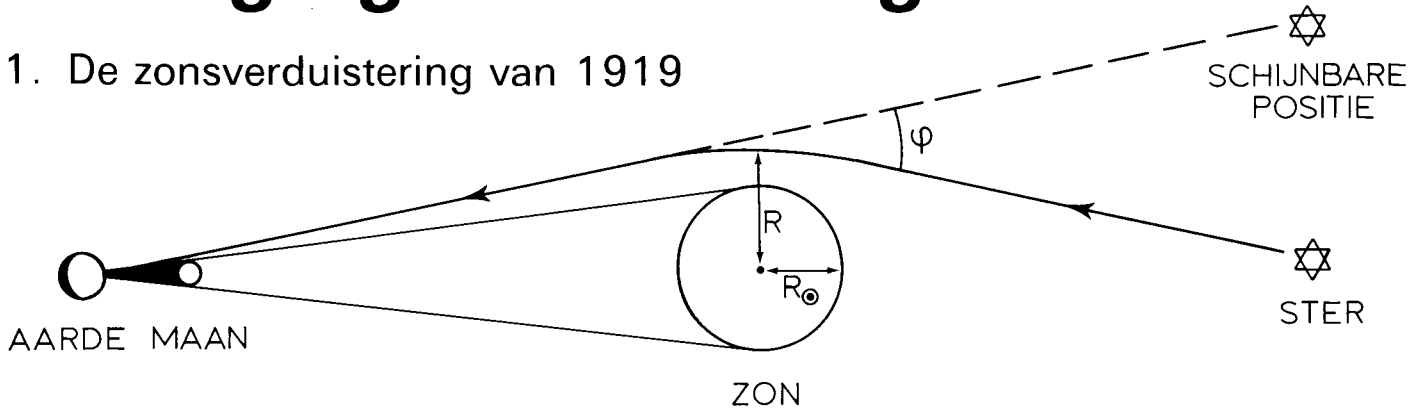


# Afbuiging van straling door de zon

## 1. De zonsverduistering van 1919



Geen eclipsexpeditie is zo beroemd als de Britse onderneming van 1919 waarmee de algemene relativiteitstheorie werd bevestigd. De zonsverduistering was op 29 mei en op 12 november maakte Eddington de resultaten openbaar: sterren gezien nabij de verduisterde zon staan niet op hun plaats, maar 'te ver' van de zon doordat hun lichtstralen zijn afgebogen door de zwaartekracht van de zon, en wel in overeenstemming met Einstein's voorspelling van 1915. Deze dramatische bevestiging bleek naderhand echter niet voldoende nauwkeurig. Pas nu, zestig jaar later, zijn er wel nauwkeurige metingen beschikbaar – en ze kloppen precies met Einstein's voorspelling. De nieuwe metingen zullen in een volgend nummer van Zenit beschreven worden; hier wordt eerst de geschiedenis van de roemrijke zonsverduistering van 1919 opgehaald.

In 1911 had Einstein al gesteld dat sterlicht door de zon moet worden afgebogen, maar toen voorspelde hij een kleinere waarde:  $0''{,}87$  voor een ster waarvan de stralen juist langs de zonsrand scheren. In 1915 werd dat twee maal zoveel:  $1''{,}75$ . Waarom deze her-

R. J. RUTTEN

ziening? De voorspelling van 1911 beruiste op het *equivalentie-principe*, een tussenstap in Einstein's ontwikkeling van de zwaartekrachtsbeschrijving die we 'algemene relativiteitstheorie' noemen. In 1905 was er de *speciale* relativiteitstheorie aan voorafgegaan. 'Speciaal' omdat deze zich beperkt tot zich met constante snelheid bewegende waarnemers, maar feitelijk algemeen omdat 'relativistische' effecten op allerlei terreinen van de natuurkunde gemeengoed zijn. Uitgangspunt voor de speciale theorie was de overtuiging dat de natuurkunde overall

Fig. 1. De afbuiging van sterlicht door de zon: de waarnemer ziet een ster schijnbaar verplaatst, van de zon weg doordat de lichtstralen naar de zon toe buigen. Volgens de algemene relativiteitstheorie komt dat doordat de massa van de zon de ruimte en de tijd plaatselijk vervormt, leidend tot een 'kromme' baan voor rechte lichtstralen. De grootte van de afbuiging is:

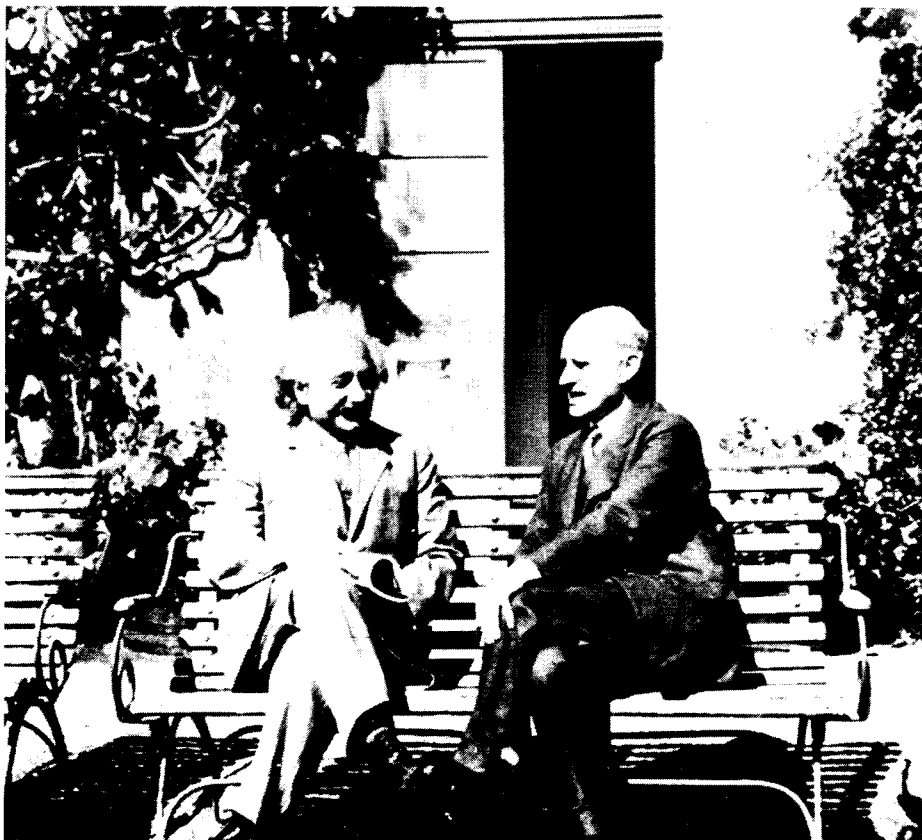
$$\varphi = \frac{4 GM_{\odot}}{c^2 R} = 1{,}749 \frac{R_{\odot}}{R}. \text{ Merk op dat de af-}$$

