

Gravitační vlny a jejich detektory

RNDr. Jiří Podolský, CSc., MFF UK Praha

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 (shrnutí poznatků o tom, jak se nám vesmír jeví při pozorování v těchto oborech lze nalézt např. v [1]).

Jestliže po celé věky hledělo lidstvo na oblohu v necelé jediné oktávě viditelného světla, dnes je nám dáno "naslouchat" vesmírné elektromagnetické symfonii v rozsahu více než 96 oktáv pokrývajících vlnové délky řádově od 10^{-24} m (gama fotony v kosmickém záření) do 10^5 m (záření typu III ze Slunce).

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 nepřímě, se musíme dovídat i o projevech gravitace. Je to docela absurdní situace, s trochou nadsázky přirovnatelná k nelehké úloze porozumět hudbě orchestru jen na základě pozorování pohybů taktovky dirigenta (tedy umět "vnímat" zvuk jen prostřednictvím zraku). 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. 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 cvrnknutá 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.

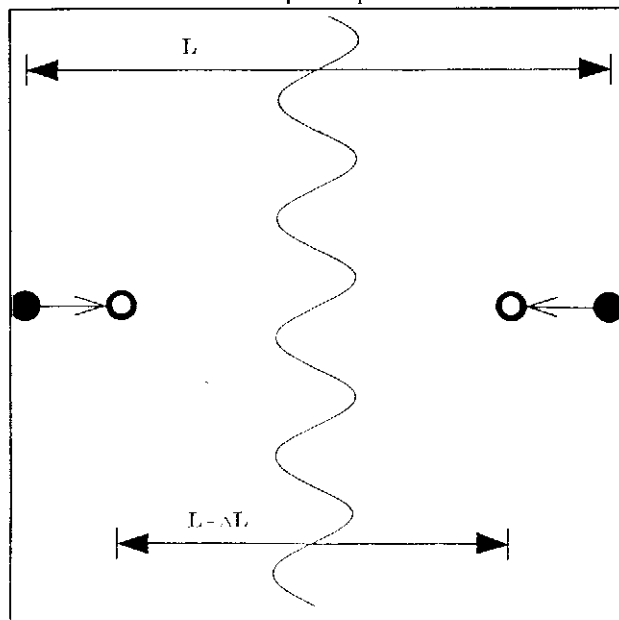
Z matematického hlediska je to teorie dosti komplikovaná [2]. I přes tuto složitost se fyzikům a astronomům daří používat obecnou teorii relativity pro stále přesnější popis gravitačních procesů známých dnešní astronomii. Obecná teorie relativity sice vznikla již před 80 lety, avšak dosud úspěšně prošla bezpočtem testů, které prokázaly naprostý kvantitativní souhlas předpovědí teorie se skutečností [3]. 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.

Obecná teorie relativity předpovídá i existenci specifických kmitavých stavů prostoročasu: *gravitačních vln* [4]. 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 splnutí černých děr.

Kromě gravitačních vln generovaných různými astrofyzikálními objekty a procesy předpokládají teoretikové též existenci "kosmologických" gravitačních vln. Takové vlny mohly vzniknout 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



Obr. 1 - Gravitační vlna mění vzájemnou vzdálenost testovacích částic. Je-li L původní vzdálenost dvou částic a ΔL změna jejich vzdálenosti způsobená vlnou, vyjadřuje číslo $h = \Delta L/L$ amplitudu (sílu) gravitační vlny.

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 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 zrekombovala a elektromagnetické záření začalo žít svým vlastním životem odděleným od ostatní hmoty. Dnes jej pozor-

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

jeme 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 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. Vlny se liší

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 kruhového průřezu hadice v eliptický.

Zásadní praktická odlišnost gravitačních a elektromagnetických vln však spočívá v jejich různé "inten-

zité". Elektromagnetické vlny lze generovat i zachycovat snadno (příkladem velmi účinného elektromagnetického detektoru jsou naše oči). Naproti tomu gravitační vlny jsou nesmírně 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 velmi malé v porovnání se silami elektromagnetickými či jadernými. Například poměr sil vzájemného působení dvou elektronů je 10^{-42} . Účinnost, s jakou jsou gravitační vlny generovány nebo detekovány, je proto nepředstavitelně 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

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 (resp. deformaci objektu) vlna svým průchodem vyvolá, t.j. $h = \Delta L/L$, kde L je počáteční vzdálenost částic a ΔL je změna jejich vzájemné vzdálenosti (viz obr. 1). Přehled hlavních předpokládaných zdrojů kosmických gravitačních vln včetně příslušných amplitud, charakteristických tvarů signálů a typických frekvencí je shrnut v tabulce.

