

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Podolský

Gravitační vlny poprvé zachyceny: GW150914 ze srážky černých děr

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 61 (2016), No. 2, 89–105

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/145760>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2016

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>

Gravitační vlny poprvé zachyceny: GW150914 ze srážky černých děr

Jiří Podolský, Praha

Abstrakt. Přesně před sto lety v červnu 1916 předpověděl Albert Einstein existenci gravitačních vln jako další důsledek obecné relativity, své dynamické teorie gravitačního pole. O jejich přímou detekci usilovalo řadu desetiletí mnoho vědců a techniků. V únoru 2016 oznámily týmy LIGO Scientific Collaboration a Virgo Collaboration, že se jim podařilo dne 14. 9. 2015 poprvé v historii zaznamenat gravitační vlnu označenou GW150914. Analýza signálu odhalila, že zdrojem této vlny byla srážka a splynutí dvou velkých černých děr, k níž došlo v dalekém vesmíru před miliardou let. V článku shrnujeme historické souvislosti tohoto významného objevu, technické parametry vysoce citlivých interferometrů Advanced LIGO i detaily vlastního objevu.

Poslyšte pozoruhodný příběh. Ač může znít neuvěřitelně, skutečně se odehrál:

- Právě před 100 lety Albert Einstein dobudoval svou obecnou teorii relativity a bezprostředně poté učinil explicitní předpověď existence gravitačních vln.
- Před 80 lety Einstein s Rosenem našli přesný prostoročas s gravitačními vlnami. Neporozuměli mu však správně, a tak existenci gravitačních vln zpochybnili . . .
- Před 60 lety se definitivně ujasnilo, že prostoročasové vlny existují i v přesné, nelinearizované teorii. Záhy začaly první Weberovy pokusy tyto vlny detekovat.
- Před 40 lety byly gravitační vlny astrofyzikálně prokázány, a to velmi pečlivým sledováním vývoje binárního pulsaru PSR B1913+16.
- Před 20 lety se v Americe a Evropě začaly stavět interferometrické detektory gravitačních vln LIGO a Virgo kilometrových rozměrů.
- Právě nyní se jim konečně po nezměrném úsilí podařilo Einsteinovu dávnou předpověď potvrdit zachycením a jasnou interpretací signálu GW150914. Jde o první pozemskou detekci gravitačních vln a současně o první přímé pozorování srážky dvou černých děr, jež se odehrála před miliardou let v hlubokém kosmu.

Fyzika je ve své podstatě fascinující dobrodružství poznání světa. Můžeme mít radost z toho, že jsme se právě stali svědky dalšího mezníku v dějinách vědy. Ba co víc: spíše než o završení stoletého díla a jeho uzavření dnes naopak stojíme na samém prahu dalších pozoruhodných objevů.

Prof. RNDr. JIŘÍ PODOLSKÝ, CSc., DSc., Ústav teoretické fyziky, MFF UK v Praze, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: podolsky@mbx.troja.mff.cuni.cz

1. Obecná relativita a gravitační vlny

Podle Einsteinovy obecné teorie relativity je gravitace deformací prostoročasu: každá hmota i libovolná forma energie kolem sebe modifikuje geometrické vlastnosti prostoru a plynutí času. Tělesa (například Země v gravitačním poli Slunce) se tedy nepohybují v neměnném euklidovském prostoru doplněném o absolutní, nezávislý čas. Přirozenou arénou světa je čtyřrozměrná prostoročasová varieta, v níž je prostor s časem vnitřně propojen a jejíž geometrie — popsaná metrickým tenzorem $g_{\mu\nu}$ — je zdeformována jednotlivými objekty.

Tuto teorii gravitace Einstein dokončil po náročném mnohaletém úsilí v listopadu 1915 [16], [10], [12], [4], kdy konečně našel správné rovnice pole. Ty přesně určují, jaké konkrétní gravitační pole $g_{\mu\nu}$ odpovídá dané hmotě popsané tenzorem energie-hybnosti $T_{\mu\nu}$. Dnes je zapisujeme ve tvaru

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

kde $R_{\mu\nu}$ je Ricciho tenzor a R jeho zúžení (Ricciho skalár) popisující míru zakřivení prostoročasu, což jsou složité nelineární kombinace složek metriky $g_{\mu\nu}$ a jejich 1. a 2. parciálních derivací podle prostoročasových souřadnic. Výtečný popis historických souvislostí vzniku obecné relativity i vysvětlení jejího koncepčního aparátu lze najít v práci doc. Semeráka [25] vyšlé ve speciálním čísle 3 ročníku 2015 tohoto časopisu věnovaném 100 letům teorie.

Během sta let své existence byla Einsteinova pozoruhodná teorie mnohokrát experimentálně testována a ověřena [30], [31], a to jak v pozemských laboratořích, tak studiem kosmických systémů. Stala se pilířem fyziky, astronomie, astrofyziky i kosmologie.

Záhy po dokončení obecné relativity Albert Einstein počátkem roku 1916 učinil též principiálně novou předpověď [8]: existenci *gravitačních vln*. Oproti Newtonově teorii je totiž obecná relativita *dynamickou teorií gravitačního pole*. To znamená, že prostoročas je přítomností hmoty nejen zdeformován, ale může začít i vibrovat. Jestliže se hmotný zdroj periodicky mění, prostoročas je uveden do kolektivního kmitavého stavu — šíří se v něm vlny křivosti. Tyto vlny slapových deformací putují *rychlostí světla*, mají *příčný charakter* a *dvě nezávislé polarizace*.

Ke své předpovědi Einstein dospěl studiem polních rovnic (1) v aproximaci, kdy je gravitační pole velmi slabé a lze tedy provést *linearizaci* rovnic. Technicky to znamená, že uvažoval metriku prostoročasu ve tvaru

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad (2)$$

kde $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ je metrika plochého Minkowského prostoročasu (bez gravitačního pole), zatímco $h_{\mu\nu}$ jsou malé poruchy reprezentující slabé gravitační pole (deformace prostoročasu), tedy platí $|h_{\mu\nu}| \ll |\eta_{\mu\nu}| = 1$. Einstein dosadil (2) do rovnic gravitačního pole (1), zanedbal všechny členy kvadratické v proměnných $h_{\mu\nu}$, zavedl pomocnou bezestopou proměnnou $\gamma_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu} h_{\alpha}{}^{\alpha}$ a aplikací kalibrační podmínky $\gamma_{\mu\nu}{}^{,\nu} = 0$ dostal nehomogenní *vlnovou rovnici*

$$\square \gamma_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (3)$$

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter „erster Näherung“ ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen $\gamma_{\mu\nu}$, welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen γ als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$.

Wir werden zeigen, daß diese $\gamma_{\mu\nu}$ in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik. Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen. Es hat sich gezeigt, daß die von mir vorgeschlagene Wahl des Bezugssystems gemäß der Bedingung $g = |g_{\mu\nu}| = -1$ für die Berechnung der Felder in erster Näherung nicht vorteilhaft ist. Ich wurde hierauf aufmerksam durch eine briefliche Mitteilung des Astronomen sr. Ström, der fand, daß man durch eine andere Wahl des Bezugssystems zu einem einfacheren Ausdruck des Gravitationsfeldes eines ruhenden Massenpunktes gelangen kann, als ich ihn früher gegeben hatte¹. Ich stütze mich daher im folgenden auf die allgemein invarianten Feldgleichungen.

¹ Sitzungsber. XLVII, 1915, S. 833.

§ 1. Integration der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes.

