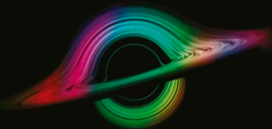


„FASCINUJÚCE“

Jeremy Vine

„NEUVERITELNÉ“

Nihal Arthanayake



BRIAN COX
JEFF FORSHAW

ČIERNE DIERY

KLÚČ
K POCHOPENIU
VESMÍRU

TATRAN

ČIERNE DIERY

BRIAN COX
JEFF FORSHAW

ČIERNE DIERY

KLÚČ
K POCHOPENIU
VESMÍRU

TATRAN

Z anglického originálu Brian Cox and Jeff Forshaw: *Black Holes: The Key to Understanding the Universe*,
ktorý vyšiel vo vydavateľstve William Collins,
An imprint of HarperCollinsPublishers,
Londýn 2022,

preložila Veronika Majerová.

Vydalo Vydavateľstvo TATRAN, s. r. o., v roku 2025,
so sídlom Klariská 16, 815 82 Bratislava, Slovenská republika.

Vyšlo ako 5517. publikácia.

Vydanie I.

Knižnú väzbu podľa pôvodného návrhu spracoval Peter Zentko.

Zodpovedná redaktorka Zuzana Šulajová

Jazykové redaktorky Beáta Beláková, Eva Melichárková

Odborná spolupráca Roman Nagy

Použitie úryvky: Charles Darwin: *O pôvode druhov*, Citadella, 2016;

William Shakespeare: *Macbeth*, Odeon, 2009;

Issac Newton: *Matematické princípy prírodnej filozofie*,

Spektrum STU, 2021

Technický redaktor Peter Zentko

Sadzba AldoDesign, Bratislava

Vytlačil FINIDR, s.r.o., Český Těšín.

www.slovtatran.sk

:: knihy pre **hodnotnejší** život

info@slovtatran.sk

All rights reserved.

Copyright © Brian Cox and Jeff Forshaw 2022

Images © HarperCollinsPublishers 2022

Illustrations © by Martin Brown and Jack Jewell

Translation © Veronika Majerová 2025

Slovak edition © Vydavateľstvo TATRAN 2025

ISBN 978-80-222-1619-7

Jeffovej mame Sylvii

OBSAH

1	Stručná história čiernych dier	11
2	Zjednotenie priestoru a času	38
3	Ako preniesť nekonečno na konečné miesto	68
4	Zakrivenie časopriestoru	104
5	Do čiernej diery	132
6	Biele diery a červie diery	151
7	Kerrova krajina zázrakov	175
8	Reálne čierne diery z kolabujúcich hviezd	198
9	Termodynamika čiernych dier	215
10	Hawkingovo žiarenie	245
11	Špagetizovaní a odparení	257
12	Tlesknutie jednou rukou	271
13	Svet ako hologram	294
14	Ostrov v prúde	311
15	Dokonalý kód	330
	Podakovanie	343
	Poznámky	345
	Autori obrázkov	351
	Register	353

1

STRUČNÁ HISTÓRIA ČIERNYCH DIER

„Práve v poznaní, že existuje niečo, čo nevieme pochopiť, prejavy najhlbšej múdrosti a najžiarivejšej krásy – práve v tejto emócii spočíva skutočná nábožnosť. V tomto zmysle, a výlučne v ňom, som hlboko veriaci človek.“

Albert Einstein

V srdci Mliečnej cesty nájdeme čosi, čo narúša štruktúru vesmíru, a spôsobuje to niečo, čo je štyri milióny rás ťažšie ako naše Slnko. Priestor a čas sú v blízkosti tohto objektu také zakrivené, že ak sa svetelné lúče priblížia na viac ako dvanásť miliónov kilometrov, už viac neuniknú. Oblasť bez návratu ohraničuje horizont udalostí, pomenovaný podľa toho, že vesmír vonku je navždy izolovaný od čohokoľvek, čo sa deje vnútri. Alebo sme si to aspoň mysleli, keď ten názov vznikol. Tento objekt sme pomenovali Sagittarius A* a je to supermasívna čierna diera.*

* Sagittarius A* sa vyslovuje ako „Sagittarius A s hviezdíčkou“ alebo „A hviezdíčka“.

