

Afplatting van de zon: toets voor theorieën over de zwaartekracht

R. J. Rutten

Inleiding

EINSTEINS speciale relativiteitstheorie dateert van 1905, zijn algemene relativiteitstheorie is van 1916. Hoewel deze beide theorieën vaak in één adem worden genoemd is het onderscheid tussen beide fundamenteel. De speciale theorie handelt over het ervaren van ruimte en tijd en is op velelei wijze getoetst en juist bevonden. De algemene theorie beschrijft de wisselwerking tussen materie en ruimte en tijd, dat is de zwaartekracht, en deze theorie is nog altijd niet aan voldoende nauwkeurige experimenten getoetst. Er zijn bovendien enigszins ervan afwijkende theorieën die eveneens de zwaartekracht beschrijven. De bekendste hiervan is de „skalar-tensor” theorie van Brans en Dicke.

Dit artikel gaat over een waarneming die tot doel had de beste uit deze alternatieve zwaartekrachtstheorieën te kunnen kiezen. Dit was de controversiële meting van de grootte van de afplatting van de zon door Dicke en Goldenberg. Daarnaast wordt ook een overzicht gegeven van geheel andere experimenten die hetzelfde doel hadden.

Want hoewel de verschillen tussen de voorspellingen die uit de verschillende theorieën voor diverse verschijnselen volgen maar heel klein zijn onder gewone omstandigheden zoals die in het zonnestelsel heersen, wordt nu toch op tamelijk korte termijn uitsluitel verwacht dankzij zeer nauwkeurige nieuwe metingen van verschillende aard: het „experimentele algemene relativiteitsonderzoek” is in een stroomversnelling gekomen.

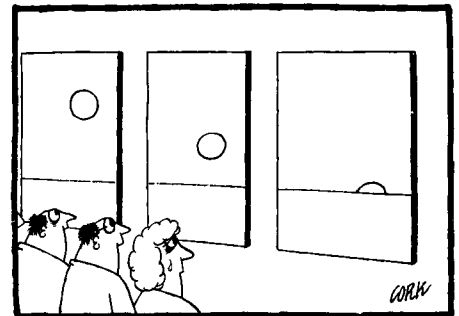
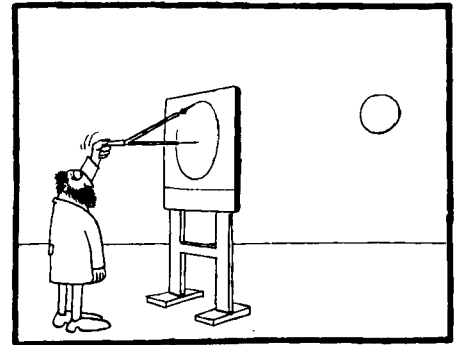
In ons zonnestelsel geeft de eenvoudige gravitatiewet van Newton al een zeer goede benadering van de verschijnselen. De

juiste beschrijving van de zwaartekracht is hier dus meer van theoretisch dan van praktisch belang. De laatste jaren geldt dat echter niet meer voor het gehele sterrekundige werkterrein: bij de beschrijving van de structuur van neutronensterren en zwarte gaten dient de astrofysicus terdege te weten welke gravitatie-theorie gebruikt moet worden. In deze stervende sterren wier bestaan reeds decennia geleden voorspeld was en die nu zoals bekend waarschijnlijk in de vorm van pulsars en röntgendubbelsterren waargenomen worden, is de materie-concentratie zo enorm (een miljard ton per kubieke centimeter), dat de „relativistische effecten” geen kleine correcties meer zijn maar een doorslaggevende invloed hebben. Zo is de voortdurende inéénstorting van een zwart gat een direct gevolg van de relativistische equivalentie van materie en energie.

Klassieke tests.

VANOUDS kent men de drie „klassieke” tests van de algemene relativiteitstheorie waarmee men vanaf 1916 gepoogd heeft de juistheid van Einsteins theorie te toetsen.

Vooreerst is er de rozetbeweging van de baan van Mercurius. Relativistische berekening voorspelt dat het perihelium ervan (punt dichtst bij de zon) zou moeten verschuiven met 43 boogseconden per eeuw. In werkelijkheid verschuift het perihelium vanaf de aarde gezien met 5600"/eeuw! Het grootste deel hiervan wordt veroorzaakt door de precessie van de aardas (5026"/eeuw) en door storingen door de andere planeten (531"/eeuw). Trekt men deze nauwkeurig bekende bijdragen af dan blijft juist het voorspelde bedrag als onverklaard over!

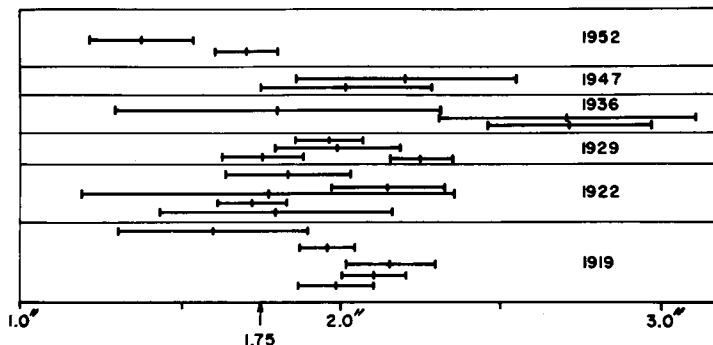


In feite brak men zich al in de vorige eeuw het hoofd over dit restant: hypothesen dat het veroorzaakt werd door een grote afplatting van de zon, een onbekende planeet („Vulcanus”) tussen Mercurius en de zon in, of remming van Mercurius door een zeer dicht interplanetair medium waren al bewezen onjuist te zijn. De prachtige overeenkomst tussen dit overschot en Einstein's uitkomst is verder de voornaamste experimentele bevestiging van de theorie blijven vormen. (Waarbij valt op te merken, dat Einstein zelf vond, dat de filosofie en de elegantie van de theorie zelf overtuigend zouden moeten zijn, en niet het al-dan-niet kloppen van een of ander klein er uit volgend effectje!)

De beide andere klassieke tests zijn namelijk niet doorslaggevend. De meting van de afbuiging van het licht van sterren, nabij de zonsrand waargenomen tijdens totale zonsverduisteringen is op zichzelf een goede test van de algemene theorie. Hoewel de speciale theorie óók al een afbuiging voorspelt - omdat de fotonen wegens hun energie ook massa toegekend dient te worden en ze dus door de zon uit hun baan worden getrokken - is het effect van de algemene theorie twee maal zo groot. Maar de voorspelde afbuiging is maar gering (1.75" nabij de rand) en erg moeilijk te meten: de vele metingen, de eerste door Eddington tijdens de eclips van 1919, wazen kwalitatief wel op een dergelijke afbuiging, maar gaven geen betrouwbaar kwantitatief resultaat.

De derde test is de roodverschuiving van spektraallijnen in een gravitatieveld.

Metingen van de gravitationele afbuiging van sterlicht



In deze figuur staan de verschillende resultaten uitgezet die in de loop der jaren bereikt zijn door de eclips-expedities die de afbuiging van sterlicht nabij de zonsrand maten.

Horizontaal staat de afbuiging in boogseconden; de waarde die uit Einsteins algemene relativiteitstheorie volgt is 1".75. De horizontale strepen geven per eclips-expeditie de resultaten (lengte: twee standaardafwijkingen). Men ziet dat de opgegeven

precisie veelal beter is dan de werkelijke strooiing: kennelijk zijn er voortdurend onbekende systematische fouten in het spel. De afbuiging die de skalar-tensor theorie voorspelt ligt - afhankelijk van de grootte van de skalar - rond de 1".65.

