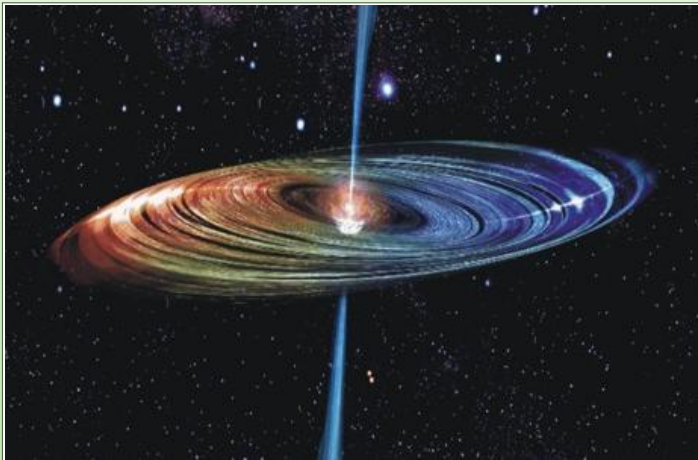
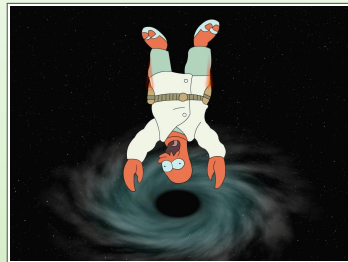
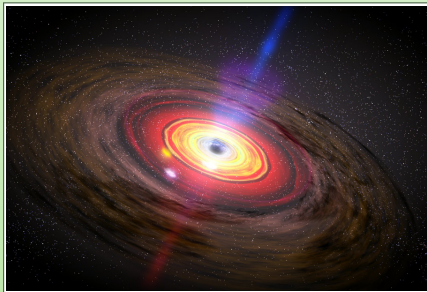


O PLEŠATOSTI ČERNÝCH DĚR



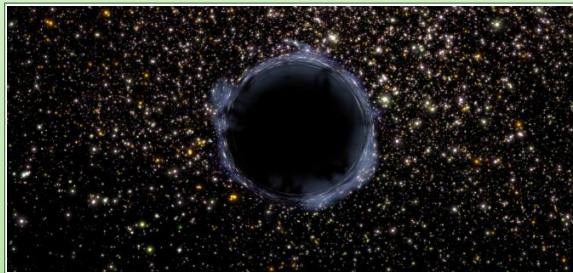
Obsah

- 1 Předpovědi – temné hvězdy
- 2 Obecná teorie relativity
- 3 Ověřování OTR
- 4 Život hvězd
- 5 Finální stadia
- 6 Černá díra nemá vlasy
- 7 Pátrání ve vesmíru
- 8 Symfonie černých děr
- 9 Použité prameny



Předpovědi – temné hvězdy

- filozofové přírody 18. století: světlo se skládá z korpuskulí
- John Michell (27. 11. 1783): *temné hvězdy*, kritický obvod pro Slunce 18 km, $r_g = 3$ km, světlo zpomalováno jako vržený kámen
- Pierre Simon Laplace (1796): *Le Système du monde*, v třetím vydání 1808 vypuštěno

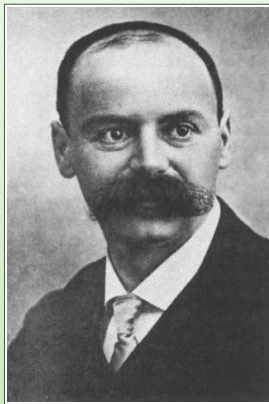
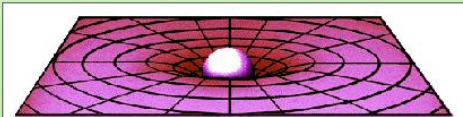


