Vybrané kapitoly z astrofyziky – díl 30.

Jak se pozorují černé díry?

Jiří Svoboda

Astronomický ústav Akademie věd ČR

Vybrané kapitoly z astrofyziky, Astronomický ústav UK, prosinec 2013

Osnova přednáškového cyklu

- Úvodní přednáška
  - popularizační přednáška z Týdne vědy a techniky
  - jak a kde pozorujeme černé díry ve vesmíru?
  - metody detekce černých děr – současné i budoucí
- Rentgenová astronomie
  - proces redukce dat a spektrální analýza
  - astrofyzikální modely pro rentgenová spektra
- Otevřené problémy současné astrofyziky akrečních disků okolo černých děr
- Závěr, diskuze, sepisování návrhu na pozorování,...

Co jsou černé díry?

- definice: oblast prostoročasu, ze kterého nemůže uniknout žádné světlo
  - okraj černé díry (úniková rychlost je rovna rychlosti světla) se nazývá **horizont událostí**
  - podle teorie relativity: rychlost světla je konečná (nic se nepohybuje rychleji než světlo)
  - z toho plyne, že z černé díry nemůže uniknout nic...
- jak tedy černé díry pozorovat?
  - nepřímo, ze záření hmoty, která do nich padá

Prvotní ideje o černých dírách

- 1783 John Michell uvažoval o nepozorovatelných super-velkých hvězdách

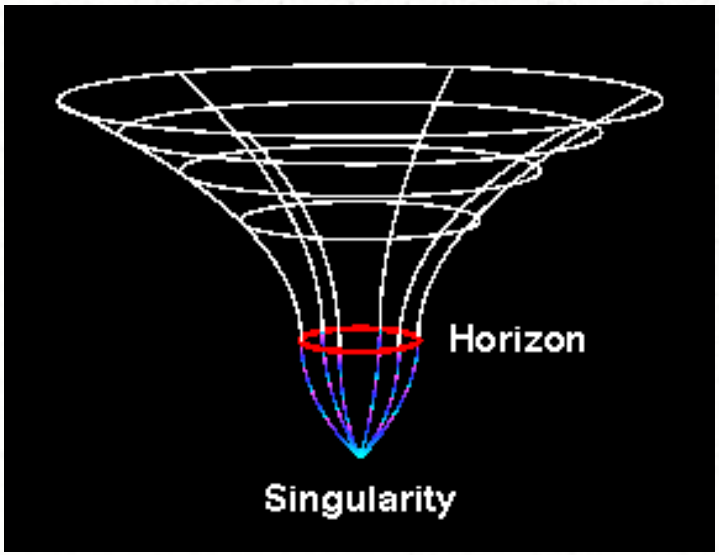
- představte si Slunce, které je 500x objemnější a má stejnou hustotu
- úniková rychlost na povrchu $v \sim \sqrt{\frac{M}{R}}$ by dosáhla rychlosti světla
- může světlo z povrchu takového tělesa uniknout nebo by tak silnou gravitaci nedokázalo překonat?

Einsteinova teorie relativity

- 1905 speciální teorie relativity
  - rychlost světla je konečná
  - nezahrnuje v sobě gravitaci
- 1911-1912 Albert Einstein v Praze
  - studuje vliv gravitačního pole na šíření světla
    - světlo není gravitačně přitahováno, jak si to představoval Michell, ale dráha světelného paprsku je přítomností hmotného tělesa ovlivněna – tzv. **gravitační ohyb světla**
- 1916 obecná teorie relativity
  - gravitační pole je zakřivením prostoročasu způsobené přítomností hmoty/energie ($E = mc^2$)

Schwarzschildovo řešení

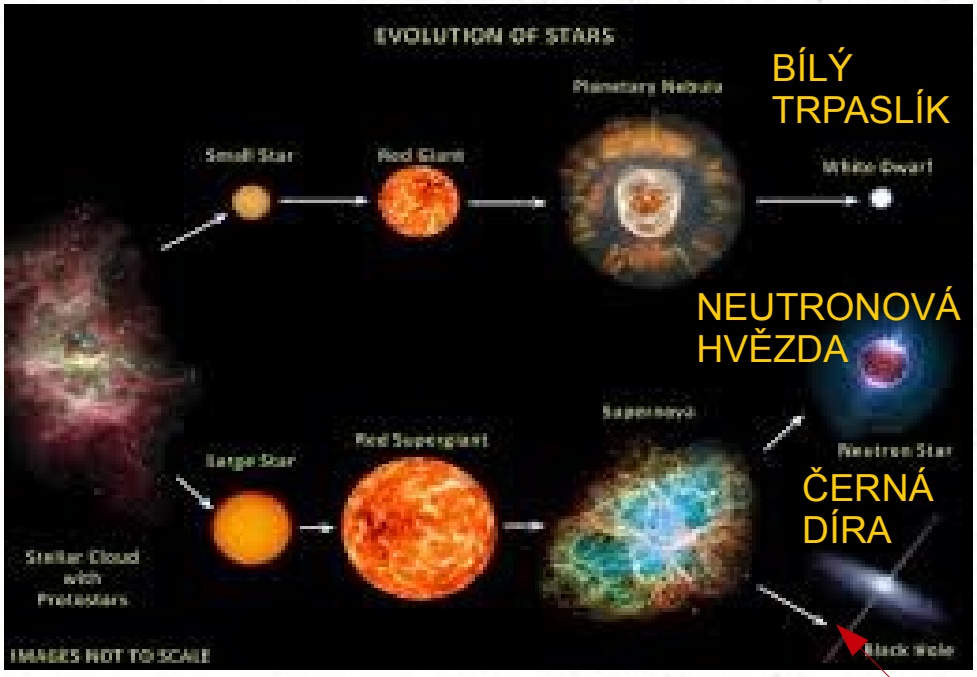
- 1916 Karl Schwarzschild - řešení Einsteinových rovnic pro statický sféricky-symetrický případ ve vakuu bez elektrických nábojů
  - Schwarzschildův poloměr: $R_S = \frac{2GM}{c^2}$



- gravitační konstanta:
  $G = (6{,}67384 \pm 0{,}00080) \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
- rychlost světla: $c = 299\,792\,458\ m \cdot s^{-1}$
- rozměr černé díry závisí na hmotnosti:
  - člověk: $R_S \sim 10^{-25}$ m
  - Měsíc: $R_S \sim 0{,}1$ mm
  - Země: $R_S \sim 1$ cm
  - Slunce: $R_S \sim 3$ km
  - galaktické jádro: $R_S \sim 10^5$-10^{10} km

Existují černé díry?

- zpočátku pochopitelná skepse
- 30. léta 20. století – studium hvězdného kolapsu



- 1931 Chandrasekhar – maximální hmotnost **bílého trpaslíka** 1,5$M_{\odot}$ (kolaps hvězdy zastaví tlak elektronů)
- 1939 Oppenheimer & Volkoff – maximální hmotnost **neutronové hvězdy** 3-5$M_{\odot}$ (atomová jádra se rozpadnou, protony se spojí s elektrony a kolaps hvězdy zastaví tlak neutronů)

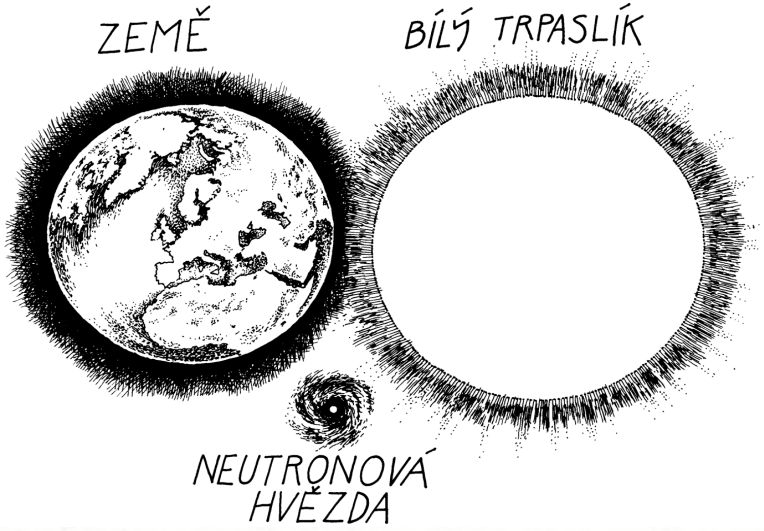
- co se stane s hmotnějšími hvězdami?

