

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Clifford M. Will

Ostře sledovaný Einstein

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 18 (1973), No. 5, 256--270

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137681>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1973

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>

němž experiment mu byl jen nezbytnou konfrontací teorie se skutečností, i když ovšem obráceně teorie mu nebyla pouhou duchovní zábavou (což bylo ostatně v této době „vykladačů přírody“ prostě nemyslitelné), jeví se nám jako průkopník moderního vědeckého nazírání, a máme tedy specifický, aktuální, nikoliv pouze historický důvod k oslavování jeho výročí.

Literatura

- [1] YOUNG, T.: *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 83 (1793), 169.
- [2] YOUNG, T.: *The Mechanism of the Eye*, *Phil. Thans. Roy. Soc. London* 91 (1801), 23.
- [3] YOUNG, T.: *The Theory of Light and Colour*, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 92 (1802), 12.
- [4] YOUNG, T.: *Experiments and calculations relative to Physical Optics*, *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 94 (1804), 1.
- [5] YOUNG, T.: *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Printed for J. Johnson, London, 1807. New edition, ed. by P. Kelland, printed for Taylor and Walton, London, 1845, 2 vols.
- [6] YOUNG, T.: *An Account of the Recent Discoveries in Hieroglyphical Literature and Egyptian Antiquity*, London, 1823.
- [7] HERSCHEL, J.: *Encyclopaedia Metropolitana*, B. Fellows, London, 1817–45, vol. II, 456.
- [8] ARAGO, D. F.: *Éloge de Thomas Young*, *Mém. Acad. Roy. Sci.* 13 (1835).
- [9] PEACOCK, G.; LEITCH, J., eds.: *Miscellaneous Works of the Late Thomas Young, M. D., F. R. S.*, John Murray, London, 1855.
- [10] PEACOCK, G.: *Life of Thomas Young, M. D., F. R. S.*, John Murray, London, 1855.
- [11] MACH, E.: *Die Prinzipien der physikalischen Optik-Historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt*. J. A. Barth, Leipzig, 1921.
- [12] BUDGE, E. A. W.: *The Rosetta Stone*, London, 1929.
- [13] OLDHAM, F.: *Thomas Young, F. R. S.*, London, 1933.
- [14] WOOD, A.; OLDHAM, F.: *Thomas Young. The Natural Philosopher*, Cambridge, 1954.
- [15] BARR, E. S.: *Men and Milestones in Optics. II. Thomas Young*, *Appl. Opt.* 2 (1963), 639.
- [16] HERIVEL, J.: *Thomas Young (1773–1829)*, *Endeavour XXXII* (1973), Nr. 115, 15.

Ostře sledovaný Einstein*)

Clifford M. Will, Chicago, USA

Obecné teorii relativity je již přes padesát let. Během tohoto období však nebyla jedinou teorií gravitace. Lze sestavit „teoretické síto“. To je systém, v jehož rámci se lépe rozhoduje o shodě teorií s experimenty a tím o jejich přípustnosti.

Astronom zachytí záhadné pulsy ve světle z hvězdy ve středu Krabí mlhoviny a teore-

*) C. M. WILL: *Einstein on the firing line*, *Physics Today*, October 1972. Přeloženo se souhlasem vydavatele (American Institute of Physics).

tici se domnívají, že zdrojem je rotující neutronová hvězda („pulsar“*). Masivní hliníkové válce v Illinois a v Marylandu se náhle a současně rozechvějí a teoretici si myslí, že slunečním systémem právě prošla gravitační vlna.***) Radioastronomové zjistí, že celý prostor je vyplněn zářením černého tělesa o teplotě kolem $3\text{ }^{\circ}\text{K}$ a teoretici říkají, že to je vedlejší produkt počátečního „Big Bangu“ vesmíru.****) Rentgenovští astronomové objeví v rentgenovém záření objektu Cygnus — X1 aperiodické fluktuaace; optičtí astronomové objeví, že jde o spektroskopickou dvouhvězdu s jednočárovým spektrem: teoretici z toho usuzují, že rentgenové záření přichází od černé díry, která obíhá obyčejnou hvězdu†).

Když si však teoretici sednou a začnou vytvářet detailní modely těchto jevů, najednou se zarazí. Zjišťují, že v popise všech těchto jevů je podstatná relativistická teorie gravitace. Newtonova teorie jistě není vhodná ke kvantitativnímu popisu těchto jevů, dva z nich (černé díry a gravitační vlny) není s to popsat ani kvalitativně. Experimentální testy, prováděné v rámci sluneční soustavy až do konce padesátých let, se zdají potvrdovat EINSTEINOVU relativistickou teorii gravitace, takže snad to je ta teorie, které je třeba při vytváření modelů. Ale příslušné experimenty byly tak málo přesné, (ve většině případů se relativní chyba pohybovala kolem 20%), že jim vyhovovaly i alternativní teorie:

*) Neutronové hvězdy mají hmoty srovnatelné s hmotou Slunce ($M \sim 10^{33}\text{ g}$), avšak charakteristické poloměry $R \sim 10\text{ km}$; tedy hustoty $\rho \sim 10^{14}\text{ gcm}^{-3}$. Při takových hustotách je hmota složena převážně z neutronů — především tlak degenerovaného Fermiho neutronového plynu brání tomu, aby se neutronová hvězda zhroutila vlivem gravitace. Pulsary — objekty vysílající záření v pravidelných pulsech s periodou (0,3—3,8) s — jsou velmi pravděpodobně rychle rotující neutronové hvězdy, na nichž existuje určitá „horká skvrna“, která vysílá pozorované záření (maják). (Česky viz např. [29], [30].)

***) Nejenom Einsteinova teorie, i jiné polní teorie gravitace předpovídají existenci gravitačních vln — podobně, i když matematicky mnohem komplikovanější cestou, jako Maxwellova teorie elektromagnetického pole předpovídá existenci elektromagnetických vln (viz např. [30]). Experimentálně však existence gravitačních vln dosud bezpečně prokázána není. Rok 1972, během něhož několik pracovišť opakovalo experimenty prof. WEBERA — ovšem s negativními výsledky, vyzněl pesimisticky. Ať již J. Weber pomocí svých asi 1000 km vzdálených hliníkových válců (viz např. [31]) „vidí“ opravdu gravitační vlny či ne, obecný consensus soudí, že „astronomie gravitačních vln“ má velmi slibnou budoucnost. Řada předních pracovišť ve světě konstruuje nové detektory. Očekává se, že se otevře kvalitativně zcela nové okno do vesmíru.

****) Záření černého tělesa ve vesmíru je izotropní mikrovlnné záření, které odpovídá Planckovu záření černého tělesa teploty $2,7\text{ }^{\circ}\text{K}$. Podle současných představ vyplňuje toto záření celý vesmír. Je pozůstatkem přežívajícím z „několika prvních minut“ vývoje vesmíru, kdy ionizovaná hmota byla v rovnáze se zářením. Z počáteční singularity, „Big Bangu“, vesmír expandoval, teplota i hustota záření a hmoty se snižovaly až do okamžiku, kdy záření s hmotou přestalo efektivně interagovat. Následující expanze záření stále ochlazovala — až na teplotu $2,7\text{ }^{\circ}\text{K}$, kterou pozorujeme dnes (viz např. [32], [33]).

