

Gravity Probe B – ověřování základních principů Einsteinovy obecné teorie relativity

Petr Kulhánek

Když nám před čtvrt stoletím vyprávěl na přednáškách z obecné relativity profesor Bičák o družici, která bude testovat pohyb těles po geodetice pomocí malých rotujících kuliček uzavřených v malé družici, myslel jsem si, že jde o experiment, který se uskuteční během několika příštích let. Osud tomu chtěl však jinak. Teprve 20. dubna 2004 byla vynesena na polární oběžnou dráhu obří termoska s protáhlou měřicí sondou ve svém nitru. Srdcem měřicí sondy jsou čtyři malé gyroskopy o velikosti pingpongového míčku. Ano, řeč je o družici Gravity Probe B (GPB), která slouží k ověřování základních principů Einsteinovy obecné teorie relativity.

Obecná relativita

Albert Einstein (1879-1955) zobecnil speciální relativitu platící v inerciálních souřadnicových soustavách na veškeré souřadnicové systémy a vytvořil v roce 1915 obecnou relativitu, která se v zápleti stala jedinou funkční teorií gravitační interakce [1].

Gravitační interakce se od všech ostatních výrazně odlišuje. Jako jediná působí na všechny částice. Toto působení má zvláštní charakter: testovací (malá) tělesa se v gravitačním poli pohybují po stejných trajektoriích. Je to důsledkem principu ekvivalence mezi setrvačnou a gravitační hmotou.

V obecné relativitě sama tělesa zakřivují prostor a čas ve svém okolí a v tomto zakřiveném prostoročase se pohybují po nejrovnějších možných drahách - *geodetikách*. Prostor a čas v obecné relativitě bez samotných těles neexistuje. Zakřivení prostoročasu je svázáno s rozložením hmoty známými Einsteinovými rovnicemi

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

kde na levé straně je Ricciho tenzor popisující zakřivení prostoročasu a na pravé tenzor hmoty-energie popisující rozložení hmoty v prostoročase. Pohyb po geodetice je možné spočítat z rovnice geodetiky

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

kde $\Gamma_{\mu\beta}^{\alpha}$ jsou Christoffelovy symboly počítané z metrického tenzoru a U_{μ} je čtyřrychlost.

Obecná relativita znamenala zásadní revoluci ve fyzice 20. století. Předpověděla nebo vysvětlila řadu nových jevů: zakřivení světelného paprsku v gravitačním poli (1,75" u povrchu Slunce), gravitační čočky (první objevena v roce 1979), stáčení perihélia planet (zejména Merkuru o 43" za století), gravitační červený posuv (závislost chodu hodin na gravitačním poli, poprvé byla prokázána pro bílé trpaslíky), kosmologický červený posuv způsobený rozpínáním vesmíru; Lenseův-Thirringův jev (strhávání souřadnicové soustavy při rotaci tělesa); existenci černých děr, rozpínání vesmíru; gravitačních vlny a mnoho dalších jevů neznámých v newtonovské fyzice.

Schwarzschildovo řešení

Nejjednodušší řešení rovnic v obecné relativitě je Schwarzschildovo řešení popisující časoprostor v okolí sféricky symetrického hmotného tělesa [2], které našel Karl Schwarzschild v roce 1916. Interval má dobře známý tvar

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

Ze Schwarzschildova řešení plyne existence černých děr, zakřivení paprsku světla v okolí hmotných těles a v roce 1936 navrhl Albert Einstein možnost existence gravitačních čoček.

Dalším důležitým jevem vyplývajícím z Schwarzschildova řešení je *gravitační červený posuv*. Fotony opouštějící hmotné těleso červenají a fotony přibližující se k hmotnému tělesu modrají. Změna frekvence souvisí se změnou gravitačního potenciálu vztahem

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

Historicky prvním měření tohoto jevu se podařilo R. V. Poundovi a G. A. Rebkovi v roce 1960 [3]. K měření použili starou vodárenskou věž na Harvardské universitě. 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 2.5×10^{-15} ! V experimentu byl naměřen jak červený posuv fotonů pohybujících se vzhůru, tak modrý posuv fotonů pohybujících se dolů. V roce 1965 zopakoval 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 Marschallova kosmického letového centra (NASA) a Astrofyzikální observatoře Smithonova úřadu. Na suborbitální oběžnou dráhu byla vynesena raketou Scout-D1 dne 18. června 1976 z Wallopova letového centra ve Virginii. Dráha družice byla volena tak, aby prošla co největším rozdílem gravitačního potenciálu – 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

