

# Nobelova cena 2017 udělena za objev gravitačních vln

Jiří Podolský

Před dvěma lety, 14. září 2015 v 09.50.45 UTC, zachytily oba interferometry Advanced LIGO ve Spojených státech signál GW150914. Poprvé v historii byly prokazatelným způsobem přímo detekovány gravitační vlny, jejichž existenci sto let předtím teoreticky předpověděl Albert Einstein. V daném případě byla zdrojem vln srážka dvou velkých černých děr, ke které došlo před více než miliardou let v hlubokém vesmíru. Zpráva o této události byla oficiálně zveřejněna v únoru 2016 a vyvolala nadšení v odborné komunitě i nebývalý zájem médií. Záhy jsme o ní referovali i na stránkách Astropisu [1]. Nebylo pochyb, že první přímé pozorování gravitačních vln je událost historického významu, která by zasloužila ocenění Nobelovou cenou. A to se i stalo: Královská švédská akademie věd dne 3. října 2017 ohlásila, že Nobelovu cenu za fyziku pro tento rok získávají Rainer Weiss, Barry Barish a Kip Thorne „za rozhodující příspěvky k detektoru LIGO a pozorování gravitačních vln“.

## Gravitační vlny a metody jejich detekce

Einsteinova obecná relativita je dynamickou teorií gravitace, ve které hmota zakřivuje prostoročas. Tuto deformaci vnímáme jako „slapové gravitační působení“. Když se hmota zdroje zrychleným způsobem periodicky pohybuje, geometrie prostoročasu se rozkmitá a vesmírem se začne šířit vlna křivosti. Tato gravitační vlna putuje rychlostí světla ve vakuu a má příčný charakter. V její amplitudě, frekvenci i dvou polarizacích zůstává pochopitelně „otříděno“ chování zdroje a jeho fyzikální parametry.

Zachytit a správně analyzovat gravitační vlnu je však nesmírně obtížný úkol. Její amplituda klesá nepřímo úměrně vzdálenosti, a tak je zde na Zemi amplituda vln od hlavních astrofyzikálních zdrojů (binárních systémů černých děr nebo neutronových hvězd, supernov)

neuvěřitelně malá, typicky menší než  $10^{-22}$ . Zaznamenat tak nepatrnou změnu geometrie prostoročasu pomocí detektoru je opravdový vědecko-technický zážrak. Od teoretické předpovědi gravitačních vln Albertem Einsteinem v červnu 1916 k jejich přímé detekci proto muselo uplynout celé století...

První se o to po roce 1960 pokoušel *Joseph Weber*. Postupně vymyslel a postavil několik rezonančních detektorů, hliníkových válců obklopených citlivými snímači. Velkou nevýhodou Weberových detektorů (i jejich citlivějších následníků) bylo naladění na úzké rezonanční frekvence. Tato vlastnost neumožňuje detekci tzv. čírpového signálu (např. ze srážky černých děr), kdy ve zlomku sekundy prudce naroste amplituda i frekvence příslušné vlny.

Proto byla už v 60. letech navržena metoda detekce gravitačních vln pomocí interferometrů. Laserový interferometr Michelsonova typu se dvěma navzájem kolmými rameny je pro detekci gravitační vlny ideální zařízení. Deformace prostoročasu gravitační vlnou totiž způsobí periodické zkracování a prodlužování jednoho ramene vůči druhému, což se projeví změnou interferenčního signálu na výstupním fotodetektoru. Frekvence naměřeného signálu je přitom shodná s frekvencí gravitační vlny a jeho velikost je přímo úměrná amplitudě vlny. V principu lze takto měřit frekvence v poměrně širokém rozsahu spektra (na Zemi zhruba 10–1000 Hz).

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

Ilustrace vlivu gravitační vlny na pět skupin testovacích těles (která vzájemně neinteragují). Tělesa jsou na počátku umístěna v rovnoběžných kružnicích soustředěných kolem společné osy (vedoucí zleva doprava). Kruhy jsou od sebe vzdálené čtvrtinu vlnové délky gravitační vlny. Je patrné, že gravitační vlna se šíří jako příčná vlna křivosti a kruhy deformuje v elipsy.

