

Kip Thorne a gravitační vlny

[Jana Olivová](#), [Martin Uhlíř](#)

| 8. 7. 2019

| Vesmír 98, 402, [2019/7](#)

Co nového o vzniku a vývoji vesmíru mohou prozradit gravitační vlny? Jak se bude vyvíjet budoucnost jejich měření? Pomohou zodpovědět zatím otevřené zásadní otázky současné astrofyziky a kosmologie? To je jen malý zlomek dotazů, kterým čelil v Praze v květnu host navýsost vzácný: americký fyzik Kip S. Thorne, který v roce 2017 získal Nobelovu cenu za fyziku za detekci gravitačních vln. Českou republiku navštívil na pozvání Učené společnosti ČR a Matematicko-fyzikální fakulty UK a přednesl tři přednášky pro odborné publikum i širokou veřejnost. Při této příležitosti poskytl i společný rozhovor měsíčníku Vesmír a týdeníku Respekt.

Žijeme ve velmi vzrušující době, protože byly konečně detekovány gravitační vlny ve vesmíru. Vy jste za svůj klíčový příspěvek k jejich pozorování a k vybudování detektoru LIGO získal Nobelovu cenu. Byl též pořízen první přímý snímek černé díry, respektive jejího stínu. Cítíte zadostučinění vzhledem ke svému dlouholetému úsilí na tomto poli? — Ano, cítím velké uspokojení, zejména proto, že jsem **nasměroval svůj čas a energii do oblasti, která slavila úspěch.** Jsem ale také velmi vděčný skvělému týmu experimentátorů, se kterými jsem pracoval. Věřil jsem jim a oni si skutečně mou důvěru zasloužili, protože dokázali realizovat potřebné experimenty a potvrdit teoretické předpoklady – což byl jejich obrovský triumf.

Bolzanova přednáška [Učené společnosti České republiky](#), kterou Kip Thorne přednesl 15. března 2019 v Modré posluchárně rektorátu Univerzity Karlovy. Všechny tři Thornovy pražské přednášky najdete [ZDE](#).

Během svých přednášek v Praze jste řekl, že díky detekci gravitačních vln je astronomie dnes svým způsobem ve stejném okamžiku, v jakém byla před čtyřmi sty lety, kdy Galileo Galilei poprvé namířil svůj dalekohled na oblohu. Proč je pozorování vesmíru pomocí gravitačních vln tak odlišné? — Elektromagnetické vlny, jež využíval Galileo a další astronomové, například viditelné světlo, rádiové vlny nebo rentgenové záření, **jsou produkovány hmotou, oscilujícími elektrickými náboji.** Gravitační vlny ale vznikají jinak: vytváří je pohyb velkých množství energie. Nejsilněji je produkuje ta energie, která se podílí na zakřivení časoprostoru. Jejich ideálními zdroji jsou proto objekty tvořené silným zakřivením časoprostoru, nikoliv hmotou – například černé díry. Povaha černých děr i gravitačních vln je ostatně totožná; **zakřivením časoprostoru jsou tvořeny i gravitační vlny samé.**

Světlo nebo rentgenové záření lze proto dobře pozorovat konvenčními teleskopy skládajícími se z obyčejné hmoty, elektronů, protonů a podobně. Týmž druhem hmoty jsou totiž tvořeny i objekty ve vesmíru, které teleskopy zkoumají. **Pomocí gravitačních vln lze naopak studovat tu část vesmíru, která je v elektromagnetickém**

spektru neviditelná – objekty vytvořené zakřivením časoprostoru. Rozdíl je tedy obrovský.



