

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jiří Podolský

Gravitační vlny a možnosti jejich detekce

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 40 (1995), No. 5, 272--288

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138310>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1995

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Gravitační vlny a možnosti jejich detekce

Jiří Podolský, Praha

Motto:

BORN: „Rád bych položil panu Einsteinovi otázku, totiž jak rychle se gravitační působení podle jeho teorie šíří. Že se tak děje rychlostí světla mi není docela zřejmé...“

EINSTEIN: „Je velmi jednoduché napsat rovnice pro případ, kdy perturbace pole jsou nekonečně malé. V tom případě se (složky metriky)  $g$  liší jen nekonečně málo od těch, jež by byly v nepřítomnosti perturbací. Perturbace se pak šíří stejnou rychlostí jako světlo.“

BORN: „Ale pro velké perturbace jsou věci jistě velmi komplikované?“

EINSTEIN: „Ano, je to matematicky složitý problém. Především je obtížné nalézt přesná řešení rovnic, protože rovnice jsou nelineární.“

Z diskuse po Einsteinově přednášce ve Vídni na podzim roku 1913

## 1. Chvála vln

Většinou si jen málo uvědomujeme, jak významnou roli při vnímání a poznávání okolního světa sehrávají vlny. Oba naše hlavní smysly, zrak i sluch, jsou ve své podstatě velmi citlivými detektory vlnění. Oči dokáží vnímat barevné světlo (elektromagnetické záření různých vlnových délek v rozsahu zhruba 400 nm až 700 nm), zatímco uši vnímají zvuky (vlny šířící se vzduchem, přičemž jejich vlnová délka pohybující se v rozsahu centimetrů až metrů odpovídá výšce tónu). Bez existence vln bychom se pohybovali ve světě slepí a hluchoněmí, odkázaní jen na možnost doteků, tedy bezprostředního kontaktu s předměty.

Nejen náš každodenní život, ale i astronomie by byla naprosto nemyslitelná bez existence elektromagnetických vln. Prakticky vše, co jsme se až doposud dozvěděli o vesmíru, nám bylo zprostředkováno právě jimi. Po celé věky hleděli lidé na oblohu pouhýma očima. Vynález dalekohledu počátkem 17. století se stal jednou z klíčových

---

RNDr. Jiří PODOLSKÝ, CSc. (1963), je asistentem na katedře teoretické fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8 (e-mail: podolsky@aci.cvut.cz).

událostí stojících u kolébky moderní přírodovědy. Optická spektroskopie a technika fotografického záznamu umožnily učencům minulého století dobudovat klasický obraz světa, dokázat, že všechny hvězdy jsou složeny z téhož materiálu jako naše Slunce a že v hlubinách vesmíru platí stejné fyzikální zákony jako v pozemských laboratořích. Vědcům první třetiny našeho století pak umožnily odhalit existenci galaxií, objevit rozpínání vesmíru a významně přispět k vybudování moderního obrazu světa založeného na Einsteinově teorii relativity. Tento triumf lze v jistém smyslu označit jako vyvrcholení programu optického pozorování vesmíru. Prakticky ve stejné době se však již začala psát nová éra v dějinách astronomie — éra astronomie „neviditelná“. Lidé začali zkoumat vesmír v celém spektru elektromagnetických vln, nejen v onom užoučkém pásmu vlnových délek zachytitelných našima očima. Nejprve se zrodila radioastronomie<sup>1)</sup>, studující elektromagnetické záření vysílené vesmírnými objekty na vlnových délkách větších než zhruba 1 mm, tedy v oboru mikrovln a rádiových vln. Po vzniku kosmonautiky začali astronomové s pomocí přístrojů umístěných na družicích studovat vesmír i v oboru infračerveném, ultrafialovém, rentgenovém a gama<sup>2)</sup>). Jestliže lidstvo až do 30. let tohoto století hledělo na vesmír v necelé jediné oktávě viditelného světla, dnes je nám dáno „naslouchat“ úchvatné vesmírné symfonii v celém rozsahu více než 96 oktáv elektromagnetického spektra pokrývajících vlnové délky řádově od  $10^{-24}$  m (gama fotony v kosmickém záření) do  $10^5$  m (záření typu III ze Slunce) — viz pozn. <sup>2)</sup>! Tak se ukázalo, že vesmírné objekty nejsou jen vzdálenými mdlými bludičkami, ale nositeli dynamických procesů obdařených obrovskou pestrostí a „barevností“.

Zdá se, že dnes již máme v hrubých rysech zmapována všechna klíčová fakta, která nám o vesmíru mohou zprostředkovat elektromagnetické vlny v plné šíři svého spektra. Tento elektromagnetický obraz světa se bude i nadále zpřesňovat a zjemňovat, ovšem asi jen v detailech. Jistě nás čekají ještě další zajímavé objevy, ale pravděpodobně jen málo jich bude tak zásadní povahy, jakými byly svého času objevy kvasarů, pulsarů, reliktového záření, oblaků organických molekul, tvorby a zániku hvězd, aktivity galaktických jader, projevů akrece v binárních systémech či gama záblesků. Určitě však není na místě propadat nostalgickým náladám nad koncem průkopnické, objevitelské éry elektromagnetické astronomie. Už proto ne, že — řečeno s básníkem — něco překrásného se končí, ale současně se něco překrásného počíná. Tím novým je v současné době vznikající obor experimentální gravitační astronomie. Půjde-li vše podle předpokladů, budeme schopni na přelomu tisíciletí zachycovat i analyzovat nejen elektromagnetické vlny přicházející k nám z vesmíru, ale též vlny gravitační.

---

<sup>1)</sup> Jako první objevil a správně interpretoval rádiové záření z kosmu roku 1932 americký radiofyzik českého původu Karel G. Janský, a to náhodně při studiu zdrojů rušení rádiového příjmu na krátkých vlnách. Skutečný rozmach radioastronomie nastal ovšem až koncem 40. let. Podrobný výklad základů radioastronomie včetně historie vzniku tohoto oboru lze nalézt v práci J. BUDĚJICKÝ, Z. PLAVCOVÁ, M. PLAVEC: *Radioastronomie* (nakladatelství ČSAV, Praha, 1962).

<sup>2)</sup> Přehled nejdůležitějších poznatků o tom, jak se nám vesmír jeví při pozorování na různých vlnových délkách elektromagnetického záření, tj. o vesmíru rádiovém, infračerveném, viditelném, ultrafialovém, rentgenovém i gama, lze nalézt například v 6. kapitole knihy J. KLECZEK: *Vesmír kolem nás* (Albatros, Praha, 1986).

## 2. Chvála gravitačních vln

Obecně lze říci, že vlnění představuje specifický kolektivní kmitavý stav jistého prostředí. V případě nejjednodušších tzv. harmonických vln mají kmity ve všech místech prostředí stejnou frekvenci, zatímco jejich fáze jsou navzájem posunuty, a to úměrně vzdálenosti míst. Právě v důsledku tohoto fázového posunutí (jež lze interpretovat jako důsledek „zpožďující“ vazby mezi kmity v sousedních místech) vznikají vlny šířící se od zdroje jistou konečnou rychlostí. Prostřednictvím vln lze proto přenášet informace směrem od jejich zdroje. To je předurčuje k tomu, aby se staly nositelem poznatků o vzdálených objektech.

V případě mořských vln je oním kmitajícím prostředím vodní hladina, v případě zvuku vzduch, v případě elektromagnetických vln elektromagnetické pole. V případě vln gravitačních kmitá sám prostor a čas. Toto poněkud podivně znějící tvrzení se nyní pokusíme podrobněji vysvětlit.

