

Gravitační vlny a jejich detektory

Jiří Podolský

(Nejprve uvádíme zkrácený článek doc. Podolského z roku 1995.) Ještě před půl stoletím jsme byli při zkoumání vesmíru zcela odkázáni na pozorování v oboru viditelného světla. Teprve rozvoj radiotechniky, elektroniky a kosmonautiky umožnil vznik astronomie „neviditelná“. Astronomové začali studovat vesmír prostřednictvím celého elektromagnetického spektra, nejen v onom úzkém pásmu vlnových délek zachytitelných očima. Zrodila se radioastronomie a po ní přišla i pozorování v oboru ultrafialovém, infračerveném, rentgenovém a gama [1].

Analýza elektromagnetických vln dnes představuje takřka výhradní zdroj informací o kosmických objektech a procesech. Jiné metody (přímý průzkum pomocí meziplanetárních sond, detekce částic kosmického záření, slunečního větru, neutrin, atd.) stále poskytují v podstatě jen doplňující údaje (s čestnou výjimkou průzkumu Měsíce). Prostřednictvím elektromagnetických vln, tedy jen nepřímou, se musíme dovídat i o projevech gravitace. Je ale pravděpodobné, že ještě před koncem století budeme moci zaznamenávat gravitační pole některých vzdálených kosmických objektů přímo. Umožní nám to detektory gravitačních vln, které se v současné době staví.

Gravitační vlny

Vlnění obecně představuje kmitavý stav jistého prostředí. 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. Podle gravitační teorie zformulované Albertem Einsteinem v roce 1915 (všeobecně známé pod názvem obecná teorie relativity) lze totiž veškeré gravitační efekty vysvětlit jako důsledek zakřivení prostoročasu [2]. 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 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 cvrknutá do vyhloubené jamky.

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 a vznik neutronových hvězd.

Obecná teorie relativity předpovídá i existenci specifických kmitavých stavů prostoročasu: gravitačních vln [3]. Co jsou gravitační vlny lze intuitivně pochopit z následující analogie. 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 rozvlí celá trampolína. Podobným způsobem vznikají i gravitační vlny. Každá hvězda zakřivuje prostoročas ve svém okolí. Změní-li hvězda náhle svůj tvar (například při výbuchu 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. V jejich amplitudě a frekvenci je zakódována cenná informace o procesu zániku hvězdy.

Gravitační vlny vznikají nejen při výbuších supernov, ale obecně všude tam, kde se nerovnoměrně mění tvar objektu a tím i rozložení hmoty. Významnými zdroji gravitačních vln jsou dvojhvězdy, v nichž celkové rozložení hmoty osciluje s periodou rovnou době oběhu. Čím blíže jsou k sobě obíhající složky a čím jsou hmotnější, tím silnější jsou i generované vlny. Silnými zdroji gravitačních vln jsou proto těsné binární systémy, z nichž alespoň jednu 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, které mohly vznikat v raném vesmíru. S pomocí tohoto reliktního gravitačního záření by se nám mohlo podařit získat přímý obraz velkého třesku a studovat globální strukturu vesmíru.

Gravitační vlny se svými vlastnostmi podobají vlnám elektromagnetickým. Šíří se vesmírem rychlostí světla, která, jak známo, představuje maximální možnou rychlost vzájemného pohybu fyzikálních objektů. Oba typy vln mají příčný charakter, neboť rozkmitávají tělesa pouze ve směrech kolmých na směr šíření. Elektromagnetická vlna však dokáže rozkmitat jen elektricky nabitě částice, zatímco vlna gravitační ovlivňuje geometrické vlastnosti prostoročasu a působí proto na veškerou hmotu.

Zásadní praktická odlišnost gravitačních a elektromagnetických vln však spočívá v jejich různé intenzitě. Elektromagnetické vlny lze generovat i zachycovat snadno (příkladem velmi účinného elektromagnetického detektoru

Doc. RNDr. Jiří Podolský, CSc. (*1963)

vystudoval MFF UK v Praze, kde nyní působí na Ústavu teoretické fyziky. Zabývá se Einsteinovou teorií gravitace, zejména teorií gravitačního záření.

