

Die Pioneer-Anomalie

Das größte von Menschen durchgeführte Experiment und sein Rätsel

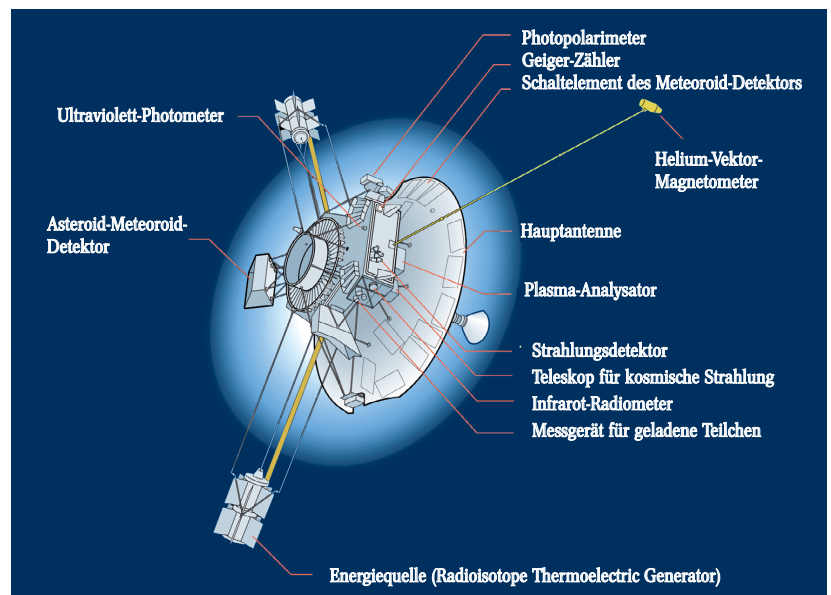
Hansjörg Dittus und Claus Lämmerzahl

Ende der 70er-Jahre wurde erstmals eine anomale Beschleunigung der Raumsonden Pioneer 10 und 11 festgestellt, für die eine schlüssige Erklärung bis heute aussteht. Manifestiert sich in dieser Anomalie eine „neue“ Physik oder ist dieser Effekt zwar noch nicht verstanden, aber im Rahmen der Standardtheorie erklärbar? Oder handelt es sich vielleicht doch nur um einen Messfehler? In diesem Artikel wollen wir Argumente dafür vorbringen, dass sich ein Messfehler mit großer Wahrscheinlichkeit ausschließen lässt. Abgesehen davon hat dieses offene Problem die Diskussion vieler grundlegender Fragestellungen wie den Einfluss der Kosmologie auf das Sonnensystem stimuliert.

Sowohl die Grundlagen als auch die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind mit allen Experimenten und Beobachtungen in Übereinstimmung [1, 2]. Trotz dieser bedeutenden Erfolge gibt es einige Phänomene, die nicht ganz in unser Weltbild der Standardphysik passen: Dies sind zunächst die dunkle Materie und die dunkle Energie [3, 4]. Ein weiteres offenes Problem ist die Pioneer-Anomalie, eine bisher nichtverstandene anomale Beschleunigung der Pioneer-Sonden 10 und 11 (Abb. 1) in Richtung zur Sonne. Die primäre Frage ist hierbei, ob diese Beobachtung wirklich glaubwürdig ist. Dies möchten wir im Folgenden diskutieren. Falls diese Beobachtung sich bewahrheitet, kann man darüber spekulieren, ob dieses Phänomen vielleicht etwas mit der dunklen Materie oder dunklen Energie bzw. einer Modifikation der Feldgleichungen der Gravitation zu tun hat. Einige Untersuchungen behaupten dies, was der Anomalie zusätzliche Bedeutung verleiht. Wenn dem so wäre, hätte man auch die Möglichkeit, mittels einer weiteren Mission den Einfluss und die Natur der dunklen Materie und/oder dunklen Energie bzw. einer modifizierten Gravitation erforschen zu können, was auch enorme Konsequenzen für die Physik und Entstehung der Galaxien [5, 6] und des Universums als Ganzes hätte. Daher wird dieses Thema aktuell sehr stark diskutiert. Viele theoretische Arbeiten beschäf-

KOMPAKT

- ▶ Die sehr genaue Navigation der amerikanischen Planetensonden Pioneer 10 und 11 ermöglichte die Entdeckung der sog. Pioneer-Anomalie.
- ▶ Diese anomale Beschleunigung hat zur Folge, dass die Sonden nach 15 Jahren um ca. eine Million Kilometer von der vorhergesagten Position abweichen.
- ▶ Da ein Messfehler nach einer sorgfältigen Datenanalyse mit großer Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist, wird u. a. auch darüber spekuliert, ob vielleicht sogar die rätselhafte „dunkle Energie“ für die Pioneer-Anomalie verantwortlich sein könnte.



tigen sich mit diesem Problem, eine neue Analyse der gesamten Pioneer-Daten ist geplant, und die Konzeption einer neuen Mission wird diskutiert.

Die Pioneer-Sonden

Die Sonde Pioneer 10 startete am 2. März 1972, Pioneer 11 ein Jahr später am 5. April 1973. Beide wurden auf ca. 14,4 km/s beschleunigt, womit sie innerhalb von elf Stunden den Mond erreichten und schon nach zwölf Wochen am Mars vorbeiflogen. Pioneer 10 durchquerte im Juli 1972 den Asteroidengürtel und erreichte am 4. Dezember 1973 den Jupiter, der die Sonde auf 36,7 km/s beschleunigte, womit sie in eine Bahn eingeschossen wurde, auf der sie das Sonnensystem verließ (Abb. 2). Ende der 90er-Jahre ging die Energieversorgung langsam zu Ende. Die Mission wurde formell am 31. März 1997 (Abstand ca. 67 AU)¹⁾ beendet, die letzten Messdaten wurden jedoch noch am 27. April 2002 empfangen, das letzte Signal erreichte die Erde am 23. Januar 2003. Pioneer 11 flog zwei Jahre nach Pioneer 10 durch den Asteroidengürtel und wurde beim Vorbeiflug am Jupiter in Richtung Saturn ab-

Abb. 1: Der Aufbau der Planetensonden Pioneer 10 und 11. Bis 2003 bzw. 1995 konnten noch letzte Signale der Sonden empfangen werden. (Quelle: NASA)

1) 1 Astronomische Einheit (Astronomical Unit, AU) beträgt rund 150 Millionen Kilometer und entspricht etwa dem mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne.

