



Frank Verbunt  
Sterrekundig Instituut, Universiteit Utrecht

De algemene relativiteitstheorie vertelt ons dat het in principe mogelijk is dat er zwarte gaten zijn – plaatsen in het heelal van waaruit geen licht kan ontsnappen. In 1971 gaf de ontdekking van de röntgenbron Cygnus X-1 een sterke aanwijzing dat zulke zwarte gaten ook daadwerkelijk bestaan. De afgelopen jaren heeft onderzoek met nieuwe satellieten meer kandidaten voor de status van ‘zwart gat’ opgeleverd. Het aantal kandidaten stijgt snel. Deze ontwikkeling geeft reden om nog eens op een rijtje te zetten wat volgens de theorie een zwart gat is en hoe we besluiten dat een waargenomen object een zwart gat moet zijn.

# EINSTEINS GELIJK

Relativiteit en zwarte gaten



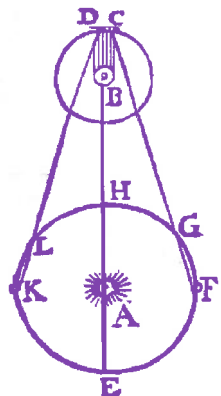
Zo'n tweehonderd jaar geleden deden Michel en Laplace voor het eerst de suggestie dat er in het heelal plaatsen zijn van waaruit geen licht ons kan bereiken. In de redenering die tot deze bewering leidde, combineerden de achttiende-eeuwse wetenschappers de begrippen lichtsnelheid en ontsnappingsnelheid. Wanneer de snelheid van het licht niet toereikend is om aan de zwaartekracht van een zwaar lichaam te ontsnappen, dan kunnen we dat voorwerp niet zien, opperden zij.

Een belangrijk uitgangspunt voor de hypothese van Michel en Laplace was de ontdekking dat de snelheid van het licht eindig is. Die vondst was een eeuw eerder gedaan, als onverwacht bijproduct van de studie van de vier galileïsche maantjes van Jupiter. Volgens de wetten van Kepler zouden die met precieze perioden hun baantjes om de planeet moeten draaien. De Deense sterrenkundige Olaf Römer ontdekte echter onregelmatigheden. Als hij de baanperiode bepaalde op het punt

van de aardbaan dat het dichtst bij Jupiter ligt, bleek het binnenste maantje in het halve jaar daarna steeds verder achter te raken op het baanschema. In het tweede halfjaar nam het verschil weer af en bij de volgende dichtste nadering was het weer verdwenen. Römer suggereerde in 1675 dat het tijdsverschil tot stand komt doordat het licht meer tijd nodig heeft om de langere afstanden tussen de Aarde en Jupiter af te leggen dan voor de kortste afstand nodig is. Hij concludeerde dat de snelheid van het licht eindig is.

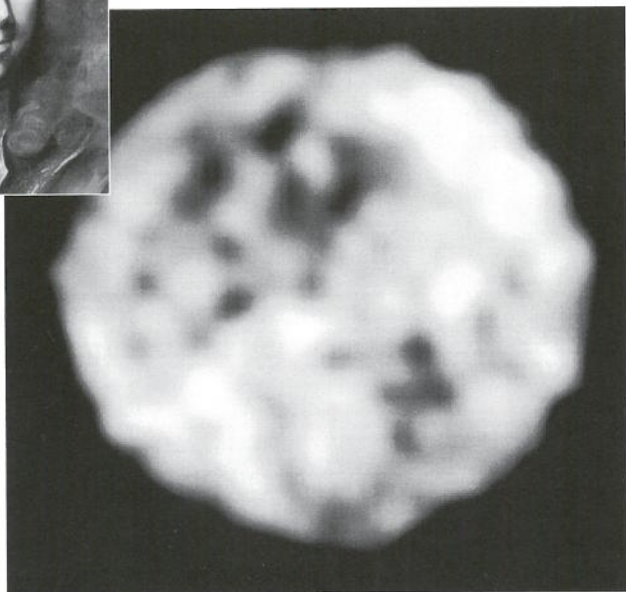
Römer schatte dat het licht 22 minuten nodig zou hebben om de doorsnee van de aardbaan te doorlopen (de correcte waarde is ruim zestien minuten). Door de doorsnede van de aardbaan te delen door 22 minuten zou hij de snelheid van het licht hebben kunnen bepalen, maar hij deed dit niet. Doordat de afstand tot de Zon in die tijd werd onderschat, zou hij een waarde van ongeveer  $125\,000\text{ km s}^{-1}$  hebben gevonden. We weten nu dat de lichtsnelheid  $300\,000\text{ km s}^{-1}$  bedraagt.

Enige jaren later, in 1687, publiceerde Newton zijn theorie van de zwaartekracht. Deze verklaart dat een omhoog geworpen appel door de Aarde wordt aangetrokken, langzamer gaat bewegen en weer terugvalt. Newton kon echter ook uitrekenen dat de zwaartekracht



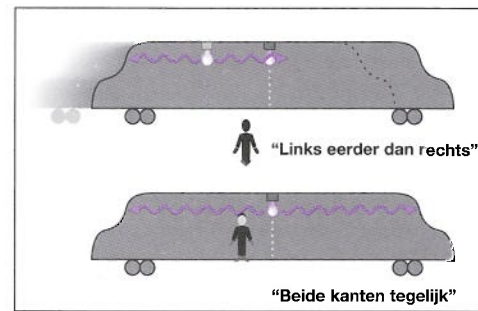
1, 2. De Deense sterrenkundige Römer (2) gebruikte deze illustratie (1) in het artikel waarin hij bewees dat de lichtsnelheid eindig is. A is de Zon, B Jupiter. Terwijl de Aarde van L naar K beweegt in zijn baan om de Zon, heeft het licht van Jupitermaan Io (C en D) steeds meer tijd nodig om de Aarde te bereiken. Daardoor lijkt Io achter te lopen in zijn baan. Het omgekeerde gebeurt tussen F en G.

3. De Hubble Space Telescope maakte deze UV-opname van Io, de vulkanisch zeer actieve Jupitermaan. Het is de beste foto sinds die van de Voyager ruimtesondes eind jaren zeventig.



3

een met heel hoge snelheid geworpen projectiel niet meer kan terughalen, zodat het projectiel ontsnapt. Voor een bolvormig hemellichaam hangt de minimale snelheid waarbij dit gebeurt, de *ontsnappingsnelheid*, af van de verhouding van de massa tot de straal. Voor de Zon is de ontsnappingsnelheid ongeveer  $620\text{ km s}^{-1}$ , voor de Aarde ongeveer  $11\text{ km s}^{-1}$ .



4

4. Einstein ontdekte dat wat gelijktijdig gebeurt voor de ene waarnemer, voor een ander op verschillende momenten kan plaatsvinden.

5. Dankzij zijn snelheid kan een raket aan de aardse zwaartekracht ontsnappen. De minimale snelheid die het voertuig daarbij moet bereiken heet de ontsnappingsnelheid.



5

Het duurde tot in onze eeuw voor deze snelheid met raketten kon worden bereikt.

In 1784 bedacht de Engelsman Michel dat een zeer zware ster een ontsnappingsnelheid kan hebben die groter is dan de snelheid van het licht. Hij redeneerde dat een omhoogvliegend lichtdeeltje door deze ster zou worden teruggetrokken. De ster is onzichtbaar! De Fransman Laplace herhaalde deze redenering enkele jaren later, in 1795, en rekende voor dat een ster met de dichtheid van de Aarde maar een straal van 250 zonsstralen zo'n donker lichaam zou zijn.

We weten nu dat de redenering van Michel en Laplace niet klopt: licht kan niet worden afgeremd. Toch is het resultaat van hun redenering wél juist: er zijn lichamen denkbaar die zo compact zijn dat licht er niet van kan ontsnappen. Zulke objecten noemen we *zwarte gaten*. Om ze correct te beschrijven moeten we de relativiteitstheorie gebruiken.

### De relativiteitstheorie

De snelheid van het licht speelt een centrale rol in de relativiteitstheorie. Wanneer we de eerste door Einstein uitgewerkte theorie, de *speciale relativiteitstheorie*, in één zin willen samenvatten, dan is die zin: *de lichtsnelheid is gelijk voor alle waarnemers die met constante snelheden bewegen*. Dat dit héél vreemd is, kunnen we met een gedachtenexperiment illustreren. Als een kwajongen een sneeuwbal een snelheid geeft van  $30\text{ km u}^{-1}$  in de richting van een fietser die hem met  $20\text{ km u}^{-1}$  tegemoetkomt, ziet de fietser die met een snelheid van  $50\text{ km u}^{-1}$  op zich afkomen. Als daarentegen een elektron dat met een snelheid van  $200\,000\text{ km s}^{-1}$  door het heelal raast, een lichtfoton met een snelheid van  $300\,000\text{ km s}^{-1}$  naar de Aarde stuurt, dan nadert dat foton ons met een snelheid van  $300\,000\text{ km s}^{-1}$ , onafhankelijk van de bewegingsrichting van het elektron.