E-mail: podolsky@mbox.troja.mff.cuni.cz



Obrázek 1 – Joseph Weber u svého detektoru

jsou naše oči). Naproti tomu gravitační vlny jsou nesmírně slabé. Účinnost, s jakou jsou gravitační vlny generovány nebo detekovány, je proto malá. To je důvod, proč jsme do dnešní doby přes 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.

Velikost gravitační vlny popisuje její amplituda, kterou fyzikové standardně označují symbolem h . Je to bezrozměrné číslo vyjadřující, jak velkou relativní změnu vzdálenosti dvou testovacích částic (resp. deformaci objektu) vlna svým průchodem vyvolá, tj. $\Delta L/L$, kde L je počáteční vzdálenost částic a ΔL je změna jejich vzájemné vzdálenosti. Přehled hlavních předpokládaných zdrojů kosmických gravitačních vln včetně příslušných amplitud, typických frekvencí a charakteristických tvarů signálů je shrnut v tabulce 1.

Zdálo by se tedy, že nejsnáze budou zachytitelné gravitační vlny generované výbuchem supernovy v naší Galaxii. Úskalí 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 zachycovat gravitační vlny generované supernovami v hnízdech galaxií v souhvězdí Panny, vzdáleném od nás 40 miliard světelných let. V tomto obrovském shluku více než 2000 galaxií

je tolik hvězd, že ročně vybuchne několik supernov, což je již docela přijatelná četnost.

Detektory gravitačních vln

První pokusy o stavbu detektoru gravitačních vln sahají do začátku 60. let. Hlavní osobností na tomto poli se stal Joseph Weber z Marylandské university, který navrhl konstrukci rezonančního detektoru (obr. 1). Jednalo se o velký hliníkový válec zavěšený ve vakuové komoře a izolovaný od vnějších ořesů. Deformace válce byly zaznamenávány piezoelektrickými snímači. Průchod gravitační vlny by válec rozkmital, přičemž při vhodných frekvencích vlny by rezonanční efekt způsobil zesílení vibrací. Aby se vyloučily falešné signály způsobené pozemskými vlivy, prováděla se měření dvěma stejnými detektory vzdálenými od sebe cca 1000 km. Vybírány byly jen ty signály, kdy se oba detektory rozezvuchely současně.

Přestože Weberovo průkopnické dílo nebylo završeno jednoznačným úspěchem [4], našlo mnoho pokračovatelů. Četné skupiny po celém světě pracovaly v uplynulých desetiletích na dalším vylepšování rezonančních detektorů Weberova typu. Dnešní detektory 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.

Léta 70. ovšem přinesla nepřímý důkaz existence gravitačních vln. V létě roku 1974 objevili astronomové Joseph Taylor a Russell Hulse pulsar, který dnes nese označení PSR 1913+16. Pečlivou analýzou rádiových pulsů zjistili, že se ve skutečnosti jedná o unikátní binární systém, v němž obíhají dvě neutronové hvězdy kolem sebe jednou za pouhých 8 hodin [5]. V tak těsném dvojhvězdném

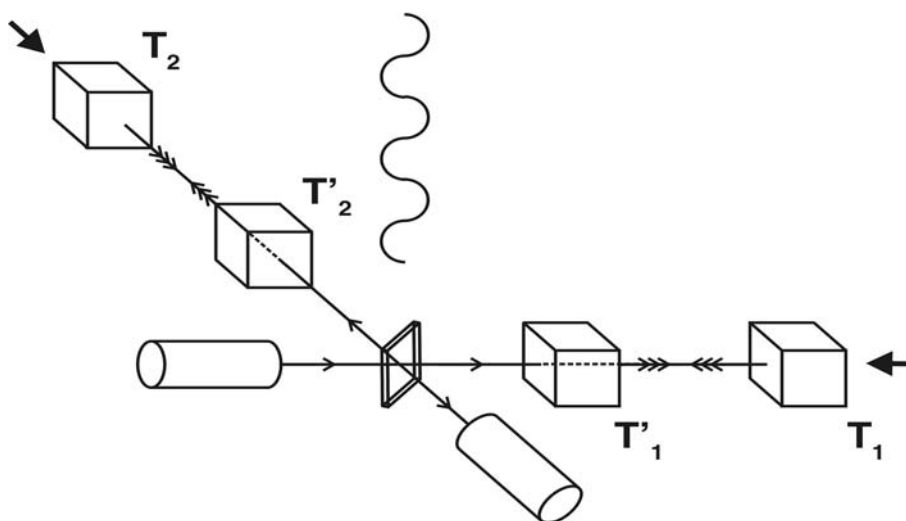
systému jsou všechny relativistické efekty velmi výrazné (například stáčení hlavní osy kvazieliptické dráhy zde dosahuje hodnoty více než 4° za rok, zatímco pro soustavu Slunce-Merkur pouhých $43''$ za století). Binární pulsar se proto stal úžasnou laboratoří gravitační fyziky. Nejdůležitější se ukázalo zjištění, že se oběžná doba neustále zkracuje. Tento experimentální fakt potvrzuje Einsteinovu obecnou teorii relativity, která předpovídá, že obě neutronové hvězdy k sobě spirálovitě přibližují, přičemž ztracená vazbová energie systému je odnášena vyzařovanými gravitačními vlnami. Dosavadní pozorování potvrzují 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. Proto se intenzivně pracuje na detektorech, zařízeních schopných měřit přímo odpovídající deformace prostoročasu. Zdá se, že prvním úspěšným gravitačním teleskopem přitom nebude rezonanční detektor Weberova typu, ale detektor interferometrický.

