

Jiří Podolský

Detekce gravitačních vln poctěna Nobelovou cenou 2017

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 63 (2018), No. 1, 1–12

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/147203>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2018

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library*
<http://dml.cz>

Detekce gravitačních vln poctěna Nobelovou cenou 2017

Jiří Podolský

Abstrakt. Švédská Královská akademie věd 3. října 2017 ohlásila, že Nobelovu cenu za fyziku v tomto roce získávají Rainer Weiss, Barry Barish a Kip Thorne „za rozhodující příspěvky k detektoru LIGO a pozorování gravitačních vln“. Od února 2016, kdy bylo oznámeno, že interferometry LIGO úspěšně zachytily signál GW150914, to mnozí očekávali. Nebylo pochyb, že první přímé pozorování gravitačních vln je událost prvořadého významu, která si nejvyšší fyzikální poctu zaslouží.

1. První detekce gravitačních vln 100 let po teoretické předpovědi

Vědecké týmy LIGO Scientific Collaboration a Virgo Collaboration dne 14. září 2015 v čase 09:50:45 UTC poprvé v historii zaznamenaly gravitační vlny. Analýza signálu označeného kódem GW150914 odhalila, že zdrojem byla srážka a splynutí dvou velkých černých děr, k níž došlo v dalekém vesmíru před více než miliardou let [2]. Zpráva o této události vyvolala nadšení v odborné komunitě i značný zájem veřejnosti a médií. Záhy jsme o ní podrobně referovali i na stránkách *PMFA* [18].

Všeobecné nadšení pramenilo zejména z toho, že na přímé potvrzení existence gravitačních vln jsme museli čekat celé století. Jak známo, tyto vlny předpověděl v roce 1916 Albert Einstein, a to jako významný důsledek své — tehdy zcela nové — obecné relativity [9], [10]. Einsteinova teorie chápe dynamické gravitační pole jako deformaci prostoročasu. Prostoročas je přítomnou hmotou zakřiven. Může dokonce začít vibrovat, když se hmotný zdroj periodicky hýbe, například když kolem sebe obíhají dvě hvězdy. Prostoročasem se pak začnou šířit vlny křivosti, periodické slapové deformace, jež putují rychlostí světla, mají příčný charakter a dvě polarizace [7], [8], [16].

Gravitační interakce je však nejslabší fyzikální síla ve vesmíru. Účinnost, s jakou jsou příslušné vlny generovány, je velmi malá. Gravitační vlny buzené astrofyzikálními zdroji jsou proto zde na Zemi opravdu slabé, jejich amplituda je typicky řádu $h \sim 10^{-22}$ a méně. Toto bezrozměrné číslo h současně vyjadřuje, jak nepatrnou relativní změnu ΔL detektoru o velikosti L gravitační vlna svým průchodem vyvolá ($h = \Delta L/L$). Není proto divu, že trvalo tolik desetiletí, než se podařilo sestrojít „gravitační přijímač“ natolik citlivý, aby byl schopen tak malé deformace zachytit. Prvními úspěšnými detektory gravitačních vln se staly až vysoce citlivé interferometry LIGO kilometrových rozměrů (obr. 1). Právě za jejich ideu, návrh, stavbu, úspěšné fungování a věrohodnou analýzu jimi pořízených dat byla v roce 2017 udělena Nobelova cena.

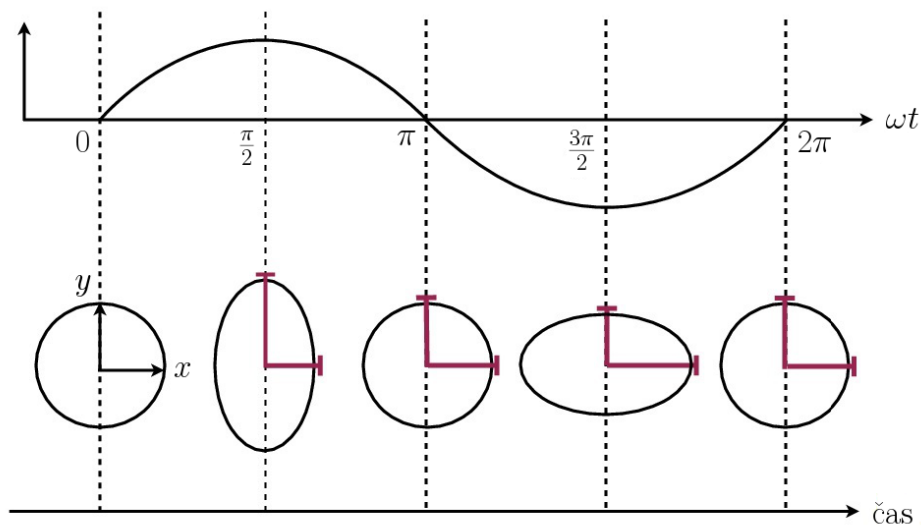
Prof. RNDr. JIŘÍ PODOLSKÝ, CSc., DSc., Ústav teoretické fyziky a Centrum Alberta Einsteina pro gravitaci a astrofyziku, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: podolsky@mbox.troja.mff.cuni.cz



