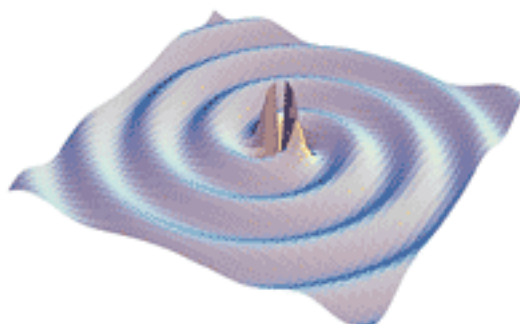


# Gravitační vlny

Michal Dvořák

7. ledna 2007



## 1 Úvod

Vlnění obecně představuje kmitavý stav jistého prostředí. V případě mořských vln je 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. 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.

Cesta od základní myšlenky vysvětlit gravitaci zakřivením prostoročasu ke správné matematické formulaci obecné teorie relativity ovšem nebyla snadná a trvala Einsteinovi takřka deset let. Z matematického hlediska je to teorie dosti komplikovaná. I přes tuto složitost se fyzikům a astronomům daří používat obecnou teorii relativity pro stále přesnější popis gravitačních procesů známých dnešní astronomii. Od svého vzniku prošla úspěšně bezpočtem testů, které prokázaly naprostý kvantitativní souhlas předpovědí teorie se skutečností. Je to nejlepší gravitační teorie, kterou máme k dispozici. 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.

## 2 Gravitační vlny

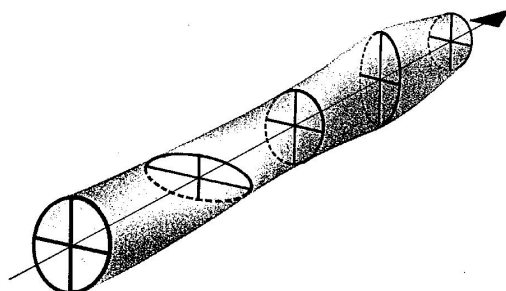
Obecná teorie relativity předpovídá i existenci specifických kmitavých stavů prostoročasu: gravitačních vln. Co jsou gravitační vlny lze intuitivně pochopit z následující analogie. Stoupne-li si člověk doprostřed trampolíny, vytvoří se prohlubeň. Začne-li však člověk na trampolíně skákat, prohlubeň bude periodicky měnit svůj tvar a postupně se rozvlní 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. Kdybychom uměli 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. Mohli bychom nahlédnout do oblastí dnes nespátřitelných, neboť jsou pro elektromagnetické záření neprůhledné.

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 dvojhvězdy, v nichž celkové rozložení hmoty osciluje s periodou rovnou době oběhu. Čím blíže jsou obě obíhající složky a čím jsou hmotnější, tím silnější jsou i generované vlny. Silnými zdroji gravitačních vln jsou proto 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 mohly vznikat v raném vesmíru. 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  $10^{-43}$  s po velkém třesku! Poznamenejme v této souvislosti, že prostřednictvím elektromagnetických vln nelze studovat vesmír mladší než 100 000 let. Na počátku byl totiž 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. Dnes jej pozorujeme jako tzv. reliktní mikrovlnné záření (za jeho objev učiněný v roce 1965 byla Penziasovi a Wilsonovi udělena Nobelova cena). S pomocí reliktního gravitačního záření by se nám mohlo podařit získat přímý obraz velkého třesku a studovat globální strukturu vesmíru.