buiging niet van de golflengte van de straling afhangt: het is immers een eigenschap van ruimte en tijd. Einstein's eerdere waarde, gebaseerd op Newton's gravitatiewet en zonder tijdschromming, was twee maal zo klein.

De afbuiging door de maan, waar de lichtstraal nog dichter langs scheert, is verwaarloosbaar ( $M_{\odot}/M_{\oplus} = 27000000$ ).

hetzelfde is, en ook voor verschillende bewegende waarnemers niet verschilt. Dan is voor hen de lichtsnelheid hetzelfde, omdat die als constante in Maxwell's wetten voor de electromagnetische verschijnselen optreedt. Dat impliceert dat de maten verschillen waarin verschillende bewegende waarnemers, gebruik makend van lichtsignalen, ruimte en tijd meten. Hun meetlatten en klokken hangen dan van hun snelheid af. Einstein stelde dus, om de elegantie van Maxwell's wetten te kunnen handhaven, de ervaring van ruimte en tijd subjectief. De uit de speciale relativiteitstheorie volgende voorspellingen en verschijnselen, waaronder de relatie  $E = mc^2$ , zijn op velerlei wijze getest, juist bevonden en technisch toegepast, ten goede en ten kwade.

Het is anders gesteld met de *algemene* relativiteitstheorie: een beschrijving van de zwaartekracht die nog niet in alle detail



Einstein (links) en Eddington in de tuin van deze laatste te Cambridge in 1930. Einstein voorspelde in 1911 dat sterlicht in de buurt van de zon wordt afgebogen. Eddington kon na de zonsverduistering van 1919 bekend maken dat dit inderdaad het geval is (uit 'The life of Arthur Stanley Eddington': 1956. Foto Institute of Astronomy, Cambridge).

## I. PURPOSE OF THE EXPEDITIONS.

1. THE purpose of the expeditions was to determine what effect, if any, is produced by a gravitational field on the path of a ray of light traversing it. Apart from possible surprises, there appeared to be three alternatives, which it was especially desired to discriminate between—

- (1) The path is uninfluenced by gravitation.
- (2) The energy or mass of light is subject to gravitation in the same way as ordinary matter. If the law of gravitation is strictly the Newtonian law, this leads to an apparent displacement of a star close to the sun's limb amounting to  $0''.87$  outwards.
- (3) The course of a ray of light is in accordance with EINSTEIN'S generalised relativity theory. This leads to an apparent displacement of a star at the limb amounting to  $1''.75$  outwards.

In either of the last two cases the displacement is inversely proportional to the distance of the star from the sun's centre, the displacement under (3) being just double the displacement under (2).

getest is, mededingers heeft, en in feite nog niet af is. Waarom heet deze theorie dan 'algemeen'? Omdat Einstein hierin de be-

Fig. 2. Het equivalentieprincipe door Katrien (7 jaar) in beeld gebracht: er is fysisch geen verschil tussen zwaar en traag. Zwaartekrachtsversnelling en bewegingsversnelling beide zetten ons met beide benen op de grond, zonder merkbaar of meetbaar verschil.

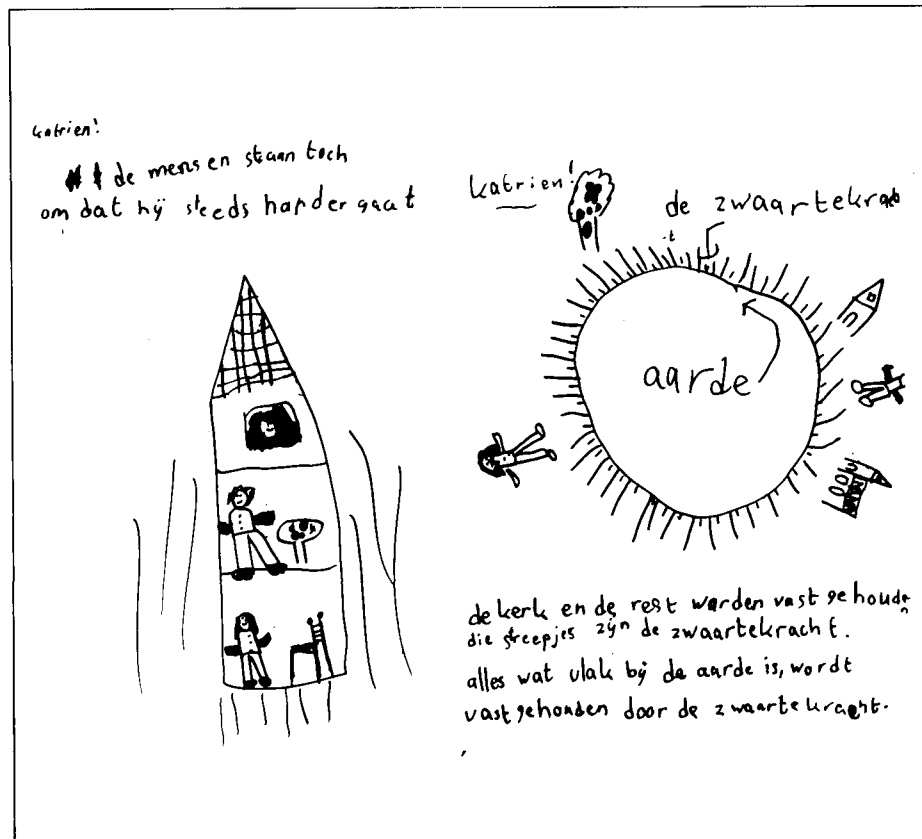


Fig. 3. De aanhef van het artikel in de *Memoirs van de Royal Astronomical Society* waarin Dyson, Eddington en Davidson in 1919 de algemene relativiteitstheorie experimenteel bevestigden.

