

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
PEDAGOGICKÁ FAKULTA
KATEDRA FYZIKY



ČERNÉ DÍRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: RNDr. Petr Jelínek, Ph.D.

Autor: Miroslav Jurča

Anotace:

Cílem práce je rešerše poznatků o konečných stádiích vývoje hvězd různých hmotností se zvláštním zaměřením na velmi hmotné hvězdy.

Popisuje Vesmír od Velkého třesku, přes vznik protonů a neutronů po vznik hvězd a jejich konečná stádia. Zvláště je kladen důraz na velmi hmotné hvězdy, které se hroutí pod tíhou vlastní gravitace do sebe až pod horizont událostí a ze kterých tak mohou vzniknout černé díry. Práce také popisuje i možné detekce černých děr a gravitačních vln, které vznikají při vzájemném pohybu těles v gravitačním poli.

Abstract:

The main aim of this bachelor thesis is to summarize the knowledge about the final phases of stellar evolution with a diferent masses especially to a very massive stars.

We describe the Universe since the Big Bang, the formation of protons and neutrons, forming the stars and their final phases. In particular, we emphasise to a very massive stars which collapses itself, under their own gravity to the event horizon and may become the black holes. This work also describes the possible detection of black holes and gravitational waves, generated by the relative motion of very massive stars in a gravitational field.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. V seznamu literatury jsem uvedl všechny použité literární a odborné zdroje.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě, fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

České Budějovice, 28.04.2010

.....
Miroslav Jurča

Poděkování:

Děkuji panu RNDr. Petru Jelínkovi, Ph.D, za velmi užitečnou metodickou a odbornou pomoc, kterou mi poskytl při zpracování této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Vznik vesmíru.....	7
2.1 Hubbleův zákon.....	8
3. Vznik hvězd.....	10
4. Stádia hvězd.....	16
4.1 Červení obři.....	17
4.2 Bílý trpaslík.....	19
4.3 Supernova.....	20
4.3.1 Typ Ia.....	23
4.3.2 Typ Ib a Ic.....	23
4.3.3 Typ II.....	24
4.4 Neutronová hvězda.....	27
4.5 Černá díra.....	29
5. Černé díry.....	31
5.1 Klasifikace černých děr.....	33
5.2 Singularita.....	34
5.3 Detekce černých děr.....	35
5.4 Pozorování černých děr.....	38
5.5 Gravitační srážka dvou černých děr.....	41
5.6 Detekce gravitačních vln.....	42
5.7 Detektory gravitačních vln.....	43
5.8 Zánik černých děr.....	49
6. Závěr.....	50
7. Seznam literatury.....	51
8. Seznam obrázků.....	52
9. Seznam tabulek.....	53

1. Úvod

Podle encyklopedií je kosmologie naukou o světě, avšak platí, že se jedná o vědu, která se zabývá vesmírem jako celkem. Vysvětluje vznik Vesmíru, popisuje jeho vývoj, ale i možné scénáře jeho zániku.

Problém počátku Vesmíru se podobá prastaré otázce, byla-li dříve slepice, nebo vejce. Jinými slovy – jaké jsoucno stvořilo Vesmír a kdo naopak stvořil toto jsoucno. Možná, že Vesmír existoval odjakživa, nebo odjakživa existovalo jsoucno, které jej stvořilo [1].

Prvotní poznatky o Vesmíru, které byly základem pro studium sluneční soustavy, přišly díky pozorovací technice té doby. Už v 16. století astronom Mikuláš Koperník a Johannes Kepler vyvrátili tzv. geocentrickou soustavu, u které se lidé domnívali, že Slunce obíhá kolem Země a prokázali opak.

Je to touha po poznání, která žene lidi kupředu, k poznání a pochopení proč se různé věci dějí a z jakých příčin.

2. Vznik vesmíru

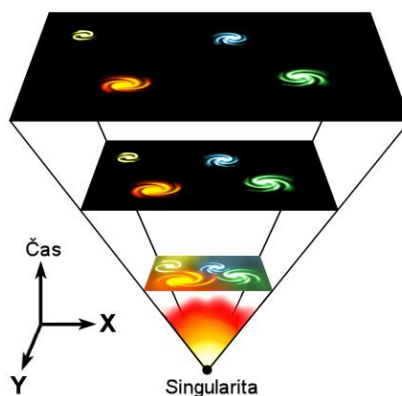
Během staletí lidského bádání se pohled na Vesmír a jeho vývoj neustále měnil a děje se tomu tak i nadále.

Teorie Velkého třesku vypovídá o vzniku Vesmíru z nekonečně malého bodu o nekonečně velké hustotě. Mluvíme jak o počátku hmoty a prostoru, tak i o počátku času. Byl to první okamžik, od kterého se začal odvíjet vývoj Vesmíru.

Vědecká kosmologická teorie, popisující tvar a raný vývoj Vesmíru, se nazývá Velký třesk. Pozorováním pohybu galaxií, které se od sebe vzdalují, se dá odvodit stav Vesmíru v minulosti, ale i v budoucnosti. V minulosti měl Vesmír daleko vyšší teplotu, ale i hustotu. Používaným časovým bodem v užším slova smyslu, pro počátek pozorování rozpínání Vesmíru se používá právě termín „Velký třesk“.

Takzvaná počáteční singularita, která měla některé společné rysy s singularitou gravitační a ve které bylo měření času a délky bezpředmětné a teplota spolu s tlakem byly nekonečné, se datuje na období před 13,7 miliardami let. Toto období historie vzniku Vesmíru zůstává nevyřešeným fyzikálním problémem, protože zatím neexistují žádné modely systémů s takovýmito charakteristikami, speciálně žádná teorie kvantové gravitace.

Pozorování podporující teorii Velkého třesku, stojí všeobecně na třech pilířích. A to na pozorování rudého posuvu galaxií, což vyjadřuje Hubbleův zákon rozpínání, na měření reliktního záření a na četnosti lehkých prvků. Pozorování vzájemných vztahů struktur velkého měřítka ve Vesmíru, velmi dobře zapadají do standardní teorie Velkého třesku.



Obr.1 Rozpínání vesmíru

2.1 Hubbleův zákon

Na základě měření rychlosti vzdalování spirálních galaxií pomocí měření rudého posuvu spektrálních čar a různých odhadů skutečných vzdáleností těchto hvězdných soustav, dospěl Hubble k důležitému objevu 20. století.

Podle pozorování vzdálených galaxií a kvasarů jsou spektra těchto objektů posunuta k jeho červenému konci, to znamená k delším vlnovým délkám. Naměřený posuv se dává do souvislosti s Dopplerovým posuvem záření tělesa, které se od nás vzdaluje určitou rychlostí. Z těchto měření rychlostí a měření vzdáleností těchto těles vyplývá, že rychlost vzdalování závisí na vzdálenosti lineárně. Této závislosti se říká Hubbleův zákon [7]:

$$v = H_0 D \quad (1)$$

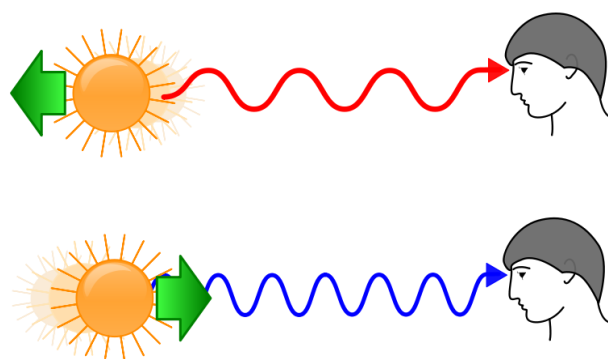
kde v je rychlost, D je vzdálenost od objektu a H_0 je Hubbleova konstanta, její hodnota je $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Hubbleově konstantě se též říká konstanta úměrnosti. Je to veličina, která vyjadřuje, jak moc se zvětší rychlost vzdalování (v km/s) vzdáleného vesmírného objektu (zpravidla galaxie), když jeho vzdálenost vzroste o milion parseků.

Pro výpočet rudého posuvu se používá následující vztah:

$$Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (2)$$

kde $\Delta\lambda$ je posun čáry, λ její vlnová délka, jejichž poměr je právě rudý posuv, c = rychlost světla a v = rychlost pohybu. Velikost rudého posuvu je v tomto případě dobrá pro výpočet vzdálenosti galaxie. Rudý posuv je tím větší, čím větší je vzdálenost pozorovaného objektu od Země, což byl základ teorie o rozpínání Vesmíru. Opakem rudému posuvu je pak modrý posuv, ke kterému naopak dochází, když se zdroj k pozorovateli přibližuje.



Obr. 2 Rudý a modrý posuv světla zdroje

O formulaci tohoto zákona se v roce 1929 postaral Edwin Powell Hubble, díky soustavnému měření rudých posuvů, kterým se zabývali astronomové ve 20. letech 20. století na Wilsonské observatoři. Využívali při tom v té době největšího dalekohledu na světě s parabolickým zrcadlem o průměru 2,5 m. Rychlosti, kterými se vzdalují spirální galaxie, změřil nejdříve V. M. Slipher, po něm E. P. Hubble a M. Humason. Diagram, který jednoznačně ukazuje lineární vztah rychlosti vzdalování galaxií a jejich vzdálenosti, sestrojil jako první E. P. Hubble. Díky tomuto se závislost na počest jeho objevitele nazývá jeho jménem. Hubbleův zákon nebo také Hubbleův vztah a konstantě úměrnosti se říká Hubbleova konstanta.



Obr. 3 Edwin Powell Hubble

3. Vznik hvězd

Ke vzniku hvězd vedla celá řada událostí již od počátku Velkého třesku, v této době se Vesmír skládal z extrémně horké plazmy, složené z částic a antičástic těžkých bosonů X , kvarků a gluonů, které se neustále vzájemně proměňovaly. To postupně vedlo až ke vzniku protonů a neutronů, jež jsou základními stavebními kameny atomů. Takzvaná rekombinační teplota atomu vodíku se pohybuje kolem 3000 K. Této hodnoty dosáhl vesmír zhruba až čtyři sta tisíc let po velkém třesku, teprve až potom mohla atomová jádra na sebe trvale vázat elektrony.

Čtyři sta tisíc let po Velkém třesku už byl tedy Vesmír naplněn nám známou hmotou. Přesto byla hmota tehdy pořád ještě výrazně chudá na své složení. Vodík, helium, malé množství lithia, spousta elektronů a asi deset miliard fotonů na každý stavební kámen atomu. Nicméně po zbývajících prvcích z celkem dvaadvadesáti nebylo ani památky. V dnešním univerzu není absolutně nic, co by nebylo vybudováno výlučně ze zmíněných devadesáti dvou prvků. Bez nich by nebyly diamanty, zlato, vzduch, voda, půda, a hornina a už vůbec ne něco tak jednoduchého, a přece složitého, jako je bakterie, o vyšších organismech ani nemluvě. Mohlo však vzniknout něco jiného, něco velmi důležitého pro další vývoj Vesmíru – hvězdy! Když budeme pozorovat noční oblohu, bude se nám zdát, že hmota není rovnoměrně rozložená. Uvidíme hvězdy osamoceně a jinde zase natěsnány na sebe. Jak hmota vznikla, tak se musela i shluknout v jednotlivých místech a zhustit se v galaxie a hvězdy. Jediná síla v univerzu, která je něčeho takového schopna, je gravitace. To ona způsobuje, že se hmoty vzájemně přitahují, že tvoří „kupy“ [2].

Hvězdné ostrovy, galaxie, jsou složeny z mezihvězdné hmoty a hvězd. Jejich vývoj spočívá v přeměně první složky v druhou. Tento proces neboli vznik hvězd, je ovlivňován zářením hvězd samotných i tím, že hvězdy navracejí do mezihvězdného prostoru značnou část své hmoty. Jedná se o zpětnou vazbu, která ovlivňuje vznik hvězd dalších generací. Vývoj izolovaných galaxií je určován jednak gravitací, která je příčinou velkorozměrných struktur, jako jsou spirální ramena nebo centrální příčky, a dále samoregulující se tvorbou hvězd. Takto je možno popisovat vývoj galaxií v okolí Mléčné dráhy, kde jsou mezi nimi značné vzdálenosti. V době svého vzniku se však galaxie ovlivňovaly navzájem, což bylo příčinou tvorby prvních hvězd [8].

Podíváme-li se na noční oblohu, působí na nás hvězdy jako stále svítící a neměnné body. Ve skutečnosti však stále vznikají hvězdy nové, které se rodí z obrovských oblaků chladného plynu a prachu, kterým se říká mlhoviny.



Obr. 4 Vznik hvězd

Z prvopočátečních plynoprachých mlhovin se vyvíjejí nestabilitami prvotní shluky (globule), budoucí zárodky hvězd. Když je velikost mlhoviny větší než udává tzv. Jeansovo kritérium, může se hroutit samovolně [12].

Hvězdy vzniknou jen v mlhovinách větších a hmotnějších než je právě tato kritická mez. Typické zárodečné mlhoviny mají rozměry $20 \div 30$ ly a hmotnosti $100 \div 1000 M_S$. V přítomnosti magnetického pole Jeansovo kritérium neplatí a hvězdy pak mohou vznikat i třeba v mlhovinách menších. Vždy je však třeba určitý počáteční impuls. Tím může být exploze blízké Supernovy, přechod přes spirální ramena galaxie, elektromagnetické síly nebo prolínání dvou galaxií.