Dr. Hansjörg Dittus und Priv.-Doz. Dr. Claus Lämmerzahl, ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen, dittus@zarm.uni-bremen.de, laemmerzahl@zarm.uni-bremen.de

gelenkt, den sie am 1. September 1979 erreichte. Mitte der 90er versagte Pioneer 11. Die letzten Daten wurden am 30. September 1995 übertragen, das letzte Signal erreichte im November 1995 die Erde. Pioneer 11 bewegt sich auf das Sternbild des Adlers zu und wird in etwa vier Millionen Jahren den nächsten Stern erreichen. Pioneer 10 wird in ca. zwei Millionen Jahren beim Stern Aldebaran ankommen. Für den Fall, dass fremde Zivilisationen die Sonden finden sollten, wurde auf diesen sogar eine eigens entworfene Plakette angebracht.

Die Pioneer-Sonden sollten als erste Sonden überhaupt den erdfernen Weltraum und speziell Jupiter und Saturn erkunden. Außerdem sollten sie nach dem ominösen „Planeten X“ suchen, der jenseits von Neptun vermutet wurde. Um einerseits relativ nahe am Jupiter und Saturn vorbeifliegen zu können und um auch das schwache Gravitationsfeld des unbekanntem Planeten X nachweisen zu können, mussten die Sonden sehr genau navigiert werden können. Diese genaue Navigation ermöglichte die Entdeckung der Pioneer-Anomalie.

Die Pioneer-Sonden wurden mittels des Deep Space Network DSN (in Goldstone/USA, Madrid/Spanien, Canberra/Australien) navigiert. Von den Bodenstationen werden Radiowellen einer wohldefinierten Frequenz zum Satelliten gesandt (*uplink*), der sie wieder mit einer 8-W-Sendeanlage und eines Transponders mit einer um den Faktor 240/221 konvertierten Frequenz zurückschickt (*downlink*). Dieses Frequenzverhältnis ist „fest verdrahtet“ und kann nicht geändert werden.

Von Zeit zu Zeit und nach den Vorbeiflügen an den großen Planeten musste der Satellit neu ausgerichtet werden, wozu kleine am Rand des Parabolspiegels angebrachte Triebwerke für eine kurze Zeitdauer eingeschaltet wurden. Die Eigenrotation der Sonde von knapp 5 bis 8 Umdrehungen pro Minute um die Symmetrieachse des Parabolspiegels diente der Stabilisierung der Ausrichtung der Satelliten auf die Erde.

Die Beobachtung

Das bei den Pioneer-Sonden verwendete Prinzip zur Messung ihrer Geschwindigkeiten bezüglich der Erde beruht auf der Zwei-Wege-Doppler-Verschiebung.

Dabei wird von der Erde aus ein Radiosignal mit einer wohldefinierten Frequenz ν zu den Sonden geschickt (Abb. 3). Die von diesen Sonden empfangene Frequenz ν' hängt über die Doppler-Verschiebung von der Relativgeschwindigkeit v zwischen Sender und Empfänger ab,

$$\nu' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \nu, \quad (1)$$

wobei wir hier der Einfachheit annehmen, dass die Sonde sich radial von uns wegbewegt. Direkt nach dem Empfang dieses Signals sendet die Sonde ihrerseits ein Signal mit der Frequenz des empfangenen Signals zurück.²⁾ Dieses Signal kommt dann auf der Erde mit der Frequenz

$$\nu'' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \nu' \quad (2)$$

an. Durch Elimination der Frequenz ν' ergibt sich dann über die relative Frequenzdifferenz

$$\frac{\nu'' - \nu}{\nu} = -2 \frac{v/c}{1 + v/c} \approx -2 \frac{v}{c} \quad (3)$$

die Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger. Wichtig ist hierbei, dass man keine Information über die von der Sonde gemessene Frequenz benötigt.

Umgekehrt kann man aus Bahndaten sowie den bekannten Gravitationsfeldern der Sonne, der Planeten und Asteroiden sowie durch Berücksichtigung des Einflusses des Sonnenwindes, des interplanetaren Staubes etc. die Geschwindigkeit v_{Theorie} der Pioneer-Sonden berechnen und diese mit der gemessenen Geschwindigkeit v_{Messung} vergleichen. Primär hat man es aber mit Frequenzmessungen zu tun, d. h. aus der berechneten Geschwindigkeit kann man eine Frequenzverschiebung vorhersagen und diese mit der tatsächlichen Messung vergleichen.

Neben der Frequenz wurde auch die Laufzeit Δt der Signale gemessen, die vermöge $2d = c\Delta t$ die Entfernung d des Satelliten zur Erde ergibt. Dies kann mit der aus der Doppler-Messung ermittelten Geschwindigkeit verglichen werden. Diese beiden unabhängigen Messmethoden lieferten Konsistenzchecks, trugen zur Fehlereliminierung bei und erlauben es auch, einige phänomenologische Erklärungsmodelle auszuschließen. Die Position der Sonden lässt sich außerdem über die Modulation der Doppler-Daten aufgrund der Eigenrotation der Erde bestimmen.

Seit 1979 wurde gegenüber der berechneten Frequenz eine anomale Blauverschiebung des Doppler-Signals festgestellt. Mit den daraufhin genauer analysierten Daten von 1987 bis 1998 für Abstände zwischen 20 und 70 AU stellte sich heraus, dass diese Blauverschiebung mit einer konstanten Rate

$$\frac{d\Delta\nu}{dt} = (5,99 \pm 0,01) \cdot 10^{-9} \text{ Hz/s} \quad (4)$$

mit $\Delta\nu = \nu_{\text{Messung}} - \nu_{\text{Theorie}}$ zeitlich anwuchs [7, 8] (Abb. 4).

Auf der Ebene der Geschwindigkeiten lässt sich dies als eine konstante Abbremsung interpretieren. Diese Abbremsung mit

$$a_{\text{Pioneer}} = \frac{d\nu}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{c}{\nu} \frac{d\Delta\nu}{dt} = -(8,74 \pm 1,33) \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

2) Der Einfachheit halber lassen wir den Unterschied zwischen der uplink- und downlink-Frequenz außer acht. Dieser Unterschied kann leicht berücksichtigt werden und ändert am Prinzip des Verfahrens nichts. Darüber hinaus sind die verwendeten Radiosignale zirkular polarisiert, so dass bei der Kommunikation die Rotation der Sonden zu berücksichtigen ist. Das bedeutet, dass pro Umdrehung der Sonde eine zusätzliche Phase von $(1 + 240/221) 2\pi$, die auch das Umwandeln der Frequenz im Transponder berücksichtigt, hinzukommt.

