

# Gymnázium Mnichovo Hradiště

## Studentská odborná činnost



## Černé díry

XXXXXXXXXXXXXXXXXX

Třída:	xxxxxx
Předmět:	Fyzika
Vedoucí práce:	xxxxxxxxx
Měsíc a rok odevzdání:	xxxxxxxxx

# Abstrakt

*Cílem této studentské práce bylo zpracování poznatků o černých dírách, jejich vzniku, vzhledu i vývoji.*

*Práce se zabývá vznikem a životem hvězd, přičemž se zaměřuje na černé díry. Popisuje vznik, následný vývoj a možnosti zániku černé díry i její vzhled, typy a vlastnosti.*

*Obsahuje i praktickou část, jejíž náplní bylo fotografování oblastí výskytu černých děr.*

## Klíčová slova

*Černá díra, hvězda, Hawkingovo záření, horizont událostí, akreční disk*

Prohlašuji, že jsem práci na téma černé díry vypracovala samostatně pod vedením  
vedoucího práce za použití uvedených pramenů a literatury.

xxxxxxxxxxx

.....

Podpis

## Poděkování

Děkuji panu xxxxxxxxxxxx za odborné vedení mé práce, za rady a připomínky, kterých se mi dostalo .

Děkuji také panu Aleši Majerovi a panu Pavlu Růžičkovi za odbornou pomoc při tvoření praktické části, za to, že jsem se mohla podílet na fotografování několika oblastí výskytu u černých děr, a za poskytnuté rady a informace o astronomii.

Nakonec děkuji panu Filipu Walterovi ze Štáfánikovi hvězdárny v Praze za prohlídku hvězdárny, rady a pomoc s praktickou částí.

# Obsah

Obsah .....	4
1. Úvod .....	5
2. Teoretická část .....	6
2.1. Historie .....	6
2.2. Vývoj černé díry .....	8
2.2.1. Vznik a vývoj hvězdy .....	8
2.2.2. Konečná stadia hvězd .....	11
2.2.2.1. Bílý trpaslík .....	11
2.2.2.2. Neutronová hvězda .....	11
2.2.2.3. Kvarková hvězda .....	12
2.2.2.4. Černá díra .....	12
2.3. Vzhled černých děr .....	13
2.4. Klasifikace černých děr .....	14
2.4.1. Podle velikosti .....	14
2.4.2. Podle vlastností .....	15
2.5. Vlastnosti černých děr .....	16
2.5.1. Schwarzschildův poloměr a střední hustota .....	16
2.5.2. Černá díra nemá vlasy .....	16
2.5.3. Termodynamika .....	17
2.6. Zánik černé díry .....	17
2.6.1. Hawkingovo záření .....	17
2.6.2. Srážka dvou černých děr .....	19
2.7. Pozorování černých děr .....	19
3. Praktická část .....	20
4. Závěr .....	22
Seznam literatury .....	23
Internetové zdroje .....	23
Seznam obrázků .....	23
Zdroje obrázků .....	24

# 1. Úvod

My, lidé, jsme odjakživa zvědaví tvorové. Jen málo co nám unikne a málo co nás odradí, od toho, abychom porozuměli tomu, co jsme dosud nepochopili. Vždy nás zajímalo vše kolem nás. Jak věci fungují, proč tak fungují nebo kde se vzaly. Známe neskutečně mnoho věcí. Už v dávných dobách jsme se naučili získané poznání i zkušenosti pečlivě uchovávat a předávat. Přesto je mnoho věcí, které jsme dosud neobjevili, nerozluštili a jsou nám stále záhadou, nebo vůbec o nich ještě nevíme, ačkoliv si někdy myslíme, že už známe všechno. Touha všechno znát a všemu rozumět nás žene stále dál a dál. Máme zmapovanou celou naši planetu. Známe téměř všechny rostliny a živočichy, kteří Zemi obývají. Víme, jaké počasí bude zítra a co si vzít s sebou na druhou stranu světa. Žijeme v době informací, ať už si to uvědomujeme a ceníme si toho, nebo ne.

Stále velkou záhadou je nám to, co se skrývá okolo našeho domova – Země. Jistě toho už známe o vesmíru mnoho, ale stále je nám daleko více neznámého. Tajemství vesmíru odjakživa skýtá obrovský prostor pro fantazii. Je to ráj pro všechny snílky a nepochybně i pro spisovatele vědecko-fantastické literatury. Kosmické lodě, jiné vesmírné kultury, sousední galaxie, vesmírné války a mnoho a mnoho dalšího.

Leckdo by si mohl pomyslet, že černá díra je právě jedním z výplodů fantazie nějakého spisovatele sci-fi. Je to jeden z nejpodivnějších objektů ve vesmíru. Vymyká se všem pravidlům a zákonům. Možná právě proto je středem pozornosti mnoha vědců, spisovatelů, snílků a teď i mě.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Historie

Ačkoliv by se mohlo zdát, že černé díry jsou ve světě vědy záležitostí posledních let, ve skutečnosti historie pozorování těchto záhadných vesmírných objektů je celkem dlouhá a zajímavá. Černá díra nebyla dosud spatřena a podle obecné teorie relativity to ani není možné, přesto první myšlenky o její možné existenci se objevily už na konci 18. století, kdy ovšem šlo ještě o myšlenku klasické fyziky, tedy newtonovské gravitace a světla jako částice, a od té dnešní představy se poněkud liší.

