

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jiří Grygar

Prolínání astronomie a relativity (1919–2014)

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 60 (2015), No. 3, 189–202

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/144415>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2015

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



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

# Prolínání astronomie a relativity (1919–2014)

Jiří Grygar, Praha

Astronomie a astrofyzika překročily ve XX. století hranice platnosti klasické fyziky díky objevům objektů s vysokou koncentrací hmoty, částic pohybujících se vysoce relativistickými rychlostmi, a také studiem historie vesmíru během velmi dlouhých intervalů času a prostoru. Při zpětném pohledu na astronomické objevy minulého století vidíme, že Einsteinovy práce z let 1905 až 1936 přišly jako na zavanou. Vesmír se stal nenahraditelnou fyzikální laboratoří, v níž lze Einsteinovy teoretické koncepce ověřovat ve velkém rozsahu a se stále se zvyšující přesností.

## 1. Základní testy obecné teorie relativity

### 1.1. Ohyb světla v silném gravitačním poli

Přijetí převratných Einsteinových myšlenek se ostatně uspíšilo díky pozorování ohybu světla hvězd během úplných slunečních zatmění. Einstein sice už v roce 1911 spočítal v Praze na základě principu ekvivalence velikost posuvu polohy hvězd, jež by se promítaly přesně na okraj slunečního disku. Vypočtená odchylka  $0,87''$  sice byla ve shodě s výpočtem podle Newtonovy korpuskulární teorie, jak ji odvodil již v roce 1801 J. SOLDNER (1776–1833), ale ve skutečnosti byla chybná [14]. K ověření tohoto Einsteinova výpočtu připravili němečtí astronomové pod vedením E. FINLAYE-FREUNDLICH (1885–1964) expedici za zatměním v srpnu 1914 na Krym. Jelikož však právě vypukla I. světová válka, stali se členové výpravy dočasnými zajatci a jejich přístroje byly zapečetěny, takže se žádné pozorování neuskutečnilo.

Tento zádrhel paradoxně přispěl k přijetí Einsteinovy teorie, neboť v roce 1915 si Einstein uvědomil koncepční chybu ve svém výpočtu a ukázal, že podle obecné teorie relativity (OTR) musí být zmíněná odchylka  $\delta$  přesně dvojnásobná ( $1,75''$ ) [7]. Obecně pak platí pro těleso o hmotnosti  $M$  (v jednotkách hmotnosti Slunce –  $M_{\odot}$ ) a nerušený obraz hvězdy, jež se zobrazuje v průmětu do roviny kolmé k zornému paprsku v lineární vzdálenosti od centra tělesa  $D$  (v jednotkách poloměru Slunce –  $R_{\odot}$ ) jednoduchý vztah:

$$\delta = 1,75'' \cdot \frac{M}{D}. \quad (1)$$

K ověření nového výpočtu uskutečnila britská Královská astronomická společnost dvě expedice za slunečním zatměním, jež se odehrálo ve čtvrtek 29. května 1919. Bylo viditelné jednak z Brazílie (Sobral), ale též z východního Atlantiku (Princův ostrov, 200 km na západ od Guinejského zálivu v Africe).

---

RNDr. JIŘÍ GRYGAR, CSc., Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8, e-mail: grygar@fzu.cz

O přípravu expedicí i pečlivé zpracování měření se rozhodující měrou zasloužil britský astrofyzik ARTHUR EDDINGTON (1882–1944), jenž o výsledcích referoval na společné schůzi londýnské Královské společnosti a Královské astronomické společnosti. Oznámil, že ohyb paprsků světla hvězd byl potvrzen v rozmezí  $(1,61'' \div 1,98'')$  [6]. Einsteinovi pak 19. prosince 1919 poslal telegram: „Celá Anglie mluví o Vaší teorii.“ Vskutku, od té chvíle se stal Albert Einstein světově známý, a tak to už zůstalo. Mimochodem, v roce 1983 proměřili britští astronomové originální fotografické snímky na moderních digitálních měřicích strojích a obdrželi tak hodnotu  $(1,87'' \pm 0,13'')$ .

V 80. letech minulého století se podařilo D. Robertsonovi aj. [24] využít radiointerferometrie na velmi dlouhých základnách ke změření odchylek v poloze bodových radiových zdrojů odlehklých od Slunce v úhlových vzdálenostech  $2,5^\circ\text{--}178^\circ$ . Měření probíhala celé desetiletí a naměřené odchylky souhlasí s výpočtem podle OTR s přesností 0,02%.

## 1.2. Stáčení perihelu Merkuru

Již v polovině XIX. století dosáhla nebeská mechanika takové úrovně, že dokázala vysvětlit téměř beze zbytku pozorované stáčení přímky apsid dráhy planety Merkuru ve směru oběhu o úhel  $529''/100$  let poruchovým gravitačním působením ostatních planet Sluneční soustavy. Zbýval však rozdíl, který se přičítal hypotetické planetě obíhající velmi blízko ke Slunci, jež dokonce dostala jméno Vulkán. O tomto rozporu Einstein patrně nevěděl, když z OTR odvodil pro stáčení za století vztah:

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

kde  $e$  je numerická výstřednost elipsy,  $a$  velká poloosa dráhy v metrech a  $M_\odot$  hmotnost tělesa v jednotkách hmotnosti Slunce ( $\sim 2 \cdot 10^{30}$  kg). Mezi planetami Sluneční soustavy právě Merkur vyniká jednak výstředností své dráhy 0,21 a dále malou délkou poloosy ( $5,8 \cdot 10^{10}$  m), takže z Einsteinovy teorie vyplývá  $\varepsilon = 43,0''$ , což je velmi blízké pozorovanému rozdílu  $\varepsilon = 42,6''$ .

## 1.3. Gravitační červený posuv

Třetí předpověď se týká *posuvu spektrálních čar k červenému konci spektra* v silném gravitačním poli. Pro červený posuv  $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ , kde  $\lambda_0$  je klidová vlnová délka dané spektrální čáry, obdržíme

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

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).

V astronomické praxi jde většinou o velmi malé hodnoty, takže je zvykem vyjadřovat tento posuv  $z$  nikoliv jako bezrozměrné číslo, ale jako Dopplerův posuv v m/s, popřípadě v km/s. Tento efekt se dlouho nedařilo spolehlivě ověřit, protože hmotné hvězdy hlavní posloupnosti mají obvykle velké lineární poloměry (obří) a naopak malé hvězdy mají obvykle nízké hmotnosti (trpaslíci). Nejvhodnějšími testovacími objekty by mohli být jedině bílí trpaslíci o hmotnostech srovnatelných se Sluncem, ale s poloměrem srovnatelným se Zemí, jenže v jejich spektru se pozorují jen velmi mělké

spektrální čáry, navíc s rozmytými širokými profily. Teprve pokrok spektroskopické techniky (mřížkové spektrografy ve spojení s velkými dalekohledy) umožnil zmíněný efekt v 70. letech minulého století potvrdit, avšak jen s nevelkou přesností pro statisticky významnější soubor půl stovky bílých trpaslíků (s chybou kolem 10 %) a také pro Slunce (s chybou 6 %).