Laserové interferometrie použil v detektoru gravitačních vln poprvé Robert Forward počátkem 70. let. Vloni (1994) začala ve Spojených státech výstavba zařízení, k jehož realizaci se spojily dvě skupiny, z Caltechu a z MIT. Projekt se nazývá LIGO, což je zkratka anglického Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Citlivost by měla dosáho-

zdroj	amplituda	frekvence	typ signálu
supernova v Galaxii	10^{-18}	1 kHz	pulzní
supernova v LMC	10^{-19}	1 kHz	pulzní
supernova v Panně	10^{-21}	1 kHz	pulzní
srážka černých děr	10^{-20}	100 Hz	kvaziperiodický
srážka neutronových hvězd	10^{-22}	< 1 kHz	kvaziperiodický
vibrace černé díry	?	< 10 kHz	tlumené oscilace
velký třesk	?	?	šum

Tabulka 1 – Přehled hlavních předpokládaných zdrojů gravitačních vln

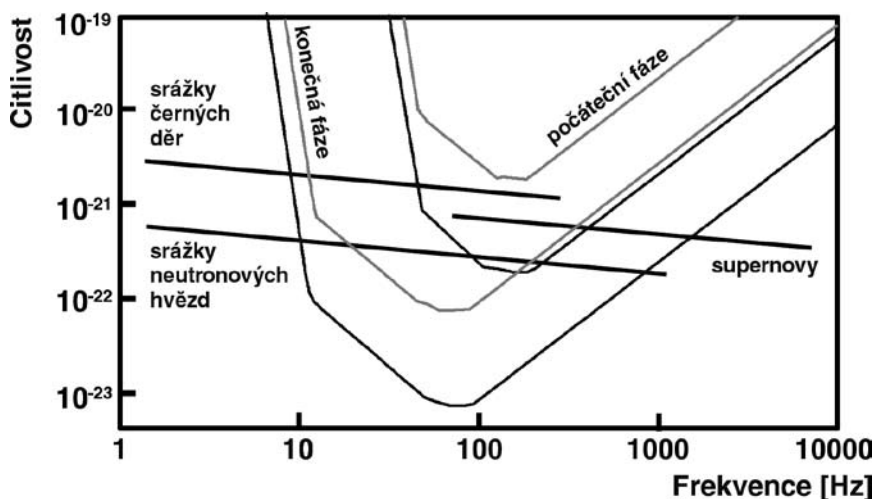


Obrázek 2 – Interferometry projektu LIGO budou dosahovat vyšší citlivosti zásluhou Fabryho-Perotových rezonančních dutin. Paprsky se budou v obou ramenech mnohonásobně odrážet mezi volně zavěšenými tělesy T_1 a T_1' resp. T_2 a T_2' . Teprve poté se složí a dopadnou na fotodetektor.

vat 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 ($10^{-21} = 10^{-10} \text{ m} / 10^{11} \text{ m}$). Výrazného zvýšení citlivosti o několik řádů oproti dnešním detektorům bude dosaženo kombinací důmyslných technických vylepšení. Především má jít o zařízení obrovských rozměrů, více než stokrát větší než jsou současné interferometry: velikost navzájem kolmých ramen má být 4 kilometry. Velké rozměry samozřejmě přinášejí i velké technické komplikace. Celá optická soustava bude umístěna ve dvou

trubicích délky 4 km a průměru 1,2 m, v nichž bude udržováno velmi vysoké vakuum (vzhledem k objemu 9000 m^3 půjde o největší vakuovou aparaturou na světě). Zařízení bude izolováno od rušivých vlivů.

