

Afbuiging van straling door de zon

2. Nieuwe metingen

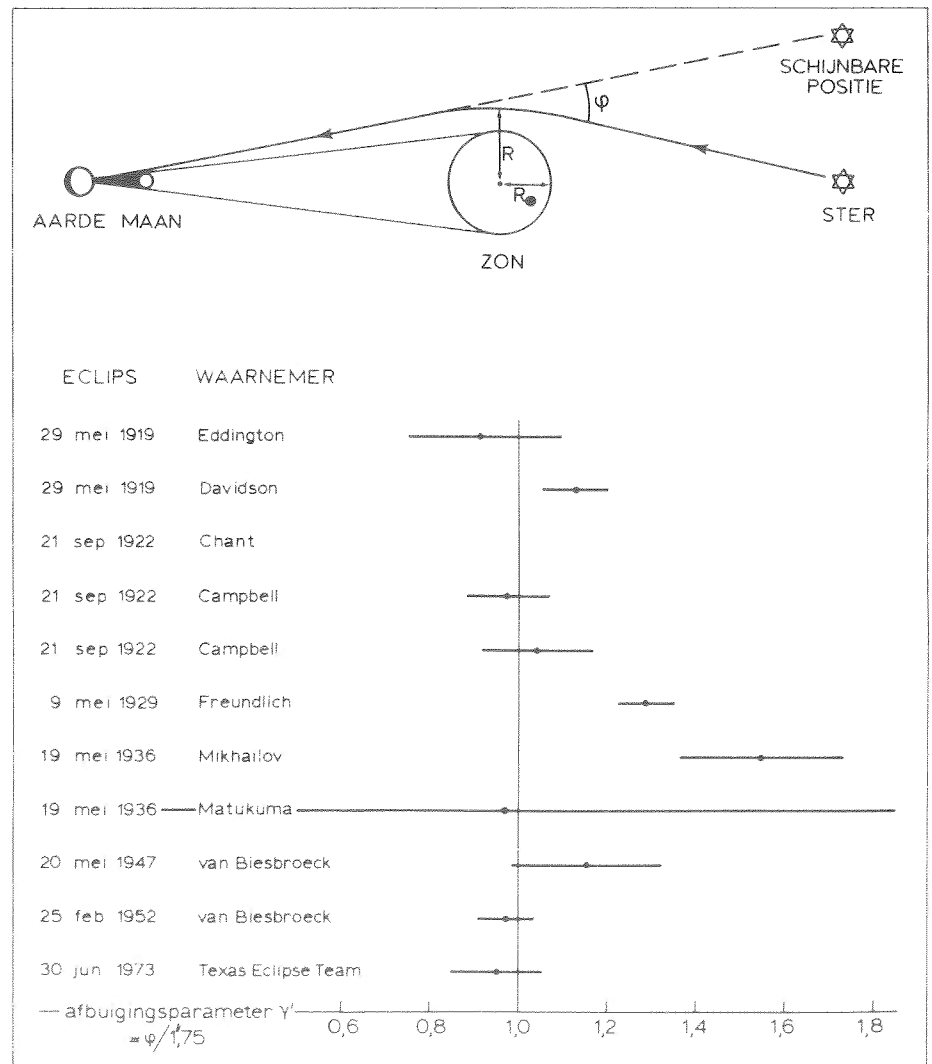
Eddington's bevestiging in 1919 van de afbuiging van sterlicht door de zon was het sein tot de algemene aanvaarding van Einstein's algemene relativiteitstheorie (zie het eerste deel van deze serie in het vorige nummer van Zenit). De meting was echter niet erg precies. Naderhand rees de noodzaak van nauwkeuriger bepalingen, want naast de algemene relativiteitstheorie kwamen ook afwijkende theorieën over de zwaartekracht naar voren. Pas de laatste jaren zijn de experimentele tests voldoende nauwkeurig geworden om onderscheid te kunnen maken; de algemene relativiteits-theorie is daarin onaangetast overleefd.

Na Eddington's expeditie van 1919 stond het dan wel vast dat de zwaartekracht de meetkunde van ruimte en tijd doet krommen, maar veel meer leek dit een belangwekkende filosofische gedachte dan een ontdekking met praktische toepassingen. In ons zonnestelsel is de sterkste zwaartekracht die van de zon, en die is nog zo zwak dat Newton's formule voor dagelijks gebruik meer dan goed genoeg is. Desondanks is de gravitatie-theorie sindsdien een onderzoeksterrein van grote interesse geworden, met belangrijke astrofysische toepassingen in de laatste jaren, en met veelbelovende astrofysische meetmethoden in het verschiet. Een eerste nieuwe toepassing, al in de twintiger jaren, was die op het heelal zelf. Einstein begon met statische modellen; De Sitter en Friedmann vonden oplossingen van Einstein's vergelijkingen waarin het heelal expandeert. Tegelijkertijd vond Hubble de met hun afstand toenemende roodverschuiving der melkwegstelsels, die de uitdijning

van het heelal aantoonde. Dit leidde tot de theorie van het evoluerende heelal, inclusief de oerknal aan het begin der tijden, zo'n twintig miljard jaar geleden. Hoyle bedacht nog wel een truc ('continue creatie van materie') om voortdurende uitdijning toe te staan zonder evolutie van het heelal, dat dan overal en altijd hetzelfde zou zijn. Maar, net zoals alles in de natuur – wijzelf, de sterren, de melkwegstelsels –, evolueert ook het heelal zelf. Dat bleek eerst uit de extragalactische radiobronnen, die ver weg (dus lang geleden) anders zijn. Het getheoretiseer over de 'big bang' zelf werd in 1965 op experimentele poten gezet door de toevallige

ontdekking van de microgolf-achtergrondstraling die nog van de explosie over is (de '3-graden Kelvin straling'). Een belangrijke vraag (vooral nog door Hawking en Penrose in 1970 met ja beantwoord) is of er, teruggaand tot de vroegste tijd, een *singulariteit* geweest is: een moment waarop alles op een kluitje zat. Het daaraan voorafgaande deel van het verhaal, zo aanwezig, is dan vermoedelijk *fundamenteel* ontoegankelijk. Eenzelfde singulariteit siert ook een ander nieuw toepassingsgebied van de algemene relativiteitstheorie, maar dat is een singulariteit die niet het voorafgaande maar het

Fig. 1. De metingen van de afbuiging van sterlicht door de zon tijdens totale zonsverduisteringen. De uitgezette parameter geeft de afwijking ten opzichte van de voorspelling uit de algemene relativiteitstheorie ($\gamma^1 = 1$). De afgebeelde metingen zijn degene waarvan resultaten zijn gepubliceerd; vele andere waarnemingen zijn nooit precies uitgewerkt. De horizontale strepen tonen de opgegeven waarschijnlijke fout (Chant deelt deze niet mee). Het aantal waargenomen sterren varieerde van 7 in 1919, via 85 in 1923 tot 150 in 1973.





