

Gravitační vlny

Petr Kulhánek

Zakřivení času a prostoru

Než se pustíme do vyprávění o gravitačních vlnách, musíme si říci alespoň něco málo o zakřivení prostoru a času a o gravitační interakci vůbec.



Albert Einstein (1879-1955)

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. Již Galileo Galilei věděl, že doba volného pádu malé kuličky i velkého kamene je v tíhovém poli Země shodná. (Nesmí jít například o pířko, kde je podstatnou silou odpor vzduchu.) To je důsledkem tzv. principu ekvivalence mezi setrvačnou a gravitační hmotou. Hmota se projevuje setrvačnými a gravitačními účinky a ty jsou si úměrné. Nelze proto od sebe odlišit setrvačné a gravitační jevy. Je jedno, zda se nacházíme v urychlovaném výtahu, tj. neinerciální soustavě, nebo v tíhovém poli se stejným gravitačním zrychlením. V obou soustavách dopadnou experimenty stejně. To vedlo Alberta Einsteina (1879-1955) k zobecnění speciální relativity platící v inerciálních soustavách na veškeré souřadnicové systémy a k vzniku obecné relativity, jejíž kostru dokončil v roce 1915.

Právě universálnost gravitační interakce a jednotná odezva všech testovacích částic na zdroj gravitačního pole vedla k přehodnocení klasického pojmu síly. Zakřivení trajektorií již není způsobeno obtížně definovatelnou silou, ale vlastnostmi prostoru a času. V obecné relativitě sama tělesa zakřívují 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.

Jak si ale představit zakřivení prostoru? Nakreslíme-li trojúhelník, součet úhlů již nemusí být 180° , plocha koule není $4\pi r^2$, neplatí Pythagorova věta, atd. Zkrátka běžné zákony Eukleidovy geometrie přestávají platit. V třírozměrném prostoru je velmi obtížné si to představit. Zkuste si ale nakreslit trojúhelník nebo kružnici na povrch míče. Známé vztahy také nebudou platit, protože povrch koule je zakřivený. Jaké jsou důsledky zakřivení prostoru a času v reálném světě? Planety se podle obecné teorie relativity pohybují po zakřivených drahách proto, že sám prostor a čas je zakřivený. Světelný paprsek se ohýbá v blízkosti Slunce i ostatních hmotných objektů. V některých situacích dochází k efektu gravitační čočky. Naše Slunce kolem sebe zakřívuje prostor natolik, že poloměr Slunce zjištěný přímým měřením by se od poloměru zjištěného výpočtem ze změněné plochy Slunce lišil o 0,5 km. To je velmi málo, uvědomíme-li si, že poloměr Slunce je 700 000 km.

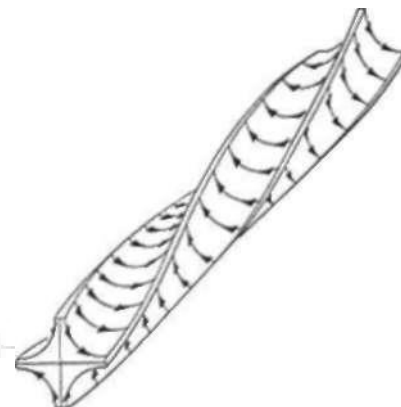
A co zakřivení v čase? Na první pohled se zdá, že bude ještě obtížnější představitelné. Opak je ale pravdou. Zakřivení v čase neznamená vlastně nic jiného, než že hodiny jdou na různých místech různě. Jinak jdou hodiny při povrchu zemském a jinak například 20 metrů nad Zemí. Chod hodin totiž ovlivňuje přítomnost těles (například naší Země). I fotony opouštějící těleso mění ve stejném poměru svou frekvenci. Tento jev nazýváme *červený gravitační posuv*. Rozdíl je ale pro fotony v blízkosti naší Země pro normálního smrtelníka nepatrný.