V roce 1783 anglický geolog John Michell předpověděl existenci hvězdy natolik vysoké hustoty, aby její úniková rychlost přesáhla rychlost světla ve vakuu, tedy nejvyšší dosažitelnou rychlost ve vesmíru. Toto těleso nazval temná hvězda a jeho minimální hmotnost odhadl na 500 Sluncí.

O několik let později podpořil Michellovu myšlenku francouzský matematik Pierre-Simon Laplace. Avšak ani tehdy tato teorie nevzbudila velký zájem.

Až v roce 1915, když přišel Albert Einstein s obecnou teorií relativity, dostala myšlenka existence černých děr novou naději. Netrvalo ani rok a německý fyzik Karl Schwarzschild dokázal, že černé díry mohou existovat.

V roce 1928 indický student Subrahmanyan Chandrasekhar cestoval do Anglie, aby mohl studovat u anglického fyzika sira Arthura Eddingtona. Během cesty vypočítal, jak velká může být hvězda, aby zvládla překonat gravitaci i poté, co spotřebuje všechno své palivo a setrvala ve stabilní formě bílého trpaslíka. Tato hodnota je dodnes známá pod pojmem Chandrasekharova mez. Když dorazil do Anglie, setkal se se sirem Eddingtonem. Eddington nebyl myšlenky existence černých děr příznivě nakloněn, a proto Chandrasekharovu teorii odmítl uznat. Chandrasekhar proto od této práce upustil. Avšak v roce 1983 získal za tuto práci Nobelovu cenu.

Mezi vědce, kteří se podíleli na dnešní představě černých děr také patří americký teoretický fyzik Julius Oppenheimer. Spolu se svým studentem Georgem Volkoffem na základě předchozí práce Richarda Tolmena objevili obdobu

Chandrasekharovy meze pro neutronovou hvězdu, tzv. Tolmanovu-Oppenheimerovu-Volkoffovu mez. Oppenheimer také popsal horizont událostí a je spoluautorem Oppenheimerova-Snyderova paradoxu.

V průběhu druhé světové války k téměř žádným pokrokům v astronomii nedocházelo. Veškerá pozornost se obracela k válečnému výzkumu. Věda se soustředila na výrobu zbraní jako například atomové bomby nebo termionukleární pumy.

John Wheeler se přímo černými děrami nezabýval, ale právě on poprvé použil výraz černá díra (kterým chtěl poukázat na její vlastnosti) a od něj pochází i pojmenování „no hair theorem“ (černá díra nemá vlasy). Sám se zabýval obecnou teorií relativity a jejím propojením s kvantovou fyzikou.

Charles Tones objevil galaktickou černou díru uprostřed naší galaxie, což zanedlouho potvrdil Hubbleův teleskop. Ukázalo se, že galaktické černé díry se nachází uprostřed většiny galaxií.

Jeden z nejvýznamnějších vědců zabývajících se problematikou černých děr byl bezesporu Stephen Hawking. Podílel se na vzniku teorému Černá díra nemá vlasy a objevil, že plocha horizontu událostí se nezmenšuje. Pomocí aplikování kvantové mechaniky na zkoumání černých děr objevil kvantově mechanické vypařování černých děr, které je známé jako Hawkingovo záření.



## 2.2. Vývoj černé díry

Černá díra může vznikat různými způsoby. Nejčastěji vzniká jako konečné stádium hvězdy. Proto k pochopení černých děr neodmyslitelně patří i znalost životního cyklu hvězd.

### 2.2.1. Vznik a vývoj hvězdy

Hvězdy vznikají v chladných a hustých mlhovinách tvořených především prachovými částicemi (nízká teplota je udržována díky tomu, že přebytečné teplo je vyzářeno do prostoru), molekulami nebo atomy vodíku, helia a dalších prvků. Nejčastěji se mlhoviny vyskytují nedaleko ramen spirálních galaxií a zpravidla obsahují více než polovinu mezihvězdné látky celé galaxie. Obvykle vzniká více hvězd najednou.



**Obrázek 1:** *Krabí mlhovina*

Aby došlo ke vzniku hvězdy, musí být velikost mlhoviny větší než mez daná Jeansovým kritériem (výjimkou jsou mlhoviny, kde se vyskytuje magnetické pole), pro představu, hvězda o velikosti Slunce by potřebovala ke svému vzniku mlhovinu o velikosti stokrát větší, než je Sluneční soustava. Dále musí dojít ke gravitačnímu působení narušujícímu dosud trávající rovnováhu, které způsobí gravitační kolaps. Gravitačním působením zpravidla bývá exploze supernovy, přechod mlhoviny přes spirální ramena galaxie, elektromagnetické síly nebo srážka dvou galaxií.