Čierne diery ležia tam, kde kedysi žiarili najťažšie hviezdy, v stredoch galaxií a na okraji nášho súčasného poznania. Vyskytujú sa prirodzene ako neodvratné vytvory gravitácie, keď sa priveľa hmoty zrúti v dostatočne malom priestore. A hoci ich naše prírodné zákony predpovedajú, nezvládajú ich opísať dokonale. Fyzici celú svoju profesijnú kariéru hľadajú problémy a robia pokusy v snahe nájsť čokoľvek, čo sa nedá vysvetliť známymi zákonmi. Na rastúcom počte objavených čiernych dier posievajúcich oblohu je úžasné, že každá je pokusom prírody, ktorý nedokážeme vysvetliť. Znamená to, že nám uniká niečo podstatné.

Moderný výskum čiernych dier sa začína Einsteinovou všeobecnou teóriou relativity publikovanou v roku 1915. Táto storočná teória gravitácie vedie k dvom zarážajúcim predpovediam: „Po prvé, osudom masívnych hviezd je skolabovať do seba za horizontom udalostí a vytvoriť ‚čiernu dieru‘, ktorá obsahuje singularitu, a po druhé, v našej minulosti existovala singularita, ktorá v istom zmysle predstavuje začiatok vesmíru.“ Táto pozoruhodná veta sa vyskytuje na prvej strane prelomovej učebnice všeobecnej teórie relativity *The Large Scale Structure of Space-Time* (Štruktúra časopriestoru vo veľkej mierke), ktorú v roku 1973 napísali Stephen Hawking a George Ellis.¹ Predstavuje farbisté termíny – čierna diera, singularita, horizont udalostí –, ktoré sa odvtedy stali súčasťou popkultúry. Takisto tvrdí, že gravitácia donúti tie najhmotnejšie hviezdy vo vesmíre na konci života sko-

labovať. Hviezda zmizne a zanechá odtlačok v štruktúre vesmíru. Za horizontom však niečo ostane. Singularita, skôr okamih ako miesto, keď sa naše poznatky o prírodných zákonoch rozpadajú. Podľa všeobecnej teórie relativity singularita leží na konci času. Aj v našej minulosti existovala singularita, ktorá zas označuje začiatok času: Veľký tresk. Žiada sa od nás, aby sme prijali zásadnú myšlienku, že náš vedecký opis gravitácie, tej známej sily, čo riadi správanie delových guľí a mesiacov, v podstate súvisí s povahou času a priestoru.

Vôbec nie je očividné, že by gravitácia mala súvisieť s časom a priestorom, a už tobôž nie, že ak ju chceme opísať vedeckou teóriou, možno sa budeme musieť zamyslieť nad počiatkom a koncom času. Čierne diery stoja v centre skúmania tejto zásadnej súvislosti, pretože sú najextrémnejšími pozorovateľnými výtvormi gravitácie. Z intelektuálneho hľadiska sú také problematické, že ešte v 60. rokoch minulého storočia si mnohí fyzici mysleli, že hoci ich existencia vyplýva z matematickej stránky všeobecnej teórie relativity, príroda by si určite našla spôsob, ako ich vzniku predísť. Sám Einstein v roku 1939 napísal článok, v ktorom usúdil, že čierne diery „vo fyzickej realite neexistujú“.² Einsteinov slávny súčasník Arthur Eddington to vyjadril ráznejšie: „Mal by existovať prírodný zákon, ktorý by hvieзде zabránil správať sa takto absurdne.“ Nuž, žiaden neexistuje a hviezdy sa tak veru správajú.