gen jaar, tot de formulering van de algemene relativiteitstheorie in 1916. Het equivalentieprincipe was een stap onderweg. Dit stelt dat versnelling het gevolg kan zijn van zwaartekracht en van traagheid *zonder wezenlijk verschil tussen beide*. Het maakt voor u niet uit of de aarde u met beide benen op de grond trekt, of dat de versnelde beweging van een lift u tegen de vloer drukt. Dat voelt voor u precies gelijk, en daarom stelde Einstein het ook gelijk: zware massa = trage massa, met volstrekte equivalentie tussen beide versnellingen (figuur 2).

Loopt er nu dwars door uw versneld omhoog bewegende lift een lichtstraal, dan ziet u die een beetje naar de vloer gekromd wegens de eindige lichtsnelheid. Terwijl de straal de lift doorloopt rijst de vloer steeds sneller naar de straal toe. Dezelfde kromming moet dan equivalentie-getrouw ook optreden als de lift stilstaat in een zwaartekrachtsveld. De zon zal dus lichtstralen afbuigen. Einstein berekende de afbuiging met Newton's gravitatiewet, en kwam op  $0''.87$  aan de zonsrand (figuur 1).

Naderhand formuleerde Einstein de algemene relativiteitstheorie, waaruit bleek dat Newton's formule in deze berekening niet gebruikt kan worden. Aan de gedachten-gang lag Galilei's waarneming (of liever: gedacht experiment\*) ten grondslag dat ongelijke voorwerpen even hard naar de aarde vallen. Ze beschrijven dezelfde baan, *ongeacht hun massa*. Dan moet hun beweging, als bij een slee in een bobsleebaan, gedicteerd

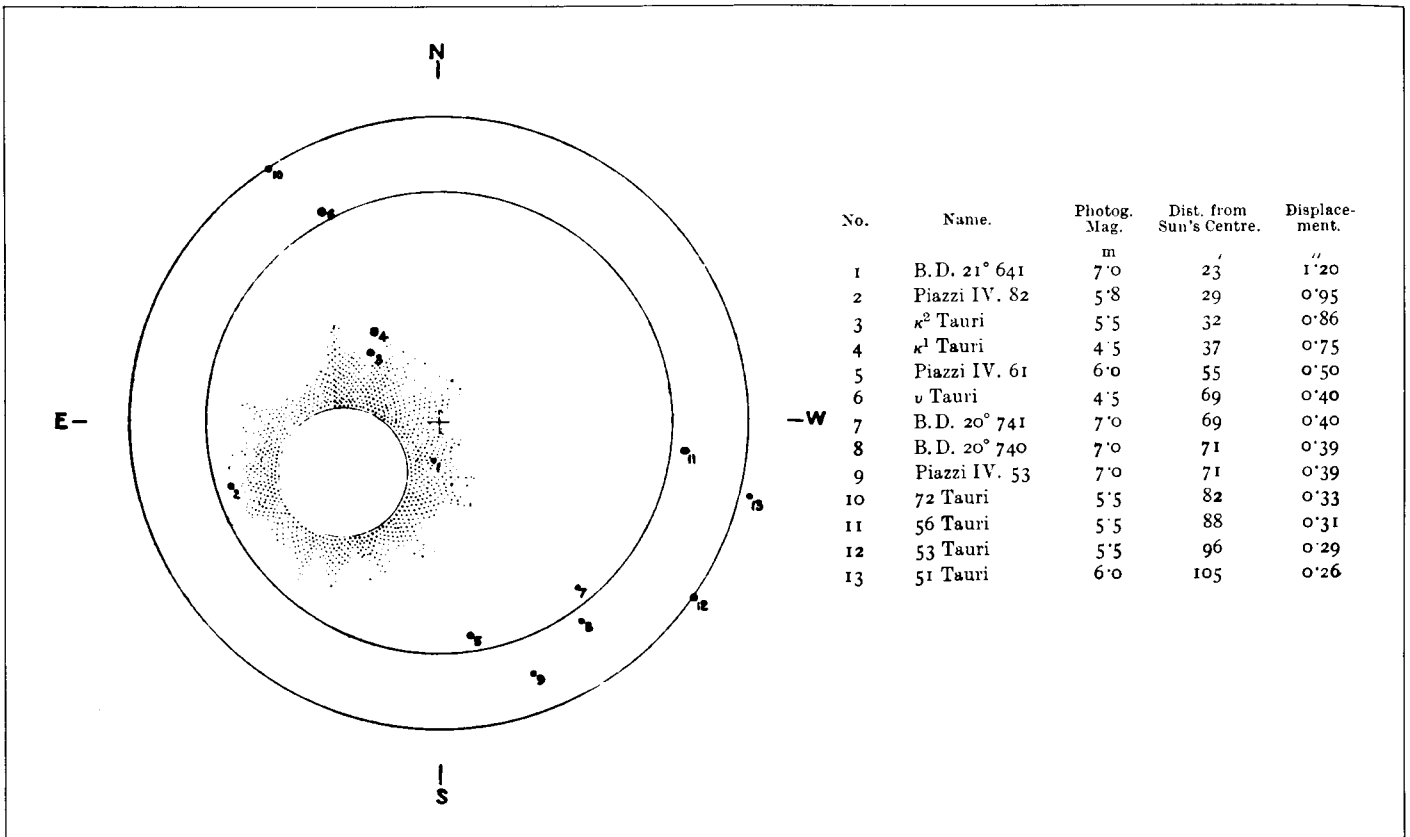
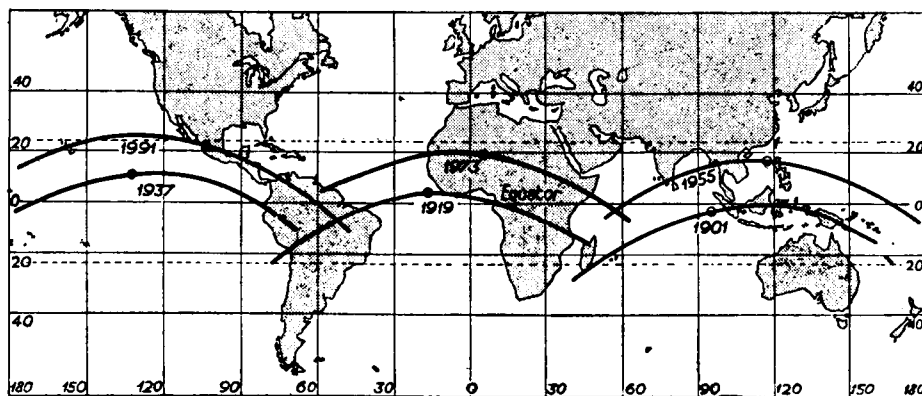


