

Gymnázium Jána Adama Raymana

Prvá školská písomná práca

Čierne diery

(výklad)

Nikola Mikšová

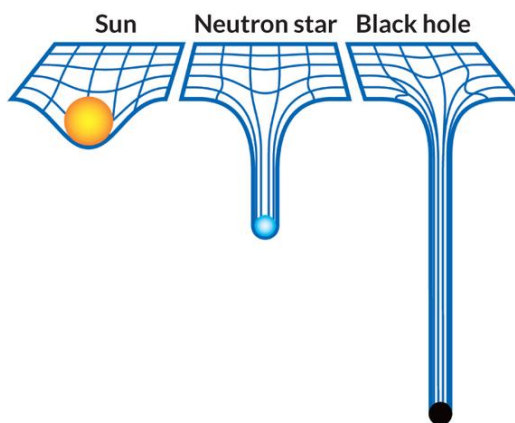
Úvod

Cieľom tejto práce je zhrnúť základné poznatky o čiernych dierach. Práca popisuje vznik čiernej diery, ktorá je posledným vývojovým štádiom veľmi hmotných hviezd. V práci tiež spomíname možnosti skúmania týchto veľkých vzdialených telies a najnovšie objavy z oblasti skúmania čiernych dier.

Čierna diera

Keď chcete niekoho naučiť plávať, najlepšie je hodiť ho do vody. Preto nevidíme lepší spôsob, ako začať vysvetľovať tak náročné veci, než vám rovno predstaviť stručnú definíciu.

Čiernu diera je oblasť časopriestoru ohraničená tzv. horizontom udalostí, z ktorého sa nemôže nič, vrátane svetla, dostať k vzdialenému pozorovateľovi. (Vesmír v orechovej škrupinke, 2002, s.78) Veľmi dôležitou informáciou pre nás zatiaľ bude, že čierna diera v skutočnosti nie je dierou. Táto oblasť získala svoje pomenovanie len vďaka tomu, že svojou váhou pôsobí na časopriestor, zakrivuje ho a vytvára tak akýsi tunel, dieru. Pre lepšiu predstavu tu máme obr. 1.



Obrázok 1 - Porovnanie zakrivenia časopriestoru. Slnko, neutrónová hviezda a čierna diera.

O prvej zmienke čiernych dier z roku 1783 sa môžeme dozvedieť od Stevena Hawkinga: „Niekdajší rektor univerzity v Cambridgei, John Michell, vtedy použil nasledujúci príklad. Ak niekto vystrelí časticu, napríklad delovú guľu, kolmo nahor, jej výstup bude spomaľovať gravitácia, až sa nakoniec jej pohyb smerom nahor zastaví a ona začne padať späť. Ak je počiatočná rýchlosť v smere nahor väčšia ako určitá kritická hodnota, nazývaná úniková rýchlosť, gravitácia nebude dost' silná na to, aby časticu zastavila, a tá unikne z jej dosahu. Pre Zem je úniková rýchlosť asi 12 km.s⁻¹ a pre Slnko približne 618 km.s⁻¹.“

Michell tvrdil, že je možné, že sa vo vesmíre vyskytujú také hviezdy, ktoré sú oveľa hmotnejšie ako Slnko a ich úniková rýchlosť je väčšia ako úniková rýchlosť svetla. Tieto hviezdy by boli pre naše oči neviditeľnými, pretože všetko svetlo, ktoré by vyslali, by gravitácia hviezdy pritiahla späť. Michell vtedy týmto objektom dal pomenovanie tmavé hviezdy.

Michellove tmavé hviezdy boli však založené na Newtonovej fyzike, podľa ktorej je čas absolútny a plynie bez ohľadu na to, čo sa deje. Avšak istý nemecký astronóm Karl Schwarzschild mal to šťastie, že pôsobil v roku 1916, kedy už existovala Einsteinova teória relativity, v ktorej masívne objekty časopriestor zakrivujú. Schwarzschild v roku 1916 našiel riešenie Einsteinovej teórie relativity, ktoré predstavuje sférickú čiernu dieru.