Gravitační kolaps je „proces, při němž gravitační síla převládá nad všemi ostatními silami a nutí jednotlivé částice k pohybu téměř volným pádem směrem k těžišti“ (1), během tohoto procesu dochází k adiabatickému stlačování (růst teploty, hustoty a tlaku).

Právě nárůst teploty způsobuje zpomalení smršťování oblaku. Následkem gravitačního kolapsu vzniká útvar rotujícího disku a uvnitř se vytváří žhavá koule, kde teplota stále narůstá. Tento objekt se nazývá protohvězda. Ve chvíli, kdy teplota dosáhne  $10^7$  K, kinetická energie jader začne překonávat odpudivou bariéru, čímž dochází k zapálení termonukleární fúze. Od této chvíle se objekt nazývá již hvězdou.

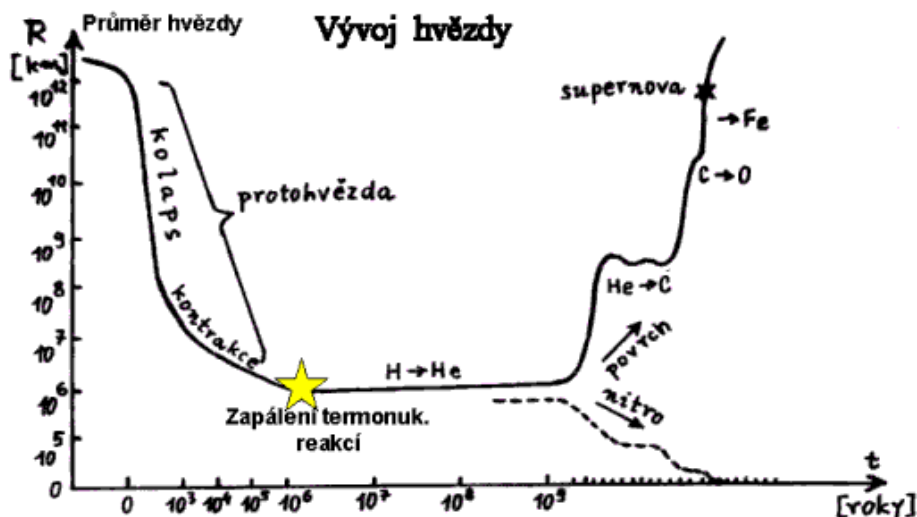
V této chvíli se jádra vodíku syntetizují na helium a uvolňuje se velké množství vazebné energie, celá soustava se nachází v hydrodynamické a tepelné rovnováze. Tato fáze se nazývá hlavní sekvence, je to nejdelší životní období hvězdy. Kontrakce hvězdy se zpomalují, protože tlak rozžhaveného plynu začíná vyrovnávat gravitační sílu. Na  $10^6$  až  $10^{10}$  let se smršťování hvězdy za normálních podmínek ustaluje. Většina pozorovaných hvězd se nachází právě v této fázi, ale každá hvězda je trochu jiná. Liší se především velikostí a teplotou. Teplota ovlivňuje vlnovou délku světla – čím menší vlnová délka je, tím vyšších teplot hvězda dosahuje. Proto chladnější hvězdy vidíme červeně, méně chladné žlutě a ty s nejvyššími teplotami zeleně až modře. Teplota povrchu Slunce dosahuje 5 800 K a vyzařuje světlo o vlnové délce cca 580 nm. Nejběžnějším typem hvězdy je rudý trpaslík, jeho hmotnost se pohybuje od desetiny do poloviny hmotnosti našeho Slunce a má teplotu menší než 4000 K. Běžným pozorováním je spatřit nelze, protože jsou příliš málo jasné. Patří mezi nejdéle žijící hvězdy. Velikost hvězdy ovlivňuje délku jejího života a konečné stadium jejího vývoje.

Jak dlouho setrvá hvězda v rovnováze, závisí na její velikosti. Hmotnější hvězdy spotřebují termonukleární fúzi více energie než ty méně hmotné, proto hmotnější hvězdy žijí daleko kratší dobu. Délka života hvězd se liší od milionů let až po miliardy. Některé dostatečně malé hvězdy vzniklé krátce po vzniku vesmíru stále ještě nedošly do konečné fáze hvězd. Žádná hvězda ale nemůže existovat věčně.

Po vyčerpání zásob vodíku se jádro hvězdy gravitačním působením začíná opět smršťovat, zatímco termonukleární fúze se přesunuje do části kolem jádra a energie fúze způsobí expanzi vnějšího obalu hvězdy. Velikost hvězdy vzroste a teplota vnějších vrstev výrazně klesne, proto vlnová délka vyzařovaného světla se prodlouží až k červeným odstínům a tomuto objektu se říká červený obr.