Die Feldgleichungen lauten in ihrer kovarianten Form

$$\left. \begin{aligned} R_{\mu\nu} + S_{\mu\nu} &= -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right) \\ R_{\mu\nu} &= -\sum_{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial x_{\alpha}^2} \left\{ \frac{\mu\alpha}{\alpha} \right\} + \sum_{\alpha} \left\{ \frac{\mu\alpha}{\alpha} \right\} \left\{ \frac{\nu\beta}{\beta} \right\} \left\{ \frac{\alpha}{\alpha} \right\} \\ S_{\mu\nu} &= \frac{\partial \log \sqrt{g}}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} \sum_{\alpha} \left\{ \frac{\mu\alpha}{\alpha} \right\} \frac{\partial \log \sqrt{g}}{\partial x_{\nu}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Dabei bedeuten die geschweiften Klammern die bekannten CHRISTOFFEL'schen Symbole, $T_{\mu\nu}$ den kovarianten Energietensor der Materie, T den zugehörigen Skalar. Die Gleichungen (1) liefern in der uns interessierenden Näherung die durch Entwickeln unmittelbar folgenden Gleichungen

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_{\alpha}^2} + \sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\alpha}}{\partial x_{\alpha}^2 \partial x_{\nu}} - \sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma_{\alpha\nu}}{\partial x_{\alpha}^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} \left(\sum_{\alpha} \gamma_{\alpha\alpha} \right) = -2\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} T_{\alpha\alpha} \right).$$

Das letzte Glied der linken Seite stammt von der Größe $S_{\mu\nu}$, die bei der von mir bevorzugten Koordinatenwahl verschwindet. Die Gleichungen (2) lassen sich durch den Ansatz

$$\gamma_{\mu\nu} = \gamma'_{\mu\nu} + \psi \delta_{\mu\nu} \quad (3)$$

lösen, wobei die $\gamma'_{\mu\nu}$ der zusätzlichen Bedingung

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial \gamma'_{\mu\alpha}}{\partial x_{\alpha}} = 0 \quad (4)$$

genügen. Durch Einsetzen von (3) in (2) erhält man an Stelle der linken Seite

$$-\sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \gamma'_{\mu\nu}}{\partial x_{\alpha}^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} \left(\sum_{\alpha} \gamma'_{\alpha\alpha} \right) + 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}} - \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\alpha}^2} - 4 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_{\mu} \partial x_{\nu}}.$$

Der Beitrag des zweiten, dritten und fünften Gliedes verschwindet, wenn ψ gemäß der Gleichung

$$\sum_{\alpha} \gamma'_{\alpha\alpha} + 2\psi = 0 \quad (5)$$

gewählt wird, was wir fortsetzen. Mit Rücksicht hierauf erhält man an Stelle von (2)

69

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial x_{\alpha}^2} \left(\gamma'_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} \gamma'_{\alpha\alpha} \right) = 2\kappa \left(T'_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\alpha} T'_{\alpha\alpha} \right)$$

oder

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial x_{\alpha}^2} \gamma'_{\mu\nu} = 2\kappa T'_{\mu\nu}. \quad (6)$$

Es ist hierzu zu bemerken, daß Gleichung (6) mit der Gleichung (4) im Einklang ist. Denn es ist zunächst leicht zu zeigen, daß bei der

Obr. 1. První dvě strany a detail začátku třetí strany Einsteinova příspěvků [8] předloženého Královské pruské akademii věd dne 22. června 1916. Právě před sto lety v něm předpověděl existenci gravitačních vln coby další důsledek své nové dynamické teorie gravitačního pole, obecné teorie relativity.

Poruchy křivosti dosud plochého prostoročasu vyvolané pohybem hmotného zdroje $T_{\mu\nu}$ se tedy šíří v podobě vln, neboť \square je d'Alembertův vlnový operátor. Toto vše je přehledně uvedeno na necelých třech úvodních stránkách Einsteinova příspěvků [8], viz obr. 1. V lednu 1918 pak dokončil práci [9] nazvanou již přímo *O gravitačních vlnách*, v níž svou analýzu vlastností gravitačních vln dále upřesnil a rozvinul.

Studujeme-li samotné šíření gravitačních vln *prázdným vesmírem*, mimo zdroj je $T_{\mu\nu}$ nulové a navíc vždy existuje vhodná vztážná soustava (splňující tzv. TT podmínku), kdy jsou poruchy křivosti $h_{\mu\nu}$ čistě transversální a bezestopé (neboli $h_{\alpha}^{\alpha} = 0$). V takovém případě se linearizované Einsteinovy rovnice (3) dále zjednodušují na

$$\square h_{\mu\nu} = 0. \quad (4)$$

Pokud se například rovinná gravitační vlna šíří ve směru osy z , jsou jediné nenulové složky deformací prostoročasu $h_{xx} = -h_{yy}$ a $h_{xy} = h_{yx}$. Vlna je příčná — rozkmitává tělesa pouze v rovině (x, y) kolmé na směr šíření — a má dvojí polarizaci: složka h_{xx} způsobuje kvadrupólovou deformaci kroužku testovacích částic v elipsy s osami x, y , zatímco pro složku h_{xy} jsou osy příslušných elips v příčné rovině otočené o 45 stupňů vůči x, y . Proto se hovoří o polarizacích „+“ a „×“. Více podrobností o tomto tématu v českém jazyce lze najít například v [6], [7], [19], [26], [5], [20], [21].

Gravitační vlny se tedy svým charakterem podobají běžným vlnám elektromagnetickým — i ony se šíří rychlostí světla, mají příčný charakter a dvojí polarizaci. Hlubší důvod tkví v tom, že Einsteinovy rovnice gravitačního pole (1) jsou svou matematickou strukturou analogií Maxwellových rovnic elektromagnetického pole — jsou to parciální diferenciální rovnice hyperbolického typu, byť v případě gravitace nelineární a mnohem složitější.

Z historického hlediska je pozoruhodné, že i v případě elektromagnetizmu to byl sám tvůrce dané teorie, kdo příslušné vlny předpověděl hned poté, co svou teorii koncepčně dobudoval a našel její polní rovnice. Opravdu: James Clerk Maxwell prezentoval svou *dynamickou teorii elektromagnetického pole* před britskou Královskou společností 8. prosince 1864, jeho příspěvek [15] tohoto názvu byl publikován v roce 1865, právě 50 let před Einsteinovou teorií gravitace dokončenou 25. listopadu 1915. Přičemž v šesté části svého fundamentálního článku, kterou nazval *Elektromagnetická teorie světla*, Maxwell z rovnic elektromagnetického pole ihned odvodil existenci elektromagnetických vln, příčných rozruchů pole šířících se vakuem rychlostí světla v souladu s vlnovou rovnicí — v dnešním zápisu $\square B_i = 0$, kde B_i jsou složky vektoru magnetického pole (stejná rovnice platí i pro složky vektoru elektrického pole E_i), což je jasná analogie rovnice (4) pro perturbace gravitačního pole.¹ V jediném díle tak sjednotil elektřinu, magnetizmus a optiku.

James Clerk Maxwell, velký teoretický fyzik a vizionář, si byl vědom, že také gravitace by se dala popsat jako specifické pole, jehož chování by mohlo být určeno diferenciálními rovnicemi, možná dynamickými. Snad to měl na mysli i tehdy, když během setkání vědců v Edinburghu v roce 1871 sepisoval závěrečnou sloku své ódy na přítele P. G. Taita, „hlavního muzikanta na kvaternionový operátor nabra“:

<p><i>Go to! prepare your mental bricks, Fetch them from every quarter, Firm on the sand your basement fix With best sensation mortar. The tower shall rise to heaven on high — Or such an elevation, That the swift whirl with which we fly Shall conquer gravitation.</i></p>	<p><i>Kupředu! připravte cihly svých myšlenek, Ze všech stran světa je sneste, Zpevněte základy na písku stojící Nejlepší maltou svých smyslů. Potom věž vyrostě do nebeských výšin — Až tam, kde létají jen ptáci, A v prudkém víru, ve kterém vneseme se, Překonáme i gravitaci.</i></p>
---	--

¹Podrobný popis Maxwellova článku [15] lze najít v [18].

