

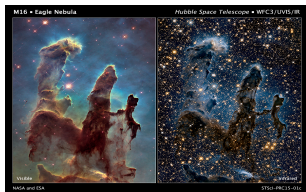
Superhmotné černé díry

Petr Kurfürst

Noc vědců
Masarykova univerzita
30. 9. 2016

Jak hvězdy vznikají?

- Na počátku *obří vodíková molekulová mračna*, zpravidla ve spirálních ramenech galaxií, stovky až milióny slunečních hmotností



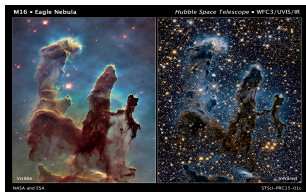
„Sloupý stvoření“ v mlhovině M16



Oblaka v ramenech „Vírové galaxie“

Jak hvězdy vznikají?

- Na počátku *obří vodíková molekulová mračna*, zpravidla ve spirálních ramenech galaxií, stovky až milióny slunečních hmotností



„Sloupý stvoření“ v mlhovině M16

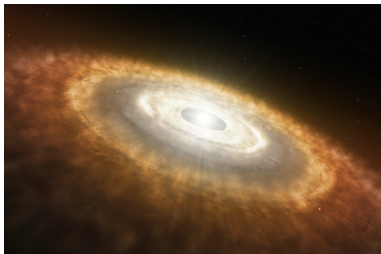


Oblaka v ramenech „Vírové galaxie“

- *Impuls* k zahuštění (kontrakci, kolapsu) oblaku - *rázové vlny* od mladých hmotných hvězd, explozí supernov, atd.
- *Jeansovo kritérium* udává minimální hmotnost oblaku v závislosti na teplotě a hustotě, nutnou k jeho kontrakci
- Primární rozdrobení (*fragmentace*) oblaku, díky jeho ne zcela rovnoměrné hustotě

Jak hvězdy vznikají?

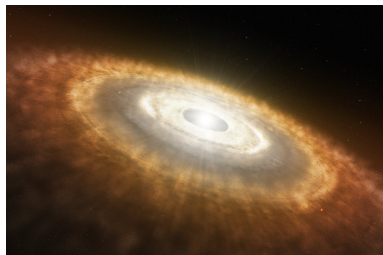
- V jisté fázi kolapsu oblaku začne teplota a tlak v centru narůstat
- Okolo zárodku hvězdy se formuje *protostelární akreční disk*



Předhvězdný (*protostelární+protoplanetární*) disk

Jak hvězdy vznikají?

- V jisté fázi kolapsu oblaku začne teplota a tlak v centru narůstat
- Okolo zárodku hvězdy se formuje *protostelární akreční disk*



Předhvězdný (*protostelární+protoplanetární*) disk

- Tento disk zajišťuje odtok přebytečného *momentu hybnosti*, tím umožňuje další nabalování látky na *protohvězdu*
- Samotný zárodek hvězdy je zahalen v husté *prachoplynové obálce*
- V chladnějších částech disku se mohou formovat zárodky *planet*

Hlavní etapa „života“ většiny hvězd

- Smršťování hvězdy se zastaví, energetické ztráty hvězdy plně hrazeny *termojadernými reakcemi*, $H \rightarrow He$
- Vstup do nejdější etapy „života“ - milióny až miliardy let - Slunce zhruba uprostřed této fáze

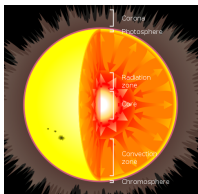
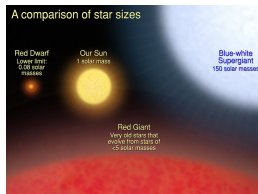


Schéma vnitřní stavby Slunce



Porovnání rozměrů hvězd

Hlavní etapa „života“ většiny hvězd

- Smršťování hvězdy se zastaví, energetické ztráty hvězdy plně hrazeny *termojadernými reakcemi*, $H \rightarrow He$
- Vstup do nejdelší etapy „života“ - milióny až miliardy let - Slunce zhruba uprostřed této fáze