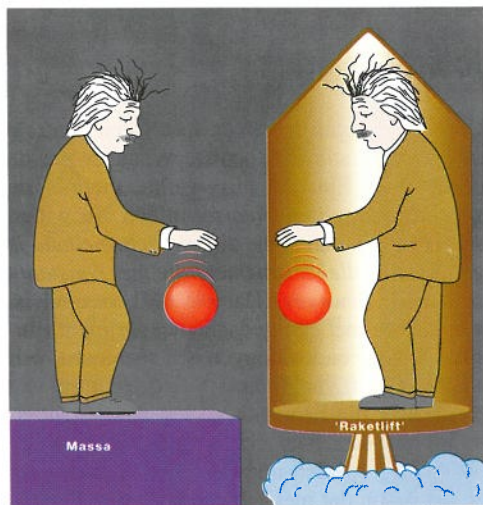


Einstein schreef de natuurkunde zó om, dat alle waarnemers *automatisch* een gelijke licht-snelheid meten. Dit heeft bizarre gevolgen. Eén daarvan is dat het begrip gelijktijdigheid relatief wordt. Ook dit kan met een gedachten-experiment worden toegelicht. Stel dat een waarnemer op een perron in het midden van een zeer snel langsrazende trein een flitslamp ziet afgaan. Doordat de trein beweegt, ziet hij het licht eerder de achterzijde van de trein treffen dan de voorzijde. Een reiziger in de trein ziet de flits ook. Hij ziet het licht even snel naar voren als naar achteren bewegen. Doordat voor- en achterzijde van de trein evenver van de flitslamp zijn, ziet de reiziger die gelijktijdig oplichten. De verbijsterende conclusie die we moeten trekken, is dat gebeurtenissen die voor één waarnemer gelijktijdig zijn, dat voor een andere niet hoeven te zijn.

De tweede door Einstein uitgewerkte theorie is de *algemene relativiteitstheorie*. Ook deze kan in één zin worden samengevat: *trage massa is identiek aan zware massa*. Wat betekent dat? Om een voorwerp van snelheid te laten veranderen, moeten we er een kracht op uitoefenen. De benodigde kracht is evenredig met de *trage* massa van het voorwerp: voor

massieve voorwerpen is een grote kracht nodig. De zwaartekracht die twee voorwerpen op elkaar uitoefenen is evenredig met het produkt van hun *zware* massa's. Newton ontdekte dat de zware massa van een voorwerp identiek is aan de trage massa en realiseerde zich dat dit niet vanzelf spreekt. De moeite die we moeten doen om een voorwerp in beweging te brengen hoeft immers in principe helemaal niet af te hangen van de kracht die dit voorwerp zelf uitoefent. Denk bijvoorbeeld aan de elektrische lading en helemaal niet van de trage massa van een voorwerp. Dat er een kracht is, de zwaartekracht, waarvan de sterkte afhangt van de trage massa, is dan ook uitzonderlijk.

Einstein herschreef de theorie van de zwaartekracht. Hij liet daarbij zien dat de veronderstelling dat de lichtsnelheid voor alle waarnemers gelijk is – zelfs als die waarnemers bezig zijn hun snelheid te veranderen – er toe leidt dat zware en trage massa *automatisch* identiek zijn. Dit wordt tot uitdrukking gebracht in het liftexperiment. Als een persoon in een afgesloten lift zich plotseling zwaar voelt worden, kan hij met geen enkel experiment vaststellen of dit komt doordat de lift plotseling naar



6

6 en 7. Newton ontdekte dat zware massa identiek is aan trage massa, Einstein wist dat te verklaren. Ten gevolge van de gelijk-

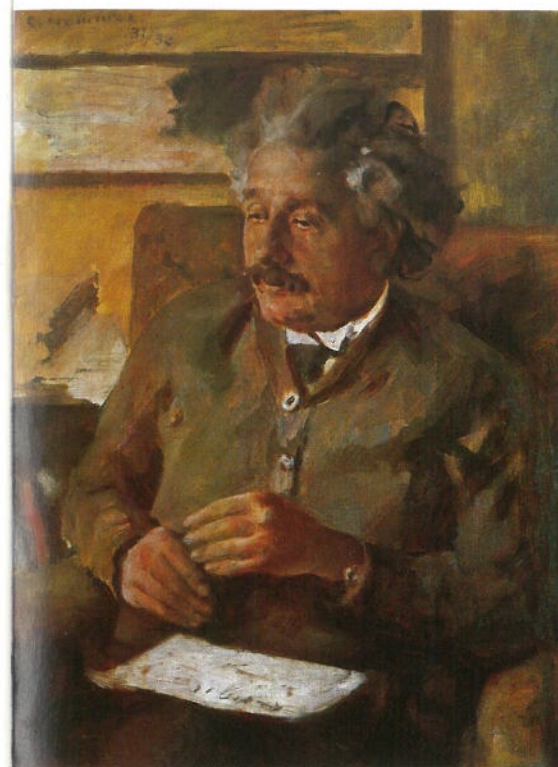
heid kan een waarnemer geen onderscheid maken tussen versnelling in een lift of versnelling door de zwaartekracht.



7

boven wordt getrokken òf doordat er een massa onder de lift is opgedoken. De equivalentie van trage en zware massa heeft gevolgen die voor onze huis-, tuin- en keukenintuïtie héél bizar zijn.

Als voorbeeld beschouwen we twee cirkels om een gemeenschappelijk centrum, met omtrekken  $O_1$  en  $O_2$ . De afstand tussen de twee cirkels is dan  $(O_2 - O_1)/2\pi$ , zouden we denken. Dat klopt, althans in de lege ruimte. Als er echter een massa in het middelpunt van beide



8

licht nodig heeft om de afstand tussen Aarde en Mercurius af te leggen blijkt inderdaad groter dan we op grond van gewone meetkunde zouden verwachten. Groot is het verschil overigens niet: een tienduizendste seconde, ofwel enkele tientallen meters.

De kromming van de ruimte heeft gevolgen voor de beweging van de planeten. Zo doorloopt de planeet Mercurius een ellips om de Zon. De lange as van de ellips roteert in de ruimte, zodat de ellips na enige tijd een andere oriëntering heeft. De storende invloed die de zwaartekracht van andere planeten op de baan van Mercurius uitoefent, kan dit voor 93 procent verklaren. Einstein berekende het effect van de kromming van de ruimte in de nabijheid van de Zon en vond dat deze precies de resterende zeven procent verklaart.

8. Alleen, en zonder gebruik van nieuwe waarne-

mingen, bedacht Einstein de relativiteitstheorie.

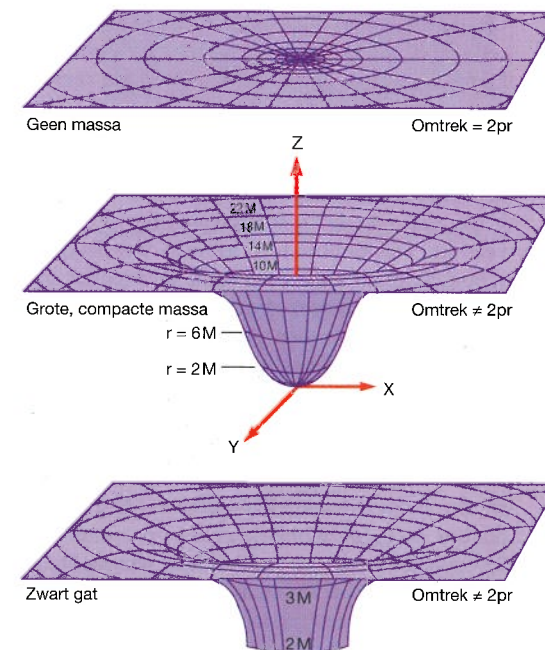
9. We zijn bij een cirkel gewend aan een omtrek die evenredig is met de straal ( $2\pi r$ ). In aanwezigheid van een massa geldt die relatie niet en is de

straal groter dan de omtrek doet vermoeden (middelste tekening). Bij een zwart gat is de straal oneindig groot: de bodem is uit de kuil gevallen.

cirkels is, is de afstand tussen de cirkels groter! Hoe groter de massa, des te groter het verschil. De langs een lijn naar het middelpunt gemeten afstanden kloppen in de aanwezigheid van een massa dus niet meer met de langs de omtrek gemeten afstanden volgens de euclidische meetkunde. We zeggen wel dat de ruimte *gekromd* is.