Teplota jádra se stále zvyšuje a postupně se termonukleární fúze přesouvá dál od jádra, kde se zapalují fúze nových prvků. Postupně vznikají fúze kyslíku, neonu, hořčíku, křemíku, vápníku, chromu a nakonec železa. Tento řetězec končí železem, které má nejvyšší vazebnou energii. Pro fúzi dalších prvků, by se musela energie naopak dodávat.

Poté, co hvězdě dojde palivo, dochází k výbuchu supernovy. V této fázi vznikají prvky těžší než železo, jelikož při výbuchu supernovy se velké množství energie uvolňuje. Prvky syntetizované hvězdou jsou vyvrhovány do vesmíru, kde se mísí s mezihvězdnou hmotou. Hvězda se proto často přirovnává k chemické továrně vesmíru. Tímto končí nejdelší životní období hvězdy a následují její konečné fáze vývoje.



Obrázek 2: Průměr hvězdy v závislosti na jejím stáří

### 2.2.2. Konečná stadia hvězd

Když hvězda spotřebuje všechno své palivo, jaderná fúze přestává probíhat. Gravitační síla začne převládat nad mizející silou pocházející z energie tvořené jadernou fúzí, která dosud vyrovnávala gravitační sílu. Další vývoj je pak závislý na hmotnosti samotné hvězdy, stává se bílým trpaslíkem, neutronovou hvězdou, nebo černou dírou.

#### 2.2.2.1. Bílý trpaslík

Hvězda o hmotnosti menší, než je stanovena Chandrasekharovou mezí rovnající se zhruba 1,44 hmotnosti Slunce, se stává bílým trpaslíkem. Pokud se bílým trpaslíkem stane hvězda přesahující Chandrasekharovu mez, je nestabilní a může dojít k explozi supernovy. Bílý trpaslík má poloměr v rozmezí 10 000 až 30 000 km, hustotu  $10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-3}$  a teplotu povrchu 8 000 - 40 000 K. Je to velmi husté těleso, které by se dalo hmotností přirovnat k Slunci a velikostí k Zemi. Bílým trpaslíkem se stává většina hvězd, vědci předpokládají, že se i Slunce za 5-7 miliard let stane bílým trpaslíkem.

Bílý trpaslík vzniká, pokud gravitační hroucení hvězdy, které došlo palivo, se zastavuje vlivem příliš stlačené látky. Atomy se uvnitř nachází v tak těsné blízkosti, že jejich elektronové obaly se prolínají a elektrony pak mohou volně přecházet mezi jednotlivými obaly. Tak vzniká elektronový degenerovaný plyn. Teplota získaná při gravitačním hroucení způsobuje záření bílého trpaslíka. Zářením ztrácí svoji energii a chladne až biliony let, jeho jádro postupně krystalizuje. Nakonec vyčerpá svoji energii, přestává zářit a stává se černým trpaslíkem.

#### 2.2.2.2. Neutronová hvězda

Pokud se původní hmotnost hvězdy pohybuje v rozsahu 1,44 až 8 hmotností Slunce, pravděpodobně se z ní stane neutronová hvězda. Jako u bílého trpaslíka její vznik začíná smršťováním způsobeným gravitací, ale po nějaké době nastává extrémně rychlý kolaps způsobený nestabilitami, kdy se jádro smršťuje daleko rychleji než vnější vrstvy. V jádře je vzniklý elektronový degenerovaný plyn vlivem obrovského tlaku způsobeného rychlým smršťováním vtlačován do jader atomů,

kde elektrony reagují s protony a vznikají neutrony a neutrina. Smršťování jádra se zpomaluje a jádro hvězdy se stává extrémně tvrdým. Vrstvy kolem jádra hvězdy naráží rychlostí 25% rychlosti světla na tvrdé jádro a odráží se od něj v podobě rázové vlny. Vnější vrstvy vlivem rázové vlny vybuchují jako supernova, po výbuchu vnější vrstvy postupně chladnou a stávají se mlhovinou.

Velikost neutronových hvězd se pohybuje v řádech několika kilometrů, nejčastěji v rozmezí 20 až 50 km. Jejich hustota je srovnatelná s hustotou atomového jádra, která je cca  $10^{10} \text{ kg.cm}^{-3}$ . Neutronové hvězdy se také vyznačují nejsilnějším známým magnetickým polem dosahujícím  $10^6 - 10^9 \text{ T}$  a rychlou rotací. Nejčastějším typem neutronové hvězdy ve vesmíru je pulsar. Je to neutronová hvězda, jejíž směr rotační osy a magnetické osy se neshoduje, a proto dochází k výtryskům světelného záření a nabitých částic ve směru magnetické osy.

#### 2.2.2.3. Kvarková hvězda

Pokud nezastaví gravitační kolaps elektronový plyn ani neutrony a neutrina, je teoreticky možné, že by gravitační kolaps mohl být zastaven kvarky, a tak by vznikla kvarková hvězda. Její existence nebyla dosud dokázána, je jen teoretická.

