

No mission could be simpler than Gravity Probe B.
It's just a star, a telescope, and a spinning sphere.

William Fairbank

Liebe Leserin, lieber Leser,

NASA's Ion-getriebene Raumsonde „Dawn“ nähert sich dem ersten Zwischenstop, der Vesta. Mitte des Monats lässt sie sich von dieser einfangen. Für viele Astronomen ist Vesta mehr als ein Planetoid – ein Zwergplaneten-Kandidat. Anfang August schwenkt „Morgendämmerung“ in eine Umlaufbahn ein, die über die Pole der Vesta führt. 2015 soll die Ceres erreicht werden. Der Kosmos-Bote wird berichten.

Julithema ist ein anderer Raumflugkörper, ein Erdsatellit: Gravity Probe B. Die ultra-präzisen Präzessionsmessungen, die die vier Kreiselkompass dieses Satelliten ein Jahr lang ausgeführt haben, liegen zwar schon eine Weile zurück, aber jetzt gibt es doch noch Ergebnisse. Nach 52 Jahren kommt damit eine spektakuläre Satellitenmission der Grundlagenforschung zu einem befriedigenden Abschluss. Es geht um die Schwerkraft, also um Einstein. So etwas darf der Kosmos-Bote seinen Lesern nicht vorenthalten.

Eine erquickliche Lektüre wünscht Ihnen

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Juli

Der Juli beginnt wie der Vormonat mit einer partiellen Sonnenfinsternis. Wie jene ist auch diese in Deutschland nicht sichtbar.

Jupiter geht Ende des Monats bereits vor Mitternacht auf. Saturn verabschiedet sich allmählich von uns. Erst am Ende des Jahres wird er wieder am Morgenhimmel erscheinen.

Merkurfreunde aufgepasst: Der schnellste unter den Wandelsternen geht nach der Sonne unter. Am 20. Juli erreicht Merkur mit $26,8^\circ$ seinen diesmaligen

maximalen Winkelabstand zur Sonne. Es lohnt sich schon vorher am Abendhimmel Ausschau nach ihm zu halten, in Horizontnähe.

Mars wird zwar immer besser, ist aber noch lange nicht gut. Gegen Ende des Monats geht er 1 1/2 Stunden nach Mitternacht im Nordosten auf.

Am 4. Juli durchläuft die Erde den sonnenfernsten Punkt ihrer Umlaufbahn um die Sonne. Ihre Bahngeschwindigkeit ist dann am niedrigsten, weshalb das Sommerhalbjahr bei uns etwa eine Woche länger dauert als das Winterhalbjahr. Landwirte sollten das bedenken, bevor sie nach Australien auswandern!

Einstein behält recht

Mit der Rotation, der Drehung eines Körpers um seine Achse, ist es seltsam bestellt. Der Kosmos-Bote hat sich deshalb für seine Leser diesbezüglich schlau¹ gemacht. Was unser Thema anbelangt, so fügt es sich gut, dass der Topwissenschaftler von Gravity Probe B, Francis Everitt von der Stanford Universität, über die glückliche Gabe verfügt, sich dem gebildeten Laien gegenüber verständlich machen zu können. Das dürfte für die Finanzierung des Projekts von erheblicher Bedeutung gewesen sein (und der Kosmos-Bote profitiert auch davon).

Die Vorgeschichte

Im Physikunterricht wurde uns beigebracht, die Gesetze der Physik – denken Sie an die Mechanik – lauteten am einfachsten, verwendet man ausgezeichnete Bezugssysteme (Das dem so ist, kann man leicht nachprüfen. Man betrete einmal ein Kinderkarussell und versuche, bei drehendem Karussell sich zur Drehachse durchzukämpfen. Viel Spaß!) Ein solches Bezugssystem, der Physiker spricht von einem Inertialsystem, darf sich weder längs einer Geraden beschleunigt bewegen, noch gar – wie das Karussell – rotieren. (Der Klassenraum ist, genaugenommen, für physikalische Experimente ungeeignet, da er sich auf einer rotierenden Erde befindet.) Doch wer sagt einem, ob ein Bezugssystem rotiert oder nicht? Auf Sir Isaac Newton (1643–1727) geht das

¹Angesichts allenthalben kursierender Plagiatsvorwürfe beeilt sich der Kosmos-Bote festzustellen, dass auch diesmal nichts von alledem, was folgt, „auf eigenem Mist gewachsen ist“. Sein Anliegen ist es, „Ansichten der Natur“ zu vermitteln und dabei ihre Wandelbarkeit zu zeigen – nichts weiter! Er hofft nur, dass ihm dabei keine groben Schnitzer unterlaufen. Wer Quellenangaben wünscht, frage einfach nach!