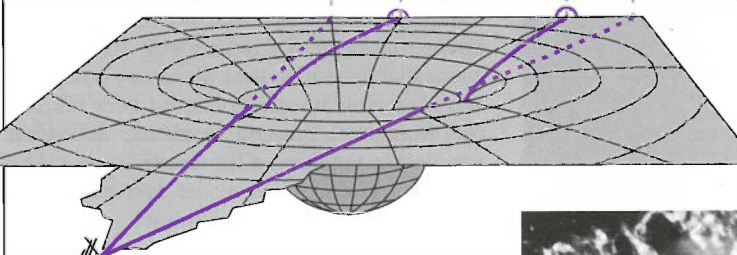
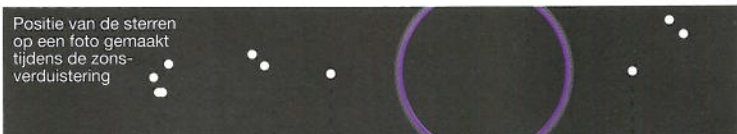
Om de afstanden tussen de cirkels weer te geven, kunnen we geen plat vlak gebruiken. Daarom gebruikt men vaak een weergave waarin de cirkels nabij het centrum een kuil vormen, zodanig dat de langs het oppervlak van de kuil gemeten lengte de afstand aangeeft zoals die bijvoorbeeld met heen- en teruggestuurd licht wordt gemeten (afb. 9). Men moet wel bedenken dat deze weergave alleen een visueel hulpmiddel is: in werkelijkheid liggen de cirkels wel degelijk in één vlak.

Dat de natuur echt zo in elkaar zit, is bevestigd door de Amerikaanse natuurkundige Shapiro, die radarsignalen naar Mercurius zond en de weerkaatste signalen mat. De tijd die het



9





10. Tijdens de zonsverduistering van 1919 werd voor het eerst aangetoond dat het licht van sterren door de massa van de Zon wordt afgebogen.

11 en 12. De Krabnevel is het overblijfsel van de supernovaontploffing die in 1054 op Aarde werd waargenomen. In het centrum van de nevel knippert een radiopulsar, een intense bron van radio- en röntgenstraling. De heldere lob linksonder op de röntgenfoto van de Krabnevel is de pulsar in de 'aan-toestand'.

Ook licht ondergaat het effect van de gekromde ruimte: het wordt afgebogen (afb. 10). In 1919 werd tijdens een zonsverduistering de afbuiging van het sterrelicht door de Zon voor het eerst gemeten. Gemakkelijk was dat niet. Ten opzichte van een op een ander moment gemaakte foto was de verplaatsing van de sterbeeldjes slechts een veertigste millimeter. De metingen waren echter net goed genoeg om de natuurkundigen ervan te overtuigen dat Einstein het met zijn rare theorie bij het rechte eind had. Dankzij de ontdekking van een dubbelster die bestaat uit twee neutronensterren waarvan er één een radiopulsar is, zijn inmiddels zeer nauwkeurige toetsen mogelijk.

De radiopulsar zendt pulserende radiogolven uit. Die radiopulsen kunnen worden beschouwd als de tikken van een zeer nauwkeurige klok. De pulsar draait in een ellips om zijn begeleider, in een periode van zeven uur en drie kwartier. De positie in de baan waar de pulsar de andere neutronenster het dichtst nadert, het periastron, verschuift heel snel. De radiopulsen die de pulsar uitzendt in het deel van zijn baan dat het verst van de Aarde ligt, reizen langs de begeleider en blijken meer reistijd nodig te hebben dan we op grond van de euclidische meetkunde zouden verwachten. Beide effecten – verplaatsing van het periastron en reistijdvertraging – zijn binnen de meetnauwkeurigheid van één procent in over-

eenstemming met de voorspellingen van de algemene relativiteitstheorie.

Een andere voorspelling van de algemene relativiteitstheorie is, dat klokken in een zwaartekrachtsveld voor een waarnemer ver weg langzamer tikken. Ook deze voorspelling kan worden getoetst met een pulsar. De pulsar PSR1937+21 heeft een pulsperiode van anderhalve milliseconde. De gemeten pulsperiode blijkt maandelijks met een miljoenste seconde te variëren (afb. 13). Dit komt doordat de Aarde, die met de Maan om een gemeenschappelijk zwaartepunt beweegt, de ene helft van de maand dichterbij de Zon is dan de andere helft. Vergelijken met de pulsar lopen de aardse klokken langzamer naarmate we de Zon dichterbij komen! Ook hier klopt het gemeent effect exact met de voorspelling.

Dat een experimentele bevestiging van een theoretisch voorspelde waarde niet altijd een echte bevestiging van de theorie is, leert ons de geschiedenis van een andere test op de algemene relativiteitstheorie: die van de roodverschuiving van spectraallijnen. Als voorbeeld van een klok die in een zwaartekrachtsveld langzamer blijkt te lopen, nemen we een elektron in zijn baan om een atoomkern. De frequentie waarmee dit elektron zijn baan voltooit, is voor een waarnemer op Aarde wat lager als het atoom dicht bij een steroppervlak is. Wanneer het elektron verspringt naar een andere baan om de kern, zal bij de ster ook de frequentie van het daarbij uitgezonden lichtdeeltje lager zijn dan van een op Aarde bij hetzelfde proces uitgezonden lichtdeeltje. De grootte van dit effect werd voorspeld voor en gemeten aan de witte dwerg die Sirius, de helderste ster aan de hemel, begeleidt. Later bleek dat zowel de voorspelling als de meting fout waren! Pas in 1971 werd de roodverschuiving met 0,03% correct gemeten.

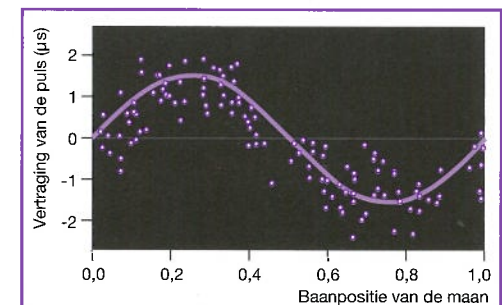
### Zwarte gaten

Met behulp van de bovenstaande beschrijving van een aantal effecten van de algemene relativiteitstheorie kunnen we het verschijnsel *zwart gat* bekijken. We beschouwen weer de afstandsmetingen op een lijn door het middelpunt, de afbuiging van licht en de tiksnellheid van een klok.

In het Zonnestelsel zijn dicht bij de Zon de relativistische effecten het grootst. We mogen

de massa van de Zon in het middelpunt geconcentreerd denken, maar we moeten er rekening mee houden dat dit alleen geldt voor afstanden tot dat punt die groter zijn dan een zonsstraal. Gaan we – in gedachten – de Zon in, dan is de effectieve massa kleiner. Dan doet immers alleen die massa mee die dichterbij het centrum van de Zon is. De relativistische effecten zijn alleen waarneembaar aan het oppervlak van de Zon.

Willen we sterkere effecten bekijken, dan moeten we de Zon massiever maken door er massa aan toe te voegen of hem samen te persen in een kleiner volume. In een gedachtenexperiment laten we de zon inklinken. We houden daarbij een spiegel bij het zonnoppervlak en meten de afstand tussen de spiegel en de Aarde door licht heen en terug te sturen. Naarmate de Zon kleiner wordt, neemt deze afstand steeds sneller toe. In afbeelding 9 werd dat aangegeven met een steeds diepere kuil. Uit berekeningen volgt dat de gemeten



13. De afstand tussen de Aarde en de Zon is afhankelijk van de baanpositie van de Maan. Een relativistisch effect van die schommelende afstand is de op Aarde waargenomen verandering in pulsperiode van pulsar PSR 1937+21.

afstand naar oneindig gaat als de zonsstraal wordt samengedrukt tot ongeveer 2,7 kilometer. De bodem valt uit de kuil! De Zon is een zwart gat geworden. De straal waarbij dit gebeurt is *precies* die waarbij volgens de berekening van Michel en Laplace de ontsnappingsnelheid van de Zon gelijk is aan de snelheid van het licht. Deze straal wordt de *Schwarzschildstraal* genoemd.



Laten we bij ons gedachtenexperiment een klok aan de spiegel vastmaken en die vanaf de Aarde observeren. Dan ontdekken we dat bij het krimpen van de Zon de tijd tussen de tikken van de klok steeds groter wordt. Als de klok een atoomkern is waaromheen een elektron draait, dan gaat de door ons gemeten frequentie waarmee het elektron zijn banen beschrijft, omlaag met het krimpen van de Zon. Met de baanfrequentie daalt ook de frequentie van licht dat het elektron uitzendt als het naar een andere baan springt. De golflengte van het door ons waargenomen licht wordt tegelijkertijd steeds groter. We noemen dit de *roodverschuiving* van het licht. Bij een straal van 2,7 km wordt de van veraf gemeten tijd tussen de tikken van de klok, oneindig lang. De golflengte van het licht gaat voor de waarnemer naar oneindig en daarmee gaat de energie per foton naar nul: de Zon wordt zwart.