Al deze waarnemingen samen tonen dus wél aan dat er een afbuiging is, maar geven geen voldoende precies kwantitatief resultaat.

Speciale en algemene relativiteitstheorie

IN het bestek van dit artikel kan geen gedetailleerde uitleg van Einsteins theorie gegeven worden, maar dat is voor de behandeling van de afplatting van de zon ook niet nodig. Met nadruk dient echter te worden gesteld, dat het jammer is dat de ten onrechte verbrede faam van ontoegankelijkheid velen van kennisneming van het Einsteiniaanse wereldbeeld weerhoudt: het 'moeilijke' zit niet zozeer in de formules als wel in de conceptuele inhoud. Hier volgt een summier overzicht, met vermelding van verdere literatuur.

De relativiteitstheorie berust op het 'equivalentie-principe': de natuurkunde is niet verschillend in laboratoria die ten opzichte van elkaar bewegen - geen plaats in het heelal is bevoorreed boven andere. Deze stellingname zegt dus dat elders, en ook op andere tijdstippen, dezelfde natuurwetten gelden als hier en nu: een fysicus in de Andromeda-nevel ervaart de structuur van het heelal net als wij.

In de speciale theorie wordt dit principe beperkt tot laboratoria die ten opzichte van elkaar met konstante snelheid bewegen ('inertiaalstelsels'); in de algemene theorie heeft Einstein het uitgebreid tot waarnemers die ook versneld of vertraagd ten opzichte van elkaar bewegen. De speciale theorie is een statische theorie: hoe ondervinden verschillend geplaatste waarnemers het heelal? Uit het equivalentieprincipe volgt dat de lichtsnelheid konstant moet zijn, onafhankelijk van de snelheid van de waarnemer (want de lichtsnelheid is een konstante in de wetten van Maxwell voor de elektrische en magnetische verschijnselen, en die blijven volgens het principe gelijk).

Daarmee vervallen de begrippen 'absolute tijd' (want klokken gebruikt de lichtsnelheid) en 'absolute lengte' (want begin- en eindpunten van meetlatten kunnen niet 'tegelijk' vergeleken worden): met de beweging van de waarnemer wijzen klokken en meetlatten anders aan. Maar ook variëren dan weegschalen en energiematen, waaruit de bekende gelijkheid volgt van materie en energie: $E = mc^2$ - de beroemde relatie waaraan zon en H-bom door middel van kernfusie, en atoombom en kernreaktor door middel van kernsplitting hun energieopbrengst ontleen.

Met tal van metingen zijn deze implicaties gevonden en exact juist bevonden. De speciale theorie is eigenlijk erg algemeen, want ze is gemeengoed en volop in gebruik in vele uiteenlopende terreinen van onderzoek. De 'algemene' theorie daarentegen is nog onbewezen en feitelijk beperkter: het is een theorie die laboratoria behandelt welke onder invloed van de zwaartekracht versneld bewegen en geeft daarmee een beschrijving van de gravitationele wisselwerking tussen ma-

terie en de plaatselijke structuur van ruimte en tijd.

Het verschil met de Newtoniaanse beschrijving is enorm, al zijn de waarneembare verschillen maar klein.

Bij Newton is de ruimte in vorm absoluut: meetlatten en klokken blijven onbeïnvloed door de aanwezigheid van materie; de zwaartekracht is een mysterieuze, op afstand werkende kracht. Volgens Einstein vervormt de ruimte zelf onder invloed van materie: de maan wordt niet door de aarde 'aangetrokken' maar beweegt rechtuit in een ruimte die door de aarde zo gekromd is, dat 'rechtuit' betekent: om de aarde draaien. De beweging van de planeten wordt ter plaatse geregeld door de ruimte zelf, die zelf weer door de hemellichamen vervormd wordt.

De voornaamste concurrent van de algemene theorie is de al genoemde skalar-tensor theorie, die slechts door een wijziging in het wiskundig formalisme ervan verschilt. Bij Einstein wordt de gravitatie door een z.g. tensor beschreven; bij deze grootte kan men een skalar optellen (maar ook een vektor: er bestaat dan ook een 'vektor-tensor' theorie). De mate waarin deze theorie van de Einsteiniaanse verschilt hangt af van de grootte van deze extra term. Een belangrijk gevolg van de skalar is dat de gravitatieconstante geen konstante is maar langzaam met het verouderen van het heelal afneemt, wat al lang geleden door Dirac op andere gronden is geopperd.

Met de keuze van de juiste theorie zijn we overigens niet 'klaar': een werkelijk algemene theorie zou naast de gravitationele wisselwerking ook de werking van de andere krachten die men kent (elektromagnetische en de sterke en zwakke kernkrachten) moeten geven. Einstein heeft lang naar zo'n 'unified field theory' gezocht; recentere pogingen om de elementaire deeltjes die de dragers van deze vier wisselwerkingen zijn (vooral protonen, neutronen, elektronen, fotonen, neutrino's en - wellicht - gravitonen) te begrijpen als samenstellingen van nog elementairder deeltjes ('quarks') zijn vooralsnog mislukt. Wel zijn er vooruitgang in de theoretische beschrijving van deze krachten als velden: onder meer heeft de Utrechtse fysicus 't Hooft in zijn dissertatie aangetoond dat de elektromagnetische en zwakke wisselwerkingen misschien onder één hoedje te vangen zijn. Recente proeven met grote deeltjesversnellers zoals bij de CERN te Genève lijken deze vermoedens te bevestigen.

Literatuur:

- Speciale relativiteitstheorie: Serie van J. Heise en W. de Graaff, 1973, Natuur en Techniek nrs. 3, 4, 5 en 7.
- boek: E.F. Taylor en J.A. Wheeler: 'Space-time Physics', 1966, Freeman & Co., San Francisco. Niveau: Atheneum, HBS-B.
- boek: Ch.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler: 'Gravitation', 1973, Freeman & Co., San Francisco. Niveau: vakman.

Deze is op de zon door de aanwezigheid van stromingen en drukeffekten moeilijk te meten, bij de zoveel kompaktere witte dwergen wel. De beste bepalingen zijn op aarde gedaan met behulp van het Mössbauer-effect. Het is echter geen goede test van de algemene theorie omdat de speciale theorie dezelfde roodverschuiving al kan voorspellen.

Zo blijft alleen de waargenomen periheliumverschuiving van Mercurius als 'klassiek' bewijs van de algemene relativiteitstheorie over. (De voorspelde extra periheliumverschuivingen van de andere planeten zijn veel kleiner omdat ze verder van de zon staan.)

De afplatting van de zon.

EEN van de opstellers van de alternatieve hierboven reeds genoemde skalar-tensor theorie is de Amerikaanse fysicus Robert H. Dicke. Omdat zijn theorie een kleinere waarde voor de periheliumbeweging van Mercurius voorspelt (het verschil met de voorspelling volgens de algemene relativiteitstheorie is ongeveer 5") en dus in strijd is met de waargenomen waarde van 43"/eeuw, heeft hij voorspeld dat de zon niet volkomen rond is, maar enigszins is afgeplat aan de polen. De oorzaak van de afplatting zou moeten worden gezocht in een snelle rotatie van de binnenste delen van de zon: ongeveer één omwenteling per twee dagen in plaats van de zeventwintig dagen die de zichtbare buitenkant er over doet. Een dergelijke rotatieversnelling naar binnen toe zou juist die extra bijdrage op de baan van Mercurius geven die nodig is om de skalar-tensor theorie te laten kloppen met de waargenomen periheliumverschuiving.