Dnes chápeme, že čierne diery sú prirodzenou a neodvratnou fázou života hviezd, ktoré sú niekoľkonásobne

ťažšie ako Slnko, a keďže takých hviezd v našej galaxii existuje mnoho miliónov, existuje aj mnoho miliónov čiernych dier. Hviezdy sú vlastne veľké zhluky hmoty bojujúce s gravitačným kolapsom. V počiatočných štádiách života odolávajú príťažlivosti vlastnej gravitácie smerom dovnútra tým, že v jadre premieňajú vodík na hélium. Tento proces známy ako jadrová fúzia uvoľňuje energiu, ktorá vytvára tlak, a ten zas zabraňuje kolapsu. V tejto fáze sa aktuálne nachádza aj naše Slnko a každú sekundu premieňa 600 miliónov ton vodíka na hélium. V astronómii je jednoduché len tak preletieť cez obrovské čísla, ale mali by sme sa pozastaviť a užasnúť nad desivým rozdielom medzi veľkosťami hviezd v porovnaní s objektmi, s ktorými sa človek každodenne stretáva. Šesťsto miliónov ton váži malá hora a naše Slnko každú sekundu pravidelne páli jednu takúto horu vodíka, a to dlhšie, ako existuje Zem. No nebojte sa, ostáva mu dostatok vodíka, aby mohlo naďalej bojovať s gravitáciou ešte ďalších päť miliárd rokov. Slnko to dokáže, lebo je veľké – pohodlne by sa doň zmestilo milión Zemí. V priemere má 1,4 milióna kilometrov – prúdovému dopravnému lietadlu by trvalo šesť mesiacov, kým by ho obletelo. Napriek tomu všetkému je Slnko iba malou hviezdou. Najväčšie známe hviezdy sú tisíckrát väčšie, s priemerom rádovo v miliardách kilometrov. Keby tieto hviezdy ležali uprostred našej slnečnej sústavy, pohltili by Jupiter. Takéto monštrá zakončia svoj život katastrofickým gravitačným kolapsom.

Gravitácia je slabá, ale nezadržateľná sila. Iba priťahuje, a ak neexistuje v jej prítomnosti iná väčšia sila, ktorá by pôsobila proti nej, priťahuje bez obmedzenia. Gravitácia sa vás snaží stiahnuť cez podlahu k stredu Zeme a podlahu ťahá rovnakým smerom. Všetko sa nezrúti do jedného bodu len preto, že hmota je pevná, pozostáva z častíc, ktoré sa správajú podľa zákonov kvantovej fyziky, a keď sa priveľmi priblížia, odpudzujú sa. Pevnosť hmoty je však tak trochu ilúzia. Nevnímame to, ale zem pod našimi nohami je v podstate prázdny priestor. Oblaky elektrónov tancujúce okolo atómových jadier držia atómy od seba a iba nás klamú, že pevné objekty sú nahusto stlačené. Atómové jadro v skutočnosti predstavuje iba maličký zlomok objemu atómu a zem pod nami je nehmotná ako para. Napriek tomu sú odpudivé sily vnútri hmoty veľmi silné a schopné zabrániť, aby ste sa prepadli cez podlahu, či stabilizovať umierajúce hviezdy až dvakrát hmotnejšie ako Slnko. No má to aj hranicu, ktorú môžeme skúmať na neutrónových hviezdach.