Dlhú dobu panovala neistota medzi fyzikmi, vrátane Einsteina, či sa takéto extrémne stavy hmoty môžu reálne vyskytovať vo vesmíre. Dnes však vieme, že hocijaká dostatočne hmotná nerotujúca hviezda s ľubovoľne zložitým tvarom a vnútornou stavbou, ktorá vyčerpá svoje jadrové palivo, nevyhnutne skolabuje na dokonale sférickú Schwarzschildovu čiernu dieru. Polomer horizontu udalostí čiernej diery (R), závisí iba od jej hmotnosti a je daný vzťahom:

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

V tomto vzorci symbol (c) predstavuje rýchlosť svetla, (G) Newtonovu gravitačnú konštantu a (M) hmotnosť čiernej diery.

Čierna diera s takou istou hmotnosťou ako má slnko by napríklad mala polomer iba tri kilometre! (Vesmír v orechovej škrupinke, 2002, s.77-78)

Vznik čiernej diery

Vznik čiernej diery si môžeme popísať na hviezde, ktorej hmotnosť dosahuje približne desaťnásobok hmotnosti Slnka. Na hviezdach prebieha jadrová syntéza, pri ktorej sa vodík mení na hélium. Energia v podobe tepla, ktorá sa vytvára pri týchto jadrových procesoch, je dostatočná na vyrovnanie tlaku vlastnej gravitácie. Hviezda sa tak udržiava v rovnováhe proti vlastnej gravitácii, čím zabraňuje svojmu zmršťovaniu.

„Veľmi hmotné hviezdy budú spaľovať svoj vodík na hélium omnoho rýchlejšie ako Slnko. Znamená to, že sa ich zásoby vodíka môžu minúť už za pár stoviek miliónov rokov a hviezdy budú čoskoro čeliť kríze. Svoje hélium môžu spáliť aj na ťažšie prvky, ako je uhlík a kyslík, ale v týchto jadrových reakciách sa už neuvolňuje veľa energie, preto hviezdy začnú strácať teplo a tlak, ktorý im pomáhal vzdorovať vlastnej gravitácii. Výsledok je, že sa začnú zmenšovať. Ak majú približne viac ako dvojnásobok hmotnosti Slnka, vnútorný tlak nikdy

nezastaví ich zmršťovanie. Také hviezdy sa scvrknú na nulovú veľkosť s nekonečnou hustotou a vytvorí to, čo sa nazýva singularita,“ vysvetľuje Stephen Hawking.

Keď sa polomer hviezdy zmenší na kritických 30km, úniková rýchlosť dosiahne 300 000km za sekundu, čo je rýchlosť svetla. Túto rýchlosť nie je možné prekonať a tak je svetlo z povrchu hviezdy stiahnuté späť gravitačným poľom. (Miroslav Jurča, 2010, s.32)

Nemožnosť uniknúť z takzvaného horizontu udalostí, ktorý vytvára pre fotóny svetla akési väzenie Shawshank, pekne laicky vysvetľuje Hawking: „Svetlo sa bude vznášať v konštantnej vzdialenosti od stredu hviezdy a nikdy sa nedostane preč. Táto kritická dráha svetla vytvorí plochu zvanú horizont udalostí, oddeľujúcu oblasť priestoročasu, z ktorej svetlo môže uniknúť, od tej, z ktorej to nedokáže. Akékoľvek svetlo vyžiarené hviezdou po prechode horizontom udalostí bude krivosťou priestoročasu nútené vrátiť sa späť dovnútra hviezdy. Hviezda sa tak stane jednou z Michellových „tmavých hviezd“, alebo ako im hovoríme dnes, čiernou dierou.“

Singularita a dilatácia času

Podľa všeobecnej relativity existuje predpoklad, že pod horizontom udalostí sa nachádza singularita. Singularitu môžeme charakterizovať ako miesto, bod, kde je nekonečné zakrivenie časopriestoru a nekonečne veľké gravitačné pole.

Časopriestor za horizontom udalostí je charakteristický tým, že sa všetko vnútri pohybuje smerom k singularite. Medzi pôvodným návrhom Johna Michella a relativistickým pojatím čiernej diery sú nezrovnalosti. V Michellovej teórii sa úniková rýchlosť rovnala rýchlosti svetla, avšak bolo stále možné objekt vytriahnuť pomocou lana. Všeobecná relativita toto nepripúšťa, pretože hneď ako sa objekt dostane za horizont udalostí, jeho časová os nadobudne koniec času samotného. Návrat už nie je možný.

