



1. Ruimtesonde Rosetta scheert langs de aarde op 4 maart 2005 (artist's impression: ESA). In totaal zal Rosetta drie keer een zwaartekrachtslinger langs de aarde en één keer langs Mars maken voordat hij goed op weg is en uiteindelijk in 2014 de komeet 67P/Churyumov-Gerasimenko zal gaan onderzoeken.

Vreemde gedragingen van ruimtevaartuigen

Zwaartekracht en mogelijke onbekende interacties (1)

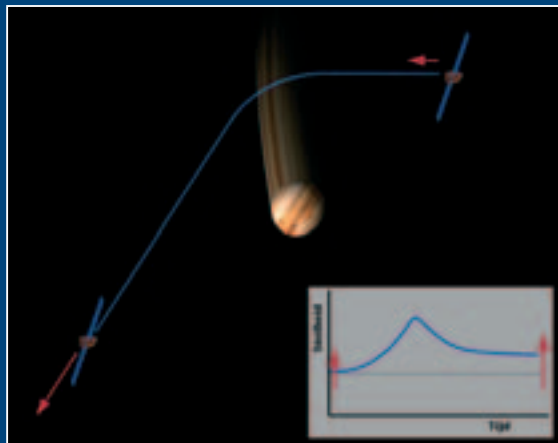
Vreemde krachten op ruimtevaartuigen, niet-waarneembare materie, merkwaardige verschijnselen tijdens zonsverduisteringen, een voorkeursrichting in de ruimte... Betekenen deze zaken dat we, ondanks de successen van Einsteins algemene relativiteitstheorie, de zwaartekracht niet goed begrijpen? En wat is er überhaupt waar van deze fenomenen? Dit is het eerste deel van een korte serie artikelen over waarnemingen van onbegrepen krachten en andere interessante fenomenen in de ruimte en op aarde.

Chris P. Duif*

* Chris Duif is experimenteel natuurkundige en werkt momenteel aan de TU Delft waar hij divers materiaalonderzoek doet met behulp van nieuwe technieken voor neutronenverstrooiing. Daarvoor had hij een verscheidenheid aan functies, zowel in het universitaire onderzoek als in het bedrijfsleven. Sinds zijn aanstelling op Starlab NV/SA te Brussel in 2001 heeft hij zich met de onderwerpen van dit artikel beziggehouden, maar tegenwoordig meer als nevenactiviteit.

Om brandstof te besparen laat men de ruimtevaartuigen die de buitenste regionen van ons zonnestelsel verkennen vaak op een bepaalde manier langs een planeet scheren. Op die manier kan wat van de bewegingsenergie van de planeet worden afgetapt of er aan afgegeven, respectievelijk om een grotere snelheid te verkrijgen of om af te remmen. Ook kan de rich-

Zwaartekrachtslingers: het aftappen van bewegingsenergie van planeten



Stel dat een ruimtesonde vlak langs een planeet scheert, bijvoorbeeld langs Jupiter. Tijdens de nadering zal de sonde door de zwaartekracht aan snelheid winnen, en ook zal zijn baan in de richting van de planeet afbuigen. Na het passeren zal de sonde echter weer vertragen en als de planeet niet bewoog, zou het netto-effect nul zijn.

De planeten staan echter niet stil, maar bewegen in banen om de zon (de aarde met bijna 30 km/s). Wanneer nu een ruimtesonde een planeet van achteren nadert, wordt hij als het ware meegetrokken: hij wint niet alleen aan snelheid door de zwaartekracht, maar ook door de snelheid van de planeet. Netto draagt de planeet daarbij een klein beetje van zijn bewegingsenergie aan de ruimtesonde over (zie grafiek).

Zo'n zwaartekrachtslinger (Engels: *gravity-assist*) kan worden nagebootst door een stalen kogel langs een bewegende magneet te laten rollen.

De snelheid van het ruimtevaartuig neemt na de piek tijdens het meest nabije punt wel weer af, maar is uiteindelijk groter dan vóór de passage.

ting van het apparaat met deze methode worden veranderd (zie kader 'Zwaartekrachtslingers'). Dat laatste is onder andere toegepast om de ruimtesonde Ulysses, die de poolgebieden van de zon onderzoekt, uit het vlak van de aardbaan te krijgen. Zonder deze methode zouden veel missies een veel grotere raket nodig hebben, en daardoor veel duurder zijn, of zelfs geheel onmogelijk zijn (zoals bij de Ulysses).