Obecná relativita znamenala zásadní revoluci ve fyzice 20. století. Předpověděla a vysvětlila řadu nových jevů: *zakřivení světelného paprsku v gravi-*

tačním poli ($1,75''$ u povrchu Slunce); *gravitační čočky* (první objevena v roce 1979); *stlačení perihélia planet* (zejména Merkuru o $43''$ za století); *gravitační červený posuv* (závislost chodu hodin na gravitačním poli, poprvé prokázán pro bílé trpaslíky); *zpoždění elektromagnetického signálu*; *kosmologický červený posuv* způsobený rozpináním Vesmíru; *Lensův-Thirringův jev* (strhávání souřadnicové soustavy při rotaci); *černé díry*; *rozpinání Vesmíru* a mnohé další. Nás v tomto článku bude zajímat ještě jedna předpověď obecné relativity - možnost existence gravitačních vln.

Jak vypadají gravitační vlny?

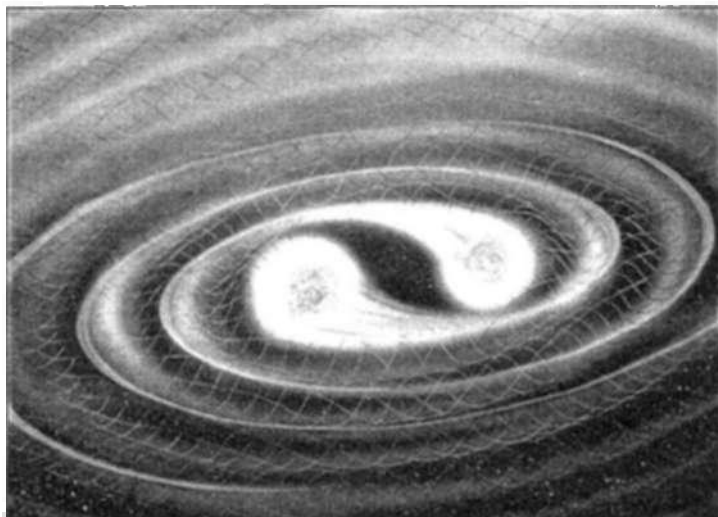
Existenci gravitačních vln předpověděl Albert Einstein již v roce 1916. Jde o periodické zakřivení prostoru a času, které se šíří od svého zdroje, podobně jako například vlna zvuková nebo elektromagnetická. Je zde ale mnoho odlišností. Představte si tři tělesa v prostoru tvořící například pravouhlý trojúhelník. Bude-li přes náš trojúhelník přecházet gravitační vlna,



Síly působící na testovací těleso při průchodu gravitační vlny

budou se tělesa „pohupovat“ na zakřiveném prostoročase a periodicky se bude měnit jejich vzdálenost podobně jako vzdálenost tří lodí pohupujících se na mořských vlnách. V Pythagorově větě nebude čtverec přepony roven součtu

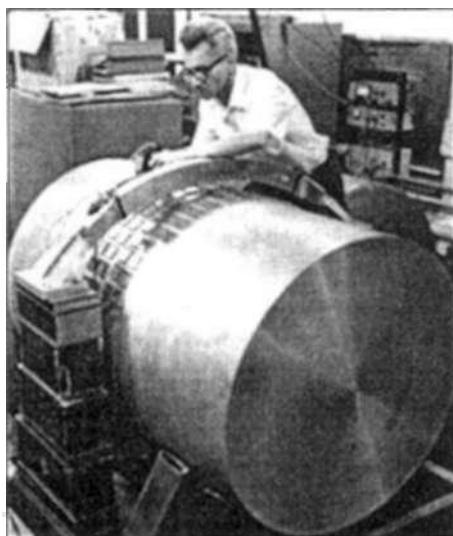
Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (*1959) vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT. Poslední tři roky kromě standardních přednášek vede výběrovou přednášku „Astrofyzika“ doplněnou astronomickými soustředěním.



Gravitační vlna vyvážaná dvojicí neutronových hvězd

čtverců odvěšen, vzdálenosti se budou periodicky měnit vlivem proměnnosti časoprostoru.