Bylo však zapotřebí celých padesát let vývoje fyziky a dalšího génia, tentokrát Einsteina, aby byl Maxwellův „gravitačně-polní“ program úspěšně završen, a to formulací obecné relativity. A zatímco Maxwellova teoretická předpověď elektromagnetických vln byla experimentálně potvrzena v letech 1887–1888 Heinrichem Rudolfem Hertzem (a nezávisle Oliverem Lodgem) — a v 20. století z ní vzešla telekomunikační revoluce, jež hluboce změnila fungování a tvář našeho světa — na přímé potvrzení gravitačních vln jsme museli čekat celých 100 let. Proč? Inu, zkrátka proto, že gravitační vlny jsou *neporovnatelně slabší* než vlny elektromagnetické.

Je známo, že gravitační interakce je nejslabší fyzikální silou vesmíru. To znamená, že vazba mezi gravitačním polem a hmotou zdroje je velmi malá v porovnání s elektromagnetickým či jaderným působením. Účinnost, s jakou jsou gravitační vlny generovány nebo detekovány, je tudíž nepatrná. Zatímco elektromagnetické vlny lze generovat i zachycovat snadno (elektromagnetickým vysílačem je každá žárovka, velmi účinným detektorem například naše oči), reálné gravitační vlny jsou *nesmírně* slabé: jejich účinky jsou typicky řádu 10^{-22} a méně.

Proto lidstvu trvalo tak dlouho, než dokázalo sestrojít „gravitační přijímač“, detektor schopný přímým způsobem zachytit gravitační vlny přicházející z vesmíru . . .

2. Zdroje gravitačních vln a první pokusy o jejich detekci

Gravitační vlny vznikají všude tam, kde se nerovnoměrně mění tvar nebo poloha objektu, přesněji: když se hmota pohybuje zrychleně nesférickým způsobem. Zdroji gravitačních vln jsou proto zejména dvojhvězdy, v nichž rozložení hmoty pravidelně osciluje s periodou oběhu. Čím blíže k sobě jsou obě obíhající složky a čím jsou hmotnější, tím silnější jsou i generované vlny. Nejvýznamnějšími zdroji gravitačních vln jsou proto *velmi těsné binární systémy neutronových hvězd* (pulsarů) anebo *černých děr*. Vlny odnášejí energii a moment hybnosti, takže se oba objekty k sobě po spirále přibližují a jejich oběžná doba se zkracuje. Jak plyne z teoretických výpočtů a numerických simulací rovnic obecné relativity, nejmohutnější vlny vznikají na konci tohoto procesu, kdy se hvězdy nebo černé díry srazí a pak splynou. Ve specifickém časovém průběhu amplitudy, frekvence a polarizace je zakódována cenná informace o průběhu dramatického děje, kdy vstupují do hry velmi silná gravitační pole.

Gravitační vlny by měly vznikat i tehdy, když samotná hvězda náhle změni svůj tvar při *kolapsu jádra a následném výbuchu supernovy*. Kdybychom zachytili a dešifrovali vzniklý rozruch prostoročasové geometrie, otevřel by se nám unikátní pohled přímo do srdce hvězdného kolapsu. Jak ale ukázaly nedávné studie, tento proces probíhá docela symetricky, takže generované gravitační vlny jsou slabší, než se původně myslelo.

Kromě vln astrofyzikálního původu se očekává i existence *kosmologických* gravitačních vln zrozených ve velmi raném vesmíru. Pomocí těchto reliktních gravitačních vln bychom mohli získat obraz samotného velkého třesku a možná zjistit velkorozměrovou strukturu našeho kosmu.

Amplitudu gravitační vlny — její „velikost“ popsanou veličinami h_{ij} , kde indexy i, j označují prostorové složky x, y, z — lze spočítat z *kvadrupólové formule*. Tu odvodil již Albert Einstein ve svém průkopnickém článku [8] a upřesnil v [9],

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4} \frac{\ddot{Q}_{ij}}{r}, \quad \text{kde} \quad Q_{ij} = \int \left(x_i x_j - \frac{1}{3} x^2 \delta_{ij} \right) dm \quad (5)$$

je bezestopý kvadrupólový tenzor rozložení hmoty zdroje. Amplituda vlny tedy klesá jako $1/r$, kde r je vzdálenost od zdroje. S časovým zpožděním (daným konečnou rychlostí šíření) je dána *druhou časovou derivací* kvadrupólového tenzoru Q_{ij} . Navíc si povšimněte extrémně malého faktoru G/c^4 ve vzorci (5). To objasňuje, proč jsou amplitudy gravitačních vln ze vzdálených astrofyzikálních zdrojů zde na Zemi tak nesmírně slabé.

Z (5) můžeme vyvodit řádový odhad velikosti perturbací h_{ij} . Odhlédneme-li od jejich tenzorového charakteru a omezíme se pouze na jejich typickou velikost, kterou označíme symbolem h , lze provést aproximace $|\ddot{Q}_{ij}| \leq \frac{d^2}{dt^2} \int x^2 dm \sim \int (\frac{d}{dt}x)^2 dm \sim mv^2 \sim 2E$, kde E je kinetická energie pohybu hmoty zdroje. Protože sférický pohyb hmoty gravitační vlny negeneruje, musíme vzorec omezit jen na *nesférickou* část pohybové energie zdroje $E_{\text{nesfér}}$, čímž dostáváme *horní odhad*

$$h \sim \frac{4G}{c^4} \frac{E_{\text{nesfér}}}{r} = 2 \times 10^{-17} \left(\frac{E_{\text{nesfér}}}{M_{\odot} c^2} \right) \left(\frac{30\,000 \text{ světelných let}}{r} \right). \quad (6)$$

Kdyby tedy například v naší Galaxii v typické vzdálenosti $r = 30\,000$ světelných let explodovala supernova a předala 1% své klidové hmotnosti $2M_{\odot}$ do energie gravitačních vln, tedy $E_{\text{nesfér}} = 0,02 M_{\odot} c^2$, byla by jejich amplituda zde na Zemi maximálně jen $h \sim 4 \times 10^{-19}$. Navíc je nutno uvážit, že k takové události dochází v naší Galaxii jen velmi vzácně, v průměru tak jednou za pár set let. Chceme-li detekovat gravitační vlny z výbuchů supernov častěji, musíme se dívat do větších hlubin vesmíru: počet událostí zhruba roste úměrně objemu, tedy r^3 , současně však amplituda vln klesá jako $1/r$. Nejbližší obří kupa galaxií v Panně čítající snad až 2000 galaxií je od nás vzdálena skoro 60 milionů světelných let. Mohli bychom tedy odhadnout, že v tak velkém množství galaxií vybuchne možná deset supernov do roka, ale amplituda jimi generovaných gravitačních vln bude dle odhadu (6) menší nežli $h \sim 2 \times 10^{-22}$. Podobné odhady a zejména nedávné exaktní numerické simulace ukazují, že také gravitační vlny generované binárními systémy černých děr či neutronových hvězd nemají zde na Zemi o moc větší amplitudu.

Stojíme tedy před takřka neřešitelným technickým úkolem sestavit přístroj, jehož citlivost v měření vzájemných vzdáleností těles bude lepší než 10^{-22} . Ono bezrozměrné číslo h , popisující amplitudu vlny v daném místě, totiž přímo vyjadřuje, jakou *relativní změnu vlastní vzdálenosti* dvou testovacích těles (či velikosti objektu) gravitační vlna — deformace prostoročasové geometrie — svým průchodem vyvolá. Můžeme psát

$$h = \frac{\Delta L}{L}, \quad (7)$$

kde L je počáteční vzdálenost obou těles (původní velikost objektu), zatímco ΔL je změna této vzdálenosti. Pokud je amplituda vlny $h = 10^{-21}$, je to, jako bychom chtěli proměřovat vzdálenost Země od Slunce s přesností rozměru jediného atomu. Přičemž reálné vlny jsou typicky ještě mnohem slabší a ztrácejí se v kakovonii seismického, civilizačního a přístrojového šumu . . .