†) Hvězda s hmotou větší než asi dvojnásobek hmoty Slunce neskončí svůj vývoj v rovnovážném stavu; vlivem gravitace začne kolabovat a vytvoří černou díru, tj. oblast v prostoru, z které nemůže žádné záření ani hmotná částice vyjít ven. Tak silné je gravitační pole, resp. tak je zakřiven prostor kolem mrtvé, zkolabované hvězdy (viz např. [34], [35]). Rentgenové záření zdroje Cygnus — X 1 pravděpodobně vzniká tím, že hmota z první, normální složky dvojhvězdy „přepadává“ na složku druhou, černou díru. Teplota hmoty přitom vzroste na hodnoty, při nichž je vyzařováno rentgenové záření.

WHITEHEADOVA teorie, BELIFANTOVA-SWIHARTOVA, DICKEOVA-BRANSOVA-JORDANOVA, YILMAZOVA, PAPAPETROUOVA teorie aj. *) Teoretici jsou zaskočení. Pokud nemají nějaký silný důvod pro to, aby věřili jedné z teorií více než ostatním, nemohou důvěřovat modelům, které sestrojí k vysvětlení různých astrofyzikálních jevů.

Naštěstí pokrok v technologii, který dovolil objev zmíněných astrofyzikálních jevů, dá teoretickým astrofyzikům v následujícím desetiletí zároveň silnější experimentální důvody k důvěře v jen jednu teorii gravitace. Technologie šedesátých let nám vložila do rukou vysoce přesné přístroje k testování gravitačních teorií let sedmdesátých: měření vzdáleností planet a družic pomocí radarů s chybou menší než 15 m; měření vzdálenosti Měsíce laserem s chybou menší než 30 cm; interferometrii o dlouhé základně, která dovo-luje měřit úhly o velikosti $3 \cdot 10^{-14}$ úhlových vteřin; atomové a molekulární hodiny, jejichž relativní změna chodu během jednoho roku je menší než 10^{-14} ; gravimetry schopné měřit změny tíhového zrychlení na Zemi řádu 10^{-10} g a mnohé jiné.

Ačkoliv máme mnoho nových experimentálních možností, cena provedení většiny z nich, ať už finanční nebo cena lidské práce je příliš vysoká. (Megadolar je užitečnou jednotkou míry některých z těchto testů.) Z těchto důvodů je velmi důležité mít co nejlepší teoretický systém ke srovnávání relativní ceny různých experimentů a pro navrhování experimentů nových, které by mohly být přehlédnuty. Tento teoretický systém by měl být dostatečně mocný, aby mohl být použit k podrobnému analyzování a ocenění experimentálních testů, současně však dostatečně obecný, aby nebyl zaujatý ve prospěch Einsteinovy obecné relativity. Měl by poskytovat možnost rozboru všech teorií gravitace, které byly vymyšleny v posledních sedmdesáti letech, klasifikovat tyto teorie, ujasnit, v čem jsou podobné a v čem rozdílné a nakonec srovnat jejich předpovědi s výsledky experimentů ve sluneční soustavě.

Takový teoretický systém byl vyvinut v posledních několika letech ruku v ruce s rychle se vyvíjející astrofyzikou a technologií. Zde diskutujeme jednu jeho verzi. Na tento teoretický systém pro testování teorií gravitace (viz obr. 1) se díváme jako na stroj k rozdělování teorií gravitace do dvou košů: *životaneschopné teorie*, tj. teorie, které nemohou být správné, a *životaschopné teorie*, tj. teorie, které mohou být správné z hlediska současné technologie. Toto rozdělování znamená nechat projít každou teorii sérií testů, které srovnávají předpovědi teorie s různými experimentálními výsledky, a jedním testem, který rozsoudí: je daná teorie úplná a bezesporná? Upozorňujeme, že naše diskuse testů bude mít silnou teoretickou příchut' — nebudeme hovořit o detailech experimentálních aparatur nebo o návrzích na technická vylepšení a budeme si jen rychle

*) Kompendium teorií gravitace zde podat nemůžeme. Ostatně konce článku se mnoho teorií nedožije. Teorie, které dnes v konfrontaci s přírodou obstojí: obecná relativita — gravitační pole je plně popsáno metrickým tenzorem, který určuje vzdálenost dvou bodů prostoročasové variety. Velkou „filosofickou“ předností obecné relativity je, že neobsahuje žádný volný, nastavitelný parametr nebo funkci. (Viz např. [36], [37].) Skalární — tenzorové teorie — teorie vyrobené tak, že kromě metriky (metrického tenzoru) je postulováno skalární gravitační pole ϕ . Toto pole není geometrizováno. Obecné skalární teorie obsahují jednu libovolnou funkci $\omega = \omega(\phi)$, která určuje vazbu mezi skalárním gravitačním polem a metrikou. Speciálně, Bransova-Dickeho-Jordanova teorie předpokládá $\omega = \text{konst.}$ V limitě $\omega \rightarrow \infty$ se BDJ teorie redukuje na Einsteinovu obecnou relativitu. Vektorová-tenzorová teorie vedle metriky postuluje vektorové gravitační pole. Obsahuje jednu libovolnou funkci.

i povrchně hrát s experimentálními čísly a chybami. O rozborech těchto problémů z hlediska experimentátora se čtenář může dovědět v řadě jiných přehledných článků ([1], [2]).

