

# LISA: nová naděje lovců gravitačních vln

*Jiří Podolský, Praha*

Již brzy uplyne 100 let od pobytu Alberta Einsteina v Praze. Mezi 1. dubnem 1911 a 25. červencem 1912 zde působil jako řádný profesor teoretické fyziky na německé části Karlo-Ferdinandovy univerzity. Pro fyziku a astronomii to bude významné jubileum. Během pražského pobytu se Einstein vydal na náročnou intelektuální cestu, jejímž cílem bylo uvést teorii gravitace do souladu s principy relativity. Jak je podrobně popsáno v monografiích [1], [2] a [3], úkol to byl obtížný a Einstein ho po mnoha peripetiích triumfálně završil formulací obecné teorie relativity v listopadu 1915. Koncepční kořeny této fascinující teorie, která se stala pilířem moderní fyziky, však sahají právě do jeho pobytu v Praze.

Einsteinova obecná relativita, mnohokrát experimentálně ověřená [4], dodnes zůstává nejlepší gravitační teorií. V jejím rámci byly poprvé v historii sestrojeny realistické kosmologické modely rozpínajícího se vesmíru vzniklého při velkém třesku. Einsteinova teorie se stala i nezbytným nástrojem astrofyziky: sehrála klíčovou roli v pochopení vzniku prvků, struktury a vývoje hvězd i procesů odehrávajících se na konci jejich života, kdy kolabují v bílé trpaslíky, neutronové hvězdy či dokonce singulární černé díry. Po objevu pulsarů, kvasarů a aktivních galaxií, jichž jsou zmíněné rotující objekty hnacím motorem, se v 60. letech obecná relativita stala integrální součástí astronomie.

## Co jsou gravitační vlny a jak vznikají

Podle obecné teorie relativity lze všechny klasické gravitační jevy vysvětlit jako důsledek zakřivení prostoru a času [5], [6], [7]. Každý fyzikální objekt ve svém okolí deformuje prostorčas: mění jeho geometrické vlastnosti, a to tím více, čím větší má hmotnost a energii. Tělesa se proto nepohybují v neměnném euklidovském prostoru s absolutním časem, ale v prostředí, jehož geometrie je zdeformována ostatními objekty. Newton si představoval, že planeta obíhá kolem Slunce proto, že je k němu bezprostředně přitahována gravitační silou. Ta vyvolává radiální zrychlení zakřivující dráhu, která by jinak byla přímá. Podle Einsteina však mezi Sluncem a planetou žádná gravitační síla nepůsobí. Dráha planety je zakřivena proto, že sám prostor (i čas), v němž se pohybuje, je příslušným způsobem zdeformován přítomností Slunce.

Albert Einstein tím dospěl k nové principiální předpovědi: možnosti existence gravitačních vln, kmitavých stavů prostor času [8], [9], [10], [11]. Oproti Newtonově teorii je obecná relativita dynamická. To znamená, že prostorčas se přítomností hmoty nejen

---

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

deformuje, ale může začít i vibrovat, jestliže se zdroj deformací periodicky pohybuje. Stejně jako skákající dítě rozvlní trampolínu kolem sebe, i hvězda, která náhle změnil svůj tvar při výbuchu supernovy, pozmění okolní geometrii a vzniklý rozruch se bude předávat dál. Směrem od supernovy se začne konečnou rychlostí šířit gravitační vlna, „poruchová“ vlnka křivosti prostoročasu. V její amplitudě a frekvenci je zakódována cenná informace o zániku hvězdy. Kdybychom uměli takovou vlnu zachytit a přečíst, otevřel by se nám unikátní pohled přímo do srdce hvězdného kolapsu.

Gravitační vlny by měly vznikat všude tam, kde se nerovnoměrně mění tvar nebo poloha objektu (přesněji: když se hmota pohybuje zrychleně nesférickým způsobem). Zdroji gravitačních vln by proto měly být zejména dvojhvězdy, v nichž rozložení hmoty pravidelně osciluje s periodou oběhu. Čím blíže jsou obě obíhající složky a čím jsou hmotnější, tím větší budou i vznikající vlny. Významnými generátory gravitačních vln jsou proto těsné binární systémy neutronových hvězd (pulsarů) nebo černých děr. Vlny odnášejí energii, takže se oba objekty k sobě po spirále přibližují a jejich oběžná doba se zkracuje. Nejmohtnější vlny vznikají na konci tohoto procesu, kdy se hvězdy nebo černé díry srazí a pak splnou.

Kromě zmíněných vln astrofyzikálního původu předpokládáme i existenci kosmologických gravitačních vln zrozených ve velmi raném vesmíru. Pomocí nich bychom mohli získat přímý obraz velkého třesku a zjistit velkorozměrovou strukturu našeho kosmu. A možná objevit překvapivé poznatky se zásadním významem pro astrofyziku, kosmologii a teoretickou fyziku obecně.

