

Pozorování gravitačních vln ze srážky černých děr

Tomáš Ledvinka, Jiří Bičák

Ústav teoretické fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

Ve čtvrtek 11. února 2016 na tiskové konferenci ve Washingtonu oznámili vědci z Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) [1], že na dvou detektorech nacházejících se na opačných koncích

Spojených států se 14. září 2015 podařilo zaznamenat příchod gravitačních vln. Kromě důležitých astronomických dat toto pozorování představuje přímé potvrzení jedné z klíčových předpovědí Einsteinovy obecné teorie relativity (OTR) a přináší informace o událostech odehrávajících se za extrémních podmínek velmi silné gravitace, kdy se naplno projevuje nelinearity jako zásadní vlastnost této teorie.

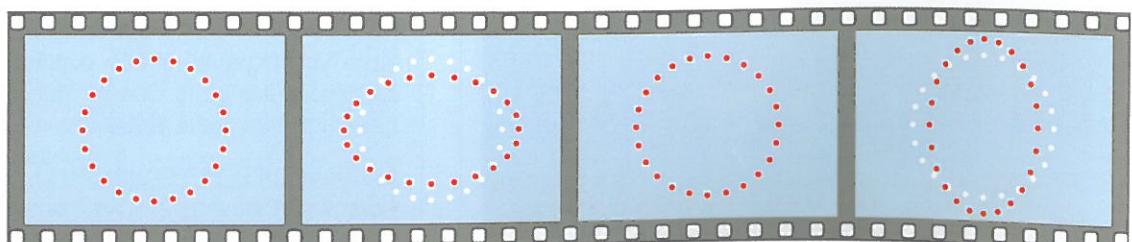
Gravitace jako nejslabší interakce nikdy nepřála snadnému experimentálnímu zkoumání. První měření přitažlivé sily předpovězené Newtonovou teorií gravitace (~1686) – pozorování gravitačního ovlivnění směru vertikální hmotou sopky Chimborazo – bylo publikováno až roku 1749 a teprve v roce 1797 Henry Cavendish realizoval pokus navržený Johnem Michelllem a založený na měření gravitační sily torzními vahami. I když v dnešním pojetí šlo o stanovení hodnoty gravitační konstanty, tento pokus představoval také první laboratorní ověření Newtonovy teorie všeobecné gravitace. Naproti tomu od Maxwellovy předpovědi elektromagnetických vln (~1864) k jejich experimentálnímu potvrzení Heinrichem Hertzem uplynulo jen 23 let.

Zatímco v Cavendishově experimentu se gravitační působení mezi dvěma páry olověných koulí projevilo jejich pohybem o celé 4 mm, pro úspěšnou detekci gravitačních vln bylo potřeba zaznamenat změnu vzdálenosti o amplitudě asi 10^{-16} cm u dvojice zrcadel interferometru vzdálených 4 km. Podle Einsteinovy obecné teorie relativity byla příčinou změny pozorované vzdálenosti zrcadel deformace prostoročasu vyjádřena bezrozměrnou amplitudou gravitačních vln o velikosti 10^{-21} . Analýza ukazuje, že vlny přišly ze vzdálenosti přesahující miliardu světelných let a byly vyvolány spirálovitým přibližováním a následným splynutím dvou

černých děr. Jde tak nejen o objev gravitačních vln, ale také o nejpřímější důkaz existence černých děr pozorováním. Ačkoli o existenci temných hvězd, z nichž nedokáže vlivem gravitace uniknout ani světlo, spekuloval již zmíněný John Michell, existence zhrouceného prostoročasu v podobě černých děr je klíčovou předpověďí OTR a ohlášené pozorování gravitačních vln pocházejících od jejich srážky je připomenutím, že na tváři této teorie nelze ani ve sto letech spatřit jedinou vrásku.

Existenci gravitačních vln šířících se rychlosťí světla ovšem zmiňuje již v roce 1905 Henri Poincaré, který ještě před Einsteinovou základní prací o speciální relativitě odvodil obecný tvar Lorentzovy transformace, ukázal, že tvoří grupu, a předpověděl, že všechny sily v přírodě se mohou šířit nanejvýš světelnou rychlosťí. Skutečný popis gravitačních vln v limitě slabého pole se poprvé objevuje v roce 1913 v ještě nedefinitivní verzi Einsteinovy obecné teorie relativity – v tzv. „Entwurf teorii“¹. Je pozoruhodné, že zářijové pozorování

1 O „Entwurf teorii“, o Einsteinově cestě k finální podobě teorie gravitace i o jeho pracích týkajících se gravitačních vln vyšel ke 100. výročí OTR zajímavý článek [2]. Dílu A. Einsteina, zvláště obecné teorie relativity a kosmologii, bylo věnováno speciální číslo Čs. čas. fyz. připravené ke 100. výročí Einsteinova narození [3]. Zajímavé informace o gravitačním záření jsou obsaženy v rozhovoru s prof. Trautmanem.

