

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Grygar

Astronomické testy teorie relativity

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 29 (1984), No. 5, 274--280

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137987>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1984

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>

Astronomické testy teorie relativity

Jiří Grygar, Řež

„Einsteinova dekáda“ 1905–1915 způsobila převrat především ve fyzice, ale i ve filozofickém myšlení přírodovědců. Podivuhodná fyzikální koncepce teorie relativity nejenže nezestárla, ale prakticky až dodnes ji nebylo třeba opravovat (s malou výjimkou: objev reliktového záření kosmického pozadí v roce 1965 ukázal, že existuje preferovaná vztažná soustava ve vesmíru, v níž se pozorovatelé jeví reliktové záření přesně izotropní); stala se naopak východiskem k dalšímu rozvoji teoretické fyziky a kosmologie. Einsteinova teorie rychle překonala Newtonovu koncepci gravitace; nepřímo však vyvolala úsilí o sestavení alternativních gravitačních teorií. Je tedy dosti důvodů ke snahám ověřit či spíše prověřit platnost speciální teorie relativity (STR) i obecné teorie relativity (OTR) vhodně volenými experimenty [1].

Je známo, že odchylky od klasické teorie nabývají měřitelných hodnot teprve v silných gravitačních polích anebo při rychlostech částic srovnatelných s rychlostí světla. Z toho důvodu byl až donedávna vesmír jedinou myslitelnou laboratoří, v níž bylo možno ověřovat důsledky STR a OTR. Tato situace se sice změnila, když byly uvedeny do chodu obří urychlovače částic a když se výrazně zvýšila citlivost a přesnost laboratorních fyzikálních metod. Dodnes však astronomické testy teorie relativity patří ke zcela zásadním. Navíc rozvoj astronomie přinesl objevy objektů, kde relativistické řešení nemá charakter pouhých korekcí klasických vztahů, nýbrž je naprosto nezbytné pro fyzikální výklad vlastností těchto těles.

1. Základní testy teorie relativity

Při formulaci OTR navrhl Albert Einstein tři základní testy, jejichž úspěšné ověření značně přispělo k rychlému přijetí myšlenek teorie relativity.

Einsteinovi se především podařilo nenásilně vysvětlit pozorované nadbytečné *stáčení perihélia eliptické dráhy planety Merkura*. Velká poloosa elipsy Merkurovy dráhy kolem Slunce se stáčí ve směru oběhu a v oběžné rovině o $529''$ za století (úplná otočka trvá 245 000 let). Stáčení lze z větší části objasnit poruchovým gravitačním působením ostatních planet a jeho existence byla zprvu jen dalším potvrzením platnosti Newtonova gravitačního zákona. Nicméně přesnost astrometrických měření i poruchových výpočtů dosáhla v polovině 19. století takové úrovně, že vypočtené a pozorované stáčení se od sebe měřitelně lišilo o hodnotu $43''$ za století – o tomto efektu však A. Einstein v době své práce na OTR pravděpodobně nevěděl. Astronomové té doby vysvětlovali odchylku přítomností neznámé planety obíhající uvnitř Merkurovy dráhy a rušící dráhu Merkura (planeta Vulkán).

Předneseno na semináři „Nové impulsy“, pořádaném dne 5. září 1983 odbornou skupinou Pedagogická fyzika FVS JČSMF a katedrou fyziky UJEP ve Třech Studních na Vysočině.

V OTR platí pro relativistické stáčení perihélia, respektive periastra vztah

$$(1) \quad \varepsilon'' = 3,34'' \cdot 10^{28} \cdot (1 - e^2)^{-1} \cdot a^{-5/2} \cdot M(\odot),$$

kde ε'' je úhel, o nějž se pootočí perihélium (periastrum) za *století*, e je numerická excentricita eliptické dráhy, a je hlavní poloosa eliptické dráhy (v metrech) a $M(\odot)$ je hmotnost centrálního tělesa v jednotkách hmotnosti Slunce ($= 2 \cdot 10^{30}$ kg). Efekt se tedy projevuje u všech planet sluneční soustavy; u Merkura je největší především díky značné excentricitě Merkurovy dráhy ($e = 0,206$) a malé hodnotě poloosy ($a = 5,8 \cdot 10^{10}$ m).