Pozorování vyhaslých hvězd

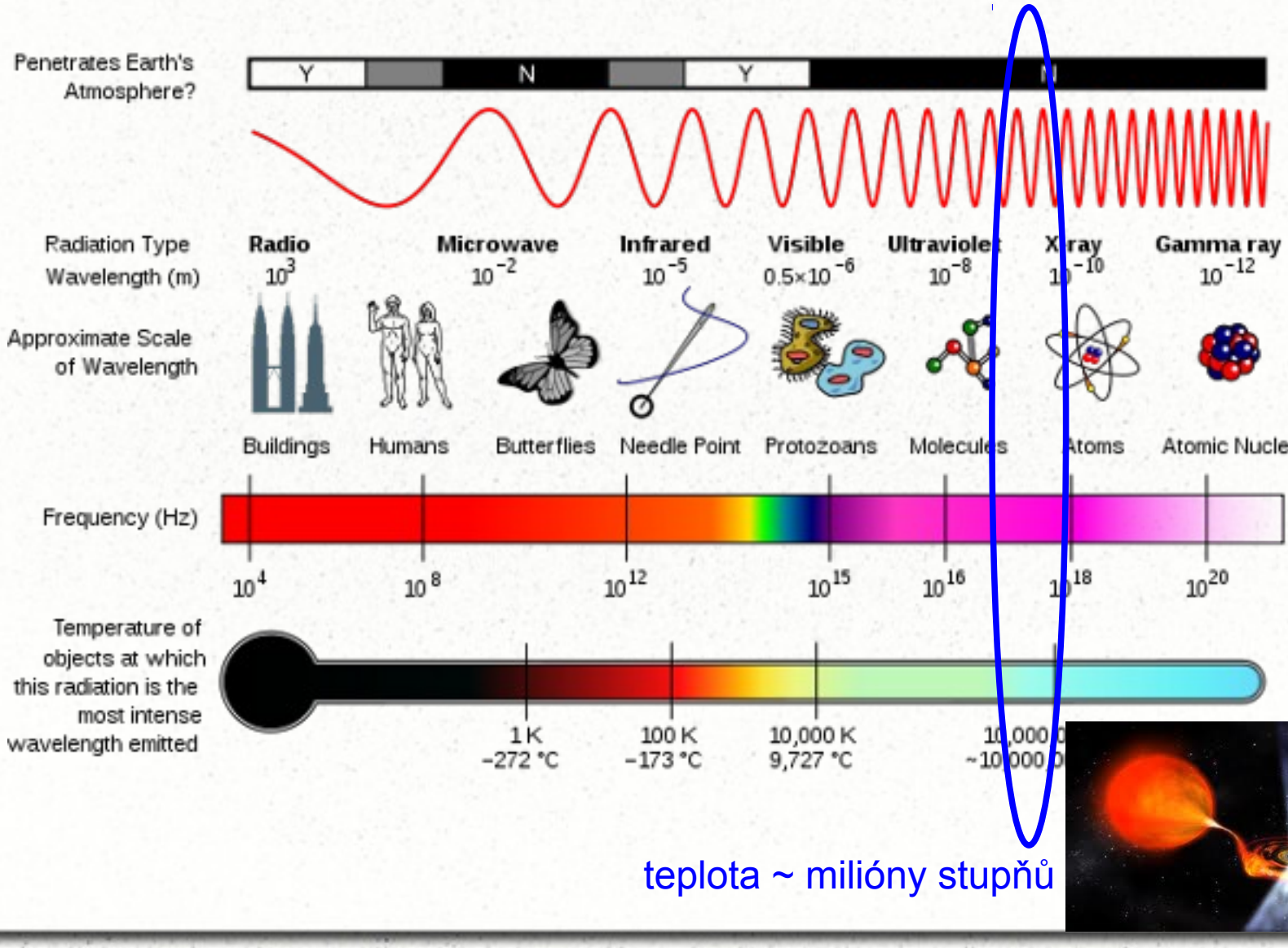
- bílí trpaslíci byli v té době již dobře známými objekty (Sirius B, 40 Eridani)
- bílý trpaslík je velký asi jako Země, neutronová hvězda má rozměr desítky km a případná hvězdná černá díra by byla ještě menší

bílý trpaslík:
hustota: 1 tuna/cm^3
povrchová teplota: asi 100000°C
(klesá, jak bílý trpaslík chladne...)

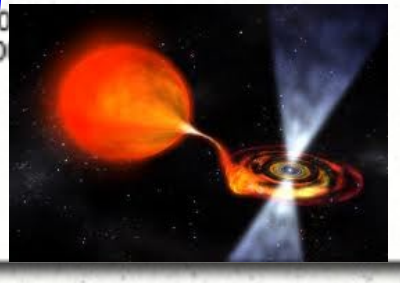
neutronová hvězda:
hustota v nitru: až 10^{15} g/cm^3
povrchová teplota: milión °C
=> svítí v **rentgenovém oboru**



Elektromagnetické spektrum

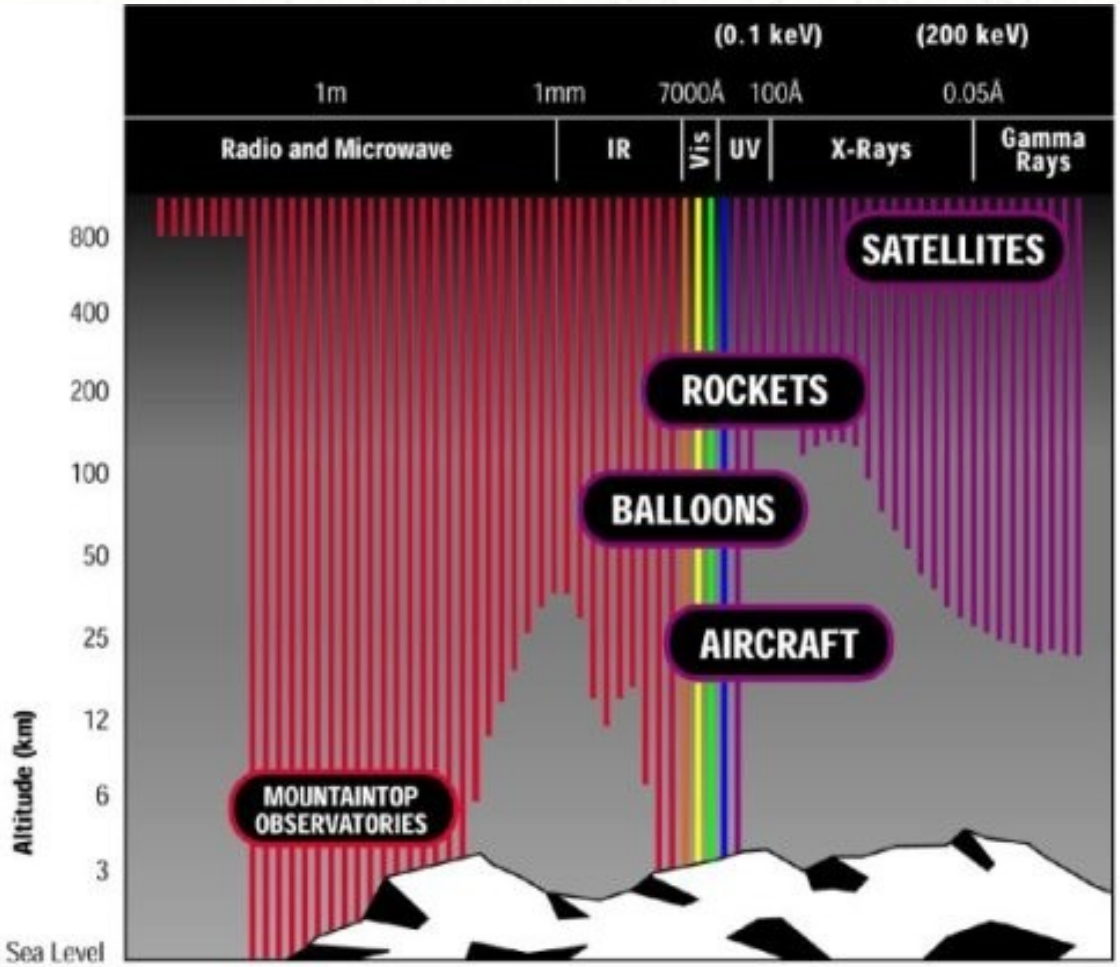


teplota ~ milióny stupňů



Zrod rentgenové astronomie

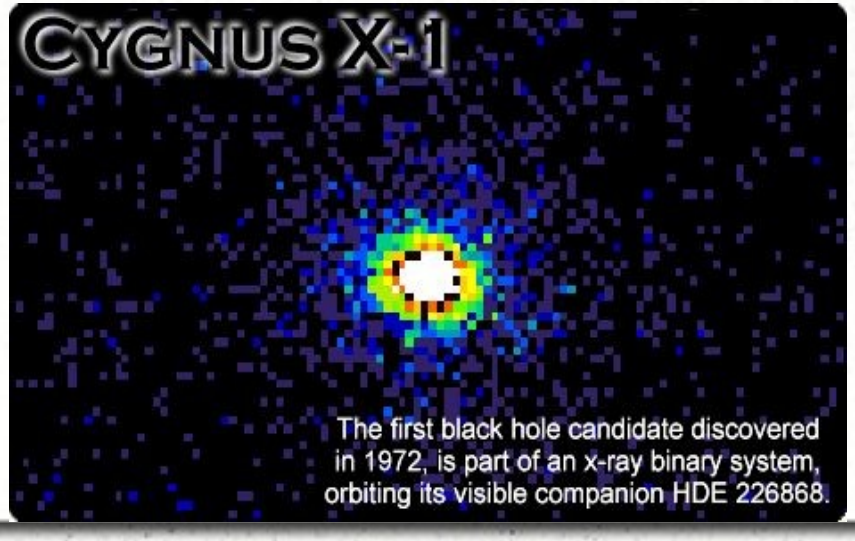
Propustnost atmosféry

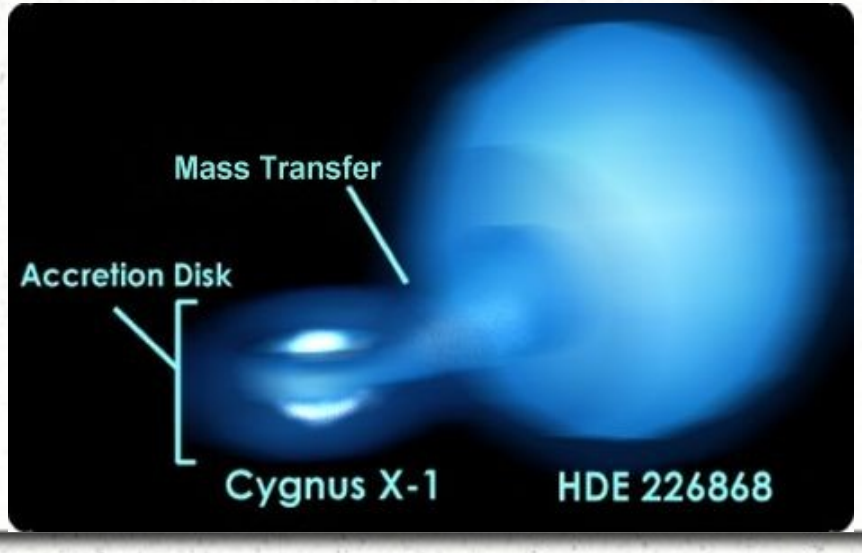


- atmosféra je pro RTG nepropustná => RTG astronomie umožněna až pomocí raket a balónů
- první očekávání – RTG pouze ze Slunce (ostatní hvězdy příliš daleko)
- 1962 – detektor ke zkoumání RTG záření na Měsíci (odraz od Slunce)
- objeven Sco X-1!!! (1967 potvrzeno, že je to neutronová hvězda)
- 2002 Nobelova cena za fyziku (1/2) – R. Giacconi