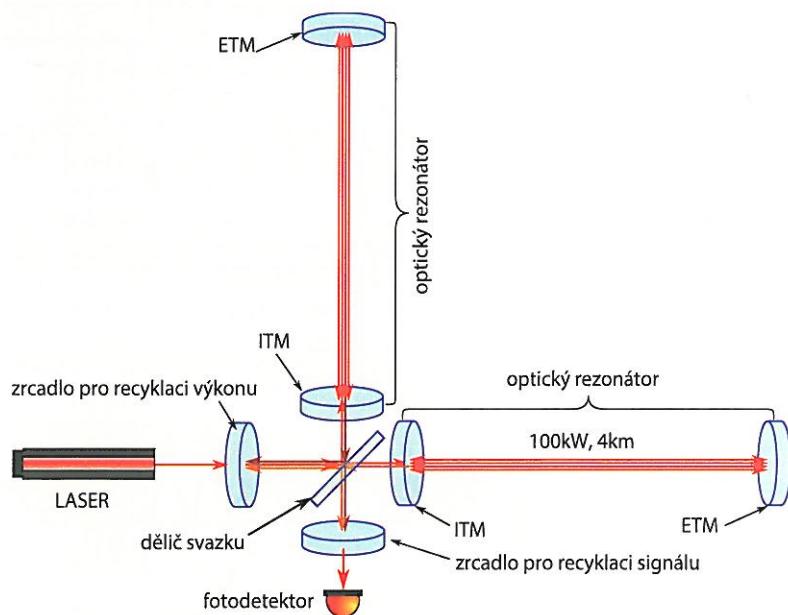


Obr. 1 Účinek gravitační vlny harmonického průběhu dopadající kolmo na rovinu, v níž se nachází kroužek částic volně se vznášejících v prostoru. Změny metriky lze znázornit deformací kroužku do podoby elipsy, tu protažené vodorovně, tu svisle. Druhá polarizace gravitační vlny má osy elipsy pootočené o 45 stupňů. Podrobnosti lze nalézt v [4].

gravitačních vln jen o dva měsíce předcházelo stejmu výročí přednášky před Pruskou akademii věd (25. 11. 1915), v níž Einstein představil *finální podobu své nové teorie gravitace*. Tato teorie, jež ztotožňuje gravitaci s geometrií prostoročasu, ve kterém se pohybujeme, a hmotě dává moc tuto geometrii zakřivit, se za sto let dočkala potvrzení velké řady svých důsledků. Nejprve šlo o vysvětlení stáčení perihelia Merkuru a předpověď ohybu světla v gravitačním poli Slunce. Posléze se potvrdila pozorováním na kosmologických škálách, ve sluneční soustavě, u pulsarů, u Země i v laboratoři. Předpověděla také existenci černých dér – objektů, v nichž hmota zkola bovala natolik, že vznikly oblasti, ze kterých není možné komunikovat směrem ven. Jakkoli jde o extrémní objekty, vysvětlení mnoha pozorovaných bouřlivých procesů ve vesmíru předpokládá, že černé díry obíhají jako souputníci hvězd nebo sídlí v centrech galaxií, včetně Galaxie naší s intenzivně zkoumanou černou dírou o hmotnosti zhruba 4,3 milionu hmotností Slunce.