Fig. 4. De zonsverduistering van 1919 bood een unieke kans om de afbuiging te meten omdat er veel heldere sterren dichtbij de zon stonden. Met deze tekening liet Sir F. W. Dyson in maart 1917 zien dat een veld van anderhalve graad een dozijn heldere sterren zou bevatten.

worden door hun baan, dat wil zeggen door de vorm van de ruimte ter plaatse. Zwaartekracht regelt blijkbaar de baan, en dus de ruimte zelf: kromt hem zo dat voorwerpen die rechtuit willen, krom gaan. Dat geldt bovendien ook voor de tijd. Die komt in Newton's gravitatiewet niet voor, hetgeen impliceert dat het 'gravitatiesignaal' zich

Fig. 5. Lange verduisteringen van deze eeuw. Getoond zijn de familie van zonsverduisteringen, met de banen van hun kernschaduw, waar die van 1919 toe behoort. Ze liggen steeds een 'Saros'-periode (223 maanden) uit elkaar en hebben analoge omstandigheden. Alle hebben ze een duur van ongeveer zeven minuten.



oneindig snel voortplant. Maar dat kan niet sneller dan de lichtsnelheid, met als resultaat dat ook de tijd 'gekromd' kan worden. Zwaartekracht maakt dus rechte lijnen krom, in een wisselwerking tussen materie en de lokale structuur van ruimte en tijd. Dat is de reden waarom de 'meetkunde' van de algemene relativiteitstheorie zo ingewikkeld is. Uit Einstein's berekeningen met deze nieuwe meetkunde volgde in 1915 dat de afbuiging twee maal zo groot is als de waarde die Newton uit het equivalentieprincipe berekend zou hebben: 1,75 in plaats van 0,87 voor een ster gezien bij de zonsrand.

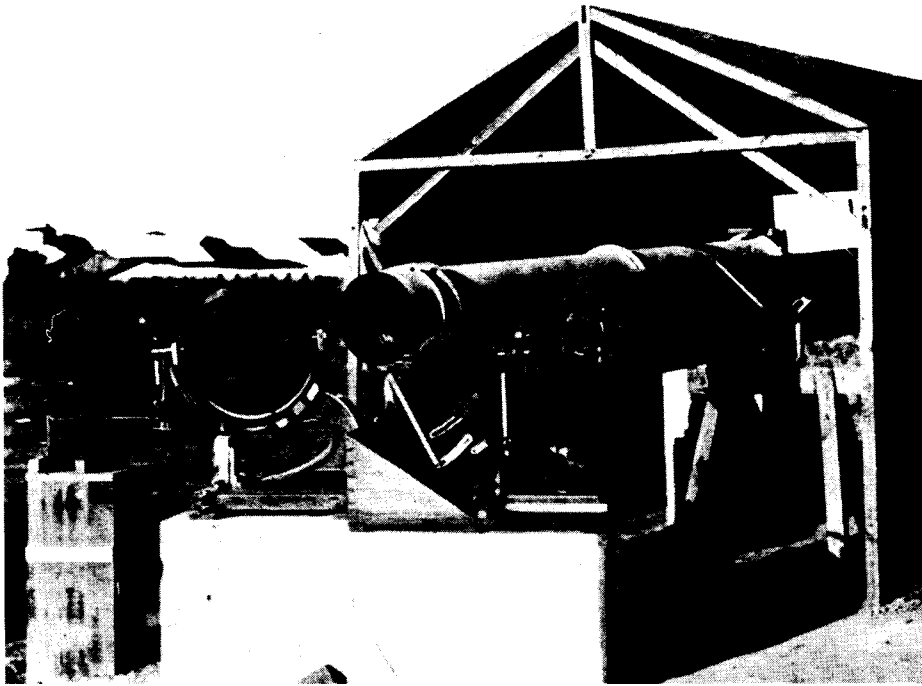
#### De klassieke tests

De voorspelde afbuiging van licht dat langs Jupiter scheert is slechts 0,017; dat maakte duidelijk dat de afbuiging alleen bij de zon gemeten kon worden. De grootte van de afbuiging is omgekeerd evenredig met de afstand tot het centrum van de zon (figuur 1), dus kan het effect gemeten worden door de positie van sterren gezien ver van de zon

te vergelijken met de positie van sterren gezien nabij de zon, dus door van meerdere sterren de onderlinge afstand te meten wanneer de zon niet in de buurt aan de hemel staat en wanneer de zon wel in de buurt staat. Het laatste gaat natuurlijk het gemakkelijkst tijdens een totale zonsverduistering.