Obr. 1. Čtyřkilometrové americké interferometry LIGO v Hanfordu (nahore) a v Livingstonu (dole). Stanice jsou od sebe vzdáleny 3 000 kilometrů. Zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory

2. Interferometrické detektory gravitačních vln a historie projektu LIGO

Interferometr Michelsonova typu (se dvěma navzájem kolmými rameny) je pro účely detekce gravitačních vln ideální zařízení. Efekt vlny, což je oscilující slapová deformace prostoru, je totiž takový, že v rovině příčné na směr šíření periodicky zkracuje a prodlužuje vzdálenost mezi centrálním zrcadlem (děličem svazku) a plně odrazivým testovacím zrcadlem volně zavěšeným na konci ramene. Současně v protifázi prodlužuje a zkracuje vzdálenosti ve druhém kolmém rameni interferometru (obr. 2 a 3). Výsledkem je periodická změna interferenčního signálu ve výstupním fotodetektoru, která je přímo úměrná amplitudě h gravitační vlny. Navíc se jedná o širokopásmový



Obr. 2. Gravitační vlna v rovině kolmé na směr šíření deformuje prostor takovým způsobem, že periodicky zkracuje a prodlužuje vzdálenosti těles. Délky navzájem kolmých ramen interferometru (vyznačených tučně) se mění tak, že když je jedno rameno nejkratší, druhé je nejdelší, a naopak. Tento kvadrupólový charakter slapových deformací je v obrázku naznačen deformací kružnice do elips. Jedna zobrazená oscilace odpovídá jedné periodě gravitační vlny.

detektor [1], [14], [15], [17], [19], protože na rozdíl od dřívějších rezonančních detektorů Weberova typu dokáže zachytit gravitační vlny v poměrně širokém intervalu frekvencí (na Zemi typicky 1 Hz – 1 kHz). První prototyp interferometrického detektoru gravitačních vln přitom postavil také již v 60. letech Weberův student Robert Forward.

Paralelně se vývojem interferometrických detektorů zabýval Rainer Weiss na MIT. Už v roce 1967 demonstroval zařízení s velmi vysokou citlivostí a v roce 1972 sepsal průkopnickou studii laserového interferometru. Důkladně v ní analyzoval a zhodnotil různé zdroje rušení.¹ Na konci své studie Weiss uvádí, že interferometr by měl mít kilometrové rozměry. Několik let byl Weissův výzkum financován MIT. Aby získal větší zdroje, podal v roce 1974 grantový návrh americké Národní vědecké nadaci NSF. Jeho záměrem bylo zvětšit ramena dosavadního metrového prototypu na 9 metrů.

O několik let později vznikl na Caltechu pod vedením Kipa Thorna jiný prototyp interferometru. Thorne se svou relativistickou skupinou navíc systematicky a důkladně rozvíjel teorii gravitačních vln a studoval chování možných astrofyzikálních zdrojů. Jeho předpovědi očekávaných signálů pak sehrály rozhodující roli v přípravě a konstrukci velkého detektoru LIGO.

Interferometrické detektory gravitačních vln se budovaly i v Evropě. Skupina Heinze Billingha v Ústavu Maxe Plancka pro astrofyziku v Garchingu postavila třímetrový prototyp a pak dokonce třicetimetrové zařízení. Na Universitě Glasgow sestrojil Ro-

¹Mezi ně patří zejména seismický šum, gradienty gravitačního pole, tepelné gradienty ve vakuových komorách, tepelný šum zrcadel a závěsů, změny amplitudy laseru, nestability jeho frekvence, tlakové rázy na zrcadlech a kvantový fotonový šum na výstupní fotodiode.

nald Drever se spolupracovníky desetimetrový interferometr, který navíc pro další zvýšení citlivosti v každém rameni využíval Fabryho–Pérotovy optické rezonanční dutiny. Německá i skotská skupina se rozhodly spolupracovat. Tak vznikl detektor GEO600 s délkou ramen 600 m, jehož stavba začala v roce 1995 poblíž Hannoveru a plánované citlivosti dosáhl v roce 2006. Při jeho konstrukci byla vyvinuta a testována řada pokročilých technologií, které byly použity i v detektorech LIGO.