Objev černých děr

- 1963 – Roy Kerr nachází řešení pro rotující černé díry
- 1968 – J.A.Wheeler používá termín "černá díra" a přichází s tvrzením, že černé díry nemají vlasy (při svém kolapsu hvězdy zcela zapomenou na všechny své původní parametry kromě **hmotnosti**, **rotace** a **náboje**)
- 1972 – objevena první černá díra v souhvězdí labutě **Cygnus X-1** (Webster & Murdin; Bolton)



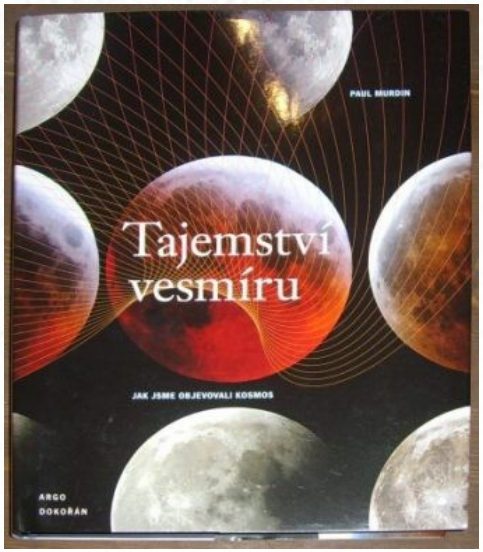


Objev černých děr

- 1963 – Roy Kerr nachází řešení pro rotující černé díry
- 1968 – J.A.Wheeler dává černým dírám své jméno a přichází s tvrzením, že černé díry nemají vlasy (při svém kolapsu hvězdy zcela zapomenou na všechny své původní parametry kromě **hmotnosti**, **rotace** a **náboje**)
- 1972 – objevena první černá díra v souhvězdí labutě Cygnus X-1 (Webster & **Murdin**; Bolton)

Paul Murdin na konferenci v Praze, únor 2010

jeho kniha **Secrets of Universe** vyšla v češtině (Argo, 2009)



Detekce černých děr

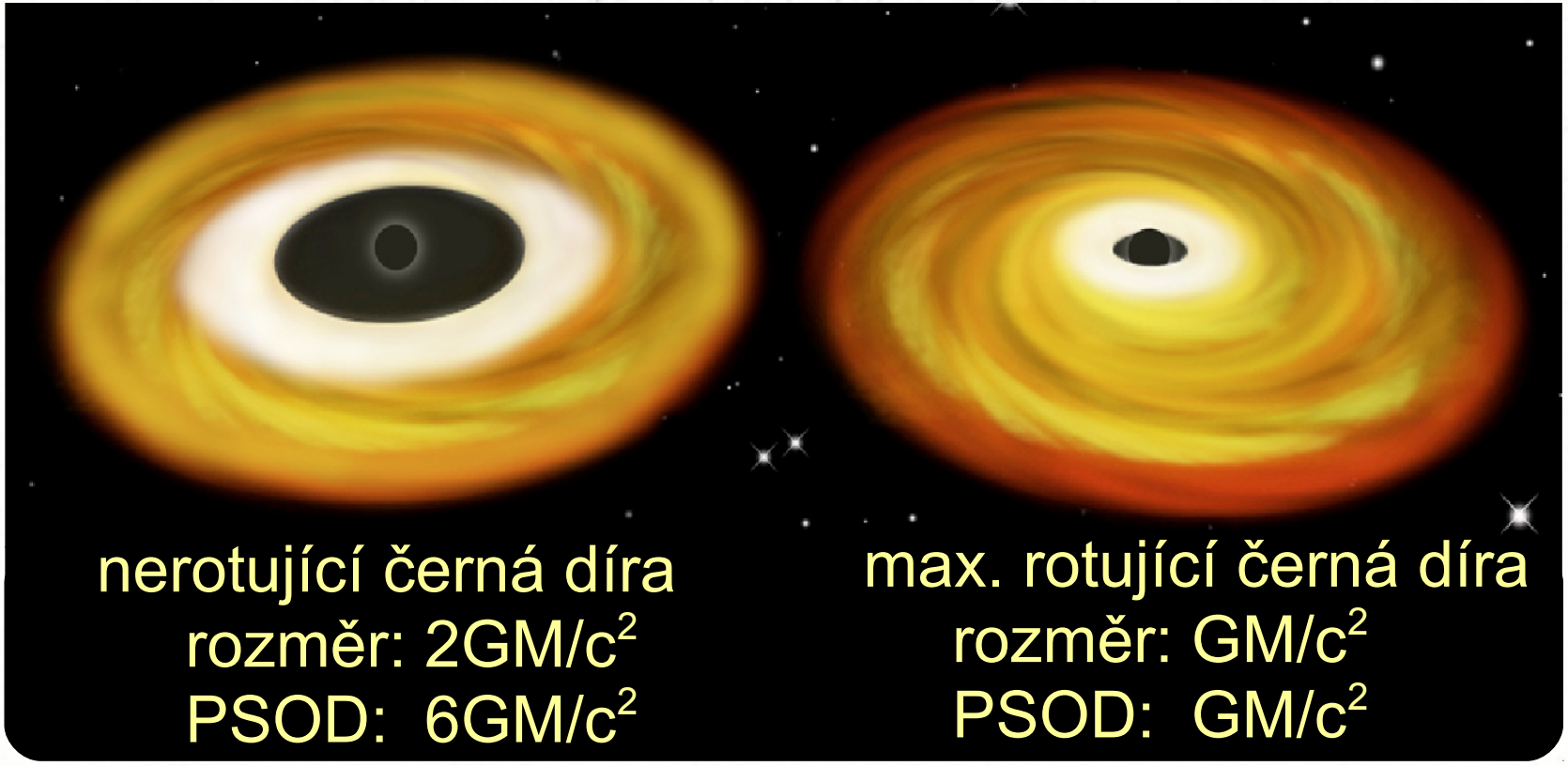
- přímé metody:
  - fotka – obrázek černé díry
  - gravitační vlny
  - *možné v budoucnu?*

- nepřímé metody:
  - *v současné době jediný způsob spolehlivé detekce*
  - pohyb hvězd kolem "ničeho" – střed Mléčné dráhy
  - časová proměnnost a spektrální vlastnosti záření hmoty obíhající černou díru

Jak hmota padá na černé díry?

Vnitřní okraj akrečního disku

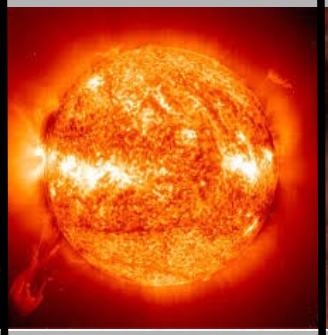
- poslední stálá oběžná dráha (PSOD) – její poloha závisí na spinu (vlastní rotaci) černé díry



Akreční disky

Účinnost akrece

- uvolněná energie: $E = \varepsilon Mc^2$

oheň, chemické reakce	jaderné štěpení	jaderná fúze	akrece na černou díru
			
ε = 0,00001%	ε = 0,01%	ε = 0,1%	ε = 40%

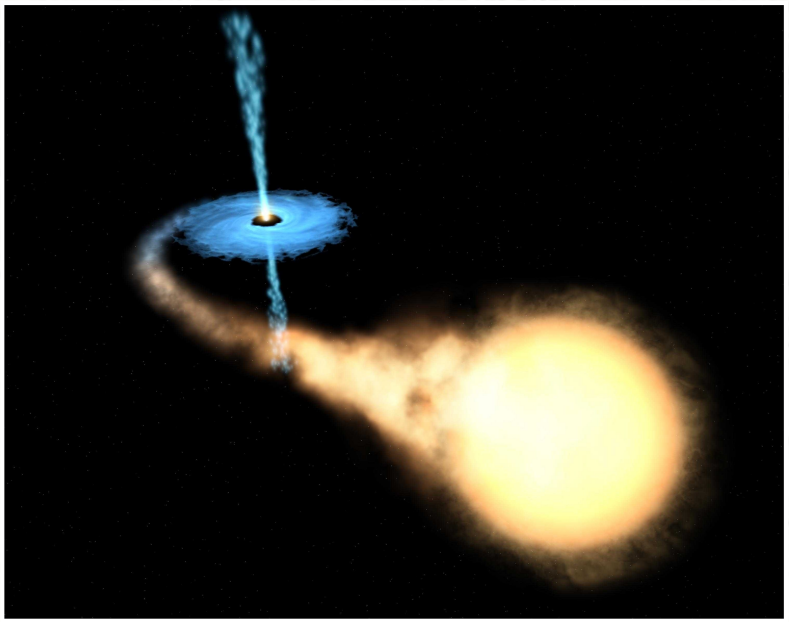
- akrece na ČD je velice účinný proces, při němž dochází k uvolnění enormního množství energie; proto je mezi RTG zdroji na obloze mnoho akreujících černých děr