Al direct na Einstein's eerste voorspelling (1911) werden oude eclipsiplaten onderzocht door Freundlich, maar hij vond er niet genoeg sterbeeldjes op. Daarna mislukten diverse eclipsexpedities die het meten van de afbuiging tot doel hadden. Na Einstein's tweede voorspelling (1915) vaardigde de Lick sterrewacht, nog tijdens de oorlog, een eclipsexpeditie uit, maar ook deze leverde te onnauwkeurige resultaten. Althans, na de 'preliminary' aankondiging dat de metingen helemaal geen afbuiging toonden werd er niets meer over gepubliceerd. (Het patroon van 'preliminary' publicaties en verder niets is trouwens een negatief kenmerk van eclipsexpedities.) Inmiddels was men in En-

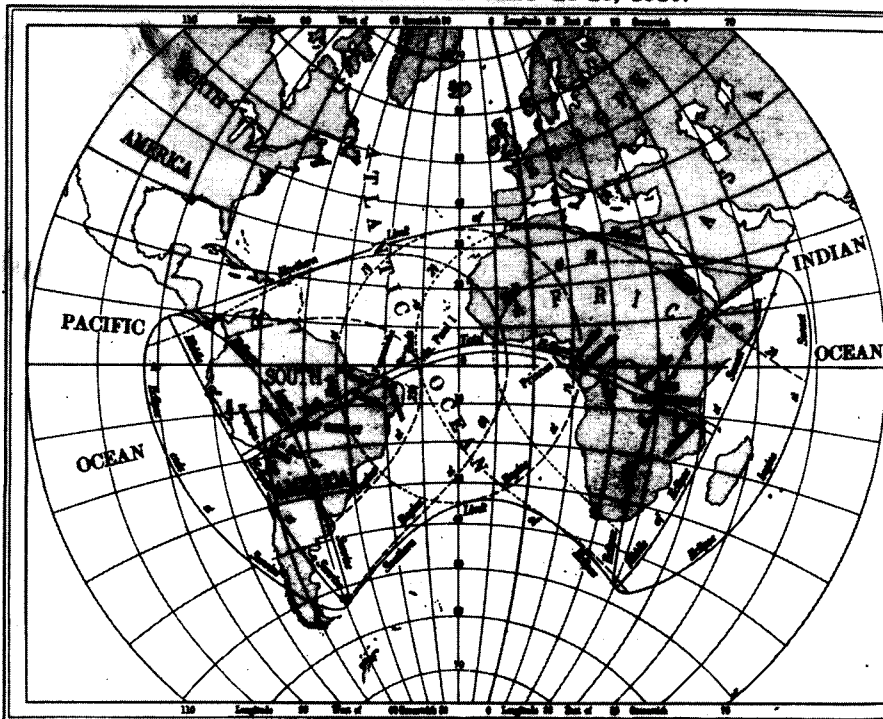
\*Het gedachte experiment is als volgt. Denk je twee ongelijke stenen, waarvan de zwaarste sneller valt dan de lichtste. Bind ze aan elkaar: wat gebeurt er? De lichte remt de zware, dus vallen ze samen minder snel dan de zware alleen. Maar samen wegen ze zwaarder dan de zware alleen – dus vallen ze samen harder. De tegenstrijdigheid laat zien dat de oorspronkelijke aanname fout was: ze vallen dus even hard. De scheve toren van Pisa speelt hierin geen rol! Het verhaal van de toren is, net als Newton's appel en de invloed van de proeven van Michelson en Morley op Einstein, er naderhand bij verzonnen – wellicht om geniale gedachtesprongen door schijnbare experimentele noodzaak te nivelleren?



De horizontale 10 cm telescoop, gevoed door de 20 cm coelostaat, voor hun behuizing te Sobral in Brazilië. De coelostaat werd aangedreven door het uurwerk dat geheel links zichtbaar is (foto Royal Greenwich Observatory).

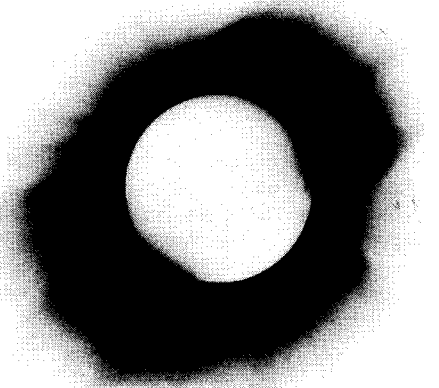
Fig. 6. De omstandigheden van de zonsverduistering van 29 mei 1919 volgens de *Nautical Almanac* van dat jaar. Sobral (Greenwich expeditie) ligt 100 km van de Braziliaanse kust nabij Fortaleza. Het *Ilha do Principe* (Cambridge expeditie) is hier aangegeven als *Princes Island*.

#### TOTAL ECLIPSE OF MAY 28-29, 1919.



Note: The hours of beginning and ending are expressed in Greenwich Mean Time.

spektrum werd niet gevonden. De voorspelde roodverschuiving bedraagt  $0,01 \text{ \AA}$  voor een golflengte van  $5000 \text{ \AA}$ , overeenkomend met een ogenschijnlijke radiële snelheid van  $0,63 \text{ km/sec}$  van ons af. Uitvoerige metingen werden in 1917 gedaan door Schwarzschild in Duitsland en door St. John met de zonnatoren op Mt. Wilson. Ze vergeleken de golflengten van lijnen van het CN molecuul in het zonnenspectrum met dezelfde lijnen opgewekt in een koolboog ter plaatse. Hun resultaten waren respectievelijk: hooguit  $0,2 \text{ km/sec}$  (Schwarzschild), géén roodverschuiving (St. John). Naderhand bleek dat dit komt door de granulatatie van de zon: de snelheden in dit patroon van opborrelende gasbellen geven in het gemiddelde spectrum een blauwverschuiving van  $\approx 0,4 \text{ km/s}$ , die de test op de zon bederft. Later is de zwaartekrachtroodverschuiving wel gemeten in het spectrum van witte dwergen, en heel precies in aardse laboratoria. Als numerieke test van de algemene relativiteitstheorie valt de meting echter af, omdat dezelfde waarde van de roodverschuiving ook al alleen uit het equivalentieprincipe volgt: er is hier-



Opname van de totaal verduisterde zon op 29 mei 1919, zoals waargenomen te Sobral. De opname is in negatief afgedrukt (foto Royal Greenwich Observatory).

voor geen factor twee verschil bij overgang van Newton's op Einstein's gravitatieformules.