Typická neutrónová hviezda má polomer iba zopár kilometrov a hmotnosť okolo 1,5-násobku Slnka, čo je asi milión „Zemí“ natlačených do oblasti veľkej ako mesto. Neutrónové hviezdy sa veľmi rýchlo otáčajú a vyžarujú jasné lúče rádiových vĺn, ktoré osvetľujú vesmír ako maják. Prvé pozorovanie takej neutrónovej hviezdy, známej ako pulzar, vykonal Jocelyn Bell Burnellová a Antony Hewish v roku 1967. Pulzovanie, ktoré ožiarilo Zem každých 1,3373 sekundy, bolo také pravidelné, že Bell

Burnellová a Hewish ho pokrstili „Malí zelení mužičkovia 1“. Doposiaľ najrýchlejší objavený pulzar s názvom PSR J1748-2446ad sa otočí 716-krát každú sekundu. Neutrónové hviezdy sú extrémne energetické nebeské telesá. Dvadsiateho siedmeho decembra 2004 zasiahol Zem záblesk energie, oslepil satelity a rozšíril našu ionosféru. Táto energia vyšla z preskupenia magnetického poľa okolo neutrónovej hviezdy s názvom SGR 1806-20, ktorá leží 50 000 svetelných rokov od Zeme na opačnej strane Galaxie. Za päťtinu sekundy hviezda vyžiarila viac energie, ako naše Slnko vyžije za štvrt' milióna rokov.

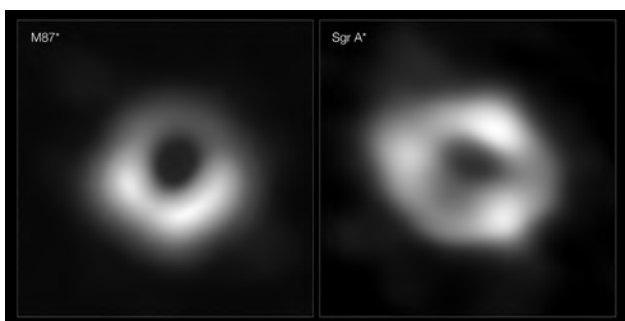
Gravitačná príťažlivosť na povrchu neutrónovej hviezdy je stomiliárdnásobne väčšia ako na Zemi. Čokoľvek, čo dopadne na povrch, sa v okamihu sploští a premení na polievku nukleónov. Keby ste spadli na povrch neutrónovej hviezdy, častice, ktoré kedysi tvorili vaše objemné atómy, by sa premenili na neutróny a natlačili sa tak nahusto, že by okolo seba lietali takmer rýchlosťou svetla, aby nenarazili jeden do druhého. Takéto poskakovanie vie udržať pri živote neutrónovú hviezdu s hmotnosťou asi dvoch Slnk, ale väčšiu už nie. Za touto hranicou gravitácia zvíťazí. Keby sa na jej povrch prilialo ešte trochu hmotnosti, hviezda veľkosti mesta by skolabovala a vytvorila by časopriestorovú singularitu. Georges Lemaître, katolícky kňaz a jeden zo zakladateľov modernej kozmológie, opísal singularitu Veľkého tresku na počiatku nášho vesmíru ako deň bez včerajška. Singularita vytvorená gravitačným kolapsom je okamih bez zajtrajška.

STRUČNÁ HISTÓRIA ČIERNYCH DIER

To, čo zostane vonku, je temný odtlačok kedysi žiarivej veci: čierna diera.

Dnes máme konkrétne pozorované dôkazy, že náš vesmír obývajú čierne diery. Obrázok 1.1 zachytil projekt Event Horizon Telescope Collaboration, sieť rádioteleskopov rozmiestnených po Severnej a Južnej Amerike, Európe, Pacifiku, Grónsku a Antarktíde. Snímka vľavo zobrazuje supermasívnu čiernu diery v strede galaxie M87, ktorá leží 50 miliónov svetelných rokov od Zeme. Ako to vo vede často býva, obyčajná rozmazaná fotka je o to úžasnejšia, čím viac sa dozvedáte o tom, na čo sa vlastne pozeráte.

Táto čierna diera má hmotnosť 6,5 miliardy Sĺnk a leží v tmavej strednej oblasti obrázka známej ako tieň. Oblasť je tmavá, pretože gravitácia je tam taká silná, že jej neunikne ani svetlo, a keďže nič sa nevie pohybovať rýchlejšie ako svetlo, neunikne z nej nič.