Väčšina teoretikov si myslí, že matematické rovnice popisujúce singularitu sú nekompletné a všeobecná teória na ne nestačí. Na to, aby sme plne pochopili singularitu musia do hry vstúpiť nové javy. Avšak vo všeobecnej relativite neexistujú tzv. nahé singularity, čo znamená, že všetky singularity sú schované za horizontom udalostí a nemôžeme ich preskúmať.

Objekty nachádzajúce sa v gravitačnom poli sú vystavené časovej dilatácii, spomaleniu času. Takéto spomaľovanie času je najviac výrazné v blízkosti horizontu udalostí.

Predstaviť si niečo také je veľmi náročné, a preto sa to najbežnejšie vysvetľuje na prípade s kozmonautom. „Predstavme si nešťastného kozmonauta padajúceho nohami napred do stredu nerotujúcej čiernej diery Schwarzschildovho typu. Čím bližšie sa dostane k horizontu udalostí, tým dlhšie trvá fotónom, ktoré vyžaruje, uniknúť gravitačnému poľu čiernej diery. Vzdialený pozorovateľ uvidí kozmonautov spomaľujúci sa zostup pri približovaní sa k horizontu udalostí, ktorý zdanlivo nikdy nedosiahne. Astronaut u vlastného pohľadu prekročí horizont udalostí a dosiahne singularitu v konečnom čase. V momente, kedy prekročí horizont udalostí, ho nebude možné pozorovať z okolitého vesmíru. Behom pádu by si všimol, že svetlo prichádzajúce z jeho chodidiel, potom kolien a tak ďalej podlieha zväčšujúcemu sa červenému posunu svetla, až sa stane neviditeľným. Keď sa priblíži k singularite, gradient gravitačného poľa sa od hlavy k chodidlám značne zväčší. Bude sa cítiť natiahnutý a nakoniec ho roztrhnú slapové sily, pretože v jeho chodidlách bude pôsobiť omnoho väčšia gravitácia než na úrovni hlavy,“ píše Miroslav Jurča vo svojej práci.

Pozorovanie čiernych dier

Ako môžeme pozorovať čiernu dieru, ak sa z nej nemôže dostať von žiadne svetlo? Pri čiernych dierach v podstate nie sú žiadne pozorovateľné vlastnosti, ktoré by nám pomohli pochopiť, čo sa deje v ich vnútri. Je možné popísať len ich hmotnosť, moment hybnosti a elektrický náboj.

Objaviť čiernu dieru vďaka vyžarovanej energii alebo odrazeného svetla od hmoty vnútri, možné nie je. Výskyt však môžeme odhadnúť podľa javov, ktoré sa dejú v jej blízkosti. Sem patria jav gravitačnej šošovky alebo telesá, ktoré zdanlivo obiehajú okolo prázdneho priestoru. (Miroslav Jurča, 2010, s.38) Správanie sa týchto telies bližšie vysvetľuje Stephen Hawking: „Čierna diera stále pôsobí tou istou gravitačnou silou na susediace objekty, akou pôsobilo teleso, ktoré sa zrútilo. Keby bolo Slnko čiernou dierou, a podarilo by sa mu prejsť kolapsom bez straty hmotnosti, planéty by okolo neho obiehali stále tak, ako obiehajú dnes.“

Najlepším spôsobom je však pozorovať hmotu, ktorá do čiernej diery padá. Tá sa sústreďuje a otáča sa okolo čiernej diery, dokým nie je pohltená. Obiehajúca hmota vytvára

akrečný disk, v ktorom sa hmota trie, čo spôsobuje zahrievanie a následnú premenu hmoty na röntgenové a ultrafialové žiarenie. Pri tomto procese sa dokáže premeniť na žiarenie až 50% hmoty. Takéto akrečné disky však nájdeme aj pri neutrónových hviezdach alebo bielych trpaslíkoch. Zamerat' sa čisto na žiarenie z akrečných diskov preto nie je pri hľadaní čiernej diery efektívne, nehľadiac na to, že toto žiarenie nám, že o podstate hviezdy nám toto žiarenie veľa neprezradí. Identifikovať objekt ako je čierna diera, je možné len vtedy, keď sa preukáže, že sa nemôže jednať o iné dostatočne hmotné a kompaktné teleso alebo previazaný systém telies. Jedným z dôležitých pozorovateľných rozdielov medzi čiernymi dierami a kompaktnými objektmi je akákoľvek hmota padajúca do čiernej diery, ktorá vyvolá nepravidelné vzplanutia röntgenového žiarenia alebo iného tvrdého žiarenia.