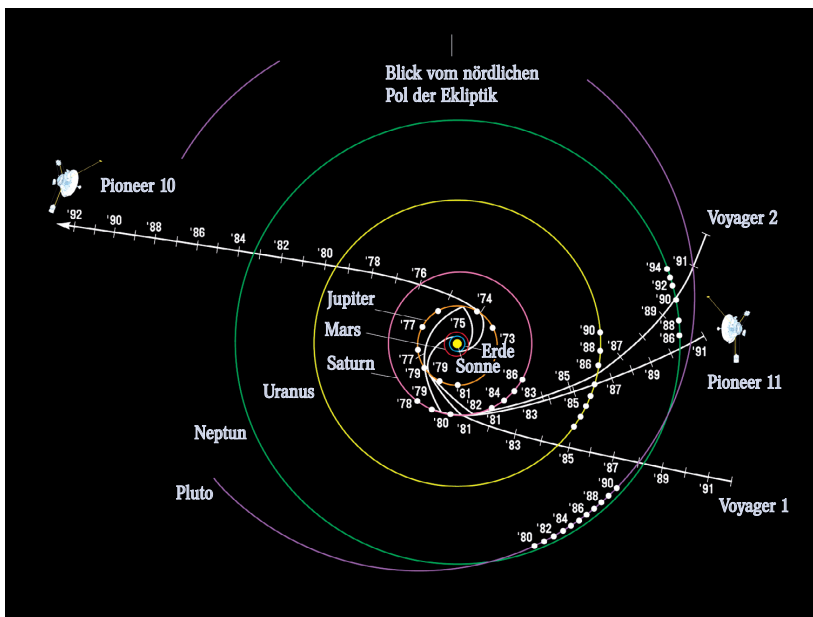


Abb. 2: Die Bahnen der Sonden Pioneer 10 und 11 (sowie von Voyager 1 und 2), die Anfang der 90er-Jahre das Sonnensystem verlassen haben.

nennt man die *Pioneer-Anomalie* (Abb. 5). So klein dieser Wert auch zu sein scheint, ist dieser Effekt doch im Vergleich ziemlich groß; er beträgt etwa 10^{-5} der Newtonschen Beschleunigung auf die Sonde. Das bedeutet, dass die Sonden nach 15 Jahren um ca. eine Million Kilometer von der vorhergesagten Position entfernt sind. Dagegen sind relativistische Korrekturen zur rein Newtonschen Dynamik um Faktoren U/c^2 , v^2/c^2 , $r a/c^2$, die von der Größenordnung von 10^{-8} bis 10^{-10} sind, kleiner.³⁾

Die Messung ergab auch, dass das anomale Signal nur um maximal 3,5 % über die Beobachtungszeit variiert. Dies bedeutet, dass die Pioneer-Sonden eine vom Betrag und der Richtung konstante Beschleunigung in Richtung auf die Sonne erfahren. Mit einer Auflösung von 3° wurde jedoch die Richtung der Beschleunigung nur recht ungenau bestimmt.

Die Pioneer-Daten wurden mit drei verschiedenen Programmpaketen⁴⁾ analysiert. Für alle Codes ergab sich dasselbe Resultat. Darüber hinaus wurde auch die numerische Genauigkeit der Berechnungen abgeschätzt. Auch diese liegt unterhalb der Fehlergrenze. Es ist geplant, am ZARM in Zusammenarbeit mit dem JPL die gesamten Pioneer-Daten ab deren Start bis zur letzten Datenübermittlung neu und unabhängig zu analysieren.

Die Beschleunigung wurde für *beide* Pioneer-Sonden *unabhängig* bestimmt; die Ergebnisse lagen maximal um 3 % auseinander. Eine ähnliche Beschleunigung in Richtung zur Sonne scheint auch bei den Sonden Galileo und Ulysses aufzutreten [8], wobei diese Messungen allerdings viel ungenauer und stark modellabhängig (z. B. von Annahmen über den Sonnenwind) sind, sodass diese Resultate zwar die Pioneer-Anomalie tendenziell untermauern, als Einzelmessung jedoch schlecht abgesichert sind. – Obwohl es vermutlich nichts mit der Pioneer-Anomalie zu tun hat, ist es vielleicht doch interessant anzumerken, dass kürzlich drei Gruppen durch unabhängige Analyse aller verfügbarer

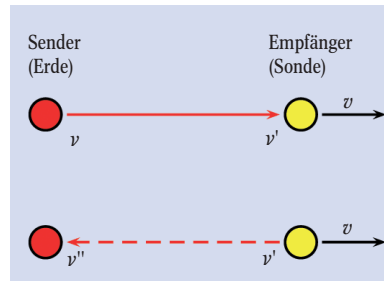


Abb. 3: Von der Erde wird ein Signal der Frequenz ν zur Sonde geschickt, die dort mit v ankommt, worauf die Sonde ein Signal mit der Frequenz ν' zurückschickt, welches mit der Frequenz ν'' auf der Erde ankommt. Das Messsignal ist $\nu'' - \nu$.

Daten ein Anwachsen der astronomischen Einheit AU um 7 Meter pro Jahrhundert festgestellt haben [9]. Außerdem machen Satellitennavigatoren der ESA und NASA die Erfahrung, dass bei vielen Vorbeiflügen (fly-bys) von Satelliten an der Erde eine kleine unerklärliche Geschwindigkeitszunahme auftritt [10].

Auf der Suche nach Fehlern

Um die Doppler- und Laufzeit-Messungen interpretieren zu können, müssen vier Gruppen von Einflüssen auf das Messergebnis genau untersucht werden. Diese sind (i) die gravitativen und (ii) nichtgra-

vitativen Effekte auf den Satelliten, (iii) die satelliteninternen Effekte und (iv) Einflüsse auf die Beobachtung selbst. Die ersten beiden Gruppen werden im gleichnamigen Infokasten abgehandelt. Wir zeigen, dass all diese Einflüsse einen nur kleinen vernachlässigbaren Effekt auf die Messung oder die Interpretation der Messung haben, was wesentlich auf die Analyse der Gruppe um J. D. Anderson am JPL zurückgeht [8].

Einfluss des Satelliten

Viele Effekte, die durch den Satelliten selbst hervorgerufen werden, lassen sich nur indirekt abschätzen. Viele Details sind zu berücksichtigen, die die ganze Argumentation unübersichtlich machen. Allerdings hilft die Vielzahl der Details auch dabei, Konsistenzbetrachtungen durchzuführen. Nur in wenigen Punkten müssen Plausibilitätsargumente herhalten. Die ausführliche Fehleranalyse, in der auch auf alle bis dahin aufgeworfenen Einwände eingegangen wird, findet sich in [8].