Gravitační vlny se v něčem podobají běžným vlnám elektromagnetickým. Šíří se rychlostí světla, tedy maximální možnou rychlostí. Oba typy vln mají příčný charakter. Gravitační vlna představuje periodickou deformaci slapových účinků: sousedním částicím uděluje relativní zrychlení, čímž rozkmitává tělesa, ovšem jen v rovině kolmé na směr šíření. Také elektromagnetická vlna je příčná. Dokáže však rozkmitat jen elektricky nabitě částice (především elektrony), zatímco vlna gravitační mění geometrii prostoročasu a ovlivňuje proto každou hmotu. Liší se též svými polarizačními vlastnostmi. Oba typy sice připouštějí dva nezávislé polarizační stavy, ty ale mají u gravitačních vln poněkud složitější (kvadrupólový) charakter.

Zásadní odlišnost gravitačních a elektromagnetických vln však spočívá v jejich různé „intenzitě“. Elektromagnetické vlny lze generovat i zachycovat snadno (elektromagnetickým vysílačem je každá běžná žárovka, velmi účinným detektorem například naše oči). Oproti tomu gravitační vlny jsou nesmírně slabé. Je známo, že gravitační interakce je nejslabší fyzikální silou ve vesmíru. To znamená, že vazba mezi gravitačním polem a hmotou je velmi malá v porovnání s elektromagnetickým či jaderným působením. Účinnost, s jakou jsou gravitační vlny generovány nebo detekovány, je tudíž nepatrná. Proto dodnes nebyl sestaven přijímač schopný přímým způsobem zachytit gravitační vlny přicházející k nám z vesmíru.

Velikost gravitační vlny popisuje její amplituda, kterou fyzikové označují symbolem  $h$ . Je to bezrozměrné číslo vyjadřující, jakou relativní změnu vzdálenosti dvou testovacích částic (nebo deformaci objektu) vlna svým průchodem vyvolá. Je tedy  $h = \Delta L/L$ , kde  $L$  je počáteční vzdálenost částic (původní velikost objektu) a  $\Delta L$  je změna jejich vzájemné vzdálenosti vyvolaná vlnou. Podrobné výpočty a odhady

ukazují, že i v případech již zmíněných extrémně mohutných — ale současně velmi vzdálených — kosmických zdrojů (supernov, závěrečných srážek binárních systémů) je příslušná amplituda gravitačních vln zde na Zemi neuvěřitelně malá, obvykle mnohem menší než hodnota  $h = 10^{-21}$ . Pro názornost uveďme, že tak malé číslo odpovídá například schopnosti určit vzdálenost Země od Slunce s přesností rozměru jediného atomu. Tak nepatrné změny rozměrů se samozřejmě ztrácejí v kakofonii pozemského seismického šumu. A to je hlavní důvod, proč zatím nebyly Einsteinem předpovězené gravitační vlny přímým způsobem potvrzeny pomocí detektoru, který by takovéto deformace zaznamenával.

Prozatím proto musíme vystačit jen s nepřímým (zato však velmi přesvědčivým) argumentem ve prospěch reálné existence gravitačních vln plynoucím z pozorování slavného binárního pulsaru označovaného PSR 1913+16. Tento systém dvou neutro-  
nových hvězd obíhajících velmi blízko sebe (ve vzdálenosti asi 1 milion kilometrů s periodou zhruba 8 hodin) objevili v roce 1974 Joseph Taylor a Russell Hulse [12], [13], [14], [15]. Dlouhodobá měření prokázala, že perioda dvojhvězdného systému se systematicky zkracuje o hodnotu  $76 \mu\text{s}$  za rok. To je přesně hodnota, jakou pro takový systém předpovídá Einsteinova obecná teorie relativity. Vyzářováním gravitačních vln se totiž ze systému odnáší vazebná energie, takže se obě složky k sobě spirálovitě přibližují o 3 metry za rok a perioda jejich oběhu klesá. Za uvedený významný objev byli jeho autoři v roce 1993 právem poctěni Nobelovou cenou.

## Stručná historie pokusů o detekci gravitačních vln

Jak již bylo řečeno, veškeré pokusy o přímou detekci gravitačních vln byly dosud neúspěšné, přestože o ni experimentátoři usilují již padesát let. Honbu za tímto nesnadným cílem odstartovalo v 60. letech průkopnické úsilí Josepha Webera (1919–2000). Se svými spolupracovníky navrhl a sestrojil řadu tzv. rezonančních detektorů, velkých hliníkových válců zkonstruovaných tak, aby se průchodem gravitační vlny v důsledku rezonančního efektu rozkmitaly. Ačkoli byly Weberovy detektory na svoji dobu překvapivě citlivé (dosahovaly až  $h = 10^{-16}$ ), na zachycení vln generovaných astrofyzikálními zdroji zdaleka nestačily [16], [17], [18], [19]. Ani jejich dokonalejší následníci zatím úspěšní nebyli, přestože využívají mnohem lepší kvantové senzory a tepelný šum potlačují chlazením na teploty blízké absolutní nule. Kryogenní zařízení pracující při  $T = 3 \text{ K}$ , jako byl EXPLORER (laboratoř v CERNu), ALLEGRO (USA) nebo NIOBE (australský Perth), dosáhly citlivosti stokrát větší. Italské superkryogenní detektory ( $T = 0,01 \text{ K}$ ) NAUTILUS ve Frascati u Říma a AURIGA v Legnariu mají citlivost dokonce  $h = 10^{-19}$ . Hlavní nevýhodou rezonančních detektorů je však jejich naladění na privilegovanou rezonanční frekvenci (většinou kolem 900 Hz) a tedy neschopnost zaznamenávat případné signály v širokém frekvenčním pásmu. To pochopitelně snižuje jejich celkovou účinnost i astrofyzikální užitečnost.