Jak již bylo řečeno v úvodu, o přímou detekci gravitačních vln experimentátoři usilovali přes padesát let. Honbu za nesnadným cílem odstartovalo počátkem 60. let průkopnické úsilí Josepha Webera (1919–2000). S kolegy navrhl a sestavil několik *rezonančních detektorů*, velkých hliníkových válců, jež se měly průchodem gravitační vlny

konkrétní frekvence rozkmitat v důsledku rezonančního efektu. Přestože byly Weberovy detektory na svou dobu velmi citlivé (snad až $h \sim 10^{-16}$) a k eliminaci lokálního šumu užívaly koincidenčních měření vzdálených válců (v Marylandu a u Chicaga), na zachycení vln generovaných astrofyzikálními zdroji zdaleka nestačily. V roce 1970 Weber sice ohlásil objev vln údajně přicházejících z centra naší Galaxie [29], [32], [13], [14], jeho výsledky se ale nikomu nepodařilo zreprodukovat, nebyly všeobecně akceptovány a nakonec jim věřil už jen on sám. A ani mnohem citlivější nástupci Weberových válců úspěšní nebyli, přestože systémy využívaly kvantové magnetometry SQUID a tepelný šum potlačovaly chlazením na velmi nízké teploty — jmenujme například experimenty EXPLORER (CERN), ALLEGRO (Louisiana), NIOBE (Perth), NAUTILUS (Frascati) či AURIGA (Legnaro). Hlavní nevýhodou rezonančních detektorů je zejména jejich naladění na specifickou rezonanční frekvenci (většinou kolem 900 Hz) a tedy neschopnost měřit v širokém frekvenčním pásmu. To pochopitelně snižuje jejich použitelnost, neboť řada astrofyzikálních zdrojů generuje gravitační vlny, při nichž se frekvence zcela charakteristickým způsobem rychle mění. V případě prvního pozorovaného signálu GW150914 z binárního systému vzrostla frekvence gravitační vlny z 35 Hz na 150 Hz během pouhých 200 ms. Takový signál nedokážou rezonanční detektory zaznamenat.

3. Binární pulsar a interferometrické detektory

Do neúspěšných a čím dál více frustrujících snah zaznamenat gravitační vlny pomocí stále sofistikovanějších rezonančních detektorů vstoupil doslova jako pověstný *deus ex machina* nečekaný a zásadní astronomický objev: v roce 1974 Russell Hulse a Joseph Taylor pomocí radioteleskopu v Arecibu objevili a identifikovali *binární pulsar PSR B1913+16* [11], [3]. Jeho pečlivé sledování v průběhu následujících let [27], [28] poskytlo *zcela přesvědčivý důkaz reálné existence gravitačních vln*.

Jedná se totiž o systém dvou neutronových hvězd s hmotnostmi zhruba $1,4 M_{\odot}$, které obíhají velmi blízko sebe po protáhlé eliptické dráze ($e = 0,6$) s periastrém 0,7 mil. kilometrů, apoastrém 3,1 mil. kilometrů a periodou oběhu necelých 8 hodin. Dlouhodobá měření jednoznačně prokázala, že perioda oběhu tohoto binárního systému se soustavně zkracuje, a to o hodnotu $76 \mu\text{s}$ za rok. Což je přesně hodnota, jakou pro takový systém předpovídá Einsteinova obecná teorie relativity (v rámci chyb měření dnes menších než 0,2%). Vyzařováním gravitačních vln se totiž ze systému odnáší vazebná energie, takže se obě složky spirálovitě přibližují o 3 metry za rok a perioda jejich oběhu klesá. Za tento velmi významný objev byli jeho autoři v roce 1993 právem poctěni Nobelovou cenou.²

Tento astrofyzikální důkaz existence gravitačních vln a současně další významné ověření platnosti Einsteinovy obecné relativity byl pro komunitu v 80. letech obrovskou vzpruhou. Z popela Weberových neúspěšných pokusů se začal rodit nový obor experimentální fyziky — gravitační astronomie. Ambicí nebylo nic menšího nežli studium astrofyzikálních systémů a procesů *přímým měřením jejich silných dynamických*

²Vyzařování gravitačních vln bylo potvrzeno i v dalších binárních systémech, zejména u dvojitého pulsaru PSR J0737+3039 objeveného v roce 2003. Mimochodem, také Země při svém oběhu kolem Slunce budí gravitační vlny, takže se poloměr její dráhy zmenšuje. Ale jenom nepatrně: za celou dobu své existence se Země v důsledku tohoto efektu přiblížila Slunci o pouhý milimetr.

gravitačních polí. K tomu ale bylo nezbytné přijít se zcela jiným, perspektivnějším principem detekce efemérních gravitačních vln. Na scénu vstoupily supercitlivé *obří laserové interferometry.*

Interferometr michelsonovského typu se dvěma kolmými rameny je pro účely detekce gravitačních vln ideální zařízení. Efekt vlny coby slapové deformace prostoročasu³ je totiž takový, že v příčné rovině periodicky zkracuje a prodlužuje vzdálenost mezi centrálním polopropustným zrcátkem a plně odrazivým testovacím tělesem volně zavěšeným na konci jednoho ramene, zatímco současně zvětšuje a zmenšuje vzdálenosti ve druhém rameni interferometru kolmém na rameno první. Výsledkem je periodická změna interferenčního signálu ve fotodetektoru, která je přímo úměrná amplitudě h gravitační vlny. A navíc je to širokopásmový detektor — dokáže zachytit gravitační vlny v dost širokém intervalu frekvencí [24], [1], [17], [19], [20].

Možnosti optického interferometru pro přímou detekci gravitačních vln analyzoval již počátkem 70. let Rainer Weiss z MIT. Koncem 80. let pak se svými kolegy spojil síly se skupinou kolem významného teoretika Kipa Thorna a experimentálního fyzika Ronalda Drevera z Caltechu: v Pasadeně postavili prototyp interferometrického detektoru gravitačních vln MARK 2 s délkou ramen 40 metrů, který dosáhl skvělé citlivosti 10^{-18} .

Obdobná zařízení byla pak v 90. letech stavěna a testována i v Evropě, konkrétně v Garchingu a Glasgow ve skupinách kolem Karstena Danzmanna, Jamese Hougha a Bernarda Schutze, a také v Japonsku. V roce 2000 byl v Tokiu dokončen první detektor nové generace TAMA 300 s délkou ramen 300 m, o rok později potom v Sarstedtu u Hannoveru dvakrát tak velký německo-britský interferometr GEO 600, průkopník mnoha nových technologií.

Ještě ambicióznější byly projekty laserových interferometrů kilometrových rozměrů: americký projekt LIGO s rameny 4 km (viz www.ligo.caltech.edu) a italsko-francouzský Virgo (který byl postaven nedaleko Pisy u městečka Cascina) s rameny 3 km (viz www.virgo.infn.it). Více informací o těchto interferometrech lze najít v autorově předchozích článcích [17], [19], [22], [23].

LIGO, jehož idea se zrodila v 70. letech, to ale rozhodně neměl lehké. Čelil řadě oponentů, zejména kvůli vysokým nákladům ve výši stovek milionů dolarů a kvůli nejistotě, zda vůbec může být úspěšný. Americká Národní vědecká nadace NSF projekt LIGO dvakrát zamítla a v roce 1990 se dokonce nedostal ani do pořadníku astronomických projektů, které by měly mít prioritu ve státní podpoře.

Situace se změnila až zásluhou binárního pulsaru PSR B1913+16, jenž poskytl jasný důkaz existence gravitačních vln, posvěcený Nobelovou cenou za rok 1993. Třetí návrh projektu LIGO byl v roce 1992 konečně schválen, dostal počáteční podporu 250 milionů dolarů a mohl se rozeběhnout.

Observatoř LIGO tvoří dva téměř identické interferometrické systémy vzdálené od sebe 3 tisíce kilometrů. Jeden byl postaven v Hanfordu (stát Washington), druhý v Livingstonu (stát Louisiana), viz obr. 2, a pracují v koincidenčním režimu, aby bylo možné lépe rozpoznat místní rušivé vlivy.