Een extra duwtje tijdens aardscheringen

De techniek van de zwaartekrachtslinger wordt al enkele decennia succesvol toegepast en de bijbehorende manoeuvres kunnen tot in het kleinste detail doorgerekend worden. Tijdens zo'n manoeuvre van de Galileo langs de aarde in 1990 viel echter op dat er rond het moment van de dichtste nadering tot onze planeet een onverklaarbaar extra sprongetje in de snelheid van het ruimtetuig leek op te treden van zo'n vier millimeter per seconde. Berekeningen laten zien dat de versnelling in de minuten rond het laagste punt ongeveer een honderdviendste van de normale (verticale) zwaartekracht op het oppervlak van de aarde is (10^{-4} m/s^2). Dat is natuurlijk een klein effect als de snelheid van de ruimtesonde in de orde van acht kilometer per seconde ligt, maar het zijn tamelijk

grote apparaten (meestal 1000-3000 kg) en de toename in bewegingsenergie is daardoor groot genoeg om een flinke mok ijswater aan de kook te brengen!

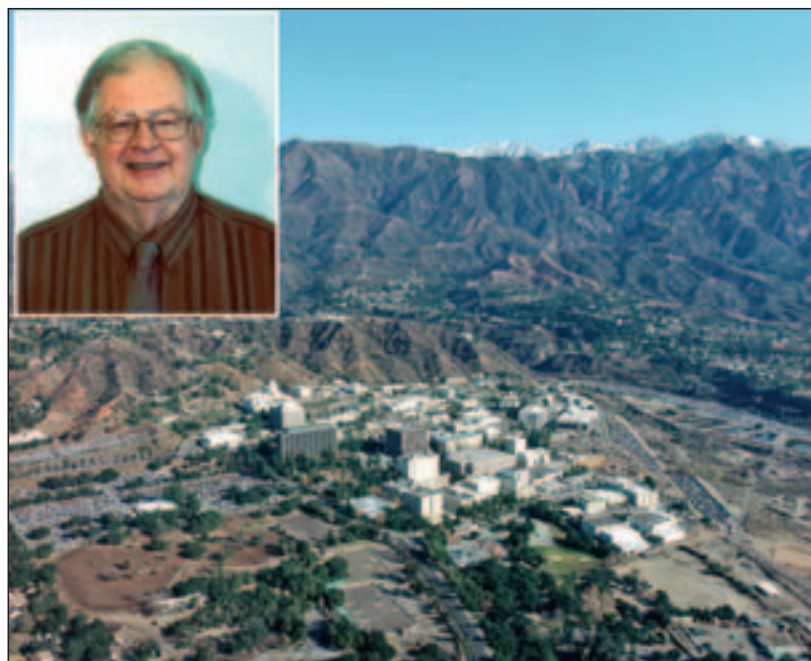
De onderzoekers van het *Jet Propulsion Laboratory* (Pasadena, Californië) gingen er aanvankelijk van uit dat er een fout moest zitten in de software die wordt gebruikt om de baangegevens te berekenen uit de signalen van ruimtevaartuigen. Deze signalen worden opgevangen door een van de schotelantennes van het *Deep Space Network* van de NASA. Ook werd onderzocht of een ongecontroleerd gebruik van een van de stuuraketjes verantwoordelijk kon zijn, evenals diverse andere oorzaken. Diverse onderzoeksteams vonden echter geen aanwijzingen dat dit het geval kon zijn.

Toen twee jaar later, in december 1992, de Galileo nog een laatste keer langs de aarde scheerde om definitief richting Jupiter te vliegen, was men natuurlijk zeer benieuwd of het effect opnieuw zou optreden. Helaas bleken de gegevens te onbetrouwbaar om tot een verantwoorde schatting van de anomale snelheidstoename (*delta-v*) – dat willen zeggen: een snelheidstoename die niet in overeenstemming is met de gangbare theorie – te komen. Waarschijnlijk lag dit aan het feit dat Galileo dit keer nog lager over de aarde scheerde, op zo'n 300 kilometer hoogte, waar de atmosfeer al een verstrend effect heeft.

Het onderzoek naar het verschijnsel bleef een aantal jaren liggen, totdat in januari 1998 het ruimtevaartuig NEAR, op weg naar de planetoïde Eros, ook zo'n zogeheten *gravity-assist* langs de aarde onderging. De hoogte van de baan lag tussen die van de twee Galileo-passages in en er was een duidelijke snelheidstoename waarneembaar – zelfs een nog grotere waarde dan die tijdens de eerste Galileo-passage, namelijk ruim dertien millimeter per seconde.

Bij Cassini en Rosetta ook

Een jaar later vertoonde ook de ruimtesonde Cassini een klein effect en vorig jaar werd het duidelijk waargenomen bij Rosetta (zie tabel). Inmiddels zijn dus bij vier ruimtevaartuigen kleine snelheidsafwijkingen waarge-



2. Luchtfoto uit begin jaren '60 van het Jet Propulsion Laboratory (JPL), waar de verrichtingen van de interplanetaire ruimtemissies van de NASA in de gaten worden gehouden. Inzet: John D. Anderson was als hoofd vluchtmechanica van onder meer de Pioneer-missies vanaf het eerste uur betrokken bij de flyby- en de Pioneer-anomalie.