Teoretický systém pro testování teorií gravitace

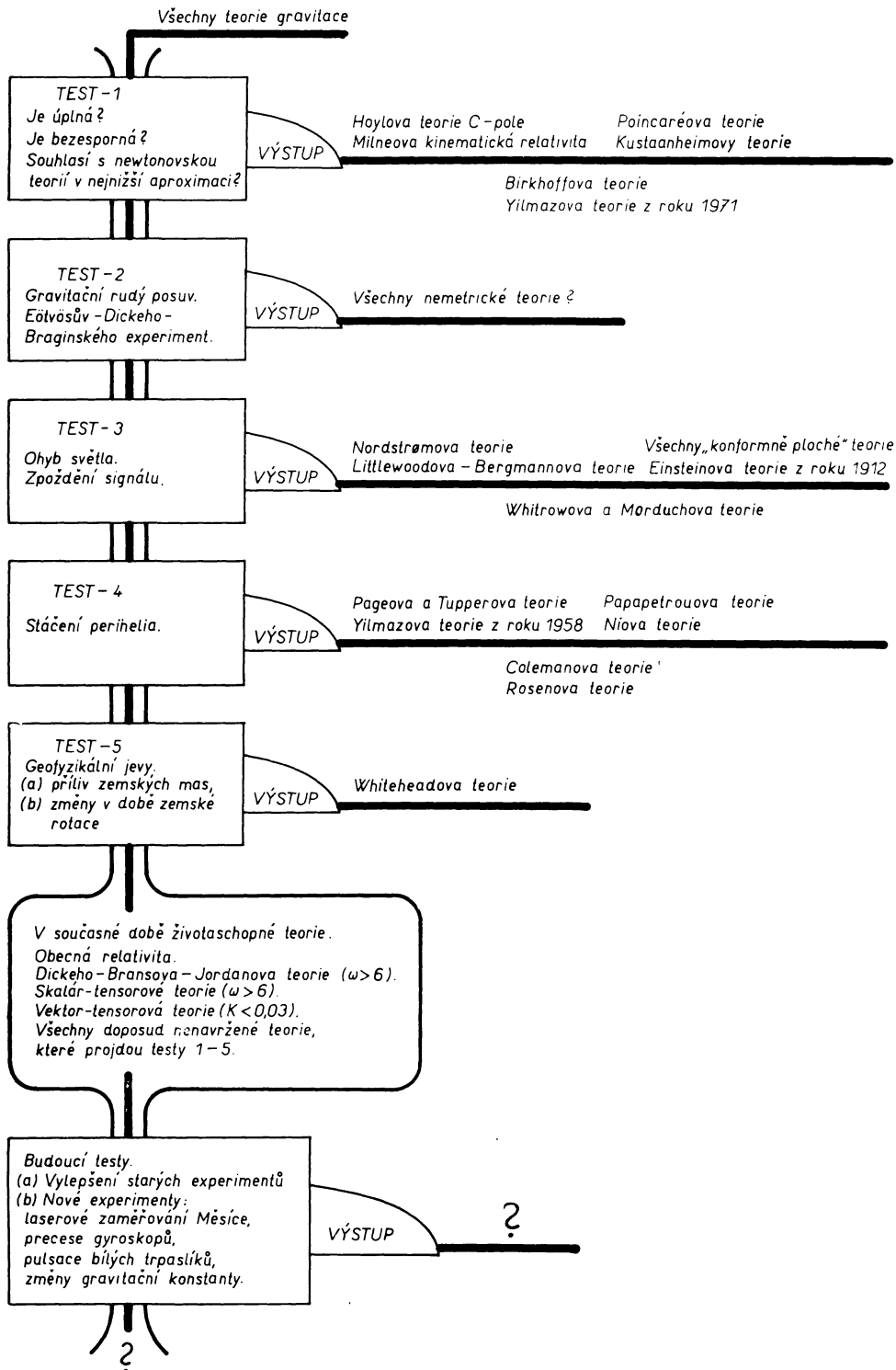
Každá teorie gravitace, kterou je možno brát vážně, musí vyhovovat určitým podmínkám:

- Musí být úplná. To znamená, že musí být schopná analyzovat ze základních principů výsledek každého experimentu, o který se zajímáme. Nestačí například, jestliže je v teorii postulováno, že dvoje atomové hodiny ve dvou různých výškách v gravitačním poli se rozcházejí (gravitační rudý posuv). Teorie se musí slučovat s úplným systémem elektromagnetických a kvantově mechanických zákonů, kterých lze použít k podrobnému výpočtu chování atomových hodin v gravitačním poli. Například „kinematická relativita“ E. A. MILNEOVA ([3]) není schopná dávat předpovědi o rudém posuvu pro nedostatek teoretických prostředků.
- Musí být bezesporná. Některé teorie gravitace trpí vnitřním nesouhlasem. Například teorie PAULA KUSTAAHEIMA předpovídají správný gravitační rudý posuv pro světlo, užíváme-li k popisu světelného záření částicové verze (fotonů), ale předpovídá nulový rudý posuv, používáme-li vlnové verze (MAXWELLOVY teorie).
- V první aproximaci musí souhlasit se standardní newtonovskou teorií. Většina teorií gravitace souhlasí alespoň v nejnižším řádu s newtonovskou fyzikou. Jedna však nesouhlasí – BIRKHOFFOVA teorie. Přestože předpovídá stejný gravitační posuv, ohyb světelného paprsku i stáčení perihélia jako obecná relativita, požaduje, aby se zvukové vlny šířily rychlostí světla, což je hrubý nesouhlas s experimentem.

Na obrázku vidíme situaci po tom, co teorie prošly prvním stupněm našeho stroje – test 1. (Diskusi, proč odvržené teorie nevyhovují tomuto prvnímu testu stejně jako odkazy na články, ve kterých se pojednává o jednotlivých teoriích, čtenář nalezne v [3].)

Přestože Einstein považoval gravitační rudý posuv za jednu z nejdůležitějších předpovědí obecné relativity, byl jeho opravdu přesný experimentální důkaz proveden až roku 1965. Toho roku potvrdili ROBERT POUND a JOSEPH SNIDER ([4]) užitím vylepšené verze experimentu provedeného o pět let dříve Poundem a GLENEM REBKOU – gravitační posuv fotonů, které se pohybovaly v gravitačním poli od základny až po vrchol věže Harvardské university. Přesnost jednoho procenta, které dosáhli, byla umožněna užitím MÖSSBAUEROVA jevu (emise a absorpce fotonů bez zpětného rázu). Avšak v následujících letech se interpretace pokusů s rudým posuvem změnila.

LEONARD SCHIFF a ROBERT DICKE ([5]) naznačili, že experimenty s rudým posuvem vůbec nejsou klíčovými testy obecné relativity. Podle jejich názoru gravitační rudý posuv by mohl být vypočten s odvoláním pouze na zákon zachování energie elementární kvantovou teorií a EÖTVÖSŮV experiment, tj. měření nezávislosti gravitačního zrychlení



na složení těles laboratorních rozměrů.*) Tento experiment byl poprvé proveden baronem von Eötvösem ([6]) s přesností 10^{-9} , vylepšil jej Dicke ([7]) (10^{-11}) a nejnověji BRAGINSKÝ ([8]) (10^{-12}). Schiff pracoval na přesvědčivějším důkazu svého hlediska v době před svou tragickou smrtí v lednu 1971.

Jinak se na gravitační rudý pokus dívá ALFRED SCHILD ([9]) a další: I když gravitační rudý posuv není klíčovým testem samotné obecné relativity, dokazuje, že prostoročas proměřovaný tyčemi a atomovými hodinami musí být v přítomnosti hmoty zakřiven.**)

Třetí hledisko se objevilo po nedávných výzkumech DAVIDA LEEA, ALANA LIGHTMANA a KIPA THORNA. Tato interpretace je v jistém smyslu sloučením předešlých: každá teorie gravitace, která prošla testem 1, musí dávat úplné a konzistentní prostředky ke sloučení svých zákonů gravitace s ostatními zákony fyziky. To znamená, že musí udávat formalismus, který dovoluje vypočítat „odpověď“ elektromagnetického pole na gravitaci (modifikované Maxwellovy rovnice), „odpověď“ kvantově mechanického systému na gravitaci (modifikovaná Diracova rovnice), „odpověď“ jaderných sil na gravitaci.

