

## DE ZWAARTEKRACHT

door

G. 't HOOFT

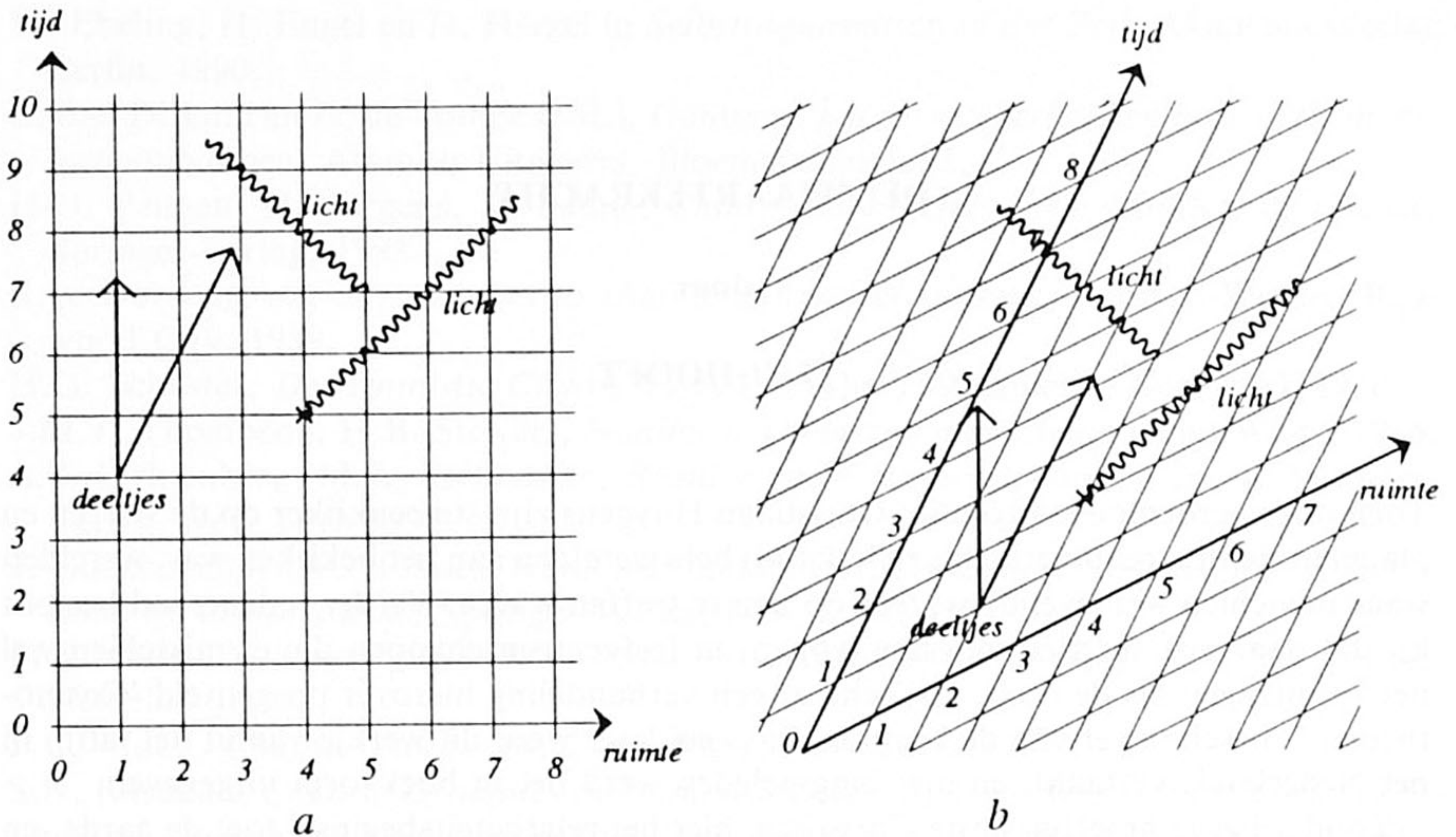
Toen onze beroemde landgenoot Christiaan Huygens zijn sterrenkijker op de sterren en planeten richtte, realiseerde hij zich dat hij hele werelden aan het bekijken was, werelden waar misschien wel levende wezens op aan te treffen waren. Verder redenerend besloot hij dat daar ook mensen moesten wonen, in leefgemeenschappen die er misschien wel net zo uitzagen als de onze. Hij schreef een verhandeling hierover op getiteld 'Cosmotheoros', beschouwer van de kosmos. Pas veel later werd dit werkje vanuit het latijn in het Nederlands vertaald, en niet lang geleden werd het in boekvorm uitgegeven.

Zonder het te beseffen paste Christiaan hier het relativiteitsbeginsel toe: de aarde, en wij die van hieruit waarnemingen doen, nemen niet een bevoorrechte positie in in het heelal. Andere plaatsen, 'waarnemingsstelsels', zeggen we nu, zijn niet minder geschikt om de natuurverschijnselen in te beschrijven. Niettemin beging hij een vergissing, en je kunt je achteraf gezien afvragen of deze niet onvermijdelijk was: hij vermengde zijn religieuze opvattingen met zijn wetenschappelijke redeneringen om tot de conclusie te komen dat al die werelden bewoond moesten zijn - anders zou God die immers voor niets hebben geschapen?

Ook in onze huidige opvattingen omtrent de natuurwetten neemt het relativiteitsprincipe een voorname plaats in. Of toekomstige generaties om onze fouten zullen lachen, daar waar onze ideeën op 'geloof' berusten, zal alleen de toekomst kunnen uitmaken. 'Speciale relativiteit' houdt in dat alle natuurwetten zodanig geformuleerd moeten kunnen worden dat ze er voor iedere waarnemer, ongeacht de snelheid waarmee hij zich voortbeweegt, hetzelfde uitzien. Met name moet dit gelden voor de wetten die verbanden leggen tussen de elektrische en de magnetische veldsterkten. Deze wetten zijn verantwoordelijk voor het verschijnsel 'licht', en we weten dat het licht een constante snelheid heeft.

Het was Albert Einstein die in 1905 aan kon geven hoe het één en ander geformuleerd moest worden. De 'speciale relativiteitstheorie' die hieruit voortvloeide vormt nu een centrale pijler van de moderne fysica. Ten onrechte denken vele mensen dat je de scherpzinnigheid van een Einstein nodig hebt om deze theorie te kunnen begrijpen, maar dat is gelukkig allerm minst het geval. Er was een Einstein voor nodig om op het idee te komen, maar de redeneringen zijn thans heel eenvoudig uiteen te zetten.

