

Petr Kulhánek

Gravity Probe B - ověřování základních principů Einsteinovy obecné teorie relativity

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 49 (2004), No. 3, 226--233

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141232>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2004

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Gravity Probe B — ověřování základních principů Einsteinovy obecné teorie relativity

Petr Kulháněk, Praha

Když nám před čtvrtstoletím vyprávěl na přednáškách z obecné relativity profesor Bičák o experimentu, při němž bude sledován pohyb rotujících kuliček uzavřených v malé družici, myslel jsem, že jde o plán, který se uskuteční během několika příštích let. Osud tomu však chtěl jinak. Teprve 20. dubna 2004 byla vynesena na polární oběžnou dráhu obří termoska s protáhlou měřicí sondou ve svém nitru. Srdcem sondy jsou čtyři gyroskopy o velikosti pingpongového míčku. Ano, jde o družici Gravity Probe B (GPB), která má posloužit k ověřování Einsteinovy obecné teorie relativity.

Obecná relativita

Deset let po objevu speciální teorie relativity, vztahující se k situacím bez gravitačního pole, vytvořil v roce 1915 Albert Einstein (1879–1955) obecnou teorii relativity, která je od té doby nejlepší známou teorií gravitace.

V obecné relativitě je gravitace reprezentována geometrií prostoročasu. Ta je plně popsána metrickým tenzorem $g_{\mu\nu}$, pomocí něhož se počítá tzv. prostoročasný interval $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ (přes hodnoty 0–3 stejných indexů se sčítá), důležitý invariant spojený s „prostoročasnou odlehlostí“ dvou blízkých událostí. Prostoročas je zakřiven přítomností hmotných těles podle Einsteinových rovnic

$$(1) \quad G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu},$$

v nichž Einsteinův tenzor na levé straně, vytvořený z metrického tenzoru a jeho 1. a 2. derivací, popisuje zakřivení prostoročasu, zatímco tenzor energie a hybnosti na pravé straně popisuje rozložení hmoty.

Gravitační interakce se od všech ostatních interakcí výrazně odlišuje. Jako jediná působí na všechnu hmotu stejně: v daném gravitačním poli se všechny volné testovací částice pohybují po stejných trajektoriích, tzv. geodetikách, daných rovnicí

$$(2) \quad \frac{dU_\mu}{d\tau} - \Gamma_{\mu\beta}^\alpha U_\alpha U^\beta = 0,$$

Doc. RNDr. PETR KULHÁNEK, CSc. (1959), katedra fyziky, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické, Technická 2, 166 27 Praha 6, e-mail: kulhanek@aldebaran.cz

kde $\Gamma_{\mu\beta}^{\alpha}$ jsou Christoffelovy symboly 2. druhu, určené 1. derivacemi metrického tenzoru, a U_{μ} je čtyřrychlost částice.

Obecná relativita znamenala zásadní revoluci ve fyzice 20. století. Předpověděla nebo vysvětlila řadu jevů: ohyb světelného paprsku v gravitačním poli (1,75'' pro paprsek procházející těsně kolem Slunce) a efekt gravitační čočky (první objevena v roce 1979), stáčení perihélia planet (u Merkuru o 43'' za století), gravitační frekvenční posun (daný závislostí chodu hodin na gravitačním poli, poprvé prokázané u bílých trpaslíků), Lenseův-Thirringův jev (strhávání inerciálních systémů rotací tělesa), existenci černých děr, rozpínání vesmíru a kosmologický červený posun, gravitační vlny a další jevy neznámé v newtonovské fyzice.

Schwarzschildovo řešení

Jedním z nejjednodušších řešení Einsteinových rovnic je řešení popisující prostoročas v okolí sféricky symetrického tělesa [2], které našel Karl Schwarzschild v roce 1916. Příslušný prostoročasový interval má tvar

$$(3) \quad ds^2 = -c^2 \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} \right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2Gm}{c^2 r}} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2.$$