Mezi předpověďmi OTR jsou i gravitační vlny. V rámci definitivní verze OTR Einstein již v roce 1916 zjistil, že malé poruchy gravitačního pole vyjádřené jako odchylka od Minkowského plochého prostoročasu speciální teorie relativity se řídí nehomogenní vlnovou rovnici, na jejíž pravé straně stojí hmota a její pohyb. Tak tomu ovšem je, předpokládá-li se slabé gravitační pole a složité nelineární rovnice OTR se uvažují pouze v linearizované approximaci. Když se Einstein mnohem později snažil nalézt ve spolupráci s Nathanielm Rosenem řešení neapproximovaných rovnic, která by představovala gravitační vlny, například „klasickou“ rovinnou vlnu, narazil na potíže s formováním singularit, které vedly k jeho nedůvěře v existenci gravitačních vln. V roce 1936 v dopise Maxu Bornovi píše, že „*dospěl k výsledku, že gravitační vlny neexistují, ačkoliv byly považovány za jisté v první approximaci, že nelineární rovnice pole nám mohou říci více, nebo nás spíše omezují více, než jsme si dosud myslí*“. A expresivně dodává, „*jen kdyby nebylo tak zatraceně obtížné najít rigorózní řešení*“. Nakonec Einstein s Rosenem přesné řešení našli ve tvaru válcových vln, ale skepse v souvislosti s existencí gravitačních vln přetrvala až do 60. let minulého století. Jmenovitě vyvstaly pochybnosti o tom, zda gravitační vlny jsou vyzařovány pouze gravitačně interagujícími objekty (například dvojhvězdou). Výmluvným dokladem je závěr slavné monografie Leopolda Infelda (přímého dlouholetého Einsteinova spolupracovníka) a jeho žáka Jeryho Plebańského „*Motion and relativity*“ z roku 1960: „*Einstein často poznamenal, že nemáme uspokojivou klasickou teorii záření... a tato poznámka platí zejména o gravitačním záření.*“ V letech 1960–1970 došlo k velkému pokroku v chápání matematické i fyzikální struktury OTR, jak v rámci přesné teorie, tak v rozšíření spolehlivějších approximačních metod, zvláště pak těch aspektů, které se týkají gravitačního záření a černých dér.

Zároveň v roce 1960 Joseph Weber v Marylandu začal konstruovat první detektory gravitačních vln založené na jednoduchém principu „kvadrupolového oscilátoru“ – dvou stejných hmot propojených pružinou. V poli gravitačních vln vznikne mezi částicemi relativní zrychlení. V laboratoři je tento model realizován jako válec, který kmitá s frekvencí svého nejnižšího kvadrupolového režimu. Kmity jsou registrovány



Obr. 2 Velmi zjednodušené schéma detektoru Advanced LIGO. Základem úspěchu je vylepšení základního principu Michelsonova interferometru o optický rezonátor tvořený sofistikovaně zavěšenými zrcadly. Jejich úkolem je ve směru ramene co nejstabilněji vymezovat měřený úsek prostoru; odsud pocházejí názvy: *input test mass (ITM)* a *end test mass (ETM)*. To spolu s délkou ramene 4 km a uloženým optickým výkonem 100 kW umožnilo dosáhnout potřebné citlivosti přístroje. Tzv. recyklace signálu (poslední zrcadlo před detektorem) se nepodílí na zvýšení uloženého výkonu, ale umožňuje ladit frekvenční závislost citlivosti detektoru.

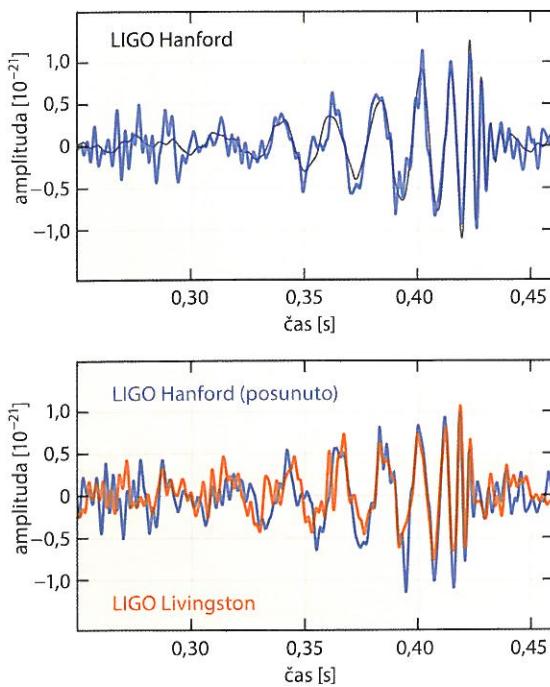
piezoelektrickým snímačem. Ač Weberem označená detekce v roce 1969 se ukázala neopodstatněnou, jeho průkopnická práce měla na rozvoj detektorů gravitačních vln velký vliv.

