

Miliardu let staré poselství

Robert Švarc

Náš příběh začíná v době, kdy je na Zemi zformován prakontinent Rodinie. Rovněž v této době, ale v dalekém vesmíru, splynula ve zlomku vteřiny po předcházejícím dlouhém spirálovém obíhání dvojice černých dér třicetkrát hmotnějších než Slunce. Uvolněná energie v podobě gravitačního záření začala putovat rychlostí světla od místa této gigantické kolize. Vesmír se doslova rozechvěl.

Omiliardu let později dne 14. září 2015 v 9 hodin 50 minut a 45 vteřin UTC (Coordinated Universal Time, Koordinovaný světový čas) doputovalo toto chvění i k Zemi a vědcům z mezinárodních týmů LIGO Scientific Collaboration a Virgo Collaboration se ho podařilo zachytit [1]. Tato událost dle své povahy a data nesoucí označení GW150914 představuje první přímou detekci gravitačních vln a zároveň první přímé pozorování kolapsu binárního černoděrového systému. Proč ale lidé takový signál již řadu let hledali? A jaké informace nám přinesl?

Teorie relativity a gravitační vlny

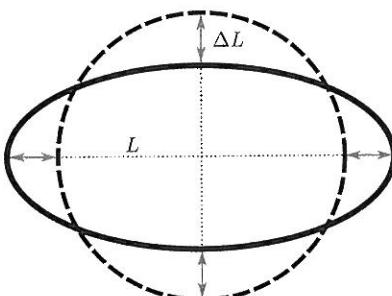
Abychom lépe porozuměli výjimečnosti tohoto objevu, je třeba vrátit se 101 let zpět do roku 1915, kdy 25. listopadu Albert Einstein v Berlíně představil Královské pruské akademii věd svůj nový geometrický popis gravitace – obecnou teorii relativity [2,3,4]. Gravitační působení je zde asociováno přímo s geometrií jeviště světa – prostoročasu, tedy pružného kontinua tvořeného neoddělitelným svázáním intuitivně chápáných, dříve zcela absolutních, newtonovských pojmu prostoru a času. Jeho křivost (kódující nehomogenitu gravitačního pole) je pak přirozeně určena rozložením hmoty a energie, přičemž ale zároveň předepisuje, jak se musí příslušné zdroje pole v takové aréně pohybovat. Jejich pohyb však nevyhnutelně generuje zpětnou reakci zakřivení prostoročasu, což vnáší do Einsteinovy teorie nelineární dynamickou interakci odrážející se v její matematické komplikovanosti. Přesněji se informace o změně rozložení zdrojů pole šíří prostoročasem rychlostí světla v podobě příčných vlnek křivosti – gravitačních vln – a je tak přímou analogií elektromagnetického záření v Maxwellové teorii elektromagnetismu.

Na rozdíl od vln elektromagnetických však není možné gravitační záření jakožto chvění samotného jeviště žádným způsobem odstínit. Má tak potenciál poskytnout jedinečný výhled do nitra extrémních opticky nedostupných událostí. Přirozenými zdroji gravitačních vln pak mohou být například sám vznik vesmíru, kolapsy supernov či

spirální pohyb dvojice velmi hmotných objektů – binárních pulsarů, popřípadě černých dér.

Technicky předpověděl existenci gravitačních vln v linearizovaném módu své obecné relativity, tedy pouze pro slabá gravitační pole, Albert Einstein již v roce 1916 [5]. Trvalo však dalších čtyřicet let, než byla matematicky vyjasněna jejich přítomnost i v plném nelineárním popisu. Bezprostředně poté začal americký astrofyzik Joseph Weber s prvními pokusy o jejich zachycení [6]. Přímá detekce se však zdařila až téměř o šedesát let později. Proč vědci neslavili úspěch dříve?

