

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Věra Marvanová

Detekce gravitačních vln

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 21 (1976), No. 5, 276--290

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139328>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1976

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Záver

Zo všetkého uvedeného vyplýva, že perspektívne prichádza do úvahy v rámci jednej vysokej školy jedine koncepcne a jednotne premyslené budovanie uceleného systému výpočtovej techniky v návaznosti na systém celého rezortu ministerstva školstva s perspektívnym napojením na celonárodný systém, čo je veľmi dôležité z hľadiska informačných služieb, príp. v ďalšej budúcnosti na medzinárodný systém v rámci krajín RVHP. Keďže vývoj v tejto oblasti je mimoriadne rýchly, uvedený problém je už v súčasnosti aktuálny. Podľa niektorých odhadov vznikne takýto medzinárodný informačný systém v priebehu najbližších 10–15 rokov.

Akademik GLUŠKOV vidí vo vytvorení takýchto systémov predpoklady pre uskutočnenie opravdovej revolúcie v pedagogike, keďže to umožní organizovať proces výuky ako individuálnu prácu súčasne pre desiatky miliónov študujúcich. Pritom takýto pedagogický proces sa môže uskutočniť v škole aj v domácich podmienkach.

Detekce gravitačních vln

Věra Marvanová

Úvod

Teoretické úvahy obecné teorie relativity brzy po jejím vzniku vedly na myšlenku, že by měly existovat gravitační vlny. První odhady ukázaly, že vliv těchto gravitačních vln je velice malý, o mnoho řádů menší než možná citlivost existujících přístrojů. Tento fakt zchladil horlivost experimentátorů na dobu téměř padesáti let. Teprve v šedesátých letech tohoto století se našli fyzici, kteří měli dostatečnou odvahu zabývat se tak „bez nadějným“ problémem, jako je detekce gravitačních vln. Úporné úsilí, které bylo tomuto problému věnováno, vedlo především k téměř fantastickému zvýšení citlivosti měřicích zařízení, a jestliže si dnes nemůžeme být ještě jednoznačně jisti, že gravitační vlny byly pozorovány, rozvoj experimentální techniky slibuje netušené možnosti v blízké budoucnosti.

Článek se snaží podat ucelený přehled experimentů týkajících se detekce gravitačních vln.

1. Vlastnosti gravitačních vln

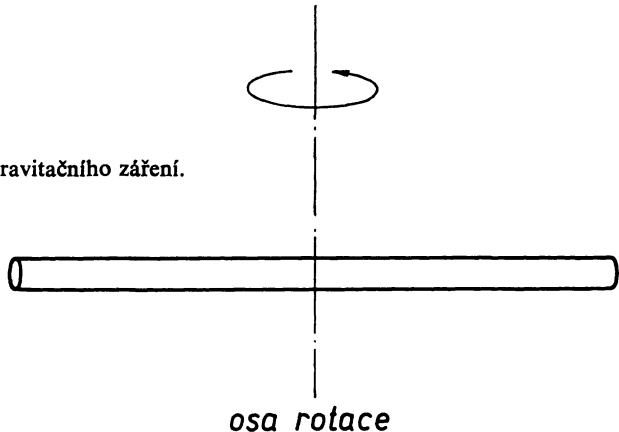
Matematická stránka obecné teorie relativity je značně složitá. Obecná řešení rovnic gravitačního pole nejsou dosud známa, jde totiž o systém nelineárních diferenciálních rovnic. Omezíme-li se na slabá gravitační pole (jaká se vyskytují např. na Zemi nebo ve

vesmíru v oblastech vzdálenějších od velkých hmot), lze rovnice linearizovat a v tomto případě se dá nalézt řešení popisující gravitační vlny. Gravitační záření se svým charakterem liší od záření elektromagnetického. V elektrodynamice září systém, který má proměnný dipólový moment. Monopólové záření neexistuje v důsledku zachování náboje. V gravitační teorii však neexistuje ani dipólové záření (důsledek zákona zachování hybnosti). Gravitačně zářit může jen systém s proměnným kvadrupólovým momentem (to je výraz, který – zhruba řečeno – charakterizuje odchylky zdroje od sférické symetrie). Možným zdrojem gravitačního záření může být tedy třeba tyč rotující kolem osy, mechanicky kmitající hmota, dvojhvězda, nesféricky vybuchující supernova či kolabující hvězda apod.

A. EINSTEIN [1] studoval úlohu o tyči rotující v prostoru a ukázal, že intenzita gravitačního záření je

$$P = \frac{32GI^2\omega^2}{5c^2},$$

kde I je setrvačný moment tyče k její ose, G gravitační konstanta, c rychlost světla, ω je úhlová rychlost. Číselný odhad [2], [3] nám řekne, že necháme-li rotovat tyč o hmotnosti $m = 10^4$ g tak, aby napětí působené odstředivou silou bylo blízké pevnosti oceli nejlepších druhů, pak největší tok gravitačního záření, který by mohl být získán



Obr. 1. Otáčející se tyč jako zdroj gravitačního záření.

při optimálním tvaru tyče, je 10^{-30} erg/s. Kdyby byl pohyb tyče brzděn jen gravitačním zářením, zastavila by se za 10^{35} let.

Gravitační záření může vznikat i při mechanických kmitěch pevných těles, ale i zde jsou možnosti detekce gravitačních vln z pozemských zdrojů pramálo nadějně. Kdybychom optimálním způsobem vybudili mechanické kmity v tyči, získáme podle J. WEBERA [4] tok intenzity 10^{-13} erg/s, ale spotřebujeme na vybudění kmitů 10^8 W.

Gravitační vlny vznikají také např. při explozích. Při výbuchu atomové bomby o 17 kT vznikne tok záření 10^{-4} erg/s a potrvá po dobu 10^{-8} s. Celá sluneční soustava při svých pohybech vyzařuje v gravitačních vlnách do prostoru jen několik set wattů.

intenzitách je asi 10 řádů v neoptimálnějším případě. Proto je třeba snažit se o zachycení gravitačního záření přicházejícího z kosmických zdrojů.