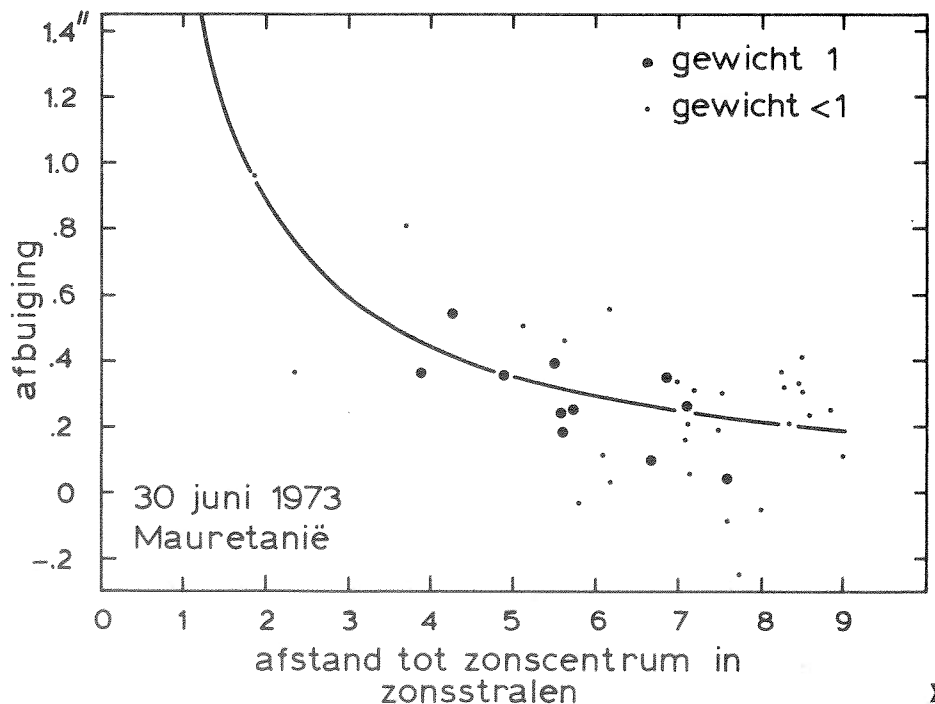
vervolg aan onze blik onttrekt – een kosmisch hiernamaals. Dat is de ‘gravitatiecollaps’: de ineenstorting van een materieconcentratie onder de eigen zwaartekracht tot een zwart gat (Ref. 2).

Zo’n collaps volgde als theoretische mogelijkheid uit het werk van Chandrasekhar, Landau en Oppenheimer in de dertiger jaren, maar werd als werkelijk einde voor een ster verworpen door Einstein, Eddington en vele anderen. De toevallige ontdekking van de pulsars (1967), en hun interpretatie als de reeds in 1934 door Zwicky voorspelde neutronensterren, maakte echter sindsdien gemeengoed wat tevoren als esoterische speculatie was afgedaan. Neutronensterren waren namelijk óók al in de der-

tiger jaren uitgebreid doorgerekend als mogelijk bestaande ster; ook in deze berekeningen speelt de algemene relativiteitstheorie een belangrijke rol. Van een neutronenster naar een zwart gat is niet zo’n grote stap meer. De ontdekking van de röntgendubbelsterren door de Uhuru-satelliet en de gedetailleerde modellen en plausible evolutie-scenario’s die daarvoor zijn opgesteld maken het daadwerkelijk bestaan van ineengestorte sterren heel waarschijnlijk – zoal niet reeds gevonden in het geval van Cygnus X-1 (Ref. 1 en 3).

Zwarte gaten zijn nu ingeburgerd. De avonturiers in de astrofysika worden al gelokt door nieuwe verten: verdampende minigaten nog over uit de oerknal, actieve maxigaten in bolhopen en in kernen van melkwegstelsels, evoluerende gaten in quasars (Ref. 4 en 5).

Fig. 2. De in 1973 gemeten afbuiging als functie van de afstand tot de zon. De kromme geeft de voorspelde afbuiging; de punten zijn de metingen. Deze meting is het teleurstellende resultaat van een grootscheepse, door Dicke geïnspireerde expeditie van de universiteiten van Texas en Princeton naar Mauretanië. Een frans astrometrisch objectief werd gebruikt (diameter diafragma 16,5 cm, brandpuntsafstand 2,1 m), in equatoriale opstelling in een airconditioned gebouw. Er hadden meer dan 1000 sterren (tot $m = 10,5$) gefotografeerd moeten worden, maar de hemel was door de grote hoeveelheid Saharastof zo helder (licht verstrooid van buiten de totaliteitszone) dat men slechts magnitude 8,5 haalde, goed voor 150 sterren. Niettemin werden in november nog ijkingsopnamen gemaakt. Er werden glasplaten van ruim een centimeter dikte gebruikt, ‘microvlak’ geslepen, met een nauwkeurig rooster van referentiepunten aangebracht op de emulsie. Daaruit bleek dat er ondanks alle voorzorgen toch schaalveranderingen waren tussen juni en november. De fouten verschillen per plaathouder, waaruit volgde dat te slappe veren waren gebruikt om de plaathouders met de zo zware platen aan te drukken! Dat maakte de ijkplaten onbruikbaar, en de eclipsplaten slecht.



Eclipseexpedities lijken altijd naar exotische oorden te moeten plaatsvinden. Hier staat een bewaker voor de hut met apparatuur voor het maken van ijkingsopnamen te Chinguetti, Mauretanië, in november 1973. Deze expeditie vond vijf maanden na de werkelijke eclips plaats en werd geleid door David S. Evans van de universiteit van Texas. Volgens hem zou de tekst op de hut ongeveer moeten luiden: ‘De Amerikaanse astronomen komen in vrede om de zonsverduistering waar te nemen’, maar wellicht kan één van de lezers dit nog verifiëren (foto University of Texas at Austin).

Bij deze ontwikkelingen is de algemene relativiteitstheorie gereedschap geworden, nodig in berekeningen voor omstandigheden waar de afwijkingen van Newton’s wet niet verwaarloosbaar maar allesbepalend zijn. Tegelijk met deze ontwikkelingen is het gereedschap scherp geslepen, in een serie steeds verfijndere proeven die we hier de revue laten passeren. Overigens dient hierbij te worden opgemerkt dat het gereedschap dan nu wel scherp is, maar nog lang niet *kompleet*. Het optreden van singulariteiten definieert de toepassingen waar de algemene relativiteitstheorie faalt als beschrijving van de zwaartekracht – dus waar verdere ontwikkeling van de theorie is vereist (zie kader).

