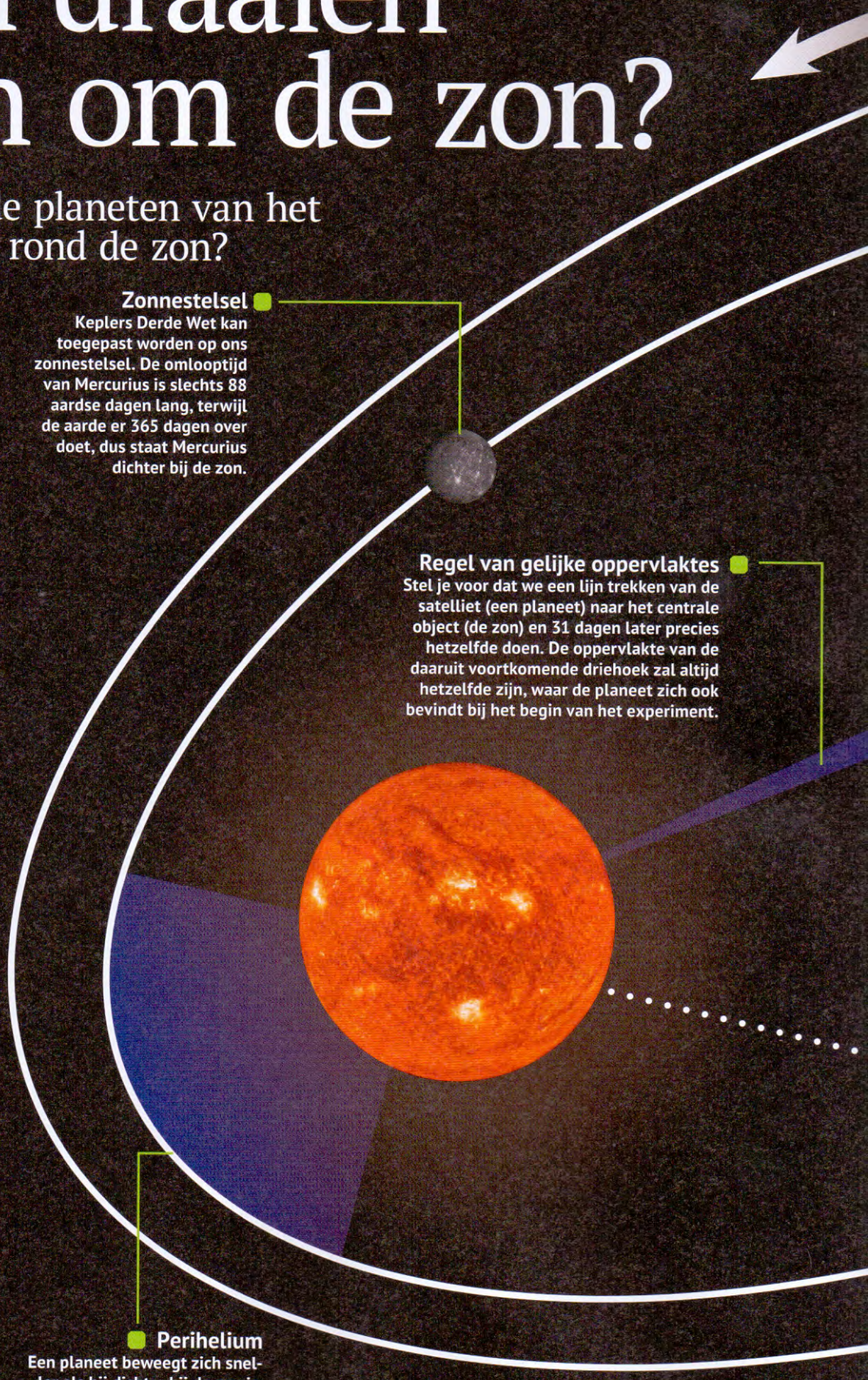
De kracht die de zon hierbij uitoefent op de objecten heet de middelpuntzoekende kracht en zorgt ervoor dat de vallende objecten in elliptische baan rond het middelpunt (de zon) blijven. Deze stabiele banen vormen een balans tussen de vooruitgaande beweging van de planeet en de aantrekkingskracht die erop uitgeoefend wordt. In een optimale balans valt een object net zo hard richting de zon als dat het zijwaarts beweegt, waardoor deze nooit in botsing komt met de zon.

Hetzelfde principe geldt voor satellieten die in een baan rond de aarde bewegen. Onze maan wordt bijvoorbeeld beïnvloed door zowel de zon als de aarde. Hij moet een bepaalde snelheid behouden om in zijn baan te blijven en kan nooit de snelheid bereiken die nodig is om los te raken uit de baan.

Elk object dat (onder invloed van aantrekkingskracht) in een baan rond een ander object draait, gedraagt zich volgens een reeks wetten die de Duitse wiskundige en astronoom Johannes Kepler heeft beschreven. Deze heten de Drie Wetten van Kepler en zijn al in 1609 bedacht.

De eerste wet stelt dat de planeten in een ellipsbaan rond de zon bewegen. De tweede wet stelt dat ze binnen dezelfde tijdsspanne altijd dezelfde hoeveelheid ruimte bestrijken. Ook al versneld of vertraagd een planeet naar gelang zijn positie ten opzichte van de zon, de hoeveelheid bestreken ruimte blijft hetzelfde. Als je op een bepaald tijdstip een lijn zou trekken van de kern van de zon naar de kern van de planeet en een tijdje later weer, zou de 'pizzapunt' die daardoor ontstaat altijd even groot qua oppervlakte zijn, of de planeet zich nou ver of dicht bij de zon bevindt in zijn elliptische baan.

Keplers derde wet beschrijft de relatie tussen de hoeveelheid tijd die een planeet erover doet om 1 omwenteling rond de zon te maken en de afstand tussen desbetreffende planeet en de zon. Zijn vergelijking stelt dat het kwadraat van de omlooptijd van een planeet proportioneel is tot de derde macht van zijn gemiddelde afstand tot de zon. Dus als je weet hoe lang een planeet over 1 omwenteling doet, kun je bepalen hoe ver de planeet verwijderd is van de zon. Keplers werk is zeer invloedrijk geweest; dankzij zijn derde wet kon Newton zijn werk over zwaartekracht en zijn bewegingswetten schrijven.



Zonnestelsel
Keplers Derde Wet kan toegepast worden op ons zonnestelsel. De omlooptijd van Mercurius is slechts 88 aardse dagen lang, terwijl de aarde er 365 dagen over doet, dus staat Mercurius dichter bij de zon.

Regel van gelijke oppervlaktes
Stel je voor dat we een lijn trekken van de satelliet (een planeet) naar het centrale object (de zon) en 31 dagen later precies hetzelfde doen. De oppervlakte van de daaruit voortkomende driehoek zal altijd hetzelfde zijn, waar de planeet zich ook bevindt bij het begin van het experiment.

Perihelium
Een planeet beweegt zich sneller als hij dichter bij de zon is, waardoor een grotere driehoek ontstaat. Het punt op de omloopbaan die het dichtst bij de zon ligt, heet het perihelium.

De wetten van Kepler over de beweging der planeten

Aphelium
Op het verst mogelijke punt van de zon zal een planeet trager bewegen, waardoor de driehoek lang en smal is. Het punt in een omloopbaan die het verst van de zon ligt, heet het aphelium.

Elliptische baan
Johannes Kepler was de assistent van astronoom Tycho Brahe, die hem vroeg om de baan van Mars te definiëren. Hij merkte op dat alle objecten die rond een ander object draaiden, een elliptische baan volgden. Dit werd zijn eerste wet.

De foci
Binnen een ellips bevinden zich twee punten, de foci genaamd. Als je twee lijnen trekt van de planeet naar de foci, zal de som van beide lijnen constant blijven, ongeacht waar de planeet zich op de elliptische omloopbaan bevindt. Het object waar omheen gedraaid wordt, zal zich op een van de foci bevinden.

Lengte van de omloopbaan
De derde wet werd pas 10 jaar na de eerste twee aangekondigd. Hij ging dieper in op de beweging van een object in een omloopbaan. Als je weet hoe lang het duurt voor een planeet 1 omloopbaan rond de zon heeft voltooid, kun je berekenen hoe ver de planeet van de zon staat.

Er zweven circa 3000 satellieten rond de aarde.

In een baan rond de aarde

Als satellieten in de ruimte geplaatst worden, kunnen ze twee dingen doen; of ze blijven boven een bepaald gebied op aarde hangen, of ze draaien in een baan rond de aarde. Welke van de twee het wordt, ligt aan de afstand tussen de satelliet en de aarde en of het in een hoge, midden- of lage omloopbaan bevindt. Satellieten in een hoge baan gaan trager dan die in een lage baan. Satellieten voor televisie, communicatie en het weer bevinden zich in een middenbaan, zodat ze boven dezelfde plaats op aarde kunnen blijven hangen. De Aquasatelliet van NASA, die de aardse watercyclus observeert, zit in een lage baan en gaat in 99 minuten de aarde rond.

© NASA

DONKERE MATERIE

85 procent van de werkelijkheid ontbreekt. We kijken naar het geheim dat het lot van het universum bepaalt.

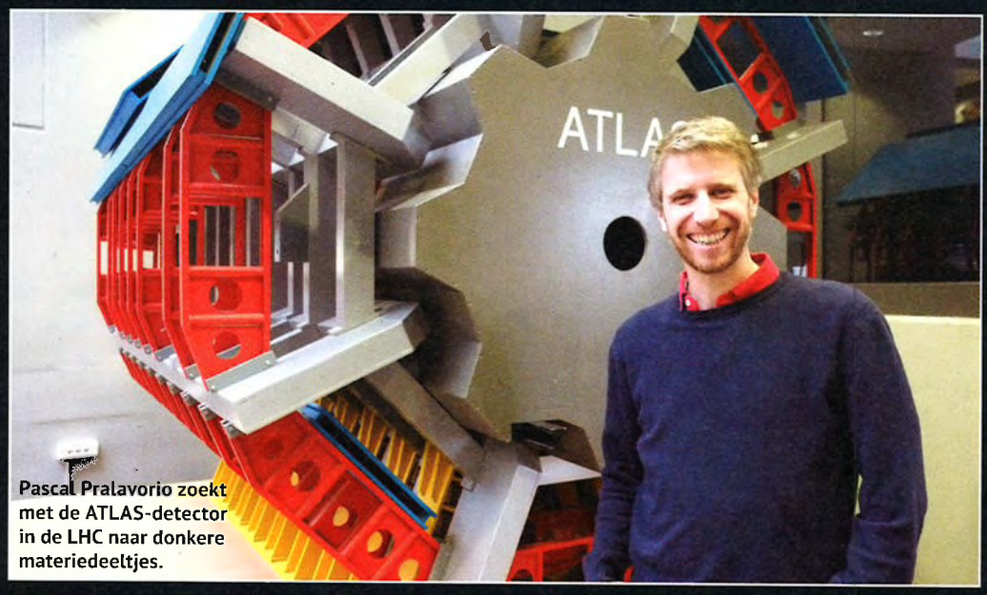
Als je de nachtelijke hemel bekijkt, zie je miljoenen en miljoenen verlichte objecten; van de maan en de sterren tot de planeten in ons zonnestelsel. Je denkt al snel dat dat het grootste deel van het heelal is, maar we zien slechts een fractie van wat er daarbuiten aanwezig is. Wat je niet kan zien, is een onzichtbare, maar belangrijke entiteit die we donkere materie noemen en 22 procent van de kosmos beslaat. Dit klinkt je misschien vreemd in de oren, omdat er zes keer zoveel donkere materie is dan de normale materie (waar alles wat we kunnen zien en voelen uit bestaat), maar het is een van de grote mysteriën van de astronomie en het lijkt er op dat we er decennia over zullen doen om de geheimen ervan te ontsluieren.

Donkere materie heeft astronomen al ruim 80 jaar gefascineerd en verward, niet in het minst omdat ze op geen enkele wijze lijkt op de normale materie die we hier op aarde kennen. Ze bestaat niet uit baryonen, de deeltjes waaruit de planeten, sterren en zelfs wijzelf bestaan. Ze zendt geen licht uit, absorbeert geen licht en kan niet direct met onze eigen ogen gezien worden. Zo ongeveer het enige wat astronomen er met enige zekerheid over weten, is dat donkere materie invloed uitoefent door middel van zwaartekracht. Wat de rest betreft kan gerust gezegd worden dat astronomen meer weten over wat donkere materie niet is, dan wat ze wel is. "Het is nogal een pijnlijk verhaal," vertelt Richard Massey, astrofysicus aan de universiteit van Durham. "Er zijn heel veel verschillende theorieën over wat het kan zijn, maar als je een theo-

reticus een dag lang in een kamer met potlood en papier zet, heeft hij aan het einde van de dag een nieuwe theorie. We hebben decennialang over donkere materie na kunnen denken, dus je kan nagaan dat er heel veel ideeën zijn over wat ze is en wat ze kan doen, maar eerlijk gezegd hebben we geen flauw benul. Elke theorie zou de kloppende kunnen zijn, of geen van allen."

Donkere energie werd in 1933 voor het eerst 'gezien' door Zwitserse astronoom Fritz Zwicky, die (terecht) beweerde dat sterrenstelsels binnen clusters zich in relatie met elkaar bewogen. Tijdens zijn bestudering van het Coma-cluster zag hij dat de snel bewegende sterrenstelsels te weinig zichtbare materie hadden om genoeg zwaartekracht te genereren om het stelsel bijeen te houden. Om zijn observaties te verklaren, concludeerde hij dat er veel onzichtbare materie moest zijn. Toentertijd werden zijn bevindingen grotendeels genegeerd.

Langzaamaan werd het idee van een onzichtbaar materiaal echter geaccepteerd. In de jaren 1970 ontdekte astronoom Vera Rubin dat zowel losse sterrenstelsels als clusters verborgen massa hadden. Ook ontdekte ze dat de sterren die rond een zwart gat in het midden van een spiraalstelsel draaiden, dezelfde snelheid behielden, ongeacht hoe ver ze van het zwarte gat stonden. Dit vond Rubin bijzonder vreemd omdat zwarte gaten aantrekkingskracht uitoefenen, net als onze zon, aantrekkingskracht uitoefent op de planeten in ons zonnestelsel. Maar hoe verder een planeet verwijderd is van de zon, hoe langer ze doet over een omloopbaan. Om te verklaren waarom sterren een constante snelheid hebben, ongeacht hun afstand tot een zwart gat, dacht Rubin dat iets anders moest voorzien in de benodigde aantrekkingskracht.

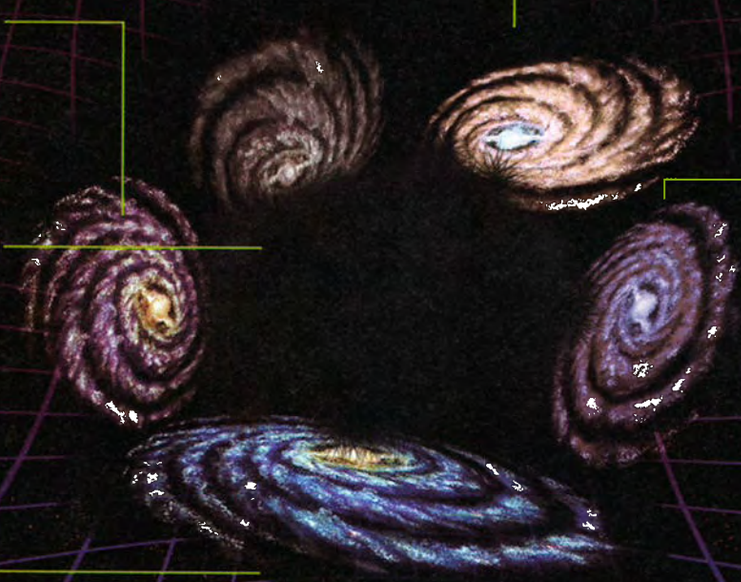


Pascal Pralavorio zoekt met de ATLAS-detector in de LHC naar donkere materiedeeltjes.

Dat 'iets' is donkere materie, het spul dat sterrenstelsels bijeenhoudt. Ze vormt een onzichtbare halo rond een sterrenstelsel dat voorbij de rand van het stelsel uitstrekt en houdt de omwentelingssnelheid constant. Men denkt dat donkere materie al bij de oerknal aanwezig was, om vervolgens te condenseren tot de basis waarop al het andere in het universum gebouwd is. Toen het heelal zich vormde, klonterde donkere materie samen en begon aantrekkingskracht uit te oefenen op de omliggende zichtbare, normale materie en hielp zo bij de vorming van sterrenstelsels. Omdat haar aantrekkingskracht zo groot is, voorkomt ze dat sterrenstelsels uiteenvallen en heeft ze invloed op de snelheid waarmee een stelsel zich door een cluster beweegt.

Maar waar bestaat dit bijzondere materiaal uit? Dat is de vraag die astronomen graag willen beantwoorden. Experts dachten even dat het uit antimaterie (het tegenovergestelde van materie) bestond, maar ze zagen geen unieke gammastraling die ontstaat als antimaterie en materie elkaar vernietigen. Zware compacte halo-objecten (MACHO's), bruine dwergen, witte dwergen en zwarte gaten zijn ook allemaal de revue gepasseerd als mogelijke verklaringen, maar deze zijn verworpen

Wat is donkere materie?



Een galactische lijm
Donkere materie oefent aantrekkingskracht uit, waardoor ze sterrenstelselclusters bijeen kan houden.

Verwarrende materie
Astronomen weten nog maar weinig over donkere materie. Maar de meesten denken dat ze niet uit fotonen, elektronen en atomen bestaat.

Kosmische steigers
Naast het bijeenhouden van clusters, fungeert donkere materie ook als een soort netachtig skelet dat het heelal bijeenhoudt.

In het donker
Donkere materie is niet-lichtgevend, dus astronomen kunnen de effecten ervan bestuderen, maar de donkere materie zelf niet zien. Ze absorbeert geen licht en zendt het niet uit.

Gever van extra massa
Met hun rotatiesnelheid zouden sterrenstelsels zichzelf uiteen moeten trekken. Donkere materie geeft ze de extra massa (en daarmee zwaartekracht) die ze nodig hebben om intact te blijven.

Kosmische strijd
Donkere materie 'strijdt' tegen donkere energie. Terwijl donkere materie alles bijeen houdt, duwt donkere energie alles verder uit elkaar waardoor het heelal uitdijt.

Waar is het heelal van gemaakt?

26,8%
Donkere materie
Ruim een kwart van ons heelal is gemaakt van donkere materie. Meer dan 5 keer de hoeveelheid normale materie.

31,7%
Alle materie
Als je donkere energie niet meetelt, bestaat alle materie in het heelal uit 85% donkere en 15% normale materie.

68,3%
Donkere energie
Astronomen denken dat het grootste deel van ons heelal uit donkere energie bestaat. Men denkt dat deze mysterieuze energievorm in de toekomst dominanter gaat worden.

4,9%
Normale materie
Normale materie (alles wat we met eigen ogen kunnen zien) beslaat slechts een klein deel van het heelal.

omdat 85% van alle materie uit donkere materie bestaat en er simpelweg te weinig van deze objecten zijn om zo'n hoog percentage te rechtvaardigen. Donkere materie bestaat wellicht uit neutron- of axiondeeltjes. Maar astronomen denken dat ze waarschijnlijk iets totaal anders is, omdat het gedrag van die deeltjes de indirecte observaties van donkere materie niet volledig verklaart. De mogelijke donkere fundamentele deeltjes worden gezien als deeltjes die slechts een zwakke interactie met hun omgeving hebben (de WIMP-deeltjes). Hoewel dit nog steeds niet echt verklaart wat donkere materie is, klopt het in ieder geval met een van de typische eigenschappen van donkere materie: de deeltjes ervan kunnen door normale materie en donkere materie heen vliegen. "Donkere materie reageert niet op onze deeltjes of andere donkere materiedeeltjes, behalve via zwaartekracht," legt Massey uit. "Als je je hand op de tafel legt, gaat deze dankzij elektromagnetische kracht niet door de tafel heen. Dat is wat atomen uiteendrijft. Hetzelfde geldt voor een op een muur botsende auto: elektromagnetische krachten stoppen de auto en verkreukelen hem. Maar we hebben enorme klonters donkere materie gezien die op elkaar botsten en vervolgens door elkaar heen gingen alsof er niets was. We concludeerden dat donkere materie geen interactie heeft met elektromagnetische kracht."

Het is dan ook ironisch dat het laten botsen van protonen een van de methoden is die gebruikt wordt om individuele deeltjes donkere materie te detecteren. Dit gebeurt in de 27 kilometer lange, ondergrondse deeltjesversneller genaamd Large Hadron Collider. Wetenschappers van de Europese Organisatie voor Nucleair Onderzoek (CERN) in Zwitserland zijn momenteel bezig met het laten botsen van deeltjes. "Als donkere materie echt een nieuw deeltje is, dan moet het een speciale eigenschap hebben," zegt natuurkundige Pascal Pralavorio, die bij CERN aan de ATLAS-sensor in de LHC werkt en daarmee de donkere materiedeeltjes hoopt te vinden. "Het moet oud zijn en relatief langzaam bewegen in vergelijking met de lichtsnelheid. Maar we weten niets van deze deeltjes. We weten niet eens hun massa. We zijn overal aan het zoeken."

Met hun pogingen om de oerknal na te bootsen, hopen wetenschappers bij CERN dat de deeltjes waar donkere materie uit bestaat wellicht ontdekt worden. Pralavorio denkt dat er verschillende donkere materiedeeltjes kunnen bestaan, maar houdt zich voorlopig bij "we weten het niet". Nu het energieniveau van de LHC opgevoerd wordt, zoeken wetenschappers naar de ontbrekende transverse energiestroom, wat een onbalans in het momentum is, vlak vóór en vlak na de botsing van deeltjes. "Maar de manier waarop we het onderzoeken is paradoxaal," voegt Pralavorio toe. "Deze deeltjes, als ze al bestaan, zullen geen enkel spoor achterlaten dat onze sensoren op kunnen vangen, dus zullen we ze zien door ze niet te kunnen zien."

Als dit een wilde gok lijkt; dat is het ook een bétje. "We kunnen momenteel alleen maar gissen," zegt Pralavorio. "Het is alsof we een totaal nieuw gebied betreden en in principe is het ook mogelijk dat donkere materie niet bestaat. Alleen als het niet bestaat," legt de natuurkundige uit, "is zwaartekracht anders dan we denken. Maar dit is in de jaren 1980 en 1990 getest en de conclusie was dat donkere materie niet verklaard kan worden door veranderde zwaartekracht. Het is waarschijnlijk een nieuw deeltje, dus gaat de zoektocht door."

Wetenschappers gebruiken een spectrum aan instrumenten bij hun jacht op het deeltje; van de LHC en telescopen tot antimaterie-detectors, kosmologische instrumenten en gammastralingsdetectoren. De Fermi Gammastralingstelescoop van NASA zou misschien botsingen van donkere materie kunnen registreren. Honderden sterrenstelsels zijn geanalyseerd en ze laten allemaal rotatiesnelheden zien die niet overeenkomt met hun zichtbare massa. In april 2013 leidde Massey een team wetenschappers dat de Hubble-ruimtetelescoop gebruikte om vier verre stelsels in het centrum van een cluster dat 1,3 miljard lichtjaar verderop ligt te kijken. Veel botsingen lieten zien dat donkere materie geen enkele interactie vertoonde, het vertraagde niet en werd niet vernietigd. Maar er was nog iets; bij één sterrenstelsel dat in een sterrenstelselcluster viel (iets wat langere tijd duurt), was de donkere materie niet waar ze zou moeten zijn. In plaats daarvan leek een van de klonters antimaterie achter te lopen op het stelsel waar het bij hoorde, met zo'n 50.000 biljoen kilometer afstand. Dit was een intrigerende ontdekking want het betekende dat donkere materie misschien interactie kan hebben met andere krachten dan zwaartekracht, anders zou het gelijk blijven lopen met het stelsel. "Het wijst op een milde bron die heel langzaam aan de donkere materie trekt, miljarden jaren achtereen, waardoor er een nettokracht ontstaat," zegt Massey. Dit liet de geobserveerde achterstand zien en wees op een mogelijkheid van zelf-interactie door de donkere materie. Het is nog niet onomstotelijk bewezen en er moet nog meer onderzoek gedaan worden, maar Massey zegt: "Als het bevestigd wordt, is het zonder twijfel van groot belang."

"Wat we zagen was een beetje vreemd," voegt hij toe. "We zagen datgene wat voorspeld was als donkere materiedeeltjes op elkaar afketsten, zonder

Donkere materie vs. donkere energie

Hoe het universum eindigt, hangt af van wie de kosmische strijd wint.

Big Freeze

In plaats van uit elkaar getrokken te worden, zal het universum volgens deze theorie doorgaan met uitdijen tot het simpelweg stopt. Donkere energie duwt het universum uiteen, waarbij de donkere energie steeds dunner wordt, tot het in balans is met donkere materie. Nieuwe sterren kunnen niet ontstaan omdat de aanwezige gassen te dun zijn en de temperatuur zal overal hetzelfde zijn. Dit eindigt in de 'Big Freeze', een leeg en doods heelal.

Big Crunch

Om een Big Crunch te laten gebeuren, moet de zwaartekracht de uitdijing vertragen en objecten naar elkaar toe trekken, waardoor het universum ineenstort. Er zal genoeg materie moeten zijn, met een hogere dichtheid dan de kritieke dichtheid om de benodigde aantrekkingskracht uit te oefenen. Dit zou ook betekenen dat donkere materie dominant is, in plaats van donkere energie. Het resultaat zou het grootste zwarte gat ooit zijn, of het begin van een nieuwe oerknal.

Donkere materie wint

4 De Big Freeze
Het heelal koelt af en er ontstaat warmtedood: sterren sterven en materie brokkelt af omdat er geen temperatuurverschillen zijn die energie vragen.

3 Doorgaande uitdijing
Terwijl het heelal uitdijt, groeit de ruimte tussen sterrenstelselclusters. De gassen die nodig zijn voor stervorming raken op.

2 Periode van uitdijing
Het heelal is al miljarden jaren aan het uitdijen. 6 miljard jaar geleden begon dit proces te versnellen, waarbij hitte afgegeven werd.

Gelijkspel!

1 Het begin
Zoals bij elke theorie begint alle met de oerknal, 13,8 miljard jaar geleden.

5. Een singulariteit
De zwarte gaten fuseren tot één zwart gat en er ontstaat 1 superheet punt.

6. Nieuwe start
De singulariteit heeft een ongelooflijke dichtheid en kan in theorie een nieuwe oerknal veroorzaken, waardoor de cyclus opnieuw begint.

4. Zwart gat
Sterrenstelsels worden bijeen getrokken en fuseren, sterren exploderen en zwarte gaten ontstaan terwijl het heelal onder zijn eigen zwaartekracht ineenstort.

3 Grotere dichtheid
De dichtheid van het heelal is groter dan de kritieke dichtheidsniveau. Zwaartekracht wordt sterker en begint het universum samen te trekken.

2 Maximale omvang wordt bereikt
De Big Crunch-theorie gaat ervanuit dat de ruimte een positieve constante curve is, oftewel een gesloten universum. In dat geval wordt een maximaal uitdijingspunt bereikt.

1 Het heelal dijt uit.
Het heelal dijt momenteel uit en blijft dit nog vele miljarden jaren doen

KEVIN PIMBLET

Astronoom aan de universiteit van Hull (VK) en Monash University in Australië

"We weten dat het heelal uitdijt en dat steeds sneller doet. We weten ook dat de geometrie van het heelal plat is (waardoor de som van de hoeken van een driehoek altijd 180 graden is). Wat we niet weten, is hoe krachtig donkere energie is. Daarom zou ik mijn geld nu inzetten op een eeuwigdurende uitdijing. Als donkere energie sterker blijkt te zijn, ben ik bereid van mening te veranderen en te kiezen voor de Big Rip!"

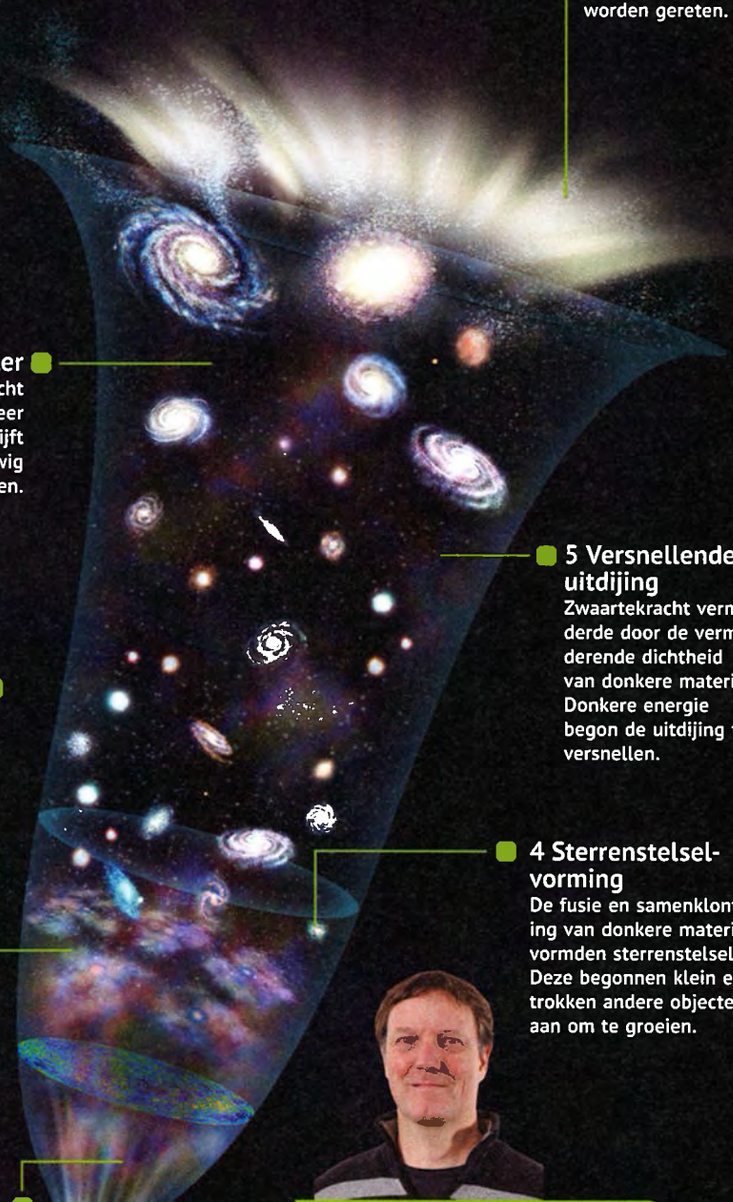
NEMANJA KALOPER

Professor in natuurkunde aan de universiteit van Californië, Davis.

"Aangezien deeltjes massa hebben, moet het heelal een eindig volume en levensduur hebben, dus moet het in de toekomst krimpen. De huidige versnellingsfase kan niet eeuwig duren, maar is slechts een overgangsfase. Donkere energie kan niet eeuwig constant blijven, waardoor het heelal wel moet instorten."

Big Rip

Men dacht vroeger dat de zwaartekracht van het heelal ervoor zou zorgen dat de uitdijing zou vertragen, maar er is nu bewijs dat het juist versneld. De aantrekkingskracht begon 8 miljard jaar na de oerknal te verzwakken, waardoor donkere energie dominant werd. Deze energie lijkt het heelal te laten uitdijen en als dit zo blijft versnellen, kan alle materie uiteen getrokken worden; de Big Rip.



EELCO VAN KAMPEN

Astronoom bij ESO

"Donkere energie strijdt met zwaartekracht (wegens donkere en normale materie) om het lot van het heelal te mogen bepalen. Zwaartekracht trekt dingen naar elkaar toe, terwijl donkere energie alles uit elkaar probeert te drijven; ze zorgt voor de uitdijing van ons heelal. Hoe snel dat gebeurt, ligt aan de aard van de donkere energie: in het ergste geval zal het alles, inclusief atomen en uiteindelijk de ruimtetijd zelf, uiteen rijten; de Big Rip."

het afketsen zelf te zien. Maar als het waar is, is het van zo'n belang dat we nu aan het controleren zijn of er iets anders kan zijn dat het door ons geobserveerde effect kan veroorzaken."

Wetenschappers 'zien' donkere materie door een exacte techniek te gebruiken die zwaartekrachtlenswerking heet. Dit is gebaseerd op het feit dat donkere materie lichtstralen kan afbuigen. Het pad dat licht om donkere materie heen aflegt, stelt astronomen in staat om de verdeling van donkere materie in kaart te brengen. "Gelukkig botsen klonters donkere materie regelmatig tegen elkaar, net zoals sterrenstelsels tegen elkaar botsen terwijl ze door het heelal vliegen," zegt Massey. "Dus we hebben de Very Large Telescope in Chili gebruikt om plekken in het heelal te bekijken waar donkere materie en normale materie tegen elkaar aan gebotst zijn. We zoeken naar de banen van donkere materie en zien of het vertraagd is, of het van richting veranderd is of dat het in iets anders veranderd is. Ook kijken we of iets van de donkere materie tijdens de botsing is verdwenen." Massey denkt dat donkere materie op een of andere manier een interactie aangaat, ook al is het op een heel laag niveau. "We weten dat omdat donkere materie ontstaan is, dus moet het ontstaan zijn door een of andere interactie. Zelfs 13 miljard jaar later moet er in het universum een miniem spoortje van te vinden zijn," zegt Massey. Maar in het algemeen heeft men gezien dat wanneer twee sterrenstelsels botsen, ze zonder probleem fuseren. Hierbij botsen verschillende elementen van beide stelsels tegen elkaar, dat wijst op de zwaartekrachtvelden van beide stelsels.