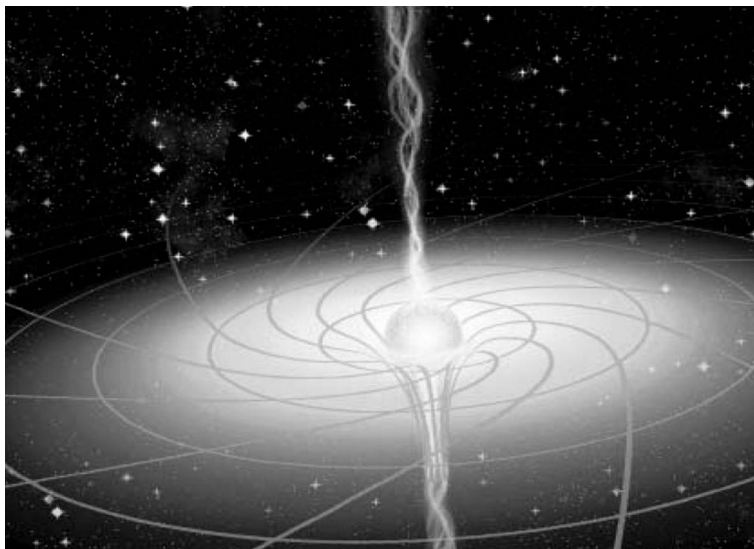
Brzy se ukázalo, že může popisovat pole extrémního objektu, který byl později nazván jako černá díra. Ve Schwarzschildově prostoročasu také dochází k relativistickému efektu ohybu světelného paprsku (při průletu kolem centrálního tělesa).

Schwarzschildovo řešení potvrzuje i další významnou předpověď teorie, *gravitační frekvenční posun*. Fotony opouštějící hmotné těleso červenají a fotony přibližující se k hmotnému tělesu modrají. Změna frekvence ω souvisí se změnou gravitačního potenciálu φ vztahem

$$(4) \quad \frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{\Delta\varphi}{c^2}.$$

Historicky první měření tohoto jevu se podařilo R. V. Poundovi a G. A. Rebkovi v roce 1960 [3]. K měření použili starou vodárenskou věž na Harvardově univerzitě. K dispozici tak měli výškový rozdíl pouhých 22,6 m. Jako zdroj záření použili radioaktivní izotop železa Fe 57 emitující fotony s energií 14,4 keV. Frekvence byla měřena pomocí Mössbauerova jevu (ze zpětného rázu krystalové mříže, na kterou dopadl foton). Relativní změna frekvence činila pouhých $2,5 \times 10^{-15}$! V experimentu byl naměřen jak červený posuv fotonů pohybujících se vzhůru, tak modrý posuv fotonů pohybujících se dolů. V roce 1965 zopakovali experiment s vyšší přesností R. V. Pound a J. L. Snider [4].

Přesné proměření gravitačního červeného posuvu měla za úkol družice Gravity Probe A, která je historickým předchůdcem současné družice Gravity Probe B. Družice byla společným projektem Marshallova kosmického letového centra (NASA) a observatoře SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory). Na suborbitální oběžnou dráhu byla vynesena raketou Scout-D1 dne 18. června 1976 z Wallopova letového centra ve



Obr. 1. Lenseův-Thirringův jev v blízkosti černé díry. (© Sky & Teleskope)

Virginii. Dráha družice byla volena tak, aby prošla co největším rozdílem gravitačního potenciálu, tj. byla silně eliptická s bodem obratu 10 000 km nad Zemí. Družice byla ve vesmíru pouhých 55 minut, poté řízeně spadla do Atlantiku. Na družici byl umístěn vodíkový MASER, který sloužil jako hlavní měřicí zařízení (hodiny). Stejný MASER byl pro srovnání naměřených údajů umístěn na povrchu Země. Souhlas naměřených údajů s obecnou relativitou byl zjištěn s relativní přesností 2×10^{-4} .

Lenseův-Thirringův jev

Prostor očas kolem sférického hmotného tělesa je deformován podle Schwarzschildova řešení, které bylo nalezeno již v roce 1916. O dva roky později, v roce 1918, zjistili Joseph Lense a Hans Thirring [5], že u rotujícího tělesa předpovídá teorie relativity ještě jeden jev: lokální souřadnicový systém by měl být strháván rotací tělesa, podobně jako koule rotující ve viskózní kapalině s sebou strhává kapalinu ve své těsné blízkosti. V anglické literatuře se jev nazývá „*frame-dragging*“. Extrémních hodnot by mělo strhávání lokálního souřadnicového systému nabývat v těsné blízkosti černých děr.

Po dlouhou dobu se zdálo, že přímé měření tohoto jevu je nemožné. Až v letech 1959 a 1960 navrhli nezávisle George Pugh z ministerstva obrany a Leonard Schiff ze Stanfordské univerzity měření jevu pomocí rotujícího gyroskopu umístěného na polární oběžné dráze. Rotační osa gyroskopu bude v důsledku draggingu konat tzv. Lenseovu-Thirringovu precesi — bude se stáčet úhlovou rychlostí

$$(5) \quad \frac{d\varphi_{LT}}{d\tau} = \frac{G}{c^2} \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}) - \mathbf{J}}{r^3},$$

kde \mathbf{J} je moment hybnosti centrálního tělesa a \mathbf{n} jednotkový polohový vektor.