Začátkem nového tisíciletí byly složité interferometry LIGO a Virgo postupně dokončovány a spouštěny. Mezi roky 2002 až 2010 pak LIGO uskutečnilo šest cyklů měření označovaných S1 až S6 [1], při nichž byla nasbírána a poté analyzována vědecká

³Viz popis deformací kroužku testovacích částic v elipsy pod vzorcem (4).



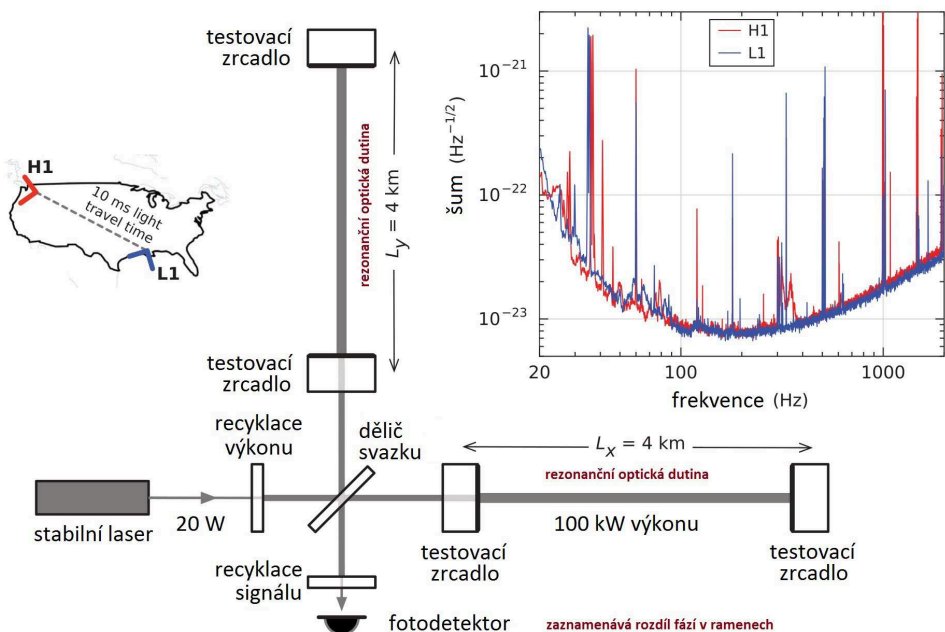
Obr. 2. Snímek čtyřkilometrového interferometru LIGO v Hanfordu (vlevo) a v Livingstonu (vpravo), USA. Jsou od sebe vzdáleny 3000 km a pracují v koincidenčním režimu. Zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

data. V mnoha obdobích probíhala současná měření detektory GEO 600 a Virgo. Citlivost detektorů se stále zlepšovala, celkově o dva řády až na hodnotu $h = 10^{-22}$ v intervalu 100–300 Hz. Gravitační vlny se přesto zachytit nepodařilo. Vlny ze závěrečných stádií binárních soustav, následných srážek černých děr a neutronových hvězd, jejich otřesů nebo změn rotace, kolapsu jader supernov či stochastického pozadí jsou zkrátka obvykle mnohem slabší. Náročné numerické simulace nedávno opravdu potvrdily, že srážky dvou černých děr či neutronových hvězd nejsou tak „divoké“, jak stavitelé detektorů původně očekávali.

Jedinou nadějí tedy bylo dále zvýšit citlivost interferometrů o řád až na hodnotu 10^{-23} . Je pozoruhodné, že za dané situace se podařilo přesvědčit NSF, aby uvolnilo dalších 200 milionů dolarů na stavbu tzv. Advanced LIGO. Paralelně s tím začala rekonstrukce evropského interferometru na tzv. Advanced Virgo.

Ambiciózní Advanced LIGO bylo dokončeno v září roku 2015 a dále posunulo hranice technologických možností lidstva. Parametry nových interferometrických detektorů, umístěných ve stejné vakuové infrastruktuře jako původní LIGO, jsou opravdu fantastické, jak je vidět ze spektra dosažené citlivosti na obr. 3 (vpravo nahoře). Úspěchu bylo dosaženo vyváženou souhrou spousty dílčích vylepšení. Šum na nízkých frekvencích řádově 10 Hz byl potlačen platformou s aktivní seismickou izolací a zavěšením hlavních zrcadel na sofistikované čtyřkyvadlo. Na frekvencích kolem 100 Hz užitím těžších a kvalitnějších zrcadel z křemenného skla (o průměru 34 cm a hmotnosti 40 kg místo původních 11 kg, s chybami povrchu $< 0,1$ nm) zavěšených na křemenných vláčknech (nikoli jen ocelových strunách) a jejich pokrytím dielektrickými vrstvami s velmi malými ztrátami a šumem. Omezení na vyšších frekvencích řádově 1 000 Hz bylo potlačeno užitím výkonnějšího, vysoce stabilního laseru (v budoucnu až 125 W namísto původních 10 W) i dalším snížením tlaku ve vakuových trubicích na hodnotu menší než $1 \mu\text{Pa}$.

Původní optická soustava Fabryových–Perotových rezonačních dutin byla doplněna o další zrcadla zajišťující recyklaci výkonu i recyklaci signálu, jež umožňuje dle potřeby ladit frekvenční charakteristiku detektoru. Výsledkem je výrazně lepší odstup signálu od šumu. Elektrostatický systém ESD umístěný na pomocných reakčních zrcadlech dokáže manipulovat polohou hlavních zrcadel s přesností 10^{-18} m, přičemž tyto posuvy jsou plně pod kontrolou díky fotonovému kalibračnímu systému. Stav prostředí je neustále monitorován soustavou seismometrů, akcelerometrů, mikrofonů, magneto-



Obr. 3. Optické schéma interferometrů Advanced LIGO (vlevo dole) a jejich spektrální citlivost (vpravo nahoře) v době objevu gravitačních vln. Interferometry v Hanfordu (H1-červeně) i v Livingstonu (L1-modře) dosahují ve frekvenčním rozsahu 100–400 Hz neuvěřitelné citlivosti $10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$. Převzato z [2] a upraveno.

metrů, radiopřijímačů, senzorů počasí, kosmického záření atd., jež pomáhají eliminovat falešné signály. Dalších zhruba 100 000 kanálů zaznamenává stav řídicího systému interferometru a jeho fungování. Sběr dat je synchronizován GPS časem s přesností lepší než $10 \mu\text{s}$ a verifikován atomovými hodinami i sekundárním GPS přijímačem na obou observatořích.

4. První přímá detekce gravitačních vln: zdroj GW150914

Vynaložené úsilí, trpělivost a značné finanční prostředky se rozhodně vyplatily: ihned poté, co byly oba nové interferometry Advanced LIGO v Hanfordu a Livingstonu uvedeny v září roku 2015 do provozu (bylo to dokonce pár dní před vlastním zahájením vědeckých měření), učinily objev, který vstoupil do dějin.