Kip S. Thorne

(*1940) vystudoval na Kalifornské technice (1962), doktorát získal v Princetonu (1965) pod vedením Johna Archibalda Wheelera. Thorne se věnoval teorii gravitace a relativistické astrofyzice. Byl strhujícím učitelem a vynikajícím školitelem. Působil na Kalifornské technice (Caltech). Je spoluautorem (s Johnem A. Wheelerem a Charlesem C. Misnerem) proslulé učebnice *Gravitation* (1973). Spolu s Reinerem Weissem a Ronaldem Dreverem založili v r. 1984 projekt Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory známý pod akronymem LIGO ([viz schéma](#)). Thorne zásadním způsobem přispěl k tomu, že na tomto interferometru byly v roce 2015 poprvé detekovány gravitační vlny. V češtině vyšla Thornova kniha *Černé díry a zborcený čas* (2004). Snímek Luboš Svoboda, MFF UK

První pozorované gravitační vlny vznikly při splynutí dvou černých děr ve vzdálenosti 1,3 miliardy světelných let od Země. Vy jste se černým dířám začal věnovat v době, kdy dokonce ani někteří vědci nevěřili v jejich existenci. Neváhal jste někdy, jestli jste si skutečně zvolil správné téma? Trvalo pět desetiletí, než se existence černých děr potvrdila... — Neváhal jsem, protože my odborníci na černé díry jsme v ně velice věřili. Zakládali jsme své přesvědčení jak na fyzikálních zákonech, tak na pozorováních vesmíru, která nám říkala, že by tam černé díry být měly. Klíčovým problémem však nebyly černé díry, ale to, jestli bude možné postavit dostatečně citlivé detektory pro detekci gravitačních vln. Věděli jsme, jaká přibližně má citlivost být – takže velkou otázkou bylo, jestli se podaří vytvořit tým, který jí dokáže dosáhnout a tento experiment uskutečnit. Právě tím jsem strávil několik let; studoval jsem, jaké problémy se s tím pojí, než jsem se rozhodl do toho jít. Jakmile jsem experimentálním problémům dost porozuměl, věděl jsem, kdo jsou v této oblasti ti nejlepší experimentátoři, například Rainer Weiss a Vladimir Braginskij – věřil jsem jim a důvěru v ně jsem nikdy neztratil.

Když jste koncem osmdesátých let plánovali stavbu detektorů LIGO, věděli jste, že jejich první generace ještě pravděpodobně žádné gravitační vlny nezachytí. Jak se vám podařilo přesvědčit politiky, aby dali peníze na dlouhodobý a nejistý projekt, který během prvních deseti let měření neměl zaznamenat vůbec žádný signál? V roce 1992 Kongres zastavil stavbu gigantického urychlovače SSC v Texasu, ačkoliv na ni již utratil dvě miliardy dolarů. Projekt LIGO ale turbulence přežil. — Uspěli jsme z několika důvodů. Za prvé by byla odměna za úspěch obrovská: úplně nový způsob pozorování vesmíru a možnost studovat jevy, které by pravděpodobně fundamentálně změnily jeho chápání. Za druhé jsme měli vynikající experimentální tým včetně externích posuzovatelů, kteří se na projektu mohli podílet, skvěle řízený Barrym Barishem [další z nobelistů oceněných v roce 2017 spolu s Thornem, pozn. aut.]. Dále jsme byli vůči politikům naprosto upřímní a nijak jsme neskrývali, že projekt bude pravděpodobně vyžadovat dvě generace detektorů. Navíc jsme nemuseli získat na svoji stranu celý Kongres, stačilo přesvědčit členy výborů, které se zabývají rozpočtem na vědu.

Detektory LIGO také nebyly tak velký projekt jako supravodivý superurychlovač v Texasu. My jsme plánovali utratit miliardu dolarů, jejich rozpočet byl pět nebo dokonce deset miliard. A konečně jsme měli skvělé posudky, které oceňovaly kvalitu našeho týmu i pravděpodobnost úspěchu.

Podařilo se vám rozpočet dodržet? — Nakonec LIGO vyšel na 1,1 miliardy dolarů. Na první generaci detektorů jsme žádali 300 milionů a víc jsme neutratili. Barry Barish přesně věděl, co dělá: u každé fáze výstavby dokázal naplánovat, kolik bude stát a jak dlouho potrvá. A nikdy se nemýlil, což je ve vědě neobvyklé – a nejen ve vědě, vlastně v každém projektu, který využívá státní peníze.

