Gravitační vlny

Štěpán Kolář

12. srpna 2016

„Nejkrásnější a nejhlubší pocit jaký může člověk zažít je poznat tajemno. To je základním principem náboženství, stejně tak jako veškerého seriózního úsilí v umění a ve vědě.“ Albert Einstein

Abychom mohli vysvětlit pojem gravitační vlny, je potřeba se nejprve zmínit o jiných důležitých pojmech, konkrétně o Einsteinově teorii relativity a černých dírách.

1 Teorie relativity

V běžném životě si pro popis okolního světa většinou vystačíme s newtonovskou mechanikou, která se učí na základní škole. Ovšem tato mechanika selhává při zkoumání malých objektů jako jsou částice, kde se používá *kvantová mechanika*, kterou se zabývat nebudeme. Při zkoumání ve vesmírného měřítka a vysokých rychlostí uplatníme právě *teorii relativity.*

S moderní teorií relativity přišel Albert Einstein, a přestože má v moderní fyzice obrovský význam, tak za ni nedostal Nobelovu cenu[1]. Teorii relativity lze rozdělit na speciální, která tu byla dříve a obecnou, která tu speciální doplňuje.

1.1 Speciální teorie relativity

Nejprve vám ke speciální teorii relativity řeknu pouze jednu věc a to, že existuje jakási nejvyšší možná rychlost, kterou se pohybuje světlo a objekty s kladnou klidovou hmotností této rychlosti nemohou dosáhnout. Pro zamyšlení jsem si připravil úlohu „ze života“:

Úloha: Jedu na skateboardu rychlostí $v = 3/4\,c$ a hodím před sebe hakysák, který vůči mě letí rychlostí $u = 3/4\,c$. Jaká bude rychlost hakysáku w, která je vůči Aničce, sedící na lavičce?

[1] Albert Einstein dostal Nobelovu cenu za fyziku za vysvětlení *fotoelektrického jevu* o kterém se učí ve čtvrtém ročníku střední školy.

Řešení: Podle klasické mechaniky bychom tyto rychlosti sečetli klasickým vztahem

$$w = u + v \tag{1}$$

a Anička by viděla míček letící rychlostí $3/2\,c$. Ovšem jak jsem již řekl, rychlosti světla nelze dosáhnout, takže jsme se dostali k problému, který klasickou mechanikou nevyřešíme.

Další možnost, která vás jistě napadne je, že hakysák se vůči Aničce bude pohybovat rychlostí světla, tedy c. Ovšem těleso, které se pohybuje v jedné vztažné soustavě pomaleji než rychlostí světla, nepřekročí rychlost světla ani v jiné soustavě.

Jaké bude správné řešení? Samozřejmě musíme nějak použít teorii relativity. Konkrétně použijeme Lorentzovu transformaci pro skládání rychlostí [1], která vypadá

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{u}{c^2} v}. \tag{2}$$

Rychlost kterou se míček vůči Aničce pohybuje je tedy $24/25\,c$.

Kde se ovšem taková divná skládání rychlostí vzala? Odpověď zní jednoduše: Náš prostor a čas se nechovají přesně, tak jak jsme zvyklí. Ovšem o něco složitější bude vysvětlit, jak se vlastně chová, proto se to pokusím podat nějak stravitelně.

Již jsem řekl, že světlo se pohybuje rychlostí c, která je přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s. Tato rychlost platí pro všechny *vztažné soustavy*, čili pro Aničku na lavičce, pro mě na skateboardu nebo pro kosmonauty na Mezinárodní vesmírné stanici. Aby byla rychlost světla zachována, musí se jí přizpůsobit veškerý okolní pohyb, z čehož plyne, to že prostor a čas v našem vesmíru se chovají jinak, než jsme zvyklí. Pro pozorovatele, který se vůči naši vztažné soustavě pohybuje (například pro Aničku vůči mě), náš čas dilatuje (prodlužuje se) a naše délky kontrahují (zkracují se). Z dilatace času a kontrakce délek plyne chování rychlostí, které jsem uvedl v příkladu. Odvození těchto vlastností je jednoduché a stačí k němu Pythagorova věta, přesto ho nebudu popisovat, ale dá se najít na internetu pod názvem „světelné hodiny“.

