

Cavendishův experiment s torzními vahami

J. Klečka*, M. Špaček**

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

*kubaq@centrum.cz, **emcdva@seznam.cz

Abstrakt

Následující text seznamuje s metodou, kterou použil britský fyzik Henry Cavendish pro změření gravitační konstanty. Po letmém teoretickém úvodu budou zmíněni jeho předchůdci, popsána bude aparatura, se kterou jsme pracovali, naznačen princip a postup měření a pamatováno bude i na potíže, které nastaly, a možné důvody nepřesnosti vlastního měření. Nebudou chybět důsledky, které ze znalosti vlastní gravitační konstanty plynou.

1 Úvod

Gravitace je základní a také jediná univerzální interakce ve vesmíru. Jejím vlivu nejsou ušetřeny žádné známé částice – hadrony počínaje a neutriny či fotony konče. Podle teorie velkého sjednocení byla první silou, která se po Velkém třesku realizovala v samostatné podobě, odštěpila se od ostatních interakcí, které se diferencovaly až později. Nejen současná, ale i minulá a budoucí podoba vesmíru je ve velkých měřítkách výsledkem působení právě této síly, gravitace je zodpovědná za velikost, strukturu, pohyb a prostorové rozvržení všech velkých vesmírných objektů jako jsou planety, hvězdy i celé galaxie. Gravitace se uplatňuje právě až u takto velkých objektů. V menších měřítkách je její vliv zcela zanedbatelný. Například gravitační přitahování a elektrostatické odpuzování mezi dvěma protony se liší o celých 36 řádů. Nicméně podle současných znalostí má gravitace jednu výhodu – existuje jen jediný její „náboj“, proto se její účinky vždy sčítají a u velkých těles se projevuje víc než zřetelně. Prvním, kdo prokazatelně pozoroval vliv gravitace na planety, byl Tycho de Brahe, z jehož měření byl Johannes Kepler schopen sestavit první tři zákony nebeské mechaniky.

2 Cavendishovi předchůdci

Prvním obrovským průlomem ve studiu gravitace byla Newtonova formulace obecného gravitačního zákona. Již tímto okamžikem byl patrný problém, který se v té době zdál nerozlušitelný, a sice určení konstanty úměrnosti v Newtonově rovnici. Newton si byl vědom faktu, že konstanta bude velice malá a její určení nesnadné. Sám navrhnul a uskutečnil metodu, při které se pokusil určit hustotu Země z horninového složení její kůry. Jednalo se sice jen o velice hrubý odhad, nicméně technické možnosti té doby bližší určení konstanty neumožňovaly. Avšak tento odhad posloužil dalším generacím fyziků jako značná motivace v jejich badatelské práci.

Další možnou metodou, jak se hodnotě gravitační konstanty přiblížit, je tzv. metoda odklonu od svislice. Při ní se měří úhel vychýlení olovnice od svislého směru vlivem blízké hmoty. Pierre Bouguer se pokoušel o provedení této metody v roce 1738 na úbočí sopky Chimborasso v Jižní Americe, pánové Nevil Maskelyne a Charles Hutton totéž zkoušeli na

skotském hoře Schiehallion v roce 1774. V obou případech se ale nedařilo určit hmotnost a rozměry hor s uspokojivou přesností.

Jako nadějná se jevila metoda kyvadla umístěného hluboko v dolech, kterou se zabýval George Biddell Airy či pánové Haughton a Sterneck.

Zmíníme ještě jednu velice pokročilou metodu, která sice přišla až po Cavendishově, ale je jí dosti podobná – jsou to tzv. Jollyho váhy nesoucí jméno po Phillipu Johannu Gustavu von Jollyovi. Principem bylo sledovat, jakým způsobem se dostává dvojice závaží s tekutou rtuťí po 5 kilogramech na miskových vahách z rovnováhy vlivem blízké olovené koule o hmotnosti 5775 kilogramů. Metodu zdokonalil John Henry Pointing.

3 Cavendishova aparatura

Britský fyzik Henry Cavendish se narodil 10. října 1731 a zemřel 24. února 1810. Učil se na univerzitě v Cambridge, kde ale studia nedokončil. Důvodem mohla být jeho až chorobná plachost a roztržitost, kterých se po celý život nedokázal zbavit a proto také většinu svého času trávil o samotě a v ústraní. Obzvláště z žen měl neobvyklý strach. Dnes se soudí, že příčinou mohl být Aspergerův syndrom vyznačující se podobnými průvodními jevy. Ve svém domě si nechal zbudovat speciální schodiště a se svým služebnictvem komunikoval výhradně přes vzkazy na listech papíru. Na druhou stranu, byl to vynikající fyzik, který se možná ve svých výzkumech dostal dál, než se kdo mohl domnívat. Kvůli své stydlivosti totiž prakticky vůbec nepublikoval a velká část jeho spisů vyšla až přičiněním Jamese Clerka Maxwella.

