


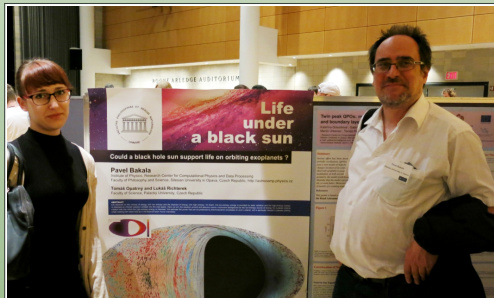


ŽIVOT POD ČERNÝM SLUNCEM?

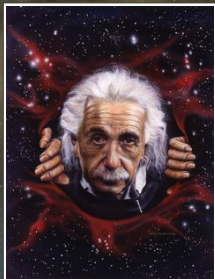
Velké Meziříčí 19. 8. 2019



-  Opatrný, T., Richterek, L., & Bakala, P. (2016). Life under a black sun. *Am. J. Phys.*, **85**(1), 14–22. DOI: [10.1119/1.4966905](https://doi.org/10.1119/1.4966905), arXiv: [1601.02897\[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/1601.02897).



21st Int. Conf. on Gen. Relativity and Gravitation, New York 2016



- 1 Černé díry
- 2 Tepelný stroj s CMB
- 3 Obloha poblíž černé díry
- 4 Dysonova sféra s černou dírou
- 5 Závěr

Motivace

- **Nutná** podmínka života na Zemi: přísun energie s nízkou entropií (Slunce, $T \approx 6\,000\text{ K}$) a „odkládání“ energie s vysokou entropií (záření Země do okolí – chladná obloha; $20\times$ více fotonů s $T \approx 300\text{ K}$)
- „Životní“ cyklus hvězdy typu Slunce není věčný \implies co naši potomci za XX Gy?
- Chladný vesmír plný ČD a reliktního záření (vesmírné ochlazení), i ČD se časem vypaří ($\approx 10^{50} - 10^{100}\text{ y}$)
- Lze (alespoň teoreticky) přežít na planetě okolo (rotující) ČD?



Frautschi, S. (1982). Entropy in an expanding universe. *Science*, **217**, 593–599.



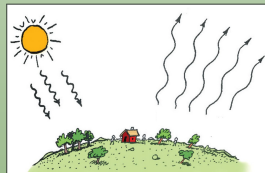
Krauss, L. M., & Starkman, G. D. (2000). Life, the universe, and nothing: Life and death in an ever-expanding universe. *Astron. J.*, **531**, 22–30.



Opatrný, T., & Richterek, L. (2012). Black hole heat engine. *Am. J. Phys.*, **80**(1), 66–71. DOI: [10.1119/1.3633692](https://doi.org/10.1119/1.3633692).



Pinus longaeva
(borovice dlouhověká), $\approx 4800\text{ y}$
Zdroj: Wikipedie



Zdroj: northcoastjournal.com

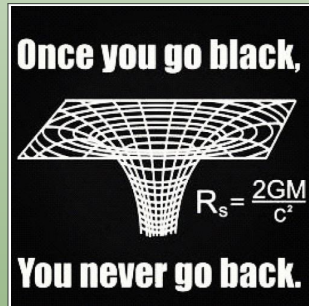
Černé díry

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 (Prague, 15–18/2/2010)



Co je černá díra?



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

Černé díry vznikají na konci vývoje velkých hvězd

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

Část hmoty je po explozi vržena do okolního prostoru

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

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 dříve přitahován mnohem více než zadní, takže raketa, věci v ní i posádka uvnitř by se natahovaly jako špagety

Černé díry: mass-size relation



Mass-size relation: Carr, B. J., & Rees, M. J. (1979). The anthropic principle and the structure of the physical world. *Nature*, **278**(5705), 605–612. DOI: [10.1038/278605a0](https://doi.org/10.1038/278605a0).



Begelman, M., & Rees, M. (2013). *Osudová přitažlivost gravitace*. Praha: Argo/Dokořán.

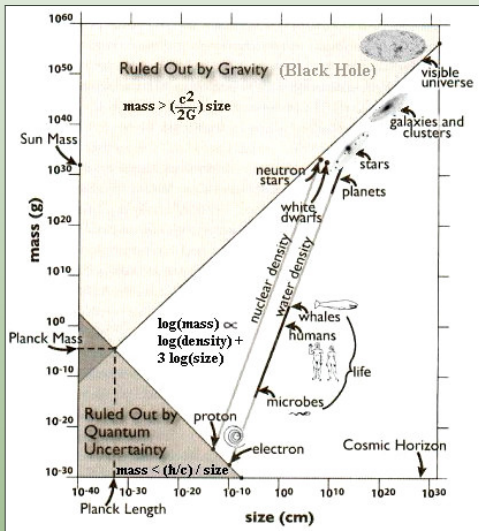
Barrow, J. D. (2011). *Vesmírná galerie*. Praha: Argo/Dokořán.



■ Kdy je důležitá OTR?

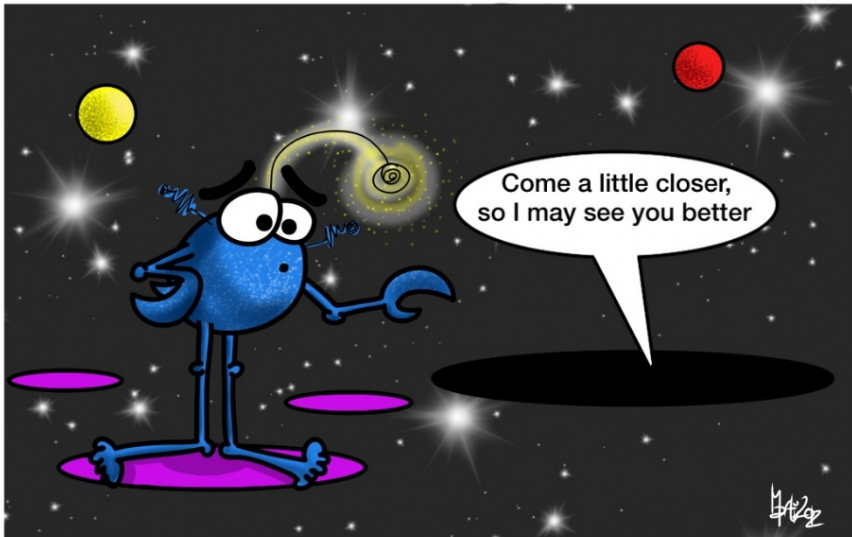
$$\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}c^2} \approx 10^{-9}, \quad \frac{2GM_{\odot}}{R_{\odot}c^2} \approx 10^{-6}$$

$$\frac{2GM_{NS}}{R_{NS}c^2} \approx 0,2 \quad (\text{Buchdahl: } < \frac{8}{9})$$



<http://universe-review.ca/I01-00-massize.jpg>

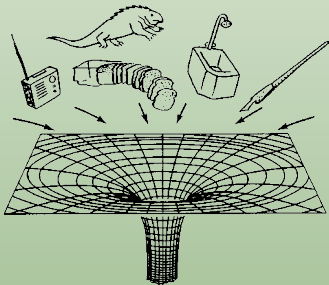
JUST OUTSIDE THE BOX




...said the black hole to the alien

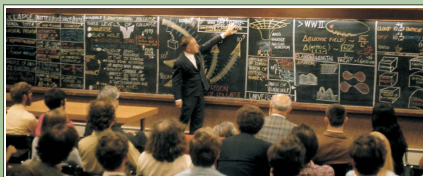
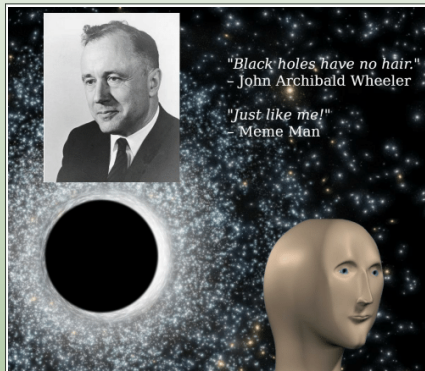
Černé díry nemají vlasy

- John Archibald Wheeler (9. 7. 1911 – 13. 4. 2008)
- tři parametry: M , Q , a
- informační paradox



Zdroj: astronet.ru


 Susskind, L. (2013). *Válka o černé díry. Soubor se Stephenem Hawkingem o záchranu principů kvantové mechaniky*. Praha: Argo/Dokořán/Paseka.

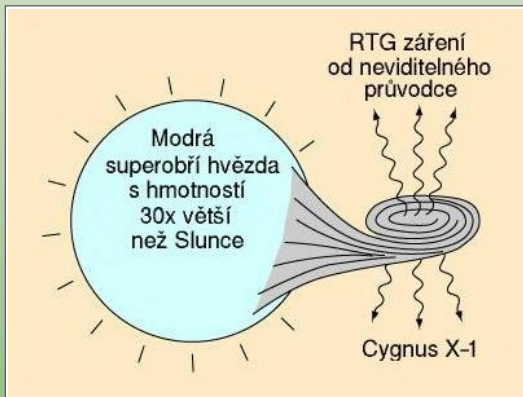


Zdroj: Misner, C. W., Thorne, K. S., & Zurek, W. H. (2009). John Wheeler, relativity, and quantum information. *Physics Today*, 62(4), 40–46. DOI: [10.1063/1.3120895](https://doi.org/10.1063/1.3120895).

Pátrání po ČD ve vesmíru

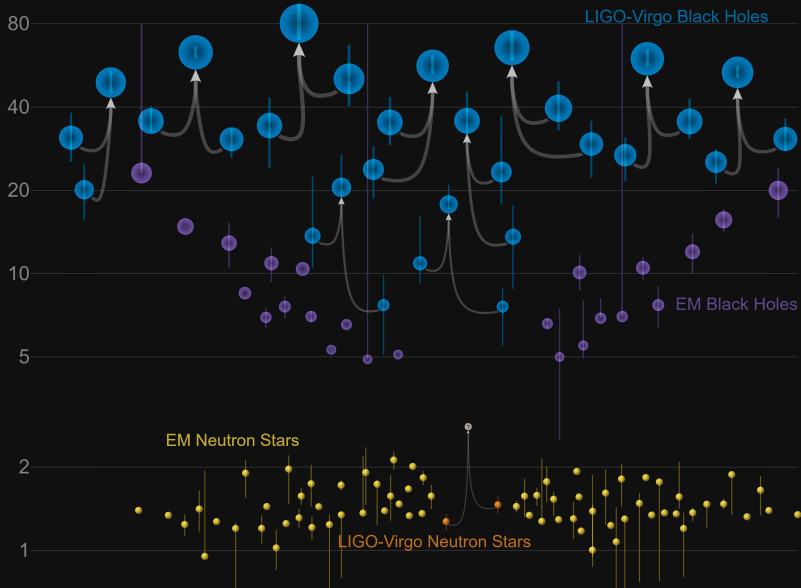
- Cygnus X-1: hvězda $20 - 35 M_{\odot}$ a průvodce HDE226868 min. $6 M_{\odot}$, 6 000 ly, RTG zdroj

 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).



