

Gravitační vlny: Einsteinovo obdivuhodné dědictví

Jiří Podolský

Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Praha

Před sto lety v červnu 1916 předpověděl Albert Einstein existenci gravitačních vln jako další pozoruhodný důsledek obecné relativity, své dynamické teorie gravitačního pole, která v mnohem překonala klasickou Newtonovu teorii gravitace. O přímou detekci Einsteinových gravitačních vln se pak řadu desetiletí neúspěšně pokoušely stovky lidí. Až v únoru 2016 oznámil tým vědců, kteří postavili obří interferometry LIGO, že dne 14. 9. 2015 se jim poprvé v historii podařilo zaznamenat signál gravitační vlny, který označili symbolem GW150914. Analýza signálu navíc odhalila a jednoznačně prokázala, že zdrojem této vlny byla srážka a splynutí dvou velkých černých děr, k níž došlo v dalekém vesmíru před více než miliardou let.

V tomto textu popisujeme Einsteinovu teoretickou předpověď plynoucí z jeho obecné relativity, první detektory gravitačních vln ze 60. let, astronomické potvrzení existence gravitačních vln sledováním binárního pulsaru PSR B1913+16 (tento objev byl v roce 1993 oceněn Nobelovou cenou), technické parametry dnešních vysoce citlivých interferometrů Advanced LIGO a Virgo, detaily historické detekce GW150914, za který byla v roce 2017 udělena Nobelova cena, další dosud zachycené vlny a také nadějnou budoucnost nově zrozeného oboru gravitační astronomie, umožňující sledovat vesmír skrze „mnoho pozorovacích oken“.

1. Historie v kostce

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

- Před 100 lety Albert Einstein dobudoval svou obecnou teorii relativity a ihned 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 gravitační vlny existují i v přesné, neporuchové teorii. Záhy začaly první pokusy Josepha Webera tyto vlny detekovat.
- Před 40 lety byly gravitační vlny astrofyzikálně prokázány, a to velmi pečlivým dlouhodobým 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.

Licence Creative Commons CC BY-NC-SA 3.0: prof. RNDr. JIŘÍ PODOLSKÝ, CSc., DSc., Ústav teoretické fyziky a Centrum Alberta Einsteina pro gravitaci a astrofyziku, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, Praha, březen 2018.

- 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.
- Od té doby se podařilo zachytit a analyzovat další gravitační vlny, které otevřely netušené možnosti studia extrémních astronomických objektů a procesů, jako jsou srážky černých děr či neutronových hvězd, při nichž jadernými reakcemi vznikají prakticky všechny těžké prvky, které kolem sebe v přírodě nacházíme
- Za tyto fascinující objevy obdrželi „otcové zakladatelé“ projektu LIGO Rainer Weiss, Barry Barish a Kip Thorne v roce 2017 Nobelovu cenu za fyziku.

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

2. Obecná relativita a gravitační vlny

Podle Einsteinovy obecné teorie relativity není gravitační interakce těles zprostředkována silou, která mezi nimi působí na dálku a ubývá s druhou mocninou vzdálenosti, *ale deformací prostoročasu*. Každá hmota (i libovolná forma energie) kolem sebe modifikuje geometrické vlastnosti prostoru a plynutí času. Tělesa, například planety v gravitačním poli Slunce, se tedy nepohybují v neměnném euklidovském prostoru doplněném o absolutní, zcela nezávislý čas. Přirozenou arénou světa je čtyřrozměrný prostoročas, kde prostor s časem jsou navzájem propojeny a geometrie je zdeformována přítomnými objekty. Tato zdeformovaná (neeuclidovská) geometrie je matematicky popsána takzvaným *metrickým tenzorem* $g_{\mu\nu}$. Co se myslí pod pojmem „tenzor“ je naznačeno v dodatku *Nebojte se tenzorů*.

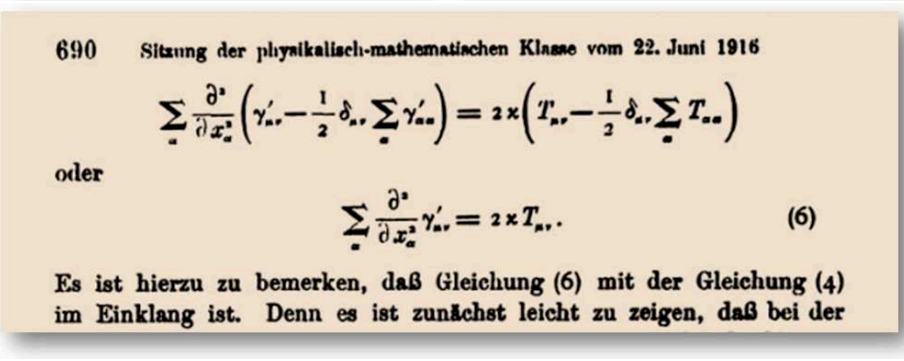
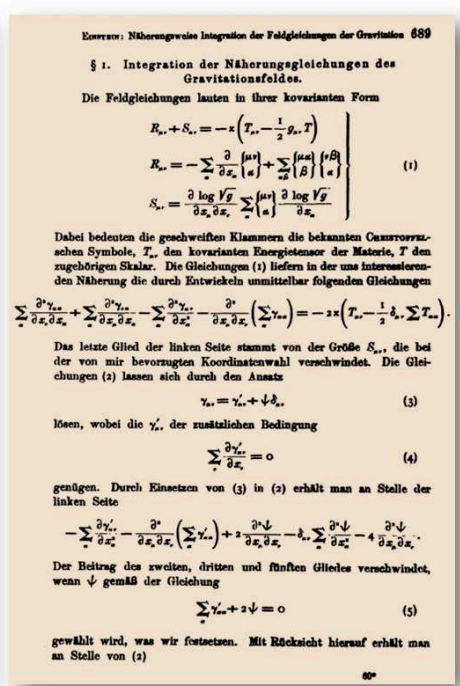
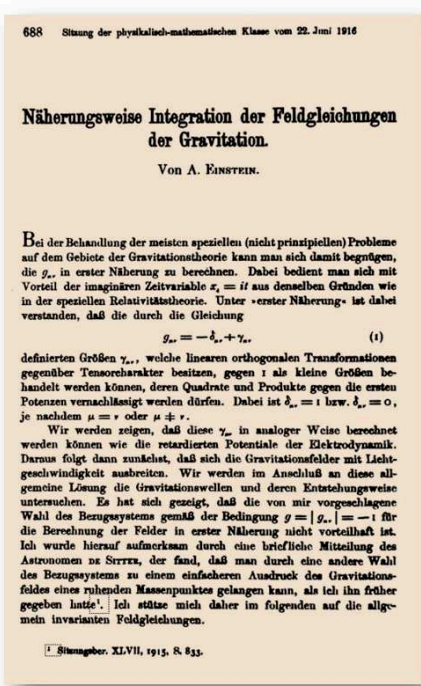
Tuto pozoruhodnou teorii gravitace Einstein dokončil po náročném mnohaletém úsilí v listopadu 1915, kdy konečně našel správné rovnice pole (podrobnosti lze najít např. v [13, 15, 21, 30]). Ty určují, jaké *konkrétní* gravitační pole $g_{\mu\nu}$ odpovídá *dané* hmotě popsané takzvaným *tenzorem energie-hybnosti* $T_{\mu\nu}$. 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 G je gravitační konstanta, c je rychlost světla ve vakuu, $R_{\mu\nu}$ je takzvaný Ricciho tenzor a R jeho zúžení (Ricciho skalár) související s mírou zakřivení prostoročasu, což jsou složité kombinace složek metriky $g_{\mu\nu}$ a jejich 1. a 2. derivací podle prostoročasových souřadnic. Einsteinovy rovnice gravitačního pole (1) tedy kromě funkcí $g_{\mu\nu}$ obsahují také jejich změny a změny změn, a to jak prostorové tak časové.

Během sta let své existence byla Einsteinova teorie mnohokrát experimentálně ověřována [36], a to jak v pozemských laboratořích, tak studiem kosmických systémů. Úspěšně zatím prošla sítím čím dál náročnějších testů. Stala se proto pilířem fyziky, astronomie, astrofyziky i kosmologie.

Záhy po dokončení obecné relativity učinil Albert Einstein počátkem roku 1916 také zcela novou předpověď [11], totiž že existují *gravitační vlny*. Oproti Newtonově



Obr. 1. První dvě strany (nahore) a detail začátku třetí strany (dole) Einsteinova článku [11] předloženého Královské pruské akademii věd dne 22. června 1916. Před sto lety v něm předpověděl existenci gravitačních vln jako další důsledek své, tehdy nové, dynamické teorie gravitačního pole, obecné teorie relativity. Rovnice (6) je vlnová rovnice pro „odchylky od plochosti prostoročasu“ $h_{\mu\nu}$ (v Einsteinově notaci $\gamma'_{\mu\nu}$) představující gravitační vlny.

teorii je totiž obecná relativita *dynamickou teorií pole*. To znamená, že prostoročas (jehož geometrie popsána $g_{\mu\nu}$ reprezentuje gravitační pole) je přítomností hmoty nejen zdeformován, ale může začít i *vibrovat*. Jestliže se hmotný zdroj periodicky mění, vybudí v prostoročase vlny křivosti. Tyto vlny slapových deformací putují *rychlostí světla*, mají *příčný charakter* a *dvě nezávislé polarizace*. Jejich amplituda klesá, a to

nepřímou úměrně vzdálenosti od zdroje. A stejně jako jiné vlny ve fyzice nesou energii a hybnost.

V tomto smyslu se hodně podobají známým a v běžném životě používaným vlnám elektromagnetickým (světlo, ultrafialové a infračervené záření, mikrovlny, rádiové vlny). V jejich případě jsou zdrojem vln zrychlené se pohybující náboje, tedy mění se elektrické proudy, a kmitají vektory intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetické indukce \mathbf{B} (jejich tři složky značíme E_i a B_i). Je zajímavé, že elektromagnetické vlny jsou také příčné a mají dvě polarizace. Jak ale uvidíme, účinky gravitačních vln jsou zde na Zemi *neporovnatelně slabší*.

K předpovědi gravitačních vln Einstein dospěl studiem svých rovnic (1), a to za předpokladu, že gravitační pole je *velmi slabé*, takže lze provést takzvanou *linearizaci*. Matematicky to znamená, že Einstein uvažoval metriku prostoročasu

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

kde $\eta_{\mu\nu}$ je metrika *plochého* prostoročasu *bez gravitačního pole*,¹ zatímco $h_{\mu\nu}$ jsou *malé odchylky* reprezentující slabé gravitační pole (deformace prostoročasu), tedy platí $|h_{\mu\nu}| \ll 1$. Einstein dosadil (2) do rovnic gravitačního pole (1), zanedbal všechny členy obsahující druhou a vyšší mocniny $h_{\mu\nu}$ a po úpravách dostal takzvanou *vlnovou rovnici*

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (3)$$

Tato matematická rovnice říká, že poruchy geometrie $h_{\mu\nu}$ dosud plochého prostoročasu vyvolané pohybem hmotného zdroje $T_{\mu\nu}$ se šíří v podobě vln. Toto vše je přehledně uvedeno na necelých třech úvodních stránkách Einsteinova článku [11], viz obr. 1., přičemž rovnice (3) obsahově odpovídá jeho rovnici (6). V lednu 1918 pak dokončil práci [12] nazvanou již přímo „O gravitačních vlnách“, v níž svou analýzu vlastností gravitačních vln dále upřesnil a rozvinul.