Van belang is in te zien dat 'puntgebeurtenissen' in ruimte en tijd met vier coördinaten ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  en  $t$ ) kunnen worden beschreven. Een waarnemer moet dan een coördinaten-



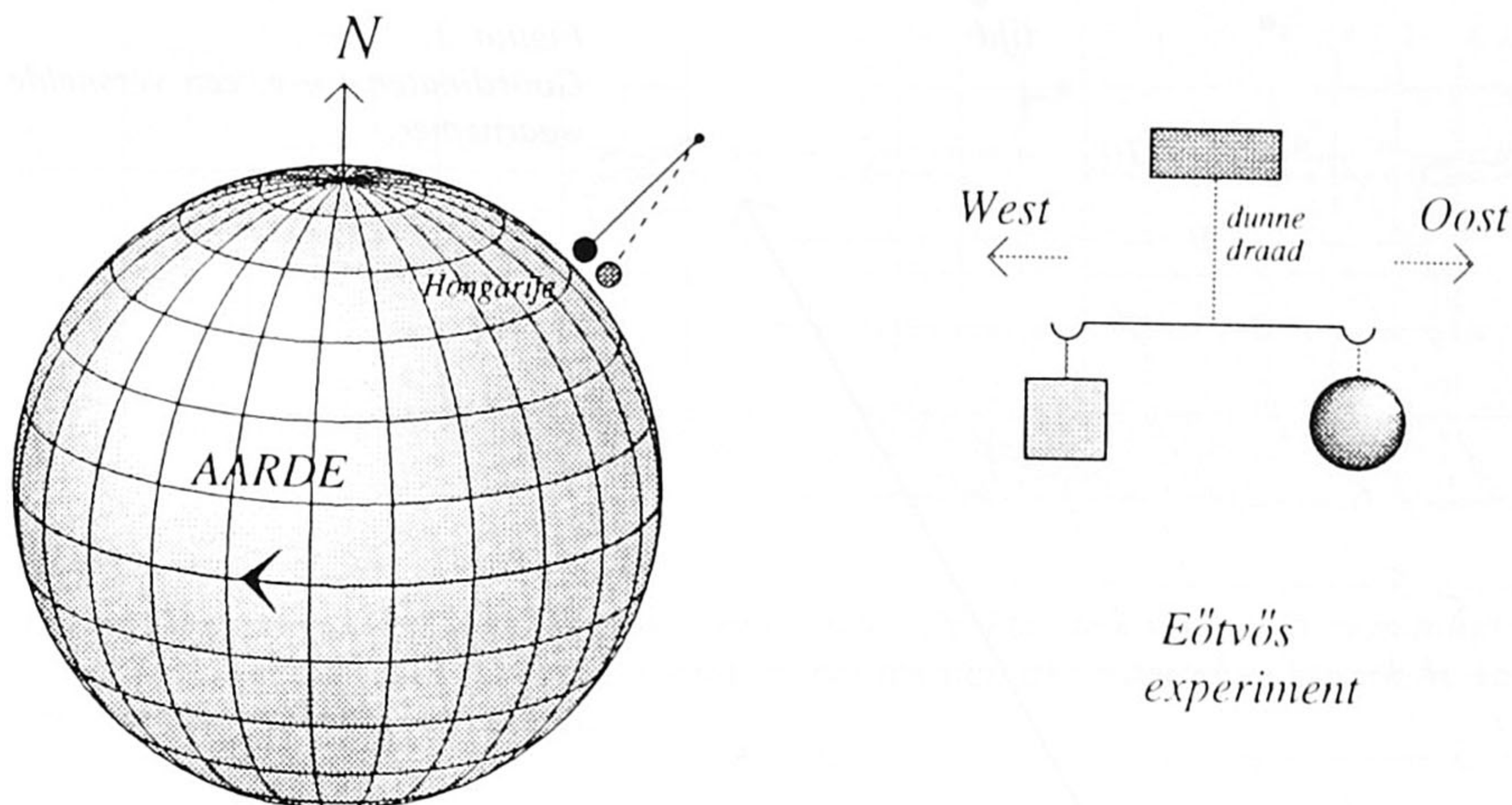
Figuur 1.

a) Coördinatenframe voor stilstaande waarnemer. b) Coördinaten gebruikt door een waarnemer met snelheid  $v = \frac{1}{2}c$ . Het licht gaat in beide frames met een hoek van  $45^\circ$ .

systeem definiëren, en kiest dit dan meestal zodanig dat zijn eigen positie gegeven wordt door  $x = y = z = 0$ , voor alle tijden  $t$ . In Figuur 1 zien we twee zulke coördinatenframes. De tijd staat hier verticaal uitgezet. Eén ruimtelijke coördinaat horizontaal. Er zijn twee deeltjes aangegeven, die langzamer gaan dan de lichtsnelheid. In (a) staat één ervan stil, zodat de ruimtelijke coördinaten constant zijn; in het frame (b) heeft het andere constante ruimtelijke coördinaten. De ontdekking (die eigenlijk al door onze landgenoot H.A. Lorentz was gedaan) was dat *beide* assen in (b) schuin moeten lopen. Alleen dan krijgt men dat lichtstralen altijd een hoek blijven maken van  $45^\circ$ , zodat de lichtsnelheid constant is.

Een implicatie van deze theorie is dat, althans gebruik makend van elektromagnetische verschijnselen, het altijd onmogelijk zal zijn vast te stellen welke van de frames, zoals (a) en (b), *bij voorkeur* gebruikt dient te worden. Ze zijn beide volstrekt equivalent. Einstein vermoedde dat het dan wel altijd onmogelijk zal blijven een voorkeursframe aan te geven. Inderdaad blijkt dat ook alle andere natuurverschijnselen in al deze frames dezelfde wetten blijven volgen. Maar dan, zo redeneerde Einstein, moeten ook de wetten van de zwaartekracht aan deze restrictie gehoorzamen.