Om deze hypothese te toetsen heeft hij met Goldenberg en Hill te Princeton een speciale telescoop gebouwd om eventuele afwijkingen van de cirkelvorm van de zonneschijf te meten. En inderdaad hebben zij met deze telescoop gevonden dat de zon juist de door Dicke voorspelde afplatting vertoont! Zoals te begrijpen is heeft dit resultaat een heftige discussie teweeggebracht die nog steeds niet is verstomd. Maar alvorens daarop in te gaan eerst meer over de gebruikte meetmethode.

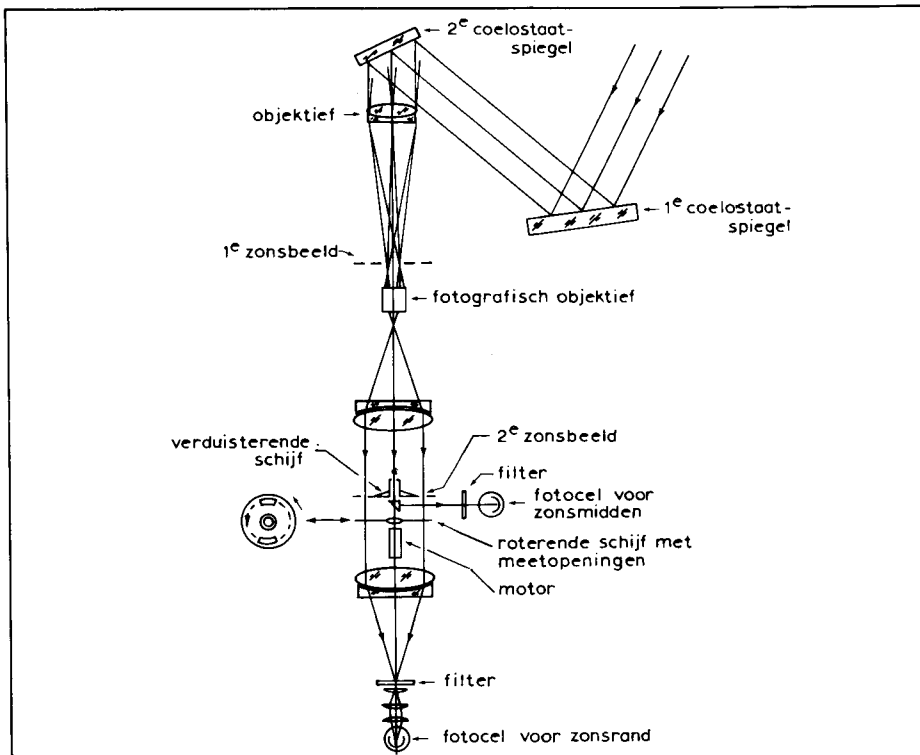
Dicke is een bekend theoretisch fysicus (die ondermeer de later ontdekte 3° K kosmische achtergrondstraling voorspelde a's huidig overblijfsel van de „big bang"), maar daarnaast ook een befaamd experimentator: hij is bijvoorbeeld de vader van de zogenoemde „lock-in" versterker, heeft het eerste patent over lasers op zijn naam en bereikte bij metingen of de zwaartekracht wel gelijk werkt op aluminium en op goud de toen ongehoorde nauwkeurigheid van 1 : 10¹¹: een wat verfijndere proef dan Galilei's soortgelijke proef vanaf de toren van Pisa! Ook de afplattingskijker was erg geraffineerd van opzet. Dat moest ook wel want het verschijnsel is erg klein: de gemeten afplatting bedraagt slechts zo'n 35 km, terwijl de zon een middellijn heeft van anderhalf miljoen kilometer. In boogmaat meet de afplatting slechts 0.05"; de onrust van de atmosfeer laat overdag nooit een gemiddelde beeldkwaliteit van

beter dan 1" toe. Afwijking van de cirkelvorm kan dus niet eenvoudig met een passer op een foto van de zon bepaald worden!

Dicke deed het door een zonsbeeld van hoge kwaliteit bijna geheel af te dekken met een donkere schijf, zodat slechts de uiterste rand van de zon als een smalle ring met enkele boogseconden dikte overbleef. Daaronder draaiden dan snel twee spleetvormige openingen rond die voortdurend de lichtintensiteit van de ring rondom aftastten. De door de openingen doorgelaten intensiteit werd fotoelektrisch geregistreerd en op magnetische band vastgelegd. De gemeten stroomsterkte bevat zo een deel van konstante grootte: het deel van de ring dat rondom even breed en helder is, en een deel met periodiek wisselende sterkte. In één rondgang van de meetopening zal de intensiteit namelijk één maximum en één minimum tonen als de ring niet overal even breed is doordat de verduisterende schijf niet goed op het zonsbeeld is gecentreerd: de wisselstroomkomponent in het signaal met juist de periode van ronddraaien werd dan ook gebruikt om met een servosysteem voortdurend automatisch de centrering van de schijf bij te regelen. Als de zon aan beide polen is afgeplat, dan is de ring echter in twee sectoren smaller en in twee sectoren breder: de intensiteitswisselingen die daaruit voortvloeien hebben dus twee maxima en minima per omloop van de aftastpleet. De grootte van de wisselstroomkomponent in het signaal met de halve periode van ronddraaien geeft dus een directe maat voor de afplatting van de zon en door meting van de fase van deze component weet men waar de zonneschijf afwijkt van de cirkelvorm.

Op deze wijze hebben Dicke en Goldenberg gedurende de zomer van 1966 en 1967 dag-in-dag-uit metingen verricht; omdat het effect zo klein is moest er over veel metingen gemiddeld worden en met allerlei kleine foutenbronnen, zoals de refractie in de aardatmosfeer, rekening worden gehouden.

De definitieve bewerking van al deze meetgegevens is pas deze zomer gereedgekomen: in een uitvoerige studie heeft Dicke alle metingen vergeleken en gekorreleerd met alles wat men zich maar denken kan: de aantallen zonnevlekken, zonnevlammen etc. op de zon; de doorzichtigheid, de vochtigheid en de onrust van de lucht boven Princeton, tot zelfs de wisselingen van de bemanning van het instrument toe. Maar al in 1967 publiceerde hij als voorlopig resultaat, dat de afplatting van de zon 5×10^{-5} van de straal bedraagt, waarvan slechts 1×10^{-5} volgt uit de waargenomen rotatiesnelheid van de buitenkant van de zon en de rest dus moet komen van de veronderstelde sneller draaiende kern binnen in de zon. Nog afgezien van de implicaties voor de relativiteitstheorie zou zo'n sneldraaiende kern op zichzelf al van belang zijn voor het begrip van de bouw en evolutie van sterren. Er zijn ook andere argumenten voor te vinden (jonge sterren draaien in het algemeen