#### 2.2.2.4. Černá díra

Poslední známé konečné stadium vývoje hvězdy je černá díra, která vzniká z hvězd hmotnějších než 8–10 hmotností Slunce. Vzniká podobně jako neutronová hvězda, avšak gravitační kolaps nic nezastaví. Pokud poloměr smršťující se hvězdy překročí hodnotu Schwarzschildova poloměru, neexistuje již stabilní řešení, protože neexistuje síla, která by vyrovnala gravitační sílu. Vnější vrstvy explodují a hvězda vybuchuje jako supernova, nebo jako hypernova. Vytvoří se horizont událostí, za kterým se časoprostor vlivem stoupající hustoty zakříví natolik, že úniková rychlost bude větší než rychlost světla a dojde k vytvoření singularity. „Singularita je místo, u něhož křivost časoprostoru a další charakteristiky nekonečně narůstají.“ (2)

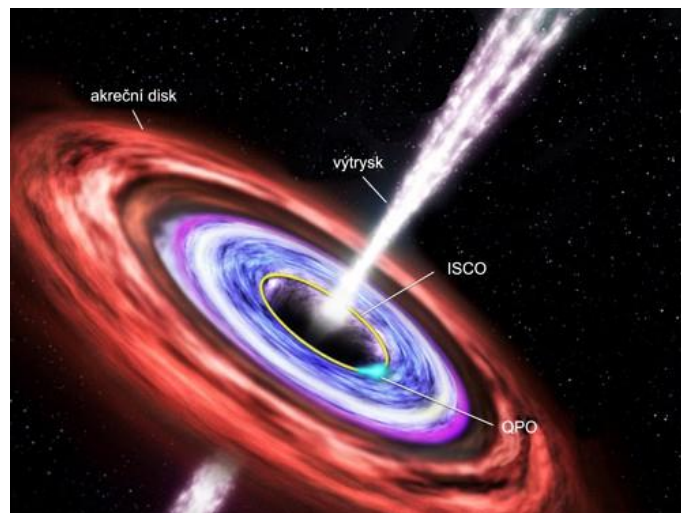
Druhým způsobem vzniku černé díry je postupná kumulace hmoty. Hmotnost a hustota kumulované hmoty stále narůstá do doby, kdy se časoprostor zakříví

natolik, že vznikne horizont událostí a úniková rychlost překročí rychlost světla ve vakuu.

Černé díry by také mohly vzniknout srážkou dvou neutronových hvězd, nebylo to však nikdy pozorováno.

### 2.3. Vzhled černých děr

Černá díra svou vysokou hustotou zakřivuje prostoročas natolik, že její úniková rychlost přesahuje rychlost světla, podle obecné teorie relativity nejvyšší možnou rychlost, které lze ve vesmíru dosáhnout. Vnitřek černé díry tedy není možné spatřit.



*Obrázek 3: Popis černé díry*

V centru černé díry se nachází gravitační singularita, místo s nekonečně malými rozměry a nekonečně velkou hustotou, avšak s konečnou hmotností. Podle principu kosmické cenzury singularitu nemůžeme nikdy spatřit, protože by měla být vždy obklopena horizontem událostí.

Horizont událostí neboli Schwarzschildův poloměr ( $r_g$ ) je hranice černé díry (2). Jelikož úniková rychlost se zde rovná konečné rychlosti světla, vše vyskytující se za horizontem událostí se nemůže vrátit zpět.

Okolí černých děr patří k nejzářivějším objektům ve vesmíru. Vlivem velkého zakřivení časoprostoru a tedy velkou gravitační silou se kolem černé díry hromadí rotující oblak plynu a prachu, který se vlastním třením zahřívá a září. Část tohoto oblaku je gravitací strhávána ke středu do tzv. akrečního disku, kde teplota roste, plyn se ionizuje, a tak se stává plazmou. Hmota akrečního disku září v celém oboru spektra a rotuje rychlostí okolo  $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na vnitřním okraji akrečního disku se nachází vnitřní stabilní dráha (ISCO – innermost stable circular orbit), je to poslední stabilní dráha o poloměru  $3r_g$ , kde částice mohou obíhat černou díru bez rizika zřícení se do ní. Pokud částice překročí tuto hranici, už se nemůže vrátit zpět a končí v černé díře.

Nabitě částice plazmatu vytváří velice silné, ale neuspořádané magnetické pole. Jednotlivá pole se mezi sebou přepojují, a v důsledku toho vznikají kvazi-periodické oscilace, které pozorujeme jako záblesky šířící se téměř rychlostí světla dvěma směry na velké vzdálenosti.

## 2.4. Klasifikace černých děr

Černé díry se rozlišují podle dvou hledisek. A to buď podle velikosti, nebo podle vlastností.

### 2.4.1. Podle velikosti

Nejčastějším typem černých děr ve vesmíru jsou **hvězdné** nebo také nazývané stelární černé díry. Vznikají jako konečná stadia velmi hmotných hvězd a dosahují 10 až 100 hmotností Slunce. Je to první zaznamenaný typ černých děr.