Vysoce přesné výsledky Eötvösova, Dickeho a Braginského experimentů silně omezují tento formalismus, který „smíchává“ gravitaci s ostatní fyzikou. Třetí pohled dokonce spekuluje s myšlenkou, že jediný formalismus, který dává souhlas s těmito obdivuhodně přesnými experimenty, je formalismus teorie zakřiveného prostoročasu neboli „metrických“ teorií gravitace. Navíc experimenty s gravitačním rudým posuvem ověřují, že volně padající „testovací“ tělesa se pohybují po geodetikách zakřiveného prostoročasu. (Geodetiky jsou „přímky“ v zakřiveném prostoru.) Pak v souhlase s tímto třetím hlediskem test 2 (experimenty s rudým posuvem a Eötvösův-Dickeho-Braginského experiment) propustí jen „metrické“ teorie zakřiveného prostoročasu a odvrhne všechny „nemetrické“ teorie. Probíhající výzkum směřuje k „důkazu“ tohoto náhledu tím, že explicitě ukáže, že každá nemetrická teorie uvažovaná v literatuře nesouhlasí s Eötvösovým-Dickeho-Braginského experimentem při jisté přesnosti a tím, že dokáže (nebo ukáže co nejpřesvědčivěji) obecný „teorém“, který tvrdí: Každá úplná, bezesporná teorie gravitace, ve které volný pád nezávisí na složení padajícího tělesa (souhlasí ve všech řádech s Eötvösovým-Dickeho-Braginského experimentem), musí být metrickou teorií.

*) Podrobnou diskusi Eötvösova-Dickeho pokusu i Poundova-Rebkova-Sniderova pokusu lze najít v [37] a v [38].

**) O tom, jak z gravitačního rudého posuvu lze usoudit, že prostoročas je křivý, se může čtenář dočíst i v proslulých *Feynmanových přednáškách o fyzice*.

Obr. 1. Teoretický systém k testování teorií gravitace, který odděluje teorie životaschopné od teorií životaneschopných tím, že nechá projít každou teorii řadou testů. Na výstupu každého testu jsou teorie, které daný test vyloučil. Většina těchto testů srovnává předpovědi teorie s výsledky experimentů, ale jeden z nich (test 1) rozhoduje, zda teorie je úplná, bezesporná a zda souhlasí v nejnižší aproximaci s newtonovskou fyzikou. Jen několik teorií včetně obecné relativity je v současné době životaschopných, tj. projde všemi pěti testy systému. Budoucí testy mohou vyloučit některé ze současně životaschopných teorií. Jestliže v našem teoretickém systému interpretujeme některou teorii špatně, omlouváme se jejím zastáncům a pobízíme je k tomu, aby explicitě ukázali její úplnost, bezespornost a správnost experimentálních předpovědí.

Co to je metrická teorie?

Jestliže test 2, rudý posuv a Eötvösův experiment dokazují, že jen metrická teorie gravitace má naději být správnou, soustředíme se na tyto teorie a pozorně je prozkoušíme. Přesněji řečeno metrická teorie gravitace je taková, pro kterou platí:

- existuje metrika, která určuje výsledky měření vlastní délky a vlastního času obvyklým způsobem: pro dané dvě události v prostoročase, jejichž souřadnice se liší o dx , ($i = 0, 1, 2, 3$), je invariantní nebo „vlastní“ interval dán vztahem

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j,$$

kde g_{ij} je metrika a předpokládá se sčítání přes i a j ;

- testovací částice se pohybují po geodetikách metricky;
- v lokálně „inerciálních“ (tj. volně padajících) vztažných soustavách mají všechny negravitační zákony fyziky tvar jako ve speciální relativitě.

Ve sluneční soustavě je gravitace poměrně slabá; newtonovský potenciál dělený čtvercem rychlosti světla je všude menší než 10^{-5} . Tedy jakýkoliv rozbor předpovědí metrické teorie gravitace v rámci sluneční soustavy může být proveden na základě aproximace teorie pro případ slabého pole neboli tzv. postnewtonovské limity dané teorie. Když však začneme studovat postnewtonovské limity různých metrických teorií, všimneme si překvapující vlastnosti: téměř všechny metrické teorie gravitace mají stejný tvar své postnewtonovské limity, přestože jejich přesný tvar pro silná pole se může podstatně lišit, liší se navzájem teorie na postnewtonovské úrovni jedině v číselných hodnotách jistého souboru koeficientů. Daný koeficient může mít hodnotu 1 v jedné teorii, 0 v jiné, 3,7 v další atd. Soubor určitých hodnot těchto koeficientů specifikuje teorii. Protože všechny metrické teorie gravitace jsou až na hodnoty těchto koeficientů na postnewtonovské úrovni stejné, můžeme koeficienty označit symboly $\gamma, \beta, \alpha_1, \alpha_2$ atd. – *s nespecifikovanými* hodnotami a tak obržíme „supermetrickou“ teorii gravitace. Postnewtonovská limita každé metrické teorie je pak speciálním případem této super-teorie. Proto každá metrická teorie předpovídá stejné pozorovatelné efekty ve sluneční soustavě; avšak *velikost* efektů bude záviset na číselných hodnotách koeficientů odpovídajících příslušné teorii. Na experimenty měřící velikost různých efektů lze pak nahlížet jako na měření „správných“ hodnot koeficientů γ, β atd. Věřme, že soubor vysoce přesných experimentálních měření těchto koeficientů nám dovolí vybrat ze superteorie tu teorii gravitace, která nejlépe souhlasí s experimentem.

Užití postnewtonovských koeficientů nebo parametrů ke studiu metrických teorií gravitace a rozboru experimentálních testů se nazývá „parametrizovaný postnewtonovský“ (PPN) formalismus a příslušné koeficienty se nazývají PPN-parametry. Primitivní verze tohoto formalismu byla studována již roku 1922 ARTHUREM ADDINGTONEM ([10]) a později H. P. ROBERTSONEM ([11]) a Schiffem ([12]); obecnější verze byla nedávno použita KENNETHEM NORDTVEDTEM ([13]) a autorem ([14]). V současné verzi PPN-formalismu je až devět parametrů, z nichž každý měří nebo popisuje konkrétní

fyzikální vlastnosti metrických teorií gravitace. Názvy těchto parametrů a heuristický popis jejich fyzikálního významu jsou v tabulce I včetně jejich číselných hodnot v několika speciálních teoriích. Zbývající testy v našem teoretickém systému analyzujeme pomocí PPN-formalismu.