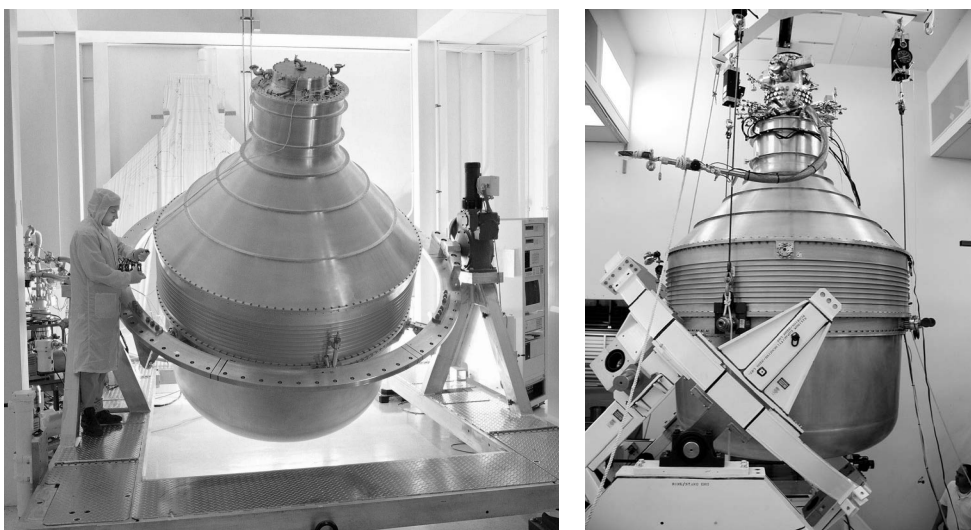
Družice Gravity Probe B, vypuštěná v letošním roce, by měla umět sledovat změny směru rotační osy malých gyroskopů umístěných v jejím nitru způsobené jak pohybem v zakřiveném prostoročasu, tak Lenseovým-Thirringovým jevem. Oba efekty jsou u Země velmi malé, ale díky preciznímu provedení experimentu měřitelné. Pro navrhovanou dráhu družice vychází z teorie změna směru rotační osy gyroskopů způsobená zakřivením prostoročasu 6,6 obloukových vteřin za rok a změna způsobená strháváním lokálního souřadnicového systému pouhých 0,042 obloukových vteřin za rok!

Pravděpodobná detekce Lenseova-Thirringova jevu byla oznámena italskými astronomy v roce 1997 v bezprostředním okolí neutronové hvězdy. Mnohem silnější experimentální data ve prospěch Lenseova-Thirringova jevu přineslo pozorování okolí černé díry v souhvězdí Orla GRS 1915+105 z MIT. V obou případech bylo analyzováno rentgenové záření zachycené z objektů družicí RXTE a jde tak o nepřímé pozorování jevu.

Gravity Probe B

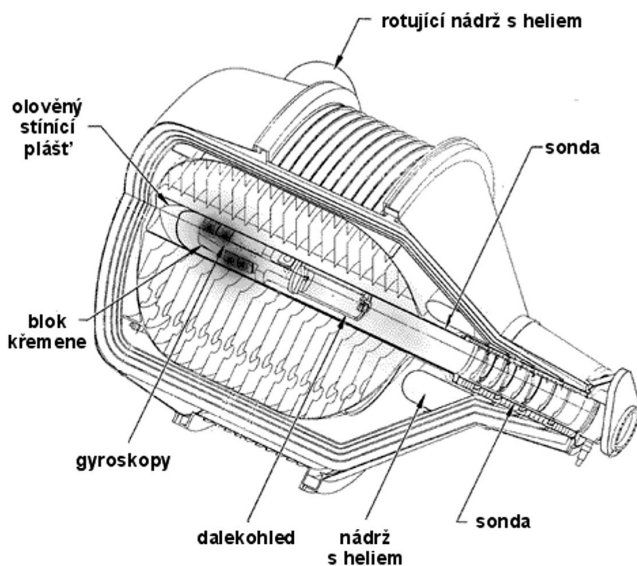
Gravity Probe B je družice NASA, která využívá nejvyspělejší známé technologie [6]. Na její přípravě se podíleli odborníci ze Stanfordské univerzity a z Marshallova kosmického letového střediska NASA. Startovala z Vandenbergovy letecké základny v jižní Kalifornii dne 20. dubna 2004. Všechna data vysílaná po startu jsou zpracovávána ve středisku umístěném v kampusu Stanfordské univerzity.