Podmínky pro vznik skupiny hvězd v mezihvězdném oblaku:

- oblak musí být stlačován
- oblak musí ztratit nadbytečnou tepelnou energii
- oblak musí snížit rychlost své rotace

Gravitačním smršťováním se v centru mlhoviny uvolňuje tepelná energie. Tlak a teplota v nitru neustále narůstají. Mezihvězdná oblaka, která jsou složena také z prachových částic, na sebe berou úlohu chladiče. Atomy se stlačováním zahřívají a narážejí na prachové částice. Těm pak předají svou kinetickou energii. Tepelná energie zahřívajících se prachových částic se rychle vyzáří v infračerveném oboru. Tomuto stádiu hvězdného vývoje se říká protohvězda. Na tzv. Hyashiho linii se zastaví rychlé smršťování, hvězda se dostává na takzvanou hlavní posloupnost. Gradient tlaku plynu s gravitačními silami se dostává do rovnováhy.

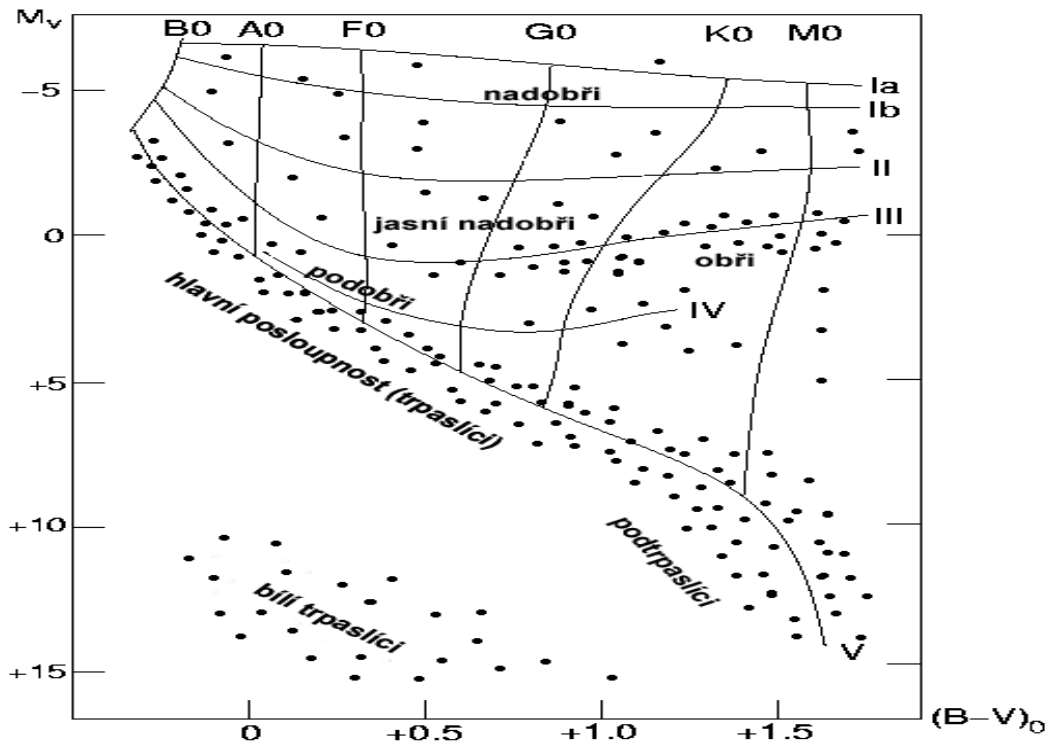
Zrod prvních hvězd se časově shoduje s rozpadem praoblaků na stále menší segmenty a stále nižší hmotnosti. Přitažlivá síla lokálně zhutněných zárodků ve fragmentech oblaků hromadila stále víc plynu, až se oblak nakonec zhroutil pod svou vlastní přitažlivostí a zhoustl v tzv. protohvězdu, plynnou kouli sestávající ze 75% vodíku a 25% helia.

Protohvězda, je vývojové stadium hvězdy poté, co se mateřská mlhovina z vodíku, hélia a prachu začne smršťovat. Ale ještě předtím, než se ocitne na hlavní posloupnosti Hertzsprungova-Russellova diagramu. K tomuto je zapotřebí překonání Jeansovy hustoty, což je kritická mez pro samovolný kolaps oblaku plynu, bez okolního vlivu nabitých částic a magnetických polí. Teprve po jejím překročení vzniká v oblaku protohvězda. Jeansova hustota se dá vyjádřit pomocí vztahu:

$$\rho_J = (81/32\pi M^2) \cdot (kT/G\mu m)^3 \quad (3)$$

kde M je hmotnost oblaku, m je průměrná hmotnost částic. Tento vztah odvodil James Jeans v roce (1877-1946).

Poté když se ve středu plynné koule konečně dosáhne teploty asi $15 \cdot 10^6$ K a tlaku kolem $20 \cdot 10^{15}$ Pa, změní protohvězda rázem svůj charakter. Tento dosud spíše neviditelný objekt se promění v jasně zářící hvězdu a spustí se v jejím nitru procesy dodávající obrovské množství energie, během nichž vznikají vedle vodíku a helia dosud chybějící těžké prvky.



Obr. 5 Hertzsprungův – Russelův diagram

Každý oblak byl zárodečnou buňkou pro nespočetné množství hvězd a všechny hvězdy z jednoho oblaku spolu vytvořily galaxii, obrovský systém hvězd.

Otevřenou otázkou ale zůstává, do jaké míry je za strukturu shluků zodpovědná gravitace, která při dostatečné hustotě shluku převládla nad tlakovými silami, a do jaké rázové vlny spojené s turbulentními toky, které mohou stlačit látku na stonásobek hustoty oproti jejímu okolí. Z výpočtu vychází, že turbulentní komprese může vést ke vzniku předhvězdných jader – oblastí s vyšší než průměrnou hustotou, které se nacházejí ve stavu na pokraji gravitačního kolapsu (tj. asi pětiny světelného roku) a hmotnost zhruba 0,7 hmotnosti Slunce. Jádra pozorovaná přímo v molekulárních mračcích mají podobné vlastnosti, proto se turbulentní komprese zařadila na přední místo z mnoho teorií, které vysvětlují vznik předhvězdných objektů. Nakonec převezme nadvládu gravitace, které ve formování hvězdy dosud bránila magnetická pole a nadbytečný pohyb hybnosti.

V nejhustších částech mračna se může na hvězdy přeměnit až polovina látky, uvažujeme-li ale oblak jako celek, přemění se na hvězdy nejvýše několik procent hmotnosti oblaku.

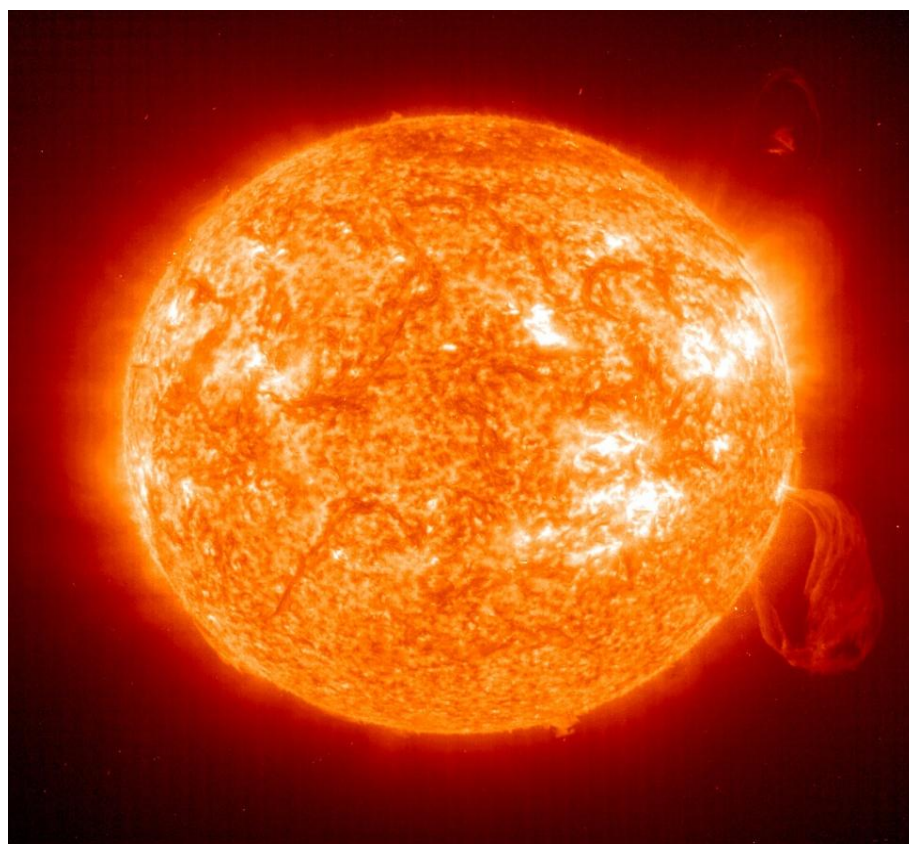
Z pozorování i simulací se ví, že v mračnu se vytvářejí předhvězdná jádra. Znalosti o vývoji předhvězdného jádra závisí převážně na výpočtech a počítačových simulacích. Z nich se zjišťuje co nejpodrobnější průběh kolapsu jádra a doba nutná ke vzniku hvězdy. Všechny vytvořené simulace dávají v podstatě stejnou předpověď. V počátečním stádiu formování hvězdy dosáhne jen malá část kolabujícího mračna hustoty dostatečné ke vzniku hvězdy. Dříve se předvíдалo, že se celé mračno, které má hmotnost Slunce rovnoměrně smršťuje tak dlouho, až z něho vznikne hvězda. Simulace nám ale ukázali, že je vše poněkud jinak. Uprostřed kolabující části mračna se vytvoří objekt o hmotnosti 0,001 hmotnosti Slunce, který je hustý a horký natolik, až v něm poměrně brzy zažehnou termojaderné reakce. Teprve poté, v průběhu dosti dlouhé doby, se na jádro akrecí nabaluje další hmota, která padá z okolí na povrch protohvězdy.

Nemusíme se příliš zabývat tím, co se dělo před okamžikem, kdy se jádro začalo zahřívat. Jeho ohřev započne, když hustota stoupne natolik, že infračervené záření z jádra nemůže uniknout a je v něm zachyceno. Konkrétní hodnota je 10^{-10} kilogramu v metru krychlovém, což odpovídá $20 \cdot 10^{15}$ vodíkových molekul v každém krychlovém metru. Rostoucí tlak jádra kolaps zastaví, když hustota vzroste ještě 2 000 krát, tj. v každém krychlovém metru bude $40 \cdot 10^{18}$ molekul vodíku (to odpovídá 0,2 miliardtiny hustoty vody za normálních podmínek). Takové jádro má hmotnost přibližně setiny hmotnosti Slunce a lineární rozměr několikanásobně větší, než činí současná vzdálenost Země od Slunce. Stabilita jádra je krátkodobá, v centru roste teplota na 2 000 K, kdy se vodíkové molekuly rozštěpí na jednotlivé atomy. Chování plynu se tím změní a proběhne druhá fáze kolapsu, která se uskuteční podobně, ale jen ve vnitřní části jádra. Kolaps se zastaví v okamžiku, kdy teplota dosáhne 10 000 K, z atomů vodíku jsou odtrhány elektronové obaly a látka se stane plazmatem, v tuto chvíli je kolaps jádra dokončen.

Vnitřní jádro je centrum, na kterém hvězda narůstá. A to v důsledku látky padající z vnějšího okolí, ta neustále zvětšuje jeho hmotnost, poloměr jádra se však mění jen nepatrně, nanejvýš na několik slunečných poloměrů. Výsledkem akrece je vyšší hustota protohvězdy.

Velikost hvězdy narůstající na jádře závisí především na množství materiálu dostupném pro akreci. Nezáleží tolik na velikosti jádra, protože všechna jádra mají na počátku přibližně stejnou hmotnost.

Hvězdou hlavní posloupnosti, se nazývá hvězda, která stává dospělou po postupném pomalém zmenšování. Po ukončení akrece, se poloměr hvězdy o hmotnosti Slunce, přibližně čtyřikrát zvětší, od toho co má Slunce dnes. V průběhu tohoto zmenšování září hvězda zejména díky gravitační energii, která se při zmenšování uvolňuje. Ve chvíli kdy teplota v jádru dosáhne přes 10 milionů kelvinů, zažehne se proton-protonový řetězec a jaderná energie zastaví další smršťování hvězdy. Prvky, které byly pozorovány u hvězd hlavní posloupnosti (včetně Slunce) v povrchových vrstvách, odpovídá směsi prvků v mračnu, ze kterého hvězda vznikla.



Obr.6 Slunce

4. Stádia hvězd

Jaká bude budoucnost hvězdy a co se s ní stane, bude záviset především na její hmotnosti.

Astronomové dělí různé vývojové stupně akrece na čtyři fáze, neboli třídy, které dávají určitou představu o délce trvání procesů, nicméně jsou definovány poměrně volně. Přibližně milion roků trvá předhvězdná fáze kolapsu mračna a vývoj jádra až do okamžiku, kdy je jádro ionizováno a stane se neprůhledným. Tento okamžik považujeme za zrod hvězdy. Jako fáze C 0 se označuje období prudké akrece látky na jádro. Tato fáze trvá desítky tisíc let a jejím výsledkem je akrece přibližně poloviny dostupné látky. Nejdelší akreční fáze se označuje jako C 1 – trvá několik set tisíc roků, během nichž hvězda velmi pomalu nabaluje většinu zbývající látky. Fáze C II trvá přibližně milion roků; odpovídá mladým hvězdám typu T Tauri, které jsou obklopeny prachem. Fázi C III označujeme mladou hvězdou, která již není obklopena prachem a postupně se několik desítek milionů roků zmenšuje na hvězdu hlavní posloupnosti [3].

V nitru hvězd se děje celá řada procesů, které postupně vyzařují energii. Tyto procesy jsou také příčinou, že vznikají postupně stále těžší prvky.

