



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Název projektu	Rozvoj vzdělávání na Slezské univerzitě v Opavě
Registrační číslo projektu	CZ.02.2.69/0.0./0.0/16_015/0002400

Binární systémy s černou dírou

Průvodní list studijního materiálu

Jan Novotný a kolektiv

Opava 2020



**SLEZSKÁ
UNIVERZITA
V OPAVĚ**

Obsah

PŘEDMLUVA.....	3
1 BINÁRNÍ SYSTÉMY S ČERNOU DÍROU.....	4
1.1 Scénář.....	6
2 PEDAGOGICKO DIDAKTICKÉ POZNÁMKY	16
POUŽITÁ LITERATURA	17
PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON.....	20

PŘEDMLUVA

Tento průvodní list byl vypracován k jednomu ze seriálu 10 vzdělávacích pořadů určených pro sférickou projekci, které vznikly v rámci projektu „Rozvoj vzdělávání na Slezské univerzitě v Opavě“.

Zabývají se vesměs astrofyzikálními tématy, jak je zřejmé i z názvů jednotlivých pořadů:

Binární systémy s neutronovou hvězdou, Binární systémy s černou dírou, Optické efekty v extrémních gravitačních polích, Akreční struktury v blízkosti černých děr a neutronových hvězd, Vyzářování v silné gravitaci, Život pod černými slunci – exoplanety u černých děr, Kosmické mikrovlnné pozadí, Rentgenové observační kosmické mise, Akreční disk u černých děr zblízka, Astrofyzika plná extrémů

Jednotlivé scénáře připravovali samostatně jejich tvůrci – Jan Hladík, Adam Hofer, Debora Lančová, Jan Novotný, Martin Petrásek, Jan Schee a Tomáš Gráf.

Na výrobě se však kromě autorů scénářů podíleli také další tvůrci z řad zaměstnanců i studentů univerzity: Jan Bartoš, Lucie Dospivová, Viky Kurečků, Adam Langer, Vojtěch Pazdera, Ondřej Smékal a Kateřina Šimečková.

Všichni tvůrci děkují Slezské univerzitě v Opavě za možnost podílet se na tomto projektu a já si dovoluji poděkovat všem kolegyním a kolegům za spolupráci, bylo mi ctí se s nimi při práci na projektu setkávat.

Tomáš Gráf

1 BINÁRNÍ SYSTÉMY S ČERNOU DÍROU



TECHNICKÝ POPIS

Pro přehrání je třeba systém umožňující digitální sférickou projekci a software DIGSTAR.



PRŮVODCE STUDIEM – STUDIJNÍ PŘEDPOKLADY

Tento materiál navazuje na předchozí videoprojekci s názvem „Binární systémy s neutronovou hvězdou“. Pro pochopení tohoto materiálu je tedy nutné její znalost.



RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍHO MATERIÁLU

Materiál se zabývá popisem a vysvětlením problematiky binárních systémů v okolí černé díry, a je pokračováním materiálu který se zabývá binárními systémy v okolí neutronových hvězd (před puštěním této projekce je třeba zajistit shlédnutí tohoto dílu). V obou případech se jedná o sférická videa.



CÍLE STUDIJNÍHO MATERIÁLU

Student by měl získat konkrétní představu o těchto pojmech a problémech:

- Binární systém.
- Rentgenové hvězdy.
- Neutronové hvězdy.
- Černá díra.
- Kompaktní objekty v binárních systémech.
- Rentgenové pulsary vs. Neutronové hvězdy s rentgenovými záblesky.
- Binární systém s černou dírou.

- Binární systém se dvěma neutronovými hvězdami.
- Gravitační vlny.

KLÍČOVÁ SLOVA STUDIJNÍHO MATERIÁLU



Binární systém, gravitační vlna, neutronová hvězda, černá díra, kompaktní objekty, binární systém se dvěma neutronovými hvězdami, rentgenové pulsary.

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



Stopáž studijního materiálu: 15 minut

Doporučený čas ke studiu: 1 hodina

DALŠÍ ZDROJE – DOPORUČENÁ LITERATURA



LYNE, A. G. a Francis GRAHAM-SMITH. Pulsar astronomy. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2012. Cambridge astrophysics series. ISBN 978-1107010147.