Družici tvoří především obří třímetrová Dewarova nádoba, do které se vejde $2,5\text{ m}^3$ kapalného helia. V ose nádoby je protáhlé pouzdro s olověným pláštěm, do kterého je zasunuto vlastní měřicí zařízení. Olověný plášť stíní měřicí sondu před zářením a elek-

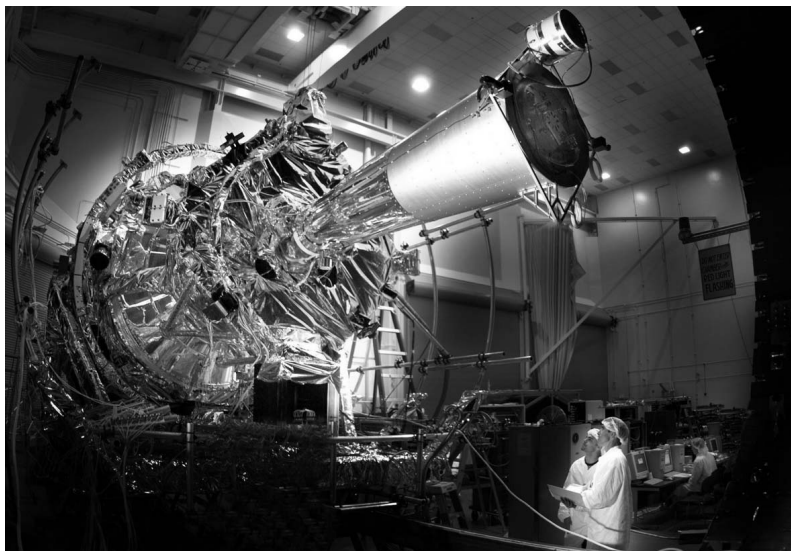


Obr. 2. Dewarova nádoba — hlavní část družice obsahující kapalně helium. [Foto nalevo: Russ Underwood (Lockheed Martin Corporation). Foto napravo: Russ Leese (Stanford University).]

trickým a magnetickým polem. Uvnitř pouzdra je magnetické pole nižší než 10^{-6} G (10^{-10} T). Kapalné helium udrží v měřicí části teplotu 1,8 K po dobu osmnácti měsíců. Předpokládaná životnost družice je jeden až dva roky. Mimo Dewarovu nádobu jsou jen panely slunečních baterií a sluneční clona naváděcího dalekohledu. Celá družice má hmotnost 3400 kg a délku 7 metrů.



Obr. 3. Uložení jednotlivých částí v Dewarově nádobě. Na pravé straně bude připevněna sluneční clona a na bocích panely slunečních baterií. (Foto: Stanford University.)



Obr. 4. Družice po dokončení. V pravé části je již namontována sluneční clona. (Foto: Stanford University.)

Dráha družice je polární ve výšce 640 km nad povrchem Země. Prochází jak polární oblastí, tak rovníkovou oblastí. Vzhledem k charakteru dráhy jsou startovací okna vždy časově velmi úzká, zhruba jednonominutová.

Dnešní družice je výsledkem čtyř desetiletí příprav, návrhů a konstrukčních zkoušek. Každá součástka družice byla pečlivě testována, některé i několik let. Družice byla sestavena v prostředí s čistotou třídy 10 podle amerických předpisů, částičky prachu o rozměrech větších než mikrometr by mohly poškodit přesně opracovaný povrch malých součástek. Družice provede test Einsteinovy obecné relativity, který nemá svou přesností v dějinách vědy obdoby.

Gyroskopy

Srdcem celého měřicího zařízení jsou čtyři gyroskopy s rotorem o velikosti pingpongového míčku. Sledováním jejich polohy a rotační osy bude možné přesně určit vliv zakřivení prostoročasu kolem Země i vliv Lenseova-Thirringova jevu. Současně tak budou testovány dva základní jevy obecné relativity, každý z nich pootočí gyroskopy v jiné ose, obě osy jsou navzájem kolmé. Vliv zakřivení prostoročasu kolem Země by měl stočit gyroskop o $6,6''$ za rok a Lenseův-Thirringův jev o $0,042''$ za rok.