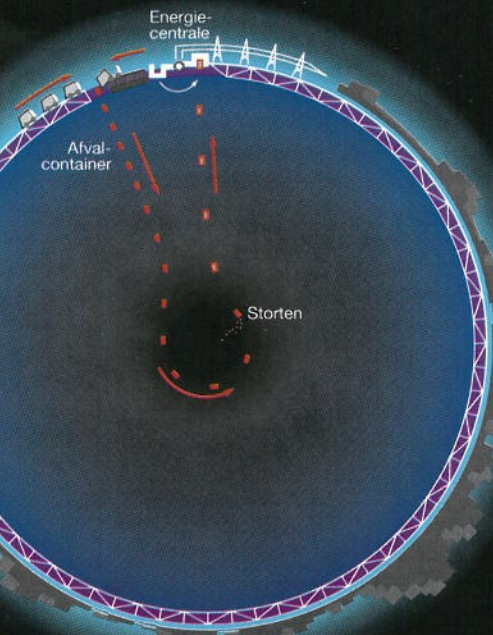
Als laatste onderdeel van ons experiment laten we een naar alle richtingen stralende lamp naar het zwarte gat zakken. Naarmate de lamp dichterbij het centrum komt wordt zijn licht steeds sterker afgebogen. Op een afstand van 4,05 kilometer is de afbuiging zo sterk dat

15

een deel van het licht in een cirkel om het gat gaat lopen. Wie zich daar bevindt, kan zijn eigen achterhoofd zien! Een deel van het door de lamp uitgezonden licht volgt een baan die binnen de Schwarzschildstraal komt. Dat deel verdwijnt onherroepelijk in het zwarte gat. Naarmate de lamp dichterbij de 2,7-kilometergrens komt, wordt een steeds groter deel van het licht opgeslokt (afb. 16). Op 4,05 km is dat de helft en op 2,7 km verdwijnt alle licht in het zwarte gat. Het oppervlak van de bol op 2,7 kilometer rond het centrum wordt de horizon van het zwarte gat genoemd. Niets kan van binnen de *horizon* naar buiten komen.

De getallen die we tot nu toe noemden, gelden voor een zwart gat met de massa van de Zon. Voor andere zwarte gaten zijn deze getallen evenredig met hun massa: een zwart gat van tien zonsmassa's heeft een horizon op 27 kilometer en een zwart gat van een miljard zonsmassa's heeft zijn horizon op 2,7 miljard kilometer.

De bovenstaande beschrijving geldt voor een niet-roterend zwart gat. De theorie laat



14. In de stad om het zwarte gat is het vuilverwerkingsbedrijf tevens energiebedrijf.

echter toe dat het zwarte gat draait. De horizon is dan wat afgeplat en de banen van het licht zijn tegen de rotatierichting in anders dan met de rotatie mee. Behalve *massa* en *rotatie* kan een zwart gat alleen nog *elektrische lading* hebben. Volgens de theorie bepalen deze drie eigenschappen het zwarte gat volledig. Of een zwart gat nu is gemaakt van biljartballen of van televisietoestellen, bezien van buiten de horizon heeft het alleen de eigenschappen massa, rotatie en lading. De afwezigheid van enig ander kenmerk wordt wel het *no-hair-theorema* genoemd. Zwarte gaten zijn kaal...

Er zijn natuurkundigen die zich uitgebreid met de eigenschappen van roterende en eventueel geladen zwarte gaten bezig houden. Zij hebben de ideale vorm van afvalverwijdering bedacht: bouw om een zwart gat een bol en daarop een stad (afb. 14). Al het afval gaat in containers. Een container wordt in een baan om het gat gebracht, en op het juiste moment wordt het vuil er uit gekieperd. Dat verdwijnt netjes in het gat. Bij een slim gekozen baan komt de container met grotere snelheid terug dan hij vertrok: de extra energie is aan de rotatie van het zwarte gat onttrokken. Het vuilver-

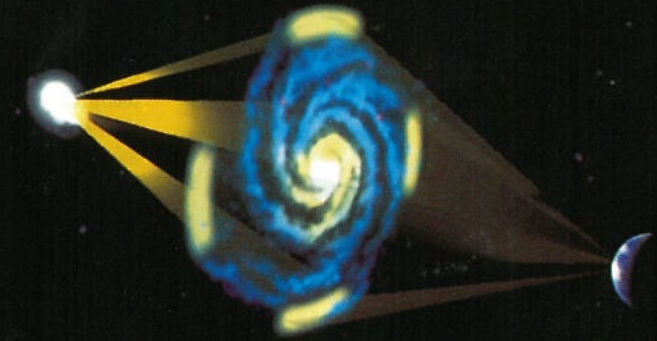
16. Naarmate licht dichterbij een compacte massa wordt uitgezonden, is de lichtbaan meer gekromd (a). Op anderhalf maal de Schwarzschildstraal kan licht in een cirkel lopen. Door de toenemende afbuiging kan dichterbij het centrum steeds minder licht ontsnappen (b). Voor de rondom stralende lichtpunten zijn de richtingen waarin licht wordt uitgezonden dat uiteindelijk in het centrum terechtkomt, zwart gelaten. Op anderhalve Schwarzschildstraal is dat de helft en op de Schwarzschildstraal zelf alles.



16

17

15 en 17. Het Einstein-kruis (15) is een viervoudig beeld van een quasar, een zeer verafgelegen en helder sterrenstelsel. Het beeld ontstaat door de afbuiging van het licht in het zwaartekrachtsveld van een tussen de Aarde en de quasar gelegen sterrenstelsel (17).



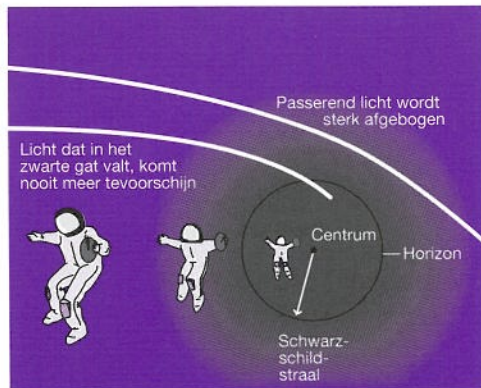


werkingsbedrijf is tevens energiebedrijf! Het zal duidelijk zijn dat ministeries van economische of milieuzaken dit onderzoek vooralsnog niet erg toepasbaar achten. De reden dat natuurkundigen zulke gedachtenexperimenten doen is dan ook vooral om te achterhalen of zwarte gaten eigenschappen hebben die zij zich niet eerder hadden gerealiseerd en die ons een dieper inzicht in de algemene relativiteitstheorie kunnen verschaffen.

### Donkere ster versus zwart gat

We zagen zo even dat de horizon van een zwart gat volgens de algemene relativiteitstheorie precies op de straal ligt die volgens Michel en Laplace van een ster een donkere ster maakt. Toch is een zwart gat iets fundamenteel anders dan een donkere ster.

In de redenering van Michel en Laplace komt het begrip gekromde ruimte niet voor. Een raket met voldoende brandstof kan gewoon van de donkere ster wegvliegen. De tijd die de raket nodig heeft om weg te komen is eindig. De klok aan boord tikt netjes. Volgens de algemene relativiteitstheorie kan geen enkel voorwerp ooit door de horizon naar buiten komen, beweegt het licht in gekromde banen, maar altijd met de lichtsnelheid en ziet de verre waarnemer een klok nabij de horizon langzaam tikken.



18

18. De horizon vormt het ontastbare 'oppervlak' van een zwart gat. Voor een waarnemer op veilige afstand lijkt het alsof een astronoot die in het gat

valt op de horizon blijft zweven. Zijn horloge lijkt tot stilstand te komen. De astronoot zelf voelt zich razendsnel vallen en wordt uiteengerek.

19. Theoreticus en waarnemers: Einstein brengt een bezoek aan het zonneobservatorium op Mount Wilson.



19

Hiermee samenhangend is er een tweede fundamenteel verschil. Als de interne druk van de donkere ster de zwaartekracht compenseert, kan de ster gewoon een vaste straal hebben. Daarentegen kan in de algemene relativiteitstheorie *geen enkele kracht* verhinderen dat een eenmaal binnen de horizon gekrompen voorwerp tot een punt ineenstort. Dit is voor natuurkundigen een nogal schokkend feit – zij houden niet van puntvormige voorwerpen. Het wordt enigszins verzacht door een vermoeden dat zegt dat zulke onbegrensde ineenstortingen alleen binnen een zwart gat, dus in delen van het heelal die voor ons toch niet waarneembaar zijn, kunnen optreden. Dit heet het *geen-naakte-singulariteitvermoeden*.

Een denkbeeldige expeditie naar een donkere ster kan op het oppervlak landen en weer terugreizen, in een eindige tijd. In de relativistische werkelijkheid gaat het er héél anders aan toe. Vanaf de Aarde zien we de expeditie steeds dichterbij de horizon komen, maar hem nooit bereiken, laat staan er door heen vliegen. Vreemd genoeg is de reis volgens de expeditieleden wél snel: in een mum van tijd passeren ze de horizon en schieten ze onafwendbaar door naar het centrum. We zien hier een extreem geval van het niet-gelijktijdig zijn van een gebeurtenis voor twee waarnemers.