Dva protony se k sobě za normálních okolností nemohou moc přiblížit, neboť se odpuzují v důsledku shodného kladného elektrického náboje. Ale v podmínkách o teplotě kolem $15 \cdot 10^6$ K a tlaku $20 \cdot 10^{15}$ Pa je to jinak. Vodíková jádra do sebe narážejí tak prudce, že zdolají dokonce i odpudivou sílu a dostanou se k sobě tak blízko, že se ocitají v oblasti vlivu silné interakce.

Atomové jádra se uvnitř hvězd nerozsbíjejí, ale naopak budují. V několika krocích nejprve vznikne vždy ze čtyř protonů heliové jádro, což se označuje jako hoření vodíku. V této fázi prožije hvězda nejdelší část svého života, v jejím středu shoří téměř celá zásoba vodíku. Jak dlouho to bude, právě záleží především na tom, jak velkou měla svoji počáteční hmotnost. Právě hmotnost hvězdy, je rozhodující veličinou pro stanovení její životnosti. Těžší hvězdy mají vyšší tlak a teplotu v jejich nitru, a čím vyšší budou tyto hodnoty, tím rychleji bude probíhat hoření.

U hvězdy velikosti Slunce trvá asi 8 až 10 miliard let, než se v jejím nitru spotřebuje vodík. Hvězda o hmotnosti stokrát vyšší než Slunce naproti tomu se svou zásobou nesrovnatelně plýtvá. Spálí veškeré zásoby vodíku asi za 1 milion let. Na druhé straně hvězda desetkrát lehčí než Slunce hoří tak úsporně, že její zásoby vystačí

přibližně na 1000 miliard let, což je doba, jež mnohonásobně převyšuje současné stáří vesmíru.

Čím hmotnější je hvězda, tím překotněji spaluje vodík, tím dříve vyčerpá vodíkové palivo, opouští hlavní posloupnost a stává se na přechodnou dobu obrem nebo veleobrem. Hvězda přechází na složitější jaderné reakce. Po vyčerpání jaderného paliva nastává závěrečné stadium vývoje. Všemocné gravitaci již nevzdoruje zářivá energie z nitra hvězdy a nastane rychlý kolaps, který je někdy provázen explozí a rozptýlením části hvězdné látky do prostoru. V závislosti na hmotnosti hroučící se hvězdy se vytváří tzv. bílý trpaslík nebo neutronová hvězda a v případě velmi hmotných hvězd vzniká tzv. černá díra.

Tab. 1 Stabilní rovnovážné konfigurace po vyhasnutí TJ syntézy

Závěrečné stadium	Rozměry [km]	Hustota [kg cm ⁻³]	Magnetické pole [T]	Mechanismus udržení
bílý trpaslík (white dwarf)	5 000 ÷ 20 000	10 ³	10 ² ÷ 10 ⁵	tlak elektronů
neutronová hvězda (neutron star)	20÷100	10 ¹⁰ ÷ 10 ¹²	10 ⁵ ÷ 10 ¹⁰	tlak neutronů
kvarková hvězda	?	?	?	tlak kvarků

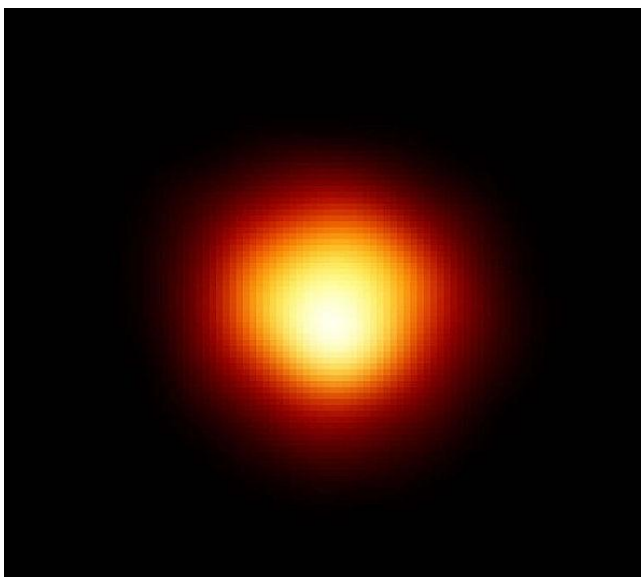
4.1 Červení obři

Červení obři jsou skutečně červení a velcí. Každou hvězdu podobnou našemu Slunci čeká osud červeného obra, až ji dojde jaderné palivo. Dokud je v jádře dostatek vodíku, který se přeměňuje na helium, drží uvolňovaná energie vnější vrstvy hvězdy před gravitačním pádem.

Poté co vodíkové palivo ve hvězdách o hmotnosti podobných Slunci vyčerpá, začnou převládat gravitační síly a hvězda se začne smršťovat. Při smršťování se uvolňuje gravitační energie a jádro se zahřívá. To způsobí expanzi vnějších vrstev hvězdy do prostoru. Jádro je čím dál teplejší a uniká z něj více energie. Povrch samotný ale pořád narůstá, takže ve výsledku energie uvolňovaná na jednotku plochy klesá a současně klesá i povrchová teplota hvězdy. Tato fáze hvězdy nebude trvat věčně. Při takto vysoké teplotě a hustotě, se v jejím jádře zažehnou heliové reakce. Při nich se

jádra helia začnou slučovat na jádra uhlíku. Malý nárůst rozměrů jádra způsobí uvolňovaná energie, s čímž také souvisí jeho nepatrné ochlazení. Odhozené vnější vrstvy se pak částečně vrátí zpět k jádru hvězdy.

Když hvězda spotřebuje veškeré helium v jádře, což může trvat přibližně i 100 milionů let, situace se bude opakovat. Jádro se smrští a zahřeje, vnější vrstvy expandují a hvězda se stane velebobrem. Pro hvězdu typu Slunce je uhlík posledním prvkem slučovaným v jádře. Nukleosyntéza může pokračovat k těžším prvkům jen u hvězd s mnohem větší hmotností. Hvězdy podobné Slunci budou mít ve stadiu velebobra neaktivní uhlíkové jádro. Termojaderná syntéza pak bude pokračovat jen ve slupkách kolem jádra, kde se bude slučovat vodík na helium. Dále bude postupně narůstat hmotnost jádra, avšak vnější slupky hvězdy budou nadále unikat do prostoru. Nakonec když hvězdě dojde veškeré jaderné palivo, začne se postupně ochlazovat a smršťovat na bílého trpaslíka. Zbude pozůstatek hvězdy s hmotností téměř rovnou hmotě Slunce, ale s objemem několikanásobně menším.



Obr.7 Červený obr Betelgeuse

Lehké hvězdy (tedy i naše Slunce), které nedosáhly ve svém nitru teplot potřebných k hoření uhlíku, se na konci svého života hrouť v bílé trpaslíky. Červený obr je v podstatě složen z velmi hustého jádra, které je obklopeno relativně málo hustým obalem. Když je všechno helium ve hvězdě spáleno a není dostatečná teplota k zapálení uhlíku, začíná se hvězda gravitačně hrouť. Rozsáhlý obal, který je tlakem záření z jádra „odfouknut“, můžeme pozorovat jako planetární mlhovinu (planetární mlhovina

nemá nic společného s "normálními" mlhovinami-jedná se pouze o shodný název). Hvězda má povrchovou teplotu kolem 50 000 K a právě se stává bílým trpaslíkem. Hmotnost bílých trpaslíků srovnatelná s hmotností Slunce, ale jejich objem je srovnatelný s objemem Země. Tzn., že hustota bílých trpaslíků je zhruba milionkrát větší než hustota obyčejných hvězd (krychlička o hraně 1 cm vyjmutá z bílého trpaslíka by vážila 10 tun) [9].

4.2 Bílý trpaslík

Bílý trpaslík je jedním z astronomických objektů, vznikající zhroucením hvězdy, které mají průměrnou nebo dokonce podprůměrnou hmotnost. Tyto hvězdy nejsou natolik hmotné nato, aby ve svém jádře dosáhly teplot potřebných k fúzi uhlíku. Vnější vrstvy odhozené během fáze spalování hélia, vytvoří planetární mlhovinu. Na místě původní hvězdy pak zůstane pouze neaktivní jádro, které se bude skládat převážně z uhlíku a kyslíku.

Toto jádro nemá žádný další zdroj energie, takže zvolna vyzařuje energii, která se nashromáždila za aktivního života hvězdy a postupně chladne. Není však chráněno fúzními reakcemi před gravitačním kolapsem, proto se stalo extrémně hustým. Bílý trpaslík je udržován tlakem degenerovaného elektronového plynu, tento proces se nazývá neutronizace a má původ v Pauliho vylučovacím principu. Hmotnost, po které již degenerační tlak není schopen odolávat gravitaci, je zhruba 1,4 hmotností Slunce. Bílý trpaslík, který by přesáhl tuto hodnotu, známou též jako Chandrasekharova mez, obvykle exploduje jako supernova typu Ia.

Degenerované izotermní nitro o teplotě $10 \cdot 10^6$ K, je obklopeno plazmovým obalem (asi 1% poloměru bílého trpaslíka). Bez tohoto plazmového obalu by vychladl bílý trpaslík velmi rychle. Množství tepla, které je uvnitř bílého trpaslíka se dá srovnat s teplem v nitru Slunce. Na rozdíl od Slunce dokáže svítit mnohem déle (přibližně 100 miliard let) než zcela vychladne, protože jeho zářivost je mnohem menší.

Až se tak stane a ochladí se za stovky miliard let natolik, že již nebude viditelný, stane se z něj černý trpaslík. Pokud bychom vzali v úvahu celou dosavadní historii vesmíru, která je asi 13,7 miliardy let, musel by i ten nejstarší bílý trpaslík stále ještě vyzařovat teplo o několika tisících kelvinů.

Bílý trpaslík se zřídka vyskytuje v dvojhvězdném páru s rudým obrem. Tyto hvězdy pak obíhají kolem společného těžiště v takové blízkosti, že se gravitačně ovlivňují. Bílý trpaslík na sobě hromadí hmotu svého hvězdného souseda, a jakmile dosáhne dostatečného množství vodíku, prudce zažehne termionukleární reakci. V tomto důsledku je pak možné pozorovat novu.



Obr. 8 Planetární mlhovina NGC 6302

4.3 Supernova

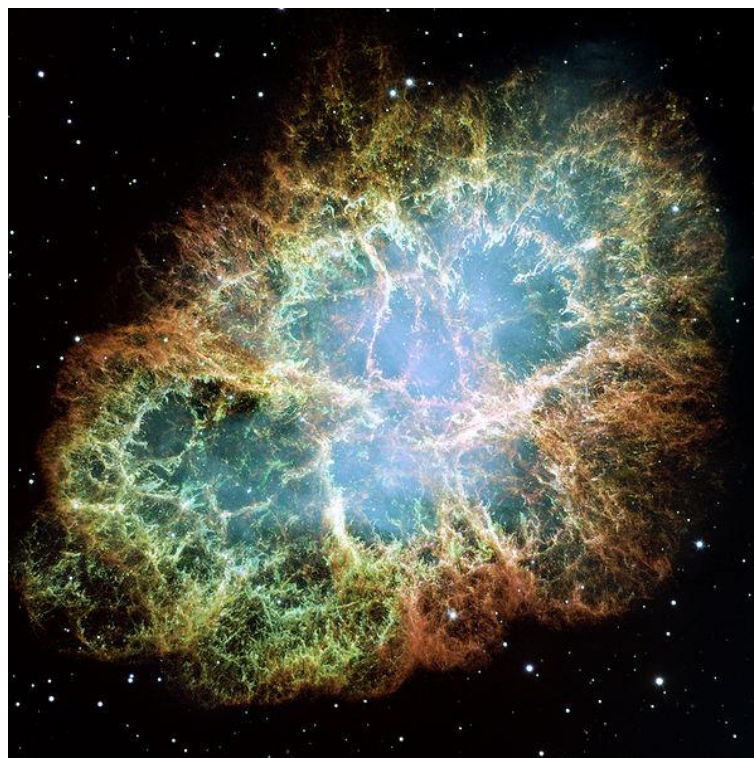
Termín supernova se vztahuje k několika typům hvězdných explozí. Těmi vznikají extrémně jasné objekty složené z plazmatu, které se vyznačují extrémní jasností, která zas v průběhu týdnů nebo několika měsíců opět klesne o mnoho řádů. K takovému konci hvězd vedou dvě cesty. Za prvé se buďto jedná o masivní hvězdu, která se začne hroutit pod vlivem své vlastní gravitace a to v důsledku vyčerpání zásob jaderného paliva pro fúzi, nebo jde o bílého trpaslíka, který na sebe nabaluje materiál od svého hvězdného průvodce. Ve chvíli kdy dosáhne Chandrasekharovy meze, prodělá

termonukleární explozi. V těchto obou případech výsledná exploze supernovy odmrští obrovskou silou většinu nebo dokonce všechnu svou hmotu.

U těžkých hvězd je gravitační kolaps rychlejší než u hvězd méně hmotných. Pokud ustanou v železném jádře termonukleární reakce, pak další snahy o zapálení železa zvýšením teploty již nejsou účinné. Tlak záření je slabý a již není schopen vyrovnávat gravitační sílu, která táhne hvězdu do svého středu. Nastane takzvaný kolaps jádra, kdy se vyhořelé jádro pod velkým tlakem hroučí, smršťuje a hustota značně stoupá. Tento průběh se poněkud zpomalí, když jádro prochází stavem bílého trpaslíka. To je tehdy, kdy 1 cm^3 váží 10 tun. Tyto extrémní tlaky a teploty drtí jednotlivá jádra na elementární částice. Na konci kolapsu jsou částice tak natěsnány blízko sebe, že se zastaví další stlačování. Vnější vrstvy padají v podstatě volným pádem ke středu hvězdy, kde pak narážejí na nestlačitelné jádro. Tímto se drasticky zvýší tlak a teplota. energii již není vyzařována pomocí fotonů, ale pomocí elementárních částic, zvaných neutrina. Zbytek energie se pak projeví jako rázová (detonační) vlna, která se šíří proti směru hroucení. Ta pak zahřívá vnější vrstvy, které obsahují ještě dostatek vodíku a helia, pod obrovskými teplotami, které dosahují hodnot až $2 \cdot 10^{11}$ K. Ta se mimo jiné považuje za nejvyšší teplotu ve vesmíru. Tímto se zapříčiní obrovská explozivní termonukleární reakce. Při této teplotě se atomy drobí na protony a neutrony. Ohromné toky těchto částic, které se šíří vysokou rychlostí směrem od centra výbuchu spolu s velkým množstvím fotonového záření, rozzáří hvězdu rázem o více než milionnásobek. Ze Země tento děj můžeme pozorovat jako explozi supernovy.