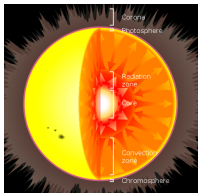
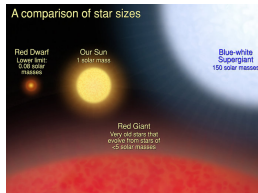


Schéma vnitřní stavby Slunce

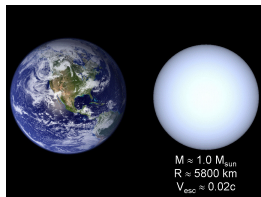


Porovnání rozměrů hvězd

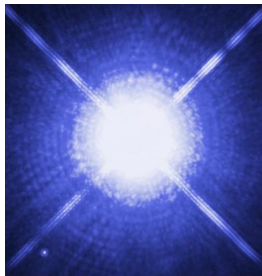
- Rozměry v rozmezí od zhruba 0,1 do několika desítek průměrů Slunce
- Povrchové (*efektivní*) teploty v rozmezí od 2 500 do několika desítek tisíc kelvinů, povrchová teplota a zářivý výkon rostou s hmotností

Závěrečné fáze vývoje hvězd

- Velká část hvězd končí jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až 10^9 kg m^{-3}
- Teplota až stovky tisíc kelvinů, během mnoha miliard let postupně chladnou a vyhasínají



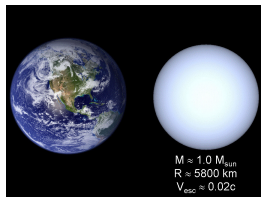
Porovnání běžné velikosti bílého trpaslíka a Země



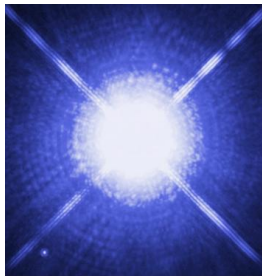
Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hvězd

- Velká část hvězd končí jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až 10^9 kg m^{-3}
- Teplota až stovky tisíc kelvinů, během mnoha miliard let postupně chladnou a vyhasínají
- Dalšímu smršťování brání tlak *elektronově degenerované látky*
- Čím hmotnější bílý trpaslík, tím *paradoxně* menší



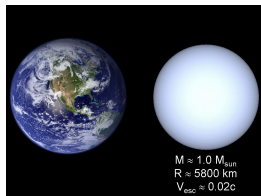
Porovnání běžné velikosti bílého trpaslíka a Země



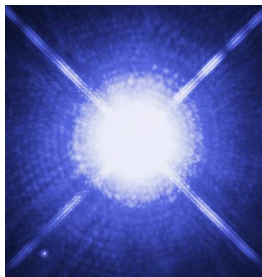
Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hvězd

- Velká část hvězd končí jako *bílý trpaslík* - obnažené *elektronově degenerované* jádro s hustotou až 10^9 kg m^{-3}
- Teplota až stovky tisíc kelvinů, během mnoha miliard let postupně chladnou a vyhasínají
- Dalšímu smršťování brání tlak *elektronově degenerované látky*
- Čím hmotnější bílý trpaslík, tím *paradoxně* menší
- Nejznámějším bílým trpaslíkem Sirius B, objev 1862, hmotnost $0,98 M_{\odot}$, poloměr $0,008 R_{\odot}$, okolo Siria A obíhá s periodou cca 50 let



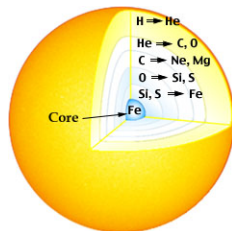
Porovnání běžné velikosti bílého trpaslíka a Země