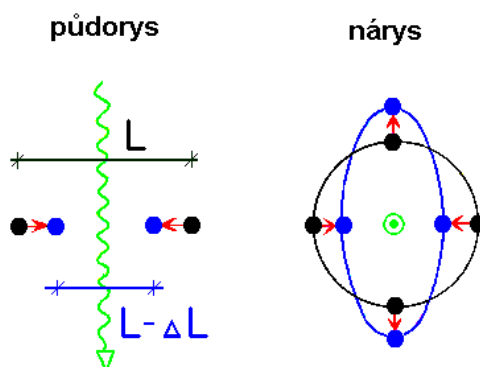
### 3 Vlastnosti gravitační vln

Gravitační vlny se svými vlastnostmi podobají vlnám elektromagnetickým. Šíří se vesmírem rychlostí světla, tedy maximální možnou rychlostí. Oba typy vln mají také příčný charakter. Periodické deformace prostoročasu představující gravitační vlnu mají slapové účinky: udělují sousedním částicím relativní zrychlení a tím rozkmitávají tělesa, ovšem pouze v rovině kolmé na směr šíření. Také elektromagnetická vlna je příčná, dokáže však rozkmitat jen elektricky nabitě částice (především elektrony), zatímco vlna gravitační mění geometrické vlastnosti prostoročasu a ovlivňuje proto každou hmotu. Liší se též svými polarizačními vlastnostmi. Oba typy sice připouštějí dva nezávislé polarizační stavy, ale ty mají u gravitačních vln poněkud složitější charakter. Projevují se například tak, že kdyby se gravitační vlna šířila ve směru rovné gumové hadice, způsobila by periodické deformace původně kruhového průřezu hadice v eliptický (obr. 1).



Obrázek 1: Šíření gravitační vlny.

Naprostou zásadní odlišnost gravitačních a elektromagnetických vln však spočívá v jejich různé "intenzitě". Elektromagnetické vlny lze generovat i zachycovat velice snadno. Oproti tomu gravitační vlny jsou nesmírně slabé. Je známo, že gravitační interakce je nejslabší fyzikální silou ve vesmíru (jako jediná ovšem efektivně působí i na obrovské vzdálenosti, a proto je přes svůj handicap dominantní interakcí ovládající kosmické procesy). To znamená, že vzájemná vazba mezi gravitací a hmotou je velmi malá v porovnání s elektromagnetismem či jaderným působením. Například poměr sil gravitačního a elektrostatického působení dvou elektronů je  $10^{-42}$ . Proto dodnes nebyl sestaven přijímač schopný přímým způsobem zachycovat gravitační vlny.



Obrázek 2: Změna polohy částic způsobená průchodem gravitační vlny.

Velikost gravitační vlny popisuje její amplituda značené symbolem  $h$ . Je to bezrozměrné číslo vyjadřující, jak velkou relativní změnu vzdálenosti dvou testovacích částic (případně deformaci objektu) vlna svým průchodem vyvolá (obr. 2). Tedy  $h = \Delta L/L$ , kde  $L$  je počáteční vzdálenost částic (původní velikost objektu) a  $\Delta L$  je změna jejich vzájemné vzdálenosti.

Podrobné odhady ukazují, že i v případě zmíněných extrémně silných (ale současně velmi vzdálených) kosmických zdrojů je příslušná amplituda gravitačních vln neuvěřitelně malá, obvykle menší než hodnota  $h = 10^{-21}$  (měřeno na Zemi). Přehled hlavních předpokládaných zdrojů kosmických gravitačních vln včetně odpovídajících amplitud, typických frekvencí a charakteristických tvarů signálů je shrnut v tabulce 1.

Zdroj gravitačních vln	Amplituda	Frekvence	Typ signálu
supernova v Galaxii	$10^{-18}$	$\sim 1$ kHz	puls
supernova ve Velkém Magellanově oblaku	$10^{-19}$	$\sim 1$ kHz	puls
supernova v hníždě galaxií v Panně	$10^{-21}$	$\sim 1$ kHz	puls
binární systém v závěrečném stádiu	$10^{-22}$	$\sim 1$ mHz	(kvazi)periodický
srážka neutronových hvězd, černých děr	$10^{-21}$	$\sim 100$ Hz	”cvrkot”
vibrace černé díry	?	$< 10$ kHz	tlumené oscilace
velký třesk, fluktuace vakua během inflace	?	?	šum