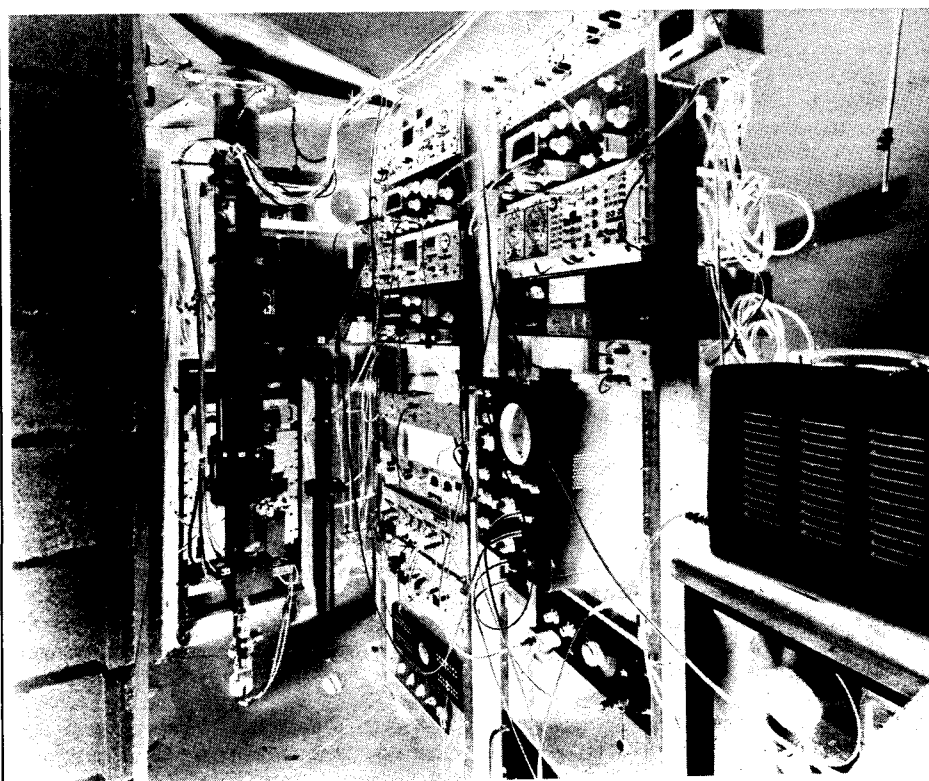


Figuur 2 en 3:

De afplattingskijker van Dicke en Goldenberg. Deze kijker bewoog niet zoals een gewone kijker méé met de dagelijkse beweging van de zon langs de hemel; de rotatie van de aarde werd daarentegen opgeheven met de beide scheef geplaatste vlakke spiegels bovenaan: de 'coelostaat'. Zo kon de telescoop altijd vertikaal blijven staan en werden ongewenste doorbuigingen voorkomen. De eerste spiegel draaide daartoe om een as evenwijdig aan de rotatieas van de aarde tegen de aardrotatie in (en twee maal zo langzaam omdat het effect bij een spiegel verdubbeld wordt). Het eerste objectief (met een doorsnede van slechts 10 cm) vormde een zonsbeeld dat werd naver groot door het fotografisch objectief; in het zo verkregen grotere zonsbeeld waren de verduisterende schijf en de roterende schijf met de twee

tegenover elkaar geplaatste meetopeningen geplaatst. Via een gaatje in het centrum van de verduisterende schijf werd de intensiteit van het zonsmidden geregistreerd. De schijf met de meetopeningen draaide honderd keer per seconde rond; de hele telescoop werd om fouten te voorkomen iedere minuut een kwartslag verdraaid. Door de dagelijkse beweging van de zon roteerde het zonsbeeld zelf ook in de loop van de dag; daarnaast werden de beide coelostaatspiegels ook voortdurend in hun vattingen verdraaid om astigmatisme te elimineren.

Zoals uit de foto blijkt was het instrument niet bijzonder groot maar wel erg ingewikkeld. Volgens Dicke had het dan ook van alle bestaande kijkers de grootste verhouding kilo's electronica/kilo's telescoop!



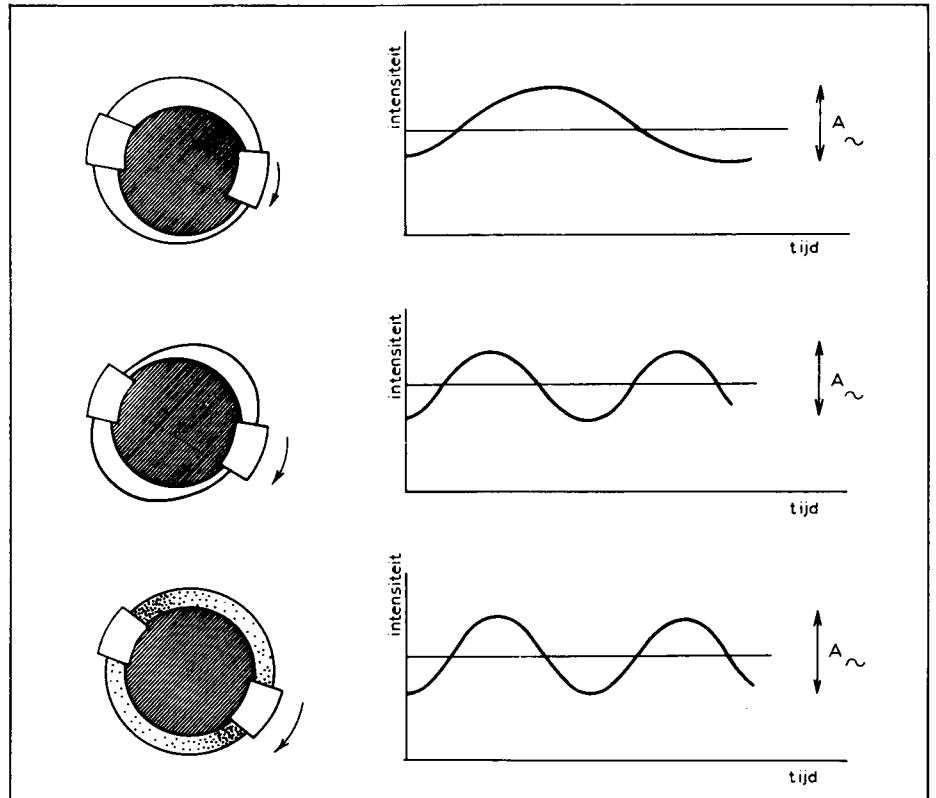
sneller dan oudere; de zon wordt inderdaad aan de buitenkant enigszins afgeemd door het uitzenden van de „zonne-wind” van deeltjes; wellicht heeft het verrassende en onbegrepen ontbreken van de voorspelde neutrino's uit het zonninwendige er ook mee te maken), maar er zijn ook argumenten tegen, die vooral berusten op stabiliteitsoverwegingen. De astrofysische literatuur loopt al jaren over van de artikelen pro en contra, waaruit voornamelijk blijkt dat deze controverse door theoretische beschouwingen alléén niet valt op te lossen.

Natuurlijk werd ook over de juistheid van Dicke's meetresultaat heftig gediscussieerd; een belangrijk argument in het voordeel ervan is echter dat de gemeten afplatting in richting goed het kantelen van de zonneas volgde. Dit kantelen ontstaat doordat de aarde in de loop van het jaar rond de zon beweegt, zodat we steeds anders tegen de enigszins hellende zonneas aankijken. De meetresultaten moeten dus echt iets met de zon te maken hebben en niet aan de kijker of de atmosfeer liggen: daarmee werden een snel ronddraaiend zonne-inwendige en de skalar-tensortheorie tot serieus te beschouwen mogelijkheden.

