

V. Weidemann

Binární pulzar PSR 1913 + 16: ideální případ testu gravitačních teorií

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 39 (1994), No. 4, 227--231

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139449>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1994

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>

Binární pulzar PSR 1913+16: ideální případ testu gravitačních teorií

V. Weidemann

Joseph H. Taylor a Russell A. Hulse obdrželi Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1993. Byli oceněni za objev prvního binárního pulzaru v roce 1974, který umožnil v následujících letech nanejvýš přesné potvrzení Einsteinovy obecné teorie relativity. Relativistické stáčení dráhové elipsy tohoto systému (stáčení periastra) je o více než čtyři řády větší než při klasickém důkazu Einsteinovy teorie v našem slunečním systému, při měření stáčení perihelia Merkuru. Spektakulární je též roční zkrácení oběžné doby o 10^{-4} s, změřené v roce 1978, které můžeme považovat za nepřímý důkaz existence gravitačních vln.

Pulzary jsou rotující neutronové hvězdy a jako kompaktní pozůstatek exploze supernov představují stabilní konečné stádium vývoje hvězd. Stlačení hmoty na hustotu atomového jádra — převážně ve formě neutronů — umožňuje stěsnat více než jednu hmotnost Slunce do útvaru o poloměru jen 10 km. Tíhové zrychlení na povrchu, úměrné $1/R^2$, je tak velké, že neutronová hvězda může rotovat víc než tisíckrát za sekundu, aniž by se roztrhla odstředivou silou. Zamrzlá magnetická pole o hodnotách víc než 10^{12} Gaussů vyvolávají emisi relativistických částic především do směru magnetických pólů: Elektromagnetické záření je tudíž vysíláno do přednostních směrů tak, že pozorovatel registruje periodicky se opakující signály jako u světla rotujícího majáku. Takové signály byly zjištěny v roce 1967 v rádiovém oboru a vysílající objekty byly nazvány pulzary. Typické periody pulzů činily 1 sekundu, u Krabího pulzaru objeveného o málo později jen 33 milisekund, což vedlo k tomu, že se prosadila interpretace pulzarů jako neutronových hvězd. (Pro argumentaci a další vlastnosti viz např. [1] a [2].)

Při hledání dalších pulzarů objevili Hulse a Taylor pomocí největšího radioteleskopu v Arecibo v Puerto Rico (pevně smontované, 305 m velké zrcadlo) jeden 59milisekundový pulzar (PSB 1913+16) s nestejnými časovými intervaly mezi pulzy. Modulace odpovídala překrývání Dopplerovým jevem podobně, jak to bylo známo u spektroskopických dvojhvězd — u kterých se spektrální linie periodicky posunují. Šlo tedy o pulzar v systému dvojhvězdy. Stejně jako pro spektroskopické dvojhvězdy umožnila analýza křivky radiální rychlosti určení parametrů keplerovské dráhy. Hulse a Taylor obdrželi již v roce 1974 [3] pro PSR 1913+16 z analýzy doby registrace pulzů následující hodnoty: oběžná doba $P_b = 27908$ s, excentricita dráhy $e = 0,615$, orientace dráhy (úhel stočení) $\omega_0 = 179^\circ$, velká poloosa $a_1 \cdot \sin i = 7 \times 10^5$ km. I když úhel sklonu

VOLKER WEIDEMANN: *Der Doppelsternpulsar PSR 1913+16: ein idealer Testfall für Gravitationstheorien*. Phys. Bl. 49 (1993), Nr. 12, s. 1101.

Přeložila IVANA STULÍKOVÁ.