Prakticky je to ale velmi složité, protože zařízení musí mít citlivost alespoň řádu  $10^{-22}$ . Zásadním úkolem je potlačit všechny rušivé vlivy, ať už jsou kosmického, pozemského či lidského původu. A právě pokročilá technologie interferometrického detektoru LIGO, jež z něj činí nejcitlivější zařízení na světě, stojí za úspěchem oceněným letošní Nobelovou cenou.

### Stručná historie interferometrů LIGO

První prototyp interferometrického detektoru gravitačních vln postavil v Kalifornii Weberův student *Robert Forward*. Paralelně se vývojem těchto detektorů zabýval *Rainer Weiss* na MIT. V roce 1967 demonstroval zařízení s citlivostí danou fotonovým šumem a v roce 1972 sepsal průkopnickou studii laserového interferometru. Weiss v ní odborně popsal a zhodnotil různé zdroje rušení. Mezi ně patří seismický šum, gradienty gravitačního pole, tepelné gradienty ve vakuových komorách, tepelný šum zrcadel a závěsů, změny amplitudy laseru, nestability jeho frekvence, tlakové rázy na zrcadlech a kvantový fotonový šum na výstupní fotodiodě. Na konci své

studie Weiss uvádí, že interferometr by měl mít kilometrové rozměry.

Několik let byl Weissův výzkum a vývoj financován MIT. Byly to však omezené zdroje, a tak v roce 1974 podal grantový návrh americké Národní vědecké nadaci NSF. Jeho cílem bylo zvětšit ramena dosavadního metrového prototypu na 9 metrů. O pár let později vznikl na Caltechu pod vedením *Kipa Thorna* jiný prototyp interferometru. Thorne se svou relativistickou skupinou navíc intenzivně a systematicky pracoval na teorii gravitačních vln a příslušných astrofyzikálních zdrojů. Jeho předpovědi očekávaných signálů pak sehrály rozhodující roli v přípravě a konstrukci detektoru LIGO.

Koncept interferometrických detektorů gravitačních vln se rozvíjel i v Evropě. V Ústavu Maxe Plancka pro astrofyziku v Garchingu postavila skupina *Heinze Billingha* nejprve třímetrový prototyp a potom třicetimetrové zařízení. Na Universitě Glasgow sestrojil *Ronald Drever* se spolupracovníky desetimetrový interferometr, který navíc v každém rameni využíval Fabryho–Pérotovy rezonanční dutiny. Německá i skotská skupina se rozhodla

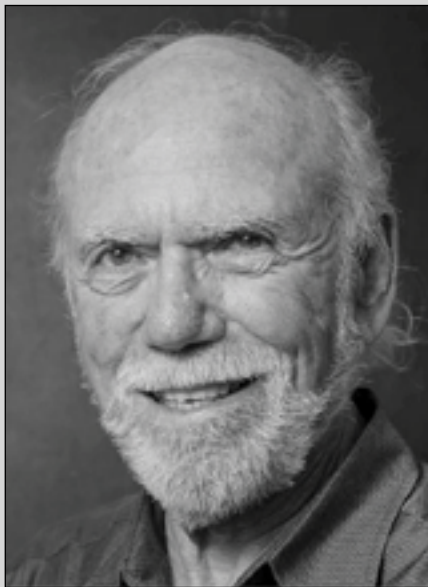
spolupracovat a postavit mnohem větší zařízení. Tak vznikl interferometr *GEO600* s délkou ramen 600 m. Jeho stavba začala v roce 1995 poblíž Hannoveru a plánované citlivosti dosáhl v roce 2006. Při jeho konstrukci byla vyvinuta a otestována řada pokročilých technologií, které byly posléze aplikovány v detektorech LIGO.