Ohyb světla a zpoždění radarového signálu

Jak ohyb světelných paprsků Sluncem (obr. 2), tak zpoždění radarového signálu, který prochází po uzavřené dráze kolem Slunce, určují parametr γ . Světelný paprsek (nebo foton), který projde kolem Slunce, je odkloněn o úhel

$$(1) \quad \delta\theta = (1/2) (1 + \gamma) (1,75/d)$$

nezávisle na frekvenci světla, kde d je vzdálenost nejbližšího bodu paprsku od Slunce v jednotkách slunečního poloměru a $\delta\theta$ je odklon paprsku v úhlových vteřinách. Radarový signál procházející sluneční soustavou kolem Slunce k planetě nebo družici a vracující se zpět na Zem se v důsledku newtonovských efektů zpozdí o

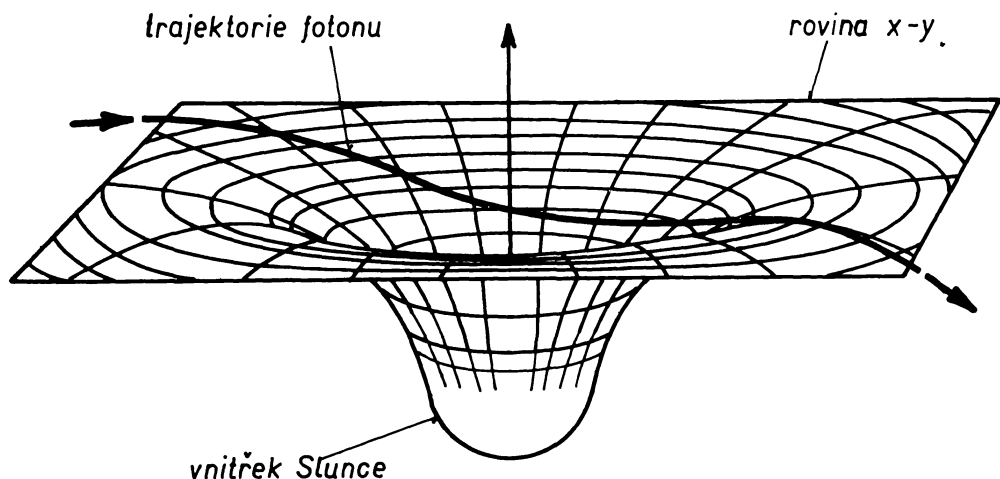
$$(2) \quad \delta t = (1/2) (1 + \gamma) [250 - 20 \ln (d^2/r)],$$

kde r je vzdálenost planety nebo družice od Slunce v astronomických jednotkách,

Tabulka I

Parametrizace metrických teorií gravitace

Parametr	Co měří vzhledem k obecné relativitě	Hodnoty v různých teoriích				
		Obecná relativita	Dickeho-Bransova-Jordanova teorie	Vektor-tenzorová teorie	Yilmazova teorie	Papa-petrouova teorie
γ	Jak velké zakřivení prostoru vytváří jednotková hmota?	1	$\frac{(1 + \omega)}{(2 + \omega)}$	1	1	1
β	Jak velká je nelinearita v zákonu superpozice pro gravitaci?	1	1	1	1	1
α_1	V jaké míře a jakým způsobem teorie vyděluje preferovaný univerzální klidový systém?	0	0	0	-8	-8
α_2		0	0	$\kappa^2/(1 + \frac{1}{2}\kappa^2)$	0	-4
α_3		0	0	0	-4	0
ξ_1	Jak velké a jakého druhu narušení zákona zachování celkové hybnosti teorie předpovídá?	0	0	0	0	0
ξ_2		0	0	0	-2	0
ξ_3		0	0	0	0	0
ξ_4		0	0	0	-1	0



Obr. 2. Zakřivení prostoru a šíření světla.

Obecní relativisté si rádi vytváří představu zakřivení prostoru metrických teorií gravitace pomocí tzv. diagramu „vnoření“. Na obr. je znázorněn tento diagram pro Slunce. Zborčená plocha je vlastně rovina xy (aby bylo možno diagram narysovat vynecháváme osu z). Kdyby platila Newtonova teorie gravitace, byla by tato plocha přesně rovná a platil by euklidovský vzorec pro vzdálenosti: $d = \sqrt{(x^2 + y^2)}$. To diagram znázorňuje „natažením“ roviny xy v blízkosti Slunce. (Poněvadž naše smyslové vnímání je omezené, potřebujeme k znázornění tohoto natažení třírozměrný obrázek.) Tak foton pohybující se v rovině xy a procházející těsně podél Slunce, projde delší dráhu, protože musí projít „nataženou“ částí prostoru; tj. musí poklesnout do prohlubně diagramu. Toto „poklesnutí“ je příčinou dodatečného „časového zpoždění“ signálu (zbytek zpoždění je způsoben speciálně relativistickým efektem). Zakřivení prostoru též způsobuje ohyb světelného paprsku: okraj prohlubně je podobný krajnici vozovky, která může změnit směr jízdy automobilu, aniž bylo pootočeno volantem. Zakřivení prostoru tak dává známý ohyb světelného paprsku Sluncem (spolu s ohybem, který je důsledkem speciální relativity).

δt je zpoždění v mikrosekundách. Měření těchto dvou efektů dává dosud nejpresnější hodnoty parametru γ .

Předpověď ohybu světla Sluncem byla jedním z největších úspěchů Einsteiny obecní relativity. EDDINGTONOVO potvrzení ohybu v prvních dnech po 1. světové válce pomohlo Einsteinovi ke slávě. Avšak experimenty, které prováděl Eddington se spolupracovníky, měly jen přesnost třiceti procent a další experimenty nebyly o mnoho lepší: výsledky byly mezi polovinou a třemi polovinami Einsteiny hodnoty, chyby byly velké. Ale rozvoj radiointerferometrie o dlouhé základně změnil situaci. Radiointerferometry o dlouhé základně a o velmi dlouhé základně*) dovolují principiálně měřit úhlové rozdíly a změny v úhlech až do $3 \cdot 10^{-4}$ úhlových vteřin. S tímto technologickým pokrokem se snoubí jedna nebeská náhoda: každého 8. října procházejí v těsné blízkosti Slunce (viděno ze Země) dva silné kvasistelární rádiové zdroje (kvasary) 3 C 273 a 3 C 279.

*) Rádioteleskopy jsou při těchto pozorováních vzdáleny až 10 000 km (např. jeden přístroj v Kalifornii, druhý v Austrálii).

(Kvasar 3 C 279 prochází ve skutečnosti za Sluncem.) Měřením relativních ohybů signálů z těchto dvou kvasarů během posledních let radioastronomové určili koeficient $(1/2)(1 + \gamma)$ ve vztahu (1), který má hodnotu 1 pro obecnou relativitu. Jejich výsledky ([16]) vidíme v tabulce II.

Jedním z největších zdrojů chyb v těchto experimentech je sluneční korona, která ohýbá rádiové signály mnohem více, než ohýbá paprsky viditelného světla, jež pozoroval Eddington. Měření na dvou frekvencích může zlepšit přesnost tím, že odliší ohyb sluneční korunou; tento ohyb závisí na frekvenci od gravitačního ohybu, který na frekvenci nezávisí.

Zpoždění radarového signálu nebylo Einsteinem předpověděno; bylo to roku 1964, kdy tento jev objevil IRWIN SHAPIRO ([17]) jako teoretický důsledek obecné relativity a jiných teorií gravitace (viz vztah (2)). V následujících letech byly činěny pokusy měřit tento efekt radarovým zaměřením objektů procházejících „vzdálenou konjunkcí“ (objekt na opačné straně Slunce; radarový signál prochází podél Slunce). Byly využity dva typy objektů: planety jako Merkur a Venuše, užitě jako pasivní odražeče radarových signálů, a umělé družice Mariner VI a Mariner VII, které signál „odrážejí“ aktivně: po přijetí signálu okamžitě vyšlou signál zpět k Zemi. Podrobný rozbor měřené doby potřebné pro cestu signálu k objektu a zpět dává výsledky uvedené v tabulce II. Zde stejně jako v experimentech s ohybem světla sluneční korona způsobuje neurčitost v měřeních, protože zpomalí radarový signál; opět je to měření s dvojitou frekvencí, které pomůže tyto chyby vyloučit.