### Theorie en waarneming

Op dit punt in ons verhaal is het nuttig nog eens op een rijtje te zetten welke beweringen we alleen theoretisch hebben berekend en welke feiten experimenteel zijn gemeten. We beginnen met de opmerking dat de algemene relativiteitstheorie onder de natuurkundige theorieën een echte uitzonderingspositie inneemt. De meeste natuurkundige theorieën ontstaan in een samenspel tussen theorie en meting. De theoretici voorspellen wat en de experimentatoren meten wat anders. Oeps, zeggen de theoretici, we waren nog wat vergeten. Ze stellen de theorie bij enzovoort. Vrijwel alle natuurkundige theorieën komen zo tot wasdom.

De algemene relativiteitstheorie daarentegen werd zo maar door Einstein bedacht, zonder een enkel experiment. Voor zover Einstein al fouten maakte, herstelde hij die zelf vóórdat de eerste metingen aan zijn theorie werden gedaan. De reden dat dit kon, is vooral dat de algemene relativiteitstheorie een heel eenvoudig basisbeginsel heeft: de lichtsnelheid is voor alle waarnemers constant. Dat dit eenvoudige beginsel tot zeer ingewikkeld rekenwerk kan leiden – en tot gevolgtrekkingen die uitermate bizar lijken – doet hier niets aan af.

Toen de theorie eenmaal op poten stond, kon men aan metingen denken. De eerste, de verschuiving van het perihelium in de baan van Mercurius, lag al klaar. Theorie en waarneming stemden overeen. Voor de tweede, de afbuiging van sterrelicht door de Zon, wachtte men op een geschikte zonsverduistering. In 1919 was het zover. Resultaat: de meting klopt met de voorspelling. Vijftig jaar later (!) kwamen de radarmetingen aan Mercurius. Resultaat: OK. De nauwkeurigste experimenten zijn thans de metingen aan radiopulsars in een dubbelster met een andere neutronenster. De laatste paar jaar zijn er meer van die dubbelsterren ontdekt. Ook hier kloppen de metingen exact met de theorie. Hoewel de periastronverschuiving van PSR1913+16 veertigduizend keer zo groot is als die van Mercurius, behoeft de goede oude relativiteitstheorie geen enkele aanpassing om die exact te beschrijven.

Het grote vertrouwen van de natuurkundigen in de algemene relativiteitstheorie is gebaseerd op de eenvoud van de theorie en op het feit dat sinds 1915, toen Einstein hem publiceerde, geen verbeteringen nodig zijn gebleken. Wanneer we de theorie echter serieus nemen, vinden we de mogelijkheid van het bestaan van zwarte gaten. Deze mogelijkheid wordt gerealiseerd als een massa voldoende compact wordt, bijvoorbeeld als een zonsmassa in een bolletje met een straal van 2,7 km wordt geperst.

De extreme consequenties die het gevolg hiervan zijn – oneindige afstand in radiële richting, oneindige roodverschuiving en gesloten lichtbanen – zijn niet direct gemeten. Toch zijn er voorwerpen in het heelal waarvan we denken dat het zwarte gaten zijn. Laten we eens zien waarom.

### Cygnus X-1

Gewone sterren, zoals de Zon, verliezen energie voornamelijk in de vorm van zichtbare en ultraviolette straling. De typische energie van een lichtdeeltje of foton in het zichtbare licht is een paar elektronvolt (eV), ofwel gelijk aan de energie die een elektron krijgt als het een spanningsverschil van een paar volt doorloopt. De typische energie van een röntgenfoton is enkele duizenden elektronvolt. De Zon zendt nauwelijks straling met zulke energie uit. Het was dan ook een grote verrassing toen metin-





20. Met de Westerbork Synthese Radio Telescoop lukte het de zichtbare tegenhanger van röntgenbron Cyg X-1 te identificeren.

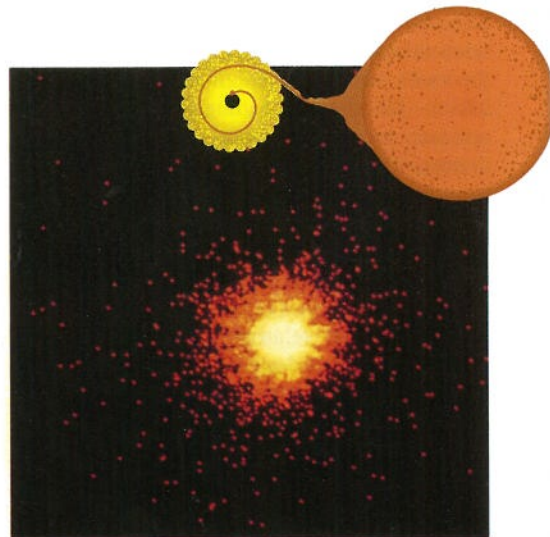
20

gen aantoonde dat er aan de hemel een aantal zeer heldere bronnen van röntgenstraling zijn. Die metingen werden aan het eind van de jaren zestig verricht. Daartoe bracht men röntgendetectoren, een soort omgebouwde geigertellers, met raketten buiten de aardatmosfeer. Zo werd in het sterrenbeeld Cygnus (Zwaan) de röntgenbron Cyg X-1 ontdekt. Met de satelliet UHURU werden in het begin van de jaren zeventig een paar honderd van zulke bronnen ontdekt (afb. 22).

De positie van de röntgenbronnen was aanvankelijk niet nauwkeurig bekend. Omdat het in het sterrenbeeld Zwaan wemelt van de sterren, was het bijvoorbeeld niet duidelijk of één daarvan, en zo ja welke, de zichtbare tegenhanger van Cyg X-1 is. Hier kwam de natuurde sterrenkundigen te hulp. UHURU nam waar dat Cyg X-1 meer hoog-energetische röntgenstraling ging uitzenden. Tegelijkertijd werd met de samengestelde radiotelescoop van Westerbork een nieuwe bron van radiostraling ontdekt in de richting van Cyg X-1. Met de radiotelescoop kunnen de posities van radiobronnen zeer nauwkeurig worden bepaald. De nieuwe bron bleek precies samen te vallen met de relatief zware en hete ster HD226868, een zogenaamde O-ster. Als mogelijke bron van zichtbaar licht, radiostraling en röntgenstraling was HD226868 een nadere studie meer dan waard.

Het door HD226868 uitgezonden zichtbare licht is vrijwel identiek aan dat van andere O-sterren. Louise Webster en Paul Murdin ontdekten dat de snelheid van HD226868 varieert

met een periode van 5,6 dagen. Blijkbaar beweegt de ster in een baan om een begeleider. In een dubbelster bewegen beide sterren om het gemeenschappelijke zwaartepunt. Daarbij heeft de lichtste ster de grootste snelheid. De vrij hoge baansnelheid van HD226868 geeft aan dat zijn begeleider een tamelijk hoge massa heeft. De O-ster heeft een massa van minstens twintig zonsmassa's en de begeleider moet minstens zeven zonsmassa's meten. Toch zien we die niet. Dat betekent dat de be-



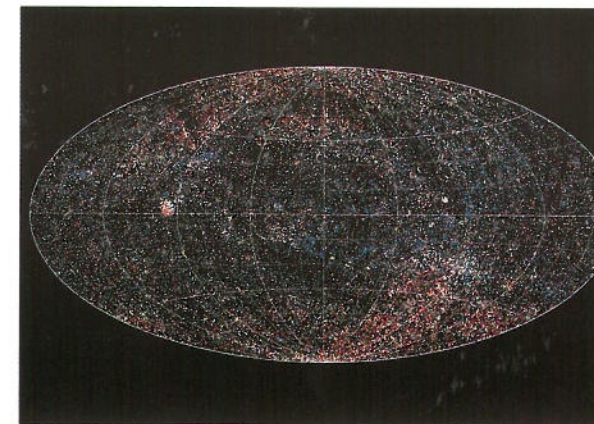
21

21. Röntgenbron Cyg X-1 is een schijf materie die van een normale zware ster in een zwart gat spi-

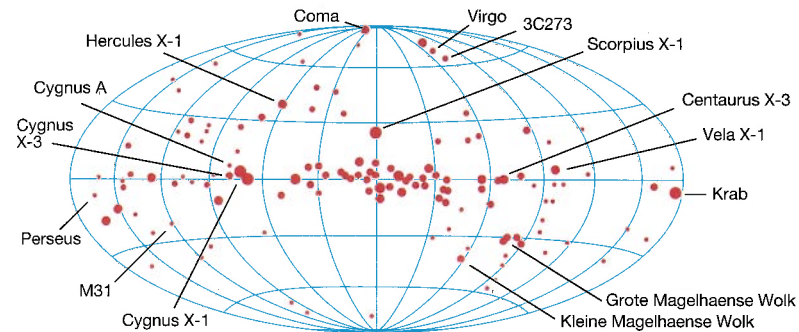
ralt. De energie die daarbij vrijkomt wordt in de vorm van röntgenstraling uitgezonden.

geleider een compacte ster moet zijn, met een kleine straal. Webster en Murdin kwamen met het idee dat de begeleider een zwart gat is.