Kde se černé díry pozorují?

rentgenové dvojhvězdy

(stelární černé díry)

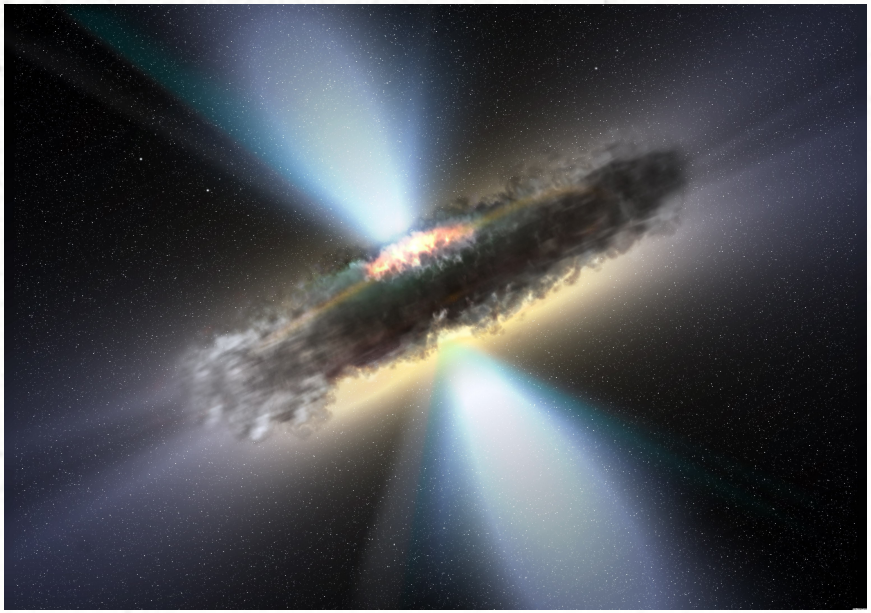
$M \sim 10\ M_{Slunce}$



aktivní galaktická jádra

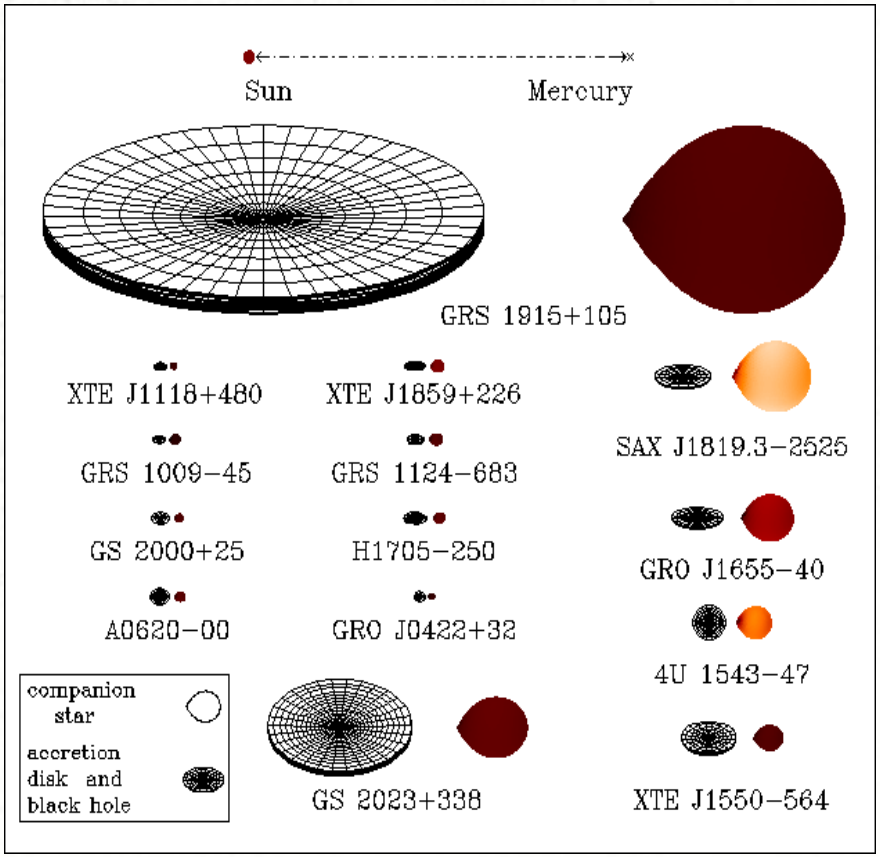
(super-hmotné černé díry)

$M \sim 10^{6} - 10^{10}\ M_{Slunce}$



Proč nás zajímají stelární černé díry?

- jsou důležité pro hlubší porozumění procesu hvězdného kolapsu v závěrečném stádiu velmi hmotných hvězd i pro studium vývoje dvojhvězd, kdy dochází ke vzájemným přetokům hmoty z jedné složky na ruhou
  - někteří souputníci černých děr jsou veleobři (například Cygnus X-1), jiní ani nejsou vidět (např. GX 339-4)
  - největší známou stelární černou dírou je:
    GRS 1915+105
    (přibližně 15 hmot Sluncí)

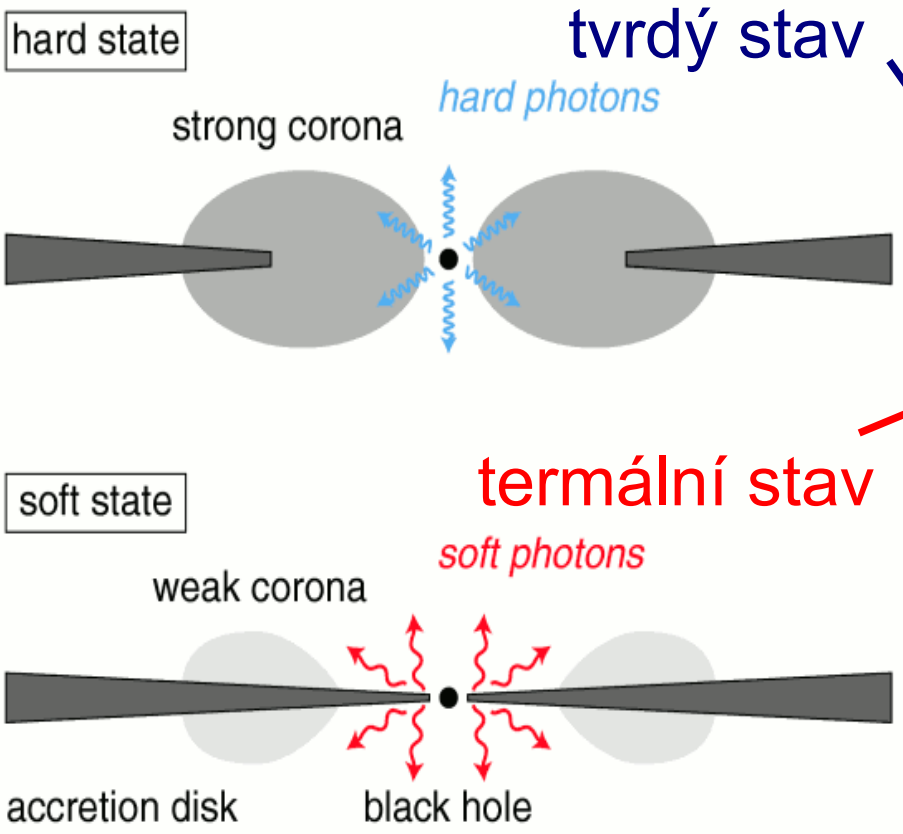


Proč nás zajímají stelární černé díry?

- jsou důležité pro hlubší porozumění procesu hvězdného kolapsu v závěrečném stádiu velmi hmotných hvězd i pro studium vývoje dvojhvězd, kdy dochází ke vzájemným přetokům hmoty z jedné složky na druhou
- testování obecné teorie relativity
- studium fyziky v podmínkách extrémní křivosti prostoročasu
- pochopení proměnnosti toku hmoty na černou díru
  - ve vnitřních oblastech akrečního disku je časová variabilita v řádech mikrosekund
  - v řádech měsíců dochází k výrazným změnám spektrálních vlastností záření akrečních disků

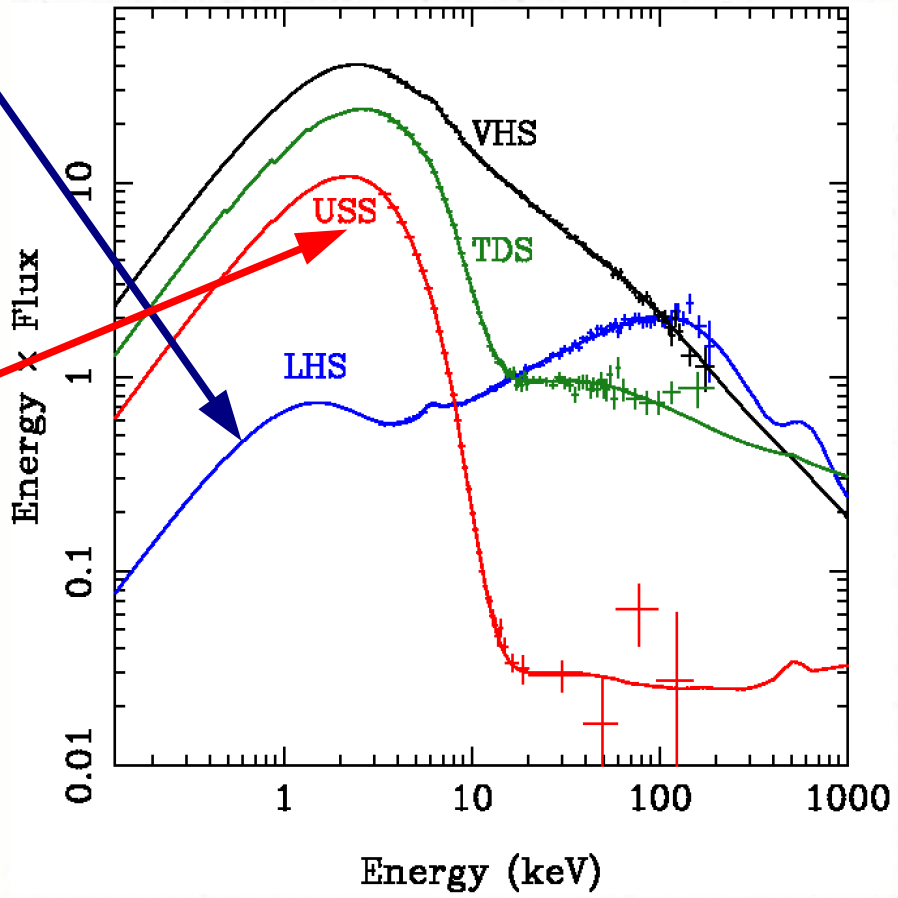
Spektrální stavy

- jak se mění množství přitékající hmoty, mění se i způsob akrečního toku:



tvrdý stav

termální stav



Proč nás zajímají super-hmotné černé díry?