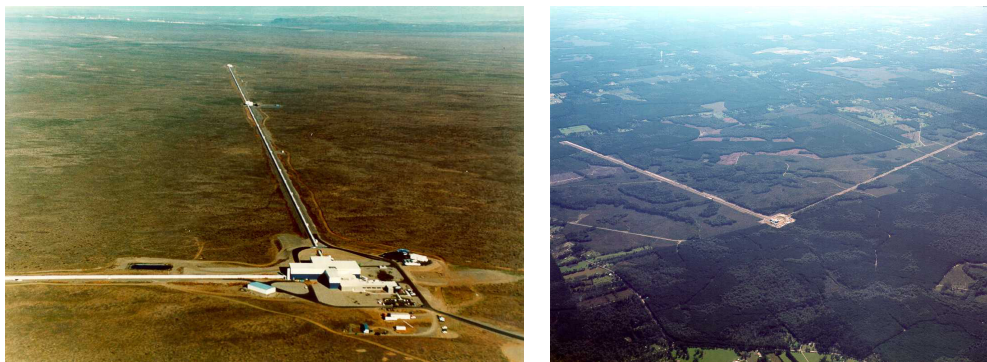
Budoucnost proto dnes patří širokospektrálním detektorům gravitačních vln jiného typu — obřím interferometrům [20], [21], [22], [23]. Pokusy o detekci gravitačních vln pomocí interferometru provedli Rainer Weiss a Weberův žák Robert Forward už počát-

kem 70. let. Byl to přirozený nápad. Efekt gravitační vlny je totiž takový, že v příčné rovině periodicky zkracuje a prodlužuje vzdálenost mezi centrálním polopropustným zrcátkem a odrazivým testovacím tělesem volně zavěšeným na konci jednoho ramene, zatímco současně zvětšuje a zmenšuje vzdálenosti ve druhém rameni interferometru kolmém na rameno první. Výsledkem je periodický posun interferenčních proužků, který je přímo úměrný amplitudě  $h$  gravitační vlny.

Počátkem 90. let byl skupinou kolem Kipa Thorna a Ronalda Drevera na Caltechu a MIT v americké Pasadeně postaven interferometrický detektor gravitačních vln MARK 2 s délkou ramen 40 metrů, který dosáhl citlivosti  $10^{-18}$ . Obdobná zařízení byla sestrojena a testována také v Evropě, konkrétně v Garchingu a Glasgow ve skupinách kolem Karstena Danzmann, Jamese Hougha a Bernarda Schutze. Koncem tisíciletí se jejich snažení zaměřilo na vybudování nové generace interferometrů alespoň tisíckrát lepších, což se opravdu podařilo.

Dosáhnout citlivosti řádu  $h = 10^{-21}$  vůbec nebylo snadné. Vědci a technici postupně navrhli, sestrojili a odladili precizní optické systémy (užívající Fabryho–Perotových rezonančních dutin s výkonovou recyklací, jež stonásobně prodlužují efektivní optickou délku klasického Michelsonova interferometru) s vysoce stabilními lasery (konkrétně pevnofázovým Nd:YAG laserem o výkonu zhruba 10 W zářícím v infračervené oblasti 1064 nm), kvalitními křemennými zrcadly (o rozměrech až 25 cm a hmotnosti 11 kg, s přesností vyleštění lepší než 1 nm a odrazivostí 99,999 998 %) a stabilizačními servomechanismy. Vše umístili do vysokého vakua (objemu až 9000 m<sup>3</sup>), zkonstruovali důmyslné izolátory seismických vibrací, našli efektivní metody analýzy obrovského množství naměřených dat...

Především však bylo nutné stonásobně zvětšit fyzické rozměry interferometrů. V roce 2000 byl v Japonsku uveden do provozu první detektor nové generace TAMA 300 s délkou ramen 300 m, o rok později pak u Hannoveru dvakrát tak velký německo-britský interferometr GEO 600. Vzápětí je následovaly detektory gravitačních vln amerického projektu LIGO (viz [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)) a italsko-francouzského VIRGO (viz [www.virgo.infn.it](http://www.virgo.infn.it)) kilometrových rozměrů.