Masses in the Stellar Graveyard

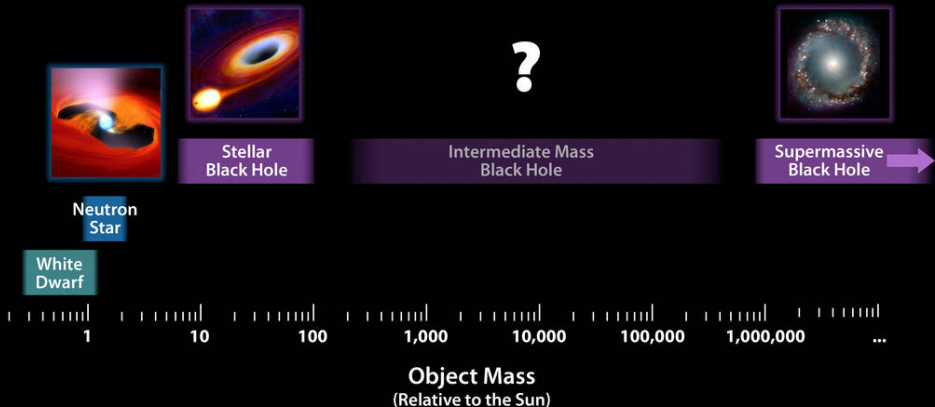
in Solar Masses



Zdroj: media.ligo.northwestern.edu

Updated 2018-12-01
LIGO-Virgo | Frank Elavsky | Northwestern

Observed Mass Ranges of Compact Objects

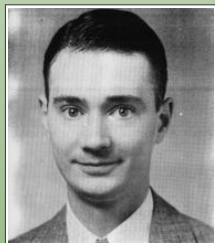
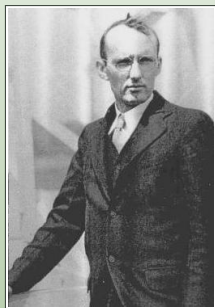


Zdroj NASA/JPL-Caltech: <https://www.nasa.gov/jpl/nustar/pia18842>

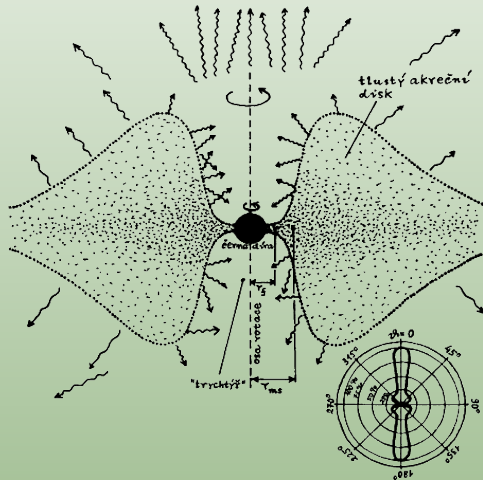
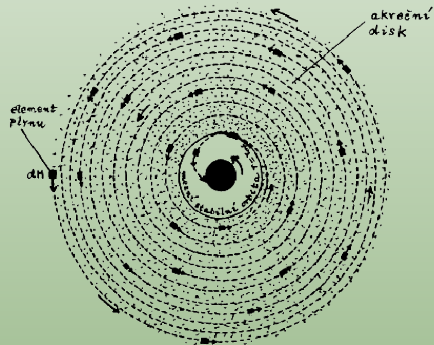
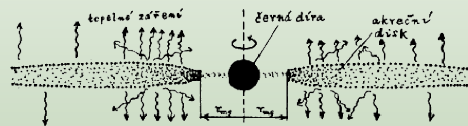
- Hypotézy vzniku SMČD: akrecí z menších (?), z primordiálních ČD (kvasary ve vesmíru ne starším než 1 Gy)

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)



Obří černé díry



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

„Motory“ v centrech galaxií

- zdroj energie v akr. disku: **tření**, $\eta \leq 40\%$
- vznik výtrysků: **Blandfordův-Znajekův proces**
- **Aktivní galaktická jádra**, u kvazarů intenzivnější „krmení“, přezáří okolí; významný vliv rotace
- M87 v Panně: vzdálenost 50 miliónů ly, kolimace 10° na 100 miliónů ly
- v centru naší Galaxie ČD $M \approx 4 \cdot 10^6 M_\odot$

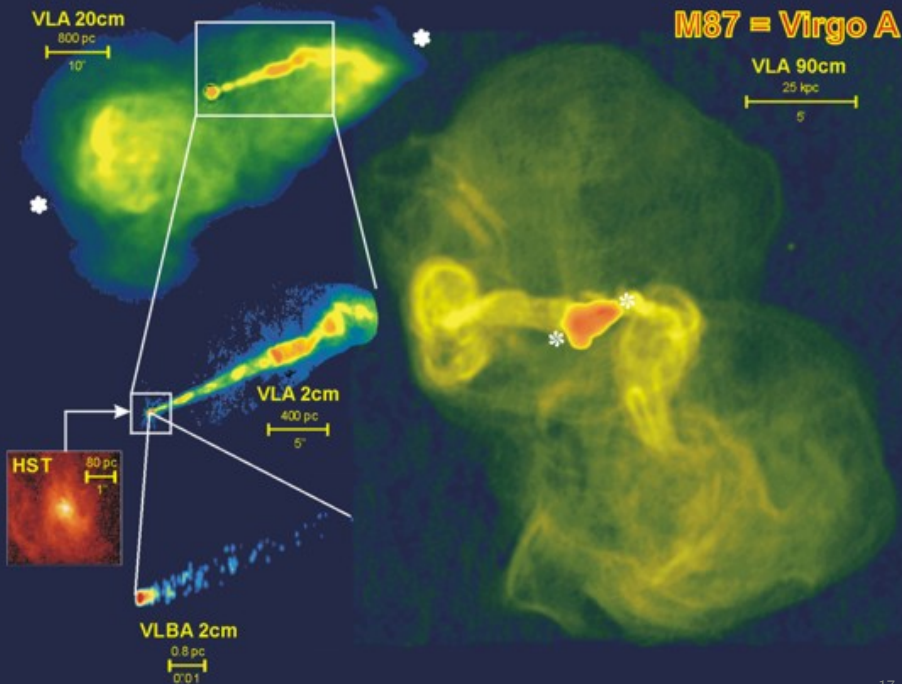


Swift J1644+57: vznik relativistického výtrysku



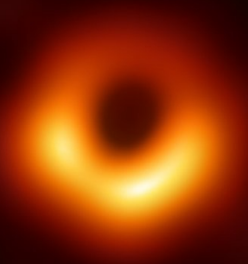
1. Hvězda velikosti Slunce se dostává do blízkosti supermasivní černé díry ve vzdálené galaxii.
2. Silné slapové síly v blízkosti černé díry začínají hvězdu natahovat, až ji nakonec doslova roztrhají.
3. Část hvězdy blíž k černé díře postupně obíhá okolo ní a vytváří tzv. akreční disk. Zbytek hvězdy 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.

Credit: NASA/Goddard Space Flight Center/Swift



První snímek černé díry

Zdroj: ESO



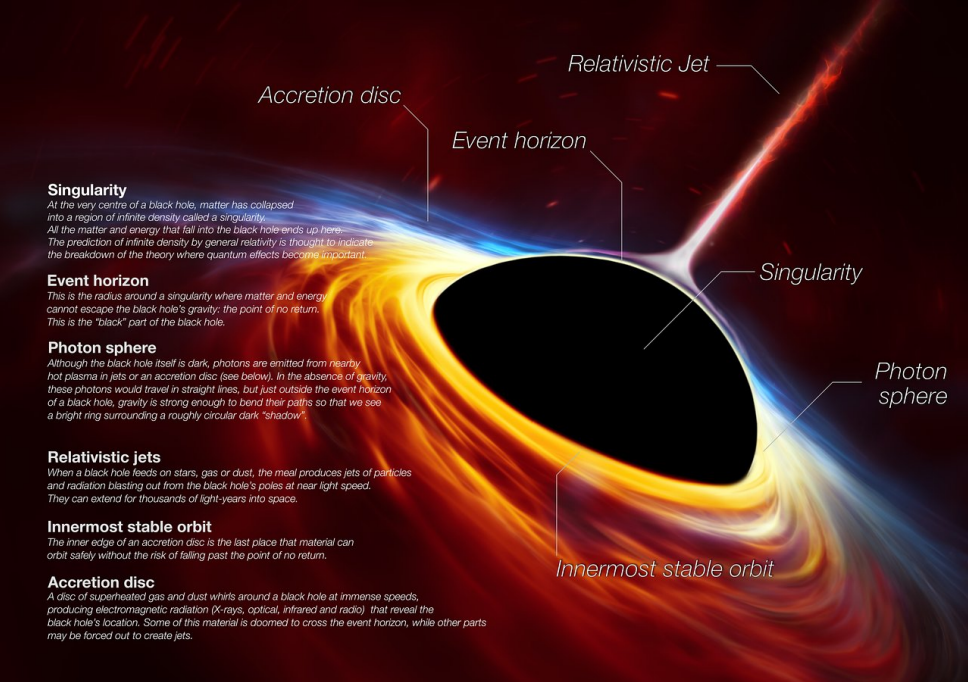
- **10. 4. 2019** (měření 2017/4): M87, 55 Mly; 6,5 miliard M_{\odot} , souhvězdí Panny
- průměr akrečního disku 0,000 042'' (jablko na Měsíci), srovnatelné se Sgr A*
- nejkratší $\lambda = 1,3$ mm rádiové interferometrie
- stín horizontu: obraz deformován gravitačním polem (Eddington, 1919)
- z jednoho 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.