Obr. 5. Vlevo: Rotor gyroskopu s oběma polokulovými pouzdry. (Foto: Don Halley.) Vpravo: Rotor gyroskopu v ruce. (Foto: GPB, Stanford University.)

Gyroskopy jsou vyrobeny z taveného křemene, mají průměr 3,8 cm a musí být dokonale sférické a homogenní. Jejich povrch je opracován a vyleštěn s přesností čtyřiceti atomárních vrstev, nejvyšší a nejnižší místo na povrchu se výškově liší o $0,01\ \mu\text{m}$. Jde údajně o vůbec nejpřesněji připravený povrch v historii lidstva. Křemen pochází z brazilských dolů, přetaven a slisován byl v Německu. Povrch rotoru je potažen vrstvou niobu, která je za provozní teploty supravodivá. Rotor se otočí 10 000krát za minutu a je umístěn uvnitř dvou polokulových pouzder. Všechna čtyři pouzdra s rotory jsou uložena v bloku z extrémně čistého taveného křemene, který je dlouhý 53 cm a pevně spojený s naváděcím dalekohledem.



Obr. 6. Blok křemene, ve kterém jsou uloženy gyroskopy. V horní části jsou patrné čtyři válcové tunely připravené pro uložení gyroskopů. (Foto: GPB, Stanford University.)

Při otáčení generuje supravodivý povrch rotoru dipólové magnetické pole (tzv. Londonův magnetický moment), které indukuje napětí ve vodivé smyčce. Ta je součástí pouzdra gyroskopu a je spojena s externí elektronikou SQUID (Superconducting QUantum Interference Device), která zjistí odchýlení osy rotace gyroskopu s přesností 10^{-4} obloukové vteřiny.

Naváděcí systém

Naváděcí dalekohled je pevně spojen s blokem taveného křemene s gyroskopy. Dalekohled má délku pouhých 36 cm, apertura má průměr 14 cm. Za naváděcí hvězdu byla zvolena hvězda IM Pegasi (HR 8703). K ní bude po celý rok mířit osa naváděcího dalekohledu i všech čtyř gyroskopů. Dva z nich budou rotovat v jednom směru a další dva v opačném. Přesnost udržení družice v daném směru je 10^{-4} úhlové vteřiny.

Volba hvězdy, která je dostatečně stabilní a má minimální vlastní pohyb, byla provedena s velkou pečlivostí. I přesto jsou známy čtyři proměnné faktory ovlivňující měření její polohy: vlastní pohyb, pohyb spojený s příslušností k binárnímu systému, roční paralaxa způsobená oběhem Země kolem Slunce a změny jasnosti způsobené výtrysky hmoty z povrchu hvězdy. Hvězda je pečlivě monitorována pozemskými dalekohledy rozmístěnými po celé zeměkouli a její poloha je porovnávána s velmi vzdáleným referenčním kvazarem.

Epilog

Autoři projektu s nadsázkou hovoří o sedmi dosažených nulách. Tím mají na mysli, že připravený experiment pracuje za téměř nulové teploty (1), za téměř nulového tlaku (2), za téměř nulového magnetického pole (3) a téměř nulové gravitace (4 — družice se pohybuje po geodetice, kde je efektivně stav beztláče). Poslední tři nuly souvisí s technologií výroby gyroskopů. Gyroskopy jsou téměř dokonale homogenní (5), mechanicky téměř dokonale sférické (6) a elektricky téměř dokonale sférické, tj. mají zanedbatelný elektrický dipólový moment (7).

Citlivost připravené družice je zcela mimořádná a všichni se můžeme těšit na výsledky této mise, které se zcela jistě stanou na dlouhou dobu základním testem Einsteinovy obecné teorie relativity.

L i t e r a t u r a

- [1] EINSTEIN, A.: *Der Feldgleichungen de Gravitation*. Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Sitzber 1915, 844–847.
- [2] SCHWARZSCHILD, K.: *Über das Gravitationsfeld eines Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften 1 (1916), 424–434.
- [3] POUND, R. V., REBKA, G. A.: *Apparent Weight of Photons*. Physical Review Letters 4 (1960), 337–341.
- [4] POUND, R. V., SNIDER, J. L.: *Effect of Gravity on Gamma Radiation*. Physical Review B 140 (1965), 788–803.
- [5] LENSE, J., THIRRING, H.: *The Influence of the Self-Rotation of Central Bodies on the Movements of the Planets and the Moon According to Einstein's Theory of Gravitation*. Physicalische Zeitschrift 19 (1918), 156–163.
- [6] WWW stránky projektu Gravity Probe B: <http://einstein.stanford.edu>