

Zwaartekracht en mogelijk onbekende interacties (3)

Het onmogelijke huwelijk tussen de Algemene Relativiteitstheorie en het Standaardmodel

(en andere problemen)

De successen van de Algemene Relativiteitstheorie van Einstein zijn fenomenaal. Toch zijn er vanuit de theorie redenen om aan te nemen dat ze niet volledig is. Aan de andere kant voorspellen uitbreidingen van de huidige deeltjes-theorie vaak extra krachten. Zijn deze met de huidige experimenten te vinden? Ook lijkt bij een aantal van de meest fundamentele mysteries van de natuurkunde, zoals donkere materie en donkere energie, zwaartekracht een centrale rol te spelen. En kunnen de in het eerste deel van deze serie beschreven effecten, zoals de Pioneer-anomalie, het gevolg zijn van de door snaartheorie voorspelde extra krachten of dimensies?

Het Standaardmodel van de elementaire deeltjesfysica is – net als de Algemene Relativiteitstheorie (ART) – een bijzonder succesvolle theorie gebleken (zie kader 'Het Standaardmodel'). Experimentele bevestigingen hebben zich in de afgelopen decennia opgestapeld en als de komende jaren ook nog het bestaan van het zogeheten Higgs-boson kan worden aangetoond, lijkt de successtory compleet te zijn. Ook de relativiteitstheorie lijkt alleen maar triomfen te kennen. Succesvolle voorspellingen daarvan werden in het maartnummer beschreven door John Heise.

Bovengenoemde theorieën kennen echter toch een aantal bezwaren, en het belangrijkste is wel dat ze niet met elkaar verenigbaar zijn: de ART geeft geen goede beschrijving van de zwaartekracht op micro(deeltjes)-niveau. Zo voorspelt ze perfect hoe sterren kunnen instorten tot zwarte gaten, maar beschrijft ze niet wat er dan gebeurt. Het is duidelijk dat de theorie niet helemaal compleet is. Ook geven de ART en het Standaardmodel geen antwoord op veel fundamentele vragen. Waarom hebben deeltjes een bepaalde massa? Waarom bestaan er überhaupt bepaalde groepen deeltjes? Waarom is de zwaartekracht zoveel zwakker dan de andere krachten (elektromagnetische, kernkrachten)? Wat is donkere materie en donkere energie?

Veel van deze fundamentele vragen lijken wat met zwaartekracht te maken te hebben. Genoeg redenen

om onderzoek te doen, zowel theoretisch als experimenteel. En dat gebeurt op beide fronten dan ook volop.

Nieuwe theorie?

Waarom is het nu zo moeilijk om de theorie van Einstein te vervangen door een theorie die wél verenigbaar is met de quantummechanica en die wél zaken als donkere materie en donkere energie voorspelt? Waarom is het überhaupt moeilijk om de ART door een andere theorie te vervangen?

Het punt is dat de ART uitgaat van een paar elementaire basisprincipes, zoals dat alle voorwerpen (van alle soorten materiaal) altijd even snel vallen in een zwaartekrachtveld en dat de lichtsnelheid constant is. De wiskundige formulering van de zwaartekrachtwetten die Einstein daaruit verkreeg heeft volgens de meeste wis- en natuurkundigen een grote mate van schoonheid en bleek, zoals het een goede theorie betaamt, veel meer te voorspellen dan erin gestopt was.

Door er bepaalde onderdelen aan te veranderen of toe te voegen, lukt het vaak wel om een enkel onbegrepen feit te beschrijven, maar doet de theorie in andere gevallen weer geen correcte voorspelling. Zo kon de, in het eerste deel van deze serie beschreven, onbegrepen snelheidstoename van langs de aarde scherende ruimtevaartuigen (de zogeheten *flyby*-anomalie) wel beschreven worden door een bepaalde toevoeging



1. Albert Einstein spelend op heel andere snaren dan waar de snaartheoretici mee werken. Zelf geloofde hij niet dat zijn theorie het laatste woord zou zijn en besteedde hij de laatste decennia van zijn leven aan een (overigens vruchteloze) zoektocht naar een unificatietheorie.