Sirius B, zdroj: HST

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

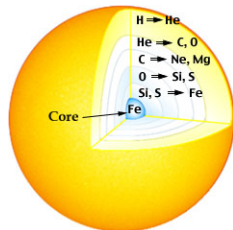
- U hvězd s počáteční hmotností $\gtrsim 8 M_{\odot}$ syntéza dalších prvků : $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$,
 $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{32}\text{S}$
- Hvězdy s počáteční hmotností $\gtrsim 11 M_{\odot}$ - „kompletní“ jaderný vývoj \rightarrow prvky skupiny železa - Ni, Co, Fe



Cibulová struktura
vnitřní stavby hmotné
hvězdy

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

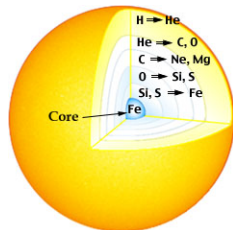
- U hvězd s počáteční hmotností $\gtrsim 8 M_{\odot}$ syntéza dalších prvků : $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$,
 $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{32}\text{S}$
- Hvězdy s počáteční hmotností $\gtrsim 11 M_{\odot}$ - „kompletní“ jaderný vývoj \rightarrow prvky skupiny železa - Ni, Co, Fe
- Zde veškeré *exotermické jaderné reakce* končí, další termojaderná syntéza není možná



Cibulová struktura
vnitřní stavby hmotné
hvězdy

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

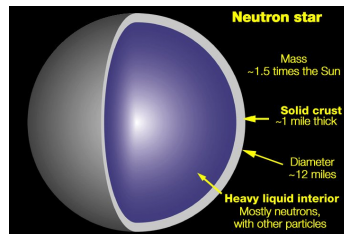
- U hvězd s počáteční hmotností $\gtrsim 8 M_{\odot}$ syntéza dalších prvků : $^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$,
 $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{32}\text{S}$
- Hvězdy s počáteční hmotností $\gtrsim 11 M_{\odot}$ - „kompletní“ jaderný vývoj \rightarrow prvky skupiny železa - Ni, Co, Fe
- Zde veškeré *exotermické jaderné reakce* končí, další termojaderná syntéza není možná
- Další rychlé smršťování a zahřívání „železného“ jádra hvězdy
- V jádru hvězdy se hromadí železný „popel“, dokud jeho hmotnost nepřekročí tzv. Chandrasekharovu mez, $M_{\text{Ch}} \approx 1,44 M_{\odot}$



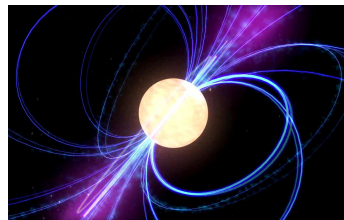
Cibulová struktura
vnitřní stavby hmotné
hvězdy

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) - americký fyzik indického původu, pomocí teorie relativity stanovil hmotnostní limit M_{Ch}



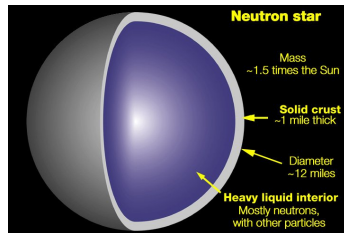
Struktura neutronové hvězdy



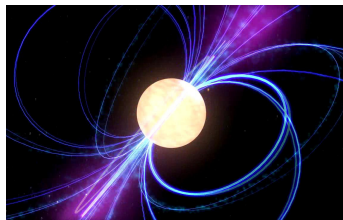
Pulsar

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) - americký fyzik indického původu, pomocí teorie relativity stanovil hmotnostní limit M_{Ch}
- Při jeho překročení se elektronově degenerované jádro začne gravitačně hroutit