Tabel 1. De waargenomen onverklaarde snelheidstoename van een aantal ruimtesondes. Rosetta is een missie van de ESA, de andere zijn van de NASA.

ruimtevaartuig	datum	minimale hoogte [km]	anomale snelheidstoename [mm/s]
Galileo	8 dec. 1990	960	$3,9 \pm 0,1$
	8 dec. 1992	303	meting onbetrouwbaar ^a
NEAR	23 jan. 1998	539	$13,5 \pm 0,1$
Cassini	18 aug. 1999	1173	$\sim 0,11$
Stardust	15 jan. 2001	5950	meting onbetrouwbaar ^b
Rosetta	4 maart 2005	1954	$1,80 \pm 0,05$
Messenger	2 aug. 2005	2526	~ 0 (voorlopige analyse)

^a Te lage baan: te veel weerstand door de atmosfeer.

^b Voortdurende activiteit van stuuraketjes tijdens de passage.

nomen. Het is echter moeilijk om daar al te veel wetmatigheden uit te destilleren. Er is een verband met de excentriciteit (maat voor de afwijking van een cirkelvorm) van de baan langs de aarde gesuggereerd, en de grootte van het effect zal natuurlijk ook afhangen van de afstand tot de aarde.

Waarom het effect dan niet wordt waargenomen bij satellieten die braaf rondjes (of eigenlijk ellipsjes) rond de aarde draaien, is merkwaardig. Dit zou kunnen samen-

hangen met het feit dat langsscherende ruimtevaartuigen een geheel ander soort baan volgen – veelal een zogeheten hyperbolische baan (objecten in zo'n baan zijn niet meer gebonden aan ons zonnestelsel en zullen het op den duur verlaten).

In de komende jaren zal Rosetta nog twee keer langs de aarde scheren, in november 2007 en november 2009, maar op hoogten van respectievelijk ca. 5000 en 2500 kilometer. Interessanter zijn waarschijnlijk nauwkeurige waarnemingen van scheervluchten langs andere planeten, zoals de komende Mars-passage van Rosetta, in februari 2007. Wanneer het effect ook dan optreedt, geeft dit veel meer zekerheid dat het niet om een over het hoofd gezien conventioneel effect gaat. Mars heeft immers een ander zwaartekrachtsveld, een veel ijlere atmosfeer, een veel zwakker magnetisch veld en minder warmtestraling. Het lijkt erop dat het zwaartekrachtsveld van Mars nauwkeurig genoeg bekend is voor zulke waarnemingen en onderzoekers van de universiteit Bremen zijn dan ook van plan deze te gaan uitvoeren. Als blijkt dat het effect ook bij Mars optreedt, zou een speciale missie met een ruimtevaartuig dat diverse keren langs de aarde en andere planeten scheert zeker op zijn plaats zijn.

Fouten in de radiocommunicatie?

Niet alle deskundigen denken echter dat er een onbe-

DSN en dopplerbepalingen

Een ruimtevaartuig wordt tijdens zijn vlucht regelmatig gevolgd door de grondstations van het *Deep Space Network* (DSN) van de NASA of ESTRACK van de ESA. Nadat een grondstation een microgolfsignaal van een nauwkeurig bekende frequentie naar het ruimtevaartuig heeft gezonden (*uplink*), zendt deze een signaal terug (*downlink*). Dit microgolfsignaal wordt weer met een van de grote schotelantennes opgevangen, zoals die van fig. 3 (de frequentie hangt af van de generatie van het ruimtevaartuig, ca. 2–35 GHz). Het ontvangen signaal wordt vervolgens vergeleken met de frequentiestandaard van het station en het verschil van de twee is de zogeheten dopplerverschuiving. Deze verschuiving wordt veroorzaakt door het snelheidsverschil tussen de sonde en de aarde en kan dus worden gebruikt om de snelheid van de sonde te berekenen. Ook is het in principe mogelijk om uit de tijd die het duurt voordat het antwoord weer op aarde wordt ontvangen de afstand van de ruimtesonde te berekenen (*ranging*).