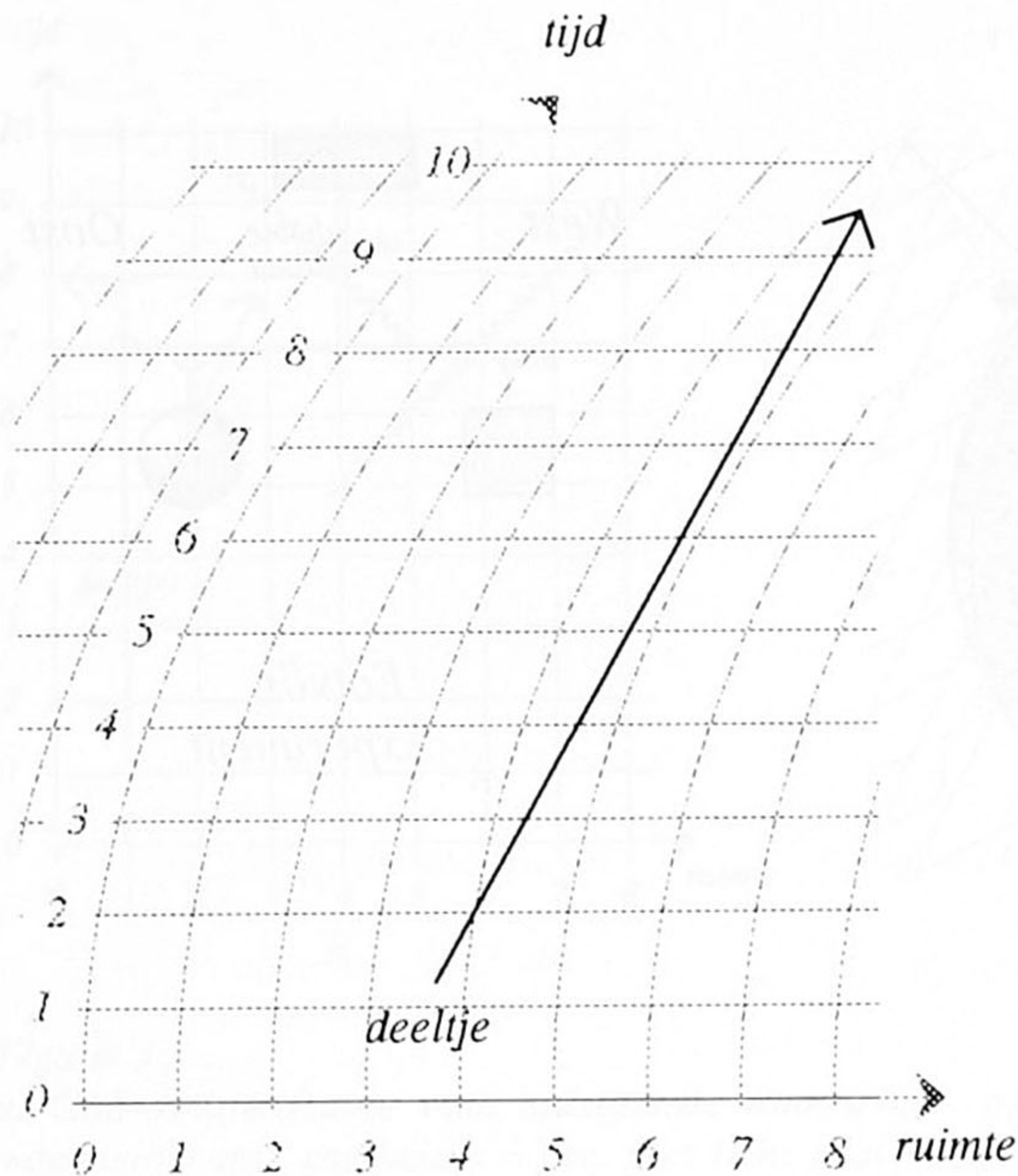
Het kenmerkende van de Newtonse zwaartekrachtwet is dat deze kracht altijd evenredig is met de massa van het aangetrokken object. Voor ieder object is de verhouding tussen de 'trage massa' (zoals deze voorkomt in de wet  $F = m \times a$ ) en 'zware massa' (die bepalend is voor het *gewicht* van het object) exact dezelfde. Een consequentie daarvan is dat alle objecten in een luchtledige ruimte dezelfde val-snelheid hebben. Een *meebewegende* waarnemer zal al deze voorwerpen stil zien staan. Als hij een meebewegend coördinatenstelsel hanteert lijkt voor hem dus de zwaartekracht afwezig. Ook kan men in een lift die versneld omhoog of omlaag beweegt een willekeurig sterk zwaartekrachtveld simuleren.



Figuur 2.  
Eötvös experiment

Dat zware massa en trage massa inderdaad zeer nauwkeurig met elkaar overeenstemmen is reeds in 1889 vastgesteld door de Hongaarse fysicus Baron Roland van Eötvös. Deze merkte op dat ten gevolge van de draaibeweging van de aarde ieder object op aarde aan twee krachten onderhevig is: de zwaartekracht trekt het in de richting van het centrum van de aarde en de middelpuntvliedende kracht trekt het naar buiten, in het vlak van de evenaar. De richting van de resultante van deze kracht hangt af van de verhouding zware/trage massa, en het effect hiervan is het grootst op  $45^\circ$  noorder- (of zuider)-breedte. Indien men gewichten gemaakt van verschillende materialen aan een torsiebalans hangt, die in een oost-west-richting is geïntendeerd, zou men moeten zien dat deze balans een draaiing vertoont zodra de gewichten een verschil in deze verhouding zouden hebben (Zie fig. 2). Eötvös kon met grote nauwkeurigheid vaststellen dat zo'n effect niet bestaat. De grote vraag waar Einstein zich voor gesteld zag was hoe nu de zwaartekracht geformuleerd moest worden als je eiste dat er enerzijds geen voorkeurs-coördinatenstelsel mag bestaan en anderzijds dat trage en zware massa altijd dezelfde evenredigheid hebben. In een vrij vallende lift zou men geen zwaartekracht mogen waarnemen en dus zouden daar de natuurwetten dezelfde moeten zijn als ver van iedere planeet of ster in de interstellaire ruimte. Maar een coördinatenstelsel dat gebruikt zou worden door deze vrij vallende waarnemer is een *gekromd* stelsel, zie Fig. 3. Hiermee werd voor Einstein duidelijk dat er met gekromde coördinatenstelsels moest worden gewerkt. Ruimte - en tijd - werden hierdoor 'gekromd'.

Beschouw nu Figuur 4. De piloot van een vliegtuig meet zijn hoogte met behulp van radar. De tijd die een signaal nodig heeft om van de grond terug te kaatsen is een goede maat voor de hoogte. De piloot zet zijn hoogte uit op grafiekpapier en krijgt dan een rechte lijn. Echter, als hij over een heuvel vliegt lijkt de zo gemeten hoogte ineens even kleiner te worden. Als hij nu zijn hoogte uitzet ziet hij dus een plotselinge piek naar beneden. Zijn interpretatie van deze uitkomst ziet U rechts in de figuur: er zou een 'gravita-