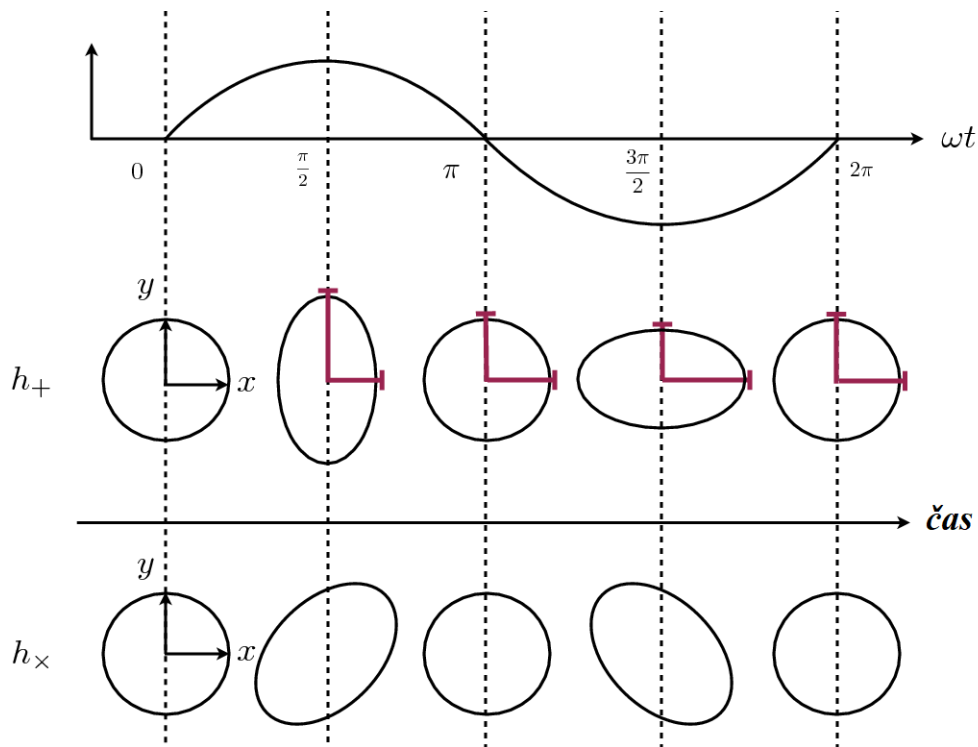
Studujeme-li samotné *šíření* gravitačních vln *prázdným vesmírem* (mimo zdroj) je $T_{\mu\nu}$ nulové a vlnová rovnice (3) se dále zjednodušuje na²

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0. \quad (4)$$

Navíc lze ukázat, že pokud se rovinná gravitační vlna šíří například ve směru osy z , pak jediné nenulové složky deformací prostoročasu jsou $h_{xx} = -h_{yy}$ a $h_{xy} = h_{yx}$. Vlna je tedy opravdu příčná — rozkmitává tělesa pouze v rovině (x, y) kolmé na směr šíření — a má dvojí polarizaci: složka h_{xx} způsobuje deformaci kroužku testovacích částic do eliptického tvaru s osami x, y , zatímco pro složku h_{xy} jsou osy příslušných elips v příčné rovině otočené o 45 stupňů vůči x, y , viz obr. 2. Proto se hovoří o polarizacích „+“ a „×“ a píše se $h_+ = h_{xx}$ a $h_\times = h_{xy}$. Více podrobností o tomto tématu v češtině lze najít například v [9, 10, 24, 25].

¹Matice ploché metriky $\eta_{\mu\nu}$ má nulové složky, jenom na hlavní diagonále jsou hodnoty $-1, 1, 1, 1$.

²Stejná rovnice popisuje i elektromagnetické vlny, jen místo veličin pro gravitační pole $h_{\mu\nu}$ v ní vystupují veličiny E_i a B_i pro elektrické a magnetické pole. Tyto rovnice poprvé odvodil James Clerk Maxwell v roce 1864 ve svém článku [19], ve kterém vybudoval dynamickou teorii elektromagnetického pole. V tomto převratném díle jako předpověděl existenci elektromagnetických vln a ukázal, že světlo je elektromagnetická vlna. Tím sjednotil elektřinu, magnetismus a optiku. Podrobný popis Maxwellova článku lze najít v [23].



Obr. 2. Gravitační vlna v rovině kolmé na směr svého šíření deformuje prostor takovým způsobem, že periodicky zkracuje a prodlužuje vzdálenosti těles. Délky navzájem kolmých ramen interferometru (vyznačených červeně) se mění tak, že když je jedno rameno nejkratší, druhé je nejdelší, a naopak. Tento charakter deformací je v obrázku naznačen stlačováním počáteční kružnice do elips. Jedna zobrazená oscilace odpovídá jedné periodě gravitační vlny. Uprostřed je znázorněn efekt vlny s polarizací h_+ , zatímco dole s polarizací h_\times . Vidíme, že „deformační elipsy“ jsou otočeny o 45 stupňů.

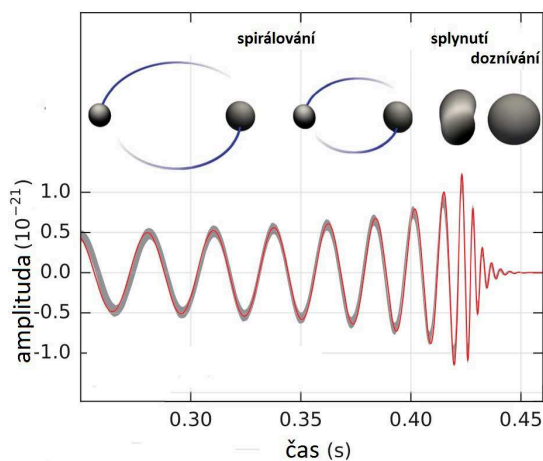
3. Zdroje gravitačních vln a jejich amplituda

Gravitační vlny vznikají všude tam, kde se nerovnoměrně mění tvar anebo poloha objektu, přesněji: *když se hmota pohybuje zrychleně*, a to způsobem který nemá sférickou symetrii. Zdroji gravitačních vln jsou proto zejména *dvojhvězdy*, v nichž rozložení hmoty pravidelně osciluje s periodou oběhu (obr. 3.). Čím blíže k sobě jsou obě obíhající hvězdy a čím jsou hmotnější, tím silnější jsou i generované vlny. Nejvýznamnějšími zdroji gravitačních vln jsou proto *velmi těsné binární systémy neutronových hvězd* (pulsarů) anebo ještě hmotnějších, zkolabovaných *černých děr*.



Obr. 3. Schematické znázornění gravitačních vln generovaných oběhem dvou hvězd kolem sebe. Gravitační vlny (deformace prostoročasu) mají v tomto případě spirálovitý charakter. Od dvojhvězdného zdroje se šíří rychlostí světla a perioda vln je dvojnásobkem oběžné doby.

Gravitační vlny odnášejí energii, takže se oba objekty k sobě postupně přibližují a jejich oběžná doba se zkracuje. Jak plyne z výpočtů i numerických simulací rovnic obecné relativity, nejmohutnější vlny vznikají na konci 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 tohoto dramatického děje. Typický časový průběh *bezrozměrné amplitudy* h gravitační vlny generované srážkou dvou kosmických objektů je vykreslen na obr. 4.



Obr. 4. Charakteristický „otisk prstů“ srážky dvou černých děr nebo neutronových hvězd má tři fáze: spirálování – splynutí – doznívání. Jak plyne z řešení rovnic obecné relativity, amplituda gravitačních vln a jejich frekvence až do okamžiku srážky narůstají (detekujeme takzvaný „čirp“), po splynutí obou černých děr či hvězd v jeden objekt signál rychle odezní v podobě tlumených oscilací. Přesně takový průběh měla první pozorovaná gravitační vlna GW150914 (dole). Převzato z [2].

Gravitační vlny by měly vznikat i tehdy, když samotná hvězda náhle změní svůj tvar při *kolapsu svého jádra a následném výbuchu supernovy*. Kdybychom zachytili a dešifrovali vzniklý rozruch prostoročasové geometrie, otevřel by se nám unikátní pohled přímo do srdce hvězd. Jak se ale nedávno ukázalo, kolaps probíhá docela symetricky, takže generované gravitační vlny jsou slabší, než se kdysi 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 (tedy její „velikost“) popisují veličiny h_{ij} , kde indexy i, j označují *prostorové složky* x, y, z metriky (2), neboli též funkce h_+ a h_\times , když se vlna šíří ve směru osy z . Tyto veličiny a zejména jejich závislost na vzdálenosti r od zdroje lze spočítat z takzvané *kvadrupólové formule*, kterou odvodil již Albert Einstein ve svém průkopnickém článku [11] a pak upřesnil v [12]. Formule zní

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4} \frac{\ddot{Q}_{ij}}{r}, \quad (5)$$

kde

$$Q_{ij} = \int (x_i x_j - \frac{1}{3} x^2 \delta_{ij}) dm \quad (6)$$

je tenzor popisující konkrétní rozložení hmoty zdroje a jeho časovou závislost.³ Amplituda vlny h_{ij} tedy *klesá jako* $1/r$, nepřímo úměrně vzdálenosti od zdroje. Je dána *druhou časovou derivací* tenzoru Q_{ij} , což zkráceně naznačují dvě tečky nad Q_{ij} neboli \ddot{Q}_{ij} . Amplituda gravitační vlny je tedy úměrná časové změně časové změny rozložení hmoty zdroje. Kdyby se hmota zdroje pohybovala jen rovnoměrně přímočaře, tedy bez zrychlení, bylo by $\ddot{Q}_{ij} = 0$ a žádná gravitační vlna by se negenerovala.

Ze vzorců (5) a (6) lze vyvodit jednodušší vztah pro *hrubý odhad velikosti amplitudy* gravitační vlny

$$h \sim \frac{4G}{c^4} \frac{E_{\text{nesfér}}}{r} = 2 \times 10^{-17} \left(\frac{E_{\text{nesfér}}}{M_\odot c^2} \right) \left(\frac{30\,000 \text{ světelných let}}{r} \right), \quad (7)$$

kde $E_{\text{nesfér}}$ je *nesférická část pohybové energie zdroje*, jež generuje gravitační vlnu. Kdyby například v naší Galaxii v typické vzdálenosti $r = 30\,000$ světelných let explodovala supernova a platilo by $E_{\text{nesfér}} = 0,02 M_\odot c^2$, měla by bezrozměrná amplituda vln zde na Zemi velikost zhruba jen $h \sim 2 \times 10^{-17} \times 0,02 \times 1 = 4 \times 10^{-19}$.