#### De eclipsexpedities van 1919

In 1917 kondigde de toenmalige directeur van de Greenwich sterrenwacht, Astronoom Royal Sir F. W. Dyson, aan dat op opnamen gemaakt met de astrografische telescoop tijdens de zonsverduistering van 1905 twee sterren waren te zien nabij de verduisterde zon. De belichting was toen echter gekozen voor het afbeelden van de corona, en niet om zoveel mogelijk sterren op de plaat te krijgen. Met langere belichtingstijden moest de meting van de afbuiging dus mogelijk zijn met meer sterren. Dyson concludeerde dat dat het beste geprobeerd kon worden bij de zonsverduistering van 29 mei 1919, omdat er dan een ongewoon groot aantal heldere sterren dicht

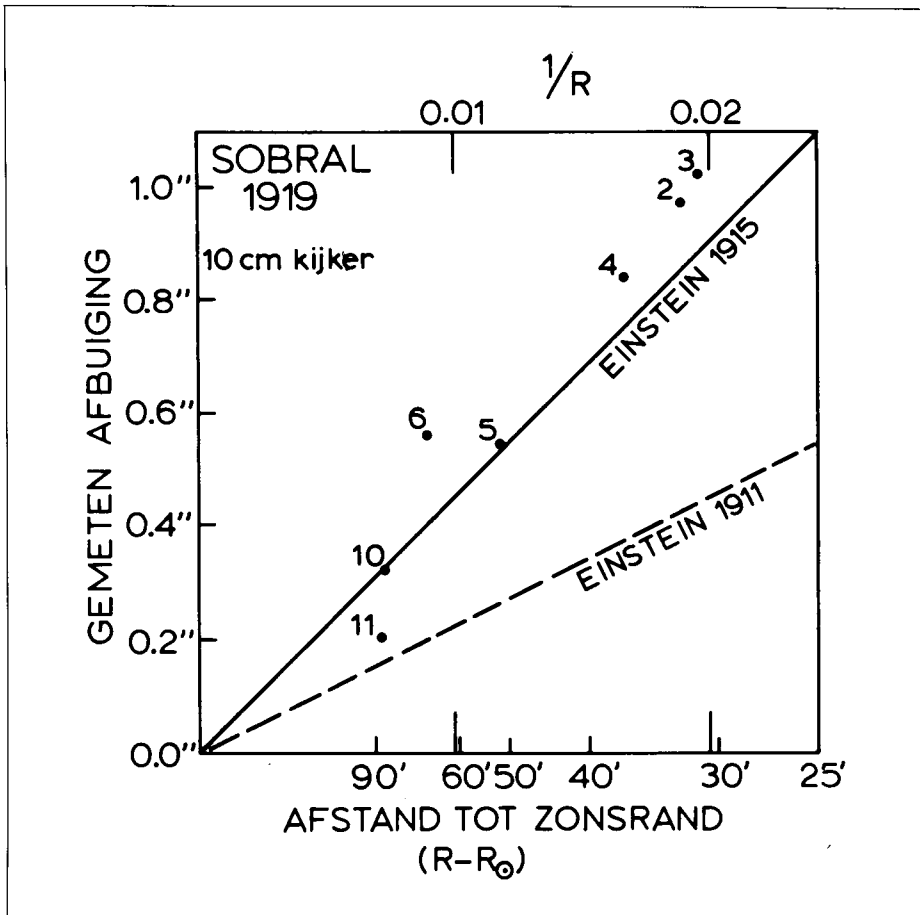


Fig. 7. De resultaten van de 10-cm kijker te Sobral. Ieder punt is het gemiddelde van de afbuiging gemeten voor dezelfde ster op alle zeven platen. De nummertjes geven de ster aan volgens figuur 4. Ster 1 verdween in de corona; sterren 7, 8, 9, 12 en 13 vielen buiten de (te kleine) platen.

bij de zon zou staan (fig. 4). Bovendien hoort de eclips van 1919 tot de groep van de lange zonsverduisteringen van deze eeuw: met een totaliteitsduur van rond zeven minuten, dus heel geschikt voor het maken van lange belichtingen. De 'Saros-partners' van deze verduistering ziet u in fig. 5.

De baan van de maanschaduw liep van Noord-Brazilië over de Atlantische Oceaan naar het Tanganyika-meer (fig. 6). Geschikte plaatsen leken Sobral in Brazilië en het eilandje Principe in de Golf van Biafra. De Engelsen besloten twee expedities uit te zenden, de ene vanuit Greenwich naar Sobral, bestaande uit A. C. D. Crommelin en C. Davidson, en de andere expeditie vanuit Cambridge naar Principe, gevormd door Eddington en E. T. Cottingham. Ze kregen de objectieven van de astrografische telescopen van Greenwich en van Oxford mee. Deze hadden een diameter van 33 cm (beide uiteindelijk gediafragmeerd tot 20 cm); ze ontvingen licht van coelostaten met een diameter van 40 cm. Deelbare stalen buizen dienden als telescoopbuizen; ze werden voorzien van lenshouders en plaathouders, de laatste van hout. Een probleem hierbij was dat de timmerman van Greenwich nog onder de wapenen was; het Royal Naval Col-

lege bleek bereid een timmerman uit te lenen.

Er kwam naderhand op voorstel van Father Cortie (die eerst naar Sobral had zullen gaan; Crommelin was zijn vervanger) nog een kleinere kijker bij, geleend van de Koninklijke Ierse Academie. Het was een 10-cm objectief, met een 20-cm coelostaat, en een houten telescoopbuis. De erbij horende plaathouders waren te klein om alle sterren van fig. 4 op de plaat te krijgen, maar er was geen tijd meer om grotere te maken. Deze eenvoudige telescoop ging als extraatje mee, maar zou de beste resultaten geven!