Vědci doufají, že gravitační vlny se budou brzy detekovat zcela běžně, rutinním způsobem. Říkají, že se jim tak otevírá nové okno do vesmíru. Co čekají, že uvidí? Co může studium gravitačních vln prozradit? — Pozorovali jsme srážku černých děr, pomocí níž získáváme informace o tom, čemu říkáme dynamika geometrie – jak se chová časoprostor, když je silně zakřivený a rychle se mění. Pozorovali jsme srážku neutronových hvězd: detekce gravitačních vln ukazují, že opravdu jde o neutronové hvězdy; pozorování elektromagnetického záření zase potvrzují, že právě při takovýchto kolizích vzniklo zlato a platina, které máme dnes na Zemi.

Nedávno jsme rovněž zaznamenali první případ, kdy černá díra trhá na kusy neutronovou hvězdu. Signály nejsou moc silné, takže nutně potřebujeme další pozorování, abychom si mohli být jisti. Bude to ale velice zajímavé, protože pokud chceme skutečně porozumět chování hmoty při hustotách desetkrát vyšších, než jsou největší hustoty ve středu atomového jádra, pak je ideální cestou pozorovat, jak černá díra trhá neutronovou hvězdu. Je to daleko výhodnější případ než srážka dvou neutronových hvězd, protože když černá díra rve hvězdu na kusy, vidíte probíhající děje daleko zřetelněji. My jsme pravděpodobně zaznamenali slaboučký signál tohoto jevu. Až uvidíme silnější, prozradí nám víc. Očekáváme také, že během dvaceti let začneme pozorovat nejranější okamžiky vesmíru.

Předpokládáte, že zaznamenáme gravitační vlny z dob zrodu vesmíru, něco podobného jako reliktní mikrovlnné záření, nějaké „reliktní gravitační vlny“? — Ano, gravitační vlny vzniklé při samém velkém třesku. **Teorie, které hodně věříme, nám říká, že ať už se ve velkém třesku dělo cokoli, uvolnily se gravitační vlny – a tyto takzvané kvantové fluktuace vakua, jak jim říkáme, se zesílily inflací,** což je fáze extrémně rychlého rozpínání vesmíru v jeho nejranějších okamžicích. A my takto zesílené gravitační vlny zaznamenáme – nejprve nepřímou a později přímo. Budou nám vyprávět o samém velkém třesku a o procesu inflace, který tyto vlny zesílil. Předpokládám, že se v průběhu příštích deseti let začne výzkum výrazně věnovat právě tomuto tématu – přímému pozorování propojení zrodu vesmíru a inflace – a potrvá několik desetiletí.

Změní to náš pohled na vesmír? — To nevíme, záleží na tom, co se ukáže.

Konzervativní předpověď říká, že z velkého třesku povstaly zmíněné fluktuace vakua, jakési minimální množství vln, které příroda dovolí. Ty by pak byly zesíleny inflací. Ale samo zrození vesmíru podléhalo zákonům, kterým nerozumíme – zákonům kvantové gravitace. A protože jim nerozumíme, jsem poněkud skeptický vůči tomu, že je konzervativní předpověď správná. Pokud je, posílí to důvěru ve správnost našich současných představ o zrození vesmíru. Velmi vzrušující by ale bylo, kdyby se mylila. Pak bychom se totiž mohli dozvědět něco právě o zákonech kvantové gravitace.

Existuje také dost velká šance, že uvidíme gravitační vlny vytvořené ne přímo při vzniku kosmu, ale v době, kdy byl stár biliontinu vteřiny (tedy již po inflaci). Tehdy se zrodila elektromagnetická síla. Předtím byly energie částic, třeba elektronů, tak velké, že elektrické a magnetické pole neexistovalo – místo nich vládla takzvaná elektroslabá interakce a fyzikální zákony byly jiné než dnes. Jak vesmír chladl a dospěl do věku zhruba té biliontiny vteřiny, elektroslabá interakce se rozpadla; zrodily se elektromagnetismus a jaderná síla jakožto dvě samostatné síly. Byl to zřejmě divoký proces, který vyvolal gravitační vlny. Observatoř Evropské kosmické agentury nazvaná LISA, která by se měla vydat do kosmu počátkem třicátých let, má velmi slušnou šanci, že je zaznamená. Doufáme tedy, že spatříme nejen zrození vesmíru, ale také trochu pozdější zrození některých základních přírodních sil.