DALŠÍ ZDROJE – ROZŠIŘUJÍCÍ LITERATURA



CARROLL, Bradley W. a Dale A. OSTLIE. An introduction to modern astrophysics. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. Cambridge astrophysics series. ISBN 978-1108422161.

1.1 Scénář

<p>Obraz 001</p> <p>Odlet</p>	<p>50 sec</p>	<p>//</p>
	<p><i>Ernest:</i> “Tak to máme konečně za sebou. Už jsem si myslel, že to odebrání vzorků nikdy neskončí.”</p> <p><i>Aida:</i>” No tobě se to lehkou řekne, ale kdo tu spoustu vzorků musí v průběhu cesty zpátky analyzovat?”</p> <p><i>Ernest:</i> “Jen si nestěžuj, alespoň se nebudeš nudit.”</p> <p><i>Aida:</i> “Myslím, že koncept nudy se s cestou vesmírem neslučuje.”</p> <p><i>Ernest:</i> “No dobře, dobře, je pravda, že tvoje zásluhy o naši bezpečnou cestu jsou nepopíratelné.”</p> <p><i>Aida:</i> “To bych řekla.”</p> <p><i>Ernest:</i> “Jaká skromnost! Hmm. No ... máme všechno připraveno na cestu zpátky?”</p> <p><i>Aida:</i> “Samozřejmě. Stačí jen, když tě uvedu zpět do stáze.”</p> <p><i>Ernest:</i> “To zas bude bolest hlavy...”</p> <p><i>Aida:</i> “Neboj, budu ti zase něco povídat, abys jsi rychleji usnul.”</p> <p><i>Ernest:</i>” No, to se právě bojím! Tak ale začni, ať to neprotahujeme.”</p> <p><i>Aida:</i> “Kde jsme minule skončili? ...Á ano, u binárních hvězd s kompaktními objekty.”</p>	<p><i>Ernest:</i> „Thank god we are already done. I have thought that the sampling process will never end “.</p> <p><i>Aida:</i> “Well, it is easily said for you is it not? I am the one who must analyze all the samples on our journey back to home “.</p> <p><i>Ernest:</i> „Ahh, stop complaining. At least you will stay active”.</p> <p><i>Aida:</i> „In my defense I actually think that this is highly impossible when you are traveling across space “.</p> <p><i>Ernest:</i> „Alright, no need to get so offended – I take my words back. I admit that your input in our safe journey is highly significant “</p> <p><i>Aida:</i> “I would certainly say so”.</p> <p><i>Ernest:</i> “So humble! So, is everything ready to go then?”</p> <p><i>Aida:</i> “Of course. The only thing left is putting you down to cryogenic sleep.”</p> <p><i>Ernest:</i> “Oh no, I can already see the headache coming...”</p> <p><i>Aida:</i> “I shall tell you a story to make it easier for you to fall asleep then”.</p> <p><i>Ernest:</i> “That is exactly what I am worried about! Alright,</p>

		<p>let's start right away.”</p> <p><i>Aida:</i> „Where did we finish the last time? Oh yes, I got it. It was about the Binary stars with compact objects.”</p>
<p>Obraz 002</p> <p>Rentgenové dvojhvězdy</p>	60 sec	//
	<p><i>Ernest:</i> “Vysvětlovala jsi mi, co jsou to rentgenové dvojhvězdy, takzvané X-ray binaries.”</p> <p><i>Aida:</i> “Jako “X-ray binaries” se označují binární systémy s periodickými nárůsty luminozity, tedy záblesky, které se opakují. Tyto astrofyzikální systémy se skládají ze dvou složek, jedna z nich je kompaktní objekt (tedy neutronová hvězda, nebo černá díra) a druhá je hvězda hlavní posloupnosti (nebo hvězda ve stádiu obra), která je označovaná jako “donor star”, neboli dárcovská hvězda. Dárcovská hvězda se jí říká proto, že předává hmotu kompaktnímu objektu.”</p> <p><i>Ernest:</i> “No jo, ale nevzpomínám si, že bys minule kompaktní objekt nějak přesněji definovala. Takže kompaktní objekt může být jen neutronová hvězda nebo černá díra?”</p> <p><i>Aida:</i> “Minule ses hlavně zajímal o to, co se může stát s Alfou Centauri. A tak jsme na definice neměli čas! Mezi kompaktní objekty se počítají neutronové hvězdy, černé díry a bílí trpaslíci. Nás s ohledem na x-ray binaries zajímají právě ty dva první typy.”</p>	<p><i>Ernest:</i> „You explained to me what the X-ray binaries are. “</p> <p><i>Aida:</i> „Those mentioned X-ray binaries are in other words binary systems with frequent increase of luminosity which means the flashes are constantly repeating themselves. These astrophysical systems consist of two parts: the first one is a compact object (which can be either a neutron star or a black hole). The second part refers to the star of the main sequence (or it might be a star in early stages of Giant) which is commonly called a “donor star”. The reason why we decided to name it this way is because it passes on its substance to other compact objects.”</p> <p><i>Ernest:</i> “Well I remember some parts of it but to be fair you have not offered me any clear definition regarding compact objects before today. So, if I understand it right, it seems to me that the compact object can be either a neutron star or black hole, right?”</p>