#### 1.4. Shapirovo zpoždění v silném gravitačním poli

V roce 1964 inspirovala radarová pozorování ozvěn od povrchu planet Sluneční soustavy I. SHAPIRA (\*1929) k objevu čtvrtého testu OTR [25]. Jestliže se vnitřní planety (Merkur a Venuše) nacházejí pro pozorovatele na Zemi poblíž horní konjunkce se Sluncem, probíhají radarové impulsy vysílané ze Země při cestě tam i zpět oblastí silného gravitačního potenciálu Slunce a jsou tudíž ve shodě s OTR zpožděny o měřitelnou hodnotu řádu 0,1 milisekundy. Radar může bez problému pracovat i v malé úhlové vzdálenosti od Slunce, což je například v optické astronomii vyloučeno. První měření z let 1966–67, kdy se k vysílání používal radar na observatoři Arecibo na Portoriku se špičkovým výkonem 300 kW, dávala velmi slabé ozvěny řádu  $10^{-27}$  W, takže efekt byl sotva měřitelný s chybou 50 %.

Brzy se však ukázalo, že Shapirův efekt má další aplikace, pokud se některá kosmická sonda vydá do hlubin Sluneční soustavy a při pozorování ze Země se dostane (podobně jako zmíněné vnitřní planety) do úhlové blízkosti ke Slunci, lineárně však až za ně. Na palubě sond jsou vždy velmi přesně naladěné rádiové vysílače, které slouží pro oboustranný přenos informací mezi sondou a řídicím střediskem. Organizace NASA používá k tomu cíli tři stanic soustavy DSN (Deep Space Network) v Goldstone (Kalifornie), dále poblíž Madridu ve Španělsku a Canberra v Austrálii. Na každé stanici byly postupně instalovány citlivé paraboly s průměry od 26 do 70 m. V roce 1985 se do úhlové blízkosti ke Slunci, ale zato 3 mld. km od Země, dostala kosmická sonda Voyager 2 a Shapirovo zpoždění se tak podařilo naměřit s chybou 3 % v dobré shodě s výpočtem podle OTR.

Právě Shapirovo zpoždění umožnilo dosud nejlépe ověřit platnost OTR, když B. Bertotti aj. [2] sledovali změny zpoždění rádiových signálů od kosmické sondy Cassini (NASA + ESA) během horní konjunkce se Sluncem dne 21. června 2002, kdy se přiblížila ke Slunci na vzdálenost  $D = 1,6R_{\odot}$  (úhlově  $9'$  od jižního okraje slunečního disku), ale byla přitom od Země vzdálena již 8,4 au (1 au = střední vzdálenost Země od Slunce) míříc ke svému cíli — planetě Saturn. Autoři pozorovali změny Shapirova zpoždění již od 13. dne před konjunkcí až do 14. dne po konjunkci ve skvělé shodě s výpočtem podle OTR, takže její platnost v tomto experimentu byla ověřena s přesností  $2,3 \cdot 10^{-5}$ , což je patrně vůbec nejpřesnější ověření OTR vůbec.

Konečně v roce 1994 se podařilo změřit Shapirův efekt u binárního milisekundového pulsaru PSR J1713+0747 s impulsní periodou 4,6 ms, vzdáleného od nás přes 1 kpc. Kolem pulsaru (neutronové hvězdy) totiž obíhá po kruhové dráze o poloměru větším než 22 mil. km průvodce v periodě 68 d. V okolí jeho dolní konjunkce s neutronovou hvězdou je tak rádiový signál pulsaru opožděn gravitačním potenciálem průvodce. Amplituda Shapirova zpoždění dosahuje  $23 \mu\text{s}$  [4]. Odtud lze spočítat přibližné meze hmotnosti neutronové hvězdy ( $1,6 \pm 0,4$ )  $M_{\odot}$  a jejího průvodce ( $0,33 \pm 0,06$ )  $M_{\odot}$ . Systém se tak stal konkurentem soudobých atomových hodin, protože stabilita rotační periody této neutronové hvězdy je obdivuhodně vysoká.

## 1.5. Různá astronomická měření potvrzující OTR

V programu Apollo umístili astronauté na místech přistání lunárních modulů A11, A14 a A15 zrcadlové koutové odražeče (retroreflektory) umožňující měření okamžité vzdálenosti Měsíce od laserového vysílače na Zemi s udivující přesností. Tato měření stále probíhají a byla doplněna ještě o kontakt s retroreflektory na víku dvou sovětských měsíčních vozítek Lunochod, když se podařilo sondě *Lunar Reconnaissance Orbiter* lokalizovat jejich polohu. Z počáteční nejistoty v určení vzdálenosti kolem 300 mm se nyní daří docílit přesnosti řádu 1 mm (!), což z činí z celého experimentu LLR (*Lunar Laser Ranging*) skvělý nástroj pro ověřování rozličných efektů OTR. Jak uvedli J. Williams aj. [29], podařilo se tak s velkou přesností ověřit platnost principu ekvivalence s relativní přesností  $5 \cdot 10^{-13}$  a dále parametrů PPN aproximace s přesností 0,06 %. Hodnota geodetické precese byla ověřena s přesností 0,7 %. Roční změna hodnoty gravitační konstanty nepřesahuje  $8 \cdot 10^{-12}$ .

A. Gould [9] konstatoval, že OTR je nyní astronomicky velmi přesně potvrzena v rozsahu vzdáleností  $10^9 \div 10^{21}$  m a v rozsahu hmotností  $10^{-3} \div 10^3 M_{\odot}$ . Výrazně se o to zasloužila astrometrická družice HIPPARCOS (ESA), která měřila polohy a vzdálenosti hvězd v letech 1989–1993.

Po heroickém souboji s nejrůznějšími experimentálními i administrativními překážkami se podařilo F. Everittovi aj. v roce 2011 dokončit projekt Gravity Probe-B [9], který měl ověřit dva subtilní efekty OTR, tj. geodetickou precesi a strhávání souřadnicové soustavy rotující Zemí (Lenseův–Thirringův efekt). Stalo se tak po 31 letech vědeckého výzkumu, jak experiment provést, 10 letech stavby družicové aparatury, 1,5 roku činnosti družice na oběžné dráze a 5 letech úmorného zpracování neočekávaně zašuměných měření. Náklady na projekt se přitom vyšplhaly na 760 mil. dolarů. Na palubě družice pracovaly celkem čtyři gyroskopy a výsledkem mnohaleté driny jsou údaje o geodetické precesi  $(-6,602 \pm 0,18)''/\text{rok}$  (předpověď OTR činí  $-6,606''/\text{rok}$ ) a o strhávání souřadnicové soustavy  $(-37,2 \pm 7,2)$  milivteřin/rok (podle OTR  $-39,2$  milivteřin/rok). Chyba prvního určení je tedy 0,3 %, ale druhý parametr má chybu 20 %, což je svým způsobem debakl.