Temperatuurverschillen in de chromosfeer

EEN steekhoudende kritiek op de waarnemingen werd echter in 1970 gelanceerd door Ingersoll en Spiegel. Zij wezen er op dat de gemeten afplatting ook geïnterpreteerd kan worden als een gering temperatuurverschil tussen de polen en de equator van de zon in de laag buiten de zichtbare zonnepool: in de chromosfeer. Natuurlijk was het ook aan Dicke duidelijk dat een wisselstroomsignaal met de juiste periode (twee maxima en twee minima per omloop van de aftastspleet langs de vrijgelaten ring) niet alleen door dikteverschillen, maar ook door helderheidsverschillen in de ring geleverd kan worden: zouden de equatoriale delen van de ring heter en dus helderder zijn dan de polaire, dan zou een soortgelijke wisselstroomcomponent verkregen zijn. Om deze reden gebruikte Dicke drie verduisterende schijven van verschillende diameters die dikwijls werden verwisseld. In het geval van afplatting is de extra dikte van de ring bij een kleinere schijf rondom konstant: de grootte van de wisselstroomcomponent verandert dan niet met de ringdikte, alleen de gelijkstroomcomponent is anders. Maar in het geval van temperatuurverschillen komt er bij een bredere ring aan de polen koeler gas en aan de equator heter gas bij, zodat de wisselstroomcomponent wél verandert, evenredig met de dikte van de ring. Door met drie ringdiktes te werken kon Dicke de beide effecten scheiden: hij vond dat het systematische temperatuurverschil tussen polaire en equatoriale gebieden in de zichtbare lagen van de zon hooguit enkele graden Celsius kan bedragen en dat zijn signaal volledig als afplatting moest worden geïnterpreteerd.

Ingersoll en Spiegel wezen er nu op dat deze scheiding niet opgaat voor de meer naar buiten gelegen ijelere lagen van de



Figuur 4. Het 'afplattingssignaal' schematisch weergegeven voor drie verschillende gevallen: boven - de verduisterende schijf is niet goed gecentreerd, midden - de zon is afgeplat,

onder - de zonsrand is heter aan de equator dan aan de polen. Het signaal geeft de som van het door de beide spleten doorgelaten zonlicht; in het bovenste geval bevat het signaal omdat de beide spleten niet even lang zijn toch een wisselstroomcomponent.

zon waar we doorheen kijken. Hoewel deze lagen slechts een kleine bijdrage leveren tot de door de zon uitgestraalde lichtsterkte, veroorzaakt een temperatuurverschil in deze lagen toch een afplattingachtige wisselstroomcomponent. Omdat zo'n helderheidsverschil sterk aan de uiterste rand van de zon geconcentreerd is, is deze wisselstroomcomponent echter veel minder sterk afhankelijk van de ringdikte dan in het geval van 'n helderheidsverschil in de zichtbare lagen.

Volgens hen konden nu de waarnemingen van Dicke heel goed worden verklaard met een pool-equator temperatuurverschil in de chromosfeer van zo'n 40°C. Zij namen aan dat het veroorzaakt zou worden door fakkels: kleine structuren in de zonnatmosfeer die inderdaad tot in de chromosfeer uitsteken, daar waarschijnlijk heter zijn dan het omringende gas en waarvan er meer zijn in de actieve zônes bij de equator dan bij de polen van de zon! Op grond van globale aantallen fakkels vonden men dat inderdaad een flink deel van het afplattingssignaal zo zou kunnen worden verklaard. Met deze studie werden Dicke's gevolgtrekkingen weer geheel op losse schroeven gezet: de gangbare opinie was dan ook al snel dat alles een storm in een glas water (rond wat fakkeltjes) was geweest.

MAAR zo eenvoudig blijkt het toch ook weer niet te zijn: uit Dicke's zojuist gepubliceerde correlaties van de dag-op-

dag meetwaarden met de dagelijkse aantallen fakkels, bepaald op gelijktijdig met de metingen opgenomen foto's van de zon, blijkt dat de fakkels maar een kleine bijdrage tot het signaal vormen en dat andere structuren op de zon (vlekken, vlammen) er niet toe doen. Zijn uiteindelijke waarde voor de afplatting verschilt dan ook niet veel van de voorlopige: $4.51 \pm 0.34 \times 10^{-5}$ van de straal van de zon, resulterend in een extra periheliumbeweging van Mercurius van $2''.98 \pm 0''.27$ per eeuw. Wel is de analyse van zo vèrgaand statistische aard dat bedenkingen mogelijk blijven: des te meer omdat er ook uit volgt dat de afplatting zou variëren met een periode van 25.7 dagen!

Maar veel directere metingen dan fakkeltellingen hebben intussen laten zien dat temperatuurverschillen in de chromosfeer niet voor het afplattingssignaal verantwoordelijk gesteld kunnen worden: namelijk metingen van de temperatuur zelf in de chromosfeer rondom de zon.

Dergelijke metingen waren al veel eerder verricht, onder meer te Utrecht, met hele andere oogmerken: op grond van de differentiële rotatie van het zonsoppervlak (het draait op hoge breedte langzamer rond dan bij de equator) was een gemiddeld pool-equator temperatuurverschil al voorspeld. Maar voor de huidige discussie waren deze oudere metingen te onnauwkeurig en te onbetrouwbaar; door gebruik

Metingen, gedaan in Utrecht

EEN meting van het temperatuurverschil tussen pool en equator in de chromosfeer van de zon werd in het najaar van 1972 door mij verricht met de zonnepetrograaf te Utrecht. Dit is een oud instrument dat rond 1919 door Julius op het Fysisch Laboratorium werd voltooid en in 1940 door Minnaert naar de Sterrewacht werd verplaatst. Nadien werd het door de in Utrecht werkende Japanse astronoom Namba gemoderniseerd.

Om de vorm van de spektraallijnen nauwkeurig te meten werd het spectrum van het zonlicht niet gefotografeerd maar met een in golflengte bewegende fotocel afgetast en op een ponsband geregistreerd met een snelheid van honderd metingen per seconde. Het aftasten werd voortdurend herhaald, zodat in een rekenmachine naderhand over een groot aantal ponsbanden gemiddeld kon worden om de ruis in het signaal voldoende te onderdrukken. Een tot op 0.002 mm nauwkeurig positiemetingssysteem zorgde ervoor, dat de verschillende meetseries precies op elkaar pasten. Wisselingen in de doorlating van de dampkring gooiden geen roet in het eten: een tweede, niet bewegende fotocel registreerde de veranderingen, zodat deling van beide signalen het resultaat onafhankelijk ervan maakte. Waren de wolken te dik dan schakelde het apparaat zichzelf uit, en wanneer ze weg waren, weer aan! In totaal werden zo ruim vijfduizend spek-

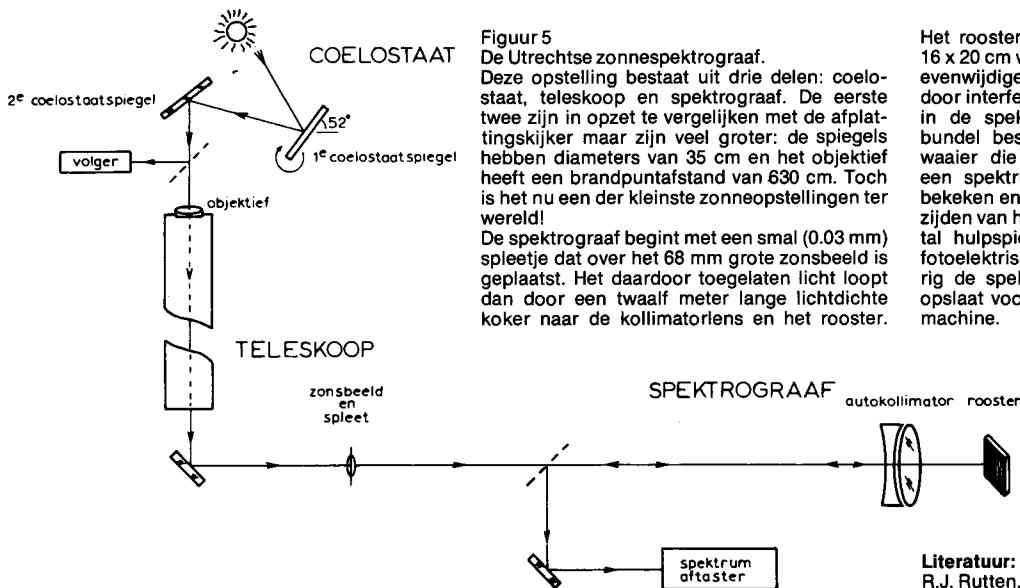
trumregistraties verkregen en in de universitaire rekenmachine verwerkt.