Počátkem 80. let financovala nadace NSF stavbu prototypů na MIT i na Caltechu (do této skupiny v roce 1979 přešel i Ron Drever), a také Weissovu studii budoucího velkého zařízení. Byla předložena v říjnu 1983 a analyzovala vědecké i technické aspekty návrhu dvou pětikilometrových interferometrů vzdálených od sebe několik tisíc kilometrů. Na základě této studie a slibných výsledků amerických i evropských prototypů podpořila NSF projekt za podmínky, že MIT i Caltech spojí své síly. Tak v roce 1984 vznikl společný projekt Weisse, Drevera a Thorna nazvaný *LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)*. Jeho centrálou se stal kalifornský Caltech a ředitelem byl jmenován *Rochus Vogt*.

Plánování a vývoj prototypů probíhalo po celá 80. léta. Konstrukci interferometrů LIGO



**Rainer Weiss**, narozen 29. 9. 1932 v Berlíně (Německo), doktorát na MIT (1962), profesor fyziky na MIT; již v 70. letech analyzoval různé zdroje šumu rušící detektory gravitačních vln, navrhl koncepci laserového interferometru, která tyto rušivé vlivy potlačuje; stavitel prvních prototypů interferometrických detektorů gravitačních vln, spoluzakladatel projektu LIGO.



**Barry Clark Barish**, narozen 27. 1. 1936 v Omaze (stát Nebraska, USA), doktorát na Kalifornské univerzitě v Berkeley (1962), profesor fyziky na Caltechu; vedoucí projektu LIGO v letech 1994–2005 se zkušenostmi s velkými částicovými detektory; dovedl projekt do konce, realizoval nápad stavby detektorů ve dvou krocích, zakladatel mezinárodní kolaborace LSC.



**Kip Stephen Thorne**, narozen 1. 6. 1940 v Loganu (stát Utah, USA), doktorát na Princetonské univerzitě (1965), profesor teoretické fyziky na Caltechu; odborník na obecnou relativitu a astrofyziku, zejména teorii gravitačních vln; odhadl velikost a charakter signálů z různých kosmických zdrojů; duchovní otec projektu LIGO, koordinátor aktivit, popularizátor vědy.





LIGO Hanford, Washington – pohled na laserovou halu a vakuové hospodářství



Instalace technických vylepšení projektu Advanced LIGO

o délce ramen 4 km schválila NSF v roce 1990 s rozpočtem zhruba 300 milionů dolarů. Bylo rozhodnuto, že obě stanice budou postaveny na „opačných koncích“ USA ve vzdálenosti 3002 km od sebe: v Hanfordu (stát Washington) a Livingstonu (stát Louisiana).

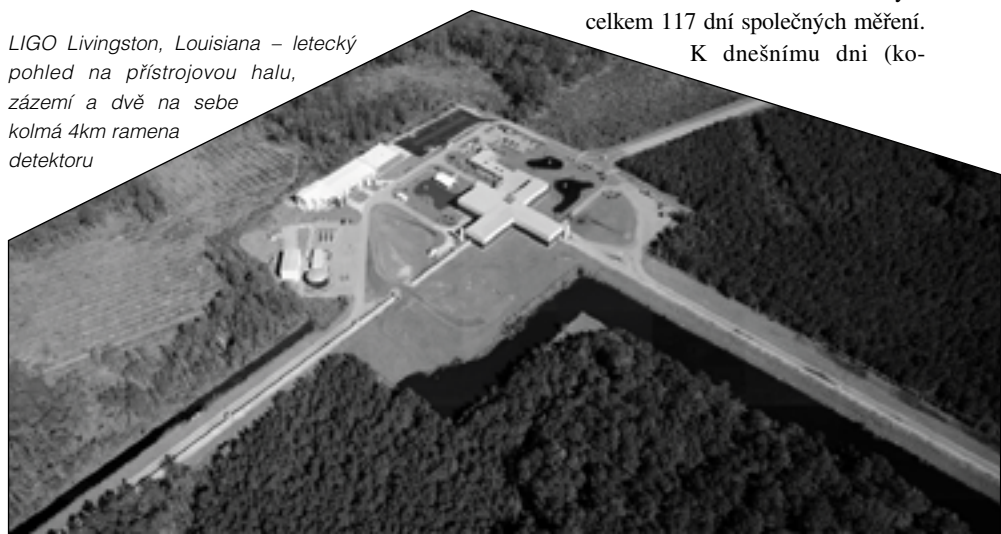
Řízením nového rozsáhlého projektu byl pověřen *Barry Barish* s dlouholetými zkušenostmi z velkých projektů částicové fyziky. Řízení LIGO se ujal v roce 1994 a dovedl ho do úspěšného konce. Samotná stavba stanic probíhala pod jeho vedením v letech 1994–1998, interferometry pak byly instalovány a uváděny do provozu v letech 1999–2002, první měření se rozeběhla v roce 2002. Barish z pozice ředitele LIGO odešel v roce 2005 (aby se stal lídrem projektu mezinárodního lineárního srážecího ILC), i nadále však zůstal členem mezinárodní kolaborace LSC (*LIGO Scientific Collaboration*), kterou zřídil v roce 1997. Prvním mluvčím LSC byl Weiss. LSC je zodpovědná za organizování všech vědeckých i technických výzkumů a za analýzu naměřených dat (zatímco provoz zařízení a jejich další rozvoj je v gesci laboratoří LIGO na Caltechu a MIT). V dnešní době čítá kolaborace LSC zhruba tisíc výzkumníků z asi stovky institucí po celém světě, je to tedy opravdu velká mezinárodní spolupráce.