© 1993 VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69469 Weinheim

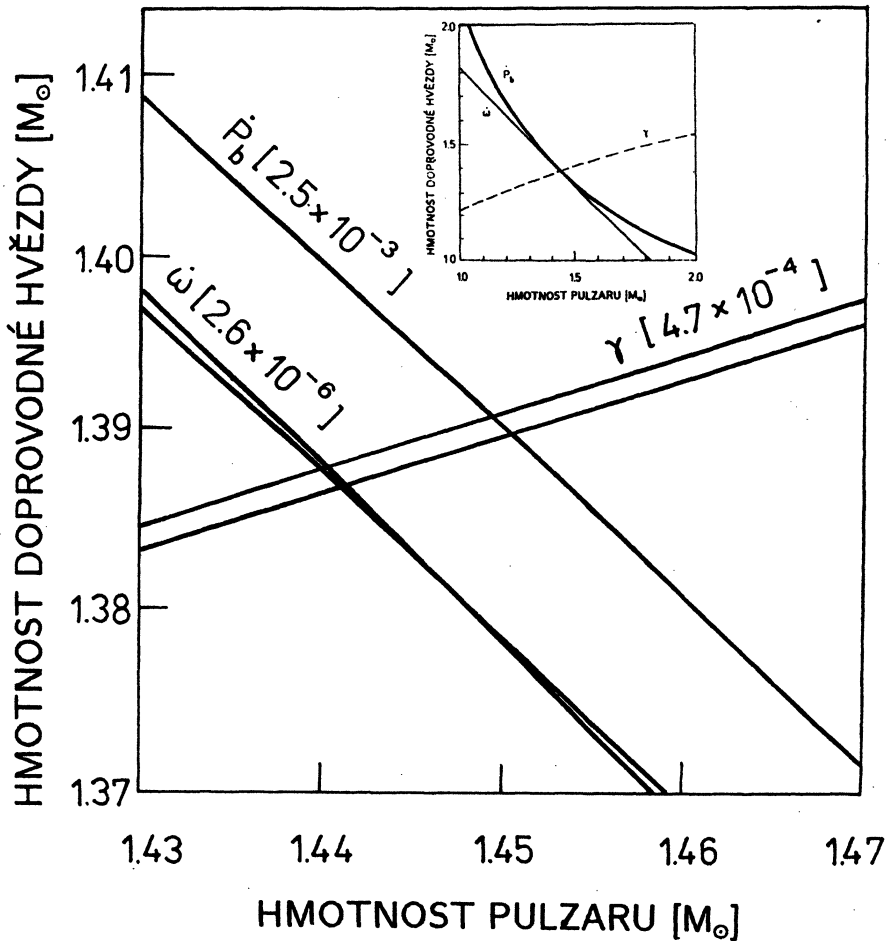
dráhy i ($i = 0^\circ$ — dráha kolmá k zornému paprsku, $i = 90^\circ$ — rovina dráhy v zorném paprsku) nemohl být z této analýzy určen, bylo přesto pravděpodobné, že musí být též druhá hvězda kompaktní, neboť velká poloosa dráhy je řádově jen jeden sluneční poloměr. V každém případě to umožňovalo významnější test obecné teorie relativity (OTR), neboť proti Einsteinem předpovězenému a pozorováním potvrzenému stáčení perihelia Merkuru, se dalo zde očekávat nesrovnatelně větší stáčení dráhové elipsy: místo 43 úhlových vteřin za století u Merkuru několik stupňů za rok pro PSR 1913+16 — za jeden oběh úměrně $1/a(1-e^2)$. A skutečně mohl Taylor se svými spolupracovníky již během dvou let zlepšit měření tak (přesnost registrace pulzů $200 \mu\text{s}$), že bylo stáčení periastra elipsy určeno na 4,22(4) stupně/rok. Tedy efekt 35 000krát silnější než při klasickém testu Einsteinovy teorie ve slunečním systému! Podle obecné teorie relativity je stáčení periastra úměrné součtu hmotností obou hvězd uvažovaných jako body. Z měření lze proto obdržet vztah mezi oběma hmotnostmi, který ovšem platí



Američtí astrofyzikové Joseph H. Taylor jun. (vzadu) a Russel A. Hulse získali Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1993 za objev prvního binárního pulzaru, PSR 1913+16 a za přesná měření provedená v souvislosti s tímto pulzarem. Tím se jim podařilo potvrdit platnost obecné teorie relativity s přesností lepší o několik řádů než dosud a také nepřímo dokázat existenci gravitačních vln. J. H. Taylor se narodil v roce 1941 ve Filadelfii; promoval v roce 1969 na Harvardově univerzitě a dnes je profesorem astronomie na Univerzitě v Princetonu. Objev PSR 1913+16 se mu podařil v roce 1974 společně s jeho tehdejším doktorandem Hulsem na Univerzitě v Massachusetts v Amherstu. Za svou vědeckou práci byl Taylor několikrát odměněn, mezi jiným Wolfovou cenou za fyziku. Russel A. Hulse narozený v roce 1950 v New Yorku promoval v roce 1975 a je dnes vedoucím výzkumným pracovníkem (Principal Research Physicist) v Laboratoři fyziky plazmatu Univerzity v Princetonu. (Fotografie: dpa.)

přesně jen za předpokladu bodovosti obou objektů. To jistě platí pro neutronovou hvězdu v systému, platnost tohoto předpokladu však nebyla prokázána pro druhou komponentu.

