

„Černé díry jsou jedním z nemnoha případů v historii vědy, kdy byla teorie rozvinuta do velkých detailů dřív, než pozorování alespoň náznakem potvrdila správnost předpokladů.“

Kdy byla ČD předpovězena?

- 1687 Gravitace - Isaac Newton – úniková rychlost
- 1783 John Michell objekt, který by měl únikovou rychlost větší než rychlost světla
- 1796 Simon Pierre Laplace předpovídá existenci tmavých objektů „černých děr“
- 1915 Albert Einstein publikuje OTR popisující zakřivení prostoročasu
- 1916 Karl Schwarzschild stanoví tzv. Schwarzschildův poloměr
- 1939 Robert Oppenheimer a Hartland Snyder matematicky prověřují Schwarzschildovy teorie
- 1964 John Wheeler razí termín „černá díra“
- 1965 Objev prvního kandidáta na černou díru, Cygnus X-1
- 1970 Stephen Hawking rozpracovává moderní teorii černých děr
- 1971 Vědci potvrzují kandidáta na černou díru Cygnus X-1 stanovením hmotnosti jeho doprovodné hvězdy
- 1989 Ruská kosmická agentura spouští Granat detekce gama paprsků pro zobrazování galaktických center
- 1994 Hubbleův kosmický dalekohled poskytuje další důkaz, že ve středu galaxií jsou umístěny superhmotné černé díry
- 2004 Zahájeny gama záblesková mise

Černé díry

Wikipedie atd.

Černá díra je natolik hmotný objekt, že jeho gravitační pole je v **jisté oblasti prostoru** **prostorochasu** natolik silné (neboli zakřivení prostorochasu je tak silné), že žádný objekt včetně světla, gravitačních vln apod. nemůže tuto oblast opustit \implies **horizont událostí**



Probing Strong Gravity near Black Holes (Perseus 15-18/2/2010)



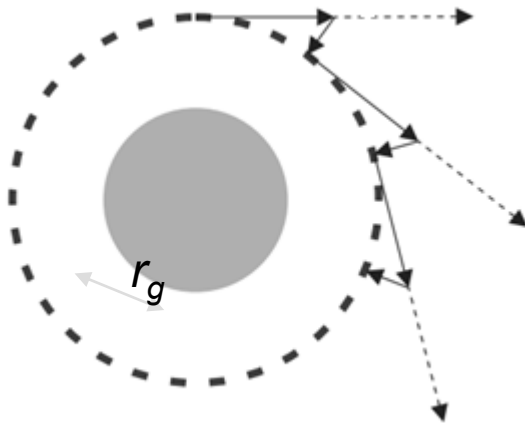
Laplaceův výpočet Schwarzschildova poloměru (1798)

Zadání: zjistit, jaký poloměr by musel mít objekt o hmotnosti M , aby úniková rychlost dosáhla rychlosti c světla.

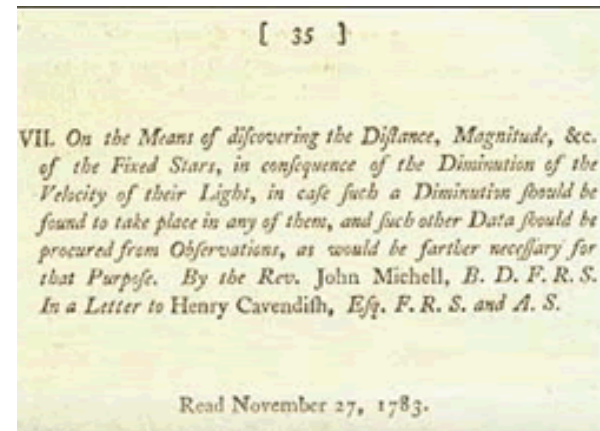
Řešení: ze zákona zachování energie

Schwarzschild radius

$$\frac{1}{2} m c^2 - G \frac{mM}{r_g} = 0 \quad \Rightarrow \quad r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$



$$v = \sqrt{g r} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



Prvním, kdo studoval otázku existence hvězd s tak velkou gravitací, že z jejich povrchu nemůže uniknout ani světlo, byl brit John Michell (1783).

Gravitační pole objektu zakřivuje prostoročas, mění jeho vlastnosti.

Einsteinovy rovnice

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\mathcal{R} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Schwarzschildova metrika

Schwarzschildovo řešení se týká prostoročasu sféricky symetrického klidného tělesa,

Einsteinova rovnice se zjednoduší $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 0$

$$ds^2 = \left(1 - \frac{C}{r}\right)c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{C}{r}\right)} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad \text{kde} \quad C = \frac{2GM}{c^2}$$

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

Sch-metrika se hodí pro popis kompaktních objektů typu neutronových hvězd a černých děr (hovoříme o tzv. Schwarzschildově černé díře).

Přesto, že většina objektů jsou rychle rotující objekty, užívá se tato metrika jako model pro maximální zjednodušení popisu fyzikálních procesů.

Černá díra, která generuje Schwarzschildův prostoročas je tedy podobná nerotující kouli bez el.náboje

Černé díry jsou objekty, jejichž základní vlastnosti odvodili vědci přesně teprve z obecné teorie relativity, z Einsteinovy teorie gravitace.

Mohou vzniknout z jakékoliv formy hmoty, pokud je vtlačena do dostatečně malého prostoru. Podle OTR přítomnost každé hmoty zakřivuje prostoročas. V případě ČD dojde k lokálnímu zhroucení prostoročasu samotného, ten je vtahován k jistému bodu "uvnitř".

Čím je poloměr reálného objektu bližší svému r_s , tím důležitější jsou efekty obecné teorie relativity. Pro objekt s poloměrem menším než je r_s neexistuje stabilní řešení, každý se zhroutí v tzv. černou díru.

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

@formula_for_your_comfort

Skutečné černé díry jsou důležitým fyzikálním jevem, jehož vlastnosti a projevy souvisejí se základními rysy našeho vesmíru, tedy časoprostorem i hmotou v něm.

Je zřejmé, že jak všechny důsledky a souvislosti jejich existence, tak i podrobné rysy jejich stavby stále ještě neznáme.

Co je černá díra?

Černá díra je oblast s tak silnou gravitací, že z ní nic nemůže uniknout, ani světlo

Zbytek hmoty hvězdy padá do velmi malé oblasti

Malou oblast nazýváme singularitou

Plochu ohraničující oblast okolo singularity, z níž nic nemůže uniknout, nazýváme horizontem událostí

Černé díry vznikají na konci vývoje velkých hvězd

Po spotřebování materiálu (lehkých prvků) v jádře hvězdy nic nebrání zhroutení.