Exploze supernov se klasifikují podle čar různých chemických prvků objevujících se v jejich spektru. Základem rozdělení je přítomnost čáry vodíku. Pokud spektrum supernovy obsahuje čáru vodíku, je klasifikována jako *typ II*, v opačném případě jde o *typ I*. Kromě těchto skupin existují podrobnější dělení podle přítomnosti jiných čar nebo tvaru světelné křivky.

Jádra na povrchu hvězdy, která nebyla rozdrobena během výbuchu, zachytávají volné neutrony a opakovaně se rozpadávají tzv. beta-rozpadem. Vznikají tak těžká a velmi těžká atomová jádra (těžší než železo), které nevznikají při termonukleárních reakcích. Výbuchy supernov jsou vlastně velkými „továrnami“ na výrobu převážné většiny těžkých prvků, které ve Vesmíru existují [9].



Obr. 9 Krabí mlhovina

Tab. 2 Rozdělení supernov

Typ supernovy	Fyzikální mechanismus	Spektrum	Příklad
la	Porušení meze stability bílého trpaslíka přetokem hmoty z druhé složky	Chybí čáry vodíku. Výrazná absorpční čára Si II (655 nm). Typické čáry železa.	SN 2002bo
lb	Závěrečný kolaps hmotné hvězdy. Ztráta vodíkové obálky.	Chybí čáry vodíku. Výrazná absorpční čára hélia (570 nm). Čáry O I, Ca II, Mg II.	ESO 184 G82
lc	Závěrečný kolaps hmotné hvězdy. Ztráta vodíkové i heliové obálky.	Chybí čáry vodíku a hélia. Čáry O I, Ca II, Mg II.	SN 2003jd
II	Závěrečný kolaps hmotné hvězdy	Obsahuje typické čáry vodíku. Čáry O I, Ca II, Mg II.	M 1

4.3.1 Typ Ia

Supernovy typu Ia postrádají ve svém spektru hélium a obsahují v něm absorpční čáru křemíku poblíž světelného vrcholu. Tento typ supernov je výsledkem procesu, při němž bílý trpaslík nabaluje hmotu ze svého blízkého hvězdného průvodce, jímž obvykle bývá rudý obr, až nakonec dosáhne Chandrasekharovy meze. Chandrasekharova mez určuje maximální hmotnost bílého trpaslíka, při které ještě zůstává stabilní. Odpovídá zhruba 1,44 hmotnosti Slunce, je rovna $2,9 \times 10^{30}$ kg.

Chandrasekharovu mez M_{Ch} lze přibližně spočítat pomocí vztahu:

$$M_{Ch} \approx \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{m_p^2} \quad (4)$$

kde \hbar je redukovaná Planckova konstanta, c je rychlost světla, G je gravitační konstanta a m_p je hmotnost protonu. Přesná hodnota bude záviset na chemickém složení dané hvězdy.

Po překročení této meze, se bílý trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy a uvolněná potenciální energie se projeví explozivně. Množství uvolněné energie bývá vždy zhruba stejné, proto z její pozorovatelné jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se určují z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti, které se znázorňují na světelné křivce. To je znázornění měnící se jasnosti vesmírného tělesa v závislosti na čase. Supernovu typu Ia lze identifikovat podle tvaru jejího spektra. Typ supernov Ia uvolňuje od všech ostatních známých tříd supernov největší množství energie.

4.3.2 Typ Ib a Ic

Spektra supernov typů Ib a Ic neobsahují čáry vodíku a ani výraznou křemíkovou absorpci poblíž 615 nanometrů. Supernovy Ib a Ic ztratily většinu vnějších obálek následkem silných hvězdných větrů, nebo možnou interakcí se svým hvězdným průvodcem. Dokonce se uvažuje, že supernovy typu Ib jsou dílem zhroucení Wolf-Rayetových hvězd.

Wolf-Rayetova hvězda je hvězda hlavní posloupnosti s vysokou svítivostí a jak to u podobných hvězd tohoto typu bývá, i s velmi krátkou životností, ta se odhaduje na méně než milion let. Povrchovou teplotu naměříme mezi 25 000 K a 100 000 K, kde maximální vyzařování se děje v ultrafialové oblasti. Hmotnost takovéto hvězdy se pohybuje řádově v rozsahu mezi 25 až 60 hmotností Slunce. Spektrální třída Wolf-Rayetových hvězd má samostatné označení W, zkratka je ze slova wide, což znamená široký a je to proto, že spektrální čáry jednotlivých prvků této hvězdy jsou vlivem vysoké teploty široké.

Typy Wolf-Rayetových hvězd.

Rozdělují se podle zastoupení nejvýznamnějšího prvku ve spektru

- typ N, (ve spektru převažuje dusík)
- typ C, (ve spektru převažuje uhlík)

Tyto třídy odpovídají jejich postupnému vývoji. Typ N je vývojově mladší nežli hvězdy typu C.

4.3.3 Typ II

Jádro hvězdy o počáteční hmotnosti víc než dvacet Sluncí se po všech předchozích fázích hoření a především po ztrátách způsobených hvězdnými větry nakonec smrskne asi na jedenapůlnásobek hmotnosti Slunce. Nyní opět zavládne přitažlivost a jádro se opakovaně smršťuje. Začínají procesy, při nichž se uvolňují obrovská množství neutrin, která téměř bez zábran hvězdu opouštějí a tím odvádějí enormní množství energie. Oblast jádra rychle chladne, tlak v nitru hvězdy rapidně klesá a přitažlivost ještě víc stlačuje jádro. Nakonec se dokonce i zbylé elektrony staví s protony, takže vzniká superhusté neutronové jádro a obrovské množství dalších neutrin. Protože už nepůsobí stabilizující tlak elektronů – ten vzniká tím, že elektrony musejí obsazovat různé hladiny energie, a proto se nemohou zhušťovat libovolně, hvězda se ve zlomku vteřiny zhroutlí pod vlastní gravitací. Vrchní vrstvy hvězdy, které se nyní s rachotem řítí na neutronové jádro, vyvolávají mohutné tlakové vlny, které se odrážejí od tvrdého jádra a společně s neutrinami se společně ženou ven. Obal hvězdy se

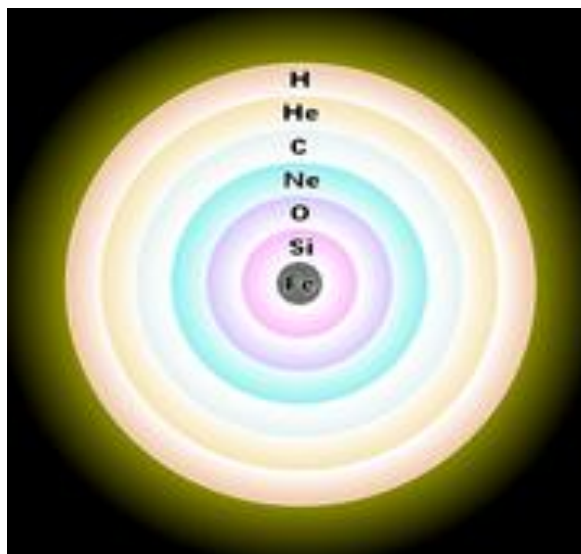
přítom prudce ohřeje, takže celá hvězda se roztrhne v mohutné explozi a její obal je vyvržen daleko do prostoru. Množství uvolněné energie je tak obrovské, že už jedno její procento rozzáří zbytek hvězdy jasněji než všech sto miliard hvězd jedné galaxie dohromady. Toto ohromující představení, při němž se definitivně uzavírá životní dráha jedné hvězdy, označují astrofyzikové vskutku střízlivě explozí supernovy II [2].

Vyčerpání paliva pro fúzi

Hvězdy, které jsou daleko hmotnější než Slunce, se vyvíjejí o dost složitějším způsobem. V jádru Slunce se každou sekundu přemění 589 miliónů tun vodíku na 584 miliónů tun hélia, tento rozdíl hodnot je pak přeměněn v energii, která se vyzáří pryč. V jádře vyprodukované helium se zde hromadí, dokud se v něm teplota nezvýší natolik, že začne jeho fúze. Vodík se přeměnou na helium postupně vyčerpá, fúze se zpomalí a gravitace, která nabude převahy, začne jádro stlačovat. Tím se zvedne teplota natolik, že začne kratší fáze spalování hélia. Ve hvězdách, které jsou menší než 10 hmotností Slunce, se již nespaluje uhlík vyprodukovaný fúzí hélia a hvězda pomalu chladne. Začne se tvořit degenerovaný elektronový plyn a hvězda přejde do stádia bílého trpaslíka. Ti se později mohou stát supernovou typu I, jak již bylo popsáno výše.

Hmotnější hvězdy mají gravitaci dostatečně silnou k vytvoření potřebných teplot a tlaků, které umožňujících fúzi uhlíku poté, co se jádro začne smršťovat. Vnější vrstva těchto hvězd obsahuje vodíkový plyn, když bychom postupovali ke středu, budeme mít vrstvu vodíku spojujícího se fúzí v helium, vrstvu hélia, vrstvu hélia spojujícího se fúzí v uhlík, vrstvu uhlíku a vrstvu uhlíku měnícího se fúzí v těžší prvky. Tyto hvězdy procházejí postupnými stadii vývoje, při kterých se jádro neustále smršťuje a umožňuje spalování těžších prvků. Což nebylo dříve možné. V průběhu těchto jednotlivých stadií se jasnost hvězdy nepravidelně mění. Každý nový zážeh fúze vytlačuje z jádra prvky do hvězdné obálky. V každém následném kroku se postupně produkují těžší a těžší prvky, které jsou svázány silnou interakcí. To znamená, že uvolňovaná energie při fúzi bude menší, než kterou uvolňovala lehčí jádra.

Ze všech prvků má nejtěsnější vazby v celém jádře železo. Lehčí prvky uvolňují energii při fúzi a těžší při štěpení. Když se začne v jádře hromadit železo, gravitace do aktivní oblasti tlačí stále více hmoty. Ta cestou projde všemi stupni fúze. Vodík na helium proton-protonovým cyklem, helium na uhlík tři alfa reakcí, uhlík s heliem na kyslík, kyslík na neon, neon na hořčík, hořčík na křemík a křemík na železo.



Obr.10 „Cibulovitá“ struktura jádra

Zhroutení jádra

Na železné jádro hvězdy působí obrovský gravitační tlak, a protože se zde již neodehrává další fúze, nemůže vzdorovat tlakem plynu. Místo toho se zde odehrává elektronové degenerace, kdy odpor elektronů působí proti stlačování k jiným elektronům. Pokud se v jádře přesáhne degenerační tlak, tzv. Chandrasekharovy mez, železné jádro se začne hroutit. V tu chvíli začne produkovat vysoce energetické gama paprsky, které rozbíjejí některá železná jádra na 13 He a 4 neutrony, v procesu známém jako fotodisociace. Avšak žádná jaderná reakce s železem nemůže uvolnit energii, může ji pouze absorbovat. Takže i když jádro po celý život produkovalo energii ven a udržovalo hvězdu v rovnováze proti gravitaci, začne naopak energii pohlcovat. Tím pomáhá gravitaci, takže se jádro zhroutí ve zlomku sekundy.

Zvyšující se teplota hroutícího jádra přitahuje elektrony a protony stále více k sobě až do chvíle než se překoná jejich vzájemné odpuzování. Tímto beta-rozpadem je elektron vtažen do protonu, vznikne neutron a uvolní se ven neutrino. Pokračující kolaps dále urychluje únik neutrina z jádra a odčerpávání energie. Řádově pouhé milisekundy trvá oddělení hvězdného jádra od vnějších vrstev a dosažení hustoty atomového jádra. Dalšímu stlačování při této hustotě bude bránit vzájemný odpor neutronů způsobený jejich kvantovými vlastnostmi (jde o fermiony podléhající vylučovacímu principu). Tímto je neutronový degenerační tlak dostatečně velký k vyrovnání gravitace. Jádro však ve skutečnosti není v rovnováze a nepatrně pruží,

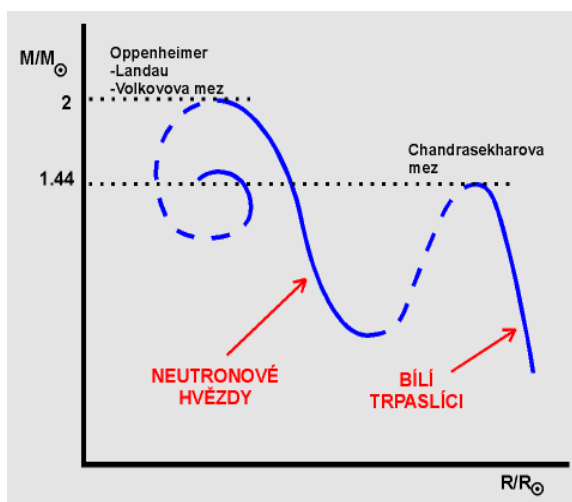
přičemž vytváří rázové vlny, které narážejí do kolabujících vnějších vrstev hvězdy. Záronek neutronové hvězdy, jež se zformovaly z jádra, pokračuje dál v kolapsu za předpokladu, že je dost masivní. Tak může skončit buďto jako černá díra nebo se kolaps zastaví v některém ze stabilních mezistavů předpovězených teorií. Těmi mohou být například hypotetické hyperonové hvězdy, jejichž neutronový plyn byl stlačením dále degenerován a neutrony vybuzeny do stavu hyperonů. Pokud gravitaci neodolá ani degenerační tlak hyperonové plazmatu, mohl by se hvězdný kolaps zastavit třeba ještě ve stádiu kvarkové hvězdy skládající se z kvark-gluonového plazmatu. Kvarky jsou fermiony a měly by být schopné díky vytvoření degenerovaného plynu podle Pauliho vylučovacího principu vyrovnávat gravitační tlak. Stejně jako u elektronů v případě bílých trpaslíků a neutronů v neutronových hvězdách.