Chris P. Duif*

* Chris Duif is natuurkundige en werkt aan de faculteit Toegepaste Natuurwetenschappen en het Reactor Instituut Delft van de Technische Universiteit Delft.

In het eerste deel van deze serie, getiteld 'Vreemde gedragingen van ruimtevaartuigen' (december 2006), werden de *flyby*-anomalie en de Pioneer-anomalie besproken, waarbij mogelijk onbekende, gravitatie-achtige krachten op ruimtevaartuigen een rol spelen. In het tweede deel (februari 2007) werden de – nog controversiëlere – mechanische effecten besproken die volgens sommige onderzoekers tijdens zonsverduisteringen optreden. Beide delen zijn te downloaden op www.space-time.info/zenit

aan de relativiteitstheorie (van zogeheten torsie), maar dan bleken de formules weer geen stabiele banen voor de planeten in ons zonnestelsel te voorspellen!

Om het probleem van de donkere materie op te lossen, is door de Israëlische astrofysicus Mordehai Milgrom een alternatieve zwaartekrachttheorie bedacht: MOND (*Modified Newtonian Dynamics*). Dit was oorspronkelijk nogal een *ad hoc*-oplossing, een empirische formule die de meeste gegevens goed beschreef zonder dat er exotische donkere materiedeeltjes hoefden te worden ingevoerd. In de MOND-theorie neemt op heel grote afstanden, waar de zwaartekracht natuurlijk heel zwak is, de aantrekking niet meer af met het kwadraat van de afstand, maar veel langzamer, namelijk lineair. De laatste jaren hebben de MOND-aanhangers de theorie echter steeds meer weten te onderbouwen en een relativistische grondslag kunnen geven. De meeste natuurkundigen denken echter niet dat dit uiteindelijk tot een werkelijk fundamentele theorie (van quantumgravitatie) zal leiden.

Snaar versus loop

Pogingen om een nieuwe, meer universeel geldende zwaartekrachttheorie te ontwikkelen die meteen de quantumtheorie met zich verenigt, worden tegenwoordig vanuit meer fundamentele principes gedaan. Een belangrijke stroming is die van de snaartheorie, waarbij de 'grondstof' wordt gevormd door heel kleine, ééndimensionale objecten: trillende snaren. De frequentie waarmee zo'n snaartje trilt, bepaalt wat voor deeltje

het is (bijvoorbeeld een elektron of een foton).

Het voordeel van de snaar als uitgangspunt is onder meer dat snaren bepaalde afmetingen hebben (maar wel ontzettend klein zijn), in tegenstelling tot de in het Standaardmodel gebruikte puntdeeltjes, en er daardoor geen oneindigheden in de berekeningen hoeven voor te komen. Hoe deze snaren met elkaar reageren en in de ruimtetijd bewegen, is wiskundig te beschrijven met methoden die al eerder uit de quantumtheorie bekend waren. Kenmerkend voor de snaartheorie(ën) is dat er nogal wat extra dimensies bij komen kijken. Deze extra dimensies – 10, 11 of 26, afhankelijk van de versie van de theorie – zijn niet zo kunstmatig als het misschien lijkt, maar volgen uit de bijbehorende wiskunde.

Een probleem is dat het snaartheoretici nog niet gelukt is voorspellingen over experimenten te doen die een andere uitkomst zouden geven dan de huidige theorieën. In die zin verkeren snaartheorieën nog in het embryonale stadium. Er worden wel voorspellingen gedaan aan de hand van aanvullingen op het Standaardmodel die *geïnspireerd* zijn door de snaartheorie. Een voorbeeld is een eigenschap die in de snaartheorie voorkomt, de zogeheten supersymmetrie. Wanneer deze eigenschap in het Standaardmodel van de deeltjesfysica wordt geïntroduceerd, doet deze een aantal experimenteel verificerbare voorspellingen, maar deze worden niet *direct* uit de snaartheorie afgeleid.