Část hmoty je po explozi vržena do okolního prostoru

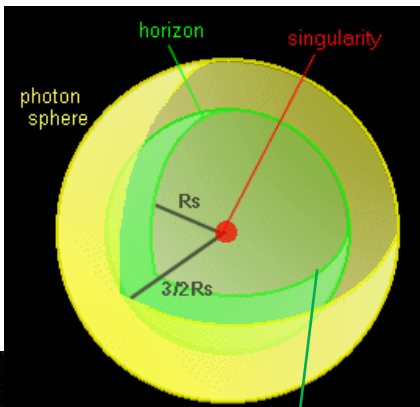
Horizont událostí

Černé díry hvězdné velikosti

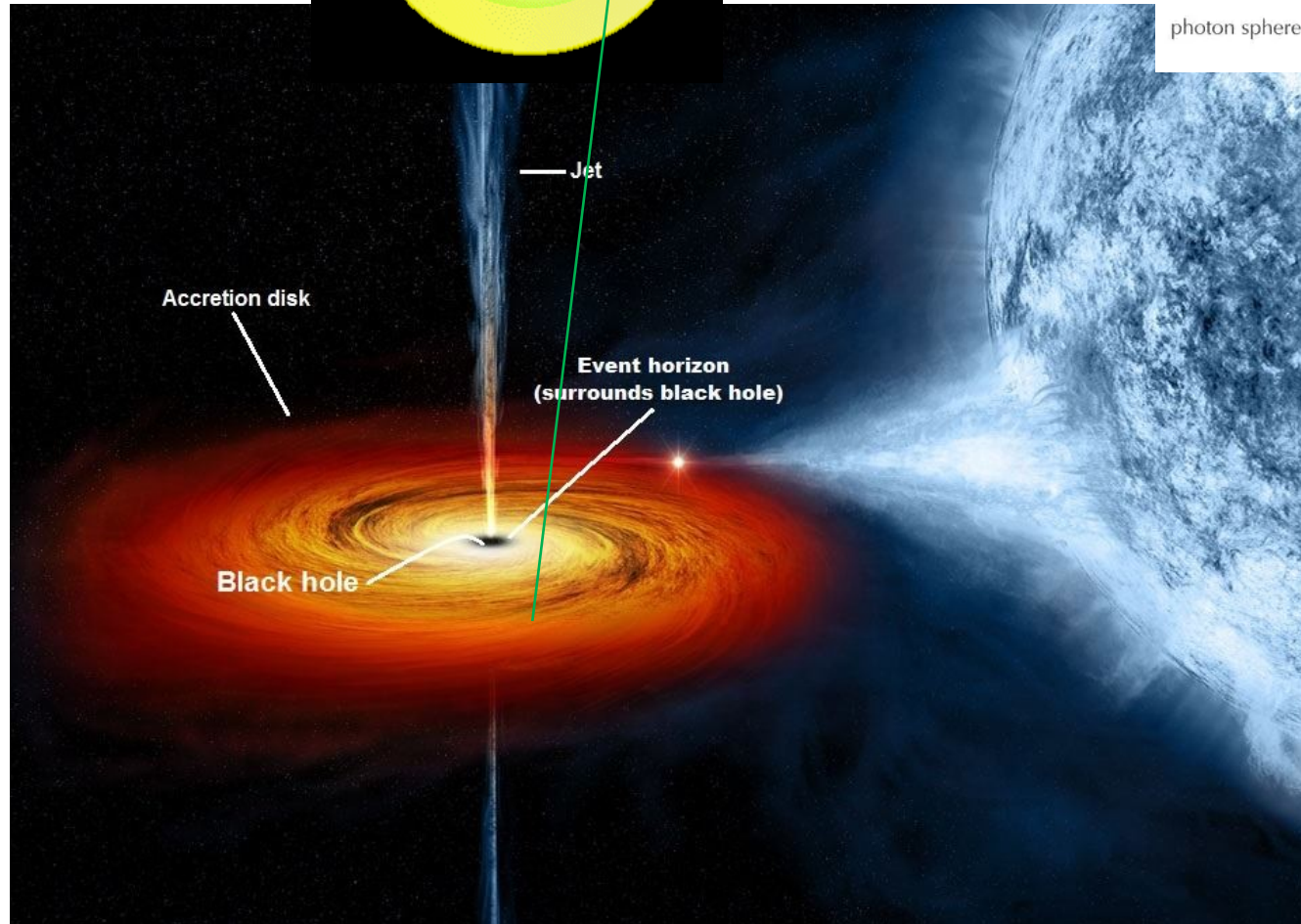
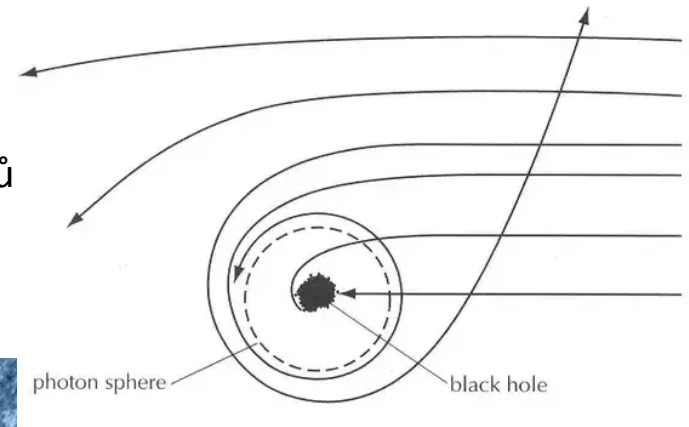
Supermasivní černé díry

Černé díry hvězdné velikosti mají hmotnost nejvýše sta Sluncí, supermasivní černé díry do hmotnosti milionů až miliard Sluncí

Pokud bychom se k hranici černé díry vydali v raketě, její přední konec by byl dírou přitahován mnohem více než zadní, takže raketa, věci v ní i posádka uvnitř by se natahovaly jako špagety



kruhová orbita fotonů



Okolí černé díry patří mezi nejsvětivější objekty ve vesmíru. Kolem ní se vytváří tzv. **akreční disk**, mohutný torus plynu a prachu, který ve vnitřní části přechází v rotující plazma zahříváné vnitřním třením plynu.

Rozdělení černých děr podle modelových vlastností

- **Schwarzschildova** díra: nerotující nenabitá díra, jediný parametr – hmotnost M . Zjednodušený ideál černé díry rotují.
- **Kerrova** díra: rotující nenabitá díra, charakterizována M a momentem hybnosti. Patří k běžně pozorovaným č.d.
- **Reissnerova-Nordströmova** díra: nerotující nabitá díra (Q), jde o možné řešení Einsteinových rovnic, ve vesmíru se nejspíše nevyskytuje, všechny hvězdy jsou elektricky neutrální.
- **Kerrova-Newmanova díra**: nejobecnější případ, č.d. s momentem hybnosti a nábojem (Q). Žádné jiné parametry si černá díra ze své historie neponechává, ostatní informace se při jejím formování ztratí (tzv. no hair teorém – černá díra nemá žádné vlasy).

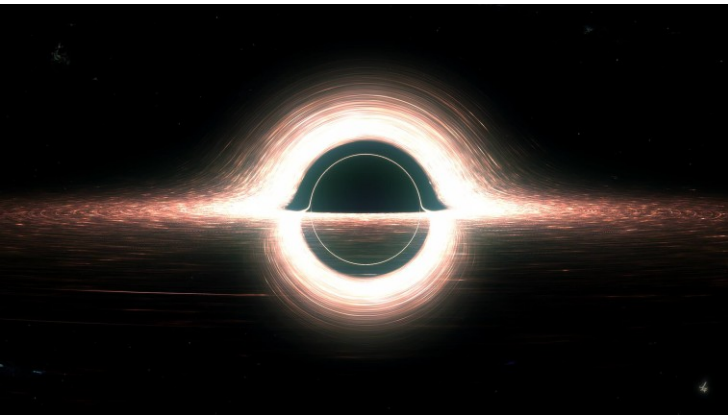
Černé díry pozřou vše včetně světla ---

„černé díry nemají vlasy“.

To znamená, že je lze úplně popsat jen

3 parametry:

hmotností M ,
momentem hybnosti a
elektrickým nábojem Q .

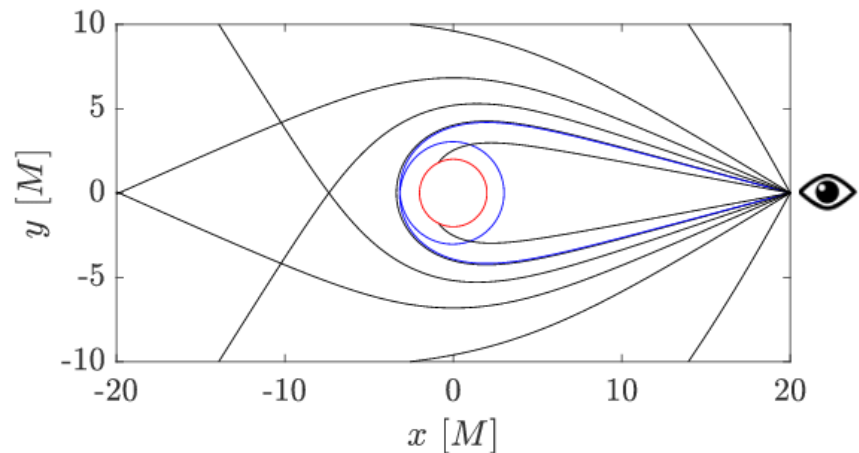


black holes have no hair!