- super-hmotné černé díry se nacházejí v centrech galaxií:
  - aktivní galaktická jádra – vysoká aktivita
  - obyčejné galaxie – nízká aktivita, ale přítomnost černé díry je v těch okolních jasně potvrzena
    - naše Galaxie (Sgr A*), M87, ...
- je různá aktivita pouze vývojovým stupněm každé galaxie?
- jsou super-hmotné černé díry přítomny ve všech galaxiích?
- co bylo dřív, galaxie nebo její centrální černá díra?
  - jak se galaxie zformovaly a vznikly černé díry již jako obří nebo narostly až postupně akrecí okolní hmoty?

Proč nás zajímají super-hmotné černé díry?

- jaký vliv má centrální aktivita na tvorbu hvězd v jejím okolí?
- dochází k urychlování černých děr v důsledku akrece?
- jakou roli hrají vzájemné srážky galaxií?

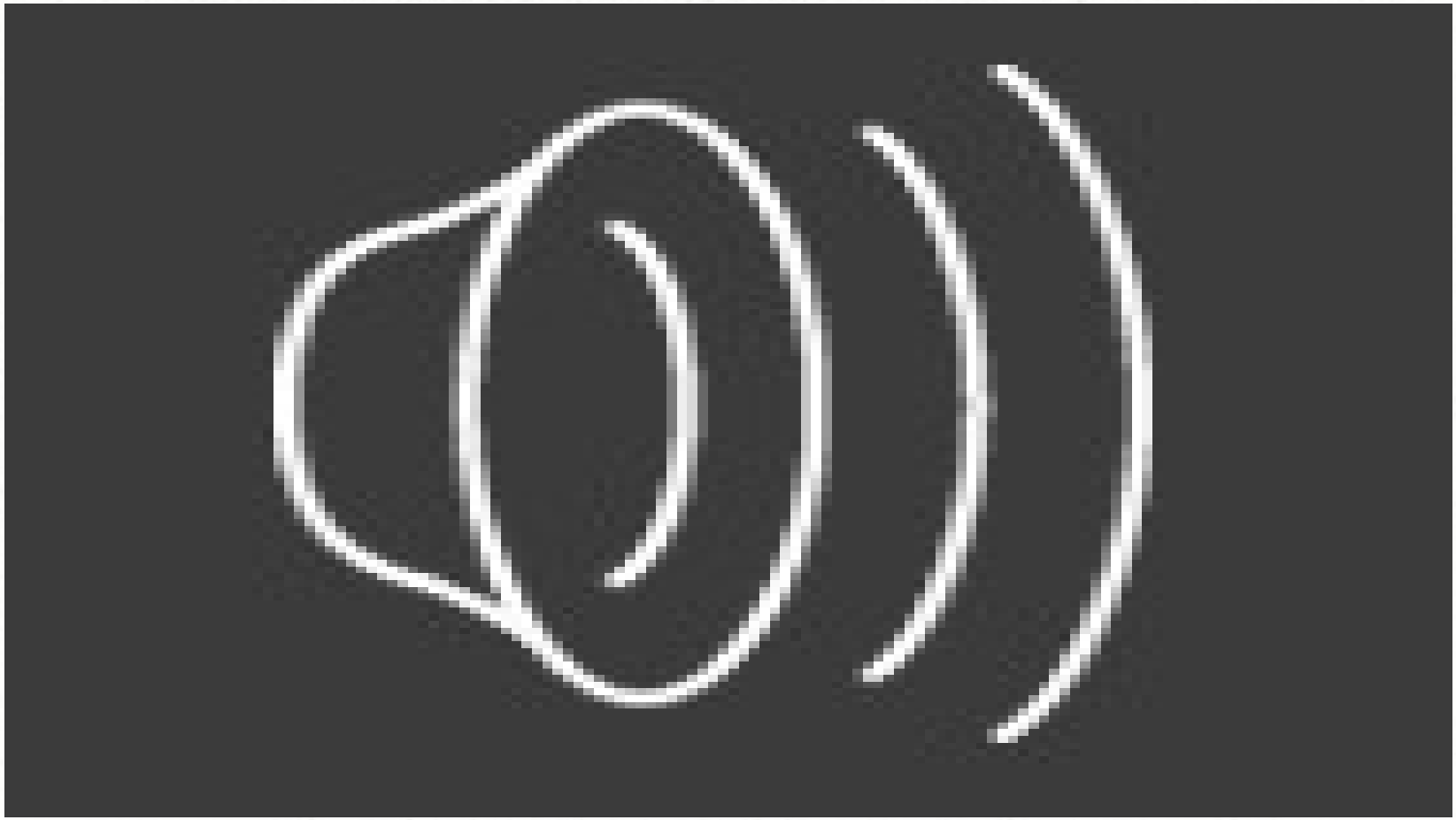
srážky galaxií jsou poměrně časté:

- ***splynutí galaxií***
  *odhaduje se, že naše Mléčná dráha splyne s galaxií v Andromedě za asi 5 miliard roků
- ***galaktický kanibalismus***
  *Mléčná dráha pojídá Magellanova mračna
- ***galaktické harašení***

*Nejbližší obří černá díra – Sgr A**

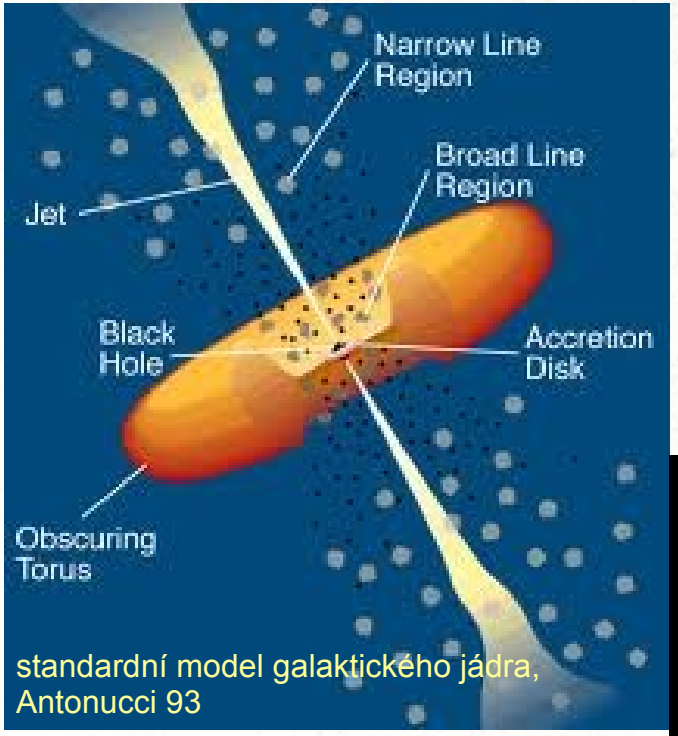
- Sgr A* - centrální černá díra naší Mléčné dráhy
  - nachází se v souhvězdí Střelce (Sagittarius)
  - váží přibližně jako 4 milióny sluncí
  - v porovnání s ostatními galaxiemi je jádro naší Galaxie neaktivní (málo hmoty dopadá na černou díru)
  - kolem ní se pohybují mladé hvězdy
    - existuje několik teorií, jak vznikly, ale stále není jednotný názor ohledně jejich vzniku
    - umožňují velmi přesně změřit polohu a hmotnost centrální černé díry Mléčné dráhy
  - nyní se na černou díru řítí oblak plynu nazvaný G2
    - celková hmotnost přibližně jako větší planeta, roztrhaný slapovými silami