		<p><i>Aida:</i> "I remember the reason why. Last time you were so interested to get to know more about what might happen to Alpha Centaur that we did not have any time to discuss this further. The compact objects include neutron stars, black holes and white dwarfs. But since we talk about x-ray binaries the most important ones are the first two mentioned types."</p>
<p>Obraz 003</p> <p>Neutronová hvězda</p>	50 sec	//
	<p><i>Aida:</i> "Jestli chceš, mohu je definovat teď."</p> <p><i>Ernest:</i> "Eeee..."</p> <p><i>Aida:</i> (bez ohledu na to, co Ernest říká) "Jako neutronová hvězda se označuje jádro masivní hvězdy, které zůstane po jejím výbuchu. Exploze skončí aktivní fáze vývoje této hmotné hvězdy, a zůstane jen její jádro. Jedná se o jednu z nejmenších a zároveň nejhustších hvězdných objektů. Neutronová hvězda má poloměr v řádech desítek kilometrů, a hmotnosti kolem 1,3 až 2,5 hmotností Slunce. Velmi často se neutronové hvězdy projevují také jako pulzary. To jsou extrémně rychle rotující objekty, vysílající periodické rentgenové záření v úzce směřovaném segmentu. Jejich rotace je tak rychlá a periodičita pulsu tak přesná, že si podle nich řídím hodinky."</p> <p><i>Ernest:</i> "Vždyť ani žádné hodinky</p>	<p><i>Aida:</i> „If you are up to it, we can start with the definition right away. “</p> <p><i>Ernest:</i> „Eeee... “(does not sound very sure nor eager about it)</p> <p>Aida (starts talking despite Ernest’s obvious lack of enthusiasm): “Once the massive star explodes the only remaining thing left is its core which we call the Neutron star. Following the explosion, the active development stage of that particular massive star ends, and its core remains instead. It is one of the smallest and thickest star objects out there. Neutron star has got its radius by tens of kilometers and its weight between 1,3 – 2,5 in comparison to the weight of the Sun. Moreover, neutron stars can very often behave like pul-</p>

	nemáš ...”	sars. Those are extremely quick rotating objects sending periodic X-ray radiation in a very narrow and focused segment. Its rotation and periodicity are so quick and even that I even adjust my own watches in accordance with it”: <i>Ernest:</i> „Are you kidding? You don't even own a pair...! “
Obraz 004 Černá díra	50 sec	//
	<i>Aida:</i> “Černé díry jsou objekty z astronomického hlediska ještě exotičtější. Jejich gravitační pole je tak silné, že z něj žádný objekt včetně světla nemůže uniknout. Povrch černé díry se nazývá horizont událostí a je definován hranicí, kde rychlost potřebná k úniku překračuje rychlost světla. Hmota i záření padají dovnitř, ale nemohou uniknout. Jsou rozlišovány dvě třídy černých děr podle jejich hmotnosti. Hvězdné černé díry s hmotností stovek až tisíců hmotností Slunce a potom supermasivní černé díry o hmotnostech statisíců až milionů hmotností Slunce. Ty se nacházejí ve středu velkých galaxií, včetně té naší. První potvrzená černá díra byla objevena v roce 1971 v souhvězdí Labutě pomocí rentgenového záření.”	<i>Aida:</i> „From an astronomical point of view black holes are even more exotic types for us. Its gravitational field is so strong that no object or even light can escape its reach. The surface of the black hole is called the event horizon and is defined by the boundary of speed which needs to exceed the speed of light in order to break away. The substance and radiation fall inside but both are unable to escape. We distinguish two types of black holes based on their weight measurements. Stellar black holes with its weight from ten to thousand times bigger than the sun and the second ones are supermassive black holes with weight from ten thousand to million times bigger than the sun itself. Both can be found within the center of big galaxies such as ours. The first confirmed black hole was