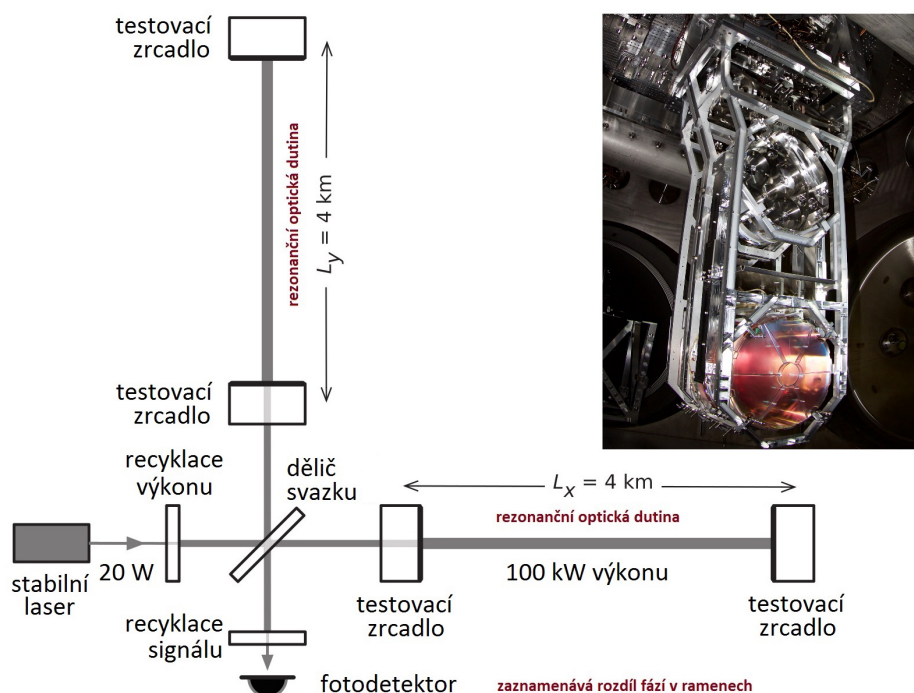
Počátkem 80. let financovala nadace NSF stavbu prototypů na MIT i Caltechu (do této skupiny přešel roku 1979 i Ron Drever) a také Weissovu studii budoucího velkého zařízení. Předložena byla na podzim 1983 a analyzovala vědecké i technické aspekty dvou pětikilometrových interferometrů vzdálených od sebe tisíce kilometrů. Na základě této studie a slibných výsledků amerických i evropských prototypů slíbila NSF projekt podpořit za podmínky, že MIT i Caltech spojí své síly.

Tak se v roce 1984 zrodil společný projekt Weisse, Drevera a Thorna nazvaný LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Jeho centrálou se stal kalifornský Caltech a ředitelem byl o tři roky později jmenován Rochus Vogt. Plánování a vývoj trvaly celá 80. léta. Vlastní konstrukci interferometrů LIGO o délce ramen 4 km pak schválila NSF v roce 1992 s rozpočtem zhruba 300 milionů dolarů. Padlo rozhodnutí, že obě sesterské stanice budou postaveny na „opačných koncích“ USA, konkrétně v Hanfordu (stát Washington) a Livingstonu (stát Louisiana), 3 tisíce kilometrů od sebe, viz obr. 1.

Vedením rozsáhlého projektu byl pověřen Barry Barish, který měl dlouholeté zkušenosti s řízením projektů částicové fyziky. Řízení LIGO se ujal v roce 1994. Stavba stanic probíhala v letech 1994–1998. Interferometry byly instalovány a uváděny do provozu 1999–2002 a vzápětí se rozeběhla první měření. Barish z pozice ředitele LIGO odešel v roce 2005, zůstal však členem mezinárodní kolaborace LSC (LIGO Scientific Collaboration), kterou již v roce 1997 zřídil a jejímž prvním mluvčím se stal Weiss. LSC dnes čítá zhruba tisíc členů ze zhruba stovky institucí po celém světě. Je zodpovědná za organizaci vědeckých výzkumů a za analýzu naměřených dat (zatímco provoz zařízení a jejich další rozvoj je v gesci laboratoří LIGO na Caltechu a MIT).

Barish také prosadil nápad realizovat projekt LIGO ve dvou krocích: nejprve ověřit všechny technologie na „počátečním LIGO“ (Initial LIGO neboli iLIGO, 2002–2010), s určitou nadějí na detekci silnějších vln, a teprve potom ve druhé fázi implementaci vylepšených technologií postavit „pokročilé LIGO“ (Advanced LIGO neboli aLIGO, obr. 3) s citlivostí, která s velkou pravděpodobností umožní detekci astrofyzikálních gravitačních vln. Tak se i stalo: ihned po spuštění aLIGO v září 2015 byla 14. 9. historicky poprvé detekována gravitační vlna, signál GW150914 zmíněný v úvodu.

Koncem 80. let se zrodila také italsko-francouzská spolupráce vedoucí ke stavbě detektoru gravitačních vln Virgo v místě Cascina nedaleko italské Pisy. Technologie Virgo jsou obdobné jako má LIGO, avšak délka jeho ramen činí 3 km. Stavba začala v roce 1996, inaugurován byl 2003 a pokročilá verze interferometru Virgo byla poprvé spuštěna v srpnu 2017. Americké detektory LIGO i evropské Virgo a GEO600 provádějí koordinovaná měření a sdílejí získaná data. Společně se provádí jejich pečlivá analýza i publikování výsledků této unikátní transatlantické vědecké spolupráce.