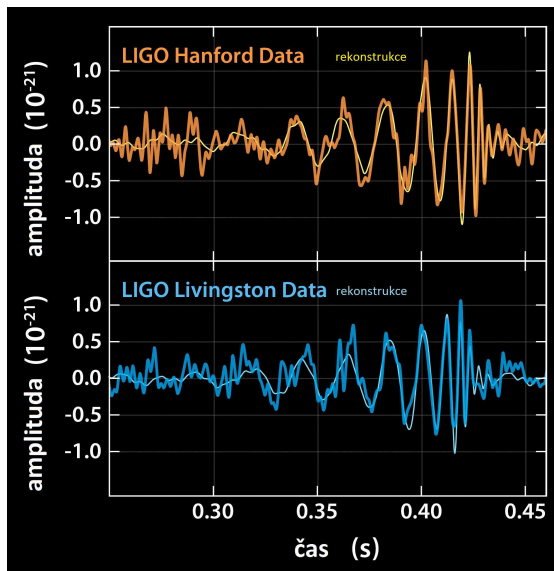
V pondělí 14. září 2015 v 09.50.45 UTC zachytily obě stanice jasný a co do profilu vlny shodný signál, viz obr. 4, který dostal označení GW150914.⁴ Trval zhruba 150 milisekund a měl zcela typický charakter takzvaného *čirpu* generovaného v závěrečných stadiích vývoje binárního systému dvou černých děr, kdy až do okamžiku jejich srážky roste frekvence a amplituda signálu, a pak nastává rychlý pokles amplitudy při takřka konstantní frekvenci vlny. Signál dorazil nejprve do interferometru v Livingstonu,

⁴Nomenklatura je zjevná: GW je zkratka anglického „gravitational wave“, tedy „gravitační vlna“, následující tři dvojice čísel označují rok, měsíc a den zachycení signálu.

o 7 milisekund později do Hanfordu. Z časového zpoždění a vzdálenosti obou stanic bylo možné vymezit část kružnice, kde ležel zdroj signálu: na jižní obloze zhruba v oblasti kolem Magellanových oblaků. Ve skutečnosti však *zdrojem této gravitační vlny byla srážka dvou velkých černých děr* o hmotnostech $36 M_{\odot}$ a $29 M_{\odot}$, k níž došlo mnohem dál, než leží Magellanova oblaka: více než miliardu světelných let od nás kdesi v hlubokém vesmíru.

Tak zní závěr dlouhé a pečlivé analýzy signálu GW150914, kterou provedly týmy LIGO Scientific Collaboration (LSC) a Virgo Collaboration. Proto byl objev ohlášen až po 5 měsících na tiskové konferenci 11. 2. 2016 ve Washingtonu, DC. Všechny zásadní informace byly současně zveřejněny v odborném článku [2] v prestižním fyzikálním časopise Physical Review Letters (má 1 010 autorů ze 133 vědeckých institucí po celém světě) a v sérii 12 ještě podrobnějších prací, které jsou všechny veřejně dostupné na stránce losc.ligo.org/events/GW150914/.

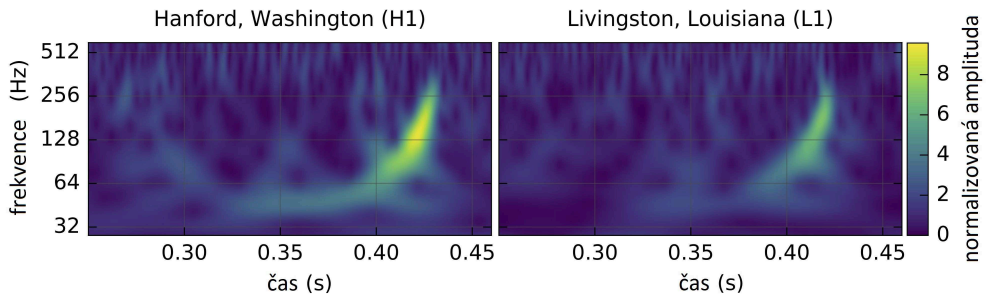
Jak je vidět z obr. 4, signál GW150914 zaznamenaný oběma stanicemi je opravdu čírp. Do okamžiku srážky černých děr bylo zaznamenáno zhruba 8 zákmitů vlny, což odpovídá posledním 4 oběhům obou černých děr kolem sebe. Během toho vzrostla frekvence gravitační vlny z 35 Hz na 150 Hz (kdy její vlnová délka činila 2 000 km) a maximální amplituda dosáhla hodnoty $h_{\max} = 1 \times 10^{-21}$, čemuž odpovídala deformace prostoročasu v ramenech detektorů pouhých 0,002 femtometru.



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 velkých černých děr. Pevzato z [2].

Čírpový charakter je dobře vidět i na spektrogramu: diagramu, v němž se vodorovně vynáší čas, svisle frekvence signálu a barevně jeho amplituda, viz obr. 5.

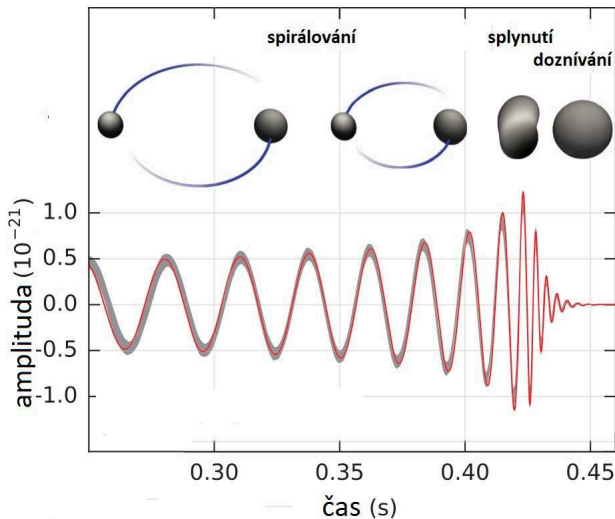
K analýze signálu bylo použito několik nezávislých statistických postupů. Hlavní metodou bylo porovnání profilu gravitační vlny GW150914 s rozsáhlou databankou



Obr. 5. Spektrogram gravitační vlny GW150914. Vlevo Hanford, vpravo Livingston [2]

250 000 čírpových „vzorových profilů“. Vlastně se jedná o jakousi „kosmickou daktyloskopii“, kdy zaznamenaný signál hraje roli otisků prstů, které se porovnávají se specifickými profily gravitačních vln generovanými binárními systémy černých děr různých hmotností, spinů, sklonu oběžné dráhy atd. Tyto profily byly předtím získány přímo z rovnic Einsteinovy teorie gravitace metodami numerické relativity a sofistikovanou analytickou perturbační metodou EOB (zkratka tzv. „effective-one-body formalism“).

Fyzikální systém dvou černých děr je popsán 17 parametry: 8 jich popisuje vlastní zdroj (hmotnosti a vektory rotačních momentů hybnosti obou černých děr), dal-



Obr. 6. Charakteristický „otisk prstů“ srážky dvou černých děr má 3 fáze: spirálování – splynutí – doznívání. Jak plyne z numerických i analytických simulací rovnic obecné relativity, amplituda gravitačních vln a jejich frekvence až do okamžiku srážky narůstají (detekujeme „čírp“), po splynutí obou černých děr v jednu velkou signál rychle odezní (v daném případě během 4 ms), což odpovídá tlumeným oscilacím nově zrozené Kerroy černé díry. Přesně takový průběh měla první pozorovaná gravitační vlna GW150914 (dole). Převzato z [2].

ších 9 určuje vzájemný vztah zdroje a detektoru (luminozitivní vzdálenost, rektascenze, deklinace, sklon oběžné dráhy, dva parametry popisující excentricitu dráhy, polarizace, čas a fáze srážky). Nalezení optimálního vzoru s konkrétní volbou parametrů, jehož průběh je znázorněn na obr. 6, a jeho verifikace byly výpočetně dosti náročné: tým uvádí, že si to vyžádalo 50 milionů CPU hodin (což odpovídá 100 dnům zpracování pomocí 20 000 osobních počítačů). Statistická analýza naměřeného signálu též ukázala, že profil zaznamenaný stanicemi (poměr signál-šum byl 24) by mohl náhodně nastat ani ne jednou za 200 000 let, což odpovídá statistické významnosti větší než 5σ .