Obr. 1. Letecký snímek amerického čtyřkilometrového interferometru LIGO v Hanfordu (vlevo) a v Livingstonu (vpravo).

Observatoř LIGO tvoří dva téměř identické interferometrické systémy vzdálené od sebe 3 tisíce kilometrů. Jeden byl postaven v Hanfordu (stát Washington), druhý v Livingstonu (stát Louisiana), viz obr. 1. Délka jejich ramen dosahuje nebývalých 4 km (v Hanfordu je navíc ještě interferometr délky 2 km). Stanice pracují v koincidenčním režimu, aby bylo možné odfiltrout místní rušivé vlivy. Evropská observatoř VIRGO, viz obr. 2, s rameny dlouhými 3 km byla budována u městečka Cascina, jen několik kilometrů od Pisy (kde Galileo Galilei prováděl první významné gravitační experimenty). Díky speciálním osmimetrovým tlumicím závěsným systémům zrcadel je VIRGO citlivější v oblasti nízkých frekvencí okolo 10 Hz (LIGO dosahuje největší citlivosti v okolí 100 Hz).



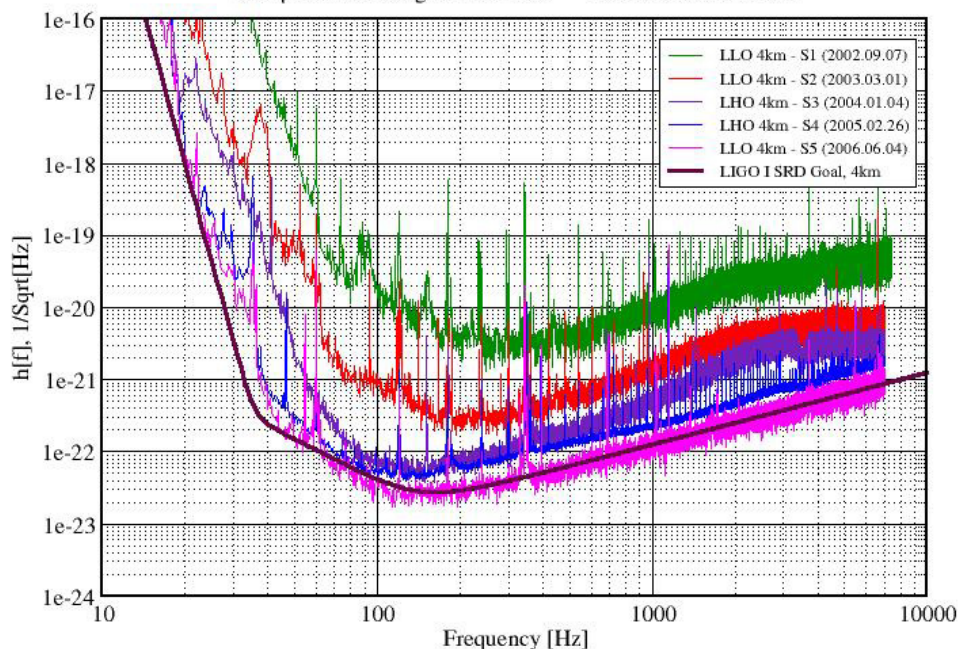
Obr. 2. Snímek evropského interferometru VIRGO délky 3 km u Pisy.

Začátkem nového tisíciletí byly tyto složité systémy dokončovány a spouštěny. Od roku 2002 se uskutečnilo již pět cyklů měření pomocí LIGO, tzv. „science run“ nesoucí označení S1 až S5, při nichž byla sbírána a následně analyzována vědecká data. Jak je vidět z grafu na obr. 3, citlivost měření se neustále zlepšovala, celkově o dva řády. Během posledního a zatím nejdelšího měření S5, které trvalo od listopadu 2005 do září 2007, bylo dosaženo projektované citlivosti detektoru  $h = 10^{-21}$ . Byl shromážděn celý jeden rok zpracovatelných dat, kdy všechny tři interferometry LIGO fungovaly při této citlivosti v koincidenzi (v některých obdobích navíc probíhala současná měření detektory GEO 600 a VIRGO).

Komplexní shrnutí dnešního stavu konstrukce detektorů LIGO i samotných měření lze najít v nedávné přehledové publikaci [23]. Pokud jde o vlastní vědecké výsledky, bohužel jsou zatím stále negativní. Astrofyzikální i kosmologické gravitační vlny ze závěrečných stadií binárních soustav, gravitačního kolapsu jader supernov, srážek černých děr a neutronových hvězd, jejich otřesů nebo rotace či stochastického reliktního pozadí jsou zjevně mnohem slabší (respektive při dané amplitudě méně četnější), než jsme doufali. Nedávné numerické simulace binárních systémů opravdu ukázaly, že závěrečné srážky dvou černých děr či neutronových hvězd nejsou tak „divoké“, jak jsme původně očekávali. Ani výbuchy supernov nebývají příliš asymetrické, takže produkují slabší gravitační vlny.