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 whirrs 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.

Relativistic Jet

Accretion disc

Event horizon

Singularity

Photon sphere

Innermost stable orbit

Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes



2018 Observatories

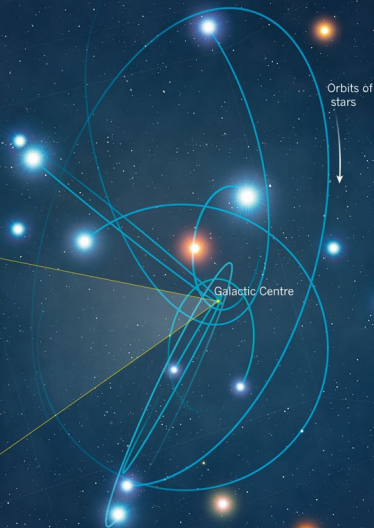
- ALMA**  Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- APEX**  Atacama Pathfinder EXperiment
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- 30-M**  IRAM 30-M Telescope
PICO VELETA, SPAIN
- JCMT**  James Clerk Maxwell Telescope
MAUNAKEA, HAWAII
- LMT**  Large Millimeter Telescope
SIERRA NEGRA, 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



THE MONSTER IN THE MIDDLE

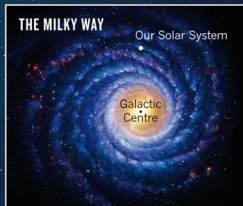
By tracking stars near the mysterious object at the centre of the Milky Way, astronomers have shown that they move in years-long orbits; 8 examples are shown here. These orbits prove that the object packs the mass of 4.1 million Suns into a space smaller than the Solar System, and can only be a black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



THE BLACK HOLE



THE MILKY WAY



Některé objevující se (skoro) miskoncepty

- Vznikají pouze kolapsem velmi hmotných hvězd
 - Schwarzschildův poloměr:

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

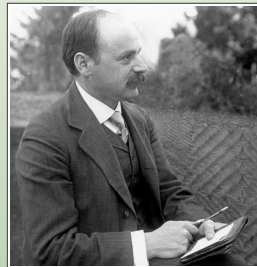
Země: $M \approx 6 \times 10^{24} \text{ kg} \implies R_S \approx 9 \text{ mm}$

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

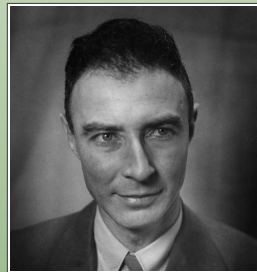
- Tolmanova–Oppenheimerova–Volkoffova mez: $\approx 2 - 3M_\odot$ (GW170817: $2,27M_\odot$)
 - ČD v raném vesmíru (?)
- Mají vždy obrovskou hmotnost \times **kompaktní objekty**



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).



Karl Schwarzschild (1873–1916)



Jacob Robert Oppenheimer
(1904–1967)
Zdroj: Wikipedia

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:

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

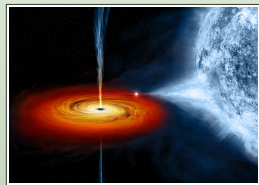
- supermasivní ČD:

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

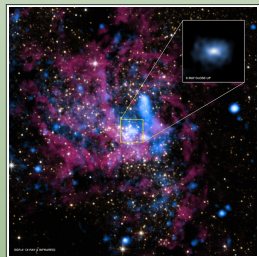
- „Vcucnou“ do sebe všechno okolo:
nejvnitřnější stabilní kruhová orbita (ISCO)
 $3R_S$
- Jsou „dokonale černé“, nic nevyzařují



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).



Zdroj: NASA/CXC/M.Weiss



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

Černé díry: řekli o...

Černé díry jsou tam, kde Bůh dělil nulou.

*Steven Wright (*1955, komik)*

Černé díry přírody jsou nejdokonalejší makroskopické objekty ve vesmíru. Jediné, z čeho se skládají, jsou naše pojmy/koncepce prostoru a času.

*Subrahmanyan Chandrasekhar
(19. 10. 1910 – 21. 8. 1995)*

Jsme jen pokročilé plemeno opic na menší planetě obíhající kolem průměrné hvězdy. Ale přesto dokážeme pochopit vesmír. To z nás dělá něco velmi výjimečného.

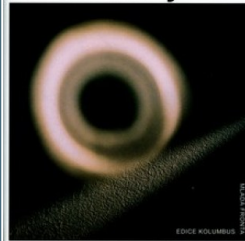
*Stephen Hawking, Der Spiegel, 17. 10. 1988
(8. 1. 1942 – 14. 3. 2018)*





KIP S. THORNE

Černé díry a zborcený čas



Thorne K. S. (2004). *Černé díry a zborcený čas (Pozoruhodná dědictví Einsteinova génia)*. Praha: Mladá fronta.

Obrázek: <https://caltechy.org>
Feynman Prof., Caltech, $\frac{1}{4}$ NC 2017

Termodynamika černých děr

- Stephen Hawing (1970)

Horizon area theorem

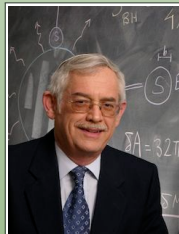
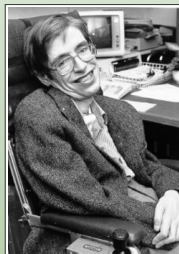
Plocha horizontu uzavřeného systému obsahujícího černé díry se nikdy nezmenšuje. Může se pouze zvětšovat nebo zůstat stejná.

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

Entropie (Schwarzschildova ČD)

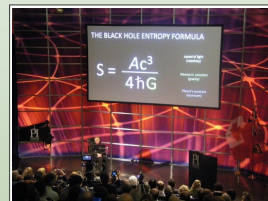
$$S_{\text{BH}} = 4\pi k \left(\frac{M}{m_{\text{P}}} \right)^2 = \frac{k}{4} \left(\frac{A}{l_{\text{P}}^2} \right) = \frac{A k c^3}{4 \hbar G} \approx 10^{77} k \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2$$

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



Termodynamika černých děr

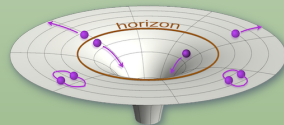
- hvězda zkolabuje na ČD \implies zvyšuje se entropie
- $S_{\text{BH}} \propto M^2 \implies$ splynutí dvou ČD M_1 a M_2 do jedné $M_1 + M_2 \implies$ nárůst entropie $\propto 2M_1 M_2$



Teplota (Schwarzschildova ČD)

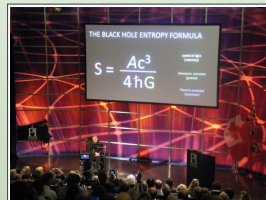
$$T_{\text{BH}} = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM} \approx \frac{10^{23}}{M} \text{ K}$$

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



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 (Schwarzcildova ČD)

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

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{3,6 \times 10^{32}}{c^2 M^2}$$

$$\implies t_{\text{BH}} \approx 8,33 \times 10^{19} \left(\frac{M_0}{10^{12} \text{ kg}} \right)^3 \text{ s} \approx 2 \times 10^{67} \left(\frac{M_0}{M_{\odot}} \right)^3 \text{ y}$$

-  Raine, D. & Edwin, T. (2009). *Black Holes: An Introduction*. London: Imperial College Press.

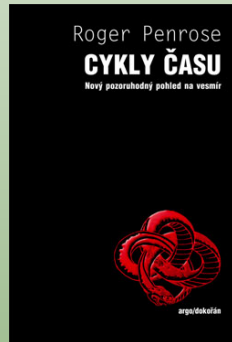
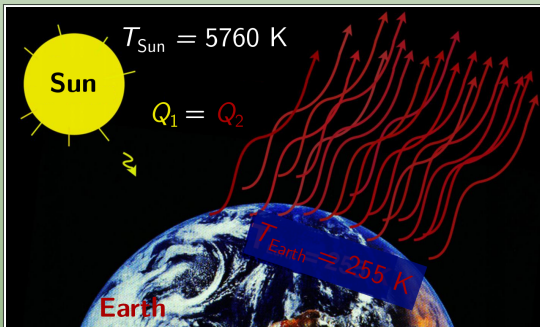
Slunce jako zdroj energie s nízkou entropií



Život na Zemi je možný díky kontrastu mezi horkým sluncem a
chladnou oblohou

Východ Slunce v Olomouci 22. 6. 2015

Slunce jako zdroj energie s nízkou entropií

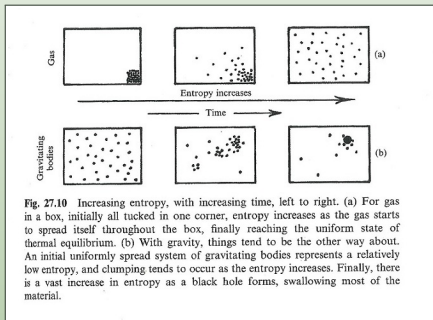


Penrose, R. (2013). *Cykly času*.
Praha: Argo/Dokořán.

Nárůst entropie

Nárůst entropie:

- lidský metabolismus za život (chemická energie potravy na teplo): 10^9 J/K
- pohlcování fotonů ze Slunce $\sim 6\,000$ K a vyzáření asi $20\times$ více fotonů ~ 300 K
 \implies
- Země za 1 s: $\approx 5\times 10^{14}$ J/K
- Země za dosavadní existenci (sluneční fotony na infračervené): 10^{32} J/K
- Slunce: 10^{41} J/K
- kolaps Slunce na ČD: 10^{54} J/K
- splynutí dvou ČD hmotnosti Slunce – entropie se zdvojnásobí (oproti 1 ČD)



Druhá věta termodynamická

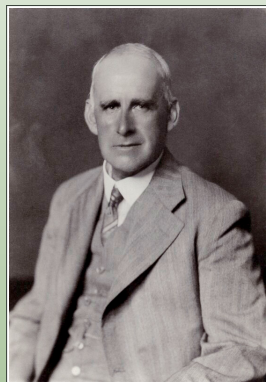
„Zákon, že entropie stále roste – druhá věta termodynamiky – má, jak se domnívám, mezi zákony Přírody výsadní postavení. Pokud vám někdo vytkne, že vaše zamilovaná teorie vesmíru je v rozporu s Maxwellovými rovnicemi, tím hůř pro Maxwellovy rovnice. Zjistí-li se, že je v rozporu s pozorováním, dobrá, experimentátoři občas něco zpackají. Ale zjistí-li se, že vaše teorie je v rozporu s druhou větou termodynamiky, nemáte naději. Nezbyvá než se v hluboké pokoře sklonit.“



Eddington, A. (1935). *The Nature of the Physical World*. London: J.M. Dent & Sons.