Další modulace dob příchodů pulzů jsou způsobeny tím, že jsou ovlivněny relativistickým gravitačním rudým posuvem, jelikož vzhledem ke značné eliptičnosti dráhy přichází signál z různé „hloubky“ gravitačního potenciálu druhé hvězdy. Dále se projevuje skutečnost, že dilatace času podle speciální teorie relativity způsobuje transverzální Dopplerův jev: Kombinovaná měření obou efektů shrnutá do parametru γ umožnila určit $\sin i$ a tím i a_1 , jakož i vztah mezi hmotnostmi obou hvězd M_1 a M_2 pomocí třetího Keplerova zákona. Pomocí $\gamma = 0,0047$ s a vztahu pro periastrum obdržel Taylor pro pulzar hodnoty $M_1 = 1,39$ a $M_2 = 1,44$ hmotnosti Slunce.



Obr. 1. Určení hmotnosti binárního pulzaru PSR 1913+16 ze tří parametrů \dot{P}_b , $\dot{\omega}$ a γ . Šířka pásu každého parametru představuje relativní přesnost. Čísla v závorkách jsou směrodatné odchylky měření. Na vloženém obrázku je průběh tří parametrů při větším rozsahu hmotností. (Vyhodnocení N. Wexa a G. Schäfera, Jena, podle [6].)

Protože toto jsou právě horní hranice hmotností bílých trpaslíků, potvrdila se interpretace PSR 1913+16 jako neutronové hvězdy a bylo možno se domnívat, že i druhá hvězda je neutronová; její světelný kužel nás však buď nezasahuje nebo její pulzarová aktivita již odezněla. (Až na výjimky se rychlost rotace pulzarů snižuje).

To, co však Taylor uvedl v Mnichově v roce 1978 — na 9. Texas-symposiu pro relativistickou astrofyziku — jako další jev, bylo přijato jako senzace: zkrácení *oběžné doby* o 10^{-4} s/rok. Tato ztráta energie systému se dá numericky vyjádřit téměř přesně, přihlédneme-li k *vyzařování gravitačních vln* předpovězenému Einsteinovou teorií. Až dosud se nepodařil žádný důkaz existence gravitačních vln, a ani nyní nejsou detektory gravitačních vln tak dalece vyvinuty, aby přinesly přímý důkaz (např. na základě explozí supernov v sousedních galaxiích — supernovu 1987A v Magellanově mračnu jsme bohužel zmeškali!). Pomocí této interpretace vyplývá také zde z naměřených údajů vztah mezi oběma hmotnostmi, který se sice přesně nekryje s výše uvedeným řešením pro M_1 a M_2 ze stáčení periastra a parametru γ , ale přesto dává blízké hodnoty [4]. Protože však byly údaje ještě relativně nepřesné ($dP_b/dt = (-3,2 \pm 0,6) \times 10^{-12}$) a protože nebylo také dostatečně jasné, zda by nemohly hrát roli sekulární efekty, bylo třeba nejprve vyčkat na další měření.

Ve skutečnosti v následujících letech pokračující měření nejen potvrdila první závěry, ale navíc dosáhla přesnosti, která je ojedinělá v astronomii i ve fyzice. Nejprve k astronomickým údajům: Při výpočtu parametrů dráhy z registrovaných dob pulzů se přirozeně musí brát zřetel na to, že také my jako pozorovatelé se pohybujeme se Zemí — do měřeného relativního pohybu vstupuje jak poloha a rychlost Země ve slunečním systému tak i poloha vysílačů. Poloha a rychlost Země ve sluneční soustavě jsou dnes stanoveny pro celý sluneční systém pomocí obecné relativistické analýzy (nutné např. také k vyhodnocování radarových měření k Měsíci nebo k určení přesného času, kdy musí být vydány povely ke korekci kurzu vesmírných sond). Poloha pulzaru PSR 1913+16 se podle toho udává (v systému B1950.0 — pozn. recenzenta): (rektascenze) $\alpha = 19^h 13^m 12,46549^s$ s přesností $0,00015^s$ a (deklinace) $\delta = 16^\circ 01' 08,189'' \pm \pm 0,003''$ [5] — přesnost, která nebyla pro jiné hvězdy nikdy dosažena. Totéž platí i pro Keplerovy parametry dráhy: excentricita $e = 0,6171308(4)$, průmět velké poloosy $a_1 \cdot \sin i = 2,3417592(19)$ (ve světelných sekundách, přesnost tedy odpovídá 60 m!) a oběžná doba $P_b = 27906,9807804(6)$ s [6] (k okamžiku fixovaného periastra s $\omega_0 = = 226,57528(6)^\circ$ určenému s přesností na 0,003 s).