Barish také prosadil nápad realizovat projekt LIGO ve dvou krocích: nejprve ověřit všechny technologie na „počátečním LIGO“ (*Initial LIGO* neboli *iLIGO*, 2002–2010), s určitou nadějí na detekci silnějších vln, a teprve potom ve druhé fázi implementací vylepšených technologií postavit „pokročilé LIGO“ (*Advanced LIGO* neboli *aLIGO*, od září roku 2015) s citlivostí, která s velkou pravděpodobností umožní detekci astrofyzikálních gravitačních vln. Jak dnes víme, tato strategie se opravdu vyplatila.

Koncem 80. let se zrodila těž italsko-francouzská spolupráce, která vyústila v konstrukci detektoru gravitačních vln *Virgo* v místě Cascina nedaleko italské Pisy. Klíčové technologie *Virgo* jsou obdobné jako má LIGO, v detailech se pochopitelně liší. Délka jeho ramen je jen 3 km, zato však díky speciální konstrukci závěsů optických prvků má znatelně větší citlivost na nejnižších frekvencích kolem 10 Hz. Stavba začala v roce 1996 a inaugurován byl 2003, pokročilá verze interferometru *Virgo* byla spuštěna v srpnu 2017. V roce 2007 byla podepsána formální dohoda mezi kolaboracemi LIGO a *Virgo*, od té doby všechny tři detektory provádějí koordinovanou měření, týmy sdílejí data a podílejí se na jejich analýze. Také výsledky jsou zveřejňovány společně, jedná se tedy o unikátní transatlantickou vědeckou spolupráci.

Pro historickou úplnost ještě dodejme, že v letech 1999–2004 sbíral data i menší japonský interferometr *TAMA300* s rameny dlouhými 300 m. Od roku 2010 se staví jeho nástupce, tříkilometrový interferometr *KAGRA* v podzemí dolu u neutrinové observatoře Kamioka.

LIGO Livingston, Louisiana – letecký pohled na přístrojovou halu, zázemí a dvě na sebe kolmá 4km ramena detektoru



### První detekce gravitačních vln byla pouhý začátek!

Jak vidno, Weiss, Barish a Thorne získali letošní Nobelovu cenu plným právem. Jejich přínos ke stavbě detektorů LIGO a k první přímé detekci gravitačních vln byl opravdu zásadní. Nobelovu cenu ale mohl získat i Ronald Drever, třetí z trojice „otců zakladatelů“ projektu LIGO. Bohužel, zemřel letos 7. března...

Detekcí **první gravitační vlny GW150914** [2] a udělením Nobelovy ceny však celý příběh nekončí. Právě naopak. V následujících měsících roku 2015 (přesněji celkem 49 dní v období 12. 9. 2015–19. 1. 2016 během 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 splnutím dvou černých děr, ale nikoli tak hmotných jako v prvním případě. Počátkem roku 2016 byly interferometry LIGO odstavěny a skoro celý rok na nich byla prováděna dílčí technická zdokonalení zvyšující citlivost. Druhý běh měření *O2* probíhal pak v období 30. 11. 2016–25. 8. 2017. Shromážděno bylo celkem 117 dní společných měření.

