



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

Optické efekty v extrémních gravitačních polích

Průvodní list studijního materiálu

Jan Hladík a kolektiv

Opava 2020



**SLEZSKÁ
UNIVERZITA
V OPAVĚ**

Obsah

PŘEDMLUVA.....	3
1 OPTICKÉ EFEKTY V EXTRÉMNÍCH GRAVITAČNÍCH POLÍCH	4
1.1 Scénář.....	7
2 PEDAGOGICKO DIDAKTICKÉ POZNÁMKY	30
POUŽITÁ LITERATURA	32
PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON.....	34

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, Vyzařování 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 OPTICKÉ EFEKTY V EXTRÉMNÍCH GRAVITAČNÍCH POLÍCH



TECHNICKÝ POPIS

Audiovizuální dílo vzniklo výhradně ve formátu vhodném pro projekce pořádané ve full dome planetáriích. Plně využívá možností daných zobrazováním na sféru. Nemí vhodné pro běžnou, rovinnou, projekční plochu, byť náhledově jej lze i na ní sledovat.



PRŮVODCE STUDIEM – STUDIJNÍ PŘEDPOKLADY

Od diváka (studenta) není vyžadována žádná předběžná znalost problematiky ani jakákoli příprava. Pro porozumění – na zamýšlené úrovni – diskutovaného tématu postačí duševní přítomnost zúčastněného po dobu prezentace obsahu. Jedním z klíčových předpokladů je tak schopnost udržet pozornost.

Nejvhodnější cílovou skupinou jsou studenti středních škol, či jejich absolventi, dosud neznalí obecné teorie relativity a jejích důsledků.



RYCHLÝ NÁHLED STUDIJNÍHO MATERIÁLU

Pořad „Optické efekty v extrémních gravitačních polích“ uvádí základní poznatky a východiska problematiky gravitačního čočkování mezi laickou veřejností (jmenovitě studenty středních škol). Přemostňuje propast mezi vědeckou odbornou literaturou a diváky, která se rozevírá s neznalostí božího jazyka – matematiky. Je zaměřen komplexně, od popisu raných fází lidského poznávání, přes první predikce, objevy, simulace a pozorování až po současný vývoj směřující k praktickému uplatnění.

Doplňující text je průvodním materiálem k vytvořenému AV pořadu a jeho studium není pro shlédnutí pořadu podstatné. Informačně jej však dále rozvíjí. Krom jiného, obsahuje textový přepis (autorsky upraveného) komentáře díla, který lze dále efektivně použít, např. pro tvorbu cizojazyčného překladu či titulků. Uvádí užitečný soupis literatury hloubkou myšlenek i zpracováním přístupné zamýšlenému okruhu diváků.

CÍLE STUDIJNÍHO MATERIÁLU



Dílo cílí seznámit diváka s problematikou optického zobrazování v silných gravitačních polích. S historií jeho modelování, prvních objevů i s jeho užitím při dnešním zkoumání vesmíru. Klade si za cíl poučit i motivovat. Je vstupním krůčkem k budoucímu hlubšímu studiu zmíněných dějů. Dotváří divákovu základní (či mizivou) představu o fungování světa kolem nás, dle všeobecně přijímané Einsteinovy obecné teorie relativity.

KLÍČOVÁ SLOVA STUDIJNÍHO MATERIÁLU



gravitace – obecná teorie relativity – optické zobrazování – prostoročas – nulové geodetiky – extrémně kompaktní objekty – gravitační čočkování – astronomie – vesmír

ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU



Stopáž studijního materiálu: 27 minut

Doporučený čas ke studiu: předběžné ani následné studium se nevyžadují (autoři doporučují věnovat se problematice po zbytek života)

DALŠÍ ZDROJE – DOPORUČENÁ LITERATURA



- Luminet, J. P. : *Black holes*. Cambridge University Press, Cambridge 1992. ISBN 0-521-40029-5.
 - Müller, T.; Weiskopf, D. : General-Relativistic Visualization. *Computing in Science & Engineering* **13**(6), 2011.
 - Šolc, M. : Gravitační čočky, Einstein a Praha. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **44**(3), 1999.
 - Taylor, E. F.; Wheeler, J. A. : *Exploring Black Holes – Introduction to General Relativity*. Addison Wesley Longman, USA. ISBN 0-201-38423-X.
-



DALŠÍ ZDROJE – ROZŠIŘUJÍCÍ LITERATURA

Základní učebnice obecné relativity:

- Misner, Ch. W.; Thorne, K. S.; Wheeler, J. A. : *Gravitation*. Princeton University Press, Princeton and Oxford 2017. ISBN 978-0-691-17779-3.

Základní přehled o současné astrofyzice:

- Carroll, B. W.; Ostlie, D. A. : *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, Cambridge 2017. ISBN 978-1108422161.

Jediný (nám) známý studijní, **česky psaný**, text o gravitačním čočkování:

- Bakala, P. : Extrémní gravitační lensing v silné gravitaci černých děr a neutronových hvězd [studijní text]. Slezská univerzita v Opavě, Opava 2019. [Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/338611765_Extremni_gravitacni_lensing_v_silne_gravitaci_cernych_der_a_neutronovych_hvezd_skripta]

1.1 Scénář

- Ježto přepis nenahrazuje shlédnutí pořadu, nejsou zde vloženy obrázky, animace, videa a ani odkazy na ně; úplnou audiovizuální roli zastává pouze vzdělávací pořad sám o sobě. Předkládaný přepis komentáře (autorsky upravený) slouží jako výrazná opora při orientaci ve struktuře a obsahu díla.

Scéna 1

Planety, hvězdy, souhvězdí, cizí světy... od úsvitu lidských dějin člověk vzhlížel na nebe. Sledoval zdánlivé pohyby hvězd, zakryty nebeských těles a jiné rozličné úkazy odehrávající se na hvězdné obloze. Světlo mu bylo jediným zpravodajcem o veškerém dění v okolním vesmíru. Avšak jeho povaha zůstávala naprostou záhadou. Přisuzoval se mu božský původ. Jedna jeho vlastnost ale byla nasnadě. A tak se již minimálně od starověku nekriticky věřilo, že světlo se šíří po přímkách. Tento zaběhlý omyl definitivně vyvrátil Albert Einstein, jako nutný důsledek své obecné teorie relativity.

Planets, stars, constellations, alien worlds...humankind has looked up to the sky since the first dawn in human history. All of them watched the apparent movement of the stars, overlaps of star bodies and any other possible views occurring on the sky itself. The only reporter of any event in the space represented a light. Its character remained a whole mystery for them all and thus they decided upon giving it a divine origin. One of its characters though was all but questioned: since antiquity was a general belief that light spreads along a bisector. This was refuted by Albert Einstein with his general theory of relativity over time.

Scéna 2

Optické jevy v extrémních gravitačních polích

Scéna 3

S popisem vzájemného gravitačního působení dvou hmotných těles přišel již Isaac Newton, který svým působením výrazně zasáhl nejen do matematiky, mechaniky, ale i optiky. Světlo si představoval jako proud částic, a tak nejspíše v analogii s vrhy těles na Zemi, si ve svém pojednání o optice pokládá zásadní otázku: „Nepůsobí na světlo tělesa na dálku? A neohýbá toto působení jejich paprsky? A není snad takové působení nejsilnější, jsou-li si nejbližší?“

The description of the law of universal gravitation by Isaac Newton had a major influence not only on math, but also on mechanics and optics as well. He thought about light as a particle stream, so in his analogy of litter of bodies to the ground asked himself these significant questions about optics: is the light affected by the distant ensembles? And if so, does this have an effect on its beams? And is it not the most effective if both get as close to each other as they can?

Scéna 4

Dalších téměř sto let trvalo, než Johann von Soldner provedl na základě Newtonovy teorie příslušné výpočty. Vyšlo mu, že Slunce odkloní blízko procházející paprsky ze vzdálených hvězd maximálně o 84 setiny úhlové sekundy. Ač své zjištění publikoval v Astronomické ročence, jednalo se čistě o teoretický výsledek, který nebyl podepřen měřením. Na jeho současníky měl článek pramalý vliv. Dnes víme, že ho v tomto zjištění o pár let předběhl Henry Cavendish. Ten svůj objev neuveřejnil.

Rozdělíme-li obvod naší Unisféry na 360 částí a každou z nich dále na 3600 dílků, získáme při jeho pozorování ze středu projekční plochy názornou představu velikosti jedné úhlové sekundy. Lineární velikost takového dílku by ale byla více než 100krát menší, než je rozměr projekčního bodu, který vám zde můžeme ukázat! Ani lidské oko takovou rozlišovací schopnost nemá. Ta je zhruba 28 úhlových sekund. Sousední dílky byste tak z této vzdálenosti vůbec okem nerozlišili.

It took almost 100 hundred years before Mr. Johann von Soldner did relevant calculations based on Newton's theory. The results provided him with the conclusion that all the incoming beams from far away stars are diverted by the Sun with the maximum up to 84 hundredth of an angular second. Even though he published this information within the astronomy yearbook, it was taken lightly since it was only a theory result with no supporting measurements as a backup. Moreover, his research did not have a significant influence on his contemporaries back then. As of now we are aware that Mr Henry Cavendish actually reached this conclusion a few years before him already but unfortunately he did not publish his discovery anywhere at that time.

If we divide the perimeter of our Unisphere into 360 parts and after that into another 3600 parts, we get an idea of the size of one angular second based on the observation from the middle part of the projection screen. Although the linear size of such a part would be over 100times smaller than the perimeter of the projection point which we can show you here. Besides the fact that even the human eye does not have such a distinguished ability - it is around 28 angular seconds. As a matter of fact, you would not be able to distinguish even its adjacent part with your own eye.

Scéna 5

Za sto let přichází na scénu Albert Einstein a nezávisle na Soldnerových výpočtech dochází z principu ekvivalence k obdobnému výsledku. Později si do deníku poznamenává, že by tak gravitační pole mohlo způsobovat vícenásobné obrazy zdroje. Myšlenku nepublikuje.

Astronoma Erwina Freundlicha se ptá na uskutečnitelnost měření ohybu paprsku vlivem gravitačního pole. Je uspořádána vědecká výprava na ruský Krym, kde během úplného zatmění Slunce by snad bylo možné takový jev pozorovat. Úsilí je však zhceno První světovou válkou.