Eimer-Gedankenexperiment zurück. Man stelle sich einen mit Wasser gefüllten Eimer vor. Das Wasser befinde sich bezüglich des rotierenden Eimers in Ruhe, also keinerlei Strömungen etc. Ist die Wasseroberfläche eben, rotiert der Eimer nicht. Bei Rotation führte die Fliehkraft nämlich unweigerlich zu einer parabolischen Verformung der Wasseroberfläche. Zu der Frage, *wogegen* Eimer und Wasser rotieren, wollte sich Newton nicht äußern. Für ihn waren Raum und Zeit etwas Absolutes, also Gottgegebenes, und keinesfalls Gegenstand physikalischer Untersuchungen.

Zu Newtons Eimer gibt es eine quantenhydrodynamische Entsprechung. Man fülle den Eimer mit farblosem flüssigen Helium, sog. Helium I, und kühle das Ganze unter die Sprungtemperatur ab, bei der Helium in den suprafluiden Zustand übergeht. Bei 2,1768 K passiert's: Das Helium II „steht“ und der Eimer rotiert; er muss den überschüssigen Drehimpuls aufnehmen. Die Erklärung ist die folgende: Drehimpuls ist gequantelt und nicht in beliebig kleinen Portionen verfügbar. Ist der Gesamtdrehimpuls der Anordnung nur klein genug, muss das Helium II „anhalten“, also seine Rotation einstellen. Die Reibung zwischen Helium II und Eimer verschwindet im superflüssigem Zustand. Dieses Experiment ist kein Gedankenexperiment! Es wurde 1967 von zwei Quantenkryophysikern ausgeführt!

Der österreichische Physiker Ernst Mach (1838–1916) empfand die Newtonsche Auffassung von einem absoluten Raum als physikalisch unerträglich. Von Rotation zu sprechen mache nur Sinn, fügt man hinzu, *wogegen*! Für Mach war das natürliche Bezugssystem der Sternenhimmel. Irgendwie entsteht Fliehkraft, dreht sich etwas bezüglich des Sternenhimmels, so seine Meinung! Wir Heutigen heften das universale² Bezugssystem lieber an ferne Galaxien und Quasare an. Die Sterne unserer Nachbarschaft gehören ja selbst einem rotierenden System an, dem Milchstraßensystem. Die Frage, ob das Universum als Ganzes rotiert, hielt Mach für unsinnig.

Mach inspirierte Einstein (1879–1955), wenn auch dessen Bewunderung für Mach später abflaute. Ohne Not, denn es gab seinerzeit nichts, das das zwingend erfordert hätte, hatte Albert Einstein 1916 in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) mit der Newtonschen Vorstellung von Raum und Zeit als etwas *a priori* Gegebenes gebrochen. Genaugenommen hatte die „Physikalisierung“ von Raum und Zeit bereits 1905 mit der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) eingesetzt. Seitdem weiß man nämlich, dass bei einem Wechsel von

²Der Kosmologe kann sogar, anders als der Physiker, von einer *Absolutgeschwindigkeit* sprechen – der Bewegung bezüglich des Photonensees der 3-K-Hintergrundstrahlung.