4.4 Neutronová hvězda

Neutronové hvězdy jsou dalším možným vývojovým stádiem hvězdy. Je to v podstatě pozůstatek výbuchu supernovy typu II, typu Ib nebo Ic.

Od hvězd jako je Slunce, se neutronové hvězdy podstatně liší. Ve hvězdě hlavní posloupnosti probíhají termionukleární reakce a je složena z plazmatu, které je v jejím jádru.

Tlak plazmatu při jeho vysoké teplotě kompenzuje gravitaci. Naproti tomu jsou pod velkým tlakem vmáčknuty elektrony do jader atomů a protony se změní na neutrony, v tu chvíli se vyzáří neutrino, čímž vznikne neutronový degenerovaný plyn.



Obr. 11 Rovnováha hvězd bez TJ

Tento proces se nazývá neutronizace. Můžeme říct, že se neutronová hvězda skládá ze samých neutronů a je kompenzována tlakem. Ten vychází z Pauliho vylučovacího principu. Jejich typická hmotnost se pohybuje v rozmezí od 1,35 do 2,1 slunečních hmot. Teoreticky může dosáhnout 3 až 5 slunečních hmot, což odpovídá hodnotě známé jako Tolman-Oppenheimer-Volkoffova mez. Dosažení této meze představuje hodnotu, při které vznikne z tělesa složeného z degenerovaného neutronového plynu černá díra nebo kvarková hvězda.

Při zhroucení hvězdy, která měla průměr například 2,5 mil. km do neutronové hvězdy o průměru 25 km, se jako její průměr zmenší i objem a povrch, ale na druhou stranu její hustota naroste. Siločáry magnetického pole zůstanou všechny, ale vzroste jejich hustota. To znamená, že vzroste i intenzita magnetického pole. U obyčejných hvězd je to jen několik setin tesla, na neutronových hvězdách však magnetická pole dosahují obrovských hodnot, od 10^6 až do 10^9 T. Jsou to právě tato silná magnetická pole, které dělají z neutronových hvězd pulzary, zdroje pravidelně se opakujících záblesků. Všechny pulzary jsou v podstatě neutronové hvězdy. Bohužel většinu neutronových hvězd jako pulsary nemůžeme pozorovat, neboť jejich pulzy záření míjejí Zemi.

V Vesmíru je jen málo pozorovaných neutronových hvězd. Pozorování osamocené neutronové hvězdy je dosti nesnadné, protože jejich povrch je velmi malý a září velmi slabě. Tyto hvězdy vysílají vzhledem ke své povrchové teplotě ultrafialové a rentgenové záření.

První pulsary byly objeveny radioastronomy v roce 1968. V silném magnetickém poli vysílají neutrony, jejichž rychlost se přibližuje k rychlosti světla. Ty se stáčejí po spirálách rádiové vlny a vyzařují se podobným způsobem jako světlo majáku. U nejpomalejších pulsarů se počítá 1 puls za 4 sekundy, u nejrychlejších se pak pulsy počítají ve zlomcích milisekundy. Příklad pulsaru najdeme v Krabí mlhovině, která je pozůstatkem supernovy z roku 1054 n.l. Tento pulsar vysílá rádiové pulsy rychlostí 30 pulsů.

Na základě matematických modelů můžeme soudit, že se povrch neutronové hvězdy skládá z klasických atomových jader a elektronů. Neutronová hvězda má asi 1 m silnou atmosféru a pod ní je pevnou kůru. Více do středu jsou atomy stále těžší se stále více neutrony (zpravidla izotopy, které by se v pozemských podmínkách dávno rozpadly, za takto vysokého tlaku zůstávají však stále stabilní). Tam také existuje tzv.

neutronová mez přesycenosti (v orig. *neutron drip*), což je mez, kde mohou existovat samotné volné neutrony, ale i atomová jádra s elektrony. Směrem do hloubky jader gradientem stále více ubývá a volné neutrony přibývají. V dostatečné hloubce, tzv. jádře, již zůstanou jen neutrony. Přesné složení superhusté hmoty v jádře není přesně známá. Pravděpodobně jde o supratekutou směs neutronů, v malém podílu také protonů a elektronů a čím více je hvězda hustější, tak stále více zastoupených pionů, kaonů, nebo tzv. podivné hmoty (orig. *strange matter*, což bylo odvozeno od kvantové vlastnosti pojmenované podivnost. Nejpravděpodobněji by šlo o hmotu, která by byla složená z kvarků nevázaných do hadronů.



Obr. 12 Binární systém

4.5 Černá díra

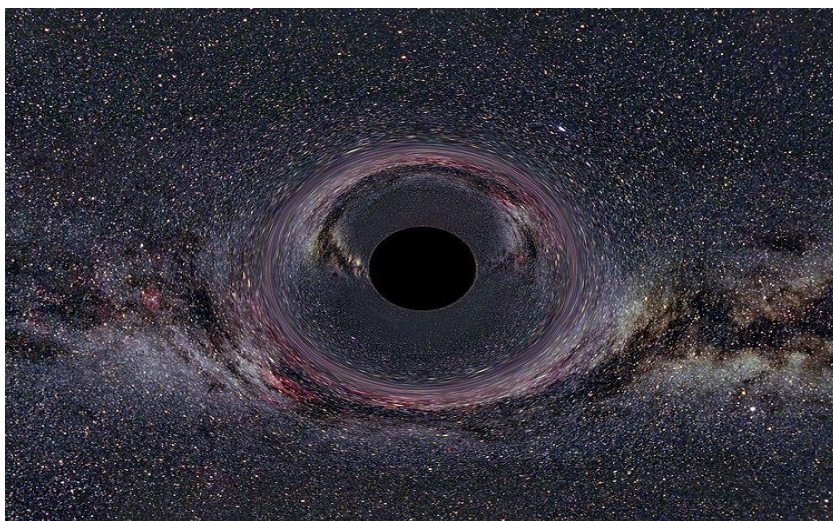
Neudrží-li gravitaci u normální hvězdy tlak látky, u bílého trpaslíka tlak degenerovaného elektronového plynu a ani u neutronové hvězdy tlak neutronů, nastane nezadržitelný kolaps hvězdy, přičemž vznikne černá díra. S označením černá díra přišel v roce 1967 John. A. Wheelera. Myšlenka existence tělesa, z kterého nemůže unikát ani světlo, existovala už od roku 1783 a přišel s ní tehdy John Michell. V roce 1916 odvodil Karl Schwarzschild hodnotu, pro poloměr do kterého musí být stlačena veškerá hmota, aby už nemohla odvrátit žádná síla zhroucení do gravitační singularity. Tato hodnota se označuje jako Schwarzschildův poloměr r_s , a vypočte se pomocí vzorce:

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2} \quad (5)$$

G je gravitační konstanta a c rychlost světla.

Černá díra je kosmický objekt s hmotou obrovské hustoty, který má obrovskou únikovou rychlost přesahující rychlost světla. Z tohoto důvodu nemůže z černé díry uniknout žádná částice ani žádný světelný paprsek.

Černé díry jsou důležitým článkem ve vývoji hvězd, galaxií a celého vesmíru. Jejich interakce navzájem a s obyčejnou hmotou (jak je tomu v případě kvazarů, blazarů a aktivních galaktických jader) se řídí dvěma zákony dynamiky černých děr, které jsou obdobou prvního a druhého zákona termodynamiky [5].



Obr.13 Simulovaná deformace obrazu Mléčné dráhy gravitační čočkou černé díry

5. Černé díry

Vznik černé díry si můžeme představit na hvězdě, jejíž hmotnost dosahuje přibližně desetinásobku hmotnosti Slunce. Hořením se uvolňuje energie dostatečná k vyrovnání tlaku vlastní gravitace zabraňující její zhroucení. Pokud tento rovnovážný stav bude narušen, hvězda se zhroutlí do sebe a tím v určitých případech vznikne černá díra. Ten bude narušen ve chvíli, když hvězda vyčerpá své jaderné palivo, nebude v ní už co moci kompenzovat spád tlaku a vlivem vlastní gravitace se začne hroutit. V případě smršťování hvězdy, sílí na jejím povrchu gravitační pole a úniková rychlost tím narůstá. Ve chvíli, kdy se poloměr zmenší jen na pouhých 30 kilometrů, vzroste úniková rychlost na 300 000 kilometrů za sekundu, tedy na rychlost světla. Tuto rychlost speciální teorie relativity nelze překonat a tak světlo vyslané z povrchu hvězdy neputuje do nekonečna, ale je vztaženo zpět gravitačním polem. Výsledkem toho všeho bude černá díra. Hranice černé díry, ze které neunikne žádná energie, se nazývá horizont událostí.

Obecná teorie relativity, vypovídá o existenci černých děr, ale také přímo předpovídá, že mohou vznikat přirozeně.

Existuje několik modelů vzniku černé díry:

- Gravitační kolaps

Gravitačně se zhroutlí v daném prostoru ve vesmíru hmota, díky procesu, který se nazývá gravitační kolaps. Z těchto procesů jsou nejznámější některá finální stadia evoluce hvězd. Například pokud poklesne tlakový gradient (tlak záření hvězdy) a hvězda se neudrží v hydrostatické rovnováze a rovněž je splněna podmínka dostatečného množství hmoty, aby následný kolaps nebyl zadržen například ve fázi neutronové hvězdy (tedy ve formě degenerovaného neutronového plynu). Takovýto kolaps hvězdy pak již není možné zastavit. Povrch hvězdy se zhroutlí pod horizont událostí a nevyhnutelně skončí v singularitě [7].

- Akumulace hmoty

Když v nějakém prostoru dochází v důsledku gravitačních sil k nakupování hmoty, gravitační pole takové oblasti sílí – nebo v jazyku relativity – zakřivení prostoru

v okolí se zvětšuje. Když úniková rychlost v nějaké vzdálenosti od centra gravitačního působení dosáhne rychlosti světla, vytvoří se horizont událostí, uvnitř kterého musí hmota nevyhnutelně skončit v singularitě [7].

Černé díry tohoto typu existují jako dva typy modelů:

- Primordiální černé díry
- Supermasivní černé

Primordiální černé díry mohly vzniknout v počátečních fázích vývoje vesmíru. Jsou to díry, které nevznikly kolapsem hvězd, ale vysoce stlačené látky, která pravděpodobně naplňovala vesmír po velkém třesku. Tyto černé díry jsou velmi zajímavé z hlediska kvantových efektů. Ve vesmíru by se jich mělo vyskytovat stále ještě velké množství, zatím však nebyly pozorovány a observačně potvrzeny. Takováto černá díra, která by měla hmotnost miliardy tun, by přesto měla poloměr asi 10^{-13} , tedy pro srovnání řádově s rozměrem neutronu či protonu. A mohla by klidně obíhat kolem Slunce, nebo centra Galaxie.

Černou díru, která se vytvoří gravitačním kolapsem a ustálí se ve stacionárním stavu, charakterizují pouze tři veličiny: hmotnost, elektrický náboj a moment hybnosti, který určuje její rotaci. Mimo těchto tří charakteristik si černá díra z původního objektu, který zkolaboval, neuchovává žádnou z vlastností.

Ve velmi hmotných hvězdách mohou jaderné reakce probíhat i po skončení fáze, kdy je spojováno hélium a vzniká uhlík. Jakmile je jádro dostatečně horké, může docházet k novým jaderným procesům. Velice složitý sled reakcí dokáže produkovat stále těžší prvky až po železo ^{56}Fe . Za železem již není možné získávat termonukleárními reakcemi další energii, protože železo má nejvyšší vazebnou energii ze všech prvků. Železo se hromadí v jádru, dokud nezačne docházet jaderné palivo. Až k tomu dojde, začne se jádro opět smršťovat, dokud dalšímu zhroucení nezabrání vylučovací princip [4].

Pauliho vylučovací princip však nedokáže zabránit zhroucení libovolné hvězdy bez ohledu na hmotnost. Pokud hvězda překročí Chandrasekharovu mez, nedokáže již Pauliho vylučovací princip gravitačnímu hroucení zabránit. Když se železné jádro velice hmotné hvězdy začne hroutit, na sebe nahuštěné elektrony začnou slabě interagovat. Ty pak mění protony na neutrony:



Díky tomu jsou z jádra hvězdy elektrony a protony vyloučeny a energie ve formě neutrin z hvězdy uniká. Ve chvíli kdy se sníží Pauliho tlak působící mezi elektrony, dojde velice rychle ke zhroucení jádra.

Černá díra odpovídá speciálnímu druhu řešení Einsteinových rovnic. Pro vznik černé díry je nutná nesmírně vysoká hustota. Například, aby ze Slunce vznikla černá díra, bylo by třeba je stlačit do koule o průměru okolo šesti kilometrů. Jakmile je hvězda stlačena do oblasti o poloměru menším, než je jistý kritický – Schwarzschildův – poloměr, je již působení gravitace tak silné, že nic, dokonce ani světlo, nedokáže uniknout [4].