K dnešnímu dni (ko-

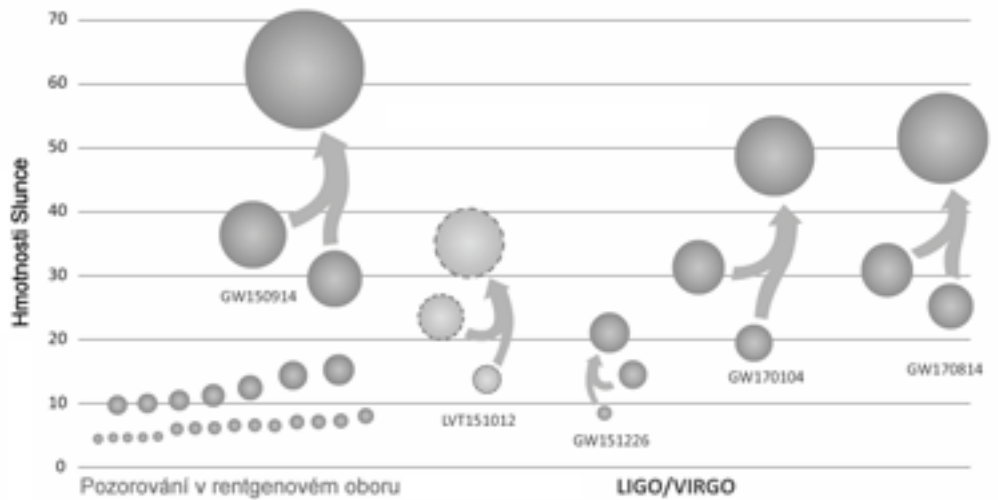
nec října 2017) byly oficiálně oznámeny další tři prokázané signály gravitačních vln, konkrétně GW170104, GW170814 a GW170817 [4–6] (viz tabulka shrnující základní údaje o všech pěti dosavadních gravitačních vlnách).

Vidíme, že první, třetí a čtvrtý signál pocházel z velmi podobných zdrojů: srážky a splynutí dvou hmotných černých děr, při nichž vznikla jedna větší černá díra o hmotnosti kolem  $50 M_{\odot}$  (je zajímavé, že hned první signál byl z nich nejsilnější a vznikla také nehmotnější díra). Naproti tomu druhý signál GW151226 pocházel od menších černých děr zhruba třetinové hmotnosti. Podařilo se ho identifikovat jenom proto, že trval delší dobu a bylo naměřeno více cyklů vlny.

Zcela nový fakt je, že nedávno 4. a 5. detekci gravitační vlny v půlce srpna 2017 provedly tři interferometry, protože k oběma stanicím LIGO se poprvé připojil také pokročilý evropský interferometr *Virgo*. Díky tomu bylo možné mnohem přesněji lokalizovat polohy zdrojů na obloze.

Zatím nejnovějším a z pohledu dějin astronomie dalším přelomovým objevem je však detekce a následné sledování páté gravitační vlny GW170817 [6], kterou spolu provedly LIGO a *Virgo* dne 17. srpna 2017 v 12.41.04 UTC. Zdroj signálu byl třemi interferometry lokalizován do malé oblasti na obloze o velikosti jen 28 čtverečních stupňů. Jak se záhy ukázalo, v tomto případě gravitační vlnu vyvolala srážka nikoli dvou černých děr, ale dvou neutronových hvězd o celkové hmotnosti menší než 3 hmoty Slunce. Z tabulky je vidět, že charakter signálu byl opravdu výrazně jiný nežli v předchozích případech: netrval jen zlomek sekundy ale déle než minutu (zaznamenáno bylo zhruba 3000 cyklů).