### Gravitace jako zakřivení prostoročasu

Podle gravitační teorie zformulované v konečné podobě Albertem Einsteinem koncem roku 1915 lze veškeré gravitační efekty vysvětlit jako důsledek zakřivení prostoročasu. Každý fyzikální objekt kolem sebe mění geometrické vlastnosti prostoru a času, zakřivuje je, a to tím více, čím větší má hmotnost. Tělesa se proto nepohybují v pevně daném, neměnném euklidovském prostoru měřena absolutním časem, ale v prostředí, jehož geometrie je zdeformována ostatními objekty. Newton si představoval, že každá planeta obíhá kolem Slunce proto, že je k němu přitahována gravitační silou. Tato síla zakřivuje dráhu planety, jež by bez přítomnosti síly byla přímá. Podle Einsteina ovšem mezi Sluncem a planetou *nepůsobí žádná gravitační síla*. Dráha planety je zakřivena prostě proto, že *sám prostor* (i čas), v němž se planeta pohybuje, *je zakřiven* přítomností Slunce. Planeta je nucena obíhat kolem Slunce podobně jako hliněná kulička cvrnknutá do vyhloubené jamky. Pokud je kulička nastřelena s energií větší, než je vazbová, nebude sice jamkou zachycena, ale směr jejího pohybu se změní. Podobně jsou nuceny změnit svůj směr také komety, a dokonce i světelné paprsky, protože i ty se pohybují ve Sluncem zakřiveném prostoročase.

Tato myšlenka, jež je podstatou Einsteinovy gravitační teorie všeobecně známé pod názvem obecná teorie relativity, má rysy geniality: je prostá a přitom správná! Správná v tom smyslu, že všechny doposud provedené experimenty a testy (a bylo jich za 80 let existence teorie provedeno bezpočet<sup>3)</sup>) prokázaly naprostý kvantitativní

---

<sup>3)</sup> Zdaleka se už nejedná pouze o měření všeobecně známých efektů stáčení perihélia Merkura, ohybu paprsků či gravitačního rudého posuvu (mimoходом: relativní chyba těchto měření  $\delta$  je dnes již menší než  $10^{-3}$ ), ale o desítky dalších, mnohem rafinovanějších a technicky náročných pokusů. Jen jako pouhou ilustraci tu uvedme například ověřování platnosti slabého principu ekvivalence laserovým měřením vzdálenosti Měsíce ( $\delta < 10^{-12}$ ), testy nezávislosti rychlosti šíření světla na směru pomocí techniky laserového chlazení atomů ( $\delta < 10^{-20}$ ) nebo ověřování nepriviléovanosti souřadnicových bází měřením zrychlení pulsarů ( $\delta < 10^{-10}$ ). Obecná teorie relativity doposud úspěšně přestála všechny testy. Důkladný

souhlas předpovědí teorie se skutečností. Poznamenejme však, že cesta od zmíněné geniální myšlenky vysvětlující gravitaci zakřivením prostoročasu ke správné matematické formulaci obecné teorie relativity nebyla nijak snadná (vyžádala si takřka deset let Einsteinova úsilí) a že z matematického hlediska je to teorie dosti komplikovaná<sup>4</sup>). I přes tuto složitost se teoretickým fyzikům daří používat obecnou teorii relativity pro stále přesnější popis veškerých gravitačních procesů známých dnešní astronomii. Einsteinova teorie se stala pilířem moderní kosmologie, předpověděla existenci černých děr, umožnila pochopit strukturu a vývoj hvězd včetně procesů probíhajících na samém konci jejich života jako jsou výbuchy supernov či vznik neutronových hvězd. Obecná teorie relativity předpověděla i existenci specifických kmitavých stavů prostoročasu: *gravitačních vln*<sup>5</sup>). Tak se dostáváme zpět k hlavnímu tématu tohoto příspěvku.

### Co jsou gravitační vlny a jak vznikají

Při dopadu kamene vzniknou na doposud rovné vodní hladině vlnky, drobná periodická zakřivení povrchu, jež se začnou šířit směrem od místa dopadu. Stoupne-li si člověk doprostřed trampolíny, vytvoří se prohlubeň. Začne-li však člověk na trampolíně skákat, prohlubeň bude periodicky měnit svůj tvar a postupně se rozvlíne celá

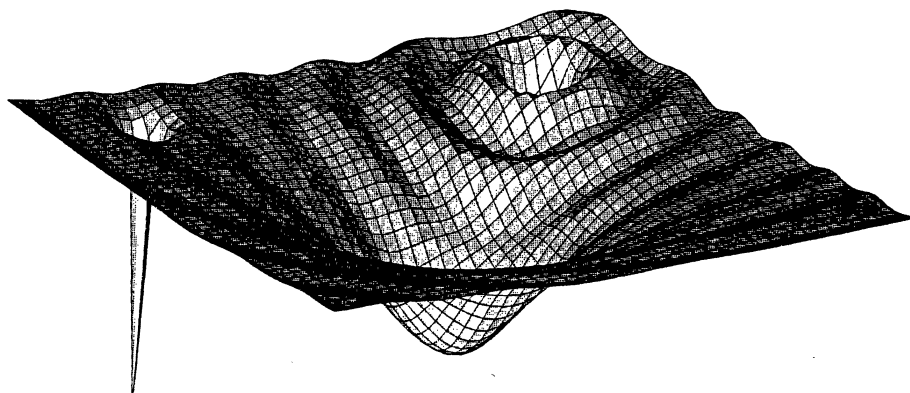
---

rozbor provedených i připravovaných experimentů je obsahem knihy C. M. WILL: *Theory and Experiment in Gravitational Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1981). Ještě novější údaje jsou uvedeny v práci C. M. WILL: *The confrontation between general relativity and experiment: a 1992 update*, *International Journal of Modern Physics D1* (1992), 13.

<sup>4</sup>) Geometrie zakřiveného prostoročasu (jehož dimenze je čtyři, neboť každá událost je určena třemi prostorovými a jednou časovou souřadnicí) je popisována tzv. metrikou. Metrika je symetrická matice o čtyřech řádcích i sloupcích, která v každém bodě popisuje základní geometrické vlastnosti jako například délku vektoru či úhel mezi dvěma směry. Protože se geometrie zakřiveného prostoročasu mění bod od bodu, je každý prvek matice funkcí souřadnic. Klíčovou rovnicí obecné teorie relativity je tenzorová Einsteinova rovnice gravitačního pole, která jednoznačně určuje tvar metriky popisující zakřivení způsobené konkrétním rozložením hmot. Z matematického hlediska představuje Einsteinova rovnice soustavu deseti parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu pro deset neznámých funkcí čtyř proměnných. Řešení této soustavy je velmi obtížné, přičemž největší nesnáze způsobuje nelinearita rovnic. Srozumitelný výklad obecné teorie relativity včetně zavedení nezbytných pojmů je například ve skriptech L. DVOŘÁK: *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru* (SPN, Praha, 1984); velmi podrobně pak v knize C. W. MISNER, K. S. THORNE, J. A. WHEELER: *Gravitation* (Freeman, New York, 1973).