Na obr. 1 vidíme, že NORDSTRØMOVA a LITTLEWOODOVA-BERGMANNOVA teorie nepředpovídají ani ohyb světla ani zpoždění radarového signálu ($\gamma = -1$), Einsteinova teorie z roku 1912 (nikoliv obecná relativita) a WHITHROWOVA a MORDUCHOVA teorie předpovídají polovinu pozorovaného jevu ($\gamma = 0$). Tyto teorie jsou tím vyloučeny.

Tabulka II

Měření PPN-parametru γ

Typ experimentu	Experimentátoři (a datum provedení experimentu)	Hodnota $(1/2)(1 + \gamma)$
Ohyb světla měřený rádiovou interferometrií	Muhleman, Ekers, Fomalont (říjen 1969)	$1,04 \pm 0,15$ $- 0,10$
	Seielstad, Sramek, Weiler (říjen 1969)	$1,01 \pm 0,12$
	Hill (říjen 1970)	$1,07 \pm 0,17$
	Shapiro se spolupracovníky (říjen 1970)*)	$1,03 \pm 0,2$
	Sramek a Fomalont (říjen 1970 a říjen 1971)*)	$0,94 \pm 0,06$
Časové zpoždění radarového signálu	pasivní radarové zaměřování Merkura a Venuše	$1,02 \pm 0,05$
	aktivní radarové zaměřování Marineru 6 a Marineru 7	$1,00 \pm 0,04$

*) Nepublikované výsledky.

Některé teorie na tom po testu 3 nejsou příliš dobře, ale nemůžeme je zatím zcela vyloučit; jsou to skalár-tenzorové teorie, jejichž speciálním případem je Dickeho-Bransova-Jordanova teorie. Tyto teorie obsahují bezrozměrnou „vazbovou konstantu“ ω , která může nabývat hodnot v intervalu od $-3/2$ do nekonečna (v limitě $\omega \rightarrow \infty$ se tyto teorie redukují na obecnou relativitu). Aby tyto teorie např. souhlasily s experimentem v rámci dvou standardních odchylek, musí být $\omega > 6$. Avšak hodnoty z rozličných experimentů a uvedené pravděpodobné chyby při měření paramentru $(1/2)(1 + \gamma)$ v současné době nedovolují tyto teorie vyloučit.

Stáčení perihélia

V posledních letech se teoretická interpretace stáčení perihélia planet stává stále složitější. Změřené hodnoty stáčení perihélií jsou známy přesně: po odečtení vlivu jiných planet a vlivu „obecné precese“ zemské osy rotace stáčí se Merkurovo perihélium o 43 úhlových vteřin za století; toto stáčení je známo s přesností jednoho procenta z radarového zaměřování planet ([19]). Po odečtení uvedených efektů činí stáčení pro Zemi 4 úhlové vteřiny za století a je známo s přesností asi 10%. K vysvětlení stáčení perihélia se užívá tří efektů: klasické stáčení, zploštění Slunce a stáčení vůči preferovanému vztažnému systému.

V souhlase s PPN-formalismem závisí klasické stáčení perihélia na parametrech γ a β , tj. závisí na křivosti prostoru a na nelinearitě gravitačního pole Slunce. Pro obecnou relativitu je klasické stáčení perihélia v úplném souhlase s pozorováním.

Slunce může být trochu zploštělé a toto zploštění může způsobovat dodatečné stáčení perihélia Merkuru až o čtyři úhlové vteřiny za století. Avšak čím menší je zploštění Slunce, tím menší je dodatečné stáčení.

Některé metrické teorie gravitace vybírají určitý systém, který je v klidu vůči Vesmíru jako „preferovaný“ vztažný systém. Příklady těchto teorií jsou teorie C. PAGEOVA, B. O. J. TUPPERA, HUSEYIMA YILMAZE, A. PAPAPETROUA, W. - T. NIOVA, C. J. COLEMANA a NATHANA ROSENA a vektor-tenzorová teorie gravitace rozvinutá Nordtvedtem a autorem ([3], [15]). Kdyby sluneční systém byl v klidu vůči klidovému systému Vesmíru, většina těchto teorií by souhlasila s obecnou relativitou co se týče předpovědi všech „klasických“ testů. Ale sluneční systém se patrně pohybuje Vesmírem rychlostí asi 200 km za sec (v důsledku svého pohybu uvnitř Galaxie a pohybu Galaxie vůči jiným galaxiím) a tento pohyb by mohl podle zmíněných teorií způsobit pozorovatelné efekty ve sluneční soustavě, jejichž velikost závisí podle PPN-formalismu na parametrech „preferovaného systému“ α_1 , α_2 a α_3 (viz tab. I; všimněte si, že ani obecná relativita ani skalár tenzorové teorie nepředpovídají takovéto jevy $-\alpha_1$, α_2 a α_3 jsou nulové.). Jeden z těchto jevů je anomální stáčení perihélia Merkura a Země ([21]). Ve skutečnosti mnoho teorií s preferovaným systémem předpovídá tak velké anomální stáčení perihélia (stovky a tisíce úhlových vteřin za století), že je pozorování vylučují, i když existuje neurčitost 4 úhlových vteřin způsobená možným zploštěním Slunce.

Neurčitost hodnot způsobená zploštěním Slunce nedovoluje vyloučit skalár-tenzorové

a vektor-tenzorové teorie (viz obr. 1): jejich předpovědi se liší od předpovědi obecné relativity o méně než 4 úhlové vteřiny za století.

Geofyzikální jevy

Teorie gravitace s preferovaným systémem předpovídají dva druhy geofyzikálních jevů způsobených pohybem Země rychlostí 200 km/sec Vesmírem, které opět závisí na parametrech α_1 , α_2 a α_3 . Nejdůležitější z těchto jevů jsou: přílivy a odlivy pevných zemských mas, které mají periodu dvanáct hodin hvězdného času a jsou analogické přílivům a odlivům tuhé zemské hmoty způsobené Měsícem a Sluncem*) a změny v periodě rotace Země během roku. Údaje o přílivu zemských mas obdržené pomocí vysoce přesných gravimetrů a údaje o délce dne, získané pomocí atomových hodin, podstatně omezují velikost těchto jevů související s preferovaným systémem. Omezení jsou tak silná, že by opět vyloučila všechny teorie s preferovaným systémem, které již byly vyloučeny testem 4. Tyto teorie tedy zklamaly v obou testech. Vektor-tenzorová teorie je měřením přílivu zemských mas téměř vyloučena – měření nedovolují, aby vazbová konstanta κ této teorie byla větší než $3 \cdot 10^{-2}$ (v limitě $\kappa \rightarrow 0$ se tato teorie redukuje na obecnou relativitu).