Neexistuje žádné prostředí, ve kterém by se gravitace vlnila, jako je tomu u zvukových vln. Rozvlněný je sám časoprostor. U elektromagnetických vln existují dva nezávislé módy vln skloněné o 90°. Podobně i gravitační vlny kmitají ve dvou nezávislých směrech, ale ty jsou skloněny jen o 45°. To souvisí s odlišným spinem (elektromagnetické pole má spin roven jedné, gravitační pole dvěma). Elektromagnetické vlny mohou vznikat u těles s dipólovým a vyšším momentem. To znamená, že sféricky symetrické těleso



Joseph Weber a jeho válcový detektor

nemůže být zdrojem elektromagnetických vln, osově symetrické těleso (dipól) ano. Zdrojem gravitačních vln nemůže být ani monopól ani dipól. Až teprve kvadrupólové rozložení látky může generovat gravitační vlny. Nelekejte se slova kvadrupól. Nejde o nic jiného, než o rozložení hmoty, které není symetrické vzhle-

dem k bodu ani vzhledem k ose. Tyč rotující podél své osy nemá kvadrupólový moment. Tyč rotující kolmo na svou osu kvadrupólový moment má (rozložení látky není symetrické vzhledem k rotační ose) a může generovat gravitační vlny.

Nejjednodušším zdrojem gravitačních vln ve Vesmíru může být dvojice hvězd rotujících kolem společného těžiště. Aby měly gravitační vlny velkou intenzitu, je nutné, aby obě hvězdy značně zakřivovaly prostorčas a byly dostatečně blízko. Ideální je například dvojice neutronových hvězd.

Gravitační vlny přenášejí, podobně jako jiné vlny, energii. Každý zdroj vyzařující gravitační vlny proto ztrácí energii. Jde-li například o dvojici hvězd, budou se z důvodu vyzařování gravitačních vln k sobě přibližovat, poroste jejich oběžná rychlost a po určité době dojde k splynutí obou složek. Intenzita vln ubývá s kvadrátem vzdálenosti od zdroje.

Z hlediska jiné úspěšné teorie 20. století - kvantové teorie pole - je gravitační interakce a tím i gravitační vlna tvořena částicemi, které nazýváme gravitony. Gravitony mají spin roven dvěma a jejich detekce je daleko za hranicemi současných přístrojů. V tomto článku se ale budeme zabývat gravitačními vlnami

v rámci obecné relativity, tj. rozvlněným prostorčasem.

První pokusy o detekci ...

První známé pokusy detekce gravitačních vln pochází od Josepha Webera. O detekci se pokoušel pomocí dvou velkých hliníkových válců. Jeden z válců byl umístěn na Universitě v Marylandu v blízkosti Washingtonu, D.C. a druhý v Argonne National Laboratory v blízkosti Chicaga. Vzdálenost válců byla asi 1 000 km. To proto, aby případná detekce gravitační vlny byla potvrzena z nezávislého místa a nešlo jen o lokální poruchu. Válcové se chovaly jako přirozené oscilátory naladěné na frekvenci 1660 Hz. Byly vyrobeny z hliníku, jejich hmotnost byla 1,4 tuny, průměr měly 66 cm a délku 153 cm. Každý váleček byl zavěšen ve vakuu na kovovém vlákně a mechanicky zcela od-



Russell A. Hulse (*1950)



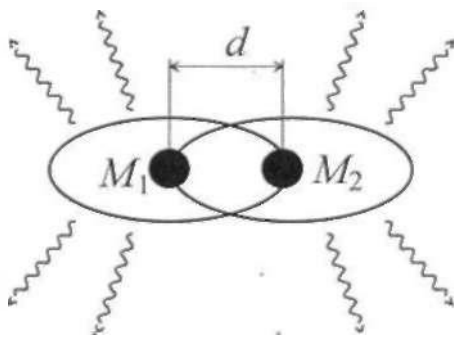
Joseph H. Taylor, Jr. (*1941)

dělen od okolí. Přibližně ve středu byl umístěn piezoelektrický snímač (je patrný na fotografii) propojený s elektronickými obvody citlivými na základní frekvenci oscilací válců.