V červnu 1969 Weber oznámil [8], že se pomocí jeho přístrojů podařilo detekovat gravitační vlny o kilohertzové frekvenci přicházející z vesmíru. Detektory jsou hliníkové válce (největší z nich má hmotnost tři a půl tuny), zavěšené ocelovými dráty na blocích akustických filtrů tlumících otřesy. Osa symetrie míří ve směru východ – západ. Dopadající gravitační vlna vyvolá v tělese deformaci, tím se změní napětí uvnitř detektoru a tyto změny napětí v materiálu jsou převáděny na elektrické signály piezoelektrickými krystaly, které jsou upevněny prstencovitě kolem válce. U jednoho z detektorů je elektrická část přístroje chlazena na nízkou teplotu, aby byl maximálně snížen šum přístroje. Místnost s detektory je elektricky odrušena a otřesy půdy se zjišťují soustavou seismografů. Aby bylo možno určit, zda signály nepocházejí z nějakých místních zdrojů, pracují detektory metodou koincidencí. Pro další zpracování se užívají jen ty signály, které se objevily současně na obou stanicích. Protože základní pracoviště je na univerzitě v Marylandu na západním pobřeží USA a další stanice je v argonnské národní laboratoři u Chicaga, tedy zhruba ve vzdálenosti 1000 km, nelze uvěřit, že by se nějaké lokální poruchy objevily současně na obou stanicích. Obě pracoviště jsou propojena přímou telefonní linkou pro přenos dat, takže záznamy z detektorů v Marylandu i v Argonnu jsou zapisovány v centrální laboratoři. Výstup argonnského detektoru je kromě toho zapisován na místě, aby srovnáním se mohly vyloučit případné poruchy v záznamu vzniklé na lince. Hranice citlivosti aparatury je určena amplitudou tepelných kmitů detektoru, která je za daných podmínek řádově 10^{-14} cm. Rozměry detektorů byly vybrány tak, aby vyhovovaly detekci signálů, jež by mohly vznikat při výbuchu supernov, antény jsou úzkopásmové a pracují na 1660 Hz. Signály, které převyšovaly danou prahovou hodnotu, byly považovány za koincidující, když byly zachyceny alespoň na dvou přístrojích v daném časovém intervalu (zde 0,44 s).

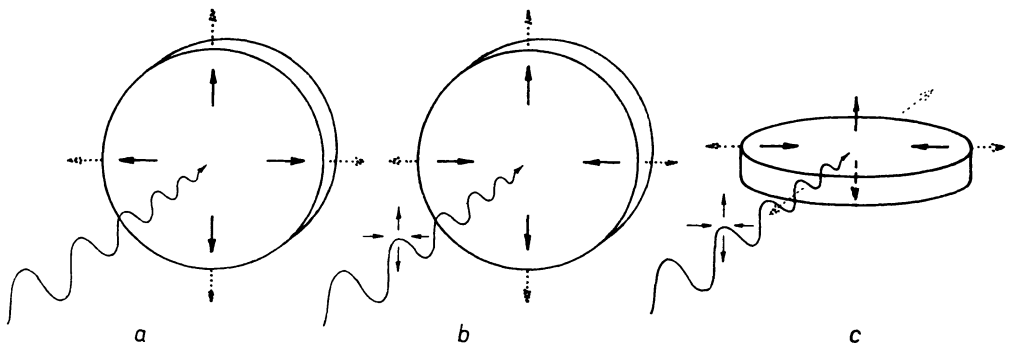
Popsanou aparaturou byly v roce 1969 zachyceny impulsy, ze kterých bylo možno usoudit, že pokud jsou působeny gravitačním zářením nějakého kosmického zdroje, střední hustota gravitačního záření je nejméně 10^{-32} g cm⁻³ v šířce pásma $\Delta\omega \sim 0,1$ rad/s [9].

O rok později měl Weber už nashromážděno tolik materiálu, že mohl studovat hodinovou četnost impulsů, a tak hledat směr, odkud gravitační vlny přicházejí. Prokázal, že hodinová četnost impulsů zjištěná z celé doby pozorování neukazuje žádnou periodicitu, jestliže sledujeme rozdělení impulsů vzhledem k hodinám světového času, tj. středního slunečního času. Situace se ovšem rázem změní, provedeme-li totéž rozdělení pro hvězdný čas. Pro určitou hodinu se objeví výrazné maximum četnosti, což napovídá, že impulsy souvisejí s nějakým vesmírným objektem. Signály by měly přicházet ze směru, ve kterém leží střed Galaxie. Protože maximum signálů se opakovalo po 12 hodinách hvězdného času, Weber předpokládal, že systém antén zřejmě reaguje jak na gravitační vlny přecházející z přímého směru ke středu Galaxie, tak i na ty, které prošly naší Zemí (prakticky bez zeslabení). Předpokládáme-li však, že gravitační záření přichází z centra naší Galaxie, tj. ze vzdálenosti 8000 pc, pak dospíváme k překvapivě velkým odhadům o velikosti hmoty, která se musí ve středu Galaxie přeměnit na gravitační záření. Kdyby byly gravitační vlny vyzařovány ze středu Galaxie izotropně, v každém pulsu by se mu-

selo přeměnit na gravitační záření asi 0,2 hmoty Slunce, a tedy každoročně by se muselo v gravitační záření přeměnit řádově 10^3 hmot Slunce. Těžko si dovedeme představit tak aktivní procesy v jádru naší Galaxie a srovnat to s faktem, že Galaxie je stabilní po dobu aspoň několika miliard let. Anizotropnost záření by ovšem odhad značně snížila. Gravitační vlny ovšem mohou přicházet též ze zdroje, který by byl mnohem blíže, než je střed Galaxie a který pouze náhodně leží v témže směru (antény mají malou směrovací schopnost a mohou zatím určit pouze jednu souřadnici zdroje – rektascenci – nikoli však deklinaci). Existuje též možnost, že střed Galaxie působí jako gravitační čočka a soustřeďuje gravitační záření z vesmíru. Poněvadž gravitační vlny jsou jen velmi málo hmotou zachycovány, uvažuje Weber, že by byla možnost tímto způsobem „pozorovat“ záření vzniklé během počátečních stadií vesmíru [10]. Popis zpracování zachycených signálů a užitou výpočetní techniku uvádí Weber v [11].

Gravitační vlny mohou mít čistě tenzorový charakter (v tom případě plně vyhovují Einsteinově teorii relativity) nebo mohou být skalárně tenzorové a vyhovují té variantě teorie relativity, kterou vyslovil P. JORDAN [12], [13] a podrobně propracovali C. BRANS a R. H. DICKE [14], [15]. Válcové detektory, které byly použity v předchozích pokusech, reagují na dopad gravitační vlny tak, že není možno určit, zda jejich reakce byla způsobena vlnami tenzorového nebo skalárně tenzorového charakteru. Proto byl vyvinut další detektor diskovitého tvaru [16]. Uvažujme vliv tenzorové vlny kvadrupólového charakteru na částice tohoto detektoru. Dopadá-li tenzorová vlna na detektor ve směru jeho osy symetrie (viz obr. 3), nemohou se vybudit radiální oscilace. Jestliže dopadá taková vlna na disk ze strany, může v tělese diskovitého detektoru radiální kmity vybudit, protože jeden pár sil působí v rovině disku a druhý v rovině k ní kolmé.

Má-li však dopadající gravitační vlna také skalární složku (podle Bransova-Dickeova předpokladu), vybudí se radiální kmity, když vlna dopadne ve směru osy symetrie disku. Je tedy možno oba případy od sebe odlišit. Jestliže nyní vhodně orientovaný disk je unášen rotující Zemí, mění se jeho poloha vůči předpokládanému zdroji gravitačních vln a z četnosti zjištěných signálů a jejich rozložení v čase lze usoudit na charakter záření způsobujícího reakci detektorů. Weber uvádí, že šestiměsíční pozorování prováděná v r. 1970 neprokazují žádný výskyt skalární složky.