Obr. 3. Technické parametry pokročilých interferometrů LIGO jsou fantastické. Testovací zrcadla z křemenného skla (průměr 34 cm, hmotnost 40 kg, chyby povrchu $< 0,1 \text{ nm}$) jsou křemennými vlákny zavěšena na platformě s aktivní seismickou izolací. Elektrostatickým systémem s nimi lze manipulovat s přesností 10^{-19} m . Optická soustava Fabryho–Pérotových rezonančních dutin v každém rameni je doplněna o další zrcadla zajišťující recyklaci výkonu z vysoce stabilního laseru i recyklaci signálu. Více technických informací lze najít např. v [1], [2], [14], [15], [17], [18], [19]. Vlevo dole je schéma optického systému, vpravo nahoře snímek hlavního testovacího zrcadla v sofistikovaném závěsu. Zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory

3. Tři laureáti Nobelovy ceny 2017, stovky dalších a Einstein

Z uvedeného nástinu historie interferometrických detektorů gravitačních vln LIGO je dobře patrné, že přínos Weisse, Thorna i Barishe (obr. 4) byl zcela zásadní a tedy že Nobelovu cenu za první přímou detekci gravitačních vln získali plným právem (mimořádně: Weiss získal polovinu finanční částky, Thorne a Barish pak čtvrtinu). Nobelovu cenu však mohl (a měl) získat také Ronald Drever, třetí z trojice vizionářů a „otců zakladatelů“ projektu LIGO. Bohužel, 7. března 2017 zemřel . . .

Je také třeba zdůraznit, že cena do té či oné míry náleží všem členům mezinárodního týmu LIGO a Virgo, tedy více než tisícovce vědců, inženýrů a techniků. A v přeneseném slova smyslu se nositelem Nobelovy ceny za fyziku v roce 2017 stal i Albert Einstein, tvůrce obecné teorie relativity, ten, kdo jako první předpověděl existenci gravitačních vln a určil jejich základní vlastnosti.



Obr. 4. Laureáti Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2017: Rainer Weiss (vlevo), Barry Barish (uprostřed) a Kip Thorne (vpravo). Cenu získali „za rozhodující příspěvky k detektoru LIGO a pozorování gravitačních vln“. © Nobel Media AB 2017. Photo: Alexander Mahmoud

Uvedme na tomto místě stručné profesní životopisy tří laureátů:

RAINER WEISS se narodil 29. 9. 1932 v Berlíně (Německo). Doktorát získal na MIT v roce 1962, kde byl poté dlouholetým profesorem fyziky. Již na počátku 70. let analyzoval zdroje šumu rušící detektory gravitačních vln, navrhl koncepci laserového interferometru, která tyto vlivy potlačuje. Stavěl první prototypy interferometrických detektorů gravitačních vln a získával na ně grantovou podporu. Patří do trojice spoluzakladatelů projektu LIGO. Kromě problematiky detekce gravitačních vln se zabýval experimentální atomovou fyzikou, vyvíjel například přesné atomové hodiny. Spolupracoval též s R. Dickem a D. Wilkinsonem na kosmologických tématech. Mimo jiné byl vůdčí osobností projektu COBE, první družice pro detekci spektra a anizotropií reliktního mikrovlnného záření kosmu, pozůstatku žhavého velkého třesku.

BARRY CLARK BARISH se narodil 27. 1. 1936 v Omaze (stát Nebraska, USA). Doktorát získal na Kalifornské univerzitě v Berkeley v roce 1962, od roku 1963 dosud působí na Caltechu jako profesor fyziky. Byl v řídicích funkcích řady projektů experimentální částicové fyziky (2005–2013 například ředitel mezinárodního projektu lineárního srážecího ILC). V letech 1994–2005 byl hlavním řešitelem projektu a v letech 1997–2005 ředitelem laboratoře LIGO. Zakladatel a člen mezinárodní kolaborace LSC (LIGO Scientific Collaboration), která je zodpovědná za organizaci vědeckých výzkumů LIGO a za analýzu naměřených dat. Iniciátor a propagátor stavby detektorů ve dvou krocích (nejprve „počáteční LIGO“ a potom „pokročilé LIGO“).

KIP STEPHEN THORNE se narodil 1. 6. 1940 v Loganu (stát Utah, USA), doktorát obdržel na Princetonské univerzitě v roce 1965. Od roku 1967 působí na Caltechu, kde se o 3 roky později stal profesorem teoretické fyziky. Thorne je přední světový odborník na obecnou relativitu, teorii gravitace a astrofyziku, především relativistické hvězdy, akreční disky, černé díry a gravitační vlny. Spolu s kolegou C. W. Misnerem a učitelem J. A. Wheelerem napsali nejslavnější učebnici Einsteinovy teorie nazvanou *Gravitation*,