Deze situatie, met een ruimtevaartuig dat op een signaal van de aarde reageert, wordt tweewegsverbinding genoemd. Vanwege de grote af-



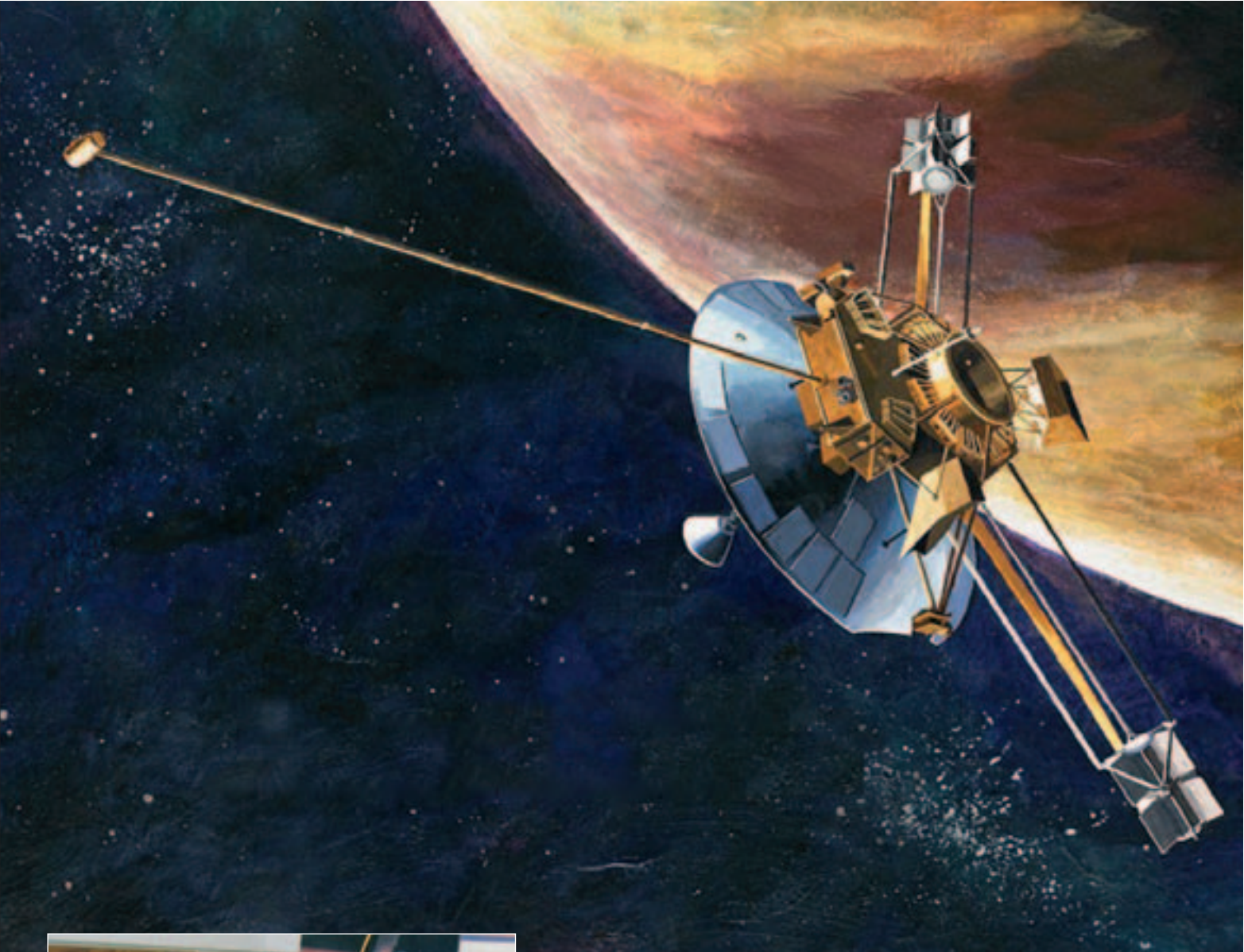
stand is er echter vaak sprake van een zogeheten driewegsverbinding: het grondstation dat het signaal uitzond is al door de draaiing van de aarde uit het zicht van het ruimtevaartuig verdwenen en een ander station pikt het *downlink*-signaal dan op. Bij een éénwegsverbinding zendt het ruimtevaartuig

zelfstandig een signaal uit waarvan de dopplerverschuiving wordt bepaald, maar omdat er geen voldoende stabiele signaalbron aan boord is, is deze methode veel onnauwkeuriger.

Om heel nauwkeurig te berekenen wat de precieze snelheid van een voorbij scherende satelliet is, is een gedetailleerde kennis van de vorm van de aarde en de verdeling van massa's daarin (o.a. verschillen in dichtheid van gesteenten) noodzakelijk. Door de berekende snelheidsvariatie te vergelijken met de gemeten snelheidsvariatie, werd de anomale snelheidsverandering ontdekt.