Obecně princip přímé detekce gravitační vlny spočívá v proměřování relativní změny prostorové geometrie. Představme si například pružný prstýnek o poloměru L . Teorie relativity říká, že v důsledku průchodu vlny šířící se ve směru kolmém na rovinu prstýnu se bude jeho původně kruhový tvar periodicky měnit v elipsu. V jistém směru se tedy prstýnek protáhne o vzdálenost ΔL přičemž ve směru kolmém se o tutéž vzdálenost zploští a naopak.



Typický efekt gravitační vlny: kroužek deformovaný v elipsu.

Zajímáme se tedy o relativní změnu jeho poloměru

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

a o frekvenci, s jakou tvar mezi kroužkem a elipsou osciluje. Pro potvrzení, že se skutečně jedná o deformaci způsobenou gravitační vlnou, a nikoli například zemětřesením, je pak výhodné provozovat

alespoň dvojici detektorů dostatečně od sebe vzdálených. V signálech obou detektorů následně hledáme koincidence. Vzhledem k tomu, že gravitační vlnění se má podle Einsteinovy teorie šířit rychlostí světla, neměl by být rozestup mezi shodnými částmi signálu v prvním a druhém detektoru větší, než je doba, za kterou vlna mohla urazit vzdálenost mezi detektory.

Ačkoli Joseph Weber dosáhl neuvěřitelné citlivosti $h = 10^{-16}$, i když pouze pro fixovanou frekvenci, nebyl ve svém úsilí úspěšný. Nabízela se dvě vysvětlení. Buď gravitační vlny vůbec neexistují a podstatná část Einsteinova popisu je chybná, nebo je jejich efekt ještě slabší, než Weber na základě teoretických úvah předpokládal.

Alespoň částečnou odpověď na tuto otázku přineslo roku 1974 objevení a následné mnohaleté precizní pozorování pulsaru PSR B1913+16 Russellem A. Hulsem a Josephem H. Taylorem [7]. Ukázalo se, že v tomto systému, který je tvořen dvojicí navzájem obíhajících neutronových hvězd, dochází ke zkracování oběžné doby, a tedy vzájemnému přibližování obou složek. Odpovídající ztráta pohybové energie hvězd pak přesně souhlasí s předpovědí obecné relativity pro množství energie odnášené v podobě gravitačních vln. Jedná se tak o nepřímý důkaz existence gravitačního záření. Ještě dodejme, že protagonisté tohoto objevu byli roku 1993 odměněni Nobelovou cenou za fyziku a že toto ocenění podpořilo i následné zintenzivnění snah o přímou detekci gravitačních vln.

Interferometrické detektory

I když se objev pulsaru PSR B1913+16 a později i dalších binárních systémů, např. unikátního dvojitěho pulsaru PSR J0737+3039, stal velmi přesvědčivým testem obecné relativity, stále zbývalo změřit přímý geometrický efekt gravitační vlny na objekty zde na Zemi. Velmi nadějnou metodou pro citlivá měření relativní změny vzdáleností se v sedmdesátých letech ukázalo být využití optického jevu zvaného interference, tedy skládání světla plynoucí z jeho elektromagnetické vlnové povahy. Uvidíme, že tento přístup umožní výrazně překročit citlivost Weberových rezonančních detektorů, a to navíc s výhodou širokého frekvenčního rozsahu. Princip interferometrického detektoru se zdá být na první pohled prostý, přičemž intuitivně připomíná studium deformací dříve zmíněného pružného prstýnku. V technických detailech se však jedná o nesmírně sofistikované zařízení stojící na samé hranici současných možností mechaniky, optiky či vakuové fyziky.