5.1 Klasifikace černých děr

Černé díry můžeme podle velikosti rozdělit do čtyř kategorií:

- *Prvotní (primordiální) černé díry*: Tyto černé díry by měly mít nepatrné rozměry elementárních částic a mohly vznikat v ranných fázích vývoje Vesmíru.
- *Hvězdné černé díry*: Tyto černé díry vznikly jako závěrečné fáze hvězdného vývoje a jejich hmotnosti jsou několikanásobkem hmotnosti Slunce. Předpokládáme existenci takových objektů v Galaxii na základě nepřímého pozorování.
- *Střední černé díry*: Zástupci této skupiny nebyly dlouho známy. Hmotnost $100 M_S$ až $1\,000 M_S$.
- *Galaktické černé díry*: Černé díry s hmotností srovnatelnou s hmotností galaxií nebo jejich jader. Tvoří jádra některých aktivních galaxií, pravděpodobně i naší vlastní Galaxie a jádra kvazarů. Pozorována je řada objektů tohoto typu. Velikost centrální výdutí galaxií pravděpodobně souvisí s hmotností centrální černé díry [6].

5.2 Singularita

Podle obecné relativity se předpokládá, že v černé díře pod horizontem událostí, existuje singularita. Je to místo, které se charakterizuje jako nekonečné zakřivení prostoročasu a nekonečně velké gravitační síle.

Prostoročas pod horizontem událostí je specifický tím, že singularita je v každé z pozorovatelných budoucností každého objektu, který projde horizontem událostí, a tedy, že se vše uvnitř horizontu událostí pohybuje směrem k ní (Penrose a Hawking). To znamená, že mezi původním návrhem Johna Michella z roku 1783 a relativistickým pojetím černé díry je konceptuální nesrovnalost. V Michellově teorii se úniková rychlost rovnala rychlosti světla, ale bylo například stále teoreticky možné vytáhnout objekt z černé díry pomocí lana. Obecná relativita tuto mezeru eliminuje, protože jakmile je objekt za horizontem událostí, jeho časová osa obsahuje konec samotného času a není možný návrat světočáry ven přes horizont událostí [7].

Očekává se, že budoucí zjemnění anebo zobecnění obecné relativity (především kvantové gravitace) změní pohled na podstatu nitra černé díry. Většina teoretiků interpretuje matematické rovnice popisující singularitu tak, že naznačují nekompletnost současné teorie a že k plnému pochopení singularity musí do hry vstoupit nové jevy. Tato otázka může však být pouze akademická, jelikož hypotéza kosmické cenzury předpokládá, že v obecné relativitě neexistují nahé singularity: všechny singularity jsou schované za horizontem událostí, a nelze je tedy prozkoumat [7].

Objekty, které se nacházejí v gravitačním poli, jsou vystaveny časové dilataci, což je zpomalování času. Tento jev byl potvrzen při experimentu s raketou Scout v roce 1976 a počítá s ním i navigační systém GPS. Dilatace času se bude projevovat zejména výrazně v blízkosti horizontu událostí.

Představme si nešťastného kosmonauta padajícího nohama napřed směrem do středu nerotující černé díry Schwarzschildova typu. Čím blíže se dostane k horizontu událostí, tím déle trvá fotonům, které vyzařuje, uniknout gravitačnímu poli černé díry. Vzdálený pozorovatel uvidí kosmonautův zpomalující se sestup při přibližování se k horizontu událostí, který zdánlivě nikdy nedosáhne. Astronaut z vlastního pohledu překročí horizont událostí a dosáhne singularity v konečném čase. V momentě, kdy překročí horizont událostí, ho nebude možné pozorovat z okolního vesmíru. Během pádu by si všiml, že světlo přicházející z jeho chodidel, potom kolen a tak dále se

podléhá zvětšujícímu se rudému posuvu, až se stane neviditelným. Když se přiblíží k singularitě, gradient gravitačního pole se od hlavy k chodidlům značně zvětší. Bude se cítit natažený a nakonec ho roztrhnou slapové síly, protože v jeho chodidlech bude působit mnohem větší gravitace než na úrovni hlavy. Blízko singularity se gradient stane dostatečně velkým k roztržení samotných atomů. Bod, ve kterém se slapové síly stávají zhoubnými, závisí na hmotě černé díry. Pro velké černé díry, jako ty v centrech galaxií, bude tento bod ležet až pod horizontem událostí, takže se kosmonaut může teoreticky dostat přes horizont událostí živý a v případech supermasivních černých děr tento přechod nemusí dokonce ani pocítit. Naopak u malých černých děr se tyto slapové síly mohou stát osudnými mnohem dříve, než kosmonaut dosáhne horizontu událostí [7].

5.3 Detekce černých děr

Ve dvacátém století se objevily dvě nové teorie, ty zcela změnili nejen náš pohled na prostor a čas, ale i naši představu reality. V podstatě ještě dnes se rozpracovávají její důsledky a snaží se spojit do jednotné teorie, která popíše celý vesmír. Jsou to obecné teorie relativity a kvantová mechanika. Obecná teorie relativity se zabývá prostorem a časem. Popisuje hmotu a energii ve vesmíru a jak je prostoročas zakřivován. Tyto efekty jsou patrnější na velkých délkových a časových mírách.

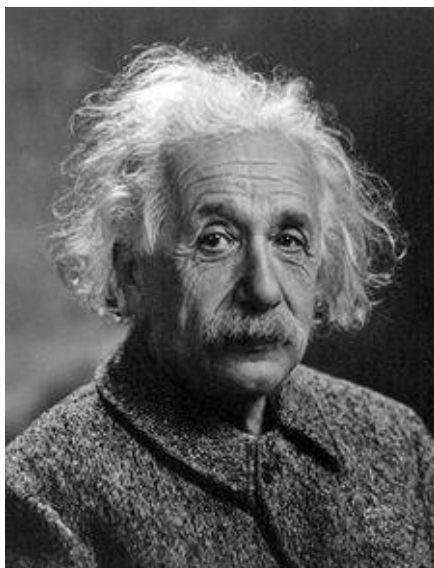
Kvantová teorie se naopak zabývá světem velmi malých rozměrů. Základním kamenem teorie je tzv. princip neurčitosti. Podle něho nelze určit současně rychlost a polohu částice přesně. Čím přesněji totiž změříme jednu z těchto veličin, tím neurčitější se stane naše znalost druhé.

Původní Einsteinovu teorii relativity, dnes nazýváme jako speciální teorii relativity. Tu předložil ve svém článku v roce 1905. Popisuje, jakým způsobem se pohybují objekty v prostoru a čase. Jednou z jejích základních myšlenek je, že čas není univerzální veličinou, která existuje odděleně od prostoru a nezávisle na něm. Budoucnost a minulost jsou do značné míry analogií směrů jako nahoru a dolů, vlevo a vpravo v něčem, co se nazývá prostoročas.

Speciální teorie relativity sice propojila prostor s časem, avšak prostor a čas i nadále zůstaly pevným jevištěm, na kterém se události odehrávají. Podle ní se sice

můžete pohybovat prostoročasem po různých drahách, ale nijak toto prostoročasové pozadí neovlivníte. Tato představa však podstatně změnila svou podobu v roce 1915, kdy Einstein formuloval obecnou teorii relativity. Vyšel z revoluční myšlenky, že gravitace není pouhou silou, která působí na pevném prostoročasovém pozadí, nýbrž se představuje zakřivením prostoročasu samého, vyvolané rozložením hmotnosti a energie v něm. Objekty jako dělové koule a planety se snaží pohybovat prostoročasem po přímkách. Prostoročas však není plochý, nýbrž zakřivený, zvrásněný, proto se jejich dráhy jeví jako ohnuté. Země se snaží pohybovat prostoročasem po přímce, ale zakřivení prostoročasu vyvolané hmotností Slunce ji nutí kroužit kolem Slunce. Obdobně se světlo snaží sledovat přímou dráhu, ale zakřivení prostoročasu v okolí Slunce způsobuje ohyb paprsků světla ze vzdálených hvězd procházejících v jeho blízkosti [1].

Einsteinovo objevením se kompletně změnil pohled na prostor a čas. Prostor a čas se staly dynamickými veličinami, které jak události ovlivňují, tak jsou událostmi ovlivňovány.



Obr. 14 Albert Einstein

Energie a hmota mají jednu velice základní vlastnost a to, že jsou vždy kladné. Z tohoto důvodu se vlivem gravitace vždy tělesa přitahují. Podobně si k sobě Slunce udržuje na oběžné dráze planety a nedovolí jim odletět do mezihvězdného prostoru. Jelikož je hmotnost vždy kladná, znamená to, že prostoročas se bude zakřivovat sám do sebe. Z tohoto hlediska mluvíme o kladné křivosti. Můžeme si pod tím představit to, že

v důsledku zakřivení je odříznuta část vesmíru od okolí. A právě tato oblast bude černou dírou, poněvadž objekty do ní mohou padat, ale nic ji nemůže opustit. To by totiž vyžadovalo pohyb rychlejší než světlo a to teorie relativity neumožňuje.

Pokud se zakříví prostor do sebe, pak dochází ke vzniku singularit. V této souvislosti to znamená místa, kde prostoročas má svůj počátek nebo konec. Počátkem by měl být velký třesk a konec kolabující hvězda a cokoli co do černé díry spadne.

Einsteinova obecná teorie relativity předpovídá existenci singularit. Jeho rovnice však v singularitách ztrácejí smysl.

V roce 1973 se Stephen Hawking začal zabývat účinkem principu neurčitosti na částici v zakřiveném prostoročase v blízkosti černé díry. Dospěl k pozoruhodnému závěru. V důsledku principu neurčitosti bude z černé díry unikat stálý proud částic a záření. Černá díra je taková oblast prostoročasu, z níž neunikne nic, pokud se to pohybuje rychlostí menší, než je rychlost světla. Feynmanův přístup ke kvantové teorii předpokládá, že se částice může pohybovat prostoročasem po libovolné „světočáře“, tedy i nadsvětelnou rychlostí. Ale pravděpodobnost, že se dostane na dlouhou vzdálenost nadsvětelnou rychlostí, je velice malá; částice se však může pohybovat nadsvětelně dostatečně daleko, aby se dostala ven z černé díry, a pak se už pohybovat podsvětelnou rychlostí. Takto dovolí princip neurčitosti částicím uniknout z oblasti, kterou jsme dříve pokládali za jejich doživotní vězení. Že by částice unikla z černé díry o hmotnosti odpovídající Slunci, je velice nepravděpodobné, protože by typická částice musela cestovat nadsvětelnou rychlostí několik kilometrů. Mohly by však existovat malé černé díry, které se vytvořily ve velice raném vesmíru. Tyto černé díry by mohly mít rozměr atomového jádra a přesto hmotnost několik miliard tun [1].

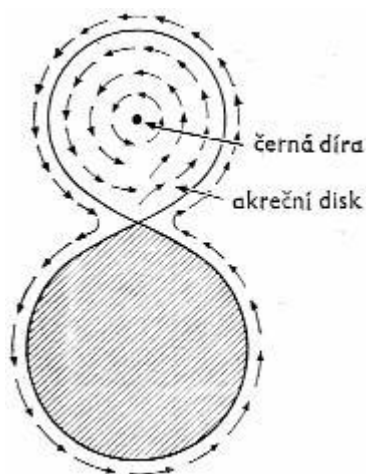
5.4 Pozorování černých děr

Předpověď záření černých děr byla prvním netriviálním výsledkem získaným kombinací Einsteiny teorie obecné relativity s kvantovým principem.

Černé díry nemají v podstatě žádné pozorovatelné vlastnosti, které by dopomohly k objasnění toho, co se děje uvnitř. Můžeme je popsat třemi základními parametry: hmotou, moment hybnosti a elektrický náboj (čtvrtou teoreticky přípustnou vlastností je magnetický náboj, v přírodě však pozorován nebyl pozorován).

Podle teorie nelze objevit černé díry podle vyzařované energie nebo odraženého světla od hmoty v nitru. Jde však odhadnout výskyt podle jevů, které se odehrávají v jejich blízkosti, kterým je například jev gravitační čočky a podle hvězd obíhajících kolem prostotu zdánlivě prázdného.

Ten nejviditelnější efekt je hmota padající do černé díry. Ta se soustřeďuje do otáčejících se akrečních disků kolem černé díry, do doby než bude úplně pohlcena. Disk se zahřívá a tím způsobí vyzařování rentgenového a ultrafialového záření. Při tomto procesu se může přeměnit až 50 % zbytkové hmoty na záření. Další efekty, které můžeme pozorovat, jsou úzké výtrysky částic, ty se pohybují v ose akrečního disku.



Obr. 15 Černá díra a akreční disk

Akreční disky, výtrysky a obíhající objekty nemusí obíhat pouze kolem černých děr, ale najdeme je například i kolem neutronové hvězdy či kolem bílého trpaslíka. Průběh u takovýchto atraktorů, je velmi podobný těm v okolí černých děr. Proto také platí, že pozorování akrečního disku a orbitálních pohybů většinou pouze indikuje

existenci kompaktního objektu s určitou hmotností, ale vypovídá jen velice málo o jeho podstatě. Identifikovat takový objekt jako černou díru je možné pouze tehdy, pokud se prokáže, že se nemůže jednat o jiné dostatečně hmotné a kompaktní těleso nebo provázaný systém těles. Většina astrofyziků, dle obecné teorie relativity, v takovém případě předpokládá, že se koncentrace hmoty s dostatečnou hustotou musí nevyhnutelně zhroudit do černé díry v kosmologicky krátkém čase. Jeden důležitý pozorovatelný rozdíl mezi černými děrami a jinými kompaktními objekty je, že jakákoli kolabující hmota, která narazí na takový kompaktní hmotný objekt v relativistické rychlosti, vyvolá nepravidelná vzplanutí rentgenového záření nebo jiného tvrdého záření. Nedostatek takovýchto vzplanutí kolem kompaktní koncentrace hmoty se považuje za důkaz, že objekt je černá díra bez povrchu, na který by mohla hmota náhle narazit. (celý jev se správně nazývá gravitační mikročočkový efekt, to proto, že obraz zakřivila jen jedna černá díra, kdežto gravitační čočka je způsobena mnohdy více galaxiemi) [7].