Bij de pogingen om de heldere röntgenbronnen aan de hemel te verklaren, was al geopperd dat de meeste ervan neutronensterren zijn, die materie van een begeleidende ster opnemen. Als die materie recht naar de neutronenster zou vallen, zou ze op het moment van inslag een snelheid van een derde van de lichtsnelheid hebben. De geweldige bewegingsenergie die deze snelheid vertegenwoordigt, zou bij de inslag vrijkomen. In werkelijkheid gaat het anders: de materie spiraliseert via een schijf langzaam naar de neutronenster. Daarbij



23



22

22 en 23. In de twintig jaar tussen de UHURU- en de ROSAT-satelliet is de techniek flink voortgeschreden. Waar UHURU een totaal van zo'n 200 röntgenbronnen, voornamelijk neutronensterren, aan de hemel ontdekte (22), vindt ROSAT er ruim 50 000 (23). De meeste ROSAT-bronnen zijn gewone sterren op korte afstand en zwarte gaten in de kernen van actieve sterrenstelsels op zeer grote afstanden.

wordt, in de vorm van door de schijf uitgezonden straling, evenveel energie vrijgemaakt als bij een directe inslag. De schijf zendt de meeste energie vlakbij de neutronenster uit als röntgenstraling. Ook het oppervlak van de ster zendt röntgenstraling uit.

Een neutronenster kan niet meer dan twee à drie zonsmassa's zwaar zijn. De structuur van de neutronenster wordt bepaald door een evenwicht tussen de druk van het gas van neutronen en de zwaartekracht. De gasdruk probeert de ster te laten uitzetten, terwijl de zwaartekracht hem samentrekt. Een neutronenster van anderhalve zonsmassa is in evenwicht bij een straal van ongeveer tien kilometer. Voor een zwaardere neutronenster is de evenwichtsstraal kleiner! In de buurt van drie zonsmassa's wordt de evenwichtsstraal gelijk aan de Schwarzschildstraal. Voor nog zwaardere neutronensterren is geen evenwicht mogelijk en kan niets de instorting tot een zwart

gat verhinderen. Ook zo'n zwart gat kan via een schijf materie opnemen, waarbij het deel van de schijf nabij het gat een heldere bron van röntgenstraling is. Cyg X-1 is waarschijnlijk een zwart gat dat materie opsloopt van de O-ster HD226868 (afb. 21).

### Röntgenpulsars en nog twee zwarte gaten

De meeste andere met de UHURU ontdekte röntgenbronnen bleken neutronensterren te zijn die materie vangen van een begeleider. In ongeveer vijftig gevallen heeft de neutronenster een sterk magnetisch veld dat de invallende materie op de magnetische polen van de ster dwingt. Met de draaiing van de neutronenster om de eigen as roteren deze polen beurtelings uit ons gezicht en weer terug, waardoor we de röntgenstraling zien variëren met de rotatieperiode van de neutronenster. Zo'n bron noemen we een *röntgenpulsar*. Voor acht van die dub-



belsterren is het inmiddels gelukt de baan en vervolgens de massa van beide sterren te bepalen. De neutronensterren blijken allemaal ongeveer anderhalve zonsmassa zwaar te zijn.

Een geladen zwart gat heeft bij rotatie een magneetveld. Toch kan een zwart gat geen pulsar zijn: het geen-haarvermoeden houdt in dat de magnetische as van een zwart gat met de rotatie-as moet samenvallen, terwijl dat bij een pulsar juist niet het geval is. Röntgenpulsars kunnen dus geen zwarte gaten zijn.

Vele jaren lang bleef Cyg X-1 het enige hemellichaam waarvan overtuigend kon worden beargumenteerd dat het een zwart gat is. Behalve door de afwezigheid van pulsen, onderscheidt Cyg X-1 zich ook door de energieverdeling van de röntgenfotonen. Bij de meeste röntgenbronnen hebben vrijwel alle fotonen een energie die dicht bij het gemiddelde ligt. Als het gemiddelde bij 5 keV (kilo-elektronvolt) ligt, zendt zo'n bron bij 1 keV of bij 25



25



24

24 en 25. Diverse verschijnselen wijzen op een zwart gat in de kern van een sterrenstelsel. M51 (24) geeft een donkere 'X' te zien die bestaat uit stofbanden. De horizontale band is vermoedelijk een stofring om de

materieschijf van het zwarte gat. Het licht van de schijf kan alleen naar boven en naar beneden. Het lijkt erop dat alleen een zwart gat voldoende energie kan leveren om de jet die M87 uitstoot (25) in stand te houden.

begeleider loopt. Die begeleider zou een massa van minstens zeven zonsmassa's moeten hebben. Daarmee was, twaalf jaar na Cyg X-1, een tweede overtuigende kandidaat voor een zwart gat gevonden. Na nog eens vier jaar werd aangetoond dat de eerste in de Grote Magelhaense Wolk ontdekte röntgenbron, LMC X-1, eveneens door een B-ster wordt begeleid. Uit de voor de B-ster gemeten snelheid volgt dat zijn compacte begeleider minstens 2,7 zonsmassa's zwaar moet zijn. LMC X-1 vertoont geen röntgenpulsen en heeft een soortgelijk röntgenspectrum als Cyg X-1. Ook deze röntgenbron is mogelijk een zwart gat.

### De zachte röntgentransiënts

Ongeveer de helft van de met UHURU in ons eigen Melkwegstelsel ontdekte röntgenbronnen vertoont geen pulsen en heeft geen ex-

treem zacht of hard röntgenspectrum. De meeste röntgenfotonen van deze dubbelsterren hebben een energie van enkele duizenden elektronvolt. In veel gevallen weten we tamelijk zeker dat de compacte ster geen zwart gat, maar een neutronenster is. Die bronnen zenden namelijk zo nu en dan een stoot röntgenstraling – röntgenburst – uit, die enkele tientallen seconden duurt (afb. 26a).

De verklaring voor de bursts moeten we in kernfusieprocessen zoeken. Gewone sterren, zoals de ster die in een dubbelster massa verliest aan zijn compacte begeleider, bestaan voornamelijk uit waterstof en helium. Er valt dus veel waterstof en helium op de neutronenster. Dat waterstof fuseert onmiddellijk tot helium. Aldus vormt zich langzaam een laag helium op de neutronenster. Als de laag dik genoeg wordt, lopen druk en temperatuur onder in de laag ver genoeg op om opnieuw kernfusie te laten beginnen. Berekeningen voorspellen dat de hele laag helium in enkele tientallen seconden tot koolstof fuseert. De hoeveelheid kernfusie-energie die hierbij volgens de theorie vrijkomt, klopt goed met de tijdens röntgenbursts gemeten energieën.

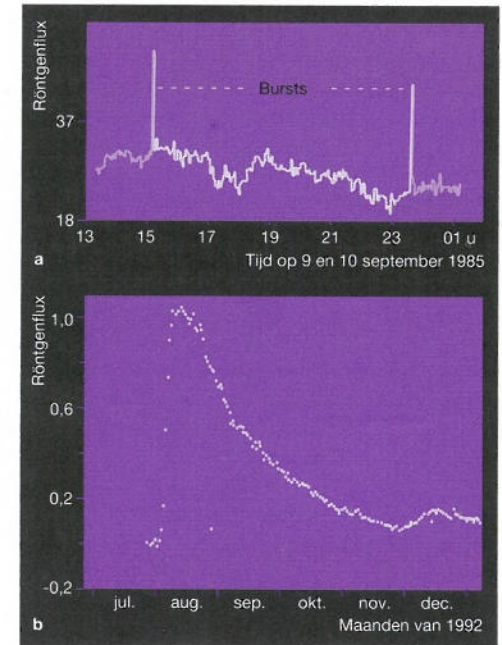
De meeste van deze röntgenbronnen zijn neutronensterren die materie vangen van een zonachtige ster met een lage massa. Omdat zo'n zonachtige ster lichtzwak is, wordt ze geheel overstraald door de schijf om haar begeleider. Het is dan ook heel moeilijk de materie-gevende ster te bestuderen. We kunnen met name haar baansnelheid niet bepalen. In het algemeen hebben we in lage-massaröntgendubbelsterren dan ook geen informatie over de massa van de compacte ster.