Válcové byly zprovozněny v roce 1966 a v roce 1972 byla naměřena jediná koincidence, která se již nikdy nezopakovala. Dnes se soudí, že relativní citlivost $h \equiv \Delta L/L \sim 10^{-15}$ tohoto zařízení nebyla dostatečná pro detekci gravitačních vln z běžných zdrojů.

PSR 1913+16

V roce 1974 byl objeven největším radioteleskopem světa v Arecibu podvojný pulsar 1913+16 s periodou pulsací 0,059 s. Rozměry obou složek i celého systému jsou tak malé, že systém je téměř ideální relativistickou laboratoří, kterou



PSR 1913+16

pro nás příroda připravila. Jde o dvě neutronové hvězdy v těsné blízkosti, takže zakřivení prostoru a času, na které složky reagují, je značné. Navíc v prostoru mezi složkami není žádný rozházený materiál, který by komplikoval interpretaci mě-

Parametry pulsaru PSR 1913+16

Hmotnost 1. složky	$M_1 = 1,44 M_S$
Hmotnost 2. složky	$M_2 = 1,39 M_S$
Vzdálenost složek	$d = 700\ 000\text{ km}$
Rotační perioda	$T_r = 0,059\text{ s}$
Orbitální perioda	$T_o = 7\text{ h } 45\text{ min}$

řených veličin. Snadno si můžeme udělat představu o unikátnosti soustavy. Hmotnosti složek jsou o něco vyšší než je hmotnost našeho Slunce ($1,44 M_S$ a $1,39 M_S$). Vzdálenost obou hvězd je ale pouhých 700 000 km, tj. stejná jako poloměr našeho Slunce!

V roce 1993 obdrželi za výzkum tohoto unikátního systému Nobelovu cenu za fyziku Russel A. Hulse a Joseph H. Tay-

lor. Systém vykazoval celou řadu jevů předpovídaných obecnou relativitou. Například stáčení periastra soustavy činí 4° za rok (připomeňme, že stejný jev způsobuje stáčení dráhy Merkuru o pouhých $43''$ za století). Z dalších naměřených jevů upozorníme alespoň na relativistický Dopplerův jev, červený gravitační posuv, dilataci času způsobenou vzájemným oběhem a stáčení světelných paprsků.

Nejnámějším se ale stal objev zkrácování periody odpovídající vyzařování gravitačních vln. Oběžná perioda podvojného pulsaru činí 7 h 45 min a zkracuje se o 76×10^{-6} s/rok díky vyzařování gravitačních vln. R. A. Hulse a J. H. Taylor tak poprvé v historii nepřímo detekovali gravitační vlny. Šlo jen o měření důsledku vyzařování gravitačních vln, nikoli o jejich přímou detekci a tak nelze zatím hovořit o objevu gravitačních vln. Optimisté však doufají, že přímá detekce gravitačních vln na sebe nenechá příliš dlouho čekat.

Dnes je známo přes 1000 pulsarů, z toho více jak 40 podvojných. Například pulsar PSR 1534+12, objevený v roce 1991, má ještě lepší parametry pro testování obecné teorie relativity.

LIGO

Většina dnešních systémů pro přímou detekci gravitačních vln je postavena na laserové interferometrii. Laserový svazek je polopropustným zrcadlem rozdělen do

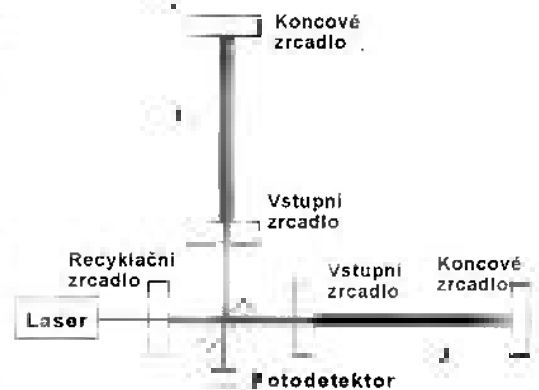


Schéma soustavy LIGO

dvou kolmých ramen, na jejichž koncích jsou dokonale vybroušená odrazná zrcadka na zavěšených testovacích tělesec. Právě pohyb těchto tělísek se sleduje. Odražené paprsky se rameny vrací přes rezonanční dutinu zpět, interferují a elektronicky jsou zaznamenávány změny interferenčních proužků. Citlivost těchto zařízení závisí na velikosti ramen a může dosáhnout velmi vysokých hodnot.