#### De Cambridge-expeditie naar Principe

Het lijkt wel alsof zonsverduisteringen altijd vanaf exotische plaatsen moeten worden waargenomen. In die tijd betekende dat langdurige reizen. De beide expedities schepten zich in te Liverpool op 8 maart; te Madeira vond de scheiding plaats. Eddington en Cottingham bleven daar een kleine maand wachten op de boot naar Principe waar ze op 23 april arriveerden. De telescoop werd opgesteld naast het huis van de voornaamste cacaoplanter op het eiland, die om de expeditie gastvrijheid te kunnen verlenen een reis naar Europa had uitgesteld. Het werk werd nog een week onderbroken, om te wachten op de komst van de droge 'gravana'-wind aler de kwetsbare coelostaatspiegel werd uitgepakt. De coelostaat werd op een stenen pilaar geplaatst, met een diep gat om het gewicht van het uurwerk dat de draaiing verzorgde ruimte te verschaffen voor een half uur zakken zonder opwinden.

De telescoop rustte in houten wiggen op de pakkisten; een stuk karton was de sluiters. De gravana-wind had de regen verjaagd, maar de bewolking was daarentegen toegenomen. Op de morgen van de zonsverduistering was er een zwaar onweer; twintig minuten voor de verduistering werd de zon door de bewolking heen zichtbaar. Een paar minuten na de totaliteit was het even volkomen helder (tengevolge van de verduistering, dacht Eddington); erna bleef het bewolkt. Tijdens de totaliteit werd het programma naar plan afgewerkt: 16 platen werden belicht. Cottingham verzorgde de coelostaat en de sluiters; Eddington verwisselde de platen. Na ontwikkeling bleken de laatste platen enkele sterbeeldjes te tonen: de bewolking was nog tijdens de verduistering blijkbaar aanzienlijk afgenomen. Daarop volgde een wat gehaast vertrek, om een komende staking van de stoomschipmaatschappij te ontlopen. Op de overvolle laatste boot vorderde de Portugese regering kooien voor de eclipsgangers. Op 14 juli waren ze terug in Liverpool.

#### De Greenwich expeditie naar Sobral

Crommelin en Davidson voeren inmiddels van Madeira naar Para (het tegenwoordige Belem) nabij de monding van de Amazone. Daar aangekomen bleek er nog geen uitsluitel over wat de directeur van de sterrewacht van Rio de Janeiro tot verblijf in Sobral geregeld had; dus de heren bleven nog maar aan boord en voeren van Para de Amazone op helemaal naar Manaus. Toen ze terugkwamen was hun accommodatie verzorgd: een huis aan de racebaan van de jockey-club waarvan de overdekte tribune goede opslagruimte bood. De beide telescopen werden op de racebaan opgesteld. De grote coelostaat kwam op een verticaal ingegraven lange kist, waarin het klokgewicht een half uur kon dalen. De kleine coelostaat kwam op een holle pilaar van baksteen, op een houten wig waarmee het breedteverschil met Engeland werd overbrugd. Allereerst werden, evenals te Principe, ijkingsopnamen gemaakt van een sterveld rond Arcturus, welke ster goed met de coelostaat te vinden was. In Engeland waren met de oorspronkelijke kijkers ook opnamen van hetzelfde veld gemaakt. De sterbeeldjes bleken nu minder scherp, vooral voor de astrografische telescoop, waarschijnlijk tengevolge van beeldfouten geïntroduceerd door de coelostaatspiegel. De afbeeldingsschaal was wellicht veranderd; men besloot daarom te zullen blijven tot juli. Het eclipsveld zou dan, zonder zon, in de morgen met dezelfde zenithafstand fotografeerbaar zijn.

Deze expeditie had meer geluk met het weer dan Eddington. Enkele dagen voor de eclips regende het hard, wat gunstig was omdat er tevoren problemen waren met het vele stof dat de coelostaatuurwerken verstopte. Op eclipsdag was het eerst zwaar bewolkt, maar een minuut voor het begin van de totaliteit bereikte een grote open plek de zon. Acht platen werden belicht met de 10-cm kijker, elk gedurende 28 seconden. Alleen de zesde plaat mislukte door een voorbijtrekkend wolkje. Met de astrografische telescoop

werden 19 platen opgenomen, met wisselen-de belichtingstijden van 5 en 10 seconden. Deze waren gekozen in de hoop dat er enkele niet zouden worden bedorven door de slingerende gang van de grote coelostaat, die een periodefout van 30 seconden bleek te hebben.

Na de eclips werden de spiegels en de klokken opgeborgen; de telescopen bleven onberoerd staan. De waarnemers amuseerden zich verder aan de kust; op 9 juli kwamen ze terug om de ijkplaten te nemen. Om het eclips-sterfeld aan de hemel met de coelostaten te kunnen vinden fabriceerden ze uit millimeterpapier uircirkels. Op 18 juli hadden ze een vijftigtal opnamen van het eclipsveld zonder zon; ze vertrokken op 22 juli en kwamen thuis op 25 augustus.

### De resultaten

De oogst van beide expedities werd apart uitgewerkt: de Sobral-platen door Davidson te Greenwich en de Principeplaten door Eddington te Cambridge. Eddington had geen ijkplaten van het eclipsveld; om die te nemen, met de juiste zenitafstand, had hij nog veel langer dan tot juli moeten wachten, omdat de eclips te Principe later op de dag werd waargenomen. Eddington gebruikte daarom voor de schaalijking de platen van het sterfeld rond Arcturus die zowel te Principe als tevoren te Oxford genomen waren. Deze procedure was gerechtvaardigd omdat de temperatuur te Principe nooit meer dan enkele graden varieerde, en de schaal in het telescoopbeeld vermoedelijk ook niet. Kennis van de schaal is niet strikt noodzakelijk omdat de afbuiging verandert met de afstand tot de zon, maar Eddington's platen tonen zo weinig sterren dat een onafhankelijke schaalbepaling nodig was. Bij de Sobral-platen werd dat niet gedaan.