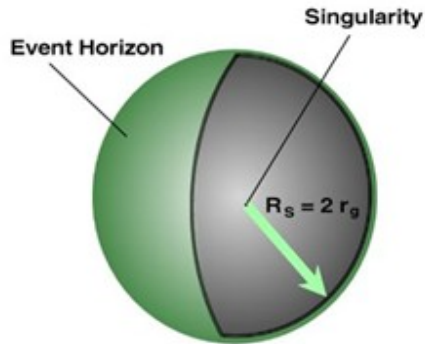
- schwarzschild
 $\{M\}$
- reissner-nordstrom
 $\{M, Q\}$
- kerr
 $\{M, a\}$
- kerr-newman
 $\{M, a, Q\}$

wheeler: no-hair theorem

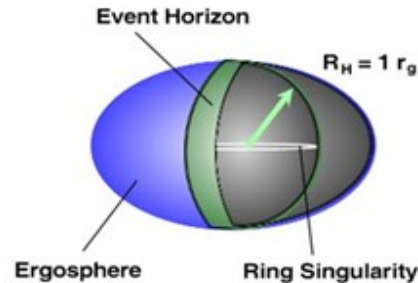


Fotosféra a gravitační čočkování

Skutečné objekty rotují a situace je složitější než u idealizované nerotující Schwarzschildovy černé díry.



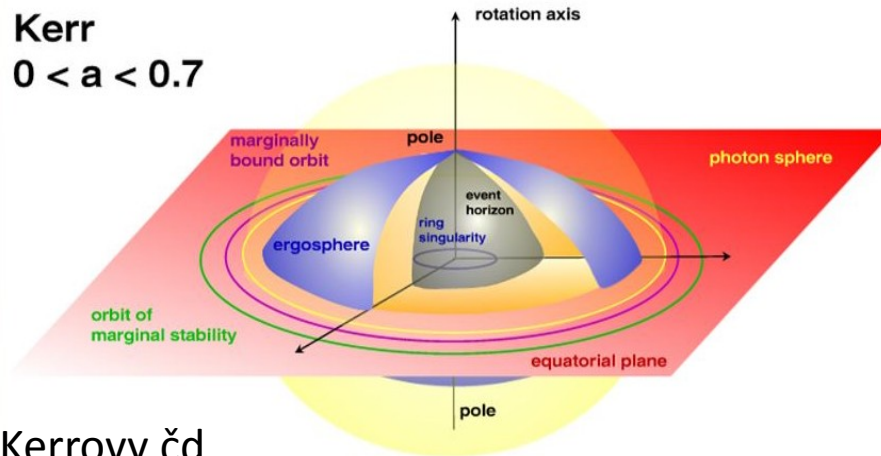
Schwarzschild
 $a = 0$



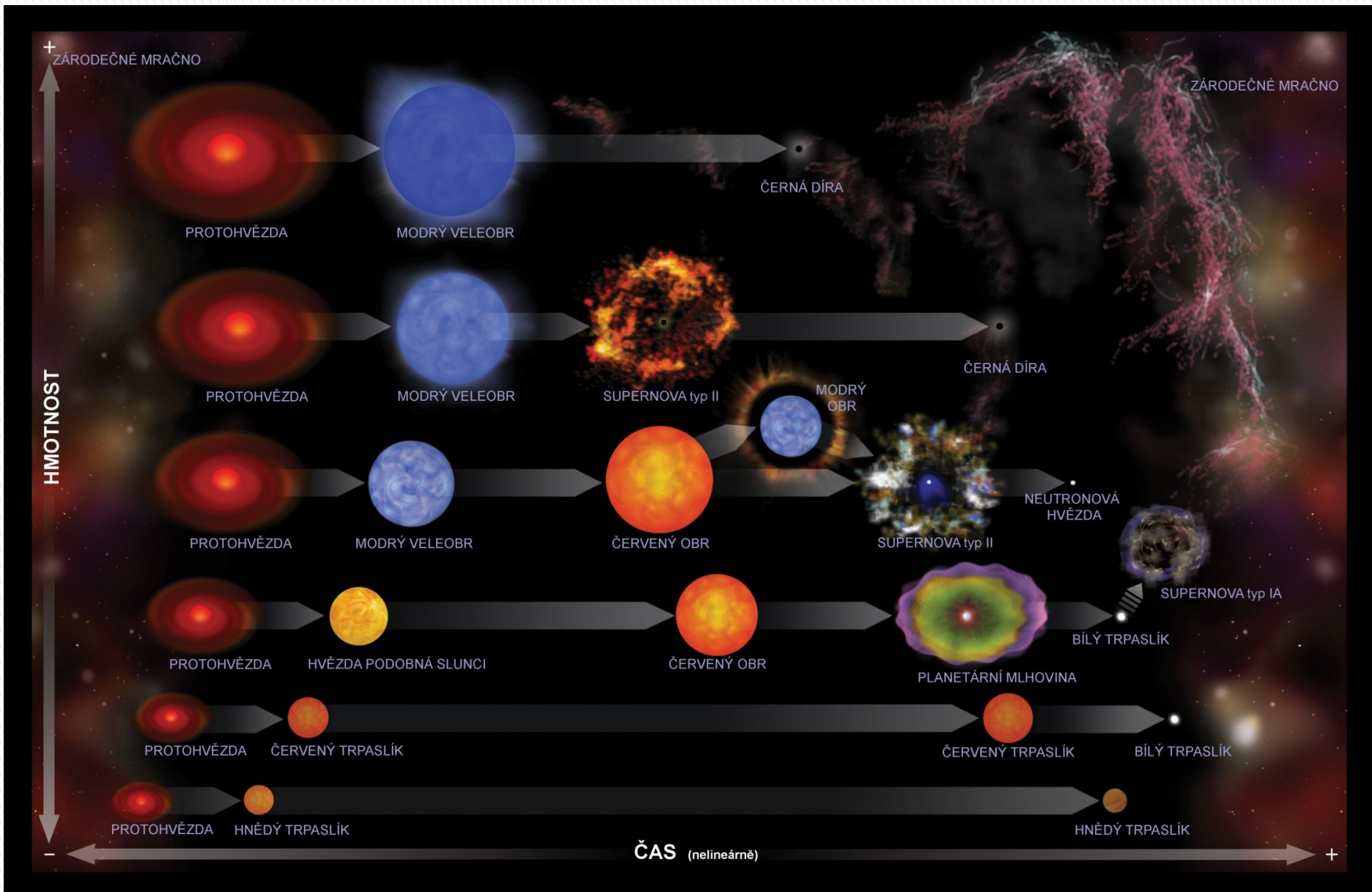
Kerr
 $a = 1$

Strhávání prostoročasu rotující černou dírou způsobuje i strhávání fotonů ve směru rotace.