## Best Strain Sensitivities for the LIGO Interferometers

Comparisons among S1 - S5 Runs LIGO-G060009-02-Z



Obr. 3. Citlivost detektoru LIGO během dosavadních cyklů vědeckých měření S1 až S5 mezi roky 2002 až 2007 neustále rostla. V grafu je vodorovně vynášena frekvence a svisle citlivost.

Vloni detektory prošly technickým vylepšením označovaným „Enhanced LIGO“. Výkon vstupního laseru byl zvýšen na 35 W a dalších drobnějších modifikací doznal optický i řídicí systém. Díky tomu citlivost detektorů oproti S5 vzrostla na dvojnásobek: detektory nyní dohlédnou dvakrát dál a počet potenciálně měřitelných zdrojů tudíž narostl osmkrát. V současné době (od počátku roku 2009 do konce roku 2010) probíhá cyklus měření S6.

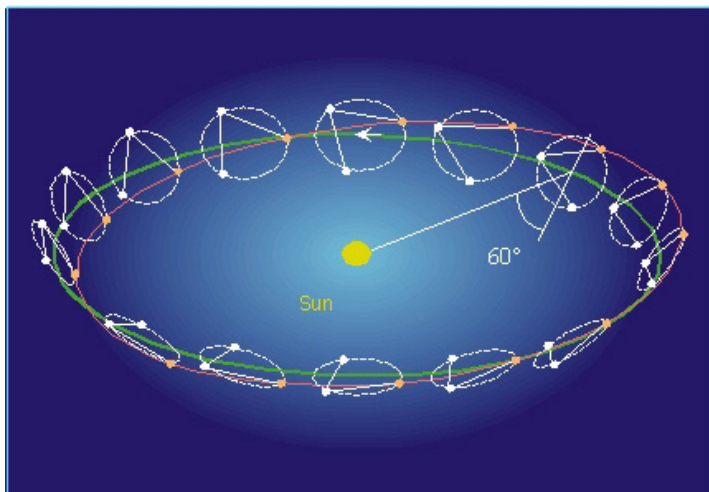
Bez ohledu na to, zda tato nová a bezprecedentně citlivá měření budou úspěšná anebo ne, již dnes jsou v plném proudu přípravné práce na následném radikálním vylepšení detektorů nazývaných „Advanced LIGO“ a „Advanced VIRGO“. Cílem je do roku 2014 dosáhnout v celém frekvenčním pásmu desetkrát lepší citlivosti než dnes, tedy hodnoty výrazně lepší než  $h = 10^{-22}$ . Počet kandidátů gravitačních vln se tím zvýší tisícnásobně (detektory by pak měly zaznamenat srážku dvou neutronových hvězd o hmotnostech  $1,4 M_{\odot}$  až do vzdálenosti 300 Mpc). Půjde o zásadní technická vylepšení v mnoha směrech: výkonnější lasery (180 W), těžší a kvalitnější zrcadla (průměru 34 cm a hmotnosti 40 kg) zavěšená na křemenných vláknech, několikanásobnou aktivní seismickou izolaci. Nově implementovaná recyklace signálu umožní dle potřeby ladit frekvenční charakteristiku detektoru. Výsledkem bude výrazně lepší odstup signálu od šumu.



Tento další ambiciózní krok v konstrukci detektorů gravitačních vln již získal finanční podporu ve výši 200 milionů dolarů od americké vědecké nadace NSF. Uskuteční-li „Pokročilé LIGO a VIRGO“ první přímou detekci Einsteinem dávno předpovězených gravitačních vln, bude to vynikající zpráva nejen pro všech 650 zúčastněných odborníků z 59 vědeckých institucí 11 zemí světa, ale i pro celou relativistickou komunitu. Především však konečně vstoupíme do éry experimentální gravitační astronomie studující vesmír naprosto novým pozorovacím oknem.

### Další naděje: kosmický projekt LISA

Zvětšovat dále rozměry pozemských interferometrů je zjevně neschůdné, zejména vzhledem k ceně vakuového systému. Principiální omezení klade též všudypřítomná seismická aktivita, jež zcela znemožňuje detekci gravitačních vln s frekvencemi menšími než 1 Hz. Nezbyvá tedy, než začít uvažovat o stavbě interferometru v kosmickém prostoru. Právě to je cílem projektu LISA (Laser Interferometer Space Antenna), jenž se rodí ve spolupráci evropské a americké kosmické agentury ESA a NASA (viz například [24] a stránky [sci.esa.int/lisa](http://sci.esa.int/lisa) resp. [lisa.jpl.nasa.gov](http://lisa.jpl.nasa.gov)).