Gravitační vlny vznikají nerovnoměrným pohybem zdrojů a odnášejí část jejich energie. Důsledkem Einsteinovy teorie vycházející z ekvivalence gravitačních a setrvačních hmotností objektů je, že pro izolované systémy, jako jsou dvojhvězdy, jsou zdrojem vln až časově závislé kvadrupolové (nikoliv dipolové) momenty hmoty. To spolu s malou hodnotou gravitační konstanty určuje, že gravitační vyzařování je obvykle velmi malé.²

Důležitou výjimkou se ukázal v roce 1974 objevený pulsar PSR 1913+16, u kterého se zjistilo, že náleží do velmi těsného binárního systému tvořeného dvojicí neutronových hvězd obíhajících po značně výstředných drahách okolo společného těžiště zhruba každých osm hodin rychlostí až 450 km/s. Protože pulsary představují velmi dokonalé hodiny, bylo možné měřením nepravidelností přicházejícího signálu pulsaru prokázat mnohé efekty předpovězené OTR. Nobelovu cenu za „*objev, který otevřel nové možnosti studia gravitace*“ ovšem Hulse a Taylor obdrželi v roce 1993 také díky tomu, že z jejich pozorování přesvědčivě plyne, že se každý rok doba oběhu zkrátí o 80 mikrosekund

2 V české literatuře je teorie gravitačního záření podrobně rozebrána ve skriptech [4] a například v přehledu [5] (jsou zde zmíněny i příspěvky relativistické skupiny na MFF UK), v [4] jsou rovněž popisovány detektory Weberova typu i detektory interferometrické. Na populární úrovni jsou vlastnosti gravitačních vln pěkně popsány v českých překladech knih [6] a [7]. Nové přehledy o zdrojích a detektorech gravitačních vln lze nalézt v přednáškách B. Schutze, G. Heinzela a K. Danzmannova ve sborníku [8]. Videozáznam z jejich přednášek i z přednášky G. Gonzalesové (mluvčí LIGO) jsou dostupné na webu konference [9].

„Průchod gravitační vlny vyplýne z analýzy řídicích signálů usměrňujících pohyb zrcadel.“



Obr. 3 Nahoře: Průběh signálu zaznamenaného detektorem v Hanfordu. Tenkou čarou je zakreslen i teoretický průběh odpovídající srážce černých dér s parametry nejlépe odpovídajícími pozorovanému signálu. Dole: Signál srážky černých dér jasně vystupuje ze šumu shodně na obou detektorech. Po posunutí v čase o 7 ms je vidět přesvědčivá shoda obou průběhů.
Převzato z [1].

v důsledku vyzařování gravitačních vln. Jejich existence tak byla poprvé, byť ne jejich přímým měřením, potvrzena [10]. Když totiž tyto vlny dorazí k Zemi, mají bezrozměrnou amplitudu 10^{-26} a pro pozemská pozorování velmi nevhodnou frekvenci.

Odhady amplitudy gravitačních vln přicházejících od různých astrofyzikálních zdrojů a jejich četnosti řadí mezi nejpravděpodobnější detekovatelné gravitační vlny přicházející od orbitujících a splývajících černých dér nebo neutronových hvězd, dále vlny vyvolané asymetrií pulsarů a rotujících neutronových hvězd a konečně vlny vznikající při dostatečně nesymetrických výbušných supernov. Kromě signálů od jednotlivých událostí bude snad některou z příštích generací detektorů gravitačních vln možné změřit i stochastické pozadí vzniklé slitím nerozlišených signálů od mnoha slabších událostí a zcela mimořádnou informaci by mohly přinést reliktní gravitační vlny vzniklé při velkém třesku. (Jejich objev pozorováním polarizace kosmického mikrovlnnného pozadí [11] z března 2014 se bohužel nepotvrdil.)

Klíčovou vlastností, která určuje podobu detektorů, je tvar deformace prostoročasu, kterou vlny přinášejí (obr. 1). Současné interferometrické detektory gravitačních vln využívají toho, že tyto charakteristické poruchy geometrie prostoru vyvolané gravitačními vlnami se projeví jako drobné rozladění Michelsonova interferometru (obr. 2). Jde o důsledek změny doby, kterou potřebuje světlo na cestu deformovaným prostoročasem, ale pro dostatečně nízké frekvence vln si lze i představit, že „záhadná síla“ hýbe zrcadly rezonátoru. Ačkoli zrcadla u gravitačních detektorů jsou sofistikovaně zavřena, není to proto, aby snad něco nebránilo v jejich pohybu v poli gravitační vlny – ta nevyvolává žádny relativní pohyb zrcadla vůči jeho bezprostřednímu

okolí. Účelem oné bezprecedentní preciznosti zavření klíčových optických prvků v detektorech Advanced LIGO a Virgo je jednak mechanická izolace od seismického šumu v oblasti citlivosti přístroje a také samotný princip činnosti přístroje. Aktivním ovlivňováním polohy zrcadel je totiž interferometr neustále udržován ve vyladěném stavu. O průchodu gravitační vlny se pak experimentátoři dozvijí analýzou řídicích signálů usměrňujících pohyb zrcadel – „z ničeho nic“ je pro udržení nastavení interferometrů potřeba zrcadly pohnout současně na obou gravitačních observatořích vzdálených 3 000 km.