Eén ding dat met zekerheid gezegd kan worden, is dat er een eindige hoeveelheid donkere materie is. Dr. Massey zegt dat men ruim tien jaar geleden is begonnen met meten om te zien hoeveel donkere materie er in het universum is op verschillende momenten. "Waar we ook kijken, er lijkt een vaste hoeveelheid donkere materie te zijn, net zoals bij normale materie," legt hij uit. Maar omdat het heelal uitdijt, wordt ze uitgereikt en verdund. Uiteindelijk kan het zo ver uitgerekt worden, dat het uiteen getrokken wordt, maar de aantrekkingskracht van donkere materie trekt haar bij elkaar. Het is te vergelijken met een bal die je in de lucht gooit, waarna de aantrekkingskracht van de aarde de bal weer naar beneden trekt. Als de oerknal alles uit elkaar explodeert, trekt de zwaartekracht alles weer bij elkaar en houdt alles intact."

Maar in 1998 ontdekten twee teams van astronomen die de Hubble-ruimtetelescoop gebruikten iets verbazingwekkends. Het High-Z Supernova Search Team en het Supernova Cosmology Project bestudeerden verre exploderende sterren (supernova's) en zagen dat ze minder fel dan verwacht waren. Dit wees erop dat de sterren verder weg lagen dan zou moeten, vooral omdat men tot dan toe dacht dat de uitdijing van het heelal vertraagde. Dit leidde tot een compleet onverwachte conclusie: de uitdijing van het heelal was aan het versnellen. Als we Massey's voorbeeld van de bal die in de lucht gegooid wordt gebruiken, is dit vergelijkbaar met het opgooien van de bal, waarna deze steeds hoger gaat en tegelijkertijd oneindig versneld. Op aarde zou de zwaartekracht de bal weer naar beneden trekken en in de ruimte oefent donkere mate-

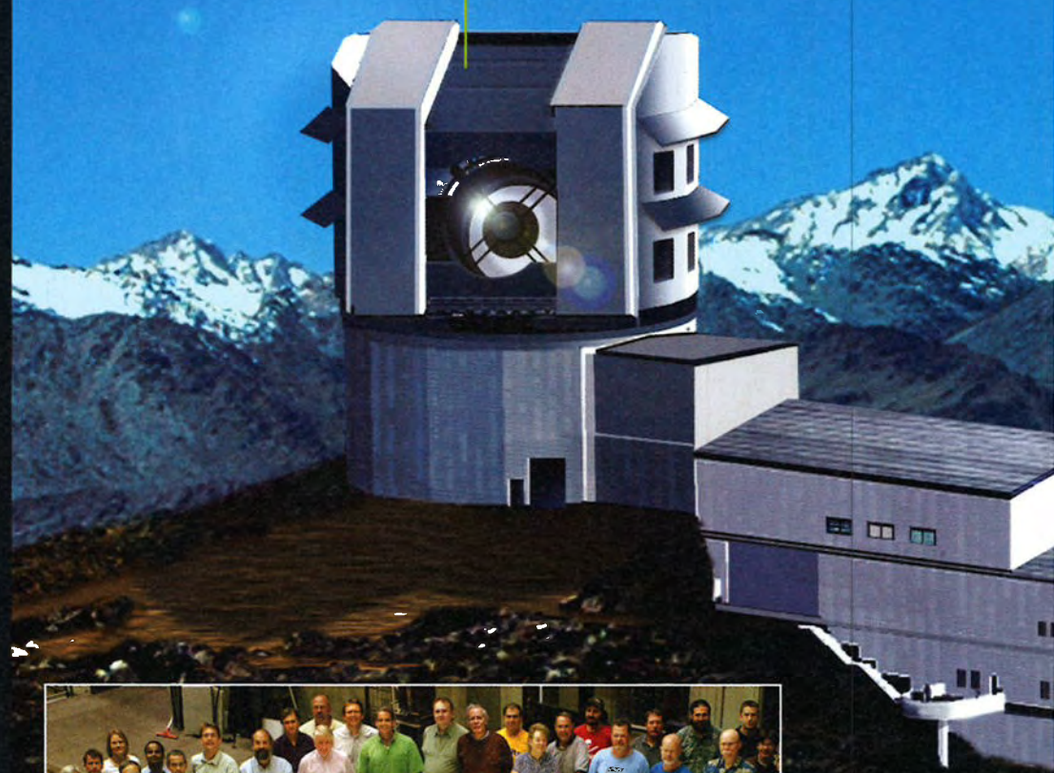
rie zo'n aantrekkingskracht uit dat een dergelijke oneindige versnelling onmogelijk is. Dus hoe kon de uitdijing dan versnellen? Na veel controles van de data, kwamen de astrofysici met een hypothese die stelde dat het heelal aan het versnellen was wegens een afstotende zwaartekracht. Dit werd donkere energie genoemd. Einstein had decennia daarvoor al zoiets bedacht in zijn theorieën. Zijn zwaartekrachttheorie vermeldde een kosmologische constante die voorspelde dat de lege ruimte zijn eigen energie kon hebben. Hoewel Einstein dit later zijn grootste blunder noemde, bleek het allesbehalve een blunder. Astronomen geloven dat er meer donkere energie verschijnt naarmate het heelal verder uitdijt. Het algemene effect hiervan leidt tot een steeds groeiende afstotende kracht die de snelheid van de uitdijing alsmaar vergroot. Ook heeft men ontdekt dat de afstotende kracht van donkere energie de aantrekkingskracht van donkere materie soms 'overklast'. Dit waren verbazingwekkende ontdekkingen en het was dus ook niet verrassend toen de wetenschappers Saul Perlmutter, Adam Riess en Brian Schmidt in 2011 gezamenlijk de Nobelprijs kregen voor hun werk. "Donkere energie duwt naar buiten, terwijl donkere materie naar binnen trekt. Het is een kosmische touwtrekwedstrijd," zegt Massey. "Maar donkere energie is nog altijd even mysterieus en we weten er nog minder over dan over donkere materie. Er zijn veel grootschalige experimenten gaande om beide te meten, de onderlinge balans te ontdekken en erachter te komen wat het allemaal doet."

Zoals je zou verwachten, heeft dit mogelijk een enorme invloed op het heelal als geheel. De aantrekkingskracht van donkere materie kan niet voorkomen dat het heelal versneld uitdijt, dus wordt het groter en groter. Het heelal kan zo snel uitdijen, dat het te ver uitgerekt wordt en uiteindelijk uiteen scheurt: de Big Rip. Tegelijkertijd wordt donkere energie steeds dominanter. Momenteel is 26,8% van het heelal donkere materie, 4,9% is normale materie en de overige 68,3% is donkere energie. Maar het percentage donkere energie is hoger dan het vroeger was en het percentage donkere materie is lager. Ongeveer 6 miljard jaar geleden kreeg donkere energie de overhand. Het percentage donkere materie zal blijven dalen omdat donkere energie zich met donkere materie voedt. Als dit zo doorgaat, zal de groei van structuren als sterrenstelsels kunnen vertragen. In 2011 onthulde NASA dat een vijfjarig onderzoek naar 200.000 sterrenstelsels tot wel 7 miljard jaar terug in de tijd, heeft bevestigd dat donkere energie ons heelal steeds sneller uit liet dijen.

Dit alles maakt het donkere universum een fascinerend onderwerp van studie. "Als donkere materiedeeltjes bestaan, betekent dit dat er natuurkundige processen plaatsvinden die we nog niet kennen en alle fenomenen verklaren die we zien," zegt Pralavorio. "Er zullen het komende decennium nieuwe theorieën ontwikkeld moeten worden om dit te verklaren." Donkere energie, donkere materie en materie/antimaterie symmetrie zijn de hoofdrichtingen van onderzoek van de 21e-eeuwse astrofysica. "Donkere materie kan een rol spelen, donkere energie speelt dan een nog grotere rol. Het kan het gebied van de deeltjesfysica totaal veranderen," zegt Pralavorio. "En het eind is nog lang niet in zicht."

Donkere materie in kaart brengen

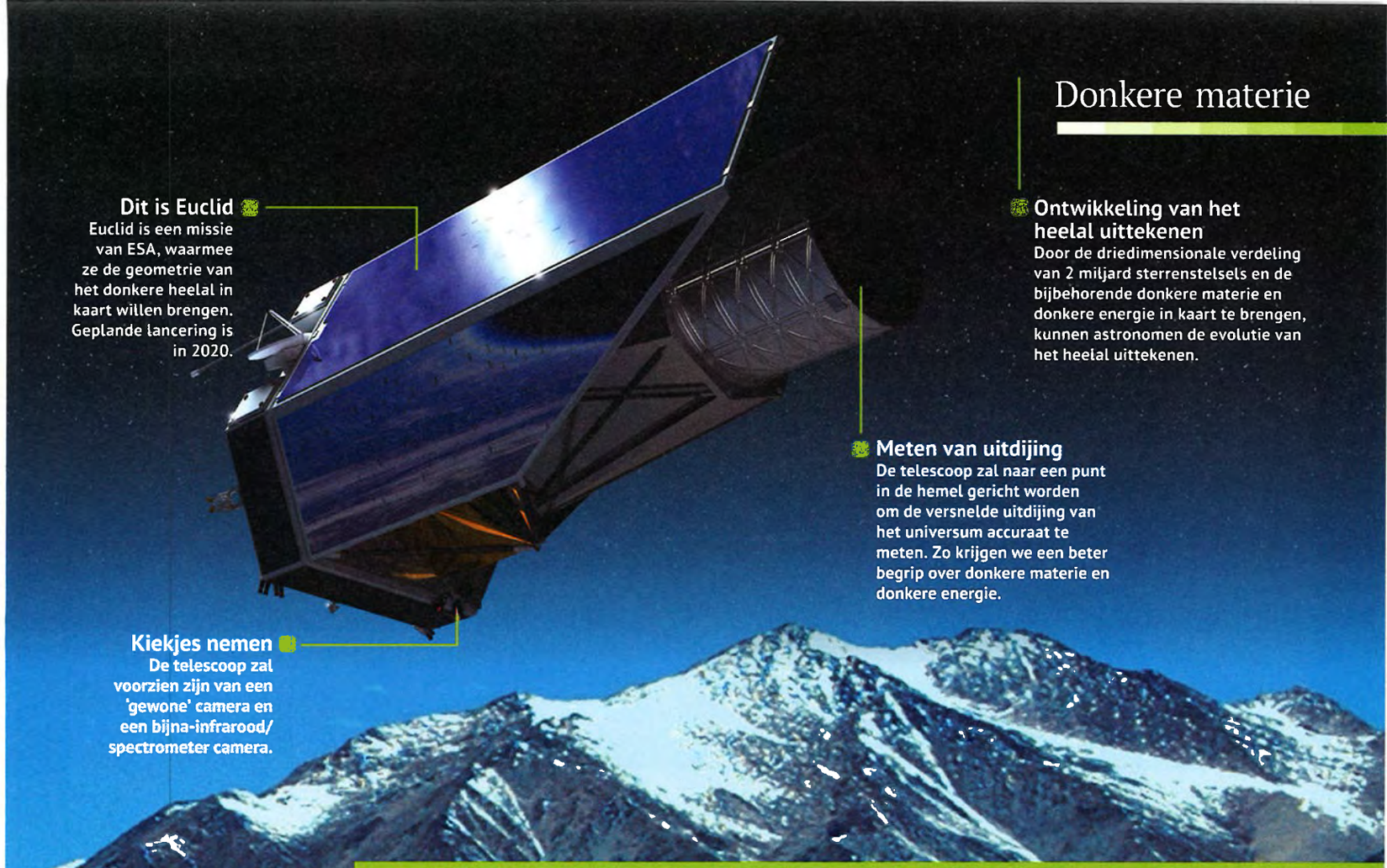
Vanaf de aarde en vanuit de ruimte brengen astronomen het donkere heelal in kaart.



De Large Synoptic Survey Telescope
De LSST wordt momenteel gebouwd in Chili en zal de zichtbare hemel in kaart brengen door een mix van zwakke en sterke zwaartekrachtlenswerking.

Zwaartekracht-lenswerking
Dit is afhankelijk van hoge concentraties materie die licht van een verder weg gelegen bron afbuigen. Hierdoor kunnen astronomen het donkere universum meten.

De LSST-telescoop in Chili zal door middel van zwakke en sterke zwaartekrachtlenswerking het donkere heelal meten.



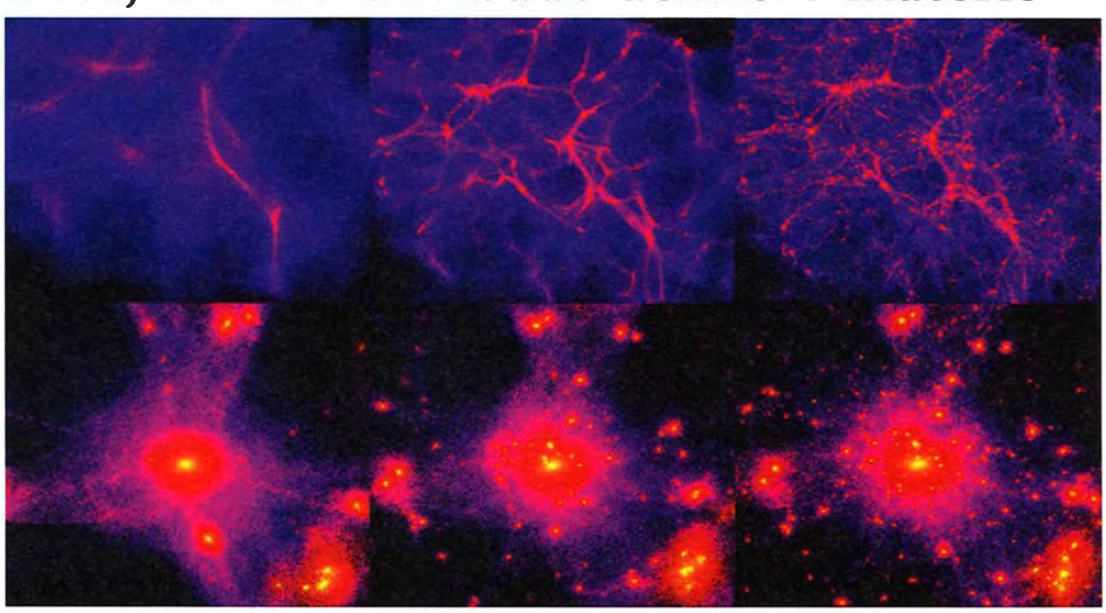
Dit is Euclid
Euclid is een missie van ESA, waarmee ze de geometrie van het donkere heelal in kaart willen brengen. Geplande lancering is in 2020.

Ontwikkeling van het heelal uittekenen
Door de driedimensionale verdeling van 2 miljard sterrenstelsels en de bijbehorende donkere materie en donkere energie in kaart te brengen, kunnen astronomen de evolutie van het heelal uittekenen.

Meten van uitdijing
De telescoop zal naar een punt in de hemel gericht worden om de versnelde uitdijing van het universum accuraat te meten. Zo krijgen we een beter begrip over donkere materie en donkere energie.

Kiekjes nemen
De telescoop zal voorzien zijn van een 'gewone' camera en een bijna-infrarood/spectrometer camera.

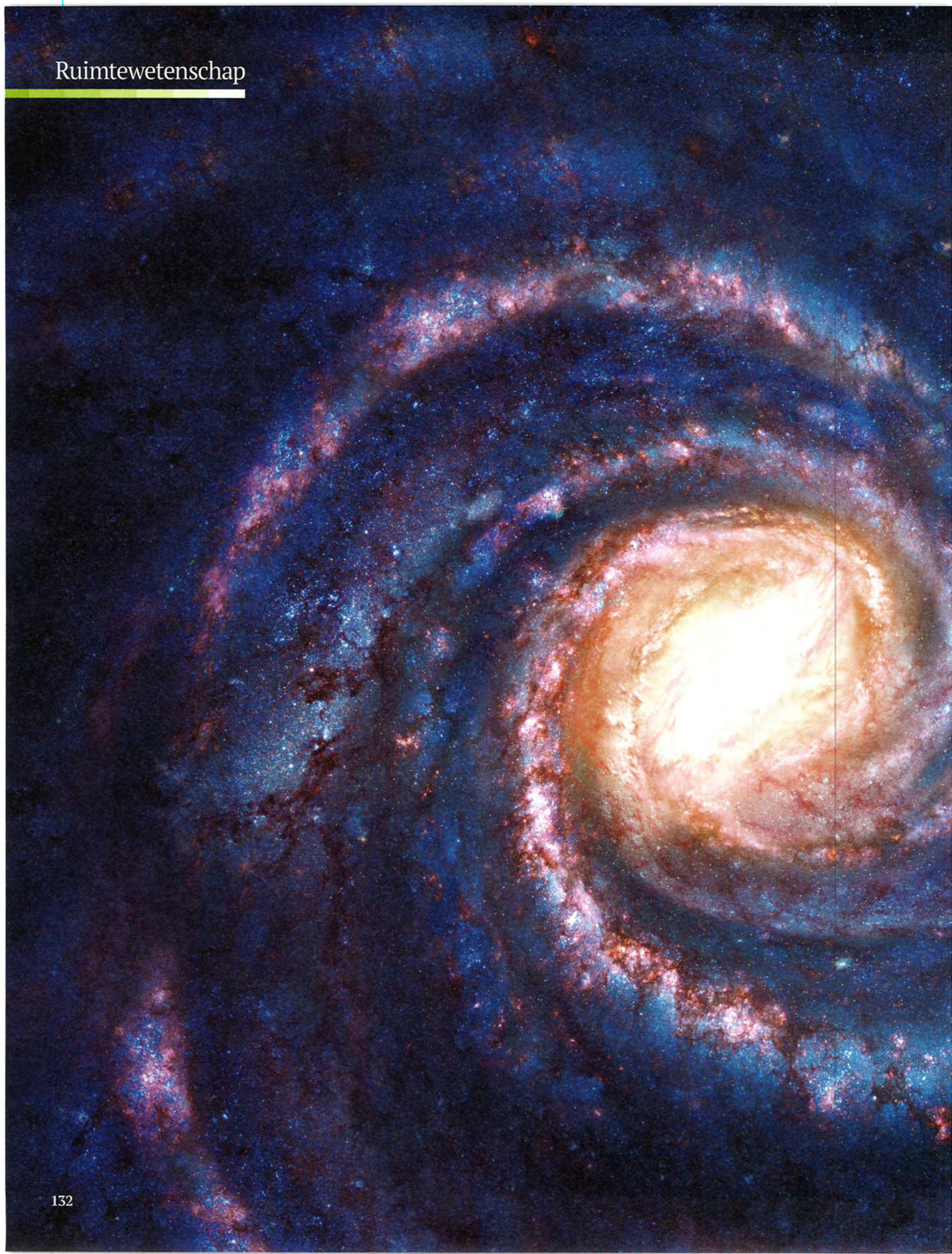
Hete, warme en koude donkere materie



Koude donkere materie
De meeste astronomen zijn aanhangers van de theorie van koude donkere materie. Deze stelt dat koude donkere materiedeeltjes veel langzamer dan de lichtsnelheid bewegen. Dit betekent dat ze minder energie bevatten en een hogere kans hebben op een hiërarchische groei, omdat ze elkaar kunnen aantrekken en met elkaar kunnen fuseren, waardoor ze grote structuren kunnen vormen.

Warme donkere materie
De tussenvorm tussen koude en hete donkere materie. Structuren worden vanaf de basis opgebouwd, vergelijkbaar met koude donkere materie, hoewel de verdeling daar dichter en massiever kan zijn. Ze vormen ook op dezelfde manier als hete donkere materie. Warme donkere materiedeeltjes bewegen zich sneller voort dan koude, maar langzamer dan hete donkere materiedeeltjes.

Hete donkere materie
Deze deeltjes zijn hoog-energetisch en bewegen zich op en rond lichtsnelheid voort. De deeltjes hebben geen of vrijwel geen massa, noch zijn ze elektrisch geladen zoals neutrino's. Deze theorie is weinig populair omdat de snelle deeltjes minder snel samenklonteren, waardoor vorming van sterrenstelsels bemoeilijkt wordt.

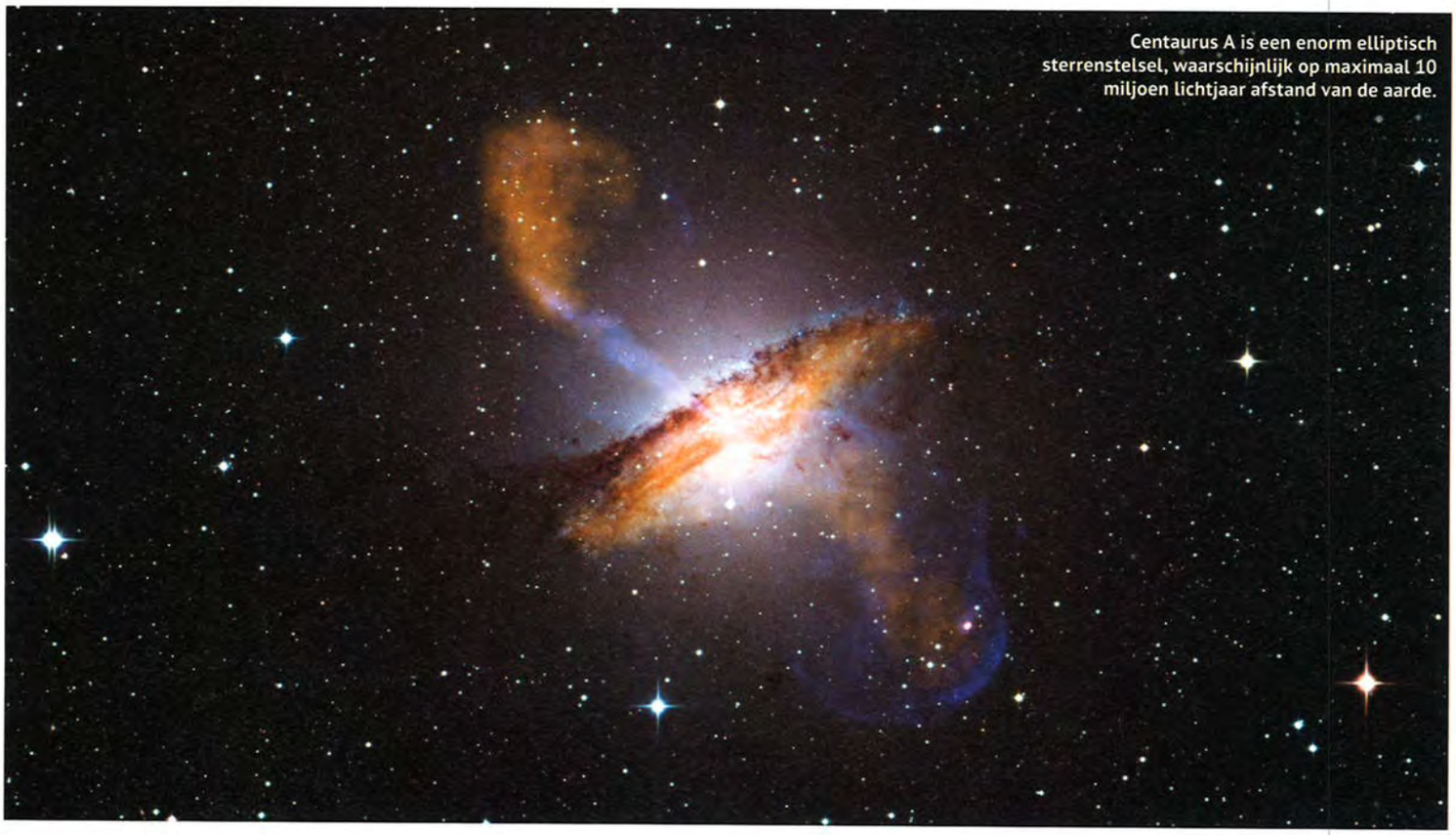


Super sterren stelsels

Het zijn de grootste stelsels in het heelal; enorme sterrenwolken die vele malen groter zijn dan onze Melkweg. Hoe vormen deze enorme elliptische super-sterrenstelsels zich en welke invloed hebben ze op het omliggende heelal?

Stel je een sterrenstelsel voor dat zó groot is, dat wanneer het op de plek van de Melkweg komt te liggen, het niet alleen de directe buren van de Melkweg zou opslokken, maar ook het enorme Andromeda-spiraalstelsel, dat zo'n 2,5 miljoen lichtjaar van ons af ligt. Het lijkt fantasie, maar 1 miljard lichtjaar van aarde, in het sterrenbeeld Maagd, ligt er precies zo'n monsterachtig sterrenstelsel. Het heet IC 1101 en is het elliptische super-sterrenstelsel in het hart van het Abell 2029-sterrenstelsel-cluster; een enorme bal van rode en gele sterren, met een grootte van zes miljoen lichtjaar in doorsnee.

"Deze enorme elliptische sterrenstelsels, soms superstelsels genoemd, zijn de grootste en zwaarste sterrenstelsels in het heelal," zegt Ryan Hickox, assistent-professor aan de natuurkunde- en astronomiefaculteit van Darthmouth College in New Hampshire. "Ze worden doorgaans in het centrum van grootschalige structuren, groepen of clusters sterrenstelsels gevonden. De grootsten hebben een massa van een biljoen zonsmassa's, wat het tienvoudige is van de massa van onze eigen Melkweg." Hickox heeft een groot deel van



Centaurus A is een enorm elliptisch sterrenstelsel, waarschijnlijk op maximaal 10 miljoen lichtjaar afstand van de aarde.

zijn carrière gewijd aan het begrijpen van deze reuzen; hun eigenschappen, verdeling in het heelal en vooral het geheim van hun ontstaan.

Zoals de naam doet vermoeden, zijn elliptische sterrenstelsels bol- of lensvormige sterrenverzamelingen. Waar de meeste sterren in spiraalstelsels (zoals onze eigen Melkweg) in een platte schijf rond het centrum draaien, zijn de sterren in elliptische stelsels willekeuriger geplaatst. Hierdoor ontstaat een stelsel dat in meer of mindere mate (vanuit een bepaalde hoek gezien) een ellips lijkt te vormen. Kleine elliptische stelsels kunnen van 20 tot 50.000 lichtjaren in doorsnee zijn, maar elliptische reuzenstelsels kunnen wel honderdduizenden lichtjaren in doorsnee zijn. De nog grotere 'cD'-stelsels hebben enorme, dunne buitenste lagen die meer dan een miljoen lichtjaren in doorsnee kunnen zijn.

"Een van de belangrijkste eigenschappen van elliptische stelsels is dat ze erg oude sterren hebben, die waarschijnlijk al enkele miljarden jaren na de oerknal zijn ontstaan. En nu hebben ze erg weinig koud, dicht, stervormend gas in zich, dus er worden weinig sterren gevormd", legt Hickox uit. Door dit gebrek aan stervorming blijven elliptische stelsels gedomineerd door rode en gele sterren; deze rustige sterren met een kleine massa leven miljarden jaren, terwijl de hetere witte en blauwe sterren een veel kortere levensspanne hebben en dus snel uitsterven als stervorming stopt. "In een stelsel als de Melkweg, wordt er misschien 1 keer per jaar een zonachtige ster geboren. Maar een elliptisch reuzenstelsel kan tien keer zo groot zijn en toch tien keer langzamer sterren vormen. Een van de grote vragen over elliptische reuzen is waarom ze dat gas niet hebben."

Naast biljoenen individuele sterren zijn superstelsels vaak omgeven door grote aantallen bolvormige sterrenclusters. Deze compacte ballen, bestaande uit tot wel een miljoen sterren, lijken zelf op miniatuur-elliptische stelsels en worden ook gedomineerd door oude rode en gele sterren. Zo'n 150 van deze ballen bevinden zich in en rond onze Melkweg, maar enorme elliptische stelsels zoals Messier 87 (een van de dichtstbijzijnde superstelsels vanaf de aarde, zo'n 54 miljoen lichtjaar verderop in het hart van het sterrenbeeld Maagd) kunnen vergezeld worden door wel vele duizenden bolvormige stelsels.

Hoewel kleinere elliptische stelsels overal in het heelal gevonden worden, worden superstelsels alleen bij het centrum van sterrenstelselclusters en –groepen gevonden. Hier heeft hun aantrekkingskracht een grote invloed op het bijeen houden van het cluster. Röntgenobservaties laten zien dat ze omringd worden door enorme gaswolken, welke door getijdekrachten tussen de stelsels tot miljoenen graden verhit worden.

"We denken dat het gas heet is omdat het in de zwaartekrachtput van de het hele cluster zit; de massa hiervan kan wel het duizendvoudige van de massa van het centrale sterrenstelsel hebben. Maar het is niet duidelijk waar het gas nu vandaan komt; is het van buiten naar binnen gevallen of is het een hete 'atmosfeer' die door zich ontwikkelende sterren binnen het stelsel geproduceerd is? Het gas is in z'n geheel gebonden aan het sterrenstelselcluster, maar hoeveel ervan uit het stelsel zelf komt, is nog een open vraag."

In het hart van elk superstelsel ligt een enorm superzwaar zwart gat dat als ankerpunt van het hele stelsel dient. Dit zijn de grootste zwarte gaten in het heelal; supercompacte stukken ruimte waarin een miljard of meer zonsmassa's samengepakt zijn in het formaat van ons zonnestelsel. Ze zijn de sleutel tot het begrijpen van de vorming en ontwikkeling van superstelsels

"Ze hebben erg oude sterren, waarvan de meeste waarschijnlijk slechts enkele miljarden jaren na de oerknal zijn ontstaan."

Ryan Hickox

Hoe groot is een superstelsel?

Superstelsel
Met een diameter van circa 6 miljoen lichtjaar is IC 1101 het grootste bekende sterrenstelsel in het heelal en zo'n 50 keer de diameter van de Melkweg.

50 keer groter dan de Melkweg

Melkweg
De schaal van ons spiraalstelsel is bijna onvoorstelbaar; met een diameter van circa 120.000 lichtjaren is het maar liefst 126 miljoen keer groter dan ons zonnestelsel.

126 miljoen keer groter dan het zonnestelsel

Zonnestelsel
Het zonnestelsel is (vanaf de omloopbaan van de buitenste grote planeet, Neptunus) ruwweg 9 miljard kilometer in doorsnee, zo'n 6.500 keer de diameter van de zon ter hoogte van diens evenaar.

6.500 keer groter dan de zon

Zon
Het zichtbare oppervlak (fotosfeer) van onze lokale ster is 1,39 miljoen kilometer in doorsnee; 110 keer de diameter van de aarde (12.742 km).

110 keer groter dan de aarde

Aarde
Onze thuisplaneet is 12.742 kilometer in doorsnee en de gemiddelde afstand tot de maan is 384.400 kilometer (30 keer de aardse diameter).

Anatomie van IC 1101 het grootste bekende sterrenstelsel

en zijn daarom de focus van intensief onderzoek.

Onderzoek naar het zwarte gat is op zichzelf al lastig. In sommige gevallen, waarbij het zwarte gat actief zijn omgeving opslokt, verraadt het zichzelf door uitstoot van röntgenstraling of straalstromen van deeltjes. Men denkt nu dat straalstromen een sleutelrol spelen bij het voorkomen van de afkoeling van het omliggende gas. Als gas afkoelt, kan er geen nieuwe stervorming plaatsvinden. In andere stelsels kan het zwarte gat slapend zijn; het is dan onzichtbaar, maar verraadt zijn aanwezigheid omdat het door zijn zwaartekracht invloed uitoefent op zijn omgeving.

"De meest directe manier om de aanwezigheid van een zwart gat in een sterrenstelsel te observeren, is het bekijken van de omloopbanen van de sterren in het centrum en daar de massa uit af te leiden die nodig is om de sterren hun baan te geven", legt Hickox uit. "Het beste voorbeeld hiervan is ons eigen spiraalstelsel, waar we individuele sterren in hun baan rond het zwarte gat kunnen onderscheiden. Andere stelsels liggen te ver van ons af om de omloopbanen van individuele sterren te kunnen onderscheiden. In plaats daarvan kun je een spectrumanalyse maken van de centrale gebieden in een stelsel." Door het licht te scheiden in een kleurenspectrum en te analyseren hoe de kleuren van de ene kant van het centrum naar het andere veranderen, kun je relatief simpel de snelheid van de sterren berekenen.

Maar ook dit is alleen mogelijk bij relatief nabijgelegen sterren. Hickox wijst op een manier waarop de methode uitgebreid kan worden. "Je kunt deze techniek ook gebruiken als het verder gelegen stelsel een 'maser' heeft; een uitgezonden straal microgolven die geproduceerd wordt door een kettingreactie in het gas van het stelsel. Soms zorgt dit voor individuele vlekken bij het centrum van een sterrenstelsel, en als we de beweging van de maser rond het centrum kunnen volgen, geeft ons dat een idee van de massa van het centrale zwarte gat.

Onderzoekers hebben verschillende complexere methodes en vuistregels gebruikt om de massa van zwarte gaten in nog verder gelegen stelsels te meten en er lijkt een bijzonder patroon te ontstaan

> "Je kunt deze techniek ook gebruiken als het verder gelegen stelsel een 'maser' heeft; een uitgezonden straal microgolven."
> **Ryan Hickox**

Ontstaan van een superstelsel

Volgens de populairste theorieën komen elliptische superstelsels voort uit de botsing van twee of meer gasrijke schijfvormige sterrenstelsels, gevolgd door verdere fusies in de geschiedenis van het sterrenstelsel. Deze simulaties volgen de evolutie van een superstelsel gedurende enkele miljarden jaren.

1 Gasrijke schijven

Het licht van schijfstelsels komt vooral van jonge, heldere en kortlevende sterren die continu ontstaan in de met gas en stof gevulde schijfdelen en rode en gele sterren in relatief gasarme delen.

2 In botsing

Als sterrenstelsels botsen, zijn botsingen tussen sterren zeldzaam, maar getijdekrachten verstoren en ontrollen de spiraalarmen. Gaswolken botsen frontaal, waardoor ze opwarmen en gas naar buiten en in de halo van het stelsel drijven.