V roce 1971 Stephen Hawking dokázal, že se celková plocha horizontu událostí jakékoli skupiny černých děr nikdy nezmenší. Toto tvrzení se příliš podobalo druhému termodynamickému zákonu, přičemž plocha hraje v tomto případě úlohu entropie. Proto Jacob Bekenstein navrhl, že entropie černé díry je skutečně úměrná ploše jejího horizontu událostí. V roce 1975 aplikoval Hawking kvantovou teorii pole na zakřivený prostoročas okolo horizontu událostí a objevil, že černé díry můžou vyzařovat tepelné záření, známé jako Hawkingovo záření. Z prvního zákona mechaniky černých děr vyplývá, že entropie černé díry se rovná čtvrtině plochy horizontu událostí. Tento všeobecný výsledek je aplikovatelný i na kosmologické horizonty jako de Sitterův prostoročas. Později bylo navrženo, že černé díry jsou objekty s maximální entropií, což znamená, že maximální entropie oblasti vesmíru je entropie největší černé díry, která se do oblasti vejde. Skutečnost, že maximální entropie v daném objemu je úměrná povrchu tohoto objemu a ne objemu jako takovému vedla k formulaci tzv. holografického principu [7].

Hawkingovo záření vzniká na horizontu, jde o kvantově-mechanický projev existence vakua. To však znamená, že černé díry nejsou tak bezedné propasti a probíhá u nich pomalé vypařování. Tyto efekty jsou pro astronomické černé díry zanedbatelné, ale významné pro hypotetické miniaturní černé díry. Předpokládá se dokonce, že malé

černé díry mohou díky vypařování i po nějaké době zcela zmizet. Tímto pádem má černá díra i předepsanou délku života, která je úměrná její velikosti.

V roce 1974 Stephen Howking zkoumal, jak by se hmota měla chovat v blízkosti černé díry podle zákonů kvantové mechaniky.

Nevěřil v té době svým výpočtům, protože neustále ukazovaly na to, že by černá díra měla vyzařovat stálý proud částic. V té době se však uznával názor, že černá díra nemůže vyzařovat vůbec nic. O této skutečnosti ho přesvědčil fakt, že spektrum vyzařovaných částic vycházelo přesně termální. Znamená to, že černá díra vyzařuje částice tak, jako kdyby to bylo obyčejné horké těleso. Její teplota je při tom přímo úměrná povrchové gravitaci a nepřímo úměrná její hmotnosti.

Kvantová mechanika dovoluje částicím uniknout z černé díry, to klasická mechanika zakazovala. Tyto odlišnosti jsme schopni pozorovat i při tzv. tunelovém jevu, kdy se částice dokáže „protunelovat“ bariérou, což podle klasické mechaniky nebylo možné. Kolem černé díry je tloušťka bariéry úměrná jejím rozměrům. Z černé díry obrovských rozměrů, může uniknout jen nepatrné množství částic. Naproti tomu z menších černých děr, mohou unikat částice velice rychle. To dokazují podrobné výpočty, které vypovídají o tom, že částice mají termální spektrum, vzrůstající s klesající hmotností díry. Když bychom uvažovali například černou díru o hmotnosti Slunce, měla by teplotu rovnou pouze desetimiliontině kelvina nad absolutní nulou. Avšak černá díra, s hmotností pouze miliardu tun, taková by mohla být zrovna primordiální černá díra z počátku vesmíru, by měla rozměry odpovídající rozměrům protonu a teplotu asi 120 miliard kelvinů. To by odpovídalo střední energii vyzařovaných částic rovné asi 10 milionům elektronvoltů. Pokud dosáhne černá díra takovéto teploty, je schopna vytvářet elektronové a pozitronové páry a částice s nulovou klidovou hmotností, jako jsou fotony, neutrina a gravitony (předpokládané nositele gravitační energie).

Černé díře postupným vyzařováním částic, postupně klesá její hmotnost. Čím více se zmenšuje, tím snadnější je pro částice snadnější prodrat se ven a tím způsobem se září čím dál víc, až se nakonec celá vyzáří. Tato doba závisí na její počáteční velikosti, černá díra hmotnosti Slunce vydrží 10^{66} let. Avšak právě primordiální černá díra by se vypařila za řádově 10 miliard let, což je doba, která uplynula od Velkého třesku. Takové černé díry by byly schopny nyní vyzařovat tvrdé gama částice o energii okolo 100 milionů elektronvoltů.

5.5 Gravitační srážka dvou černých děr

Pokud kolem sebe černé díry obíhají dostatečně blízko a jsou k sobě gravitačně vázané, budou vyzařovat gravitační vlny, jež předpověděla obecná teorie relativity. To znamená, že se černé díry k sobě budou stále více přibližovat. V určité době dojde k tomu, že bude gravitační interakce natolik silná, že se černé díry začnou spojovat a horizonty černých děr začnou deformovat a celková plocha jejich horizontů se zvětší. Při tomto procesu se vyzáří velké množství energie ve formě gravitačních vln. Tyto procesy a právě i jejich výskyt by se dali zachytit pomocí detektorů gravitačních vln.

Díky nelinearitě Einsteinových rovnic, která zaručovala stabilitu černých děr, nastolila překážku při hledání numerického řešení popisujícího srážku černých děr. Přesný postup zániku teda není znám a nebyl ještě nikdy pozorován. Z numerických modelů, které jsou k dispozici vyplývá, že pro nerotující černé díry o stejné hmotnosti se při srážce na gravitační vlny přemění až 3% jejich hmotnosti.

Gravitační vlny vznikají při vzájemném pohybu těles v gravitačním poli, velice významnými zdroji jsou především hvězdy v konečném stádiu vývoje. Jejich zdrojem může být nerovnoměrný pohyb hmoty, ke kterému dochází v relativně malé oblasti prostoru.



Obr. 16 Simulace gravitační vlny

5.6 Detekce gravitačních vln

Existenci gravitačních vln předpověděla už Einsteinova teorie. Jsou to poruchy gravitačního pole šířící se v prostoru rychlostí světla, jako vlnky na povrchu rybníka. Nicméně zatímco elektromagnetické záření může být absorbováno úplně, gravitační vlny mohou cestovat prostorem, aniž by ztratili svoji energii. Díky této velmi nízké interakci, je detekce gravitačních vln opravdu obtížná. Gravitační vlny doposud nebyly pozorovány přímo, ale můžeme pozorovat jejich nepřímé důsledky.

Russell Alan Hulse a Joseph Hooton Taylor, Jr. objevili, že tyto vlny byly zatím ověřeny pouze nepřímým důkazem, měřením dvou kolem sebe obíhajících neutronových hvězd. Zjistilo se, že oběžná doba systému se pravidelně zkracuje o hodnotu, kterou předpověděla Einsteinova teorie. Je to způsobeno především tím, že systém ztrácí svou energii právě vyzařováním gravitačních vln. Za tento objev jim byla v roce 1993 udělena Nobelova cena.



Obr. 17 Joseph Taylor a Russel Hulse

Aby bylo možné odlišit gravitační vlnu od zakřiveného pozadí, je nutno oddělit tu část křivosti, která je vyvolána vlnou, od části křivosti, která přísluší zakřivenému prostoročasu. Toto oddělení je možné pouze tehdy, je-li charakteristická vlnová délka λ gravitační vlny mnohem menší než charakteristický poloměr křivosti ρ prostoročasu, na jehož pozadí se vlny šíří, tzn. $\lambda \ll \rho$ [7].

Gravitační vlny se výrazně odlišují od vln elektromagnetických, které přenášejí elektrický náboj, ty při střetnutí nijak neovlivňují a v klidu projdou. Gravitační vlny přenášejí energii ekvivalentní k hmotnosti, když se střetne více gravitačních vln, budou

se ovlivňovat a to například vzájemným rozptylováním. Energie, kterou tyto vlny šíří působí jako zdroj gravitačního pole.

Tab. 3 Detektory gravitačních vln

Detektor	Umístění	Velikost	Provoz
MARK 2 USA	USA (Pasadena)	40 m	1991
TAMA 300	Japonsko (Tokyo)	300 m	1999
GEO 600	Německo (Hannover)	600 m	2000
LIGO USA	USA (Hanford, Livingston)	4 km	2002
VIRGO Itálie (Pisa) 3 km 2002	Itálie (Pisa)	3 km	2002
LISA	Oběžná dráha kolem Slunce	5 000 000 km	2010

5.7 Detektory gravitačních vln

Většina dnešních systému pro přímou detekci gravitačních vln, je založena na laserové interferometrii. Mezi největší pozemské detektory gravitačních vln patří, LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), VIRGO a GEO 600. Ty sice existenci gravitačních vln přímo nepotvrdily, ale přinesly spoustu užitečných informací, a to zejména o počátečních fázích vývoje vesmíru. Zařízení LIGO je dosud největším detektorem gravitačních vln na světě. Je to velice citlivé zařízení, citlivost dosahuje až hodnoty 10^{-23} , tvoří jej dva stejné detektory, umístěné na různých místech. Jeden je umístěn v Hanfordu ve státě Woshington, za jeho stavbu je zodpovědná universita Caltech. Druhá stavba je v Livingstonu ve státě Luisiana, která proběhla pod patronátem MIT. Jsou v provozu již od roku 2002 a využívají ke své práci interferometrů ve tvaru L, s rameny o délce 4km. V těchto ramenech je udržováno velmi vysoké vakuum, vzhledem ke svému objemu se jedná o největší vakuovou aparaturu na světě. Zařízení je izolováno od rušivých vlivů, kterými mohou být například vibrace, kosmické záření, poruchy magnetické pole a další.



Obr. 18 Detektor gravitačních vln LIGO

Dnešní systémy pro detekci gravitačních vln fungují na principu laserové interferometrie. Laserový svazek je polopropustným zrcadlem rozdělen do dvou kolmých ramen, na jejichž koncích jsou dokonale vybroušená odrazná zrcátka na zavěšených testovacích tělesech. Právě pohyb těchto tělísek se sleduje. Odražené paprsky se rameny vrací přes rezonanční dutinu zpět, interferují a elektronicky jsou zaznamenávány změny interferenčních proužků. Citlivost těchto zařízení z velké části závisí na velikosti ramen [10].

Dvojice těles v každém rameni (T_1 a T'_1 resp. T_2 a T'_2) vytvoří tzv. Fabryho-Perotovu rezonanční dutinu. Laserový paprsek bude nucen se v těchto dutinách mezi tělesy mnohonásobně odrazit (více než tisíckrát), než dopadne na fotodetektor. To umožní efektivně prodloužit optickou délku zařízení, které bude o tři řády větší než jeho „fyzické rozměry“, t.j. $L_{ef} = 10^7$ m. Pokroku má být dosaženo i ve schopnosti zařízení zaznamenávat nepatrné vzájemné pohyby testovacích těles ΔL projevující se změnami interferenčních obrazců. V principu budou měřitelná posunutí řádově $\Delta L = 10^{-16}$ m! To umožní počítačová statistická analýza počtu fotonů dopadajících do fotodetektoru. Protože platí vztah:

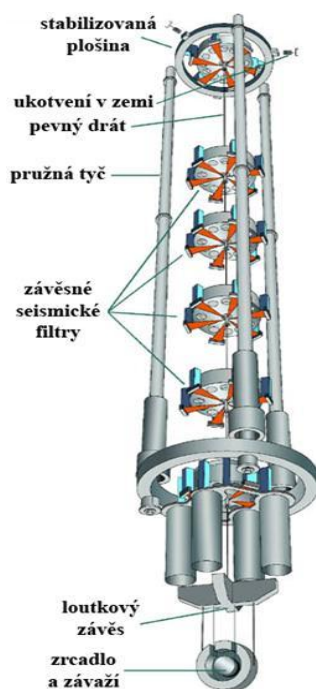
$$h = \Delta L_1 - \Delta L_2 / L \quad (7)$$

dostáváme pro citlivost detektoru LIGO hodnotu citlivosti 10^{-23} [11].

Ke zjištění gravitačních vln od standardních zdrojů, jako jsou právě supernovy, srážka dvou neutronových hvězd nebo černých děr by tato citlivost měla být dostačující. Očekávaná frekvence detekovaných vln je menší než 10 kHz. Když dopadne gravitační vlna, změní se délka ramen jen nepatrně a to o pouhých 10^{-18} m, což je zhruba tisícinu poloměru protonu.