Tímto způsobem bylo věrohodně zjištěno, že zdrojem zachyceného signálu byla srážka a splnutí dvou černých děr o hmotnostech $36 M_{\odot} (\pm 5 M_{\odot})$ a $29 M_{\odot} (\pm 4 M_{\odot})$, přičemž maximální hodnota parametru orbitální rychlosti činila 0,6 rychlosti světla. Výsledkem splnutí byla jediná rotující černá díra o hmotnosti $M = 62 M_{\odot} (\pm 4 M_{\odot})$ popsaná Kerrovým prostoročasem s hodnotou bezrozměrného spinového parametru $a = c|S|/(GM^2) = 0,67$. Černá díra tedy rotuje, nikoli však extrémně rychle. Rozdíl počáteční a koncové hmoty-energie o velikosti $3 M_{\odot} (\pm 0,5 M_{\odot})$ se vyzářil právě ve formě gravitačních vln. Vzdálenost zdroje byla stanovena na $1,2 \pm 0,5$ miliardy světelných let (410 Mpc),⁵ kterou již můžeme označit za kosmologickou (tomu odpovídá rudý posuv zhruba $z = 0,1$). Okamžitý gravitační výkon zdroje byl proto opravdu neuvěřitelný: $200 M_{\odot} c^2$ za sekundu, tedy desetkrát více než v onen okamžik svítily všechny hvězdy ve všech galaxiích našeho vesmíru!

Pro přehlednost ještě v tabulce 1 shrňme hlavní parametry události GW150914 včetně rozpětí daných možnými chybami měření a analýzy signálu.

5. Nadějná budoucnost

První přímá detekce gravitačních vln a současně první pozorování srážky dvou černých děr je vědeckou událostí prvního řádu. Nepochybně se zapíše do historie fyziky a astronomie. Obecně se předpokládá, že objev bude oceněn Nobelovou cenou. Nejspíše ji získá trio otců-zakladatelů projektu LIGO: Kip Thorne, Rainer Weiss a Ronald Drever.

Nyní čekáme, zda týmy LIGO Scientific Collaboration a Virgo Collaboration oznámí pozorování dalších gravitačních vln, které mohly interferometry zaznamenat od října 2015 do ledna 2016. Bude velmi zajímavé vědět, zda událost GW150914 byla velmi vzácná anebo jich lze na dané citlivosti detekovat více. A jestli ano, zda byly z podobných zdrojů. Statistika různých událostí bude pro astronomii nesmírně důležitá a zruší staletou hegemonii elektromagnetických vln při studiu vesmíru.

Na podzim roku 2016 začnou oba interferometry Advanced LIGO opět měřit. Pravděpodobně ještě letos se k nim připojí evropský detektor Advanced Virgo srovnatelných technických parametrů a také o něco menší GEO600. Pomocí tří nebo dokonce čtyř interferometrů rozmístěných po zeměkouli bude možné lokalizovat zdroje gravitačních vln s přesností možná jen pár úhlových stupňů, což může otevřít cestu k jejich identifikaci observatořemi elektromagnetickými (případně gama záblesky, rentgenové, ultrafialové, optické, infračervené nebo rádiové záření) či korelovat impulzy gravitačních vln se sprškami neutrin.

⁵S tím souhlasí hrubý horní odhad daný vzorcem (6): podle něj pro $E_{\text{nesfér}} = 3 M_{\odot} c^2$ a $h = 10^{-21}$, vzdálenost $r \sim 6 \times 10^4 \times 30\,000$ světelných let $\sim 1,8$ miliardy světelných let.

zaznamenáno detektory	LIGO, observatoře L1 a H1
datum a čas	14. září 2015 v 9.50.45 UTC
doba trvání	zhruba 200 ms
maximální amplituda vlny	1×10^{-21}
maximální deformace prostoročasu	2×10^{-18} m
typ zdroje	binární systém černých děr
hmotnost primární složky	32–41 M_{\odot}
hmotnost sekundární složky	25–33 M_{\odot}
celková hmotnost před srážkou	60–70 M_{\odot}
hmotnost černé díry po srážce	58–67 M_{\odot}
velikost černé díry po srážce	180 km
spin černé díry po srážce	0,57–0,72
maximální rychlost	0,6 c
frekvence dozívání	250 Hz
doba dozívání	4 ms
energie vyzářená gravitačními vlnami	2,5–3,5 $M_{\odot}c^2$
zářivost v maximu	$3,6 \times 10^{49}$ W
luminozitní vzdálenost zdroje	0,8–1,9 miliardy světelných let
rudý posuv zdroje	0,054–0,136
pravděpodobnost falešného poplachu	menší než 1 ku 5 milionům
v souladu s obecnou relativitou ?	ano, prošla všemi testy

Tab. 1. Hlavní fyzikální parametry události GW150914

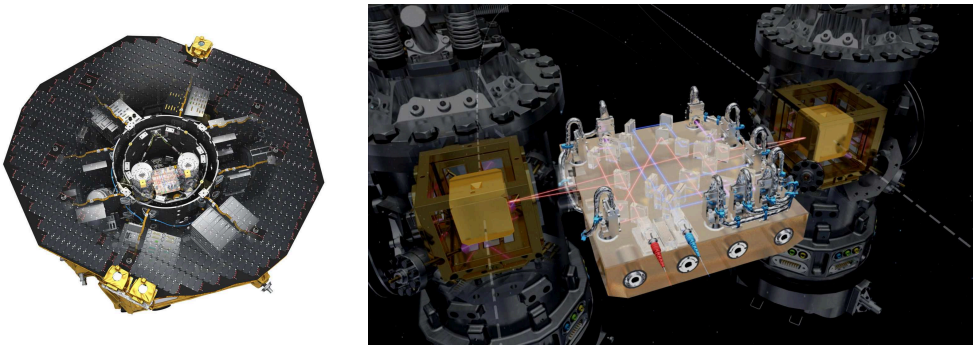
Za pár let jim pomůže také Advanced LIGO v Indii (projekt byl schválen týden po oznámení první detekce GW150914) a ještě v tomto desetiletí japonský kryogenní detektor KAGRA (KAmioka GRAvitational wave detector) s rameny dlouhými 3 kilometry, který se právě buduje v podzemním masívu dolu Kamioka. Existuje i evropská studie ET (Einstein gravitational-wave Telescope) pokročilého interferometrického detektoru 3. generace: uvažuje se o trojúhelníkové konfiguraci několika detektorů s desetikilometrovými rameny v podzemí, jejichž safírová zrcadla by byla chlazena na nízké teploty. Citlivost toho zařízení by mohla dosáhnout neuvěřitelných 10^{-24} , doufejme, že už někdy po roce 2020.

V dlouhodobé perspektivě se jistě dočkáme také interferometru LISA (Laser Interferometer Space Antenna) v kosmickém prostoru, který plánuje Evropská kosmická agentura ESA, viz stránky sci.esa.int/lisa. Mají ho tvořit tři družice ve vrcholech pomyslného rovnostranného trojúhelníka o stranách řádově milion kilometrů, obíhající kolem Slunce ve vzdálenosti 1 au. Vzájemná vzdálenost družic se bude s pikometro-

vou přesností proměřovat laserovou interferometrií. Pro potlačení negravitačních vlivů bude použita technika aktivního udržování družice na geodetické „bezsílové“ trajektorii: uvnitř každé bude volné referenční těleso (krychle o hranách 46 mm ze slitiny platiny a zlata) a družice bude jemnými tryskami korigovat svůj pohyb tak, aby poloha krychle vznášející se ve vakuové dutině uvnitř ní zůstávala konstantní. Krychle bude současně optickým srdcem družice — bude se od ní odrážet laserový paprsek interferometru, více podrobností viz [22].

Hlavní předností LISA bude absence seismického rušení, díky čemuž se stane robustním detektorem slabých gravitačních vln, ale především nám otevře zcela jiné, *nízkofrekvenční* gravitační okno do vesmíru. Zatímco detektory na zemském povrchu mohou detekovat frekvence zhruba od 10 Hz do 1000 Hz, LISA má mít frekvenční rozsah 0,0001 Hz až 0,1 Hz. Právě v této milihertzové oblasti přitom vydává gravitační záření velké množství zajímavých a prokázaných astrofyzikálních zdrojů, především kompaktních binárních systémů v naší Galaxii a srážejících se velmi hmotných černých děr v jádrech dalekých galaxií [26].