Očekáváte, že gravitační vlny pomohou zodpovědět také další fundamentální otázky, jako je podstata temné hmoty a temné energie nebo skutečnost, že se rozpínání vesmíru zrychluje? — Je určitá naděje, že ano. Například co se týče současné rychlosti rozpínání vesmíru, panují nejasnosti. Jedna pozorovací metoda je založená na výbuších supernov, druhá zkoumá reliktní mikrovlnné záření kosmického pozadí – a ohledně rychlosti rozpínání vesmíru se neshodují.

My ale máme naprosto nezávislou metodu, jak rychlost změřit. Bohužel zatím není dostatečně přesná. Už nám nicméně přinesla první číslo, první výsledky, když týmy kolem detektorů LIGO a Virgo pozorovaly srážku dvou neutronových hvězd. Prostřednictvím elektromagnetického záření se podařilo určit galaxii, v níž ke kolizi došlo, a zjistit, jak rychle se v důsledku rozpínání vesmíru vzdaluje od Země. Prostřednictvím gravitačních vln jsme pak mohli také docela přesně změřit, jak je daleko. Takže když zjistíte vzdálenost z dat gravitačních vln a určíte rychlost pohybu na základě dat elektromagnetického záření, lze z toho spočítat Hubbleovu konstantu [právě ta je mírou rychlosti rozpínání vesmíru, pozn. aut.]. Přesnost ještě není

dostatečná, aby nám poskytla klíčové odpovědi, ale s novými pozorováními se bude zlepšovat. Takže kombinací gravitačních a elektromagnetických údajů začneme být schopni studovat historii rozpínání vesmíru – snad s lepší přesností, než se dá dosáhnout pouze na základě elektromagnetického záření. A tím se dostaneme k otázkám, jako je temná energie.

Už jste se zmínil o kvantové gravitaci. Detekce gravitačních vln znovu a velmi přesvědčivě potvrdila Einsteinovu teorii relativity, ta je ale stále v rozporu s druhým pilířem současné fyziky – kvantovou fyzikou. Zatím se je nedaří sladit, propojit v jeden funkční celek. Myslíte si, že je třeba odhalit ještě něco fundamentálnějšího? Ještě další základní sílu, fundamentální jev, aby se obě tyto teorie podařilo propojit? — Dobře víme, že **musí dojít k nějaké změně fyzikálních zákonů, že relativita a kvantová fyzika samy o sobě jsou neslučitelné. Matematicky neslučitelné, protože jedna je lineární a druhá nelineární . Ale mohly by spolu koexistovat, respektive kvantová fyzika alias vřící vakuum 3+3 dimenzí dvou veličin se postupně rozbaluje a geometricky přechází do „paraboly“ a pak do euklidovského plochého nekřivého stavu Dosažení jejich kompatibility bude vyžadovat něco zásadně nového.** Je dost pravděpodobné, že to bude třeba nějaká verze teorie strun nebo M-teorie., **nebo HDV**

Věříte tedy v teorii strun? — Považuji za dosti pravděpodobné, že právě ona nabízí řešení. **Stovky jiných fyziků zase naopak věří že to pravděpodobně není...** Z minulých zkušeností také víme, že zákony fyziky, které se zprvu zdají úplně rozdílné, se nakonec mohou ukázat jako shodné. V raných dobách kvantové mechaniky existovala vlnová mechanika, kterou formuloval a rozvinul Erwin Schrödinger, a maticová mechanika, jejímž hlavním zakladatelem byl Werner Heisenberg. Vypadaly jako zcela odlišné – **ale ukázalo se, že jde o stejnou teorii, ovšem nazíranou z jiných matematických hledisek.** Trvalo několik let, než si tím byli vědci jisti, než tomu porozuměli. Známe i pár dalších případů, takže může nakonec vyjít najevo, že jak teorie strun, tak další přístupy ke kvantové gravitaci jsou správně.