Druhý z testů, totiž *ohyb světelných paprsků v gravitačním poli*, je historicky nejznámější. Podle Einsteinovy předpovědi je obraz hvězdy, jejíž průmět do roviny kolmé k zornému paprsku se nachází v lineární vzdálenosti D od středu centrálního tělesa o hmotnosti M , odsunut od středu tělesa o úhel δ . Vyjádříme-li hmotnost centrálního tělesa a vzdálenost průmětu nerušeného obrazu hvězdy od středu tělesa v jednotkách hmotnosti a poloměru Slunce, obdržíme pro úhel δ (v obl. vteřinách):

$$(2) \quad \delta'' = 1,75'' \cdot M/D,$$

tj. hvězda, promítající se přesně na okraj slunečního kotouče je od něho zdánlivě odsunuta o úhel $1,75''$. Efekt je tedy měřitelný jen v blízkosti slunečního disku, což přináší nemalé technické problémy: v blízkosti Slunce nejsou vidět ani nejjasnější hvězdy.

Naštěstí existují nedlouhé intervaly úplných slunečních zatmění, při nichž je obloha dostatečně temná a lze vyfotografovat jasné hvězdy v nevelké vzdálenosti od slunečního kotouče. Úplná zatmění však trvají na daném pozorovacím stanovišti maximálně 7 minut a pás totality je široký jen desítky až stovky kilometrů, takže se téměř vždy „vyhýbá“ místům, kde jsou umístěny stabilní astronomické observatoře. Nezbyvá než za zatměními konat expedice, což v případě přesných astrometrických měření není vůbec jednoduché (navíc se táž část oblohy musí fotografovat s odstupem šesti měsíců před zatměním nebo po něm, aby bylo možné snímky vzájemně porovnat).

První takové expedice, zaměřené na prověrku zmíněného důsledku teorie relativity, vykonali britští astronomové v roce 1919. Expedice se osobně zúčastnil Sir A. Eddington, jeden z nejvýznamnějších světových astrofyziků, který sám označil svou účast na celé akci za nejvíce vzrušující událost svého vztahu k astronomii [2]. Výsledky měření byly předloženy vědecké veřejnosti na schůzi britské Královské společnosti dne 6. listopadu 1919 a dobrý souhlas měření s předpovědí se stal doslova reklamou správnosti OTR – od tohoto okamžiku byl Einstein rázem nejznámější vědeckou osobností na světě. V roce 1983 byly fotografické desky z expedic v r. 1919 znovu proměřeny na moderních komparátorech. Odtud byla určena hodnota Einsteinovy odchylky pro okraj slunečního kotouče $\delta = (1,87 \pm 0,13)''$.

Tento úspěch má poněkud pikantní příchuť. Einstein totiž v prvních odvozeních stanovil pro koncepční chybu přesně poloviční hodnotu zmíněné odchylky. V té době probíhající první světová válka však znemožnila jakoukoliv výpravu za úplným zatměním Slunce a než válka skončila, Einstein chybu opravil. Sotva lze odhadnout, jak by dopadlo přijetí teorie relativity, kdyby ranější expedice našla odchylku dvojnásobnou anebo naopak rovnou chybné hodnotě!

Třetí předpověď se *týká posuvu spektrálních čar k červenému konci spektra* v silném gravitačním poli. Příslušný vztah je formálně obdobný předešlému, takže pro červený posuv $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ obdržíme

$$(3) \quad z = 2,1 \cdot 10^{-6} M/R,$$

kde M je hmotnost centrálního tělesa (v jednotkách hmotnosti Slunce) a R vzdálenost vrstvy, v níž spektrální čára vzniká, od středu centrálního tělesa (v jednotkách poloměru Slunce; poloměr Slunce je zhruba $7 \cdot 10^8$ m). Červený posuv ve spektru Slunce je poměrně malý a donedávna byl na hranici měřitelnosti. Mnohem nadějnějším kandidátem jsou gravitačně zhroucené objekty. V době vzniku OTR astronomové právě dokazovali, že tzv. bílí trpaslíci jsou hvězdy o hmotnostech srovnatelných s hmotností Slunce, avšak s řádově 10^2 krát menším poloměrem, takže na těchto objektech by měl být efekt dobře měřitelný. Naneštěstí nemáme nezávislé určení radiální složky prostorové rychlosti osamělých bílých trpaslíků (pokud se objekt od nás vzdaluje, vlivem Dopplerova jevu dochází rovněž k červenému posuvu spektrálních čar) a navíc jsou spektra bílých trpaslíků chudá na spektrální čáry, jež jsou kromě toho silně rozšířené, takže jejich polohy se dají obtížně měřit.