Die Pioneer-Sonden 10 und 11 wogen beim Start 260 kg, wovon 40 kg Treibstoff waren. Die Parabolantenne hat einem Durchmesser von fast 3 m. Die Energie lieferten zwei *Radioisotope Thermoelectric Generators* (RTGs), die auf dem radioaktiven Zerfall von Plutonium ^{238}Pu basieren und an 3 m langen Auslegern am Satelliten angebracht sind. Nach dem Start erzeugten diese 2580 W, von denen 160 W in elektrische Energie umgewandelt wurden. Die Instrumente benötigen 100

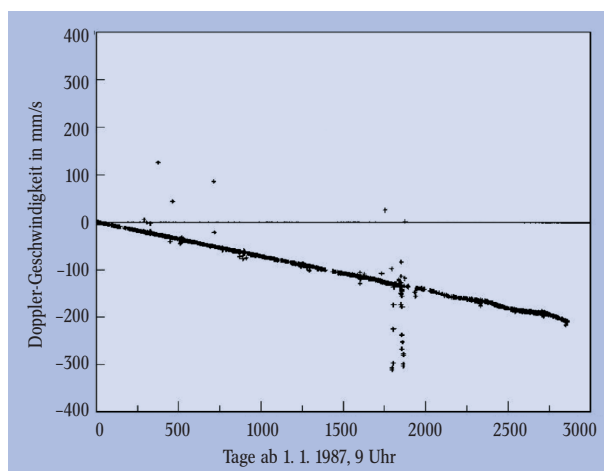


Abb. 4: Die im Laufe von 10 Jahren ab 1987 gemessene anomale Frequenzabnahme lässt sich auch als Abnahme der Geschwindigkeit darstellen. Eine Frequenzänderung um 1 Hz entspricht einer Geschwindigkeitsänderung von 65 mm/s.

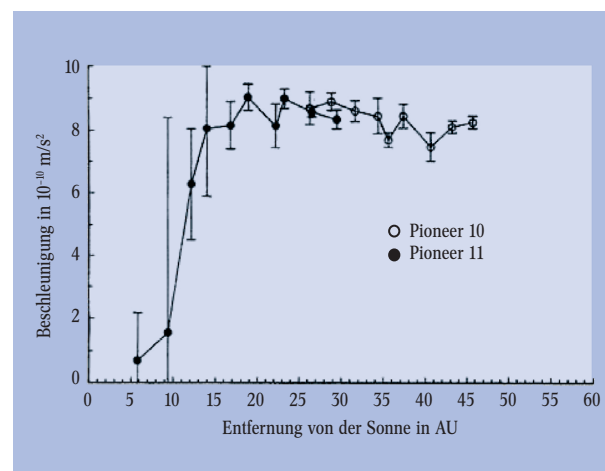


Abb. 5: Die nicht modellierten Beschleunigungen von Pioneer 10 und 11. Auffallend ist die Gleichheit der Beschleunigungen bei beiden Sonden, obwohl diese das Sonnensystem in entgegengesetzter Richtung verlassen.

3) Dabei ist U das Newtonsche Potential und r der Abstand von der Sonne.

4) Dem Orbit Determination Program vom JPL, dem Programm POEAS der Aerospace Corporation und einem Code des NASA Goddard Space Flight Center.

W. Der Abfall der verfügbaren Energie wird durch die Halbwertszeit des Plutoniums von 87,75 Jahren und wesentlich durch Verschleiß der elektrischen Komponenten bestimmt, was einen Abfall der verfügbaren Energie in 20 Jahren um ca. die Hälfte bedingte (Abb. 6). An verschiedenen Positionen der Sonden waren Temperatursensoren angebracht.

Das Senden von Signalen mit einer Leistung von 8 W bewirkt einen Rückstoß auf die Pioneer-Sonden von weniger als 15 % der Anomalie weg von der Sonne, was in die Messung eingerechnet wurde. Bei jedem Satellitenmanöver, bei dem der Satellit neu auf die Erde ausgerichtet wurde, gab es einen zusätzlichen kleinen Drehimpuls und Geschwindigkeitsschub gefolgt von einem einige Tage andauernden unkontrollierten Treibstoffaustritt, was nochmals die Bewegung veränderte. Auf die ganze Mission gesehen waren das kumulative Effekte. Diese einzelnen Änderungen der Satellitenbewegung ließen sich sehr genau bestimmen und das Messergebnis entsprechend korrigieren. Auch eine mögliche elektrische Aufladung und somit eine Beeinflussung der Satellitenbewegung durch Magnetfelder im äußeren Sonnensystem ließ sich durch am Jupiter durchgeführte Plasma-Messungen mit hoher Präzision ausschließen.

Die durch die Wärmeabstrahlung induzierte Beschleunigung ist der größte Effekt, der sich aber auch gut abschätzen lässt, obwohl dies aufgrund der Komplexität des Problems der heikelste Punkt in der Argumentation ist. Bei ca. 2580 W zur Verfügung stehender Leistung müssen abzüglich der elektrischen Energie im Durchschnitt etwa 2000 W abgestrahlt werden; allerdings würde die gerichtete Abstrahlung von 63 W schon die Anomalie erklären. Es gibt nun zwei Gründe, warum diese Abstrahlung jedoch kaum Einfluss auf die Bewegung der Sonden haben konnte. Zunächst müsste die Abnahme der zur Verfügung stehenden Energie auch eine Abnahme der Beschleunigung zur Folge haben. Innerhalb von zwanzig Jahren ist diese Leistung auf 80 % abgefallen, was eine Änderung der Beschleunigung um mehr als 30 % der Anomalie ausmachen würde. Dies ist aber nicht beobachtet worden. Der zweite Grund ist die geometrische Anordnung der thermoelektrischen Generatoren (RTGs) und die symmetrische Abstrahlung. Auch die im Satelliten erzeugte Wärme müsste, falls deren Abstrahlung für die Anomalie verantwortlich wäre, einen Abfall von mehr als 30 % zeigen.

Der Zerfall des ^{238}Pu erzeugt Helium, welches unter Rückstoß mit 1,22 km/s austritt. Unter Berücksichtigung der Zerfallsrate, der Menge an vorhandenem Plutonium und der Temperatur ergibt sich eine Heliumproduktion von 0,77 Gramm pro Jahr, was maximal eine Beschleunigung von ca. 15 % der Anomalie verursacht. Berücksichtigt man jedoch die Geometrie der RTGs und der Sonde, ergibt sich eine maximale Beschleunigung von 1,5 % der Anomalie.

Da die Sonden immer mit einer Seite in Richtung Erde zeigten und damit im Wesentlichen auch Richtung Sonne, könnte die Abstrahlcharakteristik der RTGs in Sonnenrichtung sich gegenüber der entgegengesetzten Richtung verändert haben. Auf der der Sonne zugewandten Seite könnten Sonnenstrahlung und -wind, auf der Rückseite interplanetarer Staub die Oberflächen verändert haben. Bei anderen Missionen wurde jedoch keine merkliche Veränderung von Oberflächen festgestellt. Auch hätte dann der Vorbeiflug am Jupiter, wo die Elektronen- und Protonenstrahlung um viele Größenordnungen höher als in Erdnähe ist, einen

sprunghaften Effekt ergeben müssen. Eine Änderung der Abstrahleigenschaften hätte bei gleichbleibender erzeugter Energie eine Änderung der Oberflächentemperatur der RTGs zur Folge, was aber nicht gemessen wurde. Aus der Konstanz der Temperatur konnte eine maximale Ungleichheit der Abstrahleigenschaften der Vorder- und Rückseiten der RTGs berechnet werden, was einer maximalen Unsicherheit von 10 % in der gemessenen Beschleunigung entspricht.