<sup>5</sup>) Existenci gravitačních vln předpověděl sám Einstein již v roce 1913. O tři roky později dokázal, že gravitační vlny jsou nutným matematickým důsledkem obecné teorie relativity. Einstein a další relativisté pak v dalších letech zkoumali vlastnosti slabých gravitačních vln šířících se v plochem prostoru (je-li totiž amplituda vln malá, lze Einsteinovy rovnice výrazně zjednodušit tzv. linearizací). Později byly nalezeny desítky dalších fyzikálně realističtějších a přesných řešení popisujících obecnější gravitační vlny šířící se zakřiveným vesmírem. Více informací lze nalézt například ve skriptech J. BIČÁK: *Teorie relativity a gravitační vlny* (Univerzita Karlova, Praha, 1986); J. BIČÁK: *Exact radiative space-times*, Max-Planck-Institut f. Physik und Astrophysik preprint, MPA 404, October 1988; J. BIČÁK: *Recent rigorous studies in gravitational radiation theory* v knize *Selected topics in QFT and mathematical physics*, ed. J. NIEDERLE, J. FISCHER (World Scientific, Singapore, 1990).

trampolína. Podobným způsobem vznikají i gravitační vlny. Každá hvězda zakřivuje prostoročas ve svém okolí. Změní-li hvězda náhle svůj tvar (například v okamžiku svého zániku, který pozorujeme jako výbuch supernovy), změní se též okolní geometrie a vzniklý rozruch se bude předávat dále. Směrem od hvězdy se začnou šířit konečnou rychlostí gravitační vlny, „poruchové“ vlnky křivosti prostoročasu (obr. 1). V jejich amplitudě a frekvenci je zakódována cenná informace o procesu zániku hvězdy. Kdybychom dokázali takové gravitační vlny zachytit a dešifrovat informaci, kterou přenášejí, otevřel by se nám pohled přímo do samotného srdce hvězdného kolapsu, při němž vzniká buď neutronová hvězda nebo dokonce černá díra. Prostřednictvím gravitačních vln bychom mohli nahlédnout do oblastí dnes nespátřitelných, neboť jsou pro veškeré elektromagnetické záření neprůhledné. Mohli bychom lépe poznat fyzikální procesy odehrávající se při vzniku neutronových hvězd a černých děr.



Obr. 1. Schématické dvourozměrné znázornění zakřivení prostoročasu v okolí objektů, které je podle Einsteina podstatou gravitace. V černé díře (vlevo) dosahuje křivost, na rozdíl od obyčejné hvězdy (uprostřed), nekonečné hodnoty. Při výbuchu supernovy (vzadu) vznikají gravitační vlny — vlnky křivosti šířící se od zdroje všemi směry rychlostí světla.

Gravitační vlny vznikají nejen při výbuších supernov, ale obecně všude tam, kde se nerovnoměrně mění tvar objektu, a tím i rozložení hmoty (fyzikové jej popisují tzv. kvadrupólovým momentem). Významnými zdroji gravitačních vln jsou například dvojhvězdy: jak obě složky systému obíhají navzájem jedna kolem druhé, celkové rozložení hmoty osciluje s periodou rovnou době oběhu. Čím blíže jsou obě obíhající hvězdy a čím jsou hmotnější, tím silnější jsou i generované vlny. Silnými zdroji gravitačních vln jsou proto velmi těsné systémy, z nichž alespoň jednou složkou je neutronová hvězda (pulsar) nebo černá díra. Vůbec nejsilnější gravitační vlny vznikají v okamžiku srážky neutronových hvězd či splynutí černých děr.

Kromě gravitačních vln generovaných různými astrofyzikálními objekty a procesy předpokládají teoretikové též existenci „kosmologických“ gravitačních vln. Takové

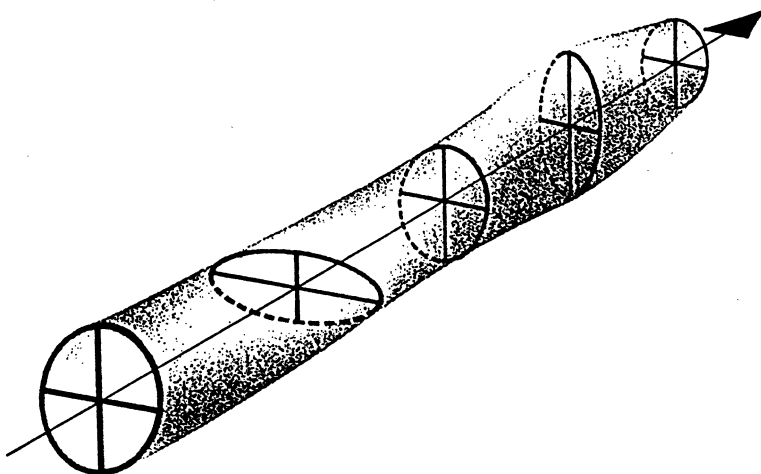
vlny by byly svědkem velmi raných stádií existence vesmíru, kdy ještě nemusel být v globálním měřítku tak homogenní a izotropní, jako je dnes. Protože gravitační vlny interagují s hmotou jen velmi slabě, jimi přenášená informace je velmi dobře „zakonzervována“. S pomocí detektorů gravitačních vln bychom tak mohli dohlédnout nepředstavitelně daleko do minulosti přes propast více než deseti miliard let v principu až do doby, kdy se zrodil sám prostor a čas v nám známé podobě, což nastalo podle dnešních představ pouhých  $10^{-43}$  sekundy po velkém třesku! Poznamenejme v této souvislosti, že prostřednictvím elektromagnetických vln nelze studovat vesmír mladší než 100 000 let. Na počátku byl vesmír velmi žhavý, hmota byla ionizována, a proto elektromagneticky neprůhledná. Teprve v době zhruba 100 000 let po velkém třesku ochladl natolik, že hmota zrekombinovala a elektromagnetické záření začalo žít svým vlastním životem odděleným od ostatní hmoty. Od té doby volně bloudí vesmírem a dnes jej pozorujeme jako tzv. reliktové mikrovlnné záření (za jeho objev učiněný v roce 1965 byla Penziasovi a Wilsonovi udělena Nobelova cena). S pomocí reliktového *gravitačního* záření by se nám mohlo podařit získat přímý obraz velkého třesku a stanout doslova tváří v tvář samotnému stvoření světa.

Astronomové a fyzikové by prostřednictvím gravitačních vln získali možnost nahlížet do vesmíru skrze další, úplně nové a odlišné pozorovací okno. Očekáváme, že jejich svědectví zcela nezávislé od elektromagnetického by přispělo k hlubšímu poznání důležitých astrofyzikálních procesů (včetně těch nejzajímavějších jako jsou výbuchy hvězd nebo srážky černých děr) i k získání přesnějších odpovědí na klíčové otázky kosmologie (zejména okolností zrodu vesmíru a jeho globální struktury). Historie nám navíc dává dobré důvody k naději, že pomocí gravitačních vln odhalíme také jevy dnes nepředvídané. Dost možná právě ty budou patřit k nejzávažnějším.

## Vlastnosti gravitačních vln

Přestože gravitační vlny představují šířící se drobná zakřivení prostoročasu, zatímco vlny elektromagnetické jsou specifickým vibračním stavem elektromagnetického pole, mají oba zmíněné typy vln některé společné rysy. Šíří se vesmírem stejnou rychlostí, a to rychlostí světla (ta, jak známo, představuje maximální možnou rychlost vzájemného pohybu fyzikálních objektů i přenosu informace). Oba typy vln mají příčný charakter, neboť rozkmitávají tělesa pouze ve směrech kolmých na směr šíření. Odlišnost naproti tomu spočívá v tom, že elektromagnetická vlna dokáže rozkmitat jen elektricky nabitě částice (například elektrony v anténě přijímající rádiové vlny), zatímco vlna gravitační ovlivňuje geometrické vlastnosti prostoročasu, a působí proto na veškerou hmotu. Vlny se liší též svými polarizačními vlastnostmi. Oba typy sice připouštějí dva nezávislé polarizační stavy, ale ty mají u gravitačních vln poněkud složitější charakter. Zatímco lineárně polarizovaná elektromagnetická vlna kmitá jen v jediném směru (například svislém nebo vodorovném), polarizovaná gravitační vlna kmitá jistým způsobem v celé rovině kolmé na směr šíření. Pokud by se například gravitační vlna šířila ve směru rovné gumové hadice, způsobila by periodické deformace

kruhového průřezu hadice v eliptický<sup>6)</sup> naznačené na obr. 2. Odlišnost polarizačních vlastností odpovídá tomu, že elektromagnetické pole je vektorové povahy, zatímco gravitační pole je tenzorové (proto má foton spin 1, kdežto graviton spin 2).