3 Geboorte van een elliptisch stelsel

Nu het stelsel beroofd is van het koele gas dat stervorming ondersteunt, bestaat het uit oudere sterren met lange levensduur. Deze draaien in chaotische omloopbanen rond de kern, waar zich een superzwaar zwart gat bevindt.

4 Voortdurende groei

De zwaartekracht van de nieuw gevormde reus zorgt voor meer botsingen, waarbij ze nog meer schijfstelsels absorberen, zich voeden met kleine onregelmatige stelsels of 'droge' fusies aangaan met andere gasarme stelsels.

5 Centrale plaats

Tegenwoordig vinden we superstelsels in het centrum van hoogontwikkelde, compacte sterrenstelselclusters. Afhankelijk van hun omvang en dichtheid kunnen deze stelsels gelabeld worden als ofwel enorme elliptische stelsels, ofwel cD-stelsels.

XMM-Newton is de gevoeligste röntgentelescoop ooit en een betrouwbaar ruimte-observatorium.

> "Met andere woorden: we weten hoe die vroege, gewelddadige stelsels zich gaan ontwikkelen, want we weten hoe hun halo's van donkere materie zich zullen ontwikkelen."
> Ryan Hickox

in de resultaten. De omvang van het centrale zwarte gat lijkt evenredig te vergroten met de massa aan zichtbare materie in het stelsel, welke geschat wordt aan de hand van de gecombineerde helderheid van de sterren in het stelsel.

Dit bewijs zorgde voor de opkomst van het populairste model voor de vorming van elliptische superstelsels; het idee dat ze ontstonden door de botsing van kleinere, gasrijke systemen, waarvan de respectievelijke zwarte gaten samengaan, vergezeld door intense pieken in stervorming en andere activiteit. Dit model verklaart veel van de bijzondere eigenschappen van superstelsels; van hun sterrenpopulatie en gebrek aan gas, tot hun plek in het midden van compacte sterrenstelselclusters.

Het grootste probleem voor astronomen is echter dat dit proces niet te zien is in een korte tijdsspanne. We kunnen alleen hopen op foto's van verschillende stadia van het proces. Deze stelsels bestonden immers in eerdere, turbulente tijden van het heelal en hun licht heeft er miljarden jaren over gedaan om de aarde te bereiken. We zien dus momenten uit het verleden. Maar hoe kunnen we zeker zijn dat ver verwijderde, op elkaar in werkende of actieve sterrenstelsels zich ontwikkelen tot hedendaagse superstelsels? Recente onderzoeken door Hickox en zijn collega's geven misschien de ontbrekende schakel. Ze hebben gekeken naar de relatie tussen de centrale superzware zwarte gaten in superstelsels en de onzichtbare 'donkere materie'. Die werkt niet op licht in, maar vormt enorme, uitgebreide halo's rond de zichtbare sterrenstelsels. Er is veel meer donkere materie dan zichtbare en donkere materie speelt een belangrijke rol in de geboorte en evolutie van elk stelsel. Maar het kan enkel gezien worden door de invloed die de zwaartekracht ervan uitoefent op omliggende zichtbare objecten.

"We kunnen de massa van de halo's schatten door de ruimtelijke clustering van de zichtbare sterrenstelsels te meten", legt Hickox uit. "We weten dat sterrenstelsels met zwaardere halo's dichter bij elkaar trekken (door hun grotere gezamenlijke aantrekkingskracht), dus door te meten hoe dicht de stelsel bijeen geclusterd zijn, kunnen we schatten hoe zwaar de halo is

Superzware zwarte gaten zijn waarschijnlijk een van de drijvende krachten achter de groei van sterrenstelsels.

Het geheim van galactische groei ontsluieren

Brian McNamara, professor in astrofysica aan de universiteit van Waterloo in het Canadese Ontario, legt uit hoe sterrenstelsels zo groot kunnen worden.

Waarom is het belangrijk om de helderste stelsels in stelselclusters te bestuderen?

Het is interessant om de helderste clusterstelsels te bestuderen omdat we in detail de processen kunnen zien die plaatsvinden in het centrum van alle elliptische stelsels, omdat alles versterkt is; we zien krachtige straalstromen uit superzware zwarte gaten komen. De zwarte gaten zijn groter, de jets zijn krachtiger en de gasmassa eromheen is groter, dus kunnen we met onze instrumenten dit proces enorm gedetailleerd bestuderen.

Kun je uitleggen wat dit proces is?

We noemen dit het feedbackproces en het idee is vrij eenvoudig. Eind jaren 1990 ontdekten we dat er een opvallende relatie is tussen de totale massa van een stelsel en die van het bijbehorende centrale superzware zwarte gat. De verhouding is bijna constant, wat een aanwijzing is dat iets de groei van beide aanstuurt. Misschien doet het zwarte gat dat wel. Het idee dat zoiets kleins de groei van een heel sterrenstelsel kan reguleren is bijzonder en zorgt voor veel nieuwe vragen. Hoe reguleer je de materie die in het zwarte gat valt (wat de energie opwekt) en hoe 'weet' het de benodigde te energie te produceren om het omliggende gas niet ineen te laten storten zodat sterren zich kunnen vormen?

Hoe kun je de betrokken mechanismes bestuderen?

Voor de belangrijkste observaties moeten we röntgenfoto's van sterrenstelsels en stelselclusters maken, met telescopen als de Chandra röntgentelescoop en het XMM-Newton Observatorium. Als je een röntgenfoto neemt van een cluster, zie je röntgenstralen uit de hete gassen komen. Deze gassen zijn heet omdat de zwaartekracht zo sterk is dat de gassen bewegen, op hoge snelheid tegen elkaar aan botsen en zo hitte genereren. Als we goed kijken, zien we enorme gaten in de röntgenstraling en deze gaten zijn er in geblazen door jets van magnetische velden en deeltjes (elektronen en protonen) die uit de buurt van de zwarte gaten komen. De zwarte gaten kunnen duizenden tot wel tienduizenden lichtjaren in doorsnee zijn. Er wordt genoeg energie uit deze zwarte gaten gepompt om het gas heet te houden. De energie wordt vrijgegeven als kleine beetjes gas wel afkoelen en op het zwarte gat vallen. Daarom noemen we dit het 'feedbackeffect'.

Hoe vaak komt dit proces voor?

Er is indirect bewijs dat laat zien dat het veel voorkomt. Het vindt plaats in de meeste of alle enorme elliptische stelsels en sommige theoretische studies hebben laten zien dat, wanneer je dit opneemt in de modellen voor stelselvorming, je de lichtsterkten en afmetingen van huidige stelsels kunt beschrijven. We hebben nu zo'n 50 van die dingen gevonden die op verschillende schaalgroottes energie uitzenden. Messier 87 is de dichtstbijzijnde, maar wekt slechts in mindere mate energie op. De grootste die we gevonden hebben, is bijna een miljoen keer krachtiger. Het blijkt dat de energie die er in gepompt wordt, precies genoeg is om stervorming te bemoeilijken.

Wat is volgens u de volgende stap?

We zijn momenteel vooral erg blij met de resultaten van van de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, of ALMA. Mijn groep kreeg al vroeg onderzoekstijd en we vonden iets waar we enorm verrast over waren. We hadden aangenomen dat we radiostraling zouden zien van gas dat naar binnen viel om stervorming te voeden (minder dan normaal door het feedbackeffect, maar toch). Maar toen we onze eerste observaties terugkregen, zagen we een koel moleculair gas naar buiten vliegen. Dit hadden we niet verwacht, omdat het moleculaire gas erg dicht is; duizenden tot miljoenen keren dichter dan het gas dat we associëren met deze bellen. Om het moleculaire gas door middel van het hete gas te doen verplaatsen, is hetzelfde als een zwerfkei met een tuinslang verplaatsen. Als dit in veel elliptische stelsels gebeurt, moet ook koud gas aan het feedbackmechanisme gekoppeld worden. Uiteindelijk is het koud gas dat het zwarte gat en de stervorming voedt, dus we zien een extra schakel in de keten. Feedback is nog steeds lastig, omdat het moeilijk is te vangen in een concept of theorie, maar we zien het gebeuren, overal waar we kijken. Ik denk dat de natuur ons iets nieuws leert over de natuurkunde achter deze zwarte gaten.

> "We hebben nu zo'n 50 van die dingen gevonden die energie naar buiten pompen."

waarin de stelsels liggen. Veel van mijn werk heeft bestaan uit het kijken naar verre, groeiende systemen en me afvragen wat de massa van de bijbehorende halo's zou zijn."

Het blijkt dat door de grootte van de halo's van verre stelsels te schatten, Hickox kan voorspellen hoe die stelsels er in de toekomst uit zullen zien. "Omdat de werking van zwaartekracht redelijk bekend is, kunnen we door het observeren van een halo op enkele miljarden lichtjaren afstand, een goede voorspelling doen over de verdere ontwikkeling van de halo. Als we weten hoe zwaar de halo van een ver gelegen, actief stelsel is, kunnen we de hedendaagse massa van de halo schatten. Hetzelfde geldt voor enorme, actieve stelsels. Wat we ontdekten is dat deze halo's consistent zijn met de halo's die zich in middelgrote tot grote groepen sterrenstelsels bevinden en dat is precies waarbinnen we de superstelsels vinden. Met andere woorden: we weten hoe die vroege, gewelddadige stelsels zich gaan ontwikkelen, want we weten hoe hun halo's van donkere materie zich zullen ontwikkelen."

Als je denkt dat nu het definitieve bewijs geleverd is over hoe moderne elliptische stelsels zich vormden, heb je het mis. "Er is nog steeds onzekerheid over hoeveel verschillende typen fusies bijdragen aan het proces", zegt Hickox. "Echt grote sterrenstelsels, zoals Messier 87, hebben waarschijnlijk een andere geschiedenis dan kleinere elliptische stelsels, maar het algemene model staat nog overeind."

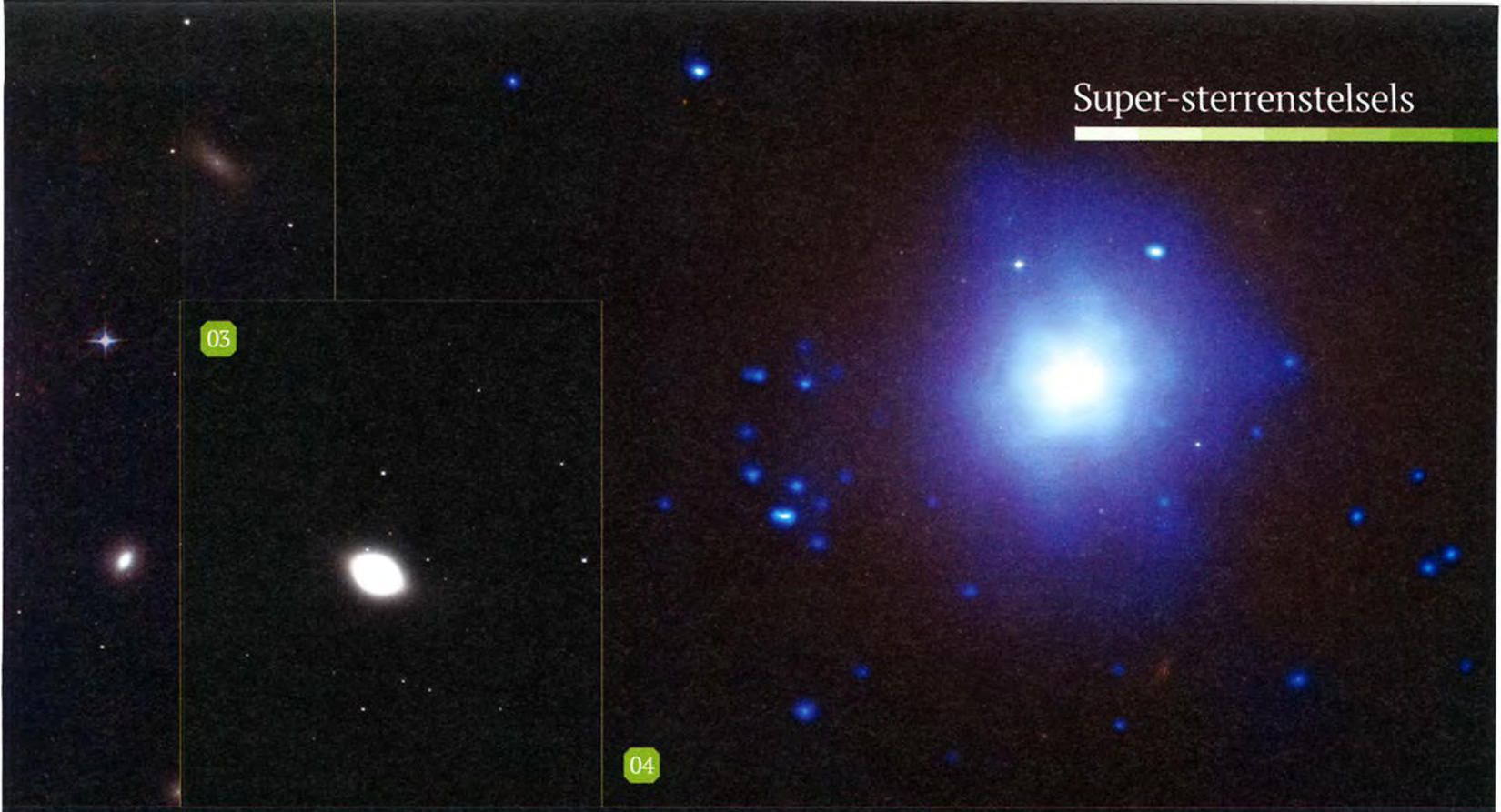
Wat betreft de meeste enorme sterrenstelsels in dicht opeengepakte clusters (zoals IC 1101), is het verhaal waarschijnlijk wéér totaal anders. Het lijkt erop dat er zeker nog genoeg te leren en te begrijpen valt over de grootste sterrenstelsels in het heelal.

> "Echt grote sterrenstelsels, zoals Messier 87, hebben waarschijnlijk een andere geschiedenis dan kleinere elliptische stelsels, maar het algemene model staat nog overeind."
> **Ryan Hickox**

5 superstelsels

1 Perseus A
Omvang: 250.000 lichtjaar in doorsnee
Massa: 20 Melkwegen
Dit complexe superstelsel bestaat uit een cD-stelsel met een actief zwart gat dat bellen van heet gas spuit en een stoffig stelsel dat er mee op ramkoers ligt.

2 Messier 87
Omvang: 1 miljoen lichtjaar in doorsnee
Massa: 2 Melkwegen
Messier 87 is ons dichtstbijzijnde cD-stelsel en heeft actieve jets die uit het gebied rond het zwarte gat komen. Men denkt dat de groei van zijn buitenste halo beperkt is door inwerking van naburige sterrenstelsels.



3 NGC 6482
Omvang: 1 miljoen lichtjaar in doorsnee
Massa: 3 Melkwegen
Dit enorme elliptische stelsel is een zogenaamde 'fossiele stelselgroep'; dankzij onregelmatigheden in de omringende röntgenstraling uit de gaswolk kunnen astronomen de oorspronkelijke sterrenstelsels herleiden die fuseerden tot de centrale reus.

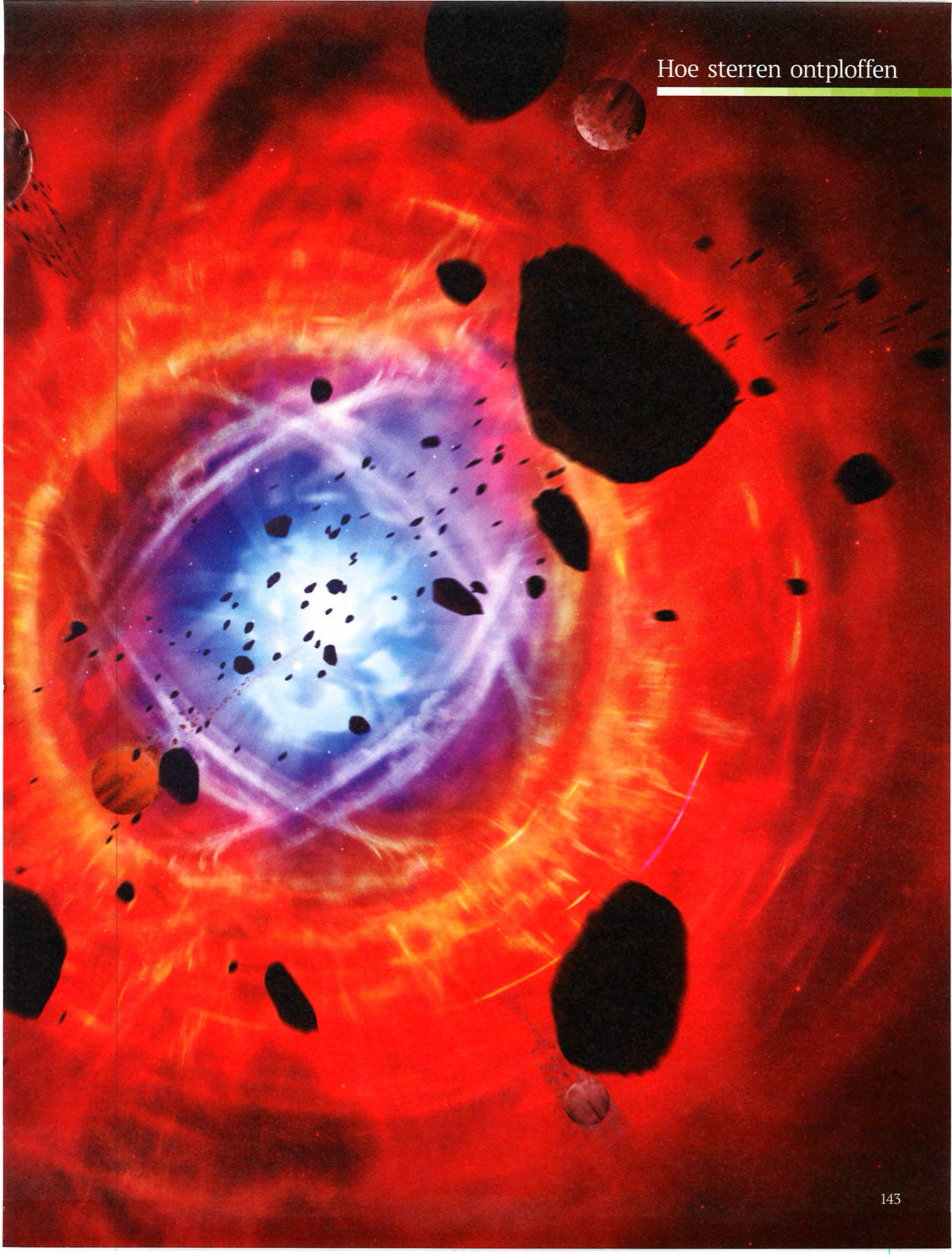
4 NGC 1399
Omvang: 1,3 miljoen lichtjaar in doorsnee
Massa: 2 Melkwegen
Om het relatief kleine cD-stelsel draaien circa 6000 bolvormige clusters. Het centrale zwarte gat is 500 zonsmassa's groot.

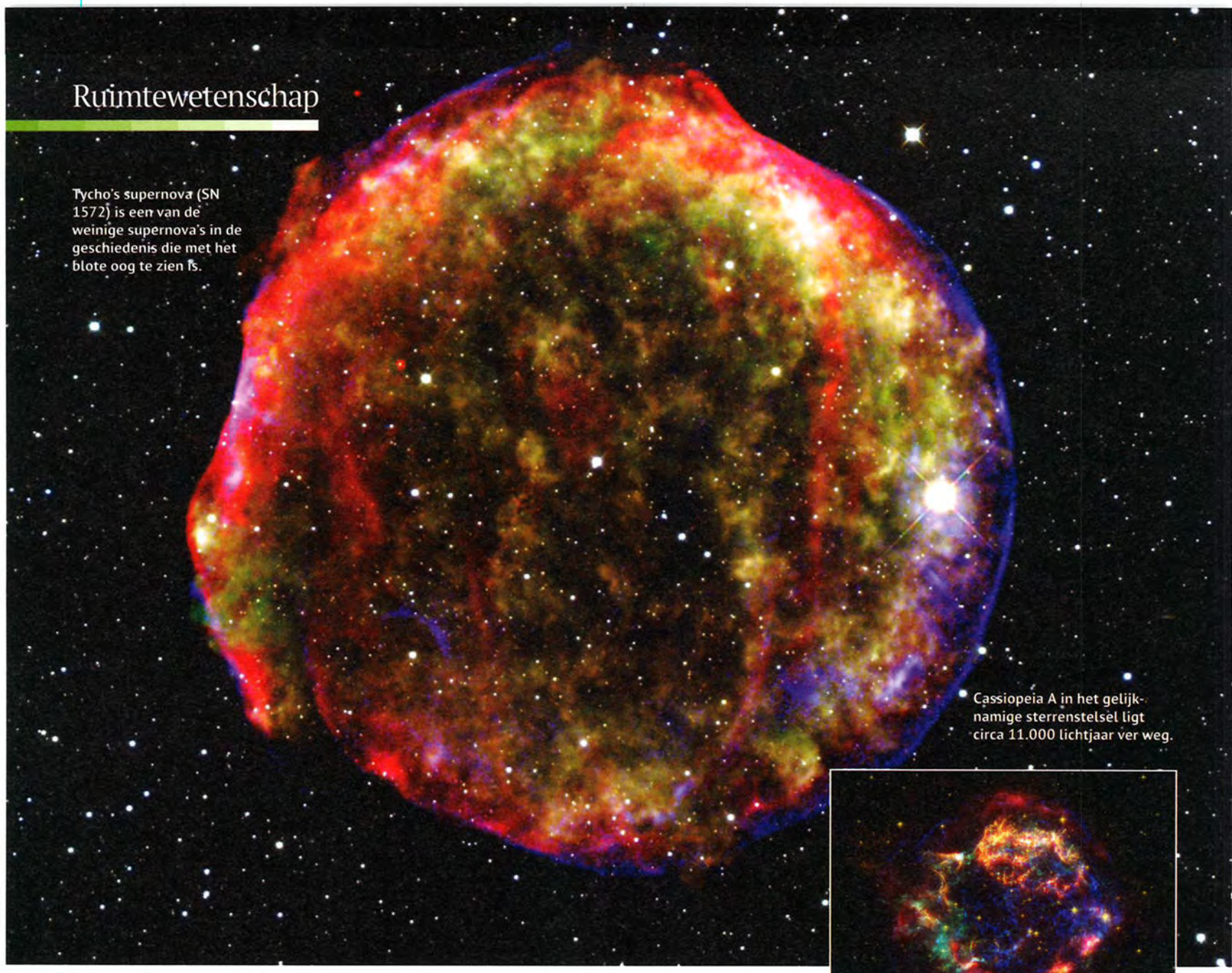
5 Centaurus A
Omvang: 100.000 lichtjaren in doorsnee
Massa: 1 Melkweg
Hoewel hij qua omvang en massa redelijk gelijk is aan de Melkweg, is deze elliptische reus een van de dichtstbijzijnde actieve sterrenstelsels. Men denkt dat het uit een stoffig spiraalstelsel bestaat, dat bezig is te fuseren met een ouder elliptisch stelsel.

© NASA, Sayo Studio Alamy, CXC, J Irwin, STSCI, JPL Caltech, ESA, AURA, ESO, WFI, CFA, R.Kraft, MPIR, APEX, A.Weiss, L.Frattare, NAO, Wikisky.org, The Hubble Heritage Team, Hubble Collaboration

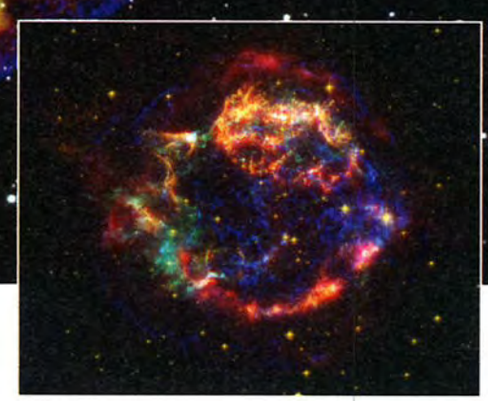
HOE STERREN ONTPLOFFEN

We zijn getuige van de krachtige, catastrofale explosies die het einde van een ster markeren.





Tycho's supernova (SN 1572) is een van de weinige supernova's in de geschiedenis die met het blote oog te zien is.



Cassiopeia A in het gelijknamige sterrenstelsel ligt circa 11.000 lichtjaar ver weg.

Kijk naar je handen. Waarschijnlijk kun je het fijne netwerk van adertjes met daarin je bloed ontwaren. Misschien draag je ook een soort sieraad, als een ring, armband of horloge, gemaakt van goud, zilver of platina. Wat hebben deze dingen gemeen? Het bijzondere antwoord is dat deze dingen op aarde niet voorgekomen zouden zijn als er geen ontploffende sterren (supernova's) waren. Die edelmetalen werden, net zoals het ijzer dat zuurstof door je lichaam draagt, allemaal gevormd tijdens de doodsstuipen van een enorme ster.

Vergeleken met ons nederige mensen, leven sterren ontzettend lang. Zelfs de sterren die jong sterven, hebben honderden miljoenen jaren achter de rug. Het grootste deel van zijn leven is een ster erg stabiel. De zwaartekracht probeert de ster in elkaar te drukken, terwijl de straling die voortkomt uit kernfusie in de kern juist naar buiten drukt. Bij fusie worden lichtere elementen gecombineerd tot zwaardere elementen, waarbij energie vrijkomt. In onze zon wordt bijvoorbeeld elke seconde ruim 600 miljoen ton aan waterstof omgezet in helium. Miljoenen en soms miljarden jaren lang blijven de twee tegenovergestelde krachten netjes in balans en houden ze de ster in evenwicht. Maar kernfusie kan niet eeuwig doorgaan. Uiteindelijk raakt de waterstof in de kern op. "Op dat moment begint het fout te gaan," zegt dr. Joanne Pledger, een supernova-onderzoeker aan het Jeremiah Horrocks Institute (onderdeel van de universiteit van Central Lancashire). "De zwaartekracht krijgt de overhand."

> "De kern bereikt een punt waarop hij niet verder ineen kan storten. Hij stuitert terug op zichzelf en dat veroorzaakt een schokgolf."

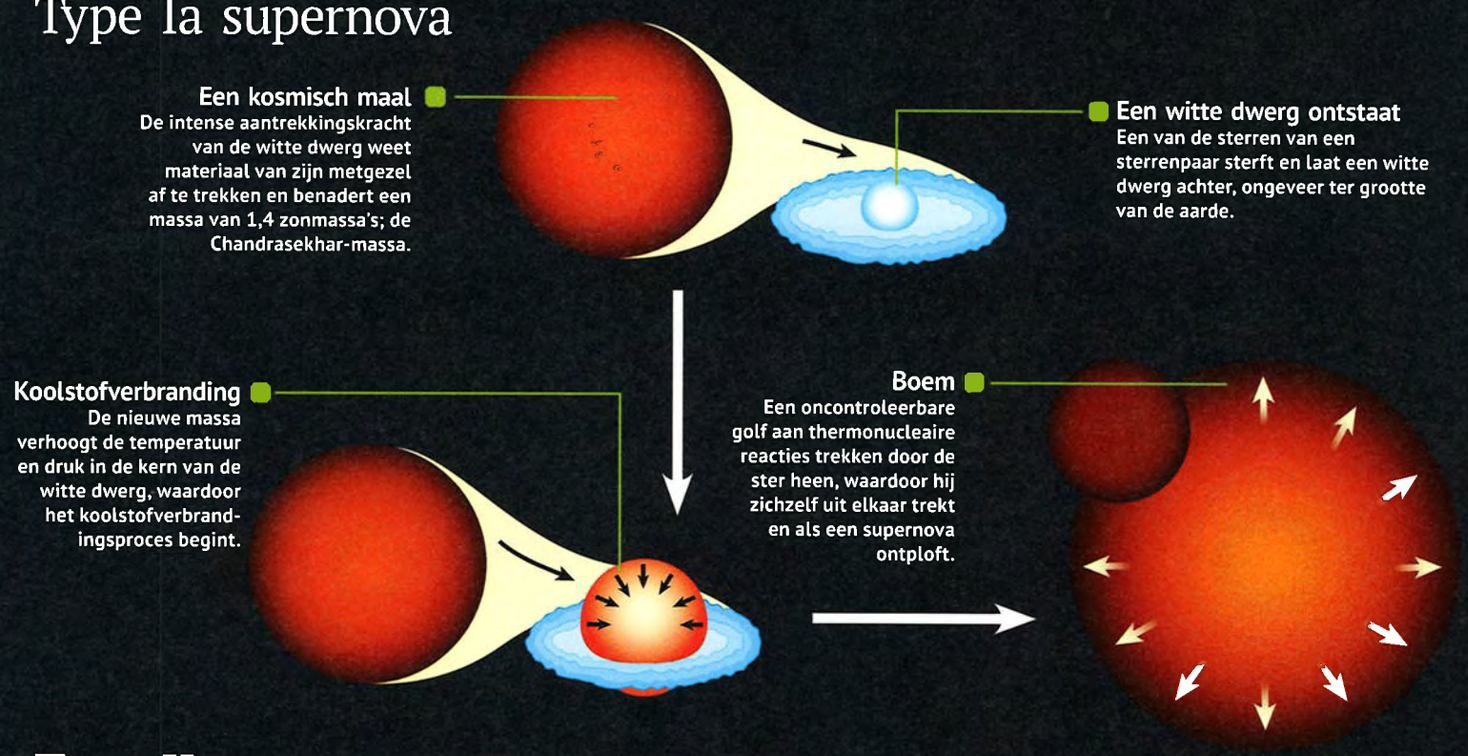
De kern begint ineen te storten, wat de temperatuur doet stijgen en voor een tijdelijke pauze zorgt; het is nu heet genoeg om helium om te zetten naar koolstof. Maar bij heliumfusie komt meer energie vrij dan bij waterstoffusie, dus de balans wordt weer verstoord, dit keer in het voordeel van de naar buiten drukkende kracht. De buitenste lagen van de ster beginnen uit te zetten. Bij sterren zoals de zon noemen astronomen dit een 'rode reus'. Bij nog grotere sterren wordt het een 'rode superreus' genoemd.

Voor rode reuzen is dit het einde van de reis. De ster valt uiteen en wordt een prachtige planetaire nevel met een witte dwergster in het midden. Maar bij rode superreuzen is op dit punt het einde nog lang niet in zicht. Er worden steeds zwaardere elementen in de kern verbruikt, waardoor de ineenstorting van de ster steeds weer wordt uitgesteld. Een dwarsdoorsnede van de ster ziet eruit als een enorme ui, waarbij de lagen uit waterstof, helium, koolstof, neon, zuurstof en silica bestaan. Uiteindelijk stijgt de temperatuur

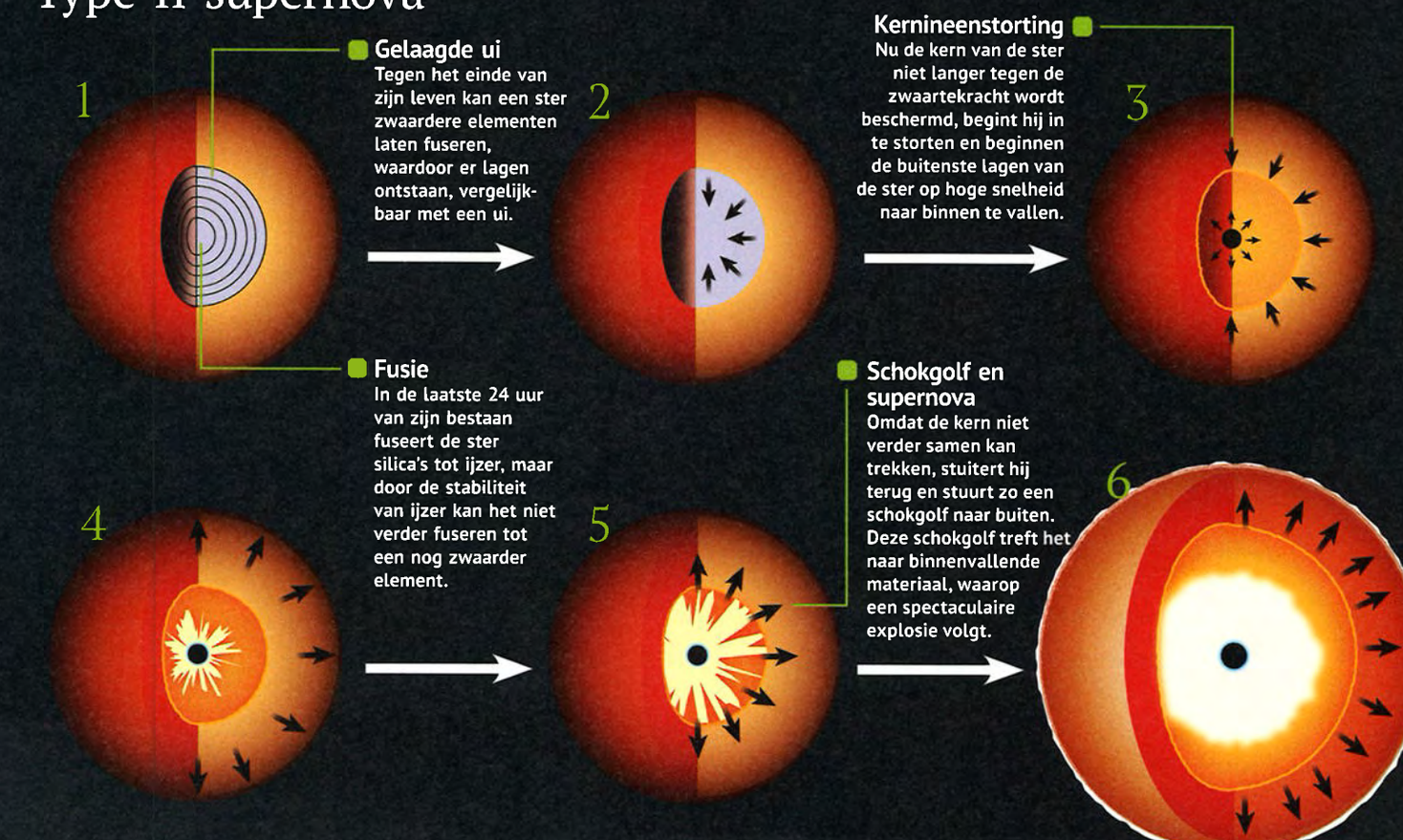
Hoe sterren sterven

De twee beroemdste typen supernova zijn Type Ia en Type II; en zo werken ze:

Type Ia supernova



Type II supernova



naar 3 miljard graden Kelvin en 1 dag lang kan de ster silica omzetten naar ijzer. Maar daar moet het proces stoppen. "Door de atoomstructuur van ijzer verbruikt het fusieproces meer energie dan het afgeeft," zegt Pledger. "Het is niet zelfvoorzienend."