Dalším typem jsou **galaktické černé díry** (veledíry, obří černé díry, masivní černé díry). Dosahují od 100 000 po biliony hmotností Slunce a nacházejí se v téměř každém jádru galaxie nebo kvasaru, černá díra v jádru naší Galaxie se nazývá Sagittarius A\*. Dosud se neví, jestli dříve vznikaly galaxie, nebo galaktické černé díry v jejich jádrech. Pravděpodobně mají mnohokrát menší hustotu než hvězdné černé díry.

Třetím typem jsou **černé díry středních hmotností**, které dlouhou dobu nebyly pozorovány. Jejich hmotnosti se pohybují mezi 100 a 100 000 hmotnostmi Slunce. Pravděpodobně vznikají slučováním hvězdných černých děr.

Posledním typem jsou **primordiální černé díry**, jejichž existence nebyla doposud dokázána. Pravděpodobně vznikaly v rané fázi vesmíru, kdy látka byla ještě velmi horká a hustá. Buď nějaký impulz, nebo lokální zhušťování mohlo způsobovat vznik malých černých děr velikosti elementárních částic a hmotnosti srovnatelné s horou.

#### 2.4.2. Podle vlastností

Podle teorému přezdívanému „černá díra nemá vlasy“ (z anglického no hair theorem) lze černou díru charakterizovat třemi veličinami, a to hmotností  $M$ , momentem hybnosti  $L$  a elektrickým nábojem  $Q$ . Všechny ostatní vlastnosti po průchodu tělesa horizontem událostí mizí.

Prvním a nejjednodušším typem je **Schwarzschildova černá díra**, nerotující a nenabitá, charakterizovaná jen svou hmotností, tedy s nulovým momentem hybnosti a nulovým nábojem

**Kerrova černá díra** je rotující, ale nenabitá, tedy s nulovým nábojem. Vzniká z rotujícího, nenabitého tělesa.

**Reisnerova-Nordströмова černá díra** je nerotující, nabitá černá díra, která vyplývá z řešení Einsteinových rovnic, ale předpokládá se, že ve vesmíru neexistuje.

**Kerrova-Newmanova černá díra** je charakterizována všemi třemi veličinami. Jako rotující, nabitá a hmotná černá díra je nejčastěji pozorovaná černá díra ve vesmíru.



## 2.5. Vlastnosti černých děr

### 2.5.1. Schwarzschildův poloměr a střední hustota

Schwarzschildův poloměr je hranice černé díry, kterou odvodil Karl Schwarzschild z Einsteinových rovnic na konci 18. století. Ale už na konci 18. století stejný vztah odvodil S. Laplace z klasické fyziky na základě únikové rychlosti. Tento vztah je definován jako:

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

kde  $r_g$  je Schwarzschildův poloměr (nebo také gravitační poloměr),  $G$  je gravitační konstanta,  $M$  je hmotnost hvězdy a  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Střední hustota Schwarzschildova poloměru s rostoucím Schwarzschildovým poloměrem klesá, těžší galaktické díry mají dokonce hustotu srovnatelnou s vodou, nebo i menší. Je definována jako:

$$\rho = \frac{c^3}{32\pi M^2 G^3}$$

Kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $M$  je hmotnost hmoty za Schwarzschildovým poloměrem a  $G$  je gravitační konstanta.

### 2.5.2. Černá díra nemá vlasy

Černá díra nemá vlasy (z anglického no hair theorem) je teorém popisující skutečnost, že jediné shodné veličiny černé díry s původním tělesem, ze kterého vznikla, jsou hmotnost, moment hybnosti (určující rotaci) a elektrický náboj. Z tohoto teorému vyplývá, že určitá černá díra mohla vzniknout z nekonečného množství variant objektů, jelikož ostatní veličiny jako tvar, velikost nebo magnetické pole zanikají.

### 2.5.3. Termodynamika

Termodynamické zákony v jistém tvaru platí i pro černé díry. Plocha horizontu událostí s časem vždy narůstá a plocha horizontu se nikdy nezmenšuje. Buď je neměnná, nebo se vlivem pohlcování vnější hmoty zvětšuje. Pokud splynou dvě černé díry v jednu, nová černá díra bude mít buď stejnou, nebo větší plochu horizontu.

Podle holografického principu, který říká, že všechny vlastnosti látky uvnitř černé díry jsou dány vlastnostmi na povrchu, můžeme podle povrchu horizontu událostí určit entropii černé díry, podle vztahu:

$$S = \frac{\pi A k c^3}{2 h G}$$

S je entropie systému, A je plocha horizontu událostí, k je Boltzmanova konstanta ( $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ), c je rychlost světla ve vakuu ( $c = 299\ 792\ 458 \text{ m.s}^{-1}$ ), h je Planckova konstanta ( $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J.S}$ ) a G je gravitační konstanta ( $6,672\ 59 \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ ).