Kerr
 $0 < a < 0.7$

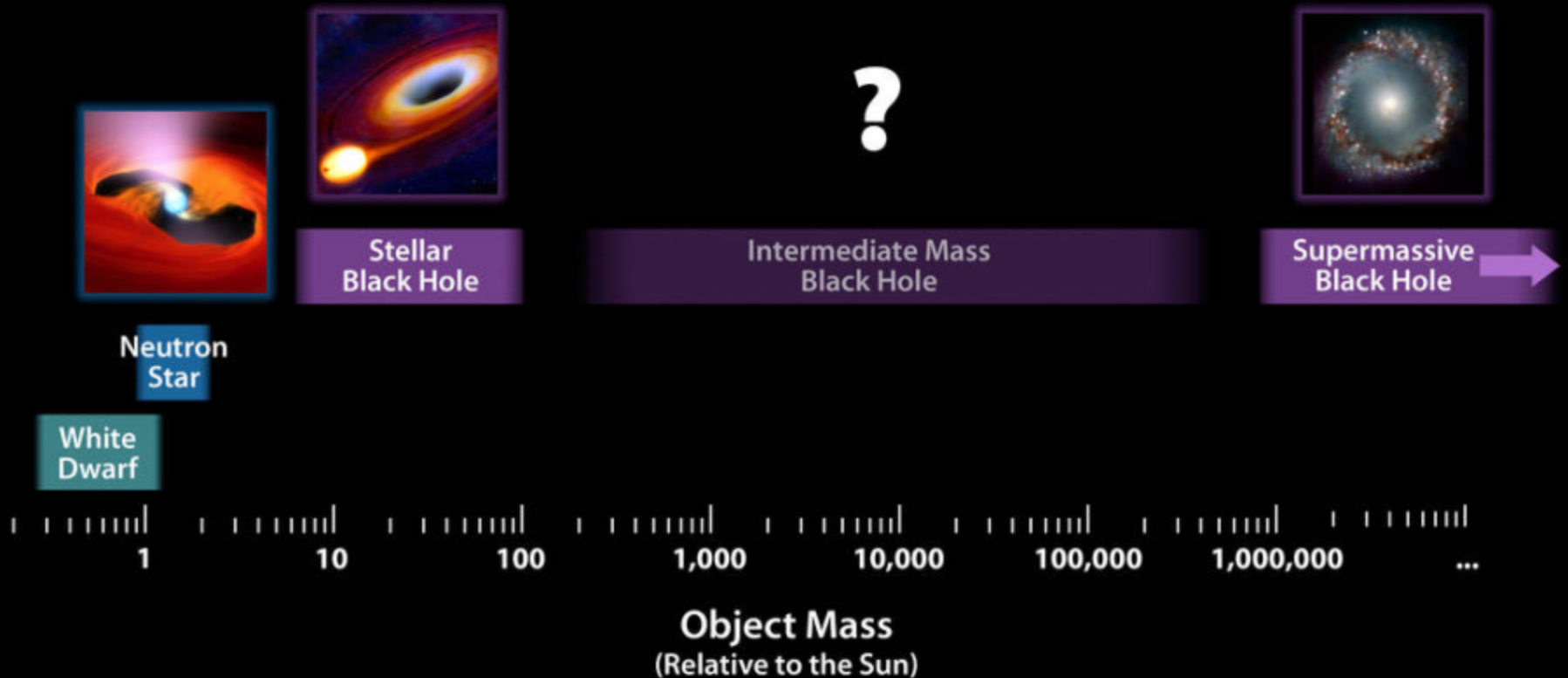


Topologie Kerrový čd



„Život“ hvězd se liší podle velikosti a typu hvězdy

Observed Mass Ranges of Compact Objects



Zdroj NASA/JPL-Caltech: <https://www.nasa.gov/jpl/nustar/pia18842>

- Hypotézy vzniku SMČD: akrecí z menších (?), z primordiálních ČD (kvasary ve vesmíru ne starším než 1 Gy)

Rozdělení podle hmotností

- **Hvězdné černé díry.** Černé díry vznikající v závěrečných fázích hvězdného vývoje. Jejich hmotnost je několik Sluncí, typickým zástupcem je například první objevená černá díra **Cyg X1** v souhvězdí Labutě.
- **Galaktické č.d.** - v centrech galaxií, M je od milionů po miliardy Sluncí. Není jasné, zda se galaxie formovaly kolem těchto obřích černých děr, nebo zda tyto díry vznikaly v galaxiích až později. Jiné názvy: **obří díry**, občas masivní černé díry (z angl. **massive**).
- **Primordiální č.d.** Měly by mít nepatrné rozměry elementárních částic a mohly vznikat by v ranných fázích vývoje vesmíru. Pokud existují, měly by zářit díky Hawkingovu vypařování.

Pozorované množství γ záření ve vesmíru vylučuje větší množství primordiálních děr než 300 v 1 krychlovém světelném roce. Nikdo je zatím neviděl.

- **Černé díry středních hmotností.** Vznikají slučováním hvězdných černých děr. První exemplář byl objeven v roce 2015 při první detekci gravitačních vln. Za dva roky detekování gravitačních vln byly objeveny čtyři takové díry, nejhmotnější má cca 60 Sluncí (viz AB 20/2017).

Hmotnostní – energetická škála černých děr

- TeV M_{BH} $\sim 1 \text{ TeV}$ (relativistic heavy ion collisions)
 - primordialní M_{BH} $\sim 10^{18} \text{ g}$
 - stellar $1 M < M_{\text{BH}} < 100 M_{\text{sl}}$
 - massive $100 M_{\text{sl}} < M_{\text{BH}} < 10^5 M_{\text{sl}}$
 - supermassive $10^5 M_{\text{sl}} < M_{\text{BH}} < 10^{10} M_{\text{sl}}$
-
- TeV mini holes in particle accelerators (?)
 - primordial early universe, galactic seeds (?)
 - stellar fate of massive stars, microquasars
 - massive globular clusters (?)
 - supermassive obří galactic centers and agn

indikátory č.d.: hypernovy, gravit.vlny, supernovy, pro supermasivní čd
M-sigma relace

Zdroj: ESO



- **10. 4. 2019** (měření 2017/4): M87, 55 Mly; 6,5 miliard M_{\odot} , souhvězdí Panny
- průměr akrečního disku 0,000 042'' (jablko na Měsíci), srovnatelné se Sgr A*
- nejkratší $\lambda = 1,3$ mm rádiové interferometrie
- stín horizontu: obraz deformován gravitačním polem (Eddington, 1919)
- z jednoho teleskopu řádově jednotky petabajtů (tj. 10^{15} , tedy milion gigabajtů), vozí se fyziky (z jižního pólu až na konci zimy, tj. na podzim u nás)

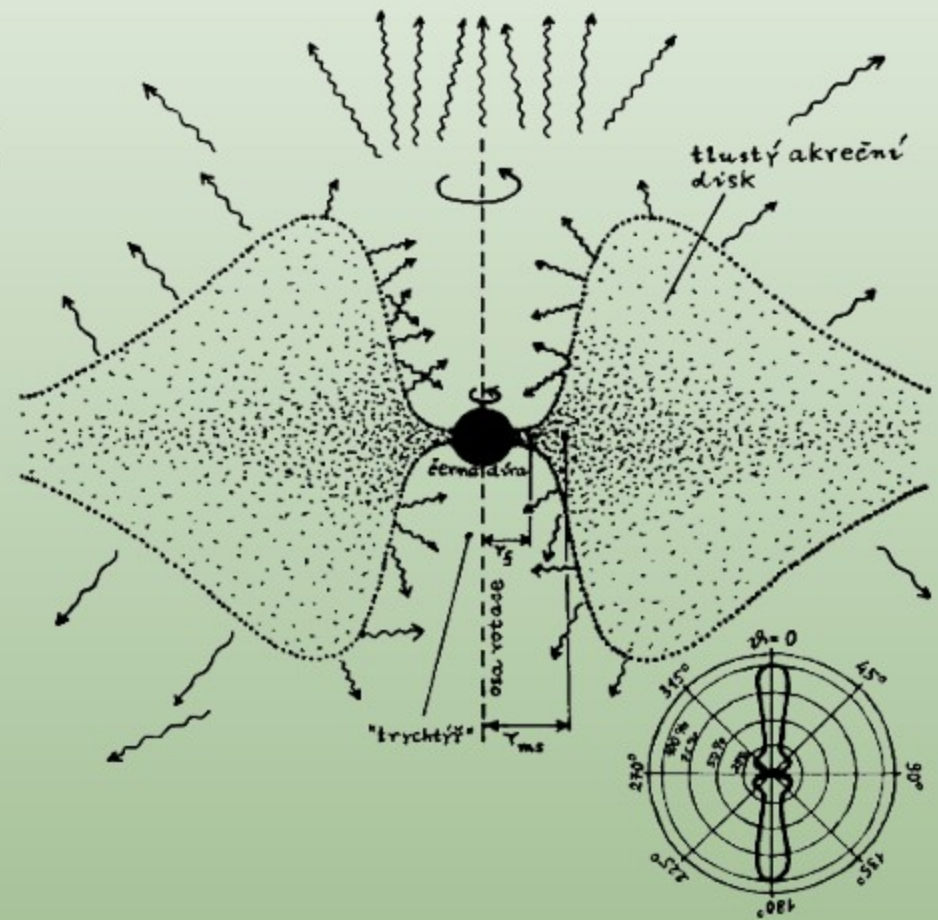
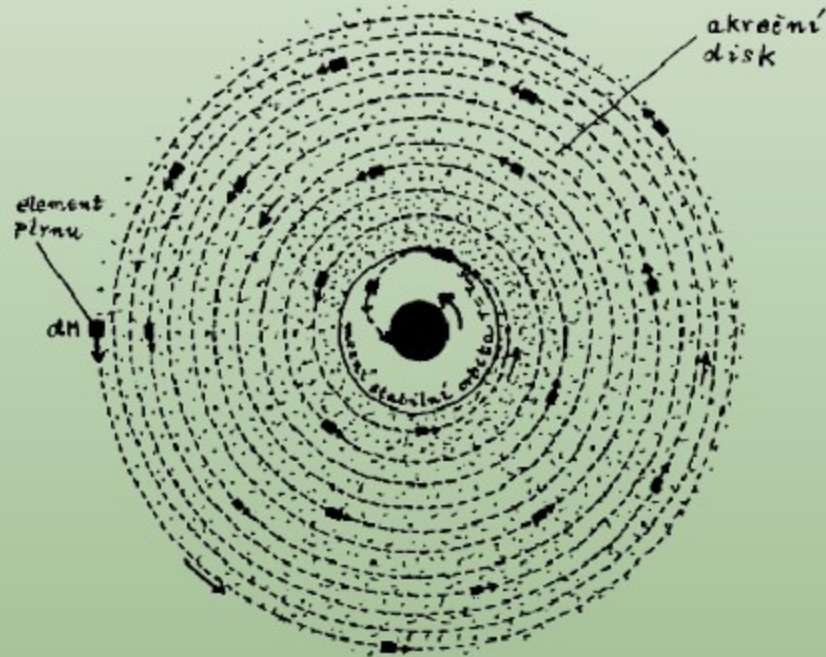
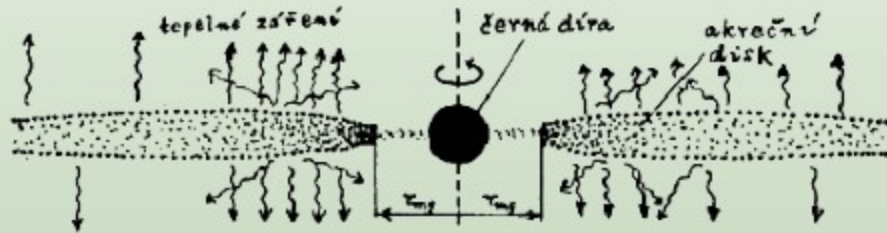