Navíc je nutno uvážit, že k výbuchu supernovy dochází v naší Galaxii jen velmi vzácně, v průměru tak jednou za pár set let. Chceme-li tedy 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 asi deset supernov do roka, ale amplituda jimi generovaných

³Ve vzorcí pro Q_{ij} se sčítá před všechny části zdroje, které mají hmotnost dm a polohu $(x_1, x_3, x_3) = (x, y, z)$. Protože zdroj je spojitě rozložený, místo sčítání konečného počtu částí provádíme spojitou integraci, kterou naznačuje symbol \int . Veličina δ_{ij} je takzvaný Kroneckerův symbol: jeho hodnota je 1, když jsou indexy i, j stejné, zatímco hodnota je 0, když jsou indexy různé.

gravitačních vln bude dle odhadu (7) menší nežli $h \sim 2 \times 10^{-22}$. Podobné odhady a zejména nedávné numerické výpočty pomocí počítačů ukazují, že také gravitační vlny generované binárními systémy černých děr či neutronových hvězd nemají zde na Zemi o moc větší amplitudu. Gravitační vlny ze vzdálených astrofyzikálních zdrojů jsou tedy opravdu *nesmírně slabé*. Lze to pochopit už z toho, že faktor G/c^4 ve vzorci (5) je extrémně malý, v SI soustavě jednotek jen řádově 10^{-44} .

4. První detektory gravitačních vln

Stojíme tedy před takřka neřešitelným technickým úkolem sestavit přístroj, jehož citlivost v měření vzdáleností (například délky červeně znázorněných ramen interferometrického detektoru na obr. 2.) bude lepší než 10^{-22} . Bezrozměrné číslo h ze vzorce (7), jež popisuje amplitudu gravitační vlny v daném místě, totiž přímo vyjadřuje, jak velkou *relativní změnu vzdálenosti* dvou testovacích těles (tedy rozměrů detektoru) gravitační vlna svým průchodem vyvolá. Lze psát

$$h = \frac{\Delta L}{L}, \quad (8)$$

kde L je *počáteční vzdálenost* dvou těles (například zrcadel na koncích ramene interferometru), 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 seismickém, civilizačním a přístrojovém šumu. . . Na přímou detekci gravitačních vln jsme proto museli od Einsteinovy předpovědi čekat celých 100 let. Až dnes umíme sestavit dostatečně citlivý „gravitační přijímač“.



Obr. 5. Joseph Weber s jedním ze svých detektorů gravitačních vln v říjnu 1969. Zdroj: Special Collections and University Archives, University of Maryland Libraries.

O přímou detekci gravitačních vln experimentátoři usilovali více než padesát let.

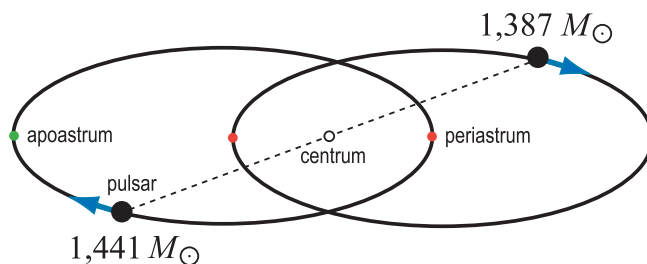
Honbu za tímto nesnadným cílem odstartovalo počátkem 60. let průkopnické úsilí vynikajícího vědce a inženýra Josepha Webera (1919–2000) [35]. S kolegy navrhl a sestrojil několik *rezonančních detektorů*, velkých hliníkových válců, jež se měly průchodem gravitační vlny konkrétní frekvence rozkmitat v důsledku rezonančního efektu, obr. 5.

Přestože byly Weberovy detektory na svou dobu velmi citlivé (snad až $h \sim 10^{-16}$) a k eliminaci lokálního šumu užívaly současná měření velmi vzdálených válců (v Marylandu a u Chicaga), na zachycení vln generovaných astrofyzikálními zdroji zdaleka nestačily. Weber v roce 1970 sice ohlásil objev vln údajně přicházejících z centra naší Galaxie [16], jeho výsledky se ale nikomu nepodařilo zreprodukovat, nebyly všeobecně akceptovány a nakonec jim věřil už jen on sám.

Úspěchu nebylo dosaženo ani pomocí mnohem citlivějších nástupců Weberových rezonančních válců, i když k detekci vibrací využívaly kvantové magnetometry a tepelný šum potlačovaly chlazením na velmi nízké teploty — jednalo se o experimenty EXPLORER (CERN), ALLEGRO (Louisiana) NIOBE (Perth), NAUTILUS (Frascati), AURIGA (Legnaro) a další. 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, jejichž frekvence se charakteristickým způsobem rychle mění. Například u prvního pozorovaného signálu GW150914 vzrostla frekvence gravitační vlny z 35 Hz na 150 Hz během pouhých 200 ms. Takový signál nedokážou rezonančními detektory zaznamenat.

5. Objev binárního pulsaru: důkaz existence gravitačních vln

Do neúspěšných snah zaznamenat gravitační vlny pomocí 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 *binární pulsar PSR B1913+16* [8, 14]. Jeho pečlivé sledování během následujících let [32] poskytlo *zcela přesvědčivý důkaz reálné existence gravitačních vln*.



Obr. 6. Schéma eliptických trajektorií dvou neutronových hvězd (každá má hmotnost zhruba 1,4 krát větší než je hmotnost našeho Slunce) obíhajících kolem sebe v binárním pulsaru PSR B1913+16. Nejbližše k sobě jsou v takzvaném periastru (červené body) a nejdále v apoastru (zelené body). Ve skutečnosti se velikosti elips postupně zmenšují a hvězdy se spirálovitě přibližují, protože dochází k vyzařování gravitačních vln. Za mnoho tisíc let na sebe nakonec narazí.

Jedná se totiž o systém dvou neutronových hvězd s hmotnostmi zhruba $1,4 M_{\odot}$, které obíhají velmi blízko sebe po protáhlé eliptické trajektorii ($e = 0,6$) s periastrem 0,7 mil. kilometrů, apoastrem 3,1 mil. kilometrů a periodou oběhu necelých 8 hodin, jak je znázorněno na obr. 6.

Dlouhodobá měření jednoznačně prokázala, že doba oběhu tohoto binárního systému se systematicky zkracuje, a to o hodnotu $76 \mu s$ 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 doba jejich oběhu klesá. Za tento velmi významný objev byli jeho autoři v roce 1993 právem poctěni Nobelovou cenou [34].

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

Zmíněný astrofyzikální důkaz existence gravitačních vln a současně další významné ověření platnosti Einsteinovy obecné relativity byl pro relativistickou komunitu v 80. letech obrovskou vzpruhou. Po Weberových neúspěšných pokusech bylo však nezbytné přijít se zcela jinou, účinnější metodou detekce gravitačních vln. Na scénu vstoupily supercitlivé *obří laserové interferometry*.

6. Interferometrické detektory gravitačních vln a historie projektu LIGO

Interferometr se dvěma navzájem kolmými rameny je pro účely detekce gravitačních vln ideální zařízení. Jak jsme již uvedli (viz též znázornění na obr. 2.), 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 v rohu detektoru) a plně odrazivým testovacím zrcadlem volně zavěšeným na konci ramene. Současně v protifázi prodlužuje a zkracuje vzdálenosti ve druhém kolmém rameni interferometru. Výsledkem je periodická změna interferenčního signálu ve výstupním fotodetektoru, která je díky (8) *přímo úměrná* amplitudě h gravitační vlny. Navíc to je širokopásmový detektor [1,22,24,27,29], protože na rozdíl od dřívějších rezonančních detektorů Weberova typu dokáže zachytit gravitační vlny v poměrně širokém intervalu frekvencí (na Zemi je to typicky 1 Hz – 1 kHz).

První prototyp interferometrického detektoru gravitačních vln postavil v Americe už v 60. letech Weberův student Robert Forward. Paralelně se jejich vývojem zabýval Rainer Weiss na MIT. 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.⁴ Na konci své studie Weiss uvádí, že interferometr by měl mít kilometrové rozměry. Aby pro svůj výzkum získal větší finanční zdroje, podal v roce 1974 grantový návrh americké Národní vědecké nadaci NSF. Jeho záměrem bylo zvětšit ramena dosavadního metrového prototypu na 9 metrů.

⁴Mezi ně patří zejména seismický šum, nehomogenita zemského gravitačního pole, tepelné změny ve vakuových komorách, tepelný šum zrcadel a závěsů, změny amplitudy laseru, nestability jeho frekvence, tlakové rázy na zrcadlech a kvantový fotonový šum na výstupní fotodiodě.

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.

Interferometrické detektory gravitačních vln se budovaly i v Evropě. Skupina Heinze Billinga v Ústavu Maxe Plancka v Garchingu postavila třímetrový prototyp a pak dokonce třicetimetrové zařízení. Na Universitě Glasgow sestrojil Ronald Drever se spolupracovníky desetimetrový interferometr, který navíc pro další zvýšení citlivosti v každém rameni využíval takzvané Fabryho–Pérotovy optické rezonanční dutiny (v rameni není jenom koncové testovací zrcadlo, ale také další zrcadlo blízko centrální stanice — mezi nimi vzniká optická stojatá vlna, která dále zvyšuje citlivost zařízení). Německá i skotská skupina se pak rozhodly spolupracovat. Tak vznikl detektor GEO600 poblíž Sarstedtu u Hannoveru s délkou ramen 600 m. Jeho stavba začala v roce 1995 a plánované citlivosti dosáhl v roce 2006, viz obr. 7. Při konstrukci byla vyvinuta a testována řada velmi pokročilých technologií.



Obr. 7. Letecký pohled na německo-britský interferometrický detektor gravitačních vln GEO600. Zdroj: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik a Leibniz Universität Hannover.

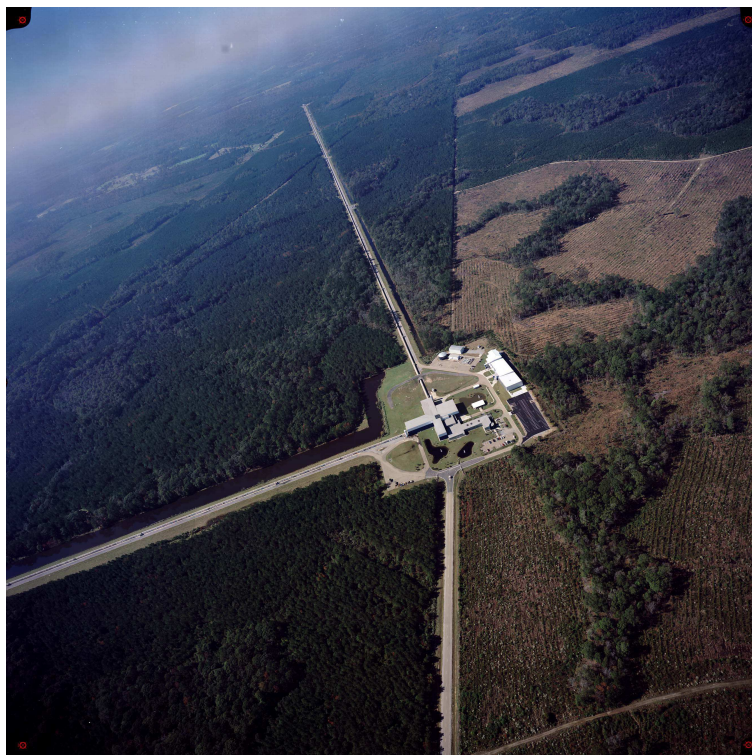
Také v Japonsku byl kolem roku 2000 v Tokiu testován interferometrický detektor gravitačních vln TAMA 300, a to s délkou ramen 300 m.