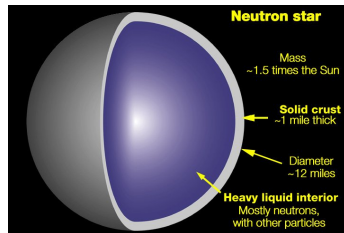
Struktura neutronové hvězdy



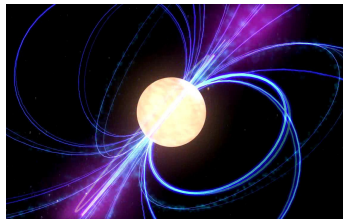
Pulsar

Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

- Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) - americký fyzik indického původu, pomocí teorie relativity stanovil hmotnostní limit M_{Ch}
- Při jeho překročení se elektronově degenerované jádro začne gravitačně hroutit
- Hroucení se zastaví se vznikem extrémně husté, tzv. *neutronové* hvězdy (10^{17} - 10^{18} kg m⁻³)
- Ve výjimečných případech ($M_{poč} \gtrsim 40$ - $50 M_{\odot}$) hvězda kolabuje „nade všechny meze“, vytvoří *černou díru*
- Rychlý gravitační kolaps hvězdy do stadia neutronové hvězdy, případně černé díry → *exploze supernovy*



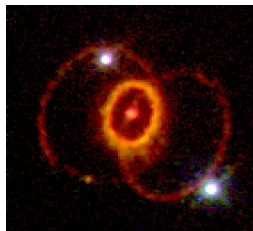
Struktura neutronové hvězdy



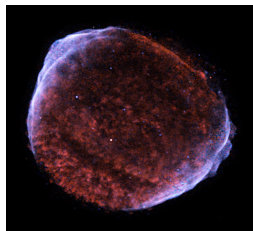
Pulsar

Supernovy

- Supernovy typu II :
 - *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než 10^4 km s^{-1}



Supernova typu II, SN 1987A, zdroj: D. Arnett

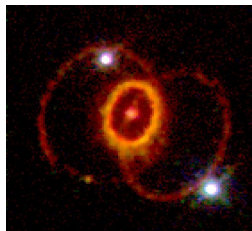


Supernova typu Ia, SN 1006, zdroj: HST

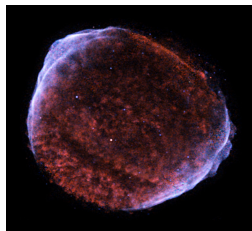
Supernovy

- Supernovy typu II :

- *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než 10^4 km s^{-1}
- Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň „dotuje“ syntézu jader těžších než železo



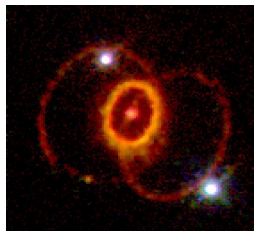
Supernova typu II, SN 1987A, zdroj: D. Arnett



Supernova typu Ia, SN 1006, zdroj: HST

- Supernovy typu II :

- *Gravitačně kolabující* velmi hmotné hvězdy, pád vnějších vrstev rychlostí vyšší než 10^4 km s^{-1}
- Mohutná odražená rázová vlna → počátek vlastní *exploze supernovy*, její ohromná energie zároveň „dotuje“ syntézu jader těžších než železo
- Hlavním motorem exploze obrovská teplota až 10^{11} K , *neutrinová „exploze“* → $E_\nu = 10^{46} \text{ J}$, $E_{\text{kin}} = 10^{44} \text{ J}$, $E_{\text{rad}} = 10^{42}\text{-}10^{43} \text{ J}$, *radioaktivní ohřev*
- V poslední době se objevuje názor, že hvězdy kolabující přímo na černou díru *neexplodují*, nýbrž „*potichu zmizí*“



Supernova typu II, SN 1987A, zdroj: D. Arnett



Supernova typu Ia, SN 1006, zdroj: HST

Černé díry

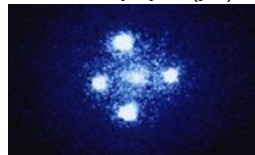
- Výsledek kolapsu hvězd o „zbytkové hmotnosti“ větší než $3-4 M_{\odot}$
- Oblast *prostor času* s extrémně silnou gravitací
- Černá díra je opravdu „černá“ - nic z ní *nemůže uniknout* - ani *částice* ani *elektromagnetické záření* (jako například světlo)