Je zajímavé, na jaká omezení narážejí dosažitelné hodnoty citlivosti detektorů gravitačních vln. Pro vyšší frekvence gravitačních vln přináší informaci o rozladění interferometru menší počet fotonů. Informace o posunutí zrcadel je tak průměrem z menšího soubořu a přirozeně je zatížena větší chybou (tzv. výstřelový šum, *shot noise*). Citlivost interferometru na nižších frekvencích, kdy se prodlužuje efektivní doba měření posunutí zrcadla, omezují fluktuace vychýlení volně zavřených zrcadel způsobené tlakem záření v podobě hybností fluktuujícího počtu fotonů přicházejících z děliče svazků. Klíčovými parametry ve vztazích určujících citlivost detektoru jsou hmotnost zrcadel a optický výkon rezonující mezi zrcadly. Na nižších frekvencích je však omezujícím faktorem také šum přicházející ze zavření zrcadel. Pásma nejvyšší citlivosti interferometru bylo v rozsahu frekvencí 50–1 000 Hz a jeho rozšiřování spolu s trojnásobným zvýšením citlivosti je předmětem právě probíhajícího vylepšování obou detektorů. Snadno lze mít pochyby, zda přístroj opravdu dokáže měřit posunutí zrcadla o velikosti tisíciny rozměru protonu. Součástí přístroje je tedy i kalibrační zařízení, které tlakem laserového paprsku s modulovaným výkonem přímo „rozhoupatá“ zrcadla přesně známou silou.

Pozorované gravitační vlny (obr. 3) mají podobu oscilací se zvyšující se frekvencí a mírně rostoucí amplitudou, která po dosažení maxima exponenciálně odesní. Přesně takový signál se očekává v situaci, kdy se k sobě po spirálovité dráze stále rychleji přibližují dvě černé díry, které se nakonec spojí a ustálí do jedné větší rotující černé díry. Jak to lze ze signálu vyčíst? Pro opravdu velké vzájemné vzdálenosti je i pohyb dvojice černých dér popsán obvyklými Keplerovými zákony a z pozorování periody oběhu určené dvojnásobkem periody gravitačních vln nelze přímo určit další parametry systému. Pokud však jsou černé díry vzájemně blízko, systém významně ztrácí energii právě v podobě gravitačních vln. Z jejich pozorování lze vyčíst nejen periodu oběhu, ale i rychlosť její změny, které umožňují přímo určit jistou kombinaci hmotností obou složek, přibližně odpovídající jejich geometrickému průměru. Přidáme-li změřenou amplitudu gravitačních vln, pak lze určit i vzdálenost, v níž se systém od nás nachází. Další průběh pozorované gravitační vlny stále více závisí i na ostatních parametrech systému. Jejich konkrétní hodnotu lze pak určit mírou souladu s šablonou (*template*) signálu určenou řešením Einsteinových rovnic za použití složitých metod tzv. *postnewtonovské approximace* a náročných postupů „numerické relativity“ v situaci popisující poslední oběhy a splynutí černých dér s určenými hodnotami hmotností, dráhových parametrů a spinů obou černých dér. Samozřejmě, čím lepší odstup signálu

od šumu, tím přesněji lze vybrat konkrétní šablonu a tak určit hledané parametry.

Nejpravděpodobnějším zdrojem pozorovaných gravitačních vln bylo několik posledních oběhů dvojice černých dér o hmotnostech 36 a 29 hmotností Slunce. Vlastní rotace (spin) černých dér nebyla natolik výrazná, aby se podstatně projevila na pozorovaném tvaru vln. Po jejich splynutí po nich zůstala jediná černá díra o hmotnosti 62 hmotností Slunce a relativní velikosti spinu 0,67. Odstup signálu od šumu umožnil určit uvedené hodnoty s přesností 10–15 %. Událost se odehrála ve vzdálenosti 230 až 570 Mpc, tedy v oblasti vesmíru zahrnující miliony galaxií. Aby bylo možno detektovat gravitační vlny přicházející z takové vzdálenosti, byly potřeba vlny o celkové energii odpovídající asi třem hmotnostem Slunce. Zejména hodnota hmotností černých dér je do jisté míry překvapením, podobně masivní černé díry v binárních systémech ještě nebyly zaznamenány.

