

První přímá detekce gravitačních vln

sto let po jejich předpovědi Albertem Einsteinem

Jiří Podolský

Čtvrtek 14. září 2015 se do dějin fyziky a astronomie bezpochyby zapíše jako přelomový den, kdy byly poprvé v historii přímo detekovány gravitační vlny. Dva nesmírně citlivé interferometry observatoří Advanced LIGO ve Spojených státech (viz obr. 1) zachytily signál GW150914. Byl dokonce tak jasný a zřetelný, že mohl být zcela hodnověrně interpretován jako následek srážky a splynutí dvojice velmi hmotných černých děr, jež se odehrála před více než miliardou let hluboko v kosmickém prostoru. Po mnoha desetiletích nezměrného úsilí tak astronomie konečně vstoupila do zcela nové éry přímé detekce dynamických gravitačních polí vzdálených astrofyzikálních objektů, jako jsou černé díry, neutronové hvězdy či supernovy, a časem možná i samotného velkého třesku. Kdoví, jaké nečekané objevy nás díky tomu teď čekají.

Co jsou gravitační vlny a jak vznikají

Existenci gravitačních vln předpověděl přesně před 100 lety Albert Einstein ve svém příspěvku [1] z 22. června 1916 jako další pozoruhodný důsledek obecné relativity, dynamické teorie gravitačního pole, kterou zformuloval krátce předtím v listopadu roku 1915. V této teorii je gravitace specifickou deformací prostoročasu, jež je způsobena přítomnou hmotou. Pokud se hmota pohybuje zrychleně nesférickým způsobem, *geometrie prostoročasu se rozkmitá* a vesmírem se od zdroje začne *rychlostí světla šířit příčná vlna* křivosti, v jejíž amplitudě, frekvenci a dvou polarizacích zůstává „otřáskavě“ chování zdroje.

Míru deformace prostoru v daném místě vyjadřuje *amplituda gravitační vlny*, označovaná symbolem h . Z teorie plyne, že h se vzdáleností klesá jako $1/r$. I když tedy nějaká kataklyzmatická kosmická událost vyvolá silnou gravitační vlnu, velmi daleko od ní zde na Zemi bude amplituda vlny nepředstavitelně malá, typicky menší než 10^{-21} . Zaznamenat takto nepatrnou relativní změnu vzdáleností pomocí detektoru je opravdový vědecký a technický zázrak. Někteří lidé proto označují nynější úspěch z technologického hlediska za srovnatelný s přistáním lidí na Měsíci.

Existence gravitačních vln *byla již dříve prokázána nepřímým způsobem* pomocí pečlivého sledování *binárních pulsarů*. První takový systém, slavný PSR B1913+16, objevili *Russell Hulse* a *Joseph Taylor* v roce 1974 [2] a vynesl jim Nobelovu cenu za fyziku v roce 1993. Především proto, že dlouhodobým měřením

zjistili, že obě kolem sebe obíhající neutronové hvězdy se pomalu *spirálovitě přibližují* (o 3 mm při každém oběhu trvajícím 8 hodin) a zkracuje se jejich oběžná doba [3]. To je *plně v souladu s obecnou teorií relativity*: hvězdy se pohybují zrychleně, tudíž generují gravitační vlny, které odnášejí vazebnou energii. Shoda mezi teorií a pozorováním PSR B1913+16 je perfektní (v rámci chyb měření 0,2%) a byla potvrzena i sledováním dalších binárních pulsarů, včetně dvojitého pulsaru PSR J0737+3039 objeveného v roce 2003.

Nevyhnutelným osudem každého kompaktního binárního systému neutronových hvězd anebo černých děr je tedy *srážka obou složek a jejich splynutí*. Amplituda i frekvence generovaných gravitačních vln až do okamžiku srážky postupně narůstají a pak signál odezní, protože vzniklý objekt rychle vyzáří své nesy-metrie, viz obr. 2. V odborné anglické terminologii se příslušný profil nazývá „chirp“, česky bychom mu tedy mohli říkat „čirp“. *Gravitační vlna s právě takovým profilem byla nyní poprvé přímo zaznamenána* pomocí interferometrů *Advanced LIGO*.