Přetok látky z „normální hvězdy“ do černé díry



Centrální výtrysk (jet)



Gravitační čočka

Černé díry

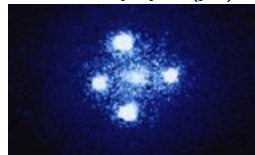
- Výsledek kolapsu hvězd o „zbytkové hmotnosti“ větší než $3-4 M_{\odot}$
- Oblast *prostor času* s extrémně silnou gravitací
- Černá díra je opravdu „černá“ - nic z ní *nemůže uniknout* - ani *částice* ani *elektromagnetické záření* (jako například světlo)
- „Okrajem“ je *horizont událostí* (*Schwarzschildův poloměr*), $r_{sh} = \frac{2GM}{c^2} \approx 2,95 \frac{M}{M_{\odot}} \text{ km}$



Přetok látky z „normální hvězdy“ do černé díry



Centrální výtrysk (jet)



Gravitační čočka

Černé díry

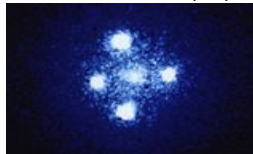
- Výsledek kolapsu hvězd o „zbytkové hmotnosti“ větší než $3-4 M_{\odot}$
- Oblast *prostor času* s extrémně silnou gravitací
- Černá díra je opravdu „černá“ - nic z ní *nemůže uniknout* - ani *částice* ani *elektromagnetické záření* (jako například světlo)
- „Okrajem“ je *horizont událostí* (*Schwarzschildův poloměr*), $r_{sh} = \frac{2GM}{c^2} \approx 2,95 \frac{M}{M_{\odot}} \text{ km}$
- Pozorování černých děr díky *gravitačním čočkám*, *akrečním diskům*, *centrálním výtryskům* (jetům), *rentgenovému záření*, atd.



Přetok látky z „normální hvězdy“ do černé díry



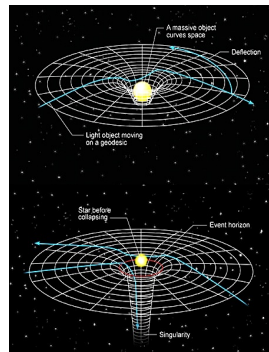
Centrální výtrysk (jet)



Gravitační čočka

Černé díry

- Uvnitř horizontu událostí je *gravitační singularita* kde je soustředěná veškerá hmotnost - místo s nulovým objemem, nekonečnou hustotou a nekonečně velkým *zakřivením prostoročasu*



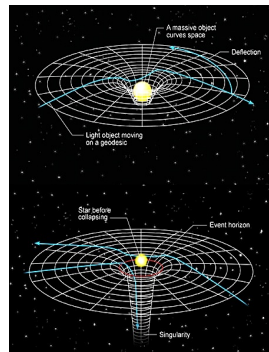
Zakřivení prostoročasu



Rotující černá díra

Černé díry

- Uvnitř horizontu událostí je *gravitační singularita* kde je soustředěná veškerá hmotnost - místo s nulovým objemem, nekonečnou hustotou a nekonečně velkým *zakřivením prostoročasu*
- *Rotující* černé díry - obklopeny *ergosférou* - částice ji může opustit s energií vyšší než při vstupu
- Přebytek energie je odčerpán z rotační energie černé díry, to vede k jejímu zpomalení

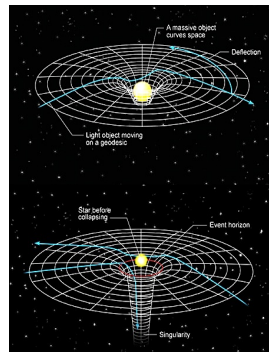


Zakřivení prostoročasu



Rotující černá díra

- Uvnitř horizontu událostí je *gravitační singularita* kde je soustředěná veškerá hmotnost - místo s nulovým objemem, nekonečnou hustotou a nekonečně velkým *zakřivením prostoročasu*
- *Rotující* černé díry - obklopeny *ergosférou* - částice ji může opustit s energií vyšší než při vstupu
- Přebytek energie je odčerpán z rotační energie černé díry, to vede k jejímu zpomalení
- *Růst černých děr* - pohlcováním hmoty a záření, větších těles, splynutí (*merging*) černých děr → emise *gravitačních vln*