Zonsverduisteringen

Welhaast bij iedere geschikte totale zonsverduistering sinds 1919 heeft men opnieuw geprobeerd de verplaatsing van sterren door de afbuiging van hun licht te meten. Doorgaans is er een expeditie van het land waar de verduistering het best valt waar te nemen. De lokale Akademie van Wetenschappen wenst dan niet met lege handen te staan tussen het internationale bezoek, en vaardigt maar een Einstein-expeditie uit. Meest-

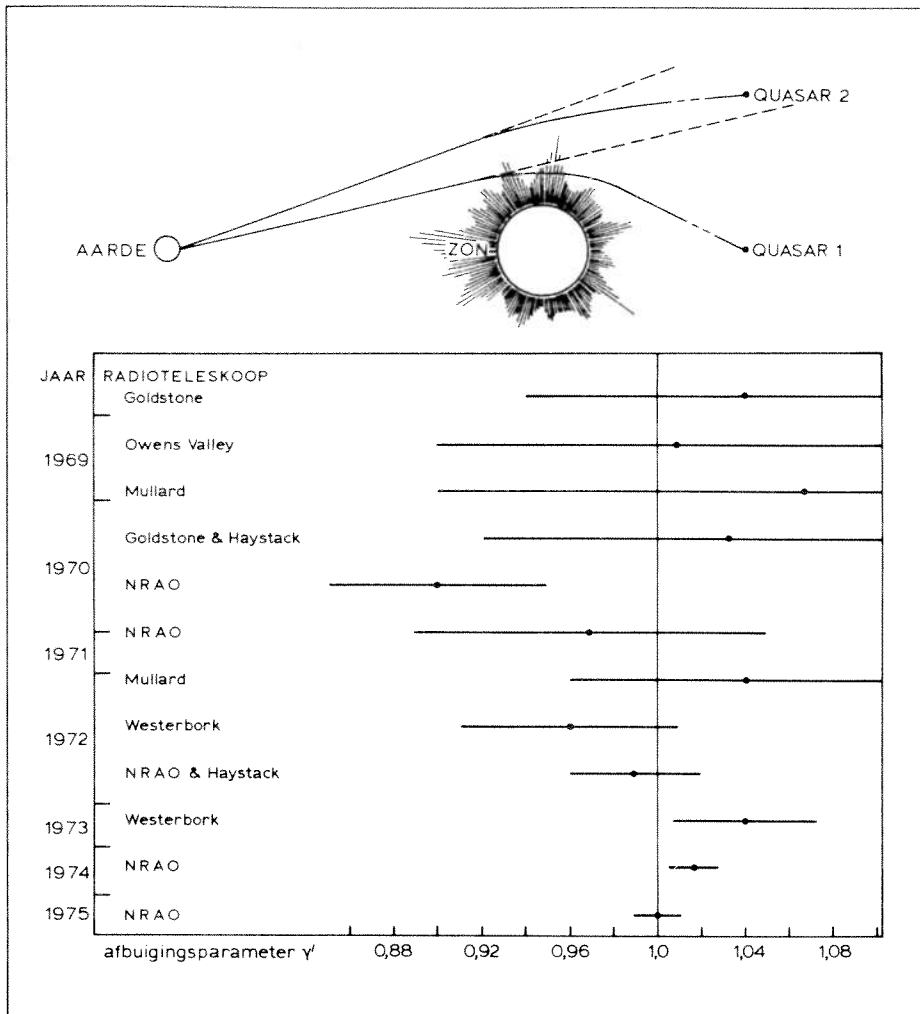


Fig. 3. De metingen van de afbuiging van radiostraling van quasars door de zon. De parameter γ^1 geeft de gemeten afbuiging relatief tot de Einsteinese voorspelling ($\gamma^1 = 1$). Merk op dat de schaal ten opzichte van fig. 1, sterk is uitgerekt! De metingen van Goldstone + Haystack en NRAO (te Greenbank, W. Virginia) + Haystack waren 'Very Long Baseline Interferometry' metingen, met basislengten van respectievelijk 3900 en 845 km. De metingen van 1975 en 1976 te NRAO hebben 1% precisie. Indien de daar gebruikte technieken met lange basislengten worden gecombineerd moet 0,1% precisie haalbaar zijn.

al leveren ze niets op! Veel verder dan de precisie die de Greenwich-expeditie in 1919 met haar 10-cm telescoop haalde ($0'',12$), is men nooit gekomen (fig. 1). De moeilijkheid, evenals bij de expedities van 1919, blijft het optreden van schaalveranderingen in het beeld tussen de eclipsopnamen en de controleopnamen maanden later. In fig. 2 wordt de grote expeditie van 1973 nader bekeken; deze gaf $\gamma^1 = 0,95 \pm 0,11$, dat is een afbuiging van $1'',66 \pm 0'',2$.

Andere gravitatie-theorieën

De precisie van de afbuigingsmetingen mocht dan gering zijn, de algemene relativiteitstheorie bleef toch nog precies kloppen in de voorspelling van een kleine extra periheliumbeweging van Mercurius. Maar deze bevestiging werd verstoord door de aankondiging van Dicke en Goldenberg in 1967 dat de zon meer is afgeplat dan verwacht. De extra afplatting impliceert óók extra precessie van Mercurius' baan, zodat de waargenomen opschuiving niet meer precies met Einstein's berekening klopte. De waarde klopte daarentegen nu wel met Dicke's eigen gravitatie-theorie, de z.g. 'scalar-tensor' theorie! Dicke's vernuftige experiment heb ik eerder uitvoerig beschreven (Ref. 6). Hier zal ik alleen het verdere verloop uit de denken doen.

De scalar-tensor theorie van Brans en Dicke uit 1961 was de voorloper, en is de belang-

rijkste, van een ware stortvloed van alternatieve gravitatie-theorieën. Het zijn er zo veel dat er, op Dicke's voorstel, zelfs aan *theorie van theorieën* gedaan wordt, om uit te zoeken wat nu precies de onderlinge verschillen zijn. De meeste lijken erg op de algemene relativiteitstheorie: het zijn ook 'metrische' theorieën, met het equivalentieprincipe in een of andere vorm als basis. Ze verschillen in kleine bijmengsels, waardoor ze conceptueel wel, maar in de experimentele praktijk niet veel afwijken van Einstein's theorie.

We nemen Dicke's scalar-tensor theorie als voorbeeld. Bij Einstein wordt de meetkunde van ruimte en tijd uitsluitend door de zwaartekracht geregeld, en beschreven door een z.g. tensorveld. In de Brans-Dicke theorie wordt daar een 'scalarveld' bij opgeteld (zoiets als het vrijelijk optellen van een integratieconstante in de integraalrekening). Bij andere theorieën wordt er een vectorveld bij opgeteld, of een niet door de zwaartekracht geregeld achtergrond-tensorveld. Bij deze optellerij spelen vragen een rol als: regelt *alleen* de zwaartekracht de ruimte/tijd kromming? Is de zwaartekracht, bijvoorbeeld de gravitatieconstante, *anders* waar extra veel massa is, of was hij anders in het jonge heelal? Hoe moet men de zwaartekracht van verschillende lichamen combineren? Hoeveel zwaartekracht leveren verschillende vormen van energie, zoals kinetische energie, potentiële energie, inwendige energie en druk?

Met een reeks van 10 'post-newtoniaanse

coëfficiënten' worden deze en andere keuzen nu in de zwaartekrachtsformules aangegeven. In de algemene relativiteitstheorie zijn sommige van deze parameters gelijk aan 1 en de overige 0; in de andere theorieën vindt men diverse combinaties. De belangrijkste parameter is γ , welke de mate van kromming van de ruimte en de tijd meet per massa-eenheid. In de algemene relativiteitstheorie geldt $\gamma = 1$; in de scalar-tensor theorie varieert γ volgens $\gamma = (1 + \omega)/(2 + \omega)$, waarbij ω ruwweg de relatieve verhouding tensor/scalar aangeeft: voor hele grote ω nadert γ tot 1, dus tot Einstein (dat kunt u zien door teller en noemer beide door ω te delen: er blijft voor grote ω de breuk 1/1 over).