Obr. 3. Reakce antény ve tvaru disku na dopad gravitační vlny.

a) dopad skalární vlny; b) dopad tenzorové vlny ve směru osy; c) dopad tenzorové vlny ze strany.

2.2. Studium negravitačních vlivů. Během experimentů byl soustavně sledován vliv seismicity na detekci gravitačních vln, ale žádná korelace mezi seismickými údaji a záznamy z detektorů nebyla zjištěna. Stejně tak nebyla nalezena korelace s elektromagnetickými vlivy. Místnosti s detektory byly kromě toho elektromagneticky odstíněny [8], [9]. Podobně se zkoumala možnost, že detektory reagují na spršky kosmického záření [17]. Ukázalo se, že pokud hustota kosmického záření nepřevyšuje 100 částic na čtvereční metr, neovlivňuje to nijak detektory gravitačních vln. Experimentálně byl též prověřován vliv proměnného magnetického pole [18]. Detektory byly umístovány v proměnném magnetickém poli elektromagnetické cívky. Pole nijak neovlivňovalo detekci, i když amplituda byla stokrát větší než možné změny zemského magnetismu.

V experimentech prováděných v poslední době detekují v Marylandu až 7 koincidencí za den [19]. Weber se spolupracovníky diskutuje kalibraci posunu válce elektrostatickou silou, kterou působí nabitá deska umístěná v blízkosti jednoho konce válce. Propočítávají citlivost detektorů a uvažují o důvodech občasných nezachycení koincidencí na detektorech. Nezjištění signálů je vždy důsledkem zvýšení přístrojového šumu. Weber uvažuje také o dalších variantách detektorů. Například v elektromagnetickém detektoru by v supravodivém materiálu zchlazeném na velmi nízkou teplotu byla cylindrická dutina. Ta je rezonátorem. Proměnné gravitační pole vytváří v systému tenzorové pole napětí, které vzbuzuje v rezonátoru tvořeném cylindrickou dutinou elektromagnetické kmity. Ty jsou registrovány. Tento návrh a několik dalších je patentováno [20], [21], [22], [23], [24], [25].

2.3. Gravitační detektory na dalších pracovištích. Pokusy zachytit gravitační vlny s přístroji podobnými Weberovým se konají v mnoha dalších laboratořích.

Práce na italské stanici detekce gravitačních vln ESRO ve Frascati [26] směřovaly ke zlepšení aparatury a k odstranění některých rušivých vlivů. Výzkumníci zvětšují plochu piezoelektrických snímačů a zlepšují jejich kontakt s tělesem detektoru.

Záporné výsledky zjistil Tyson [27]. Jeho detektor pracoval na frekvenci 710 Hz, tedy nižší než Weberův. Válec váží 3600 kg a je téměř 4 m dlouhý. Tyson odhaduje, že měl asi 80krát větší citlivost než Weberovy přístroje. Detektor však nepracoval metodou koincidencí. Za čtyři měsíce trvání pokusu gravitační záření nebylo vůbec detekováno.

Podobně nebyly zjištěny impulsy gravitačních vln na moskevských detektorech [28], které pracují metodou koincidencí a jsou od sebe vzdáleny 20 km. Systém detektorů se liší od Weberova především technikou určení změn napětí v materiálu přístroje. Místo piezoelektrických snímačů se používal kapacitní snímač, což vedlo i ke změnám v geometrii antény. Předpokládaná citlivost byla blízká Weberově. Podle výsledků měření lze odhadnout horní hranici impulsního gravitačního záření z vesmíru. Tok energie v impulsu ~ 2 s nepřevyšuje hodnotu $I \leq 3 \cdot 10^6 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Braginskij a spolupracovníci konstruují novou variantu gravitačního detektoru, kde chtějí podstatně zvýšit citlivost systému. Jestliže jediným zdrojem šumu jsou tepelné kmity tělesa detektoru, pak nejmenší hustota toku I_{\min} , která může být zachycena, je

$$I_{\min} \approx c^3 \kappa T / 2\pi G m \omega_0 Q l^2 \tau ,$$

kde κ je Boltzmannova konstanta, T abs. teplota, c rychlost světla, G gravitační kon-

stanta, l délka detektoru, τ délka působení gravitačního záření s frekvencí $\omega_{gr} \sim \sim \omega_0$, $Q = \omega_0 \tau^*/2$ faktor jakosti rezonance, ω_0 vlastní frekvence, τ^* je relaxační doba. Je tedy patrné, že citlivost detektoru můžeme zvýšit mimo jiné také tím, jestliže se nám podaří sestrojít jej z materiálu o vyšším Q .

Na moskevském pracovišti má být detektor vyroben z monokrystalu safíru, pro nějž je Q za pokojové teploty $4 \cdot 10^7$ a pro teplotu 7 K dokonce $6,9 \cdot 10^8$. (Detektor vyrobený z hliníku má $Q = 1,8 \cdot 10^5$.) Díky těmto hodnotám pro krystal safíru bude možno zachycovat gravitační vlny i s válcem o malých rozměrech. Experimentátoři doufají, že je možné zvýšit citlivost natolik, aby se daly zjistit gravitační vlny přicházející od dvojhvězd a pulsarů, tedy od zdrojů, jejichž existence je nesporná.

Celkově jsou technické problémy týkající se detekce gravitačních vln detektory Weberova typu značné a souhrn výsledků z poslední doby ukazuje, že prozatím žádná skupina experimentátorů, s výjimkou skupiny Weberovy, nezískala kladné výsledky. Velice jasně to bylo prokázáno na 7. mezinárodní konferenci o gravitaci a obecné teorii relativity v Tel Avivu, kde problém detekce gravitačních vln byl probírán velmi podrobně [29]. Celkovou náladu účastníků snad nejlépe vyjádřil R. DREWER, když ji označil za „zesmutnění“. Ani jeho skupina pracující v Glasgově se širokopásmovým detektorem [30], ani skupiny další (Tysonova v Bellových laboratořích [31] a Kafkova v souběžném pokusu v Mnichově a ve Frascati) nezachytily žádné signály, které by mohly být působeny dopadem gravitačních vln. I z přehledných článků, které se zabývají zjišťováním gravitačních vln [32], [33] vane podobný duch skepse.

Skupina pracující v Marylandu neztrácí však svůj optimismus; na konferenci v Texasu [34] podávají její pracovníci přehled dlouholeté práce na poli detekce gravitačních vln a celkový přehled dosažených výsledků.

Na Varšavském sympoziu o gravitačním záření a o gravitačním kolapsu referoval Weber [35] o strojně početním zpracování údajů o detekci gravitačních vln získaných jeho detektory a detektorem univerzity v Rochesteru. Z teorie plyne, že za týden by mělo být náhodných koincencí 338. Ze záznamů na obou stanicích od 23. do 29. srpna 1973 však byla zjištěna 391 koincidence, tedy o 53 více.

