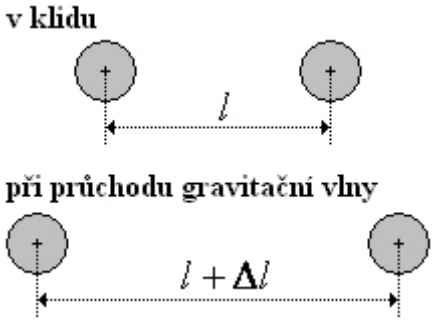
## Detekce gravitačních vln

Amplituda gravitační vlny je popsána bezrozměrným parametrem *h*, který je měřen pomocí relativního rozdílu vzdálenosti $\Delta l$ mezi dvěma tělesy. Je-li počáteční vzdálenost těles *l*, je amplituda gravitační vlny definována vztahem $h = \frac{\Delta l}{l}$ (viz obr. 106). Tato amplituda udává také relativní deformaci detektoru gravitačních vln.




Obr. 106

Vzhledem k malým amplitudám gravitačních vln, musí být detektory gravitačních vln velmi citlivé. Aby fyzikové dokázali odlišit naměřená data od nepřesností měření (šum pozadí, ...), musí detektor měřit s přesností $h = \frac{\Delta l}{l} \approx 10^{-21}$.

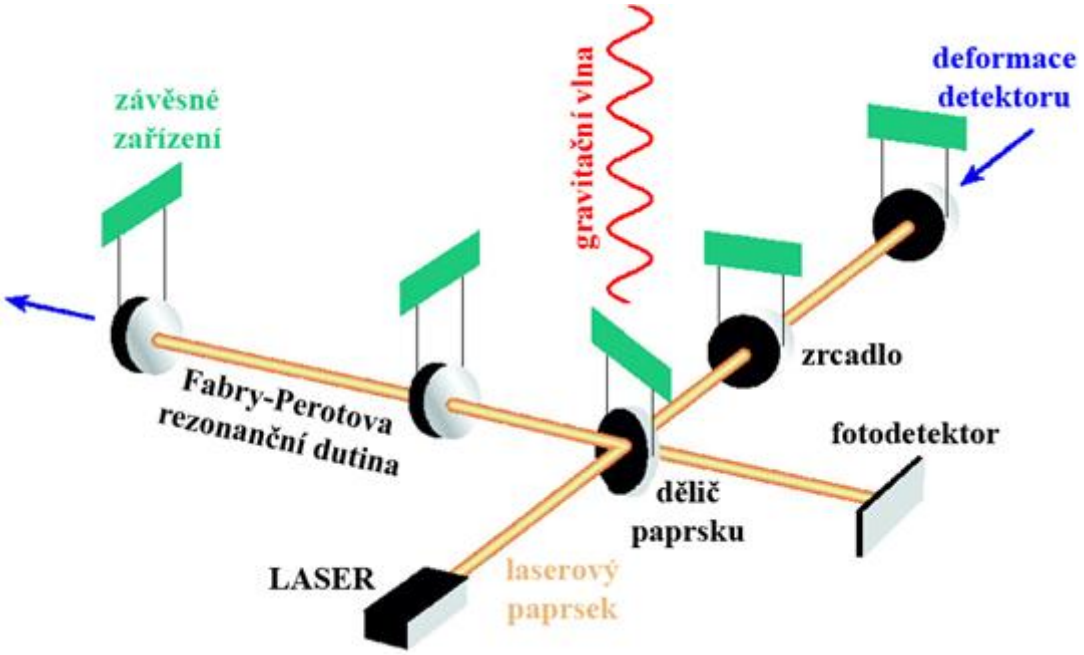
To znamená hypoteticky měřit vzdálenost Země - Slunce, která je rovna 1 AU (tj. přibližně $150.10^6\ \mathrm{km} = 150.10^9\ \mathrm{m} \approx 10^{11}\ \mathrm{m}$), s přesností na průměr atomu: $h = \frac{\Delta l}{l} = \frac{10^{-10}}{10^{11}} \approx 10^{-21}$.

Vzhledem k velmi malým délkám, které je potřeba měřit, je jedinou možností, jak tyto rozměry přesně měřit, interference světla. Pomocí Michelsonova interferometru, v němž je jako zdroj světla použit laser, lze požadované přesnosti dosáhnout. Celý experiment vyžaduje ovšem technicky a technologicky náročné vybavení.