Prostoročas kolem sférického hmotného tělesa je deformován podle Schwarzschildova řešení, které bylo nalezeno hned 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 strhává kapalinu s sebou 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 roce 1959 navrhl Leonard Schiff ze Stanfordské univerzity měření jevu pomocí rotujícího gyroskopu umístěného na polární oběžné dráze. Změna osy rotace gyroskopu bude dána Lenseovou-Thirringovou precesí

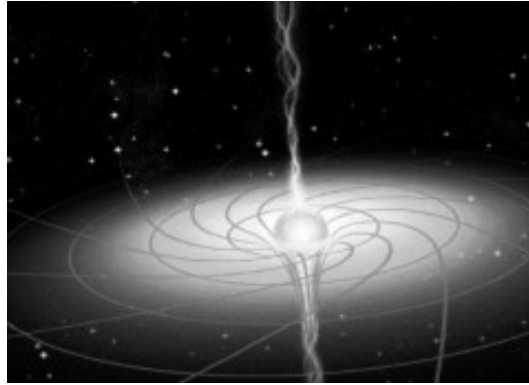
$$\frac{d\phi_{LT}}{dt} = \frac{G}{c^2} \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}) - \mathbf{J}}{r^3}, \quad (5)$$

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 rotační osy malých gyroskopů umístěných v jejím nitru způsobené jak pohybem v zakřiveném prostoročase, 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 rotační osy gyroskopů způsobená zakřivením časoprostoru 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.



Lenseův-Thirringův jev v blízkosti černé díry.
© Sky & Teleskope.

Gravity Probe B

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

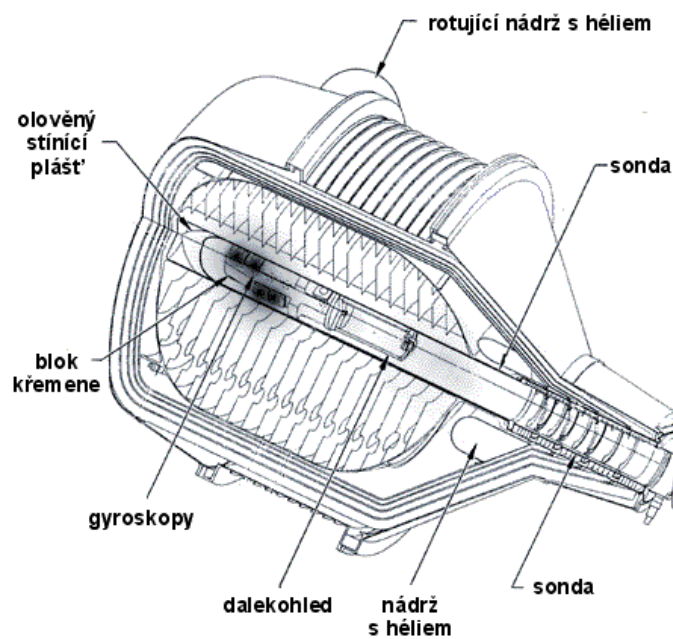
Družici tvoří především obří třímetrová Dewarova nádoba, do které se vejde 2,5 m³ kapalného hélia. V ose nádoby je protáhlé pouzdro s olověným pláštěm, do kterého je zasunuto vlastní měřicí zařízení. Olověný plášť stíní měřicí sondu před zářením a elektrickým a magnetickým polem. Uvnitř pouzdra je magnetické pole nižší než 10⁻⁶ G (10⁻¹⁰ T). Kapalné hélium udrží v měřicí části teplotu 1,8 K po dobu osmnácti měsíců. Přepokládaná životnost družice je jeden až dva roky. Mimo Dewarovu nádobu jsou jen panely slunečních baterií a protisluneční clona naváděcího dalekohledu. Celá družice má hmotnost 3 400 kg a celkovou délku 7 metrů.