einem Inertialsystem zu einem anderen weder der räumliche noch der zeitliche Abstand zwischen zwei Ereignissen für sich erhalten bleibt, sondern lediglich eine Art vier-dimensionaler Abstand in der sog. Raum-Zeit. Raum und Zeit verschmelzen in der SRT zu einem vierdimensionalen Ganzen³, der Raum-Zeit. Was wir als räumlichen oder zeitlichen Abstand messen, ist nur eine Projektion und hängt von der Relativbewegung ab. Deshalb ist ein an uns vorbeieilender Stab messbar kürzer als derselbe Stab in Ruhe⁴! Diese vierdimensional gedachte Raum-Zeit war 1905, geometrisch gesehen, immer noch *eben*. In seiner ART von 1916, seiner Gravitationstheorie, geht Einstein einen Schritt weiter: Die Raum-Zeit ist gekrümmt! Die Krümmung wird von der Verteilung der Masse (oder Energie; beides ist ja bei Einstein eins) diktiert. Nur der leere Raum, welcher nichts enthält, ist eben. Aber ohne materiellen Inhalt verliert die Raum-Zeit ihren Sinn. Kurz und gut: Seit fast einhundert Jahren sind für den Physiker Raum, Zeit und Materie (Stoff+Energie) untrennbar miteinander verwoben. Mit messbaren Konsequenzen! Ein Beispiel: Stellen Sie sich die Erde als Kugel vor. Bestimmen Sie die Größe der Kugeloberfläche, dividieren Sie diesen Zahlenwert durch 4π und ziehen Sie die Wurzel daraus! Sie werden erstaunt sein festzustellen, dass ihr Ergebnis um 1,5 mm größer als der von Ihnen gemessene Radius der „Erdkugel“ ausfällt! Niemand vermag sich einen gekrümmten dreidimensionalen Raum vorzustellen, aber die Krümmungseffekte messen kann im Prinzip jeder.

Dem Göttinger Mathematiker und Astronomen Carl Friedrich Gauß (1777–1855), Mitbegründer der nicht-euklidischen Geometrie, wird nachgesagt, er habe zwischen 1821 und 1823 im Rahmen seiner Landesvermessung in seinem „großen Dreieck“, bestehend aus Hoher Hagen, Brocken und Großer Inselsberg, die Summe der Innenwinkel bestimmt, um aus der Differenz zu 180° auf die *wahre* Geometrie zu schließen. Das mag eine Legende sein. Für uns ist wichtig: Die „Gerade“ der Geometrie – eine Idee! – wird seit Gauß durch ein physikalisches Objekt, einen Lichtstrahl, ersetzt. Warum? Nun, das Licht nimmt immer den kürzesten⁵ Weg! Die Gerade wird zur Geodäten („Luftlinie“). Nur im euklidischen Raum ist die Geodäte stets eine Gerade.

³Um ein Ereignis zu charakterisieren, beispielsweise das Anzünden einer Laterne, sind vier Zahlenangaben erforderlich, drei räumliche Koordinaten – Länge, Breite, Höhe – und eine Zeitangabe: Uhrzeit.

⁴Mehr darüber findet der Leser des Kosmos-Boten in der Ausgabe vom April 2005.

⁵Photonen, die andere Wege durchlaufen, löschen sich durch Interferenz aus. Licht ist ein Wellenphänomen.

Gravity Probe B (GP-B)

Während die SRT zu den experimentell gut untermauerten Theorien gehört – ohne SRT würde in unserer High-Tech-Welt kaum noch etwas funktionieren –, kann man das von der ART nicht behaupten. Sie ist das mit Abstand unsicherste Standbein der Physik, was Messungen anbelangt. Der Grund: Selbst solch gewaltige Massen wie Erde, Mond und Sonne sind meilenweit davon entfernt, Schwarze Löcher zu sein. Die massebedingte Krümmung des Raum-Zeit-Gewebes macht sich im Alltag einfach nicht bemerkbar. Die obigen 1,5 mm, sie sind noch nicht einmal der Milliardste Teil des Erdradius! Selbst die Einsteinsche Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne nachzuweisen, 1919, bei einer Sonnenfinsternis, erwies sich als schwieriges Unterfangen. Dass Uhren (schwingende Atome) auf der benachbarten Sonne, bedingt durch deren Schwerefeld (28 g !), dort langsamer ticken als auf der Erde, ist, soweit dem Kosmos-Boten bekannt, niemals zweifelsfrei nachgewiesen worden. Zur Messung dieses Einsteinschen Effekts war ursprünglich der Einsteinturm auf dem Telegrafenberg in Potsdam errichtet wurden. Das unaufhörliche Brodeln der Sonnenoberfläche (Granulation) hat genaue Messungen vereitelt. Die Zeitdehnung im Schwerefeld (Gravitationsrotverschiebung) wurde erst 1959 von zwei Harvard-Physikern mittels des Mößbauer-Effekts nachgewiesen – auf der Erde. Später wurde mit dem Raketenexperiment Gravity Probe A die Gravitationsrotverschiebung im Schwerefeld der Erde bestätigt.

