

'Ik geloof met Schopenhauer dat een der sterkste motieven die mensen tot kunst en wetenschap brengen is te ontsnappen aan het alledaagse leven met zijn pijnlijke ruwheid en zijn hopeloze saaiheid.'

Albert Einstein

Deze maand is het honderd jaar geleden dat Albert Einstein werd geboren: een van de grootste natuurkundigen die de geschiedenis heeft voortgebracht. Tot zijn belangrijkste bijdragen op dit gebied worden zijn speciale en de algemene relativiteitstheorie gerekend, waarmee tevens de grondslag werd gelegd voor de moderne kosmologie. Na zijn studie vervulde Einstein diverse functies in Zwitserland en Duitsland. In 1933 vertrok hij onder de dreiging van het nationaal-socialisme naar de Verenigde Staten, waar hij ging werken aan het Institute for Advanced Studies te Princeton. Ook als mens heeft Einstein bij velen een diepe indruk achtergelaten. Hij voelde zich sterk betrokken bij zaken die het welzijn van de mens betroffen en was geliefd om zijn eenvoud, integriteit en humor.

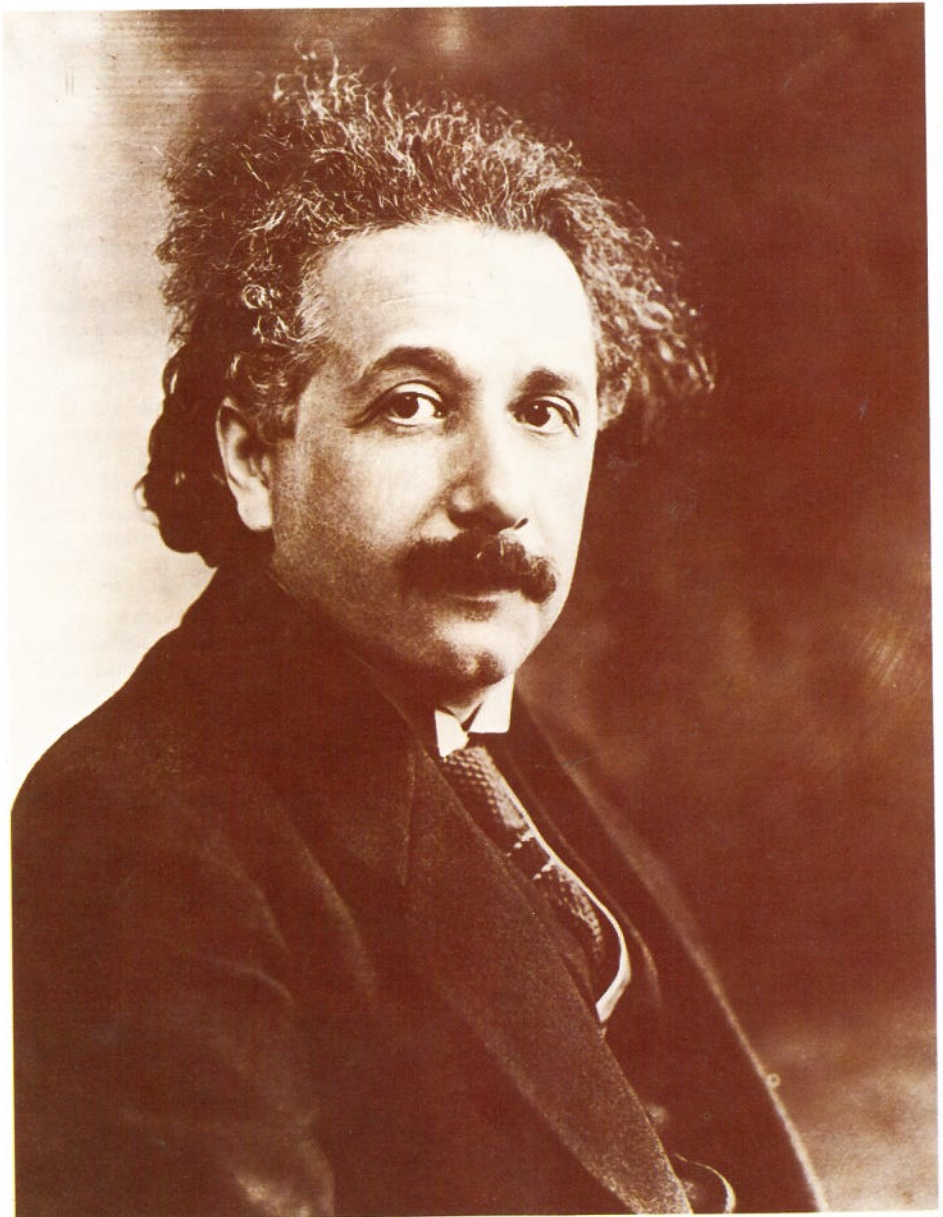
Het is nu moeilijk te geloven, maar aan het einde van de vorige eeuw dachten de natuurkundigen dat hun beeld van de wereld min of meer afgerond was. De twintigste eeuw bracht echter twee enorme omwentelingen in de natuurkunde, die resulteerden in de relativiteitstheorie en de quantummechanica (lit. 1). De eerste omwenteling was gedeels het werk van één man, die ook bij de andere omwenteling een zeer grote rol speelde: Albert Einstein. Sinds Newton is wellicht geen natuurkundige zo bekend geweest bij het grote publiek; Einstein begreep die belangstelling van het grote publiek voor zijn persoon evenmin als het grote publiek zijn theorieën. Een schaduwzijde van zijn beroemdheid is dan ook dat zijn naam en het begrip relativiteit door allerlei charlatans werden (en worden) misbruikt om wazig bijgeloof een wetenschappelijk tintje te geven (vergelijk lit. 2, p. 9 e.v.).

Een tak van wetenschap die sterk van de nieuwe natuurkundige theorieën profiteerde was de sterrenkunde: een veel beter inzicht in de inwendige bouw der sterren, en over de geschiedenis van het heelal is het gevolg geweest.

In het onderstaande zal ik eerst in grote lijnen de bijdragen van Einstein aan de quantummechanica en aan de relativiteitstheorie uiteenzetten, om vervolgens de invloed op de sterrenkunde te bespreken.

De quantummechanica

Aan het einde van de vorige eeuw won de



opvatting terrein dat de materie uit atomen bestaat. Die atomen dacht men als een soort kleine knikkers, zo klein dat men ze met het blote oog niet kan zien.

Er waren echter nog heel wat natuurkundigen die deze opvattingen niet deelden. In het derde van de vier artikelen die Einstein in 1905 in de *Annalen der Physik* publiceerde, beschreef hij een ingenieuze methode

Albert Einstein (1879-1955): 'Wanneer een blinde kever over het oppervlak van een bol kruipt, merkt hij niet dat de weg die hij aflegt gekromd is. Ik heb het geluk gehad dit wèl in de gaten te krijgen' (foto Yerkes Observatory).

om het bestaan van atomen indirect waar te nemen. Stel dat een stofdeeltje in een vloeistof zweeft. De vloeistof bestaat uit atomen die te klein zijn om gezien te worden, maar het stofdeeltje is net groot genoeg om door een microscoop waargenomen te worden. Er zullen voortdurend atomen van allerlei kanten tegen het stofdeeltje aanbotsen, waardoor het heen en weer wordt geslingerd en een tamelijk wanordelijke beweging uitvoert (fig. 1).

Einstein leidde de formule af die verband legt tussen de gemiddelde verplaatsing van het deeltje per tijdseenheid en het aantal atomen in de vloeistof. De door hem beschreven willekeurige bewegingen van stofdeeltjes in een vloeistof waren al waargenomen in 1828 door de Schotse botanicus Robert Brown, en Einsteins verklaring van dit verschijnsel overtuigde vele tot dan toe skeptische natuurkundigen, onder wie Ernst Mach, van de realiteit der atomen.

Werd de materie dus gezien als bestaand uit atomen, voor het licht had men de golftheorie van Young. De reden dat men het licht als een golf beschreef is de volgende. Wanneer we door twee spleten in een scherm knikkers schieten, zullen we zien dat de knikkers slechts op twee plaatsen recht achter de spleten op een tweede scherm terecht komen. Maar als we licht door twee (smalle) spleten sturen, zien we een afwisseling van een groot aantal lichte en donkere banden op het tweede scherm, waarbij dus blijkbaar ook licht komt op plaatsen die niet recht achter de spleten liggen (fig. 2 en 3). Thomas Young (1773-1829) liet zien dat dit verklaard kon worden door het licht op te vatten als een golf, hiermee voortbouwend op een oud idee van onze landgenoot Christiaan Huygens. Uit elk van beide spleten komt een ronde golf, en bij hun ontmoeting beïnvloeden beide golven elkaar, precies zoals golven in water dat doen. Deze wederzijdse beïnvloeding veroorzaakt het ontstaan van de banden op het tweede scherm.

Einstein bedacht dat licht door materie uitgestraald en opgevangen wordt, en begon zich af te vragen hoe een golf met een bolletje kan wisselwerken. Met de hem eigen intuïtie, was Einstein meteen tot de kern van het probleem doorgedrongen.

In het eerste van zijn vier artikelen uit 1905 liet Einstein zien dat het voor de verklaring van sommige verschijnselen handig is het licht toch als bestaande uit deeltjes te denken. Max Planck had in 1900 een formule opgesteld voor de hoeveelheid licht die een 'zwarte straler' bij elke golflengte uitzendt. (Een zwarte straler is in wezen een ondoorzichtige van binnen spiegelende doos met een klein gaatje in één wand. Zo'n gaatje ziet er van buiten donker uit, maar er komt wel degelijk straling uit die door de formule van Planck wordt beschreven.) Voor kleine golflengten bestaat een eenvoudiger formule die bijna goed is: de formule van Wien. Einstein

14 maart 1879

Geboorte van Albert Einstein te Ulm.

1880-1894

De familie Einstein verhuist naar München, waar Albert met grote tegenzin de lagere school en het gymnasium bezoekt. Hij doet veel aan zelfstudie in wis- en natuurkunde, en wordt hierdoor op 12-jarige leeftijd zeer anti-religieus. Nadat zijn familie naar Milaan is verhuisd, verlaat hij het gymnasium te München zonder diploma, en reist een jaar rond in Italië. Uit afkeer van het Duitse militarisme vraagt hij de Zwitserse nationaliteit aan.