Termodynamická šipka času




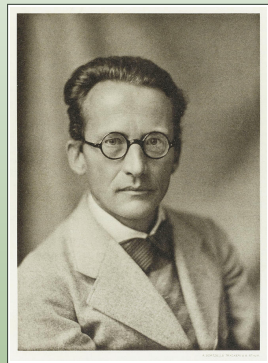
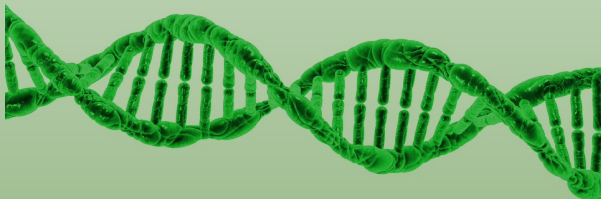
Sir Arthur Stanley
Eddington
(1882– 1944)

Zdroj: National Portrait Gallery

Schrödinger: Co je život?

- genetická informace uložena v „aperiodickém krystalu“
- organismy se živí „negativní entropií“

 Schrödinger, E. (2006, 2018). *Co je život? Duch a hmota. K mému životu*. Brno: VUT, VUTIUM (What is life: 1944).

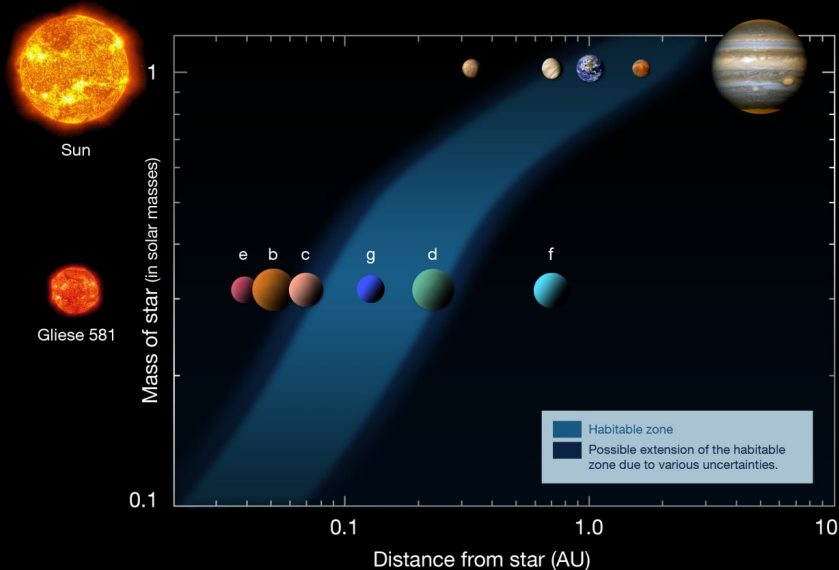


Erwin Rudolf Josef
Alexander Schrödinger
(1887–1961)

Zdroj: Wikipedie

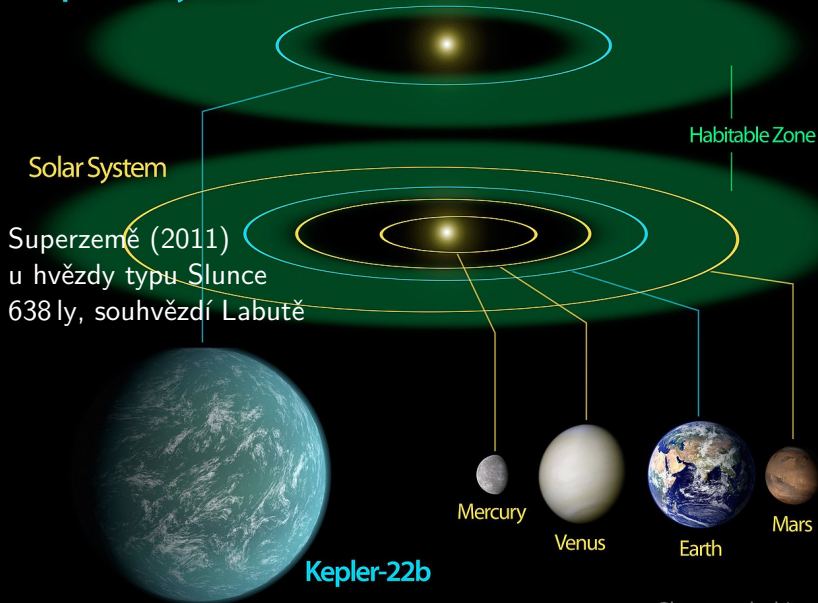
Habitable zone

Superzemě (2007–2014) u červeného trpaslíka, 20 ly, souhvězdí Vah



Habitable zone

Kepler-22 System

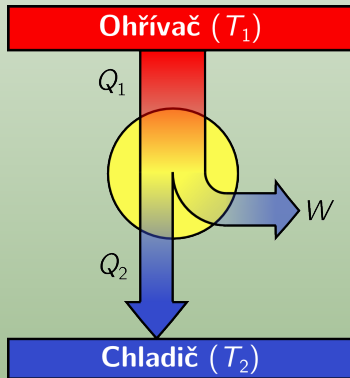


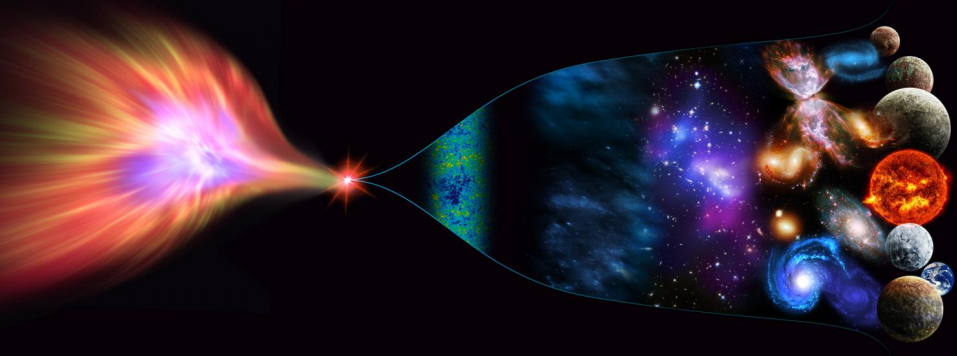
Teplný stroj

- Pro získání práce nutno část odebraného tepla předat do chladiče
- Nejvyšší možná účinnost (Carnotův cyklus):

$$\eta_{\max} = \frac{W_{\max}}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

- Může to fungovat i naopak: lze čerpat teplo z chladnějších těles na teplejší, ale je nutné k tomu vynaložit práci





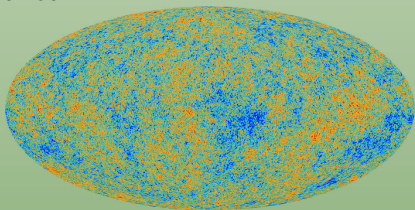
Mohou být černé díry pro nás
užitečné v expandujícím vesmíru?

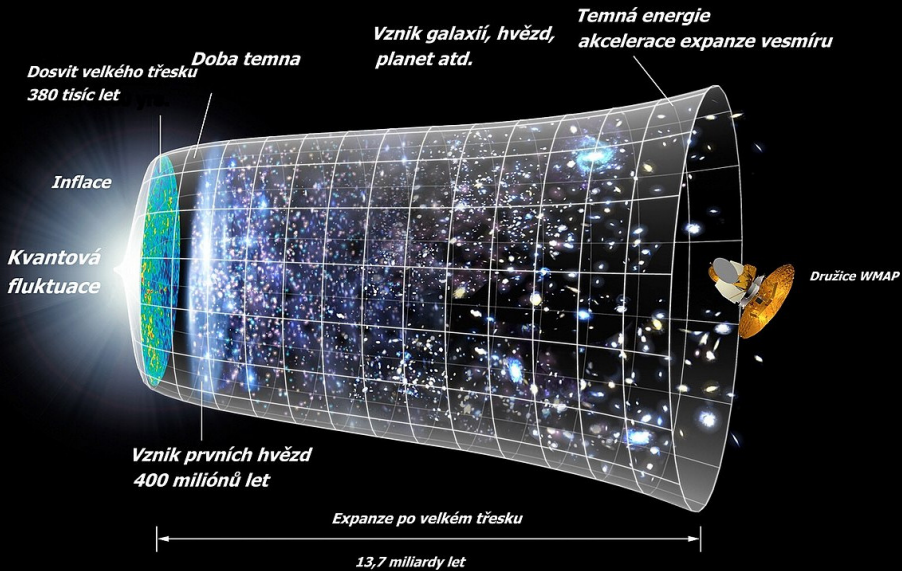


I'M AFRAID
OUR EXPERIMENTS
HAVE CREATED
A BLACK HOLE

Black hole economy

- obnovitelné zdroje **nejsou** nevyčerpatelné
- globální oteplování \times vesmírné ochlazování
 \implies téměř prázdný vesmír (CMB, pozůstatky hvězd a galaxií)
- organizované/uspořádané struktury vyžadují: **zdroj energie, odkládání „odpadní“ entropie**
- ČD díry k dispozici 10^{50} y – 10^{100} y než se vypaří i největší
- v určité fázi budou mít větší teplotu než CMB \implies mohou být zase slaboučkým „Sluncem“







Život pod černým Sluncem

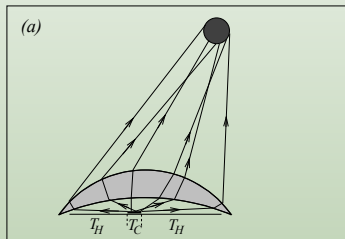
- CMB jako zdroj energie s nízkou entropií pro planetu obíhající ČD?
- \implies „Slunce“ je chladnější než „teplá“ obloha
- Loeb (2014): „habitable epoch“ ve vesmíru pro $t \approx 15 \times 10^6$ y,
 $T_{\text{BR}} \approx 273 - 300$ K \implies ; kamenné planety s kapalnou vodou na povrchu – chladná obloha pro život stejně důležitá jako žhavé Slunce \implies
- ČD jako zdroj negativní entropie?