Het plotselinge energieverlies zorgt ervoor dat de kern nogmaals instort. De buitenste schil van de ster wordt nu niet meer ondersteund en het meeste ervan begint nu ook naar binnen te vallen met een enorme snelheid. Uiteindelijk bereikt de kern een punt waarop hij niet verder ineen kan storten. "Hij stuitert terug op zichzelf, wat een schokgolf veroorzaakt," zegt Pledger. Als de schokgolf het naar binnenvallende materiaal raakt, stuwt hij het terug naar buiten en de ster explodeert als een enorme supernova. De kern verandert uiteindelijk in een neutronenster of een zwart gat. De dichtheid en energie van de uitbarsting is zo groot dat atomen tegen elkaar aan geslagen worden en er zo nóg zwaardere elementen als goud, zilver en platina ontstaan.

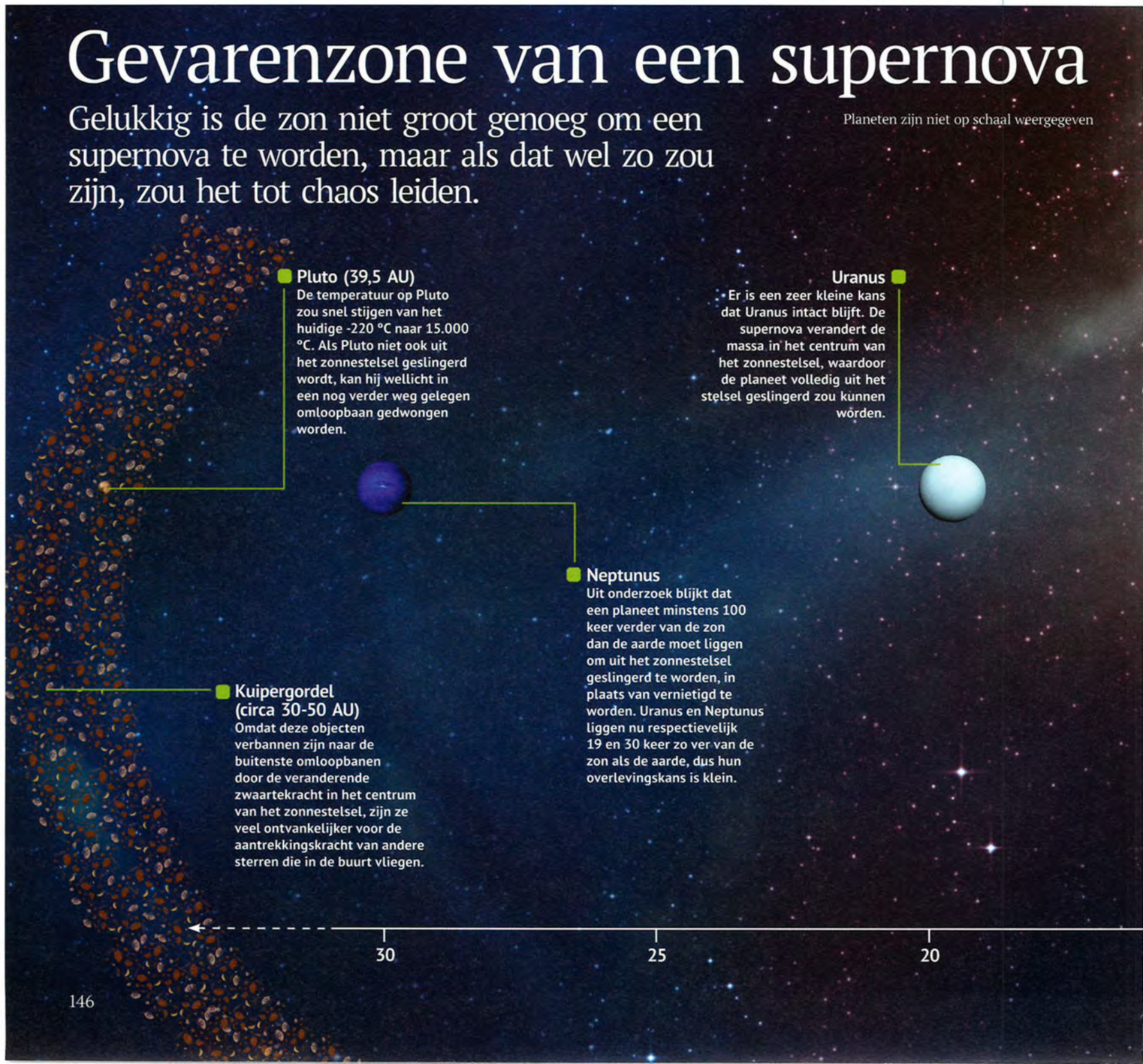
Gedurende honderden miljoenen jaren verspreidt dit materiaal zich door de ruimte en vermengt het zich met het materiaal uit andere dode sterren om zo enorme interstellaire wolken te vormen. Uiteindelijk stort de wolk ineen door zwaartekracht en vormt hij nieuwe sterren met jonge planeten die eromheen draaien. Dit is hoe de zware elementen die je ziet als je naar je hand kijkt op aarde terechtgekomen zijn. Zonder supernova-ontploffingen konden de zuurstof- en ijzerdeeltjes nooit vanuit een ander deel van de Melkweg in je bloed terechtkomen. Supernova's brengen leven.

Maar wees gewaarschuwd; ze kunnen het leven ook weer afnemen. Tijdens een supernova worden enorme hoeveelheden gammastraling geproduceerd. Als een supernova dicht genoeg bij de aarde is, kan deze straling een vernietigend effect hebben op het leven op aarde. De energie zou de ozonlaag (onze bescherming tegen

Gevarenzone van een supernova

Gelukkig is de zon niet groot genoeg om een supernova te worden, maar als dat wel zo zou zijn, zou het tot chaos leiden.

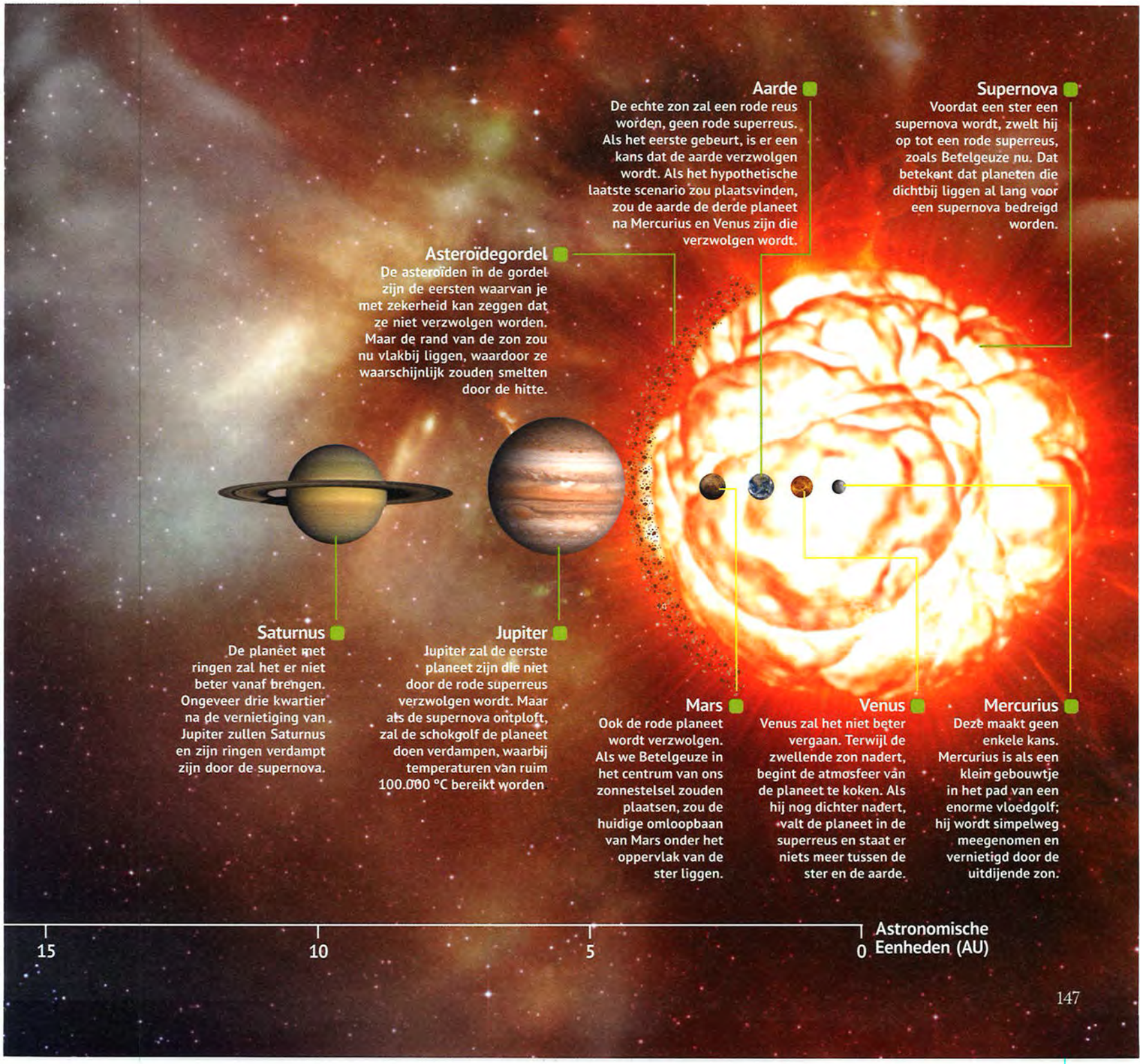
Planeten zijn niet op schaal weergegeven



schadelijke uv-straling uit de ruimte) vernietigen. Het aantal gevallen van huidkanker zou omhoog schieten. Wat wellicht nog erger is, is dat het de basis van de voedselketen aantast. "Er zijn bepaalde planktonsoorten in de oceaan die sterven als ze te veel uv-straling vangen," zegt Pledger. Als je bedenkt dat 50 procent van onze zuurstof afkomstig is van microben in de zeeën, is dat dus een enorme klap.

Onderzoek laat zien dat een supernova zich binnen een straal van 25 lichtjaar van de aarde moet bevinden om de halve ozonlaag kapot te maken. Dus het is fijn om te weten dat de eerstvolgende ster die waarschijnlijk

"Gelukkig heeft onderzoek uitgewezen dat een ster binnen een straal van 25 lichtjaar van onze aarde moet liggen om de helft van onze ozonlaag te vernietigen."



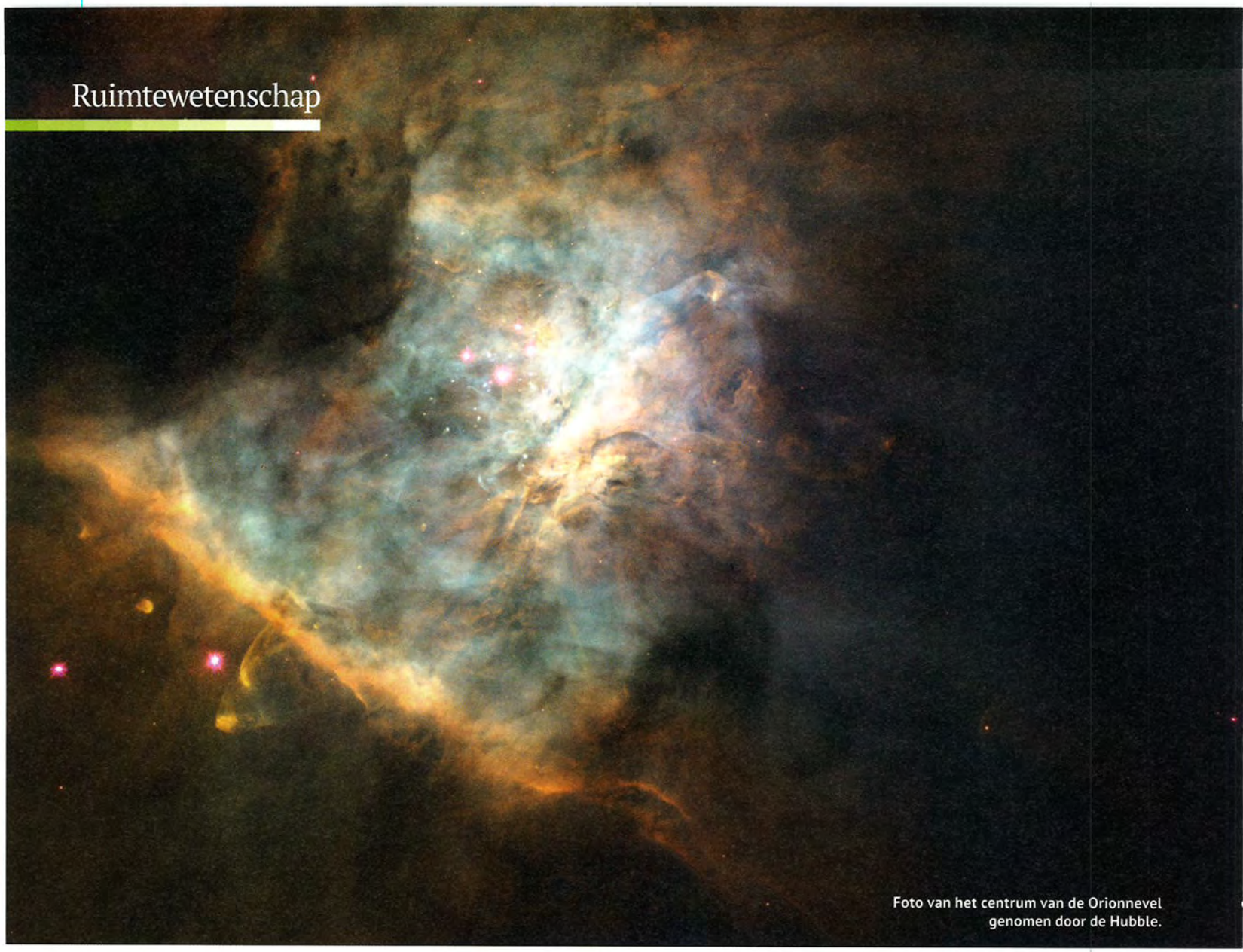


Foto van het centrum van de Orionnevel genomen door de Hubble.

supernova zal gaan, Spica is. Spica ligt op 250 lichtjaar afstand, in het sterrenbeeld Maagd. Naast Spica staat een andere beroemde ster op springen; Betelgeuze, in het Orionstelsel. Deze ligt op 600 lichtjaar afstand en kan elk moment uiteenspatten. Als dit nog tijdens ons leven gebeurt, zou het een enorme show zijn. Een korte tijd kan een supernova net zo fel schijnen als honderden miljarden sterren tezamen. Het licht van Betelgeuze zou voor ons net zo fel lijken als het licht van een volle maan, waardoor we het makkelijk ook overdag kunnen zien. Het blijft waarschijnlijk enkele maanden zichtbaar, tot de energie op raakt en de ster uitdooft tot we hem niet meer met eigen ogen kunnen zien.

Door deze enorme helderheid zijn supernova's van onschatbare waarde bij het meten van de uithoeken van het heelal, hoewel het een ander soort supernova is. De ontploffingen die we tot nu toe gezien hebben worden Type II supernova's genoemd. Om afstanden in het heelal te meten, gebruiken astronomen echter Type Ia supernova's. Dit soort stellaire explosies is niet op 1, maar 2 sterren gebaseerd.

Astronomen denken dat zo'n 70% van alles in het heelal uit paren bestaat, waardoor onze eenzame zon een uitzondering is. Stel je een scenario voor waarbij een van de sterren, die te klein is om supernova te gaan, een witte dwerg geworden is. Omdat hij een enorme dichtheid en sterke aantrekkingskracht heeft, kan hij gas onttrekken aan zijn metgezel. "De witte dwerg groeit in massa en zowel de temperatuur als de druk in de kern gaan omhoog," zegt prof. Mark Sullivan, een supernova-onderzoeker aan de Universiteit van Southampton. Dit begint het proces van koolstofverbranding en een losgeslagen nucleaire reactie die uiteindelijk tot een sterexplosie zal leiden – een supernova.

Deze explosies zijn nuttig voor kosmologen omdat er een limiet zit aan de massa die een witte dwerg kan bereiken. "Dit wordt de Chandrasekhar-massa genoemd; 1,4 keer de massa van onze zon," zegt Sullivan. In tegenstelling tot vele populaire verhalen over dit proces, ontploft een ster niet omdat het deze kritische massa overschrijdt. "Als dat gebeurt, stort hij gewoon in een tot een neutronenster," zegt Sullivan. Maar elk Type Ia supernova zal exploderen als de massa de Chandrasekhar-massa benadert. Dit betekent min of meer dat elke supernova met een vergelijkbare hoeveelheid brandstof ontploft; net iets minder dan 1,4 zonmassa's. Sterren die steeds met een vergelijkbare hoeveelheid brandstof ontploffen, zullen een vergelijkbare helderheid hebben. Dit is waarom ze zo aantrekkelijk zijn voor kosmologen; zij noemen ze 'standaardkaarsen'.

We weten dus hoe helder een supernova zou moeten zijn, maar terwijl licht door het heelal naar ons toe reist, wordt het steeds zwakker. Door de waargenomen helderheid van de supernova te vergelijken met de helderheid die hij zou moeten hebben, kunnen we afleiden hoe ver weg de supernova ligt. Omdat het licht van de supernova helderder is dan alle sterren in het omringende sterrenstelsel, kunnen we ze vanaf een enorme afstand waarnemen en kunnen astronomen ze gebruiken om afstanden in ons heelal mee te meten. Zo'n meting bracht ons in 1998 tot een verbazingwekkende conclusie: de uitdijing van het heelal is aan het versnellen.

Twee teams van astronomen hadden Type Ia supernova's gebruikt om de afstanden tot vergelegen sterrenstelsels te meten. Omdat het tijd kost voor het licht om ons te bereiken, betekent het kijken naar het licht van ver gelegen stelsels feitelijk dat je terug in de tijd kijkt, naar het moment dat het licht voor het eerst werd uitgezonden. Hoe verder gelegen het sterrenstelsel, hoe verder je terug kijkt in de tijd. De astronomen konden ook meten hoe snel het sterrenstelsel, waarin de supernova zich bevond, zich van ons af bewoog. Toen ze

de twee metingen combineerden, ontdekten ze iets totaal onverwachts. Iedereen dacht dat het heelal vertraagde omdat de energie van de oerknal langzaam uitdoofde. Maar toch spraken de metingen dit volledig tegen. Verder weg gelegen sterrenstelsels (die vroegere tijden vertegenwoordigen), bewogen zich langzamer van ons af dan dichterbij gelegen stelsels (die recentere tijden vertegenwoordigen). De uitdijing van het heelal moest dus wel versnellen. Deze ontdekking was zo belangrijk dat de betrokken astronomen in 2011 de Nobelprijs voor Natuurkunde kregen. We weten momenteel niet wat de stelsels steeds sneller uiteen duwt, maar we hebben wel een naam voor onze onwetendheid: donkere energie.

De sleutel tot beide mysteries (donkere energie en de werking van Type Ia supernova's) is het vinden van meer ontploffingen. "Er is nog veel dat we niet begrijpen," zegt Sullivan. Zo kennen we de exacte aard van het materiaal dat van de metgezel naar de witte dwerg getrokken wordt niet. Ook weten we weinig over die metgezellen; of ze normale sterren zijn zoals de zon, of ook witte dwergen. Reden temeer om meer supernova's te vinden, en daar zijn we nu al mee bezig. Het Dark Energy Survey is momenteel vanuit Chili de hemel aan het afzoeken en heeft 3.000 Type Ia supernova's gevonden. Momenteel wordt er aan de Large Synoptic Survey Telescope (LSST) gebouwd. Als deze aan het eind van dit decennium af is, zal hij tienduizenden van die supernova's moeten kunnen vinden.

Zulke aantallen zijn goed voor statistische analyse om de aard van donkere energie vast te stellen, maar als we echt willen begrijpen hoe supernova's werken en wat ze echt zijn, moeten we ze van dichtbij kunnen bestuderen. Gelukkig is de natuur het daarmee eens en hebben er zich recentelijk twee ontploffingen voorgedaan, redelijk dicht bij ons. De eerste in het Windmolenstelsel in 2011 (SN2011fe) en de tweede in het Sigaarstelsel in 2014 (SN2014J). "Ze zijn tot in detail bestudeerd en dat helpt bij het maken van een model van gebeurtenissen," zegt Sullivan. De lancering van ASTRO-H, een röntgentelescoop van de Japanse ruimtevaartorganisatie JAXA, in februari 2016, moet een nog scherper beeld geven van toekomstige supernova's (zie kader onderaan).

Verdere analyse van Type Ia supernova's lost misschien ook een ander openstaand mysterie op; waarom sommige witte dwergen de Chandrasekhar-massa kunnen overschrijden. De eerste zogeheten 'super-Chandra's' – een Type Ia supernova van meer dan 1,4 zonsmassa's – is in 2006 ontdekt, waarna nog een handvol andere volgden. Door het beperkte aantal is Sullivan niet bang dat we door de super-Chandra's onze metingen moeten weggooien, maar ze zijn nog steeds een puzzel. "Ze illustreren een gebrek in onze astrofysische kennis," aldus Sullivan.

Onze groeiende kennis wordt verder geïllustreerd door twee andere typen ontploffingen: Type Ib en Type Ic supernova's. Men denkt dat beide Types ontstaan uit kernineenstorting, net zoals Type II supernova's. Supernova's worden Type I genoemd als astronomen geen waterstof waarnemen in het spectrum, en als waterstof wel aanwezig is, wordt het Type II genoemd. Bij Type Ic supernova's is er niet alleen geen waterstof, maar ook geen helium. Type Ib supernova's zitten in het midden; geen waterstof, maar wel een beetje helium. "Vroeger," zegt Pledger, "dacht men dat Type Ic's zwaardere sterren waren die al hun helium hadden opgebruikt. Maar het laatste decennium hebben onderzoeken naar supernova's laten zien dat er meer Type Ic's bestaan dan Type Ib's. Gezien het feit dat kleine sterren vaker voorkomen dan grote, zou volgens het oude idee de situatie juist andersom moeten zijn. Het laat zien dat de zaken niet zo simpel zijn als we dachten."

Terwijl we steeds verder komen en deze sterexplosies met steeds meer wetenschappelijke precisie kunnen bestuderen, zullen we waarschijnlijk in de toekomst enkele van deze mysteries voor eens en altijd kunnen oplossen. Maar wat wel zeker is, is dat zonder supernova's wij er niet zouden zijn om deze vragen te stellen.

"Men dacht dat Type Ic's explosies waren van zwaardere sterren die meer energie en veel meer helium verbruiken."

5 sterren op het punt van ontploffen

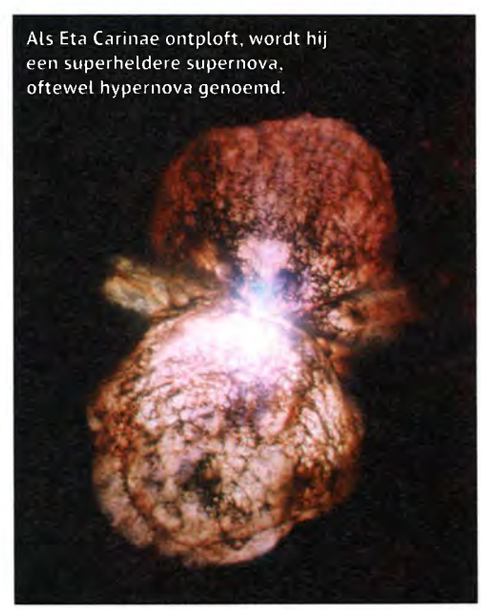
Betelgeuze
Type ster: Rode superreus
Wanneer zal de ster ontploffen: ergens in de komende honderdduizend jaar
Omvang: 1.000 keer groter dan de zon
Afstand: 643 lichtjaren
Massa: 7,7-20 zonmassa's

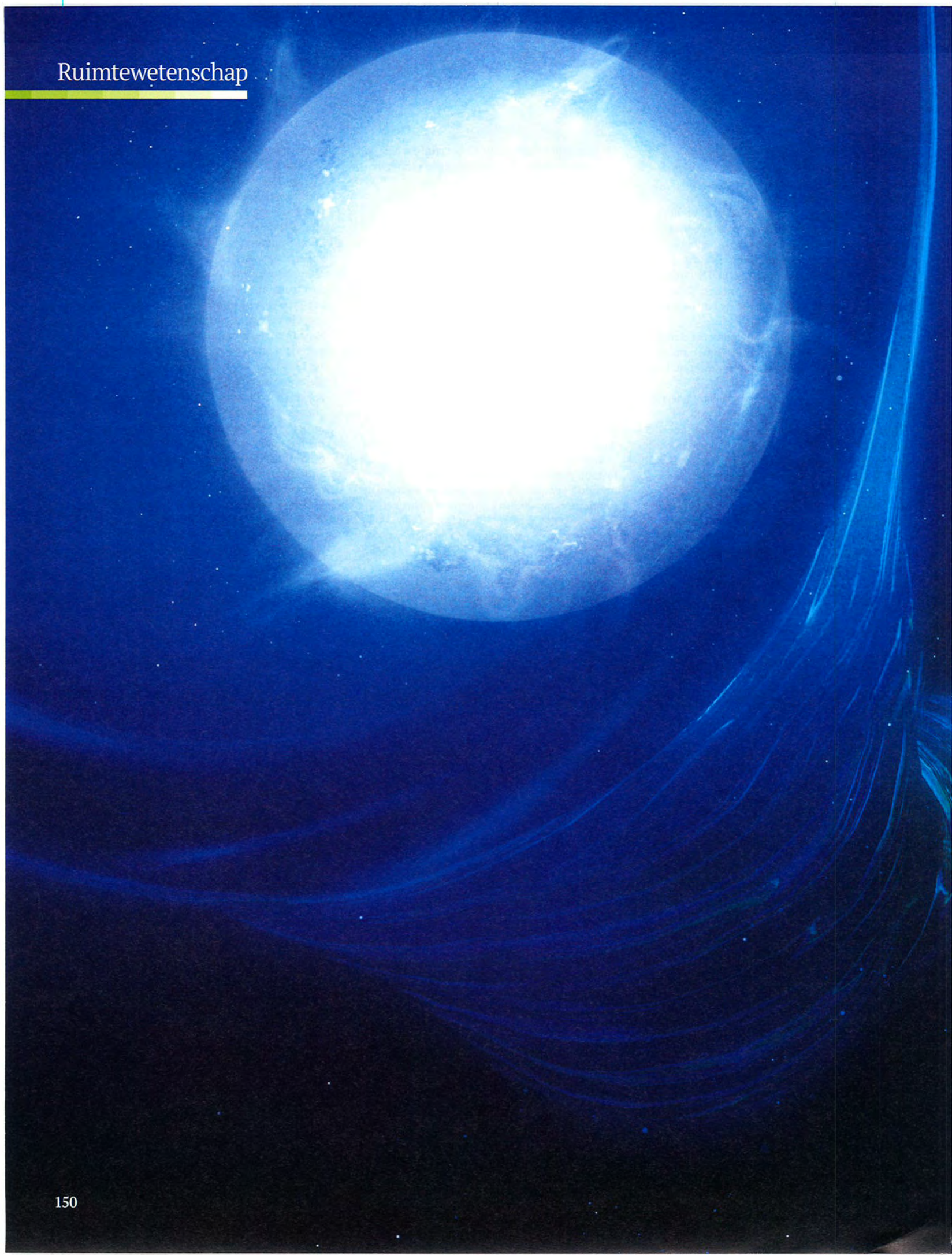
Antares
Type ster: Rode superreus
Wanneer zal de ster ontploffen: ergens in de komende honderdduizend jaar
Omvang: 883 keer groter dan de zon
Afstand: 550 lichtjaar
Massa: 12,4 zonmassa's

Mu Cephei
Type ster: Rode superreus
Wanneer zal de ster ontploffen: ergens in de komende paar miljoen jaar
Omvang: circa 1.000 keer groter dan de zon
Afstand: 6.000 lichtjaar
Massa: 19,2 zonmassa's

Rigel
Type ster: Blauwe superreus
Wanneer zal de ster ontploffen: ergens in de komende paar miljoen jaar
Omvang: 79 keer groter dan de zon
Afstand: 860 lichtjaar
Massa: 21 zonmassa's

Eta Carinae
Type ster: Dubbelster systeem (een helder blauwe variabele en een blauw-witte hoofdster)
Wanneer zal de ster ontploffen: ergens in de komende paar miljoen jaar
Omvang: 250 keer groter dan de zon
Afstand: 7.500 lichtjaar
Massa: 120 zonmassa's


Als Eta Carinae ontploft, wordt hij een superheldere supernova, oftewel hypernova genoemd.



Op zoek naar wormgaten

We spreken de wetenschappers die naar wormgaten zoeken, in een poging om de feiten van de science fiction te onderscheiden.

Wormgaten zijn een soort een sluiproute door het weefsel van de ruimtetijd. Ze kunnen gezien worden als tunnels waarvan de uiteinden bedekt zijn door een zwart gat en diens tegenhanger, het witte gat. Het witte gat spuugt liever dingen uit die te dicht bij de waarnemingshorizon komen, dan ze op te slokken.

Wormgaten lijken vooral goed te passen bij science fiction, zoals het wormgat in *Star Trek: Deep Space 9*, dat gezagvoerder Benjamin Sisko en zijn bemanning van de USS Defiant gebruiken. Zij gebruiken het wormgat om van het Alpha- naar het Gammakwadrant aan de andere kant van het heelal te reizen, met een enorme snelheid; een spannend idee. Maar we weten niet eens zeker of deze doorreisbare wormgaten, zoals ze in *Star Trek* geportretteerd worden, echt bestaan. Het vinden van zelfs het kleinste spoor van deze natuurlijke teleportatiepoorten lijkt een verre droom.
Met die kennis lijkt het heel vreemd dat grote organisaties nog steeds zoeken. Maar toch werken ze door, zoals bij Project Radio Astron, het eerste onderzoekscentrum voor radioastronomie in de Sovjet-Unie.

Interview

Waarom zoeken we naar wormgaten?

Professor Robert Owen, van Oberlin College in de VS, vertelt over de jacht op wormgaten.

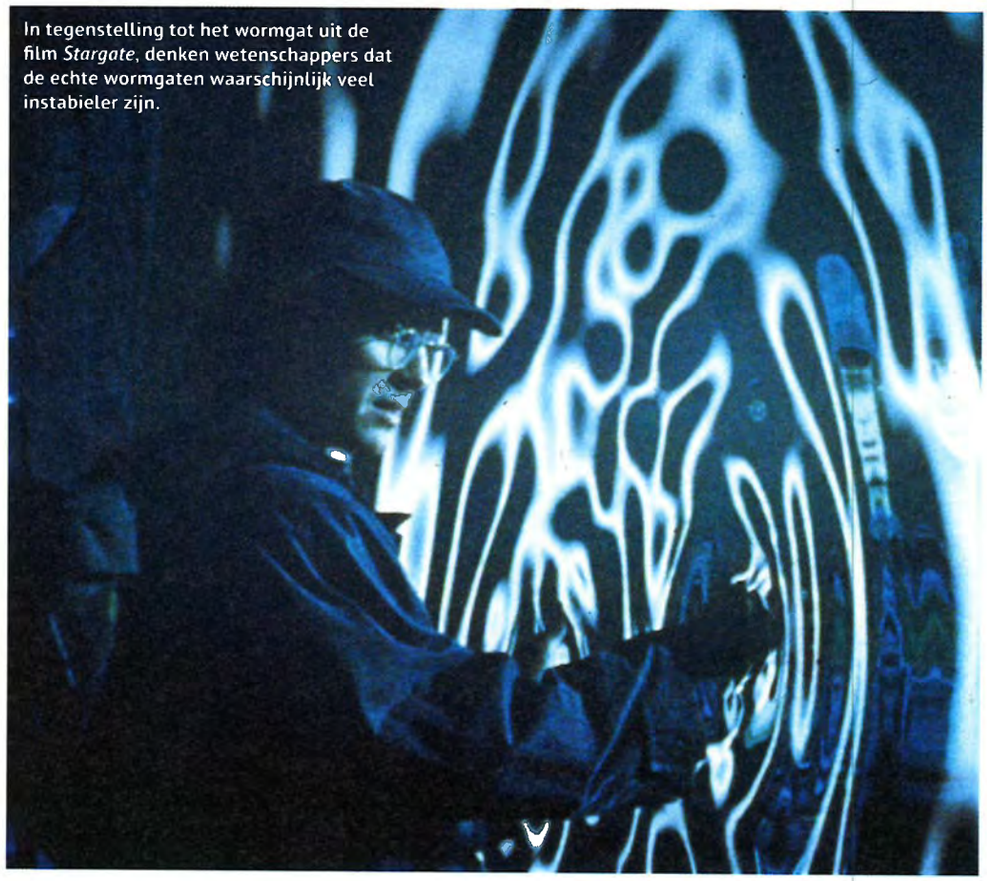
"Ik denk dat het enorm belangrijk is dat we blijven zoeken naar wormgaten en de ideeën erachter blijven onderzoeken. Er is zo veel te onderzoeken en we zien dat sommige onderwerpen praktischer zijn dan andere. Wormgaten en andere exotische fenomenen bieden een weg naar het begrijpen van enkele van de grootste vragen over de aard van ons heelal; de plek van ons bestaan.Daarom is dit een spannende onderneming en verdient het op zichzelf alle steun."