Einstein pokračuje v budování své teorie a týden před finalizací její logické struktury odvozuje z linearizované rovnice pole, že hodnota odchylky světelného paprsku by měla být zhruba dvojnásobná oproti předpovědi dané gravitační teorií Newtona. Zhruba 17 desetin úhlové sekundy. Píše se listopad roku 1915. Krátce na to Karl Schwarzschild nalézá přesné řešení Einsteinových rovnic a přesný výpočet může být dokončen.

100 hundred years later and Albert Einstein reached the same conclusion on his own as Soldner did based on the Equivalence principle. He later on wrote down in his notebook that this way the gravitational field would occur in multiple pictures of the source. He has decided not to publish this news. Instead he inquired astronomer Ervin Freundlich to conduct the measurement of beam bend by the gravitational field. They started organizing a science trip to Krym in Russia where they would be hopefully able to watch such a phenomenon during the eclipse of the Sun. Alas, their plans were stopped because of the first world war which has just started.

Despite this, Einstein still continued to build up his theory. One week before he finalized the theory's logical structure, he deduced from the linear's equation a field which comes up with the following: the deviation's value of light beam should be two times bigger against the gravitational theory concluded by Newton with its 17 tenths of an angular second. In November 1915 Karl Schwarzschild found a relevant solution to Einstein's equations: the accurate calculation could be finally done.

Scéna 6

Ještě 3 roky bude trvat, než Arthur Eddington na ostrově Príncipe v Západní Africe vyfotografuje pozici hvězd v okolí Slunce a porovná ji s pozicí, v níž paprsky vzdálených hvězd nejsou Sluncem takřka ovlivněny. Potvrzuje ohyb světelných paprsků i to, že je výraznější, pokud paprsky procházejí blíže Slunci.

Ač ne všichni vědci té doby považují pozorování za průkazné, zpráva plní titulky světového tisku a mezi lidmi se Einstein stává přes noc celebritou. Toto jediné pozorování strhává po 2 stoletích vládu Newtony mechaniky a po 22 stoletích Euklidův popis geometrie prostoru. Fyzika se bortí v samých základech.

It took another three years before Arthur Eddington photographed the positions of the stars on the Principe island in West Africa. He compared it with the positions of beams from far away stars which are barely influenced by the Sun. With this he was able to confirm the bend of light beams including the fact that it is also more intense when those beams go through the areas closer to the Sun.

Although not all scientists considered his observation as conclusive, the international newspapers published this discovery and Einstein became a world sensation at once. After two centuries this observation has erased the domination of Newton's mechanics and also Eklid's description of geometry's space after twenty two centuries. The physics started crumbling down in its foundation.

Scéna 7

Einstein vysvětlil gravitační sílu tím, že ji zrušil.

Prostor a čas již nadále nejsou nezávislé, tvoří čtyřrozměrné jeviště zvané prostoročas. Ten je deformován přítomností hmoty a energie. Tělesa se v něm pohybují nejpřímočařeji jak mohou – vždy s ohledem na jeho zakřivení. Nadále tedy nikoli po přímkách, jak tomu bylo v plochém Eukleidovském prostoru, ale po tzv. geodetikách.

Pozdější koryfej obecné relativity John Wheeler to výmluvně shrnul slovy: prostoročas říká hmotě, jak se pohybovat; hmota říká prostoročasu jak se zakřivit.

Koncept byl ve své době natolik převratný a matematicky obtížný, že jej chápala jen hrstka astronomů. V časech, kdy byla teorie potvrzena měřeními Eddingtona, o nich tisk hovořil jako o tuctu moudrých mužů. Není úplně jisté, kdo se mezi ně, kromě Einsteina a Eddingtona, skutečně řadil.

Einstein has explained a gravity power by its immediate cancelation.

Space and time are not independent anymore; they make a four dimensional stage called space-time which is deformed by the presence of mass and energy. The ensembles inside are moving in the most straightforward way, always in accordance with its own curvature. They stopped moving along the straight lines based on the flat Euclidean's space and they use the so-called geodesic curves instead.

John wheeler, a coryphaeus in general relativity, has eloquently described this in words in his life with the following statement: spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve.

This concept has been so significant and so mathematically complex that it was understood by only a small part of astronomers only. In times when the theory was primarily supported with Eddington's measurements, the press was presenting it like it was an outcome of a dozen wise

men. To this day it is uncertain who they were talking about apart from Eddington and Einstein themselves.

Scéna 8

Od těchto pionýrských dob byla vyvinuta účinná metoda znázornění některých aspektů zakřivení čtyřrozměrné geometrie zvaná vnořování. Pokud byste žili na povrchu koule jako dvourozměrné bytosti, její tvar si představíte jen stěží. Přidejte však jeden rozměr navíc a jak vypadá povrch koule v trojrozměrném Eukleidovském prostoru, už víte. Podobně bychom mohli vnořovat čtyřrozměrný prostoročas do pětidimenzionálního nadprostoru. Protože si neumíme představit ani ten, musíme se uchýlit jen k znázornění jeho řezů. Jeli prostoročas statický, neproměnný, lze uvažovat okamžité časové řezy – jakési momentky; je-li jeho prostorová část navíc sféricky symetrická, bez ztráty informace o jejím zakřivení lze dále uvažovat jen řez rovníkovou rovinou procházející středem takové sféry. Tím se zbavíme dvou dimenzí a představit si plochu v trojrozměrném Euklidovském prostoru umíme.

Vzniklá plocha připomíná gumovou blánu prohnutou uprostřed pod tíhou kuličky. Ač se jedná o časový řez, přesto do tohoto diagramu vnoření můžeme orientačně zaznačit pohybové křivky částic – tzv. geodetiky.

Since this pioneering period has been developed quite an effective method reflected in some aspects of four dimensional geometry called embedding. If you ever lived on the surface of a ball as two dimensional creatures, you would be hardly able to imagine its shape. However, with one additional dimension you would get the idea already since you know how the surface of a ball looks like in a three dimensional Euclidean's space. We could keep embedding the four dimensional spacetime into five dimensional hyperspace in a similar way. Since we are unable to imagine this as well, we can only illustrate its slices. Should the spacetime be static and invariable we can think about the instant slices; if the spatial part is spherically symmetrical, we with no loss of information about its curvature we can only conclude a slice of the equatorial plane going through the core of such a sphere. This way we can get rid of two dimensions beside the fact that we can imagine such an area in three dimensional Euclidean's space.

The new surface reminds us of a rubber membrane bended in the middle under the weight of a bead. Despite this time slice, we can still indicate into this embedding diagram a trajectory path – a so-called geodesic.

Scéna 9

Pokud jste na nerovném terénu někdy hráli golf, pak víte, že je-li v cestě míčku prohlubeň, ovlivní to jeho následnou cestu. Putuje-li míček od prohlubně ve větší vzdálenosti, bude změna oproti jeho předchozího směru jen mírná; pokud ale mířil přímo do prohlubně, může v ní i uváznout. Obdobně je tomu s geodetikami v případě zakřiveného prostoročasu.

Po geodetikách se pohybují všechna volně padající tělesa. Geodetiky, po nichž se pohybuje světlo nazýváme nulové.

If you ever had a chance to play golf in any uneven area you surely know that each hollow on the ground will affect the ball's trajectory. When the ball passes by the hollow in a bigger distance, its change will be against its previous direction mild; if the ball is coming straight to the hollow, it can get stuck inside. It is the same with geodesic curves with bended spacetime.

All free falling ensembles will keep moving along the geodesic curves.

Geodesics whose surface uses a light for its movement are called zero geodesics.

Scéna 10

Putuje-li v této teorii světlo oblastí, která není plochá, např. v okolí Slunce, dojde ke změně původního směru vyslaného paprsku. Pozorovateli na Zemi se to bude jevit tak, že světlo k němu přichází odjinud, než je skutečnost, neboť o ovlivnění jeho cesty nic netuší. Směr přichozího fotonu zkrátka projektuje na svoji lokální oblohu a vytváří si tak zdánlivý zdroj tohoto světla.

A to je celá podstata odchýlení – či chcete-li deflexe – světelného paprsku, kterou Eddington během zatmění pozoroval. Diagram vnoření nám ji pomohl snadno objasnit.

If the light travels in this theory in areas which are not flat such as surrounding areas of the Sun there can occur a change of the original beam trajectory. Anyone watching on Earth would assume the light is from elsewhere than in reality because no one would know anything about the change of this trajectory at all. The direction of the upcoming photon is projected on the local sky, thus it creates the apparent source of this light.

This is the whole matter of light beam diversion (also called deflex) which Eddington observed during the eclipse of the sun. The embedding diagram has been able to clarify it to us.

Scéna 11

V několika různých případech sledujme cestu světla podrobněji.

Animace vlevo nahoře znázorňuje šíření vějířovitě emitovaných fotonů v prázdném prostoru. Napravo od ní je ukázáno ovlivnění jejich trajektorie v Newtonově teorii a na spodních obrázcích v obecně relativistickém popisu. Levá spodní animaci je vytvořena pro statický sféricky symetrický Schwarzschildův prostoročas; v té vpravo je navíc zakřivení prostoročasu ovlivněno rotací centrálního objektu. Jedná se o tzv. Kerrův prostoročas.

Rotace objektu způsobuje jev strhávání prostoročasu v jeho okolí a popsat pohyb je v takové geometrii o poznání komplikovanější.

Všimněte si, že za takové situace navíc záleží, zda foton přichází k objektu ve směru, či proti směru jeho rotace. Geodetiky proto v animaci nevypadají rozloženy symetricky, tak jak je tomu v případě Schwarzschildovy geometrie nalevo.

Let's go ahead and watch the light journey with close attention in a few other situations.

On the left side you can see an animation which reflects the spread of fan-shaped photons in the empty space. On the opposite right side is shown the influence of their trajectory in Newton's theory and on the lower pictures can be seen in the general relativistic description. The left lower animation is made for static spherically symmetric Schwarzschild's spacetime; on the right is also the spacetime curvature influenced by the rotation of the central object which is called the Kerr' spacetime.

The object's rotation is caused by the phenomenon which tears down the spacetime in its surroundings. To describe any movement in such geometry is quite complicated.

You can notice that in a situation such as this is the most important the fact whether the photon comes to the objects in its direction or against the direction of its rotation. Due to this are geodesics in this animation not spaced symmetrically as can be seen in Schwarzschild's geometry on the left side.