Obr. 2. Gravitační vlna se v rovině kolmé na směr šíření projevuje periodickými deformacemi kruhového prstence testovacích částic do eliptického.

Co však z praktického hlediska naprosto zásadním způsobem odlišuje vlny elektromagnetické od gravitačních, je jejich různá „intenzita“. Elektromagnetické vlny lze generovat i zachycovat snadno, o čemž se sami přesvědčujeme doslova každým okamžikem. Příkladem velmi účinného elektromagnetického detektoru jsou naše oči. Lze dokonce říci, že schopnost uměle vyrábět a detekovat elektromagnetické vlny je určitou mírou rozvoje lidské civilizace počínající umělým zažehnutím ohně a končící dnešními telekomunikacemi. Naproti tomu gravitační vlny jsou velmi slabé. Je známo, že gravitační interakce je nejslabší fyzikální silou ve vesmíru (jako jediná však efektivně působí na obrovské vzdálenosti, a proto je přes svůj handicap dominantní silou ovládající kosmické procesy). To znamená, že vzájemné působení mezi gravitací a hmotou je

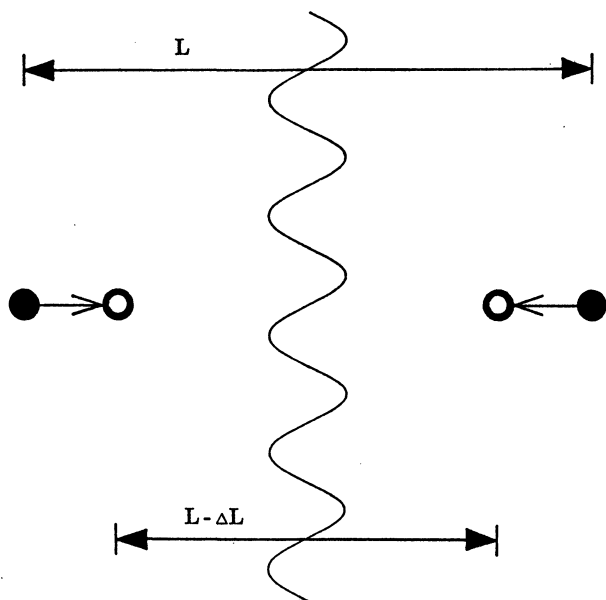
<sup>6)</sup> Zmíněné dva nezávislé polarizační stavy gravitačních vln se od sebe liší pouze orientací os elips, do nichž je vlivem vlny deformována kružnice: bývají proto označovány symboly +, resp. ×. Uvažujme kruhový prstenec testovacích částic ležící v rovině kolmé na směr šíření gravitační vlny s polarizací + a periodou kmitů  $T$ . Vlna způsobí, že horní i dolní část prstence se nejprve začnou od středu kruhu vzdalovat, zatímco levá a pravá část se mu začnou přibližovat. Kruh se tedy zdeformuje do elipsy se svislou delší osou, přičemž maximální deformace je dosaženo v čase  $\frac{1}{4}T$ . Pohyb částic prstence se poté zastaví a obrátí, takže v čase  $\frac{1}{2}T$  se eliptická deformace vyrovná zpět to kruhu. Ve druhé polovině periody vlny se naopak horní a dolní část budou pohybovat směrem do středu, zatímco levá a pravá část od středu. V čase  $\frac{3}{4}T$  je dosaženo maximální deformace, ale delší osa elipsy je nyní vodorovná. V čase  $T$  je prstenec opět kruhový a celý děj se od začátku opakuje. U gravitačních vln s polarizací × je obrázek deformací naprosto stejný, jen osy eliptických deformací jsou stočeny o 45 stupňů (podrobněji jsou vlastnosti gravitačních vln a jejich vliv na testovací částice popsány v literatuře uvedené v pozn. <sup>4)</sup>, <sup>5)</sup>).



velmi malé v porovnání se silami elektromagnetickými či jadernými. (Například poměr sil vzájemného gravitačního a elektrostatického působení dvou elektronů je  $10^{-42}$ !) Účinnost, s jakou jsou gravitační vlny generovány nebo detekovány, je proto nepředstavitelně malá. A to je důvod, proč jsme až do dnešní doby přes veškerý úžasný rozvoj moderních technologií nedokázali zkonstruovat přijímač schopný přímým způsobem zachycovat gravitační vlny přicházející k nám z vesmíru, natož abychom byli schopni vyrobit dostatečně silný umělý vysílač.

### Zdroje gravitačních vln

Sílu gravitační vlny popisuje její amplituda, kterou fyzikové standardně označují symbolem  $h$ . Je to bezrozměrné číslo vyjadřující, jak velkou relativní změnu vzdálenosti dvou testovacích částic vlna svým průchodem vyvolá, tj.  $h = \Delta L/L$ , kde  $L$  je počáteční vzdálenost částic a  $\Delta L$  je změna jejich vzájemné vzdálenosti (viz obr. 3). Amplituda  $h$  samozřejmě vyjadřuje i relativní zploštění kruhového průřezu



Obr. 3. Gravitační vlna mění vzájemné vzdálenosti testovacích částic. Je-li  $L$  původní vzdálenost dvou částic a  $\Delta L$  změna jejich vzdálenosti způsobená vlnou, vyjadřuje číslo  $h = \Delta L/L$  amplitudu (sílu) gravitační vlny.

hadice v eliptický, o němž jsme již hovořili. Lze například spočítat, že ocelový válec hmotnosti 500 tun rotující na samé hranici roztržení by generoval gravitační vlny amplitudy řádově  $h \sim 10^{-40}$ . Nikdo si dnes nedokáže ani v principu představit detektor schopný měřit tak nepatrná relativní posunutí částic či deformace těles. Gravitační vlny kosmického původu mohou být o plných 20 řádů silnější, ale i tak jejich detekce leží zatím za hranicemi našich možností. Přehled hlavních předpokládaných zdrojů

kosmických gravitačních vln včetně příslušných amplitud, charakteristických tvarů signálů a typických frekvencí je shrnut v následující tabulce:

zdroj	amplituda	typ signálu	frekvence
SN v Galaxii	$10^{-18}$	puls	1 kHz
Velkém Magellanově oblaku	$10^{-19}$		
hnízdě galaxií v Panně	$10^{-21}$		
splynutí dvou černých děr	$10^{-20}$	kvaziperiodický	10 Hz
binární systém dvou NH	$10^{-22}$	kvaziperiodický	< 1 kHz
vibrace černé díry	?	tlumené oscilace	< 10 kHz
velký třesk	?	šum	?

Použité zkratky: SN znamená supernova, NH znamená neutronová hvězda

Musíme ovšem poznamenat, že údaje v tabulce jsou pouze orientační a konkrétní hodnoty závisí na řadě okolností a předpokladů. Hlavním faktorem je vzdálenost zdroje, neboť amplituda vln se vzdáleností klesá ( $h \sim 1/r$ ), a dále účinnost zdroje, tedy množství energie, které se při daném procesu předá gravitačním vlnám<sup>7)</sup>.

Zdálo by se tedy, že nejsnáze budou zachytitelné gravitační vlny generované výbuchem supernovy v naší Galaxii. Úskalí ovšem spočívá v tom, že k takové události dochází velmi vzácně, v průměru jen jednou za 30 let. Z praktického hlediska bude proto nutné zkonstruovat přinejmenším tisíckrát citlivější detektory schopné zaznamenat vlny ze vzdálenějších zdrojů. Při citlivosti  $10^{-21}$  bychom již měli být schopni zachytit gravitační vlny generované supernovami v hnízdě galaxií v souhvězdí Panny, vzdáleném od nás 40 milionů světelných let. V tomto obrovském shluku více než 2000 galaxií je tolik hvězd, že ročně vybuchne několik supernov. To je již docela přijatelná četnost na to, aby se pátrání po gravitačních vlnách a následný rozbor získaných měření staly systematickou prací a přestaly být jen čekáním na zázrak.