Protože černá díra má určitou hodnotu entropie, přiřazuje se jí tzv. Bekensteinova teplota, jelikož s rostoucí entropií systému se mění její energie daná teplotou. Bekensteinova teplota  $T_0$  je dána:

$$T_0 = \frac{hc}{k r_g}$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu, k je Boltzmanova konstanta a  $r_g$  je Schwarzschildův poloměr.

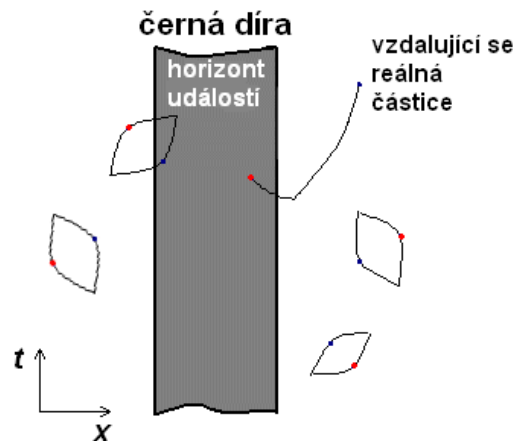
## 2.6. Zánik černé díry

### 2.6.1. Hawkingovo záření

Dlouhou dobu přetrvávala představa, že černá díra vše pouze pohlcuje a nic z ní nemůže uniknout. Avšak na základě kvantové teorie pole, Bekensteinovy teploty a myšlenky, že každé těleso o nenulové teplotě září, zjistil Stephen Hawking,

že černá díra není úplně černá, a přišel s teorií, že určité záření, dnes známé jako Hawkingovo záření, také vydává.

Na Hawkingovo záření se nahlíží dvěma různými způsoby. První je z pohledu kreace a anihilace virtuálních částic (**Obrázek 4**), kdy záření vzniká vně černé díry tak, že z částice blízko horizontu událostí vznikne na krátký časový úsek podle Heisenbergova principu neurčitosti virtuální pár částice a antičástice (částice má kladnou hmotnost, antičástice zápornou, aby jejich součet byl nulový). Než dojde k jejich anihilaci (spojení), antičástice je přitahována černou dírou a dostává se za horizont událostí. Protože má zápornou hmotnost, černá díra se tak zmenšuje, zatímco částice s kladnou hmotností se vzdaluje od černé díry jako Hawkingovo záření.



**Obrázek 4:** Hawkingovo záření - kreace a anihilace virtuálních párů částic

Druhý způsob chápání Hawkingova záření je z pohledu tunelového jevu. Jelikož jde o částici tepelného záření, která nenesení informaci, může vzácně překonat bariéru, konkrétně horizont událostí, aniž by k tomu měla dostatečnou energii.

Se zmenšujícím se Schwarzschildovým poloměrem se Hawkingovo záření a Bekensteinova teplota zvětšují. Čím je tedy černá díra menší, tím víc září a rychleji se zmenšuje. Proto jeden ze způsobů zániku černých děr by mohl být způsoben Hawkingovým zářením, ale jde o tak pomalý proces, že průměrná hvězdná černá

díra by se odpařila asi za  $10^{66}$  let. Po odpaření černé díry se předpokládá její konec v podobě supernovy.

### 2.6.2. Srážka dvou černých děr

Druhým způsobem zániku černé díry je srážka dvou černých děr, které podle obecné teorie relativity vyzařují gravitační vlny, kterými na sebe působí, a postupně se k sobě přibližují. Nakonec dochází ke spojení jejich horizontu událostí, kdy ztrácí obrovské množství energie v podobě vyzářených gravitačních vln. Povrch nově vzniklé černé díry musí být větší, nebo roven součtu povrchů dvou právě zaniklých černých děr.

## 2.7. Pozorování černých děr

Z černé díry nemohou uniknout žádné informace, proto černou díru lze pozorovat pouze nepřímo, a to například podle záření hmoty, kterou pohlcuje (akreční disk) nebo i díky jevům vzniklým jejím působením na blízké okolí. Mezi takové jevy patří gravitační čočkování (kdy černá díra zakřivuje prostoročas, přičemž na procházející světelné paprsky působí jako gravitační čočka) a hvězdy obíhající zdánlivě kolem ničeho.

Nejsnadnější způsob je pozorování akrečního disku, který září velmi intenzivně v rentgenovém a infračerveném oboru. Při tomto procesu se na záření přemění až polovina hmoty akrečního disku. V rentgenovém oboru lze pozorovat i kvaziperiodické oscilace.

### 3. Praktická část

V rámci této studentské odborné práce jsem navštívila Štefánikovu hvězdárnu v Praze a Městskou hvězdárnu v Turnově. Absolvovala jsem prohlídku obou hvězdáren.

Dne 15. února jsem se zúčastnila na hvězdárně v Turnově focení oblastí černých děr s panem Alešem Majerem a Pavlem Růžičkou. Pomocí dalekohledu a kamery (viz tabulka 1) jsme fotili jádra galaxií s výskytem supermasivních černých děr.