Een andere stroming om tot een meer fundamentele theorie te komen die quantummechanica en zwaarte-

kracht kan verenigen, is de Loop Quantum Gravity (LQG). Daarin worden meer direct quantummechanische methoden in de Algemene Relativiteitstheorie toegepast.

Experimentele toetsingen

Er worden veel experimenten gedaan om de zwaartekracht te onderzoeken en de Algemene Relativiteitstheorie en alternatieven daarvoor te testen. Deze vinden enerzijds plaats in laboratoria op aarde, anderzijds door nauwkeurige metingen in ons zonnestelsel en aan extreme dubbelstersystemen (zie daarvoor het eerdergenoemde artikel van John Heise).

Een heel belangrijke laboratoriummeting is natuurlijk die van de gravitatieconstante van Newton (G). Het is deze lastig meetbare constante die de sterkte van de zwaartekracht bepaalt. De bereikte nauwkeurigheid is na twee eeuwen meten slechts ongeveer 0,1%; alle andere natuurconstanten zijn minstens duizend keer exacter bekend. Dat komt doordat zwaartekracht zo'n zwakke kracht is¹ en de storende krachten – warmte-effecten, elektrostatische krachten en trillingen, fouten in de geometrie van de opstelling – talrijk.

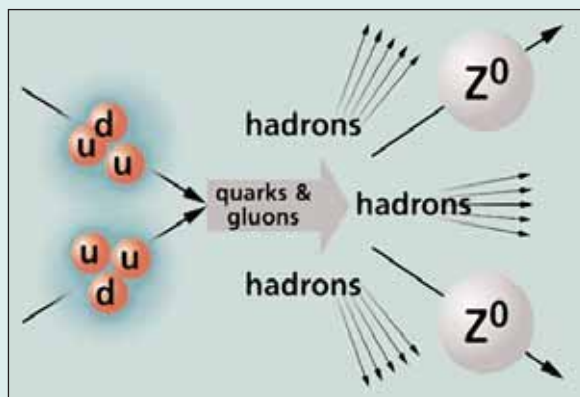
Rond deze metingen hebben zich in de afgelopen tien jaar wat controversen voorgedaan. De metingen van de laatste decennia vertoonden onderlinge verschillen die tien keer groter waren dan op grond van de door de experimentatoren geschatte onzekerheden zou mogen. Er werd zelfs geopperd dat G wel eens helemaal niet constant zou kunnen zijn, dat wil zeggen dat de zwaartekracht beïnvloed zou worden door bepaalde extra factoren. Zo ontwikkelden de Franse fysici Mbelek en Lachièze-Rey een zwaartekrachttheorie met een extra dimensie (een zogeheten Kaluza-Klein-theorie), waarin de sterkte van de zwaartekracht beïnvloed wordt door het lokale magnetische veld. De variatie in het aardmagnetische veld verklaart daarin de onderlinge verschillen tussen de laboratoria. Het is echter een controversiële theorie waar de laatste tijd weinig over gediscussieerd wordt.

Recente metingen waren meer in overeenstemming met het gemid-

1. Een bekende anekdote over de befaamde fysicus Richard Feynman is die waarbij, nadat hij tijdens een lezing net verteld heeft dat zwaartekracht zo'n ontzettend zwakke kracht is, er een luidsprekerbox van zijn steun breekt en donderend op de grond valt. 'Zwak, maar niet verwaarloosbaar', vervolgde Feynman ad rem.