Ale nejenom to. Necelé 2 sekundy po příchodu gravitační vlny zaznamenaly družice *Fermi* a *INTEGRAL* krátký záblesk záření gama GRB 170817A. Následným sledováním bylo jednoznačně prokázáno, že zdrojem obou signálů byla srážka neutronových hvězd v galaxii NGC 4993 v souhvězdí Hydry ve vzdálenosti 130 milionů světelných let od nás. Je to tudíž první zdroj v historii astronomie, který byl pozorován současně pomocí gravitačních i elektromagnetických vln. Mimo jiné to poskytlo i nový a zásadní test Einsteinovy obecné relativity: jen nepatrný časový rozdíl v příchodu obou signálů (vysvětlitelný odlišnými fyzikálními mechanismy jejich generování) znamená, že relativní rozdíl v rychlostech šíření gravitačních



Doposud známé hmotnosti hvězdných černých děr pozorované jak v rentgenovém oboru (vlevo dole), tak pomocí detektorů gravitačních vln (nahore), viz níže uvedená tabulka

#### Hlavní parametry prvních pěti (dosud oznámených) gravitačních vln a jejich zdrojů

Signál*	Detektory†	Počet cyklů	Zdroj	Hmotnost ( $M_{\odot}$ )	Vzdálenost ( $ly \times 10^6$ )
GW150914	L, H	8	černá díra × černá díra	62	1200
GW151226	L, H	55	černá díra × černá díra	21	1400
GW170104	L, H	7	černá díra × černá díra	49	2900
GW170814	L, H, V	6	černá díra × černá díra	53	1800
GW170817	L, H, V	3000	netronová hv. × netronová hv.	2,7	130

\* Astronomické označení signálů gravitačních vln, tj. GW („gravitational wave“), rok, měsíc a den.

† Zkratky interferometrických detektorů, které daný signál zaznamenaly (L značí „Livingston“, H značí „Hanford“, tedy obě americké stanice LIGO, V značí evropský detektor *Virgo*).



Porovnání signálů gravitačních vln naměřených interferometry LIGO a *Virgo* (viz tabulka výše). (Všechny signály jsou zde zobrazeny od 30 Hz.)

a elektromagnetických vln ve vakuu musí být menší než  $10^{-15}$ . S tímto novým observačním faktem se budou obtížně vyrovnávat mnohé „módní“ alternativní teorie gravitace.

Do následných pozorování tohoto unikátního astrofyzikálního jevu, který byl nejdříve zaznamenán pomocí gravitačních vln a gama záření, se okamžitě zapojilo více než



Hlavní budova detektoru Virgo a dvě 3km ramena z ní vyběhající. Patrný je rovněž 144m dlouhý čistící vstupní tunel a vzadu umístěné administrativní budovy.



Pohled do 3km severního tunelu Virgo, ve kterém je umístěna vakuová trubice pro laserový svazek interferometru

70 dalších observatoří v celém oboru elektromagnetického spektra rozmístěných po celé Zemi i v kosmickém prostoru. Během zhruba jednoho dne byl objekt rozpoznán opticky i v ultrafialovém a infračerveném oboru jako takzvaná *kilonova*. Byly tak získány cenné údaje o časovém vývoji spekter. S odstupem několika dní byl pak objekt pozorován i v oboru rentgenovém a pomocí radioteleskopů [7].

Obrovské množství naměřených dat nám nyní umožní podrobně analyzovat skutečné fyzikální procesy, které se v okolí srážejících se neutronových hvězd odehrávají. To upřesní dosavadní astrofyzikální teoretické modely. Data budou zajímavá i pro jadernou fyziku. Nejenže analýza gravitačních vln vzniklých při samotné srážce umožní *upřesnit stavovou rovnici jaderné hmoty* (kterou dosud s jistotou neznáme), ale časový vývoj spekter v celém elektromagnetickém oboru nám *upřesní modely nukleosyntézy jader velmi těžkých prvků*. Ukazuje se totiž, že právě srážkami neutronových hvězd, při nichž se uvolňuje ohromné množství rychlých neutronů, dochází tzv. *r*-procesem k syntéze prakticky všech těžkých jader. Mezi ně patří nejen (na Zemi tak populární) stříbro, zlato či platina, ale i valná většina lanthanoidů a aktinoidů až po thorium a uran. Vypadá to, že prakticky všechny tyto významné prvky, které kolem sebe dnes nacházíme a které používáme, kdysi vznikly právě srážkou dvou neutronových hvězd.