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

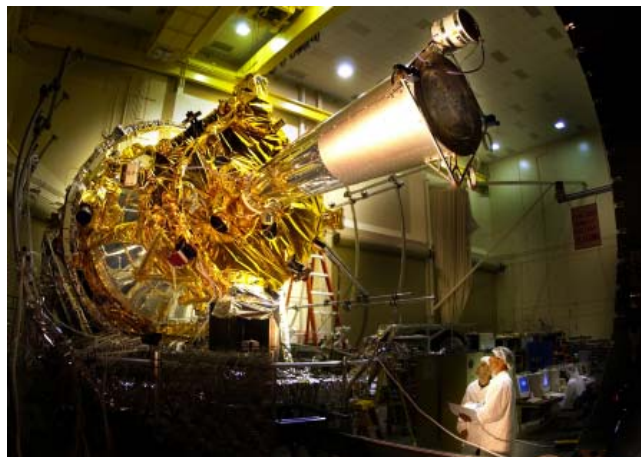
Dnešní družice je výsledkem čtyř desetiletí příprav, návrhů a konstrukčních zkoušek. Každá součástka družice byla pečlivě testována, některé i několik let. Družice byla sestavena v prostředí s čistotou třídy 10 podle amerických předpisů, částičky prachu o rozměrech větších jak mikrometr by mohly poškodit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



Dewarova nádoba – hlavní část družice obsahující kapalné hélium. Foto nalevo: Russ Underwood (Lockheed Martin Corporation) Foto napravo: Russ Leese (Stanford University)



Uložení jednotlivých částí v Dewarově nádobě. Na pravé straně bude připevněna ještě protisluneční clona a na bocích panely slunečních baterií. Stanford University.



Družice po svém dokončení. V pravé části je již namontována protisluneční clona. Foto: Stanford University.

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 vliv Lenseova-Thirringova jevu o 0,042“ za rok.

Gyroskopy jsou vyrobeny z taveného křemene, mají průměr 3,8 cm a musí být dokonale sférické a homogenní. Jejich povrch je opracován a vyleštěn a přesností čtyřiceti atomárních vrstev, nejvyšší a nejnižší místo na povrchu se výškově liší o 0,01 μm . Jde údajně o vůbec nejpresněji 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 10 000 krát za minutu a je umístěn uvnitř dvou polokulových pouzder. Všechny čtyři pouzdra s rotory jsou uložena v bloku z extrémně čistého taveného křemene, který je dlouhý 53 cm a pevně spojený s naváděcím dalekohledem.

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.



Nalevo: Rotor gyroskopu s oběma polokulovými pouzdry. Foto Don Halley.
Napravo: Rotor gyroskopu v ruce. Foto GPB, Stanford University.



Blok křemene, ve kterém jsou uloženy gyroskopy.
V horní části jsou patrné čtyři válcové tunely
připravené pro uložení gyroskopů. Výška bloku je 53 cm.
Foto: GPB, Stanford University.

Naváděcí systém

Naváděcí dalekohled je pevně spojen s blokem taveného křemenu s gyroskopy. Dalekohled má délku pouhých 36 cm, apertura má průměr 14 cm. Za naváděcí hvězdu byla zvolena hvězda IM Pegasi (HR 8703). K této hvězdě bude po celý rok mířit osa naváděcího dalekohledu i všech čtyř gyroskopů. Dva z nich budou rotovat v jednom směru a dva zbývající 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 polohy této hvězdy: vlastní pohyb, pohyb spojený s příslušností k binárnímu systému, roční paralaxa způsobená pohybem Země kolem Slunce a změny jasnosti způsobené výtrysky látek z povrchu hvězdy. Hvězda je pečlivě monitorována pozemskými dalekohledy rozmístěnými po celé zeměkouli a její poloha 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 za téměř nulové gravitace (4 - družice se pohybuje po geodetice, kde je efektivně stav beztlíže). 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.

[1] A. Einstein: Sitzber. Deut. Akad. Wiss. Berlin, 844-847, 1915

- [2] K. Schwarzschild: Sitzber. Deut. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math.-Phys. Tech., 424-434, 1916.
- [3] R. V. Pound, G. A. Rebka, Phys. Rev. Lett., **4** (1960) 337.
- [4] R. V. Pound, J. L. Snider, Phys. Rev. B, **140** (1965) 788.
- [5] J. Lense, H. Thirring: Physik. Zeitschr. **19** (1918) 156
- [6] WWW stránky projektu Gravity Probe B: <http://einstein.stanford.edu>.