Het Standaardmodel

Het Standaardmodel van elementaire deeltjes is de theorie die drie van de vier bekende krachten (kernkrachten en elektromagnetisme, maar niet de zwaartekracht) beschrijft, evenals de elementaire deeltjes zelf natuurlijk. De theorie omvat ook de quantummechanica. Zij beschrijft bijvoorbeeld hoe het proton uit drie quarks bestaat en hoe die quarks elkaar beïnvloeden. Zij voorspelde ook het bestaan van bepaalde quarks en bosonen (deeltjes die krachten overbrengen) voordat deze waren waargenomen – voorspellingen die



vrijwel allemaal al experimenteel bevestigd zijn, onder meer met de Europese deeltjesversneller van CERN in Zwitserland.

Een wat zwakker punt van het Standaardmodel is dat alle parameters (natuurconstanten, massa's van deeltjes, sterktes van interacties) er 'met de hand in gestopt moeten worden'. De theorie voorspelt deze dus niet. Wat volgens de meeste natuurkundigen (althans, diegenen zich daarmee bezighouden) een echte 'Theorie van Alles' onder meer zou moeten kunnen, is zelf massa's van deeltjes en andere natuurconstanten voorspellen.



2. Torsieslinger voor het meten van de gravitatieconstante (G) van de Eöt-Wash-groep van de universiteit van Washington (VS). De slinger bevindt zich binnen in de vacuüm-kamer in het midden. De aantrekkingskracht van massa's in de omgeving (hier de metalen bollen) verandert de slingertijd, waaruit de gravitatieconstante berekend kan worden.

op dat metingen van de groep van Eric Adelberger (Universiteit van Washington, VS) wezen op het zwakker worden van G op een afstand van circa 80 micrometer. Recente onderzoeken hebben echter laten zien dat er zelfs tot afstanden van 60 micrometer geen afwijkingen van de kwadratenwet zijn. De eerdere bevindingen waren kennelijk te wijten aan tekortkomingen van de apparatuur. Te hopen valt dat de metingen tot een afstand van een paar micrometer zijn uit te breiden. Dat wordt met de gebruikte mechanische apparatuur echter wel bijzonder moeilijk.

Laser en radarmetingen

Voorspellingen van zwaartekrachttheorieën kunnen op verschillende manieren heel nauwkeurig worden getoetst. Dat gebeurt bijvoorbeeld door met lasers de afstand van de aarde tot de maan en tot om de aarde draaiende satellieten te meten, maar ook door middel van radar-

afstandsmetingen aan de binnenste planeten van ons zonnestelsel. (Radarwaarnemingen zijn iets minder nauwkeurig vanwege de hoogteverschillen op de planeten.) Ook afstandsmetingen met behulp van ruimtevaartuigen in banen om planeten hebben nauwkeurige gegevens verschaft. De banen van de planeten vanaf Jupiter zijn alleen door middel van optische waarnemingen (telescopen) bepaald en daardoor veel minder nauwkeurig bekend.

Het exact volgen van banen van satellieten om de aarde is met de beide Lageos-satellieten uitgevoerd. Dit zijn heel nauwkeurig vervaardigde metalen bollen met een diameter van zestig centimeter met 426 reflectoren aan de buitenkant. Ze zijn zo gelanceerd (Lageos 1 al in 1976, Lageos 2 in 1992) dat ze op een hoogte van circa 6000 kilometer om de aarde bewegen – een hoogte waar vrijwel geen invloed van de dampkring meer is. Op dezelfde manier als met de reflectoren op de maan kan met de reflectie en timing van laserpulsen vanaf de aarde de afstand van de satellieten nauwkeurig gemeten worden. Het belangrijkste doel is van geodetische aard: het bestuderen van de exacte vorm van (het zwaartekrachtveld van) de aarde en van veranderingen in de lokale zwaartekracht in de tijd. De nauwkeurig verkregen baangegevens zijn echter ook gebruikt voor meer fun-

delde van vroegere metingen en de consensus lijkt te worden dat er niet zo'n probleem meer is. De redenen van de eerdere discrepanties zijn echter niet opgehelderd en het samenvallen met de gemiddelde waarde van de laatste metingen zou toeval kunnen zijn.