Historický úspěch však čekal až na *laserové interferometry kilometrových rozměrů*. Počátkem 80. let se na amerických univerzitách MIT a Caltech (do této skupiny přešel roku 1979 i Ronald Drever) stavěly další prototypy. Na podzim 1983 předložil Weiss studii budoucího velkého zařízení. Analyzoval v ní vědecké i technické aspekty dvou pětikilometrových interferometrů vzdálených od sebe tisíce kilometrů. Na základě této studie a slibných výsledků amerických i evropských prototypů slíbila vědecká nadace 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), viz www.ligo.caltech.edu a články [22,24,27,28]. Vlastní konstrukci interferometrů LIGO o délce ramen 4 km pak NSF schválila v roce 1992 s rozpočtem zhruba 300 milionů dolarů.



Obr. 8. Čtyřkilometrový americký interferometr LIGO v Hanfordu (stát Washington, USA).
Zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

Observatoř LIGO tvoří *dva téměř identické interferometry*. Padlo rozhodnutí, že obě sesterské stanice budou postaveny na „téměř opačných koncích“ USA, konkrétně v Hanfordu (stát Washington, obr. 8.) a v Livingstonu (stát Louisiana, obr. 9.). Jsou od sebe vzdáleny 3 tisíce kilometrů. Dvě nezávislé stanice jsou nezbytné k tomu, aby bylo možné lépe rozpoznat místní rušivé vlivy od skutečného signálu.



Obr. 9. Sesterský interferometr LIGO v Livingstonu (stát Louisiana). Je vzdálen 3000 km od stanice LIGO v Hanfordu, obě zařízení fungují v koincidenčním režimu jako jeden detektor. Zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

Vedením rozsáhlého projektu byl v roce 1994 pověřen Barry Barish, který měl dlouholeté zkušenosti s řízením projektů částicové fyziky. Stavba stanic probíhala v letech 1994–1998. Interferometry byly instalovány a uváděny do provozu 1999–2002 a vzápětí se rozeběhla první měření.

Mezi roky 2002 až 2010 pak LIGO uskutečnilo šest cyklů měření označovaných S1 až S6 [1,27], při nichž byla nasbíráno a následně analyzováno velké množství dat. V mnoha obdobích probíhala *současná měření evropskými interferometry*: zmíněným německo-britským detektorem GEO 600 a také novým detektorem gravitačních vln *Virgo*. Projekt Virgo se zrodil koncem 80. let, v tomto případě se jednalo o italsko-francouzskou spolupráci. Velký laserový interferometr Virgo s rameny dlouhými 3 km stojí u města Cascina nedaleko italské Pisy (viz obr. 10.). Stavba detektoru Virgo začala v roce 1996, inaugurován byl 2003, tedy zhruba ve stejné době jako LIGO.



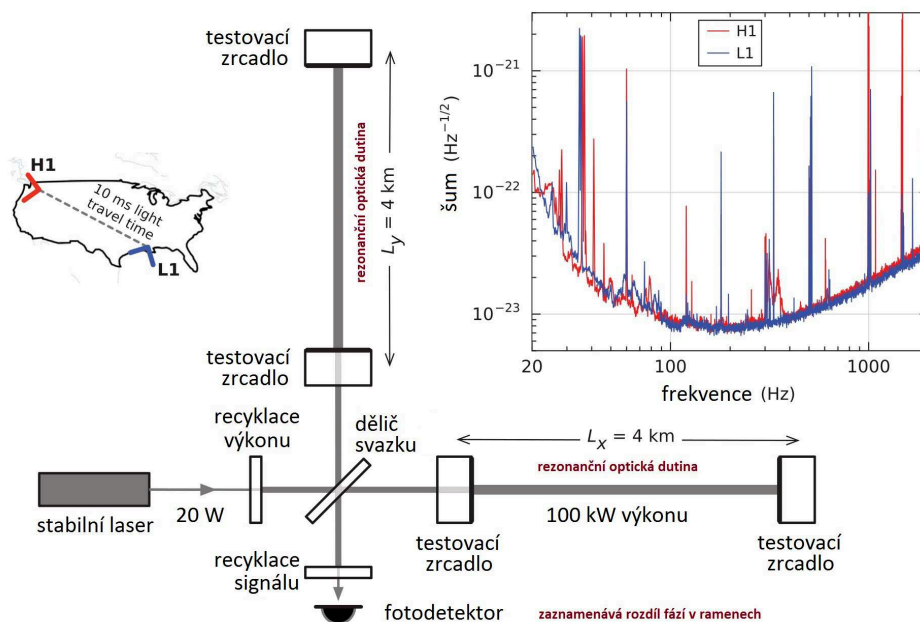
Obr. 10. Pohled na centrální stanici a jedno ze tříkilometrových ramen evropského detektoru gravitačních vln Virgo poblíž italské Pisy. Zdroj: Virgo Collaboration.

Americké detektory LIGO i evropské Virgo a GEO600 prováděly koordinovaná měření a sdílely získaná data. Společně se prováděla jejich pečlivá analýza a také průběžné publikování výsledků unikátní transatlantické vědecké spolupráce. I když se citlivost všech detektorů stále zlepšovala, celkově o dva řády až na hodnotu $h = 10^{-22}$ v intervalu 100 Hz až 300 Hz, *gravitační vlny se zachytit nepodařilo*. Vlny ze závěrečných stádií dvojhvězdných soustav, následných srážek černých děr a neutronových hvězd, kolapsu jader supernov, či z velkého třesku jsou zkrátka mnohem slabší. Nedávné numerické simulace navíc opravdu potvrdily, že srážky dvou černých děr či neutronových hvězd nejsou tak „divoké“, jak stavitelé detektorů původně očekávali.

7. Pokročilé LIGO a Virgo

Jedinou nadějí tedy bylo zvýšit citlivost interferometrů o další řád až na hodnotu 10^{-23} . Vlastně se s tím tak trochu počítalo. Projekt LIGO od počátku předpokládal realizaci detektorů ve dvou krocích: v prvním ověřit všechny technologie na „počátečním LIGO“ (Initial LIGO neboli iLIGO, 2002–2010), s určitou nadějí na detekci silnějších vln, a až potom ve druhé fázi aplikováním vylepšených technologií postavit „pokročilé LIGO“ (Advanced LIGO neboli aLIGO, obr. 11.) s citlivostí, která s velkou pravděpodobností umožní detekci astrofyzikálních gravitačních vln. Tak se i stalo: ihned po spuštění Advanced LIGO v září 2015 byla 14. 9. historicky poprvé detekována gravitační vlna, signál GW150914 zmíněný v úvodu.

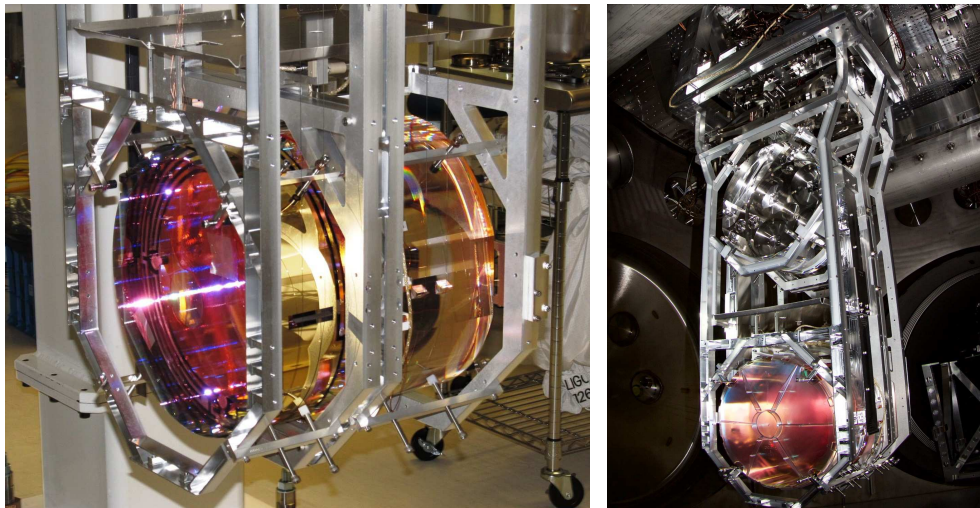
Detektor Advanced LIGO dále posunul hranice technologických možností lidstva. Parametry nových interferometrů, umístěných ve stejných vakuových trubcích a komorách jako původní LIGO, jsou opravdu fantastické, jak je vidět ze spektra dosažené citlivosti na obr. 11. (vložený graf vpravo nahoře).



Obr. 11. Optické schéma interferometrů Advanced LIGO (vlevo dole) a jejich citlivost na různých frekvencích (vpravo nahoře) v době objevu gravitačních vln. Interferometry v Hanfordu (H1-červeně) i v Livingstonu (L1-modře) dosahují ve frekvenčním rozsahu 100 Hz až 400 Hz neuvěřitelné citlivosti 10^{-23} . Převzato z [2] a upraveno.