Auch eine durch Treibstoffverluste verursachte Beschleunigung lässt sich schwierig abschätzen. Man behilft sich damit, dass man die durch Treibstoffaustritt verursachte Änderung des Drehimpulses, den man durch Messung der Spin-Rate der Sonden gut bestimmen kann, als Maß für eine mögliche Kraft in Beobachtungsrichtung nimmt. Unter sehr konservativen Annahmen kommt man dann auf eine Unsicherheit von 5 % der Anomalie. Außerdem ist es trotz Baugleichheit sehr unwahrscheinlich, dass beide Pioneer-Sonden einen gleich großen Treibstoffverlust erleiden, der zur gleichen Drehratenänderung führt.

Einflüsse auf die Beobachtung

Besondere Beachtung verdienen mögliche Einflüsse auf die Messung selbst. Die Bewegung der Sonden werden im sonnenfesten (baryzentrischen) Koordinaten beschrieben. Die Koordinaten sind durch das International Coordinate Reference System ICRF definiert, welches durch 212 außergalaktische Quellen gegeben und damit quasi-inertial ist. Die Messung geschieht aber durch die Teleskope des DSN. Da die Erde zudem sehr dynamisch ist, muss die genaue Position der Teleskope unter Berücksichtigung der gesamten Erdbewegung (Präzession, Nutation, siderische Rotation, Polbewegung, Gezeitenkräfte, tektonische Bewegung) bestimmt werden, wobei im Wesentlichen Earth Orientation Parameters EOP vom JPL und dem International Earth Rotation Service IERS übernommen wurden. Daten zur Abbremsung und Unregelmäßigkeiten der Rotation, die Loveschen Zahlen⁵⁾ und der Chandler wobble⁶⁾ wurden direkt aus Messdaten des Lunar Laser Ranging LLR, des Satellite Ranging SL und der Very Long Baseline Interferometry VLBI bestimmt.

Auch die Zeit im Sonnensystem, die Ephemeridenzeit, muss auf die Internationale Atomzeit TAI umgerechnet werden, wobei wieder Position, Geschwindigkeit und Gravitationspotential der Bodenstation sehr genau bekannt sein müssen. Außerdem muss noch die TAI mit der durch die Rotation der Erde definierten und um den Einfluss der Polbewegung korrigierten Universal Time 1 (UT1), mit der die Beobachtungen der Bodenstation parametrisiert sind, verknüpft werden [11].

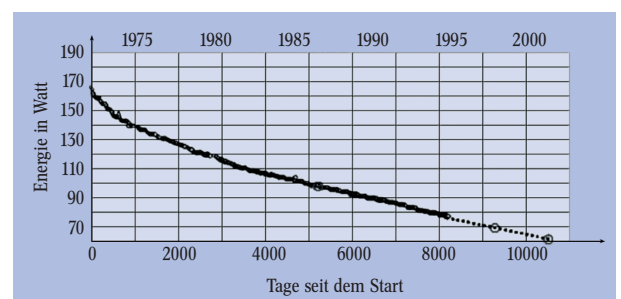


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der elektrischen Energie, die den Pioneer-Sonden zur Verfügung stand. Obwohl die Mission 1995 beendet wurde, wurden danach noch zwei Messpunkte aufgenommen.

5) Diese Zahlen sind Proportionalitätsfaktoren zwischen den verschiedenen Verzerrungen sowie dem sich einstellenden Gravitationsfeld einer sphärisch symmetrischen, nichtrotierenden elastischen isotropen Kugel und einem äußeren an dieser Kugel angreifenden Gravitationsgradienten.

6) Dies ist eine periodische Änderung der Erdrotationsachse gegenüber einem erdfesten Koordinatensystem von 0,7 Bogensekunden in 435 Tagen.

Außerdem wurden mögliche Einflüsse durch mechanische Deformationen aufgrund der Schwere der Konstruktion, Alterungserscheinungen, Einflüsse von Wind, Tektonik etc. auf die Parabolantennen des DSN abgeschätzt, was sich aber maximal auf das 10^{-5} -fache der Pioneer-Anomalie aufsummiert.

Eine Blauverschiebung des Doppler-Signals würde vorgetäuscht werden, wenn die Uhren auf der Erde mit der Zeit im Vergleich mit der durch den Umlauf der Erde um die Sonne definierten Zeit langsamer gehen würden. Man hat versucht, eine solche hypothetische Verlangsamung des Uhrenganges an die Messungen anzupassen. Ein quadratischer Drift in der Zeitmessung, der einen Effekt von der Größenordnung der Anomalie ergäbe, würde pro Jahr etwa 2 Millisekunden ausmachen, was man in der Umlaufzeit der Erde um die Sonne hätte sehen müssen, und ist auch durch den Vergleich mit Pulsaren sehr unwahrscheinlich. Andere Driftmodelle, wie z. B. ein Drift der Trägerfrequenz, werden dadurch ausgeschlossen, dass sie zwar das Doppler-Signal, nicht aber das Ranging reproduzieren können. Auch Vergleiche mit anderen Satelliten sind nicht kompatibel mit diesen Modellen.

Interplanetares Gas und Plasma, insbesondere in der Nähe der Sonne, beeinflusst die Propagation von Radiowellen und damit die Doppler- und Ranging-Messungen direkt. Zur Analyse der Pioneer-Daten konnten jedoch Ergebnisse der Cassini-Mission herangezogen werden, bei der mehrere Frequenzbänder verwendet wurden, wodurch man sehr genau die Dispersion bestimmen konnte. Dieser Einfluss auf die Messung ist kleiner als 0,2 % der Pioneer-Anomalie.

Die Pioneer-Daten zeigen eine Tages- und Jahresmodulation der gemessenen Beschleunigung im Bereich von 10 % der Anomalie. Man führt das darauf zurück, dass in den Bahnrechnungsprogrammen bestimmte Erdparameter wie die Position, Geschwindigkeit und Drehachse der Erde oder die Position der Bodenstationen nicht exakt genug vorhanden sind. An dem

Ergebnis, dass es über die Jahre hinweg eine konstante Beschleunigung gibt, ändert dies aber nichts.