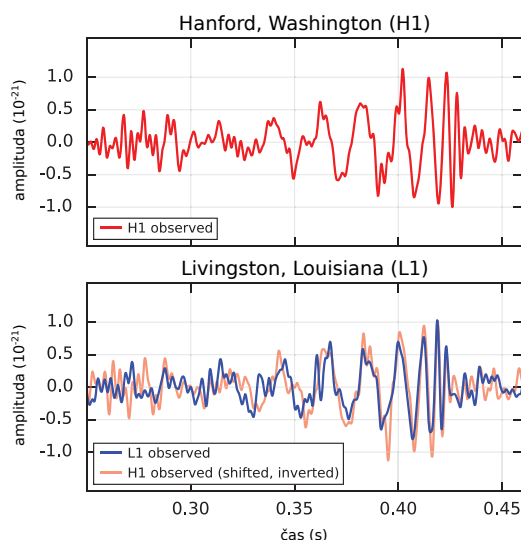
familiárně též „MTW“ [13] (z roku 1973, rozsah 1 279 stran). Od konce 60. let rozvíjel matematický formalismus pro výpočty astrofyzikálních gravitačních vln generovaných pulzacemi relativistických hvězd. Jako teoretik analyzoval myšlenky a plány na stavbu detektorů gravitačních vln. Spolu s Dreverem a Weissem stál u zrodu LIGO a více než 30 let se svou skupinou na Caltechu poskytoval teoretické zázemí projektu (identifikace zdrojů gravitačních vln, odhady velikosti a charakteru signálů, metody analýzy dat). Thorne patří mezi přední popularizátory vědy: získal například prestižní ocenění za vynikající knihu *Černé díry a zborcený čas* (1994, česky 2004 [20]), významně přispěl také k tvorbě sci-fi filmu *Interstellar* (2014).

4. Jaké gravitační vlny už detektory LIGO a Virgo zaslechly

V závěrečné části tohoto příspěvku krátce shrneme, jaké gravitační vlny byly pomocí interferometrů LIGO a Virgo dosud detekovány (a veřejně oznámeny).

4.1. První detekce: GW150914

Jak jsme již uvedli, historicky první prokazatelný záchyt gravitační vlny se odehrál dne 14. září 2015 v 09:50:45 UTC. Obě stanice LIGO zachytily naprosto zřetelný a co do profilu vlny shodný signál, viz obr. 5, který dostal označení GW150914 (číslo kóduje rok, měsíc a den). Trval zhruba 200 milisekund a měl typický charakter tzv. *čirpu* generovaného v závěru vývoje systému dvou černých děr (do srážky roste frekvence i amplituda signálu, maximální dosáhla $h = 1 \times 10^{-21}$). Pečlivá analýza signálu odhalila, že zdrojem této gravitační vlny byla *srážka velkých černých děr* o hmotnostech $36 M_{\odot}$ a $29 M_{\odot}$, k níž došlo v dalekém vesmíru ve vzdálenosti 1,2 miliardy světelných let.

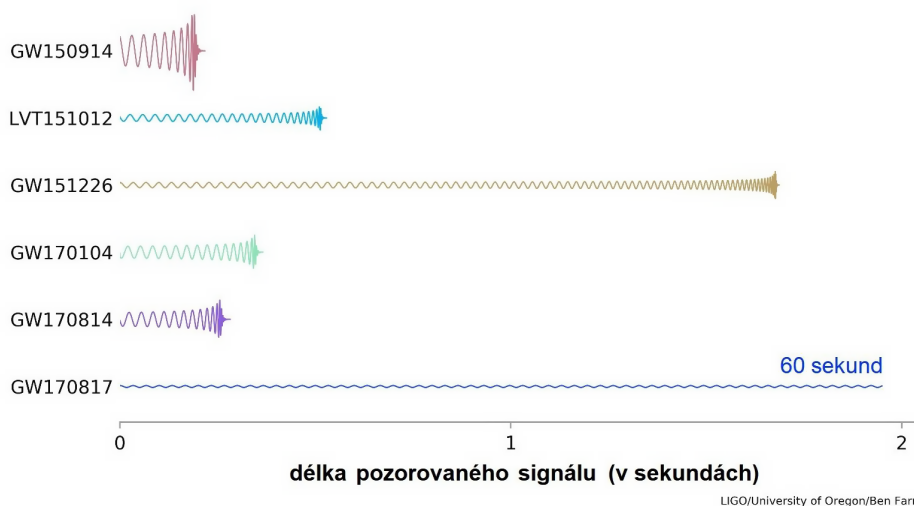


Obr. 5. První gravitační vlna GW150914 zachycená dne 14. září 2015 observatořemi LIGO v Hanfordu (nahore) a Livingstonu (dole). Převzato z [2]

Informace o tomto objevu byly oficiálně oznámeny 11.2.2016 a současně zveřejněny v článku [2] v prestižním fyzikálním časopise *Physical Review Letters* a v sérii 12 ještě podrobnějších prací, dostupných na stránce losc.ligo.org/events/GW150914/. Okolnosti první přímé detekce gravitačních vln, včetně detailních informací o signálu GW150914 a jeho zdroji, jsme popsali v článku [18].