Dicke's meting van de afplatting van de zon gaf als resultaat dat ω ongeveer de waarde 5 had, dus $\gamma \approx 0,86$, en dat een flink deel van de ruimte/tijd kromming dus niet door de zwaartekracht wordt bepaald. Dan moeten de metingen van de afbuiging van straling door de zon ook verschillen, en wel volgens

$$\varphi = \frac{1}{2}(1 + \gamma) \cdot 1,775$$

in plaats van de Einsteinese waarde van $1'',75$. De 'afbuigingsparameter' $\gamma^1 = \frac{1}{2}(1 + \gamma)$, die de afbuiging meet relatief ten opzichte van Einstein's waarde, moest volgens Dicke dus 0,93 zijn, overeenkomend met $1'',63$ afbuiging aan de zonsrand.

In 1974 schreef ik in Zenit dat Dicke's meting er derhalve op wees dat zijn theorie de algemene relativiteitstheorie zou gaan vervangen. Nu zal ik beschrijven hoe het tegendeel is uitgekomen! Er zijn nu onafhankelijke metingen die laten zien dat $\gamma = 1$ binnen 2 promille, en niemand behalve Dicke zelf gelooft nog in zijn metingen van de afplatting van de zon. (Dat is jammer voor Dicke, te meer daar men kan vermoeden dat de controverse hem een naar mijn smaak rechtmatig aandeel in de Nobelprijs voor de vondst van de 3K achtergrondstraling heeft gekost.)

Henry Hill's metingen te SCLERA

Dicke's metingen van de afplatting van de zon werden vooral in discredit gebracht door zijn eigen leerling Henry Hill. Die had oorspronkelijk geholpen met de bouw van Dicke's afplattingstelescoop, maar vertrok later naar Arizona waar hij op Mount Lemmon de 'SCLERA'-kijker bouwde (Santa Catalina Laboratory for Experimental Relativity by Astrometry). Dat is een buiten-

gewoon ingewikkelde telescoop, die bedoeld is om afbuiging van sterlicht door de zon waar te nemen – niet zoals gebruikelijk tijdens een eclips, maar gewoon *overdag* bij volle zon. Er zou een precisie van maar liefst 0,001 mee bereikt moeten worden!

Hill is echter nog altijd niet aan het meten van de verplaatsing van sterren toegekomen, door zijn onverwachte ontdekking van zonnepulsaties. De telescoop bevat namelijk een bijzonder ingenieuze methode om de diameter van de zon nauwkeurig te meten, oorspronkelijk bedoeld voor de schaalijking van het beeld. Daarmee mat Hill eerst dat de equatoriale en polaire diameters van de zon gelijk zijn: géén afplatting dus, en sindsdien wordt Dicke's meting als een dwaalspoor beschouwd. Vervolgens vond Hill onverwachts periodieke *fluctuaties* in de zonsdiameter, met perioden van 10 tot 50 minuten, en hij kondigde aan dat de zon pulseert. Deze metingen zijn echter zeer omstreken. De beweging zou namelijk ook te meten moeten zijn op het midden van de zonnenschijf (met het Doppler-effekt), maar is daar niet gevonden. Interessant is dat Hill nu, net als Dicke eerder, een meester blijkt in het weerleggen van kritiek door het verzinnen van rare effecten en ongewone oplossingen. Bovendien lijkt de geschiedenis zich te gaan herhalen en uitbreiden: een leerling van Hill is nu elders bezig een nog veel gevoeliger instrument voor het meten van zonnetrillingen te bouwen; een andere leerling van Hill wil een bijbehorende telescoop bouwen voor gebruik op de zuidpool, waar de zon 24 uur per etmaal schijnt. Maar hoe omstreken Hill's metingen ook zijn – zijn meting van het niet-afgeplat zijn van de zon werd wél algemeen aanvaard. Daarmee was de perihelium-beweging van Mercurius weer terug als bevestiging van de algemene relativiteitstheorie!

Af buiging van radiostraling

Inmiddels kwam een andere techniek naar voren om de afbuiging van straling door de zon te meten: het meten van de schijnbare verplaatsing van *radiobronnen* gezien nabij de zon. De zon passeert elk jaar een aantal geschikte quasars aan de hemel. Die kunnen niet zo dicht bij de zon worden waargenomen als sterren, wegens storingen door de eigen radiostraling van de corona, maar hun onderlinge afstand kan wel veel preciezer worden gemeten dankzij de grote basislengte van de moderne radio-interferometers (zie kader). Zeer grote basislengten worden bereikt met de 'Very Long Baseline Interferometry': bij dit soort metingen zijn lengten gebruikt tot op 4000 km (Goldstone in Californië gecombineerd met Haystack in Massachusetts, in 1970). Toch zijn dit niet de nauwkeurigste metingen, omdat er dan storingen zijn tengevolge van plaatselijk verschillende apparatuurvariaties (van de lokale oscillator), en plaatselijke verschillen in troposferische fluctuaties.

Binnen een meer-elements antenne zoals de interferometers te Westerbork en Greenbank (NRAO) vallen de apparatuurfouten weg als men snel wisselt tussen de interferometerparen die de bronnen volgen. De troposferische storingen kunnen groten-

Interferometrische meting van hoekafstanden

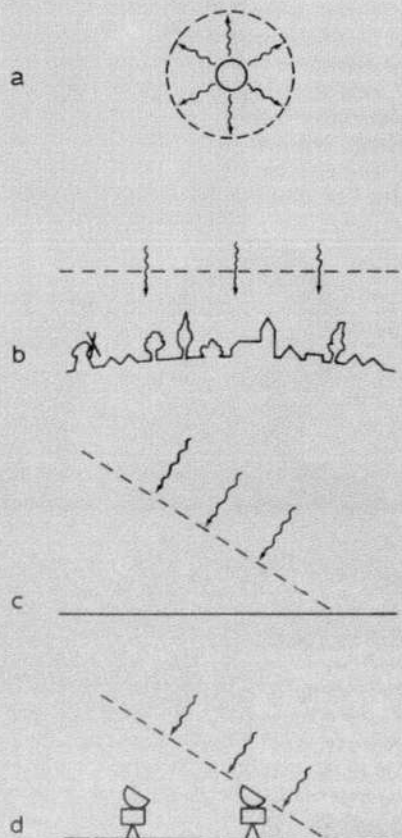
Een ster, of een quasi-stellaire radio-bron (quasar), zendt in alle richtingen straling uit welke reist met de lichtsnelheid (300 000 km/s). Loodrecht op de stralen denken we ons het *golffront* (fig. a). Dat geeft aan hoever de straling inmiddels is gekomen die op een bepaald moment van de ster vertrok. Het golffront is een *faseoppervlak*: in de interpretatie van straling als deeltjes (fotonen) betekent dit dat alle fotonen ter plaatse van het golffront gelijktijdig de ster verlieten; in de interpretatie als electromagnetische golven betekent dat dat alle golven ter plaatse van het golffront in de pas zijn. Bij een bolvormige ster is het golffront een bolschil die met de lichtsnelheid uitdijt. Bij de aarde aangekomen is het in hele goede benadering vlak, omdat de bolschil zo groot geworden is. Anders gezegd: de stralen zijn evenwijdig, ofwel: we zien de ster puntvormig (fig. b). Als de ster of quasar niet in het zenith staat is het golffront geheld (fig. c). Door de helling van het golffront te meten kunnen we de richting van de bron bepalen, dat is zijn positie aan de hemel.