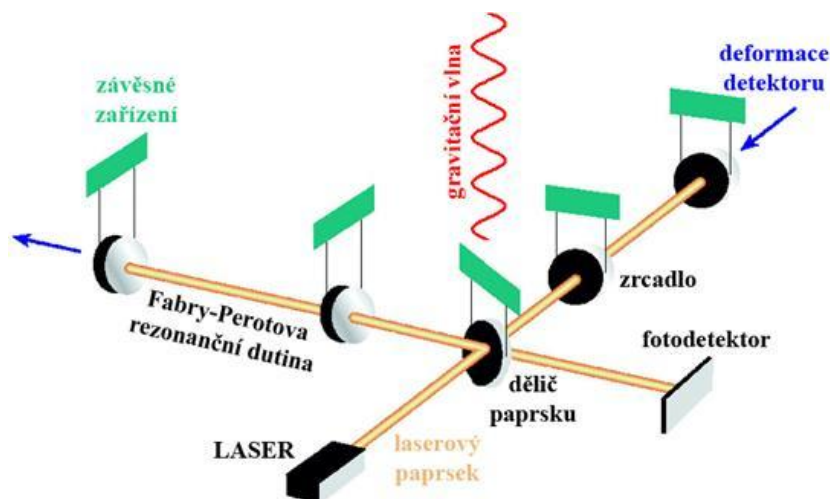
Tab. 4 Parametry aparatury LIGO

Parametry aparatury LIGO	
Délka ramene km	4
Průměr ramene cm	60
Relativní přesnost	10^{-21}
Laser Nd: m	YAG, $1,06 \times 10^{-6}$
Frekvence kHz	10 Hz - 10
Pracovní tlak Torr	10^{-9}



Obr. 19 Seismický filtr

Dalším takovým zařízením je největší evropský detektor VIRGO, který je v provozu od roku 2003. Skládá se ze dvou pravoúhlých interferometrů s ramenem dlouhým 3 kilometry, do kterých se vysílá laserový paprsek. Princip je v podstatě stejný jako u předchozího detektoru. V každém rameni, jsou Fabry-Perot rezonanční dutiny vytvořeny dvěma zrcadly, mezi kterými se paprsek mnohonásobně odráží a díky tomu se rozšiřuje optická délka od 3 do cca 100km. To má za následek zvýšení citlivosti. Oba paprsky laserového světla se po odrazu opět spojí a dopadají do fotodetektoru. Je-li interferometr v klidu, to znamená, neprochází-li gravitační vlna, dorazí oba paprsky ve stejné fázi. Pokud gravitační vlna bude procházet, ramena se budou deformovat a paprsky tak již ve stejné fázi dopadat nebudou. Aby citlivost byla dosažena co největší a odražené světlo se nerozptylovalo o molekuly vzduchu, je uvnitř trubic vysoké vakuum, které dosahuje tlaku až 10^{-8} Pa, Jelikož seismické vlny Země způsobují řádově miliardkrát větší vibrace než gravitační vlny, je potřeba celé zařízení řádně odizolovat. To se provede pomocí tří symetricky zavěšených nosníků se seismickými filtry. Tyto nosníky zabraňují pohybu ve svislém směru a ve vodorovném směru slouží složené kyvadlo. Vše je řádně ukotveno a elektronicky monitorováno. Virgo dosahuje citlivosti v širokém frekvenčním pásmu, a to od 10 do 10 000 Hz. To by mělo umožnit detekci gravitačního záření způsobené kolizí binárních systémů (hvězdy nebo černé díry).



Obr. 20 Schéma detektoru VIRGO

Tab. 5 Parametry detektoru gravitačních vln VIRGO

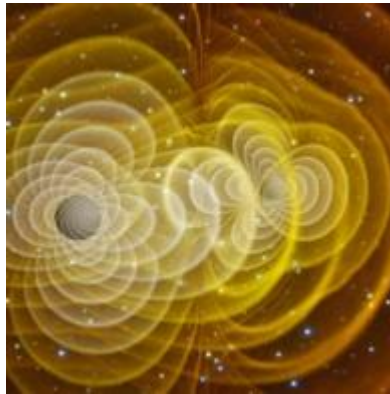
Délka ramen:	3 km
Vakuový tubus:	120 cm průměr, svařovaný, bez těsnění
Tlak po zahřátí na 150°C:	méně než 10^{-9} mbar
Parciální tlak uhlovodíků	10^{-13} mbar
Laser	Nd:YAG na 1064 nm, 20 W
Útlum seismických vln	10^{-11} při 10 Hz
Frekvenční rozsah	10 Hz až 6 kHz
Citlivost při 10 Hz	$h \sim 3 \times 10^{-21}$
Citlivost při 1 kHz	$h \sim 3 \times 10^{-23}$

Jak již je zmíněno v Tab. 3, plánovaným detektorem gravitačních vln, bude projekt LISA, na jehož dokončení se teprve čeká. Tento detektor umístěný ve Vesmíru se bude skládat ze tří sond tvořící interferometrický systém, s rameny od sebe vzdálenými 5 000 000 km a relativní citlivostí h až 10^{-24} . Bude pracovat s frekvencemi od 10^{-4} Hz do 1 Hz, čímž umožní sledovat i supermasivní černé díry s pomalými frekvencemi gravitačních vln. Tato soustava bude obíhat kolem Slunce ve vzdálenosti 1 AU. I od tohoto zařízení se očekává, že bude možno pozorovat reliktní záření z prvopočátků Vesmíru a zjistit tak, jak vypadal Vesmír v raných fázích vývoje.

Nejsilnější zdroje gravitačních vln ve Vesmíru jsou právě binární masivní černé díry, které LISA bude moci detekovat v celém viditelném prostoru. Astronomové se intenzivně zajímají o masivní černé díry, protože existuje stále mnoho otázek o jejich vesmírném výskytu nezodpovězených:

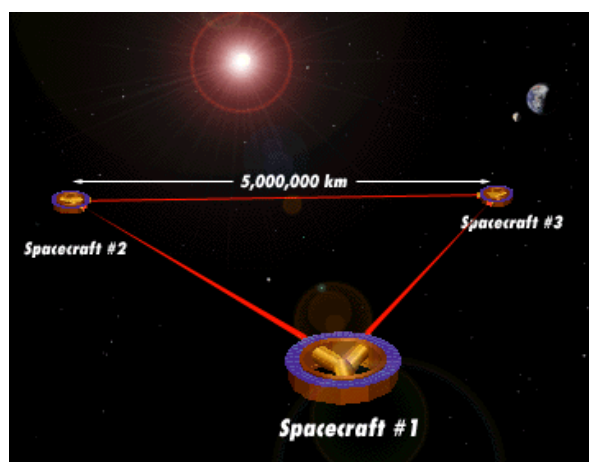
- Jak vznikaly v raném vesmíru
- Byly původně velké nebo malé
- Jak rychle rostou
- Jak často se sloučí s jinými černými dírami

LISA se bude zabývat těmito otázkami. Bude přinášet přesné informace o hmotnosti černých děr, jak rychle se otáčejí, a jak silné gravitační pole mezi nimi panuje.



Obr. 21 Počítačová simulace binární černé díry-spojení

Pozorovat slučování masivních černých děr, ale není jediný způsob, jak zkoumat jejich tajemství. Černé díry v centru galaxie jsou obklopeny rojem obíhajících hvězd, uvězněných v jejich gravitačním sevření. V naší vlastní galaxii Mléčné dráze, jsme pozorovali hvězdy v blízkosti černé díry Sgr A * více než deset let, trvá dlouho, než hvězda obkreslí celý orbit. Děje se to v přítomnosti každé galaktické černé díry, a pokud se hvězda ocitne příliš blízko, bude neustále přitahována blíž a blíž, až skončí v jejich útrokách. Právě díky tomu a při tom vznikajícím gravitačním vlnám, budou mít možnost astronomové odhalit tvar a strukturu gravitačního pole v jejich okolí a posunout se tak dál v jejich chápání. LISA je mimořádně originální a technicky odvážné rozhodnutí. Otevírá se zcela nový způsobem pozorování vesmíru, s obrovským potenciálem rozšířit naše znalosti fyziky a astronomie.



Obr. 22 Rozvržení sond detektoru grav. vln LISA

5.8 Zánik černých děr

O konečných stavech černých děr nerozhoduje, zda vznikla zhroucením objektu, který byl tvořen hmotou nebo antihmotou, nebo na jeho tvaru.

Závěrečná fáze vypařování černé díry by probíhala tak prudce, že by skončila obrovskou explozí. Její mohutnost by závisela na tom, kolik různých druhů elementárních částic by bylo přítomno. Pokud - jak se dnes obecně věří - jsou elementární částice složeny z šesti druhů kvarků, představovala by závěrečná exploze ekvivalent výbuchu deseti milionů megatunových vodíkových bomb. Podle konkurenční teorie Rolfa Hagedorna z CERN, Evropského centra pro jaderný výzkum v Ženevě, by mělo existovat nekonečně mnoho různých elementárních částic s větší a větší hmotností. Jak se černá díra zmenšuje a zároveň narůstá její teplota, měla by produkovat stále větší a větší počet druhů elementárních částic. Pak by výsledná exploze byla možná až stotisíckrát mohutnější, než odpovídá výpočtu na základě kvarkové hypotézy. Pozorování výbuchů černých děr by tedy mohlo poskytnout velmi důležité informace o fyzice elementárních částic, které možná nepůjde získat jiným způsobem [1].

Když by explodovala černá díra, doprovázelo by tento jev obrovské množství vysokoenergetického gama záření. Sice by se dalo toto záření sledovat například z družic nebo stratosférických balónů, zařízení by muselo být ale dosti veliké, proto aby bylo schopno zachytit významnější množství fotonů gama.

Samotný velký třesk připomíná explozi černé díry, jenomže v mnohanásobně větších rozměrech. Můžeme tedy doufat, že porozumíme-li, jak se tvoří částice kolem černé díry, pozorujeme i tomu, jak velký třesk porodil vše ve vesmíru. V černé díře hmota kolabuje a navždy se ztrácí, místo ní se však tvoří nová. Možná měl vývoj vesmíru fázi, kdy hmota kolabovala a byla znovu stvořena při velkém třesku [1].

To v podstatě dokázal i Hawking ve svých výpočtech a myšlenkou kvantového vypařování černých děr. Dokázal, že černá díra není zas až tak černá a že kvantové zákony dokazují, že se na horizontu událostí neustále rodí nové částice. Ty pak odnášejí část její energie do prostoru, čím zmenší její hmotnost a v určitém spektru umožňují pozorování černé díry. Ze začátku je únik pozvolný, ale jak se černá díra zmenšuje, získává proces na dynamičnosti, až na konec dojde k její explozi.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo shrnutí rešeršního charakteru, vzniku a vývoje hvězd. Práce popisuje vývoj hvězd od velkého třesku až po jejich konečná stádia. A to zejména vývoj velmi hmotných hvězd, které se vlivem vlastní gravitace zhroutí do sebe až pod horizont událostí a mohou z nich vzniknout tak černé díry.

Tyto vesmírné objekty jsou stále zahaleny spoustou nezodpovězených otázek, a proto se tato práce ve své druhé části zaměřuje výhradně na ně. Na možné způsoby jejich detekce a na jejich obecné vlastnosti. V příštích letech se plánuje vesmírný projekt, který by jak usnadnil a zpřesnil detekci gravitačních vln, tak by posunul lidstvo zas o kus dál v pochopení vzniku vesmíru.

7. Seznam literatury

- [1] Hawking, S.: Černé díry a budoucnost vesmíru. Praha, Mladá fronta, 1995. 182 s. ISBN 80-204-0515-1
- [2] Lesch, H., Müller, J.: Velký třesk - druhé dějství. Euromedia Group, k.s., 2005. 368 s. ISBN 80-242-1460-1
- [3] Gribbin, J.: Životopis vesmíru – od velkého třesku po zánik vesmíru. Praha, Mladá fronta, 2009. 272 s. ISBN 978-80-204-1902-6
- [4] Hey, T., Walters, P.: Nový kvantový vesmír. Praha, Argo, 2005. 429 s. ISBN 80-7203-699-8
- [5] Al-Khalili, J.: Černé díry, červí díry a stroje času. Praha, AURORA, 2003. 263 s. ISBN 80-7299-069-1
- [6] Astronomia - <http://objekty.astro.cz/galaxie/10/>
- [7] Wikipedie, otevřená encyklopedie - <http://cs.wikipedia.org/>
- [8] Astronomický ústav - <http://www.asu.cas.cz/>
- [9] Galaxie - http://galaxie.web2001.cz/hvezdy/b_trpaslik.html
- [10] Astropis - http://www.astropis.cz/Rocniky/txt2000_1.pdf
- [11] Katedra teoretické fyziky - Matematicko-fyzikální fakulta University Karlovy
<http://utf.mff.cuni.cz/~podolsky/GraVlny/GraVlny.htm>
- [12] <http://vacek.osoba.cz>

8. Seznam obrázků

- Obr. 1 - Rozpínání vesmíru
- Obr. 2 - Rudý a modrý posuv světla zdroje
- Obr. 3 - Edwin Powell Hubble
- Obr. 4 - Vznik hvězd
- Obr. 5 - Hertzsprungův – Russelův diagram
- Obr. 6 - Slunce
- Obr. 7 - Červený obr Betelgeuse
- Obr. 8 - Planetární mlhovina NGC 6302
- Obr. 9 - Krabí mlhovina
- Obr. 10 - „Cibulovitá“ struktura jádra hmotné hvězdy
- Obr. 11 - Rovnováha hvězd bez TJ syntézy
- Obr. 12 - Binární systém
- Obr. 13 - Simulovaná deformace obrazu Mléčné dráhy gravitační čočkou černé díry
- Obr. 14 – Albert Einstein
- Obr. 15 - Černá díra a akreční disk
- Obr. 16 - Simulace gravitační vlny
- Obr. 17 - Joseph Taylor a Russel Hulse
- Obr. 18 - Detektor gravitačních vln LIGO
- Obr. 19 - Seismický filtr
- Obr. 20 - Schéma detektoru VIRGO
- Obr. 21 - Počítačová simulace binární černé díry-spojení
- Obr. 22 - Rozvržení sond detektoru grav. vln LISA

9. Seznam tabulek

Tab. 1 - Stabilní rovnovážné konfigurace po vyhasnutí TJ syntézy

Tab. 2 - Rozdělení supernov

Tab. 3 - Detektory gravitačních vln

Tab. 4 - Parametry aparatury LIGO

Tab. 5 - Parametry detektoru gravitačních vln VIRGO