Jako dva příklady mohou sloužit teorie strun a takzvaná smyčková kvantová gravitace. Obě teorie jsou rovnocenné, nebo existuje alespoň doména, v níž se rovnají. Takže si počkejme a uvidíme. Pilně se na tom pracuje a jsem optimista, že během několika příštích desetiletí dostaneme nějaké definitivní odpovědi. Je to ale velmi obtížné, cíle se nedosáhne rychle.

Ve svých přednáškách zmiňujete spoustu detektorů gravitačních vln, které mají v následujících desetiletích vzniknout na Zemi i ve vesmíru: LISA, Big Bang Observer, Einsteinův teleskop. Budou ale opravdu postaveny? Lidstvo může mít jiné priority a obavy, může chtít dávat peníze třeba na řešení klimatických změn. — Množství peněz, které tyto projekty potřebují, je malé v porovnání s náklady na řešení klimatických změn a dalších věcí, které mohou být pokládány za důležitější než astrofyzika. Mluvíme o skromných rozpočtech. Myslím proto, že se zmíněné detektory vybudovat podaří. Díky spolupráci detektorů LIGO a Virgo [Virgo je sesterský evropský detektor vybudovaný v Itálii, pozn. aut.] se už dozvídáme nové věci. Vědecká motivace pro vybudování Einsteinova teleskopu [má jít o evropský podzemní detektor gravitačních vln tvořený třemi desetikilometrovými rameny, pozn. aut.] a kosmické observatoře LISA je značná a náklady malé v porovnání s tématy,

kteřá jsou pro lidstvo důležitější, jako je klimatická změna. Nicméně tyto věci mají v rukou mladší generace.

Rád zdůrazňuji, že také objevy učiněné pomocí detektorů LIGO a Virgo jsou výsledkem práce mladší generace, než je ta moje. Já se podílel na startu LIGO a na stanovení jeho vědeckých cílů. Pak jsem ale projekt opustil, abych mohl iniciovat práci na počítačových simulacích srážek černých děr, které by projektu LIGO pomohly. Bylo to deset let před první detekcí gravitačních vln. Ta je výsledkem práce skvělého a početného týmu mladších lidí. Budoucnost je v jejich rukou.



Několik stovek posluchačů zaplnilo 17. 5. v 17 hodin posluchárnu na Právnické fakultě UK v Praze, aby vyslechlo Thornovu přednášku pro veřejnost *The Warped Side of the Universe*. Snímek Luboš Svoboda, MFF UK

Začal jste se věnovat počítačovým simulacím a ve své přednášce jste také ukázal obrázek splývajících černých děr. Někdo se zeptal, proč vidíme právě takový obraz, a vy jste odpověděl: „Nevím, tak to řekl superpočítač.“ To byl velmi zajímavý okamžik. Věříte, že touto metodou se dotýkáme nějaké fundamentální tváře reality? A jaké parametry do modelů zadáváte, když si nemůžete být jisti, jaké třeba jevy přesně odhalíte? — V tomto případě černá díra neosciluje a klidná černá díra má z astrofyzikálního hlediska jen dva parametry – hmotnost a spin (rotaci), nebo lépe směr rotační osy a spin jako vyjádření míry rotace vůči hmotnosti černé díry. To je všechno. Tomu, s čím vstupujeme do modelů, proto rozumíme s velmi vysokou přesností. To je ohromný rozdíl oproti situaci, kdy se zabýváte hmotou a kdy neznáte příliš dobře tzv. stavovou rovnici. V nitru neutronových hvězd vstupuje do hry mnoho parametrů, avšak u černé díry jich máme jen pár. Tým, se kterým pracuji, skupina mladších lidí, úspěšně provádí tyto počítačové simulace a využívá přitom formulací Einsteinových rovnic, což jim dovoluje postupovat s naprostou jistotou a skutečně rozumět tomu, nakolik je daná simulace přesná. Získáte výsledky, pak se můžete analyticky vrátit k rovnicím a snažit se získaným výsledkům porozumět – a skutečně to tak probíhá. Takže poté, co jsme viděli výsledky simulací, budeme moci docela dobře chápat podrobnosti přímo z rovnic, bez simulace. Tak to určitě bude. Naprosto ale věříme tomu, co v simulacích vidíme. A ohledně parametrů nepanuje žádná nejistota. Podíváme se