### 3. Chvála detektorů gravitačních vln

První snahy o stavbu zařízení umožňujícího detekci gravitačních vln sahají do konce 50. let. Průkopníkem a nejvýznamnější osobností na tomto poli se stal Joseph

<sup>7)</sup> Velmi přibližně platí vztah  $h \sim 10^{-17} E/r$ , kde  $r$  je vzdálenost zdroje od Země měřená ovšem v násobcích hodnoty 30 000 světelných let (což je přibližně vzdálenost Slunce od středu Galaxie),  $E$  je zhruba energie zdroje (související s nesymetrickou změnou jeho tvaru), která je odnášena gravitačními vlnami měřená v násobcích klidové energie Slunce  $M_{\odot}c^2$ . Pokud by například v blízkosti jádra Galaxie vybuchla hvězda hmotnosti Slunce a předala 10 % své energie gravitačním vlnám, bylo by  $r = 1$  a  $E = 0,1$ , takže amplituda gravitačních vln měřená na Zemi by byla  $h \sim 10^{-18}$ , což odpovídá hodnotě v prvním řádku tabulky (podrobněji: K. S. THORNE v knize *300 years of gravitation*, eds. S. W. HAWKING, W. ISRAEL (Cambridge University Press, Cambridge, 1987); skriptu uvedená v pozn. <sup>5)</sup>).

Weber z Marylandské univerzity, který navrhl konstrukci *rezonančního detektoru*<sup>8)</sup>. Jednalo se v podstatě o velký hliníkový válec hmotnosti 3,5 tuny zavěšený ve vakuové komoře a izolovaný od vnějších rušivých vlivů, zejména seismických. Deformace válce byly zaznamenávány citlivými piezoelektrickými snímači. Průchod gravitační vlny by válec rozkmital, přičemž při vhodných frekvencích vlny by rezonanční efekt způsobil zesílení vibrací. Aby Weber a jeho spolupracovníci vyloučili falešné signály způsobené pozemskými vlivy, prováděli měření dvěma stejnými detektory vzdálenými od sebe stovky kilometrů. Vybírány byly jen ty signály, kdy se oba detektory rozezvučely současně. Počínaje rokem 1968 Weber zaznamenával několik desítek takových koincidencí ročně, ale přesto větší část fyzikální komunity nepřijala jeho interpretaci, že se jednalo o projevy gravitačních vln přicházejících ze středu Galaxie. Hlavní argument spočívá v tom, že ačkoli citlivost detektoru dosahovala na svou dobu fantastické hodnoty  $10^{-16}$ , byla stále nejméně stokrát horší, než kolik vyžadovalo zachycení nejsilnějších teoreticky předpokládaných gravitačních vln (viz tabulka). Navíc se nepodařilo, i přes velké úsilí, zopakovat Weberovy pokusy s kladným výsledkem jinou nezávislou experimentální skupinou. Všeobecně se proto předpokládá, že signály Weberem interpretované jako gravitační vlny byly ve skutečnosti jen důsledkem nějaké systematické chyby jeho zařízení.

Přestože Weberovo průkopnické dílo nebylo završeno jednoznačným úspěchem, mělo stimulující účinek a našlo mnoho pokračovatelů. Četné skupiny po celém světě pracovaly v uplynulých desetiletích na dalším vylepšování rezonančních detektorů Weberova typu. Podařilo se jim například snížit tepelný šum atomů vnořením celého zařízení do kapalného hélia, namísto piezoelektrických snímačů se začalo používat citlivějších supravodivých akcelerometrů nebo SQUIDů atd. Dnešní detektory (například na Stanfordské universitě) proto již dosahují citlivosti řádu  $10^{-18}$  postačující k zachycení gravitačních vln přicházejících ze supernov v naší Galaxii. Zatím jsme, bohužel, na takovou vzácnou událost čekali marně.

## Binární pulsar

70. léta ovšem přinesla jiný nečekaný a vlastně senzační úspěch: nic menšího než *nepřímý důkaz existence gravitačních vln*. V létě roku 1974 objevili astronomové Joseph Taylor a Russell Hulse pulsar<sup>9)</sup>, který dnes nese označení PSR 1913+16.

---

<sup>8)</sup> Popis Weberova detektoru a rovněž rozbor jeho měření je detailněji uveden například v článkách J. LANGER: *Pozorování gravitačních vln*, Čs. čas. fyz. A24 (1974), 501; V. MARVANOVÁ: *Detekce gravitačních vln*, Pokroky mat., fyz. a astr. XXI (1976), 276.

<sup>9)</sup> Pulsary jsou neutronové hvězdy, které zbudou po výbuchu supernov. Jejich hmotnosti jsou zhruba stejné jako je hmotnost našeho Slunce, ale rozměry mají jen asi 10 km. V důsledku zákona zachování momentu hybnosti velmi rychle rotují kolem své osy (mnohem rychleji než jednou za sekundu) a budí kolem sebe nesmírně silná magnetická pole. Nabitě částice urychlované v těchto polích vysílají úzce směřovaný paprsek tzv. synchrotronového rádiového záření. Protože se hvězda otáčí, paprsek ozařuje vesmír podobně jako světlo majáku. Vzdálený pozorovatel nacházející se ve vhodném směru proto vidí pulsy, záblesky rádiových vln. Podrobnější popis pulsarů obecně i fyzikálních parametrů pulsaru PSR 1913+16 lze nalézt např.

Pečlivou a dlouhodobou analýzou rádiových pulsů zjistili, že se ve skutečnosti jedná o unikátní binární systém, v němž obíhají dvě neutronové hvězdy kolem sebe po velmi protáhlé, prakticky eliptické dráze jednou za pouhých 8 hodin! Při svém oběhu se obě hvězdy k sobě přibližují až na vzdálenost srovnatelnou se vzdáleností Měsíce od Země. V tak těsném dvojhvězdném systému jsou všechny relativistické efekty velmi výrazné (například stáčení hlavní osy kvazieliptické dráhy zde dosahuje hodnoty více než  $4^\circ$  za rok, zatímco pro soustavu Slunce–Merkur pouhých  $43''$  za století). Binární pulsar se proto stal úžasnou „laboratoří“ gravitační fyziky. Nejdůležitější se ukázalo zjištění, že se oběžná doba neustále zkracuje, takže se obě neutronové hvězdy k sobě „spirálovitě“ přibližují každoročně o několik metrů. Tento experimentální fakt se stal dalším vynikajícím potvrzením Einsteinovy obecné teorie relativity, která předpovídá, že odpovídající množství ztracené vazbové energie systému je odnášeno vyzařovanými gravitačními vlnami. Dosavadní pozorování potvrzují ohromující soulad teoretické předpovědi zkracování oběžné doby o  $0,0758$  ms za rok s měřenou hodnotou ( $0,0760 \pm 0,0005$ ) ms za rok. Tak dobrý souhlas se stal triumfem obecné teorie relativity a přesvědčil i skeptiky, že gravitační vlny v přírodě opravdu existují. Zcela oprávněně byli Hulse s Taylorem za objev binárního pulsaru PSR 1913+16 odměněni v roce 1993 Nobelovou cenou za fyziku.

Lze tedy říci, že gravitační vlny již byly prokázány, přestože experimentální argumenty ve prospěch jejich existence jsou zatím jen nepřímé. Doposud se ovšem nepodařilo provést jejich přímou detekci pomocí detektoru, technického laboratorního zařízení schopného měřit odpovídající deformace prostoročasu. Taková událost by přitom nejen definitivně uzavřela jednu důležitou kapitolu v dějinách fyziky, ale znamenala by zrod další praktické experimentální metody astronomie, neboť ze směru, amplitudy, frekvence a polarizace gravitačních vln by bylo možné zjišťovat vlastnosti a parametry příslušných astrofyzikálních zdrojů.