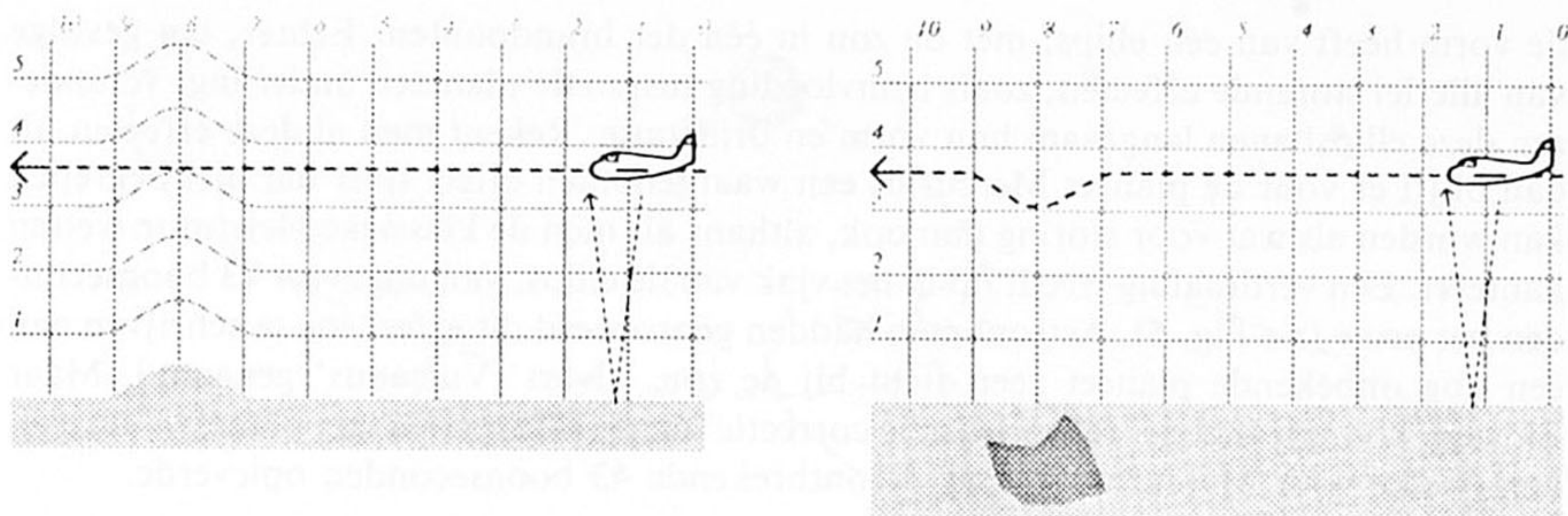


*Figuur 3.*  
*Coördinaten t.o.v. een versnelde*  
*waarnemer.*

tionale anomalie' in de grond kunnen zitten die zijn plotselinge duik zou kunnen verklaren. Einstein zou zeggen dat deze verklaring, op grond van de informatie die de piloot tot zijn beschikking heeft, niet minder geschikt is dan de veronderstelling dat hij over een heuvel vloog.

Door te werken met een 'gekromde ruimte-tijd' en kromlijnige coördinaten vond Einstein in 1915 de juiste vergelijkingen voor de zwaartekracht. De details zijn wiskundig wat te ingewikkeld om hier uit de doeken te doen. Zolang objecten snelheden hebben die veel kleiner zijn dan de lichtsnelheid geeft zijn theorie dezelfde uitkomsten als de oudere theorie van Newton. Alleen bij heel hoge snelheden worden de uitkomsten anders. De afwijkingen ten opzichte van de theorie van Newton konden nauwkeurig worden uitgerekend, en hieraan kon de nieuwe theorie worden getoetst. De theorie wordt *algemene relativiteitstheorie* genoemd.

De eerste voorspelling was dat ook lichtstralen door een sterk zwaartekrachtsveld worden afgebogen. Nu lag dat erg voor de hand. Aangezien de zwaartekracht op alle voorwerpen gelijkelijk inwerkt is het niet meer dan vanzelfsprekend dat ook lichtstralen een stukje zullen 'vallen' gedurende de tijd dat ze zich in het zwaarteveld van een grote massa bevinden. Niettemin was de voorspelling zeer belangrijk, want het licht valt niet alleen naar het zware object toe (hetgeen gezien kan worden als een gevolg van kromming in de *tijd*), maar krijgt ook nog eens een afbuiging ten goede van het feite dat de *ruimte* daar gekromd is. Beide effecten zijn even groot en tellen bij elkaar op. Als men naar een ster kijkt die zich bijna achter de zon verschuilt ziet men hierdoor het beeldje van de ster een beetje verschoven, en wel over maximaal 1.75 boogseconde. Dat deze verschuiving inderdaad werd waargenomen, door Arthur S. Eddington in 1919, werd de eerste belangrijke steun voor de nieuwe theorie.

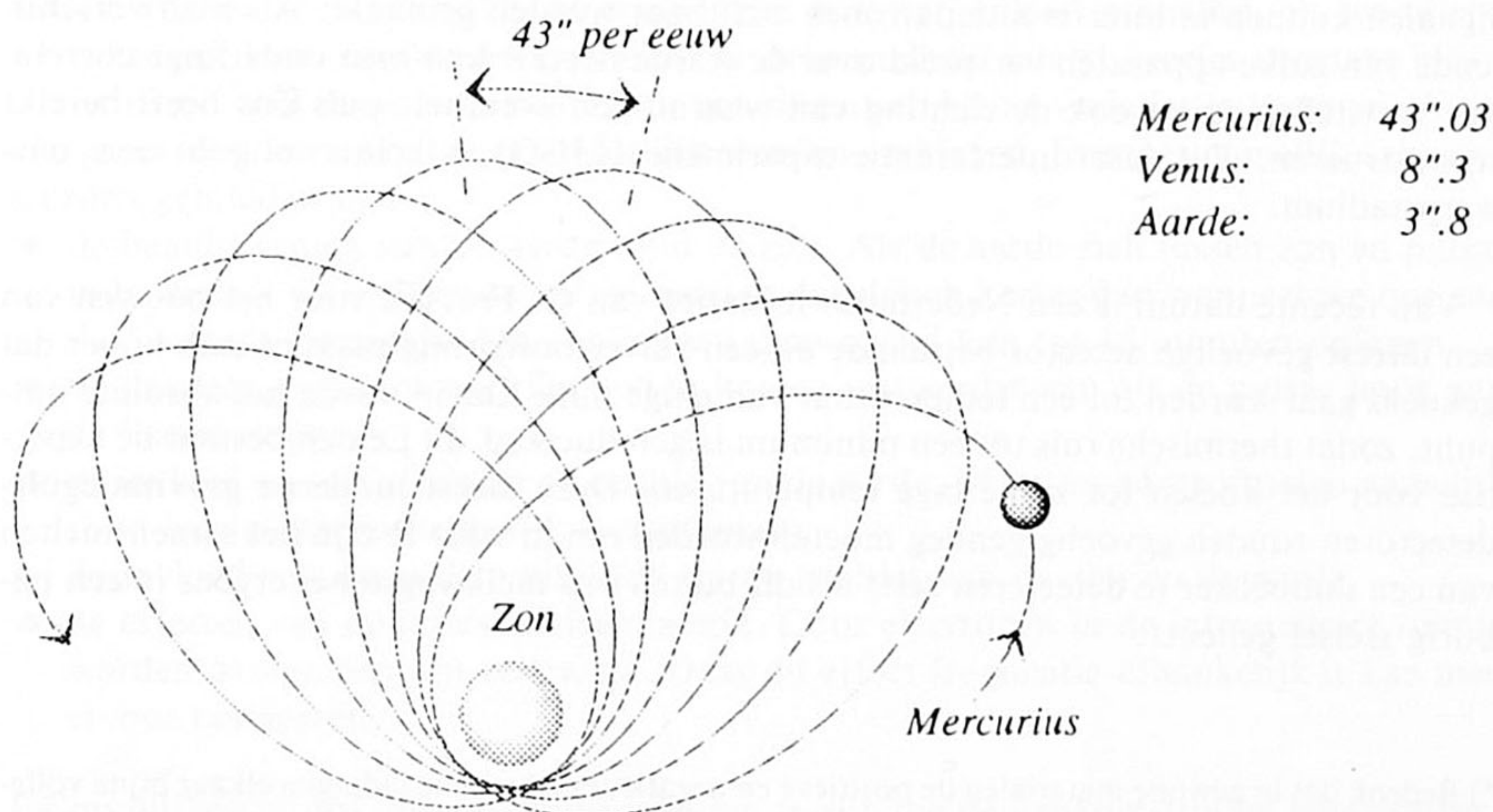


*Figuur 4.*

*Links: De baan van een vliegtuig boven een heuvel. Rechts: de hoogte lijkt even minder geworden, maar dit kan ook toegeschreven worden aan de zwaartekrachtwerking van een oneffenheid onder de grond.*