**Tabulka 1:** Přehled hlavních předpokládaných zdrojů kosmických gravitačních vln.

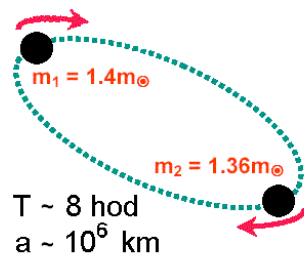
Zdálo by se tedy, že nejsnáze budou zachytitelné gravitační vlny generované výbuchem supernovy v naší Galaxii. Úskalí spočívá v tom, že k takové události dochází velmi vzácně, zhruba jednou za 30 let. Z praktického hlediska bude proto nutné zkonstruovat přinejmenším tisíckrát citlivější detektory schopné zaznamenat vlny ze vzdálenějších zdrojů. Při citlivosti  $10^{-21}$  bychom již měli zachycovat gravitační vlny generované supernovami v hníždě galaxií v souhvězdí Panny, vzdáleném od nás 40 miliónů světelných let. V tomto obrovském shluku více než 2000 galaxií je tolik hvězd, že ročně vybuchne několik supernov, což je již docela přijatelná četnost.

Shodou okolností, řádově stejnou amplitudu by měly mít i gravitační vlny vznikající při srážkách neutronových hvězd, případně černých děr na konci života binárního systému. Tyto vlny vyvolávají na Zemi relativní deformaci testovacího objektu o  $h \sim 10^{-21}$ . Pro názornost uveďme, že takto malé číslo odpovídá například určení vzdálenosti Země od Slunce s přesností rozměru jediného atomu. Tak nepatrné změny rozměrů se takřka ztrácejí v pozemském šumu. A to je hlavní důvod proč dosud nebyly Einsteinem předpověděné gravitační vlny přímým způsobem potvrzeny pomocí detektoru, který by takové deformace zaznamenával.

Tento úkol přenechalo 20. století svému následníku. Máme dobré důvody věřit, že snad již v prvních letech našeho nového století budou sotva postřehnutelné gravitační vlny poprvé zachyceny do sítě vysoce citlivých interferometrických detektorů, jejichž výstavba se v současné době dostala do závěrečné fáze. Stavitelé jsou přesvědčeni o úspěchu, neboť při jejich konstrukci spojili svůj um relativisté i odborníci na kvantovou optiku, laserové systémy, vakuové aparatury, tlumiče vibrací, počítačovou analýzu dat i fyzikové a technici z jiných oborů. Jejich společným úsilím vznikají unikátní zařízení s technickými parametry na skutečných hranicích dnešních možností.

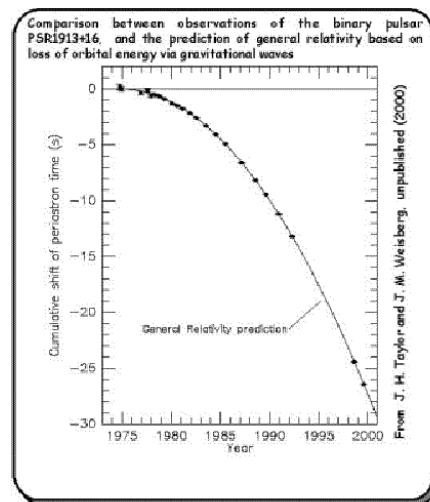
Důvěra v úspěch byla navíc před několika lety podpořena sice nepřímým, zato však silným argumentem ve prospěch reálné existence gravitačních vln (a tedy i správnosti obecné teorie relativity) plynoucí z pozorování slavného binárního pulsaru PSR 1913+16 (obr. 3). Tento systém dvou kompaktních neutronových hvězd obíhající velmi blízko sebe (řádově ve vzdálenosti 1 milion kilometrů) s periodou zhruba 8 hodin byl objeven v roce 1974 Josephem Taylorem a Russellem Hulsem. Dlouhodobým měřením se zjistilo, že oběžná perioda dvojhvězdného systému se systematicky zkracuje o hodnotu 76 mikrosekund za rok, což je přesně hodnota, jakou pro takový systém předpovídá Einsteinova teorie. Vyzařováním 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 objev byli jeho autoři poctěni v roce 1993 Nobelovou cenou za fyziku.