Scéna 12

Při zpětném sledování geodetik všech k nám přicházejících fotonů až k jejich zdrojům, dostaneme vzájemnou korespondenci mezi oním skutečným a tím pro pozorovatele zdánlivým obrazem vesmíru. Dva rozdílné světy.

Je k tomu však třeba znát, jaké je zakřivení mezilehlého prostoročasu. Případně naopak, ze znalosti pozorovaného obrazu a jeho reálné předlohy můžeme zjistit, jaké je zakřivení prostoročasu. Z toho lze pak usuzovat na rozložení hmoty a energie mezi námi a sledovaným objektem.

Tímto způsobem vznikají mapy rozložení temné hmoty ve vesmíru. Ta se navenek projevuje pouze gravitačně – tedy zakřivuje prostoročas v jejím okolí.

Ač je myšlenka trasování paprsků jednoduchá, její realizace naráží na obtíže. Uplatňují se tu i další relativistické jevy, které jsou spojeny s přechody mezi vztažnými soustavami. Proto pamatujme, že pozorovaný obraz nemusí být zkreslen jen v důsledku odchýlení geodetik od jejich původního směru.

Looking back at our geodetic observations of all incoming photons to their sources, we get a mutual connection between the real and apparent picture of space. Two different worlds.

For this purpose we need to know what the curvature of intermediate spacetime is. If not this, we can use our knowledge from image observation. We can find from its real model the curvature of spacetime. Based on this we can conclude the mass composition and energy between us and the monitored object.

Thanks to this, maps are made with composition of dark mass in space. The dark mass outwardly functions in a gravitational way - it curvatures spacetime in its surroundings.

Although the idea of beam tracing looks quite simple, we would face an obstacle with its realization. There also applies a relativistic phenomena which is connected with transitions between frame references. And thus, we have to keep in mind that our observed image does not have to be distorted only because geodetics deviations changed their original trajectory.

Scéna 13

Z důvodu zakřivení časoprostoru dochází k různému ovlivnění měření času i délek v různých místech gravitačního pole.

Dochází k odlišnostem mezi vlnovými délkami emitovaných a pozorovaných fotonů i ke změnám v dobách jejich putování po různých geodetikách. Dostane-li se foton do oblasti v níž běží čas pomaleji, tedy např. do blízkosti černé díry, zaznamenané posun v jeho vlnové délce směrem k modré oblasti spektra. Bude-li se od takového místa vzdalovat do oblasti s menší gravitací, bude opět červenat.

Daným efektům se říká gravitační červený či modrý posuv a Shapirův jev zpoždění signálu. Oba byly četnými měřeními potvrzeny a řadí se mezi klasické testy obecné teorie relativity.

Due to curvature of spacetime is influenced measurement of time including the lengths in different areas of the gravitational field.

As a result there occurs a difference between the wavelengths of emanated and observed photons. Moreover, the time of their travels along the different geodetics is changed as well. If the photons land in the area where time runs slower such as black hole we notice the shift in its wavelength in the direction to the blue area of the spectrum. If it moves back to areas with smaller gravitation, it will start to change its colour to red.

These effects are called either a gravitational blueshift or redshift. It can also be called a Shapiro time delay. Both were confirmed by many measurements and rank among standard examinations in general relativity.

Scéna 14

Začněme s nejjednodušším případem, v němž postačí uvažovat jen ohyb paprsků. Pozorovatel i zdroj obrazu jsou značně vzdáleny od mezilehlého objektu, kterým mohou být jak osamocené hvězdy, tak i jejich shluky, či celé galaxie. Ty, prostřednictvím zakřivení prostoročasu, ohyb jim blízko procházejících paprsků způsobují a vzniká tak deformovaný obraz. Hovoříme o gravitačních čočkách. Ty mohou obraz nejen deformovat co do tvaru, ale mohou vytvářet i vícenásobní obrazy jednoho objektu. V jisté analogii s fatou morgánou hovoříme o tzv. gravitačních přeludech. Jejich studium astronomům přináší poznatky o rozložení základní komponenty vesmíru, o temné hmotě; ale i o přítomnosti planet obíhajících v nám vzdálených hvězdných systémech.

Let's start off with the most simple case when we only have to think about the curvature of beams. The observer and image source are substantially distant from intermediate objects such as individual or cluster stars but also different galaxies. They are bended due to the curvature of time and thus the image becomes deformed. We call it a gravitational lens. Not only can it deform the image, it also makes a multiple image of one individual object. Generally, when you think of somewhat a "space mirage" we can actually find such an official term: a gravitational delusion. The study of it provides the astronomers news about the composition of the basic space component – a dark mass; besides that, it also informs them about the presence of orbiting planets in a distant star system.

Scéna 15

Ač Einstein příliš nevěřil, že by dvě hvězdy a pozorovatel mohly být přímo v zákrytu, na žádost Rudiho Mandla publikoval v časopisu Science studii, v níž gravitační čočku popisuje a předkládá její zobrazovací rovnici.

Pojmenování „gravitační čočka“ by nám mohlo silně připomenout klasickou skleněnou čočku, která soustřeďuje rovnoběžné paprsky do jednoho bodu – ohniska, přičemž nejvíce lomeny jsou paprsky ty nejbližší optické ose, avšak u gravitační čočky takové ohnisko není a nejvíce ohnuté paprsky jsou ty procházející nejbližší čočkujícímu objektu. Gravitační čočky jsou také achromatické. Nulové geodetiky nezáleží na vlnové délce světla, které po nich putuje.

Tvarově podobné zobrazení obrazu gravitační čočkou vykazuje sledování předmětu skrze stopku skleničky na víno. Jedná se ale jen o přibližný model vzdálený reálnému gravitačnímu čočkování.

Podívejme na počítačovou simulaci.

Although Einstein did not believe that two stars and observers could happen to be in an occultation, he later on published in the Science newspaper on request by Rudi Mandl his studies with the description of gravitational lens with its rendering equation.

The name of a gravitational lens may remind us of a standard glass lens which concentrates its parallel beams to one point only – a focal point. The most angled beams are the most distant ones from the optical axis. However, the gravitational lens does not have such a focal point and so the most angled beams are the ones coming through the nearest lens object. Gravitational lenses also happen to be achromatic. For zero geodetics does not matter the wavelength of light which travels along it.

The most similar image distortion of gravitational lens for any object observation can be done through the lower stem part of the glass. Although this is a talk about only an approximate model, still not even close to the real gravitational lens. Let's view the computer simulations in a second.

Scéna 16

Hvězdičkou uprostřed zeleného kruhu je v animaci vyznačena poloha mezilehlé, téměř bodové hvězdy či galaxie způsobující zakřivení okolního prostoročasu, které ovlivňuje světlo, jež přichází k pozorovateli od hvězdy znázorněné červeným kroužkem. Její deformovaný obraz viděný pozorovatelem je vykreslen modře.

The animation shows a star in its middle with the green circle - this represents an intermediate position of an almost point star or galaxy which causes the curvature of its surrounding space-time. This actually influences the light coming to an observer from a star shown as a red circle. Its deformed image is drawn in blue to any observer.

Jelikož je poloha obrazu v této jednoduché aproximaci dána kvadratickou rovnicí, jsou obrazy vždy dva a leží s čočkou na jedné přímce. Avšak, je-li hvězda v přesném zákrytu s mezilehlým objektem, přechází její obraz, díky symetrii situace, v kruh obklopující mezilehlý čočkový objekt. Nazýváme jej Einsteinovým prstencem a v animaci je vyznačen zeleně. Paprsky emitované v jistém prostorovém úhlu budou v ideálním případě všechny soustředěny k pozorovateli, a tak i jinak slabá hvězda bude dobře viditelná. Pomyslným Einsteinovým prstencem jsou odděleny prostory výskytu obou obrazů, jak je vidět v animaci z jejich šrafované stopy.

The position of the image in this simple approximation is given by the quadratic equation - there are always two images and both lie along the lens on one single straight line. However, if the star happens to be in a direct occultation with the intermediate object, its image switches thanks to the symmetry in this situation to the circle surrounded by an intermediate lens object. We call it Einstein's ring and it can be seen in animation as green colour. All emitted beams in a certain space angle would be in the most ideal situation and are all concentrated in the direction of the observer. This way even a weak star could be quite visible. The imaginary Einstein ring is divided by areas as can be seen in the animation when looking at the hatched footprint.

I pokud detektor pozorovatele nedokáže rozlišit oba obrazy vzdáleného objektu, přesto na něj bude dopadat více světla, než kdyby mezilehlá čočka nebyla přítomna. Dojde k náhlému zvýšení jasnosti, které nazýváme mikročočkování. Jeho časový průběh je znázorněn ve spodní části animace.

Z úhlové šířky Einsteinova prstence můžeme určovat hmotnost čočkový galaxie. Také ji lze vypočítat z úhlové separace obou obrazů. Z napozorovaných světelných křivek můžeme usuzovat na množství temných hvězd, hvězdných pozůstatků, černých děr či hnědých trpaslíků v našem okolí. Ty všechny přispívají k temné hmotě Mléčné dráhy a jinými pozorovacími metodami jsou jen obtížně zjistitelné.

Even if the detector from the observer cannot distinguish two images of the distant object, the light would fall down on it in a much bigger amount than if the intermediate lens was not present at all. If there occurs a sudden increase of brightness we call it microlensing. It's time course is shown in a lower part of animation.

From the angle width of the Einstein ring can be defined the weight of the lens galaxy. We can also calculate it from separation of both images. We can conclude from observed light curves the amount of dark stars, star remains, black holes or brown dwarfs in our surroundings. All of them contribute to the dark mass in our Milky way. Any different observation methods would make it harder for us to find it all.

Scéna 17

Není-li hmota v čočkujícím systému rozložena rovnoměrně, nebo ji nelze pokládat za bodovou, může být počet obrazů i vyšší než dva. Na obrázku vidíte příklad čočkování binárním systémem stejně hmotných hvězd.

Scéna 18

If the mass in the lens system is not spread evenly or if it cannot be considered as a point, the amount of images could be higher than two. On the picture you can see the example of the lensing by binary systems of the same heavy stars.

První objev dvojitého obrazu vzdáleného kvazaru zobrazeného gravitační čočkou byl učiněn roku 1979 v mikrovlnné oblasti elektromagnetického spektra. Jsou pod ním podepsáni Walsh, Carswell a Weymann.