Velmi hodnotný soubor dosavadních znalostí o zdrojích gravitačního záření a podrobný rozbor možných detektorů je [6]. Přehledu problematiky probírané na Koperníkovském mimořádném zasedání IAU ve Varšavě, Toruni a Krakově (jehož částí bylo i symposium o gravitačních vlnách a gravitačním kolapsu) jsou věnovány některé články v Československém časopisu pro fyziku 24, 5 (1974). Upozorňuji hlavně na článek J. LANGERA: *Pozorování gravitačních vln*.

3. Země nebo Měsíc jako detektory

3.1. Detekce klasickými seismografy. Snaha o detekci gravitačních vln se rozvíjí i v jiném směru než v budování gravitačních antén Weberova typu. Detektorem může být každé těleso, v němž mohou vznikat kvadrupólové vlastní kmity, tedy jím může být i Země, případně Měsíc. Problémem ovšem je, jak kmity takového detektoru registrovat.

Už v r. 1961 se FORWARD, ZIPOY, WEBER, SMITH a BENIOFF [36] snažili odhadnout horní hranici efektu dopadu gravitačního záření na Zemi. Ze záznamů přesných seismografů v seismicky klidném období, v době, kdy nebylo pozorovatelné žádné zvýšení signálu na frekvencích odpovídajících vlastním kmitům Země, odvodili horní hranici efektů gravitačního záření v nízkofrekvenčním pásmu (1 Hz).

V roce 1968 [37] obrátil Weber pozornost na možnost detekce gravitačních vln přicházejících od pulsarů. Vzhledem k tomu, že pulsary nejsou osově symetrické, vzniká při jejich rotaci proměnný kvadrupólový moment a měly by gravitačně zářit. Na rozdíl od jevů explozivního charakteru by nevysílaly pulsy záření, ale monochromatické periodické gravitační vlny. Vlny by měly frekvenci v oblasti kolem 1 Hz. Weberovy propočty však naznačovaly, že dopadající intenzita je velmi nízká a že hledání podobných efektů je jen nepatrně nadějně. F. J. DYSON [38] provedl výpočty znovu za použití lineární aproximace rovnic obecné teorie relativity nejdříve pro pevnou rovinnou Zemi, pak pro Zemi sférickou a rotující a zjistil, že pro otáčející se Zemi by seismická reakce Země na dopadající gravitační vlnu byla rozložena do 5 frekvencí, ω , $\omega \pm \Omega$, $\omega \pm 2\Omega$, kde ω je frekvence dopadající gravitační vlny, Ω je frekvence zemské rotace. Jev by se projevil nejvíce na povrchu Země. Pokud by zdroj gravitačních vln vyzařoval v gravitačních vlnách tolik energie, kolik vyzařuje elektromagnetické energie hvězda o absolutní bolometrické magnitudě 0 ve vzdálenosti 10 pc (hvězda 100krát jasnější než Slunce), pak by tok energie byl $2 \cdot 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$; z toho plyne odhad amplitudy posunutí zemského povrchu způsobeného gravitačními vlnami dopadajícími od pulsarů $y = 2 \cdot 10^{-17} \text{ cm}$.

Jak velké amplitudy posunu zemského povrchu lze seismicky zjistit? Realistický odhad velikosti seismického neklidu v seismicky neaktivním místě je $\langle y \rangle = 10^{-7} \cdot B^{1/2} \text{ cm}$, kde B je šířka uvažovaného pásma v Hz.

Dyson předpokládá, že budeme-li korelovat několikaleté záznamy seismického neklidu s periodou pulsarů, kterou známe velice přesně, získáme odhad pro $\langle y_p \rangle$. Odhadl, že zjistitelná velikost středního posunu zemského povrchu způsobeného pulsarem $\langle y_p \rangle$ je 10^{-11} cm . Užijeme-li většího počtu seismografů, můžeme zjistit až $\langle y_p \rangle = 10^{-12} \text{ cm}$. Vidíme, že hladina šumu je asi o pět řádů vyšší než očekávaný signál od pulsaru. Protože však Dyson pro výpočet seismické reakce Země přicházející na gravitační vlnu od pulsaru záměrně uvažoval nejpesimističtější odhady, domníval se, že pokusy o detekci reakce Země na gravitační vlny v oblasti 1 Hz nejsou beznadějně. Experimenty týkající se zjištění seismických posunutí způsobených gravitačními vlnami prováděli v roce 1969 R. A. WIGGINS a F. PRES [39]. Využili údaje získané systémem 525 seismografů v pokusné oblasti v Montaně. Sečtením signálů všech prvků seismického pole očekávali vzrůst citlivosti o faktor nejméně 20. Prováděli Fourierovu analýzu vybraného, seismicky velmi klidného intervalu v délce 20,5 hod., ale výsledky byly negativní pro frekvence odpovídající pulsaru CP 0950, CP 0834 a CP 1919. Pro pulsar CP 1133 se ukázala slabá korelace, ale nebylo možno s jistotou prohlásit, že jev byl nalezen. Jako horní hranici možných (ale nezjištěných) posunutí zemského povrchu gravitačními vlnami od pulsarů udali 10^{-11} cm .

Velký zájem a živou diskusi vzbudil článek D. SADEHA a M. MEIDAVA [40], ve kterém

autoři ověřovali výsledky Wigginsovy a Presovy. Několikaměsíční pokusy se konaly na seismické stanici v Izraeli severně od Eilathu s vertikálním seismografem Rocard. Získaný digitalizovaný signál byl zpracován korelátorem; zařízení potlačovalo neperiodický šum. Maximum signálu se opakovalo podle hvězdného času, což ukazovalo na mimozemský původ signálu. Údaje byly korelovány pro přesnou periodu pulsaru CP 1133, tj. 1,18791 s. Autoři uvádějí, že v měření během tří dnů byl skutečně hledaný efekt nalezen s periodou rovnou polovině periody rádiového záření pulsaru, ale jen v případě, kdy seismické pozadí bylo velice nízké. Aby vyloučili možnost, že seismograf pracuje jako anténa elektromagnetických vln vysílaných z pulsaru, sledovali souběžně i v rádiovém rozsahu, ale zde žádná korelace nebyla nalezena. Na seismogramu našli též další záznam, závisící na hvězdném čase; perioda záření odpovídala 0,33–0,34 s. To však neodpovídá žádnému známému pulsaru. Kdyby impulsy byly působeny dosud nezjištěným pulsarem, měl by se hledat v rektascenci 6 hod. 50 min. nebo 18 hod. 50 min. Základní otázka však zůstává dosud nerozřešena. Odhady Weberovy i Dysonovy o velikosti seismické odpovědi na gravitační záření z pulsaru dávají velikost posunutí pro krátkodobé pozorování $\sim 10^{-17}$ cm, i když jde o pesimistický odhad. V Izraeli naměřili $2 \cdot 10^{-9}$ cm. Rozdíl není vysvětlen.