Een enkele keer hebben we meer geluk. We kennen een aantal dubbelsterren die slechts gedurende langdurige uitbarstingen waarneembaar zijn als een heldere röntgenbron. Zo'n uitbarsting begint met het in een paar dagen helder worden van de röntgenbron. In de daaropvolgende maanden neemt de röntgenstraling geleidelijk af en verdwijnt tenslotte (afb. 26b). Blijkbaar loopt er in deze bronnen slechts nu en dan materie door de schijf naar de compacte ster, al weten we niet hoe dat komt. Als de schijf weg is, kunnen we de zonachtige ster die de compacte ster begeleidt, ongestoord waarnemen.

Eén zo'n voorbijgaande röntgenbron of röntgentransiënt, A0620-00, werd in 1975 ont-

dekt door de Britse satelliet Ariel V. Tijdens de uitbarsting leek het röntgenspectrum van A0620-00 zozeer op dat van Cyg X-1, dat astronomen er meteen een zwart gat in zagen. De optische begeleider werd in 1986 in de uit-toestand bestudeerd. Daarbij bleek dat de materie-donor een baansnelheid heeft van meer dan 460 km s<sup>-1</sup>; verrassend hoog. De baanperiode is 7,75 uur. De compacte ster moet dan ook minimaal 7,3 zonsmassa's zwaar zijn: een zwart gat. Gelukkig voor de theoretici vertoont A0620-00 geen röntgenbursts.

Dankzij enkele nieuwe satellieten die voortdurend grote stukken van de hemel in de gaten houden, is de laatste jaren het aantal bekende zachte röntgentransiënts drastisch toegenomen. Van twee zulke systemen is inmiddels ook aangetoond dat de compacte ster een zwart gat is. Dat gebeurt door meting van de baansnelheid van de begeleidende ster, na het weer uitgaan van de röntgenbron.



26

26. Veel neutronensterren zijn herkenbaar aan hun plotselinge stoten röntgenstraling (a), bursts genoemd. Bij een zachte röntgentransiënt zien we

een plotselinge toename van de röntgenintensiteit (b) die in enkele maanden weer verdwijnt. Veel zulke transiënts zijn vermoedelijk zwarte gaten.



27. De Grote Magelhaense Wolk (LMC, achtergrond) toont de heldere resten van Supernova 1987A. Een supernova haalt zijn energie uit de vorming van een neutronenster (zoals SN 1987A) of een zwart gat (LMC X-1 en LMC X-3). De afstand tot de LMC is nauwkeurig bekend door de ring om SN 1987A.



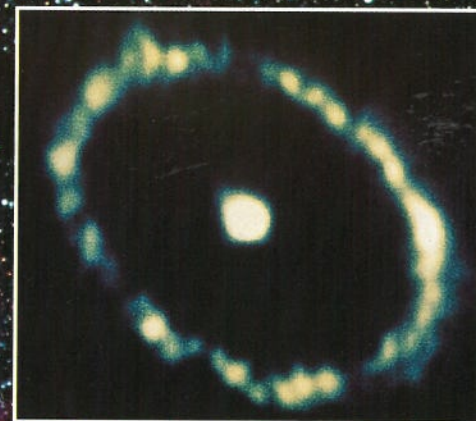
Bron GS/GRS1124-68 werd ontdekt toen zij in januari 1991 uitbarstte. In 1992 werd de massa van de compacte ster op minimaal 3,1 zonsmassa's bepaald. Bron GS2023+33 barstte in mei 1989 uit; hier duurde het tot 1992 eer werd vastgesteld dat de massa van het compacte object minimaal acht zonsmassa's bedraagt.

**De stellaire zwarte gaten**

In het voorgaande passeerden zes röntgenbronnen waarvan we vrijwel zeker weten dat het zwarte gaten zijn, de revue (zie tabel). De hoge helderheid van de röntgenstraling vertelt ons dat de compacte ster een neutronenster of een zwart gat is. Uit de gemeten snelheid van de massa-gevende ster volgt de massa die compacte ster minstens moet hebben. Die waarde is bij alle zes de bronnen te hoog voor een neutronenster, dus moeten het zwarte gaten zijn. Drie zwarte gaten hebben een zware ster als begeleider (Cyg X-1, LMC X-1 en LMC X-3). De drie andere hebben daarentegen een zonachtige lage-massaster (A0620-00, GS/GRS1124-68, GS2023+33). Deze stellaire zwarte gaten, zoals ze wel worden genoemd, zijn vermoedelijk gevormd uit oorspronkelijk zeer massieve O-sterren. Aan het eind van haar leven ondergaat zo'n O-ster een supernova-ontploffing, waarbij de kern ineenstort tot een zwart gat, terwijl er wellicht nog wat buitenlagen worden afgeworpen.

**TABEL** Bekende zwarte gaten: massa, lichtkracht en baanperiode (in dagen)

Zwarte gaten	Positie	Massa M <sub>☉</sub>	L <sub>x</sub> (Watt)	P <sub>b</sub> (d)
<b>Bij O- of B-ster</b>				
LMC X-1	0540-70	6	2 · 10 <sup>31</sup>	1,4
LMC X-3	0538-64	>7	2 · 10 <sup>31</sup>	1,7
Cyg X-1	1956+35	16	2 · 10 <sup>30</sup>	5,6
<b>Bij Lage-massaster</b>				
V616 Mon	0620-00	>7	2 · 10 <sup>31</sup>	0,3
Nova Muscae	1124-68	>3	4 · 10 <sup>30</sup>	0,4
V404 Cyg	2023+34	10	2 · 10 <sup>32</sup>	6,5



27

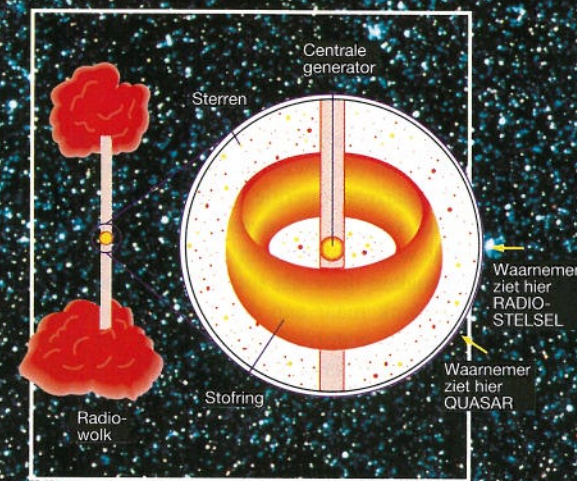
Alle zes de zwarte gaten blijken een opvallend breed röntgenspectrum te hebben, in de zin dat ze zowel zeer zachte (relatief energie-arme) als zeer harde (relatief energie-rijke) röntgenstraling uitzenden. Röntgensterrenkundigen hebben een lijstje opgesteld met alle bronnen die zo'n breed röntgenspectrum hebben. Dat lijstje bevat zes zwarte gaten en veertien zachte röntgentransiënts. Het lijkt erop dat die veertien ook zwarte gaten zijn. Zeker weten we dit niet, omdat we niet begrijpen waardoor de spectra van de zes zwarte gaten zo breed zijn. We weten dus ook niet of het feit dat de compacte ster een zwart gat is er iets mee te maken heeft. Bovendien is er één bron, Circinus X-1, die ook zo'n breed spectrum heeft, maar waarvan we door een heuse röntgenburst stellig weten dat het een neutronenster is. We moeten dus proberen de baansnelheden van de begeleiders te meten.

Circinus X-1 is toch al een spelbreker. Vroeger dacht men wel dat een zeer snelle variabiliteit van de röntgenstraling, op tijdschalen van een honderdste seconde, een goede handtekening van een zwart gat was. Maar ook de neutronenster Circinus X-1 vertoont zulke snelle variaties. Je zou haast denken dat er twee röntgenbronnen, een zwart gat en een röntgenburster, toevalligerwijs vlak bij elkaar aan de hemel



28 en 29. Een foto en een schema van een sterrenstelsel met een actieve kern. De positie van de waarnemer bepaalt hoe hij de bron ziet. De centrale generator is vermoedelijk een zwart gat.

28

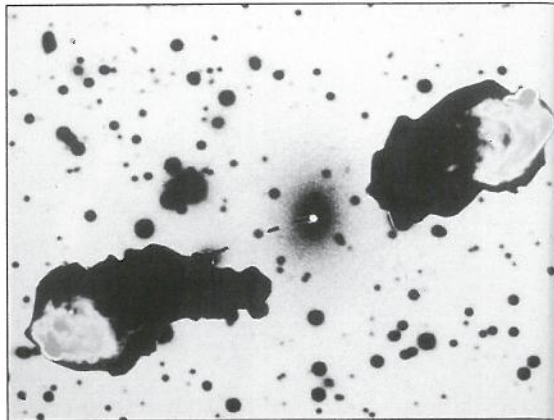


29



staan. De nauwkeurigheid waarmee moderne satellieten de positie van röntgenbronnen bepalen, is echter zo groot dat deze mogelijkheid kan worden uitgesloten. Er is echt maar één enkele bron Circinus X-1.