1.2 Obecná teorie relativity

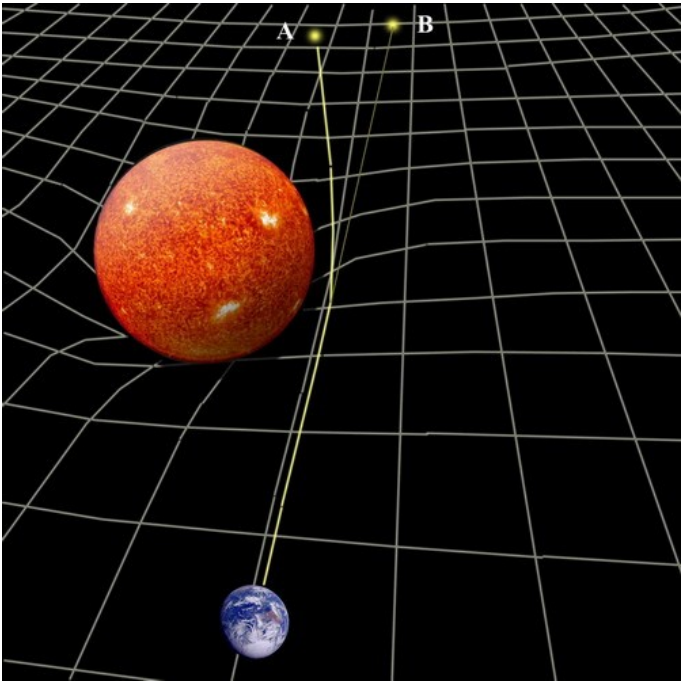
Vzhledem k tomu, že obecná teorie relativity je složitější, než ta speciální a na střední škole ji nejpravděpodobněji vůbec nepotkáte, tak jí zjednoduším pouze na základ, který bude stačit vysvětlení toho, co jsou to gravitační vlny a jak fungují.

Po uvedení speciální teorie relativity se objevil další problém, konkrétně s gravitací. Klasická mechanika předpokládá, že pokud na mě bude nějaké těleso (např.: Slunce na Zemi) působit gravitační silou a pokud se tato síla změní (Slunce zmizí), tak se účinky projeví okamžitě (Země hned přestane obíhat okolo Slunce). Speciální teorie relativity si s tímto problémem poradit neumí, protože po jejím zveřejnění Albert Einstein nad tím, jak se vlastně chová gravitace teprve přemýšlel.

V roce 1915 se mu povedlo přijít s revolučními myšlenkami, které tvoří základ obecné relativity[2].

První myšlenkou je, že působení gravitace se v prostoru šíří určitou rychlostí, konkrétně stejnou, jakou se pohybuje světlo.

Druhá myšlenka, která ještě více bourá představu o našem vesmíru je to, že hmotné objekty pokřivují okolní prostor tak, že pokud se něco pohybuje v místě jejich gravitačního působení, pak právě po nejkratší možné trajektorii.

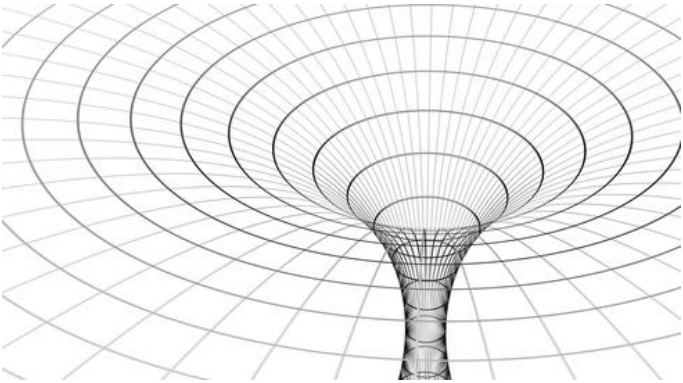


Obrázek 1: Slunce pokřiví prostor ve svém okolí tak, že fotony letící z bodu B vnímáme, jakoby přiletěly z bodu A.