		discovered in 1971 in the swan´s constellation X-ray”.
Obraz 005 Kompaktní objekty v binárních systémech	40 sec	//
	<p><i>Ernest:</i> (zívnutí) “A takové objekty tedy mohou být součástí binárního systému?”</p> <p><i>Aida:</i> “Ano, existují různé typy binárních systémů, podle toho, jaká je dárcovská hvězda, nebo podle toho, jaký je kompaktní objekt. Existuje tak mnoho kombinací, mezi nejzajímavější soustavy patří rentgenové pulsary (tzv. X-ray pulsars), systémy s neutronovými hvězdami (tzv. neutron star mergers) nebo binární systémy s černými dírami (tzv. black hole binaries).”</p> <p><i>Ernest:</i> “A čím jsou právě tyhle typy tak zajímavé?”</p>	<p><i>Ernest:</i> (is jawing out loud): so, to sum it up: those objects can be a part of the Binary system, am I right? “</p> <p><i>Aida:</i> Yes, that is indeed correct. There are numerous types of Binary systems, but it mostly depends on what type of a donor star or a compact object it is. The combination of systems is endless. I can name the most intriguing ones among all of them; for example, X-ray pulsars, neutron star mergers or black hole binaries.”</p> <p><i>Ernest:</i> “Well and what is so interesting about those particular types then?”</p>
Obraz 006 Rentgenové pulsary vs. Neutronové hvězdy s rentgenovými záblesky	60 sec	//
	<p><i>Aida:</i> “Zvláště růzností jejich chování. Nejdříve se podívejme na dvojhvězdu s neutronovou složkou. Zde dochází k předávání hmoty dárcovskou hvězdou neutronové hvězdě, což vede k vyslání rentgenového záblesku. Existují dvě varianty., V první konfiguraci dopadá hmota po ztrátě hyb-</p>	<p><i>Aida:</i> „Primarily the diverse pattern of their behavior. Let's have a look first at the binary star accompanied by neutron essence. What happens here is the transmission of the substance from the donor star onto the neu-</p>

	<p>nosti na povrch neutronové hvězdy, dochází k termonukleární reakci nebo k uvolnění gravitační energie a následně k rentgenovému záblesku z povrchu hvězdy. Jedná se o tzv. X-ray burst neutron star, neutronovou hvězdu s rentgenovými záblesky. Druhou možností reprezentují pulzary, kde také dochází k přetoku látky, ale rentgenové záření je emitováno jako kužely rentgenových záblesků z magnetických pólů tzv. x-ray pulsars. Všechny tyto případy jsou pozorováními dobře rozlišitelné.”</p> <p><i>Ernest:</i> “Předpokládám, že je to důležité hlavně kvůli těm hodinám.”</p>	<p>tron star which results in a direct send-off of x-ray flashes. As a matter of fact, there are two alternatives we know of. The first one is when the substance falls off following the loss of the weight right on top of the neutron star and this concludes either into a thermonuclear reaction or a release of gravitational energy followed by the x-ray burst on the surface of the neutron star. We officially call it X-ray burst neutron stars. The second occurrence is represented by pulsars whose substance is overflowing but its x-ray radiation is instead emitted in a form of conical flashes called x-ray pulsars. All these types are easily distinguishable based on our observations.”</p> <p><i>Ernest:</i> “I assume its importance is so high due to the time, right?”</p>
<p>Obraz 007</p> <p>Binární systém s černou dírou</p>	<p>50 sec</p>	<p>//</p>
	<p><i>Aida:</i> (nereflektuje, co bylo řečeno a pokračuje dál)</p> <p>“V případě, kdy je součástí binárního systému černá díra, dochází hned k několika efektům. Zaprvé dárcovská hvězda předává svou hmotu černé díře a kolem ní se tvoří akreční disk. Hmotu v akrečním disku klesá k horizontu událostí, odkud už nic nemůže</p>	<p><i>Aida</i> (carries on while ignoring what was said out loud by Ernest himself): If the black hole happens to be a part of binary systems there are several effects accompanied with it. Firstly, the donor star passes over its substance onto black hole with the accretion-</p>