The first discovery of the double image was actually a distant quasar through the gravitational lens in 1979. It was in a microwave area of the electromagnetic spectrum found by Walsh, Carswell and Weymann.

Pozorovaný objekt je dnes značen QSO 0957+561 A/B. V době, kdy byly oba obrazy objeveny, se věřilo, že se jedná o dva různé objekty. Brzy se ukázalo, že identická dvojčata. Proto se objektu říká Twin Quasar. Leží 14 miliard světelných let od Země. Čočkovací galaxie je od nás vzdálena 4,6 miliard světelných let. Je to ten červený drobný flíček nad spodním obrazem. Z toho, že obrazy a čočka neleží na jedné přímce soudíme, že čočkovací galaxie není sféricky symetrická.

Ve viditelném spektru oblast zaznamenal i Hubbleův vesmírný dalekohled. Rozpoznáte na snímku oba obrazy jednoho kvazaru?

This observed object is nowadays known as QSO 0957+561 A/B. When it was discovered there was a general belief that both are separate objects which was soon corrected by the revelation that these are actually identical twins. Thus its name is Twin Quasar and is from Earth around 14 billions of light years away. The lensing galaxy is around 4,6 billions of light years distant. You can see it as the tiny red spot above the lower image. Because the image and lens do not lie on one straight line there can be concluded that the lensing galaxy is not spherically symmetrical.

The Hubble Space Telescope also took notice of this area in the visible spectrum. Could you distinguish both pictures of one quasar in this image by yourself?

Scéna 19

Roku 1987 Jaquelin Hewittová pozorovala v radiové oblasti objekt MG1131+0456, který se v ní jevil jako zářivý eliptický prstýnek doprovázený párem kompaktních zdrojů. Morfologie rádio-

vých zdrojů však napovídala, že se jedná o případ, kdy je obraz zdroje deformován gravitační čočkou. Jednalo se o první pozorování Einsteinova prstence vůbec.

Od těch dob byl zaznamenán ještě mnohokrát. Lví podíl na těchto objevech měl Hubblův vesmírný dalekohled.

When Jaqueling Hewitt was observing in a radio area an object called MG1131+0456 back in 1987, it did look like a bright elliptical ring accompanied by two sets of compact sources. The morphology of the radio source did show that it was a case with the image source deformed by a gravitational lens. It was the first observation of the Einstein ring ever. Since then we did have many other occasions to take notice of it. The Hubble Space Telescope played a significant part in all of our discoveries.

Scéna 20

Částečnou formou Einsteinova prstence je Einsteinův kříž. Odpovídá 4 obrazům stejného objektu čočkovaného například mezilehlou galaxií.

The Einstein cross partly represents the form of the Einstein ring. It reflects to four images of the lens objects such as the intermediate galaxy.

Velmi pozoruhodnou ukázkou je obraz galaxie známé jako UZC J224030.2 032131 pořízený rovněž Hubblovým vesmírným dalekohledem. Uprostřed struktury připomínající kříž vidíme slabý difúzní objekt – galaxii, která čočkuje za ní se nacházející kvazar, od nás vzdálený 11 miliard světelných let v souhvězdí Pegase. Mezilehlá galaxie je asi miliardu světelných let od nás. Pravděpodobně se jedná o nejkrásnější ukázkou Einsteinova kříže ve viditelném oboru. Napomohl tomu téměř dokonalý zákryt obou objektů, které jsou od sebe vzdáleny jen asi 5 setin úhlové sekundy. Pro lepší představu, celkový úhlový rozměr zobrazeného pole je 26 na 26 úhlových sekund.

Quite remarkable example is the galaxy image known under name UZC J224030.2 032131 also provided by The Hubble Space Telescope. In the middle of the structure similar to the cross can be seen a weak diffuse object - a galaxy which is lensed by the quasar behind it with its distance around 11 billions of light years away in the Pegasus constellation. The intermediate galaxy is around one billion light years distant from us. It is most likely one of the most beautiful examples of Einstein's cross in a visible field. The nearly perfect occultation of both objects had a hand in that. Both objects are from each other around 5 hundredths of an angular second away. To get a better idea: a total angular dimension of the displayed field is 26 x 26 of an angular seconds.

Scéna 21

Někdy gravitační obrazy nebývají na první pohled patrné a plně se projeví až po odečtení záření pocházejícího z čočkující galaxie. Tak, je tomu například i v případě blízké galaxie ESO 325-G004. Současné metody zpracování obrazu, které astronomové používají, si však i s tímto dokáží poradit.

Sometimes the gravitational images are not not noticeable at a first glance and usually show up after the deduction of radiation from the originating lensing galaxy. The same way it is in the case of a close galaxy ESO 325-G004. The current methods of image processing by astronomers are quite helpful in this matter too.

Scéna 22

Vícenásobného obrazu vzniklého čočkováním v gravitačním poli galaktického klastru MACS J1149.5+2223 bylo využito k sledování výbuchu supernovy. Jelikož se cestovní doby jednotlivých obrazů liší, mohli jsme její výbuch vidět s odstupem času vícekrát. První obraz astronomové zmeškali, nacházel by se v oblasti vyznačené horním červeným kolečkem, druhý byl spatřen hned čtyřikrát jako Einsteinův kříž ve spodní červeně vyznačené oblasti, ukázalo se však, že šestý obraz byl v té době stále ještě na cestě k Zemi a skutečně, rok na to byl i tento obraz zaznamenán.

Taková pozorování umožňují nejen studovat exploze masivních hvězd, ale i expanzi našeho vesmíru.

Určení zpoždění obrazů výbuchu supernovy umožnilo vypočítat Hubblovu konstantu. Již dříve, a zde poprvé použitou, metodu výpočtu navrhl astrofyzik Sjur Refsdal, a tak je na jeho počest supernova známa pod jeho jménem.

Using the method of multiple images constructed by the lensing in the gravitational field of galaxy cluster MACS J1149.5+2223 enabled us to watch the supernova explosions. Due to the different travel timings of each individual image, we could see the explosion in a hindsight many times right after. The astronomers missed out the first image in the area which is illustrated as the upper red spot; the second one was seen around four times and it is the Einstein cross image illustrated in the lower part as a red spot; However we found out that the sixth image was still on its way to the Earth and one year later on it was really recorded. These observations are helpful not only in studying massive stars explosions but also the expansion of our space.

The determination of image delay related to the supernova explosion was enabled by the Hubble's law. The astrophysicist Sjur Refsdal suggested to use this method already before that but was firstly used in this case and thus in his honour we have given the supernova his name.

Scéna 23

Podívejme se na událost pojmenovanou OGLE-2005-BLG-390. Jedná se o světelnou křivku získanou společným úsilím šesti dalekohledů rozmístěných po celém světě z důvodu zajištění možnosti nepřetržitého měření. Zatímco na jednom z pozorovacích míst noc končila, jinde teprve nastávala. Každý bod křivky odpovídá jednomu měření a příslušné hodnotě pozorované intenzity záření. Čočkou je zde trpasličí hvězda, tedy malá, poměrně chladná hvězda o hmotnosti asi dvě desetiny hmotnosti našeho Slunce. Změny intenzity světla se odehrály v průběhu týdnů. Vzhledem k předchozímu výkladu to jistě není nic překvapivého, vzdálená hvězda byla čočkována trpasličí hvězdou. Ale přece! V rámci jednoho dne došlo k drobnému zjasnění. Tento drobný výběžek na křivce je zvětšen v pravém horním rohu. Analýzou bylo zjištěno, že se jedná o odchylku způsobenou planetou o hmotnosti asi 5,5 hmotnosti Země obíhající čočkující hvězdu.

Let's have a look at the event named OGLE-2005-BLG-390. It is a light curve obtained by the cooperation of six telescopes across the whole world in order to get constant measurements. In practice it meant that the moment the night ended at one spot, somewhere else it had just begun. Each curve point corresponds to one single measurement and appropriate value of the observed radiation intensity. The dwarf star is a lens here - it is a small and quite cold star with its weight two tenths of the weight of our sun. The changes of light intensity kept changing during the upcoming weeks. It is not surprising at all given our previous explanation of the distant star which was lensed by the dwarf star. And yet - in a matter of one day a small brightness occurred. This tiny protrusion on the curve is seen enlarged in the upper right corner. The conducted ana-

lysis found it that this is a deviation caused by a planet with weight around 5,5 times that of the Earth which orbits around the lensing star.

Scéna 24

Zaznamenání krátkodobého achromatického zjasnění při dlouhodobém sledování mikročočkování je dobrým základem pro podezření na výskyt exoplanety v čočkujícím systému, která způsobuje dodatečné zkreslení jednoho ze dvou obrazů.

Různé způsoby vzniku tohoto jevu a jeho závislost na hmotnosti či poloze exoplanety sledujeme v animacích. Exoplaneta je zde znázorněna fialovým kroužkem. Povšimněte si plynoucího výrazného projevu na světelné křivce.

The record of a short time achromatic brightness during the long term observation of microlensing puts down a great basis for us to assume the presence of exoplanets in a lensing system; this results in an additional distortion of one of the images.

We can observe the different types of this newly occurred phenomenon and its dependence on the weight or the exoplanet position on this animation. The exoplanet is displayed as a purple circle. We can notice its significant dynamics on the light curve.

Scéna 25

Toto je první snímek, na němž bylo zaznamenáno pět obrazů jediného vzdáleného kvazaru. Je to objekt, který se nám jeví podobně jako hvězdy, ale nejspíše se jedná o aktivní galaktické jádro – obří černou díru strhující okolní hmotu.

This is the first ever image of one single quasar displayed in 5 separate pictures. While this object seems more like a star it is actually an active galactic core - a huge black hole which pulls down the surrounding mass around it.

Přesný mechanismus fungování kvasarů ale dosud nebyl odhalen.

Kupa galaxií formujících gravitační čočku je známa jako SDSS J1004+4114. Je od nás vzdálena sedm miliard světelných let. Vidíme ji tedy tak jak vypadala, když měl vesmír jen poloviční stáří. Řadí se mezi jednu z nejvzdálenějších známých kup galaxií.

Všimli jste si, že se na snímku nacházejí ještě další obrazy vzdálených galaxií, které jsou gravitačně deformovány do tvarů obloučků?

The correct mechanism of the quasars functions is yet to be found.