Op radiogolflengten gaat het meten van de helling heel precies door middel van *interferometrie*. Dat is niets anders dan het gebruik van twee radio-antennes die een eind uit elkaar zijn geplaatst, als voelertjes om te meten wanneer het golffront voorbijkomt. Het tijdsverschil is immers een maat voor de helling (fig. d). Hoe verder de twee antennes uit elkaar staan, hoe preciezer de meting. Een probleem is nog dat de golffronten elkaar zo snel opvolgen (met de frequentie van de straling) dat de meetapparatuur het niet bij kan houden; daarom wordt het radiosignaal eerst gemengd met een kunstmatige radiobron, de 'lokale oscillator'. Met deze truc, heterodyne detectie genoemd, wordt de laag-frequente fase-informatie, in dit geval de vertraging tussen de beide aankomsttijden van de opeenvolgende golffronten, overgezet op een signaal van lagere frequentie dat wel hanteerbaar is. De lokale oscillator moet dan wel gelijkop trillen voor beide antennes. Voor kleine basislengte (dat is de afstand van de antennes) gebruikt men één lokale oscillator die met kabels verbonden is met beide antennes. In het geval van 'Very Long Baseline Interferometry' (VLBI) gebruikt men er twee, één bij iedere antenne. Die lopen dan wel niet precies in de pas, maar als ze maar dezelfde frequentie hebben kan men toch

goed het *verschil* bepalen in de helling van twee golffronten, dus de hoekafstand tussen twee radiobronnen aan de hemel.

N.B. 1. Voor uitgebreide, dat is niet puntvormige, objecten wordt het ingewikkelder en zijn meer-elements interferometers nodig, of trucs zoals apertuursynthese. Zie het artikel van W. N. Brouw en R. T. Schilizzi, *Zenit* 5, mei 1978, p. 170.

N.B. 2. Interferometrie gaat goed in het radiogebied maar niet op optische golflengten. Dat komt omdat de atmosfeer het optische golffront verpest: in bellen koudere of warmere lucht wordt de snelheid van het licht meer of minder vertraagd, en worden de stralen ook een weinig afgebogen. Dit resulteert in hobbels en bobbel van het golffront, zodat niet meer met slechts twee voelertjes de helling ervan kan worden bepaald. Radiostraling wordt daarentegen door de bellen niet verstoord.



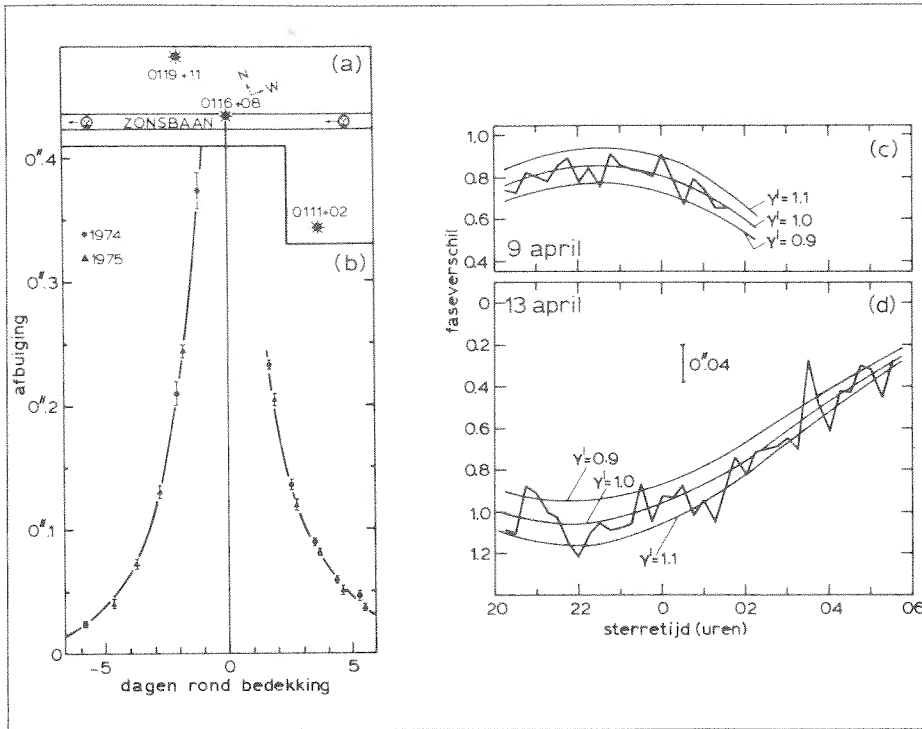


Fig. 4. Details van de metingen van Fomalont en Sraek van de afbuiging van radiostraling door de zon. Fig. 4a laat de configuratie zien: drie quasars bijeen op een rij waarvan de middelste op 11 april 1975 door de zon werd bedekt. Fig. 4b toont de gemeten afbuiging terwijl de zon voor de bron langs schoof, per dag gemiddeld over metingen elke vijf minuten, gedurende tien uren. Dichtbij de zon werd niet gemeten: daar stoort de corona teveel. Figuren 4c en 4d laten voor 9 april en 13 april 1975 de dagelijkse metingen zien: ieder punt is een meting van een kwartier. Verticaal staat het faseverschil van het gecorrigeerde interferometersignaal van de middelste bron met de twee buitenste bronnen samen. De krommes geven voorspellingen voor verschillende waarden van γ^1 .

deels gecorrigeerd worden door drie bronnen te volgen die dicht bij elkaar op een rechte lijn aan de hemel staan, waarvan dan de middelste door de zon wordt bedekt. De gemeten fluctuaties in de posities van de buitenste twee worden dan geïnterpoleerd om een correctie voor de middelste te vinden.

Het voornaamste resterende probleem is dat radiogolven in de zonnecorona zelf ook al gebroken worden. De mate van deze buiging hangt af van de hoeveelheid elektronen, en in de zeer inhomogene corona wisselt die sterk hetgeen correctie bemoeilijkt. (Voor zichtbare straling is de buiging in de zonne-atmosfeer verwaarloosbaar. Dat heeft men niet altijd geweten: in het begin van deze eeuw spendeerde Julius te Utrecht jarenlang vruchteloos onderzoek aan de mogelijke effecten ervan.) De coronale afbuiging kan echter uit de metingen verwij-

derd worden door op meerdere frequenties waar te nemen. De coronale afbuiging verandert namelijk omgekeerd evenredig met het kwadraat van de frequentie, terwijl de gravitatie-afbuiging niet verandert (want dat is een eigenschap van de ruimte zelf). Simultane metingen op twee verschillende frequenties leveren dus twee vergelijkingen met twee onbekenden die te vinden zijn.