Naštěstí pro OTR přišli I. Ciufolini a E. Pavlis již v roce 2004 na skvělý nápad [5] využít pro zmíněná měření dvou umělých družic Země LAGEOS, vypuštěných v letech 1976 a 1992, jejichž vzdálenosti bylo možné měřit pomocí laserových ozvěn na 426 koutových odražečích připevněných k plášti družic s přesností na několik desítek milimetrů (poloosy oběžných drah družice dosahovaly něco přes 12 tis. km). Výsledkem příslušných výpočtů je hodnota efektu dosahující 99,5 % hodnoty předpověděné OTR s chybami pro geodetickou precesi 0,1 % a pro efekt LT 10 %.

## 2. Další významné aplikace OTR v soudobé astronomii

### 2.1. Gravitační čočky

První Einsteinovy úvahy o gravitačních čočkách lze nalézt v jeho poznámkách z r. 1912, dalším v pořadí pak byl v roce 1919 známý britský fyzik OLIVER LODGE (1851–1940) a v roce 1924 ruský fyzik O. D. CHVOLSON (1852–1934), ale žádná z prací nešla dostatečně do hloubky. Zcela zapomenuty však nepochopitelně zůstaly podrobné výpočty českého astronoma F. LINKA (1906–1984), zveřejněné 16.3.1936 v prestižní fran-

couzské publikaci [20]. O den později (17.3.) navštívil Einsteina v Princetonu český elektrotechnický inženýr Rudi W. Mandl, který se domníval, že pomocí efektu gravitační čočky bude možné vysvětlit tvary prstencových planetárních mlhovin, původ kosmického záření (zesílením signálu v gravitačním poli Galaxie) a dokonce velké vymírání na Zemi vinou zakrytů hvězd těžkými mezilehlými tělesy. Na Einsteina to žádný velký dojem neudělalo. Mandl však neustával v naléhání a nakonec se proto Einstein rozhodl celou záležitost sprovodit ze světa. Teprve v prosinci 1936 uveřejnil krátkou poznámku o efektu v americkém vědeckém týdeníku Science [8], kde explicitně píše o naléhání Ing. Mandla a o tom, že praktický význam výpočet nemá, jelikož pravděpodobnost tak těsného seřazení dvou různě vzdálených hvězd na téže přímce je nepatrná. Přesto se tato poznámka všeobecně uvádí jako doklad toho, že Einstein našel efekt gravitační čočky, ačkoliv průkopnickou práci vykonal evidentně F. Link, jak uvádí Valls-Gabaud [27].

SEANCE DU 16 MARS 1936.

919

**exemple, pour un corps comme notre Soleil, placé à la distance de 100 par secs,**

$$\alpha_1 = 0^s,0043, \quad \rho_\infty = 0^s,088.$$

**De tels rapprochements optiques seront sans doute rares, sauf dans certaines régions du ciel, en particulier dans les nébuleuses spirales. Nous discuterons ces phénomènes dans un autre Recueil.**

Závěr klíčového Linkova článku [20] z března 1936. „Nébuleuses spirales“ je tehdy používaný název pro spirální galaxie.

V Linkově práci se totiž uvádí nejenom poloha vícenásobných obrazů, ale také zvýšení jejich jasnosti, což umožní pozorovat i hvězdy daným dalekohledem neviditelné. Uvažoval nejenom o pozorovatelných, ale i nepozorovatelných hvězdách jako gravitačních čočkách. Kromě toho v závěru své studie explicitně zdůraznil že např. spirální mlhoviny (galaxie) jako plošné objekty zvyšují pravděpodobnost slícování polohy čočkovaného a čočkujícího objektu.<sup>1</sup> Na rozdíl od Einsteinovy pesimistické poznámky vyjádřil Link svůj názor, že jev gravitačních čoček by se měl hledat ve všech oblastech stelární astronomie nejenom kvůli potvrzení OTR, ale také pro vysvětlení, proč některé objekty jeví proměnnou jasnost.

Zcela symbolicky byla první gravitační čočka objevena D. Walshem aj. [28] v roce 100. výročí Einsteinova narození na observatoři Kitt Peak v Arizoně pomocí 2,1m reflektoru. Autoři zjistili, že kvasar QSO 0957 + 561 v souhvězdí Velké medvědice je ve skutečnosti dvojitý se složkami *A* a *B* v úhlové rozteči 6". Spektra obou bodových složek vykazovala týž červený posuv  $z = 1,4$  (vzdálenost od nás 2,7 Gpc) a dokonce

<sup>1</sup>V literatuře se cituje, že s tímto názorem přišel jako první F. Zwicky [30], jenž svou krátkou poznámku zaslal do redakce Phys. Rev. 14.1.1937. Ve své poznámce zmiňuje R. W. Mandla, jenž o gravitačních čočkách přesvědčoval také průkopníka televize V. K. ZVORYKINA (1888–1982), od něhož se o možnostech gravitačních čoček Zwicky dozvěděl v létě 1936. Podrobnosti o skutečně velkém úsilí zcela kompetentního R. W. Mandla přesvědčit Einsteina, aby se problematice gravitačních čoček věnoval, zveřejnili J. Renn a T. Sauer v roce 2000 [23]. Bohužel ani tyto badatelé v historii vědy vůbec nezmiňují významnou roli českého astrofyzika F. Linka, který je v anglické Wikipedii uváděn jako F. Klin (!).

i naprosto identická spektra, z čehož autoři usoudili, že jde o projev gravitační čočky. Po jistém váhání se k této domněnce astrofyzikové přiklonili, když se ukázalo, že jasnost složek  $A$  a  $B$  kolísá rovněž shodně jedině s tím rozdílem, že změny jasnosti složky  $A$  se kopírují u složky  $B$  s prodlevou 417 dnů, což je dáno rozdílem v délce zakřivených drah pro obrazy  $A$  a  $B$  téhož kvasaru. Posléze se podařilo objevit i mezilehlou čočkující galaxii se  $z = 0,36$  (vzdálenost od nás 1,1 Gpc), která je úhlově odlehlá do polohy obrazu  $B$  o  $1''$  ve směru k obrazu  $A$ .

V roce 1964 ukázal S. Refsdal [22], že pokud by se podařilo zobrazit vzplanutí vzdálené supernovy mezilehlou gravitační čočkou v podobě plošné galaxie, dostaneme více obrazů téže supernovy s různým časovým zpožděním, protože obrazy mají různé dlouhé dráhy paprsku k pozorovateli. Odtud lze pak odvodit jednak hmotnost galaxie — gravitační čočky, ale navíc i hodnotu Hubbleovy konstanty rozpínání vesmíru ( $H_0$ ), pokud se podaří určit vzdálenosti supernovy i čočky změřením příslušných červených posuvů.