Jinou teorií, kterou vylučují geofyzikální testy je teorie, která byla trnem v oku pro Einsteinovu stranu již od jejího zavedení roku 1922 Alfredem Northem Whiteheadem ([3], [39]). Whiteheadova teorie, třebaže je velmi jednoduše a elegantně formulována, je tak složitá ve svých matematických detailech, že dokonce nevyhovuje PPN-formalismu s devíti parametry (jako jediná dosud známá metrická teorie). Nicméně souhlasí s Einsteinem ve svých předpovědích pro všechny klasické testy a všemi předešlými lehce proplová. Nedávno však bylo zjištěno ([22]), že předpovídá dvěstěkrát větší hodnotu pro výše zmíněné přílivy a odlivy zemské hmoty způsobené Galaxií, než dovolují pozorování. Tak byla Whiteheadova teorie zabita testem 5 po padesáti letech života.

Diskutovali jsme teorie gravitace, které byly vyloučeny pětici testů našeho teoretického systému. A co teorie, které prošly všech pět testů a jsou životaschopné? Obecná relativita prošla s úspěchem, pokud zploštění Slunce je dost malé, takže příspěvek zploštění ke stáčení perihélia Merkuru je menší než experimentální chyba ($\pm 0,4$ úhlové vteřiny za století). Dickeho-Bransova-Jordanova teorie a skalár-tenzorové teorie projdou všech pět testů, pokud jejich vazbová konstanta ω je větší než 6. Výsledky budoucích experimentů s ohybem světla a zpožděním radarového signálu mohou posunout dolní hranici pro ω ještě výše.

Vektor-tenzorové teorie všech pět testů projdou, pokud jejich vazbová konstanta κ je menší než $3 \cdot 10^{-2}$. Mohou existovat jiné teorie, ať už dosud nenalezené nebo ještě nevybrané z literatury a nepřezkoušené, které vyhovují všem současným testům našeho teoretického systému.

*) Připomeňme, že podobně jako nehomogenity gravitačního pole Měsíce a Slunce vyvolávají přílivy a odlivy oceánů, působí i na zemskou kůru a na atmosféru. I „přílivy a odlivy“ tuhé země jsou měřitelné.

Budoucí testy

Existují dva druhy budoucích testů teorií gravitace, které náš teoretický systém obsáhne: vylepšení starých experimentů a experimenty zcela nové.

Teorie dnes životaschopné by měly znovu projít vylepšenými verzemi testů 2–5. Mnohá zdokonalení těchto testů jsou plánována již v příštích letech. Hodiny používající vodíkového maseru na dráze kolem Země mohou zvětšit přesnost měření gravitačního rudého posuvu o několik řádů ([23]). (Nedávno obyčejné tryskové letadlo s atomovými hodinami na palubě obletělo Zemi a ukázalo se jen zpoždění hodin v relativním pohybu – tzv. dilatace času – jev známý ze speciální teorie relativity; gravitační rudý posuv byl na hranici jejich přesnosti.) Jsou studovány možnosti dalšího zpřesnění Eötvösova pokusu s využitím orbitálních stanic s lidskou posádkou ([24]). Tyto experimenty jsou důležité, neboť (jak jsme uvažovali výše) ukazují, že správná teorie gravitace musí být metrickou teorií.

Rozhodujícím testem skalár-tenzorových teorií je test 3. Plánovaná vylepšení v experimentech s ohybem světla a zpožděním radarového signálu zahrnují: více experimentů metodou dvojí frekvence, aby se vyloučily nejasnosti způsobené sluneční korunou; radarové zaměřování kosmických lodí na oběžných drahách kolem planet nebo přímo na jejich povrchu (tzv. „zakotvené kosmické lodí“) a kosmických lodí, u kterých jsou redukovány vlivy slunečního větru a tlaku záření na jejich pohyb. Klíčovým v těchto snahách bude let kosmické lodi Viking na Mars roku 1975; žádný jiný planovaný let nepočítá se „zakotvením“ lodí, která s sebou nese radar s dvojí frekvencí.

Postupující shromažďování údajů o pohybech planet povede k zlepšenému měření stáčení perihélií Marsu a Země a dovolí snad přímé měření vlivu slunečního zploštění na planetární orbity ([19]).

Bylo navrženo mnoho nových experimentálních testů gravitačních teorií a některé z nich budou uskutečněny v následujících letech. Měření pomalé precese rotačních os supravodivých setrvačníků na oběžné dráze kolem Země je plánováno na konec tohoto desetiletí skupinou pracovníků na Stanfordské universitě. Tyto experimenty měří dva druhy precese: geodetickou precesi vznikající zakřivením prostoru okolo Země, která je $(1/3)(1 + \gamma)$ tj. 7 úhlových vteřin za rok a LENSOVU-THIRINGOVU precesi, která je důsledkem rotace Země*) $(1/2)(1 + \gamma + \alpha^1/4)$ tj. 0,05 úhlové vteřiny za rok. Doufá se, že přesnost těchto experimentů bude 0,001 úhlové vteřiny za rok.

Laserové zaměřování Měsíce s přesností větší než 30 cm může potvrdit nebo vyloučit mnoho gravitačních jevů. Jsou to např.: neekvivalence mezi setrvačnou a gravitační hmotou Země (Nordtvedtův jev) předpovídaná většinou teorií až na obecnou relativitu; některé jevy předpovídají teorie gravitace s preferovaným vztažným systémem, jako např. vektor-tenzorová teorie ([21]) a jevy vznikající nelineární superpozicí polí Slunce a Země, které dává i obecná relativita ([27]).

Studium stability a pulsace bílých trpaslíků může dokonce přinést ještě silnější omezení na teorie s preferovaným souřadným systémem, jako je např. vektor-tenzorová

*) Gravitační pole rotujícího tělesa se v polních teoriích gravitace liší od pole tělesa nerotujícího (o precesi setrvačnicku v gravitačním poli Země viz např. [38]).

teorie, anebo na jiné, které by mohly projít pěti testy našeho síta. Ni ukázal, že tyto teorie předpovídají růst amplitudy pulsací bílých trpaslíků způsobené jejich pohybem vůči klidovému systému Vesmíru, což není v soulase s pozorováním. Avšak v klasické teorii tlumení pulsací bílých trpaslíků zůstávají podstatné nejistoty.

Radarové a optické výzkumy pohybu planet mohou zmenšit horní mez pro možné pomalé změny newtonovské gravitační konstanty ([28]). Takováto změna nemůže být analyzována v rámci PPN-formalismu, protože je důsledkem změn v intenzitě kosmologických skalárních, vektorových a tenzorových polí, jejichž příčinou je vyvíjející se Vesmír. Nicméně lepší omezení změny gravitační konstanty by dovolilo odlišit obecnou relativitu a různé skalár-tenzorové a vektor-tenzorové teorie. Současná horní mez je ([28]) změna $4 \cdot 10^{-10}$ během jednoho roku, což je zatím příliš slabé ohraničení, ale zpřesnění je již plánováno.