1895-1900

Einstein zakt voor het toelatingsexamen van het Polytechnisch Instituut te Zürich, gaat op aanraden van de directeur van dit instituut een jaar naar een progressief Gymnasium te Aarau, haalt zijn diploma, en wordt dan alsnog toegelaten. Zijn belangstelling voor de colleges is minimaal: vlak voor de examens bestudeert hij de college-aantekeningen van zijn vriend Grossmann. Einstein besteedt met graagte tijd aan niet verplichte onderwerpen, o.a. de theorie van het electromagnetisme van Maxwell, maar gruwt van de verplichte examens: 'Het is een ernstige vergissing te menen dat de vreugde van het zien en zoeken door dwang en plichtsgevoel bevorderd kan worden.'

1900-1905

De professoren hebben een even grote hekel aan de lastpost Einstein als hij aan hun onderwijsmethoden. Einstein solliciteert tevergeefs naar een universitaire baan, en vindt uiteindelijk werk als klerk bij het octrooibureau te Bern. In tussentijd werkt Einstein aan zijn natuurkundige theorieën, en in 1905 vestigt hij voorgoed zijn naam met vier artikelen in het leidende Duitse tijdschrift *Annalen der Physik*.

1906-1918

Einstein wordt docent aan de universiteit te Bern en vervolgens tevens enkele jaren professor te Zürich en in Praag. Op congressen in Brussel en Salzburg maakt hij kennis met de beroemde natuurkundigen uit die tijd. Hij werkt aan zijn algemene relativiteitstheorie, o.a. samen met Grossmann. In 1914, inmiddels hoogleraar in Berlijn, neemt hij openlijk stelling

tegen de Duitse oorlogspropaganda. In 1915 publiceert hij de algemene relativiteitstheorie.

1919-1932

Na de observationele bevestiging van de buiging van sterlicht door de zon is Einstein op slag beroemd bij het grote publiek. Met lezingen aan universiteiten in o.a. Engeland, de V.S. en Frankrijk draagt hij bij aan het naoorlogse herstel van wetenschappelijk en diplomatiek contact.

Einstein vat sympathie op voor de Zionistische beweging. Hij voert vele discussies met collega's, o.a. Bohr, over de interpretatie van de nieuwe quantumtheorie. In Duitsland steekt het antisemitisme steeds sterker de kop op, en op zeker moment worden de 'Joodse' theorieën van Einstein verboden.

1933-1955

Als Hitler aan de macht komt besluit Einstein naar de V.S. te emigreren. Amerikaanse huisvrouwen protesteren tegen de toelating van deze 'communist'. Verboden aan het Institute for Advanced Studies te Princeton werkt hij de rest van zijn leven (zonder veel succes) aan een theorie die zowel de zwaartekracht als de electromagnetische krachten omvat.

In W.O. II wijst hij samen met Szilard en Teller president Roosevelt op de mogelijkheid dat de Nazi's een atoombom kunnen maken: Hierop gaan de V.S. er zelf een ontwikkelen.

In 1952 hoort hij dat zijn theorieën in de Sovjet Unie verboden zijn en schrijft daarom een bijtend gedicht (zie kader op volgende pagina).

Hij protesteert tegen de communistenjacht onder McCarthy, en stelt samen met de Engelse filosoof/wiskundige Russell een manifest op dat oproept tot wetenschappelijke samenwerking tussen het Oostblok en het Westen om een einde aan de koude oorlog te maken.

In de Pugwash-beweging gaan wetenschappers uit beide blokken inderdaad over samenwerking praten.

18 april 1955

Einstein overlijdt te Princeton.

Litteratuur: B. Hoffmann; Albert Einstein, *Creator and Rebel*; Viking Press, New York, 1972.

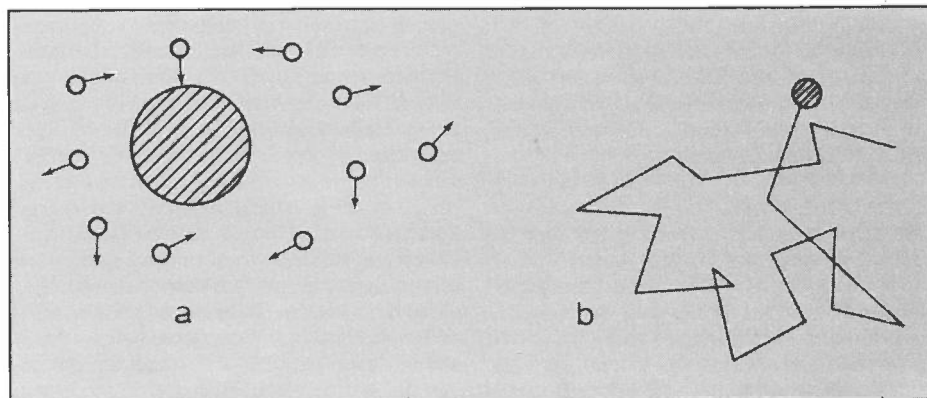


Fig. 1. De Brownse beweging. a. het stofdeeltje tussen de vloeistofatomen. b. de wanordelijke beweging van het stofdeeltje, zoals gezien door een microscoop.

Fig. 2. De golftheorie van het licht. a. knikkers bereiken het tweede scherm recht achter de spleten. b. licht geeft aanleiding tot een bandenpatroon.

liet zien dat deze formule er sterk op wijst dat licht uit losse deeltjes bestaat, elk met een eigen energie die omgekeerd evenredig is met de golflengte bepaald. Met dit idee kon hij een verklaring van het *fotoëlectrisch effect* geven: als licht op een metaal oppervlak valt, kunnen er elektronen vrijkomen met een energie die van de golflengte van het opvallend licht afhangt maar alleen als de golflengte van het licht voldoende klein is. Einstein verklaarde dit door te stellen dat een lichtdeeltje dat het metaal inkomt, zijn energie aan één van de vele in het metaal aanwezige elektronen afgeeft, dat dan kan ontsnappen. Omdat de energie van het lichtdeeltje van de golflengte afhangt, hangt de energie van het vrijkomend elektron daar evenzo vanaf en er is een bepaalde minimum energie nodig om een elektron vrij te maken. Voor deze verklaring van het fotoëlectrisch effect zou Einstein later (in 1921) de Nobelprijs krijgen.

In 1913 publiceerde de Deense natuurkundige Niels Bohr een theorie die de uitzending en vangst van lichtdeeltjes door een atoom beschrijft. Een atoom bestaat uit een kern waaromheen elektronen kunnen rondlopen, maar alleen in banen met bepaalde energieën. Wanneer een elektron uit een baan met hoge energie (een 'hoge' baan) overspringt naar een baan met lage energie (een 'lage' baan), wordt er een lichtdeeltje uitgezonden met een energie die gelijk is aan het energieverschil tussen de hoge en de lage baan (fig. 4). Andersom kan een elektron in een lage baan naar een hogere baan springen als het een lichtdeeltje met de juiste energie vangt. Einstein leidde uit dit idee van Bohr op een heel eenvoudige wijze de wet van Planck af, door te stellen dat er een bepaalde waarschijnlijkheid is dat een elektron in een hoge baan spontaan een lichtdeeltje uitzendt en naar een lage baan daalt, terwijl een andere waarschijnlijkheid de kans aangeeft dat een elektron in een lage baan een lichtdeeltje van de juiste golflengte vangt om omhoog te komen. Einstein liet zien dat bovendien de aanwezigheid van lichtdeeltjes elektronen in een hoge baan ertoe kan brengen een lichtdeeltje uit te zenden. Dit verschijnsel wordt *gestimuleerde emissie* genoemd, en de constanten die de verschillende overgangswaarschijnlijkheden geven, heten tegenwoordig de *Einstein-constanten*.

In 1924 vertaalde Einstein een artikel van de Indische natuurkundige Satyendra Nath Bose, die op statistische wijze de formule van Planck afleidde uit de onderstelling dat licht uit deeltjes bestaat.

Zo was gebleken dat sommige eigenschappen van het licht weliswaar goed met de golftheorie verklaard kunnen worden, maar andere juist met de deeltjeshypothese. Blijkbaar heeft licht zowel iets weg van een golf als van een deeltje. Einstein vroeg zich af of dit voor de materie ook zou gelden, en wees bij zijn vertaling van het artikel van Bose op

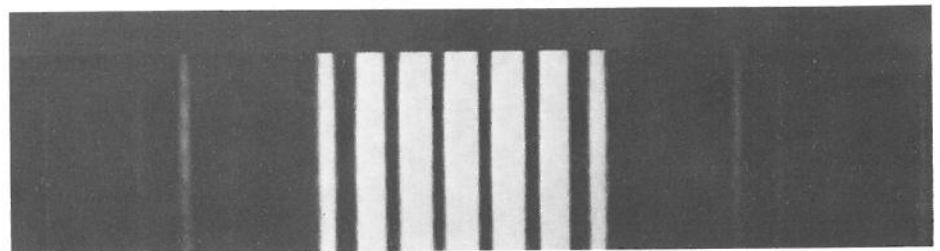
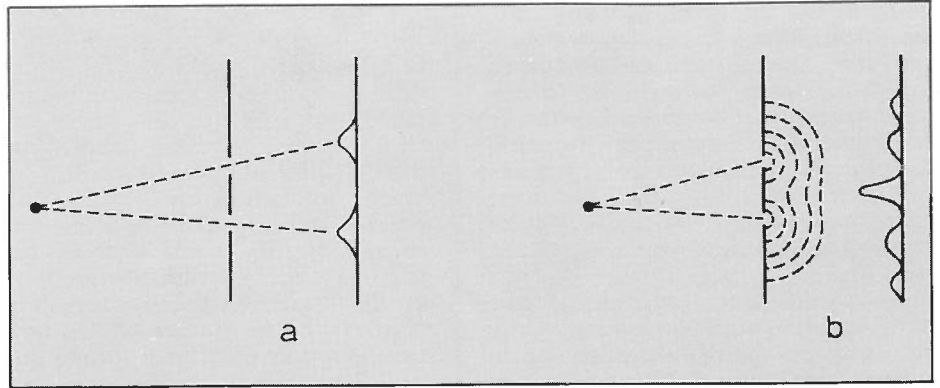


Fig. 3. Het bandenpatroon van figuur 2b. (Uit: Longhurst, *Geometrical and Physical Optics*).