Refsdal vyjádřil optimistický názor, že takové koincidence nemusí být nijak vzácné a umožní nezávislé určování hodnoty  $H_0$ , což zvýší důvěru v příslušné kosmologické modely vesmíru. Již zmíněná časová zpoždění kvasaru to potvrdila, protože i kvasar je opticky v podstatě bodový zdroj jevící kolísání jasnosti, případně i optické, rentgenové a rádiové výbuchy. Dosud měřená zpoždění pro řadu vícenásobných obrazů kvasarů v podobě „Einsteinových křížů“ popř. obřích svítících oblouků potvrdila, že Refsdalův výpočet byl správný, i když zatím přesnost stanovení  $H_0$  poněkud pokulhává za klasickými způsoby jejího určování, protože neznáme přesné rozdělení hmoty napříč mezilehlými galaxiemi a tím ani „tvar“ příslušné gravitační čočky.

Nejnověji se však podařilo P. Kellymu aj. [17] počínaje 14. listopadem 2014 pozorovat pomocí Hubbleova kosmického teleskopu (HST) supernovu v anonymní galaxii vzdálené od nás 2,8 Gpc a zobrazené v podobě Einsteinova kříže hmotnou mezilehlou eliptickou galaxií v kupě MACS J1149+2223 v souhvězdí Lva vzdálené od nás 1,6 Gpc. Rozštěpené obrazy supernovy jsou navíc nestejně zesíleny čočkou  $2\times-20\times$ , což fakticky umožnilo jejich sledování v blízké infračervené oblasti spektra supercitlivou širokoúhlou kamerou WFC3 HST.

Jednotlivé obrazy Einsteinova kříže jsou opět vůči sobě posunuty v čase, takže prakticky současně vidíme různé fáze vzplanutí vzdálené supernovy, která by pravděpodobně byla unikla pozornosti nebýt výrazného zesílení její jasnosti díky čočce v hlubinách vesmíru. HST tak zafungoval jako virtuální okulár vzdáleného objektivu o průměru řádu 100 kpc. Kromě toho se ukázalo, že mateřská galaxie supernovy Refsdal je zobrazena komplexní gravitační čočkou celé kupy galaxií vícekrát, ale žádné další zobrazení neobsahuje zmíněnou supernovu, takže buď se tam zobrazila dříve, v době kdy HST ještě neměl ve své výbavě kameru WFC3 instalovanou až v roce 2009, anebo se celý výbuch znovu zobrazí díky jiné koncentraci hmoty v rozsáhlé mezilehlé kupě během nejbližších 10 roků!

HST se ostatně od roku 2012 využívá soustavně jako virtuální okulár při pozorování vytipovaných koncentrovaných kup galaxií, jež slouží jako obří gravitační čočky pro hledání nejvzdálenějších galaxií v programu Frontier Fields. Touto technikou se již podařilo objevit galaxie s červeným posuvem  $z \sim 10$  (stáří  $\sim 500$  mil. let po Velkém třesku), jejichž jasnost v kamerách HST je tak zesílena až padesátkrát; jinak by je ani HST zobrazit nemohl.

## 2.2. Gravitační mikročockky

V roce 1987 si polsko-americký astronom B. Paczynski [21] uvědomil, že pokrok snímací a výpočetní techniky umožňuje překonat Einsteinův pesimismus ohledně efektu gravitační čockky při slícování obrazu čockovaného a čockujícího bodového zdroje. Odhadl, že pro danou dvojici hvězd dochází k takovému slícování průměrně jednou za milion let, ale to lze nyní poměrně snadno obejít tím, že budeme po dobu jednoho roku sledovat potenciální slícování milionů hvězd např. v halu naší Galaxie nebo v sousedních Magellanových mračnech, kde lze naráz zobrazovat na malé ploše miliony hvězd širokoúhlu kamerou ve spojení s polovodičovými plošnými detektory CCD. Slícování je vlastně důsledkem poměrně velkých náhodných (tzv. vlastních) příčných pohybů hvězd. K měřitelnému zjasnění vzdálenější hvězdy začne docházet tehdy, když úhlová rozteč mezi ní a bližší (čockující) hvězdou klesne na obloukové mikrovetřiny.

Tyto snímky je pak nutné co nejčastěji opakovat a rychle zpracovat důmyslným výpočetním algoritmem tak, aby již další noc byly známy údaje o zvýšení jasnosti některé hvězdy vlivem gravitačního zesílení. Jednotlivá pole je potřebí sledovat ve dvou barevných filtrech, aby se odlišila zjasnění díky gravitačním mikročockkám od hvězdných výbuchů, které mají v různých barvách rozdílný průběh, zatímco světelné křivky mikročockek jsou achromatické. Paczynski se osobně zasadil o polsko-americkou přehlídku OGLE (*Optical Gravitational Lens Experiment*), který probíhá od roku 1993 v Chile na horské observatoři Las Campanas. Pomocí 1,3m reflektoru se širokoúhlu kamerou se opakovaně pozorují pole v oblasti výduti naší Galaxie a v obou Magellanových mračnech [26]. Podobné projekty rozeběhli také britští a australsí astronomové (MACHO) a Francouzi (EROS). Zprvu se vše odehrávalo na jižní polokouli, kde je dobře vidět výduť naší Galaxie a zejména Magellanova mračna; později se pozorování rozšířilo i na severní polokouli, kde se podobně sleduje výduť galaxie M31 v Andromedě.

Výsledky jsou více než obdivuhodné. V současné době máme z těchto přehlídek dobrá data o několika stech gravitačních mikročockkách v podobě čockujících hvězd a dokonce o 35 čockujících extrasolárních planetách, jež se dají odhalit jako sekundární malá zjasnění trvající jen několik hodin nejčastěji na sestupné části světelné křivky vlastní mikročockky. Kromě toho se kombinací všech archivů zmíněných projektů podařilo nalézt desítky tisíc proměnných hvězd nejrůznějších typů a ojedinele též výbuchy nov.

## 2.3. Binární pulsary

Brzy po objevu pulsarů v roce 1968 astronomové odhalili jejich povahu: jde o rychle rotující neutronové hvězdy o hmotnosti srovnatelné se Sluncem, ale o rozměrech pouhých desítek kilometrů, tedy o hvězdy vzniklé gravitačním zhroucením po vyčerpání zdroje termonukleárních reakcí, které představují neuvěřitelně hustou neutronovou kapalinu s tenkou, leč extrémně tvrdou kůrou. Rotační periody pulsarů řádu 1 sekundy zjištěné většinou v rádiovém oboru spektra (výjimečně však i opticky a rentgenově) poukazují na jejich obrovský moment setrvačnosti, který představuje vynikající fyzikální hodiny s přesností konkurující nejlepším laboratorním atomovým hodinám.