3. Het grondstation in Canberra, Australië, van het Deep Space Network (DSN) van de NASA, een van de stations die de flyby's van enkele ruimtesonde waarnamen (de NEAR-passage werd voornamelijk met dit station gevolgd). Andere stations van het DSN bevinden zich in Californië (Goldstone) en Spanje (bij Madrid). Deze plaatsen zijn met tussenruimten ongeveer 120° over de aardbol verdeeld, zodat altijd een van de stations contact kan hebben met een ruimtevaartuig als dit niet te dichtbij is. (Foto: NASA)



4. Peter Antreasian, vluchtmechanica-expert en, samen met Joseph Guinn, auteur van het eerste artikel over de *flyby*-anomalie¹, denkt dat er een aanpassing van de relativiteitstheorie of andere nieuwe fysica in het verschiet ligt.

5. In 1973 bezocht Pioneer 10 als eerste ruimtesonde de planeet Jupiter. Na de passage zou hij nog bijna 30 jaar blijven functioneren en gegevens naar de aarde zenden. Links is de 6 meter lange staaf te zien met daaraan een magneetsensor; aan de andere uitsteeksels zijn de nucleaire generatoren voor elektriciteit bevestigd. Vanwege hun warmteafgifte spelen deze generatoren een belangrijke rol in de discussie of er toch geen conventioneel effect verantwoordelijk is voor de onbegrepen kracht die de Pioneers afremt. De 2,74 meter grote paraboolantenne was tijdens de vlucht voortdurend naar de aarde gericht. (Artist's impression: JPL/NASA)

kend verschijnsel in het spel is. Een van de sceptici is Luigiano Iess, een Italiaanse specialist op het gebied van radiocommunicatie met satellieten. Hij houdt het voor mogelijk dat er toch onnauwkeurigheden zijn in de berekeningen van de snelheden uit de dopplergegevens en vindt het veel te vroeg om te roepen dat er sprake is van een nieuw effect. Peter Antreasian van het JPL spreekt echter tegen dat de onnauwkeurigheden waar Iess het over heeft een snelheidsafwijking kunnen opleveren zoals die bij NEAR en Galileo is waargenomen. Ook de Delftse specialist op het gebied van het berekenen van satellietbanen, Pieter Visser, heeft de indruk dat de mogelijke foutenbronnen zeer zorgvuldig geanalyseerd zijn met gerenommeerde softwarepakketten.

Een verband met de Pioneer-anomalie?

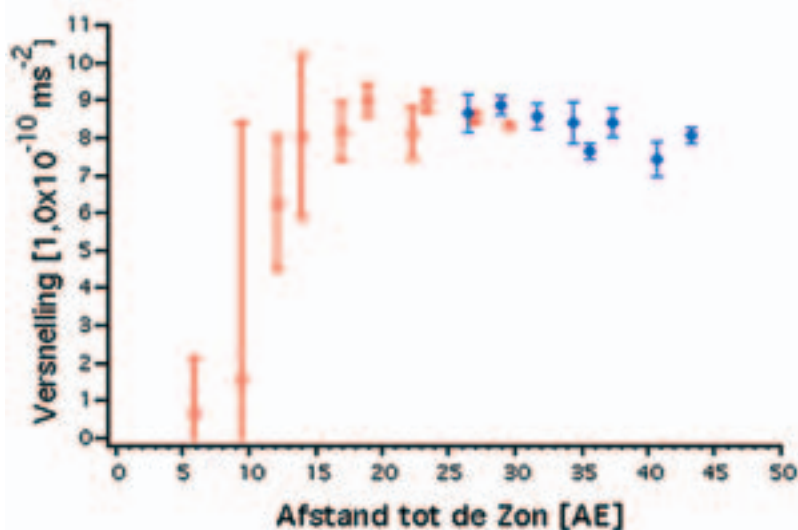
De *flyby*-anomalie heeft de laatste tijd wat meer aandacht gekregen, omdat enkele onderzoekers hopen dat deze aanwijzingen kan geven over de achtergrond van

6. Los Alamos-theoreticus Michael Martin Nieto van de *Pioneer Anomaly Collaboration* hoopt dat inzicht in de *flyby*-anomalie ook meer inzicht in de Pioneer-anomalie zal opleveren.



een ander onbegrepen fenomeen bij ruimtevaartuigen: de zogeheten *Pioneer*-anomalie.