Um in Sachen Verifizierung der ART endlich voranzukommen, war vor über einem halben Jahrhundert die Idee geboren wurden, auf einem Erdsatelliten zwei vom der Erdschwere herrührende ART-Effekte mittels hochpräziser Kreisel zu vermessen: die sog. geodätische⁶ Präzession und den „Mitnahmeeffekt“ (*frame dragging*).

Kreisel bieten sich an. Wegen der Drehimpulserhaltung behält ein kräftefreier Kreisel, einmal justiert, die Richtung bei, was beim Kreiselkompass, dem Gyroskop, ausgenutzt wird. Das Wort „Gyroskop“ geht übrigens auf den französischen Physiker Léon Foucault (1819–1868) zurück. Es bedeutet „die Drehung sehen“. Gemeint ist die Drehung der Erde. Foucault hatte diese publikumswirksam experimentell bewiesen: 1851 durch seinen berühmten Pendelversuch und ein Jahr darauf durch das Gyroskop! Schon nach Minuten machte sich die Richtungsänderung des Kreisels – eigentlich die der Erde! –

⁶Das Adjektiv bezieht sich nicht auf die Erdvermessung (Geodäsie), sondern auf die bereits erwähnte krumme „Geodäte“.

bemerkbar.

Am Heiligen Abend des Jahres 1916 wurde die Abhandlung eines italienischen Mathematikers akzeptiert. Wie Tullio Levi-Civita (1873–1941) darin bewies, hängt im gekrümmten Raum das Ergebnis einer Parallelverschiebung vom Weg ab, der durchlaufen wird. Nun ist alles klar. Beim Transport eines Kreisels um die raumkrümmende Erde wird die Kreiselachse beim Erreichen des Ausgangspunktes⁷ von der ursprünglichen Richtung abweichen, und das, obwohl lediglich eine Parallelverschiebung stattfand. Interessanter als dieser geodätische Effekt, der von der Raumkrümmung herrührt, ist der weit geringfügigere Mitnahmeeffekt. Auf ihn waren 1918 die beiden Österreicher Josef Lense (1890–1985) und Hans Thirring (1888–1976) gestoßen: In der Nähe einer rotierenden Masse sollte laut ART die Raum-Zeit ein wenig „mitgerissen“ werden. Nun, die Erde ist weder besonders schwer, noch rotiert sie besonders schnell. Der Effekt ist mithin klein – und er hängt vom Abstand zu der rotierenden Masse ab, was eine Verdrillung der Raum-Zeit⁸ nach sich zieht. Der Lense-Thirring-Effekt bewirkt, dass sich ein Inertialsystem hinieden bezüglich des Kosmos in Millionen von Jahren einmal um sich selbst dreht! Damit die Wasseroberfläche in Newtons Eimer eben bleibt, damit keine Fliehkraft auftritt, muss sich der Eimer mitsamt dem Wasser bezüglich des Sternenhimmels ganz langsam entgegen dem Urzeigersinn, also mit der Erde, um eine Achse parallel zur Erdachse drehen – um $0,000\,0114^\circ/\text{Jahr}$ in der Flughöhe von GP-B!

Nahe einem rotierenden schwarzen Loch ist der Mitnahmeeffekt dramatisch. Die Raum-Zeit wird dort zu einem rasenden Wirbel. Wahre „Monster“ davon hausen in den Zentren gewisser Galaxien und sind für die enormen Quasarleuchtkräfte zuständig.

Was Einstein selbst für unmöglich hielt: Beide ART-Effekte, Krümmung wie Verwirblung der Raum-Zeit, wurden, wie Anfang Mai auf einer Pressekonferenz mitgeteilt, von jedem der vier identischen Kreiselexperimente auf GP-B nachgewiesen. Der geodätische Effekt ist schon in den Rohdaten zu sehen und

⁷Was heißt überhaupt „einmal herum“ angesichts der Tatsache, dass der Umfang der Erde um 1,1 Zoll kleiner ist als der aus dem Erddurchmesser durch Multiplikation mit π bestimmte Wert?