"Het is ook belangrijk om te bedenken dat de onderwerpen die nu ontzettend onpraktisch lijken, uiteindelijk centraal komen te staan in ons dagelijks leven. Elektromagnetische theorie werd ooit als een onpraktisch onderwerp gezien en nu is het een fundamenteel onderdeel van ons dagelijks leven. Kwantumtheorie is lang gezien als een geheimzinnig onderzoeksgebied, maar nu is het essentieel voor de werking van vele moderne technologieën."

"Een ander belangrijk punt is dat al het onderzoek verbonden is door inzichten die in het ene onderzoeksgebied opgedaan worden en vaak gebruikt worden in andere onderzoeksgebieden. Er is bijvoorbeeld een symbiose tussen onderzoek in deeltjesfysica en vastestoffysica – het onderzoeksveld dat onze kennis van materiaaleigenschappen vormt. Er is een doorlopend gesprek gaande tussen die twee onderzoeksgebieden. Breder gezien vindt dit in de hele wetenschap plaats. Dus je kunt nooit van tevoren weten wat de impact van een onderzoeksgebied zal zijn."

"Einsteins algemene relativiteitstheorie voorspelt heel duidelijk dat als er een wormgat bestaat, het erg onstabiel zou zijn en voor ons onbruikbaar om als tijdreispoort te gebruiken. Maar door alle wetenschappelijke vragen kunnen we niet helemaal zeker zijn dat de algemene relativiteit, zoals we deze nu begrijpen, in alle situaties de meest accurate beschrijving van ruimtetijd is."

"Het kan zijn dat in bepaalde situaties de algemene relativiteit niet meer klopt, net zoals de zwaartekrachtwetten van Newton vlak bij een zwart gat niet meer opgaan. Daarom wijs ik het idee niet tot we goed astronomisch bewijs hebben."



In tegenstelling tot het wormgat uit de film *Stargate*, denken wetenschappers dat de echte wormgaten waarschijnlijk veel instabieler zijn.

"De zoektocht naar wormgaten lijkt een waardevolle onderneming", stelt Robert Owen, assistent-professor in astrofysica aan het Oberlin College. Zijn ideeën vinden weerklank bij Igor Novikov, een Russische theoretische astrofysicus en kosmoloog die in het midden van de jaren 1980 een belangrijke bijdrage leverde aan de theorie van tijdreizen. Het Novikov-zelfconsistentieprincipe zegt dat het onmogelijk is om paradoxen in de tijd te maken. "Er is een hypothese die zegt dat oer-wormgaten bestaan en sommige regio's in ons universum kunnen verbinden met het model van het multiversum", vertelt Novikov, verbonden aan het Russische Instituut voor Ruimteonderzoek. "In dit geval is de zoektocht naar wormgaten een unieke kans om andere universa te bestuderen."

Deze onvindbare ruimtetunnels zouden op zichzelf al een enorme ontdekking zijn. Maar zo'n vondst zou ook de weg vrijmaken naar nog grotere ontdekkingen. Misschien zou het zelfs de fundamentele vragen over de aard van ons heelal kunnen beantwoorden. Hoewel we ze nog niet hebben gevonden, impliceren de wetten en complexe vergelijkingen van Einsteins algemene relativiteitstheorie dat ze er technisch gezien zouden moeten zijn. Misschien bestaan ze als microscopische structuren ter grootte van atomen, of als enorme maar ondoordringbare wormgaten die zwarte gaten in de centra van sterrenstelsels verbinden. Maar mocht een stabiel wormgat gevonden worden, dan zouden we er wellicht doorheen kunnen reizen en op een andere plaats en tijd in het universum uitkomen.

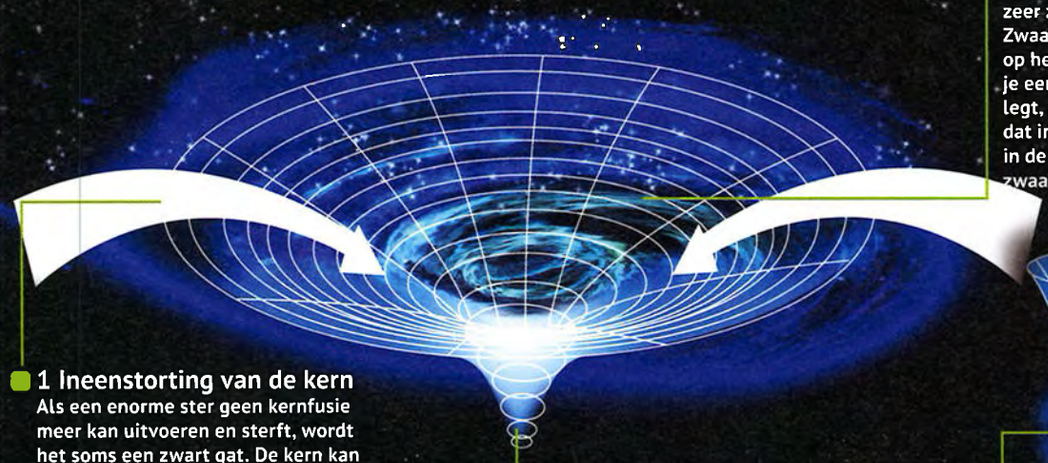
Het vinden van een wormgat is in de praktijk een uitdaging. Gelukkig houden wetenschappers zoals Owen wel van dergelijke problemen. De zoektocht behelst niet alleen het zoeken naar wormgaten zelf, maar ook naar de al even onvindbare witte gaten die theoretisch gezien aan één kant van zo'n wormgat moeten zitten. Hierdoor is het vinden ervan nog moeilijker. Desalniettemin vindt Owen dat de jacht op wormgaten, ondanks de moeilijkheden, gesteund moet worden. Om sporen van de gaten te vinden, bestudeert Owen de relativistische effecten van zwarte gaten en neutronensterren die al botsend zwaartekrachtgolven (rimpelingen in de ruimtetijd) veroorzaken.

Maar is het vinden van een wormgat echt zo belangrijk? We vroegen het theoretisch natuurkundige Kristan Jensen van de universiteit van Victoria. Samen met Andreas Karch, een natuurkundeprofessor aan de universiteit van Washington, kijkt Jensen puur vanuit een theoretisch perspectief naar wormgaten. "Eerlijk gezegd, nee", is zijn eerste antwoord. "Het lijkt me vrij onwaarschijnlijk dat er zich wormgaten van redelijke omvang bevinden in ons heelal." Dit komt omdat hij (net zoals vele andere weten-

"In de algemene relativiteit is tijdreizen een van de dingen die een natuurlijk gevolg zijn van wormgaten." Prof. Robert Owen

Het ontstaan van een wormgat

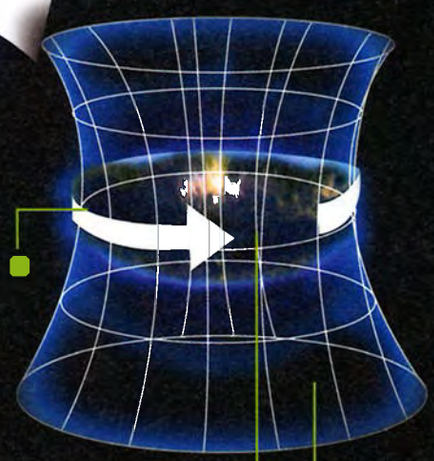
Zwart gat
Alles, van materie tot licht, wordt door de enorme aantrekkingskracht van een zwart gat naar binnen gezogen. Verwarrend genoeg is dit het toekomstige einde van een wormgat.



1 Ineenstorting van de kern
Als een enorme ster geen kernfusie meer kan uitvoeren en sterft, wordt het soms een zwart gat. De kern kan niet anders dan ineenstorten en een supernova-explosie ontstaat. De buitenste lagen van de ster worden de ruimte in geslingerd, terwijl de kern blijft krimpen.

Singulariteit

2 Een kosmisch afvoerputje
De kern wordt steeds kleiner en lijkt steeds minder op zijn vroegere zelf als ster. Als hij gekrompen is tot een puntje, is al zijn massa geconcentreerd in 1 klein gebied. Dit wordt een zogeheten singulariteit, een klein, maar zeer zwaar object dat ruimtetijd kan buigen. Zwaartekracht is het effect dat een zwaar object op het omliggende ruimtetijd-weefsel heeft. Als je een alledaags voorwerp op een beddenlaken legt, zie je dat het een deuk veroorzaakt. Alles dat in de richting van het voorwerp gaat, zal in de deuk vallen. Op dezelfde wijze oefent zwaartekracht invloed uit op het heelal.

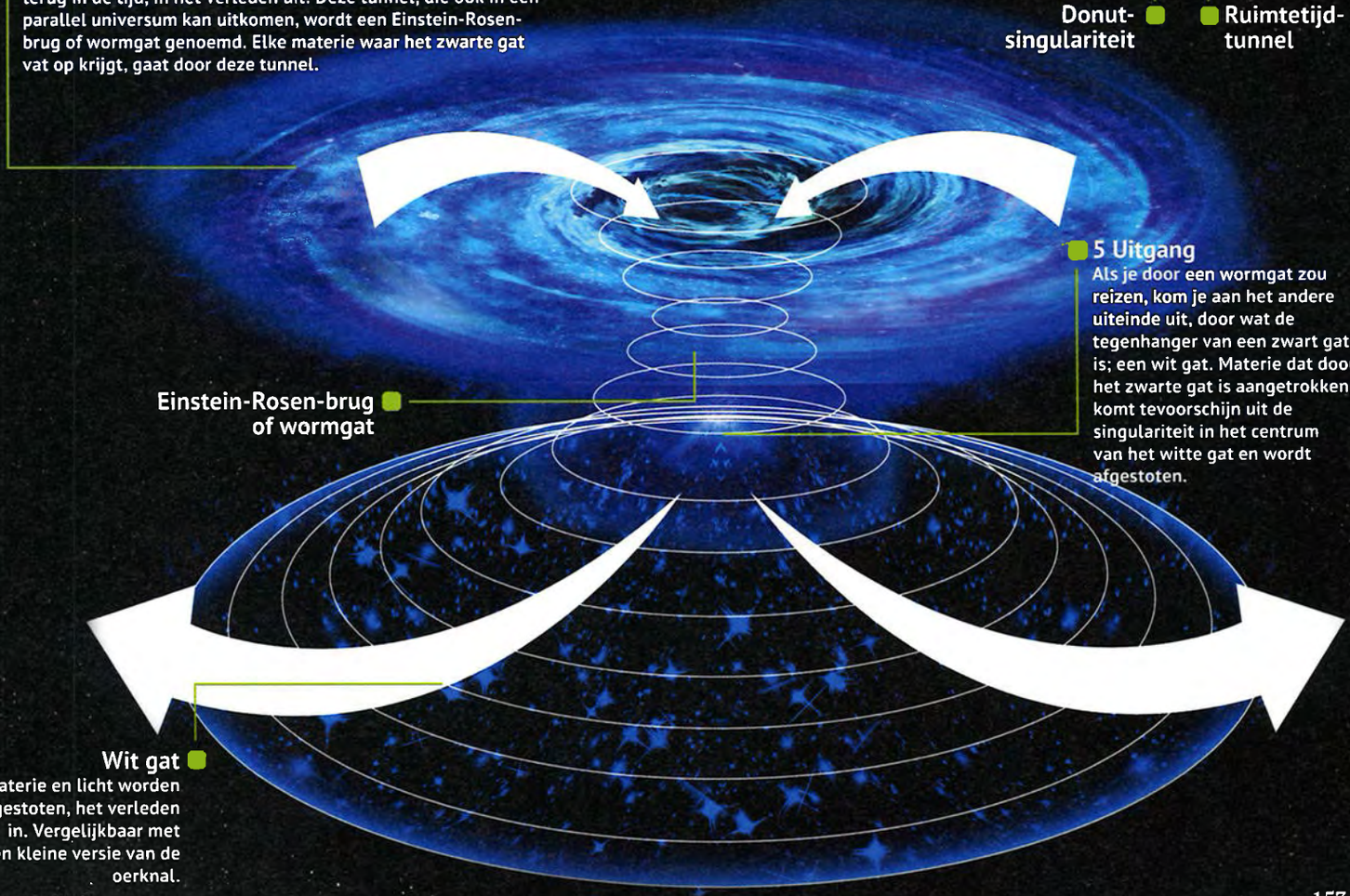


3 Het ontstaan van een donut
De kern van een ster kan nog spinnen als hij ineenstort. Terwijl hij tot een singulariteit ineenkrimpt, draait het steeds sneller, waarbij het overgebleven materiaal van de ster zich verspreidt. De ruimtetijd is niet langer gericht op 1 punt, maar wordt om een ring heen gevouwen.

Donut-singulariteit

Ruimtetijd-tunnel

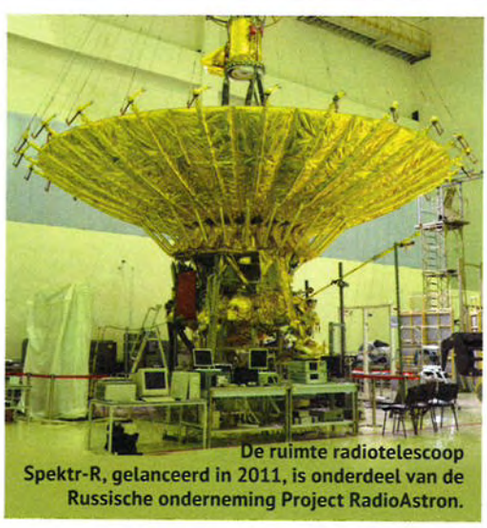
4 Door de ruimte heen prikken
De tunnel in wording prikt een gat door het weefsel van ruimtetijd en komt, bijna in een ongewone staat van omkering, terug in de tijd, in het verleden uit. Deze tunnel, die ook in een parallel universum kan uitkomen, wordt een Einstein-Rosen-brug of wormgat genoemd. Elke materie waar het zwarte gat vat op krijgt, gaat door deze tunnel.



5 Uitgang
Als je door een wormgat zou reizen, kom je aan het andere uiteinde uit, door wat de tegenhanger van een zwart gat is; een wit gat. Materie dat door het zwarte gat is aangetrokken, komt tevoorschijn uit de singulariteit in het centrum van het witte gat en wordt afgestoten.

Einstein-Rosen-brug of wormgat

Wit gat
Materie en licht worden afgestoten, het verleden in. Vergelijkbaar met een kleine versie van de oerknal.



De ruimte radiotelescoop Spektr-R, gelanceerd in 2011, is onderdeel van de Russische onderneming Project RadioAstron.

De telescoop deed op 27 september 2011 zijn eerste waarnemingen en legde de oude ster Cassiopeia A vast.

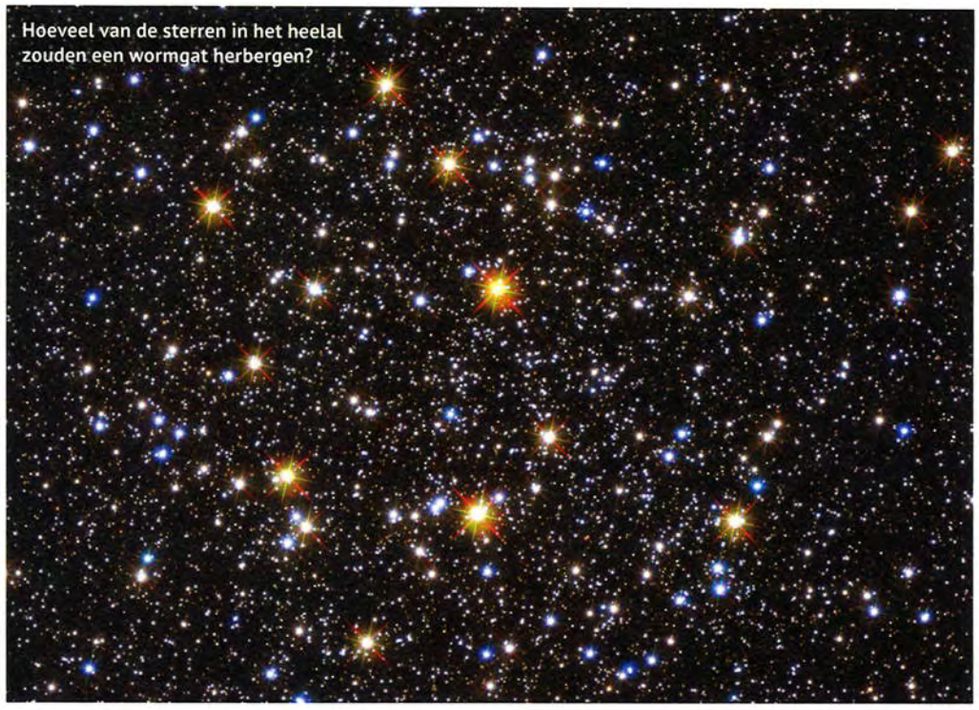
"Alles wat je nodig hebt om door een wormgat te reizen, is een ruimteschip. Gewoon erin duiken en gaan." Dr. Eric Davis

schappers) denken dat we ze gewoon erg graag willen vinden. Paradoxaal genoeg lijkt de theorie die zegt dat wormgaten bestaan een even sterk bewijs te zijn voor het idee dat ze niet bestaan. De reden dat we wellicht geen wormgat kunnen vinden, is dat ze in het echt enorm instabiele structuren zijn.

Owen zegt dat je alleen maar hoeft te denken aan het reizen door een wormgat om een goed idee te krijgen van de reden hierachter. "In de algemene relativiteit is tijdreizen een van de dingen die een natuurlijk gevolg zijn van wormgaten", zegt hij. "Maar het idee dat wormgaten gebruikt kunnen worden om mee door de tijd te reizen, wordt meestal gezien als indicatie dat ze waarschijnlijk niet kunnen bestaan." Owen refereert aan verschillende berekeningen, die laten zien dat wormgaten zichzelf vernietigen voor ze ons de kans kunnen geven om terug in de tijd te reizen. "Stel je voor dat ik beide uiteinden van een wormgat in mijn kantoor zou hebben. Als ik door één uiteinde stap, stap ik aan de andere kant van het kantoor er weer uit, maar dan tien seconden eerder," beschrijft hij. "Gedurende die tien seconden zijn er dus twee van mij in het kantoor. Maar wat als ik er voor kies om die tien seconden te wachten en tegelijkertijd met mijn vroegere zelf door het gat te stappen?" Het antwoord is dat Owen en zijn vroegere zelf samen weer uit het witte gat zouden stappen, maar dan tien seconden eerder, waardoor er drie Owens zouden zijn. "Als ik het blijf herhalen, zouden er vier van mij zijn, daarna vijf, zes, etcetera. Dit rare verhaaltje illustreert hoe een wormgat zichzelf zou vernietigen."

Owen heeft het over feedback, net zoals de hoge fluittoon die je krijgt als je een microfoon te dicht bij de speakers houdt. Want niet alleen mensen kunnen door deze wormgaten door de tijd reizen. Straling, of het nou hitte of licht is, kan ook het wormgat betreden en precies hetzelfde doen als de verschillende exemplaren van Robert Owen. Er zou zich zoveel energie in het wormgat ophopen, dat het uiteindelijk zou instorten. Een ander probleem is dat een wormgat te klein zou zijn om een persoon door te laten, laat staan een interstellair ruimteschip. Om met succes door een wormgat te reizen, moeten we een manier vinden om het gat te vergroten. Dit lijkt on-

De wetenschappers van Project RadioAstron vermoeden dat er een wormgat in het centrum van quasar 3C273 zit, wegens de temperatuurstijging en het vreemde magnetische veld.



Hoeveel van de sterren in het heelal zouden een wormgat herbergen?

waarschijnlijk omdat we het bestaan van een wormgat op zich nog niet eens hebben bewezen.

Maar niet iedereen denkt dat de reis onmogelijk is. Een van 's werelds leidende theoretische natuurkundigen, Kip Thorne, is professor emeritus aan het California Institute of Technology (Caltech) en een oude vriend van Stephen Hawking en wijlen Carl Sagan. Thorne denkt niet alleen dat de wormgaten wel degelijk bestaan, maar ook dat ze gebruikt kunnen worden als een soort tijdmachines die ons van de ene plek in het heelal naar een andere plek kunnen teleporteren.

Een andere wetenschapper die vertrouwen heeft in dit gebruik van wormgaten, is Eric Davis, een senior natuurkundig onderzoeker aan het Institute for Advanced Studies in Austin, Texas, VS. "Alles wat je nodig hebt om door een wormgat te reizen, is een ruimteschip. Het is gewoon erin duiken en gaan", zegt hij. Als het wormgat te klein is voor een ruimteschip hoef je volgens Kip Thorne, de man die de suggesties van wormgaten in Einsteins algemene relativiteitstheorie ontdekte, alleen maar het wormgat meer negatieve energiedichtheid en/of meer negatieve druk te geven om het gat te vergroten.

Wat is dan negatieve energie? Donkere energie, de drijvende kracht achter het uitdijen van het heelal, is een voorbeeld van negatieve drukenergie. Dit is de tegenhanger van krachten als zwaartekracht. Maar we weten niet eens wat donkere energie is, laat staan dat we zelf negatieve energie kunnen creëren. We zullen voorlopig dus nog niet door een wormgat reizen. Maar dat betekent niet dat de natuur geen manier heeft gevonden om wormgaten te vergroten.

Debat

Bestaan wormgaten echt?

Twee experts geven hun mening over of we ooit deze ruimtetijdtunnels zullen vinden

Ja

Dr. Eric Davis, senior natuurkundig onderzoeker aan het Institute for Advanced Studies.

Ja, wormgaten zouden in het echt moeten bestaan, omdat ze voorspeld zijn door Einsteins algemene relativiteitstheorie. Deze theorie voorspelde ook zwarte gaten, kosmologie, neutronensterren, zwaartekrachtlenswerking van sterrenstelsels, roodverschuiving en verwijding van tijd, het buigen van licht door sterren en nog andere zaken."

"Al deze astrofysische fenomenen zijn meerdere malen met hoge precisie waargenomen en bevestigen dus de algemene relativiteitstheorie. Er is geen reden waarom wormgaten niet zouden kunnen bestaan op basis van een uitgebreid geverifieerde theorie. Een andere voorspelling van de algemene relativiteitstheorie is het bestaan van zwaartekrachtgolven die een indicatie van het bestaan van wormgaten kunnen zijn en die zoektocht is al ruim vijftig jaar bezig. De zoektocht is nu nog verder geïntensiveerd met een groot Brits astronomieprogramma dat volledig gericht is op het detecteren van deze golven." Sinds dit interview zijn zwaartekrachtgolven feitelijk waargenomen en is hun bestaan bewezen. –Red.

Nee

Professor Andreas Karch, een natuurkundeprofessor aan de universiteit van Washington.

"Nee, ik zou zeggen dat ze waarschijnlijk enkel een theoretische constructie zijn. De kans is zeer klein dat we ooit een standaard-wormgat zullen zien; het soort waar je doorheen kan reizen, zoals je in scifi-films ziet. Volgens onze kennis van natuurkunde, zijn deze doorreisbare wormgaten vrijwel onmogelijk en bovendien hebben we er nog nooit een gezien."

"Zelfs als ze zouden bestaan, zou ik niet weten hoe we er naar moeten zoeken. Je kan het bestaan van een wormgat niet direct meten zonder twee sondes direct de twee verbonden zwarte gaten in te sturen, wat ook de basis van een wormgat zou kunnen vormen. Als ze elkaar halverwege tegenkomen, is er een wormgat. Zo niet, dan is er geen wormgat. In beide gevallen zouden de externe waarnemers nooit de uitkomst van het experiment te weten komen. Natuurlijk betekent dat niet dat we moeten stoppen met zoeken. We moeten altijd zoeken naar wat er daarbuiten is. Maar ik zou er geen geld op inzetten."

Het verhaal van het wormgat

Bruggen bouwen

In 1935 kwamen Albert Einstein en Nathan Rosen als eerste wetenschappers op het idee van wormgaten. Ze beschreven hoe hun theorie de ruimte voorstelt als twee vellen papier, terwijl ruimtelijk eindige bruggen de twee vellen verbindt. De technische naam is dan ook Einstein-Rosen-bruggen, maar de Amerikaanse natuurkundige John Wheeler introduceerde in 1957 de term 'wormgaten'.

De tijd vertraagd

Kip Thorne bedacht dat wormgaten als tijdmachines konden dienen. Stel je voor: je hebt een wormgat en laat één van de uiteinden versnellen tot bijna de lichtsnelheid, waarna je het terugbrengt. Volgens de speciale relativiteitstheorie gaat de tijd langzamer voor objecten die lichtsnelheid benaderen, dus een klok binnenin het versnellende uiteinde zou een totaal andere tijd aangeven dan een klok in het statische uiteinde van een wormgat.

De gekke-wetenschapper-paradox

Stephen Hawking denkt niet dat het mogelijk is om door een wormgat te reizen, zelfs al zouden we er een vinden en kunnen vergroten. Hij is bezorgd over tijdreizigersparadoxen en gebruikt de paradox van de gekke wetenschapper als voorbeeld. In deze paradox creëert een wetenschapper in zijn lab een wormgat dat hem tien minuten terug in de tijd voert. Als hij zichzelf van tien minuten geleden ziet, schiet hij zijn vroegere zelf dood. Maar als hij in het verleden al dood is, hoe kan hij in de toekomst dan in leven zijn om zichzelf dood te schieten?

Onzekerheid

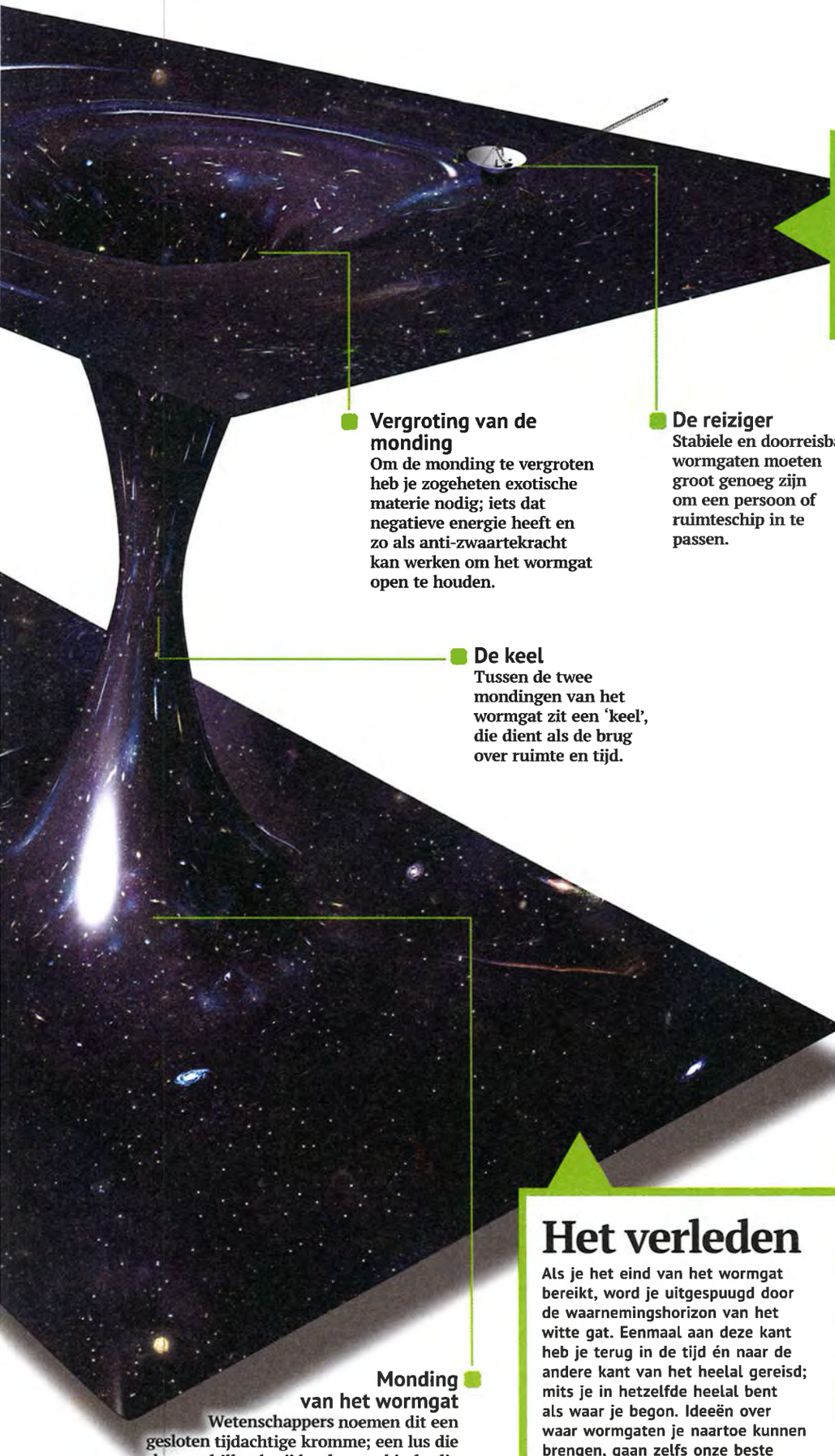
Stephen Hsu en Roman Buniy van de universiteit van Oregon stelden het onzekerheidsprincipe van de kwantummechanica voor. Zij stelden dat hoe preciezer de eigenschappen van een deeltje bekend zijn, hoe minder precies de overige eigenschappen bekend kunnen zijn. Aangezien wormgaten met kwantumeffecten werken, zeggen Hsu en Buniy dat je nooit kan weten waar je precies eindigt als je eenmaal door het wormgat reist.

Interstellar

Kip Thorne's theorieën worden gebruikt in de Hollywoodfilm *Interstellar*, waarbij Thorne co-producent was. In de film werd er door een wormgat gereisd. Thorne heeft eerder te maken gehad met science fiction; toen Carl Sagan voor zijn fictieboek Contact een manier zocht om sneller dan het licht door de ruimte te reizen, ontwikkelde Thorne de wetenschap achter wormgaten, waardoor Sagan dit in zijn verhaal kon gebruiken.

Van een wormgat een tijdmachine maken

Neem een vel papier en stel je voor dat dit een tweedimensionale verbeelding van ons heelal is. Verspreid over het papier liggen alle sterren en sterrenstelsels. Om van het ene punt naar het andere te reizen zou lang duren, dus stel je voor dat het mogelijk zou zijn om een korte weg te nemen die de ruimte ombuigt. Als je het papier zo vouwt dat de twee uiteindes elkaar raken, hoef je niet meer over de hele lengte van het papier te reizen om van het ene uiteinde naar het andere uiteinde te gaan. Je hoeft maar een klein stukje te reizen. Het idee is dat een wormgat als een brug dient, die beide uiteinden verbindt.
Stel je nu voor dat het papier niet alleen de ruimte voorstelt, maar ook tijd. Dit betekent dat een wormgat ook twee verschillende punten in de tijd verbindt.
Dit diagram illustreert exact hoe dit mogelijk is.



Het heden

Je startpunt kan overal en altijd zijn zodra het wormgat gevonden is. Dit kan gevormd worden door gewelddadige gebeurtenissen in het heelal, zoals botsende zwaartekrachtgolven die ontstaan zijn door kosmische straling op hoge snelheid.

Vergroting van de monding
Om de monding te vergroten heb je zogeheten exotische materie nodig; iets dat negatieve energie heeft en zo als anti-zwaartekracht kan werken om het wormgat open te houden.

De reiziger
Stabiele en doorreisbare wormgaten moeten groot genoeg zijn om een persoon of ruimteschip in te passen.

De keel
Tussen de twee mondingen van het wormgat zit een 'keel', die dient als de brug over ruimte en tijd.

Monding van het wormgat
Wetenschappers noemen dit een gesloten tijdachtige kromme; een lus die de verschillende tijdperken verbindt, die aan de respectievelijke mondingen van het wormgat te vinden zijn.

Het verleden

Als je het eind van het wormgat bereikt, word je uitgespuugd door de waarnemingshorizon van het witte gat. Eenmaal aan deze kant heb je terug in de tijd én naar de andere kant van het heelal gereisd; mits je in hetzelfde heelal bent als waar je begon. Ideeën over waar wormgaten je naartoe kunnen brengen, gaan zelfs onze beste theorieën te boven.

Dit is precies waar de Russische wetenschappers van Project RadioAstron op hopen. Ze gebruiken de grootste ruimtetelescoop die ooit gelanceerd is; niet Hubble, niet Herschel, maar Spektr-R. Deze radiotelescoop werd gelanceerd in 2011 en heeft een detector met een doorsnede van tien meter. Ze hopen dat ze met Spektr-R eindelijk bewijs vinden voor wormgaten en witte gaten.

De eerste stappen van het onderzoeksproject waren nogal mistroostig, omdat de Sovjet-Unie viel op het moment dat het project gereedkwam. Sindsdien is het onderzoek opnieuw begonnen. Tot voor kort was een oude radiotelescoop uit 1959 de voornaamste ontvanger van de signalen van Spektr-R. Maandenlang had de ontvanger superzware zwarte gaten in de centra van sterrenstelsels bestudeerd. Zelfs het zwarte gat van onze Melkweg, Sagittarius A*, kreeg de nodige aandacht. RadioAstron is vooral geïnteresseerd in observaties van de waarnemingshorizon van het zwarte gat.