De tweede klassieke test van de algemene relativiteitstheorie betreft de voorspelling dat diep binnen een sterk zwaartekrachtsveld de tijd wat langzamer verstrijkt dan daar buiten. Hierdoor gaan atomen die zich op het zonsoppervlak bevinden een beetje langzamer trillen dan hun soortgenoten in ons laboratorium. Ook dit effect is te meten. Het is even groot als de Dopplerverschuiving zou zijn wanneer het atoom zich met een snelheid van 630 m/sec. van ons vandaan zou bewegen. Weliswaar bewegen de atomen bij de zon zich dikwijls met een veel grotere snelheid, maar door naar de gemiddelde snelheid te kijken is deze tijdsvertraging toch goed te meten.

De meest nauwkeurige klassieke test betreft de zogenaamde periheliumbeweging. Volgens de wetten van Newton zou iedere planeet een baan rond de zon volgen die precies



*Figuur 5.*

*De ellipsbaan van een planeet zoals Mercurius ligt niet vast in de ruimte, maar de uiteinden van de ellips draaien langzaam mee. Het effect is hier sterk vergroot geschetst.*

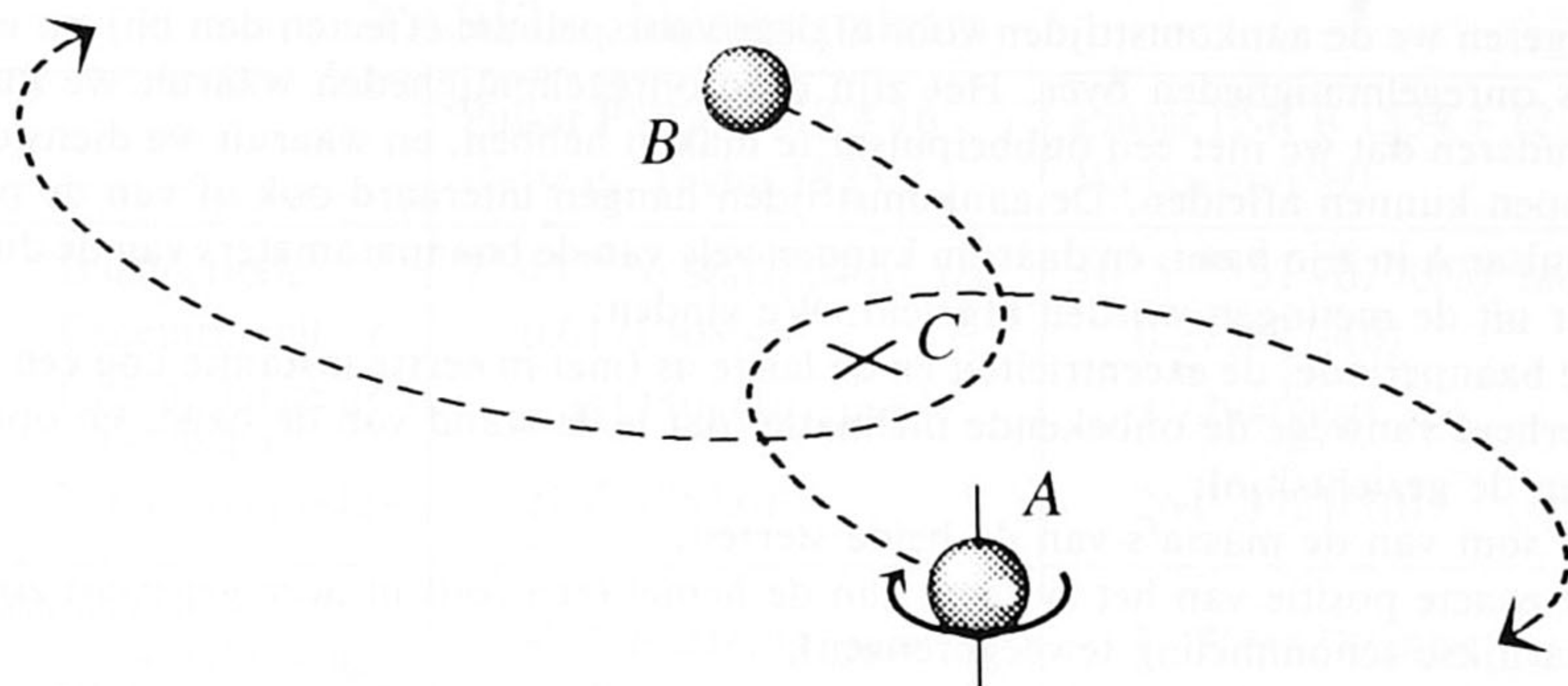
de vorm heeft van een ellips, met de zon in één der brandpunten. Echter, ten gevolge van allerlei storende effecten, zoals beïnvloeding tussen de planeten onderling, veranderen deze ellipsbanen langzaam hun vorm en oriëntatie. Rekent men al deze effecten uit dan blijft er voor de planeet Mercurius een waargenomen effect over dat niet begrepen kan worden als wat voor storing dan ook, althans als men de klassieke Newtonse wetten hanteert. Een verdraaiing treedt op in het vlak van de ellips, van ongeveer 43 boogseconden per eeuw (zie Fig. 5). Astronomen hadden geprobeerd dit effect toe te schrijven aan een nog onbekende planeet zeer dicht bij de zon, alvast 'Vulcanus' genaamd. Maar Einstein kon vrij snel de 'relativistische correctie' op de ellipsbanen van planeten uitrekenen, welke voor Mercurius precies de ontbrekende 43 boogseconden opleverde.

Eén zeer belangrijke voorspelling van de algemene relativiteitstheorie is hiermee nog niet getoetst. De theorie voorspelt namelijk dat alle bewegende voorwerpen *gravitatiestraling* uitzenden. Dit effect is vergelijkbaar met wat er met bewegende elektrische ladingen gebeurt. Deze zenden dan elektromagnetische straling uit, zoals dat gebeurt in een antenne. De golflengte van die straling hangt af van de snelheid van de bewegingen. Net als elektromagnetische straling gaan ook de zwaartekrachtsgolven met de lichtsnelheid. De zwaartekrachtconstante is echter heel veel kleiner dan de constane van Coulomb\*) zodat gravitatiestraling uiterst moeilijk is waar te nemen.