2 Černá díra

O tom, že existují černé díry snad víte a předpokládám, že máte alespoň nějakou základní představu o tom, co to vlastně je. Pokud ne, stručně připomenu, že se jedná

[2]Přestože myšlenky obecné teorie relativity měl Albert Einstein v roce 1915, na články, které se touto teorií zabývají jsme si museli ještě rok počkat. Proto se dá i letos říct, že obecná relativita slaví 100 let.



Obrázek 2: Schématické znázornění pokřivení prostoru černou dírou.

o objekty s velkou hmotností, které svou gravitační silou přitahují vše, co se vyskytne v jejich blízkém okolí.

Okolo každé černé díry existuje hranice, kterou když překročíme, tak už nikdy neunikneme jejímu gravitačnímu působení. Nazýváme jej *horizont událostí*. Z místa horizontu událostí se nepodaří uniknout ani světlu.

Ti z vás, kteří znají seriál Červený trpaslík si jistě vzpomněli na epizodu, ve které lodní počítač říká jednomu členu posádky:

> *„Víš, s černou dírou se to má tak, že jejím určujícím rysem je černá barva. A s vesmírem se to má tak, že barva vesmíru, základní barva vesmíru, je černá. Tak jak ji mám asi vidět?“*

My však díky obecné relativitě umíme černou díru ve vesmíru najít, protože světlo v jejím okolí, ale dostatečně daleko od ní, mění svojí trajektorii.

Existuje také kvantový popis černých děr, ale do toho se raději pouštět nebudeme. Použijeme pouze popis, pomocí již zmíněné obecné relativity. Ta nám říká, že gravitační působení černých děr je vlastně pokřivení časoprostoru, který je díky gravitačnímu působení výrazně protažen.

3 Co jsou gravitační vlny

Zatím jsem mluvil o natahování a smršťování prostoru, ale pokud lze pokřivovat takto, je tu zajímavá otázka, zda se může natahovat a zkracovat tak, aby se vlnil? Možná je zbytečné tuto otázku pokládat, protože přednáška se jmenuje gravitační vlny, proto jistě tušíte, že to lze a že takováto pokřivení mohou být způsobena gravitací.

Aby gravitační vlny vůbec vznikli, potřebujeme nějaký impuls. Existuje více způsobů vzniku: jak se ještě zmíním, tak jednou z příčin vzniku byl *velký třesk*. Nás

teď bude zajímat takový impuls, který bude pokud možno co největší, konkrétně srážka dvou hmotných těles, nejlépe dvou černých děr.

Srážku dvou černých děr si ukážeme v následujícím videu `https://youtu.be/dyPJX6HURtI`. Na videu si můžeme všimnout, že okolo černých děr je prostor protažený. Jakmile se černé díry přibližují k sobě, dochází k napínání prostoru mezi nimi. Ve dvou místech se prostor naopak smršťuje, protože je sem napínaný prostor vytlačován. Zde jsou gravitační síly obou černých děr téměř vyrovnány a jsou tu dva body, kde jsou vyrovnány úplně. Kdybychom byli v bodě, kde jsou gravitační síly vyrovnány, nespadli bychom ani do jedné z těchto černých děr a to do doby, než se spojí. Po spojení černých děr se změní gravitační pole a místa, kde se síly vyrušovaly zmizí. Pokud by se gravitace šířila nekonečnou rychlostí, tato místa zmizela okamžitě bez dalších následků. Ve skutečnosti je namačkaný prostor potřeba někam vytlačit, proto se začne šířit a zvlní tak své okolí.