Když se pak v roce 1982 podařilo objevit první milisekundový pulsar PSR B1937+21 v souhvězdí Lištičky, jehož rotační perioda 1,56 ms (otáčky s frekvencí 642 Hz) je



stálá s relativní přesností  $3 \cdot 10^{-14}$ , bylo astrofyzikům zřejmé, že získali přesné kosmické hodiny, které se mohou hodit pro ověřování efektů speciální i obecné teorie relativity. Tato možnost se vzápětí vrchovatě naplnila, když se zjistilo, že milisekundové pulsary mívají svého průvodce, takže musí vykazovat řadu měřitelných efektů OTR.

V roce 1974 objevili R. Hulse a J. Taylor pomocí obřího 305m radioteleskopu v Arecibu na ostrově Portoriko první binární milisekundový pulsar PSR *B1913 + 16* (suhvězdí Orla), jenž se skládá ze dvou neutronových hvězd o hmotnosti  $1,4 M_{\odot}$  vzdálených od nás 6,4 kpc a obíhajících kolem společného těžiště po silně protáhlých ( $e = 0,6$ ) eliptických drahách o velké poloose 2 mil. km v periodě 7,75 h [16]. Primární neutronová hvězda je pulsar s rotační periodou 59 ms, kterou se postupně podařilo určit s přesností na 13 platných cifer. Soustavná měření tohoto pulsaru vedla autory k ověření celkem 12 různých efektů teorie relativity. Relativistické stáčení přímky apsid činí v tomto podivuhodném systému  $4,2^{\circ}$ /rok (15tisíckrát více než v případě planety Merkur) a zkracování oběžné doby soustavy gravitačním vyzařováním je v souladu s OTR s relativní přesností 0,2%. To znamená, že velká poloosa oběžné dráhy se zmenšuje tempem 3,5 m/s! Ke splnutí obou neutronových hvězd tak dojde přibližně za 300 mil. let. Taylor a Hulse získali za tato měření a jejich interpretaci v roce 1993 Nobelovu cenu za fyziku. Dodnes jde o jediný, byť nepřímý, důkaz existence gravitačních vln.

V roce 2003 nalezla M. Burgayová aj. [3] binární pulsary PSR *J0737-3039 AB* v souhvězdí Lodní zádě ve vzdálenosti pouhých 600 pc od Slunce. Jde o velmi těsný pár s oběžnou dobou jen 2,45 h a stejnými hmotnostmi složek  $1,35 M_{\odot}$ , jež obíhají kolem společného těžiště po lehce protáhlé dráze s výstředností  $e = 0,09$  a velkými poloosami 800 tis. km. Jde zatím o jediný známý případ, kdy obě složky takto těsně dvojice jsou pulsary s rotačními periodami 23 ms a 2,8 s a indukci magnetického pole na povrchu neutronových hvězd po řadě 600 kT a 200 MT. Díky tomu se jejich rotační periody brzdí, což dává zářivý výkon  $6 \cdot 10^{26}$  W pro složku *A* a  $2 \cdot 10^{23}$  W pro složku *B*. Není divu, že relativistické stáčení periastra lze v tomto případě měřit úhloměrem, protože dosahuje rekordní hodnoty  $17^{\circ}$ /rok. Soustava rovněž umožňuje určit s velkou přesností velikost Shapirova zpoždění díky dvojím mimořádně přesným hodinám a také geodetickou precesi pro neutronovou hvězdu *A*. Velké poloosy drah se zmenšují vinou gravitačního vyzařování o 7 mm/d, takže ke splnutí složek *A* a *B* dojde za 85 mil. let.

## 2.4. Černé díry

Teorii gravitačně zhroucených objektů v OTR se jako první zabýval K. Schwarzschild již v roce 1916, ale významným pokrokem se stala až práce R. KERRA (\*1934) z roku 1963 o rotujících černých dírách (tento termín zpopularizoval J. Wheeler až v roce 1968). R. PENROSE (\*1931) ukázal v roce 1969, že s vysokou účinností lze vytáhnout z černé díry rotační energii. Současně se zjistilo, že ke spontánnímu gravitačnímu zhroucení hvězdy na černou díru může dojít jen tehdy, má-li hvězda v tom okamžiku hmotnost větší než  $3,2 M_{\odot}$ . V roce 1974 přišel S. HAWKING (\*1942) na kvantové vypařování zejména černých miniděr. Konečně v roce 1977 zjistili R. BLANDFORD (\*1949) a R. ZNAJEK, že extrakce rotační energie černé díry probíhá díky extrémně silnému magnetickému poli v bezprostřední blízkosti obzoru událostí.

Tyto teoretické výsledky vedly astronomy ke snaze objevit ve vesmíru černé díry pochopitelně nepřímou, z jejich účinků na okolní viditelnou hmotu. To se podařilo po vzniku rentgenové astronomie, kdy výškovými raketami Aerobee byl v roce 1964 objeven mj. jasný bodový rentgenový zdroj v souhvězdí Labutě, který je dnes znám pod jménem Cygnus X-1. Raketové lety inspirovaly R. Giacconiho aj. ke konstrukci první rentgenové družice Uhuru, kterou NASA vypustila v roce 1970. Tehdy se podařilo zjistit, že Cyg X-1 jeví silné fluktuace rentgenové jasnosti v intervalech zlomků sekundy, což svědčilo o tom, že zdroj rentgenového záření nemůže mít rozměry větší než 100 tis. km. O rok později se podařilo objevit i rádiové záření zdroje v Labuti a to umožnilo významně zpřesnit jeho polohu a objekt ztotožnit s poměrně jasnou hvězdou HDE 226868. Identifikace pak vedla ke zjištění, že zdroj Cygnus X-1 je součástí těsné dvojhvězdy, přičemž obě složky obíhají kolem společného těžiště v periodě 5,6 dne.

Žhavá viditelná složka spektrální třídy  $O$  dosahuje hmotnosti  $\sim 15 M_{\odot}$  a poloměru  $\sim 21 R_{\odot}$  a to umožnilo poměrně přesně odhadnout hmotnost opticky nepozorovatelné složky na  $\sim 15 M_{\odot}$ , což znamená, že rentgenové záření vzniká v akrečním disku a radiálních výtryscích v okolí takto hmotné hvězdné černé díry. Od té doby se podařilo v naší Galaxii a dokonce i ve Velkém Magellanově mračnu nalézt několik podobných případů těsných dvojhvězd s vysokou hmotností viditelné složky a silným rentgenovým zářením, které musí vycházet z opticky neviditelné složky extrémně malých rozměrů ( $< 100$  km), což odpovídá Schwarzschildovu poloměru pro černou díru o hmotnosti menší než  $30M_{\odot}$ . Od 90. let minulého století tak astronomové nepochybují, že hvězdné černé díry skutečně existují. (R. GIACCONI [\*1931] získal v roce 2002 Nobelovu cenu za fyziku za svůj podíl na rozvoji rentgenové astronomie.)