Z toho důvodu jednotlivá měření nepřinášela zprvu žádný ověřitelný efekt a úspěch měla až statistická zjištění červených posuvů v souborech bílých trpaslíků a případně měření nadbytečného červeného posuvu ve spektru bílého trpaslíka, jenž obíhá kolem těžiště těsné dvojhvězdy. Taková měření se ukutečnila až po druhé světové válce a v zásadě (i když s nevelkou přesností) potvrzují předpověděný efekt.

2. Nové testy teorie relativity

Nové testy teorie relativity vyplynuly jednak ze zavedení nových pozorovacích technik (radioastronomie, atomové normály času a frekvence) a jednak z objevů dříve zcela neznámých typů kosmických těles (pulsary – neutronové hvězdy, kvasary) [3].

Nejlepší výsledky, pokud jde o přesnost, dává měření relativistického *zpoždění radarových nebo telemetrických signálů* ve sluneční soustavě, pokud se šíří v blízkosti slunečního povrchu. Jakmile bylo technicky možné přijímat rádiové signály vyslané se Země a odrážené od povrchu planet (Venuše, Merkur, Mars), dalo se ze znalosti drah těchto těles odvodit zpoždění odražených signálů a porovnat je s předpovědí OTR. Později k tomu přibyl přenos telemetrických informací mezi pozemními stanicemi a kosmickými sondami Mariner a Viking. Předpověděná zpoždění často dosahují hodnot až několika desetin milisekund, což lze snadno měřit prostředky moderní radiotechniky. V současné době je to nejpresnější astronomická metoda ověřování OTR vůbec.

Podobně se podařilo zlepšit měření *ohybu elektromagnetického signálu v blízkosti Slunce*, a to na rádiových vlnách. Radioastronomové objevili před čtvrt stoletím bodové rádiové zdroje, jejichž polohy dokáží určit s přesností lepší, než je tomu u hvězd v optické astronomii. Jestliže Slunce během svého zdánlivého postupu po obloze některý zdroj zakryje anebo se k němu těsně přiblíží, lze takto testovat předpověď o ohybu paprsků v gravitačním poli Slunce. Zvláště vhodná je k tomu účelu dvojice kvasarů 3C–273

a 3C–279 v souhvězdí Panny, jež jsou zakryty Sluncem kolem 6. října každého roku. Jistým problémem je ohyb (refrakce) signálů v elektricky vodivé sluneční koróně, ale tento vliv se dá z větší části vyloučit současným pozorováním na několika vlnových délkách v pásmu metrových vln.

Ohyb světla vedl O. Lodge v roce 1919 a A. Einsteina v roce 1936 k předpovědi efektu *gravitační čočky* (na podnět českého inženýra R. Mandla) [4]. V klasickém případě k efektu dochází, jestliže na spojnici hvězda-pozorovatel se vyskytuje dostatečně hmotné těleso. Pozorovatel na Zemi by v ideálním případě pozoroval místo bodového obrazu hvězdy kruhový prstenec. Není-li seřazení objektů zcela přesné, vidí pozorovatel na Zemi dva srpkovité útvary, jež případně degenerují ve dva svítící body. Pravděpodobnost takového seřazení pro hvězdy naší Galaxie je pranepatrná a přes veškeré úsilí pozorovatelů se dosud nic takového nepodařilo nalézt. F. Zwicky v roce 1937 a po něm další astronomové proto navrhli hledat takový efekt u vzdálenějších objektů, tedy především u galaxií. Po objevu kvazistelárních rádiových zdrojů (kvasarů) v roce 1963 upozornili J. a M. Barnothyovi v roce 1965 na možnost výskytu gravitačních čoček při zobrazení těchto útvarů podobných hvězdám.