Dále k údajům, které jsou významné teprve v rámci obecné teorie relativity: Pro pokles oběžné doby dP_b/dt se nyní udává hodnota $-2,422(6) \times 10^{-12}$, pro ostatní „nekeplerovské“ parametry střední stáčení periastra: $4,226621(11)^\circ/\text{rok}$ a hodnota rudého posuvu a časové dilatace $\gamma = 4,295(2)$ ms. Každý z nekeplerovských parametrů udává vztah v rovině ($M_1 - M_2$). Nyní je konečně možné sestrojít společný průsečík: M_1 (hmotnost pulzaru) = $1,4409(5)$ a $M_2 = 1,3876(5)$ hmotnosti Slunce (viz obr. 1). Také tato určení hmotností přesahují svou přesností vše dosavadní: hmotnosti neutronových hvězd byly dosud na základě pozorování röntgenových dvojhvězd vypočteny na desetiny.

Také druhá hvězda musí být neutronová: při méně kompaktní hvězdě by byly na dráhových parametrech pozorovatelné slapové efekty. Tím je potvrzen původní

předpoklad bodových gravitačních interakcí. Binární pulzar PSR 1913+16 se proto jeví jako ideální laboratoř pro přezkoušení gravitačních teorií.

Toto je třetí krok, který byl v posledních letech učiněn: Přibrat ostatní gravitační teorie a posoudit, jak jsou srovnatelné s údaji o binárním pulzaru. Ačkoliv OTR je ve slunečním systému velmi dobře potvrzena, jde tu přitom ve smyslu Einsteinovy teorie jen o *slabá* gravitační pole, $(GM/c^2R)_{\text{Slunce}} \approx 2 \times 10^{-6}$; otázka, zda platí přesně též pro *silná* pole ($(GM/c^2R) \rightarrow 1$), musela dosud zůstat otevřena. To má ale nesmírnou důležitost např. pro teorii černých děr nebo pro vztahy při sjednocování sil raného vesmíru. Pro neutronovou hvězdu je $GM/c^2R \approx 0,2$, takže testy vztahů v binárním pulzaru dovolují určovat vyšší řády postnewtonovského vývoje posloupnosti. Jako alternativy k OTR jsou k dispozici i teorie, ve kterých se často vedle čistě geometricky určených sil vyskytují ještě skalární nebo jiné tenzorové interakce. Nejznámější je skalárně-tenzorová teorie Branse a Dickeho, v jejímž rámci se gravitační konstanta G , v OTR neměnná, stává proměnnou. Dřívější testy ve slunečním systému vedly již ke značnému omezení relevantních vazebných konstant v této teorii (viz [7]). Ostatní teorie udávají rychlostní závislosti odlišné od OTR, nebo předpovídají buď žádné nebo odlišné vyzářování gravitačních vln. Taylor se svými spolupracovníky provedl test pomocí údajů z binárního pulzaru — mezitím se našly i další pulzary, ne však tak spektakulární jako PSR 1913+16. Čtenáře můžeme odkázat na jejich předložkové uveřejnění v Nature [8], viz též [9]: Podle tohoto testu lze pro celou třídu teorií předpovídajících pro slabá pole (sluneční soustava) stejné jevy jako OTR, jejichž odchylky ve vyšších řádech jsou charakterizovány dvěma parametry, vymežit určité oblasti v rovině těchto parametrů. Tyto oblasti pro PSR 1913+16 jsou největší dovolené hodnoty těchto parametrů, které však leží v úzkých pásech kolem nuly (nula = OTR). Pro vynikající a obsažný přehled k tomuto tématu se 133 citacemi lze čtenáři doporučit práci Cliforda Willa *The confrontation between General Relativity and Experiment: A 1992 Update*.

L i t e r a t u r a

- [1] V. WEIDEMANN: *Naturwissenschaften* 56 (1969), 313.
- [2] V. WEIDEMANN: *Naturwissenschaften* 58 (1971), 241.
- [3] R. A. HULSE, J. H. TAYLOR: *Astrophys. J.* 195 (1975), 151.
- [4] V. WEIDEMANN: *Naturwissenschaften* 66 (1979), 190.
- [5] C. M. WILL: *Int. J. Modern Physics D1* (1992), 13.
- [6] J. H. TAYLOR: *Class. Quantum Grav. (Suppl.)* 10 (1993), 59.
- [7] V. WEIDEMANN: *Phys. Bl.* 31 (1975), 502.
- [8] J. H. TAYLOR, A. WOLSZCZAN, T. DAMOUR, J. M. WEISBERG: *Nature* 355 (1992), 132.
- [9] J. H. TAYLOR, J. M. WEISBERG: *Astrophys. J.* 345 (1989), 434.

Adresa autora:

Prof. Dr. Volker Weidemann

Institut für Theoretische Physik und Sternwarte der Universität

Olshausenstraße 40

24098 Kiel, BRD