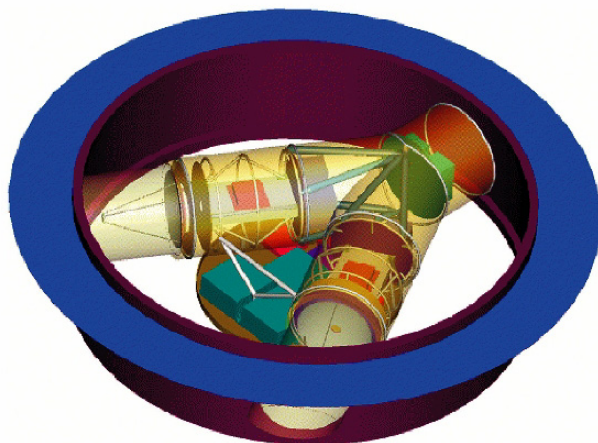


Obr. 4. Schéma oběžných drah tří družic, které budou tvořit interferometrický detektor gravitačních vln LISA v kosmickém prostoru.

Projekt předpokládá vytvoření detektoru ve tvaru pomyslného rovnostranného trojúhelníka o stranách 5 milionů kilometrů, tvořeného třemi identickými družicemi umístěnými v jeho vrcholech. Vzájemná vzdálenost družic se bude neustále proměňovat laserovou interferometrií. Soustava má obíhat kolem Slunce ve vzdálenosti 1 AU, tj. sledovat dráhu Země tak, aby úhel Země–Slunce–detektor byl zhruba  $20^\circ$ . Každá družice nezávisle poletí po své specifické dráze s vhodně zvolenou excentricitou, sklonem k ekliptice a uzlovou přímkou tak, že trojúhelníková konfigurace bude s velkou

přesností konstantní. Rovina detektoru (se sklonem  $60^\circ$  k ekliptice) se přitom bude stáčet s periodou jednoho roku, jak je znázorněno na obr. 4. Dopplerův efekt proto umožní stanovit polohy případných zdrojů na obloze: úhlové rozlišení pro nejsilnější zdroje by mohlo být dokonce lepší než jedna úhlová minuta.

Kvůli minimalizaci všech negravitačních vlivů (tlaku slunečního záření, magnetického pole atd.) bude použita technika aktivního udržování družice na geodetické „bezsílové trajektorii“. Uvnitř každé družice bude volně se pohybující referenční těleso, vyleštěná testovací krychle o hranách 46 mm vyrobená ze speciální slitiny platiny a zlata s nulovou magnetickou susceptibilitou. Vlastní družice bude soustavou jemných elektrických trysek o tahu jen několika  $\mu\text{N}$  korigovat svůj pohyb tak, aby poloha krychle vznášející se ve vakuové dutině uvnitř sondy zůstávala konstantní. Zmíněná krychle bude současně optickým srdcem družice, viz obr. 5. Paprsek emitovaný laserem (o výkonu 1 W a frekvence 1064 nm) se odrazí od stěny testovací krychle a poté ho Cassegrainův teleskop průměru 40 cm vyšle do příslušného ramene. Tam se po zkoncentrování identickým teleskopem (výkon paprsku bude pouze  $10^{-12}$  W) odrazí od testovací krychle druhé družice, beze změny fáze a frekvence zesílí jejím laserem a odešle zpět. Zde se smíchá se světlem, které obdobně absolvovalo pouť druhým ramenem ke třetí družici. Interferenci zaznamená detektor a výsledný signál bude telemetrií předán na Zemi.

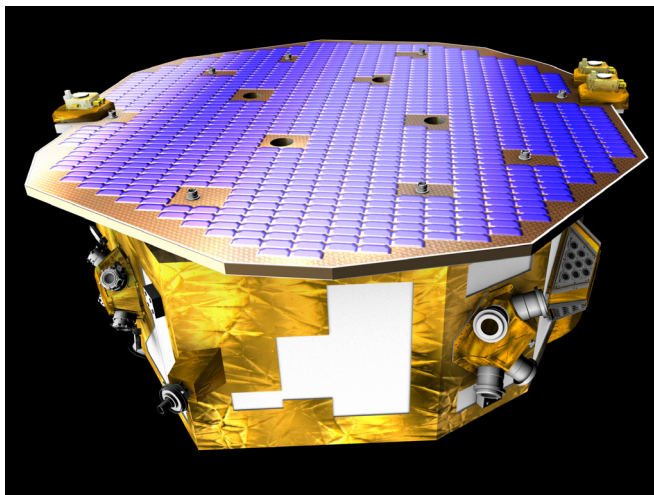


Obr. 5. Schéma družice detektoru LISA.