Er zijn verschillende voorstellen gedaan om zwaartekrachtsgolven niettemin te detecteren. Catastrofale gebeurtenissen in het heelal, zoals een supernova-explosie of wellicht botsingen tussen sterren kunnen significante hoeveelheden van deze straling emitteren. Er zijn diverse pogingen gedaan om zulke straling te detecteren. Een groot, sterk gekoeld blok metaal zou in een heel zwakke trillingstoestand kunnen worden gebracht en zulke trillingen zijn met gevoelige apparatuur te registreren. Tot op heden heeft men echter geen signalen kunnen vaststellen. Plannen bestaan om Michelson-interferometers te bouwen met zeer grote afmetingen. Lichtstralen afkomstig van een laser worden in onderling loodrechte richtingen gestuurd, en na enige kilometers gereflecteerd door spiegels bevestigd aan vrij opgehangen massa's. Minieme variaties in de loopafstand van de lichtsignalen kunnen in interferentiepatronen zichtbaar worden gemaakt. Als men verschillende van zulke apparaten verspreid over de Aarde neerzet kan men onderlinge correlaties vaststellen en zo ook de richting van waaruit een eventuele puls ons heeft bereikt reconstrueren. Dit laser-interferentie-experiment (LIGO) is echter nog in een ontwerpstadium.

Van recente datum is een Nederlands initiatief van G. Frossati voor het bouwen van een uiterst gevoelige detector bestaande uit een zuiver bolvormig massief stuk koper dat gekoeld gaat worden tot een temperatuur van enige milli-Kelvin boven het absolute nulpunt, zodat thermische ruis tot een minimum is gereduceerd. In Leiden bestaat de expertise voor het koelen tot zulke lage temperaturen. Deze meest moderne gravitatiegolf-detectoren zouden gevoelig genoeg moeten worden om in staat te zijn het samensmelten van een dubbelster te detecteren zelfs als dit buiten ons melkwegstelsel ergens in een naburig stelsel gebeurt.

\*) Bedenk dat in gewone materialen de positieve en negatieve elektrische ladingen elkaar bijna volledig neutraliseren hetgeen verklaart waarom in de praktijk grotere objecten slechts kleine elektrische krachten op elkaar uitoefenen. Bij de zwaartekracht bestaat een dergelijk neutraliserend effect niet, zodat de zwaartekracht uiteindelijk, doch slechts voor astronomisch grote objecten, gaat domineren.



Figuur 6.

*Twee compacte neutronensterren (A en B) draaien in ellipsbanen om een gemeenschappelijk zwaartepunt C. Eén der sterren (A) draait zeer snel om zijn as en een heldere plek op zijn oppervlak doet zijn totale helderheid daardoor snel pulseren.*

Hoewel de detectie van gravitatiestralen op Aarde nog niet is gerealiseerd heeft men wel langs indirecte weg het bestaan van deze straling kunnen verifiëren, zelfs met een opmerkelijke nauwkeurigheid, en wel door de waarneming van zogenaamde dubbelpulsars, zie Fig. 6. Twee zeer compacte sterren draaien om een gemeenschappelijk zwaartepunt. Eén daarvan draait ook nog eens zeer snel om zijn as, met enige honderden omwentelingen per seconde. Doordat er zich een heldere plek bevindt op zijn oppervlakte (daar waar magnetische veldlijnen het oppervlak verlaten), lijkt de helderheid van ons uit gezien snel te pulseren. De aankomsttijden van deze pulsen zijn zeer nauwkeurig te meten. Het blijkt nu dat deze pulserende ster, ook wel 'pulsar' genaamd, als een uiterst nauwkeurige klok kan fungeren, omdat de draaisnelheid uiterst precies constant blijft.

Niettemin blijken de aankomsttijden van de pulsen kleine variaties te vertonen. Voor een groot deel kunnen deze onmiddellijk worden verklaard. Er moet namelijk rekening worden gehouden met:

- de baanbeweging van de aarde rond de zon. Als de aarde zich tussen zon en pulsar in bevindt is de weg die de pulsen moeten doorlopen korter dan wanneer we ons aan de overzijde bevinden. Dit aankomsttijdenverschil kan tot 16 minuten oplopen.
- de draaiing van de aarde. De pulsen komen wat eerder aan als de pulsar hoog aan de hemel staat;
- de invloed van de maan op de positie van de aarde. Maan en aarde draaien namelijk rond hun gemeenschappelijk zwaartepunt;
- de invloed van de andere planeten op de posities van de zon en de aarde.
- de effecten van de interstellaire materie. Door electronen in de interstellaire ruimte worden de signalen wat vertraagd. Daar dit effect frequentie-afhankelijk is kan men ervoor corrigeren.

En nu blijken er ook relativistische effecten te zijn die de aankomsttijden beïnvloeden:

- De aardse klok loopt een beetje langzamer bij volle maan dan bij nieuwe maan (dan zitten we dieper in de gravitatie-potentiaal);
- Lichtsignalen die vlak langs de zon scheren worden in hun weg vertraagd.

Corrigeren we de aankomsttijden voor al deze voorspelbare effecten dan blijven er nog steeds onregelmatigheden over. Het zijn deze onregelmatigheden waaruit we kunnen concluderen dat we met een dubbelpulsar te maken hebben, en waaruit we diens eigenschappen kunnen afleiden. De aankomsttijden hangen uiteraard ook af van de positie van pulsar A in zijn baan, en daarom kunnen vele van de baanparameters van de dubbelpulsar uit de metingen worden afgeleid. We vinden:

- de baanperiode, de excentriciteit en de lange as (met in eerste instantie nog een onzekerheid vanwege de onbekende inclinatie, dat is de stand van de baan ten opzichte van de gezichtslijn);
- de som van de massa's van de beide sterren;
- de exacte positie van het systeem aan de hemel (een fout in deze gegevens zou een jaarlijkse schommeling teweegbrengen);
- zelfs de verplaatsing van het systeem in ons melkwegstelsel is vast te stellen.
- heel langzaam vertraagt de pulsar ten gevolge van terugkoppeling van zijn magnetische veld.

Daar nu dit pulsarsysteem zeer grote snelheden vertoont zijn de effecten van de algemene relativiteitstheorie hier veel groter dan in ons eigen zonnestelsel. We vinden daarom ook:

- de periheliumbeweging in dit systeem (hier natuurlijk 'periastronbeweging te noemen). Het effect is hier zo groot dat sinds zijn ontstaan de baan al meer dan  $90^\circ$  gedraaid is.
- tijdsvertragingen van het signaal als het vlak langs de andere neutronster gaat (Shapiro-effect). Dit stelt de astronomen in staat ook de stand van de baan ten opzichte van de gezichtslijn en ook de afzonderlijke massa's te berekenen (niet alleen de som van de massa's);
- en tenslotte een afname van de baanperiode. In principe zou men deze kunnen toeschrijven aan één of ander onbekend wrijvingsmechanisme waardoor het systeem energie verliest. Echter de meest voor de hand liggende verklaring hiervoor is dat dit energieverlies ontstaat door het uitzenden van gravitatiestraling. Men kan dit effect nauwkeurig berekenen met behulp van Einsteins vergelijkingen en de overeenkomst tussen de waargenomen en de voorspelde periodevertraging is verbluffend!