Afwijking op korte afstand?

Van minstens even groot belang zijn de recente metingen van de gravitatieconstante op heel kleine afstanden. Diverse geopperde theoretische verklaringen voor een aantal prangende problemen aangaande zwaartekracht en donkere energie voorspellen dat de kracht zich op kleine afstanden anders gaat gedragen dan de gebruikelijke 1 gedeeld door de afstand in het kwadraat.

De Amerikaanse theoretisch fysisicus Raman Sundrum stelt zich voor dat de deeltjes die zwaartekracht overbrengen, de gravitonen, 'dik' zijn. Wanneer gravitonen snaren zijn met een afmeting van 0,1 mm (100 micrometer) of iets minder, zouden ze een goede verklaring kunnen geven van de waargenomen dichtheid van donkere energie. Dat zou echter betekenen dat zwaartekracht op afstanden kleiner dan de afmetingen van die 'dikke gravitonen' zwakker zou moeten worden – ze worden dan minder 'gevoeld'. In andere door de snaartheorie geïnspireerde kosmologische modellen met extra dimensies wordt juist weer voorspeld dat zwaartekracht op heel kleine afstanden sterker moet worden. Dat biedt dus goede mogelijkheden om door middel van een experiment theorieën uit te sluiten.

Twee jaar geleden leek het er nog

Lunar Laser Ranging

Toen door een paar Apollo-missies en Russische onbemande Loenochod maankarretjes een speciale reflector werd achtergelaten, ontstond de nauwkeurigste meetmethode om de exacte baan van een hemellichaam te volgen. Door vanaf de aarde een laserpuls in de richting van zo'n 'retroreflector' te schieten – die nauwe laserstraal heeft bij aankomst op de maan dan inmiddels een diameter van zo'n vier kilometer – en het gereflecteerde signaal met een telescoop op te vangen, kan uit de verstrekken tijd de afstand heel nauwkeurig berekend worden. De nauwkeurigheid in de afstand aarde-maan die met deze Lunar Laser Ranging (LLR) bereikt wordt, is inmiddels beter dan een centimeter!

Het aarde-maansysteem is daarmee tot een uniek laboratorium voor het testen van zwaartekrachttheorieën geworden. Een van de dingen die hiermee goed te testen zijn, is het zogeheten equivalentiebeginsel. Volgens dit beginsel vallen alle soorten massa met dezelfde versnelling naar elkaar toe. De maan en de aarde moeten dan ook op de zelfde manier door de zon aangetrokken worden. Volgens de metingen van LLR gebeurt dit ook: de afwijking daarvan komt hoogstens in de dertiende plaats achter de komma.

Helemáál bevestigd hebben de LLR-metingen de algemene relativiteitstheorie echter niet. De afwijking van de cirkelvorm van de baan van de maan om de aarde – hij is enigszins ellipsvormig – wordt iets groter in de tijd in een mate die niet door de relativiteitstheorie wordt voorspeld (de zogeheten *LLR Anomalous Eccentricity Rate*).





3. Een van de Lageos-satellieten: geen enkele elektronica aan boord, maar bron van een schat aan gegevens (hier nog in een testopstelling op aarde).

damenteel onderzoek. Zo kon het effect van de draaiing van de aarde op de nabije ruimte (het zogeheten *gravitomagnetische effect*) gemeten worden met een nauwkeurigheid van zo'n tien procent, nog voordat *Gravity Probe B* resultaten kon leveren (zie verderop).