V interferometru LIGO bude použito celkem čtyř volně zavěšených testovacích těles se zrcátky (viz obr. 2). Dvojice těles v každém z ramen (T_1 a T_1' resp. T_2 a T_2') tvoří tzv. Fabryho-Perotovu rezonanční dutinu. Laserový paprsek bude nucen se v těchto dutinách mezi tělesy mnohonásobně odrážet, než dopadne na fotodetektor. To umožní efektivně prodloužit optickou délku zařízení.



Obrázek 3 – Ideální (černá čára) a efektivní (šedivá 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.

Projekt LIGO předpokládá, že od samého počátku budou v provozu dvě sesterská zařízení vybudovaná na velmi vzdálených místech (Hanford Reservation ve státě Washington a Livingston Parish v Louisianě). Stanice budou elektronicky propojené, takže budou pracovat simultánně jako jediná gravitační observatoř. Analýza signálů ze vzdálených, různě dlouhých interferometrů umožní eliminovat falešné signály.

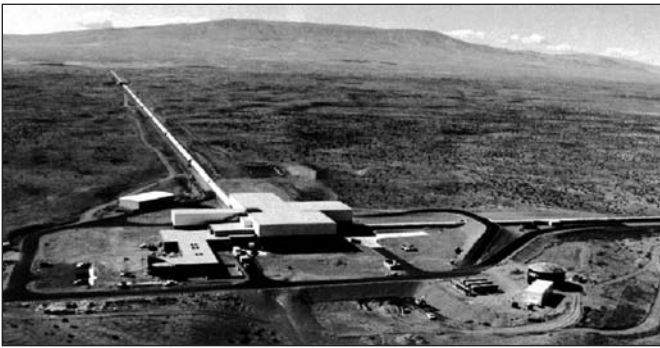
Na obr. 3 je znázorněna předpokládaná ideální citlivost LIGO pro různé frekvence, a to jak v počáteční, tak v konečné fázi budování observatoře. Čárkovaně je naznačena též o něco menší „efektivní“ citlivost zařízení (neboť signály mohou přicházet z různých směrů, vůči nimž nemá detektor stejnou účinnost). Je vidět, že po dobudování by observatoř měla být schopna detekovat gravitační vlny prakticky ze všech 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.

Nezbývá než doufat, že projekt LIGO bude zdárně dokončen. Celkové náklady se odhadují na více než 300 miliónů dolarů. Naděje na možnost přímého potvrzení existence gravitačních vln ještě před rokem 2000 by pak byly více než dobré. Šlo by o událost prvořadého významu, která by dokořán otevřela další, úplně nové pozorovací okno do vesmíru. Znamenala by zrod další praktické experimentální metody astronomie, neboť ze směru, amplitudy, frekvence a polarizace gravitačních vln by bylo možné zjišťovat vlastnosti těch nejexotičtějších astrofyzikálních zdrojů. Historie nám navíc dává dobré důvody k naději, že pomocí gravitačních vln odhalíme také jevy dnes netušené.

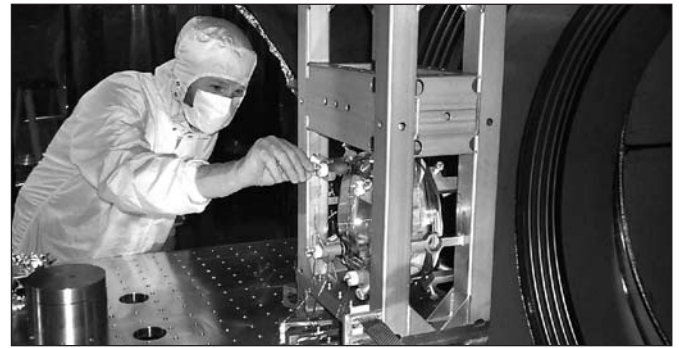
zkrácená verze článku z Astropisu 1/1995

Jak to bylo dál...