Voor de ontdekking van de eerste dubbelpulsar kregen R. Hulse en J. Taylor onlangs de Nobelprijs uitgereikt. Aangezien aan deze pulsar al bijna 20 jaar gemeten is levert die nu nog de nauwkeurigste resultaten. Een tweede dubbelpulsar van recentere datum zal waarschijnlijk op de lange duur nog nauwkeurigere metingen mogelijk maken omdat hij dichterbij staat. Inmiddels is er ook al een derde systeem bekend (Pulsar PSR B 2127 + 11C). De resultaten van de metingen geven we weer in de Tabel. Merk op hoe nauwkeurig sommige van de metingen zijn (de cijfers tussen haakjes geven de onzekerheid in de laatste decimaal aan). Van geen enkele andere ster behalve de zon kon de massa zo nauwkeurig worden vastgesteld.

De meest spectaculaire voorspelling van de algemene relativiteitstheorie betreft het lot van sterren of stersystemen die zoveel massa bevatten dat de druk in hun inwendige alle tegendruk die de materie daar kan leveren gaat overtreffen. Dit gebeurt wanneer ze door het afstaan van warmte in een steeds lagere interne energietoestand terechtkomen. Berekeningen van de astronoom S. Shandrasekhar laten zien dat er geen evenwichtstoestand kan bestaan en de zaak stort volledig ineen. Wat dan overblijft zou omschreven kunnen worden als een compacte bol van 'zuivere zwaartekracht'. De ruimte wordt daar zo sterk gekromd dat er gebieden ontstaan in de ruimte-tijd van waaruit geen enkel soort materie-deeltje meer kan ontsnappen. Ook lichtsignalen kunnen daar dan niet meer uitkomen.



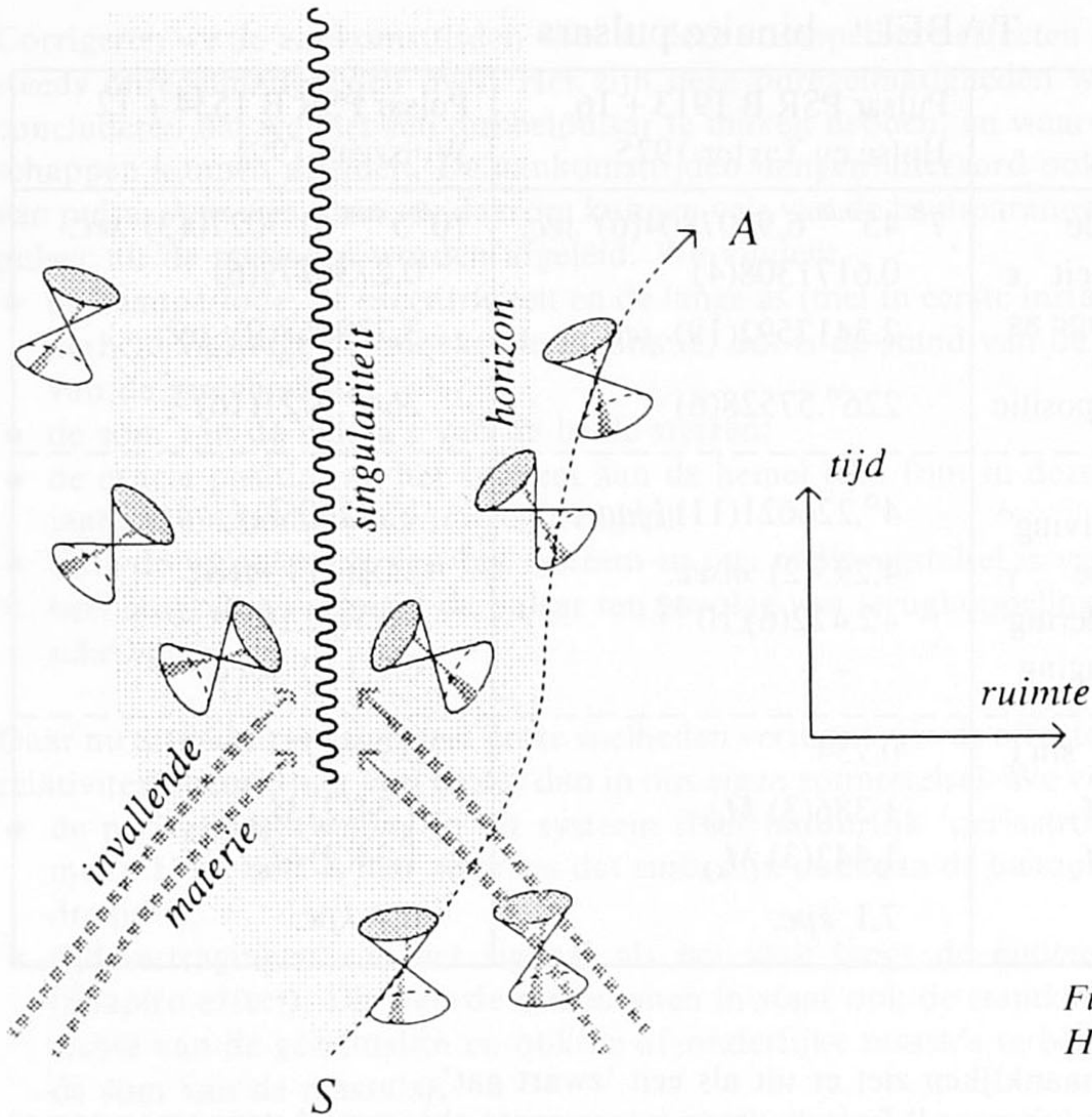
TABEL: binaire pulsars

	Pulsar PSR B 1913 + 16 Hulse en Taylor 1975	Pulsar PSR B 1534 + 12 Wolszcan 1991
Kepler	Baanperiode Excentriciteit $\epsilon$ Geproij. lange as ( $a/c$ ) $\sin i$ Periastron positie	$7^h 45^{min} 6.9807804(6) \text{ sec.}$ 0.6171308(4) $2.3417592(19) \text{ sec.}$ $226^\circ.57528(6)$
Post-Kepler	Periastron- verschuiving Tijddilatatie $\gamma$ Periodeverandering Shapiro-vertraging	$4^\circ.226621(11) / \text{jaar.}$ $4.295(2) \text{ msec.}$ $-2.422(6) \cdot 10^{-12}$ --
Berekend	Inclinatie $\sin i$ Massa's $M_1$ $M_2$ Afstand	0.734 $1.386(3) M_\odot$ $1.442(3) M_\odot$ $7.1 \text{ kpc.}$
		$0.986(7)$ $1.34(7) M_\odot$ $1.34(7) M_\odot$ $0.7 \text{ kpc.}$

Waar we dan tegenaankijken ziet er uit als een 'zwart gat'.