Obrázok 1.1. Vľavo: Supermasívna čierna diera v strede galaxie M87. Vpravo: Sagittarius A*, čierna diera v strede našej Galaxie.

Obe zachytil projekt Event Horizon Telescope Collaboration.

Aj v obrazovej prílohe 1.

ČIERNE DIERY

V tieni leží horizont udalostí čiernej diery v M87, guľa v priestore s priemerom 240-násobne väčším, ako je vzdialenosť od Zeme k Slnku. Chráni vesmír vonku pred singularitou. Jasný prstenec okolo tieňa tvoria prevažne lúče svetla vyžiarené plynom a prachom špirálovito krúžiacim okolo čiernej diery a do nej a ich trajektóriu zakrivuje gravitácia diery, ktorá ich pretvára do charakteristického tvaru šišky.

Na obrázku vpravo vidíme supermasívnu čiernu dieru uprostred našej vlastnej Galaxie Sagittarius A*. S hmotnosťou iba 4,31 milióna Slnk je v porovnaní s predchádzajúcou iba malou rybou, ktorej žiariaci prstenec by sa pohodlne zmestil na obežnú dráhu Merkúra. Jej prítomnosť odvodili vedci najprv iba nepriamo cez pozorovanie obežných dráh hviezd okolo nej. Tieto hviezdy nazývame „S hviezdy“. Hviezda S2 obieha pri čiernej diere obzvlášť blízko, s periódou iba 16,0518 roka. Presnosť je dôležitá, pretože podrobné pozorovania obežnej dráhy S2 sa porovnávali s predpoveďami podľa všeobecnej teórie relativity, a vďaka tomu bolo možné predpokladať prítomnosť čiernej diery dávno predtým, ako ju niekto odfotografoval. S2 urobila najbližší pozorovaný prelet okolo Sagittaria A* v roku 2018, keď prešla iba 120 astronomických jednotiek od horizontu udalostí.* Pri najbližšom prelete sa pohybovala rýchlosťou rovnou trom percentám rýchlosti svetla. V roku 2020 získali Reinhard Genzel a Andrea Ghezová

* Jedna astronomická jednotka sa rovná (približne) vzdialenosti Zeme od Slnka.

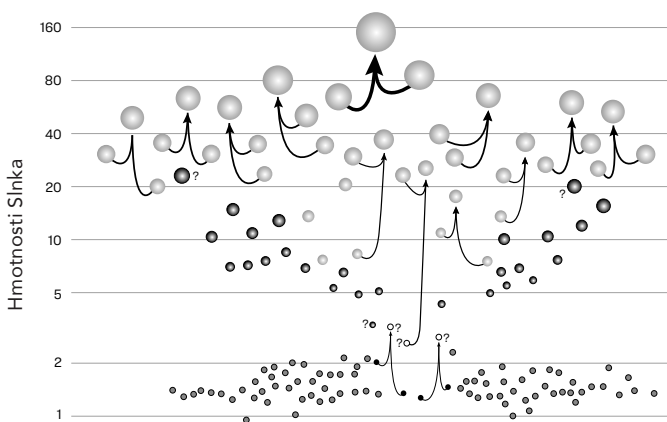
za tieto veľmi presné pozorovania počas mnohých rokov Nobelovu cenu. Dokázali nimi, že „uprostred našej Galaxie sa nachádza supermasívny kompaktný objekt“, aby sme citovali komisiu Nobelovej ceny. O cenu sa delili so sirom Rogerom Penrosom za matematický dôkaz, že „vznik čiernych dier spoľahlivo predpovedala už všeobecná teória relativity“.