Úspěchu bylo dosaženo vyladěnou souhrou mnoha dílčích vylepšení. Šum na nízkých frekvencích řádově 10 Hz byl potlačen 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 menšími než 0,1 nm) zavěšených na křemenných

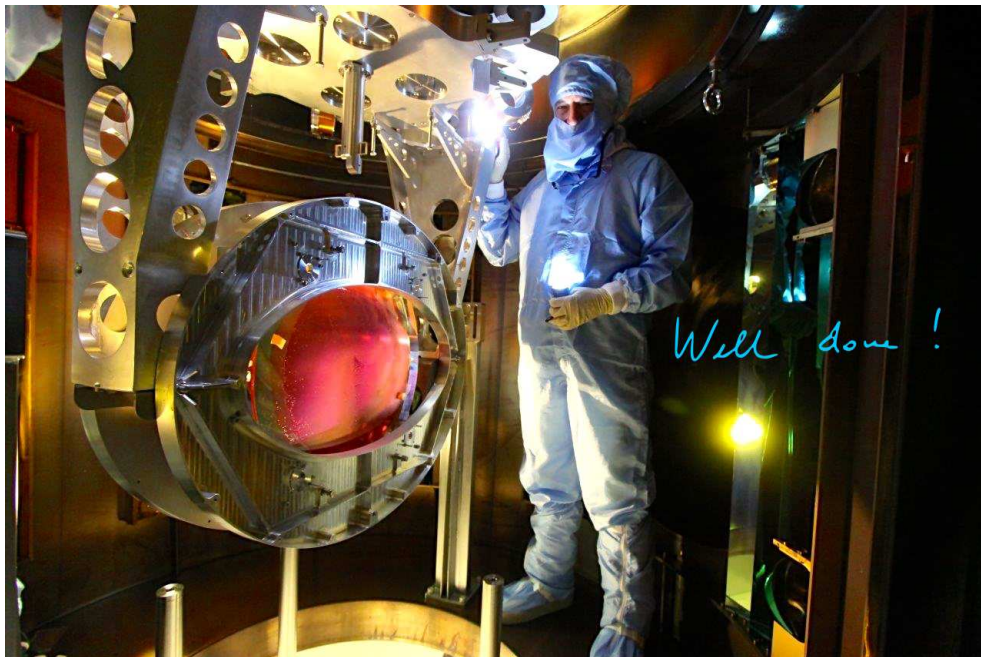
vláknech (nikoli jen ocelových strunách) a jejich pokrytím odrazivými vrstvami s velmi malými ztrátami, viz obr. 12. Šum na vyšších frekvencích kolem 1000 Hz byl potlačen užitím výkonnějšího, vysoce stabilního laseru (v budoucnu až 125 W namísto původních 10 W) i dalším snížením tlaku ve vakuových trubicích na hodnotu menší než $1 \mu\text{Pa}$.



Obr. 12. Jedno z hlavních zrcadel interferometru Advanced LIGO (vlevo) a jeho sofistikovaný závěs (vpravo). Zdroj: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.

Optická soustava Fabryho–Perotových rezonančních dutin byla doplněna o další zrcadla zajišťující recyklaci výkonu laseru i takzvanou recyklaci signálu (obr. 11.), jež umožňuje dle potřeby ladit frekvenční charakteristiku detektoru. Výsledkem je výrazně lepší odstup signálu od šumu. Unikátní elektrostatický systém umístěný na pomocných reakčních zrcadlech dokáže manipulovat polohou hlavních zrcadel s přesností 10^{-18} m, přičemž tyto posuvy jsou plně pod kontrolou díky speciálnímu kalibračnímu systému. Stav okolního prostředí je neustále monitorován soustavou seismometrů, akcelerometrů, mikrofónů, magnetometrů, radiopřijímačů, senzorů počasí, kosmického záření atd., které pomáhají eliminovat falešné signály. Dalších zhruba 100 000 datových kanálů zaznamenává okamžitý stav řídicího systému interferometru a jeho fungování. Sběr získávaných informací je synchronizován GPS časem s přesností lepší než $10 \mu\text{s}$ a nezávisle potvrzován atomovými hodinami na obou observatořích. Zkrátka: jde o technický zázrak dnešní doby. Více informací o něm lze najít např. v publikacích [1, 2, 22, 24, 27–29].

Podobných technologických vylepšení se dočkal i evropský detektor Virgo. Také v něm byla použita větší a kvalitnější zrcadla, zavěšená na unikátní několikastupňové soustavě kyvadel, jež eliminují seismický šum Apeninského poloostrova. Na obr. 13. je například centrální zrcadlo, které funguje jako dělič laserového paprsku. Konstrukce této pokročilé verze interferometru Virgo trvala o něco déle než u amerických detektorů LIGO, takže první vědecká měření s ním začala v srpnu 2017, dva roky po dobudování Advanced LIGO.



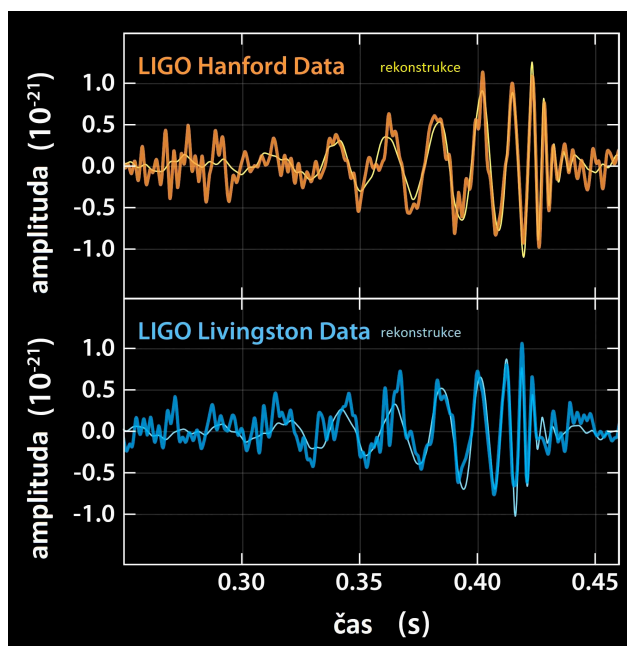
Obr. 13. Velké centrální zrcadlo evropského detektoru Virgo, který funguje jako dělič laserového paprsku do obou ramen interferometru. Zdroj: Virgo Collaboration.

8. Gravitační vlny poprvé zachyceny: signál 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. 14., který dostal označení GW150914.⁵ Trval zhruba 150 milisekund a měl zcela typický charakter takzvaného *čirpu* generovaného v závěrečných stádiích 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, pak 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.

⁵Pojmenování je trochu zvláštní, ale logické: GW je zkratka anglického „gravitational wave“, tedy „gravitační vlna“, následující tři dvojice čísel označují rok, měsíc a den zachycení signálu.



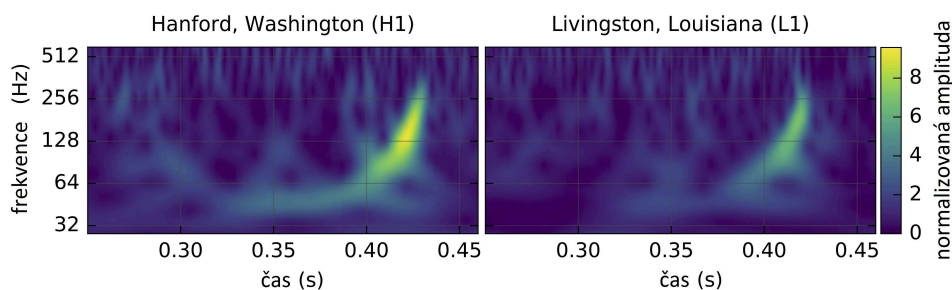
Obr. 14. První gravitační vlna GW150914 zachycená 14. září 2015 v 09:50:45 UTC observatořemi v Hanfordu (nahore) a Livingstonu (dole). Profil vlny je shodný a evidentně má charakter čirpu, jenž odpovídá srážce dvou velkých černých děr. Převzato z [2].

Tak zní závěr dlouhé a pečlivé analýzy signálu GW150914, kterou provedly týmy LIGO Scientific Collaboration (LSC) a Virgo Collaboration.⁶ Proto byl objev ohlášen až po pěti měsících na tiskové konferenci 11. 2. 2016 ve Washingtonu, D.C. Všechny zásadní informace byly současně zveřejněny v odborném článku [2] v prestižním fyzikálním časopise *Physical Review Letters* (má 1010 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/. Tato zpráva vyvolala nadšení v odborné komunitě i značný zájem veřejnosti a médií. Okolnosti první přímé detekce gravitačních vln, včetně detailních informací o signálu GW150914 a jeho zdroji, jsme popsali v článku [28].

Jak je vidět z obr. 14., signál GW150914 zaznamenaný oběma stanicemi je opravdu typu *čirp*, viz obr. 4. 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 2000 km) a maximální amplituda dosáhla hodnoty $h_{\max} = 1 \times 10^{-21}$, čemuž odpovídala deformace prostoročasu v ramenech detektorů pouhých 0,004 femtometru.

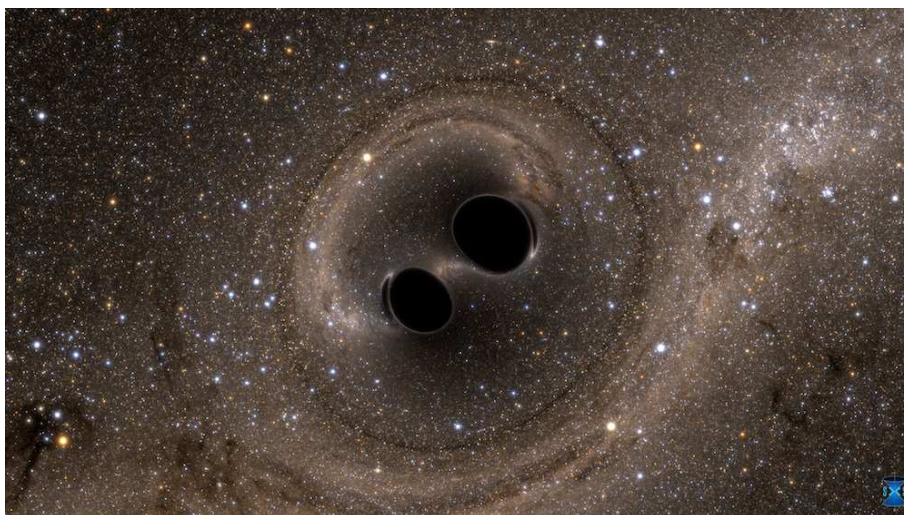
⁶Mezinárodní vědecký tým LSC dnes čítá zhruba tisíc členů ze zhruba stovky institucí po celém světě. Je zodpovědný za organizaci vědeckých výzkumů a za analýzu naměřených dat (zatímco provoz zařízení a jejich další rozvoj je v gesci laboratoří LIGO na Caltechu a MIT). Podobný, i když poněkud menší tým, se stará o evropský vědecký projekt Virgo.

Čírpový charakter je vidět i na takzvaném *spektrogramu*, tedy diagramu, kde se vodorovně vynáší čas, svisle frekvence signálu a barevně jeho amplituda, viz obr. 15.



Obr. 15. Spektrogram gravitační vlny GW150914. Vlevo Hanford, vpravo Livingston [2].

K analýze signálu bylo použito několik nezávislých statistických postupů. Hlavní metodou bylo porovnání profilu gravitační vlny GW150914 s rozsáhlou databankou 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 generované binárními systémy černých děr různých hmotností, spinů, sklonu oběžné dráhy atd. Tyto profily byly předem spočítány z rovnic Einsteinovy teorie gravitace (metodami numerické relativity a také aproximativní metodou zvanou EOB).