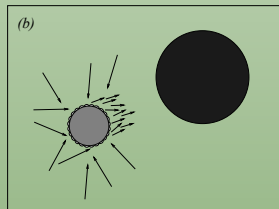
Loeb, A. (2014). The Habitable Epoch of the Early Universe. *Int. J. of Astrobiology*, 13(4), 337–339. DOI [10.1017/S1473550414000196](https://doi.org/10.1017/S1473550414000196).



Merali, Z. (2013). Life possible in the early Universe. *Nature*, 504(7479), 201–201. DOI [10.1038/504201a](https://doi.org/10.1038/504201a).

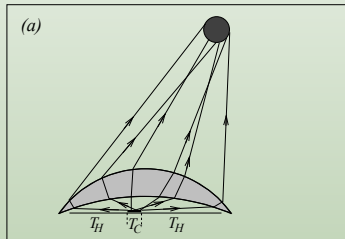


Lambertovský zářič a ČD
stejná radiance (zář,
 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) povrchu z
libovolného úhlu
Johann Heinrich Lambert (1760)

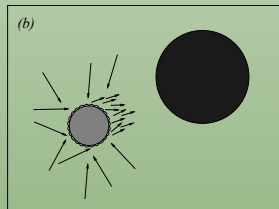


Život pod černým Sluncem

- nebeská sféra rozdělena „horkou“ část s teplotou T_1 chladnou (s $T_2 = 0\text{ K}$ pro jednoduchost)
- zanedbáme Hawkingovo záření $\implies T_{\text{BH}} \ll T_1$.
- prostorové úhly $\Omega_{\text{H}} + \Omega_{\text{C}} = 4\pi$
- větší efektivita tepelné výměny: celá planeta pokryta zařízeními na koncentraci světla/záření (numerická apertura $\approx 1 \implies$ každý bod obrazu rovnoměrně osvětlen z prostorového úhlu 2π předmětu) \implies
- paprsky z horké části oblohy soustředěny na jednu část povrchu planety, „odpadní“ paprsky do chladné části na druhou: $S_{\text{H}} + S_{\text{C}} = S$



Lambertovský zářič a ČD
stejná radiance (zář,
 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) povrchu z
libovolného úhlu
Johann Heinrich Lambert (1760)



Život pod černým Sluncem

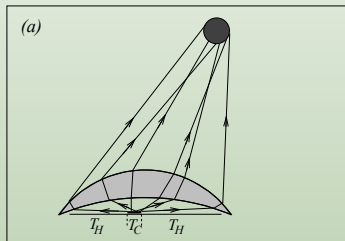
- neabsorbující, nerozptylující prostředí

⇒

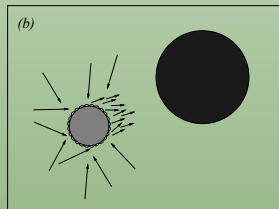
$$\frac{S_H}{S_C} = \frac{\Omega_H}{\Omega_C}$$

$$S_H + S_C = S$$

- povrch planety lze rozdělit na dvě části („ohříváč“ a „chladič“) v poměru prostorových úhlů, které zaujmají části oblohy
- interakce mezi nimi by snížila efektivitu; řeší se i ve fotovoltaickém průmyslu



Lambertovský zářič a ČD
stejná radiance (zář,
 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) povrchu z
libovolného úhlu
Johann Heinrich Lambert (1760)



Optimalizace pro dané plochy S_H a S_C

- hledáme teploty T_H a T_C tak, aby pro zadané S_H a S_C a T_1 a T_2 byl **výkon maximální**
- energie z horké části oblohy Δt : $Q_1 = \sigma S_H (T_1^4 - T_H^4) \Delta t$
- energie odložená do chladné části oblohy $Q_2 = \sigma S_C T_C^4 \Delta t$
- $\sigma \approx 5,68 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
- $W = Q_1 - Q_2$
- limitní případ Carnotova cyklu:

$$Q_1/Q_2 = T_H/T_C$$

$$T_C = \left[\frac{S_H}{S_C} \left(\frac{T_1^4}{T_H^4} - 1 \right) \right]^{1/3} T_H$$

$$W = \left[(T_1^4 - T_H^4) - \left(\frac{S_H}{S_C} \right)^{1/3} \left(\frac{T_1^4}{T_H^4} - 1 \right)^{4/3} T_H^4 \right] \times \sigma S_H \Delta t.$$

■ Optimalizace

$$\frac{dW}{dT_H} = 0$$

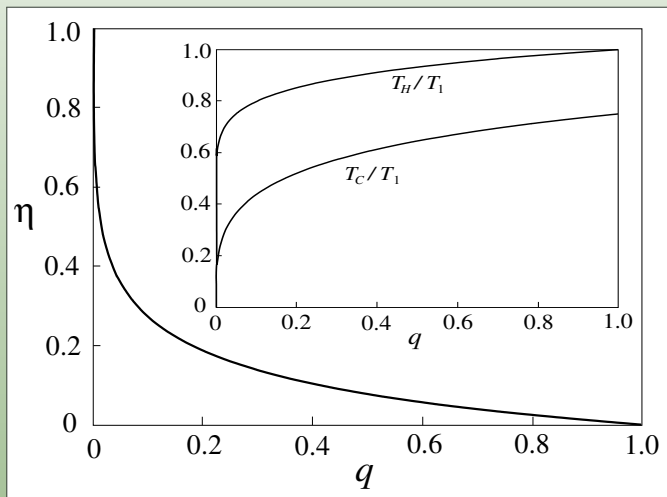
$$T_H = u^{1/4} T_1, \quad T_C = \left(\frac{S_H}{S_C} \right)^{1/3} \frac{(1-u)^{1/3}}{u^{1/12}} T_1$$

$$\frac{27}{q} u^4 - 18u^2 - 8u - 1 = 0, \quad 0 < u < 1, \quad q = \frac{S_H}{S_H + S_C} = \frac{\Omega_H}{4\pi}$$

- řešeno numericky
- výkon dopadajícího záření $P_0 = q\sigma ST_1^4$
- maximální výkon $P_{\max} = \eta q\sigma ST_1^4$

$$\eta = 1 - u - \left(\frac{q}{1-q} \right)^{1/3} u \left(\frac{1-u}{u} \right)^{1/3}$$

Optimalizace pro dané plochy S_H a S_C



Účinnost při optimalizovaném výkonu v závislosti na podílu horké části povrchu $q = \frac{S_H}{S}$

Malá horká plocha

- $S_H \ll S_C \implies u \approx 3^{-3/4} q^{1/4}$

$$T_H \approx 3^{-3/16} q^{1/16} T_1, \quad T_C \approx 3^{1/16} q^{5/16} T_1$$

- $\eta = 1 - (3q)^{1/4} \quad \eta \rightarrow 1 \text{ pro } q \rightarrow 0$

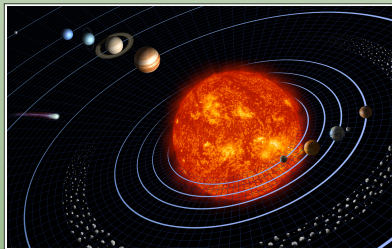
- odpovídá spíše vzdálené hvězdě osvětlující planetu v jinak prázdném vesmíru

- **Příklad: energie ze Slunce**

- $S_H/S \approx 5,4 \times 10^{-6},$
 $T_1 = 5778 \text{ K} \implies$

- $T_H = 0,385 T_1 \approx 2200 \text{ K},$
 $T_C = 0,0239 T_1 \approx 138 \text{ K}$

- $\eta \approx 92\%, P \approx 1,603 \times 10^{17} \text{ W}$
- o 4 řády více než dnes spotřebováváme



- opačná limita $S_H \rightarrow S$, $q \rightarrow 1$, $1 - q \ll 1$

$$u \approx 1 - \frac{3^3}{2^6} (1 - q),$$

$$T_H \approx \left[1 - \frac{3^3}{2^8} (1 - q) \right] T_1, \quad T_C \approx \frac{3}{4} T_H,$$

$$\eta \approx \frac{3^3}{2^8} (1 - q) = \frac{3^3}{2^8} \frac{S_C}{S} \quad P_{\max} \approx \frac{3^3}{2^8} \sigma S_C T_1^4.$$


■ Příklad: planeta velikosti Země + CMB

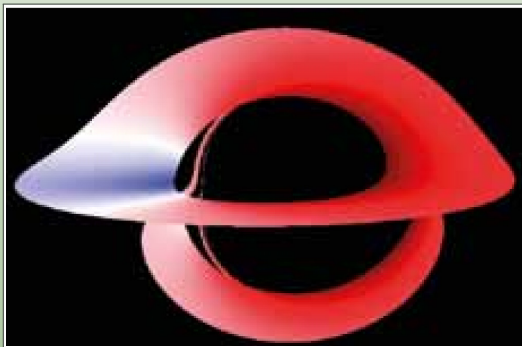
- CMB pokojové teploty $T_1 = 300$ K
- ČD o úhlové velikosti Slunce (ze Země)
- $q \approx 1 - 5,4 \times 10^{-6}$, $\eta \approx 5,7 \times 10^{-7} \implies$
- $S_C \approx 2760$ km² (Rhode Island, Lucembursko)
- $T_C \sim 225$ K = -48 °C
- $P \approx 130$ GW – 2 řády pod dnešní světovou spotřebou, 6 řádů méně, než dostává Země ze Slunce
- pro dnešní $T_1 = 2,725$ K $\implies P \approx 910$ W

Zdroj: Ute Kraus, spacetimetravel.org




Obloha pozorovatele poblíž černé díry

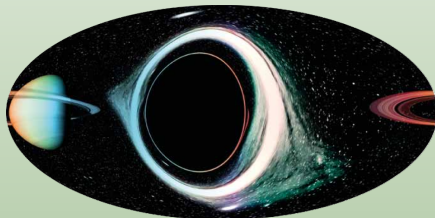
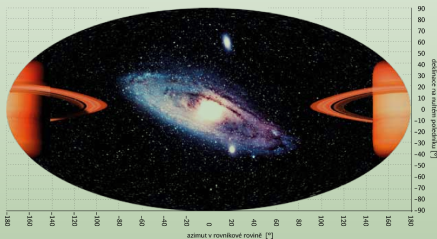
-  Bakala, P. & Goluchová, K. (2015). Hvězdné nebe nad horizontem událostí černých děr. *Vesmír*, **94**(12), 680–684.