⁸Es sei nicht nur der Raum betroffen, die Zeit ebenso, wie man liest: Zwillinge, die eine rotierende Masse oberhalb des Äquators in unterschiedlichen Richtungen *langsam* umrunden – der eine von Ost nach West, der andere von West nach Ost – unterscheiden sich im Alter, treffen sie am Ausgangspunkt wieder zusammen, wobei der Treffpunkt im Bezugssystem der Sterne fixiert sein muss.

bestätigt diese Vorhersage der Einsteinschen Theorie mit 0,3% Genauigkeit. Den Mitnahmeeffekt aus den Messdaten herauszulesen, erwies sich als vertrackter und hat, wegen unvorhergesehener „Dreck“effekte⁹, zusätzliche Jahre an Datenauswertung erfordert (was Finanzierungprobleme mit sich brachte). Die eigentlichen Messungen fanden zwischen August 2004 und August 2005 statt. Danach war das flüssige Helium zum Kühlen aufgebraucht. Der Effekt ist nachgewiesen, allerdings nicht mit der erhofften Genauigkeit von 1%. Hinzu kommt, dass zum Leidwesen der GP-B-Leute das *frame dragging* bereits 2004 bei der Auswertung der Bahndaten von passiven geodätischen Satelliten gefunden wurde¹⁰, was die Frage aufwarf, ob die 750 Millionen US-Dollar für GP-B gerechtfertigt waren, zumal es kaum einen Physiker gegeben haben dürfte, der die Existenz dieses Effekts bezweifelt hätte.

IM Pegasi, der Referenzstern für die Kreisel, marschierte im März 2005 in 22° Abstand an der Sonne vorbei. Das bot Gelegenheit, einen klassischen ART-Effekt zu überprüfen, die Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne. Obzwar nur klein, 0,0217 Bogensekunden, entging auch dieser Effekt nicht der Aufmerksamkeit der Gyroskope!

Angesichts der Fortschritte der angewandten Quantenphysik haben mechanische Kreisel kaum eine Zukunft. Wie angedeutet können die makroskopischen Auswirkungen quantenphysikalischer Eigenschaften von Viel-Teilchen-Systemen inzwischen zur Herstellung von Rotationssensoren genutzt werden. Werden wir erleben, dass Einstein nicht recht behält? Die Schwerkraft und ihre Theorie, die ART, führen in der Physik ein Außenseiterdasein. Für den Quantenphysiker ist Kraft ein Austausch von Teilchen und nicht Ausdruck der Geometrie der Raum-Zeit. Jedenfalls sind alle Bestrebungen, die anderen Naturkräfte ebenfalls geometrisch zu deuten, gescheitert. An einer Quantentheorie der Gravitation, welche die ART (mit ihren schrecklichen Singularitäten) ersetzen soll, wird emsig gearbeitet. Ob dies irgendwann Früchte trägt, sprich zu etwas Messbarem führt, steht in den Sternen.

⁹Die Kreisel waren leider nur mechanisch perfekt, nicht hinsichtlich ihrer elektrostatischen Aufladung.

¹⁰Wobei allerdings die Raumkrümmung als bekannt vorausgesetzt worden ist. Die Hauptschwierigkeit bestand darin, die Newtonschen Störungen, bedingt durch die Kräuselungen im Schwerefeld der Erde, zu eliminieren. Das Schwerefeld der Erde ist, schaut man genau hin, weit davon entfernt, sphärisch symmetrisch zu sein.

Bonusmaterial

Für Leser, die gerne mit Kreiseln spielen, hier noch ein paar technische Einzelheiten, die sicherlich Staunen machen.

Der Raumflugkörper mitsamt 5,5-Zoll-Cassegrainteleskop und Kreiseln wurde in Ermangelung eines hellen Quasars auf den Stern IM Pegasi ausgerichtet. IM Pegasi ist eine punktförmige Radioquelle, deren Position und Positionsänderung relativ zu fernen Radioquasaren mittels interkontinentaler Radiointerferometrie (VLBI) genauestens bestimmt werden kann. Leider erwies sich der Referenzstern optisch als keine so gute Wahl. Die Mission stand sozusagen von vornherein „unter einem ungünstigen Stern“. IM Pegasi ist ein enger Doppelstern und zudem befleckt! Die Radiostrahlung, die ihn einerseits so geeignet erscheinen lässt, kündigt andererseits von der unerwünschten Oberflächenaktivität des Sterns! Der optische Schwerpunkt des IM-Peg-Systems wankt auf eine komplizierte Weise über den Himmel. Das muss man im Griff haben, um IM Pegasi als Anhaltstern verwenden zu können. Die scheinbare Richtungsänderung (Aberration) des Sterns, bedingt dadurch, dass sowohl die Bewegung der Erde um die Sonne als auch die Bewegung der Sonde um die Erde nicht mehr vernachlässigbar klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, wurde benutzt, um die vier Kreiselexperimente zu eichen.