Obr. 16. Počítačová simulace systému dvou černých děr (na pozadí hvězdné oblohy), jež generoval první zachycenou gravitační vlnu GW150914. Snímek zachycuje situaci těsně před jejich srážkou a splnutím v jednu větší černou díru. Credit: SXS

Fyzikální systém dvou černých děr je popsán 17 parametry: 8 jich charakterizuje vlastní zdroj (hmotnosti a vektory určující vlastní rotaci obou černých děr), dalších 9 určuje vzájemný vztah zdroje a detektoru (vzdálenost, dva úhly udávající polohu na obloze, sklon trajektorie, dva parametry popisující její excentricitu, polarizace, čas a fáze vlny při srážce). Identifikace optimálního vzoru s konkrétní volbou parametrů, jehož průběh je znázorněn na obr. 4., a jeho ověření byly výpočetně náročné: vyžádalo si to 50 milionů CPU hodin (což odpovídá 100 dnům zpracování pomocí 20 000 osobních počítačů PC). Statistická analýza naměřeného signálu též ukázala, že signál zpravený stanicemi by mohl *náhodně* nastat ani ne jednou za 200 000 let. S velkou pravděpodobností se tedy nejednalo o falešný poplach.

Tímto způsobem bylo zjištěno, že zdrojem signálu byla srážka a splnutí dvou černých děr o hmotnostech $36 M_{\odot}$ ($\pm 5 M_{\odot}$) a $29 M_{\odot}$ ($\pm 4 M_{\odot}$), viz obr. 16., přičemž maximální hodnota parametru orbitální rychlosti činila 0,6 rychlosti světla. Výsledkem splnutí byla jediná rotující černá díra o hmotnosti $M = 62 M_{\odot}$ ($\pm 4 M_{\odot}$) s hodnotou rotačního parametru $a = 0,67$. 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, kterou již můžeme označit za kosmologickou (tomu odpovídá rudý posuv zhruba $z = 0,1$). Okamžitý gravitační výkon zdroje byl proto neuvěřitelný: $200 M_{\odot}c^2$ za sekundu, tedy desetkrát více nežli v onen okamžik svítily všechny hvězdy ve všech galaxiích našeho pozorovaného vesmíru!

Pro přehlednost ještě v tabulce shrňme hlavní parametry události GW150914, včetně rozpětí hodnot dané možnými chybami měření a analýzy signálu:

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	4×10^{-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
rotační parametr černé díry po srážce	0,57–0,72
maximální rychlost	0,6 c
frekvence dozívání signálu	250 Hz
doba dozívání signálu	4 ms
energie vyzářená gravitačními vlnami	2,5–3,5 $M_{\odot}c^2$
zářivost v maximu	$3,6 \times 10^{49}$ W
vzdálenost zdroje	0,8–1,9 miliard 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

9. Nobelova cena 2017 udělena za stavbu LIGO a detekci gravitačních vln

Signál GW150914, tedy první přímá detekce gravitačních vln a současně první pozorování srážky dvou černých děr, se stal vědeckou senzací roku 2016. Zapsal se do historie fyziky a astronomie. Obecně se předpokládalo, že objev bude oceněn Nobelovou cenou. Nebylo pochyb, že první přímé pozorování a analýza gravitačních vln je událost prvořadého významu, která si nejvyšší fyzikální poctu zaslouží.

To se opravdu stalo: Královská švédská akademie věd 3. října 2017 ohlásila, že Nobelovu cenu za fyziku v roce 2017 získávají *Rainer Weiss, Barry Barish a Kip Thorne* „za rozhodující příspěvky k detektoru LIGO a pozorování gravitačních vln“.

Z uvedeného nástinu historie interferometrických detektorů gravitačních vln LIGO je dobře patrné, že přínos Weisse, Thorna i Barishe (obr. 17.) byl zcela zásadní a tedy že Nobelovu cenu za první přímou detekci gravitačních vln získali plným právem (mimoходом: Weiss získal polovinu finanční částky, Thorne a Barish pak oba 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. To on jako první předpověděl existenci gravitačních vln a určil jejich základní vlastnosti.



Obr. 17. 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.

Uveďme zde 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 Dickem a 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 Misnerem a učitelem Wheelerem napsali asi nejslavnější učebnici Einsteinovy teorie nazvanou *Gravitation*, familiárně též „MTW“ [20] (je z roku 1973, má rozsah 1279 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 Weisssem stál u zrodu LIGO a více než 30. let se svou skupinou na Caltechu poskytoval teoretické zázemí projektu (identifikace zdrojů 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 [33]), významně přispěl také k tvorbě sci-fi filmu *Interstellar* (2014).

10. Jaké gravitační vlny už detektory LIGO a Virgo již zachytily

Nyní shrneme, jaké gravitační vlny byly pomocí interferometrů LIGO a Virgo dosud (únor 2018) detekovány a veřejně oznámeny.

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. 14., který dostal označení GW150914. 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 $h = 1 \times 10^{-21}$). 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.

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 lsc.ligo.org/events/GW150914/.

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. 18.).

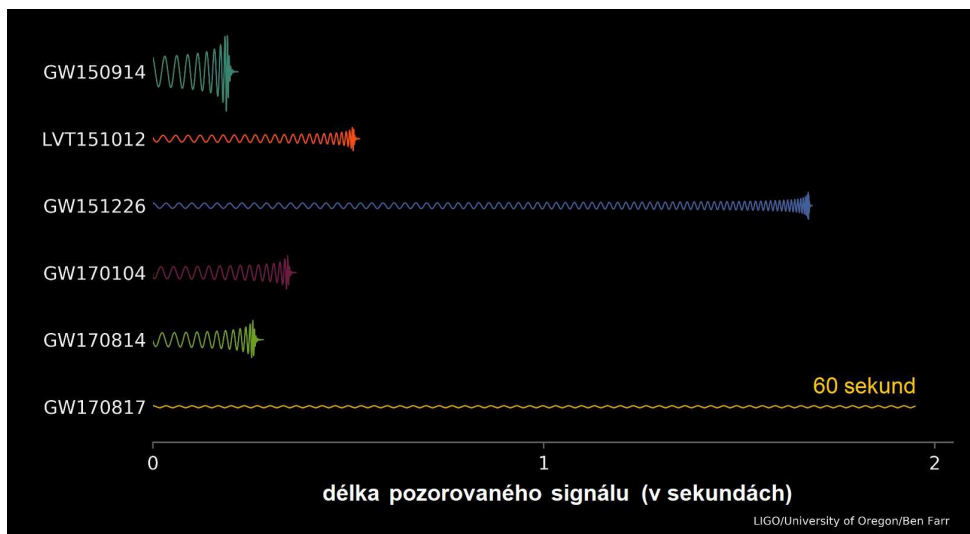
Počátkem roku 2016 byly interferometry LIGO odstaveny a téměř celý rok byla prováděna technická zdokonalení zvyšující citlivost. Druhý běh měření O2 probíhal pak v období 30. listopadu 2016 – 25. srpna 2017, kdy bylo shromážděno celkem 117 dní společných měření. K dnešnímu datu byly oznámeny další čtyři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

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.

Čtvrtá detekce: GW170608

Signál čtvrté gravitační vlny z 8. června 2017 byl hodně odlišný [17]. Trval mnohem delší dobu, zachycena byla celá stovka cyklů (v obr. 18. není znázorněn). Analýza



Obr. 18. Porovnání prvních detekovaných gravitačních vln ze srážky a splnutí 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.

ukázala, že se jednalo o zatím nejméně hmotný zdroj, kdy soustava dvou srážejících se černých děr měla hmotnost pouze $19 M_{\odot}$.

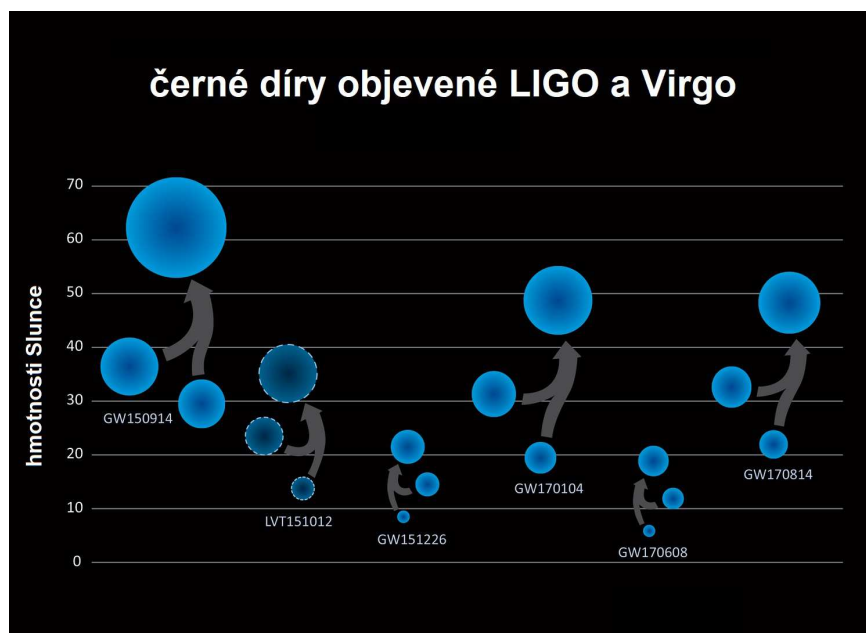
Pátá detekce: GW170814

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 vymezit polohu zdroje na obloze. Hmotnosti černých děr objevených díky prvním pěti detekovaným gravitačním vlnám jsou graficky reprezentovány na obr. 19.

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 v 12:41:04 UTC.

Charakter čirpového signálu byl už na první pohled výrazně jiný nežli v předchozích případech: netrval zlomek sekundy ale minutu, celkem bylo zaznamenáno zhruba 3000 cyklů vlny, viz obr. 18. Záhy se ukázalo, že v tomto případě gravitační vlnu nevyvolala srážka a splnutí dvou velkých černých děr, ale *dvou neutronových hvězd* o celkové hmotnosti menší než 2,7 hmotnosti Slunce.



Obr. 19. 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.

A 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* označený GRB 170817A.

Díky zachycení gravitační vlny třemi interferometry se podařilo lokalizovat zdroj signálu do malé oblasti na obloze. 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 neshodovat mnohé alternativní teorie gravitace, zatímco výsledek je v plném souladu s Einsteinovou teorií.

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 [18].

Obrovské množství získaných dat, zejména 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 záchytem 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 už jisté, že téměř všechny tyto významné prvky, které kolem sebe máme a které používáme, kdysi vznikly právě srážkou neutronových hvězd.

Proto je pozorování gravitační vlny GW170817 historická událost. Je to první velký úspěch takzvané *mnohopásmové astronomie* (anglicky „multi-messenger astronomy“) neboli „astronomie mnoha pozorovacích oken“. Tím se myslí koordinované sledování určitého astronomického jevu či objektu současně všemi dostupnými observatořemi, pokrývajícími celé elektromagnetické spektrum i nový obor gravitačních vln [18]. Časem se k nim připojí také observatoře kosmického záření a neutrin. Takto získaná komplexní pozorování se stanou doslova pokladnicí astronomických a fyzikálních poznatků.

10.1. Shrnutí dosavadních objevů

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

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	[17]
GW170814	L, H, V	6	BH-BH	$53 M_{\odot}$	1,8 mld. sv. let	[5]
GW170817	L, H, V	3000	NS-NS	$3 M_{\odot}$	0,1 mld. sv. let	[6]

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 vzdálenost (v miliardách světelných let) a v posledním sloupci je uveden odkaz na příslušný hlavní článek uvedený v části Literatura.