Nyní popišme idealizovaný model takového detektoru. Představme si laserový zdroj a rozdělme jeho paprsek polopropustným zrcadlem do dvou navzájem kolmých směrů, tedy os myšleného kroužku. Dále postavme do cesty každému z těchto kolmých paprsků další zrcadlo. Světlo se tak odrazí zpět a oba paprsky opět narazí na polopropustné zrcadlo. Po průchodu, resp. odrazu tímto zrcadlem pokračují společně a dopadají na stínítko (do fotodetektoru), kde se díky své vlnové povaze skládají v interferenční obrazec. Pokud jsou zrcadla ideálně nehybná, měl by být takový interferenční obrazec neměnný v čase. Právě tento technický požadavek přináší značné potíže. Představme si nyní gravitační vlnu putující ve směru kolmém na rovinu interferometru. Deformaci prostoru dojde ke zkrácení jednoho z laserových ramen a k prodloužení druhého z nich. Změní se tak doby letu rozdělených paprsků. Výsledkem bude posun ve fázi skládaných elektromagnetických vln, a tedy změna interferenčního obrazce. Pro vyloučení náhodných chvění je v analogii s Weberovými měřeními vhodné provozovat alespoň dvojici takových zařízení a v první řadě vyhledávat koincidence v jejich signálech. Zaznamenaný časový vývoj interferenčního obrazce pak jednoznačně kóduje

frekvenci a amplitudu procházejícího gravitačního vlnění. Nakonec ještě zbývá takto zjištěné informace přiřadit konkrétní fyzikální situaci, která prostoročas rozechvěla. Pro analýzu a efektivní vyhledávání relevantního signálu je nezbytné mít v předstihu připravenou jakousi kartotéku statisíčů teoretických modelů specifických zářivých situací, které jsou následně sofistikovanými statistickými metodami porovnávány se signálem z detektoru.

Aby byl interferenční obrazec dostatečně citlivý na změny způsobené průchodem gravitační vlny, tedy aparatura dostatečně nehybná, je z technologického pohledu třeba mimo jiné užít výkonné a vysoko stabilní laserový zdroj spolu s teplotně stálými a dokonale přesnými zrcadly s minimálními ztrátami odrazivosti. Dále musí být veškeré zavěšení zrcadel naprostě izolované od seismického chvění včetně zapojení aktivních korekcí. V neposlední řadě by délka kolmých laserových ramen měla být co možná největší. Je tedy třeba dráhu paprsků efektivně prodloužit přidáním dalších zrcadel a vícenásobných odrazů. Navíc musí být celá aparatura umístěna ve vysokém vakuu, aby byl minimalizován rozptyl laserových paprsků na molekulách vzdachu. Technicky se tak jedná o naprostě unikátní zařízení, které co do své komplexnosti nezaostává za urychlovači elementárních čistic.

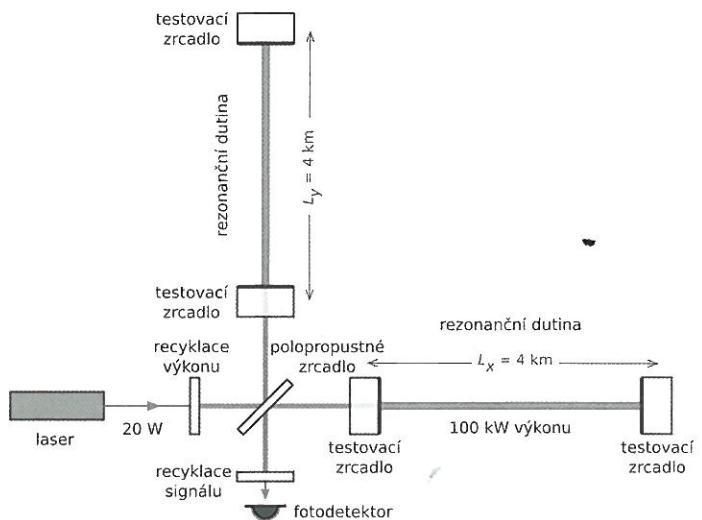


Schéma interferometrického detektoru: optická ramena (v případě detektoru LIGO dlouhá 4 km) jsou efektivně prodloužena přidáním dalších zrcadel a vytvořením rezonančních dutin (převzato z [1] a upraveno).