### Binární systém PSR 1913+16 vyzařuje gravitační vlny



obě neutronové hvězdy se po spirále přibližují při každém oběhu o 3 mm , neboť gravitační vlny odnášejí energii

pozorování zcela souhlasí s předpovědí obecné teorie relativity

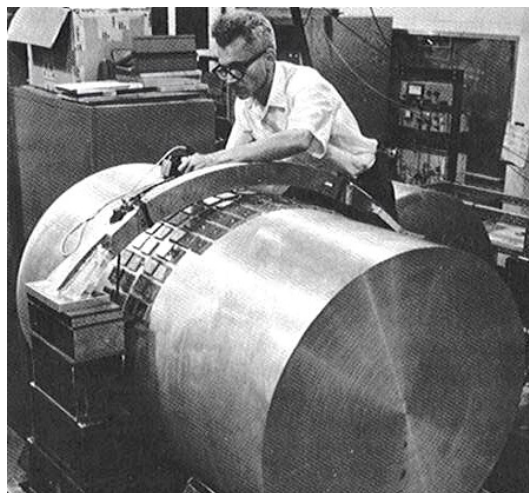


Obrázek 3

## 4 Detektory gravitačních vln

### 4.1 Rezonanční detektory

První pokusy o stavbu detektoru gravitačních vln sahají do konce 50.let. Hlavní osobností na tomto poli se stal Joseph Weber z Marylandské university, který navrhl konstrukci rezonančního detektoru (obr. 4).



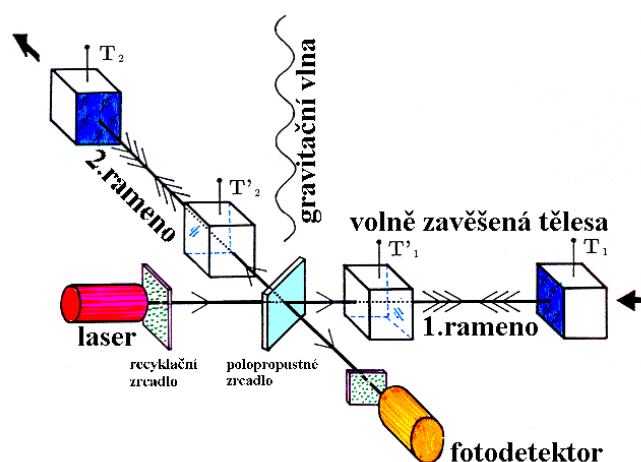
Obrázek 4: Joseph Weber a jeho rezonanční detektor.

Jednalo se o velký hliníkový válec zavěšený ve vakuové komoře a izolovaný od vnějších otřesů. 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 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. Ačkoli citlivost detektoru dosahovala hodnoty  $10^{-16}$ , byla totiž stále nejméně stokrát horší, než kolik vyžadovalo zachycení nejsilnějších teoreticky předpokládaných gravitačních vln. Také se nepodařilo zopakovat Weberovy pokusy jinou experimentální skupinou. Všeobecně se proto předpokládá, že signály Weberem interpretované jako gravitační vlny byly ve skutečnosti jen projevem nějaké systematické chyby jeho zařízení.

Přestože Weberovo průkopnické dílo nebylo završeno jednoznačným úspěchem, našlo mnoho pokračovatelů. Četné skupiny po celém světě pracovaly v uplynulých desetiletích na dalším zlepšování 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. 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 potenciální užitečnost.

## 4.2 Interferometrické detektory

Zdá se proto, že budoucnost bude patřit spíše širokospektrálním detektorům gravitačních vln jiného typu - obřím interferometrům (obr. 5). K pokusu o detekci gravitačních vln použili interferometr poprvé Rainer Weiss a Weberův žák Robert Forward počátkem 70. let. Nápad je to velmi přirozený. Efekt gravitační vlny je totiž právě 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 úměrný amplitudě  $h$  gravitační vlny.



Obrázek 5: Princip detekce gravitační vln interferometrem.