*Pozorování černých děr – Sgr A**



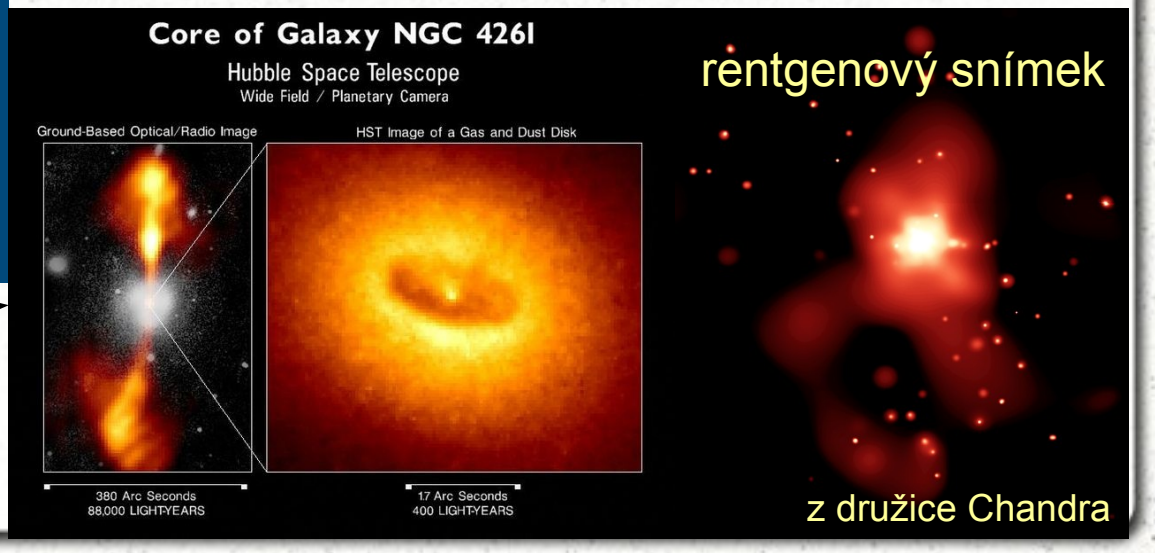
Aktivní galaktická jádra

- složení aktivního galaktického jádra:



standardní model galaktického jádra, Antonucci 93

- **centrální černá díra** ($M \sim 10^6$-$10^{10} M_{Slunce}$)
- **akreční disk** obklopující černou díru
- **oblasti horkého plynu** vyzařující široké (blíž černé díře) a úzké čáry
- záření pohlcující oblaka ve tvaru **toru**
- relativistický **jet** (jen u některých galaxií)



pozorování blízké aktivní galaxie NGC 4261 v rádiovém (jet), optickém-ultrafialovém (akreční disk) a rentgenovém (nejvnitřnější oblast a horká atmosféra akrečního disku)

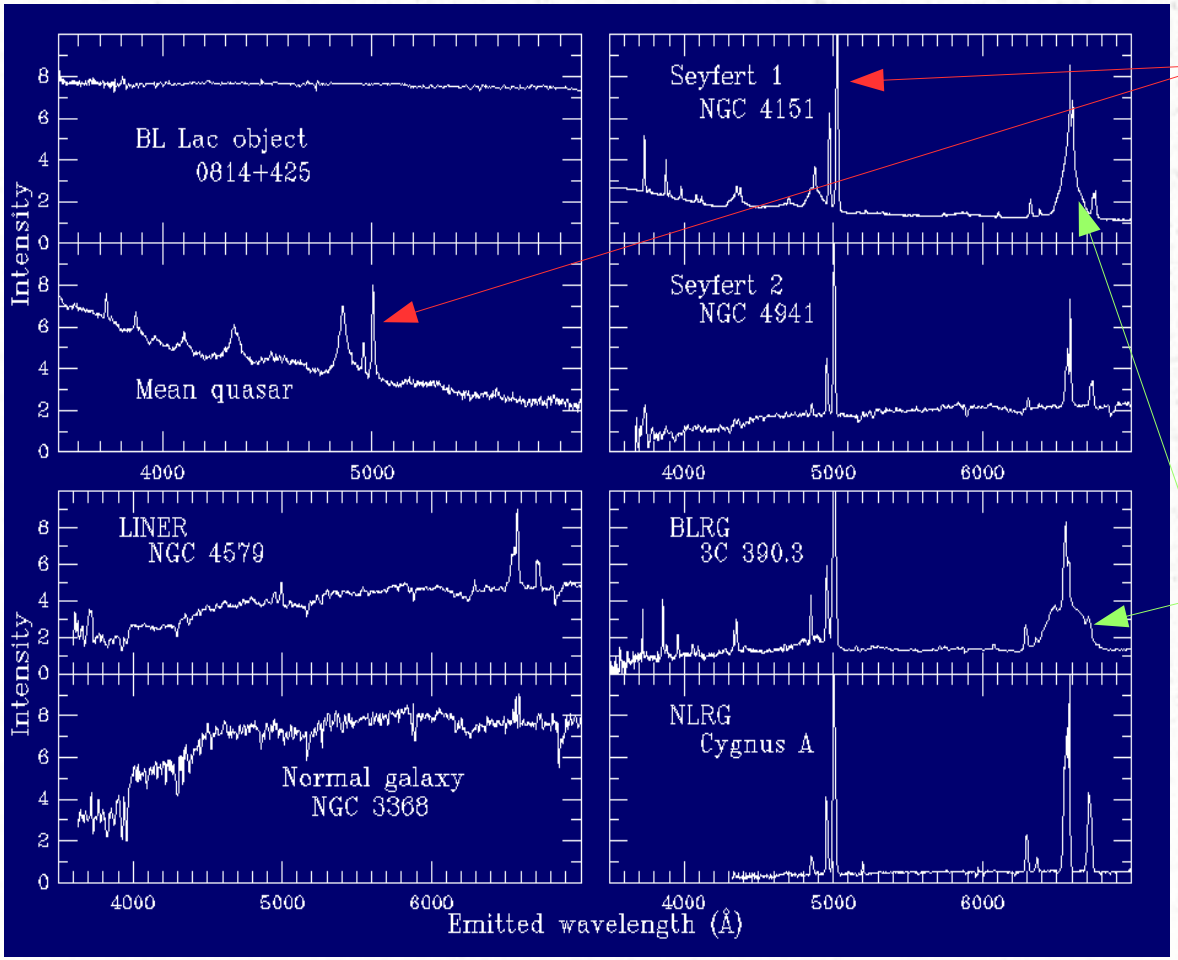
Spektra aktivních galaxií

- obrázky nám neodhalí nejvnitřnější oblasti, zejména ne pro **vzdálené zdroje** (kvasary), které se jeví našim detektorům jako bodové zdroje
- k získání informace o struktuře a dynamice aktivních galaktických jader využíváme spektrální analýzu
  - optická spektroskopie
    - z intenzity, případně šířky čáry vodíku se určuje hmotnost černé díry
  - rentgenová spektroskopie
    - netepelné záření + odražené záření od akrečního disku
    - z profilu čáry železa lze určit rotaci černé díry (spin)
    - odhaluje přítomnost vysoce ionizovaných plynů

Optická spektra

Existuje celá zoologie spekter, ale některé rysy jsou pro aktivní galaxie společné...

intenzita záření



vlnová délka

zakázané čáry

- vznikají v důsledku silného ozáření plynu o nízké hustotě
- zakázaná čára kyslíku O[III]* je charakteristickým rysem optických spekter aktivních galaxií

*[III] znamená 2x ionizovaný

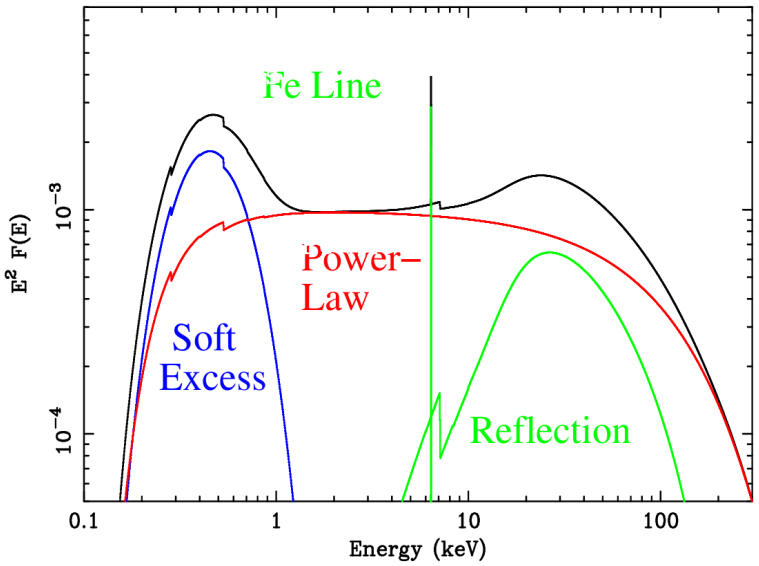
široké čáry

- rozšíření čáry vodíku je v důsledku oběhu kolem černé díry (Dopplerův jev)
- používá se k relativně přesnému určení hmotnosti černé díry