Obecná teorie relativity

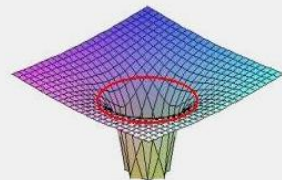
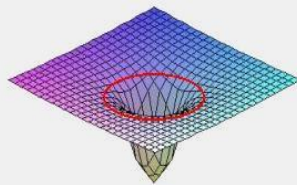
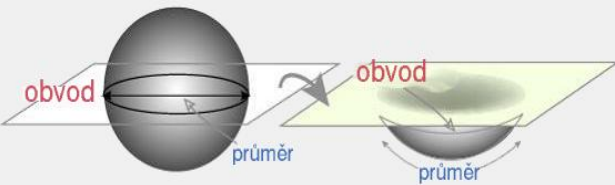
- Einstein na zasedání Pruské akademie věd (25. 11. 1915): nový nástroj k výpočtům – OTR

Gravitace je důsledkem zakřivení prostoročasu!

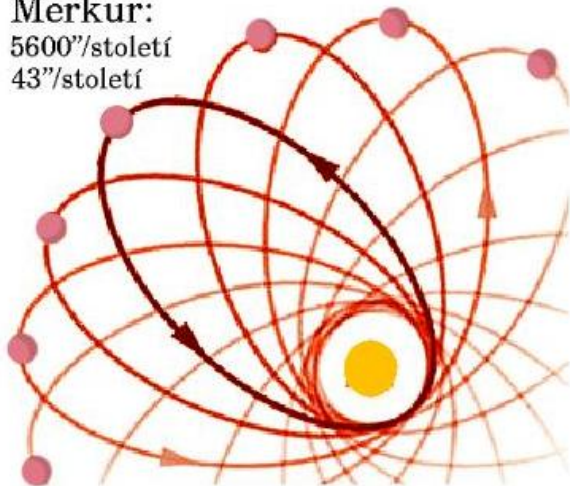
- Karl Schwarzschild (13. ledna 1916): prostoročas vně sférické nerotující hvězdy, kritický poloměr stejný jako Michellův



ředitel hvězdáren
v Göttingen a
Potsdami

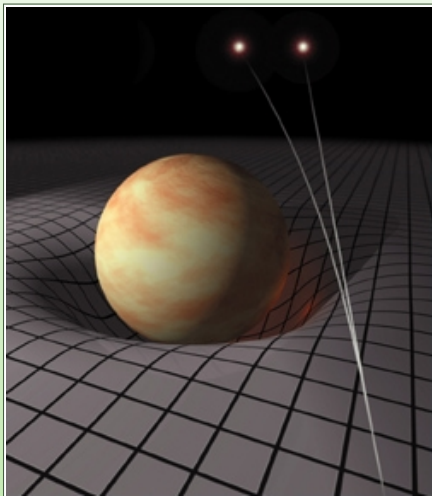
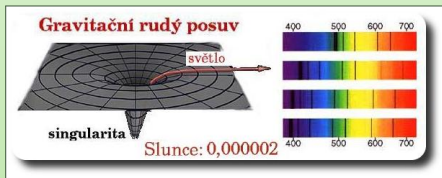


Merkur:
5600"/století
43"/století



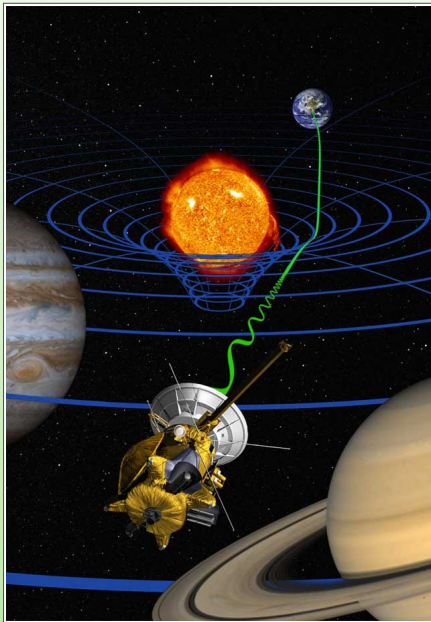
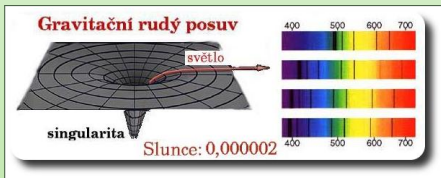
Ohyb světla a rudý posuv