Podolský, J. (2019). Jak spatřit nespátřitelné aneb černé díry opět v centru pozornosti. *Astropis*, **XXVI**(118), 6–10.



Bakala, P. & Svoboda, J. (2015). Stíny černých děr. Astrofyzikální testy obecné relativity. *Vesmír*, **94**(9), 638–641.

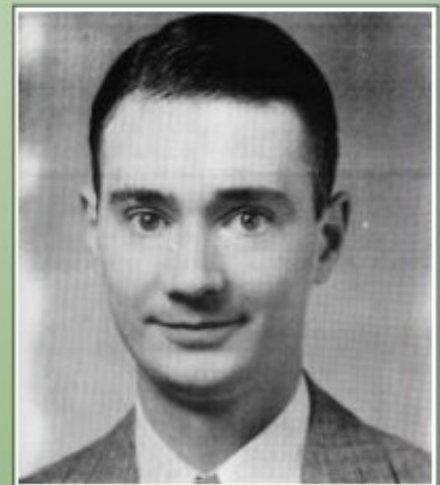
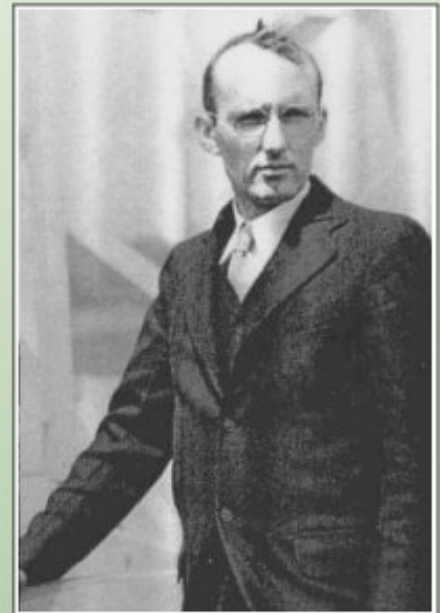
Obří černé díry



Ullmann, V. (1986). *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*. Ostrava: ČAS.
Dostupné z: <http://www.sweb.cz/AstroNuklFyzika/GravitCerneDiry.htm>.

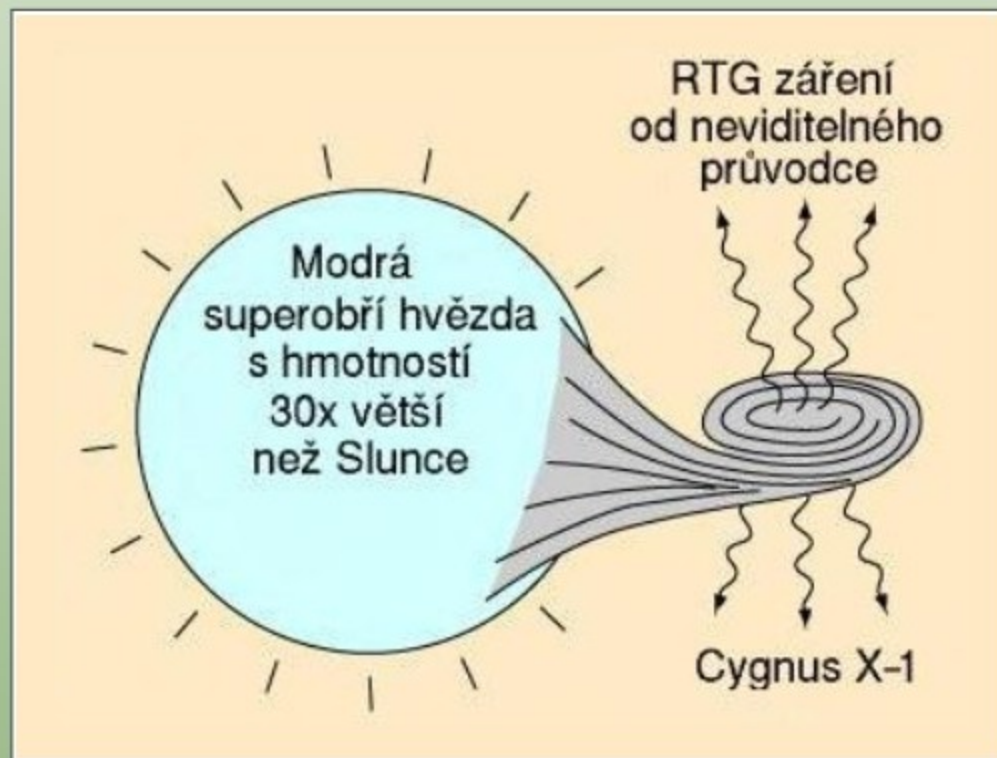
Obří černé díry

- Karl Jansky (1935): rádiový šum z centra Galaxie; dokonce silnější než ze Slunce
- Grote Reber (1939): radioamatér, na dvorku své matky, zdroje Cyg A, Cas A – 1. pozorování černých děr
- 1951: první rádiová galaxie (Ryle, opt. identifikace Baade), záření z gigantických laloků na obou stranách
- Maarten Schmidt (5. 2. 1963): kvasar 3C273, $z = 0,16$, velmi daleko, výkon $100\times$ větší než galaxie z prostoru „světelného měsíce“
- nejpravděpodobnější vysvětlení: obrovská rotující černá díra + akreční disk (Donald Lynden-Bell 1969)



Pátrání po ČD ve vesmíru

- Cygnus X-1: hvězda 20 – 35 M_{\odot} a průvodce HDE226868 min. 6 M_{\odot} , 6 000 ly, RTG zdroj
- 📄 Webster, B. L., & Murdin, P. (1972). Cygnus X-1—a Spectroscopic Binary with a Heavy Companion? *Nature*, **235**(5332), 37–38. DOI: [10.1038/235037a0](https://doi.org/10.1038/235037a0).



Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes

2018 Observatories



- ALMA**  Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- APEX**  Atacama Pathfinder EXperiment
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- 30-M**  IRAM 30-M Telescope
PICO VELETA, SPAIN
- JCMT**  James Clerk Maxwell Telescope
MAUNAKEA, HAWAII
- LMT**  Large Millimeter Telescope
SIERRA NEGRA, MEXICO
- SMA**  Submillimeter Array
MAUNAKEA, HAWAII
- SMT**  Submillimeter Telescope
MOUNT GRAHAM, ARIZONA
- SPT**  South Pole Telescope
SOUTH POLE STATION
- GLT**  The Greenland Telescope
THULE AIR BASE, GREENLAND, DENMARK
- Kitt Peak**  Kitt Peak 12-meter Telescope
KITT PEAK, ARIZONA, USA
- NOEMA**  NOEMA Observatory
PLATEAU DE BURE, FRANCE

Observing in 2020



Accretion disc

Relativistic Jet

Event horizon

Singularity

At the very centre of a black hole, matter has collapsed into a region of infinite density called a singularity. All the matter and energy that fall into the black hole ends up here. The prediction of infinite density by general relativity is thought to indicate the breakdown of the theory where quantum effects become important.

Event horizon

This is the radius around a singularity where matter and energy cannot escape the black hole's gravity: the point of no return. This is the "black" part of the black hole.

Photon sphere

Although the black hole itself is dark, photons are emitted from nearby hot plasma in jets or an accretion disc (see below). In the absence of gravity, these photons would travel in straight lines, but just outside the event horizon of a black hole, gravity is strong enough to bend their paths so that we see a bright ring surrounding a roughly circular dark "shadow".

Relativistic jets

When a black hole feeds on stars, gas or dust, the meal produces jets of particles and radiation blasting out from the black hole's poles at near light speed. They can extend for thousands of light-years into space.

Innermost stable orbit

The inner edge of an accretion disc is the last place that material can orbit safely without the risk of falling past the point of no return.

Accretion disc

A disc of superheated gas and dust whirls around a black hole at immense speeds, producing electromagnetic radiation (X-rays, optical, infrared and radio) that reveal the black hole's location. Some of this material is doomed to cross the event horizon, while other parts may be forced out to create jets.

Singularity

Photon sphere

Innermost stable orbit

Swift J1644+57: vznik relativistického výtrysku



Hvězda velikosti Slunce se dostává do blízkosti supermasivní černé díry ve vzdálené galaxii.



2. Silné slapové síly v blízkosti černé díry začínají hvězdu natahovat, až ji nakonec doslova roztrhají.



3. Část hvězdy blíž k černé díře postupně obíhá okolo ní a vytváří tzv. akreční disk. Zbytek hvězdy je roptýlen do okolního prostoru.

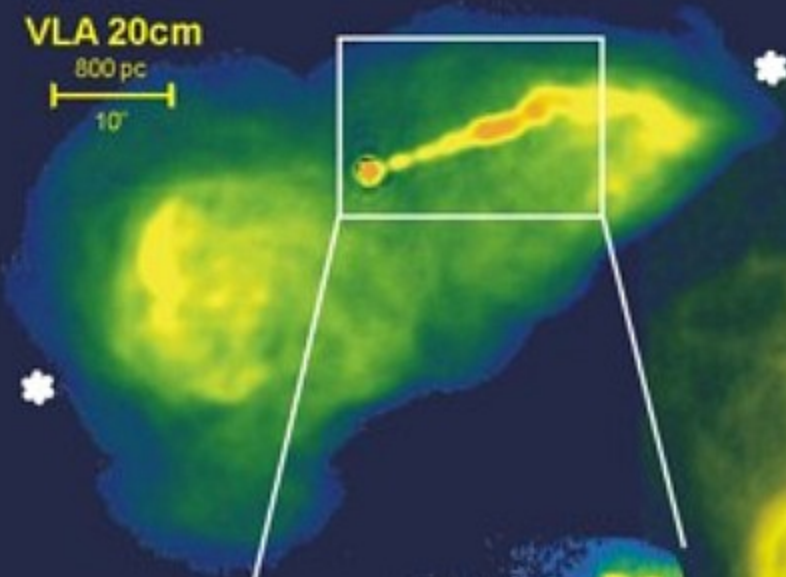


4. Silné magnetické pole v okolí černé díry vytváří výtrysky částic pohybujících se téměř rychlostí světla. Tyto výtrysky jsou zdrojem rentgenového záření a rádiových vln.

M87 = Virgo A

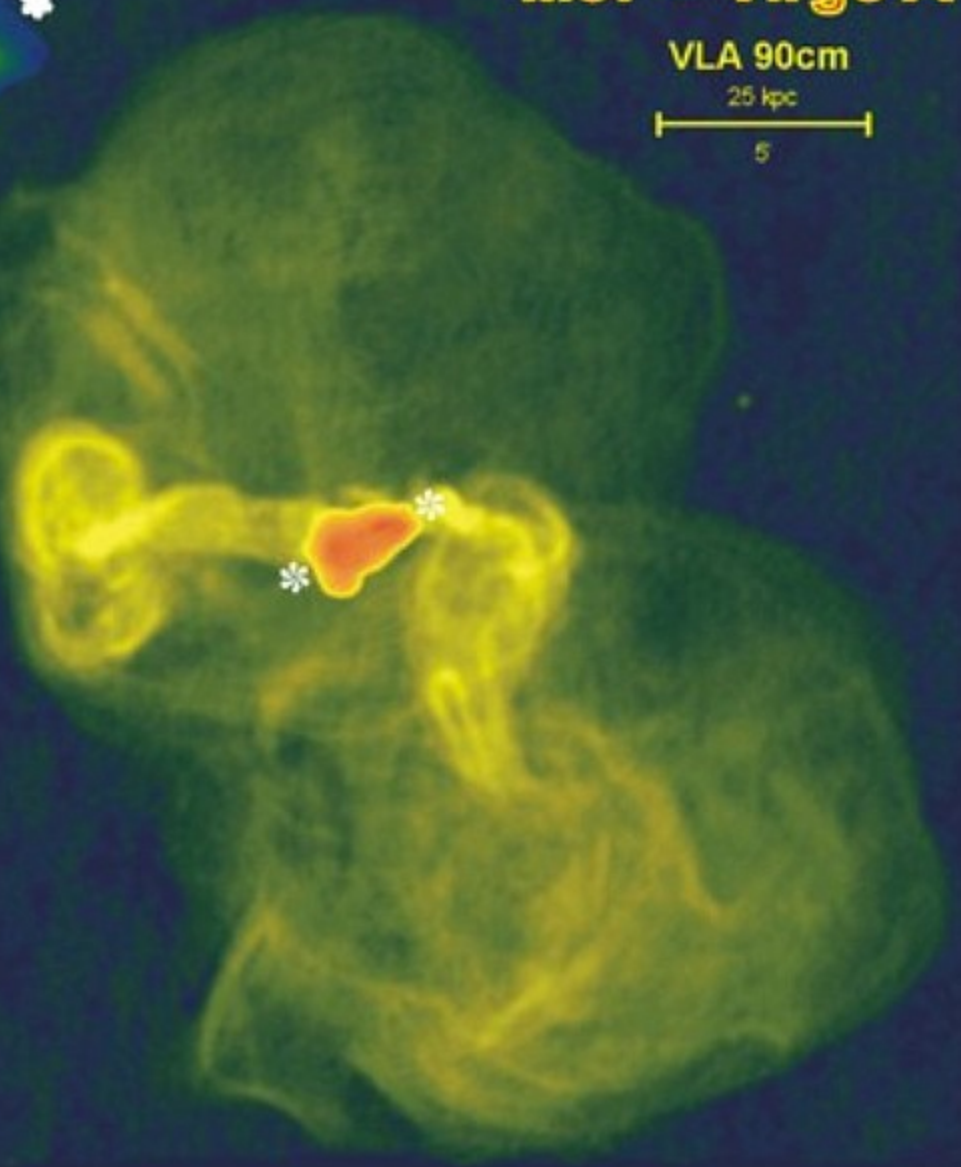
VLA 20cm

800 pc
10"