Z odstupu více než osmi let nejsem nucen na článku měnit téměř nic - vyjma toho nejpodstatnějšího. Musím čestně a otevřeně přiznat, že optimistická vyjádření z úvodu i závěru mého příspěvku se nenaplnila. Gravitační vlny nebyly do roku 2000 přímým způsobem prokázány.



Obrázek 4 – Letecký snímek amerického čtyřkilometrového interferometru LIGO v Hanfordu (stát Washington)



Obrázek 5 – Montáž precizního zavěšení jednoho z testovacích těles ve vakuové komoře stanice LIGO

Tento úkol přenechalo 20. století svému následníku.

Dobrou zprávou naproti tomu je, že úsilí o jejich zachycení nijak nepolevilo, ba naopak. Hned několik velkých týmů po světě právě nyní horečně staví, dokončuje a doladuje své detektory gravitačních vln, unikátní zařízení až kilometrůvých rozměrů s technickými parametry na hranici soudobých možností. Snad už jsou na dosah vysněného cíle.

Neustále jsou vylepšovány rezonanční detektory Weberova typu: užívají dnes mnohem lepší kvantové senzory a tepelný šum potlačují chlazením na teploty blízké absolutní nule. Kryogenní zařízení pracující při $T = 3\text{ K}$ jako je EXPLORER (laboratoř v CERNu), ALLEGRO (USA) nebo NIOBE (austral-ský Perth) spolehlivě dosahují citlivosti kolem $h = 10^{-18}$. Italské superkryogenní detektory ($T = 0,01\text{ K}$) NAUTILUS ve Frascati u Říma a AURIGA v Legnaro mají citlivost dokonce $h = 10^{-19}$. Hlavní nevýhodou rezonančních detektorů je však jejich naladění na výjimečnou frekvenci, většinou kolem 900 Hz, což snižuje jejich celkovou účinnost.

Budoucnost bude proto patřit spíše obřím interferometrům [6], které jsou širokospektrální. V půlce 90. let, kdy jsem psal svůj článek, byl nejlepším detektorem tohoto typu experimentální čtyřicetimetrový interferometr MARK 2

s citlivostí 10^{-18} , zkonstruovaný na Caltechu skupinou Kipa Thorna a Ronalda Drevera. Podobná zařízení byla koncem století sestrojena a testována v Evropě, konkrétně v Garchingu a Glasgow ve skupinách Karstena Danzmann, Jamese Hougha a Bernarda Schutze. A začala výstavba nové generace interferometrů s citlivostí $h = 10^{-21}$ shrnutých v tabulce 2.

V roce 2000 byl v Japonsku uveden do provozu pokusný detektor TAMA 300 s délkou ramen 300 metrů. O rok později ho následoval dvakrát tak velký německo-britský interferometr GEO 600. Velké šance na titul prvního detektoru, který přímým způsobem zaznamená gravitační vlny, se však všeobecně vkládají až do amerického projektu LIGO, případně do konkurenčního italsko-francouzského zařízení VIRGO.

Jak bylo popsáno již v původním článku, LIGO se skládá ze dvou stanic vzdálených od sebe 3000 km, které pracují v koincidenčním režimu. První se nachází v Hanfordu (stát Washington), viz obr. 4, druhá v Livingstonu (stát Louisiana). Délka interferometrů umístěných v nadzemních betonových tunelech je 4 km (stanice v Hanfordu navíc obsahuje ještě interferometr délky 2 km). Optický systém pracuje v obou ramenech jako Fabryho-Perotův rezonátor. Vysoce stabilní Nd:YAG laser září v infračer-

vené oblasti 1064 nm. Jeho výkon je sice pouhých 10 W, díky výkonové recyklaci však postupně do systému „napumpuje“ několik kW. Ve vakuových komorách jsou umístěny desítky kvalitních optických prvků, viz obr. 5, o rozměrech až 25 cm. Přesnost vyleštění ploch je lepší než 0,8 nm, odrazivost reflexních vrstev je 99,999 998 %.