Omdat het bij deze metingen ging om verschillen in het spectrum van de polaire en equatoriale delen aan de rand van de zonnenschijf gaven ze nauwkeurige resultaten: bij de onderlinge vergelijking vallen de afbeeldingsfouten van de (niet volmaakte) spektograaf er uit. Het was wél van belang, dat voortdurend spektra werden vergeleken van stukjes zon die precies even ver van de zonsrand verwijderd waren, omdat het spectrum óók verandert met de afstand tot de rand: nabij de zonsrand wordt er schever door de zonneatmosfeer heengekeken, zodat de buitenste lagen relatief meer bijdragen. Voor deze positionering zorgde een automatische „volger”, die de zon nauwkeurig op zijn plaats hield door met vier fotocellen rond een tweede afgetapt zonsbeeldje te meten of het niet verschoven en zodanig de stand van de beide coelostaatspiegels bij te regelen. De precisie waarmee dit geschiedde hing af van de luchttoestand; midden in Utrecht is die verre van ideaal, maar gelukkig net niet te groot om de metingen te bederven.

Op deze wijze heb ik rondom langs de rand van de zon de veranderingen bepaald in de vorm van het profiel van de spektraallijn van magnesium bij een golflengte van 4571.1 Å. Dit is een zeer bijzondere lijn die correspondeert met een „verboden” overgang in het magnesiumatoom, maar die ondanks dat verbod in de zon toch goed te zien is.

In tegenstelling tot gewone toegestane lijnen wordt deze lijn nauwelijks door de in de zon aanwezige straling beïnvloed, maar alleen gevoed door botsingen met andere deeltjes (vooral elektronen); hij vormt daarom een goede indikator van de plaatselijke temperatuur in de chromosfeer waar het centrale deel van de lijn wordt gevormd. (Een normale stralingsgevoelige lijn daarentegen is een indikator voor de energie van het stralingsveld, maar dat hoeft niet ter plaatse te zijn ontstaan: in de doorzichtige chromosfeer is dat zeker niet het geval want de daar passerende straling komt vooral uit de onderliggende fotosfeer.)

De „ijking” van deze wat ingewikkelde chromosfeer-thermometer berustte op synthetische berekeningen die de vorm van het lijnprofiel nabij de zonsrand leveren als functie van ondermeer het verloop van de temperatuur met de diepte in de zon. Deze waren mogelijk dankzij een uitgebreid computerprogramma, ontwikkeld door de Utrechtse astronomen Schadee, van Dessel en Wijbenga. De bepalingen van diverse grootheden die bovendien bekend moeten zijn (zoals de relatieve hoeveelheid magnesium in de zon) volgden uit een analyse door Wijbenga van deze spektraallijn aan de uiterste rand van de zon, welke weer berustte op spektra opgenomen door een Utrechtse expeditie (Houtgast, de Graauw, Namba en Rutten) tijdens de totale zonsverduistering van 7 maart 1970 te Mexico.



Figuur 5
De Utrechtse zonnepetrograaf.

Deze opstelling bestaat uit drie delen: coelostaat, teleskoop en spektograaf. De eerste twee zijn in opzet te vergelijken met de afplatingskijker maar zijn veel groter: de spiegels hebben diameters van 35 cm en het objectief heeft een brandpuntafstand van 630 cm. Toch is het nu een der kleinste zonneopstellingen ter wereld! De spektograaf begint met een smal (0.03 mm) spleetje dat over het 68 mm grote zonsbeeld is geplaatst. Het daardoor toegelaten licht loopt dan door een twaalf meter lange lichtdichte koker naar de kollimatorlens en het rooster.

Het rooster ('tralie') is een vlakke spiegel van 16 x 20 cm waarin per millimeter twaalfhonderd evenwijdige lijnen zijn gekrast: hierdoor wordt door interferentie het witte zonlicht gescheiden in de spektrale kleuren. De teruggekaatste bundel bestaat uit een horizontale kleurenwaaier die door dezelfde kollimatorlens tot een spectrum wordt gefokuseerd. Dat kan bekeken en gefotografeerd worden aan weerszijden van het spleetje, maar ook met een tweetal hulp spiegels worden afgebogen naar de fotoelektrische spektrumaftaster die nauwkeurig de spektraallijnen meet en op ponsband opslaat voor verdere bewerking in een rekenmachine.

Literatuur:
R.J. Rutten, 1973, Solar Physics, 28, 347.

te maken van moderne meetmethoden zijn nu zeer preciese waarnemingen verkregen.

Allereerst werd door de Amerikanen Altrock en Canfield bevestigd dat er geen noemenswaardig verschil is in de temperatuur van de zichtbare lagen tussen pool en equator. Zij maten nauwkeurig fotoelektrisch het intensiteitsverloop langs diameters van de zonnenschijf van pool tot

pool en langs de equator en vonden na middeling van een groot aantal waarnemingen géén systematische verschillen. Vervolgens werden de temperatuurverschillen in de chromosfeer bepaald. Daarvoor dient men een chromosfeer-thermometer te hebben: een spektraallijn die in de buitenste lagen van de zon wordt gevormd en die gevoelig is voor de daar heersende

temperatuur. Altrock en Canfield gebruikten hiertoe een vleugel van de bekende sterke violette „K” lijn van éénmaal geïoniseerd calcium; ik heb zelf gemeten met een speciale blauwe spektraallijn van het atoom magnesium (zie kader) en een derde groep onderzoekers (Noyes, Ayres en Hall) gebruikte een infrarode lijn van het

molekuul koolstofmonoxide. Al deze verschillende metingen leerden, dat er gemiddeld slechts kleine temperatuurvariaties (enkele graden Celsius) langs de rand van de zon in de chromosfeer zijn, die inderdaad samenhangen met de aanwezigheid van fakkels en magnetische velden. Uit de bekende aantallen fakkels en magnetische veldsterkten ten tijde van Dicke's metingen - die in een andere fase van de 11-jarige activiteitscyclus werden gedaan - valt dan af te leiden, dat zij slechts een geringe bijdrage aan Dicke's wisselstroom-signaal gegeven hebben.

We zien dus, dat de controverse rond de afplatting van de zon, het al dan niet snel draaien van het zonne-inwendige en de invloed daarvan op de beweging van de planeten nog niet is opgelost. Nog steeds is de beweging van het perihelium van Mercurius de enige test voor het juist zijn van Einsteins algemene relativiteitstheorie; de in dit artikel beschreven metingen wijzen er op, dat de Brans-Dicke skalar-tensor modifikatie ervan hem zal gaan vervangen. Op dit moment zijn er nog geen andere metingen gedaan die dit kunnen bevestigen, maar we mogen nog in dit decennium nauwkeurige metingen verwachten (zie kader) van uiteenlopende aard, die onafhankelijk van elkaar definitieve tests vormen van de zo lang onbewezen algemene relativiteitstheorie en die daarnaast ook uitsluitel zullen geven over de inwendige structuur van de zon.