- zpomalení chodu hodin v gravitačním poli
- „ohýbání“ – změna směru světelných paprsků, **fotonová orbita**
- změna vlnové délky vysílaných signálů – **rudý posuv**

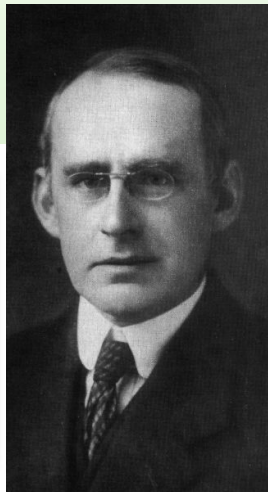
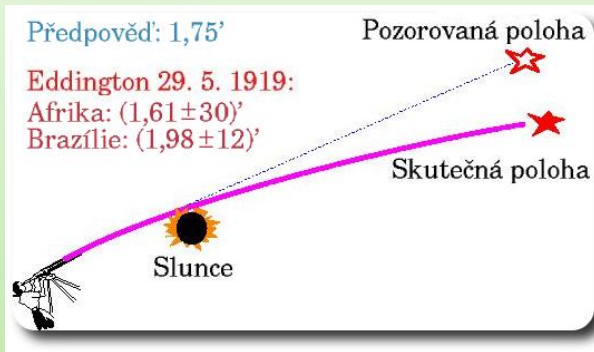


Ohyb světla a rudý posuv

- zpomalení chodu hodin v gravitačním poli
- „ohýbání“ – změna směru světelných paprsků, **fotonová orbita**
- změna vlnové délky vysílaných signálů – **rudý posuv**



Ohyb světla a rudý posuv



Ohyb světla a rudý posuv

Blatt 03 037

einstein akademie wissenschaften
berlin

Telegraphen St.

124 23 Telegraphie des Deutschen Reichs.