Das Rätsel bleibt

Die ganzen Untersuchungen und Fehleranalysen, die wir hier nur kurz angedeutet haben, konnten bisher keinen systematischen Einfluss zur Erklärung der Pioneer-Anomalie identifizieren. Ein wesentlicher Punkt ist dabei, dass die meisten Effekte zeitabhängig sind, was

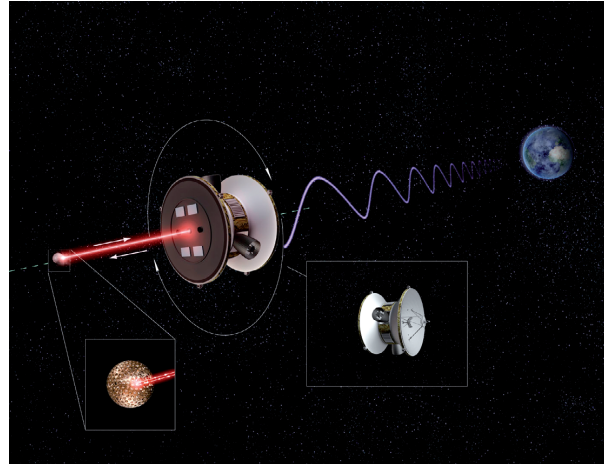


Abb. 7: Vorschlag einer neuen Mission. Der Satellit sollte möglichst symmetrisch gebaut sein. Eine Testmasse, deren Abstand mit Lasern genau vermessen werden kann, gibt zusätzliche Information.

der Konstanz der Anomalie widerspricht. Es liegt daher nahe, dass die Anomalie entweder ein physikalischer Effekt im Rahmen der Standardphysik ist, den wir bisher noch nicht erkannt haben, oder sie stellt einen Hinweis auf eine Abweichung von den bisherigen Standardtheorien dar.

Erklärungen durch Standardphysik...

Seit dem Bekanntwerden der Pioneer-Anomalie 1998 wurden viele Erklärungsversuche und Analysen veröffentlicht. So wurde z. B. erst relativ spät erkannt [12], dass die Rotation des Senders oder des Empfängers ebenfalls zu einer Doppler-Verschiebung beiträgt.

Gravitative und nichtgravitative Einflüsse

Die Bahn der Pioneer-Sonden wurden im Rahmen des relativistischen Einsteinfeld-Hoffmann-Modells beschrieben, das die Sonne, die Planeten, den Mond, und die größeren Asteroiden (ca. 0,2 Erdmassen) und Kometen berücksichtigt. Auch die Propagation der Radiosignale wurde relativistisch bis zur Ordnung v^2/c^2 beschrieben. Dies beinhaltet im Wesentlichen die gravitative Laufzeitverzögerung (Shapiro-Effekt) im Gravitationsfeld der Sonne, des Mondes und der Planeten.

Eine auf den ersten Blick mögliche Erklärung für die Anomalie wäre zusätzliche interplanetare Materie wie Staub oder die unbekannte Masse im Kuiper-Gürtel (max. ein Drittel Erdmasse). Dies hätte drei mögliche Konsequenzen: (i) gravitative

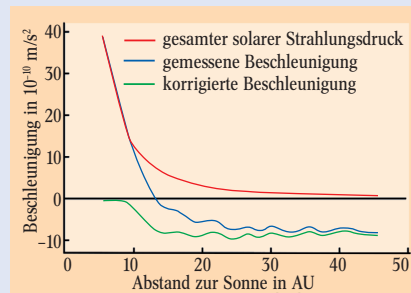
Abbremsung durch zusätzliche Masse im Sonnensystem, (ii) Abbremsung durch aufprallende Staubpartikel und (iii) Beeinflussung des Radiosignals durch Dispersion. Konsistenzbetrachtungen auf mehreren Ebenen können diese Effekte ausschließen. Eine Masse, die eine Beschleunigung von der Größe der Anomalie erzeugen würde, würde in beobachtbarer Weise die Planetenbahnen beeinflussen.

Sonnenstrahlung und Sonnenwind treiben die Sonde

nach außen und tragen nicht zur Anomalie bei. Trotzdem wurden diese Effekte sorgfältig studiert, um den korrigierten Wert der Beschleunigung zu erhalten, siehe Abb. In die Berechnung gehen natürlich alle Materialeigenschaften, die Masse und die effektive Fläche der Sonden wie die Stärke der Strahlung ein, die mit $1/r^2$ abnehmen muss. Die Ungenauigkeit bei der Bestimmung der durch Sonnenstrahlung und -wind induzierten Beschleunigung

liegt bei ca. 2 % der Anomalie.

Interplanetarer und interstellarer Staub können die Pioneer-Sonden mit $a_s = -K_s \rho v_s^2 A_s / m_s$ abbremsen. Darin stellt A_s die effektive Aufprallfläche, m_s die Masse, K_s den Widerstandsbeiwert^{#)} der Sonde und v_s die Geschwindigkeit des Satelliten durch das Gas der Dichte ρ dar. Aus Modellrechnungen ergibt sich für das interplanetare Gas eine Dichte $\rho_{IPD} \leq 10^{-24} \text{ g/cm}^3$ und aus Messungen mit der Sonde Ulysses für das interstellare Gas eine Dichte $\rho_{ISD} \leq 3 \cdot 10^{-26} \text{ g/cm}^3$. Der Vergleich ergibt, dass ein Gas eine 300000-mal größere Dichte haben müsste, wenn dessen Abbremsung die Pioneer-Anomalie erklären sollte.



Jenseits von 15 Astronomischen Einheiten fällt der Einfluss des solaren Strahlungsdrucks deutlich kleiner aus als die Pioneer-Anomalie.

#) Für freie molekulare Anströmung kann in guter Näherung $K_s = 2$ gewählt werden.

Diese „Spin-Rotations-Kopplung“ kann eine Geschwindigkeit $v = (c/\omega) \Omega$ vortäuschen. Dabei ist ω die Frequenz der Signale und Ω die relative Rotation zwischen Sender und Empfänger. Bei den Pioneer-Sonden wird eine Änderung dieser „Geschwindigkeit“ durch eine Änderung des Winkels zwischen Sichtlinie und Rotationsrichtung vorgetäuscht. Dieser Effekt ist allerdings um Größenordnungen zu klein. Darüber hinaus ist die Spin-Rotations-Kopplung schon von vornherein phänomenologisch in den Codes implementiert gewesen.

Erstaunlicherweise führt eine Beschleunigung der Sonne orthogonal zur Ekliptik auf einen Effekt, der der Pioneer-Anomalie ähnelt. Im Bezugssystem einer mit a_\odot beschleunigten Sonne lautet die Bewegungsgleichung für Testmassen

$$\ddot{\mathbf{r}} + GM_\odot (\mathbf{r}/r^3) + \mathbf{a}_\odot = 0 \quad (6)$$

wobei r der Abstand zur Sonne ist. Daraus kann auf eine Beschleunigung der Pioneer-Sonden in Richtung Sonne geschlossen werden [13]. Um die beobachtete Anomalie zu erhalten, müsste allerdings die Sonne um viele Größenordnungen stärker beschleunigt sein, als sie das selbst durch Abstrahlung allen Lichtes und Sonnenwinde in eine Richtung erreichen könnte. Es gibt keinen Hinweis auf solch eine Beschleunigung.