Zařízení	Typ
Dalekohled	ORION VX12 300/1200
Kamera	ZWO ASI294mc pro
Montáž	SkyWatcher EQ6R

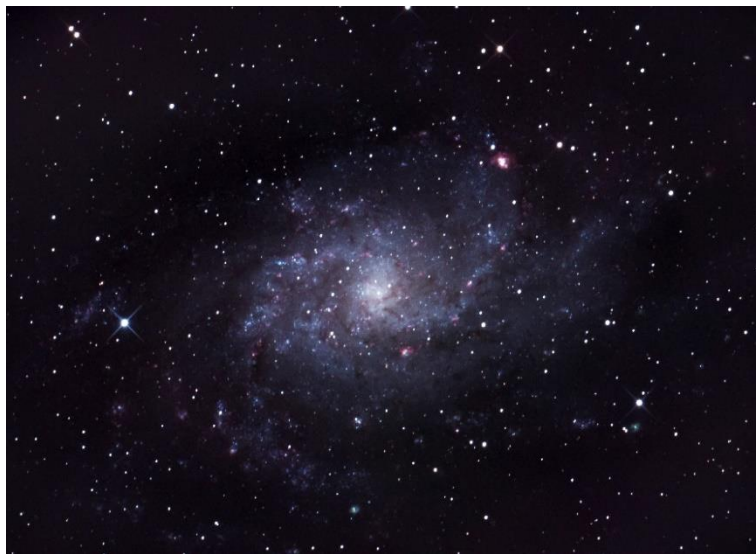
*Tabulka 1: Technické údaje použitých zařízení*

Podařilo se nám vyfotografovat galaxii M31 (Messier31), je to spirální galaxie v souhvězdí Andromedy vzdálená od Země asi 2,5 milionu světelných let. V jádru této galaxie se nachází galaktická černá (**Obrázek 5**), jejíž hmotnost se odhaduje na 230 milionů hmotností Slunce. Kromě galaktické černé díry bylo v této galaxii objeveno i dvacet šest hvězdných černých děr. Na levém okraji snímku je patrná galaxie M32.



***Obrázek 5:** M31 v Andromedě, autor: Pavel Růžička*

Druhá pořízená fotografie zachycuje galaxii M33 v souhvězdí Trojúhelníku (**Obrázek 6**). Jedná se o spirální galaxii vzdálenou asi 3 miliony světelných let od Země.



***Obrázek 6:** M33 v Trojúhelníku, autor: Pavel Růžička*

## 4. Závěr

Cílem této práce bylo studium problematiky černých děr, následné zpracování získaných informací a také fotografování oblastí výskytu černých děr.

V rámci teoretické části jsem získala mnoho informací týkajících se vývoje hvězd a především černých děr. Zabývala jsem se vznikem, vzhledem a vlastnostmi černých děr, ale i jejich typy a pozorování.

V oblasti výzkumu černých děr přibývají stále nové objevy, proto zanedlouho můžou být informace v této práci zastaralé.

## Seznam literatury

1. **Ullmann, Vojtěch.** *Gravitace, černé díry a fyzika časoprostoru.* Ostrava : pobočka Čs. astronomické společ. ČSAV, 1986.
2. **Hawking, Stephen.** *Stručná historie času.* Praha : Argo, 2007. ISBN 978-80-257-1527-7..
3. **Mikulášek Zdeněk, Krtička Jiří.** *Základy fyziky hvězd.* 2005.
4. **Hawking, Stephen.** *Černé díry: Reithův cyklus přednášek pro BBC.* místo neznámé : Dokořán, 2017. ISBN 978-80-257-2057-8.

## Internetové zdroje

1. <https://www.aldebaran.cz/>
2. <http://astronomia.zcu.cz/>
3. <https://www.stoplusjednicka.cz/>
4. <http://www.osel.cz/>
5. <http://www.geneze.info/>

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> Krabí mlhovina .....	8
<b>Obrázek 2:</b> Průměr hvězdy v závislosti na jejím stáří .....	10
<b>Obrázek 3:</b> Popis černé díry .....	13
<b>Obrázek 4:</b> Hawkingovo záření - kreace a anihilace virtuálních párů částic.....	18
<b>Obrázek 5:</b> M31 v Andromedě, autor: Pavel Růžička .....	21
<b>Obrázek 6:</b> M33 v Trojúhelníku, autor: Pavel Růžička.....	21



## Zdroje obrázků

1. [https://www.stoplusjednicka.cz/sites/default/files/styles/full/public/obrazky/2019/01/crab\\_nebula.jpg?itok=rkuBSdNM](https://www.stoplusjednicka.cz/sites/default/files/styles/full/public/obrazky/2019/01/crab_nebula.jpg?itok=rkuBSdNM)
2. <http://astronuklfyzika.cz/KosmickaAlchymie.htm>
3. [https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/black\\_holes.php](https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/black_holes.php)
4. [http://hvezdy.astro.cz/obr/hvezdy/dira/05\\_hawking\\_rad\\_e.png](http://hvezdy.astro.cz/obr/hvezdy/dira/05_hawking_rad_e.png)