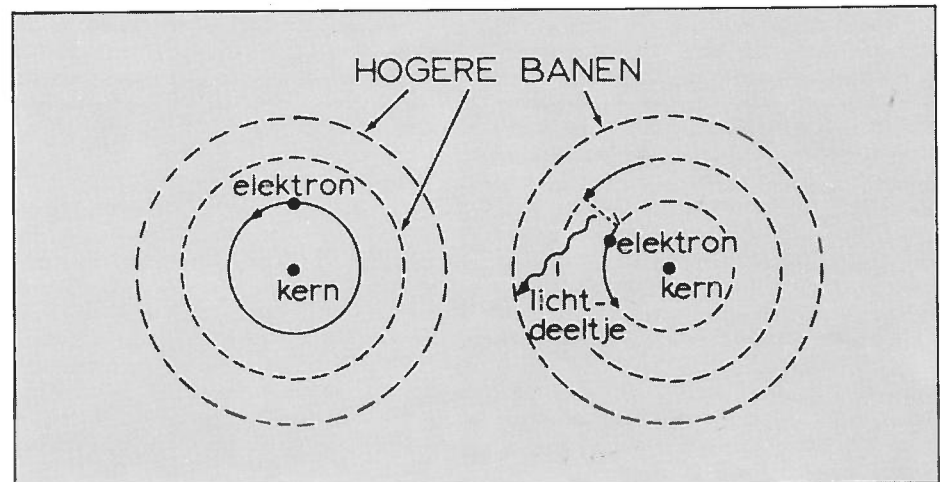


Fig. 4. Het uitzenden van een lichtdeeltje volgens Bohr.

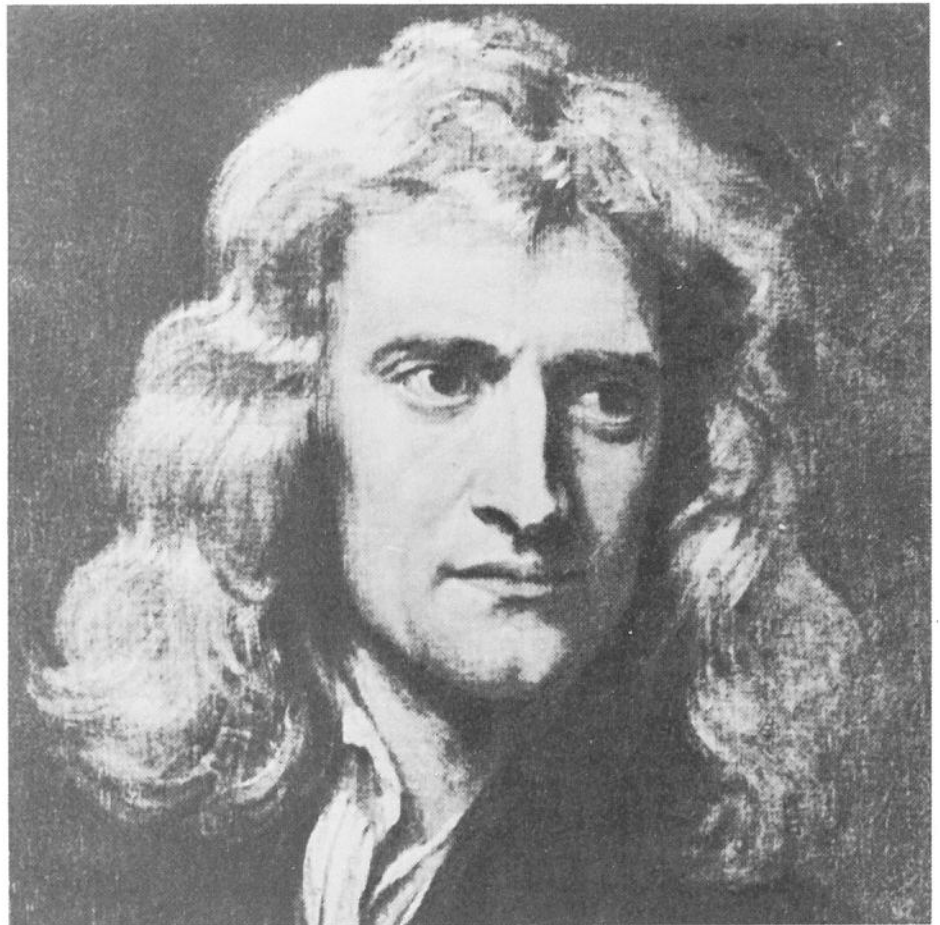
een idee van de Fransman Louis-Victor De Broglie om aan materiedeeltjes een golflengte toe te kennen. Dit idee van de Broglie werd later bevestigd in een experiment, dat er op neer komt dat elektronen die met voldoende lage snelheid door twee spleten (als in figuur 2) gezonden worden, op soortgelijke plaatsen op het tweede scherm terecht komen als licht, en eenzelfde bandenpatroon veroorzaken. We zitten dus met de situatie dat licht en materie zowel op golven als op kleine knikkers lijken. In de twintiger en dertiger jaren werd door o.a. Niels Bohr, Erwin Schrödinger en Werner Karl Heisenberg de theorie opgesteld, die dit tweeledige karakter van licht en materie beschrijft. Essentieel aan deze quantummechanica (en direct met het golfkarakter van deeltjes verbonden) is dat we een gebeurtenis nooit met zekerheid kunnen voorspellen, maar alleen de *waarschijnlijkheid* kunnen aangeven dat iets gebeurt: bij een elektron in een

Wijsheid van het Dialektisch Materialisme

Met zweet en inspanning zonder gelijke
Een graantje waarheid te bereiken?
Alleen een gek put zich zo uit
Wij nemen gewoon een partijbesluit.

En wie dan nog te twijfelen wagen
Wordt fluks de schedel ingeslagen.
Ja zo wordt als nooit tevoren,
Van koene geesten de harmonie geboren.

Isaac Newton (1643-1721) wordt beschouwd als de belangrijkste natuurkundige van de 17e eeuw. Zijn wetten van de zwaartekracht zouden later door Einstein worden verfijnd en uitgebreid (schilderij uit 1689).



hoge baan bijvoorbeeld is er een kans dat hij naar een lagere baan terugvalt (gegeven door de Einsteinconstante), maar er is ook een eindige kans dat hij dit niet doet. Deze rol van het toeval zat Einstein behoorlijk dwars, en hij meende dat we hier met een tijdelijk onvolkomenheid van de theorie te maken hebben: 'God dobbelt niet', zei hij. Met zijn voortdurende kritiek op dit aspect heeft hij sterk bijgedragen tot de nauwkeurige formulering van de quantummechanische theorieën.

Spinoza

De situatie dat materie zowel een golf- als een deeltjeskarakter heeft, en dat het van de manier van kijken afhangt welk karakter waargenomen wordt, doet denken aan de gedachten van de in Nederland woonachtige filosoof Baruch de Spinoza (1632-1677) over de mens. Bij de mens hebben we de tegenstelling van lichaam en geest. De Christelijke leer stelt dat het lichaam uit materie bestaat, en dat de niet materiële geest hieraan wordt toegevoegd. Spinoza vond het een onverteerbaar idee dat de mens uit twee zo verschillende stukken zou bestaan, en stelde voor dat een enkele substantie beide eigenschappen in zich herbergt. Uit deze substantie is de hele wereld opgebouwd.

Einstein had een grote bewondering voor Spinoza, en noemde hem 'een van de diepste en zuiverste geesten die ons Joodse volk heeft voortgebracht'. Misschien mag men daarom zeggen dat zoals Spinoza de tegenstelling geest-materie oploste door een onderliggende eenheid aan te nemen, Einstein op zoek was naar de eenheid die onder de tegenstelling golf-deeltje verborgen ligt.

De relativiteitstheorie

Zoals boven uiteengezet speelde het nadenken over licht voor Einstein een grote rol bij de totstandkoming van de quantummechanica. We zullen zien dat dit ook voor de ontwikkeling van de relativiteitstheorie geldt. Stelt u zich eens voor dat u op de fiets met een snelheid van 20 km/uur een vervelende knaap tegemoet rijdt, die een sneeuwbal met een snelheid van 30 km/uur naar u gooit: u zult de sneeuwbal met een snelheid van 50 km/uur zien naderen (fig. 5). Maar wanneer u de jongen met een snelheid van 200.000 km/s tegemoet snelt (flink doortrappen!), en hij u een lichtdeeltje toegooit met een snelheid van 300.000 km/s, dan zult u dit licht *niet* met een snelheid van 500.000 km/s op u af zien komen, maar 'slechts' met 300.000 km/s. Dat is bijzonder vreemd! De snelheid waarmee u fietst, doet dus niet terzake: als u sneller of langzamer gaat, zult u 300.000 km/s als lichtsnelheid blijven meten.

De Amerikaanse natuurkundigen Michelson en Morley deden in 1887 een beroemd

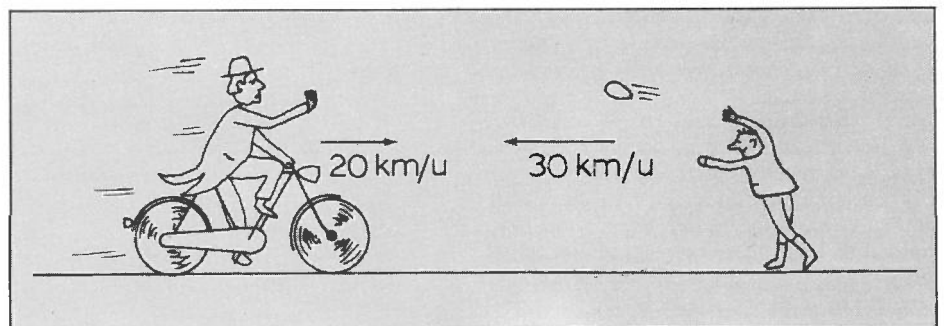


Fig. 5. Het optellen van snelheden.