Dit effect werd begin jaren tachtig van de vorige eeuw al opgemerkt door het vluchtleidingsteam van de *Pioneers* 10 en 11. Enige tijd na hun vlucht langs de planeet Jupiter leek het erop dat deze ruimtesondes een beetje meer vertraagden dan op grond van onze fysieke kennis zou moeten. Het was alsof er een extra kracht vanuit de richting van de zon aan de sondes trok. Meestal is zoiets aan een over het hoofd gezien conventioneel effect te wijten: een lekkende raketmotor of gastank, meer warmtestraling in een bepaalde richting, enzovoort. Een tiental jaren zoeken, rekenen en discussiëren door diverse teams van natuurkundigen en ingenieurs leverde echter geen *smoking gun* op. Zo werden de vluchtgegevens door vier verschillende teams ook met verschillende computerprogramma's doorgerekend en lijkt het zeker dat het geen reken- of softwarefout betreft. Opmerkelijk is vooral dat de beide *Pioneers* een even grote kracht ondervinden. Langzaam begon men zich te realiseren dat er wel eens iets bijzonders aan de hand



7. Vroege gegevens van de *Pioneer* 10 (blauw) en 11 (rood), respectievelijk 1981-1989 en 1977-1989. De verticale as geeft de onbegrepen versnelling in de richting van de zon (werkend als een vertraging op de ruimtesondes). Jupiter bevindt zich gemiddeld 5,2 AE van de zon, Saturnus gemiddeld 9,5 AE. Voor de *Pioneer* 10 konden uiteindelijk gegevens tot een afstand van 70 AE verzameld worden.

kon zijn en in 1998 verscheen, net als over de *flyby*-anomalie, de eerste publicatie over het effect.²

Simpele uitvoering bleek een voordeel

Het bleek dat de betrekkelijk simpele uitvoering van de beide *Pioneers* het mogelijk heeft gemaakt het effect te ontdekken. Zo is een zeer belangrijke eigenschap van deze beide ruimtesondes dat ze *spin-gestabiliseerd* zijn: ze draaien met frequenties van ca. 4,5 respectievelijk 7,5 omwentelingen per minuut om een as die door het midden van de paraboolantenne gaat en behouden op die manier zoals een gyroscoop hun oriëntatie in de ruimte. Alle latere sondes, zoals de *Voyagers*, hadden een veel complexere (driedimensionale) standregeling, die gebruik maakte van vliegwielen en/of het veelvuldig afvuren van stuurraketjes. Dit maakt een ruimtevaartuig veel flexibeler in het richten van camera's en andere instrumenten op een te onderzoeken planeet, maar verhindert het nauwkeurig bepalen van versnellingen op het vaartuig. De zogeheten *Extended Missions* van de *Pioneers* (na het bestuderen van de planeten) waren voor een deel ook bedoeld om door het nauwkeurig volgen van hun banen onbekende massa's in het zonnestelsel op te sporen. Waarschijnlijk heeft *Pioneer* 10 op die manier een onbekend object in de Kuiper gordel op een afstand van 56 AE ontdekt.

Dopplerverschuiving

Dichtbij de zon is de stralingsdruk nog te groot om zeer kleine afwijkingen in de versnellingen van ruimtesondes waar te nemen. Maar in de jaren tachtig passeerden de *Pioneers* de baan van Uranus op ca. 20 AE van de zon en op die afstand is de stralingsdruk van de zon veel kleiner. Na correctie voor alle bekende factoren bleek dat er een onbekende vertraging van de ruimtevaartuigen overbleef van ongeveer 10^{-9} ms^{-2} . Dit is weliswaar een kleine waarde (een tienniljardste van de zwaartekrachtsversnelling aan het aardoppervlak), maar in de loop van de jaren werd voor beide *Pioneers* consequent dezelfde waarde gemeten (zie fig. 5). Opgeteld over al



8. Leden van het JPL-navigatieteam aan het werk op de dag van de lancering van de *Pioneer* 10 in 1973. Op de voorgrond Tony Liu en Phil Laing, die later deel zouden gaan uitmaken van de *Pioneer Anomaly Collaboration*. De stapel kaarten met 'Last Card', waar de computers in die tijd mee geprogrammeerd werden en de lange papieruitdraai zijn kenmerkend voor de computertechnologie van die tijd. (Met dank aan Michael Martin Nieto).

die jaren heeft dit ertoe geleid dat de Pioneers al ruim 400.000 kilometer minder ver gevorderd zijn dan we zouden verwachten.