Zwarte gaten zijn (uiteraard) fysisch uiterst interessante objecten. Astronomen nemen diverse verschijnselen waar in het heelal waarvoor zwarte gaten de enige denkbare verklaring kunnen zijn. De massa ervan kan variëren van enige zonsmassa's tot wellicht miljoenen malen de massa van de zon. Omdat materie in de omgeving van zo'n zwart gat al gauw versneld kan worden tot een aanzienlijke fractie van de lichtsnelheid treden er enorm energetische processen op die tot op kosmische afstanden waar te nemen zijn. Dit is de meest gangbare verklaring voor de enorme hoeveelheden straling uitgezonden door 'quasars', zeer actieve kernen van jonge melkwegstelsels. Ruimte en tijd bij een zwart gat zijn geschetst in Fig. 7. Tijd is er verticaal uitgezet, en één van de ruimtecoördinaten horizontaal. De kegeltjes geven aan hoe snel een lichtsignaal in die omgeving zich kan verplaatsen. Vanuit het gearceerde gebied kan geen enkel signaal meer ontsnappen. Het komt terecht op het centrale gebied, de 'singulariteit', waar de ons bekende natuurwetten niet meer geldig kunnen zijn. Een waarnemer  $A$  die zich buiten het zwarte gat bevindt en er naar kijkt kan alleen signalen ontvangen die vanuit het punt  $S$  komen.

De algemene relativiteitstheorie blijkt dus een zeer succesvolle theoretische constructie te zijn. De principiële uitgangspunten worden kennelijk in verregaande mate door de natuur gerespecteerd. Een andere, niet minder succesvolle theoretische constructie is die van de quantummechanica. Dit is de formulering van de mechanische wetten voor moleculen, atomen en sub-atomaire deeltjes. Deze twee theorieën bestrijken beide een uitgestrekt terrein in de natuur, maar die twee terreinen liggen heel ver uit elkaar. Daar quantummechanische verschijnselen alleen merkbaar worden bij uiterst kleine en lichte objecten lijkt het een onmogelijke opgave dit soort effecten vast te stellen voor sterren en planeten in hun geheel, laat staan voor zwarte gaten. Evenzo lijkt het ondoenlijk zwaartekrachtsverschijnselen vast te stellen bij de interacties tussen elementaire deeltjes onderling.



Figuur 7.  
Het zwarte gat.

Toch ligt hier de fundamentele vraag of beide theorieën met elkaar te verenigen zijn. Zijn er verschijnselen denkbaar waar zowel de quantummechanica als de algemene relativiteitstheorie van toepassing zijn?

We praten dan over verschijnselen waarvoor de lichtsnelheid  $c$ , de constante van Planck  $h$ , en de gravitatieconstante  $G$  alle van vergelijkbaar belang zijn. Nu hebben deze drie constanten verschillende dimensies, en daarom zijn er eenheden van afstand, tijd en massa aan te geven zodanig dat in die eenheden

$$h = 2\pi, \quad c = 1 \quad \text{en} \quad G = 1.$$

De eenheid van afstand, de *Plancklengte* is dan

$$L_{Pl} = \sqrt{\frac{Gh}{2\pi c^3}} = 1.616 \times 10^{-33} \text{ cm.};$$

de eenheid van tijd:

$$T_{Pl} = \sqrt{\frac{Gh}{2\pi c^5}} = 5.39 \times 10^{-44} \text{ sec.};$$

en de eenheid van massa:

$$M_{Pl} = \sqrt{\frac{hc}{2\pi G}} = 21.8 \text{ } \mu\text{g.}$$

Dit laatste correspondeert met een energie van omstreeks  $10^{28}$  elektron-Volt per deeltje, hetgeen nog bij lange na niet in een laboratorium kan worden bereikt.

Wel kunnen we speculeren over hoe de natuurwetten in dit energiegebied zullen fungeren. Er blijkt dan een zeer grote moeilijkheid te ontstaan. Het is nog grotendeels onbekend hoe we de wetten combineren moeten. Wel is het mogelijk benaderingen uit te werken voor wanneer de deeltjes nog niet helemaal de Planckse energieschaal bereikt hebben. Deze zogenaamde storingstheorie vertelt ons dat het *quantum* van de zwaartekracht een deeltje vergelijkbaar met het foton, een spinwaarde gelijk aan 2 moet hebben: het 'graviton'. Maar berekeningen aan gravitonen laten niet de nauwkeurigheid toe die we bij fotonen gewend zijn, want hoe dicht we bij de Plancklengte komen, des te meer onbekende termen in onze vergelijkingen tevoorschijn komen.

Het probleem van de 'quantumgravitatie' heeft een lange geschiedenis. Richard Feynman wist de eerste belangrijke berekeningen te doen in het begin van de jaren '60. Velen hebben sindsdien hun krachten erop beproefd, inclusief spreker. De ontwikkelingen die volgden zijn te technisch om in een kort bestek uiteen te zetten. Omstreeks 1984 meende men een belangrijke stap voorwaarts te hebben gezet met de zogenaamde 'supersnaartheorie'. Hierin worden alle elementaire deeltjes voorgesteld als stukjes 'touw' in plaats van puntvormig, wat vóór die tijd de gewoonte was. Het 'graviton' is dan een elementair stukje touw in de vorm van een gesloten lus. De theorie heeft echter de hooggespannen verwachtingen niet geheel waar kunnen maken.

Op het terrein van de zwarte gaten deed de zwaar invalide Britse fysicus Stephen Hawking in 1975 een essentiële ontdekking. Hij rekende voor dat zwarte gaten voortdurend elementaire deeltjes uitzenden, zodat ze strikt genomen niet helemaal zwart meer zijn. Maar aangezien dit een quantummechanisch effect is, wordt het pas van belang voor heel kleine zwarte gaten. Essentieel bij dit verschijnsel is dat een gedeelte van de uitgezonden deeltjes weer terugvalt en dan voor altijd onwaarneembaar zal blijven. De allerbelangrijkste moeilijkheid doet zich echter voor wanneer we de wetten van de quantummechanica willen loslaten op zwarte gaten *in hun geheel*. Als je deze wilt vergezeld doen gaan van een 'golfje' zoals we dit doen bij elektronen en andere elementaire deeltjes, dan is het niet meer goed mogelijk te beschrijven hoe er 'informatie' in zo'n zwart gat kan verdwijnen. De Hawking-straling lijkt fundamenteel anders van aard te zijn dan de straling uitgezonden door 'gewone' materie. De techniek waar ik sterk voorstander van ben is het doen van gedachtenexperimenten met zwarte gaten. Hier immers is het zwaartekrachtsveld zo sterk als maar mogelijk is. Als we erin zouden slagen voor deze objecten de wetten van de quantummechanica met die van de algemene relativiteitstheorie te verzoenen dan zal dit ook voor alle andere omstandigheden wel lukken.

Maar zover is het nog lang niet. Het zie er naar uit dat we voorlopig opgescheept zullen blijven met een groot mysterie in de natuurwetten.

## Literatuur

Christiaan Huygens, *Cosmotheoros, de Wereldbeschouwer*, vertaling Pieter Rabus, inleiding Prof.Dr. H.A.M. Snelders, Epsilon Uitgaven Utrecht 1989.

J.A. Wheeler, *Zwaartekracht, het Verband tussen massa, ruimte en tijd*. Uitg. Natuur en Techniek, Maastricht/Brussel 1991.