Antw S

Berlin, Haupt-Telegraphenamt

Antw S

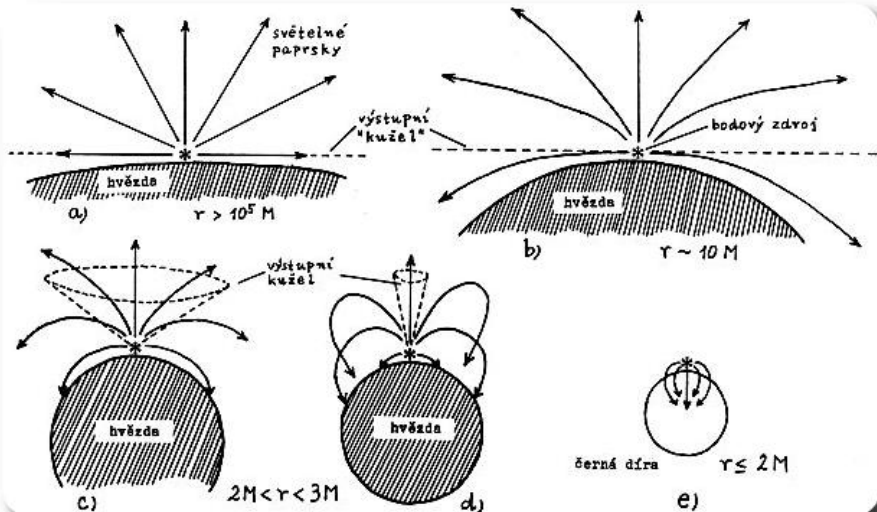
Telegraphen cab

Microservaory calif 129/12 50 11 19/16. - westernunion

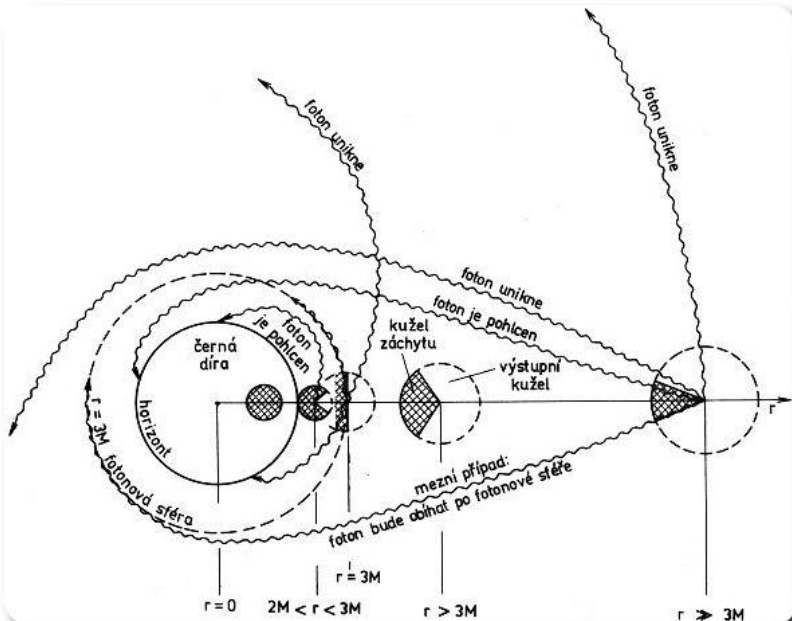
three pairs australia tahiti eclipse plates measured by camp
trumpeter sixty two to eighty four stars each five of six
measurements completely calculated give einstein deflection
between one point fifty nine and one point eighty six seconds
arc mean value one point seventy four seconds = campbell . +