	<p>uniknout. Zde pozorujeme dva druhy rentgenového záření, první, měkké rentgenové záření, vychází ze zahřátého akrečního disku. Dále se kolem černé díry formuje korona extrémně horkého plynu. Když se uvolněné nízkenergetické fotony z disku střetnou s relativistickými elektrony z okolí korony, jsou vlivem inverzního Comptonova jevu rozptýleny do vyšších energií. Pak pozorujeme i tvrdé rentgenové záření.”</p> <p><i>Ernest:</i> “Zase jsem se asi dozvěděl víc, než jsem potřeboval vědět.”</p>	<p>ary disk forming around it. Substance inside the accretionary is dropping down towards the event horizon where nothing can leave from it anymore. We can observe two types of x-ray radiation here: let's start with the first type – soft x-ray radiation flowing from the inside of the accretionary disk. In the meanwhile, there is a heated gas forming around the corona. When the released low energetic futons from the disk crash against the relativistic electrons from the surroundings of corona it diffuses them into the higher energy levels due to Compton's inverse phenomenon. Afterwards we can oversee another type – hard x-rays.</p> <p><i>Ernest:</i> “Once again I have found out more about this topic than I asked for”.</p>
<p>Obraz 008</p> <p>Binární systém se dvěma neutronovými hvězdami</p>	<p>50 sec</p>	<p>//</p>
	<p><i>Aida:</i> (nereflektuje, co bylo řečeno a pokračuje dál) “Speciální situace binárního systému nastane v případě, když jsou obě složky neutronovými hvězdami a obíhají dostatečně blízko sebe. Hvězdy se stále přibližují, až se vzájemně spojí v masivnější neutronovou hvězdu, nebo dojde ke vzniku černé díry. Který případ nastane, závisí na tom, zda výsledná hmotnost</p>	<p><i>Aida:</i> (does clearly not care about what was said again and continues with her explanation): “Quite intriguing case occurs if both components happen to be neutron stars while orbiting in proximity. Both stars come closer until they unite either into one massive neutron star or</p>

	<p>překoná Tolmanovu-Oppenheimerovu-Volkoffovu mez, která je 2,2 až 2,9 hmotnosti Slunce. Toto spojení vyvolá krátké záblesky gama záření tzv. "short gama-ray bursts". Kdyby byl jeden z prvků binárního systému černou dírou a druhý neutronovou hvězdou, došlo by k podobným zábleskům. Tuto událost obecně označujeme jako tzv. "kilonovu". "</p> <p><i>Ernest:</i> (unaveně) "Hele, ty dokonalá inteligence! Tohle už mi něco říká. Á nebyly u toho, ... náhodou ... detekovány gravitační vlny?"</p>	<p>create a new black hole. The outcome for both cases is affected if the final weight exceeds the Tolman-Oppenheimer-Volkoff limit measure by 2,2 - 2,9 of the Sun's weight. The union causes short gamma-ray bursts. The same applies if one of the Binary elements has been black hole and the second one a neutron star. We commonly refer to this occurrence as „kilonovae".</p> <p><i>Ernest (sounds very exhausted):</i> Are you sure you are human, Aida? How come you know so many things, that is quite unbeknown to me.... Anyhow, I am finally starting to get a better grasp of it. Which reminds me: weren't there detected some...hm...gravitational waves?"</p>
<p>Obraz 009</p> <p>Gravitační vlny</p>	<p>50 sec</p>	<p>//</p>
	<p><i>Aida:</i> "Ano. Že už by ses probral z dřímoty? Ve čtvrtek 17. srpna 2017 gravitační observatoře LIGO a VIRGO skutečně zaznamenaly pulzy gravitačních vln, způsobených z 99,94 % právě spojením dvou neutronových hvězd. Tento pulz gravitačních vln byl označen jako GW170817."</p> <p><i>Ernest:</i> (usínající) "Tak to si asi nezapamatuju. Ale pokud si dobře vzpomínám, tak gravitační vlny jsou definované jako jemné záhyby v časopro-</p>	<p><i>Aida:</i> „Yes, that is indeed correct. It looks like you are finally taking in everything that I have said. On Thursday 17th of August back in 2017 there were really recorded pulses of gravitational waves by LIGO/VIRGO gravitational observatory itself who believe that those pulses were by 99,94 % product of two connected neutron stars. This pulse has been officially named as GW170817."</p>