Interferencí světla lze velmi přesně měřit délky, které jsou srovnatelné s vlnovou délkou použitého světla. Předmět, jehož rozměr měříme, vystupuje v experimentu jako překážka, na níž nastává ohyb světla. V tomto případě bychom ale potřebovali záření s vlnovou délkou řádově $10^{-20}\ \mathrm{m}$ (což je menší vlnová délka, než je vlnová délka γ záření). A to je tedy nerealizovatelné. Požadované přesnosti lze přesto docílit: pokud nemůžeme zmenšil vlnovou délku, můžeme zvětšit délku ramen interferometru.

V současné době pracuje nejnovější detektor gravitačních vln VIRGO v Itálii nedaleko od vesničky Cascina (10 kilometrů od Pisy), proto bude popsán právě tento detektor. Ostatní detektory jsou starší a používají sice principiálně stejné fyzikální zákony k detekci gravitačních vln, ale VIRGO používá nejmodernější technologie.

Ramena Michelsonova interferometru (viz obr. 107) musí mít délku alespoň několika stovek kilometrů, aby bylo možné naměřit gravitační vlnu s požadovanou přesností. Takový interferometr by byl velmi náročný na stavbu, na údržbu, těžko by se zajišťovalo jeho odrušení od okolního prostředí, ... Proto se používají Fabry-Perotovy rezonanční dutiny, které jsou tvořeny dvěma zrcadly, mezi nimiž se světelný paprsek mnohonásobně odráží. Použitím těchto dutin se efektivní dráha, kterou urazí laserový paprsek, prodlouží na 120 km, ačkoliv délka ramen Michelsonova interferometru je „jen“ 3 km. Všechny součásti interferometru jsou umístěny v trubicích o průměru 1,2 m, které byly sestaveny z dílů délky 20 m.




Obr. 107

Elektromagnetické záření o vlnové délce 1064 nm vychází z laseru pracujícím s výkonem 20 W, v děliči paprsku je rozděleno na dvě stejné části, které se pohybují dvěma na sebe kolmými rameny. Po odrazu od koncového zrcadla (a po průchodu Fabry-Perotovými dutinami) se oba paprsky opět spojí a dopadají do fotodetektoru. Je-li interferometr v klidu (tj. nepřichází žádná gravitační vlna), jsou délky ramen stejně dlouhé, rozdělené laserové paprsky urazí tedy stejnou dráhu a na fotodetektor dopadají ve fázi. Prochází-li interferometrem gravitační vlna, ramena se deformují a laserové paprsky dopadající na fotodetektor již nejsou ve fázi. Na základě interferenčního obrazce a parametrů detektoru lze určit vzájemný dráhový posun obou paprsků a na základě toho míru deformace ramen a také amplitudu gravitační vlny, která deformaci způsobila.

Detektor VIRGO je schopen detekovat gravitační vlny s frekvencí z intervalu (10; 10000) Hz. Aby se laserový paprsek nerozptyloval na molekulách vzduchu, je uvnitř trubic vysoké vakuum o tlaku $10^{-8}$ Pa.

Vibrace způsobené seismickými vlnami Země způsobují řádově miliardkrát větší vibrace než gravitační vlny. Proto je nutné zabezpečit zejména optické prvky před seismickými vibracemi, které by měření amplitudy gravitační vlny rušily. To se provádí pomocí tří symetricky zavěšených nosníků se seismickými filtry (viz obr. 108). Nosníky zabraňují pohybu ve svislém směru, zatímco složené kyvadlo omezuje pohyb ve vodorovném směru. Vše je řádně ukotveno a elektronicky monitorováno, přičemž samotné základy uvedeného systému zabraňují větším pohybům celé soustavy. Dalším stabilizátorem polohy je „loutkový závěs“, který je zavěšen na pevném drátu. Na tomto závěsu je zavěšen příslušný optický prvek a vyrovnávací závaží. Přesná poloha zrcadla je kontrolována pomocí sil, které vznikají mezi zrcadlem a vyrovnávacím závažím. Přesná poloha vyrovnávacího závaží je pak nastavována pomocí elektromagnetické pohonné jednotky nebo elektrostatické pohonné jednotky.

Tyto pohonné jednotky pracují na podobném principu jako elektromagnetické relé.