Die Bahn des Satelliten führte in 642 km Höhe über die Pole. Dadurch wurde eine saubere Trennung der beiden ART-Effekte erreicht. Der Haupteffekt bewirkt eine südwärts Drift der Kreiselachse in der Bahnebene des Satelliten, der Nebeneffekt eine gen Osten gerichtete.

Die vier tischtennisballgroßen Kugelkreisel bestehen aus amorphem Quarz und sind, wie im Guinness-Buch der Rekorde vermerkt, die homogensten und kugeligsten je von Menschenhand gemachten Kugeln. Die Abweichung von der Idealgestalt macht nur etwa 40 Atomlagen aus. Dadurch werden unerwünschte Drehmomente unterdrückt¹¹.

Die mit 4300 Umdrehungen pro Minute rotierenden Kugeln in einem freifallenden Gehäuse waren von der Außenwelt weitestgehend abgeschirmt, so

¹¹Der Erdkreisel ist bekanntlich keine Kugel, sondern leicht abgeplattet, was unter der Wirkung von Mond und Sonne dazu führt, dass die Erdachse mit einer Periode von 26 000 Jahren präzessiert, wie schon die Astronomen der Antike herausgefunden hatten. Wir sollten sogar dankbar für diese vergleichsweise schnelle Präzession sein: Eine kugeligere Erde oder eine ohne Mond würde nur langsam präzessieren, was die Erdachse schlingern machte, mit katastrophalen Auswirkung aufs Klima!

dass sie – so die Hoffnung – allein der verbogenen und verdrillten Raum-Zeit unterworfen seien. Die schwebende Lagerung im Höchstvakuum war reibungsfrei. Die rotierenden Kugeln wären von allein erst nach 15 000 Jahren zum Stillstand gekommen! Doch wie misst man berührungsfrei die Lage der Rotationsachse eines Kugelkreisels? Die Kugeln waren zu diesem Zweck mit einer μ -starken Schicht supraleitendem Niobs bedampft. Das gesamte Experiment lief ab bei der Temperatur superflüssigen Heliums ($-270,9^\circ\text{C}$). Sogenannte Londonströme auf der rotierenden Rotoroberfläche hinterlassen ein Magnetfeld, das perfekt parallel zur Rotationsachse ausgerichtet ist. Die Orientierung dieses Magnetfelds wird von digitalen Magnetometern gemessen – und das ohne störende Rückwirkung auf den Rotor! Eine Richtungsänderung von 0,0005 Bogensekunden (oder $0,000\,000\,14^\circ$) über ein Jahr ist damit messbar! Das entspricht der Breite eines Menschenhaars, betrachtet aus 20 Meilen Entfernung!

Der Anstoß zur Entwicklung von GP-B kam nicht von ungefähr aus dem Pentagon. Nur dort wusste man vor 50 Jahren, wozu modernste Militärtechnik in der Lage ist. Der Kreiselkompass hatte damals schon eine lange militärische Karriere hinter sich. Er wurde bereits im ausgehenden 19. Jh. zur Steuerung von Torpedos verwandt. Auch die von Deutschland im Zweiten Weltkrieg eingesetzten Raketenwaffen bedienten sich des Kreisels. Schließlich war es der Kalte Krieg mit seiner Notwendigkeit, Interkontinentalraketen mit hochpräzisen Gyroskopen zur Lageregulierung und Steuerung auszustatten, die in den 50er Jahren zu einer zuvor nicht für möglich gehaltenen Verbesserung der Kreiseltechnik geführt hatte. Die Kugelkreisel von GP-B aber sind millionenfach genauer als Navigationsgyroskope auf der Erde, was vor allem der Schwerelosigkeit ($10^{-11} g$) und der Kälte (1,8 K) zuzuschreiben ist.