4 Jak pozorovat gravitační vlny

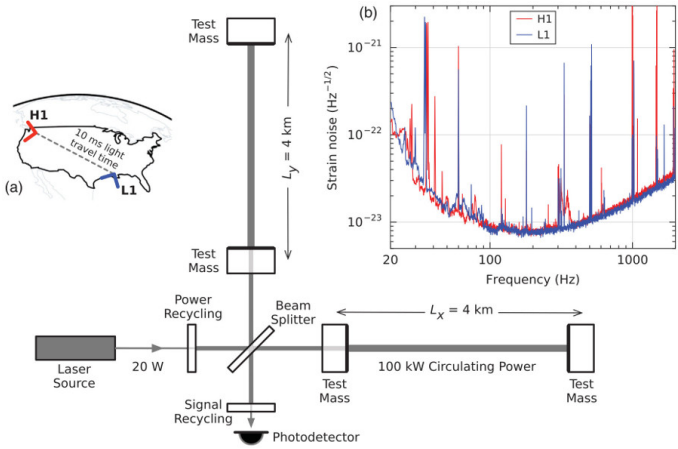
Pokud mluvíme o pozorovávání, tak první co nás napadne, že lze pozorovat pouhým okem. Pozorují se takto vlivy gravitačních vln?

Naštěstí je odpověď ne, protože pokud by byl jejich vliv tak markantní, že by se dal vidět, způsobilo by to řadu problémů. Napínání prostoru totiž způsobuje prodlužování vzdáleností a jeho stlačování naopak vzdálenosti zkracuje. Představte si, že se bude prodlužovat a zkracovat délka nějaké tyče, její materiál takové deformace nemusí vydržet a tyč pak praskne.

Z odpovědi tedy vyplývá, že gravitační vlny, které se u nás objevily byly malé, ale není vyloučeno, že mohou být větší, k tomu potřebujeme mít hmotnější černé díry, nebo bychom museli být blíž u srážejících se černých děr.

Na detekci gravitačních vln je zapotřebí tedy nějaký experiment. Zajímavostí je, že stejným experimentem, jakým gravitační vlny pozorujeme, jsme dokázali platnost speciální teorie relativity, respektive, že se světlo šíří konstantní rychlostí ve všech směrech nezávisle na vztažné soustavě.

Z laseru se pošle světelný paprsek na polopropustné zrcadlo, které je vůči laseru zkoseno o 45°. Na polopropustném zrcadle se paprsek rozdělí na dva paprsky, které putují do na zrcadla 1 a 2. Tato zrcadla jsou od polopropustného zrcadla ve stejné vzdálenosti. Naše planeta se ovšem pohybuje okolí Slunce, to se pohybuje okolo středu naší Galaxie a tak dál. Pokud by se světlo nepohybovalo ve všech soustavách stejnou rychlostí, na každé zrcadlo by dopadl paprsek v jinou dobu. Vzhledem k tomu, že se světlo pohybuje konstantní rychlostí, fotony na obě zrcadla dopadají ve stejnou dobu. Takto vypadá klidový stav. Pokud k nám dorazí gravitační vlna, na jedno ze zrcadel dopadnou fotony dřív, protože se změní vzdálenost mezi tímto zrcadlem a polopropustným zrcadlem. Abychom dokázali tyto změny pozorovat, tak za polopropustným zrcadlem bude umístěn detektor, který zkoumá amplitudy laserových paprsků.



Obrázek 3: Schéma experimentu LIGO, který slouží k detekci gravitačních vln.

4.1 Objev gravitačních vln

Gravitační vlny byly objeveny poprvé nepřímo v 70. a 80. letech, při pozorování binárního pulsaru PSR 1913+16. Složky tohoto pulsaru se vzájemně přibližovaly v souladu s obecnou teorií relativity. Pulsar vyzařoval energií v podobě gravitačních vln, které jsme bohužel nezpozorovali.