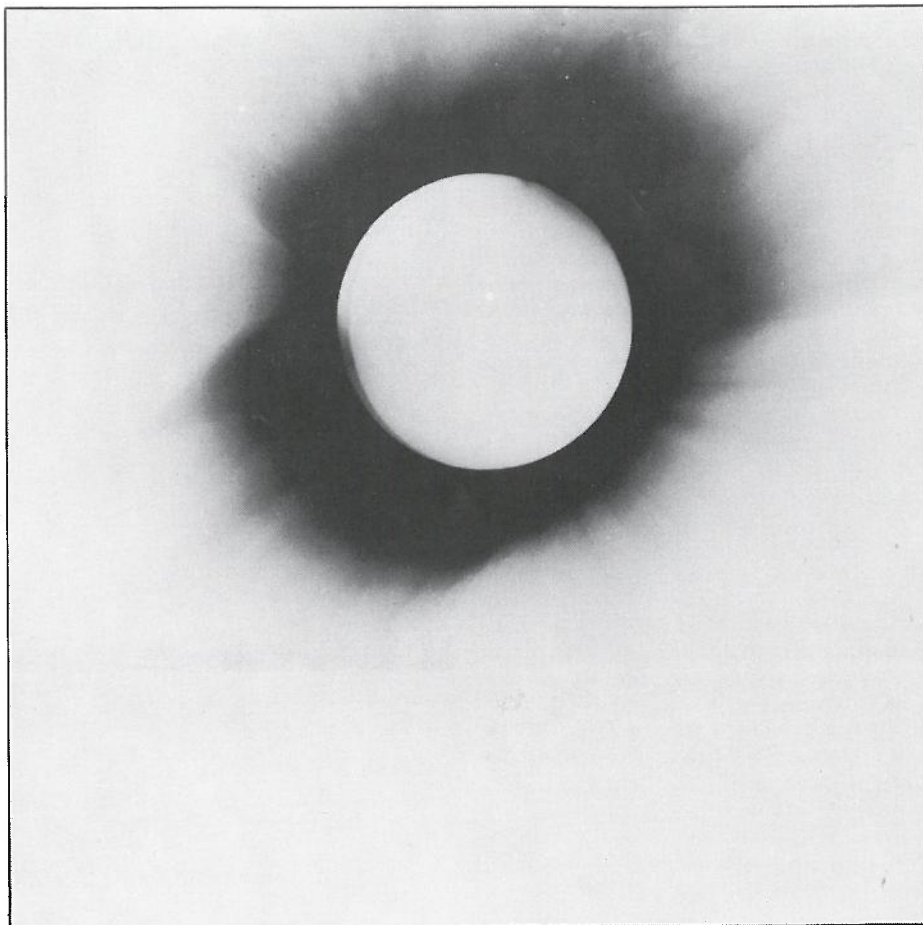
Een vergeten voorspelling

Einstein was niet de eerste die voorspelde dat een lichtstraal die dicht langs de zon beweegt enigszins wordt afgebogen. Dit werd o.a. al verondersteld door de Duitse wiskundige en geodeet Johann Georg Soldner (1776-1833), directeur van de sterrenwacht te Bogenhausen. In 1801 publiceerde hij in J. E. Bode's *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1804* een artikel over 'de afwijking van een lichtstraal van zijn rechtlijnige beweging, door de aantrekking van een hemellichaam waaraan hij op korte afstand voorbij scheert'. Soldner berekende die versnelling van lichtdeeltjes, die hij beschouwde als materiedeeltjes, van een lichtstraal die rakelings langs de zon beweegt. Hij vond dat

het licht 1",68 van zijn rechte weg werd afgebogen. Soldner merkte daarbij echter op, dat sterren helaas niet bij de zon kunnen worden waargenomen; de mogelijkheid van het waarnemen tijdens een totale eclips kwam blijkbaar niet bij hem op. Soldners publicatie had helaas geen invloed op de ontwikkeling van de wetenschap in zijn tijd. Einstein kende hem niet en referenties naar hem zijn zeer spaarzaam. Een reden temeer om hem in deze Einstein-maand uit de vergetelheid te halen. Een volledige vertaling in het Engels van Soldner's artikel is door Stanley L. Jaki gepubliceerd in *Foundations of Physics* 8 (1978), p. 927-950.

(G.B)

De totale zonsverduistering van 29 mei 1919, waargenomen te Sobral in het noorden van Brazilië. De eclipsexpeditie stond onder leiding van de Britse astronoom Arthur Stanley Eddington en leverde het bewijs van de door Einstein voorspelde afbuiging van sterlicht nabij de rand van de zon (foto Royal Greenwich Observatory).



experiment, waaruit deze onverwachte eigenschap van het licht bleek. Einstein had een eigen reden om dit te vermoeden: de theorie van Maxwell, die de elektrische en magnetische verschijnselen beschrijft, bevat de lichtsnelheid als een constante. In principe is het mogelijk dat deze constante voor een bewegende waarnemer een andere waarde heeft. Newton had al opgemerkt dat absolute beweging niet waar te nemen is maar alleen een beweging ten opzichte van iets anders. Ieder heeft op het station wel eens de ervaring gehad te denken dat de eigen trein gaat rijden om even later te ontdekken dat het de trein er naast was die ging rijden. Het leek Einstein ongeloofwaardig dat een zo fundamentele constante als de lichtsnelheid af zou hangen van een onmogelijk te bepalen absolute beweging. Onze landgenoot Lorentz had al laten zien wat de consequenties van een werkelijk constante lichtsnelheid zouden zijn (Lorentz-transformaties).

Snelheid is afstand gedeeld door tijd, en als de snelheid van het licht voor de snelrijdende fietser anders is dan we zouden verwachten, betekent dit dat afstand en tijd voor hem anders zijn dan we zouden verwachten. Door hierover goed na te denken liet Einstein zien dat afstanden voor deze fietser korter lijken en de klok langzamer loopt dan voor de kwajongen, die de sneeuwbal gooit. Maar volgens de redenering van Newton kunnen we alleen onderlinge snelheid meten, en kunnen we met evenveel recht zeggen dat de kwajongen beweegt ten opzichte van de fietser: dan zijn de afstanden voor de jongen korter en loopt zijn horloge langzamer! Einstein toonde aan dat dit inderdaad zo is en dat de tegenspraak wordt opgeheven doordat het begrip 'gelijktijdigheid' voor verschillende waarnemers' niet te definiëren valt.

Dit volgt uit een gedachtenproef die als volgt gaat: een man bevindt zich in het midden van een trein en doet een flitslamp aan. Het licht beweegt zich even snel naar de voorkant als naar de achterkant, en de passagier ziet het beide kanten op hetzelfde moment bereiken (fig. 6). Nu heeft de trein een grote snelheid ten opzichte van iemand anders buiten de trein. Deze persoon ziet het licht ook met even grote snelheid naar beide kanten bewegen, maar omdat de trein beweegt, ziet hij het licht aan één kant eerder aankomen (fig. 7). Wat voor de persoon in de trein gelijktijdig is, is het niet voor de persoon buiten! Door dit soort gedachtenproeven te doen leidde Einstein af wat er met afstand en tijd gebeurt voor waarnemers die een relatieve snelheid hebben, en kon hij de natuurwetten zo formuleren dat hiermee rekening wordt gehouden. Ook de Lorentz transformaties konden nu worden



Fig. 6. Lichtproef in een trein. ~~Men denke zich de wietjes wrijvingsloos.~~

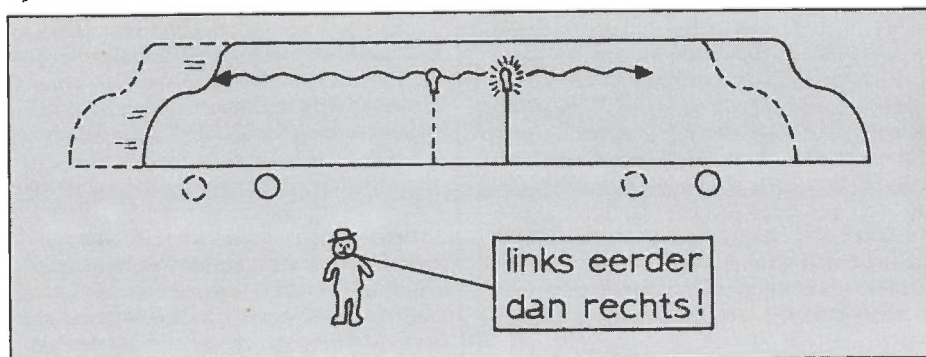


Fig. 7. Dezelfde lichtproef gezien van buiten de trein.

Het Polytechnisch Instituut te Zürich, waar Albert Einstein van 1896-1900 wiskunde en natuurkunde studeerde en van 1912-1914 hoogleraar theoretische natuurkunde was (foto ETH Zürich).

begrepen, terwijl de equivalentie van energie en massa werd aangetoond.

In zijn vierde artikel in de *Annalen der Physik* van 1905 publiceerde hij deze zogenaamde *Speciale Relativiteitstheorie*. De veranderingen in allerlei natuurwetten die optreden worden speciaal-relativistische effecten genoemd, en deze effecten worden groter naarmate de onderlinge snelheden dichter in de buurt van de lichtsnelheid komen: daarom zijn ze in het dagelijks leven niet merkbaar. Maar wanneer we in het laboratorium deeltjes een zeer grote snelheid geven worden deze effecten wel merkbaar, en beantwoorden ze precies aan de voorspellingen van de relativiteitstheorie. Vandaar dat de speciale relativiteitstheorie een basistheorie voor de moderne natuurkunde is.