LISA byla již předběžně vybrána jako jedna z velkých budoucích vědeckých misí Evropské kosmické agentury ESA s plánovanou realizací po roce 2030. Bohužel, v roce 2010 od projektu odstoupila americká NASA, takže projekt s rozpočtem 1 miliardy EUR bude Evropa muset realizovat sama. Naštěstí je ve svém úsilí vytrvalá: již byla postavena technologická sonda LISA Pathfinder (tedy *Předvoj LISY*), viz obr. 7, která má provést klíčové testy (viz www.elisascience.org a lisapathfinder.org).



Obr. 7. Technologická družice LISA Pathfinder. Vlevo celkový „rentgenový“ pohled, vpravo detail srdce sondy, který tvoří dvě krychle z platiny a zlata a optická lavice s interferometrem mezi nimi. Vzdálenost obou volně se vznášejících testovacích těles se proměřuje s pikometrovou přesností. Zdroj: ESA/ATG medialab.

LISA Pathfinder úspěšně odstartovala 3. 12. 2015 a od března 2016 provádí v okolí Lagrangeova libračního bodu L1 soustavy Slunce-Země stovky testů, které rozhodnou o dalším osudu velkého evropského projektu, nyní přejmenovaného na eLISA — Evolved Laser Interferometer Space Antenna. Podle posledních zpráv náročná mise sondy LISA Pathfinder zatím probíhá bez problémů.

6. Závěrem

Čtvrtek 14. září 2015 se do dějin vědy zapíše jako přelomový den, kdy byly poprvé přímo detekovány gravitační vlny. K překvapení mnohých byl signál GW150914 tak zřetelný a jasný, že mohl být přesvědčivě interpretován jako následek srážky a splnutí dvou velmi hmotných černých děr. Po půlstoletí velkého úsilí tím astronomie konečně vstoupila do éry přímé detekce dynamických gravitačních polí vzdálených objektů — srážejících se černých děr, neutronových hvězd či explozí supernov. Čerstvě zrozená astronomie gravitačních vln má navíc slibnou budoucnost, neboť další interferometrické detektory se nyní staví a další, ještě lepší se plánují.

Přímá detekce gravitačních vln je tou nejlepší zprávou pro obecnou relativitu, která právě oslavila své 100. narozeniny. Einsteinoва teorie gravitace byla v minulosti testována již mnohokrát. Tentokrát však byla ověřena principiálně odlišnou metodou, kdy do hry zásadním způsobem vstupují nelinearity extrémně silných gravitačních polí a dynamická povaha prostoročasu.

S pomocí nejnovějších technologií nám tato elegantní a mocná teorie právě otevřela zcela nové okno, jímž lze pozorovat hlubiny a dávnou minulost vesmíru. Kdoví, co všechno v něm nyní spatříme.

Poděkování. Velice rád bych poděkoval kolegům z Ústavu teoretické fyziky MFF UK v Praze, sdružených nyní v Centru Alberta Einsteina pro gravitaci a astrofyziku, zejména doc. Semerákovi a dr. Ledvinkovi za jejich komentáře k tomuto textu.

Děkuji též dlouholeté podpoře grantu GAČR P203-12-0118 *Prostoročasy a pole ve vícerozměrné a klasické teorii gravitace* a České fyzikální společnosti JČMF.

A ještě ryze osobní poznámka. Do časopisu PMFA jsem o problematice gravitačních vln i pátrání po nich napsal v letech 1995 a 2009 dva rozsáhlejší články [17], [22]. Je mi ctí, že jsem nyní v roce 2016 dostal možnost napsat třetí v pořadí, věnovaný jejich první přímé detekci.

L i t e r a t u r a

- [1] ABBOTT, B. P., et al.: *LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory*. Rep. Prog. Phys. 72 (2009), 076901, 25 pp.
- [2] ABBOTT, B. P., et al.: *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*. Phys. Rev. Lett. 116 (2016), 061102, 16 pp.
- [3] BIČÁK, J.: *Nová relativistická laboratoř — pulsar ve dvojhvězdě*. Čs. čas. fyz. A25 (1975), 628–629.
- [4] BIČÁK, J.: *Einstein a Praha*. JČSMF, Praha, 1979.
- [5] BIČÁK, J.: *Zářivé prostoročasy*. Čs. čas. fyz. A50 (2000), 249–251.
- [6] BIČÁK, J., RUDENKO V. N.: *Teorie relativity a gravitační vlny*. Univerzita Karlova, Praha, 1985.
- [7] DVOŘÁK, L.: *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru*. SPN, Praha, 1984.
- [8] EINSTEIN, A.: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*. Preuss. Akad. Wiss. Sitz. 1 (1916), 688–696.

- [9] EINSTEIN, A.: *Über Gravitationswellen*. Preuss. Akad. Wiss. Sitz. 1 (1918), 154–167.
- [10] FÖLSING, A.: *Albert Einstein*. Volvox Globator, Praha, 2001.
- [11] HULSE R. A., TAYLOR J. H.: *Discovery of a pulsar in a binary system*. *Astrophys. J.* 195 (1975), L51–L53.
- [12] ISAACSON, W.: *Einstein: jeho život a vesmír*. Paseka, Praha–Litomyšl, 2010.
- [13] LANGER, J.: *Pozorování gravitačních vln*. *Čs. čas. fyz.* A24 (1974), 501–504.
- [14] MARVANOVÁ, V.: *Detekce gravitačních vln*. *PMFA* 21 (1976), 276–290.
- [15] MAXWELL, J. C.: *A dynamical theory of the electromagnetic field*. *Roy. Soc. Trans.* 155 (1865), 459–512.
- [16] PAIS, A.: *‘Subtle is the Lord ...’. The science and the life of Albert Einstein*. Oxford University Press, Oxford, 1982.
- [17] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a možnosti jejich detekce*. *PMFA* 40 (1995), 272–288.
- [18] PODOLSKÝ, J.: *Zrození Maxwellovy teorie a formalizmu vektorové analýzy*. *PMFA* 43 (1998), 237–248.
- [19] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny: výzva pro příští století*. *Čs. čas. fyz.* A49 (1999), 113–119.
- [20] PODOLSKÝ, J.: *Teorie gravitačního záření*. *Čs. čas. fyz.* A55 (2005), 86–93.
- [21] PODOLSKÝ, J.: *Asymptotická struktura prostoročasů s kosmologickou konstantou*. *Čs. čas. fyz.* A55 (2005), 94–101.
- [22] PODOLSKÝ, J.: *LISA: nová naděje lovců gravitačních vln*. *PMFA* 54 (2009), 201–211.
- [23] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a jejich detektory*, *Astropis Speciál* 17 (2010), 34–37.
- [24] ROBERTSON, N. A.: *Laser interferometric gravitational wave detectors*. *Classical Quantum Gravity* 17 (2000), R19–R40.
- [25] SEMERÁK, O.: *Albert Einstein a století obecné relativity*. *PMFA* 60 (2015), 215–238.
- [26] SCHUTZ, B. F.: *Zdroje gravitačních vln nízkých frekvencí*. *Čs. čas. fyz.* A49 (1999), 120–132.
- [27] TAYLOR J. H., WEISBERG J. M.: *Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16*. *Astrophys. J.* 345 (1989), 434–450.
- [28] VANÝSEK, V.: *Nobelova cena za fyziku 1993*. *PMFA* 39 (1994), 223–226.
- [29] WEBER, J.: *Detection and generation of gravitational waves*. *Phys. Rev.* 117 (1960), 306–313.
- [30] WILL, C. M.: *Theory and experiment in gravitational physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
- [31] WILL, C. M.: *The confrontation between general relativity and experiment*. *Living Rev. Relativity* 9 (2006), 3.
- [32] ZÁVĚTOVÁ, M., ZÁVĚTA, K.: *Gravitační vlny objeveny?* *Čs. čas. fyz.* A20 (1970), 94–95.