na tvary vln a z nich můžeme odvodit správné parametry pro hmotu a spin původních černých děr s ohledem na přesnost pozorování.

Jako vědecký poradce jste spolupracoval na filmu Interstellar. Jaká to pro vás byla zkušenost? — Spolupracovat s filmaři bylo velmi zábavné. A filmaře zároveň těšilo, že mohou spolupracovat se mnou a tvořit vědeckofantastický film založený na skutečné vědě. S režisérem a scenáristou Christopherem Nolanem jsme se spřátelili a on se mnou teď konzultuje různá vědecká témata dalších filmů.

Skutečně lze vletět do černé díry jako hlavní hrdina Cooper a přežít? — Nevíme. Jsme si ale dost jisti, že se uvnitř černých děr nacházejí celkem tři singularity. Kontakt s jednou či dvěma z nich možná přežít lze.

Film ale spoléhá na něco jiného. Cooper a robot TARS do černé díry vletí, aby tu ze singularity získali informace o zákonech kvantové gravitace, jejichž pochopení by mohlo Cooperově dceři pomoci zachránit lidstvo. Už to je velmi spekulativní. Především ale v příběhu vystupuje civilizace, která žije ve vícerozměrném prostoru. Ta postaví kosmickou loď rovněž se pohybující vícerozměrným prostorem, která může Coopera a TARS chytit, když spadnou do singularity, „vzvednout“ do vyšší dimenze, mimo centrum černé díry, a dopravit zpět k Zemi. To je samozřejmě nesmírně nepravděpodobné, ale úplně vyloučeno to není – nemohu zkrátka dokázat, že je to nemožné.

Současné představy a spekulace o těchto otázkách vysvětlují ve své knize *The Science of Interstellar*. Ve vícerozměrném prostoru sice s největší pravděpodobností nežijí civilizace ochotné pomáhat lidské rase, ale odehrává se tam velmi zajímavá fyzika, o níž asi máme celkem správné představy.

Veřejnost se obvykle nejvíc zajímá o exotické objekty a jevy, jako jsou bílé díry, červí díry, cestování časem. Jak vidíte možnost jejich existence? — I o tom jsem psal ve zmíněné knize. Máme například důvod se domnívat, že cestovat zpět časem se nedá, že každý stroj času, který vospělá civilizace postaví, sám sebe zničí, jakmile se ho ta civilizace pokusí aktivovat.

I když stroj cestuje do budoucnosti? — Pokud cestuje do budoucnosti, není problém. Putuje-li časem zpět, dojde k sebedestrukci stroje. Nevíme to ale s určitostí, nejsme si vůbec jisti, a usilovně se snažíme celé věci porozumět.

Také pevně věřím, že červí díry nemohou existovat přirozeně. Možná se ale dají vytvořit uměle, pokud je civilizace dostatečně vospělá. Pravděpodobně je však nelze udržet otevřené dost dlouho, aby jimi bylo možné cestovat. Jsou to ale odhady z oblasti, v níž jsme zatím ještě nedokázali vyřešit potřebné rovnice a pochopit, co příroda predikuje.

Zmínil jste řadu nezodpovězených otázek, na které by gravitační vlny mohly pomoci najít odpověď. Jaká je pro vás ta nejzajímavější, jejíž řešení byste si nejvíc přál znát? — Rád bych se dozvěděl podrobnosti o tom, jak se zrodil vesmír, protože tyto detaily v sobě také skrývají informace o zákonech kvantové gravitace, která zrod vesmíru řídila. To je pro mne opravdu záležitost, jež mne vzrušuje nejvíc.