Zware en trage massa

Einstein had zo het probleem van de constante lichtsnelheid voor waarnemers met een onderlinge snelheid opgelost, en ging nu verder. Wat gebeurt er als de onderlinge snelheid verandert? Voor de beantwoording van deze vraag moeten we ons eerst met het begrip *massa* bezig houden. We weten uit dagelijkse ervaring dat het gemakkelijker is lichte dingen van snelheid te laten veranderen dan zware: zo kan men gemakkelijker een klein kistje met lood van snelheid laten veranderen dan een grote kist. We vinden dit heel gewoon, maar Newton zag als eerste in dat het héél raar is. Want wat is zwaarte? Zwaarte is de kracht waarmee iets door de aarde wordt aangetrokken: de grote kist wordt door de aardse zwaartekracht sterker aangetrokken dan de kleine, en we duiden dit aan door te zeggen dat de *zware massa* van de grote kist groter is dan die van de kleine. Maar het in beweging brengen van iets heeft in principe niets met zwaartekracht te maken: wanneer we met de kisten in een satelliet om de aarde gaan zitten, zodat ze allebei gewichtloos zijn, kost het nog altijd meer moeite de grote een snelheid te geven dan de kleine. We drukken dit uit door te zeggen dat de *trage massa* van de grote kist groter is dan die van de kleine. Omdat zware massa en trage massa dus twee verschillende eigenschappen van materie beschrijven, (namelijk de zwaartekracht die er op uitgeoefend wordt en de mate waarin zij zich tegen snelheidsverandering verzet), is het zeer verwonderlijk dat ze aan elkaar gelijk zijn. Deze gelijkheid vermoeden we al door de ervaring dat lichte dingen gemakkelijker in beweging te brengen zijn, en ze is precies af te leiden uit het feit dat de zware en de lichte kist, tegelijk van een toren geworpen ook tegelijk op de grond terecht komen. De aarde trekt namelijk wel sterker aan de zware kist dan aan de lichte, maar de zware kist laat zich ook minder gemakkelijk in beweging brengen dan de lichte, en deze twee effecten heffen elkaar precies op! Einstein was de eerste natuurkundige die

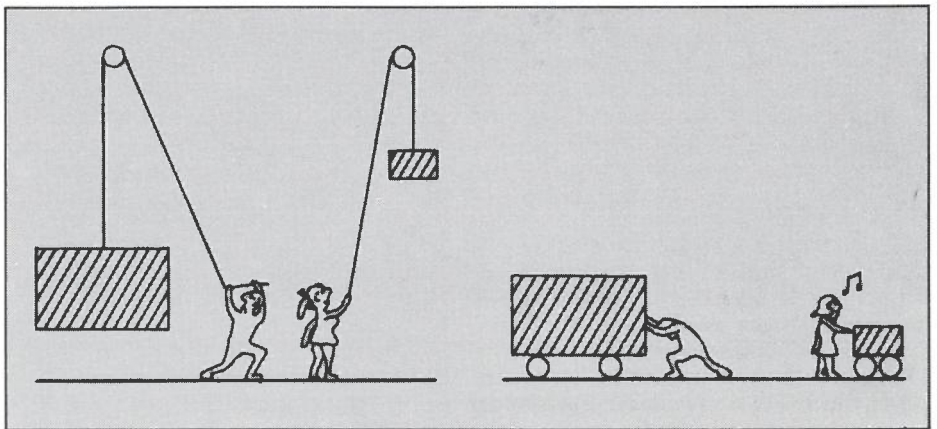
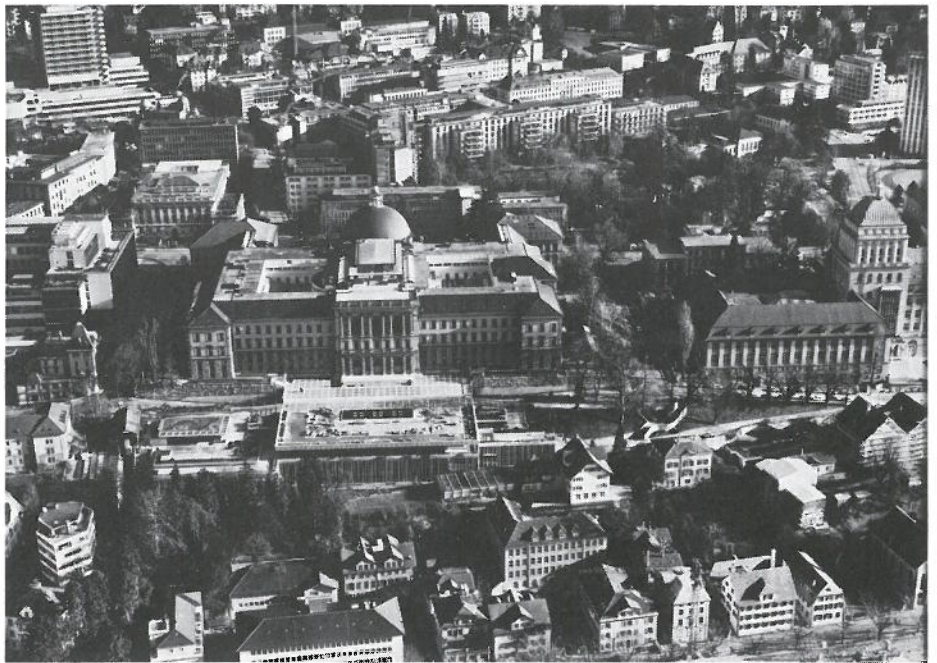


Fig. 8. Een grote kist is niet alleen moeilijker op te tillen dan een kleine, maar ook moeilijker in beweging te brengen. Men denke zich de wieltes wrijvingsloos.

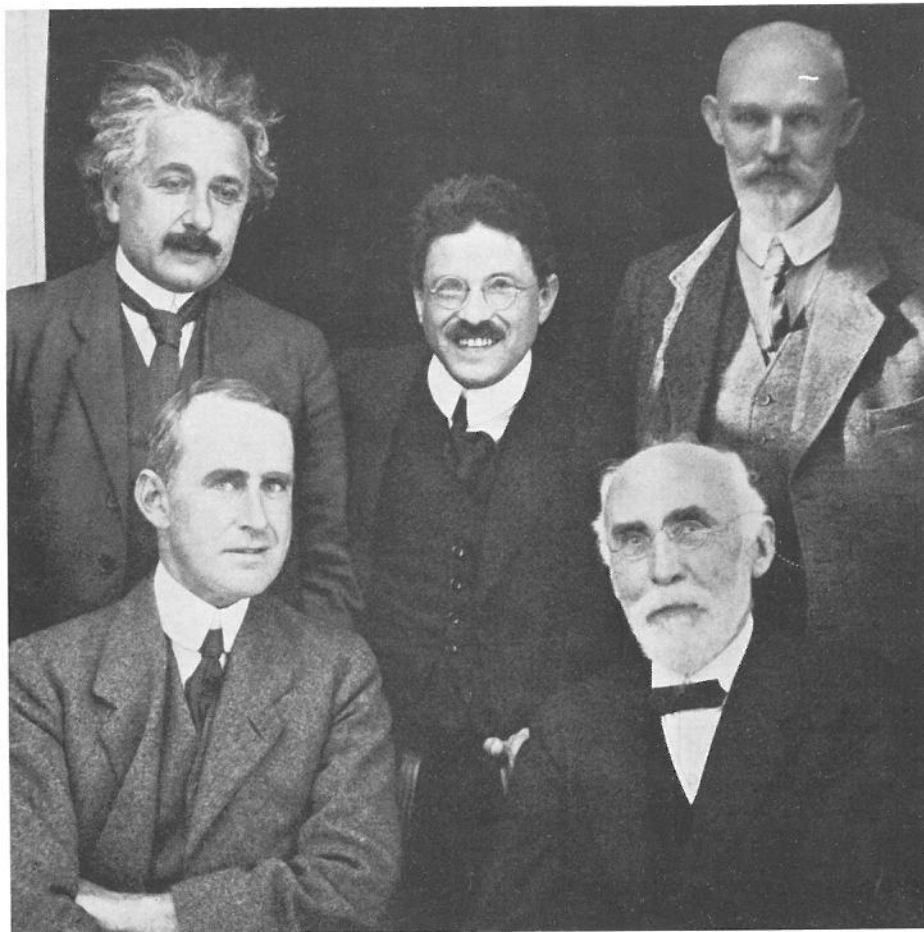
zich hierover niet alleen verbaasde, maar het ook begreep. Wanneer alle voorwerpen zich evenzeer verzetten tegen versnelling als aangetrokken worden door de zwaartekracht, moeten versnelling en zwaartekracht aspecten van één en hetzelfde verschijnsel zijn. Ook dit kunnen we ons wel enigszins voorstellen, want wanneer we in een lift staan die naar boven versnelt voelen we ons zwaarder worden. Einstein ging nu op zoek naar een nieuwe zwaartekrachtstheorie, uitgaande van het principe van de gelijkheid van trage en zware massa. Dit principe wordt het *equivalentieprincipe* genoemd. Omdat versnelling evenals snelheid een grootte is die we bepalen uit afstand en tijd, komt het equivalentieprincipe er op neer dat afstand en tijd beïnvloed worden door de aanwezigheid van zwaartekracht. Bij zijn pogingen om deze invloed te beschrijven raakte Einstein binnen de kortste keren verzeild in zeer moeilijke wiskundige problemen. Deze problemen waren dezelfde die wiskundigen als Gauss, Bolyai, Lobachevski en Riemann waren tegengekomen bij hun bestudering van gekromde ruimten. In gekromde ruimten zijn afstanden anders dan we gewend zijn.

Daarom krijgen we vervorming van afstanden wanneer we van het aardoppervlak – dat is immers krom – op een vlak vel papier een tekening gaan maken. Omdat Einstein bij de afleiding van de speciale relativiteitstheorie al had laten zien dat afstand en tijd onverbreekelijk gekoppeld zijn, moest hij deze ook samen bestuderen in een gekromde afstand-tijd-ruimte. Samen met zijn vriend Marcel Grossmann bestudeerde hij de nodige wiskunde, en verder liet hij zich leiden door de wetenschap dat de theorie van Newton in het algemeen een heel goede beschrijving van de zwaartekracht geeft. Na jarenlang ploeteren was het dan in 1915 zover dat Einstein zijn resultaten publiceerde in de vorm van de *Algemene Relativiteitstheorie*.

Drie tests mogelijk

Einstein paste zijn nieuw gevonden theorie toe op het zonnestelsel en vond naar verwachting in grote lijnen de resultaten van Newton terug. Maar hij vond ook een aantal nieuwe resultaten, bekend als de periheliumbeweging, de afbuiging van sterlicht, en de gravitationele roodverschuiving. ►►

Vijf beroemdheden tijdens een bespreking in de werkkamer van De Sitter te Leiden in september 1923. Van links naar rechts staand: Einstein, Ehrenfest en De Sitter; zittend: Eddington en Lorentz. Toen deze laatste zijn professoraat in Leiden neerlegde, had men Einstein wel als opvolger willen hebben. Deze wilde echter zijn hoogleraar-schap in Berlijn niet opgeven en liet zich daarom benoemen tot buitengewoon hoogleraar. Jarenlang reisde hij geregeld tussen Berlijn en Leiden heen en weer (foto Leidse Sterrewacht).