	<p>storu. (dlouhé zívnutí)?”</p> <p><i>Aida:</i> “Je to tak. Byly poprvé detekovány v září 2015, kdy již zmíněné detektory LIGO a VIRGO poprvé zaznamenaly gravitační vlny. Objev gravitačních vln byl následně potvrzen v únoru 2016. Detekce zaznamenala sloučení binárního systému, jehož obě složky tvořily černé díry o hmotnosti zhruba 30 Sluncí.”</p>	<p><i>Ernest:</i> (is falling asleep already): I will probably forget this in a minute. But if I remember correctly those gravitational waves are defined as a fine swirl in space-time, right? (yawns out loud)? “</p> <p><i>Aida:</i> „Exactly as you said. They were detected on the September back in 2015 by previously mentioned LIGO/VIRGO detectors who before that have already been successful in detecting those gravitational waves on another occasion. The discovery of gravitational waves has been officially confirmed during February 2016. The detection device has taken a note of the union of a binary system whose element consisted of two black holes and its weight about 30 times heavier than the Sun's.”</p>
<p>Obraz 010</p> <p>LIGO</p>	<p>10 sec + video cca 90 sec</p>	<p>//</p>
<p>usínání</p>	<p><i>Aida:</i> “K zařízení LIGO/VIRGO mám pěkné video, chceš se na něj podívat?”</p> <p><i>Ernest:</i> ... hmm.</p> <p><i>Aida:</i> “Tak já ti ho pustím, ale ještě nespi!”</p>	<p><i>Aida:</i> „In relation to the LIGO/VIRGO detector I have got quite a lovely video here! Would you like to take a look, Ernest? “.</p> <p><i>Ernest:</i> “Hmmm.”</p> <p><i>Aida:</i> „Excellent, wait until you see it and please try to keep your eyes open”.</p>
<p>Obraz 011</p>	<p>20 sec</p>	<p>//</p>

rozloučení		
	<p><i>Aida:</i> “Tak co Erneste, líbilo se? Erneste... haló ... No nic, sladké sny. A já se můžu dát do práce.”</p> <p>(Pustí si do pozadí operu Aida a brouká si při práci.)</p> <p><i>Aida:</i> “Takže co tady máme, tak postupně - nejprve vzorek číslo jedna...”</p> <p>...</p>	<p><i>Aida:</i> „So, what is your opinion on it so far? Did you like it? Ernest, hey! Oh, dear – sweet dreams then. At least I can focus on my work now”. <i>(She turns on an opera music and hums along with it while she keeps working.)</i></p> <p><i>Aida:</i> „So, what have we got here – firstly, let's start with sample number one...”</p> <p>....</p>



2 PEDAGOGICKO DIDAKTICKÉ POZNÁMKY



PRŮVODCE STUDIEM

Obory: 053 Vědy o neživé přírodě, 0532 Vědy o Zemi, 0533 Fyzika (klasifikace podle CZ-ISCED-F 2013).

Studentům bude ve sférické projekci puštěno video s výkladem. Jedná se o interaktivní doplněk běžné výuky. Pedagog po zhlédnutí odkáže na doplňující literaturu a zodpoví na dotazy.



ÚKOL K ZAMYŠLENÍ

Co vše může Aida při zpáteční cestě ze vzorků analyzovat?



SAMOSTATNÝ ÚKOL

Při pečlivém astrometrickém měření se zjistilo, že komponenta Alfa Centauri A je vzdálená od barycentra 11,2 AU. Jaká je její hmotnost? (počítejte se vzdálenosti obou komponent od sebe 23,7 AU a celkovou hmotností systému 2,09 hmotností Slunce).