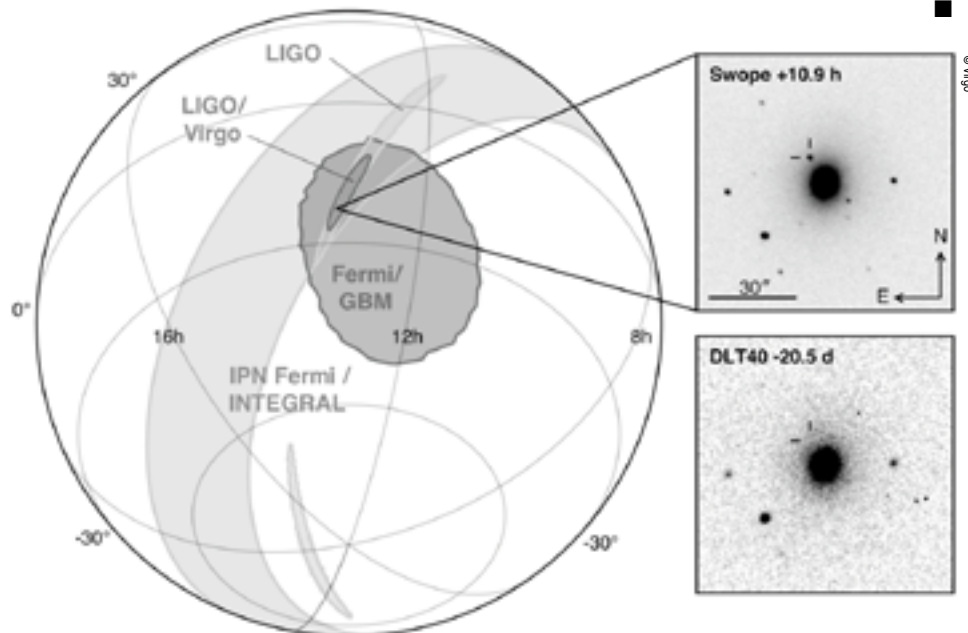
V tomto smyslu je pozorování gravitační vlny GW170817 vpravdě historická událost. Je to první opravdu velký úspěch takzvané *mnohopásmové astronomie* (anglicky „multi-

-messenger astronomy“) neboli „astronomie mnoha oken“. Tím je míněno koordinované a cílené sledování určitého astronomického jevu či objektu současně všemi dostupnými observatořemi, jež pokrývají celé elektromagnetické spektrum a nyní také nový obor gravitačních vln [7]. V budoucnu se k těmto pozorováním jistě přidají i observatoře kosmického záření a kosmických neutrin. Takto získaná komplexní měření se stanou doslova pokladnicí astronomických a fyzikální informací. Jejich rozbor a následná syntéza po-

zatků určitě posunou naše znalosti mnoha pozoruhodných vesmírných jevů.

### Literatura

- [1] J. Podolský, *Astropis* **23**, No. 1, (2016) 14–16.
- [2] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 61102.
- [3] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 241103.
- [4] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 221101.
- [5] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) 141101.
- [6] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) 161101.
- [7] LSC and Virgo Collaboration et al., *Astrophys. J. Lett.* **848** (2017) L12.



Na prvním pozorování optického protějšku gravitačních vln zachycených 17. srpna 2017 se podílely dva americké interferometry LIGO, evropský Virgo a zhruba 70 pozemských i kosmických observatoří. Obrázek ukazuje lokalizaci zdroje pomocí gravitačních vln (detektory LIGO a Virgo) a gama záření (družice Fermi a INTEGRAL). Vloženy jsou snímky galaxie NGC4993 ve viditelném oboru spektra pořízené pomocí 1m zrcadlového dalekohledu Swope na Cerro Las Campanas v Chile. Horní snímek ukazuje oblast zhruba 11 hodin po zaznamenání gravitační vlny a gama-záblesku – je na něm patrný nový zdroj, který na dolním snímku pořízeném přibližně tři týdny před touto událostí chybí...