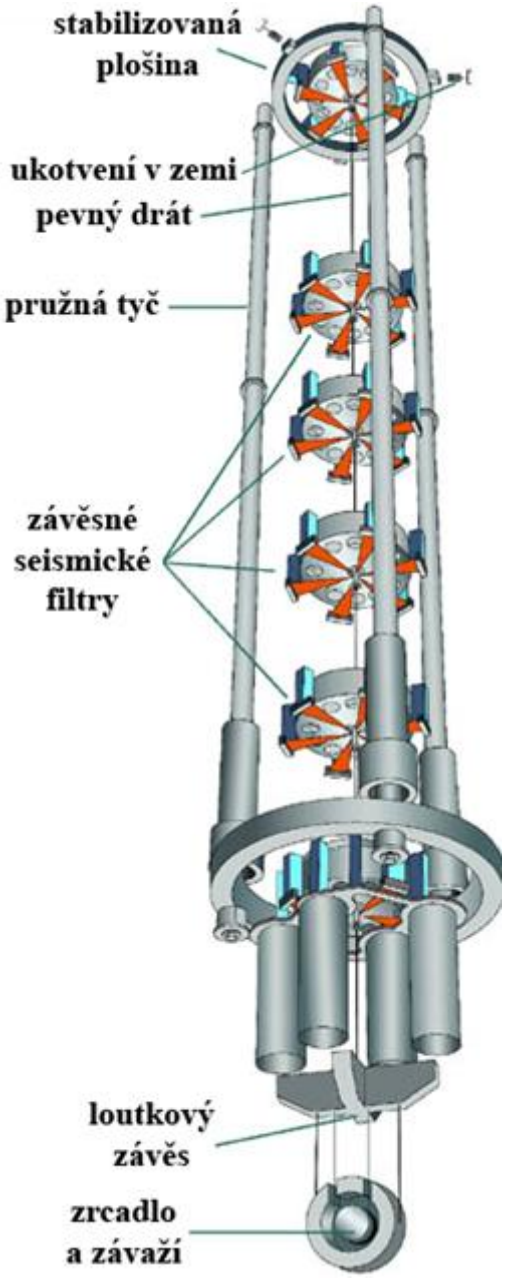
I přes tato technická řešení koná celá soustava kmitavý pohyb, tzv. tepelný pohyb, který je způsoben tepelnou energií a jejími fluktuacemi. Proto je nutné celou aparaturu ochladit na teplotu zhruba 20 K, aby se tyto nežádoucí kmity eliminovaly. Dále je nutné všechny mechanické části speciálními technologiemi vyčistit a zabavit všech nežádoucích částic na povrchu. Zvláštní pozornost se musí věnovat optickým členům - zrcadlům a děliči laserového svazku.

VIRGO je ve svém oboru ojedinělý experiment, který vyžaduje velké množství speciálně

vyvinutých a vyrobených zařízení (musí pracovat ve vysokém vakuu, musí pracovat při velmi nízkých teplotách, …). Vývoj takových zařízení je finančně nákladný, a proto se vyvinuté technologie poskytují dalším oborům vědy, které tak své výzkumy mohou zlevnit.

V tomto ohledu je VIRGO podobný CERNu, kde se nachází největší urychlovač částic na světě.

Na vývoji, stavbě i na experimentech, které se zde provádějí, spolupracují vědci z různých států světa. Spolupracují i různé podobně zaměřené laboratoře ve světě. Pokud se podaří naměřit průchod gravitační vlny v jednom experimentálním zařízení, velmi pravděpodobně tento průchod detektovala i další zařízení. Na základě dat, která se z experimentů v různých částech světa získají, lze snadněji lokalizovat směr, odkud gravitační vlna přišla. Tak se lze dozvědět o vesmíru více detailů a porovnat pozorování s teoretickými modely.




Obr. 108

V současné době na detekci gravitačních vln pracují tato experimentální zařízení:

1. MARK2 v Pasadeně v USA (od roku 1991 s délkou ramen 40 m);
2. TAMA 300 v Tokyu v Japonsku (od roku 1999 s délkou ramen 300 m);

3. GEO 600 v Hannoveru v Německu (od roku 2000 s délkou ramen 600 m);
4. LIGO v Hanfordu v USA (od roku 2002 s délkou ramen 4000 m);
5. VIRGO v Itálii nedaleko od vesničky Cascina, 10 kilometrů od Pisy (od roku 2003 s délkou ramen 3000 m);

Připravuje se experiment LISA na oběžné trajektorii kolem Slunce, který by měl být uveden do provozu v roce 2010.

---

**© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička**
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.