4.2. Druhá detekce: GW151226

Detekci první gravitační vlny GW150914 příběh samozřejmě nekončí, ba právě naopak. Během podzimu roku 2015 (přesněji celkem 49 dní v období 12. září 2015–19. ledna 2016 při tzv. O1 běhu měření neboli „Observation Run 1“) oba detektory LIGO nadále sbíraly data a 26. prosince se jim podařilo zaznamenat druhý prokazatelný signál GW151226 [3]. Je zajímavé, že i tato vlna byla generována splynutím dvou černých děr, ale nikoli tak hmotných jako v prvním případě. Tentokrát byla hmotnost výsledné černé díry $22 M_{\odot}$, oproti $62 M_{\odot}$ v prvním zaznamenaném případě. Binární systém měl tedy zhruba třetinovou hmotnost a podařilo se ho identifikovat jen proto, že měřitelný signál trval delší dobu a bylo zachyceno více cyklů vlny (55 oproti 8, viz obr. 6).



Obr. 6. Porovnání prvních detekovaných gravitačních vln ze srážky a splynutí velmi hmotných černých děr a neutronových hvězd v hlubokém vesmíru. Signály mají podobný průběh typu čirp, jejich délky jsou ale různé v závislosti na hmotnosti binárního zdroje. Signál LVT151012 sice nebyl věrohodně prokázán, ale nejspíše šlo také o gravitační vlnu. Zdroj: LIGO/Virgo/Ben Farr, University of Oregon

Počátkem roku 2016 byly interferometry LIGO odstaveny a téměř celý rok byla prováděna technická zdokonalení zvyšující citlivost. Druhý běh měření O2 probíhal pak v období 30. listopadu 2016–25. srpna 2017, kdy bylo shromážděno celkem 117 dní společných měření. K dnešnímu datu (únor 2018) byly oznámeny další čtyři prokázané signály gravitačních vln, konkrétně GW170104, GW170608, GW170814 a GW170817.

4.3. Třetí detekce: GW170104

Třetí gravitační vlna byla oběma detektory LIGO zachycena 4. ledna 2017. Zdrojem byla opět srážka velkých černých děr [4]. Signál se velmi podobal první vlně GW150914: tentokrát bylo zaznamenáno zhruba 7 cyklů vlny a výsledná černá díra měla hmotnost $50 M_{\odot}$. Rozdíl byl v tom, že tento zdroj ležel v ještě větší vzdálenosti od nás, konkrétně 2,9 miliardy světelných let, dvaapůlkrát dále než v prvním případě.

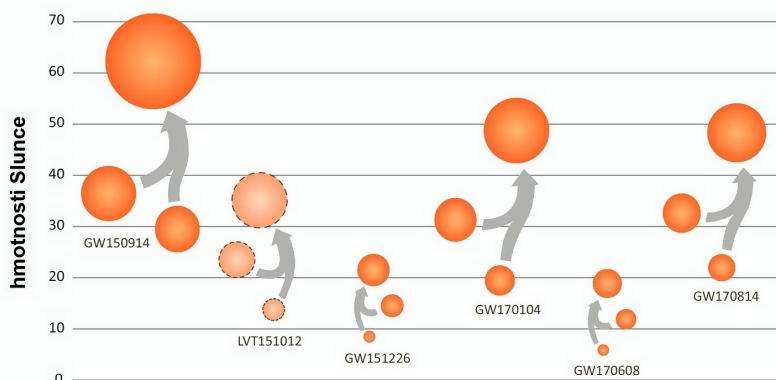
4.4. Čtvrtá detekce: GW170608

Signál čtvrté gravitační vlny z 8. června 2017 byl značně odlišný [11]. Trval mnohem delší dobu, zachycena byla celá stovka cyklů (v obr. 6 není znázorněn). Analýza ukázala, že se jednalo o zatím nejméně hmotný zdroj, kdy soustava dvou srážejících se černých děr měla hmotnost pouze $19 M_{\odot}$.

4.5. Pátá detekce: GW170814

Pátá gravitační vlna [5] zaznamenaná 14. srpna roku 2017 se podobala první a třetí vlně (signálům GW150914 a GW170104), měla tedy podobný zdroj o hmotnosti výsledné černé díry $53 M_{\odot}$. Zcela novým faktem bylo, že detekci gravitační vlny GW170814 provedly tři interferometry, protože k oběma americkým stanicím LIGO se poprvé připojil také pokročilý evropský interferometr Virgo. Proto bylo možné lépe určit polohu zdroje na obloze. Hmotnosti černých děr objevených díky prvním pěti detekovaným gravitačním vlnám jsou graficky reprezentovány na obr. 7.

černé díry objevené LIGO a Virgo



Obr. 7. Diagram schematicky znázorňující hmotnosti černých děr objevených pomocí detektorů gravitačních vln. Velikostí kolečka je znázorněna hmotnost obou srážejících se černých děr i hmotnost výsledné černé díry (naznačené šipkou). Zdroj: LIGO/Virgo

4.6. Šestá detekce: GW170817

Zatím nejnovějším a vpravdě přelomovým objevem v dějinách fyziky i astronomie je však detekce a následné sledování šesté události GW170817 [6]. Tuto gravitační vlnu zachytily LIGO spolu s Virgo dne 17. srpna 2017 ve 12:41:04 UTC.