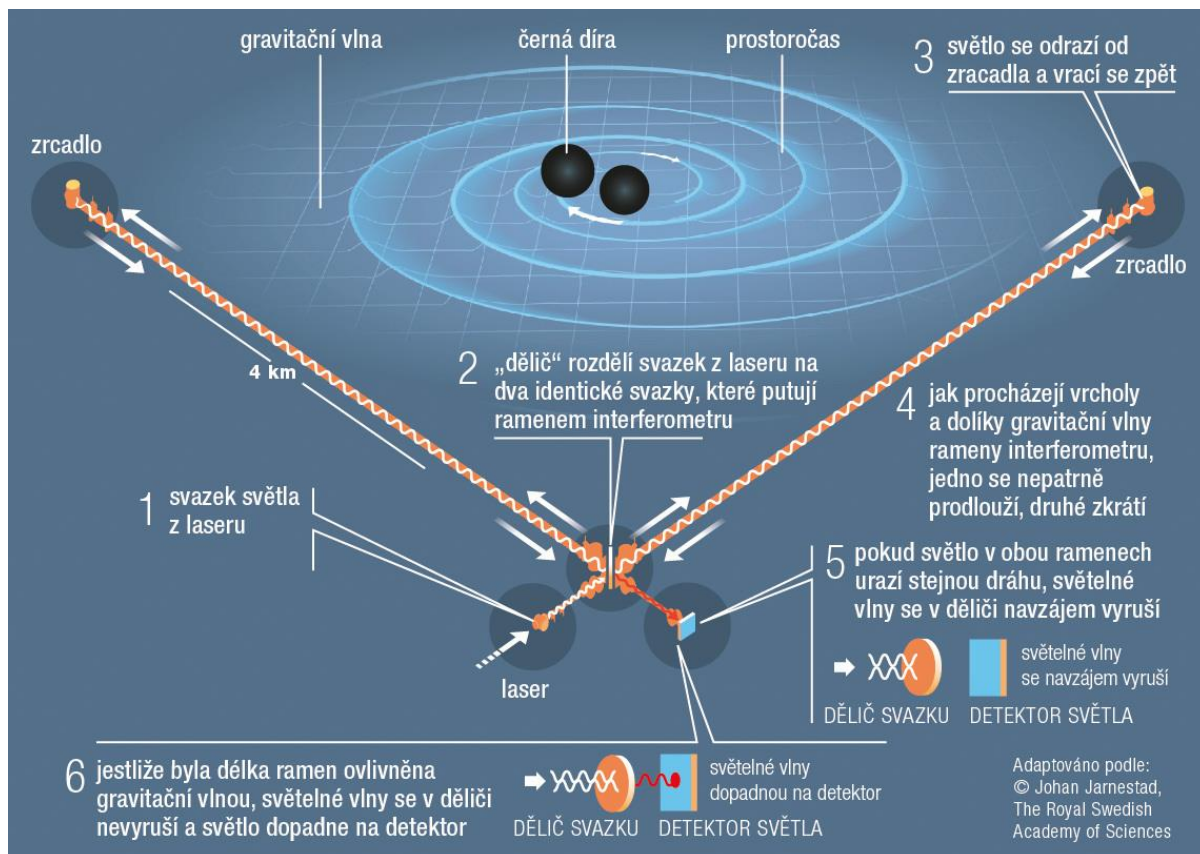


Schéma interferometru LIGO je jednoduché. Úspěch však spočíval v opravdu extrémní přesnosti. Podrobněji viz J. Langer: [Gravitační vlny aneb Příběh objevu „vrásek na prostoročase“](#).

Gravitační vlny potvrzují vesmírný zákon – princip křivení dimenzí dvou veličin, což vede ke stavbě a realizaci hmotových stavů : pole a elementární částice, pak ke konglomeraci vzájemných „sestav“ elementů jako jsou atomy, molekuly, sloučeniny atd.

JN 21.06.2020