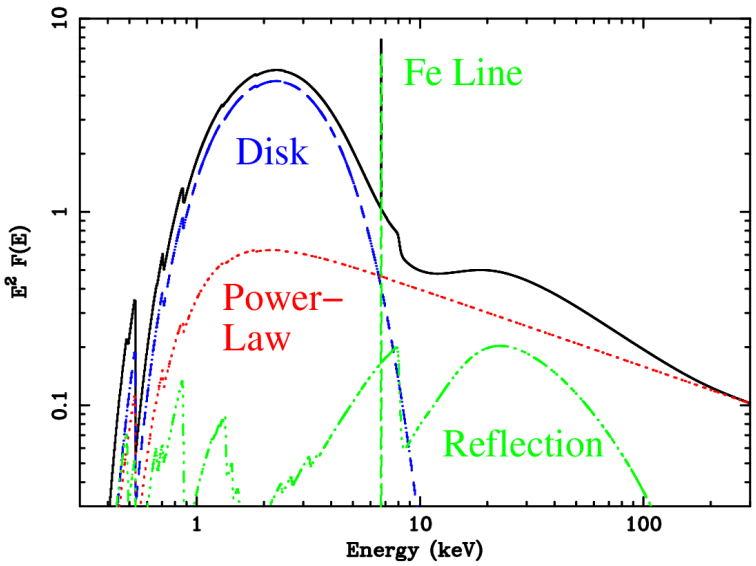
Rentgenová spektra

- odkrývají nejvnitřnější oblasti akrečního disku
- podobnost se stelárními černými dírami:

aktivní galaxie



rentgenová dvojhvězda

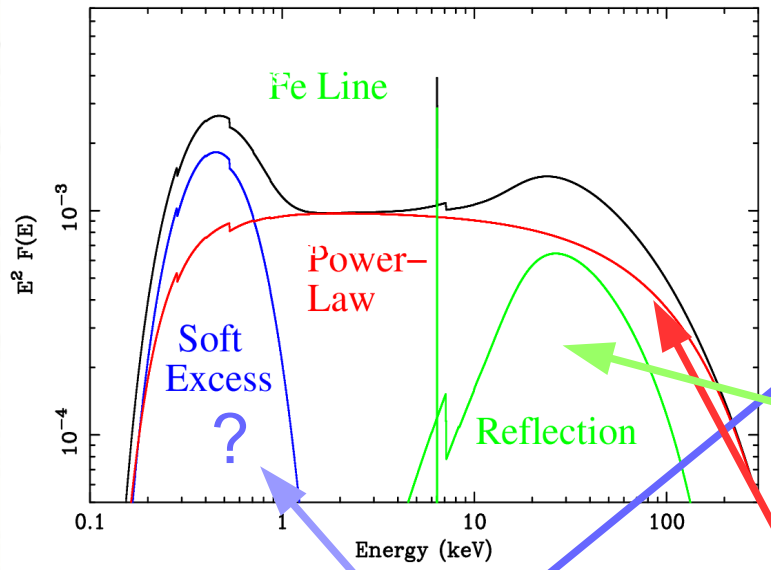


- spektrum má tři hlavní složky

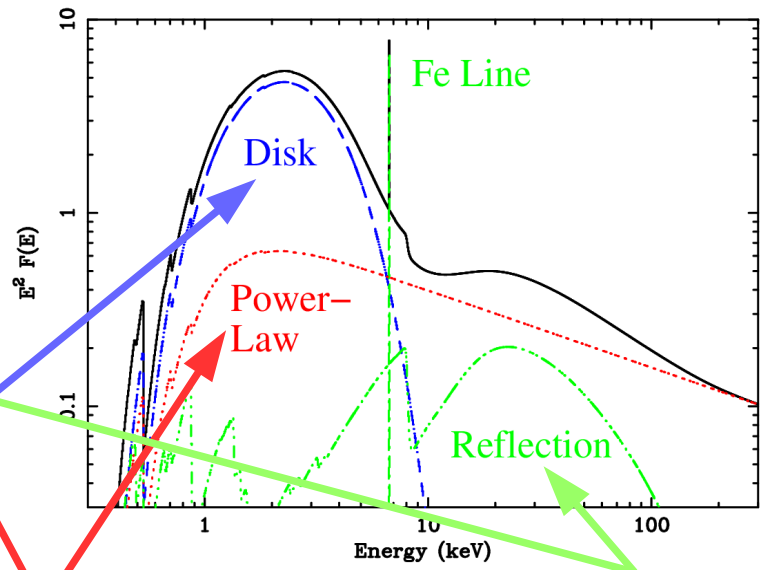
Rentgenová spektra

- odkrývají nejvnitřnější oblasti akrečního disku
- podobnost se stelárními černými dírami:

aktivní galaxie



rentgenová dvojhvězda



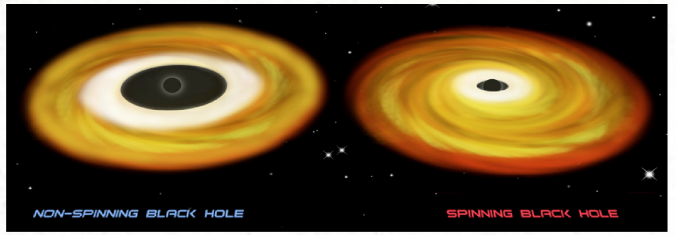
tepelné záření disku

záření rozptýlené na horkých elektronech v atmosféře disku

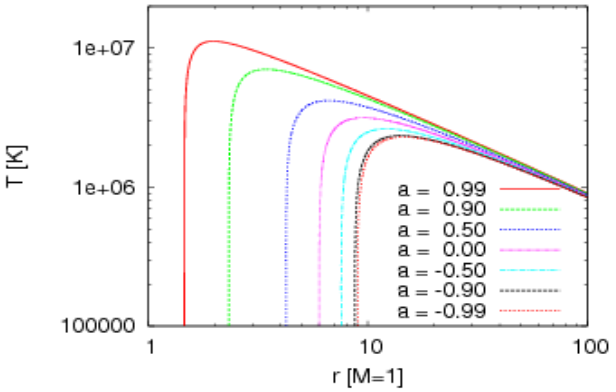
odraz rozptýleného záření na povrchu akrečního disku

Tepelné záření

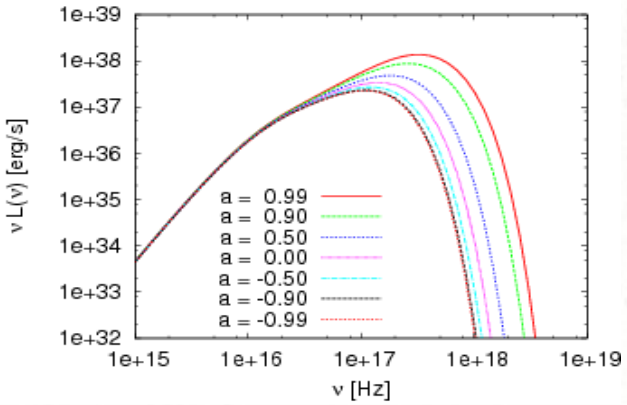
- čím blíž se akreční disk dostane k černé díře, tím více se hmota zahřeje
  - závisí na spinu černé díry



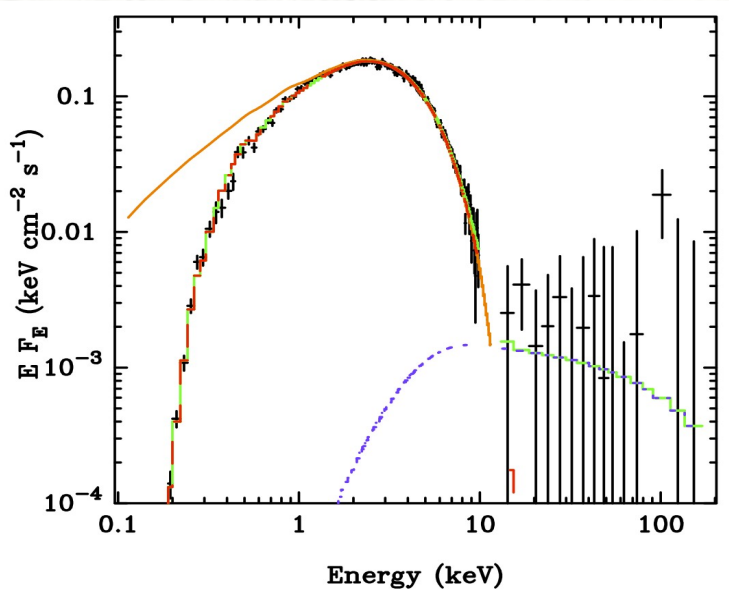
radiální profil teploty disku:



termální spektrum akrečního disku:



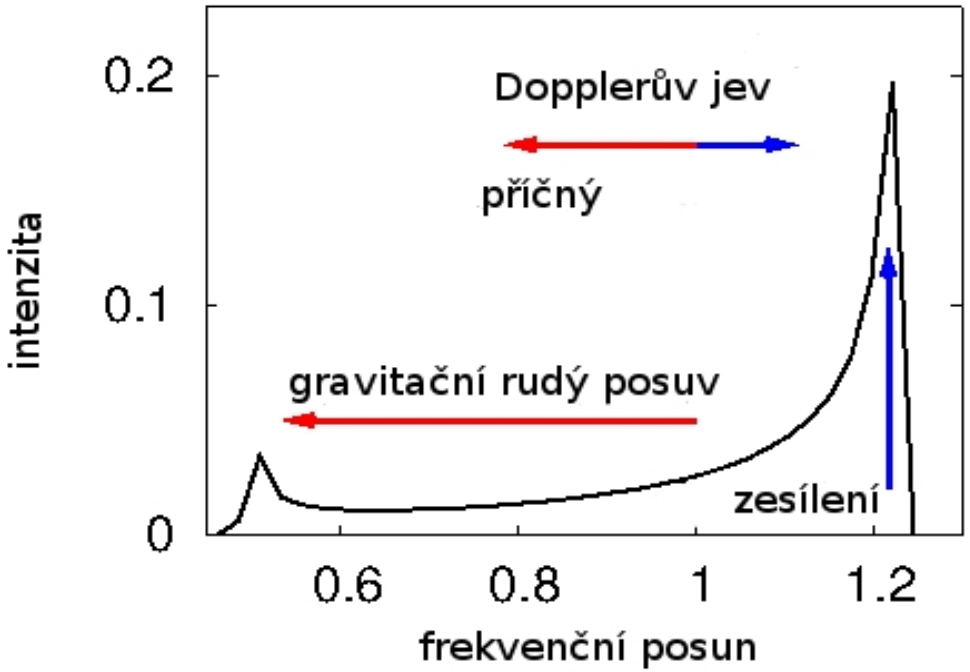
ukázka termálního spektra:



Čára železa

- vzniká odrazem na povrchu akrečního disku
  - vysoké oběžné rychlosti a zakřivení prostoročasu