Vedle měření gravitačního zrychlení, o kterém tento text pojednává, se zabýval i řadou jiných fyzikálních jevů. Mimo jiné, dokázal ze vzduchu izolovat vodík, přesně stanovil složení atmosféry, určil měrná tepla řady látek či předpověděl mnoho elektrických a magnetických jevů před Faradayem a Coulombem.

Aparaturu, se kterou Cavendish pracoval, navrhl a postavil John Michell, který ji ale již nestačil použít. Ke Cavendishovi se dostala přes Francise Johna Hyda Hollistera. Pokus byl uskutečněn v roce 1797 a jednalo se o první významné a přesvědčivé potvrzení Newtonovy teorie obecné gravitace.

Základní částí Cavendishovy aparatury byla 6 metrů dlouhá dřevěná tyč, na jejíchž koncích se nacházely velké kovové koule. Tyč byla umístěna vodorovně a uprostřed byla zavěšena na tenkém vlákně. K ní byly přiloženy další dvě 159 kilogramů těžké kovové koule, které měly na ty na tyči působit gravitační silou a tím je drobně rozpohybovat. Tak se skutečně stalo a Cavendishovým úkolem bylo zjistit, okolo které rovnovážné polohy soustava kmitá. Důležitým faktem pro odvození vztahu bylo, že silový moment potřebný ke stočení vlákna o určitý úhel byl přímo úměrný čtvrté mocnině poloměru vlákna. Přestože amplituda kmitů byla velice malá, bylo možno ji určit – Cavendish totiž na vlákenko umístil zrcátko, na které svítil. Pohyb světelné stopy na zdi pak byl jasně patrný a s jeho pomocí šlo amplitudu snadno určit. Cavendish si byl vědom náchylnosti aparatury na otřesy, změny teploty, průvan a další vnější vlivy, proto ji umístil do neprodyšné zatemněné místnosti a její průběh pozoroval teleskopem ve zdi. Perličkou je, že se Cavendish vlastně nesnažil zjistit velikost gravitační konstanty, nýbrž zjišťoval poměr mezi hustotou vody a Země. Velikost gravitační konstanty z něj ale přímo plyne.

My jsme měli k dispozici aparaturu firmy PASCO. Její základní částí byla kostra zařízení pevně fixovaná na stojanu. Neprodyšně uvnitř byla horizontálně umístěna tyčinka se

dvěma kovovými kuličkami, která byla uprostřed zavěšena na tenkém torzním vlákně z berylia. Na otočném stojánku vedle byla umístěna dvojice větších a těžších koulí tak, že v jedné pozici měly menší kuličky tendenci se k větším přibližovat ve směru a v druhém případě proti směru hodinových ručiček (bráno z pohledu shora). Na torzním vlákně se nacházelo malé zrcátko, na něž jsme museli nasměrovat laserový paprsek. Stopu laseru jsme pak odečítali na měřítku umístěném na protější stěně.

Principem metody je stanovit míru gravitační interakce mezi dvojicí malých a velkých kovových koulí. Přiložením větších koulí do jedné polohy se tyčka s menšími koulemi uvedla do tlumeného kmitavého pohybu, který způsoboval kroucení torzního vlákna, na kterém byla tyčka zavěšena. Laserem osvětlené zrcátko umístěné na kroučícím se vlákně odráželo paprsek na protější zeď, kde bylo možné dosti spolehlivě odečítat průběh harmonického pohybu. Ve vhodný okamžik se potom dvojice větších koulí posunula do opačné pozice, což mělo za následek posunutí střední polohy, okolo které soustava kmitala. Z tohoto posunutí potom bylo možné určit míru gravitačního přitahování mezi dvojicí menších a větších koulí.

Největší potíží tohoto experimentu je fakt, že gravitační interakce je mezi laboratorními objekty extrémně malá a pohyby jimi způsobené takřka nezaznamatelné. Navíc je vše přebíjeno nesrovnatelně silnějším polem naší planety. Rafinovanost této metody (a také její technická vytríbenost) však dovoluje, aby se takovéto neznatelné síly určily z analýzy tlumených harmonických pohybů.