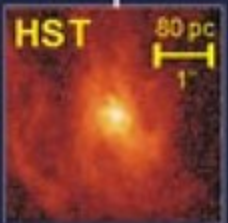
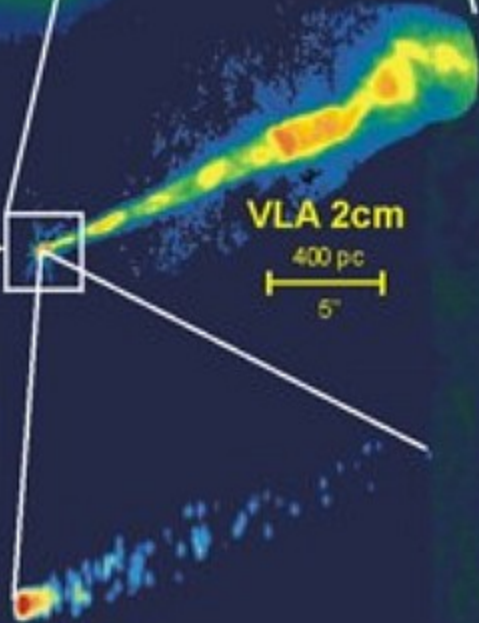
VLA 90cm

25 kpc
5"



VLA 2cm

400 pc
5"

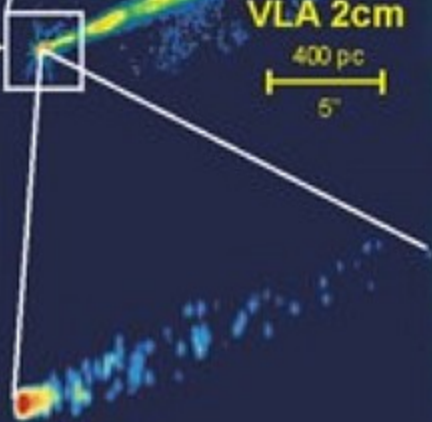


HST

80 pc
1"

VLBA 2cm

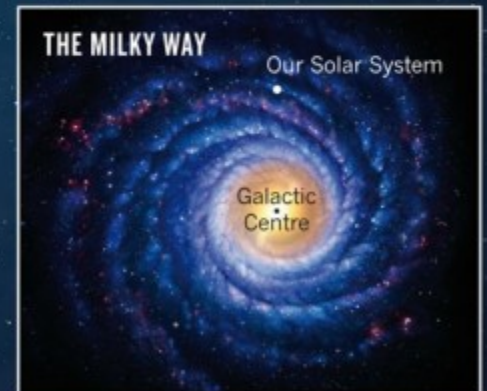
0.8 pc
0.01"



Sgr A*

THE MONSTER IN THE MIDDLE

By tracking stars near the mysterious object at the centre of the Milky Way, astronomers have shown that they move in years-long orbits; 8 examples are shown here. These orbits prove that the object packs the mass of 4.1 million Suns into a space smaller than the Solar System, and can only be a black hole.



Některé objevující se (skoro) miskoncepty

- Vznikají pouze kolapsem velmi hmotných hvězd

- Schwarzschildův poloměr:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} = 1,48 \times 10^{-27} \text{ m} \left(\frac{M}{\text{kg}} \right) \approx 3 \text{ km} \frac{M}{M_\odot}$$

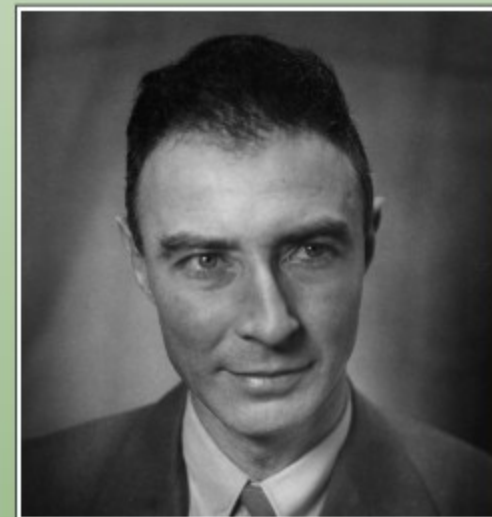
Země: $M \approx 6 \times 10^{24} \text{ kg} \implies R_S \approx 9 \text{ mm}$

člověk: $M \approx 100 \text{ kg} \implies R_S \approx 1 \times 10^{-25} \text{ m}$

- Tolmanova–Oppenheimerova–Volkoffova mez: $\approx 2 - 3M_\odot$ (GW170817: $2,27M_\odot$)
 - ČD v raném vesmíru (?)
- Mají vždy obrovskou hmotnost \times **kompaktní objekty**



Karl Schwarzschild (1873–1916)



Jacob Robert Oppenheimer
(1904–1967)

Zdroj: Wikipedie



Pinochet, J. (2019). Five misconceptions about black holes. *Physics Education*, 54(5), 055003. DOI: [10.1088/1361-6552/ab26c3](https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab26c3).

Některé objevující se (skoro) miskoncepty

- Mají obrovskou hustotu

$$\rho \approx \frac{M}{\frac{4\pi R_S^3}{3}} = \frac{3c^6}{32\pi G^3 M^2} \approx 7,3 \times 10^{79} \text{ kg/m}^3 \left(\frac{\text{kg}}{M} \right)^2$$

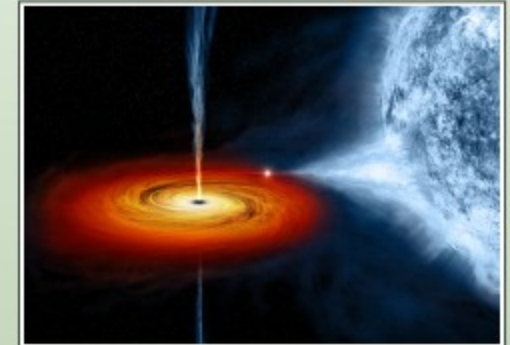
- stelární ČD:

$$M \approx 10M_{\odot} \implies \rho \approx 1 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

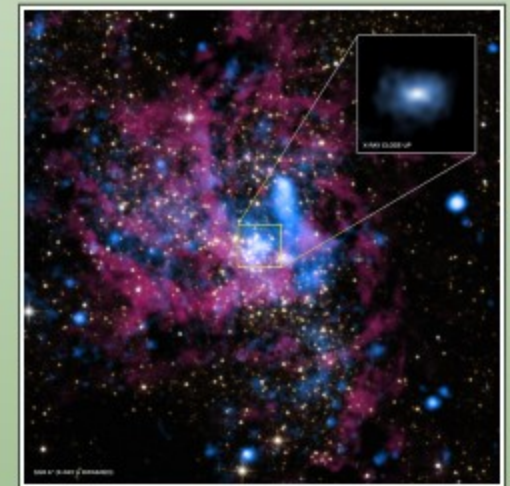
- supermasivní ČD:

$$M \approx 1 \times 10^9 M_{\odot} \implies \rho \approx 10 \text{ kg/m}^3$$

- „Vcucnou“ do sebe všechno okolo:
nejvnitřnější stabilní kruhová orbita (ISCO)
 $3R_S$
- Jsou „dokonale černé“, nic nevyzařují



Zdroj: NASA/CXC/M.Weiss



Zdroj: X-ray:
NASA/UMass/D.Wang et al., IR:
NASA/STScI



Pinochet, J. (2019). Five misconceptions about black holes. *Physics Education*, 54(5), 055003. DOI: [10.1088/1361-6552/ab26c3](https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab26c3).

Termodynamika černých děr

- Stephen Hawing (1970)

Horizon area theorem

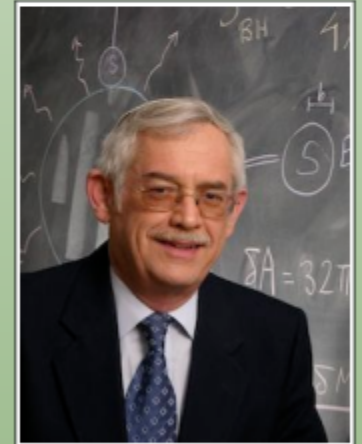
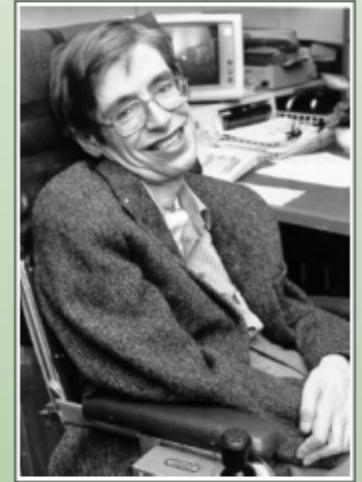
Plocha horizontu uzavřeného systému obsahujícího černé díry se nikdy nezmenšuje. Může se pouze zvětšovat nebo zůstat stejná.