Tato předpověď se splnila, když radioastronomové zaznamenali v roce 1979 dvojici kvasarů 0957 + 561 v souhvězdí Velké Medvědice, jejichž červené posuvy ($z = 1,4$) i vzhled spekter byly zcela identické. Později se podařilo zaznamenat i mezilehlou galaxii s podstatně nižším červeným posuvem $z = 0,4$, která je zřejmě hledanou gravitační čočkou. Galaxie je ovšem pro rádiové záření průhledná, takže úhrnem musíme pozorovat lichý počet obrazů, a to se také podařilo radioastronomicky prokázat [5]. Do letošního roku se radioastronomům podařilo objevit ještě dva další případy kvasarů, zobrazených gravitačními čočkami (PG 1115 + 080 a Q 2345 + 007). Týž efekt také způsobuje zdánlivé zvýšení jasnosti vzdáleného kvasaru a časovou proměnnost v intervalu několika let (vlivem nepatrných vzájemných posuvů objektů v důsledku rozdílných prostorových rychlostí).

Neobyčejně významnou podporou pro OTR se stal *objev binárního pulsaru 1913 + 16* v souhvězdí Orla v roce 1974. Pulsar má základní pulsní periodu 59 milisekund, ale brzy se ukázalo, že tato hodnota periodicky kolísá v důsledku oběžného pohybu zářícího tělesa v soustavě těsné dvojhvězdy. Astronomickými metodami se brzy podařilo určit základní charakteristiky dvojhvězdného systému. Každá ze složek dvojhvězdy má hmotnost $1,4 M(\odot)$ a obíhají kolem společného těžiště po výstředné ($e = 0,62$) dráze s hlavní poloosou řádu 10^9 m za 7,75 hod. Protože základní pulsní perioda odvozená z volné rotace neutronové hvězdy-pulsaru se nemůže s časem výrazně měnit, představuje tento systém bezmála ideální relativistickou laboratoř: přesné hodiny pohybující se velkou rychlostí po silně výstředné dráze v silném gravitačním poli.

Pečlivá měření příchodu impulsů v letech 1974–1981 ukázala na celou řadu proměnlivých složek vyvolaných superpozicí nejméně sedmi efektů STR a OTR [6]. Patří mezi ně transversální Dopplerův jev (dilatace času), gravitační červený posuv, gravitační zpoždění signálů, odchylky od eliptické dráhy a zejména stáčení periastra a zkracování oběžné periody. Stáčení periastra je 10^7 krát rychlejší než u Merkura a dosahuje $4,2^\circ$ za rok (plná otočka za 86 let)! Zkracování oběžné periody o 0,04 s za rok se vysvětluje

jako ztráta energie systému vyzařováním gravitačních vln. Hodnota zkracování dobře odpovídá předpovědi OTR o množství gravitačního záření, které ztrácí uvedený systém oběžným pohybem. V tuto chvíli jde vlastně o jediný – byť nepřímý – důkaz existence gravitačních vln, který má astrofyzika k dispozici.

Dalším novodobým potvrzením správnosti OTR je zlepšená *teorie pohybu vnitřních planet* (Merkur až Mars) sluneční soustavy, odvozená na základě radarových měření vzdáleností planet v Ústavu teoretické astronomie v Leningradě. V r. 1961 se započalo se systematickou radiolokací Venuše a do roku 1980 bylo tak nashromážděno na 13 000 pozorování, z nichž poslední dosahují přesnosti ± 100 m v určení okamžité vzdálenosti planety od radioteleskopu. Odtud byly souběžně počítány přesné polohy planet na 20 let dopředu, a to jednak podle klasické Newtonovy teorie a jednak podle OTR. Výpočet vyžaduje řešit diferenciální rovnice až 54. řádu a určuje polohy planet s vnitřní přesností lepší než ± 10 m. Odchytky pozorovaných poloh od Newtonovy teorie se pak pohybují mezi 8 až 400 km, zatímco odchytky proti OTR jsou v mezích od 0,5 do 2 km. Poněvadž řešení je komplexní záležitostí s mnoha vstupními parametry, lze tento výsledek už v této chvíli považovat za velmi přesvědčivý důkaz správnosti OTR nejen v porovnání s Newtonovou mechanikou, ale i s ostatními neklasickými gravitačními teoriemi.