The cluster galaxies which form the whole gravitational lens is called SDSS J1004+4114. It is distant from us around seven billions of light years away. We see its image as it looked like when the space was only half of its age. It ranks as one of the most distant known cluster galaxies.

Did you notice that this picture also includes a few images of distant galaxies gravitationally deformed into the curl shape?

Scéna 26

Čočkování mezilehlou galaxií si můžete vyzkoušet doma na svém mobilním telefonu či iPadu. Stačí si ze stránek Apple Store zdarma stáhnout aplikaci GravLens3.

Zkuste měnit polohu čočkující galaxie a sledovat změny počtu obrazů, jejich polohy i deformaci. Pro větší zábavu lze pozadí zaměnit za libovolnou fotografii.

Aby výpočet probíhal hladce, je použit přibližný model gravitačního čočkování, podobný těm, jakými jsme se zabývali dosud.

Pokud by nás ale zajímal přesný obraz zkeslený extrémně kompaktními objekty, jakými jsou např. černé díry, neutronové hvězdy či červí díry, je relativistický raytracing – tedy jakési “stopování paprsků”, značně výpočetně náročný.

You can try out the lensing of the intermediate galaxy yourself either on your phone or Ipad. The only thing you need to do is to download an application called GravLens3 provided free of charge. Try to keep changing the position of the lensing galaxy and observe the changes of the image amounts, their positions and even deformations.

To make it more fun you can change the background to your own liking.

In order to have a smooth calculation, we used an approximate model of the gravitational lensing similar to the one we talked about previously.

Should we be interested in the accurate picture distorted by the extreme compact objects such as black holes, neutron stars or wormholes, the method to use is relativistic raytracing. However, its calculation is quite complex.

Scéna 27

Sledujme vznik extrémně kompaktního objektu. Postupně snižujeme poloměr nerotující hvězdy při zachování její hmotnosti. Rozhodující je zde kritický poloměr zvaný Schwarzschildův. Zatímco na počátku mohly jeho povrch opustit téměř všechny vně orientované fotony, dosáhne-li hvězda 1,5násobku tohoto kritického poloměru, tečně emitované fotony k jejímu povrchu padají zpět a utvářejí fotonovou sféru, jakousi světelnou obálku obklopující kolabující hvězdu. Se zmenšujícím se poloměrem může stále méně a méně fotonů uniknout z povrchu objektu pryč. Kužel vyznačující možné směry úniku fotonů se svírá. Po dosažení kritického poloměru – nebo též horizontu událostí – jsou zachyceny všechny emitované fotony, včetně těch směřujících radiálně vně od kolabujícího objektu. Vznikla černá díra.

Let's watch now the extremely compact object upon its rise. We keep decreasing the radius of the non-rotation star while conserving its weight. The determinative is the critical radius known as Schwarzschild's. At its beginning all the externally oriented photons could appear on its surface. Once the star reaches 1,5 times its critical radius, all the tangentially emitted photons fall back on its surface while forming a photon sphere - it is a light cover surrounding the collapsing star. The smaller the radius, the less possible it actually is for photons to escape from the object itself. The cone which signals all the possible escape routes for all photos keeps continuously getting tighter. The moment the critical radius - we can also describe it as the event horizon - occurs there are captured all the emitted photons; including the ones which go away radially and externally from the collapsing object. This makes an opportunity for a new black hole to arise.

Z hlediska fotonů je horizont Schwarzschildovy černé díry dělicí hranicí. Vně horizontu je možné komunikovat se vzdálenými pozorovateli pomocí světelných signálů. Pod horizontem událostí světelné paprsky nemohou mířit libovolně mezi událostmi, jsou orientovány k centru černé díry. U nahé singularity takové rozhraní chybí. Schematicky vznik černé díry dobře vystihuje struktura světelných kuželů v prostoročasovém diagramu. Fotony se mohou pohybovat jen po jejich plášti směrem do budoucnosti.

In terms of the photons, the Schwarzschild's horizon of black hole is divided by boundary. There is a possible communication between the distant observer and the external horizon in a form of light signals. The light beams underneath the horizon cannot arbitrarily move between the horizons, it is oriented towards the centre of black hole instead. The naked singularity lacks this borderline. The light cone structure in a spacetime diagram portraits the schemic rise of a new black hole. The photons are able to move along only on their mantles to the future.

Scéna 28

Obrazy běžných předmětů můžeme zachytit na fotografiích pomocí světla, které vyzařují nebo rozptylují. Jak ale zachytit obraz černé díry, pokud z ní žádné záření nevychází? Černé díry se naštěstí ve vesmíru vždy nacházejí v poli záření okolních objektů. Černá díra bude charakterizována siluetou, kterou po sobě zanechá ve světle přicházejícím k pozorovateli od vzdáleného pozadí. Kvůli silné gravitaci bude silueta větší, než je rozměr horizontu událostí. To, co ve skutečnosti sledujeme není obraz horizontu událostí, ale fotonové sféry černé díry. Fotony, které se dostanou do její blízkosti, ji mohou několikrát oběhnout a opět se od černé díry vzdálit, některé do ní ale padají. Jedná se o nestabilní kruhovou fotonovou orbitu.

We are able to take pictures of any common objects thanks to the light which is either radiated or spread out instead. The questing you may ask yourself is how to catch the image of the black hole if it does not radiate any radiation at all? Fortunately for us, all black holes are always in the radiation field of other objects in space. The black hole is displayed by its silhouette it leaves in light which comes to any observer from the distant background. The strong gravity makes the silhouette look bigger than the size of the event horizon. Unlike our belief we do not watch the event horizon image; these happen to be photon spheres of black holes instead. Some photons are able to get close, move around and once again move away whereas some directly fall inside. It is an unstable circular photon's orbit.

U rotující černé díry je vlivem strhávání prostoročasu vytvářený obraz nesymetrický, silueta je zploštělá do tvaru písmene D. Její přímé sledování by umožnilo zjistit hodnotu rotace černé díry. Na obrázku jsou zachycené geodetiky fotonů vyznačeny černě. Vlevo vidíme případ Schwarzschildovy černé díry a vpravo rotující Kerrovy. Opět si všimněte projevu strhávání prostoročasu. Černá díra rotuje z našeho pohledu po směru hodinových ručiček. Horní obrázky zachycují řez rovníkovou rovinou černé díry, spodní zobrazují siluetu černé díry viděnou pozorovatelem z boku.

The new image of a rotating black star is asymmetric due to the frame-dragging and its silhouette is displayed in a flat in shape similar to a letter D. We would be able to determine the value or its rotation if we observed it directly though. On the picture are geodetic photons displayed in black. On the left side is an example of Scharzchild's black hole and on the right is the Kerr' one. You may once again notice the frame-dragging here. From our point of view is black hole rotating clockwise. All upper images display a section through the equatorial plane of black hole. The lower part is a black hole silhouette which can be seen by the observed from the side.

Scéna 29

Toto je první snímek, nebo přesněji počítačová interpretace naměřených dat, supermasivní černé díry v centru eliptické galaxie Messier 87, která se nachází 55 milionů světelných let od Země. Ač třeba nevíte, co září v jejím okolí, siluetu černé díry zde dokážete snadno rozpoznat. Pro pozemšťany má průměr pouhých 40 miliontin úhlové sekundy.

This is a first ever image or more accurately computer interpretation of measured data showing a supermassive black hole in a center of the elliptic galaxy called Messier 87. It is located 55 millions light years away from Earth. Despite not knowing what radiates in this area, the black hole silhouette is easily recognizable. For all earthlings it has got its radius only about 40 milli-onths of an angular second.

Scéna 30

Zmínili jsme se již o Einsteinově prstenci. Jsou-li pozorovatel, čočka i zdroj v přesném zákrytu, světlo emitované v jistém úhlu prostorově vymežujícím kužel je čočkou ohnuto, přichází k pozorovateli, přičemž symetrie situace způsobí, že obrazem je kruh. Nazýváme jej prvním Einsteinovým prstencem.

Ten ale není jediný. Ty následné jsou vždy úhlově blíže a blíže ke středu čočky, přesněji, ke zdánlivé pozici fotonové sféry. Třetí Einsteinův prstenec tvoří fotony, které jednou oběhly čočku dokola poblíž fotonové sféry a až poté dorazily k pozorovateli.

Fotony mohou čočku oběhnout i vícekrát, než se dostanou k pozorovateli. Různý počet oběhů odpovídá jinému Einsteinovu prstenci. Aby však mohly fotony několikrát oběhnout fotonovou sféru a poté putovat opět do nekonečna, musí být při jejich vyzáření ze zdroje nasměrovány k čočce velice přesně. Čím více oběhů – tím přesnější musí směr emitovaných fotonů být a tím méně fotonů tuto podmínku splňuje. Proto mají následné prstence slabší a slabší jas.

We have already mentioned Einstein's ring. If the observer, lens and sources happen to be in an accurate occultation, all the emitted light in a certain spatial angle by defining cone is bended by the lens. This way it comes towards the observer while its symmetry seems to look like a circle shape. We call it a first ever Einstein ring.

However, it is not the only one. The other ones are always angled closer towards the lens center to the apparent position of the photons sphere. The third Einstein's ring is made of photos which went around the lens already once near the photons sphere. It reached the observer right after this.

Photos can sometimes run around the lens many times before it reaches the observer. A different amount of circulation corresponds with different Einstein' ring. Photons can orbit around the photons sphere a few times under the condition that the source radiation is directed accurately towards the lens. The more it orbits, the more exact the direction of emitted photos must be and thus the small amount of photons actually meets this condition. That is the reason why the new rings have got much weaker brightness.

Scéna 31

Při číslování jsme přeskočili druhý Einsteinův prstenec. I ten existuje a nachází se mezi prvním a třetím prstencem. Vzniká však odlišně. Pozorovatel i zdroj jsou v tomto případě na stejné straně od čočky. Světlo emitované směrem k čočce ji oběhne a vrací se zpět k pozorovateli. Udělá tedy jakousi otočku o 180°. V případech, kdy udělá otočku a ještě čočku několikrát oběhne předtím, než doputuje směrem k pozorovateli, vznikají vyšší sudé řady Einsteinových prstenců. Pokud by světlo emitoval přímo pozorovatel, foton se po proběhnutí takové trajektorie vrací zpět, a

tak by mohl pozorovatel spatřit sám sebe. A dokonce nekonečněkrát, navíc zesíleně a v postupném časovém sledu! Těmto geodetikám říkáme boomerangové.