Sehr interessant ist, dass der Wert der Anomalie fast gleich dem Produkt aus Hubble-Konstante H und Lichtgeschwindigkeit c ist. Damit stellt sich die Frage, ob die Anomalie etwas mit der kosmischen Expansion zu tun hat, wobei die Expansion sowohl die Pioneer-Sonde, die Signale, das Doppler-Tracking, das von der Sonne erzeugte Gravitationsfeld als auch die Bahn der Planeten, die ein Abstandsmaß im Sonnensystem definieren, beeinflussen kann. Die Frage, ob die Expansion auf die Form des Sonnensystems Einfluss nimmt, ist viel diskutiert worden (einen wichtigen Beitrag dazu haben Einstein und Straus [14] geliefert). Die meisten Arbeiten kommen zu dem Schluss, dass gravitativ gebundene Systeme nur weit unterhalb jeder Nachweisgrenze der Expansion folgen. Sie behalten im Wesentlichen ihre Größe bei. Damit bilden die Planetenbahndurchmesser ein konstantes Abstandsmaß. Außerdem lässt sich leicht einsehen, dass die kosmische Expansion beim Doppler-Verfahren im Wesentlichen herausfällt: Die durch die Expansion verursachte Rotverschiebung wird durch die Bewegung gegenüber dem kosmischen Substrat, die notwendig ist, um den konstanten Abstand beizubehalten, kompensiert. Daher hat die Expansion keinen merklichen Einfluss auf die Physik im Sonnensystem.

In diesem Zusammenhang gibt es auch Überlegungen, dass die Expansion an gebundene Teilchen anders an koppelt, als an ungebundene Teilchen, die das Sonnensystem verlassen. Dies könnte die Beobachtung stützen, dass die anomale Beschleunigung gerade nach dem letzten Vorbeiflug am Jupiter oder Saturn einsetzt (Abb. 5). Es scheint in der Tat so zu sein, dass die Expansion auf ungebundene Teilchen mit einer Zusatzbeschleunigung vH wirkt. Diese ist aber um einen Faktor $v/c \sim 10^{-4}$ zu klein.

... oder „neue Physik“?

Ein unverstandenes Phänomen ruft natürlich viele auf den Plan, es durch neue Theorien zu erklären. Diese Erklärungen sind aber sehr spekulativ und meist nicht sehr überzeugend. Interessant ist aber, dass Zusammenhänge mit den Problemen der dunklen Materie und dunklen Energie diskutiert werden. Wenn der Pioneer-Anomalie derselbe Mechanismus zugrunde liegen würde, wie der dunklen Materie oder der dunklen Energie, würde dies einen großen Fortschritt darstellen. Umgekehrt würde jede neue gesicherte Erkenntnis über die Anomalie, gleich ob sie einen Zusammenhang mit der dunklen Materie oder dunklen Energie stützt, wichtige Implikationen für Astrophysik und Kosmologie haben.

In den letzten Jahren wurde viel darüber spekuliert, ob das Newtonsche Potential durch einen Yukawa-artigen Anteil $\propto e^{-r/\lambda}/r$ ergänzt werden soll. Dabei ist α die Stärke und λ die Reichweite dieses Yukawa-Potentials. Modifikationen dieser Art für Reichweiten kleiner als 1 mm werden durch höherdimensionale Theorien nahe gelegt [15]. Rotationskurven zumindest

einer großen Klasse von Galaxien konnten ebenfalls durch ein Yukawa-Potential mit großer Reichweite rekonstruiert werden, wobei als Quelle des Gravitationsfeldes nur die sichtbare Materie dient. Es gibt nun Spekulationen, ob die Pioneer-Anomalie ebenfalls durch solch eine Modifikation beschrieben werden kann. Diese Modifikation des Gravitationspotentials bei großen Abständen würde auf ein Graviton mit einer sehr kleinen Masse hinweisen.

Auch die von Milgrom [16] vorgeschlagene phänomenologische Modifikation des Newtonschen Anziehungsgesetzes, wobei bei Beschleunigungen unterhalb einer charakteristischen Beschleunigung a_0 das modifizierte Gesetz $a^2 = a_0$

a_{Newton} gilt, kann sehr erfolgreich die Rotationskurven der Galaxien erklären. Dieses modifizierte Gesetz ist gerade so angesetzt, dass die Zentrifugalbeschleunigung in den äußeren Galaxienbereichen konstant wird. Der diese Phänomenologie charakterisierende Parameter a_0 wird durch astrophysikalische Beobachtungen mit ca. 10^{-10} m/s^2 angegeben, was erstaunlicherweise wieder von der Größenordnung von cH und der Pioneer-Anomalie ist. Diese Modifikationen des Zusammenhangs zwischen gravitierenden Massen und deren Einfluss auf Probekörper können denselben Effekt haben wie dunkle Materie.

Um die beschleunigte kosmologische Expansion zu erklären, benötigt man eine dunkle Energie, die drei Viertel der Gesamtenergie im Universum ausmacht. Diese Energie liegt möglicherweise in Form einer kosmologischen Konstanten vor, die als Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen Teil der Metrik ist. Diese Metrik bestimmt dann wiederum den Gang der Uhren, die Propagation von Signalen und die Bewegung von Planeten und Sonden. Alternativ wird die dunkle Energie auch als ein dynamisches skalares Feld, die so genannte Quintessenz, betrachtet [17]. Für beide Fälle gibt es Vorschläge, damit die Anomalie zu erklären. Mit einer kosmologischen Konstanten Λ erhält man eine Beschleunigung $a = c^2 \sqrt{\Lambda/3} \approx 6 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ [18]. Im Rahmen der

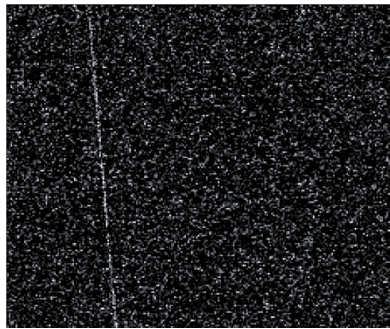


Abb. 8: Pioneer 10 im Abstand von rund 75 AU, „gesehen“ vom Arecibo-Observatorium. Das Bild zeigt die Messung der von der 8-Watt-Antenne abgestrahlten Frequenz (nach rechts aufgetragen) als Funktion der Zeit (nach oben aufgetragen). Der Frequenzshift kommt durch die Rotation der Erde zustande.

Quintessenzmodelle kann ein rein zeitabhängiger Anteil des Newtonschen Potentials die Laufzeit der Signale beeinflussen, wobei die Ankopplung der Quintessenz an die kosmische Evolution wieder cH liefert [19].