- Vizualizace vzhledu horkého akrečního disku v okolí extrémně rychle rotující ČD (LSDCode+), pozorovatel vzdálený 1 000 ly
- Zkreslení: zakřivení světelných paprsků, asymetrie díky rotaci ČD černé díry, frekvenční posun, vícenásobné obrazy


Obloha pozorovatele poblíž černé díry

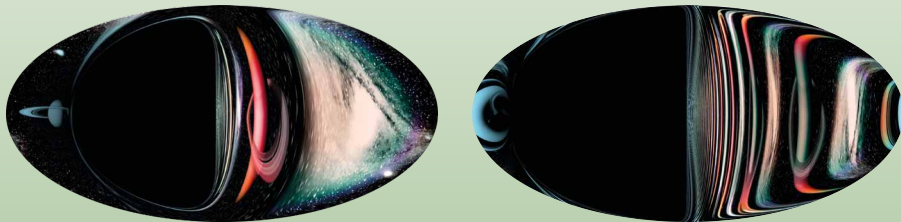
 Bakala, P. & Goluchová, K. (2015). Hvězdné nebe nad horizontem událostí černých děr. *Vesmír*, **94**(12), 680–684.



- **Mollweidova projekce** (1805, Carl Brandan Mollweide (1774–1825)) zachovává plochy objektů, kromě rovníku a centrálního meridiánu zkresluje vzdálenosti a směry
- Pozorovatel obíhající nerotující ČD na nejnižší možné stabilní kruhové oběžné dráze; hranice stínu – paprsky opouštějící/těsně míjející fotosféru
- Gravitace zpomaluje chod času \implies modrý posuv
- Dopplerův jev + aberace dané pohybem pozorovatele \implies stlačení ve směru pohybu, roztažení v opačném \implies zploštění stínu


Obloha pozorovatele poblíž černé díry

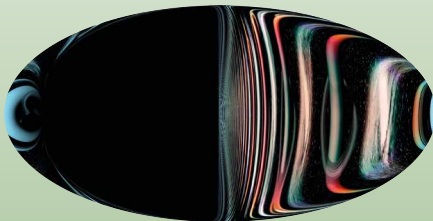
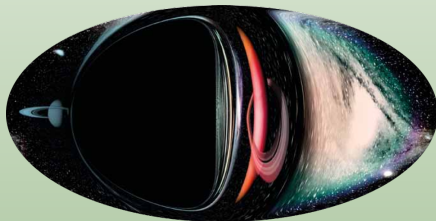
 Bakala, P. & Goluchová, K. (2015). Hvězdné nebe nad horizontem událostí černých děr. *Vesmír*, **94**(12), 680–684.



- Vlevo: obloha pozorovatele obíhajícího extrémně rychle rotující ČD na stabilní kruhové oběžné dráze těsně pod hranicí ergosféry
- Vpravo: obloha pozorovatele obíhajícího extrémně rychle rotující ČD na velmi nízké stabilní kruhové oběžné dráze vzdálené od horizontu událostí pouhou desetinu jeho poloměru
- Rotace proti směru ručiček, a blízko 1; extrémní rotace zmenší poloměr horizontu (i stabilních kruhové oběžné dráhy) na polovinu (pozorovatel $5\times$ dále)

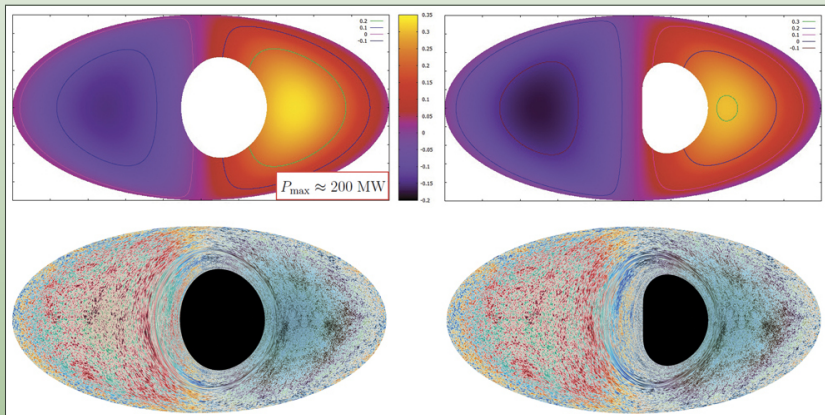
Obloha pozorovatele poblíž černé díry

-  Bakala, P. & Goluchová, K. (2015). Hvězdné nebe nad horizontem událostí černých děr. *Vesmír*, **94**(12), 680–684.



- Další efekt navíc: strhávání ve směru rotace, paprsky se na rotující ČD navíjí \implies bizarní a složité tvary, větší asymetrie
- Čím hlouběji \implies zkreslené relativistické obrazy vyšších řádů na jeho obloze dramaticky narůstají, výraznější
- Řez fotosférou rotující černé díry (ne slupka) podél osy rotace – „srpky“ spojené hroty na pólech, nejširší na rovníku

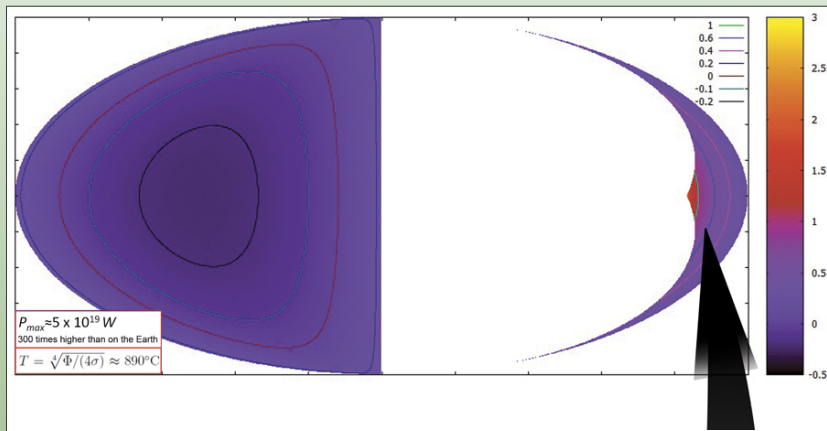
Obloha s CMB



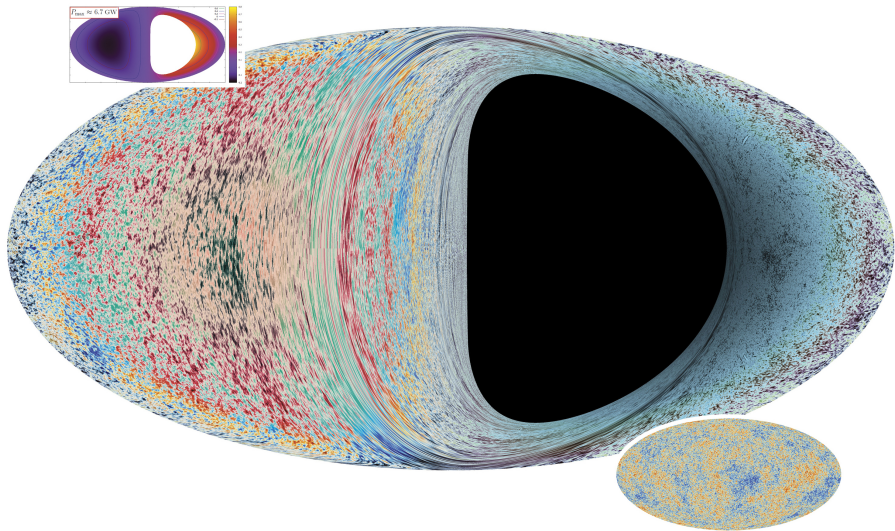
Obloha pozorovatele v okolí
Schwarzschildovy ČD ($r = 6,0M$)

Obloha pozorovatele v okolí
extrémně rotující Kerroy ČD
($r = 6,0M$)

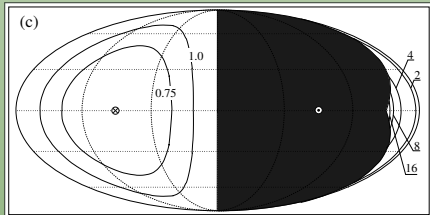
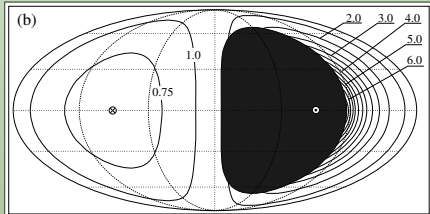
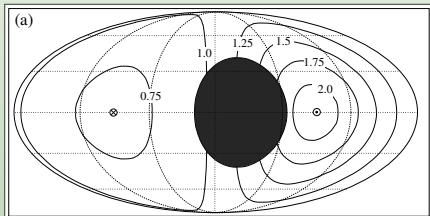
Obloha s CMB



Obloha pozorovatele v okolí extrémně rotující Kerroy ČD
($r = 1,000\,037\,8M$)

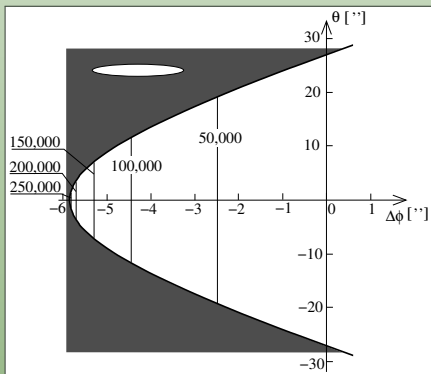


Obloha z CMB pro pozorovatele v okolí extrémně rotující ČD ($r = 2,5M$); falešné barvy odpovídají posunu frekvencí a teploty.