Hawkingovo žiarenie

„V roku 1975 Stephen Hawking objavil, že čierne diery môžu vyžarovať tepelné žiarenie, dnes známe ako Hawkingovo žiarenie. Hawkingove žiarenie vzniká na horizonte udalostí, ide o kvantovo-mechanický prejav existencie vákua. To však znamená, že čierne diery nie sú tak bezodné priepasti a prebieha u nich pomalé vyparovanie. Tieto efekty sú pre astronomické čierne diery zanedbateľné, ale významné pre hypotetické miniatúrne čierne diery. Predpokladá sa dokonca, že malé čierne diery môžu vďaka vyparovaniu aj po nejakej dobe scela zmiznúť. Týmto pádom má čierna diera aj predpísanú dĺžku života, ktorá je úmerná jej veľkosti.

V roku 1974 Stephen Hawking skúmal, ako by sa hmota mala chovať v blízkosti čiernej diery podľa zákonov kvantovej mechaniky. Kvantová mechanika dovoľuje časticiam uniknúť z čiernej diery, to klasická mechanika zakazovala. Tieto odlišnosti sme schopní pozorovať aj pri tzv. tunelovom jave, kedy sa častica dokáže „pretunelovať“ bariérou, čo podľa klasickej mechaniky nebolo možné. Okolo čiernej diery je hrúbka bariéry úmerná jej rozmerom. Z čiernej diery obrovských rozmerov môže uniknúť len nepatrné množstvo častíc. Naproti tomu z menších čiernych dier môžu uniknúť častice veľmi rýchlo. To dokazujú podrobne výpočty, ktoré vypovedajú o tom, že častice majú termálne spektrum rastúce s klesajúcou hmotnosťou diery,“ píše Miroslav Jurča o Hawkingovom objave.

O Hawkingovom žiarení ďalej píše aj sám Hawking vo svojom diele Vesmír v orechovej škrupinke: „Teplota čiernej diery je daná nasledujúcim vzťahom:

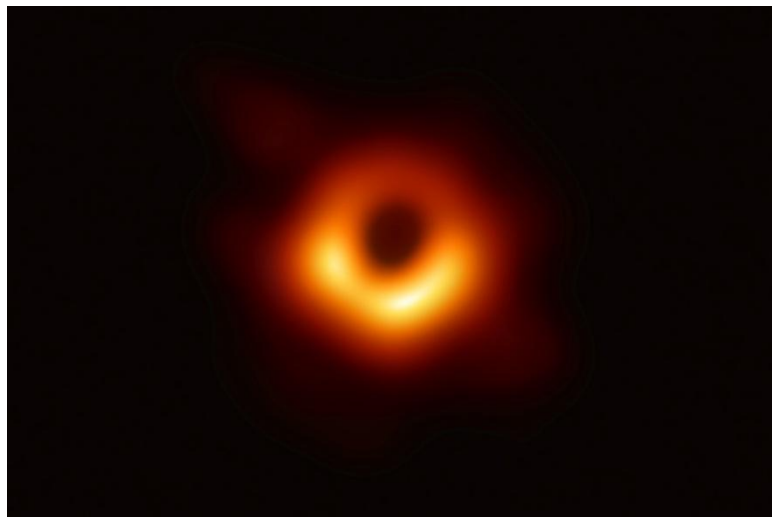
$$T = \frac{\hbar c^2}{8\pi kGM}$$

V tomto vzťahu označuje symbol (c) rýchlosť svetla, (\hbar) Planckovu konštantu, (G) Newtonovu gravitačnú konštantu a (k) Boltzmannovu konštantu. A nakoniec (M) predstavuje hmotnosť čiernej diery. Preto čím je čierna diera menšia, tým je jej teplota vyššia. Tento vzorec nám hovorí, že čierna diera s hmotnosťou niekoľkých Sĺnk, má teplotu iba okolo milióntiny stupňa nad absolútnou nulou.