Charakter čírpového signálu byl už na první pohled výrazně jiný nežli v předchozích případech: netrval zlomek sekundy ale minutu, celkem bylo zaznamenáno zhruba 3 000 cyklů vlny, viz obr. 6. Záhy se ukázalo, že v tomto případě gravitační vlnu nevyvolala srážka a splynutí dvou velkých černých děr, ale *dvou neutronových hvězd* o celkové hmotnosti menší než 3 hmotnosti Slunce.

Ale nejen to. Prakticky ve stejný okamžik, jen 2 sekundy po gravitační vlně generované při nárazu neutronových hvězd na sebe, zaznamenaly družice Fermi a INTEGRAL *krátký záblesk gama záření* GRB 170817A.

Díky zachycení gravitační vlny třemi interferometry se podařilo lokalizovat zdroj signálu do malé oblasti na obloze o velikosti pouze 28 čtverečních stupňů. Pozorování v optickém oboru pak velmi rychle (během jediného dne) jednoznačně prokázala, že zdrojem GW170817 i GRB 170817A byla srážka neutronových hvězd, ke které došlo v *galaxii NGC 4993 v souhvězdí Hydry* ve vzdálenosti 130 milionů světelných let od nás. Je to tudíž *první zdroj v historii, který byl pozorován současně pomocí gravitačních i elektromagnetických vln*.

To mimo jiné poskytlo nový a zásadní test Einsteinovy obecné relativity: jen nepatrný časový rozdíl v příchodu obou signálů (navíc plně vysvětlitelný odlišnými fyzikálními mechanismy jejich generování) znamená, že relativní rozdíl v rychlostech šíření gravitačních a elektromagnetických vln ve vakuu musí být menší než 10^{-15} . S tímto novým observačním faktem se budou nesnadno vyrovnávat mnohé „módní“ alternativní teorie gravitace.

Do následných pozorování tohoto unikátního astrofyzikálního jevu se ihned zapojilo *více než 70 observatoří v celém oboru elektromagnetického spektra* rozmístěných po celé Zemi i v kosmickém prostoru. Během jediného dne byl objekt rozpoznán opticky i v ultrafialovém a infračerveném oboru jako takzvaná *kilonova*. Byly získány cenné údaje o časovém vývoji spekter. S odstupem několika dní byl pak objekt zaznamenán i v oboru rentgenovém a pomocí radioteleskopů [12].

Obrovské množství získaných dat, konkrétně časový vývoj spekter v celém elektromagnetickém oboru, nyní umožňuje podrobně analyzovat fyzikální procesy, které se v okolí srážejících se neutronových hvězd odehrávají. To upřesní astrofyzikální modely, včetně stavové rovnice jaderné hmoty (kterou zatím s jistotou neznáme), poskytne také hlubší pochopení nukleosyntézy jader velmi těžkých prvků. To je důležité, neboť právě srážkami neutronových hvězd, kdy se uvolňuje ohromné množství neutronů, dochází tzv. r-procesem (rychlým zachytem neutronů) k *nukleosyntéze prakticky všech těžkých jader*. Mezi ně patří stříbro, zlato, platina i valná většina lanthanoidů a aktinoidů až po thorium a uran. Zdá se být nyní jisté, že téměř všechny tyto významné prvky, které kolem sebe nacházíme a které používáme, kdysi vznikly právě srážkou neutronových hvězd.

Proto je pozorování gravitační vlny GW170817 historická událost. Je to první opravdu velký úspěch takzvané *mnohopásmové astronomie* (anglicky „multi-messenger astronomy“) neboli „astronomie mnoha oken“. Tím se myslí koordinované sledování určitého astronomického jevu či objektu současně všemi dostupnými observatořemi,

pokrývajícími celé elektromagnetické spektrum i nový obor gravitačních vln [12]. Časem se k nim připojí také observatoře kosmického záření a neutrin. Takto získaná komplexní pozorování se stanou doslova pokladnicí astronomických a fyzikální poznatků.

5. Shrnutí dosavadních objevů

Hlavní údaje o prvních šesti (zatím oznámených) gravitačních vlnách a jejich zdrojích shrnuje tabulka 1.