V 90. letech byl nejlepším detektorem tohoto typu čtyřicetimetrový interferometr MARK 2 s citlivostí řádově  $h = 10^{-18}$  zkonstruovaný na Caltechu v americké Pasadeně skupinou soustředěnou kolem Kipa Thorna a Ronalda Drevera. Podobná zařízení byla koncem století sestrojena a testována i v Evropě, konkrétně v Garchingu a Glasgow ve skupinách kolem Karstena Danzmann, Jamese Hougha a Bernarda Schutze. Dnes již je ovšem zřejmé, že gravitační vlny s amplitudou  $h = 10^{-18}$  se mohou vyskytovat jen vzácně, například tehdy, dojde-li k výbuchu supernovy v relativně blízké oblasti v naší Galaxii. Aby se však z detekce gravitačních vln mohl stát vědecký pozorovací program, je zapotřebí vybudovat novou generaci interferometrů s citlivostí alespoň tisíckrát lepší.

Dosáhnout citlivosti řádu  $h = 10^{-21}$  není ale pochopitelně vůbec snadné. Testovací tělesa vzdálená např. 1 km se vlivem takto slabé gravitační vlny přiblíží jen o  $10^{-18}$  m, pouhou tisícinu rozměru protonu! Na první pohled se zdá být zhora nemožné změřit tak nepatrný posun pomocí světla s vlnovou délkou  $10^{-6}$  m a zrcadel složených z atomů o rozměrech  $10^{-10}$  m, to vše za neustálé přítomnosti seismické aktivity zemského povrchu řádu  $10^{-6}$  m. A přesto je něco takového teoreticky i technicky možné. Je však zapotřebí vyvinout precizní optický systém s vysoce stabilním laserem, nebývalé kvalitními křemennými zrcadly a kompenzačními servomechanismy, vše vnořit do vysokého vakua s hodnotami tlaku menšími než  $10^{-9}$  Pa, zkonstruovat účinné izolátory vnějších vibrací, nalézt sofistikovanější metody analýzy získaných dat. Především je ovšem nutno řádově zvětšit rozměry interferometru.

V roce 2000 byl v Japonsku uveden do testovacího provozu první pokusný detektor nové generace TAMA 300 s délkou ramen 300 m. O rok později ho následoval dvakrát tak velký německo-britský interferometr GEO 600.

### 4.2.1 Observatoře LIGO a VIRGO

Velké šance na titul prvního detektoru, který přímým způsobem zaznamená gravitační vlny, se však všeobecně vkládají až do ambiciózního amerického projektu LIGO, případně do konkurenčního italsko-francouzského zařízení VIRGO (obr. 6).



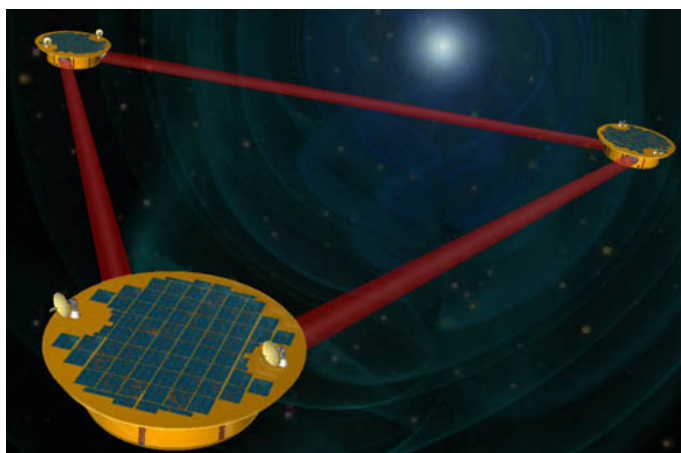
Obrázek 6: Italsko-francouzská observatoř VIRGO.