Viacero menších čiernych dier hviezdnej hmotnosti sme objavili aj pomocou detekcie narušení v čase priestore, ku ktorým došlo ich vzájomnými zrážkami. V septembri 2015 detektor gravitačných vln LIGO zaznamenal vlnky v časopriestore spôsobené zrážkou dvoch čiernych dier, ktorá sa odohrala 1,3 miliardy svetelných rokov od Zeme. Čierne diery mali 29- a 36-násobne väčšiu hmotnosť ako Slnko a zrazili sa a splynuli za menej ako dve desatiny sekundy. Maximálny výkon počas zrážky prekonával výkon všetkých hviezd v pozorovateľnom vesmíre päťdesiatnásobne. Tieto vlny k nám dorazili o vyše miliardu rokov neskôr a vzdialenosť nameranú pozdĺž štvorkilometrového laserového meracieho ramena LIGA zmenili o jednu tisícinu priemeru protónu v tvare rýchlo sa meniaceho krútiaceho vzoru, ktorý sa presne zhodoval s predpoveďami všeobecnej teórie relativity. LIGO a jeho sesterský detektor Virgo odvtedy zaznamenali veľa ďalších splynutí čiernych dier. Nobelova cena za fyziku v roku 2017 putovala k Rainerovi Weissovi, Barrymu Barishovi a Kipovi Thornovi za ich vedúce postavenie pri návrhu, stavbe a prevádzke LIGA.

ČIERNE DIERY

„Hviezdny cintorín“ čiernych dier hviezdnej hmotnosti a neutrónových hviezd, ako ho poznáme v čase písania tejto knihy, je zobrazený na obrázku 1.2.

Súhrn týchto pozorovaní pomocou rôznych teleskopov a metód nad rámec odôvodnených pochybností dokazuje, že neutrónové hviezdy a čierne diery skutočne existujú. Zo sci-fi sa stáva veda, keď sa teórie potvrdia experimentálnymi pozorovaniami. Keď nás naša teoretická cesta zavedie na čoraz zvláštnejšie chodníčky cez čoraz hrboľatejší intelektuálny terén, mali by sme si pripomínať, že tieto absurdnosti sú skutočné.



Obrázok 1.2. Známe čierne diery hviezdnej hmotnosti a neutrónové hviezdy zoradené tak, že objekty s najmenšou hmotnosťou sa nachádzajú dole. Najmenšie krúžky predstavujú neutrónové hviezdy a šípky označujú pozorované zrážky a splynutia medzi dvojicami čiernych dier alebo neutrónových hviezd. Čísla vľavo na zvislej osi znamenajú násobok hmotnosti Slnka.

Patria k prírodnému svetu, a teda by sme sa mali snažiť porozumieť im prostredníctvom známych prírodných zákonov. Ak sa nám to nepodarí, získame príležitosť odhaliť nové prírodné zákony – a v tomto prípade sa to rozhodne stalo, dokonca nad rámec najdivokejších snov prvých priekopníkov.

Snaha vyhnúť sa absurdnosti

Existenciu čiernych dier prvý raz predložil anglický farár a vedec John Michell v roku 1783 a nezávisle od neho aj francúzsky matematik Pierre-Simon de Laplace v roku 1798. Michell aj Laplace argumentovali, že rovnako ako lopta, ktorú vyhodíme nahor, spomaľuje a späť na zem ju ťahá zemská gravitácia, môžeme si predstaviť, že existujú objekty s takou veľkou gravitačnou silou, až dokážu uväzniť svetlo.

Objekt vymrštený dohora od povrchu Zeme musí mať rýchlosť vyššiu ako 11 kilometrov za sekundu, aby unikol do hlbokého vesmíru. Poznáme to ako únikovú rýchlosť Zeme. Gravitačná príťažlivosť na povrchu Slnka je oveľa silnejšia a úniková rýchlosť je takisto vyššia – 620 kilometrov za sekundu. Na povrchu neutrónovej hviezdy sa úniková rýchlosť môže priblížiť k značne veľkému zlomku rýchlosti svetla.* Laplace vypočítal, že teleso s hustotou porovnateľnou so Zemou, ale s priemerom 250-krát väčším ako Slnko, by malo takú veľkú gravitačnú prí-

* Rýchlosť svetla je 299 792 458 metrov za sekundu.