Dalším takovým „kolektivním“ důkazem správnosti OTR je *moderní kosmologie*, která se téměř kanonicky opírá o Fridmanovo-Lemaîtreovo řešení Einsteinových rovnic pro celý vesmír. Jak známo, toto řešení je nestacionární a astronomická pozorování jasně prokazují, že v současné době se vesmír rozpíná. Teorie, známá obvykle jako

Tabulka výsledků astronomických testů OTR

| Druh testu | Způsob měření | Výsledek (λ) | Citace |
|-------------------------------------|---|------------------------------|---|
| Stáčení perihélie Merkura | Radarové odrazy od planety | 1,003 $\pm 0,005$ | I. SHAPIRO aj.: Phys. Rev. Lett. 28 (1972), 1594. |
| Gravitační červený posuv | Spektra 51 bílých trpaslíků | 1,0 $\pm 0,1$ | V. TRIMBLEOVÁ a J. GREENSTEIN: Astrophys. J. 177 (1972), 441. |
| Gravitační červený posuv | Čára draslíku 770 nm ve spektru Slunce | 1,01 $\pm 0,06$ | J. SNIDER: Phys. Rev. Lett. 28 (1972), 853. |
| Gravitační červený posuv | Raketa do výšky 10 000 km s H maserem stabilním na 10^{-14} během 100 s | 1,0000025 $\pm 0,0000700$ | R. VESSOT aj.: Phys. Rev. Lett. 45 (1980), 2081. |
| Ohyb světla v gravitačním poli | Tři rádiové zdroje na frekvencích 2,7 a 8 GHz vůči Slunci | 1,007 $\pm 0,009$ | E. FOMALONT a R. SRAMEK: Phys. Rev. Lett. 36 (1976), 1475. |
| Zpoždění signálů v gravitačním poli | Oboustranné spojení se sondami Viking | 1,000 $\pm 0,002$ | R. REASENBERG aj.: Astrophys. J. 234 (1979), L 219. |

teorie horkého velkého třesku, se stala východiskem mnoha úvah částicových fyziků. Jde o úvahy, které jsou ve výborné shodě se všemi dostupnými pozorováními a stávají se základem pro budování teorií „velkého sjednocení“ fyzikálních interakcí – tedy jakési moderní obdoby unitární teorie, o níž uvažoval sám Einstein.

Výsledky jednotlivých experimentů z novější doby shrnuje tabulka, v níž veličina λ označuje výsledek měření v poměru k předpovědi efektu podle OTR, tj. $\lambda = 1$ znamená shodu pozorování s předpovědí OTR.

Kromě OTR lze astronomickými prostředky ověřovat též některé postuláty STR. *Nezávislost rychlosti šíření elektromagnetického záření ve vakuu* na vlnové délce (frekvenci) záření je s vysokou přesností ověřena díky pulsarům. Některé z nich (pulsar v Krabí mlhovině) vysílají impulsy v širokém rozsahu vlnových délek, od metrových rádiových vln až po záření gama. V tomto rozsahu se rychlost signálů neliší o více než 10^{-16} standardní hodnoty c . Za poslední tři století se rychlost světla c nezměnila o více než 10%. Rychlost c též není závislá na poloze v prostoru, jak vyplývá z pozorování vizuálních dvojhvězd, o více než 25% [7]. *Gravitační konstanta* se za rok nemění o více než 10^{-10} standardní hodnoty [8]. Konečně *setrvačná a tíhová hmota Země* se neliší více než o 1,5%, jak plyne z laserových měření vzdálenosti Země–Měsíc v letech 1970–1974.

3. Úloha OTR v astrofyzice a kosmologii

Zmínili jsme se již o zásadním významu OTR pro kosmologickou *teorii velkého třesku*, jež se nyní považuje všeobecně za kanonickou (J. B. Zeldovič, 1982) [9]. Hlavní pozorovací podporou teorie je Hubbleův vztah červený posuv – vzdálenost pro galaxie a kvasary, dále existence kosmického rádiového záření pozadí, jehož spektrální křivka odpovídá záření černého tělesa o teplotě 2,7 K (vůči tomuto zářivému poli se Země pohybuje průměrnou rychlostí zhruba 400 km s^{-1}) a konečně pozorovaný poměr vodíku a hélia v kosmických tělesech i v mezihvězdném prostoru, jež odpovídá kanonické teorii o tvoření těchto prvků v prvních minutách po velkém třesku. Všechny alternativní teorie dokáží tento poměr vysvětlit jedině zavedením dalších podmínek ad hoc.