Meer te weten komen over zwarte gaten zou ons naar de onvindbare wormgaten en witte gaten kunnen leiden, aldus de wetenschappers bij RadioAstron. De truc is om uit te kijken naar een bepaald herkenningsteken. "We moeten naar de structuur van magnetische velden bij het centrum van sterrenstelsels kijken," zegt Novikov, die in 1964 al aangaf dat de algemene relativiteitstheorie het bestaan van witte gaten niet uitsloot. "Als de structuur van magnetische velden macroscopische magnetische monopolen lijken, dan is dit een wormgat." Monopolen zijn magnetische fenomenen die maar één pool hebben en waarvan het bestaan voorspeld is, maar die tot nu toe onvindbaar zijn, net zoals wormgaten.

Het blijkt dat wormgaten – specifiek de witte gaten ervan – hun eigen straling zullen uitzenden. Dit in tegenstelling tot zwarte gaten, die zelf geen straling uitzenden, maar de straling van het omringende gas wervelend naar buiten stoten. We kunnen nog niet met zekerheid zeggen dat we een wormgat hebben gedetecteerd, maar het lijkt erop dat de wetenschappers bij RadioAstron iets op het spoor zijn. Ze richtten hun aandacht op de kern van quasar 3C273 in het sterrenbeeld Maagd, zo'n 2,5 miljard lichtjaar hier vandaan. Daar vonden ze iets onverwachts. Quasars zijn actieve galactische kernen die enorme hoeveelheden straling vanuit de omgeving van hun zwarte gat produceren. We weten dat zich een zwart gat in het centrum van 3C273 bevindt, maar de observaties van RadioAstron laten zien dat de temperatuur ervan gestegen is. Dan is er nog het vreemde magnetische veld

Het Optische Grondstation (OGS) in Tenerife is een instrument dat kwantumverstrengeling gebruikt om op een totaal veilige manier met satellieten te communiceren.

"Er zijn veel plekken waar wormgaten zich kunnen verbergen. Van binnenin zwarte gaten en sterren, tot de subatomaire wereld."

dat Novikov eerder noemde, dus moet RadioAstron blijven kijken om de steeds sterker wordende vermoedens van theoretische natuurkundigen te verifiëren.

In plaats van telescopen te gebruiken om de hemel af te zoeken naar deze onvindbare tunnels, zijn andere astrofysici ondertussen begonnen aan het zich voorstellen van een wormgat. Neem bijvoorbeeld het werk van natuurkundige theoretici Jensen en Karch. Zij beweren dat de deeltjes van het fenomeen kwantumverwikkeling verbonden is door miniatuur-wormgaten. Als twee deeltjes op elkaar inwerken, raken ze zo verwikkeld dat hun eigenschappen overeen gaan komen. De beroemde Onzekerheidsrelatie van Heisenberg betekent dat de kwantumstaten of eigenschappen van deeltjes zoals hun spin, niet vastliggen tot ze geobserveerd worden. (Denk aan Schrödingers kat die, opgesloten in een doos, zowel dood als levend is tot iemand de doos openmaakt en kijkt hoe het met het beestje is.) Maar als de spin van één verwikkeld deeltje gemeten is, zal het andere deeltje meteen dezelfde spin hebben, ook al liggen beide deeltjes elk aan een eigen kant van het heelal.

Hoe de deeltjes zo snel communiceren over zulke enorme afstanden, begrijpen we nog niet. Maar Karch en Jensen denken dat kleine, verwikkeld geraakte zwarte gaten wellicht verbonden worden door wormgaten. Julian Sonner van het Massachusetts Institute of Technology (MIT) is nog een stapje verder gegaan met dit idee. Hij liet zien dat wormgaten de verbinding konden zijn tussen verwikkelde quarks, de fundamentele deeltjes waaruit de protonen en neutronen binnenin atomen bestaan.

Ook in sterren zelf zoeken theoretici naar wormgaten, maar wegens hun locatie zullen we deze nooit kunnen bereiken. Vladimir Folomeev van het Instituut van Fysisch-technische problemen en Materiaalwetenschappen in Kirgizië heeft gezegd dat als spookmaterie (hetzelfde soort spul als donkere energie, met een negatieve energiedichtheid) bestaat, die mogelijk binnen sterren zal voorkomen.

"Het idee is heel eenvoudig", legt Folomeev uit. "Als donkere energie zo'n 70% van de volledige energiedichtheid in het heelal beslaat, dan is het logisch om aan te nemen dat er in sommige gevallen objecten kunnen bestaan, die uit een mix van gewone materie en donkere energie bestaan." Een gemixte ster zou zich vreemd gedragen, de stermassa beïnvloeden en vreemde trillingen veroorzaken omdat de negatieve energie door de ster heen beweegt.

Er zijn veel plekken waar wormgaten zich zouden kunnen verstoppen; bijvoorbeeld in zwarte gaten en sterren of zelfs op een subatomair niveau. De grote vraag is: hoe zou het zijn om erdoorheen te reizen? Volgens Davis zou de mond eruitzien als een bol met een verstoord spiegelbeeld van het heelal die zich aan de andere kant van het wormgat bevindt. Dit komt omdat het door het wormgat reizende licht afketst door de negatieve energiedichtheid. Als je erdoorheen reist, is er geen merkbare reistijd. Je bevindt je onmiddellijk aan de andere kant, en als je achter je kijkt, zie je een bol met daarop een verstoord spiegelbeeld van de regio waar je net vandaan kwam. Met één kleine stap door een heel heelal reizen, zou een enorme stap zijn voor de mensheid.

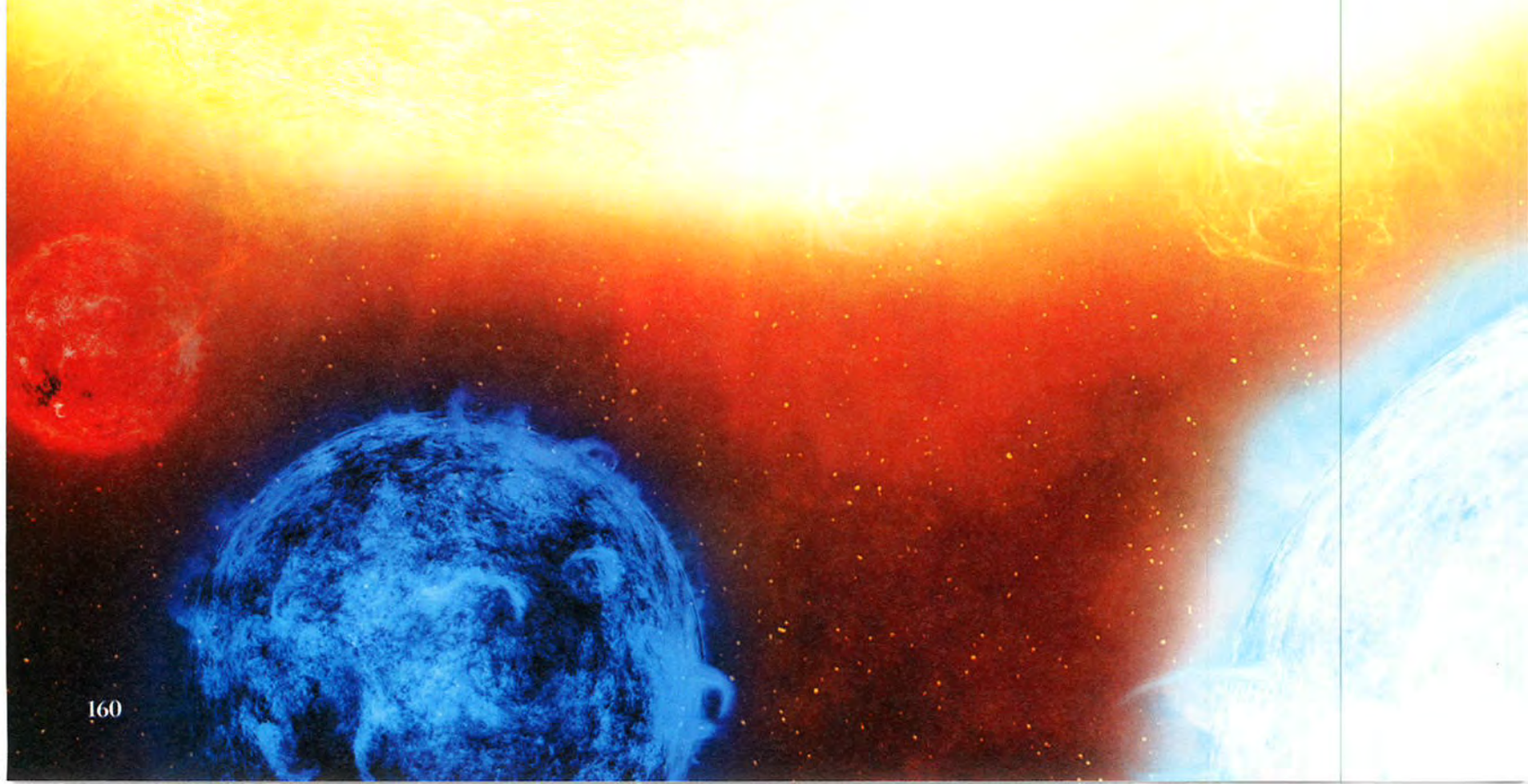
Een artistieke impressie van kwantumverstrengeling. Als twee fotonen goed op elkaar kunnen inwerken, raken ze verstrengeld.

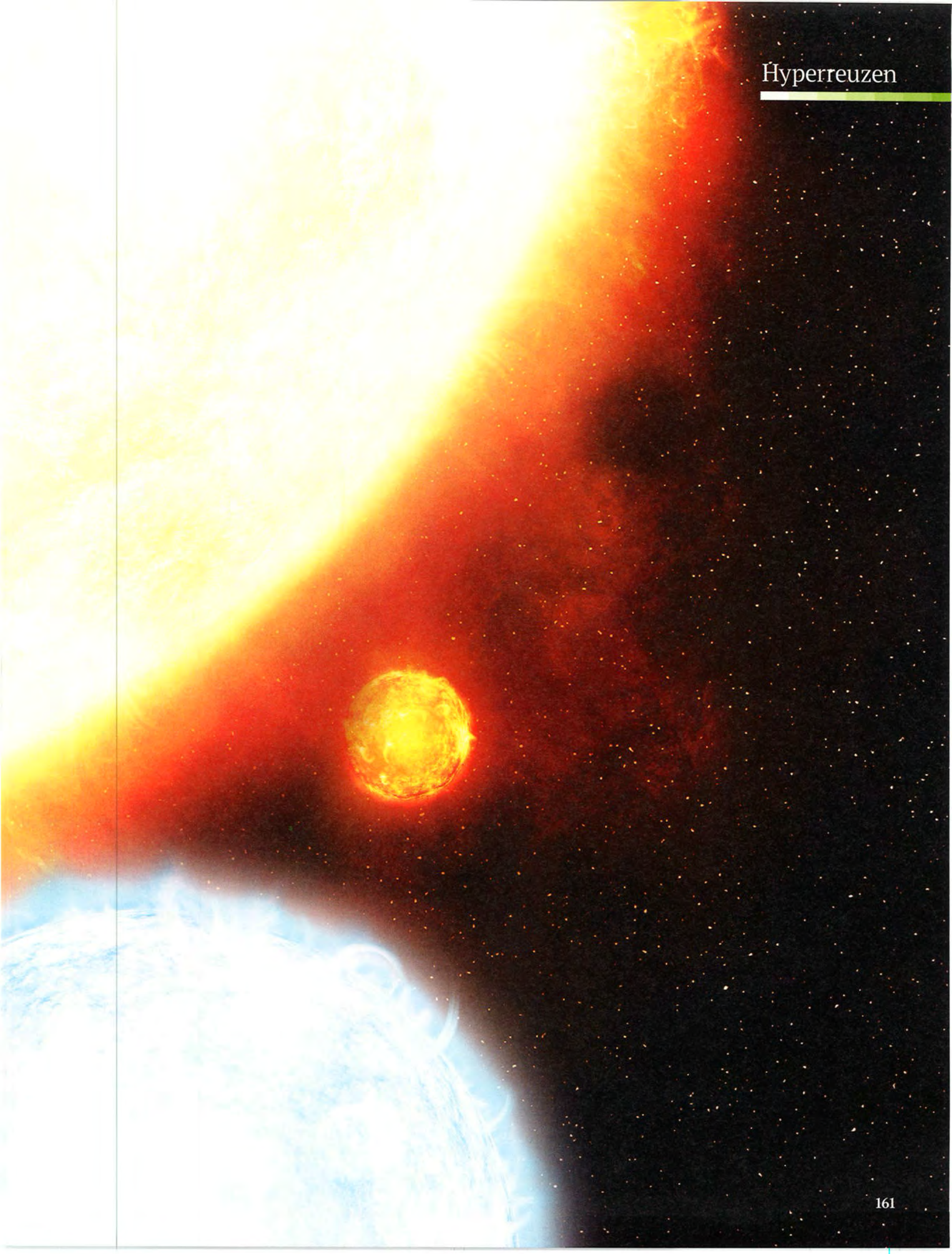
"Als je er doorheen reist, ben je er meteen."

© Science Photo Library; NASA; Caltech; NPO Lavochkin; Alamy; 1000 Vienna, Austrian Academy of Sciences

Hyper-reuzen

Het zijn de grootste sterren in het heelal – kosmische reuzen die tot wel een miljoen keer feller zijn dan de zon. Hoe rekken super- en hyperreuzensterren de grenzen van de astrofysica op?



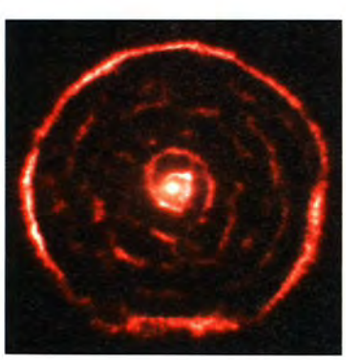


Als je op een heldere nacht naar de hemel kijkt, zie je honderden sterren. Maar slechts een paar daarvan vallen echt op. Heb je je ooit afgevraagd waarom? Bij sommige van die sterren komt het simpelweg doordat ze dichter bij de aarde staan. Sirius ligt bijvoorbeeld maar 8,6 lichtjaar van de aarde af, waardoor deze gemiddelde ster (maar toch nog steeds 25 keer feller dan de zon) de helderste ster van het firmament lijkt. Maar andere sterren lijken helder omdat ze dat ook zijn. De op één na helderste ster aan de hemel is Canopus en ligt 310 lichtjaar van de aarde af. Canopus is echter zo'n 15.000 keer feller dan de zon.

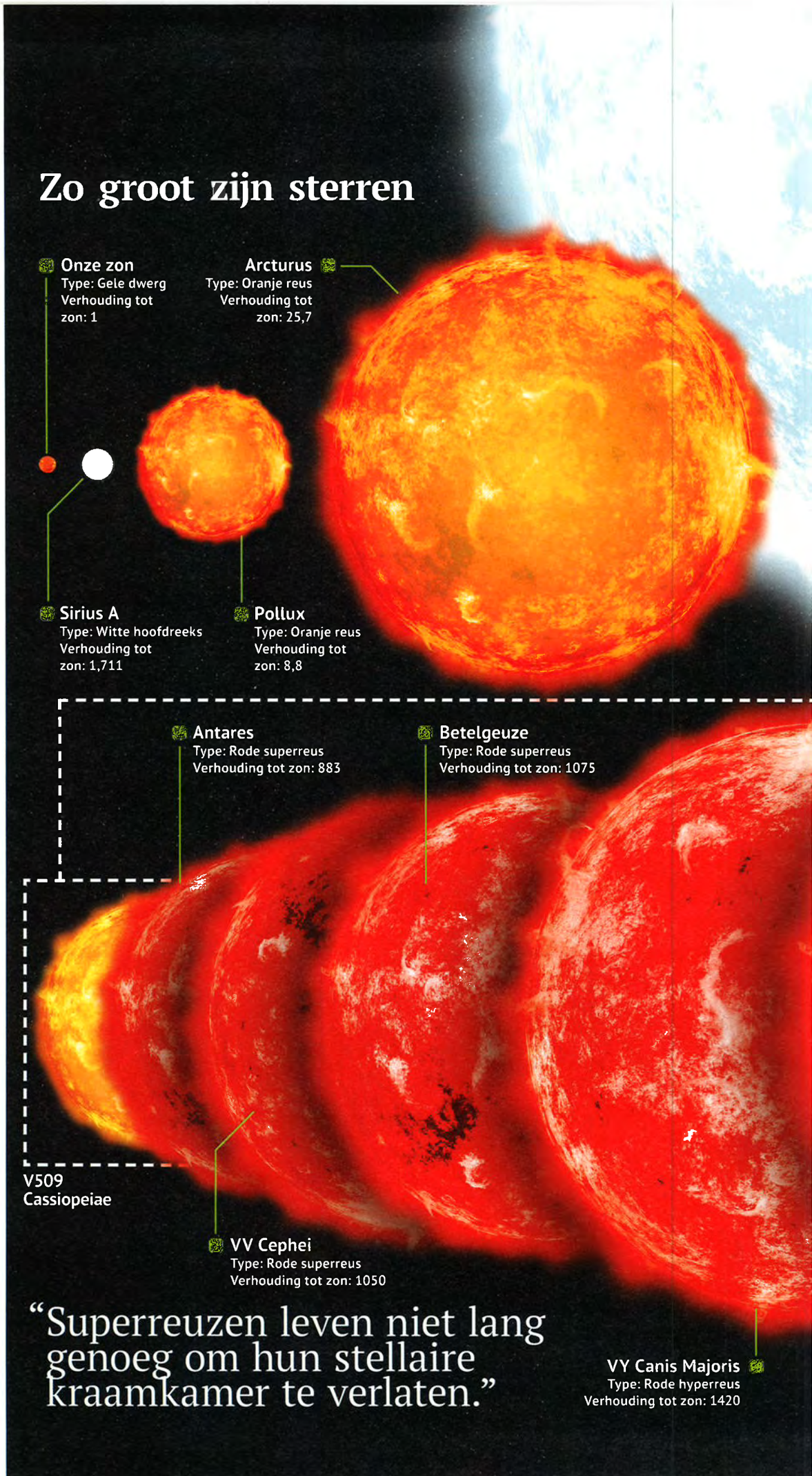
Sterren van deze categorie worden doorgaans superreuzen genoemd. Deze hebben de massa van tien of meer zonnen en ontwikkelen zich op een hele andere manier dan zonachtige sterren met lagere massa. Ze leven snel, jagen hun nucleaire brandstof er als een malle doorheen en sterven jong met spectaculaire supernova-explosies. De zwaarste sterren, die tientallen tot wel honderden zonsmassa's wegen, heten hyperreuzen en zijn de meest extreme sterren die we kennen.

"Ik denk dat astronomen van nature aangetrokken worden tot extremen", zegt prof. Paul Crowther van de universiteit van Sheffield. "Of dat nou de meest extreme fysieke omvang is, zoals bij de koele rode superreuzen, of de meest extreme massa, zoals bij de heetste en helderste blauwe superreuzen." Superreuzen en hyperreuzen werden voor het eerst ontdekt via theoretische astronomie en dan vooral door het Hertzsprung-Russelldiagram, waarmee astronomen de eigenschappen van sterren kunnen visualiseren.

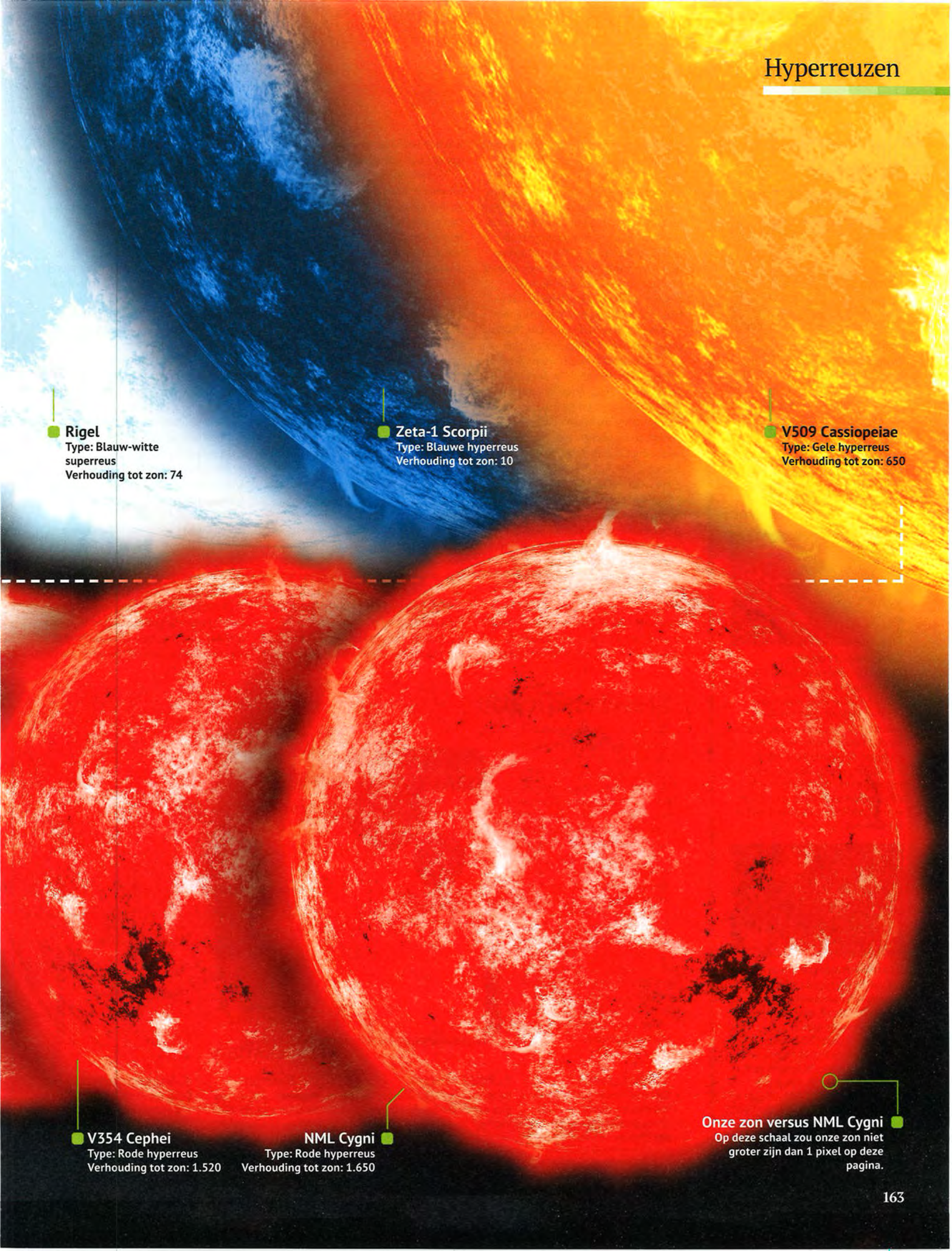
Maar het woord 'reus' kan verwarrend zijn, want in dit geval combineert het de concepten 'massa'



Dit plaatje laat de spiraalvorm van het materiaal rond de ster R Sculptoris zien.



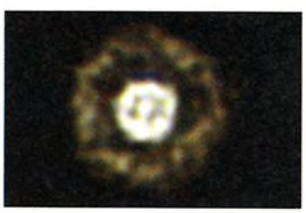
"Superreuzen leven niet lang genoeg om hun stellaire kraamkamer te verlaten."


Rigel
Type: Blauw-witte superreus
Verhouding tot zon: 74
Zeta-1 Scorpii
Type: Blauwe hyperreus
Verhouding tot zon: 10
V509 Cassiopeiae
Type: Gele hyperreus
Verhouding tot zon: 650
V354 Cephei
Type: Rode hyperreus
Verhouding tot zon: 1.520
NML Cygni
Type: Rode hyperreus
Verhouding tot zon: 1.650
Onze zon versus NML Cygni
Op deze schaal zou onze zon niet groter zijn dan 1 pixel op deze pagina.

Soorten reuzensterren

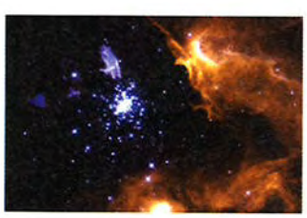
Rode superreuzen

De grootste rode reuzen zijn de grootste sterren in het heelal. Door veranderingen in hun kern, aan het eind van hun levensloop, zijn ze tot een miljard kilometer of meer in doorsnee gegroeid. Terwijl ze groeien en honderdduizenden keren de lichtsterkte van de zon bereiken, koelt hun oppervlakte af tot een duidelijke rode kleur. Maar vele wetenschappers zeggen dat dit superreuzen zijn, geen echte hyperreuzen.



Gele superreuzen

Gele superreuzen lijken een zeldzame tussenfase, hoewel ze hun naam krijgen wegens hun omvang en felheid, niet vanwege hun massa. Het lijken rode superreuzen die veel van hun buitenste gaslagen hebben uitgestoten, terwijl ze op weg zijn om supernova te gaan. Op dit plaatje van de Gebakken Ei-nevel zijn ringen van uitgestoten materiaal rond de centrale ster te zien.



Blauwe hyperreuzen

Blauwe hyperreuzen zijn de echte zwaargewichten van het heelal; ze zijn tientallen of zelfs honderden keren zwaarder dan de zon en zijn miljoenen keren lichtsterker. Hun sterke zwaartekracht beperkt hun afmetingen, dus zijn hun oppervlaktes intens heet. Het jonge serrencluster NGC 3603, te zien op het plaatje, bevat een binair systeem waarvan sterren respectievelijk 90 en 120 zonsmassa's zwaar zijn.

en 'omvang'. De sterren met de grootste diameter kunnen allemaal wel zo'n beetje 'rode reuzen' genoemd worden; een ontwikkelingsfase waar de meeste sterren doorheen gaan aan het eind van hun leven, waarbij hun omvang enorm zwelt (ze worden vaak groter dan de omloopbaan van de aarde) en hij nog veel feller wordt omdat hij meer energie uitstoot, maar tegelijkertijd rood kleuren dankzij de koele oppervlakte. Hoe zwaarder een ster, hoe groter hij zal groeien in de rode reus-fase. Rode superreuzen met tientallen zonsmassa's (zoals VY Canis Majoris, wiens diameter groter is dan die van de omloopbaan van Jupiter) zijn de grootste sterren. Maar echte monsterlijke zwaargewichtsterren halen deze fase nooit, dus hoewel de massa van een rode reus evenredig stijgt met de omvang, zijn de zwaarste sterren niet altijd de grootste.

De zwaarste sterren worden geboren in het hart van ineenstortende sterrennevels, waar gas en stof in overvloed aanwezig zijn. In tegenstelling tot de rustigere, zonachtige sterren die zich aan de randen vormen en daar miljoenen jaren over doen, worden deze stellaire zwaargewichten in slechts honderdduizend jaar zo groot. De totale hoeveelheid van grondstoffen in de nevel (wat te zien is aan de omvang van het sterrencluster dat eruit voortkomt) speelt daar ook een rol in.

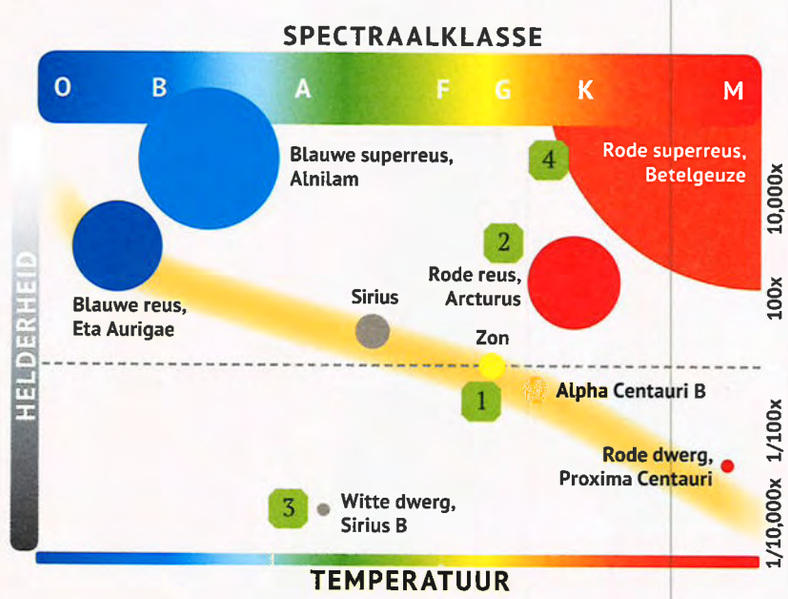
"Er lijkt een breed verband te zijn tussen de totale massa van een cluster en de zwaarste ster binnen het cluster. De Orionnevel heeft bijvoorbeeld de massa van 1000 zonnen en de zwaarste sterren daarbinnen zijn zo'n 30 keer zwaarder dan de zon, terwijl het NGC 3603-cluster zo'n 10.000 zonsmassa's aan materiaal herbergt en de zwaarste sterren daarbinnen zo'n 100 keer zwaarder zijn dan de zon. We weten niet precies waarom deze massafunctie zo werkt in jongere sterrenclusters, maar het lijkt een universele wet", zegt Crowther.

Competitie tussen de zware centrale sterren lijkt het formatieproces te versnellen waardoor superzware sterren steeds zeldzamer worden. De daaropvolgende vraag is natuurlijk of de zwaarste ster van een nog zwaarder cluster evenredig zwaarder wordt? En het antwoordt daarop lijkt 'nee' te zijn. We denken dat er een grens aan zit die verbonden is met het stervormingsproces. Een ster vormt zich in een ineenstortende nevel, die vol zit met wedijverende 'sterrenzaadjes' en heeft beperkte tijd om zoveel mogelijk materiaal aan te trekken voordat de buren dat doen. Het is vergelijkbaar met het gooien van snoepjes naar een groep kinderen; de kinderen die in het midden staan, grijpen snel de meeste snoepjes, terwijl de kinderen aan de rand amper snoep krijgen. Die competitie begrenst waarschijnlijk hoe groot een ster kan worden", zegt Crowther. Een ander groot verschil tussen normale en monstersterren ligt waarschijnlijk in de nucleaire reacties die hen brandend houden. In lichte sterren worden deze reacties overheerst door de proton-proton (p-p)-ketting, een proces waarbij individuele waterstofkernen samensmelten, met één reactie per keer. Zo produceren ze helium, het volgende zware element. De p-p-ketting stoot bij elke stap kleine hoeveelheden energie uit, maar doet dit langzaam, waardoor zonachtige sterren miljarden jaren kunnen blijven schijnen.

In zwaardere sterren wordt de echte 'CNO-cyclus' belangrijk. Deze fusiekettingreactie zet ook waterstofkernen om in helium, maar gebruikt daarbij koolstofkernen als een soort katalysator. Hierdoor kunnen de reacties veel sneller plaatsvinden. De CNO-cyclus wordt dominanter naarmate temperatuur en dichtheid stijgen, waardoor zwaargewicht sterren duizenden keren helderder schijnen dan hun minder zware buren. Maar ze leven wel veel korter, ook al bevatten hun

Sterclassificatie

Een van de meest nuttige instrumenten om sterren te classificeren is het Hertzsprung-Russell (H-R) diagram. Het beoordeelt sterren aan de hand van hun oppervlaktetemperatuur en kleur of 'spectraaltype' (op de horizontale as) en hun lichtsterkte (op de verticale as). Als een groot aantal sterren beoordeeld wordt, ontstaat er al snel een patroon: de meeste sterren liggen in een diagonaal lint, wat de 'hoofdreeks' genoemd wordt. Dit lint loopt van de vage, koude rode sterren naar de heldere, hete, blauwe sterren. Lichtsterke koele sterren en vage hete sterren ('rode reuzen' en 'witte dwergen') bezetten de gebieden aan beide zijden van de hoofdreeks en zijn relatief zeldzaam.



1. Hoofdreeks
Dit is de regio waar sterren het grootste deel van hun leven doorbrengen; de positie van een ster op de hoofdreeks wordt vooral bepaald door diens massa.

2. Rode reuzen
De meeste sterren doorlopen deze fase aan het einde van hun leven. Ze worden helderder en ontwikkelen een atmosfeer met een koele oppervlakte.

3. Witte dwergen
Deze hete sterren zijn vaag omdat ze klein zijn. Ze zijn opgebrand en hun kern koelt langzaam af, net zoals bij onze zon.

4. Superreuzen
Deze superzware sterren zijn enorm lichtsterk en laten verschillende kleuren zien terwijl ze heen en weer bewegen op het H-R-diagram.

De opbouw van een superreus

Rode superreus
Een rode superreus is een ster met veel massa die aan het eind van zijn leven komt en al lang de voorraad waterstof (als brandstof voor kernfusie) in de kern heeft opgebruikt.

Monsterster
De grootste superreuzen kunnen tot een formaat groeien dat groter is dan Jupiters omloopbaan rond de zon.

Nog steeds brandend
De kern van de ster blijft energie produceren door de kernfusie van zwaardere elementen, waardoor de dichtheid van de kern steeds groter wordt.

Fusiemantels
Ondertussen verspreid de kernfusie van lichtere elementen zich over een reeks mantels (of schillen) rond de kern.

Buitenste mantel
De enorme hoeveelheden energie, afkomstig uit de kern en de omliggende mantels, zorgen ervoor dat de buitenste lagen van de ster opzwellen.

Koele oppervlakte
Door zijn gigantische omvang heeft de ster een enorme oppervlakte, dus ondanks dat er enorme hoeveelheden energie naar buiten gepompt worden, blijft de oppervlakte relatief koel en ziet het er rood uit.