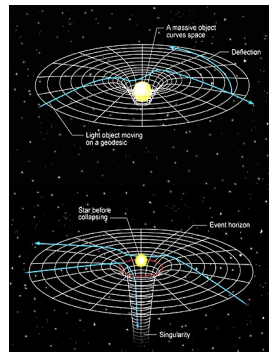
Zakřivení prostoročasu



Rotující černá díra

Černé díry

- Uvnitř horizontu událostí je *gravitační singularita* kde je soustředěná veškerá hmotnost - místo s nulovým objemem, nekonečnou hustotou a nekonečně velkým *zakřivením prostoročasu*
- *Rotující* černé díry - obklopeny *ergosférou* - částice ji může opustit s energií vyšší než při vstupu
- Přebytek energie je odčerpán z rotační energie černé díry, to vede k jejímu zpomalení
- *Růst černých děr* - pohlcováním hmoty a záření, větších těles, splynutí (*merging*) černých děr → emise *gravitačních vln*
- Postupné *vypařování* černých děr - tepelné vyzařování - *Hawkingovo záření* - menší černé díry se vypařují rychleji ← $g = c^4 / (4GM)$



Zakřivení prostoročasu



Rotující černá díra

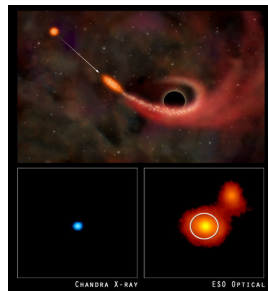
Detekce gravitačních vln

Video otevřete kliknutím na následující odkaz:

[ligo.mp4](#)

Superhmotné černé díry (SMBH)

- Obří černé díry o řádových hmotnostech od $10^5 M_{\odot}$ do $10^9 M_{\odot}$



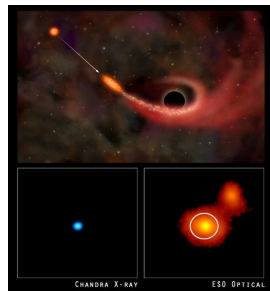
SMBH „požírá“ hvězdu



Výtrysk z galaxie M87

Superhmotné černé díry (SMBH)

- Obří černé díry o řádových hmotnostech od $10^5 M_{\odot}$ do $10^9 M_{\odot}$
- Již od roku 1971 se objevují hypotézy o výskytu SMBH v centru *Mléčné dráhy*
- Poprvé skutečně detekována v roce 1974, zdroj vyzařování pojmenován Sagittarius A, vzdálenost cca 26 000 světelných let od Země
- Její hmotnost odhadována na $4 \times 10^6 M_{\odot}$, r_{sh} na 12×10^6 km



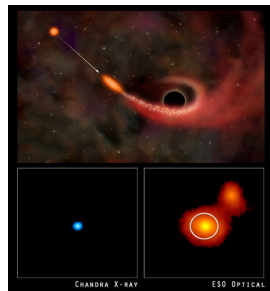
SMBH „požívá“ hvězdu



Výtrysk z galaxie M87

Superhmotné černé díry (SMBH)

- Obří černé díry o řádových hmotnostech od $10^5 M_{\odot}$ do $10^9 M_{\odot}$
- Již od roku 1971 se objevují hypotézy o výskytu SMBH v centru *Mléčné dráhy*
- Poprvé skutečně detekována v roce 1974, zdroj vyzařování pojmenován Sagittarius A, vzdálenost cca 26 000 světelných let od Země
- Její hmotnost odhadována na $4 \times 10^6 M_{\odot}$, r_{sh} na 12×10^6 km
- SMBH vznikly již ve velmi raném vesmíru, v centrech prvních galaxií