We skipped over the second Einstein's ring during our numbering. It also exists and is located between the first and third ring. It rises up differently though. Both observer and sources are on the same side of the lens in this case. The emitted light in the direction of the lens orbits around it once and returns back to the observer, so in a way it makes a 180° turn. In cases when it does a turn and orbits around the lens a few times before it reaches the observer there occurs higher even orders of Einstein rings. If the light was emitted directly by the observers, the photon would return back to its trajectory after its orbit which would enable the observers to catch a sight of them. Not only that but they view themselves infinitely, it would be amplified in a gradual time sequence as well. These geodesics are called boomerang ones.

Situace je však ještě komplikovanější. Jsou-li zdroje v různé vzdálenosti od čočky, vytvářejí různé množiny Einsteinových prstenců. Bylo by je tedy možné navíc číslovat poloměrem. Viditelnost Einsteinových prstenců rovněž závisí na vlastnostech čočky a pozici pozorovatele. Vždy je však podstatná poloha a existence fotonové sféry.

Einsteinovy prstence jsou matematický konstrukt. Vyžadují kolineární uskupení pozorovatele, čočky a zdroje. Jejich užitečnost vyplývá z toho, že tvoří pomyslnou hranici mezi množinami obrazů.

The situation is complicated even more than it seems. If those sources are in different distances away from the lens, it creates a set of different Einstein rings. It would be possible to number it by radius then. The visibility of Einstein rings depends on the lens' properties and the position of the observer. The position and the existence of the photon' sphere is the most important part here. Einstein's rings are a mathematician construct. All of them demand kolinear grouping of the observer, lens and source. Their usefulness lies in the imaginary borderline between the images sets'.

Scéna 32

Úplný obraz všech zdrojů umístěných na sféře soustředné s čočkou je viditelný mezi každými dvěma následujícími Einsteinovými prstenci odpovídajícími vzdálenosti dané sféry. Má-li čočka fotonovou sféru, můžeme vidět až nekonečně mnoho obrazů celého jejího okolí zároveň.

První obraz je v nejméně odchýleném směru od zdroje. Nazýváme ho primární obraz. Je před prvním Einsteinovým prstencem. Mezi prvním a druhým Einsteinovým prstencem se nachází sekundární obraz. Je na opačné straně čočky a je zrcadlově převrácen.

The whole image of all displayed sources on the sphere concentrated with the lens is visible between two upcoming Einstein's rings which correspond with the distance of the particular sphere. If the lens has got a photon sphere as well, we can see the infinitive amount of images in its surroundings at the same time. The first image is located from the smallest deviation direction of the source. We call it a primary image and it is located right in front of the first Einstein ring. The secondary image is located between the first and second Einstein ring. It is on the opposite lens' side displayed as a mirror image.

Třetí obraz je na shodné straně jako ten první, avšak mezi druhým a třetím Einsteinovým prstencem. Než jeho fotony dorazily k pozorovateli, oběhly čočku jednou dokola. Je blíže obrazu fotonové sféry než primární obraz. Takto bychom mohli pokračovat dále, avšak obrazy, jejichž fotony oběhly čočku několikrát, jsou jen obtížně spatřitelné pro nízký jas. Vyšší a vyšší obrazy jsou také stále více a více deformované. Musí se vejít mezi příslušné dva Einsteinovy prstence, jejichž odstup se zmenšuje s jejich vzrůstajícím řádem. A musí se mezi ně vejít nejen obraz jedné hvězdy, ale obraz celého okolního vesmíru!

The third image is on the same side as the first one but is located between the second and third Einstein's ring instead. The photons did orbit around the lens once already before they got to the observer. We could keep going around more but alas the images whose photons did orbit around the lens a few times already are hardly noticeable due to a low brightness. The higher the images are, the more the images are deformed. However, all of them must fit between two particular Einstein's rings whose interval is getting smaller with their increased order. What makes the situation more complicated is the fact that not only the image of one star must fit between them but the image of the whole space must fit in between as well.

Scéna 33

Podívejme se na obraz Mléčné dráhy zkreslené gravitační čočkou.

Nejprve si ukážeme nezkraslený panoramatický snímek Mléčné dráhy. Ta bude tvořit vzdálené pozadí čočkované mezilehlým kompaktním objektem.

Je-li tímto objektem Schwarzschildova černá díra, pak by pozorovatel od ní 25krát dále, než je poloměr jejího horizontu viděl Mléčnou dráhu takto zkresleně.

Let's look at the Milky way picture distorted by a gravitational lens.

Firstly, we will view the undistorted panoramic image of the Milky way which would make the distant background lensed by an intermediate compact object. Should this object happen to be a Schwarzschild's black hole, the observer would see the Milky way in a distorted way due to the 25times bigger distance.

Scéna 34

Černé díry mohou nést i náboj. Nerotující nabitá extrémní černá díra popsána Reissnerovou-Nordströmovou geometrií tvoří čočku na dalším obrázku.

Náboj lze objektu odebrat a přidat rotaci. Extrémně rotující Kerrova černá díra vytvoří pro pozorovatele na její rovníkové rovině ve shodné vzdálenosti jako předtím takovouto podívanou.

Přidáme-li navíc náboj, vznikne Kerrova-Newmanova černá díra. Zde je opět zobrazena její extrémní varianta kvůli maximalizaci projevu na výsledný obraz.

Zpozorovali jste nějaké rozdíly?

Pokud ne, zde je postupná animace změn v jednotlivých geometriích.

Ve všech případech snadno rozpoznáme siluetu černé díry i některé obrazy. Vzhled popisuje zakřivení v okolí čočkovacího objektu. Ze znalosti reálného snímku bychom byli schopni porovnáním s modely určovat typ, hmotnost, rotaci i náboj černé díry.

Velmi zajímavé snímky dostáváme pro případy nahých singularit, v nichž není vnitřní prostor skryt před zraky vnějšího pozorovatele pod horizontem událostí.

Black holes might carry a charge as well. Non-rotating extreme black holes are charged and are described by Reissner–Nordström metric's. It is displayed as a lens in the following picture.

Moreover, we can take away the charge and add the rotation instead. An extreme rotation of Kerr's black hole located in the equatorial plane can provide quite a show for all observers.

If we add another charge, a new Kerr-Newman's black hole arises. We are displaying its extreme example in order to show you its increased value of the image. Did you notice any differences at all? If the answer is negative, here is the gradual animation of all changes in each individual geometries. The silhouette is in all cases easily recognizable. The appearance is described by the curvature in the surroundings of the lens object. With our knowledge of real images we should be able to determine the type, weight, rotation and even charge of black hole if we compare our knowledge with models.

We also got quite an interesting image of naked singularities whose internal space is hot and hidden in front of the internal observer underneath the event horizon.

Scéna 35

A jak by vypadal oblet okolo černé díry? Zkusme si pustit simulaci.

Jen si předtím ještě nejprve všimněme, jak bude zkeslena hvězdná obloha pro pozorovatele pohybujícího se postupně se zvyšující rychlostí až téměř k hodnotě rychlosti světla.

Zatímco zprvu rozpoznáme snímek zachycující Sirius, Orion, souhvězdí Býka a Plejády, se zvyšující se rychlostí se naše zorné pole mění, obraz se scvrkává do úzké oblasti a jeho barvy jsou výrazně změněny. Projevují se zde jevy známé ze speciální teorie relativity.

Taková dodatečná zkeslení k efektu gravitační čočky bude vnímat i pozorovatel pohybující se v okolí černé díry.

What would flying around the black hole look like? Let's play the following simulations.

Before we do that though, take a notice how much the star sky would be distorted if the observer keeps continuously moving until the speed of light is reached. At first we recognize the image with the displayed Sirius, Orion, Taurus and Pleiades constellations. The increase of speed changes our field of vision, the image keeps shrinking and its colours happen to be significantly changed. The phenomenons known from special general relativity take a place here.

These additional distortions related to the changes of the gravitational lens would be also noticed by any observer being in the surrounding area of black hole.

Scéna 36

Ve videu vlevo obíhá pozorovatel Schwarzschildovu černou díru pětinou rychlostí světla po kruhové geodetice, hvězdné pozadí je umístěno v nekonečnu. Pozorujme pohyb dvou výrazných hvězd a jejich obrazů. Zdánlivý pohyb první hvězdy je na spodním časosběrném snímku vyznačen žlutě, té druhé červeně. Fialový kruh zde zastupuje Einsteinův prstenec.

Ve spodní simulaci rychlost oběhu pozorovatele dosahuje poloviny rychlosti světla. Pozorovatel je tudíž blíže jejímu horizontu. I zde snadno rozpoznáme první Einsteinův prstenec.

The video on the left side shows an orbiting observer around Schwarzschild's black hole in a fifth speed of light along the orbital geodesics while the star background is located in an infinite space. Keep watching the movement of two quite significant stars and their images. An apparent movement of the first star is displayed on the lower time lapse image in a yellow colour, on the second one is the colour red. The Einstein ring represents the purple circle.

The lower simulation shows the speed of orbit which reaches the half of the light for any observer. This pushes the observer closer to its horizon then. The Einstein ring is easily recognizable here as well.

Scéna 37

Rotace černé díry narušuje symetrii, kterou jsme pozorovali u Schwarzschildovy černé díry. Einsteinovy prstence nahrazují tzv. kritické křivky. Situace je komplikovanější, takže jen sledujme, jak simulace dopadnou. Lehce rozpoznáte typickou siluetu tvaru D. Na připojených obrázcích jsou zaznamenány trajektorie dvou různých hvězd a jejich obrazů až do čtvrtého řádu.

The black hole rotation disturbs the symmetry which we have seen in Schwarzschild's black hole. The so-called critical curves replace the Einstein rings. The situation just got more complicated, so just sit tight and keep watching how the simulations will end. We are able to identify the typical silhouette of the D shape. The additional pictures include trajectories of two different stars including their images up to fourth order.