Eerdere suggesties dat er ook vreemde invloeden merkbaar zouden zijn in de bewegingen van de Lageos-satellieten, konden tot nu toe niet hard gemaakt worden. De effecten van opwarming in het zonlicht en afkoeling blijken gecompliceerde (maar kleine) invloeden te hebben op de banen. De onzekerheden in die temperatuureffecten zijn zodanig dat het bestaan van die onbekende krachten niet uitgesloten kan worden, maar dan moeten deze krachten wel veel kleiner zijn dan in het geval van de *flyby*-anomalie.

Toename van de Astronomische Eenheid

Een ander onbegrepen fenomeen in ons zonnestelsel, maar minder bekend dan bijvoorbeeld de Pioneer-anomalie, is dat van de toename van de Astronomische Eenheid (AE, ongeveer de gemiddelde afstand van de aarde tot de zon). De afstand van vooral de planeet Mars tot de zon wordt sinds een jaar of dertig heel nauwkeurig gemeten met behulp van radarsignalen. Nu blijkt dat die afstand met circa tien centimeter per jaar toeneemt. Berekeningen tonen aan dat het niet door massa-afname van de zon kan komen of door de uitdijning die voor het heelal als geheel geldt of door enig ander bekend effect (Krasinsky en Brumberg, 2004; Standish, 2005). Het zwakker worden van de gravitatieconstante is ook uitgesloten volgens de eerder genoemde laserafstandsmetingen aan de maan.

Het lijkt daarom alsof de afstandschaal van het zonnestelsel steeds iets

groter wordt, maar het is volstrekt onduidelijk hoe dit geïnterpreteerd moet worden. Er wordt wel eens een verband met de Pioneer-anomalie gesuggereerd, maar het zijn tegengestelde effecten: bij de Pioneer-anomalie is sprake van een extra aantrekkende kracht op de ruimtevaartuigen, bij de toename van de astronomische

eenheid lijkt het alsof er een extra *afstotende* kracht op de planeten werkt.

Donkere materie en donkere energie nog complexer?

Donkere energie is vooral bekend om zijn afstotende werking op heel grote schaal: door een soort anti-zwaartekracht versnelt de uitdijning van het heelal voortdurend. Donkere materie helpt vooral bij het clusteren en daarna bij elkaar houden van sterrenstelsels.

Recent onderzoek van de Portugese onderzoekers Bertolami, Gil Pedro en Le Delliou (Lissabon) wijst op nog complexer gedrag van donkere materie en donkere energie. Zij analyseer-

den de bewegingen van de sterrenstelsels in de Abell-cluster A586. Deze cluster was daar heel geschikt voor, omdat zij bolvormig is, er alleen bewegingen onder invloed van de zwaartekracht richting centrum zijn en er heel veel metingen aan verricht zijn. Uit de afbuiging van licht wordt de hoeveelheid donkere materie afgeleid (net als bij de Kogelcluster; zie fig. 4). Uit een analyse van de posities en snelheden van de afzonderlijke sterrenstelsels bleek er iets gekks aan de hand te zijn. 'Onze modellen kloppen alleen wanneer normale materie sneller valt dan de donkere materie', zegt Bertolami. Een verklaring zou kunnen zijn dat een wisselwerking van de donkere energie met de donkere materie dit veroorzaakt. Op zich is zo'n wisselwerking niet onverwacht, maar dat zij resulteert in dit verschil in valsnelheid zou betekenen dat het equivalentiebeginsel – een fundament van de Algemene Relativiteitstheorie! – wordt geschonden.

Eerder was er vanuit analyses van de Kogelcluster gebleken dat hier wellicht een extra kracht in het spel was (een vijfde kracht dus, niet een van de bekende krachten), omdat anders de hoge snelheden in de cluster niet begrepen konden worden (onderzoek van Glennys Farrar en Rachel Rosen van New York University, 2006). Onlangs bleken de gemeten