11. Nadějná budoucnost

Definitivně tedy padla staletá hegemonie elektromagnetických vln při studiu vzdáleného vesmíru. I když i nadále budou optické, infračervené, ultrafialové, mikrovlnné, rádiové, rentgenové a gama signály hrát v astronomii klíčovou roli, gravitační vlny nám nyní poskytnou unikátní informace o objektech a procesech, které lze elektromagneticky spatřit jen velmi obtížně, anebo dokonce vůbec — což je právě případ srážejících se černých děr. Zrodil se obor *astronomie gravitačních vln*, a hned při svém vstupu na scénu přinesl senzační odhalení.

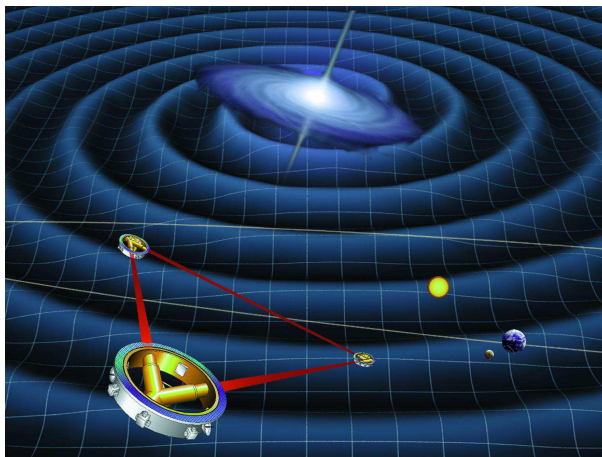
Budoucnost nového oboru je navíc velmi nadějná.

Koncem roku 2018 začnou oba americké interferometry Advanced LIGO a evropský detektor Advanced Virgo opět měřit, poté co projdou dílčími technickými vylepšeními, které dále zvýší jejich citlivost. Pomocí tří interferometrů rozmístěných po zemské kuli bude možné lokalizovat zdroje gravitačních vln s přesností možná pár úhlových stupňů. A jak jsme již viděli v zatím posledním případě GW170817, to otevírá cestu k identifikaci zdroje gravitační vlny také observatořemi elektromagnetickými. Není pochyb, že od roku 2019 budeme rutinně detekovat nemalé množství srážejících se černých děr a také neutronových hvězd, jejichž srážky budou doprovázeny gama zábleskem a následným optickým zjasněním vzniklé kilonovy.

Za pár let se k těmto třem interferometrům připojí také Advanced LIGO v Indii (projekt byl schválen týden po oznámení první detekce GW150914) a kolem roku 2020 také 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 sařírová zrcadla by byla chlazena na nízké teploty. Citlivost toho zařízení by mohla dosáhnout neuvěřitelných 10^{-24} , doufejme že už někdy kolem roku 2025.

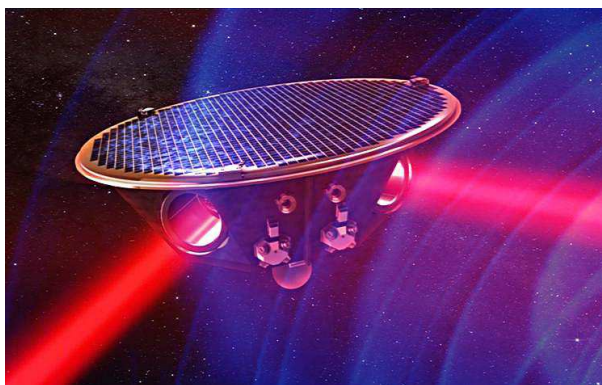
V dlouhodobé perspektivě se dočkáme také interferometru LISA (Laser Interferometer Space Antenna) v kosmickém prostoru, který plánuje Evropská kosmická agentura ESA, viz stránky sci.esa.int/lisa. Mají ho tvořit tři družice ve vrcholech pomyslného rovnostranného trojúhelníka o stranách asi 2,5 milionu kilometrů, obíhající kolem Slunce ve vzdálenosti jedné astronomické jednotky (což je průměrná vzdálenost Země od Slunce). Vzájemná vzdálenost družic se bude s pikometrovou přesností proměřovat laserovou interferometrií, viz obr. 20. a 21. Pro potlačení ne-gravitačních vlivů bude použita technika aktivního udržování družic na „bezsilové“, volné trajektorii: uvnitř každé z nich 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 [26].

Obrovskou 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 1 Hz do 1000 Hz, LISA má mít frekvenční rozsah 0,0001 Hz až 0,1 Hz. Právě v této milihertzové oblasti přitom vysílá gravitační vlny



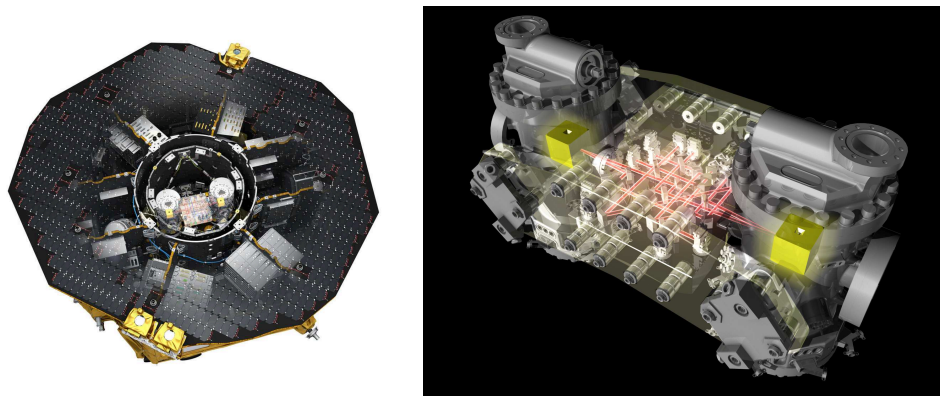
Obr. 20. Umělecké znázornění evropského detektoru gravitačních vln LISA v kosmickém prostoru. Tři družice obíhající kolem Slunce v trojúhelníkové konfiguraci budou pomocí interferometru měřit vzájemnou vzdálenost, která se příchodem gravitační vlny bude měnit. Zdroj: ESA/www.elisascience.org

velké množství zajímavých a prokázaných astrofyzikálních zdrojů, především binárních systémů bílých trpaslíků v naší Galaxii a srážejících se velmi hmotných černých děr v jádrech dalekých galaxií [31].



Obr. 21. Pohled na centrální družici interferometru LISA. Pomocí teleskopů bude vysílat laserové paprsky směrem k ostatním dvěma dceřinným družicím a po odrazu od nich laserové signály zachytí a porovná. Kredit: AEI/MM/exozet and NASA/C, Henze.

Je skvělé, že LISA již byla vybrána jako jedna z budoucích velkých vědeckých misí Evropské kosmické agentury ESA. Měla by začít měřit kolem roku 2035. Dokonce byla postavena a vyzkoušena testovací sonda LISA Pathfinder (tedy česky *Předvoj LISY* nebo též *Průkopník LISY*), viz obr. 22. Více podrobností o ní lze najít na webovských stránkách www.elisascience.org a lisapathfinder.org a v článku [26].



Obr. 22. 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 proměřovala s pikometrovou přesností. Zdroj: ESA/ATG medialab.

LISA Pathfinder úspěšně odstartovala 3. 12. 2015 a od března 2016 do června 2017 prováděla v okolí Lagrangeova bodu L1 soustavy Slunce-Země měření, která otestovala všechny klíčové technologie. Výtečnou zprávou je, že tyto testy dopadly skvěle, ba dokonce překonaly veškerá očekávání [7]. Nyní tedy už nic zásadního nestojí v cestě stavbě velkého kosmického detektoru gravitačních vln LISA!

12. Závěrem

Čtvrtek 14. září 2015 se do dějin vědy zapsal 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 splynutí 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.

Duchovním otcům projektu obřích interferometrických detektorů gravitačních vln LIGO tento mimořádný úspěch vynesl v roce 2017 Nobelovu cenu za fyziku.

Nově zrozená astronomie gravitačních vln má navíc před sebou slibnou budoucnost, neboť další interferometrické detektory se nyní staví a další, ještě lepší, se plánují. Na Zemi i v kosmickém prostoru.

Přímá detekce gravitačních vln je také vynikající zprávou pro obecnou relativitu, která právě oslavila své 100. narozeniny. Einsteinova 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.

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

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 (25pp).
- [2] ABBOTT, B. P. et al.: *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. *116* (2016) 061102 (16pp).
- [3] 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 (14pp).
- [4] ABBOTT, B. P. et al.: *GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2*, Phys. Rev. Lett. *118* (2017) 221101 (17pp).
- [5] ABBOTT, B. P. et al.: *GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence*, Phys. Rev. Lett. *119* (2017) 141101 (16pp).
- [6] ABBOTT, B. P. et al.: *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*, Phys. Rev. Lett. *119* (2017) 161101 (18pp).
- [7] ARMANO, M. et al.: *Beyond the Required LISA Free-Fall Performance: New LISA Pathfinder Results down to 20 μ Hz*, Phys. Rev. Lett. *120* (2018) 061101 (7pp).
- [8] BIČÁK, J.: *Nová relativistická laboratoř - pulsar ve dvojhvězdě*, Čs. čas. fyz. *A25* (1975) 628–629.
- [9] BIČÁK, J., RUDENKO V. N.: skripta *Teorie relativity a gravitační vlny*, Univerzita Karlova, Praha, 1985.
- [10] DVOŘÁK, L.: *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru* (skripta), SPN, Praha, 1984.
- [11] EINSTEIN, A.: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Preuss. Akad. Wiss. Sitz. *1* (1916) 688–696.
- [12] EINSTEIN, A.: *Über Gravitationswellen*, Preuss. Akad. Wiss. Sitz. *1* (1918) 154–167.
- [13] FÖLSING, A.: *Albert Einstein*, Volvox globator, Praha, 2001.
- [14] HULSE R. A., TAYLOR J. H.: *Discovery of a Pulsar in a Binary System*, Astrophysical Journal *195* (1975) L51–L53.
- [15] ISAACSON, W.: *Einstein: jeho život a vesmír*, Paseka, Praha – Litomyšl, 2010.
- [16] LANGER, J.: *Pozorování gravitačních vln*, Čs. čas. fyz. *A24* (1974) 501–504.
- [17] LSC AND VIRGO COLLABORATION: *GW170608: Observation of a 19-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence*, Astrophys. J. Lett. *851* (2017) L35 (11pp).
- [18] LSC AND VIRGO COLLABORATION et al.: *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, Astrophys. J. Lett. *848* (2017) L12 (59pp).
- [19] MAXWELL, J. C.: *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Royal Soc. Transactions *155* (1865) 459–512.
- [20] MISNER, C. W., THORNE, K. S., WHEELER J. A.: *Gravitation*, Freeman, New York, 1973.
- [21] PAIS, A.: *‘Subtle is the Lord ...’, The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982.
- [22] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a možnosti jejich detekce*, PMFA *40* (1995) 272–288.
- [23] PODOLSKÝ, J.: *Zrození Maxwellovy teorie a formalizmu vektorové analýzy*, PMFA *43* (1998) 237–248.
- [24] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny: výzva pro příští století*, Čs. čas. fyz. *A49* (1999) 113–119.
- [25] PODOLSKÝ, J.: *Teorie gravitačního záření*, Čs. čas. fyz. *A55* (2005) 86–93.
- [26] PODOLSKÝ, J.: *LISA: nová naděje lovců gravitačních vln*, PMFA *54* (2009) 201–211.
- [27] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a jejich detektory*, Astropis Speciál *17* (2010) 34–37.
- [28] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny poprvé zachyceny: GW150914 ze srážky černých děr*, PMFA *61* (2016) 89–105.
- [29] ROBERTSON, N. A.: *Laser Interferometric Gravitational Wave Detectors*, Class. Quantum Grav. *17* (2000) R19–R40.
- [30] SEMERÁK, O.: *Albert Einstein a století obecné relativity*, PMFA *60* (2015) 215–238.
- [31] SCHUTZ, B. F.: *Zdroje gravitačních vln nízkých frekvencí*, Čs. čas. fyz. *A49* (1999) 120–132.