Fig. 3 toont de geschiedenis van deze metingen. Men gebruikte eerst de twee sterke quasars 3C273 en 3C279, die 9° uit elkaar staan en waarvan de laatste telkenjare in oktober wordt bedekt door de zon. Bij de nieuwste experimenten, van Fomalont en Sraek, werden de drie bronnen 0111+02, 0119+11, 0116+08 gebruikt. Fig. 4 toont bijzonderheden van de meting in 1975. Deze gaf: $\gamma^1 = 0,999 \pm 0,009$, dus $\gamma = 0,998 \pm 0,018$. Voor de Brans-Dicke scalar-tensor theorie betekent dat: 99% zeker dat $\omega > 25$.

Echo's van de maan

Een andere nieuwe techniek werd mogelijk in 1969, toen de astronauten van Apollo 11 een retro-reflector op de maan hadden geplaatst. Die spiegelt straling terug in de richting waar deze vandaan komt, net zoals de nieuwe rode reflector achter op uw fiets, en is dus geschikt voor radar-metingen met licht ('lunar ranging'). In augustus van dat jaar werd voor het eerst de echo van een van de aarde verzonden lasersignaal opgevangen; door regelmatig van zo'n signaal de reisduur vice-versa te meten heeft men sindsdien de afstand aarde-maan nauwkeurig bijgehouden. De precisie bedraagt 1 ns, overeenkomend met 30 cm!

Ook deze meting geeft een onderscheid tussen de algemene relativiteitstheorie en de scalar-tensor theorie te zien, omdat in de laatste Galilei's valwet voor grote massa's niet strikt opgaat: zware lichamen vallen in de scalar-tensor theorie minder hard dan lichte. De zwaartekrachtsversnelling van de aarde naar de zon is derhalve anders dan die

van de maan, hetgeen een periodieke storing in de maanbaan rond de aarde moet opleveren. Die is bij de laser-afstandsmeting niet gevonden: de resultaten tot dusver impliceren met 95% zekerheid dat $\omega > 29$.

Echo's van de Vikings

Tenslotte de techniek die het beste resultaat tot dusver heeft gegeven. Dat is de *tijdsvertraging*, de eerste test die niet al door Einstein zelf werd verzonnen. Deze test werd door Shapiro in 1964 geopperd, en sindsdien steeds verder door hem verfijnd. Hij meet de heen-en-weer-reisduur van een teruggekaatst radiosignaal dat onderweg al dan niet dicht langs de zon scheert. Met de kromming van het signaalpad nemen weglengte en looptijd toe onder de invloed van de zwaartekracht van de zon. De verandering van de reisduur geeft dus een maat voor de kromming van ruimte en tijd.

De geschiedenis van deze metingen staat in fig. 5. Zulke metingen zijn eerst uitgevoerd met radar-echo's van de planeten Venus en Mercurius, terwijl ze vanaf de aarde gezien achter de zon langs bewegen. Voor Mercurius bedraagt de Einsteinse vertraging 15 microseconden bij de grootste elongatie, en 240 microseconden bij bovenconjunctie. Naderhand is hetzelfde gedaan met Mariners 6 en 7. Deze geven *aktieve* echo's: de radiozenders aan boord van deze schepjes liet men in fase met het ontvangen signaal een antwoord terugzenden.

De nauwkeurigste resultaten, zoals fig. 5 laat zien, zijn echter onlangs verkregen met de twee Viking Landers op Mars. Die bieden als radar-reflector boven Venus en Mercurius het voordeel dat ze puntvormig zijn, zonder de bergen en dalen die de echo's van hele planeten uitsmeren. Als actieve antwoorder zijn ze te verkieszen boven vrij bewegende ruimteschepen, omdat ze verankerd staan op een zwaar hemellichaam dat vast in zijn baan ligt. Ruimtevoertuigen zoals de Mariners hebben daarentegen baanvariaties tengevolge van de zonnwind, van de druk van de zonnestraling, en van het optreden van als raketjes werkende gaslekken.

Bovendien kregen de beide Viking Orbiters zenders mee die op twee frequenties tegelijkertijd kunnen werken (2,3 GHz en 8,4 GHz), in fase met het van de aarde ontvangen signaal op 2,3 GHz. De ontvangst van



Irwin I. Shapiro opperde in 1964 om de tijdsvertraging te meten van radiosignalen die door een planeet worden teruggekaatst na al dan niet dicht langs de zon te zijn gescheerd. Deze techniek heeft tot dusver het beste resultaat opgeleverd van metingen de kromming van ruimte en tijd (foto Massachusetts Institute of Technology).

De zwaartekracht en andere wisselwerkingen

Hoewel we nu met grotere precisie dan ooit tevoren weten dat Einstein's algemene relativiteitstheorie een korrekte beschrijving van de zwaartekracht geeft, is het niet zo dat er op dit terrein geen problemen meer zijn op te lossen. Integendeel: er is nu hernieuwde aandacht voor de verdere ontwikkeling van de gravitatie-theorie.

Het grote probleem is de inpassing van de zwaartekracht in één geheel met de andere *wisselwerkingen*: met de elektrische en magnetische krachten (samen ondergebracht door Maxwell in de theorie van het electromagnetische veld), en met de sterke en zwakke wisselwerkingen die slechts op de schaal van atoomkernen merkbaar zijn. Kunnen deze vier fundamentele krachten gecombineerd worden in één beschrijving? Het geloof dat dit mogelijk is bracht Einstein ertoe zijn latere leven te wijden aan de vraag hoe dit te doen; maar zijn pogingen om zwaartekracht en electromagnetisme in één veldtheorie onder te brengen zijn op niets uitgelopen. Wellicht is de oorzaak van deze mislukking dat de algemene relativiteits-

theorie een *klassieke* beschrijving van het zwaartekrachtsveld geeft in de zin van 'niet-gequantiseerd'. Tussen de beide wereldoorlogen vond de grote uitbouw van de quantumtheorie plaats. Eerder had Einstein in belangrijke mate bijgedragen tot de fundering ervan, maar de uiteindelijke resultaten heeft hij nooit geaccepteerd. In de quantumtheorie is de deterministische beschrijving van deeltjes als massapunten vervangen door pakketjes van samengestelde golven, die een *waarschijnlijkheidsverdeling* beschrijven: Einstein's bekende dobbelstenen. In zo'n quantumveld-beschrijving werd eerst het electromagnetisme ondergebracht, naderhand ook de sterke en de zwakke wisselwerkingen. Een belangrijke doorbraak kwam toen het electromagnetisme en de zwakke wisselwerking in een gezamenlijke beschrijving werden ondergebracht. Onlangs is daar ook de sterke wisselwerking in opgenomen, met als voorspelling dat een proton in ongeveer 10^{31} jaar uiteen moet vallen; men probeert dit nu te meten. Nu rest nog de zwaartekracht. Een quantumtheorie voor deze kracht zal

de formules van de algemene relativiteitstheorie grotendeels dupliceren, behalve in de extreme omstandigheden waar de laatste per definitie tekortschiet: in de singulariteiten. Een voorbeeld is de op quantumeffecten gebaseerde vondst van Hawking dat zwarte gaten toch kunnen stralen (en wel des te sterker naarmate het zwarte gat minder massa bevat) (Ref. 4). Maar in dit werk is de zwaartekracht (als 'meetkunde') nog niet gequantiseerd, en de vraag is nog open hoe dit gedaan moet worden. Er wordt sinds het succes met de zwakke wisselwerking hard aan gewerkt. Of dit zal leiden tot één theorie voor alle wisselwerkingen (en deeltjes) tezamen valt nog niet te zeggen – wel is er nieuw leven geblazen in Einstein's hoop (zij het dan per dobbelsteen).