Hlavní předností LISA budou obrovské rozměry interferometru a naprostá absence seismického rušení. Díky tomu se stane robustním detektorem slabých gravitačních vln s amplitudami menšími než  $h = 10^{-23}$ . Na rozdíl od svých pozemských kolegů bude fungovat v režimu, kdy signál bude mnohonásobně převyšovat šum. Především ale otevře zcela jiné, nízkofrekvenční gravitační okno do vesmíru. Zatímco detektory na zemském povrchu jsou naladěny na vysoké frekvence, takže mohou zachytit jen

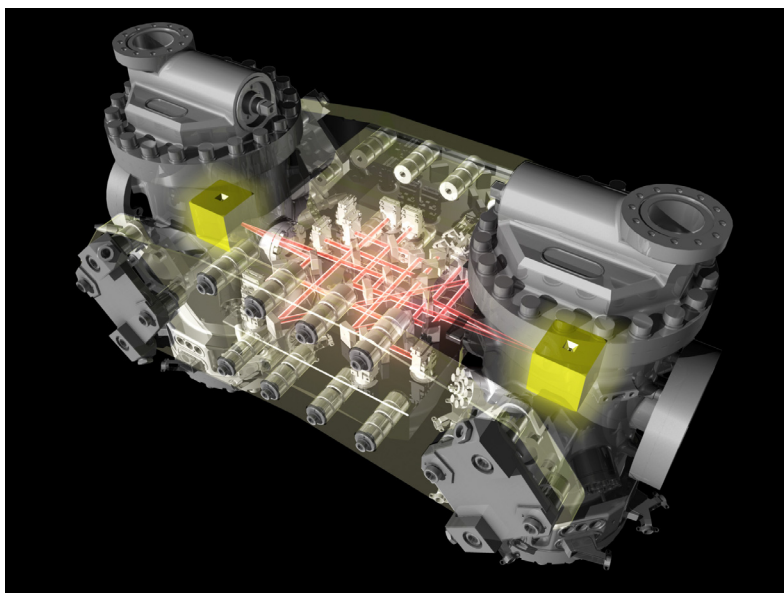


závěrečné „výkřiky“ srážejících se hvězd a černých děr, LISA má mít frekvenční rozsah 0,1 Hz až  $10^{-4}$  Hz. Jak je podrobně popsáno například v článku [25], právě v této milihertzové oblasti vydává gravitační záření celá řada zajímavých a prokázaných astrofyzikálních zdrojů, především kompaktních binárních systémů v naší Galaxii a velmi hmotných černých děr v jádrech dalekých galaxií. LISA, vybraná jako jedna z klíčových vědeckých misí Evropské kosmické agentury ESA s plánovanou realizací kolem roku 2020, je předurčena poodhalit nám roušku jejich tajemství.



Obr. 6. Technologická družice LISA Pathfinder.

Pochopitelně jde o technicky velmi náročný a finančně nákladný projekt: přijde zhruba na dvě miliardy dolarů. Proto se jeho tvůrci rozhodli nejprve postavit testovací sondu „LISA Pathfinder“ (tedy „Předvoj LISY“), viz obr. 6, na níž si chtějí vyzkoušet klíčové technologie (viz [www.esa.int/science/lisapathfinder](http://www.esa.int/science/lisapathfinder)). Koncem letošního roku vyšlou tuto demonstrační sondu pomocí evropské rakety VEGA z kosmodromu Kourou do okolí Lagrangeova libračního bodu L1 vzdáleného 1,5 milionu kilometrů od Země směrem ke Slunci, kde se gravitační přitažlivost Slunce a naší planety vyrovnávají s odstředivou silou. Tam chtějí během roční mise otestovat, jestli se opravdu podaří udržet družici se dvěma testovacími krychlemi na bezsilové trajektorii, odstínit ji od všech nechtěných vlivů a zda budou lasery i další optické prvky ve vesmíru pracovat, jak mají (byť zatím jen lokálně uvnitř družice, viz nákres jejího vnitřního uspořádání na obr. 7, nikoliv na vzdálenost pěti milionů kilometrů jako u budoucí LISY). Cílem je ověřit, že použitá technologie umožňuje zjistit změny relativní vzdálenosti dvou volných testovacích těles s přesností 10 pikometrů. Bezpochyby to bude klíčový test, který rozhodne o dalším osudu velkého projektu LISA. Zatím má projekt v silné konkurenci dalších misí ESA a NASA nadějnou pozici: představitelé kosmických agentur jí dávají nejvyšší vědeckou prioritu. Při neúspěchu zkušební družice „LISA Pathfinder“ by však jejich zájem nejspíš ochladl. Doufejme, že vše dopadne na výbornou.



Obr. 7. Vnitřní struktura družice LISA Pathfinder.

## Shrnutí

Einsteinova obecná teorie relativity již téměř sto let předpovídá existenci gravitačních vln. Mělo by jít o slabé vibrace gravitačního pole. Podobně jako dopad kamínku dokáže vybudit vlnky na hladině rybníka, tak i výbuchy a srážky hvězd nebo černých děr generují gravitační vlny. Jsou to slabé deformace prostoročasové geometrie, které se šíří od svého zdroje rychlostí světla, tedy stejně rychle jako vlny elektromagnetické.

Gravitační vlny nejsou skoro vůbec pohlcovány. Jejich působení je velice slabé, a tak se dají jen velmi obtížně zaznamenat. I když od prvních pokusů profesora Webera ze 60. let minulého století bylo vynaloženo obrovské úsilí tento obtížný úkol zvládnout, přímo zachytit gravitační vlny pomocí přístrojů zůstává nadále jednou z velkých nenaplněných výzev soudobé teoretické a experimentální fyziky.