Interferometrické detektory

O přímou detekci gravitačních vln zde na Zemi usilovali mnozí více než 50 let. Na počátku stálo průkopnické úsilí *Josepha Webera*, který v 60.–70. letech zkonstruoval několik *rezonančních detektorů* (volně zavěšených hliníkových válců obklopených citlivými snímači). Hlavní nevýhodou Weberových detektorů i jejich vylepšených následníků z 80. let bylo naladění

jen na úzkou rezonanční frekvenci, typicky 900 Hz. Proto se v 90. letech přešlo k širokopásmovým laserovým interferometrům se stometrovými délkami ramen: *MARK 2* (Pasadena), *TAMA 300* (Tokyo) a *GEO 600* (Hannover). Po nich pak po roce 2000 přišly obří americké detektory *LIGO* s rameny 4 km (jedna observatoř v Hanfordu, stát Washington, a druhá v Livingstonu, stát Louisiana) a evropské *Virgo* s rameny 3 km (Cascina u italské Pisy). Více informací o těchto interferometrech a o gravitačních vlnách obecně lze najít v autorově předchozím článku v *Astropisu* [4].

Avšak ani tak sofistikovaná zařízení na hranici technologických možností v letech 2002–2010 na zachycení gravitačních vln ještě nestačila. Jejich citlivost bylo nutné zlepšit o další řád až na 10^{-23} . Toho nyní dosáhlo tzv. *Advanced LIGO* dokončené v září roku 2015, viz obr. 3, a to vyváženou souhrou mnoha dílčích vylepšení. Šum na nízkých frekvencích kolem 10 Hz byl potlačen platformou s aktivní seismickou izolací a umístěním hlavních zrcadel na speciální čtyřkyvadlový závěs, na frekvencích kolem 100 Hz užitím těžších křemenných zrcadel (40 kg) zavěšených na křemenných vlák-

Prof. RNDr. Jiří Podolský, CSc., DSc. (*1963) vystudoval MFF UK v Praze, kde nyní působí jako profesor na Ústavu teoretické fyziky a v Centru Alberta Einsteina pro gravitaci a astrofyziku. Zabývá se obecnou relativitou, zejména přesnými řešeními Einsteinových rovnic a teorií gravitačního záření v kosmologii. Dlouhodobě se věnuje také popularizaci svého oboru, včetně překladů knih.

nech (nikoli strunách) a jejich pokrytím dielektrickými vrstvami s velmi malými ztrátami, šum na vyšších frekvencích kolem 1000 Hz byl pak omezen použitím výkonnějšího laseru i dalším snížením tlaku v trubcích na méně než 1 μPa . Technické parametry nového interferometrického detektoru (jehož konstrukce si vyžádala další stamiliony dolarů) jsou opravdu fascinující, jak je vidět ze spektra dosažené citlivosti na obr. 3 nahoře vpravo.

Vlastní objev gravitačních vln

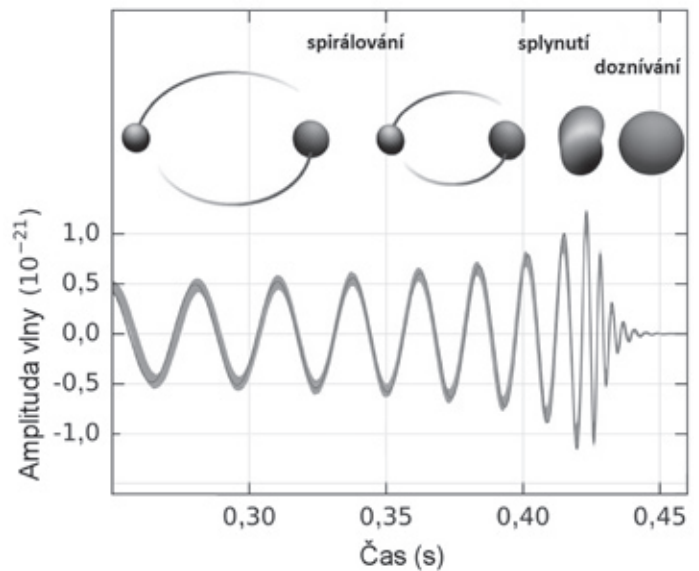
Vynaložené úsilí a prostředky se však vyplatily. Jakmile byly oba nové interferometry *Advanced LIGO* v Hanfordu a Livingstonu uvedeny v září roku 2015 do provozu, ihned učinily objev vsutku historického významu! A to dokonce pár dní před oficiálním zahájením vědeckých měření...