Scéna 38

Dosud jsme černou díru pouze obíhali po jisté uzavřené orbitě. Jak by ale vypadal pád do černé díry, pokud by jej pozorovatel přežil? Nejspíše by zažíval problémy už v oblasti kolem její fotonové sféry, ale přesto, podívejme se na simulaci pro Schwarzschildovu černou díru. Horizont událostí je zde pokryt imaginární červenou souřadnicovou sítí. Dobře tak vidíme, že světlo k nám přichází i protilehlé strany objektu. Podstatné by to bylo u neutronové hvězdy. Černá díra ale žádný povrch nemá. Vlevo dole je vyznačena pozice pozorovatele padajícího skrz oblast stabilních nenulových kruhových geodetik, následuje oblast nestabilních kruhových geodetik, oblast, v níž kruhové geodetiky neexistují a pád pokračuje skrz horizont událostí s nevyhnutelným koncem v singularitě. Možná jste si všimli, že po průletu horizontem se jeho plocha rozdělila ve dvě. Vysvětlení by si vyžadovalo hlubší znalosti teorie relativity. Nebýt zde ale horizont vyznačen, ani byste nezažnamenali, že jste jím prolétli.

Until now we have orbited by black holes around a certain closed orbit only. How would our fall into the black hole look like though should the observer survive this incident? He would be most probably having some problems in the area of the photon sphere already. But still despite this let's have a look at the simulation for Schwarzschild's black hole. The event horizon is covered here by the imaginary red grid. This enables us to clearly see that the light comes to us from the opposite side of the object as well. This would be substantially important for the neutron star for example. However, this is not the case of black hole since it does not have any surface. The lower part on the left side shows the position of the observer who falls through the area of stable non-zero orbital geodesics, the next up is the area of unstable orbital geodesics where the orbital geodesics does not exist and all of it continues with the fall through the event horizon with the inevitable end in a singularity. You might have noticed that the horizon's surface has divided in two right after the flyby. The explanation demands deeper knowledge in the theory of relativity. With no displayed horizon here, you would not be even able to recognize that you flew through it.

Scéna 39

Nechejme pozorovatele dál spokojeně žít.

Dostane-li se do okolí černé díry nějaké těleso, může zde být gravitačně zachyceno. Slapové síly se postarají o jeho destrukci. Dochází zároveň k vzájemným kolizím mezi materiálem obíhajícím černou díru. Ten se silně zahřívá a vyzařuje. Materiál kolem černé díry formuje tzv. akreční disk jenž může být různých typů. Ne všechny černé díry jej kolem sebe mají. Je-li přítomen, je zdrojem záření, které lze z bezpečné dálky pozorovat. A jak bude vypadat obraz černé díry s akrečním diskem?

Let's leave the observer for now.

Any object which comes close to the black hole itself can be gravitationally captured. The tidal forces can carry out its destruction. There simultaneously occurs mutual collision between the materials which orbit around black hole. This material keeps warming up and also keeps radiating. The material around the black hole forms an accretion disk which can form many different types. Although, not all black holes have them around themselves. If its presence is confirmed, it becomes a source of radiation which can be seen from a safe distance. So, how would the image of black hole would look like?

Scéna 40

I na tuto otázku již bylo prakticky odpovězeno studiem zdánlivé pozice bodové hvězdy obíhající černou díru. Podívejme se na obrázek pro dvě různé pozice pozorovatele. Plná čára ukazuje pozici primárního obrazu, čárkovaná sekundárního. Čísla pak polohy obrazu v ekvidistantních časových intervalech.

Even this question was answered by the study of the apparent position of a point star which orbits around black hole. Now, we will take a look at two different positions with the observer. The full line shows the position of the primary image whereas the one with commas shows the secondary image instead. The numbers represent the image of positions in the equirectangular time interval.

Scéna 41

Akreční disk je v nejjednodušším pohledu jen prstenci hmoty obíhajícími a osvětlujícími černou díru.

Představíme-li si tenký kruhový disk s pozorovatelem umístěným nad jeho rovinou, bude primární obraz disku vytvářen fotony z horní strany disku a sekundární obraz fotony emitovanými z jeho spodní strany. Tu bychom v ploché geometrii nepozorovali, jak je tomu např. u Saturnu. Terciární obraz opět zobrazuje vrch disku a tak dále, avšak vyšší řády obrazů jsou stlačeny k centrální temné oblasti, která je obrazem černé díry. Akreční disk nesahá až k horizontu událostí, jeho nejvnitřnější stabilní kruhová orbita je nad fotonovou sférou. Pokud ji hmota překročí, rychle padá do černé díry. Mezi obrazem disku a černou dírou tak můžeme očekávat určitou mezeru.

In a simpler view, the accretion disk is viewed in mass's spring which orbits and illuminates black hole. If we imagine a thin circle disk with an observer located above its plane level, the primary disc's image would consist of photons from the upper side of the disk while the secondary ones would be made of emitted photons from its lower part. We would be unable to watch it from the flat geometry the same way with Saturn. The terciary image once again shows the top of the disk

and so on. Although, the top rank images are pressed towards the central dark area seen as black hole. Moreover, the accretion disk does not reach to the event horizon, its most internal stable orbit is located above the photons sphere. Should the mass exceed it, it quickly falls down to the black hole. So, between the disc image and black hole can be expected a certain gap.

Scéna 42

Jako první obraz akrečního disku vykreslil Jean-Pierre Luminet. Nadaný fyzik, ale i grafik. Data z reálných výpočtů vynášel jako tečky na papír ručně. Zde vidíme negativ jeho kresby, která neuvažuje pouze přicházející viditelné záření, ale celý vlnový rozsah.

The first image of the accretion disk was drawn by Jean-Pierre Luminet himself who was a very gifted physicist and graphic designer. All the data taken from real calculations have been illustrated by his hand as points on the paper. This is a negative of his drawing which includes incoming visible radiation but also the whole wavelength range.

Scéna 43

Hlavní prvky obrazu jsou vyznačeny na této ilustraci. Jsou jimi: silueta černé díry, fotonový prstenec, akreční disk a jeho obraz horní a dolní části.

Povšimněte si rovněž zjasnění na levé straně obrazu. V této oblasti se vyzařující hmota pohybuje směrem k pozorovateli. Vyzářené světlo se proto pozorovateli nejeví izotropně rozložené, ale převážně úzce soustředěné do směru pohybu. Vlivem tohoto relativistického jevu dochází ke zvýšení zdánlivé svítivosti zmíněné oblasti. Napravo v obrázku pak naopak k jejímu snížení. Hmota se zde totiž pohybuje směrem od pozorovatele. Jev označujeme jako Dopplerovo zesílení či výstižněji relativistické vyzařování.

The main elements of the image are portrayed in this illustration and it includes the following: black hole silhouette, a photon ring, accretion disk and the image of the upper and lower part. Take a notice of the brightness located on the left side of the image. The radiating mass is moving towards the observer in this area. Thus, the radiated light does not seem to the observer isotropically while being spread out but it is predominantly concentrated in the movement direction. Influenced by this relativistic phenomena, there occurs an increase of an apparent brightness in this area. In the right picture is the decrease instead since the mass moves from the observer instead. This phenomenon is relativistic radiation.

Scéna 44

Vzhled akrečního disku závisí rovněž na poloze pozorovatele. Sledujeme změny v obraze během jeho pohybu směrem od rovníkové roviny k pólu a zpět.

The appearance of the accretion disk also depends on the observer's position. Let's keep watching the changes on the picture during its movement from the equatorial plane and back to its original position.

Scéna 45

Identický obraz černé díry je veřejnosti známý z filmu Interstellar. Ač se v něm filmaři snažili podat divákovi fyzikálně věrné vyobrazení černé díry, relativistické jevy jsou natolik běžné zkušenosti nepřirozené, že od některých zkruslení bylo během výroby filmu upuštěno, aby nezpůsobovaly v myslích diváků zmatek.

Obrázek znázorňuje postupný přechod k fyzikální realitě. Nejprve je ukázán obraz akrečního disku s centrální rotující černou dírou, poté je uvážen frekvenční posun přicházejících fotonů

vlivem Dopplerova a relativistického posunu a finálně je připočten i posun ve svítivosti dle Liouvillova teorému.

Až tento poslední obrázek zachycuje oprávněně očekávanou podobu černé díry s tenkým akrečním diskem.

The identical image of black hole is known to the public from the Interstellar movie. While the filmmakers did their best in portraying the physical look of black holes, some relativistic phenomena happened to be so unnaturally looking that during the production process a decision was made to drop a few drawings in order to not confuse their audience. This picture portrays a gradual transition to physical reality. Firstly, there is an image of accretion disk with the central rotating black hole, then there is added a frequency shift of incoming photons influenced by relativistic shift and finally, it is accompanied by the shift in the luminous intensity based on Liouville's theorem. Only this last picture justly reflects the most expected image of black hole with a thin accretion disk.

Scéna 46

Exoplanety, planety u cizích Sluncí. Již jednou nás k nim mikročočkování přivedlo. Přechodný záblesk upozorňoval na jejich možnou existenci.

Pokud bychom je však chtěli sledovat optickými teleskopy z důvodu difrakce bychom potřebovali nepříjemně velké dalekohledy.

Pro exoplanetu ve vzdálenosti 100 světelných let od nás, bychom pro její minimalistické zobrazení o velikosti jednoho pixelu potřebovali teleskop o průměru 90 km. Při rozlišení 1000 pixelů by již průměr dalekohledu musel dosahovat zhruba 7 zemských průměrů. Přesto se nabízí jedna možnost. Použít k zobrazení exoplanety gravitační čočku. V našem okolí máme jako nejhmotnější objekt Slunce. Tak proč jej nevyužít?

The exoplanets, planets from different Suns. We have already reached them thanks to the microlensing. The transient flash suggested its possible existence.

Should we wish to observe them with the help of the optical telescope, due to the diffraction we would need impossibly large telescopes.

To watch a distant exoplanet 100 light years away from us, we would need for its minimalistic image with the size of one pixel a telescope with radius around 90 kilometers big. If we wished to have a distinction of 1000 pixels, the telescope's radius would have to reach up to 7 agricultural averages. Still there is one option: use a gravitational lens when watching the exoplanets. The most impactful object near us is the Sun, so why don't we use it?

Scéna 47

Myšlenka pochází nejspíše z konce sedmdesátých let minulého století od V. R. Eshlemana. Překážkou je, že nejbližší bod, na který Slunce paprsky vzdáleného objektu soustředí, leží asi 550 astronomických jednotek od Země. Pokud bychom ale do tohoto místa umístili pozorovatele, mohl by sledovat celý Einsteinův prstenec vzdálené exoplanety. Další obtíží je přezáření oblasti v okolí Slunce jeho korunou, takže bychom potřebovali být během pozorování ještě o něco dále, aby Einsteinův prstenec byl dobře oddělen od slunečního kotouče. Ten by pak bylo možno zastínit. Již dnes dostupné metody zpracování obrazu by vyřešily zbytek. Studie naznačují, že lze

očekávat obraz exoplanety v rozlišení, které na ní umožní detekovat nejen jednotlivé krajinné prvky planetárního měřítka, ale i případný mimozemský život.