We zullen dit nader bekijken. Wanneer er maar een enkele planeet was bij de zon, zou deze volgens Newton in een mooie ellips lopen. Vanwege de aanwezigheid van andere planeten echter verplaatst het punt waar de planeet het dichtst bij de zon komt, het perihelium, zich langzaam en krijgen we een rozetbeweging (fig. 9). In de 19e eeuw had de Engelse sterrenkundige Simon Newcomb zich aan de rekentafel gezet en met groot geduld en grote nauwkeurigheid uit de vergelijkingen van Newton de *periheliumbeweging* voor Mercurius berekend. Het resultaat dat hij vond kwam aardig in de buurt, maar klopte toch niet precies met de waarnemingen. Einstein kon laten zien dat met de algemene relativiteitstheorie het verschil precies verklaard kon worden! (lit. 3 p. 400; 4 p. 300).

De volgende test was de *afbuiging van sterlicht* door de zon: wanneer het licht van een ster ons vlak langs de zon lopend bereikt, zal het volgens de algemene relativiteitstheorie enigszins gebogen worden (fig. 10). Daarvoor lijkt de ster ^{T vander van} ~~lichter~~ bij de zon te staan. Omdat we sterren in de richting van de zon alleen tijdens een zonsverduistering kunnen zien en fotograferen, werden in 1919 verschillende expedities uitgerust om van de zonsverduistering van dat jaar gebruik te maken om dit effect te meten. De eerste resultaten van de Engelse astronoom Arthur Stanley Eddington wezen erop dat de voorspelling van Einstein voor de plaatsverandering van sterren precies juist was, en men liet dit Einstein weten. Het verhaal gaat dat hij toen glimlachte, en zei: 'Ach, ik zou ook heel verbaasd zijn geweest als het niet zo was.' Nadere uitwerking van de gegevens toonde echter aan dat de waarnemingsresultaten vrij onzeker waren. Dit mag geen verbazing wekken als men bedenkt dat bijvoorbeeld op de foto's van de Canadese expeditie de door Einstein voorspelde verplaatsing van het sterbeeld een tweehonderdste millimeter was! (lit. 3, p. 393)

Nog onduidelijker waren de resultaten van de derde test: Einstein voorspelde dat de *golflengte van spectraallijnen* van de zon iets groter zou zijn dan de in een laboratorium gemeten golflengte. Dit effect is echter heel klein en veel grotere soortgelijke effecten worden veroorzaakt door de beweging van het gas op de zon (Dopplerverschuiving). Omdat we de beweging van het gas op de zon niet nauwkeurig genoeg weten, is onmogelijk na te gaan of de door Einstein voorspelde afwijking inderdaad bestaat.

Ondanks deze wat teleurstellende resultaten was de waardering voor de algemene relati-

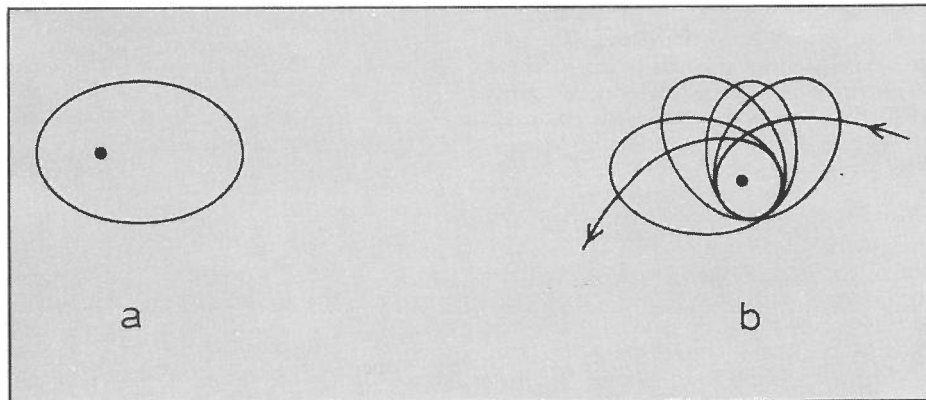


Fig. 9. De periheliumbeweging. a. de ellipsbaan van een enkele planeet. b. de rozetbeweging van een planeet die door de aanwezigheid van andere planeten gestoord wordt. (De slagen liggen in werkelijkheid veel dichterbij elkaar dan hier getekend).

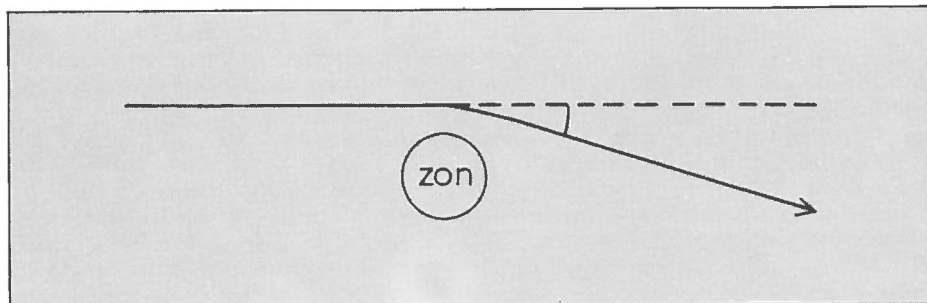


Fig. 10. De afbuiging van sterlicht door de zon (sterk overdreven getekend).

In de jaren 1920/24 werd bij de sterrenwacht te Potsdam (bij Berlijn) deze zonnetelescoop gebouwd, de Einsteintoren, om de door hem voorspelde roodverschuiving van lijnen in het zonnespectrum te meten. In de koepel van het expressionistische gebouw bevindt zich een coelostaatspiegel, die het zonlicht vertikaal omlaag richt. Onderin het gebouw wordt het zonlicht d.m.v. twee spectrografen onderzocht. Genoemde verschuiving bleek echter volledig door de beweging van het zonnegas te worden versluierd (foto Zentralinstitut für Astrophysik).

viteitstheorie tamelijk groot: vanwege de verklaring van de periheliumbeweging van Mercurius, vanwege het aanvankelijk enthousiasme over de juiste voorspelling over de afbuiging van sterlicht, maar bovenal toch vanwege de zeer fraaie wiskundige vorm en de even fraaie toepassing van het equivalentieprincipe. Tegenwoordig stellen verbeterde technieken ons in staat de drie tests (soms in wat gewijzigde vorm) veel nauwkeuriger uit te voeren, en nog steeds kloppen de metingen binnen de meetfouten met de theorie.

De bouw van sterren

De quantummechanica en de speciale relativiteitstheorie hadden tot gevolg dat de sterrenkundigen veel meer gingen begrijpen van het inwendige van sterren. Het was al lang een probleem waar de sterren de energie vandaan halen die ze zo kwistig uitstralen. Als de zon helemaal uit steenkool zou bestaan, zou hij al in 1300 jaar opgebrand zijn bij de hoeveelheid licht die hij nu uitstraalt. De zon bestaat natuurlijk al veel langer en moet zijn energie dus ergens anders vandaan halen. Eddington stelde in 1926 voor dat de zon in zijn binnenste op een of andere manier waterstofkernen samsmelt tot heliumkernen. Om één heliumkern te maken zijn vier waterstofkernen en twee elektronen nodig, maar een heliumkern weegt minder dan vier waterstofkernen en twee elektronen. Volgens de speciale relativiteitstheorie zijn massa en energie gelijkwaardig, en Eddington berekende dat de zon 10 miljard jaar kan stralen als op een of andere manier dit massaverschil als energie vrijkomt (lit. 4, p. 427). Aan het eind van de dertiger jaren gaf de Amerikaan Hans Albrecht Bethe een gedetailleerde beschrijving van de samsmeltingsprocessen van de kernen die voor de energieproductie van sterren verantwoordelijk zijn.

Niet alleen tot de kennis van het binnenste van sterren droeg de nieuwe natuurkunde bij, maar ook tot die van de buitenkant. In de buitenlaag worden immers de spectraallijnen gevormd, de donkere lijnen die we zien als het licht van een ster met een prisma in een kleurenband wordt uiteengerafeld. Met het atoommodel van Bohr werd het duidelijk hoe deze lijnen gevormd worden, en soortgelijke redeneringen als die Einstein volgde om uit Bohr's model de wet van Planck af te leiden spelen nog altijd een grote rol bij het afleiden van de fysische toestand van het gas in de buitenlagen van de zon uit de vorm van de spectraallijnen.