Za výzkum tohoto pulsaru dostali v roce 1993 Russel A. Hulse a Joseph H. Taylor Nobelovu cenu za fyziku [2, 3].

Přímým pozorováním byly objeveny až loni (resp.: 14. září 2015). Na zveřejnění objevu jsme si museli počkat do 11. února letošního roku. Důvod, proč jsme čekali na zveřejnění objevu je, že se měření pečlivě překontrolovalo. Tyto vlny způsobila srážka, která se stala před více, než miliardou let. Druhá vlna přišla 26. prosince 2015 a její detekce byla zveřejněna 15. června. Obě vlny zaznamenal experiment LIGO.

5 Výzkumná zařízení

Experiment LIGO (Obrázek 3) se nachází ve spojených státech a má dva interferometry, které leží každý na opačné straně spojených států. Jeden je v Livingstonu a druhý v Hanfordu. Větší počet detektorů potřebujeme pro to, abychom určili, že se opravdu jedná o gravitační vlny a ne o šum. Původně byl experiment v provozu mezi lety 2002 a 2010, kdy bohužel k žádné detekci nedošlo. Protože jsme potřebovali zvýšit jeho citlivost od roku 2010 se vylepšoval a byl znovu spuštěn v září 2015 (všimněte si, že k oběma objevům došlo v relativně krátké době, to může znamenat, že srážky černých děr jsou ve vesmíru častým jevem) [3].

LIGO není jediný experiment, který zkoumá gravitační vlny, v Evropě máme

Virgo, které s Ligem spolupracuje. Bohužel Virgo zatím žádné gravitační vlny neobjevilo.

Abychom mohli lépe získávat informace o okolním vesmíru, budou detektory přibývat. Virgo, které má zatím dva detektory plánuje vytvořit třetí detektor, díky čemuž budeme moci určit směr, ze kterého vlna přišla. Do projektu LIGO se plánuje zapojit Indie, která chce vlastní observatoř pojmenovat India LIGO, to umožní také určit směr zdroje vln. V Japonsku se chystá projekt KAGRA [4].

Mluvil jsem o tom, že gravitační vznikly i při velkém třesku. Jistě by bylo zajímavé tyto vlny také nějak pozorovat, to ale znamená, že budeme potřebovat mnohem větší detektor, než jsme dosud měli k dispozici a kde bychom jej měli postavit?

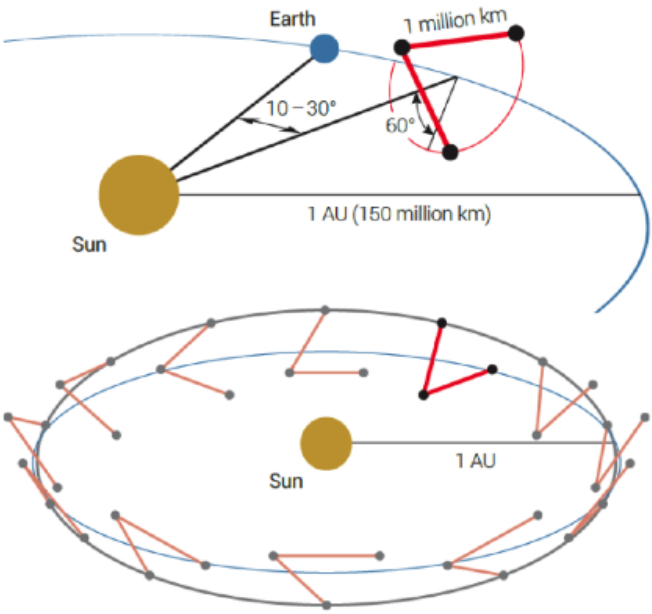
Nelepší bude mimo Zemi, kde zároveň budou eliminovány seismické otřesy. Projekt, který měl být na oběžné dráze okolo Slunce se jmenuje LISA a na jeho výstavbě se společně podílely ESA a NASA. LISA měly být tři družice, které by mezi sebou tvořily rovnostranný trojúhelník o délce ramen 5 000 000 km. Každá družice vysílala laserový paprsek na ty ostatní. Bohužel Američané od Lisy odstoupili a Evropa sama financování projektu neutáhla.