V prvním sloupci je astronomické označení signálů gravitačních vln. Druhý sloupec obsahuje zkratky detektorů, které signál zaznamenaly (L značí „Livingston“ a H „Hanford“, tedy dvojici amerických stanic LIGO, V je zkratka pro evropský detektor „Virgo“). Ve třetím sloupci je počet zaznamenaných cyklů dané gravitační vlny. Ve čtvrtém sloupci je uveden typ zdroje vlny. Zatím se vždy jednalo o srážku a splynutí dvou gravitačně zhroucených objektů: zkratka BH znamená „černá díra“ a NS „neutronová hvězda“ (z anglických názvů „black hole“ a „neutron star“). Další sloupec udává hmotnost výsledné černé díry (v násobcích hmotnosti Slunce). V předposledním sloupci je její luminozitní vzdálenost (v miliardách světelných let) a v posledním sloupci je uveden odkaz na příslušný hlavní článek.

signál	detektory	cyklů	zdroj	hmotnost	vzdálenost	článek
GW150914	L, H	8	BH-BH	$62 M_{\odot}$	1,2 mld. sv. let	[2]
GW151226	L, H	55	BH-BH	$22 M_{\odot}$	1,4 mld. sv. let	[3]
GW170104	L, H	7	BH-BH	$50 M_{\odot}$	2,9 mld. sv. let	[4]
GW170608	L, H	100	BH-BH	$19 M_{\odot}$	1,1 mld. sv. let	[11]
GW170814	L, H, V	6	BH-BH	$53 M_{\odot}$	1,8 mld. sv. let	[5]
GW170817	L, H, V	3000	NS-NS	$2,7 M_{\odot}$	0,13 mld. sv. let	[6]

Tab. 1. Shrnutí parametrů prvních detekovaných gravitačních vln a příslušných zdrojů

6. Závěr

Dovolte mi zde závěrem citovat vyjádření prezidenta Americké fyzikální společnosti Rogera Falconeho. Dle mého soudu totiž skvěle vystihuje podstatu a historický význam oboru, za který byla udělena Nobelova cena za fyziku 2017:

„Měření gravitačních vln reprezentuje tu nejlepší vědu. Nádherná přesvědčivá teorie poskytující jasné předpovědi, důmyslné experimentální techniky, brilantní nápady jednotlivých vědců, promyšlené řízení velkého projektu a vytrvalé úsilí mezinárodního týmu spolu s vládní agenturou odhodlanou financovat základní výzkum. Jak nádherný a inspirující příběh!“

Poděkování. Děkuji Grantové agentuře České republiky za dlouholetou podporu mého výzkumu, aktuálně projektu číslo 17-01625S *Prostoročasy a pole v Einsteinově teorii gravitace a jejich zobecněních*.

L i t e r a t u r a

- [1] ABBOTT, B. P., et al.: *LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory*. Rep. Progr. Phys. [online] 72 (2009) 076901, 25 pp.
- [2] ABBOTT, B. P., et al.: *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*. Phys. Rev. Lett. [online] 116 (2016) 061102, 16 pp.
- [3] ABBOTT, B. P., et al.: *GW151226: observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence*. Phys. Rev. Lett. [online] 116 (2016) 241103, 14 pp.
- [4] ABBOTT, B. P., et al.: *GW170104: observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2*. Phys. Rev. Lett. [online] 118 (2017) 221101, 17 pp.
- [5] ABBOTT, B. P., et al.: *GW170814: a three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence*. Phys. Rev. Lett. [online] 119 (2017) 141101, 16 pp.
- [6] ABBOTT, B. P., et al.: *GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral*. Phys. Rev. Lett. [online] 119 (2017) 161101, 18 pp.
- [7] BIČÁK, J., RUDENKO V. N.: *Teorie relativity a gravitační vlny*. Skripta. Univerzita Karlova, Praha, 1985.
- [8] DVOŘÁK, L.: *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru*. Skripta. SPN, Praha, 1984.
- [9] EINSTEIN, A.: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*. Preuss. Akad. Wiss. Sitz. (1916), 688–696.
- [10] EINSTEIN, A.: *Über Gravitationswellen*. Preuss. Akad. Wiss. Sitz. (1918), 154–167.
- [11] LSC and Virgo Collaboration: *GW170608: observation of a 19-solar-mass binary black hole coalescence*. Astrophys. J. Lett. [online] 851 (2017) L35, 11 pp.
- [12] LSC and Virgo Collaboration et al.: *Multi-messenger observations of a binary neutron star merger*. Astrophys. J. Lett. [online] 848 (2017) L12, 59 pp.
- [13] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: *Gravitation*. Freeman, New York, 1973.
- [14] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a možnosti jejich detekce*. PMFA 40 (1995) 272–288.
- [15] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny: výzva pro příští století*. Čs. čas. fyz. A49 (1999), 113–119.
- [16] PODOLSKÝ, J.: *Teorie gravitačního záření*. Čs. čas. fyz. A55 (2005), 86–93.
- [17] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a jejich detektory*. Astropis Speciál 17 (2010), 34–37.
- [18] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny poprvé zachyceny: GW150914 ze srážky černých děr*. PMFA 61 (2016), 89–105.
- [19] ROBERTSON, N. A.: *Laser interferometric gravitational wave detectors*. Classical Quantum Gravity [online] 17 (2000), R19–R40.
- [20] THORNE, K. S.: *Černé díry a zborcený čas*. Mladá fronta, Praha, 2004.