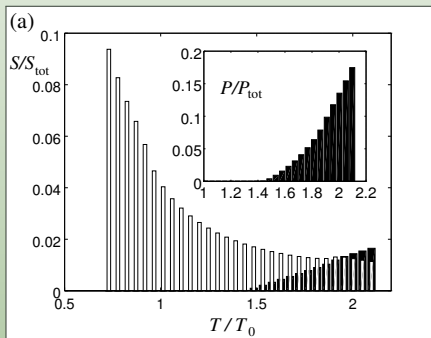
- a) nerotující ČD, $r = 6GM/c^2$
- b) rotující ČD $a = 1 - 1,3 \times 10^{-14}$,
 $r = 2,2GM/c^2$
- c) rotující ČD $a = 1 - 1,3 \times 10^{-14}$,
 $r = 1,000\,037\,9GM/c^2$

bílá skvrna: Neptun ze Země



Příklady s různými ČD

- η prostě když q klesá \implies orbita co nejlíže
- relativistické efekty: Dopplerův a gravitační modrý/rudý posuv \implies CMB na obloze není izotermické, numerická optimalizace po částech
- Kerrova (rotující) ČD: můžeme jít blíže
- Schwarzschildova ČD:
 - $P_{\max} \approx 0,126\sigma ST_1^4$ (o řád více než bez relativistických efektů)
 - $T_1 = 2,725 \text{ K}$, velikost Země \implies
 - $P_{\max} \approx 200 \text{ MW}$ (pár menších měst)



nerotující ČD, $r = 6GM/c^2$

Zlomky oblohy pozorovatele se stejnou teplotou (součet 1)

USA/Velká Británie/Kanada/Island, 2014 Scénář: Jonathan & Christopher Nolan

Režie: Christopher Nolan

MANKIND'S NEXT STEP WILL BE OUR GREATEST.

A FILM BY CHRISTOPHER NOLAN

INTERSTELLAR

PARAMOUNT PICTURES AND WARNER BROS. PICTURES PRESENT

IN ASSOCIATION WITH LEGENDARY PICTURES A SYNCOPY/LYNDA OBST PRODUCTIONS PRODUCTION

A FILM BY CHRISTOPHER NOLAN "INTERSTELLAR" MATTHEW MCCONAUGHEY ANNE HATHAWAY

JESSICA CHASTAIN BILL IRWIN ELLEN BURSTYN AND MICHAEL CAINE COSTUMES MARY ZOPHRES

MUSIC BY HANS ZIMMER EDITOR LEE SMITH, A.C.E. PRODUCTION DESIGNER NATHAN CROWLEY DIRECTOR OF PHOTOGRAPHY HOYTE VAN HOYTEMA, E.S.F., A.S.C.

EXECUTIVE PRODUCERS JORDAN GOLDBERG JAKE MYERS KIP THORNE THOMAS TULL

WRITTEN BY JONATHAN NOLAN AND CHRISTOPHER NOLAN PRODUCED BY EMMA THOMAS CHRISTOPHER NOLAN LYNDA OBST

PARAMOUNT PICTURES

LEGENDARY

SYNCOPY

DIRECTED BY CHRISTOPHER NOLAN

WARNER BROS. PICTURES

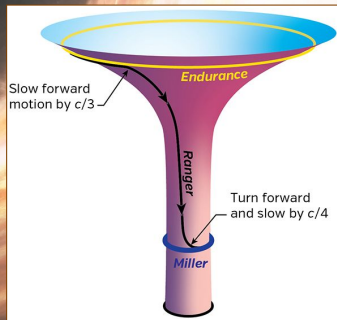
TM & © 2014 WARNER BROS. ENTERTAINMENT CO. ALL RIGHTS RESERVED.

MADE IN A REGISTERED TRADEMARK OF M&A CORPORATION.

- Gargantua – rotující černá díra
- 1 hodina/7 let (faktor $\approx 61\,000$)



Thorne, K. S. & Nolan, Ch. (2014).
The Science of Interstellar. New York:
W. W. Norton & Company.



Příklady s různými ČD

■ Gargantua:

$$a = 1 - 1,3 \times 10^{-14}$$

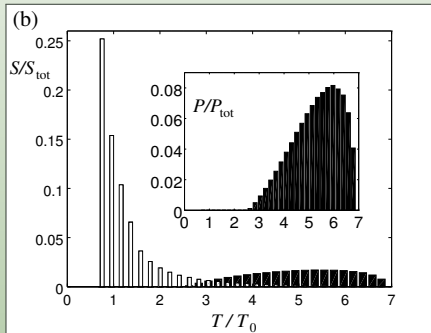
$$\blacksquare r = 2,2GM/c^2,$$

$$P_{\max} \approx 4,2\sigma ST_1^4$$

- ČD 26 % oblohy, max. modrý posuv 6,9

- $T_1 = 2,725 \text{ K}$, velikost Země \implies

- $P_{\max} \approx 6,7 \text{ GW}$ (menší stát, ČR 2018: 7–12 GW)



rotující ČD $a = 1 - 1,3 \times 10^{-14}$, $r = 2,2GM/c^2$

Zlomky oblohy pozorovatele se stejnou teplotou (součet 1)

■ Miller's planet: $r = 1,000\,037\,9GM/c^2$ (3 h odpovídají 21 rokům):

- ČD 40 % oblohy, max. modrý posuv 275 000

- zářivý tok proti pohybu $\Phi \approx 420 \text{ kW/m}^2$ (300× solární konstanta)

- rovnovážná teplota planety (jako zářícího černého tělesa)

$$T = \sqrt[4]{\frac{\Phi}{4\sigma}} \approx 890 \text{ }^\circ\text{C}$$

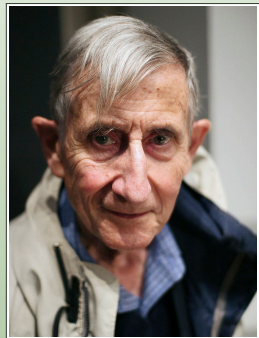
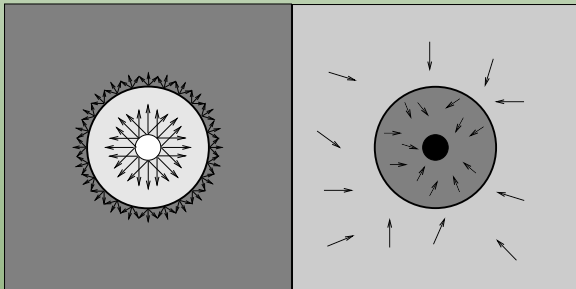
- teplota tání Al: 660 °C + extrémní UV záření

Dysonova sféra s černou dírou

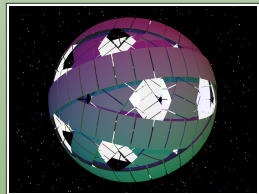


Dyson, F. J. (1960). Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation. *Science*, **131**(3414), 1667–1668. DOI [10.1126/science.131.3414.1667](https://doi.org/10.1126/science.131.3414.1667).

- Spekulace o hledání vyspělých mimozemských civilizací, které kolem své hvězdy postaví kouli pohlcující veškeré záření
- detekovali bychom jejich odpadní infračervené záření... (?)
- šlo by i **obráceně**: obyvatelé sféry by sbírali energii CMB a odpadní teplo posílali do ČD

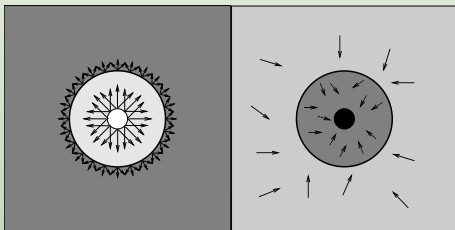


Freeman John Dyson (*1923)



Zdroj: Wikipedie

Dysonova sféra s černou dírou



- ČD pro vzdáleného pozorovatele jak sféra o poloměru $\frac{\sqrt{27}}{2} R_S \approx 2,6R_S$

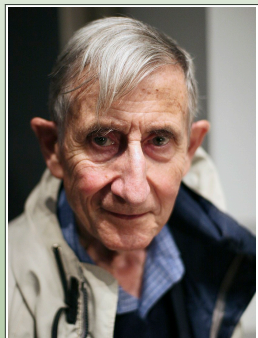
$$S_H = 4\pi R_D^2$$

$$S_C = 4\pi R_S^2 = 4\pi \frac{27}{4} \left(\frac{2GM}{c^2} \right)^2 = \frac{108\pi G^2 M^2}{c^4}$$

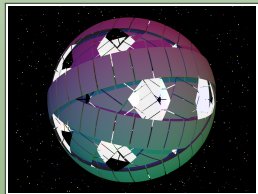
- limitní případ $R_D \gg R_S$, $S_C \gg S_H \ll 1 \implies$

$$P_{\max} = \frac{3^3}{2^8} \sigma S_C T_1^4 \approx 0,1055 P_{\text{ref}}$$

$$P_{\text{ref}} = \sigma S_C T_1^4 \quad \text{absorbovala by ČD bez sféry}$$



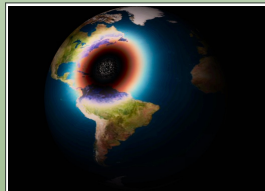
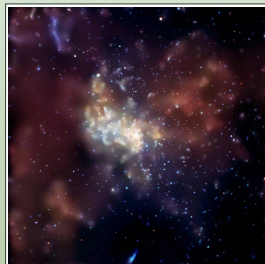
Freeman John Dyson (*1923)



Zdroj: Wikipedie

Dysonova sféra s černou dírou: příklady

- ČD velikosti Slunce $M = M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg, CMB $T_1 = 2,725$ K:
 - $R_S \approx 3$ km, zdánlivý $\approx 3,9$ km
 - $P_{\text{ref}} \approx 2,3$ kW
 - $P_{\text{max}} \approx 250$ W
- Supermasivní ČD $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ (Sgr A*)
 - $P_{\text{max}} \sim 4 \times 10^{15}$ W $\approx 4\,000$ TW
 - asi $200 \times$ více než současná světová spotřeba (lidstva, bez dalších ekosystémů)
- Raný Vesmír $T_H \approx 300$ K (asi $1000 \times$ mladší, tj. desítky My) a ČD o zdánlivých rozměrech Slunce $\frac{\sqrt{27}}{2} R_S \approx 6,96 \times 10^8$ m \implies
 - $P_{\text{max}} \approx 2,9 \times 10^{20}$ W
 - $3 \times$ více než dostává dnes Země ze Slunce



Závěr: co z toho plyne...