Es gibt weitere Spekulationen, unter denen eine Vielzahl verschiedene Versionen von Skalar-Tensor-Theorien sind. Auch höherdimensionale Brane-Theorien, Theorien mit laufender gravitativer Kopplungskonstante, antisymmetrische Metriken, bi-Metrik-Ansätze und Spiegel-Materie werden diskutiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Die anomale Beschleunigung bzw. die anomale Blauverschiebung der Doppler-Signale der Sonden Pioneer 10 und 11 ist auch 30 Jahre nach ihrer Entdeckung nicht verstanden. Weitere Untersuchungen dazu sind nötig – nicht nur um die Anomalie an sich zu verstehen, sondern auch, weil ihr Verständnis wichtige Informationen für Astrophysik und Kosmologie liefert und im Zweifelsfall die Galaxienentstehung oder Evolution des Universums in einem anderen Licht erscheinen lässt.

Einerseits sollen die alten Pioneer-Daten in ihrer Gesamtheit neu analysiert werden, wodurch man sich insbesondere neue Erkenntnisse über deren Flug in relativer Nähe zur Erde und während der letzten Vorbeiflüge erhofft (die alten Daten wurden von Magnetbändern heruntergelesen und für neue Datenanalysen aufbereitet), zum anderen besteht noch theoretischer Bedarf, auf analytischer Ebene und für komplexere Situationen mit numerischen und Näherungsmethoden die Dynamik von Teilchen auf der Skala des Sonnensystem im expandierenden Universum mit kosmologischer Konstante bzw. dunkler Energie besser zu verstehen.

Parallel dazu wird eine neue Mission angestrebt (die bei der ESA bereits den Arbeitstitel „Deep Space Gravity Probe“ trägt), die die anomale Beschleunigung verifizieren und genauere Messdaten liefern soll, mit deren Hilfe man auch die Richtung der Beschleunigung (zur Erde, zur Sonne, in Richtung der Geschwindigkeit der Sonde, oder in Richtung der Drehachse der Sonde)⁷⁾ bestimmen kann [20] (Abb. 7). Von vornherein wird auf einen maximal symmetrischen Aufbau Wert gelegt, um all die oben diskutierten anisotropen Abstrahlungen zu minimieren. Zusätzlich wäre eine hochgenaue Lageregelung von großem Nutzen, um systematische Effekte ausschließen zu können. Dazu muss eine langzeitstabile Version dieser Technik entwickelt werden. Wenn man eine oder mehrere verschiedene Testmassen vom Satelliten aus mit Lasern vermessen könnte, könnte man über die Messung der differentiellen Beschleunigung zusätzliche Information über die Anomalie und z. B. über das interplanetare Medium gewinnen. Weiterhin wäre es auch wichtig zu testen, ob die Pioneer-Anomalie auch bei Satelliten auftaucht, die senkrecht zur Ekliptik das Sonnensystem verlassen und ob der Effekt von der Geschwindigkeit abhängt. Es gäbe also einige Parameter auszutesten, wobei man sich aus finanziellen Gründen sicher auf wenige zentrale beschränken muss.

Zur Zeit befindet sich Pioneer 10 in einem Abstand von ca. 90 AU. Beim letzten Kontakt zur Sonde im Jahre 2000 (Abb. 8) bei einem Abstand von 75 AU benötigte das Signal länger als 24 Stunden. Das stellt gewissermaßen das bisher größte je von Menschen durchgeführte Experiment dar!

Danksagung

Wir danken M. Nieto, R. Reinhard, G. Schäfer, S. Turyshev und W. Zimdahl für hilfreiche Unterstützung und Diskussionen sowie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR für finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] H.-J. Dittus, C. W. F. Everitt, C. Lämmerzahl und G. Schäfer, Phys. Blätter, November 1999, S. 39
- [2] D. Giulini, Physik Journal, Oktober 2005, S. 27
- [3] D. B. Cline, Spektrum d. Wiss., Oktober 2003, S. 44
- [4] D. Giulini und N. Straumann, Phys. Blätter, November 2000, S. 41
- [5] V. Springel, Physik Journal, Juni 2003, S. 31
- [6] U. Fritze-von Alvensleben, Physik Journal, Juli/August 2004, S. 18
- [7] J. D. Anderson et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 2858 (1998)
- [8] J. D. Anderson et al., Phys. Rev. D **65**, 082004 (2002)
- [9] G. A. Krasinsky und V. A. Brumberg, Celest. Mech. & Dyn. Astron. **90**, 267 (2004). E. V. Pitjeva, Sol. Sys. Res. **39**, 176 (2005). E. M. Standish, in: D. W. Kurtz (Hrsg.): Transits of Venus: New Views of the Solar System and Galaxy, Proc. IAU Coll. No. 196, Cambridge University Press, Cambridge (2005), S. 163
- [10] T. Morley, private Mitteilung
- [11] J. Müller, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, **5** (3. DFG –Rundgespräch zum Thema Bezugssysteme), 77, 1999
- [12] J. D. Anderson und B. Mashhoon, Phys. Lett. A **315**, 199 (2003)
- [13] D. Bini, C. Cherubini und B. Mashhoon, Phys. Rev. D **70**, 044020 (2004)
- [14] A. Einstein und E. G. Straus, Rev. Mod. Phys. **17**, 120 (1945)
- [15] I. Antoniadis, in: D. Giulini, C. Kiefer und D. Lämmerzahl (Hrsg.), Quantum Gravity (2003), S. 337
- [16] M. Milgrom, New Astr. Rev. **46**, 741 (2002)
- [17] C. Wetterich, Physik Journal, Dezember 2004, S. 43
- [18] L. Nottale, gr-qc/0307042
- [19] J. P. Mbelek, gr-qc/0402088
- [20] H. Dittus and the Pioneer Explorer Collaboration, in: Trends in Space Science and Cosmic Vision 2030, ESA, Noordwijk, 2005, gr-qc/0506139

7) Eine Beschleunigung in Richtung Sonne deutet auf einen gravitativen Ursprung hin, zeigt sie engengesetzt zur Geschwindigkeit, deutet das auf eine Abbremsung durch Staub hin, zeigt sie in Richtung der Drehachse des Satelliten, ist das womöglich ein satelliteninterner Effekt, und zeigt sie in Richtung zur Erde, kann der Effekt seine Ursache in der Signalübermittlung haben.

Die Autoren

Claus Lämmerzahl studierte und promovierte in Konstanz, anschließend verbrachte er längere Zeit als CNRS-Gastwissenschaftler in Paris und war wissenschaftlicher Angestellter in Konstanz und Düsseldorf. Seit 2003 leitet er die Arbeitsgruppe Gravitationsphysik am Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation ZARM in Bremen, wo er sich u. a. mit verschiedenen Satellitenprojekten und Tests der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie beschäftigt.

Hansjörg Dittus studierte Physik und Geophysik an der LMU München mit anschließender Promotion im Fach Geophysik. Seit 1987 ist er am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation der Universität Bremen und seit 1992 dessen stellvertretender Leiter. Er war Projektleiter beim Aufbau des Fallturms in Bremen. Seit 1991 beschäftigt er sich mit der Durchführung von Gravitationsexperimenten auf orbitalen Plattformen und Satelliten.