124 7.11

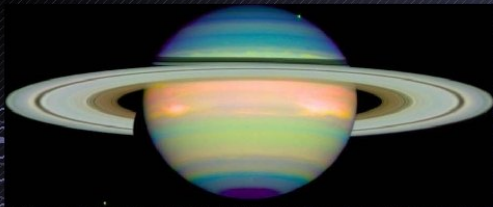
Ohyb světla a rudý posuv



Ohyb světla a rudý posuv



Simulation : Saturn near the black hole



Nondistorted view of Saturn



$r_{\text{obs}} = 20M$

Seminář ÚF

Simulation : Saturn near the black hole, $r_{obs}=5M$

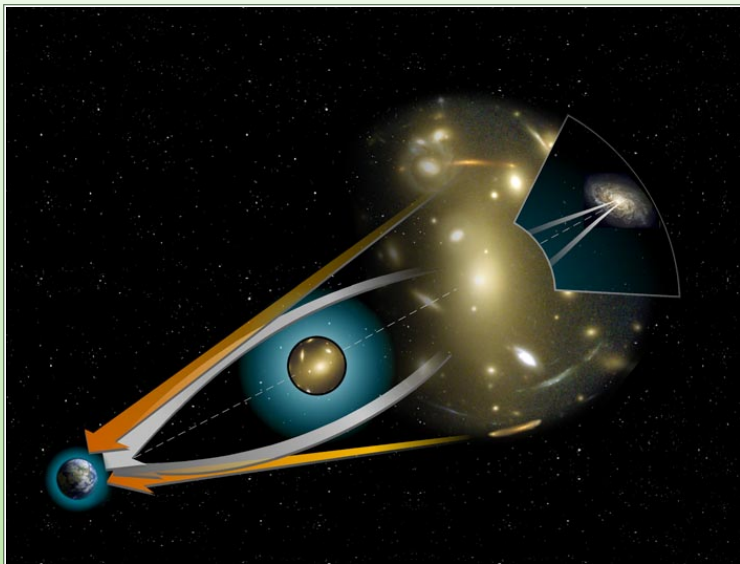


View of outward
direction

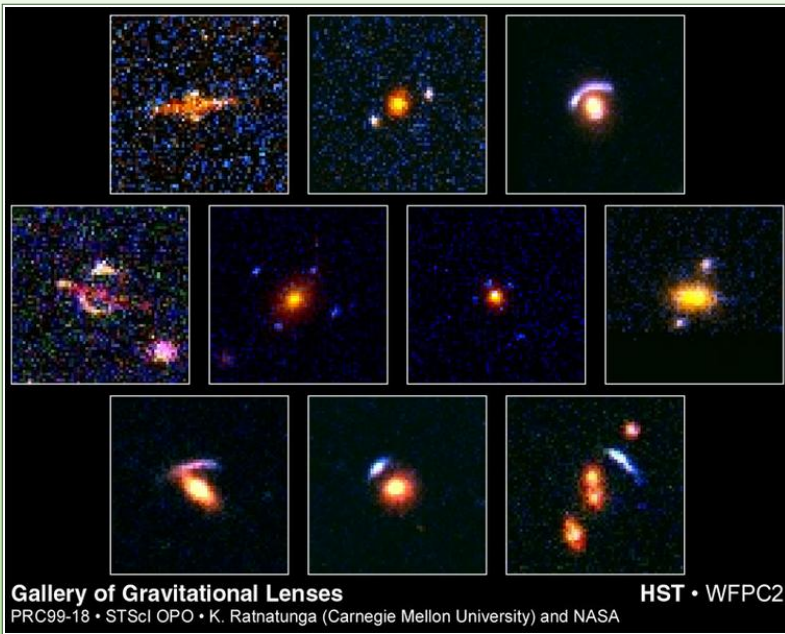
Some parts of
image are moving
into an opposite
hemisphere of
observers sky

• Blueshift

Gravitační čočky

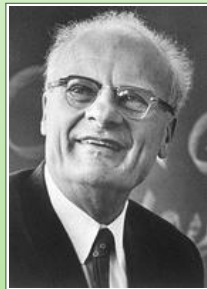
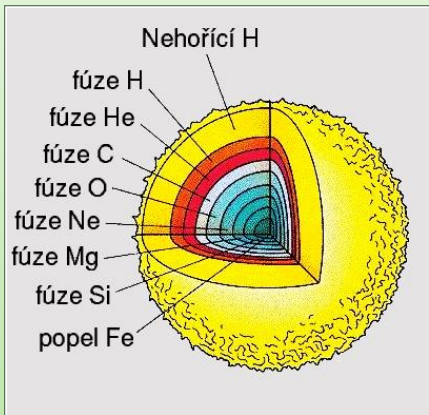