Musíme ovšem poznamenat, že údaje v tabulce jsou pouze orientační a konkrétní hodnoty závisí na řadě okolností. Hlavním faktorem je vzdálenost zdroje a dále účinnost zdroje (tedy množství energie, které se při daném procesu předá gravitačním vlnám). Velmi přibližně platí vztah $h \sim 10^{-17} E/r$, kde r je vzdálenost zdroje o Zemi měřená v násobcích hodnoty 30 000 světelných let (což je přibližně vzdálenost Slunce od středu Galaxie), E je zhruba energie zdroje (související s nesympetrickou 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 $E = 0,1$. Amplituda gravitačních vln měřená na Zemi by pak byla $h \sim 10^{-18}$, což odpovídá prvnímu řádku tabulky.

Zdalo by se tedy, že nejnáze 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 hnízdě galaxií v souhvězdí Panny, vzdáleném od nás 40 miliónů světelných let. V tomto obrovském shluku více než 2000 galaxií je tolik hvězd,

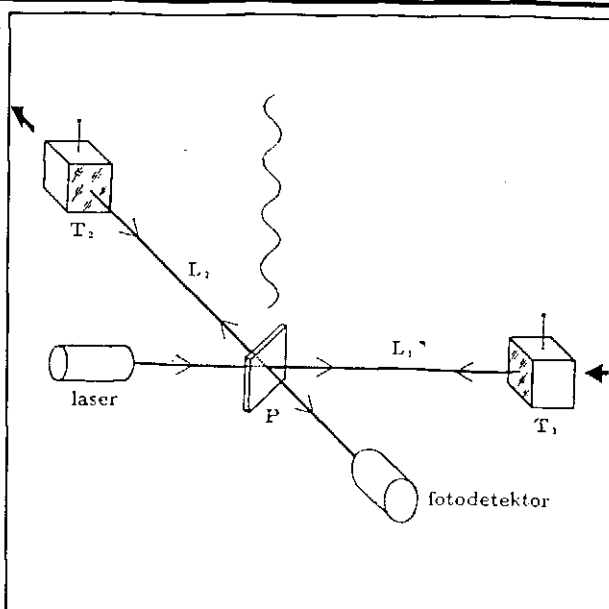
že ročně vybuchne několik supernov, což je již docela přijatelná četnost.

Detektory gravitačních vln

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 [5]. 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 koincidence ročně, ale přesto větší část fyzikální komunity nepřijala jeho interpretaci, že se jednalo o projevy gravitačních vln přicházejících ze středu Galaxie. Ačkoliv citlivost detektoru dosahovala hodnoty 10^{-10} , byla totiž stále nejméně stokrát horší, než kolik vyžadovalo zachycení nejsilnějších teoreticky předpokládaných gravitačních vln (viz. tabulka). 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