V témže čísle Nature, ve kterém vyšla Sadehova a Meidavova práce, se objevil článek T. S. MASTA a spolupracovníků [41], kteří se také snažili o detekci gravitačních vln z pulsaru CP 1133 pozorováním seismického neklidu. Užívali také vertikální seismograf, dobře odrušili vlivy okolí. S jistotou však prohlašují, že nezaznamenali žádný signál, který by odpovídal dopadu gravitačních vln z pulsaru CP 1133. Citlivost jejich přístroje by ho dovolila zjistit, kdyby byl větší než 10^{-10} cm. Podrobně diskutují o výsledcích Sadeha a Meidava, počítají citlivost jejich přístroje. Stejně skeptický je i článek O. H. WEICHERTA [42], který se pokoušel zopakovat Sadehova měření za užití yellowknifského souboru seismografů na kanadském plató v seismicky klidné oblasti. Je tam umístěno 19 vertikálních krátkoperiodických seismografů. Prvá zpracování výsledků byla nadějná, signál byl nalezen; podrobným rozbořením všech okolností se však zjistilo, že byl působen čistě pozemskými zdroji. A tak ani tato měření nemůžeme interpretovat jako detekci gravitačních vln.

V práci [43] Sadeh rozpracovává myšlenku o seismickém zjišťování gravitačních vln od pulsarů vyhodnocením záznamů přístrojů umístěných na Měsíci. Seismografy z Apolla 12 naznačují, že „měsícetřesení“ mají periodicitu odpovídající měsíčnímu hvězdnému dni (což je samo o sobě zajímavé, i kdyby to nebylo spojeno s gravitačními vlnami), že se objevují dvakrát za měsíční den (znovu připomínáme, že gravitační vlny procházejí kosmickými tělesy prakticky bez překážky); doba, kdy seismicity roste, odpovídá průchodu pulsaru CP 1133 místním poledníkem. Měření na dalších měsíčních seismografech tato fakta potvrzují. Zase je zde ovšem veliký rozdíl v měřené amplitudě ve srovnání s teorií. Zde je třeba připomenout, že při vyslání seismografů a gravimetrů na povrch Měsíce se kromě jiných hledisek přihlédlo také k Weberovu návrhu na detekci seismického neklidu na povrchu Měsíce jakožto indikátoru dopadu gravitačních vln.

V měsíční kůře pod „moři“ se též nacházejí větší nehomogenity – mascony. I jejich „rozechvívání“ gravitačními vlnami by se mohlo zachytit detektorem, jak se domnívá DE SABBATA [44], [45].

3.2 Zjišťování posunů zemského povrchu pomocí interferometrů. K detekci vlastních kmitů Země, mikroseismů a posunů způsobených gravitačními vlnami bylo navrženo též využít kvantové generátory světla. Interferometry, které využívají lasery jako zdroje světla, vynikají vysokou přesností. Například V. VALI a R. C. BOSTROM [46] sestavili laserový Fabryův-Perrotův interferometr o délce základny 1000 m. Je umístěn v tunelu o délce 4000 m, je izolován od vnějších vlivů; paprsek probíhá vyčerpanou trubicí. S tímto přístrojem je možno zjistit změny $\Delta L/L \sim 6 \cdot 10^{-12}$. Interferometry tohoto typu se kromě jiného mohou využít i pro zjišťování posunu zemského povrchu gravitačním zářením. Sabbata se svými kolegy [47] navrhuje použít podobné přístroje pro registraci makroseismické aktivity a gravitačních vln s periodou několika vteřin a amplitudou od $5 \cdot 10^{-8}$ m do $1,5 \cdot 10^{-7}$ m. Laserový interferometr MOSSEHO a FORWARDŮV [48] v Hughes Research Laboratory v Malibu v Kalifornii měří změnu vzdálenosti mezi zrcátky interferometru s přesností $\Delta L \sim 10^{-13}$ cm a může měřit v širokopásmovém rozsahu od 1,3 do 20 Hz.

Právě možnost zjištění pohybů zemské kůry v širokém pásmu frekvencí je velkou výhodou laserových interferometrů. Citlivost těchto přístrojů se dá zvyšovat zvětšením vzdálenosti mezi zrcátky a zvýšením výkonu laseru.

3.3 Gravimetrická měření. K detekci gravitačních vln by se mohly používat i gravimetry, pokud by byly dostatečně citlivé a měly dostatečně malý chod. Jednou z cest zvyšování přesnosti je „zavěšení“ závaží gravimetru v silném magnetickém poli, vytvořeném supravodivým solenoidem. Příkladem podobného přístroje je supravodivý gravimetr PROTHERŮV-GOODKINDŮV [49]. Pracuje při teplotě kapalného hélia (4,2 K), má velmi malý šum. Jádrem gravimetru je dutá aluminiová koule s olověným obalem, která se vznáší v magnetickém poli. Odchytky od její střední polohy jsou určovány dvěma způsoby: měřením magnetického toku procházejícího prstencem umístěným pod vznášející se koulí a srovnáním změny kapacity systému elektrod obklopujících kouli. Srovnání obou údajů umožní rozlišit vlivy způsobené změnami magnetického pole od působení dalších sil. Celý systém je chlazen kapalným héliem a Dewarova nádoba, do níž je ponořen, je stíněna materiálem s vysokou magnetickou permeabilitou, aby se snížil vliv vnějšího magnetického pole. Chod gravimetru je o řád menší než u dosud užívaných špičkových gravimetrů.

Gravimetr obdobného typu pro zjišťování vlastních kmitů Země, měření sekulárních změn tíže a detekci gravitačních vln použil V. S. TUMAN [50], [51]. Měření v letech 1970, 1971 ukazují, že bylo zjištěno 30 frekvencí sferoidálních kmitů Země. Autor se domnívá, že kryogenický gravimetr by mohl zkoumat kmity Země způsobené tenzorovými i skalárními kvadrupólovými gravitačními vlnami. V druhé práci uvádí, že byl detekován větší počet sferoidálních kmitů Země na třech různých frekvencích a částečně připisuje tyto kmity působení gravitačních vln; E. A. FLINN [52] však uvádí, že Tuman nezjistil pravděpodobně nic jiného než náhodný šum. Další návrhy detektorů, využívajících silně zchlazených systémů, jsou v [53].

4. Další možnosti detekce

4.1 Registrace sekundárních jevů. Souběžně s pokusy zjistit odezvu pevných těles (detektoru, Země) na dopad gravitačního záření probíhají pokusy o zjištění jevů, které by se mohly objevovat při vzniku gravitačních vln a při jejich průchodu prostředím. Pokud bychom předpokládali v centru Galaxie vznik tak silného gravitačního záření, že se za rok přemění v energii stovky hmot o velikosti Slunce, zdá se, že při těchto jevech by mělo vznikat i elektromagnetické záření v širokém spektru frekvencí.