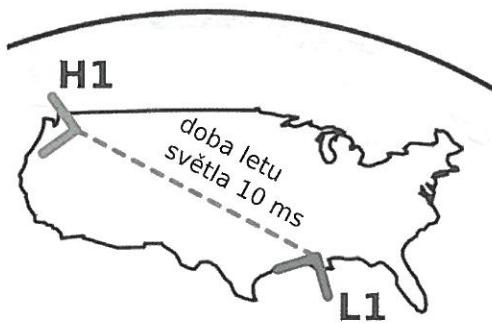
Vráťme se zpět k příběhu honby za gravitačními vlnami. Průkopníky výše popsaného interferometrického konceptu detektorů se v sedmdesátých a osmdesátých letech stali Rainer Weiss z MIT spolu s Kipem Thornem a Ronaldem Dreverem z Caltechu. Jejich zkušební detektor MARK 2 s délkou rámén 40 metrů se svou citlivostí 10^{-18} okamžitě vyrovnal detektorům Weberovým, přičemž nebyl omezen fixní frekvencí. Dodejme, že podobné prototypy detektorů byly následně konstruovány i v dalších koutech světa s cílem otestovat nové technologie a postupy minimalizující šum pro potenciální užití v budoucích detektorech, které by již mohly mít reálnou šanci na úspěch. Z předchozích Weberových neúspěšných pokusů a vylepšených teoretických modelů bylo totiž zřejmé, že kýzená citlivost musí být řádově $h = 10^{-21}$ a vyšší. V řeči reálných rozměrů to znamená podobný úkol jako pokusit se proměřovat vzdálenost mezi Zemí a Sluncem s přesností jediného atomu, což představuje skutečně extrémní experimentální výzvu.



→ LIGO a událost GW150914

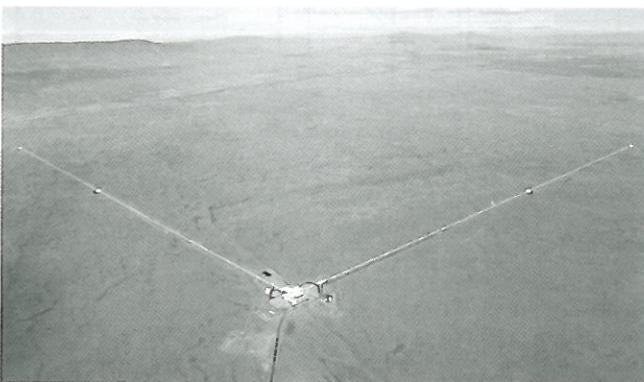
Čelné místo mezi interferometrickými experimenty směřujícími k přímé detekci gravitačních vln zaujal projekt LIGO – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory – vycházející z průkopnické práce skupin z MIT a Caltechu. Jeho první krůčky nebyly lehké. Po zdlouhavé snaze získat podporu konečně roku 1992 Americká Národní vědecká nadace (National Scientific Foundation – NSF) přislíbila financování v řádech stovek miliónů dolarů.

V protilehlých koutech Spojených států, v místech Livingston (Louisiana) a Hanford (Washington) vzdálených od sebe 3000 kilometrů, byla vybudována dvojice obřích interferometrů s délkou ramen 4 kilometry.



LIGO: poloha detektorů L1 v Livingstонu a H1 v Hanfordu, Spojené státy (převzato z [1] a upraveno).