Jak již bylo řečeno, dne 14. září 2015 v 09:50:45 UTC zachytily obě stanice velmi jasný a co do profilu vlny shodný signál, který dostal označení GW150914 (GW je zkratka anglického *gravitational wave*, tedy „gravitační vlna“, následující tři dvojice čísel označují rok, měsíc a den zachycení signálu). Trval pouhých 150 milisekund a jeho charakter byl typický čirp, viz obr. 4. Frekvence gravitační vlny během tohoto časového intervalu vzrostla z 35 Hz na 250 Hz a její maximální amplituda dosáhla hodnoty $h_{\text{max}} = 10^{-21}$. Vlna dorazila nejprve do interferometru v Livingstonu, o 7 milisekund později pak do Hanfordu vzdáleného 3 tisíce kilometrů. Z časového zpoždění bylo možné triangulací vymezit část kružnice na jižní obloze, kde ležel zdroj signálu: zhruba v oblasti kolem Magellanových oblaků. Ve skutečnosti však zdrojem této gravitační vlny byla *srážka velkých černých děr v hlu-*

bokém vesmíru, více než miliardu světelných let od nás, tedy hodně daleko za Magellanovými oblaky.

Jak tohle víme? Z dlouhé a velice pečlivé analýzy signálu GW150914, kterou provedly týmy *LIGO Scientific Collaboration* (LSC) a *Virgo Collaboration*, spolupráce tisícovky lidí z více než stovky institucí doslova po celém světě. Také proto byl objev ohlášen až po 5 měsících na tiskové konferenci ve čtvrtek 11. 2. 2016 ve Washingtonu, D.C. Vědecké a technické podrobnosti byly současně uveřejněny v odborném článku [5] v nejprestižnějším fyzikálním časopise *Physical Review Letters* (má 1010 autorů ze 133 vědeckých institucí).

Především bylo nutné zjistit, zda signál není jenom falešný poplach. Několik nezávislých statistických metod určilo, že takovýto signál by čistě náhodně mohl nastat jen jednou za 200 000 let, což je ekvivalentní statistické významnosti větší než 5σ . Druhým krokem bylo pečlivé porovnání profilu gravitační vlny GW150914 s rozsáhlou databankou 250 000 „čirpových vzorových profilů“. Mohli bychom to přirovnat k identifikaci pachatele metodami „kosmické daktyloskopie“, jen



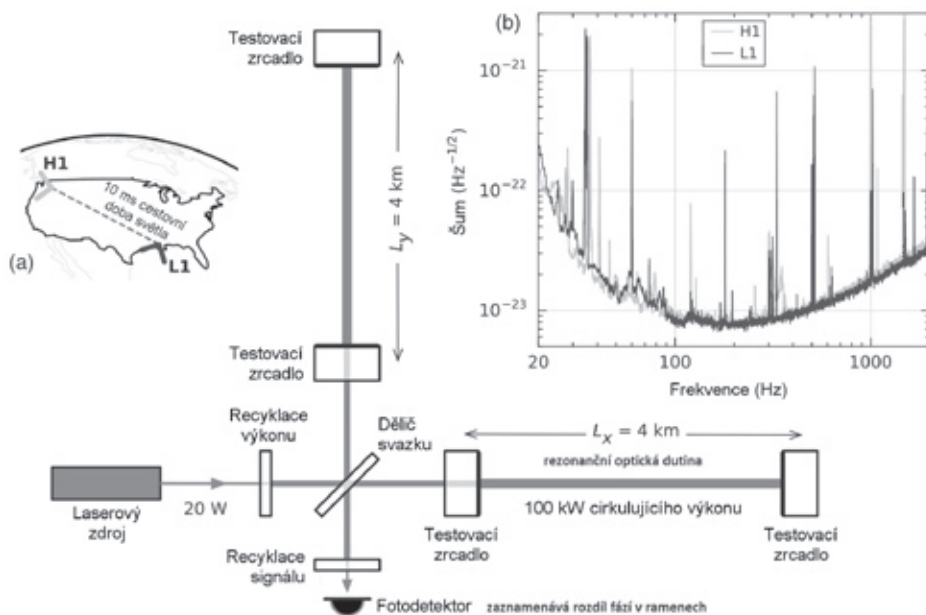
Obr. 2. Zcela typický „otisk prstů“ srážky dvou černých děr má 3 časové fáze: spirálování – splynutí – doznívání. Jak plyne z numerických i analytických simulací rovnic obecné teorie relativity, amplituda příslušných gravitačních vln a jejich frekvence až do okamžiku srážky narůstají (detekujeme „čirp“), po splynutí obou složek v jednu velkou černou díru signál rychle odezní. (Upraveno z [5].)