4. Deze compositiefoto van de Kogelcluster is bekend geworden als icoon van het bewijs van donkere materie. Twee gashoudende clusters van sterrenstelsels zijn lang geleden op elkaar gebotst. De sterren in de stelsels zijn doorgeschoten en door de zwaartekracht maar een beetje afgeremd, maar het grootste gedeelte van de gewone materie bestaat uit gaswolken (roze), en deze zijn door hun onderlinge elektromagnetische invloed veel meer afgeremd. Uit metingen aan het effect op licht van de sterrenstelsels erachter bleek dat een onzichtbare component helemaal ongehinderd is doorgeschoten: de zogeheten donkere materie (blauw). Hoewel aanvankelijk werd geclaimd dat dit aantoonde dat er alleen donkere materie in de vorm van onbekende deeltjes in het spel kan zijn en geen aanpassing van de zwaartekracht, lijken sommige alternatieve zwaartekrachttheorieën toch tot een zelfde voorspelling in staat.



5. *Gravity Probe B* heeft het effect van de draaiing van de aarde op de ruimte eromheen aangetoond.

snelheden echter overschat te zijn, zodat deze hypothese op losse schroeven is komen te staan.

GPB, LISA en Microscope

Er zijn nog diverse geavanceerde metingen aan aspecten van zwaartekracht in de ruimte gaande of gepland. Zo zijn onlangs tussentijdse resultaten bekend gemaakt van de *Gravity Probe B*, een om de aarde draaiende satelliet met heel nauwkeurige gyroscopen. Deze hebben een deel van de voorspellingen van de Algemene Relativiteitstheorie over de invloed van de draaiing van de aarde op de ruimte om haar heen bevestigd (het zogeheten geodetische effect, nog afgeleid door de Nederlandse astronoom Willem de Sitter; zie onder meer het artikel van Marcel Vonk in *Zenit* van juli/augustus 2004), en wel met een nauwkeurigheid van één procent. Door technische complicaties laten de volledige resultaten, met inbegrip van de metingen van het 'meesleepeffect' (*frame dragging*), nog even op zich wachten.

Bijzonder interessant kan ook de interferometer in de ruimte, LISA, worden. Dit is een geavanceerd instrument om gravitatiegolven – rimpelingen in de ruimtetijd – te registreren. Deze gravitatiegolven worden door de ART voorspeld. Behalve dat het al of niet waarnemen van die golven kan helpen niet-correcte zwaartekrachttheorieën te elimineren, kan waarneming ervan interessante extra astronomische gegevens opleveren.

Maar misschien wel het interessantst – vanuit het oogpunt van de fundamentele wetenschap dan – wordt het ESA-project *Microscope* (lancering in 2010). Het doel van deze missie is een heel nauwkeurige test van het

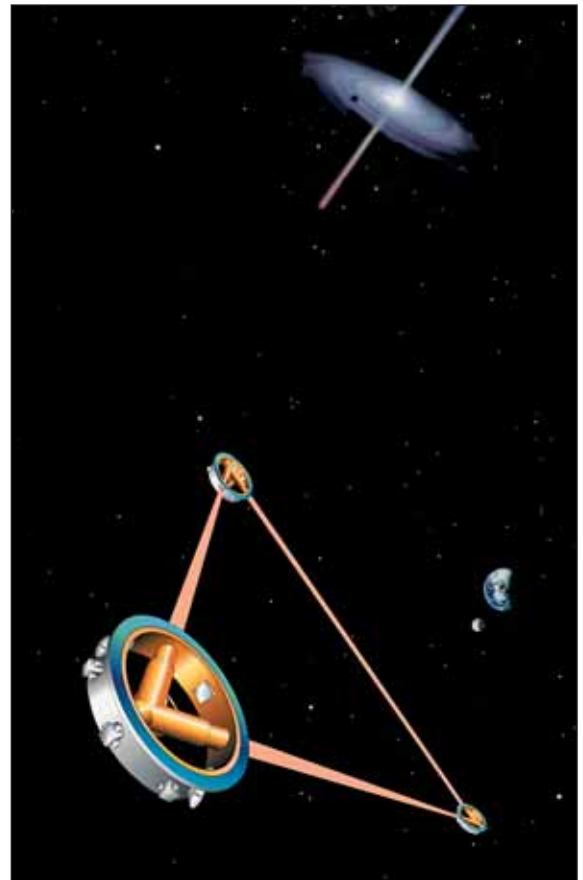
equivalentiebeginsel in een ruimtevaartuig in een baan om de aarde. In de satelliet zullen twee cilinders van platina en titanium vrij in een afgeschermd ruimte zweven waar hun posities constant worden geregistreerd. Als het equivalentiebeginsel exact opgaat, mogen er geen onderlinge bewegingen tussen de twee metalen optreden; gebeurt dit wel, dan is dat in strijd met de ART.