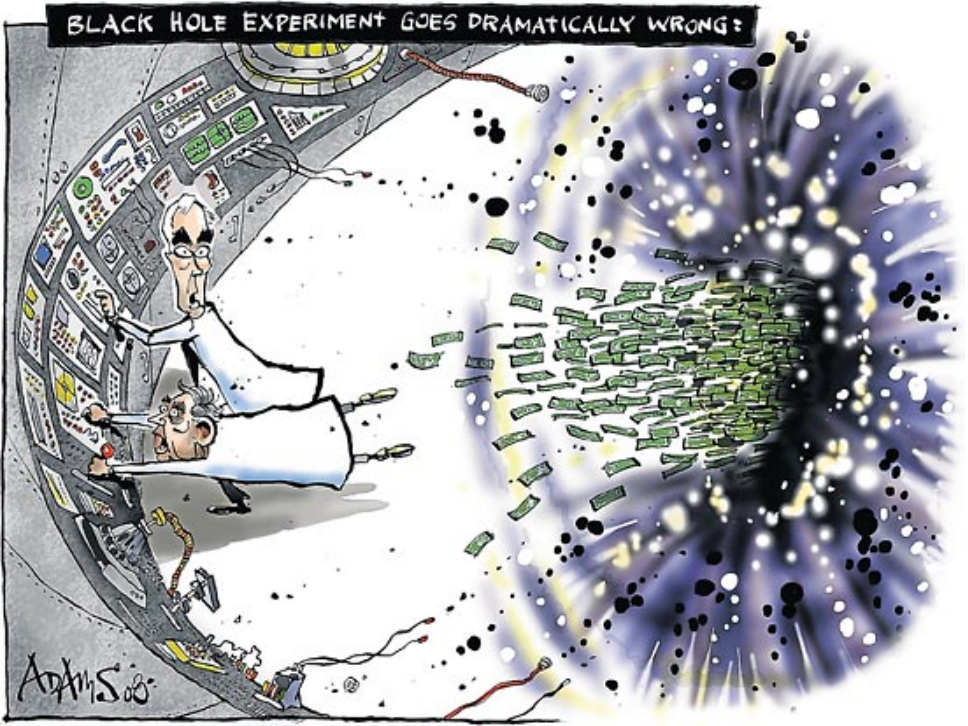
- Nerotující ČD „není moc perspektivní“, možný výkon nestačí
- CMB bude s rozpínáním vesmíru chladnout \implies stále méně energie k dispozici
- Vhodné podmínky možná v raném vesmíru, ale byl zde někdo, kdo by je využil?
- Rotující ČD nadějnější, ale řada problémů (např. slapové síly, uvažovali jsme extrémně rotující)
- Miller's planet: dilatace času 60 000 by se projevila i na CMB \implies příliš horko \implies museli bychom mít vzdálenější planetu



Zdroj: Vadim Sadovski/Shutterstock.com



BLACK HOLE EXPERIMENT GOES DRAMATICALLY WRONG:



ADAMS 08

Black hole sun could support bizarre life on orbiting planets



LIFE 18 January 2016

By Jacob Aron



newsscientist.com

IFLSCIENCE!



Life Could Exist On Planets Around Black Holes, Claims Paper

0 SHARES

Share on Facebook

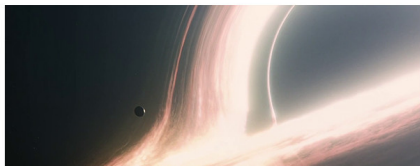
Share on Twitter



iflscience.com

Под мертвым солнцем

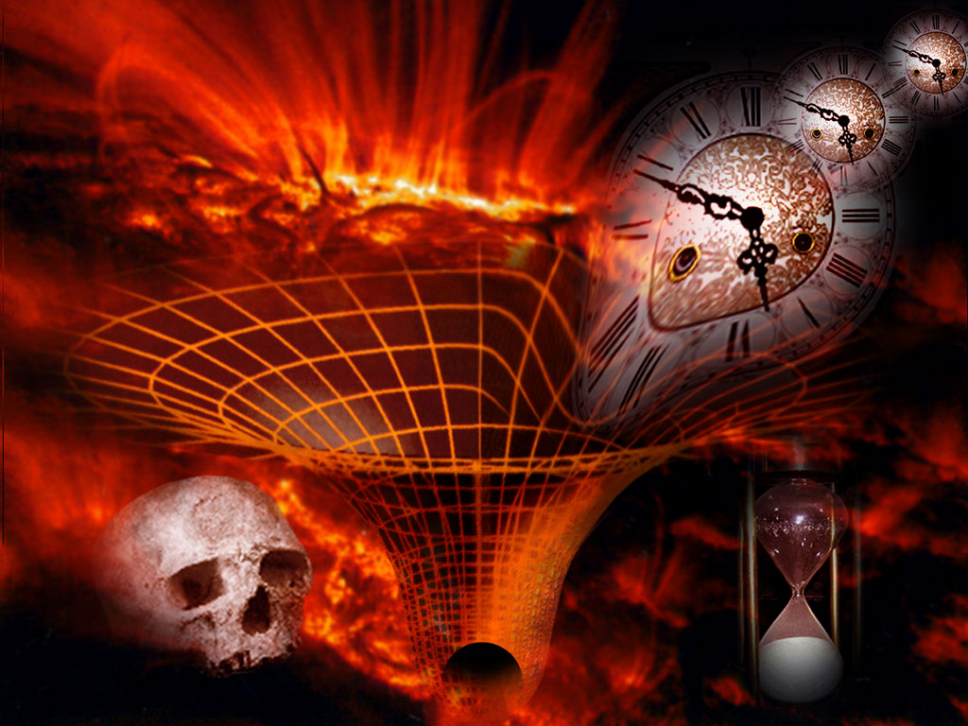
Вблизи черных дыр допустили существование жизни

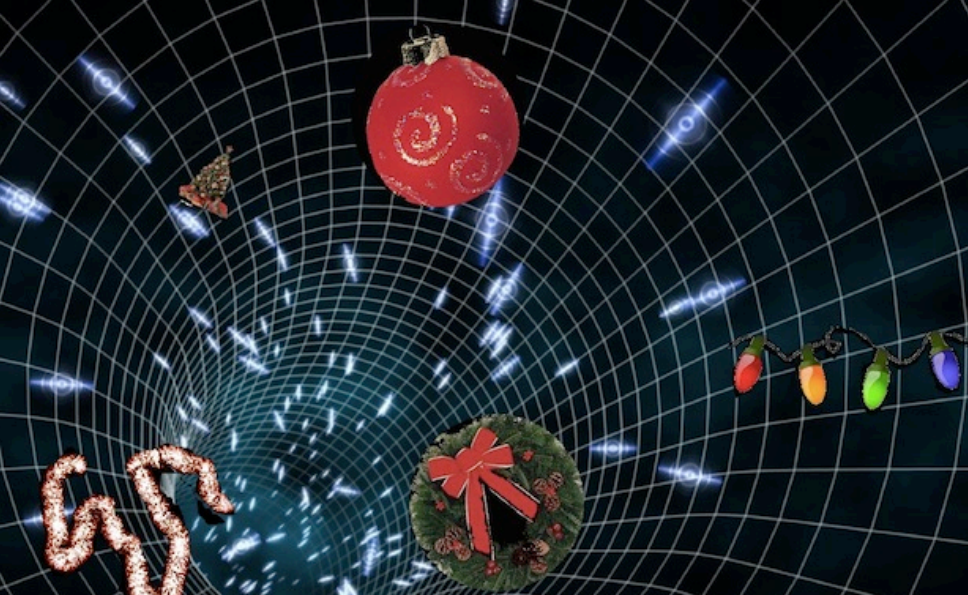


lenta.ru, ufospace.net



YouTube

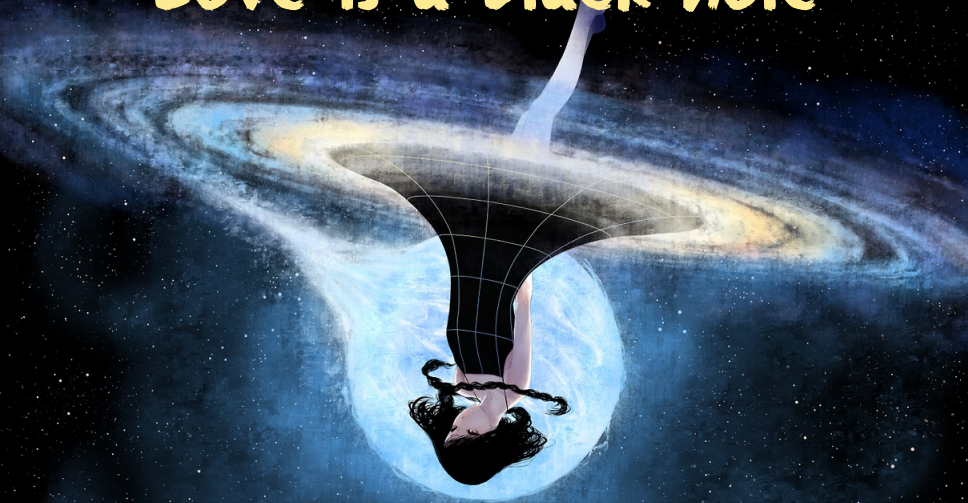




Earlier and earlier Christmas preparations each year eventually cause Christmas Spacetime to fold over itself, creating a wormhole you can travel to any Christmas through (except for 1979, due to its embarrassment over Disney's release of *The Black Hole*). Unfortunately for most scientists, the so-called "Yulehole" only works if you "believe".

Rob Kutner (<http://www.nerdist.com/2011/12/the-future-of-christmas/>)

Love is a black hole



You cannot see it. You cannot escape it. But no-one can be totally sure it even exists at all.



Přírodovědecká fakulta

Univerzita Palackého
v Olomouci

Lukáš Richterek

lukas.richterek@upol.cz

Katedra experimentální fyziky PŘF UP
17. listopadu 1192/12, CZ-771 46 Olomouc

Email: lukas.richterek@upol.cz

<http://muj.optol.cz/~richterek/>

<https://www.slideshare.net/lrichterek/>