De resultaten van de drie telescopen staan in de tabel; ze werden gepubliceerd in een artikel van Dyson, Eddington en Davidson (fig. 3) met een uitvoerige beschrijving van de expedities en de reductiemethoden. Dyson had niet alleen de stoot tot de expedities gegeven, maar ze ook helpen organiseren, als voorzitter van het 'Joint Eclipse Committee' dat de expedities had gesponsord door een regeringssubsidie van 1100 pond aan te vragen. De sponsor mocht blijkbaar delen in de eer!

De beste platen waren degene genomen met Father Cortie's kleine 10-cm telescoop. De resultaten die daaruit volgden zijn in fig. 7 uitgezet, per ster gemiddeld over alle zeven platen. Eddington's resultaat is onbetrouwbaarder, maar stemt binnen de foutengrens goed overeen.

De metingen met de astrografische telescoop te Sobral kloppen echter helemaal niet. Dat was niet verwonderlijk, aangezien de sterbeeldjes op de eclipsplaten onscherp zijn. Vermoedelijk was de coelostaat voor de eclips vervormd door de zonnearmte. De auteurs verwierven daarom deze uitkomst, vergaten de 16 platen verder maar, en concludeerden dat de andere platen duidelijk aantonen dat de zon licht doet afbuigen, in goede overeenstemming met de algemene relativiteitstheorie. Deze conclusie maakte

de pacifist Eddington op wapenstilstandsdag 1919 openbaar – de bekendmaking droeg niet weinig bij tot de snelle verbreiding van Einstein's roem.

### Nieuwe metingen van oude platen

De geschiedenis van de eclips van 1919 is hiermee nog niet afgesloten. Vorig jaar was Einstein's geboorte-eeuwfeest, en ter gelegenheid daarvan besloot men te Greenwich de oorspronkelijke Sobral-platen opnieuw uit te meten. Van de platen van de 10-cm telescoop is er eentje zoek en een andere gebroken; de astrografische platen zijn er nog alle 16, zij het vaak sterk verkleurd. De Principe-platen van Eddington werden niet opnieuw gereduceerd; wellicht liggen die nog in Cambridge? Maar misschien vindt men het te Greenwich onjuist dat de Sobral-metingen, die toch het resultaat zijn van een door de Astronomer Royal geëntameerde expeditie van de Greenwich sterrewacht, als 'Eddington's relativiteitsexpeditie' geschiedenis hebben gemaakt?

De Sobral-platen werden door G. M. Harvey en E. D. Clements opnieuw uitgemeten met een Zeiss Ascorecord plaatmeetmachine, en bewerkt met standaard astrometrische rekenprogramma's. De resultaten ziet u in tabel I. Interessant is dat de onscherpe astrografische platen er nu aanzienlijk beter afkomen, waarschijnlijk door een kleiner aantal foute identificaties van vlekjes als

sterren. Ze geven nu vrijwel hetzelfde resultaat, met dezelfde strooiing, als Eddington's Principe-meting, en hadden dus indertijd niet terzijde gelegd moeten worden maar overgemeten.

Alle Sobral-platen samen gemiddeld geven nu  $1''.8 \pm 0''.13$ , dat is juist binnen 1 standaardafwijking van Einstein's voorspelling. Dat die voorspelling inmiddels met veel grotere precisie experimenteel bevestigd is zal in een volgend artikel worden uiteengezet.

*Ik dank J. Odijk voor typewerk, E. Landré en Katrien voor de figuren, en P. Hut en E. L. Sixma voor commentaar.*

### Literatuur

- G. M. Harvey, *The Observatory*, volume 99, 195, 1979.  
 F. W. Dyson, *Monthly Notices R.A.S.*, volume 77, 445, 1917.  
 F. W. Dyson, A. S. Eddington, C. Davidson, *Memoirs Royal Astr. Soc.*, volume 62, 291, 1919.  
 F. W. Dyson, R. v.d. Woolley, 'Eclipses of the Sun and Moon', Clarendon Press, Oxford 1937.

### Artikels in Zenit over relativiteitstheorie:

- Frank Verbunt, 'Albert Einstein', *Zenit* volume 6, maart 1979, p. 88.  
 Jos Stollman en Piet Hut, 'Zwaartekracht', *Zenit* volume 1, mei 1974, p. 518.  
 Jos Stollman en Piet Hut, 'Gekromde ruimte', *Zenit* volume 1, juni 1974, p. 620.

### De afbuiging van sterlicht aan de zonsrand

#### Voorspeld:

Equivalentieprincipe + Newton (Einstein 1911)	0'',87
Algemene relativiteitstheorie (Einstein 1915)	1'',749

#### Gemeten in 1919:

Principe-expeditie (Eddington)	1'',61 ± 0'',30
Sobral-expeditie (Davidson)	1'',98 ± 0'',12
10-cm kijker	
Greenwich astrograaf	0'',93 (verworpen)

#### Nieuwe uitwerking in 1979:

10-cm kijker	1'',90 ± 0'',11
Greenwich astrograaf	1'',55 ± 0'',34

## Kosmologie

Van de cursus 'Kolleges Sterrekunde voor Afgestudeerden' 1979 onder bovenvermelde titel is thans het boekje in druk verschenen en aan de deelnemers aan de cursus toegezonden.

Belangstellenden kunnen dit eveneens bestellen, en wel door overmaking van f 7,50 per boekje op: postgironummer 2900 van de AMRO Bank te Utrecht, onder vermelding van

nummer 456402055, ten name van Prof. Dr. C. de Jager.

Van de boekjes van de cursussen 1973 (Infrarood-sterrekunde), 1976 (Het Planetenstelsel) en 1978 (Gasstromen en Massaverlies van Zon en Sterren) is nog een beperkt aantal voorradig. De boekjes van 1973 en 1976 kosten f 3,50. Het boekje van 1978 kost f 5,-.