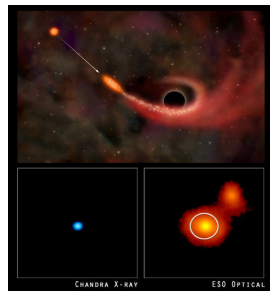
SMBH „požírá“ hvězdu



Výtrysk z galaxie M87

Superhmotné černé díry (SMBH)

- Obří černé díry o řádových hmotnostech od $10^5 M_{\odot}$ do $10^9 M_{\odot}$
- Již od roku 1971 se objevují hypotézy o výskytu SMBH v centru *Mléčné dráhy*
- Poprvé skutečně detekována v roce 1974, zdroj vyzařování pojmenován Sagittarius A, vzdálenost cca 26 000 světelných let od Země
- Její hmotnost odhadována na $4 \times 10^6 M_{\odot}$, r_{sh} na 12×10^6 km
- SMBH vznikly již ve velmi raném vesmíru, v centrech prvních galaxií
- Existuje řada teorií vzniku SMBH, předpokládá se že většina nárůstu jejich hmoty souvisí s rychlou epizodickou akrecí plynu



SMBH „požírá“ hvězdu



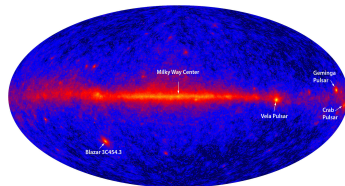
Výtrysk z galaxie M87

Superhmotné černé díry

- **Aktivní galaktická jádra (AGN) :**
 - Některá *galaktická jádra* září více než celý zbytek galaxie
 - *Svítivost* těchto jader se rychle mění, často i *během jediného dne*, rozměr zářící oblasti musí být relativně malý



Schéma kvasaru



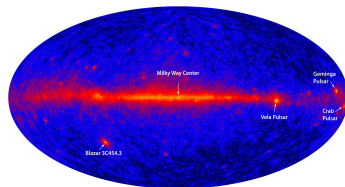
Snímek blazaru z družice GLAST

Superhmotné černé díry

- **Aktivní galaktická jádra (AGN) :**
 - Některá *galaktická jádra* září více než celý zbytek galaxie
 - *Svítivost* těchto jader se rychle mění, často i *během jediného dne*, rozměr zářící oblasti musí být relativně malý
 - Nejúčinnějším „výrobcem“ energie je akrece hmoty na černou díru, předpokládá se tedy existence supermasivních černých děr v centrech galaxií



Schéma kvazaru



Snímek blazaru z družice GLAST

Superhmotné černé díry

- **Aktivní galaktická jádra (AGN) :**

- Některá *galaktická jádra* září více než celý zbytek galaxie
- *Svítivost* těchto jader se rychle mění, často i *během jediného dne*, rozměr zářící oblasti musí být relativně malý
- Nejúčinnějším „výrobcem“ energie je akrece hmoty na černou díru, předpokládá se tedy existence supermasivních černých děr v centrech galaxií
- Nejvýkonnějšími AGN jsou tzv. *kvasary* či *blazary*, díky své jasnosti jsou jedinečnými nástroji pro zkoumání vývoje vesmíru

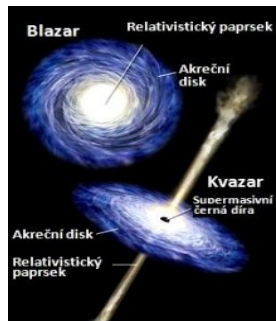
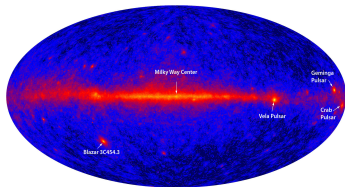


Schéma kvasaru



Snímek blazaru z družice GLAST

Obří centrální černá díra v Galaxii - Sagittarius A

Video otevřete kliknutím na následující odkaz:

[Central_Black_Hole.mp4](#)

Děkuji za pozornost