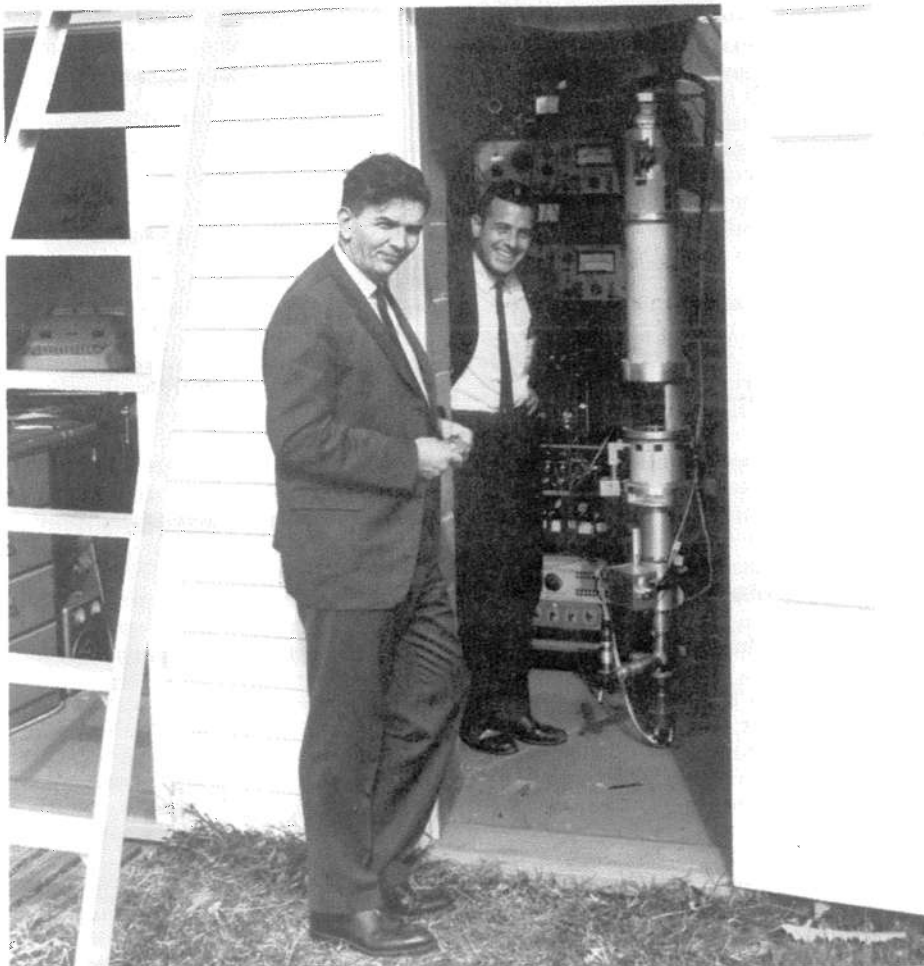
Leesstof:

D. Z. Friedman en Peter van Nieuwenhuizen, *Scientific American*, Vol. 238, febr. 1978.

beide signalen geeft de mogelijkheid om, net als bij de radio-afbuigingsmetingen, de vertraging in het coronale plasma te bepalen uit de frequentie-afhankelijkheid ervan. Zo konden de metingen met de Viking Landers (alleen 2,3 GHz) gecorrigeerd worden met de echo's van de Orbiters.

In december van het vorig jaar werd het resultaat gepubliceerd van de eerste 12 maanden volgen van de Vikingen. Daarin viel de bovenconjunctie van Mars van 25 november 1976. Het resultaat is $\gamma = 1,000 \pm 0,002$. Voor de afbuiging bij de zonsrand betekent dat: $\varphi = 1'',749 \pm 0'',002$. Dat is met een waarschijnlijke fout van slechts $0'',002$ veruit de nauwkeurigste meting tot dusver! Aangezien de Vikingen vooralsnog zullen blijven werken zal de meting mettertijd nog preciezer worden. Nog beter zou het kunnen wanneer er op een planeet een lander komt te staan die op meerdere frequenties tegelijk zowel kan seinen als ontvangen: dan moet een precisie van 0,1 promille haalbaar zijn.

Dicke (links) met zijn (inmiddels overleden) medewerker Goldenberg bij de telescoop waarmee in 1966 de afplatting van de zon zou zijn aangetoond. Het van buiten komende zonlicht werd d.m.v. een hulpspiegel in het vertikaal staande instrument geworpen (foto Princeton University).