De experimenten waarmee deze principes getest worden zijn allemaal zeer kostbaar. Maar de ART is nu eenmaal de basis van de hedendaagse astrofysica en kosmologie. Zolang we niet weten of de theorie ook echt klopt, kunnen we niet zeker zijn van onze kennis van het heelal.

Verwarring blijft

Ondanks al deze inspanningen zitten we met de verwarrende situatie dat de Algemene Relativiteitstheorie van Einstein aan de ene kant nog fier overeind staat (de klassieke tests), maar dat er aan de andere kant nog veel openstaande vragen op zowel theoretisch als experimenteel gebied zijn. Van diverse zaken is nog niet duidelijk hoe ze zijn in te passen, en het goede theoretische pad (snaartheorie of wat anders) lijkt voorlopig niet gevonden.

Volgens gravitatiefysicus Eric Adelberger (Universiteit van Washington) zien we wat belangrijks over het hoofd. Volgens de Amerikaanse mathematisch fysicus John Baez (Universiteit van Californië te Riverside) bevindt de fundamentele natuurkunde zich zelfs in een crisis en hebben we daarom veel gegevens van anormale (= niet door de huidige theorieën voorspelde) effecten nodig om een uitweg te vinden. Meer kennis van verschijnselen als de Pioneer-anomalie, de *flyby*-anomalie en



6. *LISA (Laser interferometer Space Antenna)* is een gezamenlijke missie van de ESA en de NASA. De drie afzonderlijke onderdelen komen op zo'n 5 miljoen kilometer van elkaar en vormen een bijzonder gevoelige interferometer. De lancering moet in 2018 plaatsvinden.

de toename van de astronomische eenheid zou hierin, naast het reeds toonaangevend geworden onderzoek naar donkere materie en donkere energie, wel eens van groot belang kunnen zijn.

Literatuur

- G. Beekman, 'Frame dragging bij Mars waargenomen?', *Zenit*, april 2007, blz. 180.
 C. Conselice, 'De onzichtbare hand van het heelal', *Scientific American* (Nederlandse editie), april 2007, blz. 17-23.
 J. Heise, 'Dubbele pulsar stelt zwaartekrachttheorie op de proef', *Zenit*, maart 2007, blz. 112-116.
 J. Heise, 'Structuur in het duister', *Zenit*, april 2007, blz. 175-179.
 G.A. Krasinsky and V.A. Brumberg, 'Secular increase of astronomical unit from analysis of the major planets motions, and its interpretation', *Celestial Mechanics & Dynamics Astron.*, **90** (2004), blz. 267.
 E.M. Standish, 'The Astronomical Unit now'. In: D.W. Kurtz, editor, *Transits of Venus. New Views of the Solar System and Galaxy*, Proceedings IAU Colloquium No. 196, blz. 163 (Cambridge University Press, 2005).
 F. Verbunt, 'Donkere en lichtende materie in clusters van sterrenstelsels', *Zenit*, oktober 2006, blz. 454-461.
 M. Vonk, 'Had Einstein gelijk? De relativiteitsmissie van Gravity Probe B', *Zenit*, juli/augustus 2004, blz. 332-336.