Storm rond standbeeld

In Washington is een storm van protesten opgestoken naar aanleiding van het voorstel van de National Academy of Sciences om een standbeeld van Albert Einstein op te richten. Het zes meter hoge beeld zou worden gemaakt door Robert Berks en tezamen met zijn sokkel 1,5 miljoen dollar gaan kosten. Verscheidene fysici hebben erover geklaagd dat het onjuist zou zijn zo'n beeld op te richten in een tijd waarin er op het weten-

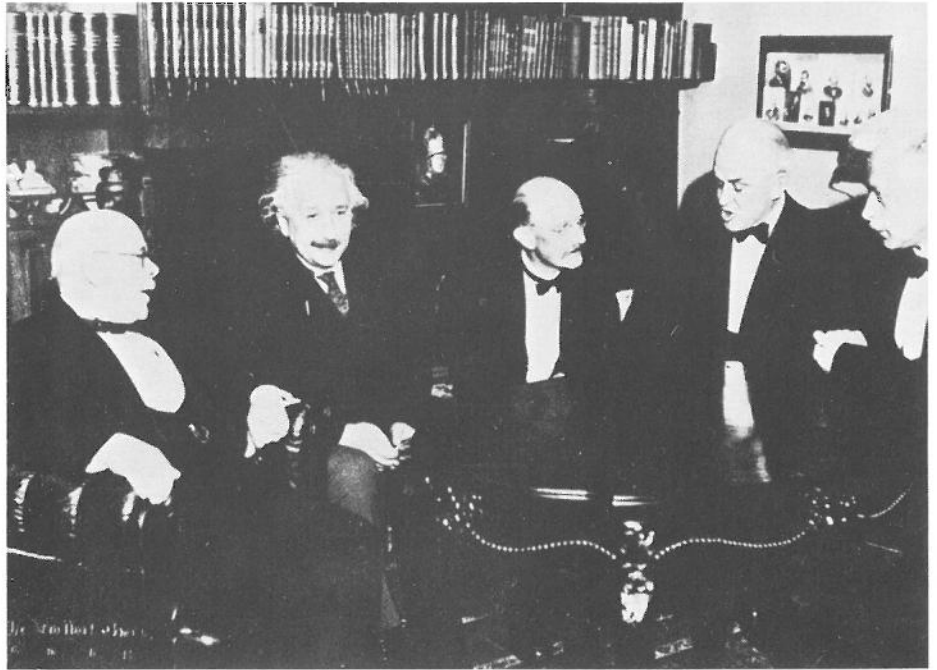
schappelijk onderzoek wordt bezuinigd. Anderen hebben erop gewezen dat Einstein zelf dit geld eerder voor een wetenschappelijk doel zou hebben bestemd en dat hij bovendien herhaaldelijk zou hebben verzocht om niet als een culturele held te worden beschouwd. Een groot aantal van de opposanten heeft zijn bezwaren in de kolommen van de *Washington Post* kenbaar gemaakt.

Er zijn in een ster twee tegengestelde krachten werkzaam: aan de ene kant de zwaartekracht die probeert de ster in te laten storten, aan de andere kant is er de energieproductie in het binnenste die de ster wil laten uitdijen. In een gewone ster zijn beide krachten in evenwicht, en is de wet van Newton nauwkeurig genoeg voor de beschrijving van de zwaartekracht. Wanneer de energieproductie in het centrum ophoudt gaat de ster instorten, en er zijn drie aflopen mogelijk: de ster wordt een witte dwerg, een neutronenster, of een zwart gat. Hij wordt een *witte dwerg* als de beweging van de atomen, ondanks het ontbreken van een energiebron groot genoeg is om evenwicht met de zwaartekracht te maken. Dat

de atomen in een witte dwerg ook zonder inwendige energiebron een redelijke bewegingsenergie moeten hebben werd in 1926 aangetoond door Enrico Fermi en Paul Dirac, met een methode die gelijkenis vertoont met de methode van Bose om de wet van Planck af te leiden.

Wanneer de ster zwaarder is dan ongeveer de zon, weegt de bewegingsenergie van de atomen niet langer op tegen de zwaartekracht en gaat de ster instorten. Op zeker moment vangen de protonen in de atoomkernen dan de elektronen in, en vormen zo neutronen zodat de ster enkel uit neutronen bestaat: een *neutronenster*. De beweging van de neutronen kan op zijn beurt evenwicht maken met de zwaartekracht: voor de be- ➤

Vijf Nobelprijswinnaars (jaartal tussen haakjes) in 1928 te Berlijn bijeen. Van links naar rechts: Von Laue (1914), Einstein (1921), Planck (1918), Millikan (1923) en Nernst (1920). Einstein was in die tijd hoogleraar en directeur van het Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik. Dit instituut telde drie medewerkers, Einstein, Von Laue en een secretaresse, en was ondergebracht in de privéwoning van Einstein (foto Max-Planck-Gesellschaft).



schrijving van dit evenwicht zijn zowel de quantummechanica als de algemene relativiteitstheorie nodig. De toestand van het neutronengas wordt beschreven met de methode van Fermi en Dirac, en de dichtheid van dit gas is zo groot dat de wetten van Newton niet goed genoeg meer zijn, en de theorie van Einstein nodig is.

Wanneer de ster meer dan ongeveer driemaal zo zwaar is als de zon, weegt ook de druk van het neutronengas niet op tegen de zwaartekracht en stort de ster volledig in. Dan wordt een *zwart gat* gevormd, dat wil zeggen dat de ontsnappingsnelheid aan het oppervlak van de ster groter wordt dan de lichtsnelheid, zodat de ster zich aan onze waarneming onttrekt: licht kan er niet meer vanaf. Het bestaan van zwarte gaten is een onontkoombaar gevolg van de algemene relativiteitstheorie. In de laatste jaren – dus lang na Einsteins dood – zijn er waarnemingen gedaan die op het bestaan van zwarte gaten wijzen, met name aan röntgenbronnen (lit. 7).

Samenvattend: de speciale relativiteitstheorie verklaart de energievoorziening van sterren, de quantummechanica de spectraallijnen. Samen beschrijven ze het inwendige van ingestorte sterren, en de algemene relativiteitstheorie leidt tot zwarte gaten.

De geschiedenis van het heelal

De belangrijkste vergelijking in de algemene relativiteitstheorie is een wiskundige uitbreiding van de zwaartekrachtswet van Newton. Zoals gezegd is de wiskunde die bij deze vergelijking hoort nogal ingewikkeld, en Einstein paste daarom de vergelijking toe op een 'eenvoudig' probleem: de bouw van het heelal. In het heelal zijn immers overall ongeveer evenveel sterrenstelsels, en het heelal ziet er in alle richtingen hetzelfde uit. Dit vereenvoudigt de wiskunde aanzienlijk en Einstein vond als oplossing dat de afstanden tussen de sterrenstelsels systematisch veranderen. Over dit resultaat correspondeerde hij uitgebreid met onze landgenoot Willem de Sitter (De Sitter had tijdens de oorlog in Engeland bekendheid gegeven aan Einsteins theorieën door middel van een aantal artikelen in de *Monthly Notices* van de Royal Astronomical Society. Deze artikelen werden aanvankelijk nogal sceptisch bekeken door de hoofdredacteur, Eddington (lit. 5).)

In 1929 ontdekte de Amerikaanse sterrenkundige Edwin Powell Hubble de naar hem genoemde uitdijning van het heelal, waarmee de voorspellingen van Einstein (waarin deze zelf overigens *niet* geloofde) werden bevestigd.

De Amerikaanse sterrenkundige George

Gamov werkte de gevolgen van deze uitdijning uit tot de nu vrij algemeen aanvaarde Big Bang theorie: als de sterrenstelsels zich nu van elkaar verwijderen, moeten ze vroeger in een grote klont bijeen hebben gezeten, en wel zo'n 20 miljard jaar geleden. Het heelal is begonnen als een zeer hete en dichte 'soep' van elementaire deeltjes, dezelfde elementaire deeltjes die we in de natuurkunde van zeer hoge energieën tegenkomen. Dit 'oeratoom' dijde uit en koelde daarbij af, zoals elk uitdijnd gas afkoelt. Op zeker moment werd de temperatuur zo laag, dat de elektronen door protonen konden worden gevangen, en er omheen konden gaan draaien, zonder steeds door krachtige botsingen uit hun baan geworpen te worden. Dat gebeurde 700.000 jaar na het begin van de uitdijning. Nog later klonterden de atomen samen tot grote wolken, en daarin weer tot sterren, zodat zich sterrenstelsels vormden.

Door de ontdekking van de *Drie Kelvin achtergrondstraling* (straling die rechtstreeks van de Big Bang afkomstig is), werd deze aanvankelijk met enig wantrouwen bekeken theorie tot een pijler van de moderne sterrenkunde. Voor de ontdekking van deze achtergrondstraling kregen Arno Penzias en Robert Wilson in 1978 de nobelprijs voor natuurkunde.

We weten dat alle materie van het heelal vroeger samengeballd was, maar wat er in de toekomst gaat gebeuren is niet zeker. De vergelijking van Einstein laat namelijk twee mogelijkheden toe: ofwel het heelal blijft alsmat uitdijen, d.w.z. de afstanden tussen de sterrenstelsels blijft altijd groter worden; ofwel de uitdijning houdt na eindige tijd op, waarna het heelal weer gaat instorten, tot dat alle sterrenstelsels weer op elkaar worden gebald. Welke van deze mogelijkheden door het heelal gevolgd gaat worden hangt af van de gemiddelde *materiedichtheid* in het heelal: als deze dichtheid groter is dan een bepaalde grenswaarde – de kritische dichtheid – is de eigen aantrekkingskracht van deze materie groot genoeg om de uitdijnde

beweging te beëindigen. Vooralnog echter wijzen de waarnemingen op een veel lagere dichtheid. Omdat we echter niet weten hoeveel gas er tussen de sterrenstelsels in zit zonder door ons gezien te worden, kunnen we geen echt definitieve conclusies trekken. Zeer recente waarnemingen maken het bestaan van grote hoeveelheden, tot nog toe niet gezien gas aannemelijk. Toch is de overheersende opinie van de astronomen dat de gemiddelde kritische dichtheid niet wordt bereikt, en het heelal dus onverbiddeijk zal blijven uitdijen.

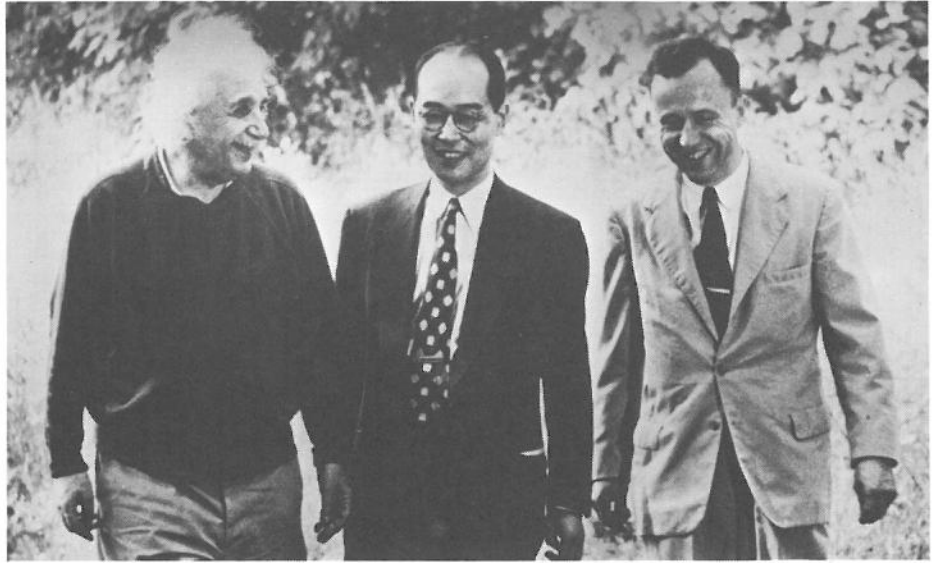
De dubbelster-pulsar

In 1974 ontdekten Hulse en Taylor met de radiotelescoop van Arecibo een pulsar in een dubbelstersysteem (Een pulsar is een snel om zijn as draaiende neutronenster met een sterk magneetveld, waar licht in nauwe bundels wordt uitgezonden. Als de lichtbundels van een vuurtoren draaien deze bundels met de neutronenster mee en zwiepen daarbij over de aarde, waar we ze met grote telescopen als lichtflitsen zien). De begeleider van deze pulsar is vermoedelijk ook een neutronenster, en beide sterren draaien in de zeer korte baanperiode van 8 uur om elkaar in een ellips, zoals we kunnen afleiden uit de steeds veranderende snelheid van de pulsar ten opzichte van ons (fig. 11).