Zmiňovali jsme se již o rezonančních detektorech Weberova typu. Dnes se ale zdá, že čest státi se prvním úspěšným gravitačním teleskopem bude vyhrazena pro detektor jiného typu opírající se o princip *optické interferometrie*.

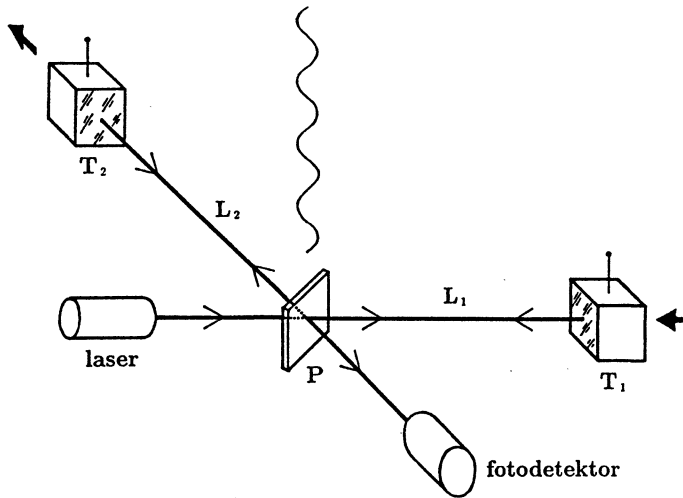
## Interferometrické detektory

Interferometr vynalezl před více než stoletím Albert Michelson. Spolu s Edwardem Morleyem jej použil ve slavném pokusu změřit závislost rychlosti světla na pohybu Země (jak známo, negativní výsledek jejich experimentu vedl posléze ke vzniku speciální teorie relativity). Fyzikální princip interferometru je docela jednoduchý. Setkají-li se spolu v daném místě dvě identické vlny ve stejné fázi (tedy „vrcholy“ obou vln),

---

v R. N. MANCHESTER, J. H. TAYLOR: *Pulsars* (Freeman, San Francisco, 1977); C. M. WILL: *The confrontation between gravitation theory and experiment* v knize *General relativity*, ed. S. W. HAWKING, W. ISRAEL (Cambridge University Press, Cambridge, 1979); citace uvedené v pozn. <sup>3)</sup> atd.; v PMFA viz články V. VANÝSEK: *Nobelova cena za fyziku 1993*, *Pokroky mat., fyz. a astr.* 39, 223; V. WEIDEMANN: *Binární pulsar PSR 1913+16: ideální případ testu gravitačních teorií*, *Pokroky mat., fyz. a astr.* 39 (1994), 227.

pak se jejich amplitudy sčítají. Pokud se však setkají v opačné fázi („vrchol“ jedné vlny s „údolím“ druhé), amplitudy se odečítají. Efektu lze snadno využít ke zjišťování toho, zda dva světelné paprsky proletěly na své cestě od zdroje k detektoru stejnou vzdálenost. Pokud byly dráhy stejné, výsledný signál v detektoru je silný, pokud se dráhy lišily o polovinu vlnové délky světla, signál úplně vymizí.



Obr. 4. Princip Michelsonova interferometrického detektoru gravitačních vln. Jsou-li dráhy obou paprsků  $L_1$  a  $L_2$  mezi polopropustnou destičkou  $P$  a testovacími tělesy  $T_1$  a  $T_2$  stejné, je složený signál měřený fotodetekto-rem silný. Změní-li se vlivem gravitač- ní vlny rozdíl obou vzdáleností o polovi- nu vlnové délky svět- la, signál vymizí.

Typický interferometrický detektor gravitačních vln se skládá ze dvou volně zavěšených těžkých testovacích těles  $T_1$  a  $T_2$  (viz obr. 4). Paprsek světla generovaný laserem je polopropustnou destičkou  $P$  rozdělen. Oba paprsky poloviční intenzity se po odrazu na zrcátkách umístěných na tělesech  $T_1$  a  $T_2$  vrací zpět k destičce  $P$ , zde se skládají (interferují) a výsledný signál je zaznamenáván fotodetekto-rem. Průchod gravitační vlny přilétávající z vesmíru ve směru kolmém na rovinu laserových paprsků způsobí takovou deformaci zařízení, při níž se vzdálenost  $L_1$  zmenší, zatímco  $L_2$  se zvětší (ve druhé polovině periody gravitační vlny se naopak  $L_1$  zvětší a  $L_2$  zmenší, viz poznámka <sup>6</sup>). Změna délky drah interferujících paprsků i o pouhý zlomek vlnové délky světla se projeví změnou intenzity složeného signálu měřeného fotodetekto-rem. Poznamenejme, že takové zařízení dokáže v principu detekovat gravitační vlny velmi odlišných vlnových délek, především v pásmu zhruba od 10 Hz do 10 kHz. To je další výhoda interferometrických detektorů oproti rezonančním, které jsou naladěny v podstatě jen na jedinou frekvenci.

Jako první použil principu laserové interferometrie ke konstrukci detektoru gravi- tačních vln Weberův žák Robert Forward počátkem 70. let. Citlivost jeho zařízení dosahovala hodnoty  $10^{-15}$ . Během uplynulých dvaceti let vzniklo pak po celém světě (v USA, Německu, Anglii, Japonsku, Itálii, Francii, Austrálii atd.) několik týmů, v nichž spojili své síly teoretičtí i experimentální relativisté, kvantová optici a další

fyzikové spolu s techniky. Výsledkem vzájemného soupeření i spolupráce těchto skupin je množství stále dokonalejších interferometrických gravitačních detektorů. Dnes nejlepší fungující detektor tohoto typu vyvinutý skupinou z Caltechu (California Institute of Technology) pod vedením Ronalda Drevera dosahuje již citlivosti zhruba  $10^{-18}$ .