4 Naše měření

Nultým krokem samozřejmě bylo pečlivé nastudování všech možných materiálů a vzájemná konzultace experimentátorů o přípravě před příchodem do laboratoře. Hlavním zdrojem informací nám byl manuál k aparatuře firmy PASCO.

První, co bylo potřeba učinit, bylo zkontrolovat, zda se aparatura nachází ve stavu, jaký vyžadoval návod. Poté bylo třeba nastavit laser na zrcátko tak, aby jeho odraz mířil do středu měřítka na protější zdi. Na laser a na samotné zařízení během experimentu nebylo možné nijak sáhnout. Po tomto bylo třeba aparaturu odaretovat a nechat uklidnit. Po nějaké době již bylo možné ve vhodný okamžik umístit větší koule do první polohy, čímž se soustava dostala do harmonického tlumeného pohybu. Polohu paprsku bylo třeba na měřítku odečítat každých 20 sekund po dobu asi 40 minut, abychom měli dostatečné množství dat ke zpracování. Pak se opět ve vhodném okamžiku umístily koule do druhé polohy a proces odečítání hodnot z měřítka se opakoval. Získáním druhé sady dat byla již laboratorní část experimentu prakticky hotova.

Získali jsme z každé polohy 4 periody, každá byla přes osm minut dlouhá. Bylo možné sestavit graf závislosti polohy paprsku na čase, což odpovídalo časovému průběhu míry zakroucení torzního vlákna. Metoda měření byla prakticky totožná s Cavendishovou, jen technicky vylepšená o vlákno z berylia a laser.

5 Problémy a důvody nepřesností

Během měření se vyskytla řada komplikací. První byl už fakt, že se experiment zdařil až napotřetí. Navíc pracně nasbíraná data z první a druhé návštěvy laboratoře byla

samozřejmě nepoužitelná. Jediné měření je už samo o sobě dost náročné časově i psychicky. Kritickým bodem bylo posunutí dvojice větších koulí z první polohy do druhé – špatný odhad správného okamžiku by mohl celé měření pohřbit. A také paprsek se někdy dostal zcela mimo měřítko, což měření také značně komplikovalo.

Důvodů nepřesností byla opět celá řada, za nejzásadnější však považujeme ne zcela spolehlivě změřenou vzdálenost mezi zrcátkem na torzním vlákne a měřítkem na protější stěně, na jejíž hodnotě výsledek experimentu silně závisí. Za podstatnou rovněž považujeme i naši experimentátorskou nezkušenost, únavu během měření, nepřesnosti v odečítání polohy paprsku a průjezdy tramvají, při nichž se paprsek viditelně vertikálně rozkmital.

6 Naměřená hodnota

Námi naměřená hodnota činí $6,068 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^2\text{kg}^{-1}$. Můžeme porovnat s hodnotou v současnosti považovanou za nejpřesnější, udávanou jako $6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^2\text{kg}^{-1}$.

7 Shrnutí

Námi naměřená hodnota zcela neodpovídá konstantě uváděné v tabulkách, ale jako odhad nám může sloužit celkem dobře a navíc jsme se přesvědčili, že takto komplikované měření lze uskutečnit. Její znalost má víc než zásadní dopad na naši znalost vesmíru. Můžeme určit hmotnost a hustotu Země, ale i všech dalších těles ve Sluneční soustavě a modelovat pohyby všech objektů v ní. Přináší to možnost řešit pohyby umělých těles ve vesmíru a studovat objekty jako neutronové hvězdy, černé díry či dokonce celé galaxie. Jedná se o neocenitelnou zbraň i pro studium světla. A díky obecné teorii relativity můžeme modelovat a studovat vesmír jako jeden celek, včetně jeho zrodu až po odhad jeho budoucnosti přes všechny prostor a čas a všechno, co se v něm nachází. A to všechno jen díky provedení experimentu kdesi v laboratoři podle postupu prvně uskutečněném Henry Cavendishem.

Poděkování

Naše velké díky patří pánům asistentům V. Svobodovi a L. Škodovi za seznámení se zařízením a umožnění s ním pracovat a studentu D. Koňářikovi za odbornou pomoc.

Reference

- [1] V. Kaizr, Měření univerzální gravitační konstanty, http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_s2.html, 10. 5. 2007
- [2] Kol. autorů, Henry Cavendish – Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Cavendish, 10. 5. 2007
- [3] Kol. autorů, Cavendish experiment – Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Cavendish_experiment, 10. 5. 2007
- [4] Kol. autorů, Manuál k aparatuře od firmy PASCO, <http://rumcajs.fjfi.cvut.cz/fyzport/FundKonst/Cavendish/CavendishEn.pdf>, 26. 3. 2007