## 2.5. Černé veledíry

Když byly v roce 1963 objeveny kvasary (zkratka z názvu: *quasi-stellar radio sources*), narazili astronomové na problém rychlých fluktuací jejich rádiové jasnosti, jež omezovaly jejich geometrické rozměry opět na méně než 100 tis. km. Přitom se brzy ukázalo, že kvasary se nacházejí běžně v rekordních vzdálenostech řádu gigaparseků, takže jejich zářivé výkony musely nutně přesáhnout zářivý výkon naší Galaxie, která má ovšem rozměry řádu 100 kiloparseků. Není divu, že mnozí astrofyzici podléhali pokušení přisoudit jejich existenci nové fyzice, protože bylo zjevné, že účinnost uvolňování energie v kvasarech výrazně překračuje účinnost termonukleární reakce přeměny vodíku na hélium ve hvězdných nitrech. Přitom mnoho dobře viditelných kvasarů se nacházelo na základě změření červeného posuvu jejich spekter podstatně dále než všechny tehdy známé galaxie. Kvasary se staly doslova majáky, jež vymezovaly nové hranice pozorovatelného vesmíru.

Brzy se ukázalo, že přirovnání k majákům sedí také proto, že záření kvasarů není zdaleka izotropní, nýbrž je usměrněno do dvou protilehlých kuželových výtrysků, z nichž jeden shodou okolností směřuje přibližně k Zemi. Skutečný počet kvasarů v objemu pozorovatelného vesmíru musí být proto téměř o dva řády vyšší, než jak vyplývá z jejich statistiky. V současné době je známo již několik set tisíc kvasarů a příbuzných objektů, jímž říkáme tiché kvasary, protože se neprojevují silným rádiovým zářením jako jejich původní prototypy.

Po vypuštění Hubbleova teleskopu v roce 1990 a jeho opravě koncem roku 1993

se mohli astronomové pustit do zkoumání centra naší Galaxie vzdáleného od nás zhruba 8 kpc. V centru byl již K. JANSKÝM (1905–1950) objeven v roce 1932 silný zdroj rádiového záření, který dnes známe pod jménem Sgr A\*. Koncem 90. let minulého století začaly dva týmy sledovat okolí tohoto rádiového zdroje v blízkém infračerveném pásmu spektra, kde HST pozoroval hvězdy v těsné blízkosti Sgr A\*. Evropský tým řídil R. Genzel [11], jenž využíval 3,6m reflektor na Evropské jižní observatoři (ESO) La Silla v Chile a později 8,2m zrcadlové teleskopy VLT ESO na chilské hoře Paranal. Americký tým vedla A. Ghezová [12], která pozorovala pohyby hvězd pomocí obřích 10m Keckových teleskopů na Mauna Kea na Havaji. K údivu obou týmů byli schopni pozorovat stabilní silně protáhlé Keplerovy elipsy desítek hvězd kolem opticky neviditelného objektu Sgr A\*. Odtud na základě 3. Keplerova zákona postupně zpřesňovali hmotnost neviditelného objektu až na současnou hodnotu 4,4 mil.  $M_{\odot}$ . Dnes už nikdo nepochybuje, že tímto opticky neviditelným objektem je černá veledíra obklopená akrečním diskem a protilehlými výtrysky, jež odnášejí přebytečný moment hybnosti částic, které z akrečního disku dopadají do veledíry.

Souběžně se zejména díky HST daří nacházet důkazy pro existenci černých veleděří, jejichž hmotnost přesahuje často velmi výrazně konvenční spodní mez 1 mil.  $M_{\odot}$ . Horní meze extragalaktických černých veleděří se pohybují na úrovni 10 mld.  $M_{\odot}$ . Statistický výzkum veleděří vede k zajímavým souvislostem mezi jejich hmotností a hmotností vřutí celých galaxií. Současně se ukazuje, že černé veledíry extrémních hmotností vznikly již během první miliardy let po Velkém třesku. Akrece hmoty na rané veledíry musela tedy probíhat neobyčejně rychle a nedá se vysvětlit běžnými procesy.

### 3. Kosmologie

#### 3.1. Počátky standardního modelu

Prvním odborníkem, který použil Einsteinovy rovnice pole pro modelování vesmíru, byl A. FRIEDMAN (1888–1925). Předpokládal, že vesmír je na stupnicích větších než 100 Mpc homogenní a izotropní, a odtud odvodil, že se prostor vesmíru musí rozpínat v čase [10]. V roce 1924 model rozšířil i pro model se zápornou křivostí prostoru (otevřený vesmír). K rozvoji relativistických modelů vesmíru přispěl nezávisle G. LEMAÎTRE (1894–1966), jenž je dnes historiky považován za otce teorie Velkého třesku vesmíru. V Einsteinových rovnicích připustil nenulovou hodnotu kosmologické konstanty  $\Lambda$ . Kromě toho měl již k dispozici měření kosmologického úprku galaxií, takže v této studii [18] odvodil vztah mezi červeným posuvem ve spektru galaxií a jejich vzdáleností od nás i hodnotu tempa rozpínání vesmíru, dnes známou jako Hubbleova konstanta  $H_0$ . (Hodnota odvozená Lemaîtreem byla ovšem stejně jako později u Hubblea přeceněna téměř o řád kvůli tehdejší systematické chybě podceňující téměř o řád vzdáleností galaxií.)

V dalších letech si Lemaître uvědomil, že kosmologická konstanta představuje fakticky energii falešného vakua, takže neklesá s časem, dále že vesmír musí být vyplněn chladným fosilním zářením z Velkého třesku, a v roce 1931 vyslovil domněnku, že vesmír vznikl z kosmického vajíčka, což je přirozeně jen jiný výraz pro Velký třesk. Současně usoudil, že rozpínání vesmíru se s časem zrychluje (viz [19]), dávno předtím, než to koncem 90. let minulého století prokázala astronomická pozorování.

Ani E. HUBBLE (1889–1953) a ani později F. HOYLE (1915–2001) však myšlenku o vesmíru rozpínajícím se od počátku času nikdy nepřijali. Na rozdíl od nich ocenil A. Einstein po jistém váhání Lemaîtreovo řešení, jež bylo zdaleka nejpracovanější.