Parametry aparatury LIGO

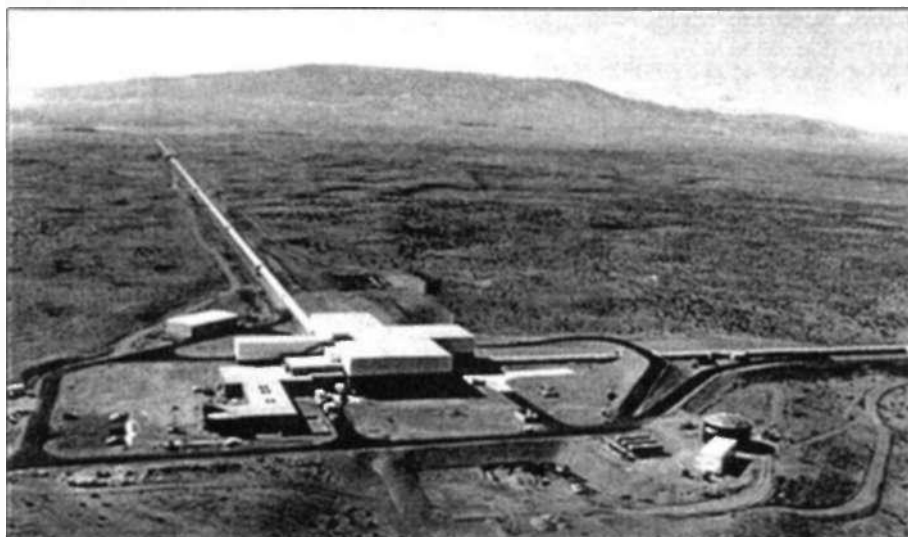
Délka ramene	4 km
Průměr ramene	60 cm
Relativní přesnost	10^{-21}
Laser	Nd:YAG, $1,06 \times 10^{-6}\text{ m}$
Frekvence	10 Hz - 10 kHz
Pracovní tlak	10^{-9} Torr

Největším systémem tohoto druhu na světě je právě dostavovaný ambiciózní projekt LIGO (Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory). Projekt vznikl ve spolupráci universit Caltech (California Institute of Technology) a MIT (Massachusetts Institute of Technology). Staví se dvojice zařízení vzdálená 3200 km. První z nich se nachází v Hanfordu ve státě Washington a za jeho stavbu je zodpovědná universita Caltech. Druhá stavba se dokončuje v Livingstonu ve státě Luisiana a stavba proběhla pod patronátem MIT. Dva interferometry se staví proto, aby mohla být detekce gravitačních vln potvrzena koincidencí ze dvou nezávislých zdrojů.

Parametry ramen interferometrů jsou úctyhodné: délka každého ramene je 4 km, průměr 60 cm a pracovní tlak bude 10^{-9} torrů. Zdrojem paprsku o vlnové délce $1,06 \times 10^{-6}\text{ m}$ je desetiwattový



LIGO - Livingston



LIGO - Hanford

Nd:YAG laser. Očekávaná přesnost měření polohy koncových testovacích tělísek je 10^{-16} cm, relativní přesnost $h \sim 10^{-21}$. To je o šest řádů vyšší přesnost než u válců Josepha Webera. Frekvenční rozsah, ve kterém je zařízení citlivé, činí 10 Hz - 10 kHz a odpovídá většině očekávaných zdrojů gravitačních vln.

Jde o první zařízení, které dosáhne relativní přesnosti 10^{-21} při měření délky ramen ($h = \Delta L_1 - \Delta L_2 / L$). Tato citlivost by měla být dostatečná na zjištění gravitačních vln od standardních zdrojů (rotující neutronové hvězdy, supernovy, binární systémy). Očekávaná frekvence detekovaných vln je menší jak 10 kHz. V současné době se zařízení vakuuje, na začátku roku 2000 budou provedeny první

testy. Úplný provoz začne v roce 2002. Po následné přestavbě a výměně laseru by mělo zařízení dosáhnout do deseti let relativní citlivosti 10^{-22} a mělo by se pokusit hledat gravitační vlny z období prvopočátku našeho Vesmíru (gravitační reliktní záření pozadí). V zařízení je částečně odstíněn tepelný šum a seismický hluk.