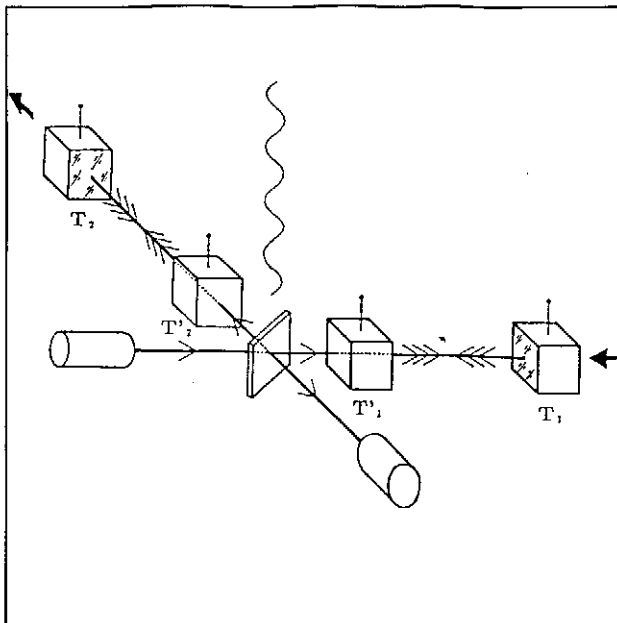


Obr. 2 - Princip interferometrického detektoru gravitačních vln. Jsou-li dráhy obou paprsků L_1 a L_2 mezi polopropustnou destičkou P a testovacími tělesy T_1 a T_2 stejné, je složený signál měřený fotodetektorem silný. Změní-li se vlivem gravitační vlny rozdíl obou vzdáleností o polovinu vlnové délky světla, signál vymizí.

pracovaly v uplynulých desetiletích na dalším vylepšování rezonančních detektorů Weberova typu. Dnešní detektory (na Stanfordské universitě atd.) 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 [6], 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! 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 experimen-

tální fakt potvrzuje Einsteinovu obecnou teorii relativity, která předpovídá, že obě neutronové hvězdy k sobě "spirálovitě" přibližují, přičemž



Obr. 3 - 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_2 , resp. T_1 a T_2 . Teprve

poté se složí a dopadnou na fotodetektor. ztracená vazbová energie systému je odnášena vyzářovanými gravitačními vlnami. Dosavadní pozorování potvrzují soulad teoretické předpovědi zkracování oběžné doby o $0,0758 \text{ ms}$ za rok s měřenou hodnotou $(0,0760 \pm 0,0005) \text{ ms}$ 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 intenzívně 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*. Typický interferometrický detektor gravitačních vln se skládá ze dvou volně zavěšených

těžkých testovacích těles T_1 a T_2 (viz. obr. 2). 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 vracejí zpět k destičce P , zde se skládají (interferují) a výsledný signál je zaznamenáván fotodetektorem. Průchod gravitační vlny přilétávající z vesmíru ve směru kolmém na rovinu lasrových 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).

Změna délky drah interferujících paprsků i o pouhý zlomek vlnové délky světla se projeví změnou intenzity složeného signálu měřeno fotodetektorem, neboť obě vlny se setkají v různé fázi.

Laserové interferometrie použil v detektoru gravitačních vln poprvé Robert Forward počátkem 70.let. Citlivost jeho zařízení dosahovala hodnoty 10^{-15} . Během uplynulých dvaceti let vzniklo pak po celém světě několik týmů, v nichž spojili své síly teoretici i experimentální fyzikové a technici. 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} .

Vloni však 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 [7]. 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 ($10^{-21} \sim 10^{-10} \text{ m}/10^{11} \text{ m}$). 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 L_1 i L_2 má být 4 kilometry. Velké rozměry samozřejmě přinášejí i velké technické komplikace. Celá optická soustava bude umístěna ve dvou trubcích délky 4 km a průměru 1,2 m, v nichž bude udržováno velmi vysoké vakuum (vzhledem k objemu 9000 m³ půjde o největší vakuovou aparaturou na světě). Zařízení bude izolováno od rušivých vlivů, především vibrací, slapových sil, tepelného šumu zařízení, fluktuací tlaku v trubcích, kosmického záření, poruch magnetického pole atd.

V interferometru LIGO bude namísto dvou použito celkem čtyř volně zavěšených testovacích těles se zrcátka (viz obr. 3). Dvojice těles v každém z ramen (T_1 a T_2 , resp. T_1 a T_2) vytvoří tzv. Fabryho-Perotovu rezonanční dutinu. Laserový paprsek bude nucen se v těchto dutinách mezi tělesy mnohonásobně odrážet (více než tisíckrát), než dopadne na fotodetektor. To umožní efektivně prodloužit optickou délku zařízení, které bude o tři řády větší než jeho "fyzické rozměry", tj. $L_{\text{ef}} \sim 10^7 \text{ m}$.

Pokroku má být dosaženo i ve schopnosti zařízení zaznamenávat nepatrné vzájemné pohyby testovacích těles ΔL projevující se změnami interferenčních obrazců. V principu budou měřitelná posunutí řádově $\Delta L \sim 10^{-16} \text{ m}$! To umožní počítačová statistická analýza počtu fotonů dopadajících do fotodetektoru. Protože platí vztah $h \sim \Delta L/L_{\text{ef}}$, dostáváme pro citlivost detektoru LIGO již zmíněnou hodnotu

citlivosti 10^{-23} .