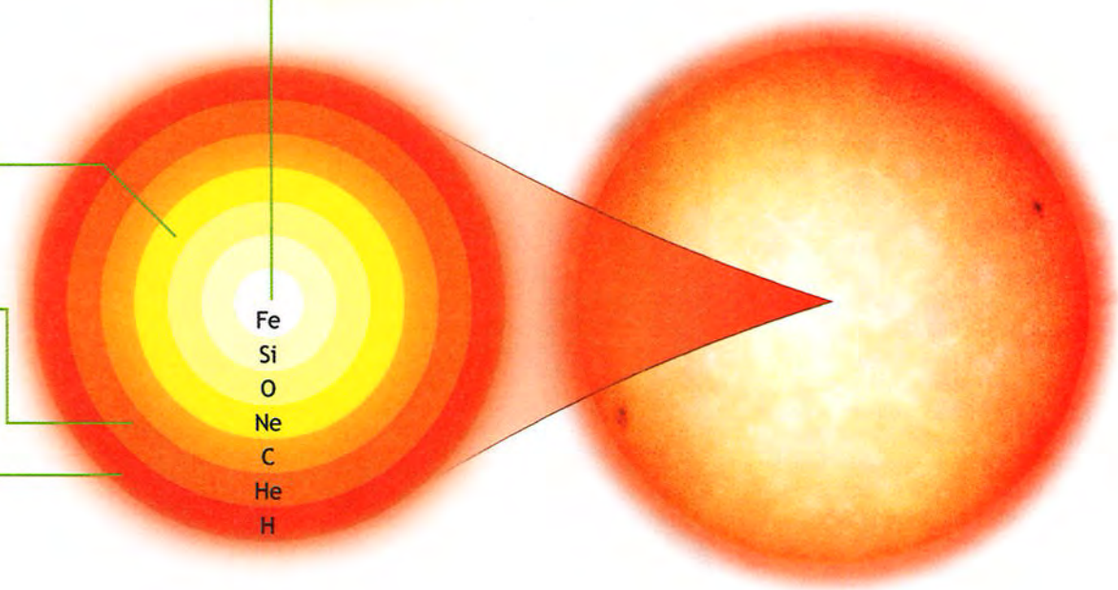
Convectiecellen
Enorme stromingen binnen de buitenste mantel zorgen voor stijgende en dalende massa's van heet en koel gas. Dit geeft de ster vaak een gevlekt uiterlijk.

IJzeren kern
Vlak voordat een ster sterft, vormt er zich een solide ijzeren kern. In tegenstelling tot kernfusie van lichtere elementen, kost kernfusie van ijzer meer energie dan hij oplevert. Hierdoor stort de kern ineen en volgt er een supernova.

Zwaardere mantels
Dichter bij de kern blijven zwaardere elementen fuseren tot nog zwaardere elementen, waardoor de superreus kan blijven schijnen.

Heliumfusie
Een tweede mantel van heliumfusie volgt op de waterstofmantel aan de buitenkant van de ster. De heliumfusie zorgt voor zwaardere elementen als koolstof en zuurstof.

Waterstoffusiemantel
Veranderingen in de dichtheid en temperatuur van de ster zorgen ervoor dat waterstof door kan gaan in een zwellende mantel rond de kern, zelfs nadat het waterstof in de kern is opgebruikt.



kernen veel meer nucleaire brandstof dan zonachtige sterren; zware sterren jagen hun brandstof er in enkele miljoenen jaren doorheen, waarna ze opzwellen tot superreuzen of hyperreuzen.

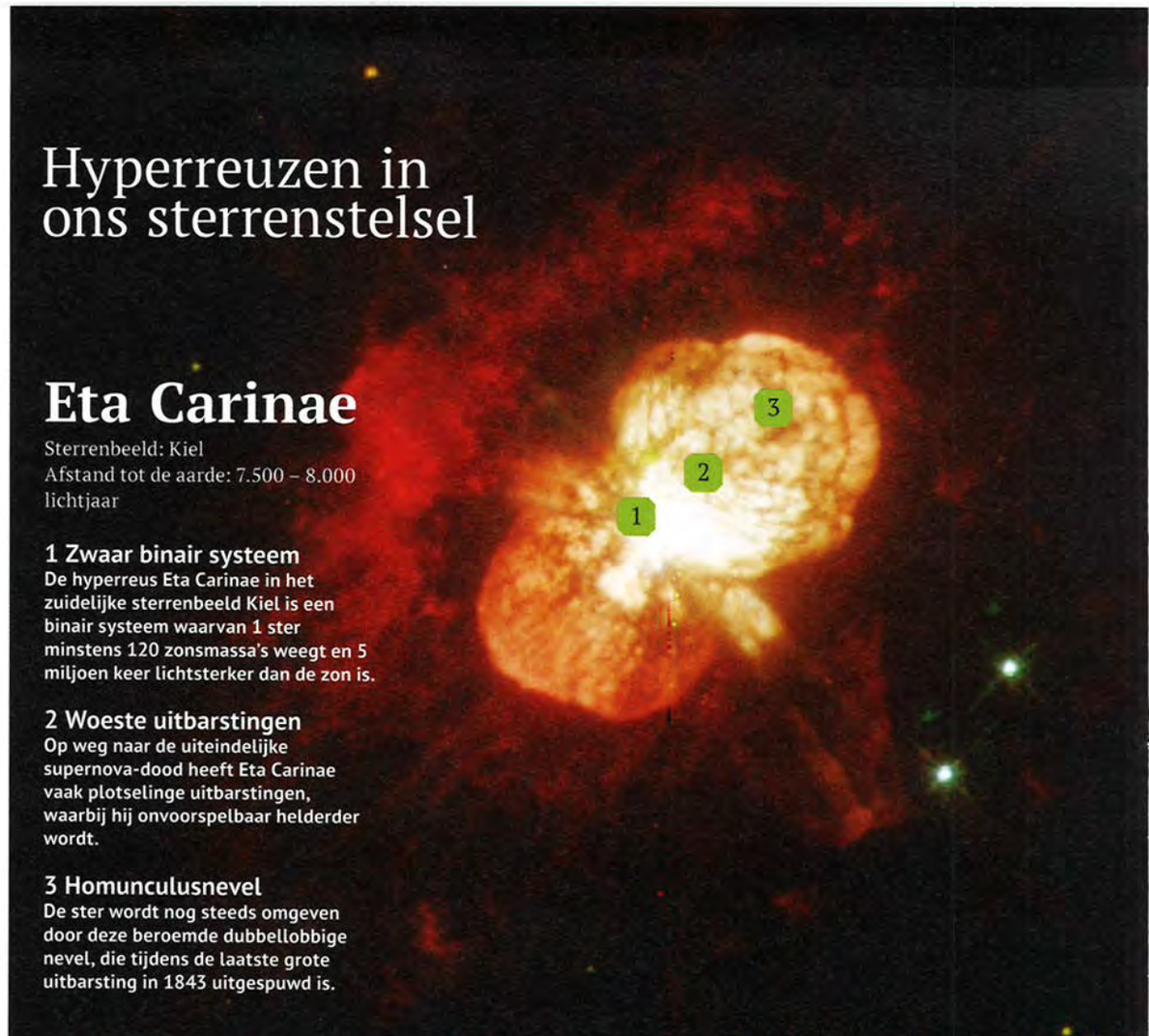
Deze korte levensduur betekent dat superreuzen bijna altijd in het centrum van nieuwe sterrenclusters worden gevonden. Deze clusters vallen gedurende miljoenen jaren uiteen, waarna ze uiteindelijk hun langlevende sterren over een groot gebied in de ruimte verspreiden. Maar superreuzen leven niet lang genoeg om hun stellaire kraamkamer te verlaten.

"Deze sterren zijn ontzettend zeldzaam; ze kunnen zich maar op een beperkt aantal plekken vormen en hebben een zeer korte levensduur, dus zelfs als je al een sterrencluster van maar vijf miljoen jaar oud vindt, zullen de zwaarste sterren daarvan al uitgestorven zijn", zegt Crowther. "Er is maar een handvol echt jonge, zware clusters die dicht genoeg bij de aarde staan om door ons geobserveerd te kunnen worden en deze zijn razendsnel massa aan het verliezen, dus is de massa die we meten afhankelijk van hoe oud die sterren toevallig zijn. De plekken waar je deze superzware clusters vindt, hebben vaak een verhoogde snelheid in stervorming, meestal door galactische botsingen of interacties."

Hoe zien superreuzen en hyperreuzen er dan uit? Ze hebben verrassend veel vormen. Hoewel het H-R diagram impliceert dat ze allemaal extreem hete oppervlakken hebben en een blauwe kleur lijken te hebben, hebben ze in het echt verschillende kleuren. Superreuzen hebben de meeste variatie en het lijkt er op dat hun kleur simpelweg een reflectie is van de precieze balans tussen de naar binnen gerichte zwaartekracht en de naar buiten gerichte stralingsdruk in de verschillende levensfases van de reuzen. Deze balans, 'hydrostatisch equilibrium' genoemd, bepaalt de totale diameter van een ster en daardoor dus ook de oppervlakte. Zelfs zeer felle sterren kunnen een zonachtig gele kleur hebben, of zelfs nog koelere rode oppervlakken als ze groot genoeg zijn om de stralingshitte dunnetjes te verspreiden.

De meeste sterren behouden gedurende hun leven dezelfde massa (en dus ook zwaartekracht). Hun equilibrium wordt vooral beïnvloed door veranderingen in felheid, welke veroorzaakt worden door veranderingen in de nucleaire reacties in hun kern. Hieruit kunnen we afleiden dat blauwe superreuzen nog

Hyperreuzen in ons sterrenstelsel



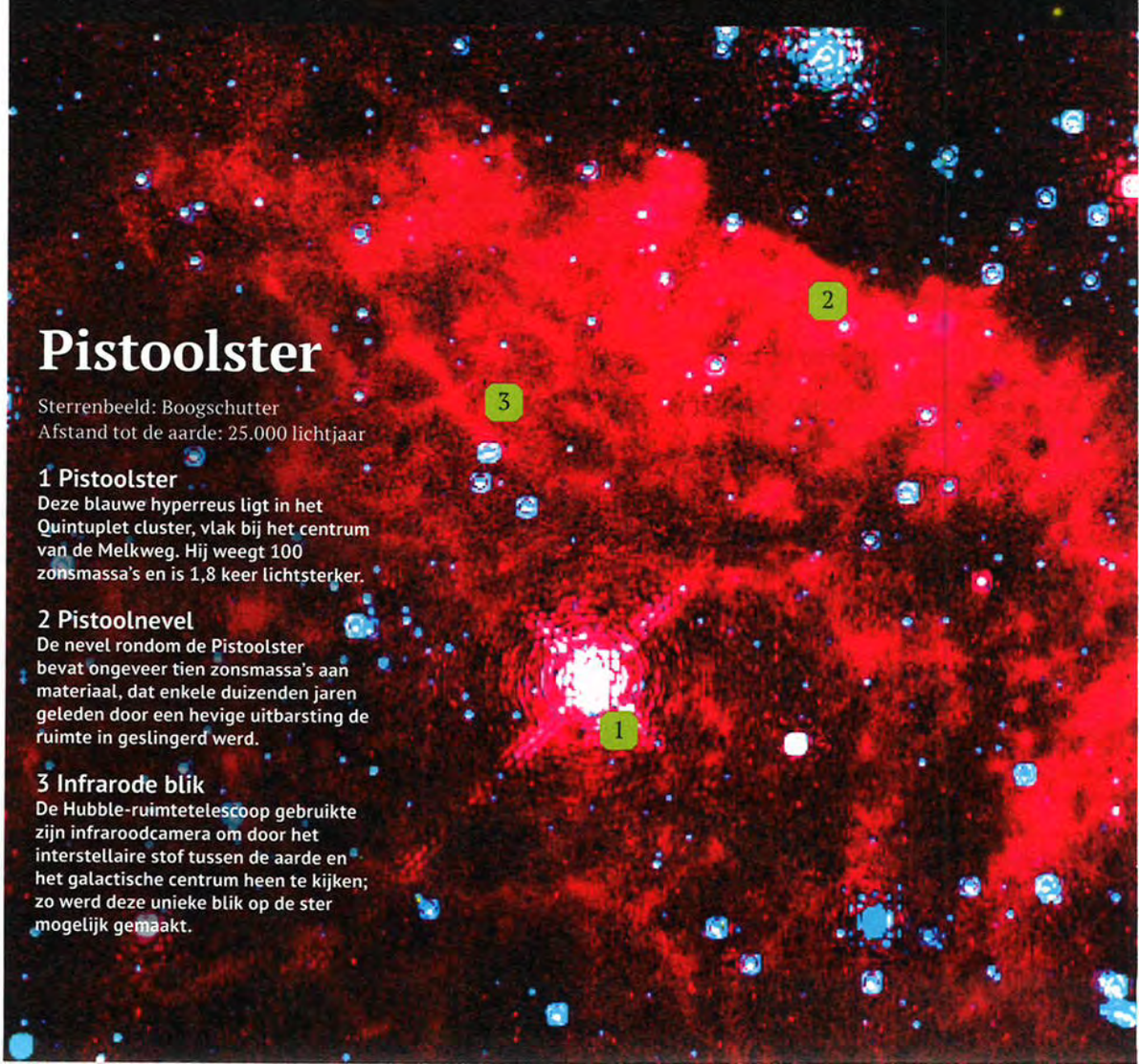
Eta Carinae

Sterrenbeeld: Kiel
Afstand tot de aarde: 7.500 – 8.000 lichtjaar

1 Zwaar binair systeem
De hyperreus Eta Carinae in het zuidelijke sterrenbeeld Kiel is een binair systeem waarvan 1 ster minstens 120 zonsmassa's weegt en 5 miljoen keer lichtsterker dan de zon is.

2 Woeste uitbarstingen
Op weg naar de uiteindelijke supernova-dood heeft Eta Carinae vaak plotselinge uitbarstingen, waarbij hij onvoorspelbaar helderder wordt.

3 Homunculusnevel
De ster wordt nog steeds omgeven door deze beroemde dubbellobbige nevel, die tijdens de laatste grote uitbarsting in 1843 uitgespuwd is.



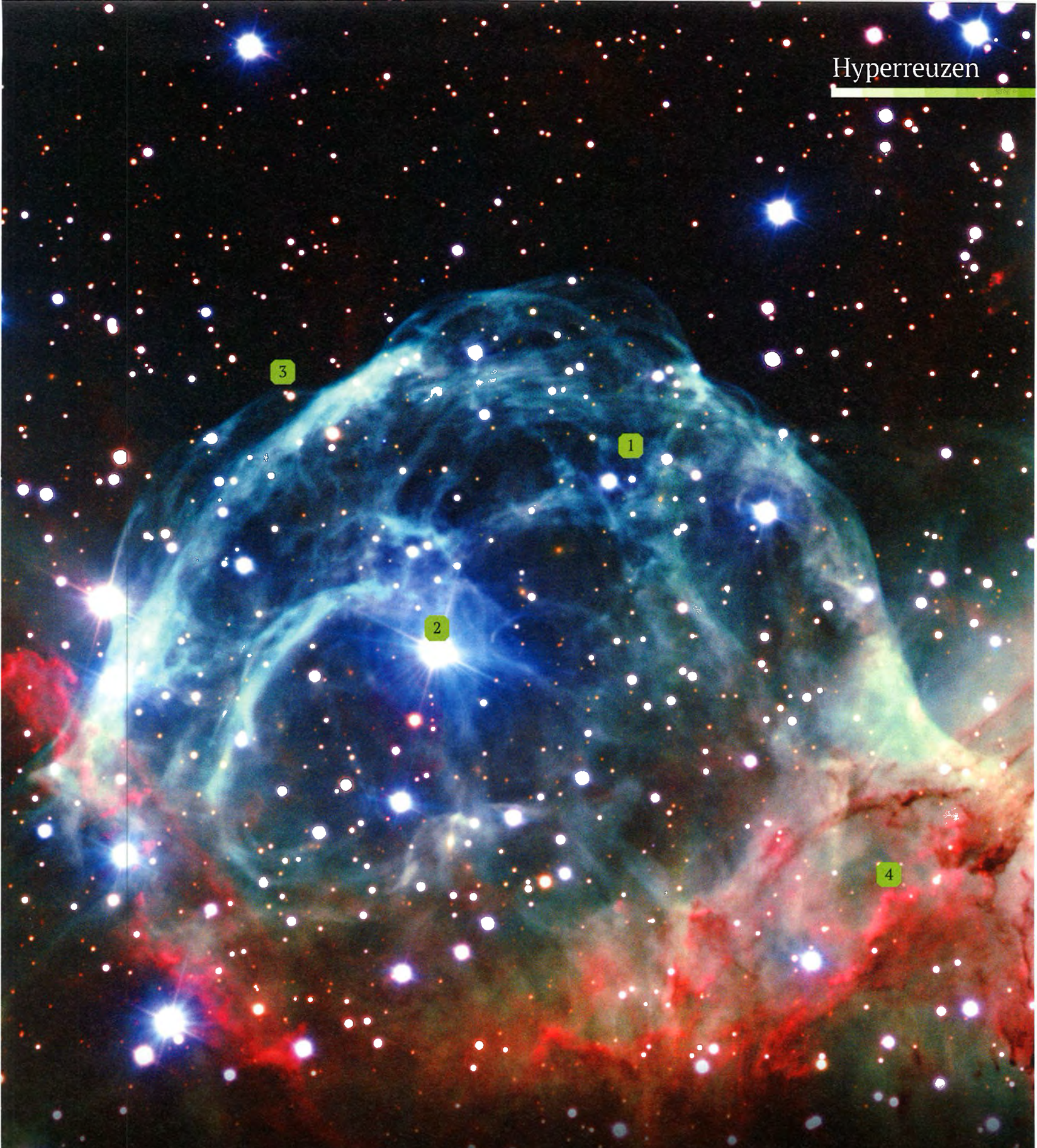
Pistoolster

Sterrenbeeld: Boogschutter
Afstand tot de aarde: 25.000 lichtjaar

1 Pistoolster
Deze blauwe hyperreus ligt in het Quintuplet cluster, vlak bij het centrum van de Melkweg. Hij weegt 100 zonsmassa's en is 1,8 keer lichtsterker.

2 Pistoolnevel
De nevel rondom de Pistoolster bevat ongeveer tien zonsmassa's aan materiaal, dat enkele duizenden jaren geleden door een hevige uitbarsting de ruimte in geslingerd werd.

3 Infrarode blik
De Hubble-ruimtetelescoop gebruikte zijn infraroodcamera om door het interstellaire stof tussen de aarde en het galactische centrum heen te kijken; zo werd deze unieke blik op de ster mogelijk gemaakt.



De Helm van Thor

1 Helm van Thor
Dit kenmerkende nevel, dat als NGC 2359 gecatalogiseerd is, ligt 15.000 lichtjaar van de aarde af, in het sterrenbeeld Canis Major.

2 Wolf-Rayet ster
De centrale ster is een blauwe superreus met een krachtige zonnewind materiaal van het oppervlak blaast. Dit wordt een Wolf-Rayet-ster genoemd.

3 Gasmantel
Terwijl de wind van de ster met de omliggende materie botst, wordt hij verhit en creëert hij energie door middel van licht, waardoor er een gloeiende gasbel ontstaat.

De botsingen tussen de door de ruimte reizende ster en interstellair materiaal zorgen voor de kenmerkende helmachtige vleugels van de nevel.

steeds dicht bij de 'hoofdreeks' van stellaire evolutie liggen, terwijl gele sterren aan het einde van hun leven zijn gaan groeien. Rode superreuzen zijn nog verder in hun levenscyclus en zijn de grootste sterren van allemaal.

Maar het verhaal is anders bij echt zware hyperreuzen. Deze sterren kunnen nooit de rode kant van het H-R-diagram halen; in plaats daarvan veroorzaakt hun straling zo veel druk dat de buitenste lagen de ruimte in geblazen worden. Hiermee komen de ondergelegen lagen bloot te liggen en blijft de ster heet. Hierdoor behouden ze hun hele leven lang blauwe of withete oppervlakken. Deze sterke uitstroom van waterstof is te zien aan het spectrum van een hyperreus; dit is een van de belangrijkste manieren om de hyperreuzen te onderscheiden van zeer felle superreuzen.

Het grensgebied tussen superreuzen en hyperreuzen is gevuld met een vreemde verzameling ongewone sterren en je zult geen twee astronomen vinden die het eens zijn over de precieze scheidslijn. Lichtsterke blauwe varianten zijn bijvoorbeeld extreem felle sterren die lange, langzame veranderingen in helderheid laten zien, met zo nu en dan een uitbarsting. Hieronder vallen zowel superreuzen als hyperreuzen. De meeste van de zeldzame, zogeheten 'gele hyperreuzen' lijken, ondanks hun naam, eigenlijk rode superreuzen te zijn die opwarmen en hun buitenste lagen afstoten. Daarnaast zijn astronomen, zoals we gezien hebben, het niet eens of rode hyperreuzen eigenlijk wel bestaan! Andere categorieën super- of hyperreuzen hebben, afhankelijk van de eigenschappen die hun licht vertoont, exotische namen als Wolf-Rayet-sterren en Ofpe-sterren.

Maar tot voor kort kon men alleen superzware sterren wegen en super- en hyperreuzen identificeren door ze te vinden in binaire systemen. In zo'n systeem kunnen de bewegingen in de omloop van de sterren gebruikt worden om hun massa te meten. Dankzij een recente doorbraak lijken deze beperkingen tot het verleden te behoren.

Superreuzen en hyperreuzen leven snel en sterven jong, maar welk lot staat hen te wachten aan het eind van hun leven? Zodra een ster de waterstofbrandstof in zijn kern heeft opgebruikt, wordt het einde van de hoofdreekslevensduur bereikt en kan hij alleen blijven schijnen door waterstof uit de schil rond de kern, of zwaardere elementen in de kern zelf te verbranden. Door deze processen schijnt de stervende ster feller en zwelt hij op, zodat hij zich richting een rode superreus ontwikkelt. Ondertussen ontwikkelt de kern een complexe, gelaagde structuur van steeds zwaardere elementen. Elke nieuwe fase van kernfusie produceert minder energie en is sneller uitgeput dan de vorige, maar de straling die uit de kern blijft stromen helpt de ster tegen ineenstorting onder zijn eigen zwaartekracht.

Dit verandert allemaal als de ster ijzer probeert te fuseren. Dit is het eerste element waarbij energie opgenomen wordt als de kernen fuseren. De energievoorziening van de ster hapert en valt uit, waarop het enorme gewicht van de buitenste lagen naar beneden komt storten. In deze 'kernineenstortingsupernova' wordt de ijzerrijke kern samengeperst tot zeer kleine afmetingen, terwijl een enorme schokgolf door de rest van de ster gaat. De schokgolf verhit de resten en perst ze samen, tot de ster ontsteekt in een explosie van kernfusie die maanden kan duren en feller kan schijnen dan een miljard sterren. Als de supernova uitdooft en de rook optrekt, kunnen de samengeperste resten van de kern een superdichte neutronenster of zelfs een zwart gat gevormd hebben.

Voor de allerzwaarste sterren is er een derde optie. "Theoretici vertellen ons dat een ster ook gewoon kan exploderen als hij sterft terwijl er zo'n 200 zonsmassa's of meer aan materiaal over is. Het is dan niet de gewoonlijke kernineenstorting, maar een thermonucleaire explosie die de ster volledig aan flarden blaast. Dit wordt een 'paar-instabiliteit-supernova' genoemd. Deze supernova's zouden enorm fel zijn; er zijn enkele observaties geweest die dit soort 'superlichtsterke supernova's' zouden kunnen zijn geweest."

Astronomen denken dat superreuzen en hyperreuzen in het vroege universum veel vaker voorkwamen, toen het gebrek aan zware elementen hen een compactere structuur met een hetere oppervlakte zou geven. Dankzij de uitdijing van het universum is de straling die toen uit de oppervlakte van zulke sterren kwam, nu uitgerekt (ofwel Doppler-verschoven) tot infrarode golflengten. Hier zou die zichtbaar moeten zijn voor de James Webb-r uimtetelescoop van NASA, die in 2018 gelanceerd moet worden en ons onze eerste blik moet gunnen op de eerste generaties sterren.

R136a1 werd in het zware jonge sterrencluster R136 ontdekt. Dit cluster ligt in het 30 Doradusnevel, een turbulente stellaire kraamkamer in het Grote Magelhaense Wolk-stelsel.

Op zoek naar monstersterren

In 2010 ontdekten prof. Paul Crowther en zijn team de zwaarst bekende enkele ster: R136a1.

Mogen we beginnen door te vragen waarom het R136-cluster je aandacht trok?
Nou, het is waarschijnlijk het hoofddoel voor iedereen die op zoek is naar de zwaarste sterren. Het is de meest logische plaats om te zoeken, omdat R136 het zwaarste jonge sterrencluster in ons deel van het heelal is. Het is ongeveer net zo groot als de beroemde Orionnevel, maar die bevat maar enkele duizenden sterren en R136 bevat waarschijnlijk 100.000 sterren of meer, als je ze allemaal kon zien. Dit is al lang bekend, maar het spannende is dat we nu, met de Hubble-telescoop en grote grondtelescopen, individuele sterren kunnen onderscheiden en bekijken.

In het centrum van het cluster ligt dus een dikke sterrenknoop, R136a genaamd?
Ja, en in eerste instantie beweerden sommige wetenschappers dat R136a één superzware ster was; duizenden keren zwaarder dan de zon. Maar zo'n 25 jaar geleden bevestigden astronomen dat het

© NASA; Alamy; ESO; DK Images; Science Photo Library

een sterrencluster was. Nu, dankzij technologische ontwikkelingen, kunnen we eindelijk de individuele sterren binnen dat cluster analyseren. Toen ons team er met de Very Large Telescope in Chili naar keek, zochten we eigenlijk naar binaire sterren; we hoopten die te kunnen gebruiken om de massa van sterren direct te kunnen meten. We vonden geen binaire sterren, maar we ontdekten wel dat de sterren binnen het cluster, en met name de helderste, veel bijzonderder waren dan iedereen dacht.

Dus een binair systeem zou jou in staat stellen om de massa van de betrokken sterren direct te meten. Maar hoe bepaal je de massa van een gigantische enkele ster als R136a1?

Het eerste wat je doet is de lichtsterkte van de ster bepalen, maar dat is al een probleem op zich. Als je kijkt naar een gele ster met dezelfde oppervlaktetemperatuur als de zon, dan is het vrij eenvoudig; de meeste straling is zichtbaar en je kunt de totale energie-uitstoot vrij makkelijk berekenen. Rode sterren, zoals koele superreuzen, stralen slechts een fractie van hun totale energie uit als zichtbaar licht, maar je kunt de rest wel met infraroodcamera's zien. De uitdaging bij hete sterren als R136a1, is dat de energie-uitstoot in ultraviolet gebeurt; deze golflengten worden geabsorbeerd door het interstellair medium, waardoor weinig ervan uiteindelijk de aarde bereikt. We kunnen de energiepiek van de ster niet direct meten, dus moeten we hem afleiden uit andere eigenschappen van het licht van de ster.
Maar zelfs als je een idee hebt van de temperatuur en gemiddelde lichtsterkte van de ster, moet je nog steeds de massa berekenen. Gelukkig is er binnen de hoofdreeks een duidelijk verband; hoe lichtsterker de ster, hoe zwaarder deze is. Bij R136a1 kwamen we uit op een lichtsterkte van bijna 10 miljoen keer die van de zon. We vroegen onze collega's om evolutionaire modellen uit te werken voor de verwachte massa. Op die manier kwamen we uit op 265 zonsmassa's. De ster was aan het begin van zijn leven waarschijnlijk nog groter.

En is er een manier om dit theoretische resultaat te controleren?

Nou, het probleem is dat je afhankelijk bent van een methode om de temperatuur te krijgen, een andere methode om een massa te krijgen, enzovoort. Voor mij als sceptische wetenschapper is dat nogal twijfelachtig; de cijfers zijn allemaal heel interessant, maar worden nog door te weinig bewijs ondersteund.
We gingen op zoek naar een vergelijkbare ster om de methode te testen. We waren idealiter op zoek naar een eclipserende dubbelster (waarbij twee sterren regelmatig voor elkaar langs schuiven, vanuit de aarde gezien), waardoor we de massa's van de individuele sterren konden bepalen. We ontdekten uiteindelijk zo'n dubbelster in het cluster NGC 3603, zo'n 25.000 lichtjaar vanaf de aarde. Dat is nu het zwaarste sterrensysteem dat bevestigd is door de wetten van omloopbewegingen; het heeft twee sterren die in vier dagen om elkaar heen draaien. Ze zijn respectievelijk 120 zonsmassa's en 90 zonsmassa's zwaar. Toen we deze harde cijfers hadden over dat systeem, gebruikten we het systeem om onze temperatuur- en lichtsterkte-methodes te testen. We kregen het juiste antwoord. Dit was een goede controle; het werkte bij de dubbelster, dus was er geen reden om aan te nemen dat de methodes en bijbehorende resultaten niet ook zouden kloppen voor de toepassing bij R136a1.

De Hubble-ruimtetelescoop kan gebruikt worden om verschillende sterren te onderscheiden.

BUITEN-AARDSE MEGASTORMEN

Wees getuige van de geweldige kracht van het oog van Jupiter en ander kosmisch weer, terwijl we de grootste cyclonen en meest extreme temperaturen in de kosmos najagen.

Een artistieke impressie van hoe de binnenkant van de Grote Rode Vlek op Jupiter eruitziet.

Als we te maken krijgen met hevige wind, stortbuien en oorverdovende onweersbuien, is het makkelijk te denken dat er niets ergers is dan het weer hier op aarde. Dat kun je denken als je binnen de beschermende schil van de aardse atmosfeer blijft. Daarbuiten helpt zelfs een stormparaplu en regenjas je niet meer. Dat is omdat het weer in de ruimte in vergelijking monsterlijk is; die paar donderklappen op aarde lijken dan niet meer dan licht gegrom en de stortbuien die tot overstromingen leiden, lijken niets meer dan plasjes door motregen.

Op een astronomische steenworp afstand (gemiddeld zo'n 108 miljoen kilometer van de aarde) begint het op Venus flink te betrekken. De planeet wordt niet voor niets de slechte tweelingzus van de Aarde genoemd; de tweede planeet vanaf de zon is een giftige woestenij. Dikke, zware zwavelzuurwolken hangen in de hoge druk van de hete Venusiaanse hemel, terwijl onregelmatig voorkomende vulkanen nog meer hitte en gifgassen de lucht in spugen. Het landschap wordt beheerst door hoge druk en giftige, verstikkende rook; het maakt ons dankbaar voor het veel mildere weer thuis, op aarde.

Aan de andere kant van de aarde, op Mars, is het niet veel beter. Dankzij de foto's die de robots van NASA op Mars terugsturen – uitgestrekte lege vlaktes onder een wat saaie roze lucht – denk je al snel dat er weinig gebeurt op de rode planeet. Maar de waarheid is anders. Als je dacht dat het moeilijk was om een goede weersvoorspelling voor de aarde te maken, dan zouden we het nog veel moeilijker hebben om het weer op Mars te voorspellen. Het weersysteem op Mars is zó onvoorspelbaar, dat meteorologen zich de haren uit het hoofd zouden trekken.

Die onvoorspelbaarheid van het weer op Mars is verrassend, omdat de atmosfeer van de planeet slechts 1% van de dichtheid van de aardse atmosfeer heeft. Door deze dunne atmosfeer zal iedereen die op het stoffige Marsoppervlak durft te lopen, met zeker-

> "Een kalme dag kan veranderen in een dag die gevuld is met windhozen en enorme stofstormen die de hele planeet rond kunnen gaan."

Een windhoos zwerft over het Marslandschap, gefotografeerd door de Mars Reconnaissance Orbiter.

Een artistieke impressie van een stofstorm, gezien vanuit de Viking Lander.

Het zuidelijk halfrond van Saturnus herbergt bijzonder gevormde stormen die Drakenstormen genoemd worden en periodiek opsteken.

heid aan een fatale dosis ruimtestraling blootstaan, of het nou van de zon of dieper uit het heelal komt. Maar er is ook goed nieuws: het regent nooit op de rode planeet, hoewel er wel wolken zijn en er sneeuw kan vallen. Maar vocht is doorgaans al verdampt voor het de grond kan raken.

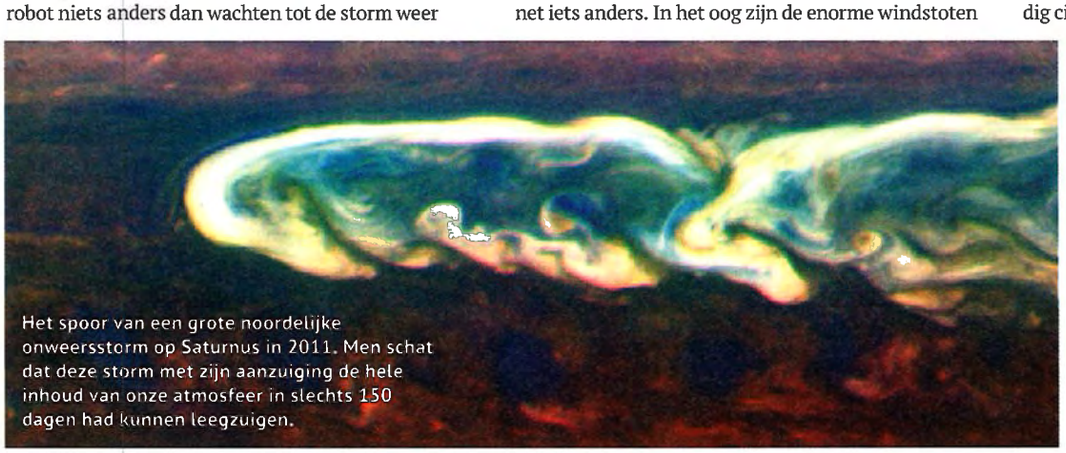
Over het algemeen is het op Mars vrij koud; temperaturen komen vrijwel nooit boven de 20°C uit, zelfs niet tijdens de zomer. Van de ene op de andere dag, of zelfs van het ene op het andere uur, kan een kalme dag veranderen in een dag met windhozen en enorme stofstormen die wekenlang de hele planeet in een rode mist hullen. Het opstuiven van zo veel stof is volledig te danken aan een daling in de temperatuur als de zonsondergang op Mars plaatsmaakt voor Marsnachten, waardoor de lauwwarme zomertemperaturen dalen tot wel -140°C.