### 3.2. Přijetí a další rozvíjení standardního modelu

O všeobecné přijetí standardního kosmologického modelu se nejvíce zasloužili G. GAMOW (1904–1968) a jeho žáci R. ALPHER (1921–2007) a R. HERMAN (1914–1997) [1] v sérii poválečných prací, které se věnovaly prvotní generaci jader atomů ve velmi raném vesmíru. V nich správně předpověděli převahu vodíku a helia nad všemi ostatními prvky Mendělejevovy tabulky a také existenci mikrovlnného tepelného záření kosmického pozadí. Obě předpovědi se posléze vyplnily a zejména PENZIASŮV (\*1933) a WILSONŮV (\*1936) objev reliktního záření v roce 1965 přinesl všem autorům teorie Velkého třesku zadostiučinění. Astronomická pozorování vzdálených rádiových zdrojů rovněž odpovídala teorii Velkého třesku a objev kvasarů s nevídanými zářivými výkony znamenal podstatné zvětšení oblasti pozorovatelného vesmíru. Díky lepším metodám určování jejich vzdáleností se pak zdařilo podstatně zvýšit odhad stáří vesmíru od Velkého třesku z původních 1,8 mld. let na 15–20 mld. let. Jako referenční model se osvědčil Einsteinův – de Sitterův plochý vesmír s deceleračním parametrem  $q_0 = \frac{1}{2}$ , který se od Velkého třesku trvale zvětšoval s rychlostí asymptoticky klesající do nekonečna (podobně jako kosmická raketa, která startuje ze Země přesně s únikovou rychlostí).

Otevřeným problémem zůstala neznámá hodnota kosmologické konstanty  $\Lambda$ , o níž se Einstein jednou vyjádřil jako o největší *volovině* (něm. die Eselei) svého života, protože ji zavedl do svých rovnic pole v roce 1917, aby zachránil statický model vesmíru. Když se ji však pokusili určit teoreticky částicoví fyzikové, způsobili největší blamáž v dějinách vědy. Zatímco pozorování dávají pro hustotu energie vakua hodnoty blízké nule, tak z kvantové teorie pole vychází neuvěřitelně obrovské číslo  $\sim 10^{120}$ !

V roce 1981 přišel s další komplikací standardního modelu americký fyzik A. GUTH (\*1947), když ukázal, že vesmír prodělal kratičkou epizodu extrémně rychlého rozepnutí (inflaci) v čase  $10^{-36}$  s po Velkém třesku [15]. Tím se původnímu chaotickému vesmíru „vyhladily vrásky“ a lze jej popisovat plochou geometrií. Zprvu velmi ztřeštěná domněnka elegantně řeší řadu problémů souvisejících s jemným vyladěním pozorovaného vesmíru a vysvětluje, proč lze dnešní vesmír popisovat plochou (Eukleidovou) geometrií a proč je tak výrazně homogenní a izotropní.

Už od roku 1933 víme zásluhou F. ZWICKYHO (1898–1974), že kupy galaxií obsahují více hmoty, než kolik ji můžeme vidět svítit v různých oborech elektromagnetického spektra. Tento nesoulad astronomického pozorování a dynamiky kup galaxií získal na významu zásluhou americké astronomky V. RUBINOVÉ (\*1928), která se věnovala proměňování křivek rotace v galaxiích v závislosti na vzdálenosti hvězd od centra příslušné galaxie. Během dekády 1970–1980 postupně ukázala na řadě rotačních křivek, že hvězdy obíhají kolem centra galaxií soustavně mnohem rychleji, než by odpovídalo velikosti zářivé hmoty galaxií. Z těchto měření vyplynulo, že na rychlosti rotace hvězd se podílí tajemná skrytá látka (*dark matter*), které je v pozorovaných galaxiích o dva řády více než hmoty zářivé.

Definitivní důkaz pak přišel ze zcela jiných oborů, tj. z pozorování fluktuací reliktního záření a také z pozorování rozštěpených obrazů vzdálených kvasarů, kde

rozteče jednotlivých obrazů téhož kvasaru jsou úhlově od sebe vzdáleny více, než jak by plynulo z hmotnosti zářivé látky mezilehlé kupy galaxií.

Konečně se v desetiletí 1998–2008 ukázalo, že ještě významnější složku vesmíru představuje naprosto tajemná skrytá energie (*dark energy*), jež se liší od skryté látky tím, že má odpudivé účinky, a dále též tím, že její prostorová hustota je navzdory rozpínání vesmíru stále stejná. To znamená, že jak vesmír stárne, význam skryté energie souběžně roste. Skrytá energie je v prostoru vesmíru zastoupena zcela rovnoměrně, na rozdíl od látky zářivé i skryté, které se koncentrují tam, kde vidíme hnízda galaxií.

Inventura zářivé a skryté složky hmoty vesmíru se naštěstí dá provádět několika zcela nezávislými metodami a je povzbuzující, že všechny metody dávají shodné výsledky, takže podíl zářivé látky vesmíru činí jen 4,8 %; zatímco skryté látky zhruba 27 % a skryté energie 68 %.

### 3.3. Reliktní záření

Zatímco v době objevu reliktního záření se jeho Planckova teplota dala určit s přesností  $\pm 1,0$  K, družice COBE to v roce 1994 dokázala už s přesností  $\pm 2$  mK, takže se podařilo objevit tzv. dipólovou anizotropii v rozložení teploty reliktního záření díky tomu, že Sluneční soustava se vůči poli reliktního záření poměrně rychle pohybuje. Tento pohyb směřuje do souhvězdí Lva a děje se rychlostí 390 km/s. Tím je ovšem definována privilegovaná souřadná soustava, v níž je pohyb vůči reliktnímu záření roven přesně nule. Drobné fluktuace v teplotě a případně i polarizaci reliktního záření změřila zatím s nejvyšší přesností družice ESA Planck, která pracovala v Lagrangeově bodě  $L_2$  v letech 2009–2013. Díky družici Planck víme, že vesmír je starý 13,8 mld. let,  $H_0 = 67$  km/s/Mpc a k oddělení látky od záření došlo 370 tis. let po Velkém třesku. Z polarizačních měření vyplynulo, že údajný objev reliktních gravitačních vln aparaturou BICEP 2 na jižním pólu je ve skutečnosti dokladem rozptylu reliktních fotonů na interstelárním prachu.

### 3.4. Gravitační vlny

I když se zdá, že existence gravitačních vln je nutným důsledkem OTR, po dlouhou dobu se skoro nikomu z významných fyziků do potvrzení takové domněnky nechtělo. Teprve objev zkracování oběžné periody binárního pulsaru PSR 1913 + 16 Taylorem a Hulsem v 80. letech minulého století povzbudil vážavé a postupně se začaly budovat detekční aparatury založené na interferometrii laserových paprsků na základních o kilometrových délkách. Nejdále pokročila dvojice amerických aparatur LIGO uvedená do chodu v roce 2002 v Louisianě a ve státě Washington. Délka ramen ve tvaru písmene L dosahuje 4 km. V současné době již LIGO dosáhlo plánovaného délkového rozlišení  $10^{-21}$ . Obě aparatury jsou od sebe vzdáleny asi 3 tis. km. V roce 2007 začala pracovat evropská aparatura VIRGO v italském Toskánsku s rameny dlouhými 3 km. Další aparatury staví Indie a Čína, ale zatím nebyl nikde zaznamenán nějaký solidní signál.