ťažlivosť, že jeho úniková rýchlosť by prevýšila rýchlosť svetla, a teda „tie najväčšie telesá vo vesmíre môžu byť neviditeľné práve pre svoju veľkosť“.³ Táto fascinujúca myšlienka predbehla svoju dobu. Predstavte si guľovú schránku v priestore, ktorá sa dotýka povrchu jednej z Laplaceových obrovských tmavých hviezd. Úniková rýchlosť zo schránky by sa rovnala rýchlosti svetla. Teraz si tú hviezdu zhustíme. Povrch hviezdy by sa zmrštil dovnútra, ale imaginárna schránka by ostala na mieste a označovala hranicu vo vesmíre. Keby ste sa vznášali v schránke, teraz už nad povrchom hviezdy, a zasvietili dovnútra baterkou, svetlo by nešlo nikam. Ostalo by navždy zmrazené, neschopné uniknúť. Táto hranica sa nazýva horizont udalostí. Vnútri schránky sa svetlo baterky obráti a vtiahne ho nazad do hviezdy. Svetlo dokáže uniknúť, iba keď sa nenachádza v schránke.

Michell a Laplace si tieto tmavé hviezdy predstavovali ako obrovské objekty možno preto, že nevedeli poňať alternatívu. Objekt však nemusí byť veľký, aby mal na povrchu silnú gravitačnú príťažlivosť. Môže byť aj veľmi malý a veľmi hustý – ako neutrónová hviezda. Pri telese akejkoľvek hmotnosti možno použiť zákony Isaaca Newtona na výpočet polomeru oblasti bez úniku, ktorá by okolo neho vznikla, keby sa dostatočne stlačilo:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

kde G je Newtonova gravitačná konštanta, ktorá predstavuje silu gravitácie, a c je rýchlosť svetla. Keby sme čokoľvek s hmotnosťou M stlačili na guľu menšiu ako tento polomer, vytvoríme tmavú hviezdu. Keď do rovnice dosadíme hmotnosť Slnka, zistíme, že polomer sa rovná zhruba trom kilometrom. V prípade Zeme je to trochu menej ako jeden centimeter. Ťažko si predstaviť, že by sa Zem scvrkla na veľkosť okruhu, zrejme preto Michell ani Laplace nebrali túto možnosť do úvahy. Hoci sú tmavé hviezdy skutočne fantastické, zdalo sa, že keby naozaj existovali, nebolo by na nich nič obzvlášť problematické ani absurdné. Zachytávali by svetlo, ale ako podotkol Laplace, znamenalo by to iba, že ich neuvidíme.

Tento jednoduchý newtonovský argument nám umožní urobiť si predstavu o čiernej diere – gravitácia môže byť taká silná, že svetlo jej neunikne –, ale Newtonov gravitačný zákon sa nedá použiť pri veľmi silnej gravitácii. Namiesto neho potrebujeme Einsteinovu teóriu. Všeobecná teória relativity zahŕňa aj objekty s takou veľkou gravitačnou silou, že svetlo jej neunikne, ale jej dôsledky sa výrazne líšia a rozhodne sú problematické a absurdné. Ako v Newtonovom prípade, ak sa akýkoľvek objekt stlačí pod hranicu určitého kritického polomeru, uväzní svetlo. Vo všeobecnej teórii relativity sa tento polomer nazýva Schwarzschildov polomer, pretože ho v roku 1915, veľmi krátko po zverejnení všeobecnej teórie relativity, prvý raz vypočítal nemecký fyzik Karl Schwarzschild. Výpočet Schwarzschildovho polomeru vo všeobecnej teórii