Místo Lisy byl tedy spuštěn nový, čistě evropský projekt, který se jmenuje NGO, ale přezdívá se mu eLISA. U projektu NGO byla potřeba snížit náklady na výstavbu projektu, toho bylo dosaženo díky zkrácení vzdáleností mezi sondami na 1 000 000 km, mezi dvěma sondami byl odebrán paprsek a úhel trojúhelníku se sevřel, takže detektor připomíná písmeno V. Celá soustava je nakloněná vůči ekliptice o 60°.

Dne 3. 12. 2015 úspěšně odstartovala sonda LISA Pathfinder, která testuje zařízení pro projekt eLISA [5, 6].

Tabulka 1: Porovnání projektů NGO a LISA (zdroj: Aldebaran.cz)

NGO	**LISA**
Formace trojúhelníku s jednou mateřskou a dvěma dceřinými sondami	Formace trojúhelníku se třemi identickými sondami
Vzdálenost sond 10^6 km	Vzdálenost sond $5 \cdot 10^6$ km
Jednoduchý Michelsonův interferometr (4 základny)	Mnoho konfigurací interferometrů, až 6 základen
Přímé měření amplitudy	Přímé měření amplitudy
Nepřímé měření polarizace z tvaru dráhy	Přímé a trvalé měření polarizace
Doba provozu: 2 roky, možné prodloužení na 5 let	Doba provozu: 5 let, možné prodloužení na 10 let

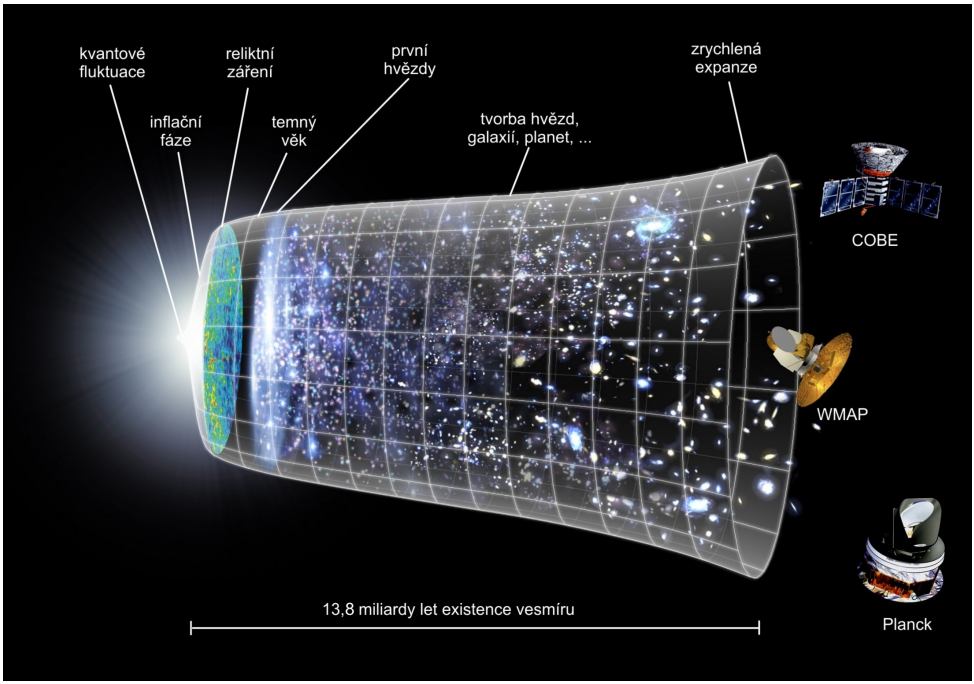


Obrázek 4: Sondy experimentu NGO obíhají kolem společného těžiště. Celá soustava pak obíhá okolo Slunce.