Zařízení by mělo být schopné detekovat tyto signály:

1. rotující binární systémy (narůstání frekvence a amplitudy vln v důsledku jejich vyzářování);
2. záblesky (supernovy, kolaps na černou díru);
3. periodické signály (rotace neosově symetrických neutronových hvězd $f = 2 \times f_{rot}$);
4. stochastické signály (gravitační vlny emitované v Planckově čase, v inflační fázi a při vzniku topologických defektů při narušení symetrii).

Další detektory současnosti a budoucnosti

Na světě existují a staví se i další interferometrické detektory s nižší citlivostí (MARK, TAMA, GEO, VIRGO) a připravuje se grandiózní projekt

LISA (Laser Interferometry Satellite Antenna) umístěný ve Vesmíru. Půjde o tři sondy tvořící interferometrický systém se vzdáleností ramen 5 000 000 km a relativní citlivostí h až 10^{-24} , který bude pracovat s frekvencemi od 10^{-4} Hz do 1 Hz a umožní tak i sledování supermasivních černých děr s pomalými frekvencemi gravitačních vln. Soustava těchto tří sond bude obíhat kolem Slunce ve vzdálenosti 1 AU. Zahájení projektu se očekává v roce 2005 a realizace je pravděpodobná po roce 2008. U zařízení LISA je skutečná naděje pozorovat reliktní gravitační záření z prvopočátků Vesmíru a přímo z pozorování zjistit, jak Vesmír vypadal v raných vývojových fázích.

Na schematickém diagramu je logaritmus relativní intenzity různých teoreticky předpokládaných exotických zdrojů gravitačních vln v závislosti na logaritmu frekvence. Zařízení LIGO je schopné detekce relativní intenzity až 10^{-5} , zatímco připravovaný projekt LISA by mohl jít až na hodnotu 10^{-11} . Je zřejmé, že interferometry LIGO budou schopné detekovat

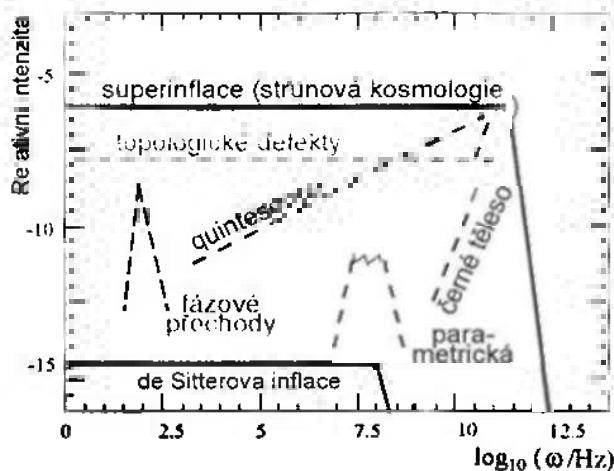
Detektor	Umístění	Velikost	Provoz
MARK 2	USA (Pasadena)	40 m	1991
TAMA 300	Japonsko (Tokyo)	300 m	1999
GEO 600	Německo (Hannover)	600 m	2000
LIGO	USA (Hanford, Livigstone)	4 km	2002
VIRGO	Itálie (Pisa)	3 km	2002
LISA	oběžná dráha kolem Slunce	5 000 000 km	2010

jen klasické zdroje gravitačních vln, zatímco projekt LISA má velkou naději objevit i exotické zdroje z prvopočátků Vesmíru.

Podrobnější informace

B. C. Barish: *The Detection of Gravitational Waves with LIGO*; California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, preprint gr-qc/9905026

Domovská stránka projektu LIGO:
<http://www.ligo.caltech.edu>,
 Aldebaran:
<http://aldebaran.feld.cvut.cz>



Exotické zdroje gravitačních vln