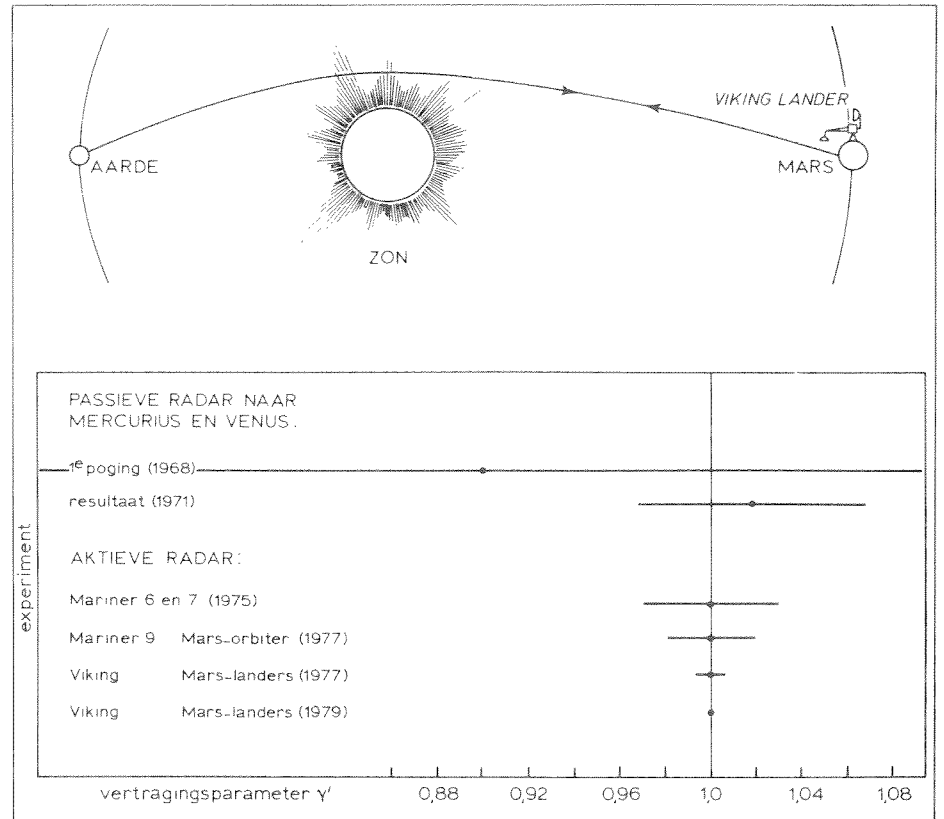
Stand van zaken

De Vikingwaarde $\gamma = 1,000 \pm 0,002$ impliceert met 95% zekerheid dat $\omega > 500$. Daarmee heeft de scalar-tensor theorie afgedaan! Er is natuurlijk toch wel weer een mouw aan te passen: diverse onderzoekers hebben voorgesteld dat de parameter ω , die ruwweg de verhouding tensor/scalar meet, niet constant is maar varieert, bijvoorbeeld met de ouderdom van het heelal. Dan kan ω nu erg groot zijn, waardoor er nu geen verschil meetbaar is met de algemene relativiteitstheorie, terwijl ω vroeger klein was zodat kosmologische modellen van het vroege heelal er wel door beïnvloed worden. Maar dat klinkt nogal gekunsteld; het is duidelijk dat Einstein's theorie nu, na een halve eeuw, ook de meest precieze metingen glansrijk heeft doorstaan. De voornaamste tegenkandidaat is afgefallen: het tijdperk van 'experimenteel Einstein al-dan-niet bevestigen' lijkt nu toch wel definitief te zijn afgesloten. Overigens zijn er velen die de algemene relativiteitstheorie sowieso onaantastbaar vinden, als een hoogtepunt in het menselijk denken. Dat de theorie haar waarde in de eerste plaats ontleent aan haar theoretische basis en haar elegantie, en niet aan een meer of minder geslaagde proef, lijkt me juist – en dat vond Einstein zelf trouwens ook al! Maar dat neemt niet weg dat experimentele toetsing er ook bij hoort, en die is er nu nauwkeuriger dan ooit tevoren. Het is nu niet zo dat we klaar zijn met zwaartekrachtstheorie, of met dit soort metingen. Zoals gezegd schiet de algemene relativiteitstheorie tekort juist waar hij de interessantste omstandigheden voorspelt: voor de singulariteiten. Verdere theoretische ontwikkelingen zijn nu volop in gang (zie kader), en ook het experimentele zwaartekrachtsonderzoek is derhalve nog niet klaar. Maar dan gaat het niet meer om de vraag of de algemene relativiteitstheorie de juiste beschrijving geeft in 'klassieke' omstandigheden, zoals nú in ons zonnestelsel.

Buiten het zonnestelsel

Tot slot bekijken we de toekomstverwachtingen voor experimenteel zwaartekrachtsonderzoek. Daarbij verlaten we het zonnestelsel waarin alle hierboven beschreven metingen zich afspeelden, maar waarin de verschillen met Newton's formule miniem zijn. Wat we eigenlijk wensen zijn metingen voor plaatsen met sterkere zwaartekrachtskromming: bovenal uit de omgeving van de zwarte gaten die ontstaan bij zwaartekrachts-ineenstorting. Zulke gravitationele diagnostiek is in principe beschikbaar in de *gravitatiegolven*. Gravitatiegolven komen ook uit Einstein's koker, op grond van zijn konklusie dat het zwaartekrachts-'signaal' niet sneller kan gaan dan het licht. Hij liet in 1916 zien dat zijn vergelijkingen golven toestaan, en ook hoe ze opgewekt kunnen worden (1918).

Het bestaan van gravitatiegolven is lang omstrede geweest: Eddington geloofde er niet in, en Weber's aankondiging dat hij ze had gedetekteerd bleek onjuist. De eerste experimentele aanwijzing voor hun bestaan.



zij het indirect, levert nu de beroemde dubbel pulsar PSR 1913+16. De relativistische effecten in dit systeem van twee neutronensterren, die in acht uur om elkaar draaien, zijn enorm: de periastronbeweging is 4,2 graden per jaar, dat is 30 000 maal zo groot als de periheliumbeweging van Mercurius! Daarom zijn ook hier tests van de algemene relativiteitstheorie mogelijk: totaal onverwacht, maar heel precies. Niet alleen de meting van Δ (periastronbeweging), maar ook van 2^e-orde parameters zoals de hoeveelheid gravitatiestraling zijn mogelijk. De laatste meet men in de afname van de baanperiode.

Een complicatie is dat de massa's van de twee neutronensterren niet a priori bekend zijn. De metingen verschaffen echter zoveel informatie (een supernauwkeurige klok in een excentrische baan in een sterk zwaartekrachtsveld – wat wil men nog meer?) dat *gelijktijdige* bepaling van de massa's en de zwaartekrachtsparameters goed mogelijk is, met snel toenemende nauwkeurigheid. In feite wordt de algemene relativiteitstheorie hier niet alleen getoetst, maar ook voor het eerst in een massabepaling *gebruikt*. Resultaat: de afname van de baanperiode klopt goed met het energieverlies berekend volgens Einstein uit de uitgezonden hoeveelheid gravitatiestraling. Gravitatiegolven zijn nu algemeen als realiteit aanvaard. Detectie ervan zou ons een directe blik verschaffen in de exotische plaatsen van opwekking: in tot zwarte gaten ineenslopende sterren, en in kernen van melkwegstelsels. Men is heel optimistisch over de mogelijkheden van zulke 'gravitatie-astronomie'. Er wordt hard gewerkt aan de detector-technologie, en de experts verwachten resultaten binnen zo'n twintig jaar. Nog voor het eeuwfeest van de algemene

Fig. 5. De gravitationele tijdsvertraging van signalen door de zon, gemeten uit de heen- en weer reisduur van echosignalen van planeten, ruimteschepen en Marslanders. De uitgezette vertragingparameter is het zo gedefinieerd als de afbuigingsparameter: $\gamma' = \frac{1}{2}(1 + \gamma)$. De behaalde precisie van 1 promille in γ' betekent dat de kromming van de ruimte en de tijd door de zon binnen 2 promille correspondeert met de waarde volgens de algemene relativiteitstheorie.

relativiteitstheorie kan derhalve uit Einstein's schepping een prozaïsche astronomische meettechniek gevolgd zijn.

Ik dank J. Odiik en E. Landré voor type- en tekenwerk, en P. Hut voor commentaar.

Literatuur:

Referenties naar eerdere artikelen in Zenit:

- over zwarte gaten:
- 1. Tj. de Vries en E. P. J. van den Heuvel, Zenit 1, febr. 1974, p. 17.
- 2. Piet Hut en Jos Stollman, serie van 10 artikelen, Zenit 1, apr. 1974, p. 21 tot en met Zenit 2, juni 1975, p. 213.
- 3. F. Verbunt, serie van 3 artikelen, Zenit 5, sept. 1978, p. 316; nov. 1978, p. 420; dec. 1978, p. 458.
- 4. Piet Hut, Zenit 6, feb. 1979, p. 58.
- 5. F. Verbunt, Zenit 6, juni 1979, p. 233.
- over de afplating van de zon:
- 6. R. J. Rutten, Zenit 1, nov. 1974, p. 7 – Vikingmetingen: R. D. Reasenberg et al., Astrophysical Journal, Vol. 234, L 219, 1979.
- Een vakboek met uitstekende overzichtsartikelen over algemene relativiteitstheorie: S. W. Hawking en W. Israel, General Relativity, Cambridge University Press, 1979.