Padesátšedm let uběhlo od vytvoření Einsteinovy obecné relativity a po padesátšedm let je tato teorie ostře sledována. Zatím jak jsme viděli, je stále životaschopná, ale to je i několik jiných teorií. Jeden z klíčových cílů následujícího desetiletí je posunout možnosti experimentálních testů gravitačních teorií k hranicím jejich možností tak, že nakonec zůstane jen jedna teorie. Může to být obecná relativita nebo některá jiná teorie. Ale až pak budou moci teoretičtí astrofyzikové vyzbrojení správnou teorií gravitace pokračovat s důvěrou ve vzrušujících snahách porozumět Vesmíru.

Literatura

- [1] Proceedings of the Conference on Experimental Tests of Gravitation Theories (red. DAVIES, R. W.), NASA-JPL Technical Memorandum 33-499 (1971).
- [2] BRAGINSKY, V. B., RUDENKO, V. N., Usp. fiz. nauk 13 (1970), 165.
- [3] THORNE, K. S., WILL, C. M., NI, W.-T. ve sborníku [1]; NI, W.-T., Astrophys. J. 176 (1972), 769.
- [4] POUND, R. V., SNIDER, J. L., Phys. Rev. 140 (1965), B 788.
- [5] SCHIFF, L. I., AM. J. PHYS. 28 (1960), 340; DICKE, R. H., ve sborníku Relativity Groups and Topology, Gordon and Breach, New York (1963).
- [6] EÖTVÖS, R. V., PEKAR, D., FEKETE, E., Ann. Physik 68 (1922), 11.
- [7] ROLL, P. G., KROTKOV, R., DICKE, R. H., Ann. Physics, 26 (1964), 442.
- [8] BRAGINSKY, V. B., PANOV, V. I., ŽETF 61 (1971), 875.
- [9] SCHILD, A., ve sborníku Evidence for Gravitational Theories (red. MØLLER, C.) Academic, New York (1962).
- [10] EDDINGTON, A. S., *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge University Press, London (1922).
- [11] ROBERTSON, H. P., ve sborníku Space Age Astronomy (DEUTSCH, A. J., KLEMPERER, W. B. red.) Academic, New York (1962).
- [12] SCHIFF, L. I., ve sborníku Relativity Theory and Astrophysics. I. Relativity and Cosmology (red. EHLERS, J.) Am. Math. Soc., Providence, R. I. (1967).
- [13] NORDVEDT JR., K., Phys. Rev. 169 (1968), 169.
- [14] WILL, C. M., Astrophys. J. 163 (1971), 611.
- [15] WILL, C. M., NORDVEDT JR., K. v Astrophys. J., 1 Nov. 1972.
- [16] MUHLEMAN, D. O., EKERS, R. O., FOLAMONT, E. B., Phys. Rev. Lett. 24 (1970), 1377; SEISELSTAT, G. A., SRAMEK, R. A., WEILER, K. W., Phys. Rev. Lett. 24 (1970), 1373; HILL, J. M., Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 153 (1971), 7P; SRAMEK, R. A., Astrophys. J. 167 (1971), L55.

- [17] SHAPIRO, I. I., *PHYS. REV. LETT.* 13 (1964), 789; MUHLEMAN, D. O., REICHLEY, P., *Space Programs Summary* 37—29 Vol. IV, 342, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (1964).
- [18] SHAPIRO, I. I., ASH, M. E., INGALLS, R. P., SMITH, W. B., CAMPBELL, D. B., DYCE, R. B., JURGENS, R. F., PETTENGILL, G. H., *Phys. Rev. Lett.* 26 (1971), 1332; ANDERSON, J. D., ESPOSITO, P. B., MARTIN, W. L., MUHLMAN, D. O., ve sborníku [1].
- [19] SHAPIRO, I. I., ve sborníku [1].
- [20] DICKE, R. H., GOLDENBERG, H. M., *Phys. Rev. Lett.* 18 (1967), 313; DICKE, R. H., *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 8 (1970), 297; *Astrophys. J.* 159 (1970), 1; INGERSOLL, A. P., SPIEGEL, E. A., *Astrophys. J.* 163 (1971), 375.
- [21] NORDVEDT JR., K., WILL, C. M., v *Astrophys. J.* 1 Nov. 1972.
- [22] WILL, C. M., *Astrophys. J.* 169 (1971), 141.
- [23] VESSOT, R. F. C., ve sborníku [1].
- [24] CHAMPMAN, P. K., HANSON, A. J., ve sborníku [1].
- [25] EVERITT, C. W. F., FAIRBANK, W. M., ve sborníku [1].
- [26] NORDVEDT JR., K., *Phys. Rev.* 169 (1968), 1014.
- [27] BAIERLEIN, R., *Phys. Rev.*, 162 (1967), 1275.
- [28] SHAPIRO, I. I., SMITH, W. B., ASH, M. E., INGALLS, R. P., PETTENGILL, G. H., *Phys. Rev. Lett.* 26 (1971), 27; SHAPIRO, I. I., ve sborníku [1].
- [29]* HEWISH, A., *Čs. čas. fyz. A* 20 (1970), 157.
- [30]* GINZBURG, V. L., *Čs. čas. fyz. A* 22 (1972), 349.
- [31]* ZÁVĚTA, K., ZÁVĚTOVÁ, M. *Čs. čas. fyz. A* 20 (1970), 94.
- [32]* SCIAMA, D. W., *Čs. čas. fyz. A* 21 (1971), 52.
- [33]* BIČÁK, J., *Čs. čas. fyz. A* 18 (1968), 725.
- [34]* LANGER, J., *Čs. čas. fyz. A* 18 (1968), 357.
- [35]* BIČÁK, J., *Čs. čas. fyz.*, A 22 (1972), 107.
- [36]* HORSKÝ, J., *Pokroky MFA* 11 (1968), 351.
- [37]* KUCHAR, K., *Základy obecné teorie relativity*, Praha, Academia, 1968.
- [38]* LANGER, J., *Pokroky MFA* 13 (1968), 333.

* Literatura k poznámkám.

*Přeložil Roman Kotecký,
poznámkami opatřil Jiří Bičák*

Matematické pojmy a metody mají ohraničenou obecnost, neboť neexistují universální metody, které by mohly efektivně řešit všechny problémy, které souvisejí s rozmanitostí kvalitativně různých oblastí skutečnosti.

Matematizace vědy dává jiným vědám především matematický jazyk popisující skutečnost, matematické modelování různých procesů a matematické metody zkoumání objektivních zákonitostí stavby a rozvoje vědeckých teorií. O hranicích matematizace vědy má smysl hovořit pouze ve vztahu úlohy této metody k poznání. Nehledě na všechny jeho přednosti, matematická metoda může být užitečná pouze ve spojení s jinými

metodami poznání. Absolutizace její úlohy v bádání nemůže přinést nic kromě rozčarování.

Úloha matematiky není „býti služkou“ vědám, v kterých je používána. Matematika umožňuje svými metodami vyjádřit takové vztahy, které je neshadné nebo dokonce nemožné dostat nematematickou cestou.

Jestliže na jedné straně matematika formuluje problémy získané nematematickými metodami, pak se v další fázi její úloha mění, matematika se aktivně podílí na tvorbě nových teorií, jejichž interpretace je třeba teprve najít.