6 Závěrem o počátku vesmíru, aneb jak pozorovat velký třesk

Projekt LISA nám měl umožnit pozorovat počátky vesmíru, tento účel bude plnit NGO. Zatím jsme byli schopni pozorovat vývoj vesmíru pomocí *reliktního*[3] *elektromagnetického záření*[4], konkrétně pomocí mikrovln. Reliktní elektromagnetické záření nám však umožnilo pozorovat pouze do doby 400 000 po velkém třesku. V té době se oddělilo elektromagnetické záření od ostatní hmoty (Obrázek 5).

My bychom ovšem rádi viděli dál. To nám umožní právě *reliktní gravitační vlny*, díky nímž lze vidět inflační fázi (Obrázek 5), při které došlo ke prudké expanzi hmoty ve vesmíru a probíhala v době 10^{-35} s. Existuje však spousta teorií o tom, jak inflační fáze probíhala a jak dloho trvala, o kterých se zatím lze jen dohadovat.



Obrázek 5: Vývoj vesmíru s popisem jeho jednotlivých částí a sondy, zabývající se pozorováním vývoje vesmíru.

[3]Reliktní záření pochází z doby vzniku daného záření.

[4]Elektromagnetické záření je zobecněný pojem pro světlo, ale nemusí se jednat pouze o světlo z viditelného spektra, může se jednat třeba o gama záření nebo infračervené záření.

Seznam obrázků

1 Slunce pokřiví prostor ve svém okolí tak, že fotony letící z bodu B vnímáme, jakoby přiletěly z bodu A. (zdroj: Time Travel Research Center) 3
2 Schématické znázornění pokřivení prostoru černou dírou. (zdroj: Shutterstock.com) 4
3 Schéma experimentu LIGO, který slouží k detekci gravitačních vln. (autor: Abbott, B. P. a kol.) 6
4 Sondy experimentu NGO obíhají kolem společného těžiště. Celá soustava pak obíhá okolo Slunce. (zdroj: Glasgow University Magazine) 8
5 Vývoj vesmíru s popisem jeho jednotlivých částí a sondy, zabývající se pozorováním vývoje vesmíru. (zdroj: ESA) 9

Literatura

[1] Oldřich Semerák. *Speciální teorie relativity.* URL: `http://utf.mff.cuni.cz/~semerak/STR.pdf` (cit. 09. 07. 2016).

[2] *The Nobel Prize in Physics 1993.* URL: `http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/` (cit. 03. 08. 2016).

[3] Michal Hron. "Gravitační vlny potvrzeny". In: *Astronomický informační server astro.cz* (12. ún. 2016). URL: `http://www.astro.cz/clanky/vzdaleny-vesmir/gravitacni-vlny-potvrzeny.html` (cit. 19. 08. 2016).

[4] Pavel Vachtl. *Gravitační vlny byly zachyceny podruhé.* URL: `http://www.rozhlas.cz/leonardo/vesmir/_zprava/1624883` (cit. 04. 08. 2016).

[5] Petr Kulhánek. *LISA je mrtvá, eLISA skomírá, naděje umírá?* URL: `http://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_19_lis.php` (cit. 04. 08. 2016).

[6] Jiří Podolský. "Gravitační vlny poprvé zachyceny: GW150914 ze srážky černých děr". In: *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* 61 (2016), s. 89–105. ISSN: 00322423.

[7] Jaroslav Reichl a Martin Všetička. *Encyklopedie fyziky. Intenzita gravitačního pole.* URL: `http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/57-intenzita-gravitacniho-pole` (cit. 18. 07. 2016).