Významný signál byl pozorován na obou interferometrech v časovém odstupu 7 ms. Ačkoli amplituda signálu na každém z detektorů zřetelně přesahuje úroveň šumu, je to právě koincidence mezi signály, která vylučuje, že by šlo o náhodné poruchy. Podstatnou částí publikovaného objevu je proto podrobná statistická analýza míry koincidence. Trikem spočívajícím v různém časovém posunutí dat jednoho z detektorů si autoři vytvořili data k podrobné analýze pravděpodobnosti různě velkých korelací signálů a odhadli pravděpodobnost náhodného výskytu dat podobajících se pozorovanému signálu na 1/203 000 let. Protože v místech detektorů se zaznamenávají mj. i hodnoty elektromagnetického rušení či radiace, autoři vylučují, že by koincidence byla způsobena negravitačním signálem šířícím se zhruba rychlosť světla, jako jsou např. elektromagnetická pole blesků nebo spršky kosmického záření.

12. ledna skončila první etapa pozorování přístrojů Advanced LIGO. Podle plánu měla začít 18. září 2015, ale první událost, jak již víme, byla pozorována o čtyři dny dříve. Všechna data ještě nebyla publikována, a tak se můžeme těšit, že ještě něco zaznamenali. Během probíhající odstávky se bude pracovat na několikanásob-

ném zvýšení citlivosti přístroje, mj. tím, že se uložený optický výkon zvětší postupně až osmkrát. Navíc by se brzy po opětovném spuštění měl připojit i evropský detektor Advanced Virgo u Pisy. Přidáním třetího detektoru úměrně jeho citlivosti poklesne možnost falešné koincidence a zpřesní se určení směru příchodu vlny. Naděje, že dosažená citlivost umožní zaznamenávat přes desítku událostí ročně, se snad naplní a nový obor – gravitačně vlnová astronomie – začne přinášet nové informace a snad i nečekané objevy.

Teoretický výzkum gravitačních vln relativistickou skupinou na Ústavu teoretické fyziky MFF UK je podporován v rámci Centra Alberta Einsteina pro gravitaci a astrofyziku grantovou agenturou GAČR, projekt č. 14-37086G.

Literatura

- [1] B. P. Abbott a kol.: „Observation of gravitational waves from a binary black hole merger“, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [2] O. Semerák: „Albert Einstein a století obecné relativity“, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **60**, 215 (2015)
- [3] *K stému výročí narození Alberta Einsteina*. J. Bičák (red.), Čs. čas. fyz. A **29**(3), 209–320 (1979).
- [4] J. Bičák, V. N. Rudenko: *Teorie relativity a gravitační vlny*. Skripta MFF UK, Praha 1986
- [5] J. Podolský: „Teorie gravitačního záření“, Čs. čas. fyz. **55**, 86 (2005).
- [6] K. S. Thorne: *Černé díry a zborcený čas*. Mladá fronta, Praha 1994.
- [7] P. G. Ferreira: *Nádherná teorie: Sto let obecné teorie relativity*. Vyšehrad, Praha 2015.
- [8] J. Bičák, T. Ledvinka (eds.): *General Relativity, Cosmology and Astrophysics – Perspectives 100 years after Einstein's stay in Prague*. Springer, NY 2014.
- [9] *Relativity and Gravitation – 100 Years after Einstein in Prague*. Videozáznamy plenárních přednášek jsou dostupné z WWW: <http://ae100prg.mff.cuni.cz/abstracts>.
- [10] J. Bičák: „Binární pulzary a základní fyzika“, Čs. čas. fyz. **43**, 224 (1993).
- [11] T. Ledvinka: „Byly pozorovány inflační gravitační vlny?“, Čs. čas. fyz. **60**, 158 (2014).

» Odstup signálu od šumu umožnil určit uvedené hodnoty s přesnosti 10–15 %. «



Obr. 4 Letecký snímek detektoru LIGO v Hanfordu na severozápadě USA. Druhý podobný detektor je na jihu USA ve vzdálosti 3 000 km. Foto: Caltech/MIT/LIGO Lab