Pátrání po rádiových pulsech, které by přicházely ze směru středu Galaxie, prováděl W. N. CHARMAN se spolupracovníky [54]. Na pokusu se podílelo 5 radioastronomických observatoří. Přístroje pracovaly jako interferometry. Vzdálenost mezi radioteleskopy byla 100 až 500 km. Pozorování trvala 5 měsíců v době, kdy Slunce bylo pod obzorem (aby se neuvažovaly „signály“ vznikající při jevech na Slunci). Za „rádiový záblesk“ byl považován signál, převýšil-li alespoň třikrát hladinu šumu. Autoři se domnívají, že výsledky neposkytují důkaz o radiopulsech mimozemského původu. Ke stejným názorům došli autoři při opakovaném měření, kdy do sítě stanic byly zahrnuty další radioastronomické observatoře [55]. Ani HUGHES a RETALLCK [56] nezjistili statisticky významné potvrzení o existenci vesmírných rádiových pulsů. Tato měření neříkají sice sama o sobě nic jiného, než že ze středu naší Galaxie nepřicházejí impulsy rádiového záření převyšujícího jistou úroveň šumu, hypotézu o aktivitě centra naší Galaxie však nepotvrzují. Také pokusy BAHCALLOVY a DAVIESOVY [57] o zjištění energie dopadu neutrin spojených s Weberovými pulsy vedly pouze k určení horní hranice možného (a nedetekovaného) toku. Pokus o zjištění anomálií infračerveného záření, jež by bylo spojeno s gravitačními vlnami [58], také nepřinesl kladný výsledek.

4.2 Kosmická sonda jako detektor? Zajímavá fakta uvádí A. J. ANDERSON [59]. Dráha aktivních kosmických sond je velmi pečlivě sledována, rychlost a její změny jsou určovány pomocí Dopplerova efektu. (Umožňuje měření s přesností 10^{-12}). Nejméně ve dvou případech (15. a 21. března 1969) bylo zjištěno, že rychlost sondy se změnila tak, že za 60 vteřin byla sonda o 10 cm jinde, než měla být. Změna mohla být způsobena průchodem gravitační vlny. V odpovídající době i na detektorech v Marylandu a v Argonne zjistili impulsy. Anderson zde byl nucen předpokládat velmi malou disperzi gravitační vlny s vlnovou délkou, neboť Weber pozoruje na frekvenci 10^3 Hz a Anderson 10^{-2} Hz. Energie potřebná na podobné „zhoupnutí“ kosmické sondy by však musela být ještě značně větší (10^4 krát), než zachycuje Weber, a proto autor sám o výsledku dost pochybuje.

4.3 Excitace molekulárního systému gravitačním zářením. L. HALPERN [60] uvažuje o detekci vysokofrekvenčních gravitačních vln. O problém se zajímal už v r. 1964 a navrhl detekovat gravitační záření za pomoci kvantových efektů. Odhadl však, že citlivost zařízení bude o několik řádů horší, než by bylo zapotřebí. Weberovy údaje ho znovu přivedly k této problematice. Velký počet molekul by byl zchlazením uveden do základního stavu a odstíněn od elektromagnetického záření. Gravitační záření by stíněním prošlo a mohlo by přivést část systému do excitovaného stavu. Při zpětném přeskoku by systém mohl emitovat fotony a ty by byly pozorovatelné čítačem.

4.4 Je možné zjistit gravitační vlny astronomickými pozorováními? W. J. KAUFMANN [61] uvažuje o možnosti, že i některá astronomická měření by mohla vést ke zjištění údajů o gravitačním záření. Je-li totiž prostor mezi zdrojem fotonů a pozorovatelem zaplněn gravitačními vlnami, můžeme očekávat různé fluktuace. (Ty mohou být bohužel způsobeny i jinými jevy). Změny ve svítivosti a pozici astronomických objektů působené gravitačními vlnami byly vyšetřovány za pomoci geometrické optiky D. M. ZIPOYEM [62]. Kaufmann se zabývá fluktuacemi rudého posuvu spektrálních čar. Propočty však vedou k tomu, že úkazy takového rozsahu, který je nutno předpokládat pro dostatečně velký výron gravitačního záření, nastávají v galaxiích zřídka, jednou za 10^5 až 10^6 let.

P. G. BERGMANN [63] navrhuje studovat fluktuace intenzity optického záření z vesmírných zdrojů a domnívá se, že superpozice mnoha nekorelovaných fluktuací na dostatečně dlouhé dráze paprsku může vytvořit pozorovatelný kumulativní efekt. Protože ve vzorci pro hvězdnou magnitudu, posun zdroje na obloze (ve směru kolmém k šíření paprsku) a délku optické dráhy se poměr celkové dráhy paprsku k délce koherence vyskytuje v různé mocnině, lze usuzovat na vlastnosti gravitační vlny, která by fluktuaci zavinila. Problémem ovšem je, že fluktuace jsou především působeny nehomogenitami atmosféry (muselo by se konat pozorování mimo Zemi), nepravidelností zdroje a efekty vznikajícími v mezihvězdném prostředí. Těžko tedy odlišit fluktuace způsobené gravitační vlnou od souhrnného efektu. M. J. REES [64] uvažuje o vlivu velmi dlouhovlnného gravitačního záření vzniklého v prvních stadiích vesmíru na další vývoj a stabilitu kosmu. Vlny o délce 1–10 Mpc by výrazně ovlivnily stavbu systému a dynamiku skupin galaxií. Pozorování podobných jevů však prozatím zůstává mimo naše možnosti.

4.5 Využití interakce gravitačního a elektromagnetického záření. Vraťme se tedy zpět k pozemským detektorům. Možná, že cesta vede k využívání vzájemného působení mezi vlnami elektromagnetickými a gravitačními. C. A. LUPANOV [65] řeší problém chování elektromagnetického pole uvnitř nabitého kondenzátoru, který je umístěn v poli tvořeném gravitační vlnou. Ukazuje, že takový kondenzátor bude vyzařovat elektromagnetické vlny s frekvencí dopadajícího gravitačního záření a amplitudou úměrnou hE , kde h je poruchový člen metrického tenzoru a E je pole v kondenzátoru pro $h = 0$. Elektromagnetická vlna se však nebude šířit ve směru průchodu gravitační vlny, zato ve směru opačném bude elektromagnetické záření existovat i vně kondenzátoru a je-li splněna jistá rezonanční podmínka, je záření co do amplitudy srovnatelné s polem uvnitř kondenzátoru. Detektor by byl dostatečně účinný jen pro vysoké frekvence.

Vzájemné přeměny gravitačních vln a fotonů studovali D. BOCCALETI a DE SABBATA [66]. Rozšířili úvahy z předešlé práce a navrhli detektor. Aby však byl přístroj dostatečně citlivý, je třeba, aby se udržovalo značně silné magnetické pole v dostatečně velkém prostoru a to současná technika řeší jen s velkými obtížemi. Problémy obdobných způsobů detekce gravitačních vln se zabýval J. B. ZELDOVIČ na 64. sympoziu IAU „Gravitational Radiation and Gravitational Collapse“ ve Varšavě v září 1973 a právě tato cesta k řešení problematiky detekce se mu zdála nejslibnější. Podrobnější teoretický rozbor i přehled současných prací týkajících se elektromagnetických detektorů gravitačních vln, viz [67] a sborník ze 64. symposia Mezinárodní astronomické unie o gravitačním záření

a gravitačním kolapsu ve Varšavě 1974. Z přehledu prací je vidět, jak nesmírně obtížným technickým a experimentálním úkolem je detekce gravitačních vln.