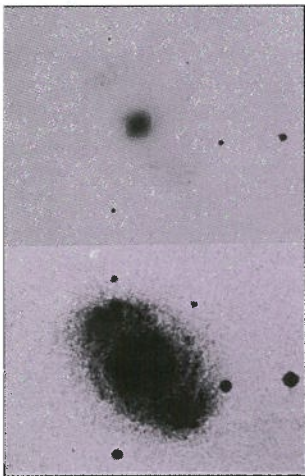
Tot slot nog een woord over de zwarte gaten bij een zware ster. In LMC X-3 wordt een zwart gat van vermoedelijk dertien zonsmassa's begeleid door een ster van negen zonsmassa's. Die ster gaat over enige miljoenen jaren ontploffen en vormt dan een neutronenster. Dan krijgen we een dubbelster die uit een zwart gat en een neutronenster bestaat! Tot nog toe is zo'n dubbelster nooit gevonden, maar wie weet vinden we er nog wel een.



31

30. NGC 4151 is een goed voorbeeld van een Seyfert-stelsel. Op de kort belichte, bovenste opname is de kern een sterachtig object, maar bij een langere belichting blijkt die kern gevat in de spiraalarmen van een compleet sterrenstelsel.

31. Cygnus A is het klassieke voorbeeld van een radiostelsel. De donkere lobben zijn de gebieden met hoge radiointensiteit die voor deze afbeelding zijn gecombineerd met een opname in zichtbaar licht. Het feit dat de lobben vele malen groter zijn dan het eigenlijke sterrenstelsel wijst op een actieve kern, mogelijk een enorm zwart gat.



30

### Actieve kernen van sterrenstelsels

De voor een waarnemer meest opvallende eigenschap van een zwart gat is de enorme efficiëntie waarmee energie kan worden vrijgemaakt uit materie die naar een zwart gat toe valt. Uit waterstof kunnen we flink wat energie vrijmaken door dat tot helium te laten fuseren – denk maar aan de waterstofbom. Als we evenveel waterstof in een zwart gat laten vallen, komt er dankzij de zwaartekracht honderd keer zo veel energie uit vrij.

De eerste suggestie dat er zwarte gaten bestaan, kwam dan ook toen in het heelal objecten werden ontdekt die enorme hoeveelheden

energie uitstralen. Het begon toen Carl Seyfert in 1943 een sterrenstelsel met een opvallend heldere kern ontdekte (afb. 30). In 1963 ontdekte Maarten Schmidt dat quasars op zeer grote afstanden staan, ver weg in het heelal. Daarmee lag de conclusie voor de hand dat quasars zulke actieve kernen van sterrenstelsels zijn, die zo ver weg staan dat het sterrenstelsel zelf niet meer zichtbaar is. Met de nieuwste, gevoelige telescopen is men er in de laatste jaren inderdaad in geslaagd het sterrenstelsel bij enkele quasars waar te nemen. Ook op röntgenbeelden zijn de actieve kernen vaak zeer helder: vele van de door de UHURU buiten het vlak van onze Melkweg ontdekte bronnen zijn zulke actieve kernen van sterrenstelsels. Voorbeelden in afbeelding 22 zijn Cas A en 3C273. Omdat die stelsels duizenden keren zo ver weg staan als de röntgendubbelsterren in onze Melkweg, volgt meteen dat de werkelijke röntgenlichtsterkte van hun kernen miljoenen malen groter is dan de lichtsterkte van röntgendubbelsterren.

Aan weerszijden van zo'n actieve kern, maar op afstanden van miljoenen lichtjaren – dus veel verder dan de doorsnee van het sterrenstelsel – treffen we soms heldere radiobronnen aan (afb. 28, 29 en 31). De radiostraling wordt uitgezonden door elektronen die in een magneetveld bewegen. Met enkele eenvoudige formules kunnen we de energie uitrekenen die minimaal nodig is om deze radiobronnen in stand te houden. Het blijkt heel, heel veel te zijn. Die energie wordt blijkbaar als een nauwe straal vanuit de actieve kern

van het stelsel naar de radiolobben gezonden. In een aantal gevallen kunnen we de loop van die straal direct in de radiostraling zien. In andere gevallen is de actieve kern zelf een zeer heldere bron van radiostraling.

Na de ontdekking van de dubbele radiobronnen en de actieve kernen van sterrenstelsels, werd wel geopperd dat de energie wordt geleverd door een waar vuurwerk van supernova's, waarbij de ene na de andere ontploft. Een meer populaire veronderstelling is dat de energie vrijkomt bij de val van materie op een zwart gat in de kern van het sterrenstelsel. Als er per jaar één zonsmassa via een schijf in dat zwart gat verdwijnt, levert dat in principe voldoende energie. Omdat de dubbele radiolobben vaak op miljoenen lichtjaren van de actieve kern staan, denken we dat de materie-stroom miljoenen jaren lang op gang kan blijven. Dan betekent wel dat het centrale zwarte gat inmiddels miljoenen zonsmassa's zwaar moet zijn. Wellicht werd het oorspronkelijke zwarte gat in de kern tegelijk met het sterrenstelsel gevormd.

De hypothese van een centraal zwart gat in de actieve kernen moge dan heel redelijk zijn, ze is niet gemakkelijk te bewijzen. Op afstanden van miljoenen lichtjaren is zelfs een grote schijf om het zwarte gat te klein om direct te worden waargenomen. Alle aanwijzingen die we tot nu toe hebben, vormen dan ook alleen maar 'circumstantial evidence'. Elk half jaar verschijnt er wel weer een artikel in de krant dat er nu een echt bewijs is voor een zwart gat in een of andere actieve kern. En nooit is zo'n bewijs echt overtuigend. In bijna alle gevallen komt het er op neer dat er aanwijzingen gevonden zijn voor een schijf. Zo meten we veel ultraviolette straling in actieve kernen en die kan best van een schijf komen. Ook nemen we waar dat radiostraling, zichtbaar licht en röntgenstraling sterk kunnen variëren op een tijdschaal van een dag of minder, precies zoals we kunnen verwachten voor de binnengebieden van een schijf om een zwart gat van een miljoen zonsmassa's. Een echt bewijs voor een zwart gat levert dit echter niet.

Regelmatig vinden sterrenkundigen in de kern van ons eigen Melkwegstelsel een variabele radiobron, een flinke sliert gas of een harde röntgenbron. Telkens wordt zo'n ontdekking met veel bombarie aangekondigd als het definitieve bewijs dat er ook daar een

zwart gat van enkele miljoenen zonsmassa's is gevonden. Tot nu toe zijn deze 'bewijzen' zelfs niet overtuigend als indirect bewijs – althans niet in de ogen van de schrijver dezes.

Het sterkste argument voor de aanwezigheid van een massief zwart gat in de actieve kern van een sterrenstelsel is nog steeds het oorspronkelijke: dat het heel moeilijk is zich voor te stellen hoe zoveel energie kan worden vrijgemaakt op een andere manier dan door materievangst door een zwart gat. Overigens is het niet duidelijk hoe materie er toe kan worden gebracht naar een zwart gat in het centrum van een sterrenstelsel te stromen. Men zou namelijk verwachten dat de materie in de onmiddellijke nabijheid van het gat snel op is, zodat er ook materie van grotere afstanden moet worden aangevoerd. Die materie op grotere afstanden draait echter in een baan om het centrum heen en kan alleen naar het centrum vallen als die baan wordt verstoord. Gebeurt dat niet, dan blijft de materie rustig op grote afstand zijn baantjes draaien. Hoe die storing tot stand kan komen, is onduidelijk. Het materieprobleem wordt wel samengevat als *How to feed the monster?*

Het directe bewijs voor de aanwezigheid van massieve zwarte gaten in de actieve kernen van sterrenstelsels valt vooralsnog niet te verwachten. Het verzamelen van indirecte aanwijzingen gaat echter door, en zal zeker nog tot leuke verrassingen leiden.

### Bronvermelding illustraties

E v.d. Padt, Ridderkerk: pag. 300-301  
 NASA/ESA/Space Telescope Science Institute: 3, 15, 17  
 (Dana Berry), 24, 25, 27 en 28  
 ESA, Noordwijk: 5  
 BPK/Conrad Humel, Berlin-Museum: 8  
 ESO, Garching, D: 11 en pag. 316-317 achtergrond  
 NASA: 12  
 The Hale Observatories, Pasadena, Californië, VS: 19  
 ASTRON, Dwingelo: 20 (Harm-Jan Stiepel, Beilen) en 31  
 Harvard Smithsonian Astrophysical Laboratory: 21  
 MPE, Garching, D: 23  
 Archief natuur & Techniek: 30  
 De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteur.

### Literatuur

Oort JH. Middenin de Melkweg - Kernactiviteit in sterrenstelsels. *Natuur & Techniek* 1991; 59: 2, 78-89.  
 Wheeler JA. Zwaartekracht - Het verband tussen massa, ruimte en tijd. Maastricht: *Natuur & Techniek, Wetenschappelijke Bibliotheek*, 1991.