- [32] TAYLOR J. H., WEISBERG J. M.: *Further Experimental Tests of Relativistic Gravity using the Binary Pulsar PSR 1913+16*, *Astrophysical Journal* 345 (1989) 434–450.
- [33] THORNE, K. S.: *Černé díry a zborcený čas*, Mladá fronta, Praha, 2004.
- [34] VANÝSEK, V.: *Nobelova cena za fyziku 1993*, *PMFA* 39 (1994) 223–226.
- [35] WEBER, J.: *Detection and Generation of Gravitational Waves*, *Phys. Rev.* 117 (1960) 306–313.
- [36] WILL, C. M.: *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1981; *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, *Living Rev. Relativity* 9 (2006) 3.

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*. Můj dík patří také prof. E. Svobodovi, doc. L. Dvořákovi a dr. R. Švarcovi za cenné připomínky k tomuto textu.

Dodatek: Nebojte se tenzorů

Všichni z běžného života dobře známe fyzikální veličiny, které jsou (v daném místě a daném čase) určeny *jedinou hodnotou*. Takovým veličinám říkáme *skalární*. Patří mezi ně například teplota T , tlak p , hustota ρ , energie E , atd.

Za školy známe také *vektory*. To jsou fyzikální veličiny, které mají nejen svou velikost, ale i směr. Takovéto veličiny jsou v třírozměrném prostoru charakterizovány *trojicí čísel*, jimž říkáme *složky vektoru*. Označujeme je indexy a píšeme je obvykle za sebou v uspořádané trojici. Například vektor polohy má složky (x_1, x_2, x_3) , vektor rychlosti (v_1, v_2, v_3) , vektor zrychlení (a_1, a_2, a_3) , vektor síly (F_1, F_2, F_3) , vektor intenzity elektrického pole (E_1, E_2, E_3) , vektor elektrické indukce (D_1, D_2, D_3) , atd. Pomocí složek se pak dají některé klíčové fyzikální zákony výhodně psát ve složkovém tvaru, například Newtonův pohybový zákon zní $m a_i = F_i$, síla působící na náboj v elektrickém poli je dána $F_i = e E_i$, atd., kde vztah platí pro *všechny* složky $i = 1, 2, 3$.

Ve fyzice se ale vyskytují i složitější veličiny, které jsou určeny *větším počtem složek*. Takovým veličinám říkáme *tenzory*. Příkladem jsou tenzory, které mají *dva indexy*, například i a j (narozdíl od vektorů, které mají jenom jeden index i). Složky takového tenzoru v třírozměrném prostoru píšeme T_{ij} , kde $i = 1, 2, 3$ a také $j = 1, 2, 3$. Má tedy $3 \times 3 = 9$ nezávislých složek. Tenzory tohoto typu s 9 složkami se vyskytují v tomto textu, konkrétně veličiny h_{ij} a Q_{ij} ve vzorcích (5) a (6).

Tenzor se složkami T_{ij} můžeme zapsat v podobě takzvané *matice*, neboli tabulky se třemi řádky a třemi sloupci,

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix}.$$

První index i čísluje příslušný *řádek*, zatímco *druhý index j* příslušný *sloupec*.

Vezmeme-li nyní vektor, např. se složkami (V_1, V_2, V_3) , můžeme provést cosi jako skalární součin se třemi čísly T_{i1}, T_{i2}, T_{i3} umístěnými v libovolném řádku matice, neboli spočítat číslo $T_{i1}V_1 + T_{i2}V_2 + T_{i3}V_3$, kde i určuje zvolený řádek matice. Když takto získaná *tři čísla*

$$N_i = \sum_{j=1}^3 T_{ij} V_j$$

pro $i = 1, 2, 3$ nyní napíšeme do uspořádané trojice za sebou, *dostane vektor*. Jinými slovy: z výchozího vektoru se složkami V_j můžeme pomocí složek tenzoru T_{ij} vysčítáním přes index j dostat jiný, nový vektor se složkami N_i . Tento *nový vektor obecně nemíří do stejného směru jako výchozí vektor*. Je to tedy obecnější vztah, než pouhé násobení vektoru V_j obyčejným číslem — tím lze sice dostat vektor jiné velikosti, ale bude mít stále *stejný směr*.

Dokonce můžeme nyní vzít tento nový vektor N_i a pomocí skalárního součinu s původním vektorem V_i vyrobit *skalár*, tedy

$$S = \sum_{i=1}^3 N_i V_i = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 T_{ij} V_i V_j.$$

Možnost pomocí tenzoru T_{ij} přiřadit výchozímu vektoru V_i vektor N_i jiného směru a velikosti, anebo mu přiřadit skalár S , je velmi vítaná. Umožňuje totiž vystihnout důležité fyzikální zákonitosti. Uveďme zde dva konkrétní příklady užití těchto obecných tenzorových vztahů v klasické fyzice:

Elektrina

Vektor *elektrické indukce* (D_1, D_2, D_3) je ve vakuu přímo úměrný vektoru *intenzity elektrického pole* (E_1, E_2, E_3) , neboli $D_i = \varepsilon_0 E_i$, kde konstanta ε_0 je takzvaná permitivita vakua. V *látkových prostředích* ale může docházet ke složitějším polarizacím materiálů, které způsobí, že vektor indukce už *nebude* mířit do směru vektoru intenzity. Takovou situaci můžeme s výhodou popsat pomocí *tenzoru permitivity* ε_{ij} , přičemž vztah mezi vektory bude

$$D_i = \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij} E_j.$$

Ukazuje se, že také skalární veličina

$$u = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij} E_i E_j$$

hraje velmi významnou roli: je to *hustota energie elektrického pole* (energie dělená objemem). Ve vakuu má tenzor permitivity velmi jednoduchý tvar, totiž

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(je ε_0 -násobkem takzvané jednotkové matice) a předchozí vzorce se tím zjednodušují na

$$D_i = \varepsilon_0 E_i, \quad u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_1^2 + E_2^2 + E_3^2).$$

Mechanika

Jiné užití tenzorů najdeme v mechanice otáčení tuhého tělesa. Zavádí se takzvaný *tenzor setrvačnosti* I_{ij} . Má tu speciální vlastnost, že dokáže vyjádřit vektor *momentu hybnosti* (L_1, L_2, L_3) pomocí vektoru *úhlové rychlosti* $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, přičemž oba vektory obecně nemíří stejným směrem. Vztah má tedy opět podobný tvar

$$L_i = \sum_{j=1}^3 I_{ij} \omega_j.$$

Také platí, že *celková energie otáčení tělesa* je dána vzorcem

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 I_{ij} \omega_i \omega_j.$$

Velmi symetrická tělesa (například koule anebo krychle) mají jednoduchý tenzor setrvačnosti

$$I_{ij} = I \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

a předchozí vzorce se tím zjednodušují na

$$L_i = I \omega_i, \quad E = \frac{1}{2} I (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2).$$

Teorie relativity

Skaláry, vektory a tenzory v *Einsteinově teorii relativity* mají podobné vlastnosti a platí pro ně podobná pravidla. Rozdíl je vlastně pouze v tom, že již neleží ve *třírozměrném* (a eukleidovském) prostoru, ale ve *čtyřrozměrném* (a zakřiveném) prostoročase. Princip je však stále stejný, jenom všechny indexy již nenabývají tří hodnot 1, 2, 3, ale čtyř hodnot 0, 1, 2, 3. To proto, že je zapotřebí přidat „nultou složku“ odpovídající času t , který je nyní doplněn ke třem prostorovým souřadnicím x_1, x_2, x_3 . Zavádíme čtyři souřadnice bodu v prostoročase

$$(x^0, x^1, x^2, x^3) = (ct, x_1, x_2, x_3),$$

kde c je rychlost světla, takže vlastně čas nyní měříme ve „světelných metrech“ x^0 (je to vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za čas t).

Abychom to na první pohled odlišili, používáme pro indexy čtyřrozměrných souřadnic, vektorů a tenzorů v Einsteinově teorii *řecká písmenka*, například μ nebo ν a tak dále. Namísto kartézských složek polohy x_i tedy máme složky x^μ . Zdůrazníme, že horní indexy x^μ zde neoznačují mocniny, ale číslicují (rozlišují) zavedené čtyři souřadnice.

V tomto matematickém zápise pak *metrický tenzor* popisující gravitační pole je vlastně matice se čtyřmi řádky a čtyřmi sloupci

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}.$$

Má tedy $4 \times 4 = 16$ složek. Podobně je to s Ricciho tenzorem $R_{\mu\nu}$ a tenzorem energie-hybnosti $T_{\mu\nu}$, které také vystupují v Einsteinových rovnicích gravitačního pole (1).

Hlavní role metrického tenzoru $g_{\mu\nu}$ spočívá v tom, že „kóduje geometrii“, neboli přesně určuje, jak velké jsou vzdálenosti dvou libovolných bodů, jaký je úhel mezi různými směry, jak moc je prostor a čas zdeformován. Například *skutečná* (geometrická, fyzikální, invariantní) *vzdálenost ds dvou blízkých bodů A a B* v prostoročase je *skalár* určený vzorcem

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu,$$

kde dx^μ jsou *rozdíly jejich souřadnic*, tedy $dx^\mu = x_B^\mu - x_A^\mu$. Je to vlastně zobecnění dobře známé Pýthagorovy věty z eukleidovského prostoru, kde se vzdálenost $dl = ds$ dvou blízkých bodů (ve stejném čase, takže $dx^0 = x_B^0 - x_A^0 = c(t_B - t_A) = 0$) počítá vzorcem

$$dl^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g_{ij} dx^i dx^j = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2.$$

To proto, že metrický tenzor ve třírozměrném nezakřiveném prostoru má jednoduché složky

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

neboli je to prostě jen jednotková matice.