místo otisků prstů se používají specifické profily gravitačních vln generované binárními systémy černých děr různých hmotností, vzájemných rychlostí a rotací. Tyto profily byly získány přímo z rovnic Einsteinovy teorie gravitace metodami numerické relativity a sofistickovanou analytickou perturbační metodou (tzv. „effective-one-body formalism“ neboli EOB).

Tímto způsobem bylo zjištěno, že *zdrojem zachyceného signálu byla srážka dvou černých děr* o hmotnostech $36 M_{\odot}$ a $29 M_{\odot}$ (s chybou asi $\pm 4 M_{\odot}$). Rychlost jejich srážky činila více než polovinu rychlosti světla. Výsledkem splynutí byla jediná rotující černá díra o hmotnosti $M = 62 M_{\odot}$



Obr. 1. Letecký pohled na čtyřkilometrové americké interferometry *Advanced LIGO* v Hanfordu (vlevo) a v Livingstonu (vpravo). Kvůli eliminaci lokálního šumu jsou od sebe vzdáleny 3000 km a pracují v koincidenčním režimu.



Obr. 3. Zjednodušené schéma dvou čtyřkilometrových interferometrů Advanced LIGO (dole vlevo), umístěných v Hanfordu (H1 – světle šedě) a v Livingstonu (L1 – tmavě šedě), a jejich spektrální citlivost (nahore vpravo) v době objevu gravitačních vln. Klasický Michelsonův interferometr je zde doplněn o rezonanční optické dutiny a sadu pomocných recyklačních zrcadel k vylepšení výkonu a frekvenční odezvy zařízení. V rozsahu 100–400 Hz dosahuje neuvěřitelné citlivosti 10^{-23} . (Převzato z [5] a upraveno.)

popaná Kerrovým řešením Einsteinových rovnic s rotačním parametrem $a = 0,67 M$ (černá díra tedy rotuje, ale nijak extrémně rychle). Rozdíl počáteční a koncové hmoty-energie o velikosti $3 M_{\odot}$ se vyzářil právě ve formě gravitačních vln. Odtud lze stanovit vzdálenost zdroje na $1,2 \pm 0,5$ miliardy světelných let (410 Mpc), ležel tedy již v „kosmologické“ vzdálenosti (rudý posuv $z = 0,1$). Jeho gravitační výkon byl opravdu neuvěřitelný: $200 M_{\odot} \cdot c^2$ za sekundu, tedy desetkrát více než v ten okamžik svítily všechny hvězdy ve všech galaxiích celého vesmíru!

Nikoli konec příběhu, naopak jeho začátek

Nejnovější úspěch fyziky a astronomie v podobě přímé detekce gravitačních vln je bezpochyby významnou vědeckou událostí prvního řádu. Lze očekávat, že bude oceněn Nobelovou cenou, kterou pravděpodobně obdrží zakladatelé projektu LIGO Kip Thorne, Rainer Weiss a Ronald Drever.