Populair-wetenschappelijke literatuur:

Neutronensterren: J. Heise, 1970, Hemel & Dampkring 68, 75.

Zwarte gaten: J. Heise, 191, Hemel & Dampkring 69, 29. Serie van J. Stollman en P. Hut in Zenit.

Vakliteratuur:

R.H. Dicke, 1970, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 8, 297.

R.H. Dicke en H.M. Goldenberg, Astrophysical Journal Suppl. nr. 241.

A.P. Ingersoll en E.A. Spiegel, 1971, Astrophysical Journal 163, 375.

R. Altrock en R.C. Canfield, 1972, Solar Physics 23, 257.

R.N. Noyes et al., 1973, Solar Physics, 28, 343.

Nieuwe tests van de algemene relativiteitstheorie.

NAAST de in dit artikel beschreven bepaling van de afplatting van de zon zijn er nog diverse andere nieuwe metingen en technieken waarmee men de algemene relativiteitstheorie hoopt te kunnen testen.

Omdat de relativistische verschijnselen bij de in ons zonnestelsel voorkomende zwaartekrachtsvelden zo klein zijn gaat het in alle gevallen om zeer geringe effecten, waarvoor uiterst nauwkeurige meetmethoden noodzakelijk zijn. De effecten zijn natuurlijk voor het zwaartekrachtsveld van de zon veel groter dan voor dat van de aarde, zodat alle experimenten op één na van de zon gebruik maken, net zoals het bij de klassieke tests het geval was. Die ene uitzondering is de „Stanford Relativiteits-satelliet” waarmee men ondermeer beoogt de relativistische gevolgen van de rotatie van de aarde op een kunstmaan te meten. Deze zeer ingewikkelde satelliet zal daartoe vier tot vlak bij het absolute nulpunt gekoelde gyroskopen bevatten, waarvan de precessie ten opzichte van de sterren nauwkeurig bepaald zal worden. Waarschijnlijk zal de meetnauwkeurigheid echter onvoldoende zijn om onderscheid te kunnen maken tussen de algemene relativiteitstheorie en modifikaties ervan zoals de skalar-tensor theorie; het testen van de relativistische effecten van roterende materie is echter op zichzelf al erg interessant wegens de toepasbaarheid op neutronensterren en zwarte gaten.

Preciese metingen van de grootte van de relativistische effecten vereist echter het zoveel sterkere zwaartekrachtsveld van de zon. Hier volgt een samenvatting van dergelijke metingen.

Vooreerst vallen er binnenkort nauwkeurige metingen te verwachten van de afbuiging van sterlicht nabij de zonsrand, nu niet verricht tijdens totale zonsverduisteringen met alle problemen van dien, maar „gewoon” overdag! Zojuist hebben Hill en medewerkers in Amerika nabij Tucson (Arizona) een speciale teleskoop („SCLERA”) voltooid, waarmee zij verwachten de afstand van sterren tot het zonsmidden met een precisie van maar liefst 0".001 te kunnen bepalen, gebruikmakend van geavanceerde optische technieken en geraffineerde detectiemethoden. (Het verschil in de positieverschuivingen van sterren bij de zonsrand tussen de skalar-tensor theorie en de algemene relativiteitstheorie bedraagt ongeveer 0".1). Tegelijkertijd zal deze teleskoop ook nieuwe metingen van de afplatting van de zon leveren: met de eerste tests is een aanvang gemaakt, maar resultaten zijn nog niet gepubliceerd.

Ten tweede wordt dezelfde afbuigingsproef tegenwoordig ook gedaan op radiogolflengten, gebruik makend van de jaarlijkse passage van de zon dicht langs de puntvormige quasi-stel-

laire radiobron 3C 279 op 8 oktober. Deze metingen zijn veel nauwkeuriger dan de vroegere optische metingen bij eklipsen, dankzij de geringe invloed van de aardatmosfeer en de hoge precisie in het interferometrische meten van de verandering in de hoekafstand tussen twee radiobronnen. Nadellig is echter de eigenschap van de zonnekorona om zelf al radiostraling af te buigen door wisselingen in de plaatselijke elektronendichtheid. De stralen van de radiobron hoeven echter niet vlak langs de zon te scheren: in feite worden de posities van radiobronnen slechts dan niet verschoven door de zwaartekracht van de zon als ze vanuit de aarde gezien diametraal tegenover de zon liggen (in oppositie zijn). Wanneer in de toekomst met de intercontinentale „Very Long Baseline Interferometers” de posities van extragalactische radiobronnen zeer nauwkeurig gemeten zullen worden (en de geodetische posities van de gebruikte radioantennes tegelijkertijd óók!) zullen correcties voor de afbuiging door de zon overal nodig zijn. Maar hoe dichterbij de zon gezien, hoe groter het effect: in de huidige metingen kiest men de beste middenweg tussen: vèr van de zon en géén last van de korona enerzijds en dichtbij de zon met een grotere afbuiging, maar meer korona anderzijds.

Sinds 1969 worden dergelijke metingen jaarlijks verricht, de eerste met de radioteleskopen te Owens Valley en Goldstone. De beste metingen komen thans echter van onze eigen nauwkeurige synthese-radioteleskoop te Westerbork. Weiler en Ekers, die ook reeds bij die eerste metingen betrokken waren en nu beiden in Nederland werken, publiceerden onlangs met Raimond en Wellington de resultaten van metingen te Westerbork verricht in 1972. Zij zijn nauwkeuriger dan alle voorgaande, maar nog niet voldoende om onderscheid te kunnen maken tussen de skalar-tensor theorie en de algemene relativiteitstheorie. Maar voor de nu in bewerking zijnde waarnemingen van oktober 1973 is dat wellicht wèl het geval: de Westerbork-teleskoop is inmiddels uitgebreid met een ontvanger voor een tweede radiogolflengte, en met de nieuwe waarnemingen op beide golflengtes (21 cm en 6 cm) kunnen correcties voor de invloed van de zonnekorona worden bepaald. De relativistische afbuiging is namelijk onafhankelijk van de golflengte (want veroorzaakt door de vorm van de ruimte) terwijl de richtingsveranderingen die de korona veroorzaakt wèl met de golflengte variëren.

EEN andere nieuwe test is de door Shapiro uitgevoerde meting van de tijdsvertraging van radarecho's aan planeten: de heen-en-weer reisduur van het radiosignaal wordt ook door de

(Advertentie)

AANGEBODEN

10 cm parallactische refractor, halfapochromat, 1 : 15, Duits fabriekaart, zware Butenschön montering, electr.aandrijving, compleet f 2100,-.

Lau,
Sloppenbrugge 23,
Rijsenhout - Post Aalsmeer
Tel: 02977-20303

TE KOOP GEVRAAGD

een lenzenteleskoop.

Bij voorkeur 125 of 150 mm als minimum. Beslist geen spiegelteleskoop. Aanbiedingen met korte beschrijving en prijs s.v.p. aan

F. den Boer
Bredeweg 20, Amsterdam

massa van de zon beïnvloed, en eveneens verschillend voor de beide theorieën. Door radiosignalen te laten terugkaatsen door Mercurius en Venus, terwijl zij achter de zon langs bewegen en nauwkeurig de tijdsduur tussen de uitgezonden en opgevangen signaalstootjes te meten kunnen eveneens de theorieën getest worden. De hobbeligheid van de planeten bederft het echter: de signalen van de bergen komen eerder terug dan die van de dalen. Het gaat daarom beter met ruimtevoertuigen die de ontvangen radiosignalen onmiddellijk weer heruitzenden.