Onmiddellijk na deze eerste (en tot nog toe enige) ontdekking van een radio pulsar in een dubbelstersysteem, concludeerden de sterrenkundigen uit de korte baanperiode dat de algemene relativiteitstheorie voor de beschrijving van de zwaartekracht in dit systeem nodig is. En al vrij snel werd de verplaatsing gemeten van het punt waar beide sterren het dichtst bij elkaar staan: 4,2°/jr. (Vergelijk de periheliumbeweging van Mercurius: 43"/eeuw!)

Maar er is meer. Wanneer twee sterren om elkaar heen bewegen zullen ze volgens de algemene relativiteitstheorie energie verliezen die wordt uitgestraald als zwaarte-

Wandeling in een park in de buurt van Einsteins woning te Princeton. Einstein wordt vergezeld door H. Yukawa en John Wheeler, die beiden ook aan de Princeton-universiteit werkten en belangrijk onderzoek deden aan o.a. de bouw van de atoomkern (foto Princeton University, ca. 1954).



krachtsgolven, dat wil zeggen als kleine storingen in het zwaartekrachtsveld. Men probeert op aarde al gedurende een tiental jaren storingen in het zwaartekrachtsveld ten gevolge van snelle massabewegingen elders in het heelal waar te nemen door te kijken of een metalen staaf gaat wiebelen. De verwachte verplaatsing van de staaf is echter zo klein (in vele gevallen kleiner dan de doorsnee van een atoomkern!), dat het geen verbazing mag wekken dat deze experimenten tot nog toe niet tot resultaat hebben geleid. In het pulsar-dubbelstersysteem hebben we echter een andere mogelijkheid om het bestaan van zwaartekrachtsgolven te testen: ten gevolge van het energieverlies zullen beide sterren in een nauwere baan om elkaar gaan draaien, zodat de baanperiode korter wordt. Op een sterrenkundig kongres te München maakte Taylor in december 1978 bekend er in geslaagd te zijn de verandering van baanperiode te meten: $-3.2 \pm 0.6 \cdot 10^{-12}$ seconde per seconde, ofwel zo'n tienduizendste seconde per jaar. Deze waarde is goed te verklaren met de algemene relativiteitstheorie, maar veel minder goed of niet met concurrerende theorieën (zie slotopmerkingen). Van belang voor de interpretatie van de gegevens is nog dat massaverlies en getijdenwerking, die beide ook aanleiding kunnen geven tot verandering van de baanperiode, in dit systeem niet van belang zijn.

Slotopmerkingen

Er zijn na Einstein nog een aantal natuurkundigen gekomen die een nieuwe zwaartekrachtstheorie hebben ontworpen. Deze andere theorieën onderscheiden zich van die van Einstein doordat ze iets ingewikkelder zijn: Einstein heeft doelbewust de zo eenvoudig mogelijke theorie gemaakt die toch aan alle eisen voldeed. Het blijkt dat de moeilijkere theorieën geen betere overeenstemming geven met de meetresultaten dan die van Einstein: zolang het mogelijk is werken de natuurkundigen dus maar met de eenvoudigste theorie. Toch is het interessant om na te gaan in hoeverre de moeilijkere theorieën tot andere resultaten leiden.

We zagen dat Einstein dezelfde wiskunde nodig had als wiskundigen die zich met gekromde ruimtes bezighouden. Vaak wordt dit zo geïnterpreteerd, dat men zegt dat de tijdruimte waarin wij leven gekromd is. Sommige natuurkundigen geven er echter de voorkeur aan om aan de overeenkomst van natuurkundige wetten met een bepaalde wiskundige theorie geen al te ver strekkende conclusies te verbinden. (lit. 6, p. VII) Deze verschillen in interpretatie bepalen voornamelijk de manier waarop men zich probeert de werking van de algemeen relativistische natuurwetten voor te stellen,

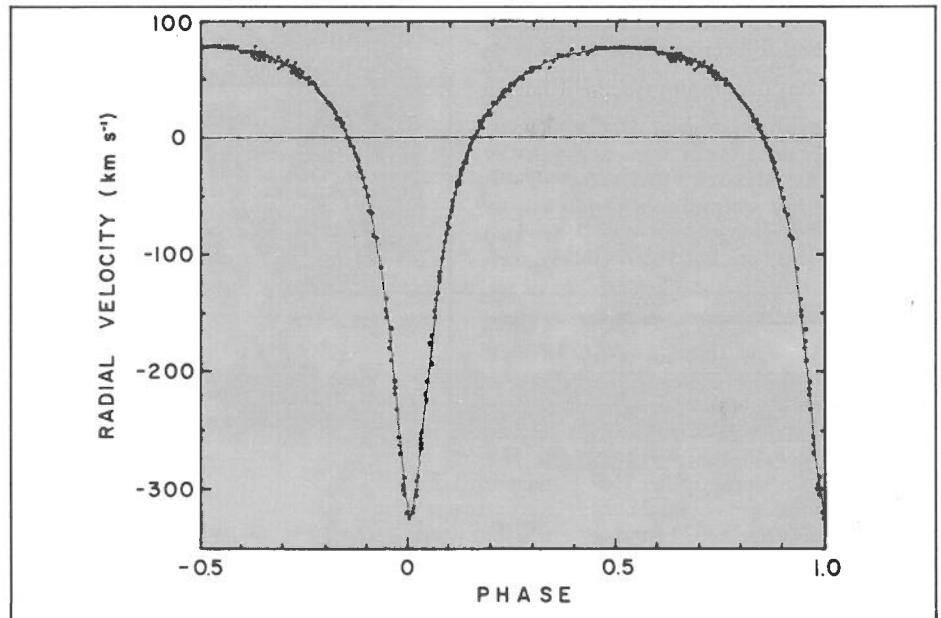


Fig. 11. De snelheid ten opzichte van ons van de radiopulsar PSR 1913+16 door de baanbeweging in 1974. Inmiddels is door de pe-

maar hebben op de vorm van die wetten zelf geen invloed. Het verschil is daarom niet van zeer groot belang, en de keuze is er vooral een van smaak.

Oplettende lezertjes vragen zich wellicht af wat er in de tweede publicatie van Einstein in de *Annalen der Physik* uit 1905 stond. Welnu, deze tweede publicatie gaat over atomen in een vloeistof, en vormt het proefschrift van Einstein. Het proefschrift was aanvankelijk geweigerd, omdat het te kort was. Nadat Einstein één regel had toegevoegd, werd het geaccepteerd...

Na bestudering van het ontstaan van de relativiteitstheorieën is het duidelijk dat dit ontstaan moeilijk eerder had kunnen gebeuren: Einstein maakt gebruik van werk van Maxwell, Michelson en Morley, Riemann, Lorentz, dat allemaal pas in de 19e eeuw werd verricht. Men hoort vaak zeggen dat de wetenschap zich verzet tegen vernieuwing. Naar mijn mening geeft de geschiedenis van zowel de quantummechanica als van de relativiteitstheorie een duidelijke aanwijzing dat het met dit verzet nogal meevalt,

riastronverschuiving de baan zodanig anders, dat een plaatje voor 1979 er heel anders uitziet.

mits de nieuwe theorie maar zodanig wordt opgezet dat er experimenten uitvoerbaar zijn om hem te testen. Daarvoor is een goede wiskundige en natuurkundige opbouw nodig. Dit verklaart meteen waarom wijsgerige speculaties, die deze opbouw missen, zo weinig invloed hebben op de voortgang der wetenschap.

Ik wil G. J. Hooijman, H. G. van Bueren, en Leo v.d. Horn bedanken voor hun hulp bij het schrijven van dit artikel, en Evert Landré voor het verzorgen van de figuren.

Literatuur

- Schilpp (Ed.), *Albert Einstein, philosopher-scientist*, Harper 1959.
- R. Kousbroek, *Avondrood der magiërs*, Meulenhoff.
- S. A. Mitchell, *Eclipses of the sun*, Columbia University Press 1923.
- A. Pannekoek, *De groei van ons wereldbeeld*, Wereldbibliotheek 1951.
- F. en C. Kahn, *Natuur en Techniek* 1975, 43, 274.
- S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley 1972.
- F. Verbunt, *Zenit* 1977, 5, 316.

Weisheit des Dialektischen Materialismus.

Durch Schweiss und Mühe ohnegleichen
Ein Körnchen Wahrheit zu erreichen?
Ein Narr, wer sich so klaglich schinden muss
Wir schaffen's einfach durch Parteibeschluss.

Und denen, die zu zweifeln wagen
Wird flugs der Schädel eingeschlagen.
Ja, so erzieht man, wie noch nie,
Der kühnen Geister Harmonie.

Wijsheid van het Dialektisch Materialisme

Met zweet en inspanning zonder gelijke
Een graantje waarheid te bereiken?
Alleen een gek put zich zo uit
Wij nemen gewoon een partijbesluit.

En wie er ^{dan} nog te twijfelen wagen
Wordt fluks de schedel ingeslagen.
Ja zo wordt als nooit tevoren,
Van koene geesten de harmonie geboren.