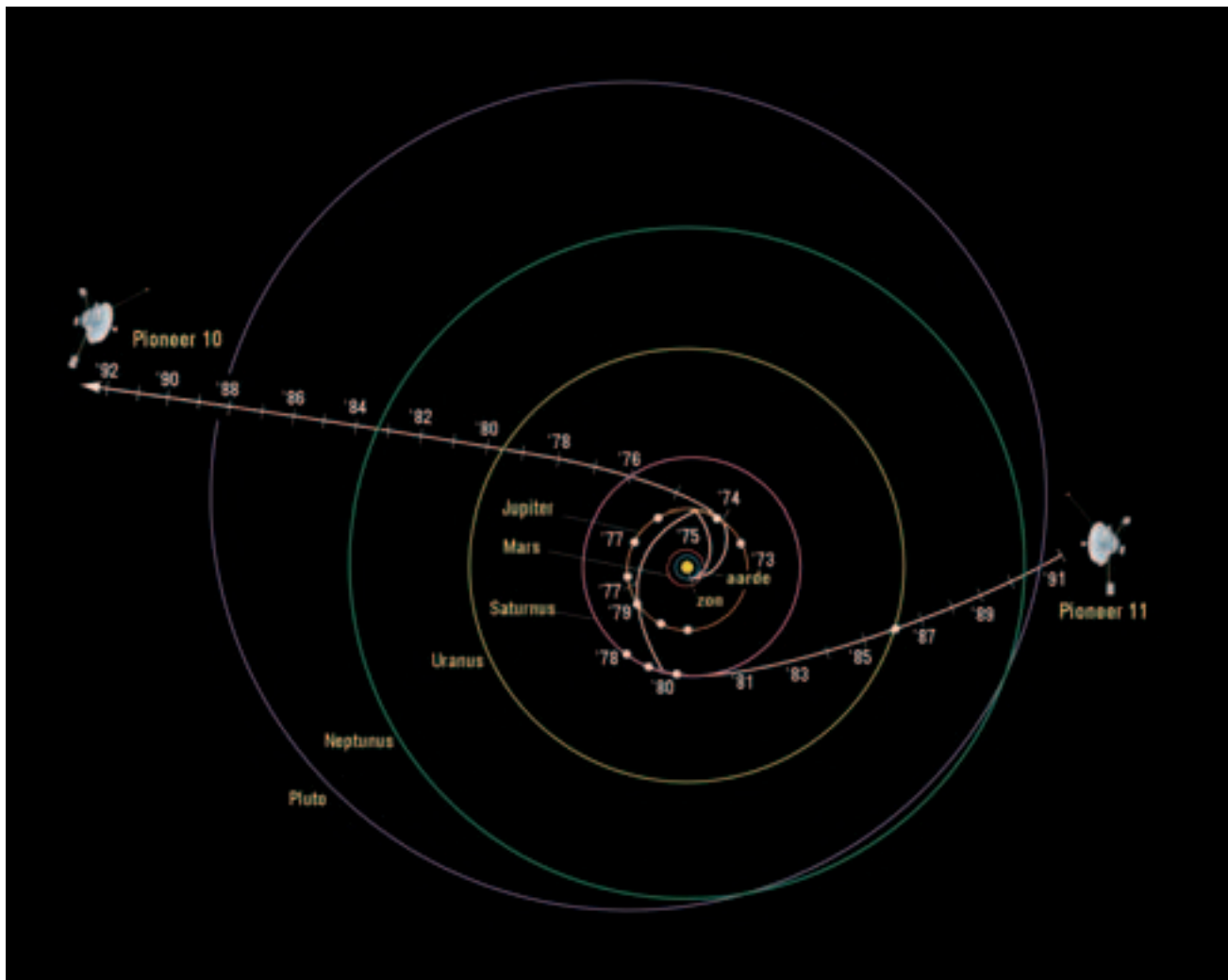
Een complicatie daarbij is dat die extra vertraging niet direct wordt gemeten, maar wordt berekend uit de dopplerverschuiving tussen het verzonden en het ontvangen microgolfsignaal (zie het kader 'DSN en dopplerbepalingen'). Er zijn theoretici die denken dat er onderweg wat met de microgolven gebeurt, waardoor ze een iets andere golflengte krijgen. In elk geval is wel vast komen te staan dat de onbekende kracht geen zwaartekracht van onbekende massa's in het zonnestelsel kan zijn of een kracht met de eigenschappen van zwaartekracht. Dan zou die kracht immers ook een invloed op de banen van planeten uitoefenen en ruimschoots groot genoeg zijn om opgemerkt te worden. De baan van met name de planeet Mars is zo nauwkeurig bekend dat een extra kracht van een paar honderdste van de Pioneer-anomalie al waarneembaar zou zijn! Daarom wordt er veel over gespeculeerd of deze anomalie al dan niet op het bestaan van een onbekende kracht in het zonnestelsel kan duiden.

Hebben de beide anomalieën wel met elkaar te maken?