  → **relativistická deformace profilu spektrální čáry**



- gravitační rudý posuv
- zesílení záření ve směru pohybu
- příčný Dopplerův jev

Čára železa

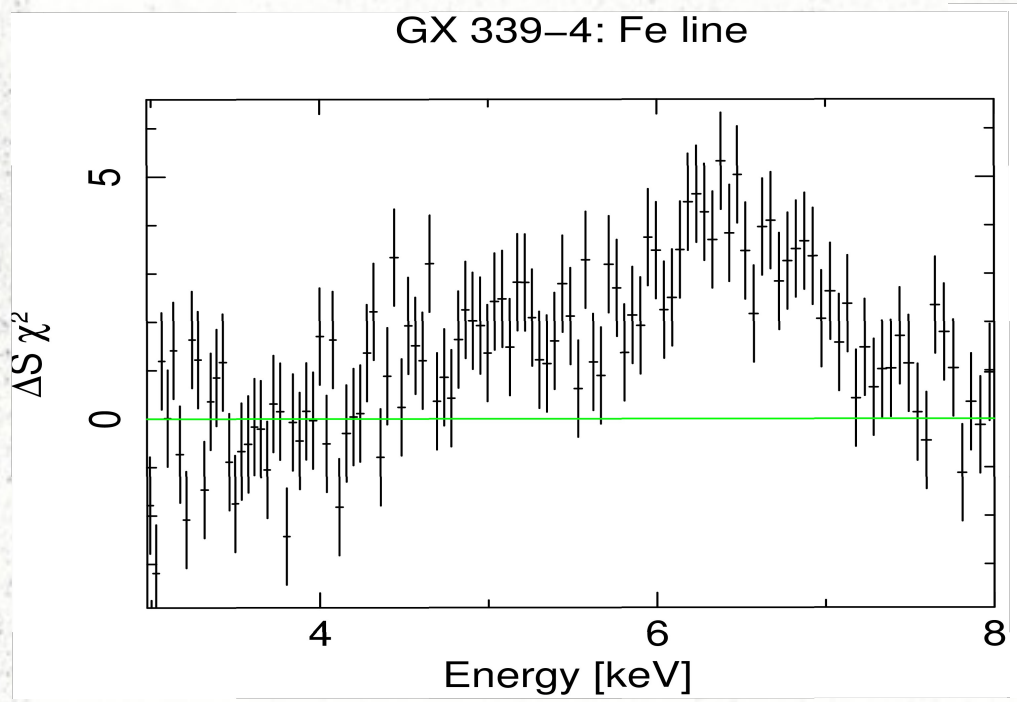
- vzniká odrazem na povrchu akrečního disku
  - vysoké oběžné rychlosti a zakřivení prostoročasu

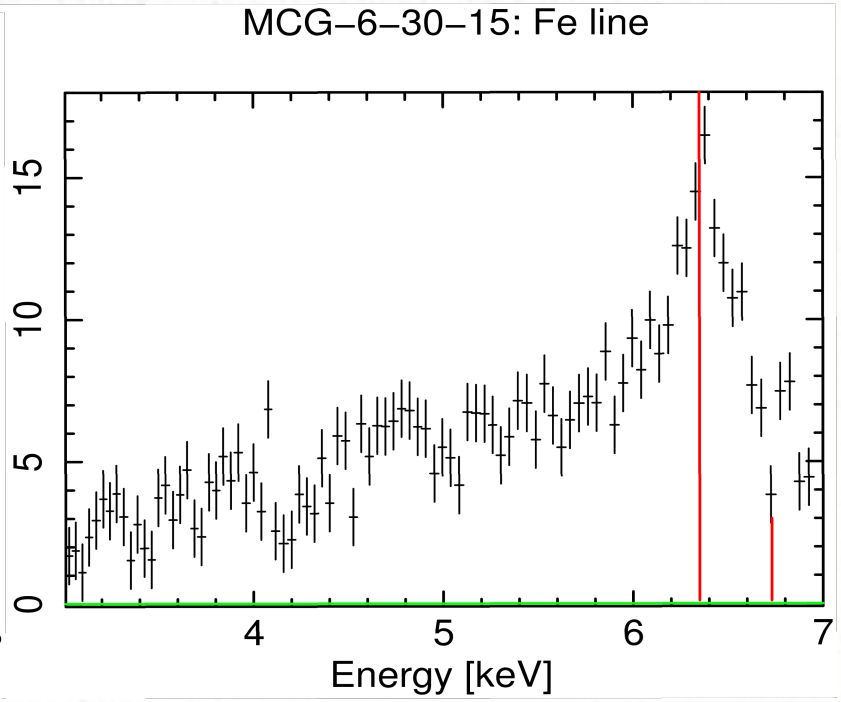
→ **relativistická deformace profilu spektrální čáry**

autor: M. Dovčiak

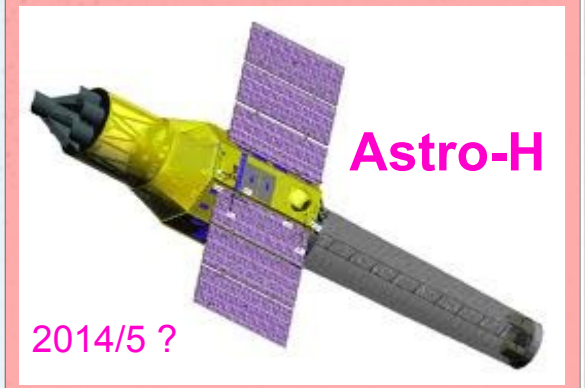
Čára železa v rentgenových spektrech

- přítomna ve spektrech aktivních galaxií i rentgenových dvojhvězd
  - umožňuje určit spin černé díry nezávisle na hmotnosti a vzdálenosti zkoumaného objektu!





Současnost rentgenové astronomie



Budoucnost rentgenové astronomie

- dvě rentgenové mise v soutěži Evropské kosmické agentury:

Athena +

velká družice, 2028?

horký vesmír, obří černé díry

LOFT

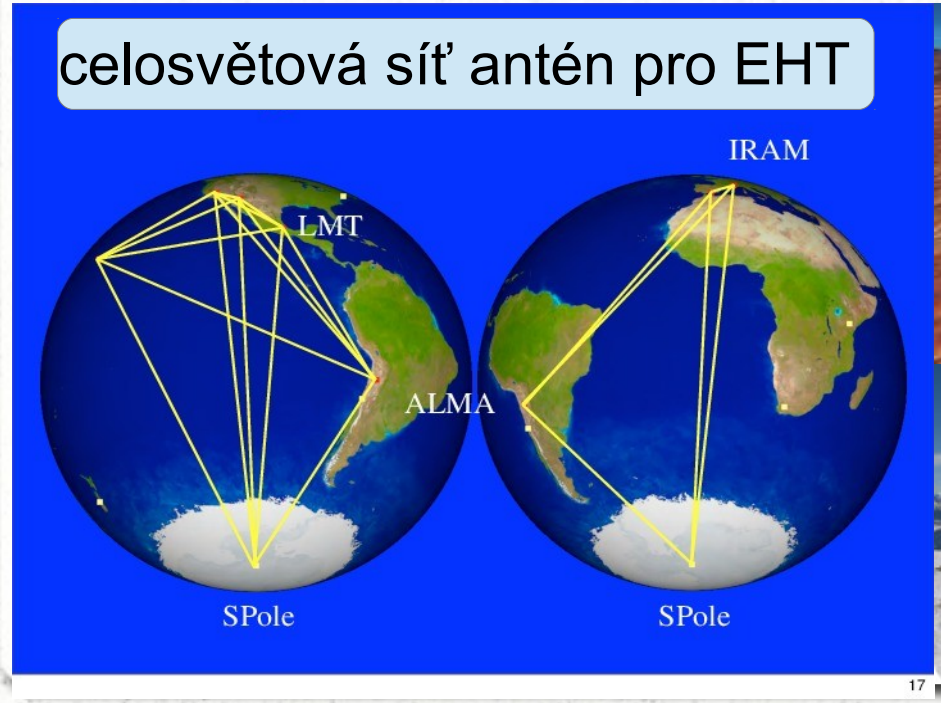
středně-velká družice, 2022?

neutronové hvězdy, stelární černé díry

Astronomický ústav AV ČR spolupracuje na obou návrzích!!!

Budoucí astronomie – vyfotíme černou díru?

- nejvhodnější objekt: Sgr A* (nejbližší obří černá díra)
- EHT (Event Horizon Telescope)
  - využívá **interferometrie v sub-mm** oblasti, kdy se do pozorování zapojí více observatoří:



Shrnutí

- černé díry jsou objekty, jejichž existence vychází z Einsteinovy teorie obecné relativity
- astronomové potvrzují výskyt dvou hlavních druhů černých děr:
  - **stelární** (pozůstatky po velmi hmotných hvězdách)
    - černé díry, které jsou součástí dvojhvězdného systému, můžeme pozorovat v rentgenovém oboru díky záření hmoty, která na ně přetéká z druhé hvězdy
  - **veledíry** v centrech galaxií, kde dosahují hmotnosti několika milionů až desítek miliard sluncí
- astrofyzikální černé díry (bez el.náboje) jsou plně popsány jen dvěma parametry – hmotnost, spin (rotační energie), které se snažíme změřit

Shrnutí - pokračování

- aktivitu černých děr pozorujeme na **všech vlnových délkách** elektromagnetického spektra
  - zejména užitečná je **rentgenová astronomie**
- v Astronomickém ústavu AV ČR (oddělení relativistické astrofyziky) se zabýváme:
  - teorií (modelování záření akrečních disků,...)
  - pozorováním - analýzou dat různých vlnových délek
  - zapojujeme se do návrhů budoucích satelitů ESA
    - Česká Republika součástí ESA od 12.11.2008