POUŽITÁ LITERATURA

KORNMESSER, M. *Close-up of jets* [online]. In: . [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/videos/eso1840h/>

BEDROCKPERSON. Simplistic representation of the formation of neutron stars. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Neutronstarsimple.png>

RAPHAEL.CONCORDE a Daniel MOLYBDENUM. Neutron Star gravitational lensing. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neutron_Star_gravitational_lensing.png

SMITS, Jm. Animation of a rotating pulsar. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pulsar_anim.ogv

Jeremy SCHNITTMAN a Francis REDDY. NASA Visualization Shows a Black Hole's Warped World. *NASA's Goddard Space Flight Center* [online]. 2020 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-visualization-shows-a-black-hole-s-warped-world>

R, Alain. BH LMC: Simulated view of a black hole in front of the Large Magellanic Cloud. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BH_LMC.png

EHT COLLABORATION. First Image of a Black Hole. *Eso* [online]. 2019 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/images/eso1907a/>

ESO/L. CALÇADA. Artist's impression. *ESO* [online]. 2017 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/videos/eso1004c/>

NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/, J. SCHNITTMAN, J. KROLIK a S. NOBLE. NASA-led Study Explains How Black Holes Shine in Hard X-rays. *ESO* [online]. 2013 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=11206>

EVANS, Christopher W. Neutron star merger seen in gravity and matter. *ESO* [online]. 2017 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/videos/eso1733h/>

ESO/M. KORNMESSER. Artist's impression of stars born in winds from supermassive black holes. *Eso* [online]. 2017 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/videos/eso1710b/>

ESO/L. CALÇADA. Artist's impression of the pulsar PSR J0348+0432 and its white dwarf companion. *Eso* [online]. 2013 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/videos/eso1319a/>

ESO/L. CALÇADA. Neutron star merger animation ending with kilonova explosion. *Eso* [online]. 2017 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/usa/videos/eso1733b/>

SIMULATING EXTREME SPACETIMES. BBH gravitational lensing of GW150914. *Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:BBH_gravitational_lensing_of_gw150914.webm

ABBOTT, B. P., R. ABBOTT, T. D. ABBOTT, et al. GW170817 spectrogram. *Physical Review Letters*. 2017, 119 (16). ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101

LIGO LAB CALTECH : MIT. *The Sound of Two Black Holes Colliding* [online]. In: . 2016 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QyDcTbR-kEA&feature=youtu.be>

LIGO/SXS, R. HURT a T. PYLE. *Journey of a Gravitational Wave* [online]. In: . 2016 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=F1DtXIBrAYE>

KOLB, Ulrich. *Extreme environment astrophysics*. Revised from the 1986 Russian edition. Cambridge: Cambridge University Press, c2010. ISBN 978-052-1193-443.

LIPUNOV, Vladimir. In the world of Binary Stars. Revised from the 1986 Russian edition. Moscow: MIR, 1989. ISBN 5030005285.

Australian Telescope National Facility: Binary Stars [online]. 2020 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/binary_intro.html

Ask an Astrophysicist: Binary Star Systems. *Nasa* [online]. [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: https://imagine.gsfc.nasa.gov/ask_astro/binary.html

SPACE.COM STUFF. *Binary Star Systems: Classification and Evolution* [online]. 2018 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.space.com/22509-binary-stars.html>

LEHMANN, Holger. *Analysis of Spectroscopic Binaries* [online]. 2017 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://docplayer.net/25204486-Analysis-of-spectroscopic-binaries-holger-lehmann-thuringer-landessternwarte-tautenburg.html>

ESO [online]. Dostupné z: <https://www.eso.org/public/>

NASA [online]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/>

Wikipedia [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/>

Pixabay [online]. Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/>

Youtube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/>

Artlist [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/>

EVANS & SUTHERLAND, Digistar 6 [software]. 2016 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.es.com>. Požadavky na systém: Win 10 Server, Full dome projekce.

PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON



Čas potřebný ke studiu



Klíčová slova



Průvodce studiem



Rychlý náhled



Tutoriály



K zapamatování



Řešená úloha



Kontrolní otázka



Odpovědi



Samostatný úkol



Pro zájemce



Cíle kapitoly



Nezapomeňte na odpočinek



Průvodce textem



Shrnutí



Definice



Případová studie



Věta



Korespondenční úkol



Otázky



Další zdroje



Úkol k zamyšlení

Název: **Binární systémy s černou dírou**

Autor: **Jan Novotný a kolektiv**

Vydavatel: Slezská univerzita v Opavě

Určeno: studentům Slezské univerzity v Opavě

Počet stran: 21

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.