## 4. Závěr

I ze stručné a neúplné historie prolínání astronomie a OTR je patrné, jak vydatně Einsteinovy práce inspirovaly astronomy i astrofyziky k odvážným krokům do neznáma. Jestliže v době, kdy Einstein pracoval na dokončení OTR, byla zejména kosmologie téměř dočista v opovržení fyziků pro svou spekulativnost a nepatrnou vazbu na kusé astronomické poznatky o struktuře a historii vesmíru, začala se situace měnit paradoxně tím, že se v období do II. světové války báječně rozvinula kvantová mechanika a obě extrémní fyzikální koncepty se v kosmologii dokonce sblížily, jak to dokládají práce C. Gaposchkinové o chemickém složení hvězd, H. Betheho o termonukleárních reakcích v nitrech hvězd nebo G. Gamowa a jeho žáků o raných fázích vývoje vesmíru.

Dříve jen úzký obor očima viditelné astronomie se postupně rozšířil nejprve do rádiové oblasti elektromagnetického spektra a pak postupně pokryl neuvěřitelně široký rozsah vlnových délek záření v poměru 1 ku kvadrilionu. Souběžně začal výzkum kosmického záření včetně částic na Zemi zcela nedosažitelných energií. Nejnověji k tomu přibyla astročásticová fyzika. Pro OTR to znamenalo nové příležitosti vysoce přesného testování a nové výzvy, jak vysvětlit nečekané vlastnosti nově rozpoznávaných jevů a objektů: supernov, kvasarů, reliktního záření, pulsarů, zábleskových zdrojů záření gama, černých děr a veleděr a naposled minimálně dvou zcela tajemných forem hmoty, jež tvoří daleko největší složky hmoty vesmíru, než jakou je historicky dávno známá látka zářivá.

Další vývoj v astronomii se prakticky nedá předvídat. Soudě ze zkušenosti minulých desetiletí bychom byli určitě překvapeni, kdybychom v příštích letech nebyli překvapeni.

## L i t e r a t u r a

- [1] ALPHER, R., HERMAN, R., GAMOW, G.: *Thermonuclear reactions in the expanding universe*. Phys. Rev. 74 (9) (1948), 1198–1199.
- [2] BERTOTTI, B., et al.: *A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft*. Nature 425 (2003), 374–376.
- [3] BURGAY, M., et al.: *An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observation of a highly relativistic system*. Nature 426 (2003), 531–533.
- [4] CAMILO, F., et al.: *High-precision timing of PSR J1713+0747: Shapiro delay*. Astrophys. J. 437 (1994), L39–L42.
- [5] CIUFOLINI, I., PAVLIS, E.: *A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring effect*. Nature 431 (2004), 958–960.
- [6] DYSON, F. W., EDDINGTON, A. S., DAVIDSON, C.: *A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919*. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A 220 (1920), 291–333.
- [7] EINSTEIN, A.: *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*. Ann. Phys. 49 (7) (1916), 769–822.
- [8] EINSTEIN, A.: *Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field*. Science 84 (4. 12. 1936), 506–507.
- [9] EVERITT, C., et al.: *Gravity Probe B: Final results of a space experiment to test general relativity*. Phys. Rev. Lett. 106 (2011), 1–5.

- [10] FRIEDMAN, A.: *Über die Krümmung des Raumes*. Z. Phys. 10 (1) (1922), 377–386.
- [11] GENZEL, R., et al.: *On the nature of the dark mass in the centre of the Milky Way*. Monthly Not. Roy. Astronom. Soc. 291 (1) (1997), 219–234.
- [12] GHEZ, A., et al.: *High proper-motion stars in the vicinity of Sagittarius A\*: Evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy*. Astrophys. J. 509 (2) (1998), 678–686.
- [13] GOULD, A.: *Deflection of light by the Earth*. Astrophys. J. 414 (1) (1993), L37–L40.
- [14] GRYGAR, J.: *Zatmění Slunce v květnu 1919 a relativita*. Vesmír 78 (7) (1999), 387–389. Dostupné z: [www.astronom.cz/grygar/clanky/Otr\\_sun.htm](http://www.astronom.cz/grygar/clanky/Otr_sun.htm)
- [15] GUTH, A.: *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*. Phys. Rev. D 23 (2) (1981), 347–356.
- [16] HULSE, R., TAYLOR, J.: *Discovery of a pulsar in a binary system*. Astrophys. J. 195 (1975), Pt. 2, L51–L53.
- [17] KELLY, P., et al.: *Multiple images of a highly magnified supernova formed by an early-type cluster galaxy lens*. Science 347 (6226) (2015), 1123–1126.
- [18] LEMAÎTRE, G.: *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques*. Ann. Soc. Sci. Bruxelles 47 (1927), 49–59.
- [19] LEMAÎTRE, G.: *Evolution of the expanding Universe*. Proc. Nat. Acad. Sci. 20 (1) (1934), 12–17.
- [20] LINK, F.: *Sur les conséquences photométriques de la déviation d'Einstein*. Comptes Rendus Acad. Sci. 202 (16. 3. 1936), 917–919.
- [21] PACZYNSKI, B.: *Gravitational microlensing by galactic halo*. Astrophys. J. 304 (1986), 1–5.
- [22] REFSDAL, S.: *On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect*. Monthly Not. Roy. Astronom. Soc. 128 (1964), 307–310.
- [23] RENN, J., SAUER, T.: *Eclipses of the Star - Mandl, Einstein, and the early history of gravitational lensing*. Revisiting the Foundation of Relativistic Physics (eds. Ashtekar, A., et al.), Springer, 2003, 69–92.
- [24] ROBERTSON, D., et al.: *New measurement of solar gravitational deflection of radio signals using VLBI*. Nature 349 (1991), 768–780.
- [25] SHAPIRO, I.: *Fourth test of general relativity*. Phys. Rev. Lett. 13 (26) (1964), 789–791.
- [26] UDALSKI, A.: *The optical gravitational lens experiment*. Acta Astronom. 42 (1992), 253–284.
- [27] VALLS-GABAUD, D.: *The conceptual origins of gravitational lensing*. Dostupné z: <http://arxiv.org/pdf/1206.1165.pdfv1>
- [28] WALSH, D., et al.: *0957+561 A,B: twin quasistellar objects or gravitational lens?* Nature 279 (1979), 381–384.
- [29] WILLIAMS, J., et al.: *Relativity parameters determined from lunar laser ranging*. Phys. Rev. D 53 (12), 6730–6739.
- [30] ZWICKY, F.: *Nebulae as gravitational lenses*. Phys. Rev. 51 (4) (February 1937), 290–290.