Závěr

Jak souhrnně hodnotit dosavadní pokusy o detekci gravitačních vln? V současné době se zdá, že nemůžeme s jistotou říci, že gravitační vlny byly zachyceny. To však naprosto neznamená, že Weberovy průkopnické práce byly neúspěšné a marné. Jemu a ostatním skupinám se podařilo téměř neuvěřitelně vylepšit techniku detekce velmi slabých signálů na hranici šumu a rozvinout metody, které mají dosud značné rezervy ve zvyšování citlivosti. Výklad Weberových impulsů, jako záření přicházejícího ze středu Galaxie, by vyžadoval předpokládat existenci neobyčejně silného zdroje, jehož astrofyzikální model činí značné potíže. Zdá se však zcela reálné dosáhnout v dohledné době takové citlivosti detektorů, ať již Weberova typu nebo pracujících na jiných principech, aby bylo možné zachytit gravitační záření, které by měly podle obecné teorie relativity vysílat některé známé objekty (pulsary, dvojhvězdy, explodující supernovy apod.).

Na závěr chci poděkovat RNDr. J. LANGROVI, CSc., ing. M. PICKOVI, DrSc., a RNDr. J. PÍCHOVI, CSc., za péči, kterou věnovali přečtení článku a za cenné připomínky, které podstatně přispěly ke zlepšení mé studie.

Literatura

- [1] EJNSTEJN, A.: *Sobranie naučnych trudov. I. Raboty po teorii otnositeľnosti 1905—1920*, Moskva, Nauka 1965.
- [2] BRAGINSKIJ, V. B.: *Gravitacionnoe izlučenje i perspektivy jeho eksperimental'nogo obnaruženija*, Usp. Fiz. Nauk 86 (1965), 433.
- [3] WEBER, J.: *Gravitacionnye volny* ve sborníku *Gravitacija i otnositelnoť*, vyd. Chiu H. J. Hoffmann, W. F., Moskva, Mir 1965.
- [4] WEBER, J.: *Detection and Generation of Gravitational Waves*, Phys. Rev. 117 (1960), 306.
- [5] ZEL'DOVIČ, JA. B., NOVIKOV, I. D.: *Relativistskaja astrofizika II.*, Usp. Fiz. Nauk 86 (1965), 447.
- [6] PRESS, W. H., THORNE, K. S.: *Gravitational-Wave Astronomy*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 10 (1972), 335, (ruský překlad: *Gravitacionno-volnovaja astronomija*, Usp. fiz. nauk 110, (1972), 569).
- [7] BRAGINSKIJ, V. B., RUDENKO, V. N.: *Relativistskije gravitacionnye eksperimenty*, Usp. Fiz. Nauk 100 (1970), 395.
- [8] WEBER, J.: *Evidence for Discovery of Gravitational Radiation*, Phys. Rev. Lett. 22 (1969), 1320.
- [9] WEBER, J.: *Gravitational Radiation Experiment*, Phys. Rev. Lett. 24 (1970), 276.
- [10] WEBER, J.: *Anisotropy and Polarisation in the Gravitational-Radiation Experiments*, Phys. Rev. Lett. 25 (1970), 180.
- [11] WEBER, J.: *Computer Analyses of Gravitational Radiation Detector Coincidences*, Nature 240 (1972), 28.
- [12] JORDAN, P.: *Schwerkraft und Weltall*, Braunschweig, 1955.
- [13] JORDAN, P.: *Zum gegenwärtigen Stand der Diracschen kosmologischen Hypothesen*, Zeits. Phys. 157 (1959), 112.
- [14] BRANS, C., DICKE, R. H.: *Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation*, Phys. Rev. 124 (1961), 925.

- [15] DICKE, R. H.: *Mach's Principle and Invariance under Transformation of Units*, Phys. Rev. 125 (1962), 2163.
- [16] WEBER, J.: *Disc-Cylinder Argonne-Maryland Gravitational Radiation Experiments*, Il Nuovo Cimento 4B (1971), 197.
- [17] EZROW, D. H., WALL, N. S., WEBER, J., YODH, G. B.: *Insensitivity to Cosmic Rays of the Gravity Radiation Detector*, Phys. Rev. Lett. 24 (1970), 945.
- [18] WEBER, J., TRIMBLE, V. L.: *On the Response of a Gravitational Radiation Detector to Magnetic Field Fluctuations*, Phys. Lett. A 45 (1973), 353.
- [19] WEBER, J., LEE, M., GRETZ, D. J., RYDBECK, G., TRIMBLE, V. L., STEPPEL, S.: *New Gravitational Radiation Experiments*, Phys. Rev. Lett. 31 (1973), 779.
- [20] WEBER, J.: Pat USA, kl 73-382, (G01 v 7/04), No 3722288.
- [21] WEBER, J.: Pat USA, kl 73-382, (B21 d 5/02), No 3722289.
- [22] WEBER, J.: Pat USA, kl 73-382, (G01 v 7/04), No 3722285.
- [23] WEBER, J.: Pat USA, kl 73-382, (G01 v 7/04), No 3722286.
- [24] WEBER, J.: Pat USA, kl 73-382, (G01 v 7/04), No 3722287.
- [25] WEBER, J., ZIPOY, D. M.; Pat USA, kl 73-382, (G01 v 7/04), No 3722290.
- [26] BRAMANTI, D., MAISCHBERGER, K., PARKINSON, D.: *Optimisation and Data Analysis of the Frascati Gravitational-Wave Detector*, Lett. Nuovo Cimento. 7 (1973), 665.
- [27] TYSON, J. A.: *Null search for Burst of Gravitational Radiation*, Phys. Rev. Lett. 31 (1973), 326.
- [28] BRAGINSKIJ, V. B., MANUKIN, A. B., POPOV, E. I., RUDENKO, V. N., CHOREV, A. A.: *Verchnij predel plotnosti gravitacionnogo izlucenija vnezemnogo proischozdenija*, ŽETF 66 (1974), 801.
- [29] DAVIES, P. C.: *Limited Progress at GR7*, Nature 250 (1974), 287.
- [30] DREVER, R. W. P., HOUGH, J., BLAND, R., LESSNOFF, G. W.: *Search for Short Bursts of Gravitational Radiation*, Nature 246 (1973), 340.
- [31] TYSON, J. A.: *Gravitational Radiation*, Ann. N. Y. Acad. Sci. 224 (1973), 74.
- [32] LOGAN, J. L.: *Gravitational Waves — a Progress Report*, Physics Today 26 (1973), 44.
- [33] *No Gravity — Wave Confirmation by the New Experiments*, Physics Today 26 (1973), 17.
- [34] TRIMBLE, V., WEBER, J.: *Gravitational Radiation Detection Experiments with Disc — Shaped and Cylindrical Antennae and the Lunar Surface Gravimeter*, Ann. N. Y. Acad. Sci. 224 (1973), 93.
- [35] LEE, M., WEBER, J.: *Gravitational Radiation Detector Magnetic Tape from Rochester and Maryland*, ve sborniku Gravitational Radiation and Gravitational Collapse, IAU Symposium no 64 (red. DeWitt-Morrete), Dordrecht 1974, 35.
- [36] FORWARD, R. L., ZIPOY, D., WEBER, J., SMITH, S., BENIOFF, H.: *Upper Limit for Interstellar Milicycle Gravitational Radiation*, Nature 189 (1961), 473.
- [37] WEBER, J.: *Gravitational Radiation from the Pulsars*, Phys. Rev. Lett. 21 (1968), 395.
- [38] DYSON, F. J.: *Seismic Response of the Earth to a Gravitational Wave in the 1-Hz Band*, Astrophys. Journal 156 (1969), 529.
- [39] WIGGINS, R. A., PRESS, F.: *Search for Seismic Signals at Pulsar Frequencies*, J. Geophys. Res. 74 (1969), 5351.
- [40] SADEH, D., MEIDAV, M.: *Periodicities in Seismic Response Caused by Pulsar CP 1133*, Nature 240 (1972), 136.
- [41] MAST, T. S., NELSON, J. E., SAARLOS, J., MULLER, R. A., BOLT, B. A.: *Search for Seismic Signals from Gravitational Radiation of Pulsar CP 1133*, Nature 240 (1972), 140.
- [42] WEICHERT, D. H.: *An Attempt to Detect Gravitational Waves with the Yellowknife Seismic Array*, Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 35 (1973), 337.
- [43] SADEH, D., MEIDAV, M.: *Possible Sideral Period for the Seismic Lunar Activity*, Nature 240 (1972), 139.
- [44] DE SABBATA, V., PANZA, G. F.: *On the Interpretation of Lunar Mascons and the Use of Them as Detector of Gravitational Waves*, Geofisica a Meteorologia 19 (1970), 52.
- [45] DE SABBATA, V.: *Lunar Mascons as Detector of Gravitational Waves from Pulsars*, Memoire della Soc. Astronomica Italiana 41 (1970), 65.