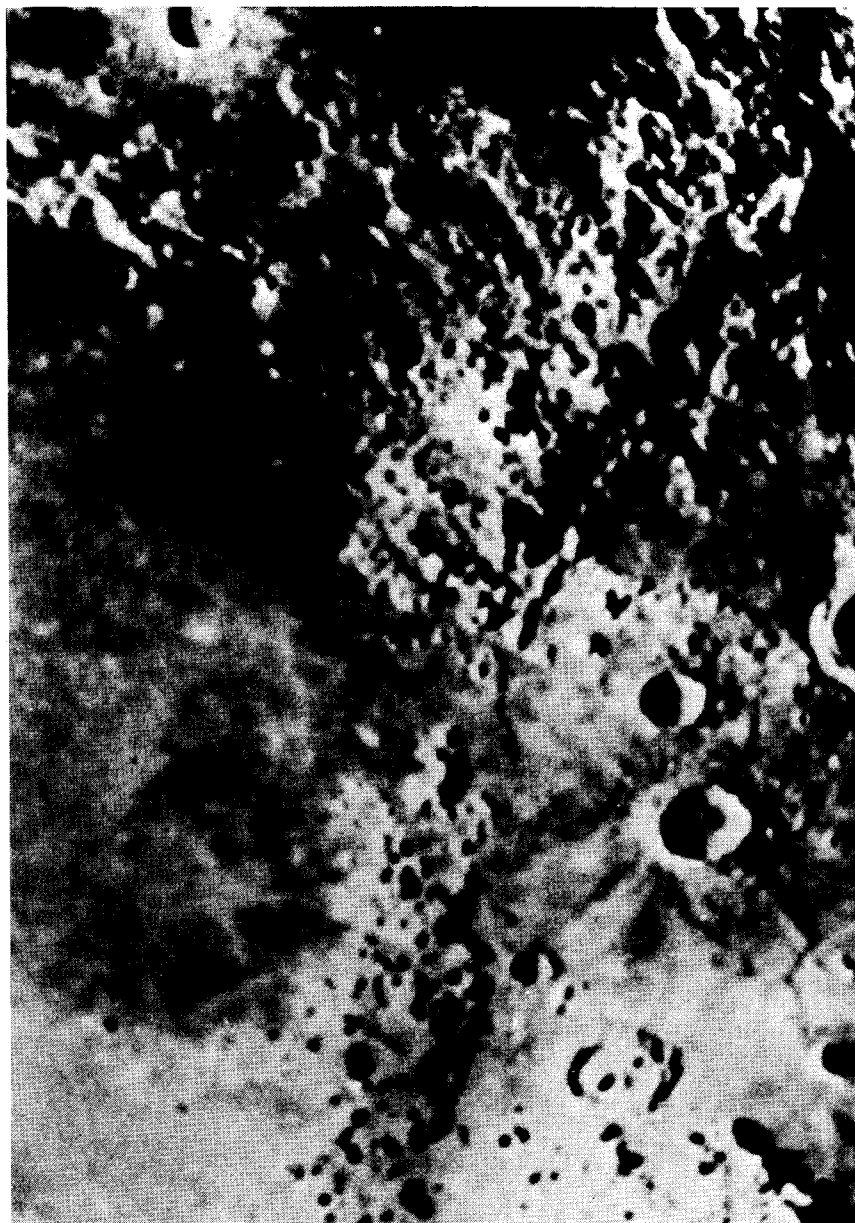
Met deze „aktieve” radarmethode aan ruimtesondes is de hoogste precisie bereikt van alle andere tot dusver uitgevoerde tests: ook deze is echter nog juist ontoereikend voor een definitief onderscheid tussen de alternatieve theorieën. De problemen liggen in het feit dat de zo lichte ruimtescheepjes gemakkelijk uit hun baan gedrukt worden door de zonnwind, de stralingsdruk van het zonlicht en ook door gaslekjes in de apparatuur zelf die als kleine raketten werken. (Om dezelfde redenen kan de algemene relativiteitstheorie ook nog niet uit de beweging van kunstmanen in het gravitatieveld van de zo goed bekende aarde getest worden; men denkt echter wel aan „drag-free” satellieten die er geen last van hebben, doordat ze worden afgeschermd door een vrij eromheen zwevend omhulsel, dat zo wordt bijgestuurd dat het de kunstmaan erin nooit raakt).

Zeer nauwkeurige resultaten zijn daarom bovenal te verwachten van de Vikings die in 1976 op Mars moeten landen: puntvormige actieve echo-reflektors die vast verankerd staan op een zware planeet! Bovendien krijgen de beide Vikings als eerste ruimteschepen zenders met twee verschillende golflengten mee, zodat net als bij de nieuwe Westerbork metingen gecorrigeerd kan worden voor storingen die ontstaan in de korona en in het interplanetaire medium.

Bovendien zullen met de Vikings en de voortgaande radarreflektie-metingen de planetenbanen steeds nauwkeuriger worden bepaald, zodat ook de periheliumbewegingen van andere planeten dan Mercurius precies gemeten zullen worden. Dat is vooral van belang omdat de periheliumverschuiving tengevolge van een snel draaiende zonninwendige anders van de afstand tot de zon afhangt dan de relativistische verschuiving dat doet, zodat een bepaling van ieder apart mogelijk wordt, resulterend in een tweede onafhankelijke meting van de rotatieverdeling binnen de zon.

Literatuur:

H.A. Hill et al. 1974, Applied Optics 13, 206
K.W. Weiler, R.D. Ekers, E. Raimond, H.J. Wellington, 1974, Astronomy and Astrophysics 30, 241
I.I. Shapiro, 1972, General Relativity and Gravitation 3, 135.



MAANFOTO:

Een deel van de (maan-) Apennijnen, gefotografeerd door Leo Aerts te Heist op den Berg (België). Aan de rechter rand is in het midden de helft van de krater Archimedes zichtbaar; links daarvan Autolycus en Aristillus, daaronder Cassini. De foto is gemaakt met een 102 mm - f/15 Polarex refractor bij een vergroting van

204 keer. De refractor was azimuthaal opgesteld; er werd dus niet gevolgd. Belichting: 1/15de seconde door afzwaaien met zwart karton. Film: Kodak Tri-X, 15 minuten ontwikkeld in Microdol X bij 24°C. Camera: Kleinbeeld Exacta VX 500, aan de refractor bevestigd. Projectie: oculair. Datum: 31 maart 1974.

ONDERZOEK MET DE WESTERBORK SYNTHESE RADIOTELESKOOP

Het boekje met de tekst van de voordrachten die in januari en februari 1974 te Utrecht werden gehouden in de serie van Kolleges Sterrekunde voor Afgestudeerden is thans verschenen en aan de deelnemers toegezonden.

Belangstellenden kunnen zich eveneens van toezending verzekeren door storting van f 3.50 op gironummer 2900 van de AMRO-

bank n.v. te Utrecht, onder vermelding van nummer 40205 t.n.v. Prof. Dr. C. de Jager. Van de voordrachten in voorgaande jaren is nog een beperkt aantal boekjes voorradig. Wilt u op uw betaalbiljet vermelden van welk jaar en van welke voordrachten u een boekje wenst te ontvangen?

Vriendelijk dank voor uw medewerking.

Prof. Dr. C. de Jager,
Hoogleraar/Beheerder van het
Sterrekundig Instituut te Utrecht.