Po roce 2000 byly ve Spojených státech, Evropě i Japonsku dobudovány a spuštěny vysoce citlivé interferometry kilometrových rozměrů. Jejich měření sice nebyla úspěšná, ale citlivost detektorů LIGO a VIRGO se neustále zlepšuje. Kolem roku 2014 by měla dosáhnout hodnoty výrazně lepší než  $h = 10^{-22}$ . Podle dnešních odhadů by to již mohlo stačit na dlouho očekávané otevření nového pozorovacího okna do vesmíru. A v plném proudu je ještě ambicióznější projekt interferometrického detektoru gravitačních vln LISA v kosmickém prostoru. Jeho technologický předvoj, experimentální družice LISA Pathfinder, má startovat v nejbližších měsících.

Dlouhý detektivní příběh, jehož hlavní a tajuplnou postavou je takřka nepolapitelné gravitační vlnění, má stále ještě otevřený konec. Objevit tyto Einsteinovy vlny a podrobit je důkladnému výsledku slibuje vědcům dát unikátní možnost zjistit zcela

nové údaje o těsných systémech gravitačně zkolabovaných objektů, neutronových hvězdách, černých dírách a možná i o tom, jakou strukturu má vesmír a jak se vyvíjel těsně po velkém třesku. Příběh intenzivního půlstoletého pátrání je plný nečekaných peripetií a čím dál napínavější. Se zájmem budeme v přímém přenosu sledovat jeho další díly.

## L i t e r a t u r a

- [1] PAIS, A.: *'Subtle is the Lord ...' The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press, Oxford, 1982.
- [2] FÖLSING, A.: *Albert Einstein*. Volvox globator, Praha, 2001.
- [3] BIČÁK, J.: *Einstein a Praha*. JČSMF, Praha, 1979.
- [4] WILL, C. M.: *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1981; *The confrontation between general relativity and experiment: a 1998 update*, gr-qc/9811036.
- [5] KUCHAR, K.: *Základy obecné teorie relativity*. Academia, Praha, 1968.
- [6] DVOŘÁK, L.: *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru* (skripta). SPN, Praha, 1984.
- [7] HORSKÝ, J., NOVOTNÝ, J., ŠTEFANÍK, M.: *Mechanika ve fyzice*. Academia, Praha, 2001.
- [8] EINSTEIN, A.: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*. Preuss. Akad. Wiss. Sitz. 1 (1916) 688–696.
- [9] EINSTEIN, A.: *Über Gravitationwellen*. Preuss. Akad. Wiss. Sitz. 1 (1918) 154–167.
- [10] BIČÁK, J., RUDENKO V. N.: *Teorie relativity a gravitační vlny* (skripta). Univerzita Karlova, Praha, 1985.
- [11] BIČÁK, J.: *Zářivé prostoročasy*. Čs. čas. fyz. A50 (2000) 249–251.
- [12] BIČÁK, J.: *Nová relativistická laboratoř – pulsar ve dvojhvězdě*. Čs. čas. fyz. A25 (1975) 628–629.
- [13] MANCHESTER, R. N., TAYLOR, J. H.: *Pulsars*. Freeman, San Francisco, 1977.
- [14] 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.
- [15] VANÝSEK, V.: *Nobelova cena za fyziku 1993*. PMFA 39 (1994) 223–226.
- [16] WEBER, J.: *Detection and generation of gravitational waves*. Phys. Rev. 117 (1960) 306–313.
- [17] ZÁVĚTOVÁ, M. a ZÁVĚTA, K.: *Gravitační vlny objeveny?* Čs. čas. fyz. A20 (1970) 94–95.
- [18] LANGER, J.: *Pozorování gravitačních vln*. Čs. čas. fyz. A24 (1974) 501–504.
- [19] MARVANOVÁ, V.: *Detekce gravitačních vln*. PMFA 21 (1976) 276–290.
- [20] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny a možnosti jejich detekce*. PMFA 40 (1995) 272–288.
- [21] PODOLSKÝ, J.: *Gravitační vlny: výzva pro příští století*. Čs. čas. fyz. A49 (1999) 113–119.
- [22] ROBERTSON, N. A.: *Laser interferometric gravitational wave detectors*. Class. Quantum Grav. 17 (2000) R19–R40.
- [23] ABBOTT, B. P. et al.: *LIGO: the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*. Rep. Prog. Phys. 72 (2009) 076901 (25pp).
- [24] ARMANO, M. et al.: *LISA Pathfinder: the experiment and the route to LISA*. Class. Quantum Grav. 26 (2009) 094001 (18pp); další články v tomto čísle.
- [25] SCHUTZ, B. F.: *Zdroje gravitačních vln nízkých frekvencí*. Čs. čas. fyz. A49 (1999) 120–132.

Pozn.: Obrázky byly převzaty z příslušných www stránek uvedených v textu.