- [46] VALI, V., BOSTROM, R. C.: *One Thousand Meter Laser Interferometer*, Rev. of Scient. Instr. 39 (1968), 1304.
- [47] DE SABBATA, V., FORTINI, S., GUALDI, C., PETRALIA, S.: *A Proposal for Combined Efforts Regarding Geophysical Research and Detection of Gravitational Waves*, Annali di Geofisica 23 (1970), 21.
- [48] MOSS, G., MILLER, L., FORWARD, R.: *Photon-Noise-Limited Laser Transducer for Gravitational Antenna*, Applied Optics 10 (1971), 2495.
- [49] PROTHERO, W. A., GODDKIN, J. M.: *A Superconducting Gravimeter*, Rev. Sci. Instr. 39 (1968), 1957.
- [50] TUMAN, V. S.: *Cryogenic Gravity Meter*, Proc. 12th Int. Conf. Low. Temp. Phys. Kyoto 1970.
- [51] TUMAN, V. S.: *Terrestrial Spectroscopy by a Cryogenic Gravity Meter*, Nature 229 (1971), 618.
- [52] FLINN, E. A.: *Free Oscillations of the Earth — a Critique*, Nature Phys. Sci. 232 (1971), 112.
- [53] BOUGHM, S. P., FAIRBANK, W. M., MC ASHAM, M. S., PAK, H. J., TABER, B. C., BERNAT, T. P., BLAIR, D. G., HAMILTON, W. O.: *The Use of Cryogenic Techniques to Achieve High Sensitivity in Gravitational Wave Detectors*, ve sborníku Gravitational Radiation and Gravitational Collapse IAU Symposium no 64 (red. DeWitt-Morrete) Dordrecht 1974.
- [54] CHARMAN, W. N., JELLEY, J. V., FRUIN, J. H., BAIRD, G. A., DELANEY, T., LAWLESS, B. G., HODGSON, E. R., SCOTT, P. F., SHAKESHAFT, J. R., DREVER, R. W. P., MEIKLE, W. P. S., PORTER, R. A., SPENCER, R. E.: *Spaced Receiver Observations of Radio Pulses*, Nature 228 (1970), 346.
- [55] CHARMAN, W. N., FRUIN, J. H., JELLEY, J. V., HAYNES, R. F., HODGSON, E. R., SCOTT, P. F., SHAKESHAFT, J. R., BAIRD, G. A., DELANEY, T. J., LAWLESS, B. G., DREVER, R. W. P., MEIKLE, W. P. S.: *Search for Isolated Radio Pulses from the Galactic Centre at 151.5 MHz*, Nature 232 (1971), 117.
- [56] HUGHES, V. A., RETALLCK, D. S.: *Radio Pulses from the Direction of the Galactic Centre*, Nature 242 (1973), 105.
- [57] BAHCALL, J., DAVIS, R.: *Upper Limit on Neutrino Energy Associated with Weber Pulses*, Phys. Rev. Lett. 26 (1971), 662.
- [58] SLUSHER, R. E., TYSON, J. A.: *Search for Infrared Anomalies Associated with Gravitational Events at the Galactic Centre*, Nature 243 (1973), 25.
- [59] ANDERSON, A. J.: *Probability of Long Period Gravitational Radiation*, Nature 229 (1971), 547.
- [60] HALPERN, L.: *Source and Detection of Gravitational Radiation of High Frequency*, Nature Phys. Sci. 233 (1971), 18.
- [61] KAUFMANN, W. J.: *Redshift Fluctuations Arising from Gravitational Waves*, Nature 227 (1970), 157.
- [62] ZIPOY, D. M.: *Light Fluctuations Due to an Intergalactic Flux of Gravitational Waves*, Phys. Rev. 142 (1966), 825.
- [63] BERGMANN, P. G.: *New Method of Search for Low-Frequency Gravitational Waves*, Phys. Rev. Lett. 26 (1971), 1398.
- [64] REES, M. J.: *Effects of Very Long Wavelength Primordial Gravitational Radiation*, Monthly Notices of the RAS 154 (1971), 187.
- [65] LUPANOV, C. A.: *Kondensator v pole gravitacionnoj volny*, ŽETF 52 (1967), 118.
- [66] BOCCALETTI, D., DE SABBATA, V., FORTINI, P., GUALDI, C.: *Conversion of Photons into Gravitons and Vice Versa in a Static Electromagnetic Field*, Il Nuovo Cimento, ser. 10, 70B (1970), 129.
- [67] BRAGINSKIJ, V. B., GRIŠČUK, L. P., DOROŠKEVIČ, A. G., ZEL'DOVIČ, JA. B., NOVIKOV, I. D., SAŽIN, M. V.: *Elektromagnitnye detektory gravitacionnyh voln*, ŽETF 65 (1973), 1729.

Při polytechnizaci průběhu a obsahu vyučování nejde jen o předkládání požadavků na vyučování matematice. Neméně podstatná je i druhá strana věci: systematické používání matematických znalostí v hodinách jiných předmětů — fyziky,

chemie, biologie, zeměpisu. To pomůže nejen prohloubení studia těchto disciplín, ale přispěje i ke zkrácení doby potřebné k výkladu látky.

B. V. Gnedenko