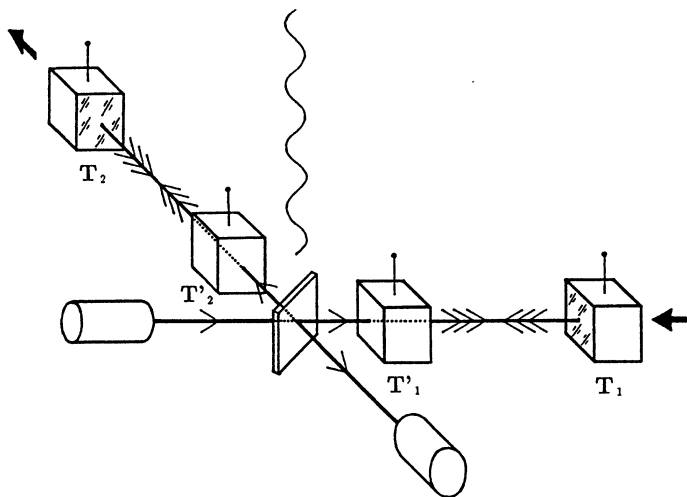
## Projekt LIGO

Tím však interferometrické gravitační detektory ještě nevyčerpaly svůj potenciál. Zdá se spíše, že stojí teprve na prahu svého rozvoje. V současné době již začala ve Spojených státech výstavba zařízení, jehož citlivost by měla dosahovat hodnoty  $10^{-21}$  a v blízké perspektivě dokonce  $10^{-23}$ ! Pro srovnání: citlivost měření řádu  $10^{-21}$  odpovídá například hypotetické schopnosti zjišťovat vzdálenost Země od Slunce s přesností rozměru jediného vodíkového atomu ( $10^{-21} \sim 10^{-10} \text{ m}/10^{11} \text{ m}$ ). Projekt nese jméno LIGO, což je zkratka anglického názvu Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory<sup>10)</sup>. Pod organizačním vedením Rochuse Vogta se k jeho realizaci spojily dvě, do nedávné doby konkurenční, skupiny: z Caltechu a z MIT. Tak výrazného zvýšení citlivosti o několik řádů oproti dnešním detektorům má být dosaženo kombinací důmyslných technických vylepšení. Především má jít o zařízení obrovských rozměrů, více než stokrát větší než jsou současné interferometry: velikost navzájem kolmých ramen  $L_1$  i  $L_2$  má být 4 kilometry. Je zřejmé, že velké rozměry přinášejí zároveň i velké technické komplikace. Aby nedocházelo k nekontrolovatelným změnám fázi a ztrátě energie laserových paprsků při rozptylu na molekulách vzduchu, musí být celá optická soustava umístěna ve dvou trubicích délky 4 km a úctyhodného průměru 1,2 m, v nichž bude udržováno vysoké vakuum ( $10^{-5}$  Pa, později dokonce  $10^{-8}$  Pa). Dostí náročné bude odizolovat aparaturu od nežádoucích rušivých vlivů, především zemských i umělých vibrací, slapových sil, tepelného šumu zařízení (zejména v závěsech testovacích těles), fluktuací tlaku v trubicích, kosmického záření, poruch magnetického pole atd.

Důležitým trikem, který umožní zvýšit citlivost interferometru LIGO o několik řádů oproti klasickému Michelsonovu „jednopružkovému“ uspořádání, bude efektivní prodloužení dráhy paprsků. V zařízení bude namísto dvou použito celkem čtyř volně zavěšených testovacích těles se zrcátky (viz obr. 5). Dvojice těles v každém z ramen ( $T_1$  a  $T'_1$  resp.  $T_2$  a  $T'_2$ ) vytvoří tzv. Fabryho-Perotovu rezonanční dutinu. Laserový paprsek bude nucen se v těchto dutinách mezi tělesy mnohonásobně odrazit (více než tisíckrát), než dopadne na fotodetektor. Efektivní optická délka zařízení LIGO bude proto více než o 3 řády větší než jeho „fyzické rozměry“, tj.  $L_{\text{ef}} \sim 10^7 \text{ m}$ .

---

<sup>10)</sup> Informace o projektu LIGO byly publikovány např. v článku R. RUTHEN: *Catching the wave*, Scientific American, March 1992, str. 90; R. VOGT: *The U.S. LIGO project* ve sborníku *Proceedings of the sixth Marcel Grossman meeting on general relativity*, Kyoto, Japan, June 1991, eds. H. SATO, I. NAKAMURA (World Scientific, Singapore, 1991), str. 244. Čerstvé údaje jsou přístupné prostřednictvím *NCSA Mosaic* (internetového hypertextového informačního systému) nebo *Netscape*: úvodní stránka projektu LIGO se otevře napsáním adresy [http://www.ligo.caltech.edu/LIGO\\_web/LIGO\\_home.html](http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/LIGO_home.html) po volbách menu File a Open URL...

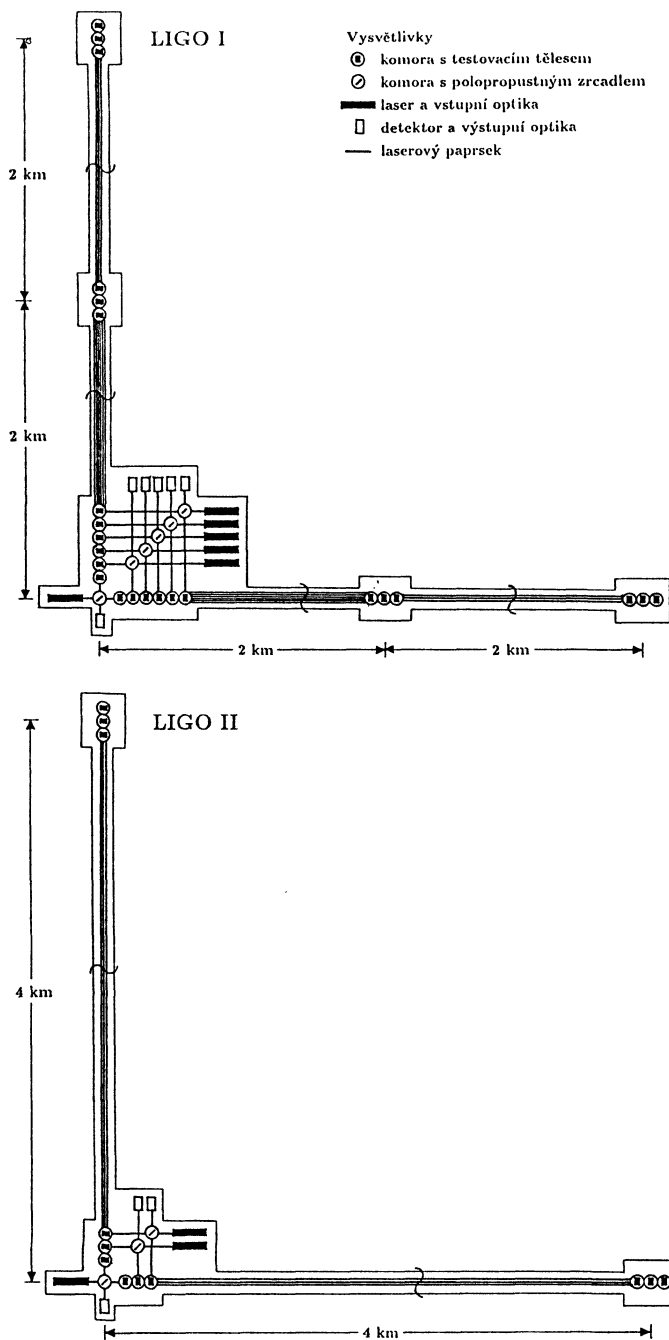


Obr. 5. Interferometry projektu LIGO budou dosahovat vyšší citlivosti zásluhou Fabryho-Perotových rezonančních dutin. Paprsky se budou v obou ramenech mnohonásobně odrážet mezi volně zavěšenými tělesy  $T_1$  a  $T'_1$  resp.  $T_2$  a  $T'_2$ . Teprve poté se složí a dopadnou na fotodetektor.

Jiným, snad ještě důležitějším faktorem ovlivňujícím citlivost interferometru bude schopnost zařízení zaznamenávat nepatrné vzájemné pohyby testovacích těles  $\Delta L$  projevující se změnami interferenčních obrazců. I zde má být dosaženo velkého pokroku, neboť bude v principu možné měřit posunutí řádově až  $\Delta L \sim 10^{-10} \lambda$ , kde  $\lambda \sim 10^{-6}$  m je vlnová délka světla generovaného laserem, tj.  $\Delta L \sim 10^{-16}$  m! Tak přesné měření bude umožněno skutečností, že na fotodetektor budou dopadat obrovská množství jednotlivých fotonů (optický laser o výkonu 1 W vysílá každou sekundu řádově  $10^{18}$  fotonů). Velký statistický soubor bude vhodnými matematickými metodami počítačově zpracováván. Protože platí vztah  $h \sim \Delta L/L_{ef}$ , dostáváme pro citlivost detektoru LIGO již zmíněnou hodnotu citlivosti  $10^{-23}$  <sup>11)</sup>.