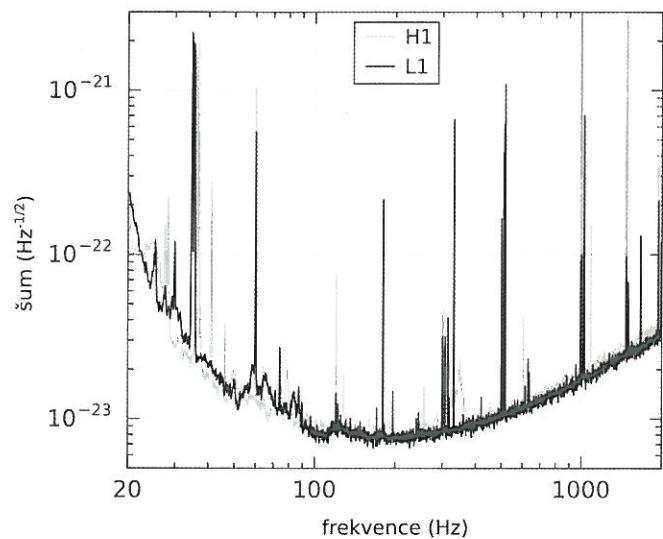
V rozmezí let 2002 až 2010 pak proběhlo šest cyklů vědeckých měření, přičemž citlivost detektorů byla dále vylepšena až k hodnotě $h = 10^{-22}$. Souběžně probíhala konstrukce a měření v rámci spřízněných evropských projektů Virgo (Pisa, Itálie) a GEO600 (Hannover, Německo).



LIGO: Interferometrický detektor poblíž Hanfordu ve státě Washington s délkou ramen 4 km (zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory).

Výsledek byl však negativní! Na základě lepšího porozumění numerickým simulacím v obecné relativitě se přitom opět ukázalo, že původní teoretické předpovědi pro velikost amplitud signálů a četnost relevantních astrofyzikálních zdrojů byly příliš optimistické. Projekt stál na rozcestí. Naštěstí se podařilo přesvědčit NSF a získat další podporu na cestě za vylepšenými detektory Advanced LIGO s citlivostí ještě o řád vyšší.

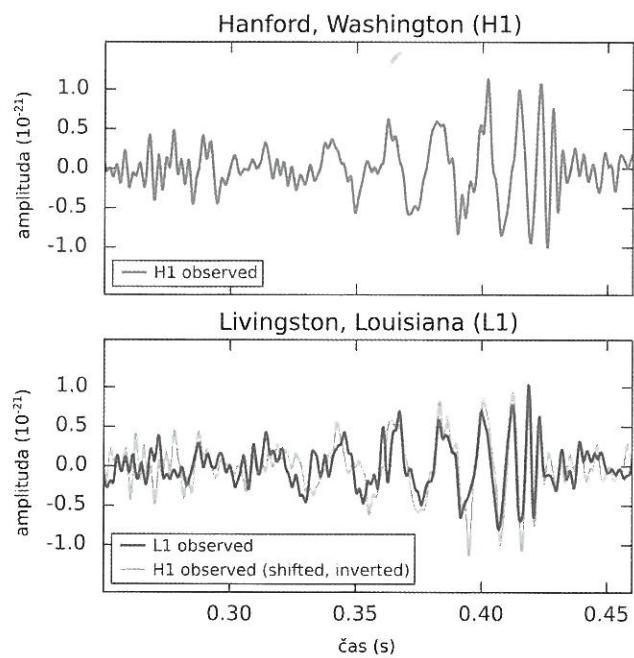
Modernizace spočívající v řadě důmyslných vylepšení, např. aktivní seismická izolace, zavěšení nyní masivnějších a zároveň přesnejších testovacích zrcadel v soustavě čtyřkyadla, výkonnější



LIGO: aktuální hranice citlivosti Advanced LIGO dosahující hodnoty $h = 10^{-22}$. Jednotlivé piky odpovídají kalibračním frekvencím a známým zdrojům rušení jako např. frekvenci napětí v elektrické síti (převzato z [1] a upraveno).

a stabilnější laser apod., trvala pět let. Dopraváza ji rovněž modernizace detektoru Virgo v Itálii.