Sommige onderzoekers denken dat de Pioneer-anomalie en de *flyby*-anomalie met elkaar te maken kunnen



9. De bijna verloren gegane tapes met gegevens uit de eerste jaren van de Pioneers 10 en 11 zouden binnenkort wel eens veel meer inzicht in het gedrag van de Pioneer-anomalie kunnen gaan geven. (Met dank aan Slava Turyshev)



10. De banen van Pioneer 10 en 11 in het zonnestelsel (niet op schaal). Pioneer 10 bezocht Jupiter in december 1973, Pioneer 11 volgde een jaar later en vloog daarna langs Saturnus (september 1979). Inmiddels bevinden ze zich al ver buiten de baan van Pluto: Pioneer 10 op ruim 90 AE (de afstand Pluto-zon is ca. 40 AE). Bij deze afstand zou een radio-signaal heen en terug er 25 uur over doen – er is echter geen radiocontact meer met beide sondes. De Pioneers bewegen in ongeveer tegengestelde richting ons zonnestelsel uit.



11. Sputnik V is een van de concepten binnen de ESA voor een reis naar de buitenste regionen van ons zonnestelsel, o.a. om onderzoek naar de Pioneer-anomalie te doen. Deze missie zou moeten plaatsvinden in de periode 2015–2025. (Illustratie: O. Bertolami/Air & Cosmos magazine)

hebben. Vlak voor de onbegrepen kracht werd waargenomen, kregen de beide Pioneers een zwaartekracht-slinger van Jupiter en Pioneer 11 ook van Saturnus. Hierdoor kwamen ze in banen met snelheden die groot genoeg waren om aan het zonnestelsel te ontsnappen (zogenoemde hyperbolische banen). Zoals te zien is in figuur 7, zijn de eerste meetpunten in de grafiek van Pioneer 11 echter nogal onnauwkeurig, waardoor je niet goed kunt zien of het effect op een bepaald moment begonnen is.

De gegevens die de Pioneers vóór 1987 hebben verzameld zijn tot nu toe echter niet gebruikt. Zwaartekrachtsexpert Slava Turyshev, al zo'n tien jaar bij het onderzoek betrokken, is daarom op zoek gegaan naar de vluchtgegevens van de eerste jaren. Dat bleek niet eenvoudig: de gegevens lagen verspreid over diverse opslagplaatsen en in diverse oude formaten: op magneetbanden, op floppy's, enz. Een deel stond zelfs op het punt weggegooid te worden. Inmiddels is alles overgezet naar moderne bestanden en is het team onder leiding van Turyshev begonnen met de analyse.

Het ziet er naar uit dat er tientallen keren meer meetpunten zijn dan in de eerste analyses zijn gebruikt – voor Pioneer 10 vanaf een afstand van 4,5 AE en voor Pioneer 11 al vanaf vlak na de lancering. Dit maakt het misschien ook mogelijk de precieze richting van de kracht te bepalen (op afstanden van tientallen AE is het onderscheid tussen de richtingen van de zon en de aarde niet te berekenen). Blijkt die nu toch naar de aarde te wijzen, dan heeft hij waarschijnlijk niets met de zwaartekracht te maken; maar als hij echt naar de zon wijst, is het een ander verhaal.

Peter Antreasian is een van de wetenschappers die niet in een verband tussen beide fenomenen geloven. In de eerste plaats is bij de Pioneer-anomalie sprake van een min of meer constante kracht die altijd in de zelfde richting wijst (en vertragend op het ruimtevaartuig werkt), terwijl in het geval van de *flyby*-anomalie gedurende enkele tientallen minuten rond het meest nabije punt met de aarde een versnelling plaatsvindt in de bewegingsrichting van de ruimtesonde. Bovendien wijst de Duitse fysicus Claus Lämmerzahl er op dat de *flyby*-anomalie al

bij vier verschillende ruimtesondes is waargenomen, en de Pioneer-anomalie alleen bij dat ene type.

Voor beide anomalieën geldt dus dat er de komende jaren al meer duidelijkheid kan komen over hun aard. In het geval van de Pioneer-anomalie door de analyses van de gehele vlucht van de Pioneers, bij de *flyby*-anomalie door analyses van scheervluchten langs Mars.

In het volgende deel van deze serie over zwaartekracht en mogelijke zwaartekrachtanomalieën worden o.a. de berichten over afwijkingen van het gedrag van slingers en gravimeters tijdens zonsverduisteringen onderzocht.

Literatuur

1. P.G. Antreasian and J.R. Guinn, *Investigations into the unexpected delta-V increases during the Earth gravity assists of Galileo and NEAR*, AIAA 98-4287 (1998).

J.D. Anderson, P.A. Laing, E.L. Lau, A.S. Liu, M.M. Nieto and S.G. Turyshev, Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration, *Phys. Rev. Lett.* Vol. **81** (1998), p. 2858.

Voor meer informatie over de Pioneer-anomalie, zie o.a. C.P. Duif, *Ruimtevaartuigen in de ban van onbegrepen versnelling*, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, januari 2005, blz. 26-29.

Veel literatuur over de Pioneer-anomalie en de *flyby*-anomalie kan gevonden worden op www.space-time.info/pioneer/