Projekt LIGO počítá s tím, že od samého počátku budou v provozu dvě sesterská zařízení označovaná LIGO I a LIGO II vybudovaná na velmi vzdálených místech: první v Hanford Reservation ve státě Washington, druhá v Livingston Parish v Louisianě (při výběru lokalit bylo nutno vzít v úvahu mnoho faktorů, především jejich seismickou i akustickou tichost). Obě stanice budou elektronicky propojené, takže budou pracovat současně jako jediná gravitační observatoř. Ve vakuovém systému obou zařízení bude umístěno vždy několik zcela nezávislých interferometrů: každý bude mít svůj vlastní laser, testovací tělesa, rezonátory, detektory atd. V konečné fázi bude ve stanici LIGO I

<sup>11)</sup> Při takové citlivosti zařízení začínají již jeho konstruktéři narážet na fyzikální omezení plynoucí z Heisenbergovy relace neurčitosti, která vyjadřuje kvantové chování mikrosvěta. Snaha změřit velmi přesně polohu testovacího tělesa bude automaticky způsobovat náhodné změny jeho hybnosti. Zjistíme-li proto o chvíli později, že se poloha tělesa změnila, nebudeme mít naprostou jistotu, že k tomu došlo vlivem průchodu gravitační vlny. Zpočátku bude tato kvantová nejistota zanedbatelná, ale s postupným vylepšováním citlivosti interferometrů se začne stále výrazněji uplatňovat.

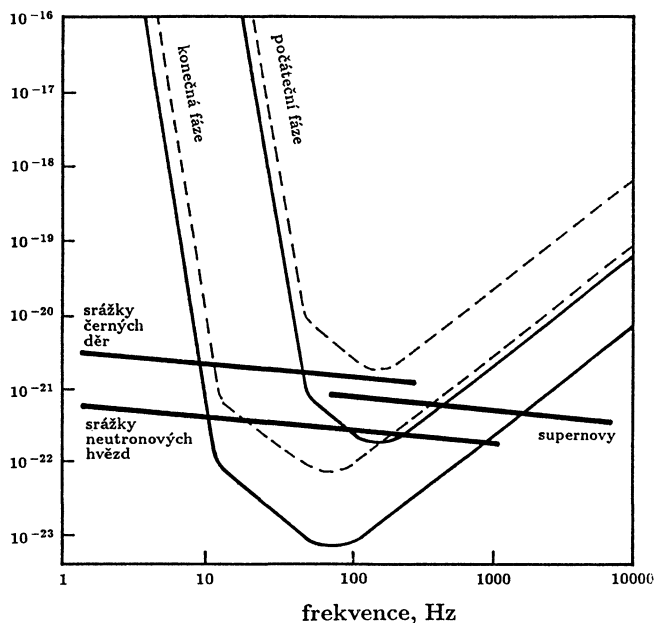


Obr. 6. Schéma obou sesterských zařízení LIGO. Ve stanici LIGO I bude umístěno 6 interferometrů (3 délky 4 km a 3 délky 2 km), zatímco ve stanici LIGO II budou 3 interferometry (délky 4 km). Signály z obou vzdálených stanic se budou neustále porovnávat.



umístěno celkem šest interferometrů (tři o délce ramen 4 km a tři o délce 2 km), zatímco ve stanici LIGO II budou umístěny tři interferometry (o délce 4 km), viz obr. 6. Výstavba bude probíhat po etapách, přičemž v první fázi (koncem 90. let) bude v obou stanicích po jednom interferometru plné délky a ve stanici LIGO I navíc jeden interferometr poloviční. Analýza signálů ze vzdálených, různě dlouhých interferometrů umožní eliminovat falešné signály způsobené náhodným šumem. Gravitační vlna se totiž, na rozdíl od poruch, bude muset projevit současně ve všech interferometrech, a to posunutím  $\Delta L$  úměrným délce ramene  $L$ .

citlivost



Obr. 7. Ideální (plná čára) a efektivní (čárkovaná čára) citlivost detektoru LIGO pro různé frekvence v počáteční i konečné fázi realizace projektu. Vyznačeny jsou též očekávané amplitudy nejsilnějších gravitačních vln, jejichž výskyt se předpokládá alespoň třikrát do roka.

Na obr. 7 je znázorněna předpokládaná ideální technická citlivost LIGO pro různé frekvence, a to jak v počáteční, tak v konečné fázi budování observatoře. Čárkovaná je naznačena též o něco menší „efektivní“ citlivost zařízení vůči signálům přicházejícím z náhodných a neznámých směrů, s libovolnou polarizací atd. Je vidět, že po dobudování by observatoř měla být schopna detekovat gravitační vlny prakticky ze všech významných typů astrofyzikálních zdrojů, zejména z těsných binárních systémů neutronových hvězd a černých děr, závěrečných stádií těchto systémů, při nichž dochází ke srážce a splynutí obou složek, ze supernov atd. Zakresleny jsou očekávané amplitudy vln od zdrojů, jejichž výskyt se předpokládá alespoň třikrát do roka: abychom například mohli pozorovat tři supernovy ročně, musíme být schopni efektivně detekovat gravitační vlny až ze vzdálenosti 30 Mpc, čemuž odpovídá amplituda  $h \sim 10^{-21}$ .

Americký projekt LIGO je nyní již ve stádiu výstavby. Existuje též několik návrhů na stavbu podobných interferometrických detektorů kilometrových rozměrů: britsko-

německý GEO, italsko-francouzský VIRGO, australský AIGO a další. Tato zařízení se v budoucnu nestanou konkurenty, ale naopak vytvoří propojenou celosvětovou síť gravitačních observatoří. Ta umožní zaznamenávat gravitační vlny s daleko větší přesností a určovat i další důležité charakteristiky, především polohu zdrojů na obloze pomocí triangulace, tvary signálů atd.

#### 4. Závěr

Nezbývá než doufat, že projekt LIGO bude zdárně dokončen. Technické a konstrukční problémy již byly vyřešeny a vše je nyní otázkou čistě finanční. Celkové náklady se odhadují na více než 300 miliónů dolarů. Projekt je financován NSF (National Science Foundation): jde o vůbec největší a nejdražší projekt podporovaný touto americkou vědeckou grantovou agenturou. Více než 90 % prostředků si vyžádá konstrukce vakuového systému, který se svým objemem 9000 m<sup>3</sup> stane největší vakuovou aparaturou na světě. V roce 1992 byla na projekt LIGO uvolněna částka 19 miliónů dolarů, vloni pak 24 miliónů dolarů. Letos se očekává mnohem větší částka v souvislosti se zahájením přípravných prací na obou štaveništích a zadáním kontraktů na konstrukci vakuového systému. Financování tak rozsáhlého projektu je ovšem v Americe vždy složitou a docela napínavou záležitostí, neboť o přidělování finančních prostředků hlasuje každoročně Kongres. Že se při svém rozhodování neřídí vždy jen ohledy na zájmy vědeckého bádání, byť by mohlo znamenat obrovský pokrok v poznání přírody, může dosvědčit nedávný smutný případ úplného zastavení mnohamiliardového projektu obřího supravodivého superurychlovače SSC. Doufejme, že LIGO nepotká stejný osud . . . .

Naděje na možnost přímého potvrzení existence gravitačních vln ještě v tomto tisíciletí by pak byly více než dobré. Jednalo by se o událost prvořadého významu, která by dokořán otevřela další okno do vesmíru. Platnost Einsteinovy teorie relativity by byla opět potvrzena, tentokrát zcela zásadním způsobem. Tvůrci detektoru by bezpochyby byli poctěni Nobelovou cenou za fyziku. Kip Thorne, teoretický fyzik z Caltechu, přední odborník na problematiku gravitačních vln a spoluautor projektu LIGO, by nadto získal též láhev červeného francouzského vína. Taková by totiž byla jeho odměna za vyhranou sázku, kterou uzavřel již v roce 1981 s princetonským astrofyzikem Ostrikerem o to, zda se podaří detekovat gravitační vlny ještě před 1. lednem 2000. Thorne by určitě vyhrál nejslavnější láhev vína v historii fyziky.