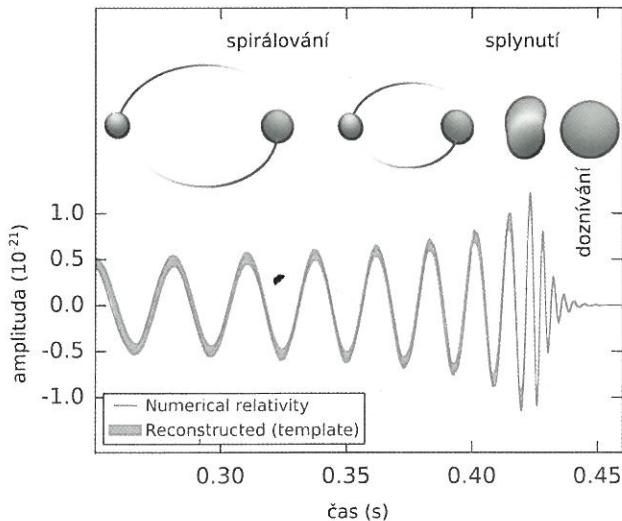
V září roku 2015 byly oba detektory Advanced LIGO spuštěny v technologickém režimu. Probíhaly testy a přípravy před dalším vědeckým cyklem měření. Překvapivě dne 14. září 2015 zachytily oba detektory, stále ještě pracující ve zkoušebním módu, shodný signál, přičemž Livingston předstihl o 7 milisekund Hanford. Vzhledem ke vzdálenosti 3000 kilometrů mezi detektory, tedy 10 ms letu světla, splnila objevená koincidence nutnou podmínu gravitačně vlnového původu, což by samo o sobě stačilo na světovou senzacii.



GW150914: shodné signály z detektorů Advanced LIGO příslušející prvnímu přímému pozorování gravitačních vln. Jejich zdrojem je srážka dvojice černých dér (převzato z [1] a upraveno).

Podařilo se však mnohem více. Získaný signál byl výrazně delší a méně zašuměný než předpokládala i ta nejoptimističtější očekávání. Jeho astrofyzikální interpretace byla jednoznačně dekódována. Událost GW150914 odpovídá typickému signálu vlny generované spirálovým obíháním a následným splynutím dvojice masivních černých dér. Charakteristickými rysy jsou zde narůstání frekvence a amplitudy (zrychlující se spirálový pohyb) zakončené maximálním výkmitem (splynutí černých dér) a náhlým útlumem signálu (ustálení vzniklého objektu do podoby osově symetrické rotující Kerrové černé díry).

Jedná se tedy současně o dva mimořádně fascinující objevy, které více než důstojně oslavily stoleté výročí Einsteinovy obecné teorie relativity.



GW150914: typický signál gravitační vlny provázející spirálové obíhání a splynutí dvou černých dér se závěrečným stadiumem v podobě jedné Kerrové černé díry (převzato z [1] a upraveno).

Nyní shrňme fyzikální parametry zdroje GW150914, které bylo možné ze zaznamenaných signálů extrahovat [1].

Událost GW150914

Datum a čas detekce	14. září 2015, 9.50.45 UTC
Detektory	L1 (Livingston) a H1 (Hanford)
Délka signálu	200 ms
Rozdíl mezi detektory	L1 o 7 ms před H1
Maximální amplituda	10^{-21}
Maximální deformace prostoročasu	10^{-18} m
Zdroj signálu	binární černoděrový systém
Hmotnost primární složky	32 až $41 M_{\odot}$
Hmotnost sekundární složky	25 až $33 M_{\odot}$
Celková hmotnost před srážkou	60 až $70 M_{\odot}$
Celková hmotnost po srážce	58 až $67 M_{\odot}$
Velikost výsledné černé díry	180 km
Vyzářená energie ve formě vln	2,5 až $3,5 M_{\odot} c^2$
Maximální rychlosť	0,6 c
Vzdálenost zdroje	0,8 až 1,9 miliardy světelných let
Poměr signál/šum	24
Falešný poplach?	pravděpodobnost $< 2 \cdot 10^{-7}$
Shoda s obecnou relativitou?	souhlasí ve všech testech

Zdroj signálu ležel na jižní obloze, směrově přibližně v oblasti Magellanových mračen, ale co do odlehlosti v mnohem hlubším vesmíru

vzdáleném více než miliardu světelných let od Země. Ještě poznamenejme, že přesnéjší určení polohy zdroje by vyžadovalo zapojení alespoň jednoho dalšího detektoru. Nadějí pro budoucí pozorování je proto Advanced Virgo v Itálii, případně plánované vybudování dalšího detektoru Advanced LIGO v Indii.