Čierna diera s hmotnosťou niekoľkých Sĺnk by mala teplotu asi milióntinu stupňa nad absolútnou nulou, a väčšia diera ešte nižšiu. Preto je všetko kvantové žiarenie z takýchto čiernych dier úplne prekryté žiarením s teplotou 2,7 stupňa, ktoré zostalo po horúcom veľkom tresku - žiarením kozmického pozadia, o ktorom sme hovorili v 2. kapitole. Bolo by možné zachytiť žiarenie z omnoho menších a horúcejších čiernych dier, ale nezdá sa, že takých je okolo nás veľa. Škoda. Ak by aspoň jednu niekto objavil, dostal by som Nobelovu cenu.“

Prvá fotografia čiernej diery

10. apríla 2019 sa vedcom podarilo odfotiť prvú fotografiu čiernej diery známej ako M87, ktorá sa nachádza v blízkosti súhvezdia Panny. Táto čierna diera je od našej planéty vzdialená 50 miliónov svetelných rokov a má hmotnosť približne 6,5 miliardy sĺnk.



Fotografia tejto čiernej diery vznikla vďaka projektu Event Horizon Telescope. Spoločne na tomto projekte globálne pracovalo 200 výskumníkov z viacerých observatórií naraz. USA, Mexiko, Havaj, Chile, Španielsko aj s observatóriom na Južnom póle tak vytvorili teleskop veľkosti Zeme a zozbierali 5PB dát pri pozorovaní čiernej diery M87 v roku 2017. Takéto množstvo dát je ekvivalentné 5 000 rokom MP3 nahrávok alebo tiež celoživotná zbierka selfies 40 000 ľudí. Pri tomto množstve dát bolo nevýhodné ich posielat', všetky dáta previezli na HDD loďami. Vedcom trvalo dva roky, kým z množstva dát vytvorili obraz tohto telesa vo vesmíre.

Aj napriek tomu, že v strede našej galaxie sa nachádza čierna diera Sagittarius A*, vedci sa rozhodli obrátiť pozornosť na M87, a to práve kvôli jej veľkosti. Sagittarius A* je oveľa menšia, s hmotnosťou len štyri milióny Slnk. Pre vedcov bolo teda o niečo málo ľahšie zaznamenať masívnejšiu a vzdialenejšiu čiernu dieru.

„Je to ako keby sme sa snažili odfotiť pomaranč na povrchu Mesiaca,“ prezradila pre médiá Katie Bouman, jedna s výskumníkov.

Vďaka horizontu udalostí M87 sa podarilo vedcom vypočítať jej hmotnosť na približne 6,5 miliárd Slnk. Výsledok sedel medzi približné odhady, ktoré boli odvodené pomocou obiehajúcich hviezd. Problémom však je, že tieto hodnoty boli oveľa väčšie ako hmotnostný odhad vypočítaný z pohybu obiehajúceho plynu. Táto technika je jednoduchšia a používa sa častejšie, keď sa vedci snažia „odvážiť“ čiernu dieru. Ak táto metóda nefunguje presne, nastal čas, aby vedci zistili prečo. (Nadia Drake, 2019, nationalgeographic.com)

Záver

Cieľom našej práce bolo v krátkosti zhrnúť fakty o čiernych dierach a rozšíriť tak obzory laikov. Rozoberali sme vlastnosti, vznik a spôsoby pozorovania týchto objektov vo vesmíre. Ďalej sme si vysvetlili prečo čierne diery nie sú úplne čierne. Na konci práce sme tiež zhrnuli najnovší objav z výskumov čiernych dier, fotografiu M87.

Zoznam použitej literatúry

Hawking S., *Vesmír v orechovej škrupinke*, Bratislava 2002, ISBN 80-7145-668-8

Miroslav Jurča, *Bakalářská práce Černé díry*, Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, katedra fyziky 2010

<https://www.nationalgeographic.com/science/2019/04/first-picture-black-hole-revealed-m87-event-horizon-telescope-astrophysics/> - 5.6.2019