V průběhu roku 2002 byl komplex dokončován a laděn. Projektované citlivosti 10^{-21} dosáhl na začátku roku 2003. Již začala první vědecká měření. Tvůrci observatoře LIGO doufají, že to budou právě oni, kdo dobudou Nobelovy ceny za přímou detekci Einsteinem dávnou předpověděných gravitačních vln. Mají pro to dobré předpoklady, konkurence se ovšem v poslední době přiostrčila. Představují ji nejen oba menší, avšak stále vylepšované interferometry TAMA 300 a GEO 600, ale zejména evropská observatoř VIRGO (obr. 6) s délkou ramen 3 km, budovaná u městečka Cascina, jen několik kilometrů od Pisy. Ta by měla být rovněž dokončena letos, a navíc bude díky speciálně vyvinutým tlumícím závěsným systémům (obr. 7) citlivější v oblasti velmi nízkých frekvencí okolo 10 Hz (LIGO vykazuje největší citlivost v okolí 100 Hz). Nechejme se tedy překvapit, jak nakonec jejich prestižní souboj dopadne.

název	umístění	země	rok	rozměr	www
MARK 2	Pasadena	USA	1991	40 m	www.ligo.caltech.edu
TAMA 300	Tokio	Japonsko	2000	300 m	tamago.mtk.nao.ac.jp
GEO 600	Hannover	SRN, GB	2001	600 m	www.geo600.uni-hannover.de
LIGO	Hanford, Livingstone	USA	2002	4 km	www.ligo.caltech.edu
VIRGO	Pisa	Itálie, Francie	2003	3 km	www.virgo.infn.it
LISA	vesmír	ESA, NASA	2010?	5 mil km	sci.esa.int/lisa; lisa.jpl.nasa.gov

Tabulka 2 – Přehled interferometrických detektorů gravitačních vln

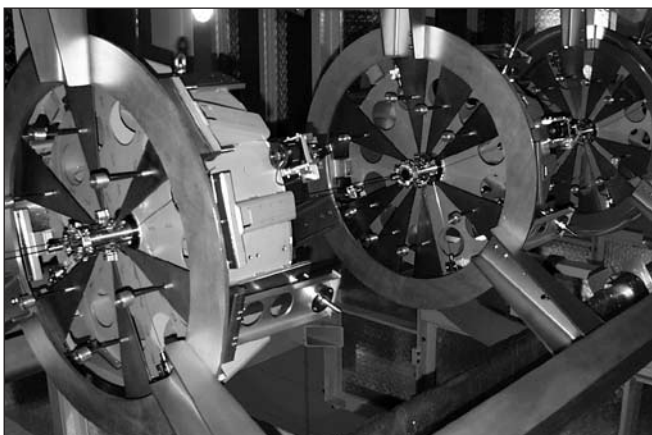


Obrázek 6 – Letecký pohled na italsko-francouzský tříkilometrový detektor VIRGO u Casciny blízko Pisy.

Jak to bude dál...

Nová generace detektorů gravitačních vln ještě ani nebyla uvedena do rutinního provozu, vědci ale již hledí do budoucnosti. Počítá se s postupným zdokonalováním observatoří LIGO (označované jako tzv. LIGO II) i VIRGO, případně s ještě robustnějšími interferometry. Ty by měly začít pracovat kolem roku 2007 a dosáhnout takřka neuvěřitelné citlivosti až $h = 10^{-23}$. Toho má být dosaženo vylepšením na mnoha stranách: výkonnějším laserem, těžšími a kvalitnějšími safírovými zrcadly zavěšenými na páscích z křemíku, recyklací signálu, laditelnou frekvenční charakteristikou, sofistikovanější aktivní seismickou izolací. Výsledkem má být výrazně lepší odstup signálu od šumu, což prakticky umožní zahájit éru experimentální gravitační astronomie.

Zvětšovat dále rozměry ramen je však neschůdné. Principiální omezení klade také seismická aktivita, která naprosto znemožňuje detekci vln < 1 Hz pozemskými detektory. Nezbyvá, než začít uvažovat o stavbě interferome-



Obrázek 7 – speciální závěsy testovacích těles VIRGO poskytují takřka dokonalé odrušení od vnějších vlivů, především seismických

tru v kosmickém prostoru. To je cílem ambiciózního projektu LISA (Laser Interferometer Space Antenna), jenž se rodí ve spolupráci evropské a americké kosmické agentury. Projekt předpokládá vytvoření detektoru ve tvaru pomyslného rovnostranného trojúhelníka o stranách 5 milionů kilometrů s družicemi umístěnými ve vrcholech. Aby se vyloučily negravitační vlivy, bude použita technika aktivního udržování na „bezsilové trajektorii“ známá z geodetických družic. Jejich vzájemná vzdálenost bude neustále interferometricky proměřována. Celá soustava má obíhat kolem Slunce ve vzdálenosti 1 AU.