Zvlášť velký význam má OTR při studiu *gravitačně zhroucených těles*, tj. neutronových hvězd a černých děr. Neutronové hvězdy jsou zcela nepochybně odpovědné za takové podivuhodné úkazy, jako jsou pulsary, galaktické zdroje rentgenového záření a zábleskové zdroje záření gama. Pozorované hmotnosti neutronových hvězd kolem 1,4 hmotnosti Slunce jsou v naprosté shodě s předpovědí podle OTR.

Existence černých děr je velmi pravděpodobná aspoň ve dvou případech rentgenových těsných dvojhvězd (Cygnus X-1, LMC X-3) a prakticky jistá v kvasarech. Zatímco v prvním případě jde o černé díry s hmotností 6 až $8 M(\odot)$, pro kvasary se uvažuje o supermasívních černých děrách o hmotnostech až $10^9 M(\odot)$. Prvotní černé díry o hmotnostech řádu 10^{12} kg , jež snad mohly vzniknout brzy po velkém třesku a jež by se měly v současné době explozivně vypařit Hawkingovým procesem, objeveny nebyly a astronomická pozorování udávají stále ostřejší horní meze jejich výskytu ve vesmíru.

V blízké budoucnosti se může uskutečnit i přímá *detekce gravitačních vln*. Jejichž existenci OTR předvídá. Z teoretických rozborů [10] vyplývá, že největší vyhlídky na detekci má záření uvolněné při gravitačním kolapsu dostatečně hmotné hvězdy (výbuch supernovy). Mnohem menší je naděje, že budou zaznamenány gravitační vlny vzniklé oběžným pohybem těsné dvojhvězdy nebo rotací neutronové hvězdy.

Současná generace detektorů má příliš malou citlivost, než aby mohla zachytit gravitační vlny z těchto očekávaných zdrojů. Jestliže se podaří zvýšit citlivost o 3–5 řádů, bude snad možné registrovat několik úkazů ročně, totiž kolapsy supernov v rámci místní kupy galaxií v souhvězdí Panny. Kolapsy supernov uvnitř naší Galaxie by pravděpodobně bylo možné zachytit dosavadními zařízeními – potíž však činí příliš nízká frekvence těchto úkazů (v nejlepším případě jeden kolaps za 15 let!).

V současné době se vyvíjejí zejména detektory založené na měření vibrací těžkých hmot (hmotnosti kolem 1 t a více), jež jsou chlazeny na teplotu kapalného hélia, pomocí supravodivých interferenčních detektorů (skvidů). Alternativně se navrhuje méně hmotné (řádově 30 kg) dokonalé safírové krystaly, opět chlazené na teplotu 4 K. Jinou cestu sledují skupiny v USA a NSR – totiž měření upravenými Michelsonovými interferometry o velmi dlouhé (několik set km!) základně. Nízkofrekvenční složku gravitačního záření by bylo možné zaznamenat vysoce přesným (zlomky mm!) měřením nepravidelností v letu vhodně vybavených kosmických sond. V příznivém případě budou gravitační vlny z vesmíru zachyceny snad již v příštím desetiletí, což by byl nepochybně vrcholný triumf obecné teorie relativity.

Literatura

- [1] J. M. KRAMAROVSKIJ, V. P. ČEČEV: *Obščaja teorija otноситelnosti i dannyje nabljudenij*. Priroda (1979), No 12, 53.
- [2] S. CHANDRASEKHAR: *The increasing role of general relativity in astronomy*. Observatory 92 (1972), 160.
- [3] J. R. SHAKESHAFT: *Astronomical tests of general relativity*. Observatory 99 (1979), 122.
- [4] J. R. GOTT: *Gravitational lenses*. Amer. Sci. 71 (1983), 150.
- [5] P. HADRAVA: *Gravitační čočky*. Kozmos 13 (1982), 183.
- [6] J. M. WEISSBERG aj.: *Gravitational waves from an orbiting pulsar*. Sci. Amer. 245 (1981), No 4, 66.
- [7] R. GRUBER aj.: *Speed of light outside the solar system: a new test using visual binary stars*. Publ. Astron. Soc. Pacific 93 (1981), 777.
- [8] T. C. VAN FLANDERN: *Is the gravitational constant changing?* Astrophys. J. 248 (1981), 813.
- [9] J. B. ZELDOVIČ: *Modern cosmology*. Highlights of Astronomy 6 (1983), 29.
- [10] J. HOUGH: *Gravitational waves and their detection*. J. British Astron. Assoc. 93 (1983), 3.