Deze enorme temperatuurverandering jaagt de harde, snelle wind aan, die het rode stof met ruim 160 km per uur over de planeet jaagt. Hetzelfde gebeurt ook op aarde, waar vocht deze stormen voedt. Maar aangezien er op Mars niets anders is dan los rood zand, stuwen de stormen dit rode stof de lucht in en geven de planeet zo een rozerode atmosfeer. Door al het stof in de lucht kan het warm worden op Mars, wat de wind verder aanjaagt, waardoor weer meer stof de dunne atmosfeer in wordt gejaagd. Hierbij ontstaat soms zelfs elektriciteit. Dan, net zo snel als hij opkwam, kan de storm weer gaan liggen, wellicht omdat het zonlicht geblokkeerd wordt en de temperatuur weer daalt.

Stofstormen zijn de extreemste weerfenomenen die er te vinden zijn op Mars. Het probleem is dat de Marslanders en Marsrovers die er door ons zijn neergezet, hier niet tegen kunnen. Als een storm het stof doet opwaaien en het zonlicht blokkeert, kan zo'n robot niets anders dan wachten tot de storm weer over is, terwijl het stof zijn zonnepanelen bedekt. Hoe groter de planeet, hoe zwaarder de stormen. Op deze reuzenplaneten is slechts een fractie van de windkracht al in staat om rampen aan te richten. Zo'n storm zou huizen op aarde kunnen oppakken en ze moeiteloos door de lucht smijten. Verrassend genoeg is het niet eenvoudig deze weerfenomenen te registreren, omdat ze op sommige werelden bedekt worden door wolkendekken.

Er is één planeet die de krachten in zijn bovenste luchtlagen, graag laat zien: Jupiter. In vergelijking met de andere gasplaneten die zich in de buitenste regio's van ons zonnestelsel bevinden, is deze planeet een beetje een opschepper. Vol trots laat hij de wervelingen en banden zien die zijn chaotische weerpatronen opwekken. De beroemdste hiervan is de Grote Rode Vlek, een hogedrukgebied waar de aarde drie keer in past. We kunnen dit enorme stormsysteem met telescopen hier op aarde zien, en we hebben de afgelopen 350 jaar met bewondering gekeken hoe de winden met 400 km per uur tegen de klok in draaiden; dit vanwege de verpletterend hoge druk op de gasreus.

Maar binnenin deze megastorm liggen de zaken net iets anders. In het oog zijn de enorme windstoten verdwenen en heerst er een licht briesje. Maar aangenaam is het er niet, want de temperatuur is ongeveer -160°C. Deze enorme orkaan houdt het al zo lang vol, omdat hij bijeengehouden wordt door straalstromen. Ze houden de storm intact terwijl deze meerdere keren de stormachtige planeet rond gaat. Maar wetenschappers hebben gemerkt dat Jupiters kenmerkende eigenschap niet zo groot is als hij ooit was: de Grote Rode Vlek is aan het krimpen. In de jaren 1800 hebben astronomen vastgesteld dat de Grote Rode Vlek 41.000 kilometer in doorsnee was. Toen de ruimtesondes Voyager 1 en Voyager 2 in 1979 Jupiter bereikt hadden, was de enorme storm gekrompen tot 23.300 kilometer in doorsnee. Recentelijk heeft de Hubble-ruimtetelescoop van NASA de Grote Rode Vlek opgemeten en kwam uit op 16.500 kilometer in doorsnee. Bovendien lijkt de storm tegenwoordig cirkelvormiger te zijn geworden. Hoe de toekomst



Het spoor van een grote noordelijke onweersstorm op Saturnus in 2011. Men schat dat deze storm met zijn aanzuiging de hele inhoud van onze atmosfeer in slechts 150 dagen had kunnen leegzuigen.

De draaikolk op de noordpool van Saturnus is een blijvend weerpatroon met zes zijden, die elk circa 13.800 km lang zijn.

Het weer in ons zonnestelsel

Als je dacht dat het weer op aarde extreem was, kijk dan eens naar de weersvoorspelling voor de andere planeten in ons zonnestelsel.

De zon

Extreem heet, met heftige uitbarstingen van coronale massa-ejectie: een enorme uitbarsting van zonnewind en magnetische velden. De temperaturen zullen voorlopig hoog blijven, met kans op zonnevlammen.

Gemiddelde temperatuur
5.500°C

Venus

In het begin bewolkt met zure regens in de hooglanden van de planeet. Waarschijnlijk sterke wind, met snelheden tot 360 km per uur. Gegarandeerd hoge temperaturen.

Gemiddelde temperatuur
462 °C

Mars

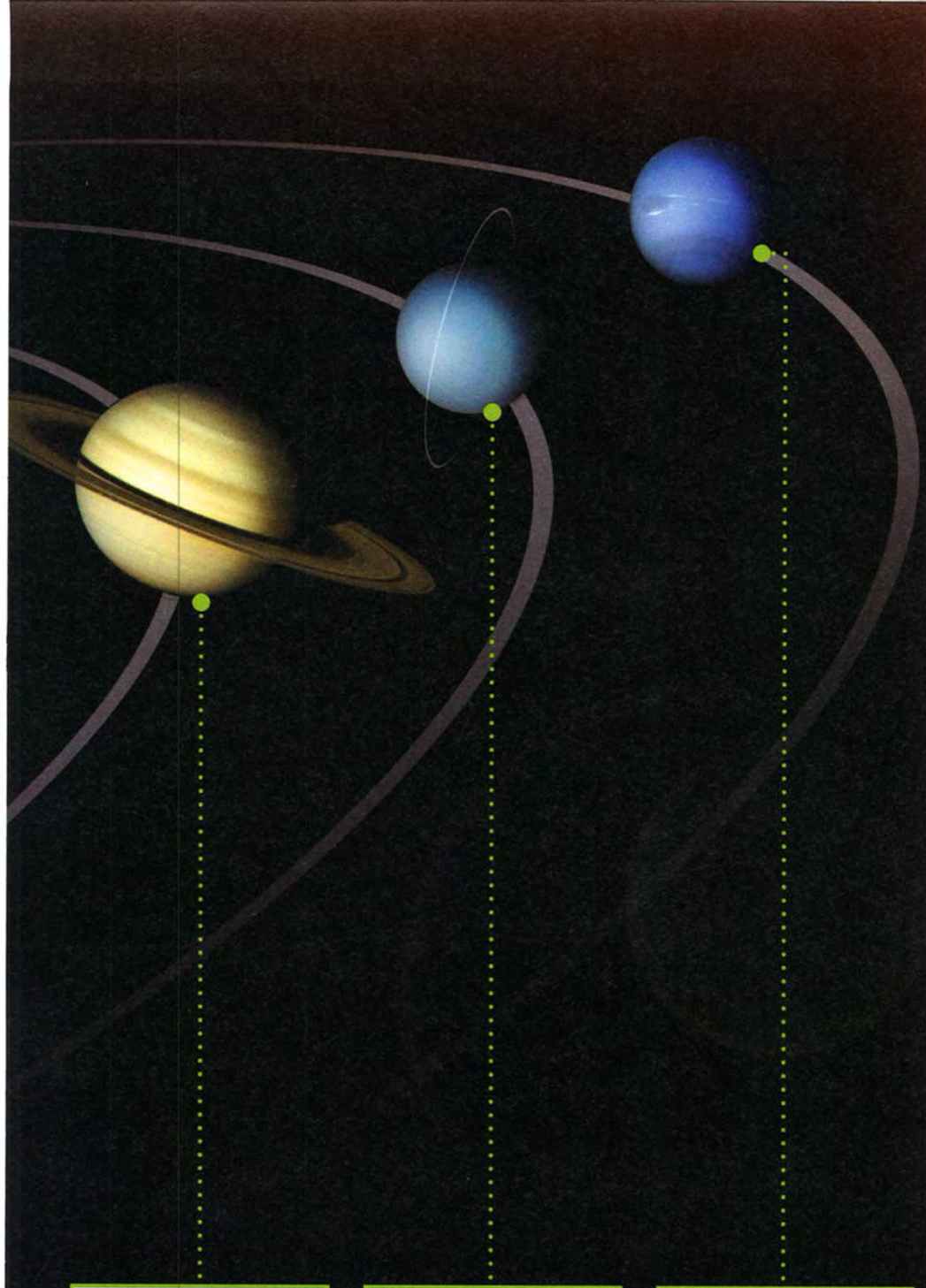
Over het algemeen de hele dag koud, droog en helder. Door temperatuurdaling in de nacht kunnen er windhozen en stofstormen ontstaan. De nacht is erg koud met temperaturen tot onder -60 °C.

Gemiddelde temperatuur
-55 °C

Jupiter

Op de meeste plekken blijft de wind hardnekkig waaien en kan daarbij snelheden van 360 km per uur halen, vooral rond de Grote Rode Vlek. Waarschijnlijk de hele dag erg koud.

Gemiddelde temperatuur
-150 °C



Saturnus

Met windsnelheden van minimaal 1.600 km per uur zal het erg koud aanvoelen binnen de atmosfeer van de planeet. Ook zijn er krachtige onweersstormen voorspeld.

Gemiddelde temperatuur
-168 °C

Uranus

Stormen met een kans op diamantregens, die zwaar en hardnekkig zullen worden. Bovenste laag van de atmosfeer zal waarschijnlijk kalm blijven, maar overal is er hoge druk en koude temperaturen.

Gemiddelde temperatuur
-224 °C

Neptunus

Erg winderig met voorspelde diamantregen. Erg koud met temperaturen die kunnen dalen tot wel -214 °C. Wind zal verder aanwakkeren en de hele dag blijven.

Gemiddelde temperatuur
-200 °C

Buitenaardse megastormen

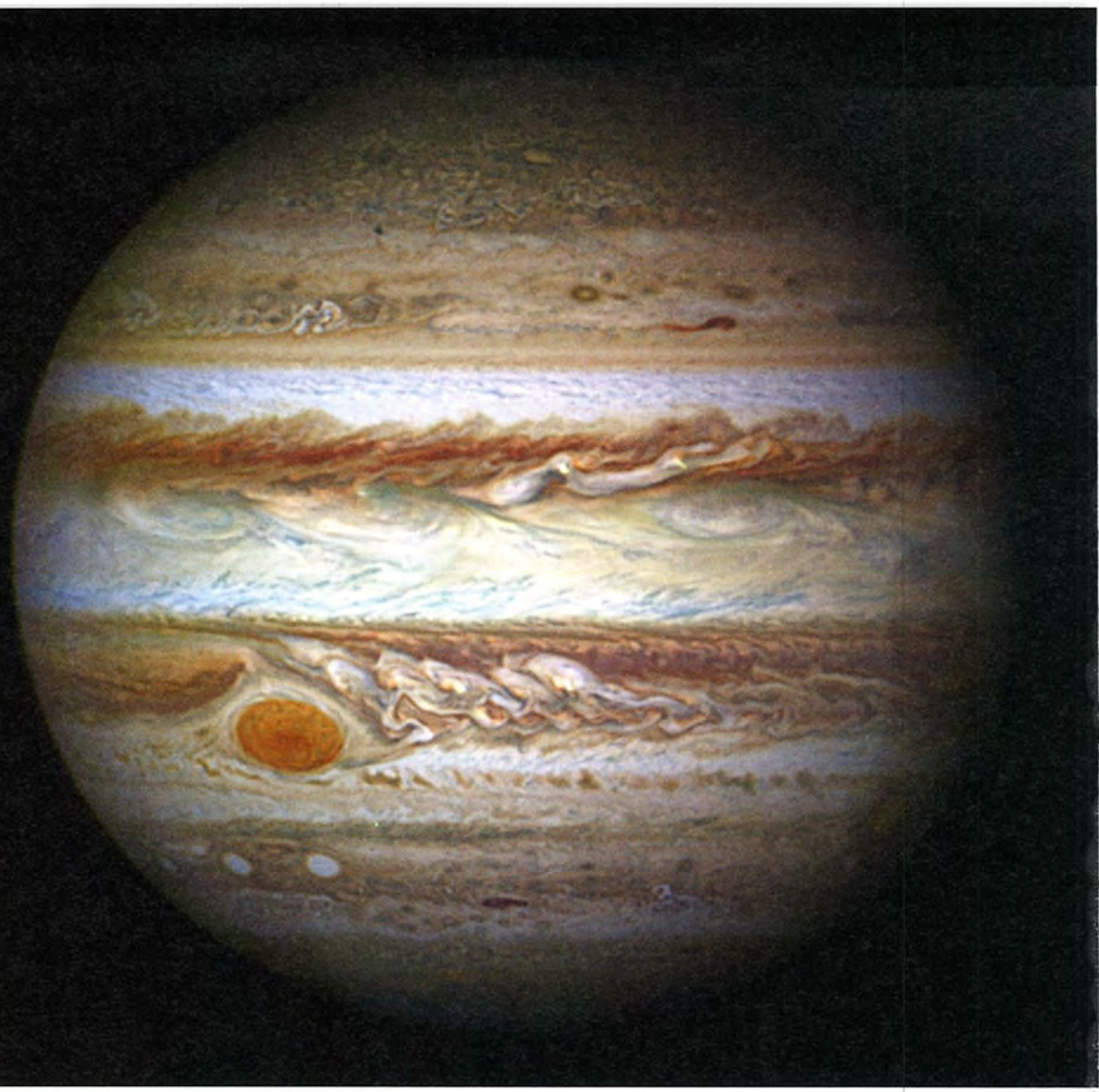
van de storm er uitziet weet niemand en astronomen vragen zich af of het volledig zal verdwijnen.

Jupiter is niet de enige planeet in de buurt die een wild weersysteem heeft. De buurplaneet, Saturnus met de ringen, heeft ook een enorm weersysteem, al zie je dat niet vanaf de aarde. Over het algemeen ziet het gasachtige oppervlak er saai uit, bijna alsof er geen winden en enorme bliksemschichten zijn. Maar die zijn er. Onder die rustige en misleidende atmosfeer vind je een wilde Saturnus. De windstoten van tot wel 1800 km per uur stuwen de gas- en ijsverzameling met extreme snelheden de planeet rond. In vergelijking lijkt de Grote Rode Vlek van Jupiter een zomerbriesje. Van dichtbij (en met de hulp van een vloot ruimtetelescopen) kunnen we goed zien waarom de stormen op Saturnus zo mega zijn. Op de noordpool van Saturnus woedt een zeshoekige storm, waarvan de zes zijden elk maar liefst 13.800 kilometer lang zijn; onze planeet valt erbij in het niet. De aanblik van de anticyclonische storm lijkt te vreemd om waar te zijn, maar hij is er ontegenzeggelijk, dankzij het bewijs dat geleverd is door ruimtesondes als Voyager en Cassini. Deze sondes hebben fotografisch bewijs terug geseind naar verbaasde wetenschappers.

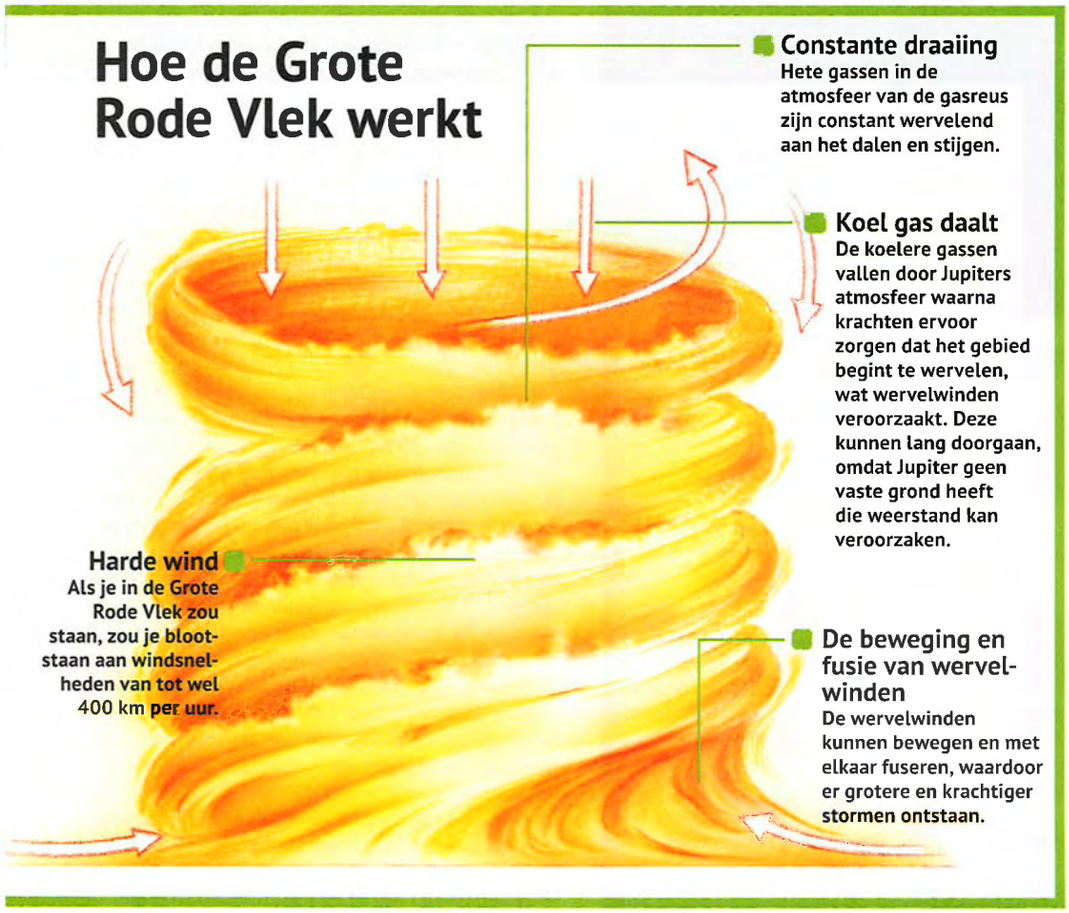
De zeshoek heeft wetenschappers lang voor een raadsel gesteld, maar dat is nu opgelost. De storm is een soort straalstroom die gecreëerd is door een turbulent atmosfeergebied. Binnen de zeshoek is er een maalstroom aan lucht, wat ook gezien wordt op de zuidpool van de planeet en op diens maan Titan; de enige maan in ons zonnestelsel met een substantiële atmosfeer. Op Titan bereiken winden met moeite een snelheid van enkele kilometers per uur, terwijl ze zich door de dikke stikstofatmosfeer worstelen. Methaan valt er als regen en vormt rivieren en meren. Als je een bezoek aan deze planeet zou willen brengen, moet je zeker je paraplu en thermisch ondergoed meenemen: met -180°C is het er steenkoud.

Terwijl we ons naar de buitenste regionen van ons zonnestelsel begeven, stuiten we op zo'n 2,9 miljard kilometer afstand van de aarde op de zevende planeet vanaf de zon: Uranus. Deze verzameling gas en ijs lijkt misschien een saaie planeet, maar onder die kalme turkooizen wolkenlaag gaat het er heel anders aan toe, hoewel het er niet zo woest is als op de planeten die we tot nu toe gezien hebben. Onder de wolken van Uranus zou het volgens de wetenschappers kunnen regenen. Maar dan hebben we het niet over water zoals op aarde of organische vloeistoffen zoals op Titan; experts denken aan diamanten. Het is een droom voor elke juwelier, maar misschien niet het soort stortbui waar je in zou willen zitten als het goed tekeer gaat. Een paraplu zal niet genoeg zijn; je zult een schild nodig hebben als de edelstenen naar beneden komen zeilen. Een hagelstorm op aarde verbleekt erbij. Deze diamantbui wordt gemaakt door methaan dat onder enorme druk (honderdduizenden keren hoger dan de diamantvormende druk op aarde) samengeperst wordt. Men zegt dat je nooit op je eerste indruk moet afgaan, en Uranus is hierbij geen uitzondering. De planeet lijkt heel sereen te zijn, met weinig activiteit. Af en toe is er een zeldzame hevige uitbarsting. De andere ijsreus, Neptunus, is veel interessanter dan Uranus. Het heeft ook een diamantregen, maar de kleinste van de buitenste planeten probeert zijn grootste broer ook na te doen en heeft een eigen Grote Vlek. In plaats van rood is die van

Volgens observaties van de Hubble-ruimtetelescoop is Jupiters kenmerkende Grote Rode Vlek aan het krimpen en zal het dit blijven doen.



Hoe de Grote Rode Vlek werkt

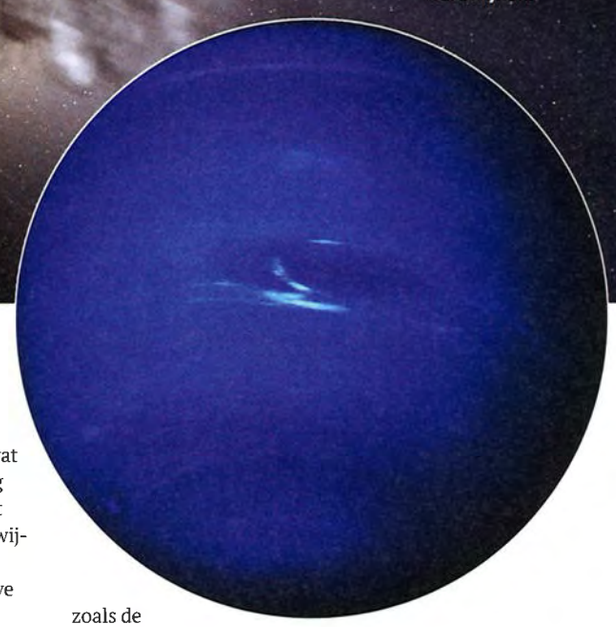


Neptunus koel en donker. Het werd in 1989 ontdekt op het zuidelijk halfrond van Neptunus, toen Voyager 2 langs de laatste planeet vanaf de zon vloog. Het is ook een anticylonische storm (zoals op Jupiter) en is ongeveer net zo groot als de aarde (13.000 km in doorsnee). Witte cirruswolken, gemaakt van bevroren methaankristallen, vormen zich aan de randen ervan. Terwijl Jupiters vlek aan het krimpen is, deed de vlek van Neptunus een eigen verdwijntruc: toen de Hubble ruimtetelescoop in 1994 ernaar zocht, was het volledig verdwenen. Maar niet voor altijd, want op het noordelijke halfrond verscheen een nieuwe vlek; deze raast nog steeds door met 2400 km per uur. Ook werd een wolk waargenomen die 'scooter' genoemd werd omdat hij zo snel bewoog.

Alles in het zonnestelsel, zelfs de verafgelegen planeten zoals Neptunus, worden beïnvloed door het weer op de zon. De zonnewind bestaat niet uit lucht, zoals op aarde, Jupiter of Titan, maar uit deeltjesstromen, afkomstig uit onze ster. Soms moet de zon 'boeren', waarna er zonnestormen van plasma naar buiten gestoten worden. Als deze stormen het magnetisch veld en de atmosfeer van de aarde bereiken, zorgen de botsingen voor de prachtige poollichten op de Noord- en Zuidpool. Maar deze stormen kunnen ook dodelijk zijn, omdat de straling astronauten kan doden, kortsluiting kan veroorzaken in satellieten en de communicatie- en elektriciteitssystemen op de aarde kan platleggen. Daarom is het weer op de zon het meest onderzochte weer buiten dat van de aarde. Vele sondes houden de zon in de gaten, zoals STEREO (van NASA) en SOHO (gezamenlijke missie van NASA en ESA). Deze observatoria geven vroege waarschuwingen af als er een zonnestorm op ons af

Een gigantisch waterreservoir, onder astronomen bekend als quasar APM 08279+5255, bevat 140 biljoen keer de watermassa van alle oceanen op aarde.

Op ijsreus Neptunus woeden er anticyclonische stormen die waarneembaar zijn als donkere vlekken, die vervolgens weer verdwijnen.



komt die schade zou kunnen berokkenen.

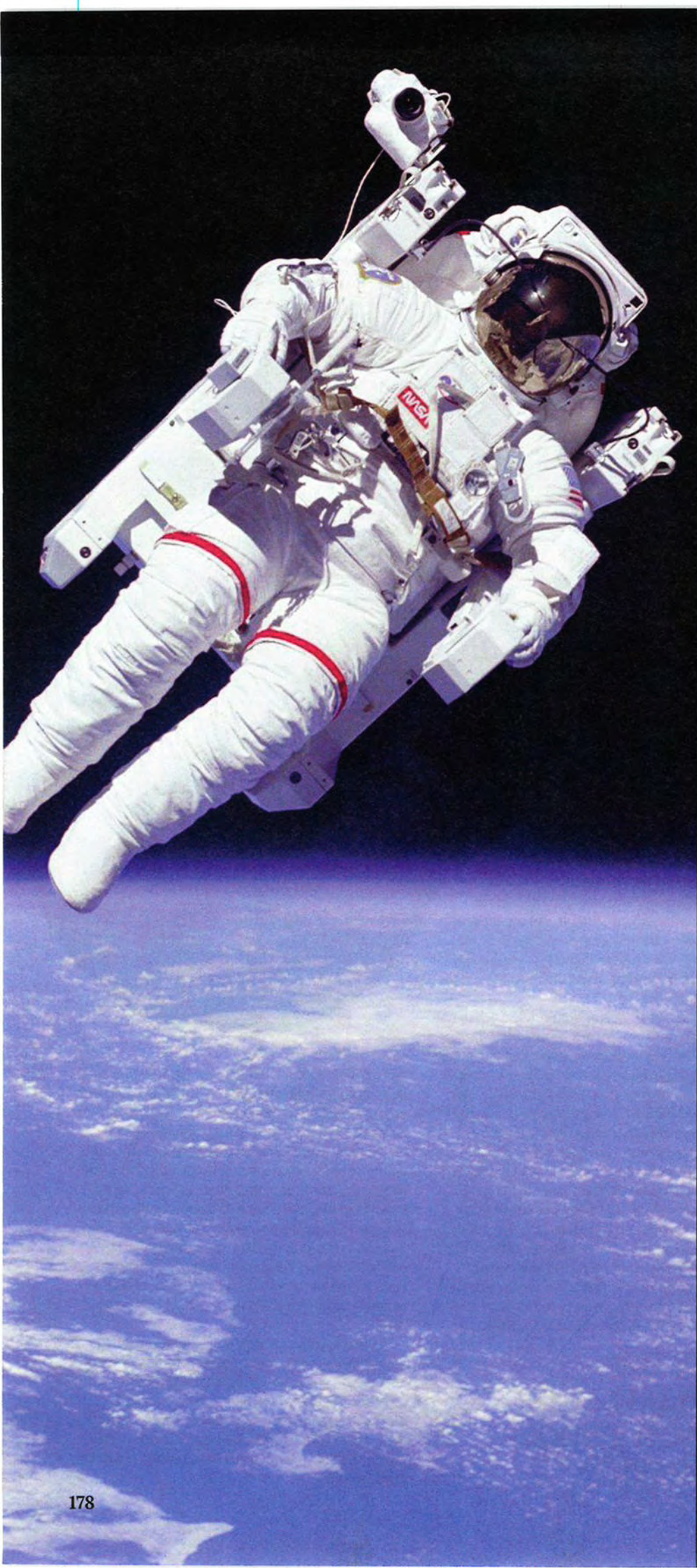
Onze zon is slechts één ster, maar hoe werkt het bij een stelsel van honderden miljarden sterren? Al die zonnewinden kunnen fuseren tot superwinden die alle gassen, die gebruikt worden bij stervorming, een stelsel uit kunnen blazen en het duizenden lichtjaren ver kunnen verspreiden. Er zijn ook stormen in het centrum van sterrenstelsels met bliksemschichten die zo groot zijn dat zelfs Thor, de Noorse god van de donder, ervan onder de indruk zou zijn. In het verre stelsel IC 310, 260 miljoen lichtjaar ver weg, hebben astronomen enorme uitbarstingen van gammastraling gedetecteerd. Deze komen van enorme bliksemflitsen die uitgezonden worden door het hete gas rond het zwarte gat in het centrum van het stelsel. Dit gas bevat krachtige elektrische velden die elke paar minuten elektrische ontladingen kunnen loslaten op een gebied dat zo groot is als ons hele zonnestelsel. Alle weersextremen die we op onze buurplaneten vinden, vallen hierbij in het niet. Op aarde wordt bliksem ondersteund door vocht in de atmosfeer en er zijn grote hoeveelheden waterdamp gedetecteerd in het gas rond superzware zwarte gaten. Sterrenstelsels met actieve zwarte gaten die hongerig gas opnemen en fel licht produceren, worden quasars genoemd. In 2010 kondigden Amerikaanse astronomen de ontdekking aan van de oudste en grootste wolk waterdamp in een quasar ooit, 12 miljard lichtjaar geleden. Deze quasar bestond minder dan 2 miljard jaar na de oerknal. Hij is groter dan welke aardse wolk dan ook en bevat 4000 keer meer water dan er in onze hele Melkweg te vinden valt. Al dit water zal nooit verworden tot regen, rivieren of oceanen, maar uiteindelijk verdwijnen in het zwarte gat.

Er is meer weer in ons eigen zonnestelsel behalve het weer op de planeten van ons zonnestelsel. De sterren in onze Melkweg hebben hun eigen planeten, waaronder een specifiek type dat van hoge temperaturen houdt. Neem Jupiter met zijn Grote Rode Vlek, schuif hem 770 miljoen kilometer dichter bij de zon en je hebt een 'hete Jupiter'. Astronomen hebben honderden van dit soort hete Jupiters rond andere sterren gevonden. Ze zijn bloedheet met temperaturen die oplopen tot wel 3200 graden, wat het geval is bij exoplaneet WASP-33b. Deze planeet staat zo dicht bij zijn ster, dat een jaar er slechts 29 uur duurt. Planeten die zo dicht bij hun ster staan, zitten in een 'getijdeslot', wat betekent dat de tijd voor één omwenteling rond de zon gelijk is aan de benodigde tijd voor één rotatie om de eigen as. Hierdoor staat steeds dezelfde zijde van de planeet op de ster gericht, net zoals de maan constant met dezelfde kant naar de aarde staat. Hierdoor staat de dagkant van planeten als WASP-33b altijd in het licht, waardoor enorme stormen opsteken, groter dan welke storm dan ook in ons zonnestelsel. De hete Jupiter HD189733b heeft een gigantische storm op zijn dagzijde, vrijwel net zo groot als de het gehele halfrond, waar de temperatuur direct onder de zon kan stijgen tot 1500 graden. Dit veroorzaakt winden die met 9700 km per uur sneller zijn dan welke wind dan ook in ons zonnestelsel. Deze winden bereiken ook het donkere halfrond van de planeet, dat constant van de zon afgekeerd staat. Hierdoor is het een winderig en donker halfrond, maar het is er nooit koud.

We beschouwen het weer vaak als een ongemak. We raken doorweekt van de regen, ons haar wordt door de wind in de war geblazen, we verbranden en zweten als het heet is en bibberen als het koud is. Maar de volgende keer dat je klaagt over het weer, denk dan even aan de plekken waar het nog veel erger is. Niet alleen binnen ons zonnestelsel, maar ook ver daarbuiten.

"Astronomen hebben enorme uitbarstingen van gammastraling, komend van bliksemflitsen rond een zwart gat, gedetecteerd."

© DK Images; Alamy; NASA; JPL



ALLES OVER HET **UNIVERSUM**

Alles over het Universum is een uitgave van

F&L Life Publications BV
in licentie van Imagine Publishing, Bournemouth
Uitgevers: Wien Feitz en Paul Lemmens
Bezoekadres: Meijhorst 6010, 6537 KT Nijmegen
Postbus 31331, 6503 CH Nijmegen
Tel: 024-240 46 36

Hoofdredactie
Pascal Gerrits

Eindredactie
Myrthe van Deemen

Redactie
Kristel Folmer, Helga Kluiter, Peter Marinus

Met medewerking van
Marvin van Gelder, Gert van Santen

Vragen aan de redactie
E-mail: redactie@allesovergeschiedenis.com

Vormgeving
Nick Groenewold, Petra van den Hoek,
Patrick Maters, Martijn Verboven

Druk
Habo DaCosta BV, Vianen

Website
Luc Kickken
Email: webmaster@fnl.nl

Commercieel directeur
Gerrit-Jan Bomhof

Accountmanager
Marko Versteege
Tel: 024-240 46 45
E-mail: mversteege@fnl.nl

Traffic/backoffice
Marko Versteege
Tel: 024-240 46 45
E-mail: mversteege@fnl.nl

Marketing
Tetske Peeters
Tel: 024-240 45 85
E-mail: tpeeters@fnl.nl

Copyrights

Het auteursrecht op deze uitgave en op de daarin verschenen artikelen wordt door de uitgever voorbehouden. Voor de uit het Engelse 'Complete history of the universe' overgenomen artikelen geldt dat het inhoudsrecht daarvan bij het copyright van Imagine Publishing, Dorset, Groot-Brittannië ligt, terwijl de vertaalrechten daarvan bij F&L Life Publications B.V., Nijmegen, Nederland berusten. Het verlenen van toestemming tot publicatie in de gedrukte uitgave houdt in dat de auteur de uitgever, met uitsluiting van ieder ander onherroepelijk machtigt de bij of krachtens de auteurswet door derden verschuldigde vergoedingen voor kopiëren te innen en dat de auteur alle rechten overdraagt aan de uitgever, tenzij anders bepaald. Niets uit deze uitgave mag worden overgenomen, vermenigvuldigd of gekopieerd zonder uitdrukkelijke schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele onjulstheden die in deze uitgave zouden kunnen voorkomen.

OMNIVERSUM

ronduit spectaculair

IMAX®

A BEAUTIFUL PLANET

EXPERIENCE EARTH LIKE NEVER BEFORE

VERTELD DOOR ANDRÉ KUIPERS

Omniversum nodigt je uit voor een onvergetelijke reis aan boord van het Internationale Ruimtestation om de wonderen van onze wereld te zien. **www.omniversum.nl**

© 2016 IMAX CORPORATION

IMAX® is a registered trademark of IMAX Corporation