Projekt LIGO předpokládá, že od samého počátku budou v provozu dvě sesterská zařízení označovaná LIGO I a LIGO II 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. 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 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). Analýza signálů ze vzdálených, různě dlouhých interferometrů umožní eliminovat falešné signály.

Na obr.4 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. 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 detekovat gravitační vlny až ze vzdálenosti 30 Mpc, čemuž odpovídá amplituda $h \sim 10^{-21}$).

Nezbývá než doufat, že projekt LIGO bude zdárně dokončen. Technické a konstrukční problémy již byly vyřešeny a vše je nyní otázkou finanční. Celkové náklady se odhadují na více než 300 miliónů

dolarů. Vloni již začaly práce na obou staveništích a byly zadány kontrakty na konstrukci vakuového systému (který pohltí více než 90 % všech finančních prostředků). Doufejme, že finanční podpora ze strany amerického Kongresu bude trvat i nadále. 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.

Literatura

[1] J.Kleczek: Vesmír kolem nás (Albatros, Praha, 1986).

[2] L.Dvořák: skripta Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz světa (SPN, Praha, 1984).

[3] C.M.Will: Theory and Experiment in Gravitational Physics (Cambridge University Press, Cambridge, 1981).

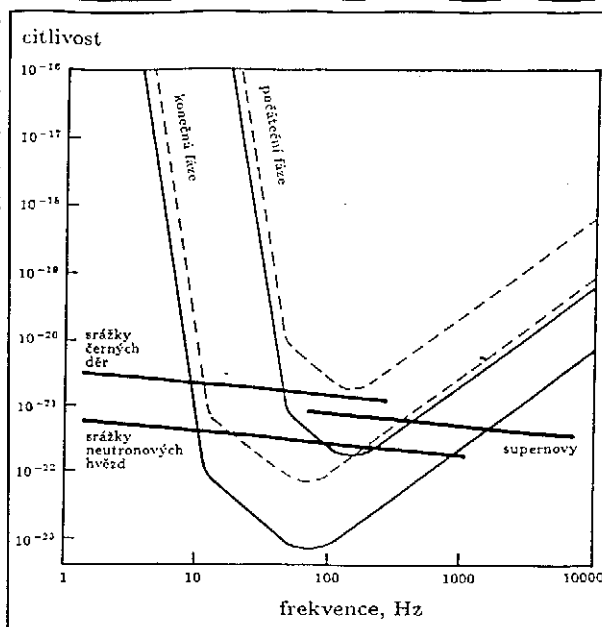
[4] J.Bičák: skripta Teorie relativity a gravitační vlny (Univerzita Karlova, Praha, 1986).

[5] J.Langer: Pozorování gravitačních vln, Čs.čas.fyz. A24 (1974) 501.

V.Marvanová: Detekce gravitačních vln, Pokroky mat. fyz. a astr. XXI (1976) 276.

[6] R.N.Manchester, J.H.Taylor: Pulsars (Freeman, San Francisco, 1977).

J.H.Taylor, J.M.Weisberg: Further



Obr. 4 - 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.

experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1916+16, Astrophysical Journal 345 (1989) 434.

[7] R.Ruthen: Catching the wave, Scientific American, March 1992, s.90

Kriteria identifikace impaktních struktur

David Rajmon, PŘF UK

Práce si klade za cíl podat ucelený pohled na problematiku identifikace impaktních struktur na Zemi, jakož i na mechanismy jejich vzniku. Stručně nastiňuje širší význam impaktních kráterů pro poznání historie Sluneční soustavy a souvislosti s vývojem života na Zemi.

Část této bakalářské práce najdete v Astropisu 2/95. David Rajmon, student 3. ročníku geologie překládal článek Staré zalednění na Marsu v Astropisu 1/94.

Mimo této práce najdete v příštím Astropisu i článek Barvy na Měsíci dr. Petra Jakeše, povídání o mlhovině Kočičí oko od Jakuba Halody a mnoho dalšího.