Observatoř LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) se skládá ze dvou takřka identických interferometrických systémů vzdálených od sebe 3000 km, jež budou pracovat v koincidenčním režimu, aby bylo možné lépe odfiltrovat místní rušivé vlivy. Jeden byl postaven v Hanfordu (stát Washington) a druhý v Livingstonu (stát Louisiana). Délka jejich ramen umístěných v nadzemních betonových tunelech dosahuje nebývalých 4 km. Stanice v Hanfordu pak navíc obsahuje ještě poloviční interferometr délky 2 km. Vakuový systém, především ocelové trubky o průměru 1,2 m a speciální vertikální komory dosahuje objemu 9000 m<sup>3</sup>, takže je to zdaleka největší vakuová aparatura na světě (mnohem větší než v urychlovačích CERNu). Optický systém pracuje v obou ramenech jako Fabryho-Perotova rezonanční dutina, což téměř stonásobně prodlužuje efektivní optickou délku. Ultrastabilní pevnofázový Nd:YAG generující laser září v infračervené oblasti 1064 nm. Jeho výkon je sice pouhých 10 W, díky výkonové recyklaci však postupně "napumpuje" do optického systému několik kW. Ve vakuových komorách jsou umístěny desítky vysoce kvalitních optických prvků. Řada z nich má rozměr až 25 cm, přesnost vyleštění ploch přitom dosahuje hodnot menších než 0,8 nm (to odpovídá rozříznutí Země podél rovníku s maximální odchylkou plochy řezu 1 cm). Odrazivost reflexních vrstev je 99,999998 %. V průběhu roku 2002 byl celý složitý systém dokončován a laděn. Citlivosti  $h = 10^{-21}$  projektované pro první fázi provozu dosáhnul v roce 2003 a začala první vědecká měření.

Tvůrci a stavitelé observatoře LIGO doufají, že to budou právě oni, kdo dobudou Nobelovy ceny za první přímou detekci Einsteinem již dávno předpověděných gravitačních vln. Mají pro to všechny předpoklady, konkurence se ovšem v poslední době přiostrčila. Představují ji nejen oba zmíněné menší avšak stále vylepšované interferometry TAMA 300 a GEO 600, ale zejména evropská observatoř VIRGO s délkou ramen 3 km budovaná u městečka Cascina, jen několik kilometrů od Pisy (kde Galileo Galilei prováděl první experimenty s gravitací).

### 4.3 Kosmický detektor

Dále zvětšovat rozměry ramen interferometru je neschůdné, zejména s ohledem na cenu vakuového systému. Zcela principiální omezení klade také všudypřítomná seismická aktivita, která naprosto znemožňuje detekci gravitačních vln frekvencí menších než 1 Hz pozemskými detektory. Nezbyvá, 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. Projekt předpokládá vytvoření detektoru ve tvaru pomyslného rovnostranného trojúhelníka o stranách kolem 5 milionů kilometrů tvořeného družicemi umístěnými v jeho vrcholech. Vzájemná vzdálenost družic by se neustále interferometricky proměřovala. Celá soustava by obíhala kolem Slunce ve vzdálenosti 1 AU. S užitím Dopplerova efektu by bylo možné dost přesně stanovit polohy případných zdrojů na obloze. Úhlové rozlišení pro nejsilnější zdroje by mohlo být dokonce lepší než úhlová minuta.



Obrázek 7: Budoucí kosmický interferometr LISA.

Hlavní předností LISA budou především obrovské rozměry interferometru a nepřítomnost seismického rušení. Díky tomu se LISA stane opravdu 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. V oblasti 1 Hz až  $10^{-4}$  Hz vydává gravitační záření celá řada extrémně zajímavých zdrojů, především kompaktních binárních systémů v naší Galaxii a velmi hmotných černých děr v galaxiích vzdálených. Otázkou zůstává, kdy se podaří tento velmi náročný projekt realizovat. Zatím se jako pravděpodobná doba spuštění objevuje rok 2025. Doufejme, že se tento projekt nebude příliš opožďovat, protože je jistě vědecky mnohem přínosnější než třeba let člověka na Mars.

### Reference

- [1] Ullmann. V: *Gravitace, černé díry a fyzika časoprostoru*. Ostrava 1986.
- [2] NASA: *LISA Project Page*. [online]  
<http://lisa.gsfc.nasa.gov/>
- [3] Různé články publikované na Internetu.