První vědecký běh detektorů LIGO byl ukončen 19. ledna 2016 a podařilo se v jeho průběhu spolehlivě detektovat ještě jednu obdobnou událost [8] označenou GW151226 a jednoho potenciálního kandidáta. Poté následovala další plánovaná modernizace vedoucí ke zvýšení citlivosti. Dne 30. listopadu 2016 byly oba detektory opět uvedeny do provozu.

Rozvoj tohoto pozorovacího odvětví astronomie bude jistě podpořen také dobudováním japonských kryogenních detektorů KAGRA, kde bude šum dálé potlačen chlazením na nízké teploty.

Zlatým hřebem by pak měla být realizace projektu eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) Evropské vesmírné agentury, tedy interferometrického detektoru přímo ve vesmírném prostoru s mimořádnou délkou ramen milion kilometrů. Navíc zde zcela odpadne problém seismického rušení. První krok na této cestě již úspěšně proběhl. Dne 3. prosince 2015 odstartovala průzkumná mise pro testování technologií LISA Pathfinder. Její dosavadní výsledky jsou více než slibné.

Detailní informace o gravitačních vlnách, včetně dat z detektorů, či řady přesných vizualizací je možné nalézt přímo na webu projektu LIGO ligo.org, případně ligo.caltech.edu. Jako podrobnější reference v českém jazyce zde ještě uvedeme článek [3] věnující se Einsteinově obecné relativitě a článek [9] detailněji popisující aspekty gravitačních vln a jejich objevu.

Gravitační vlny tedy byly přímo detektovány! Jedná se o konec našeho příběhu, anebo zde začíná dobrodružství jiné, možná ještě zajímavější? Myslím, že právě otevíráme nové okno umožňující zcela unikátní gravitační pohled na extrémní děje probíhající v našem vesmíru a sahající až k samému jeho vzniku. Nezbývá než s napětím očekávat, jaká překvapení následující roky a desetiletí gravitační astronomie přinesou.

Autor RNDr. Robert Švarc, Ph.D., působí v Ústavu teoretické fyziky MFF UK.

LITERATURA

- [1] Abbott B. P. et al.: Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102
- [2] Einstein A.: Die Feldgleichungen der Gravitation, Sitz. Preuss. Akad. Wiss., Berlin (1915) 844-7
- [3] Semerák O.: Albert Einstein a století obecné relativity, PMFA 60 (2015) 215-38
- [4] Thorne K. S.: Černé díry a zborcený čas, Mladá fronta, Praha (2004) ISBN: 80-204-0917-3
- [5] Einstein A.: Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation, Sitz. Preuss. Akad. Wiss., Berlin (1916) 688-96
- [6] Weber J.: Detection and generation of gravitational waves, Phys. Rev. 117 (1960) 306-13
- [7] Hulse R. A., Taylor J. H.: Discovery of a pulsar in a binary system, Astrophys. J. 195 (1975) L51-L53
- [8] Abbott B. P. et al.: GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 241103
- [9] Podolský J.: Gravitační vlny poprvé zachyceny: GW150914 ze srážky černých dér, PMFA 61 (2016) 89-105

Poděkování

Velice rád bych zde poděkoval prof. Jiřímu Podolskému za cenné připomínky k tomuto textu a také podpoře Centra Alberta Einsteina pro gravitaci a astrofyziku GAČR 14-37086G.