NASA s přípravnými pracemi na realizaci tohoto inovativního konceptu již začala. Je možné, že po gravitačních vlnách budou gravitační teleskopy dalším zásadním průlomem v prostředcích zkoumání vesmíru a cizích civilizací. Dalším ovocem vzešlým z Einsteinových převratných myšlenek.

A jelikož fyzikální zákony platí v celém vesmíru stejné, musíme se ptát, zda tyto civilizace n sledují naše počínání obdobnými prostředky z pohodlí svých hvězdných soustav již dnes...

And since the physical quantities apply the same way across the whole space, we ask ourselves if there is anyone out there watching our quest of alien life from the comfort of their own star system even now...

This thought is most probably from the seventies of the last century from Mr. V. R. Eshleman. The biggest obstacle is the fact that the nearest spot where the Sun beam reaches is around 550 astronomical unit away from Earth. If we placed the observer here though, he would be able to watch all Einstein rings on the distant exoplanet. Another problem portrays the overexposure in an area near the Sun by its corona. In conclusion, we would need to be in a bigger distance during our observation so the Einstein ring could be correctly separated from the sun disk. This way we could overshadow the disk. All the current methods of image processing would solve the rest. A few studies indicate that we can expect the image of the exoplanet in a distinction which would enable us to detect not only the individual landscape elements of the planetary scale but also any possible alien life. NASA has already begun to work on this innovation concept. It is possible that gravitational waves will be accompanied by new gravitational telescopes. This would make a significant breakthrough in the way we conduct our research in space and look for the footprints of any possible alien life. It would be yet another success based on Einstein's significant thought process.

Scéna 48

Jsme na konci našeho vyprávění. Příběhu, který před 100 lety začal psát Albert Einstein a který do dnešních dnů není stále dokončen. Je však dalece rozpracován a denně na něm pracují stovky teoretických fyziků, vědců i inženýrů – techniků. Jaká další překvapení nám v budoucnu přinese můžeme jen snít. Pokud by Vám to však bylo málo, není nic snadnějšího než se do jeho psaní aktivně zapojit. Třeba se Vám podaří otočit list a nadepsat novou kapitolu. Začít můžete už dnes a není pro to potřeba chodit příliš daleko. Ústav fyziky v Opavě má pro Vás dveře otevřené.

We are reaching the end of our story. The story which has been started by Albert Einstein and to this day is still not quite finished. There has been some progress though. As of now there are hundreds of theoretical physicists, scientists and even engineers - technicians working on this subject daily. We can only imagine and keep dreaming about all the possibilities we can conclude. If its results disappoint you though, you are welcome to start writing along with us. Maybe you will get lucky and start a new exciting chapter. You can start today already. There is actually no need to go too far away for this goal. The Institute of Physics in Opava will welcome you with open arms.

Scéna 49

Závěrečné titulky...

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

- Předpokládáme-li, že světlo má povahu hmotných částic, pak lze v rámci newtonovské teorie dospět k závěru, že je jejich pohyb v okolí hmotných těles ovlivněn gravitační silou. Lze dojít k podobnému závěru, pokud bychom světlo popisovali v rámci vlnové teorie, jak ji prosazoval Christiaan Huygens?
-



SAMOSTATNÝ ÚKOL

- Vykonejte exkurzi na blízké pracoviště hvězdárny, kde se podrobněji zajímejte o odpovědi na otázky, které ve Vás pořad vyvolal.
-



NÁMĚT NA TUTORIÁL

- V souladu s obecnou teorií relativity lze se studenty diskutovat zjednodušený popis problému – odvození rovnic geodetik v ekvatoriální rovině objektu. Závěry lze demonstrovat na počítačových simulacích (podobně, jak se postupuje v knize Taylor, E. F.; Wheeler, J. A. : *Exploring Black Holes – Introduction to General Relativity*).
- V méně matematicky nadaných skupinách může tutor doprovodit pořad svými komentáři k dějinám a vědeckým příběhům teorie relativity. Se studenty lze na internetu procházet katalogy fotografií vesmírných objektů a vyhledávat další a další příklady gravitačního čočkování. Zábavnou formou lze pracovat s aplikací GravLens3; studovat projev volby jednotlivých parametrů užitého modelu na výsledném zobrazení. Rovněž lze užít mobilní aplikace

AccretionDisk a simulovat vzhled akrečního disku u černé díry. (Existují i další simulátory relativistické optiky a je možno je se studenty postupně vyzkoušet.)

KONTROLNÍ OTÁZKA



- Na kterých pracovištích v ČR se můžete začít dále vzdělávat v oblasti teorie relativity?

Nepředpokládá se testování studentů po shlédnutí pořadu; pořad má vzbudit motivaci k dalšímu vlastnímu poznávání, probudit zájem o fyziku a vesmír kolem nás.

KORESPONDENČNÍ ÚKOL






















- Na základě shlédnutí pořadu a vlastního dohledání dalších informací napište referát na téma a) pokroky v poznávání vesmíru, b) matematika v přírodních vědách, c) fyzikální modely reality – prediktivní modely a jejich testování.
-

POUŽITÁ LITERATURA

- Congdon, A. B.; Keeton, Ch. R. : *Principles of Gravitational Lensing*. Springer, Cham 2018. ISBN 978-3-030-02121-4.
- Courbin, F.; Minniti, D. : *Gravitational Lensing: An Astrophysical Tool*. Springer, Berlin - Heidelberg 2002. ISBN 3-540-44355-X.
- Dodelson, S.; Schmidt, F. : *Modern Cosmology*, 2nd ed. Academic Press, London 2020. ISBN 978-0-12-815948-4.
- Eigenbrod, A. : *Gravitational Lensing of Quasars*. EPFL Press, Boca Raton 2011. ISBN 9781439873540.
- James, O.; von Tunzelmann, E.; Franklin, P.; Thorne, K. S. : Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie Interstellar. *Classical and Quantum Gravity* **32**, 065001, 2015.
- James, O.; von Tunzelmann, E.; Franklin, P.; Thorne, K. S. : Visualizing Interstellar's Wormhole. *American Journal of Physics* **83**(6), 2015.
- Luminet, J. P. : *Black holes*. Cambridge University Press, Cambridge 1992. ISBN 0-521-40029-5.
- Luminet, J.-P. : From Black Holes to Cosmology : The Universe in the Computer. *Journal of Physics: Conference Series* **523**, 2014.
- Luminet, J.-P. : An Illustrated History of Black Hole Imaging : Personal Recollections (1972-2002). arXiv:1902.11196. 2019.
- Luminet, J.-P. : Image of a Spherical Black Hole with Thin Accretion Disk. *Astron. Astrophys.* **75**, 228-235, 1979.
- Luminet, J.-P. : Seeing Black Holes: From the Computer to the Telescope. *Universe* **4**(86), 2018.
- Mellier, Y.; Fort, B.; Soucail, G. : *Gravitational Lensing*. Springer, Berlin - Heidelberg 1990. ISBN 3-540-52648-X.
- Müller, T.; Frauendiener, J. : Interactive visualization of a thin disc around a Schwarzschild black hole. *European Journal of Physics* **33**(4), 2012.
- Müller, T.; Weiskopf, D. : General-Relativistic Visualization. *Computing in Science & Engineering* **13**(6), 2011.
- Narayan, R.; Bartelmann, M. : Lectures on Gravitational Lensing. arXiv: astro-ph/9606001v2, 1997.
- Nemiroff, R. J. : Visual distortions near a neutron star and black hole. *American Journal of Physics* **61**(7), 1993.
- Ohanian, H. C. : The black hole as a gravitational "lens". *American Journal of Physics* **55** (428), 1987.
- Renn, J.; Sauer, T. : Eclipses of the Stars - Mandl, Einstein, and the Early History of Gravitational Lensing. Max Planck Institute for the History of Science. Preprint 160, 2000.
- Schastok, J. : Stellar sky as seen from the vicinity of a black hole. *American Journal of Physics* **55**(4), 1987.

- Schneider, P.; Kochanek, Ch. S.; Wambsgans, J. : *Gravitational Lensing: Strong, Weak and Micro*. Springer, Berlin - Heidelberg 2006. ISBN 978-3-54030309-1.
 - Stuckey, W. M. : The Schwarzschild black hole as a gravitational mirror. *Am. J. Phys.* **61**(448), 1993.
 - Šolc, M. : Gravitační čočky, Einstein a Praha. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **44**(3), 1999.
 - Taylor, E. F.; Wheeler, J. A. : *Exploring Black Holes – Introduction to General Relativity*. Addison Wesley Longman, USA. ISBN 0-201-38423-X.
 - Turyshev, S. G.; Shao, M.; Toth, V. T. et al. : Direct Multipixel Imaging and Spectroscopy of an Exoplanet with a Solar Gravity Lens Mission (Final Report). NASA Innovative Advanced Concepts (NIAC) Phase II. 80HQTR18NOA01-18NIAC-A2. 2020
 - Turyshev, S. G.; Toth, V. T. : Image formation for extended sources with the solar gravitational lens. *Physical Review D* **102**, 0,24038, 2020.
 - EVANS & SUTHERLAND, Digistar 6 [software]. 2016 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.es.com>. Požadavky na systém: Win 10 Server, Fulldome projekce.
 - 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/>
-

PŘEHLED DOSTUPNÝCH IKON

	Čas potřebný ke studiu		Cíle kapitoly
	Klíčová slova		Nezapomeňte na odpočinek
	Průvodce studiem		Průvodce textem
	Rychlý náhled		Shrnutí
	Tutoriály		Definice
	K zapamatování		Případová studie
	Řešená úloha		Věta
	Kontrolní otázka		Korespondenční úkol
	Odpovědi		Otázky
	Samostatný úkol		Další zdroje
	Pro zájemce		Úkol k zamyšlení

Název: **Optické efekty v extrémních gravitačních polích**

Autor: **Jan Hladík a kolektiv**

Vydavatel: Slezská univerzita v Opavě

Určeno: studentům Slezské univerzity v Opavě

Počet stran: 35

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.