Hlavní předností LISA, která byla vybrána jako jedna z budoucích klíčových vědeckých misí ESA s plánovanou realizací po roce 2010, budou obrovské rozměry a nepřítomnost seismického rušení. Díky tomu se LISA stane robustním detektorem gravitačních vln, který narozdíl od svých pozemských kolegů bude pracovat v režimu, kdy signál bude až o mnoho řádů převyšovat šum. Především se však otevře naprosto nové, nízkofrekvenční gravitační okno do vesmíru. Jak je podrobně popsáno např. v [7], právě v oblasti 1 Hz až 10^{-4} Hz vydává gravitační záření řada zajímavých astrofyzikálních zdrojů, především kompaktních binárních systémů v Galaxii a velmi hmotných černých děr v galaxiích vzdálených.

Pár slov závěrem

Vybuchující a srážející se hvězdy nebo černé díry zaplňují prostor gravitačními vlnami, kvaziperiodickými deformacemi prostoročasu. Podobně jako lze na mořském pobřeží zaslechnout zvuky velryb plujících pod vodní hladinou, tak i „gravitační zvuky“ vzdálených hvězd doléhají až k nám na Zemi, byť velmi slabě. Právě dokončované detektory nám snad poprvé umožní uslyšet jejich kosmický hlas.

Zprvu půjde především o další ověření platnosti Einsteinovy obecné teorie relativity. Záhy se však z detekce gravitačních vln vyvine nový pozorovací nástroj astronomie a astrofyziky. Poskytne nám přímé informace o extrémně energetických procesech odehrávajících se v jádrech velmi hustých objektů.

Úkol měřit gravitační vlny je technicky náročný, na první pohled zdánlivě nemožný, avšak vynakládané úsilí i prostředky rozhodně stojí za to. Skrze nové, gravitačně-vlnové okno do vesmíru získáme unikátní poznatky, které nám dále poodhalí roušku některých jeho tajemství.

Literatura

- [1] J.Kleczek: *Vesmír kolem nás* (Albatros, Praha, 1986).
- [2] L.Dvořák: skripta *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru* (SPN, Praha, 1984); J.Horský, J.Novotný a M.Štefaník: *Mechanika ve fyzice* (Academia, Praha, 2001).
- [3] J.Bičák a V.N.Ruděnko: skripta *Teorie relativity a gravitační vlny* (Univerzita Karlova, Praha, 1986); J.Podolský: *Gravitační vlny a možnosti jejich detekce*, Pokroky mat. fyz. a astr. 40 (1995) 272; J.Bičák: *Zářivé prostoročasy*, Čs. čas. fyz. A50 (2000) 249.
- [4] M.Závětová a K.Závěta: *Gravitační vlny objeveny?*, Čs. čas. fyz. A20 (1970) 94; J.Langer: *Pozorování gravitačních vln*, Čs. čas. fyz. A24 (1974) 501; V.Marvanová: *Detekce gravitačních vln*, Pokroky mat. fyz. a astr. 21 (1976) 276.
- [5] J.Bičák: *Nová relativistická laboratoř - pulsar ve dvojhvězdě*, Čs. čas. fyz. A25 (1975) 628; J.H.Taylor a J.M.Weisberg: *Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1916+16*, Astrophysical Journal 345 (1989) 434; V.Vanýsek: *Nobelova cena za fyziku 1993*, Pokroky mat. fyz. a astr. 39 (1994) 223.
- [6] J.Podolský: *Gravitační vlny: výzva pro příští století*, Čs. čas. fyz. A49 (1999) 113; N.A.Robertson: *Laser interferometric gravitational wave detectors*, Class. Quantum Grav. 17 (2000) R19.
- [7] B.F.Schutz: *Zdroje gravitačních vln nízkých frekvencí*, Čs. čas. fyz. A49 (1999) 120.

O gravitačních vlnách si kromě citovaného čísla 1/1995 můžete přečíst také v Astro-pise 1/2000.