Ještě letos se k dvojici amerických detektorů Advanced LIGO připojí evropské Advanced Virgo srovnatelných technických parametrů. Pomocí tří interferometrů rozmístěných po zeměkouli bude možné lokalizovat zdroje gravitačních vln s přesností snad až pár úhlových stupňů,

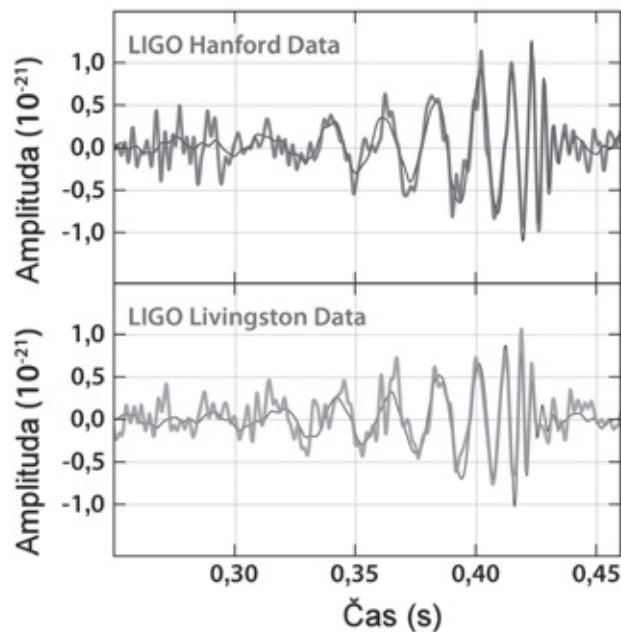
což otevře cestu jejich případné identifikaci observatořemi elektromagnetickými (gamma, RTG, atd.). Za pár let jim pomůže také Advanced LIGO v Indii (schválená týden po oznámení detekce GW150914) a japonský kryogenní detektor KAGRA (již ve výstavbě). V dlouhodobé perspektivě se jistě dočkáme také interferometru LISA v kosmickém prostoru. Čerstvě zrozená astronomie gravitačních vln má tedy před sebou dosti slibnou budoucnost.

Detekce gravitačních vln vzniklých srážkou a splynutím velmi hmotných černých děr v hlubokém kosmu představuje další, principiálně nové a přesvědčivé potvrzení platnosti Einsteinovy obecné relativity v režimu extrémně silných gravitačních polí. Tato teorie před pár měsíci oslavila 100 let své existence a těžko si ke

svým kulatým narozeninám mohla přát lepší dárek. Někdo by si mohl třeba myslět, že Einsteinova teorie gravitace je už „stoletý stařík“. Na rozdíl od hrdiny bestselleru Jonase Jonassona však „nevylezl z okna a nezmizel“. Naopak, je tu stále s námi, v plné síle, ba dokonce vitálnější než kdy dřívě. Namísto „vylezení z okna“ nám všem obecná relativita s pomocí nejnovějších technologií totiž právě otevřela další, úplně nové okno, jímž můžeme začít pozorovat vesmír kolem nás. Těšme se na to, co spatříme!

Literatura

- [1] A. Einstein: Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* **1** (1916) 688–696.
- [2] R. A. Hulse, J. H. Taylor: Discovery of a pulsar in a binary system, *Astrophysical Journal* **195** (1975) L5–L53.
- [3] C. M. Will: The confrontation between general relativity and experiment, *Living Reviews in Relativity* **9** (2006) 3.
- [4] J. Podolský: Gravitační vlny a jejich detektor, *Astropis* (No. Speciál) **17** (2010) 34–37.
- [5] B. P. Abbott et al.: Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, *Physical Review Letters* **116** (2016) 061102, viz též <https://lsc.ligo.org/events/GW150914/>



Obr. 4. První gravitační vlna GW150914 zachycená 14. září 2015 v 09:50:45 UTC observatořemi v Hanfordu (nahore) a Livingstonu (dole). Profil vlny je shodný a evidentně má charakter čirpu, jenž odpovídá srážce dvou velmi hmotných černých děr. Předpovězený profil vlny je vyznačen tmavou čarou. (Upraveno z [5].)