- Jacob Beckenstein (student v Princetonu): and **analogie** s 2. zákonem termodynamiky a entropií

Entropie (Schwarzschildova ČD)

$$S_{\text{BH}} = 4\pi k \left(\frac{M}{m_{\text{P}}} \right)^2 = \frac{k}{4} \left(\frac{A}{l_{\text{P}}^2} \right) = \frac{A}{4} \frac{kc^3}{\hbar G} \approx 10^{77} k \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, \quad m_{\text{P}} = \sqrt{\hbar c / G} \approx 2,2 \times 10^{-8} \text{ kg}, \\ l_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G / c^3} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$



Termodynamika černých děr

- Stephen Hawing (1970)

Horizon area theorem

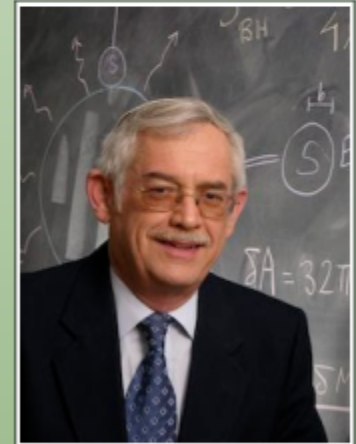
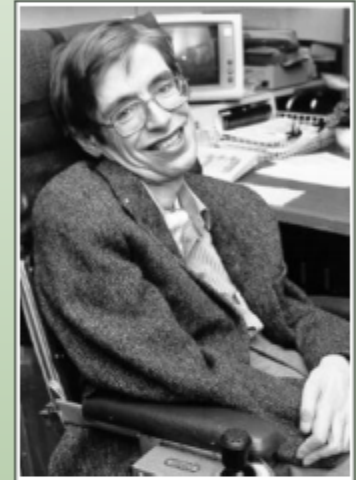
Plocha horizontu uzavřeného systému obsahujícího černé díry se nikdy nezmenšuje. Může se pouze zvětšovat nebo zůstat stejná.

- Jacob Beckenstein (student v Princetonu): and **analogie** s 2. zákonem termodynamiky a entropií

Entropie (Schwarzschildova ČD)

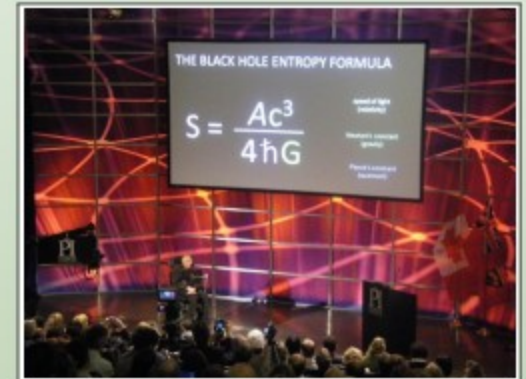
$$S_{\text{BH}} = 4\pi k \left(\frac{M}{m_{\text{P}}} \right)^2 = \frac{k}{4} \left(\frac{A}{l_{\text{P}}^2} \right) = \frac{A}{4} \frac{kc^3}{\hbar G} \approx 10^{77} k \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, \quad m_{\text{P}} = \sqrt{\hbar c / G} \approx 2,2 \times 10^{-8} \text{ kg}, \\ l_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G / c^3} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$



Termodynamika černých děr

- hvězda zkolabuje na ČD \implies zvyšuje se entropie
- $S_{\text{BH}} \propto M^2 \implies$ splynutí dvou ČD M_1 a M_2 do jedné $M_1 + M_2 \implies$ nárůst entropie $\propto 2M_1M_2$

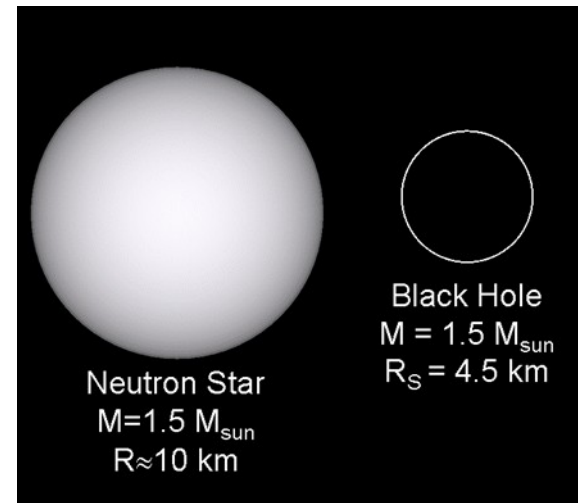
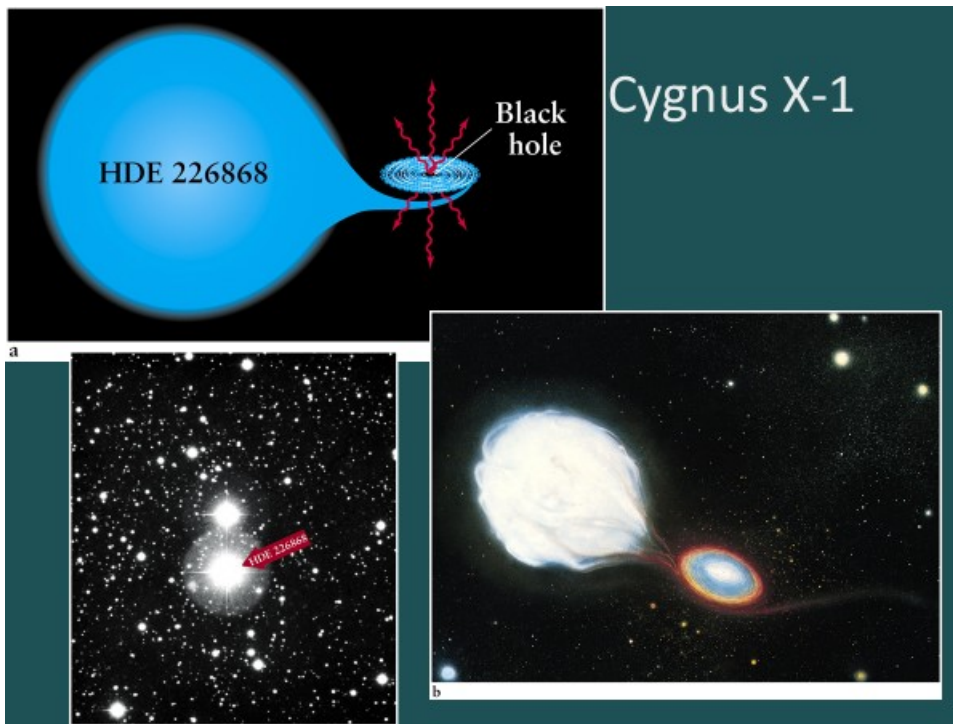


Teplota (Schwarzschildova ČD)

$$T_{\text{BH}} = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM} \approx \frac{10^{23}}{M} \text{ K}$$

$$\begin{aligned} L_{\text{BH}} &= A\sigma T^4 = 4\pi \left(\frac{2GM}{c^2}\right)^2 \sigma \left(\frac{\hbar c^3}{8\pi kGM}\right)^4 = \\ &= \frac{3,6 \times 10^{32}}{M^2} = 9,0 \times 10^{-29} \left(\frac{M_{\odot}}{M}\right)^2 \text{ W} \end{aligned}$$





Černé díry vznikají z velkých hvězd v závěru jejich života, kdy v centru dojde termojaderné palivo, převládne gravitace a hvězda se začne hroutit.

U méně hmotných hvězd je gravitační hroucení zastaveno tlakem elektronového plynu (bílé trpaslíci) nebo tlakem neutronů (neutronové hvězdy).

U hmotností nad pět Sluncí dojde ke kolapsu do černé díry.

První lokalizovaný objekt tohoto typu byl rtg zdroj v souhvězdí Labutě označovaný jako Cyg X1.