Gravitační čočky

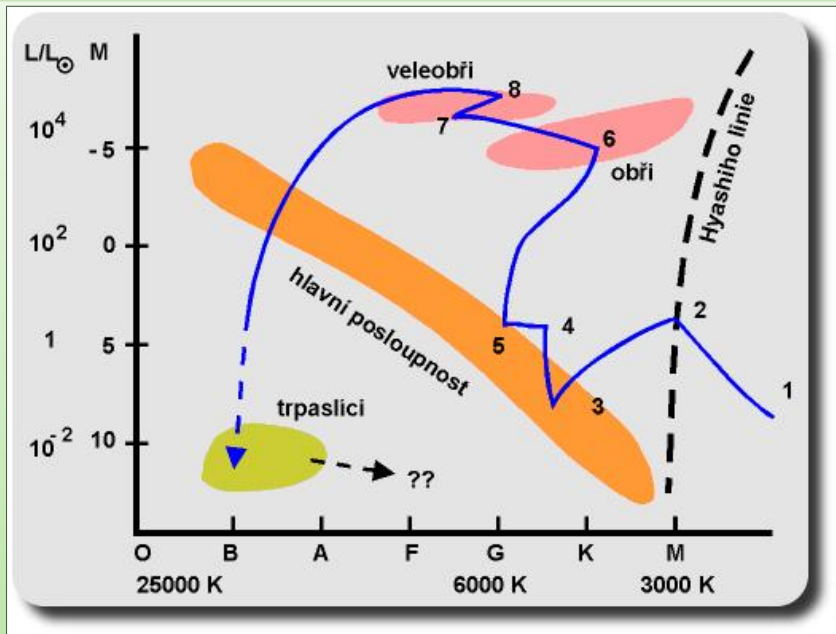


Život hvězd

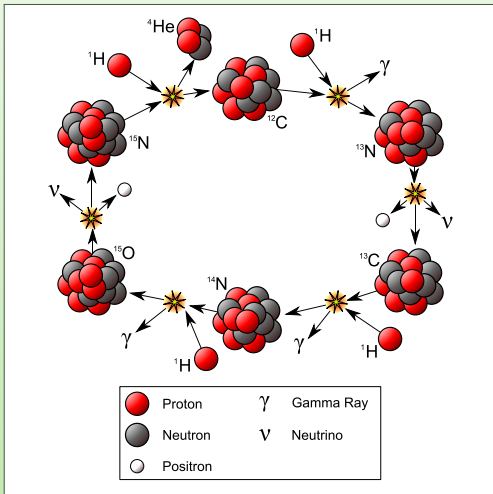
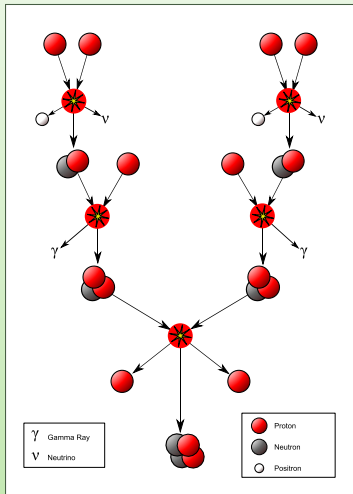
- zdroj energie: termonukleární reakce
- Hans Bethe (1938): p-p cyklus, C-N cyklus, NC 1967



H-R diagram



Proton-protonový a CNO cyklus



What is Your Cosmic Connection to the Elements?

The image features a woman kneeling and holding a large, colorful sphere that represents the periodic table of elements. The sphere is divided into segments of different colors, each representing a different cosmic origin for the elements. The background is a dark space with stars and a NASA logo in the top right corner.

Big Bang

- Hydrogen
- Helium

Small Stars

- Carbon
- Nitrogen
- Oxygen

Large Stars

- Sulfur
- Calcium
- Iron
- Silicon

Supernovae

- Gold
- Titanium
- Magnesium

Cosmic Rays

- Lithium

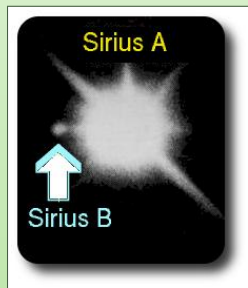
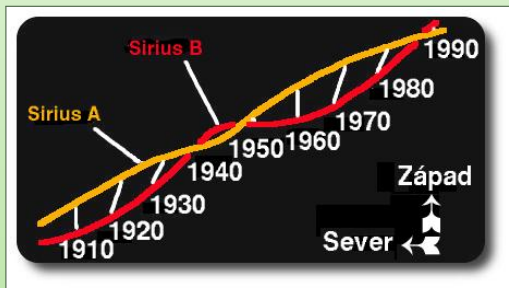
Periodic Table Elements:

- H, He
- Li, Be
- Na, Mg
- K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr
- Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe
- Cs, Ba, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn
- Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr

<http://imagine.gsfc.nasa.gov/>

Bílí trpaslíci

- Einstein 1939: „Základním výsledkem tohoto výzkumu je jasné pochopení proč Schwarzschildovy singularity nemohou existovat ve fyzikální realitě...“
- hvězda konstantní hustoty: při $r = 1,125 r_g$ nekonečný tlak $\iff$ **za určitých podmínek gravitace překoná všechny ostatní síly**
- bílí trpaslíci – Síríus B: $M = 1,05 M_\odot$, hustota 4 tuny/cm^3 (Bessel 1844, Clark 1862)





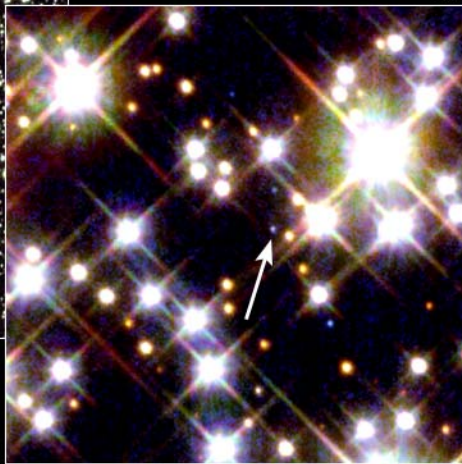
NOAO

Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA and H. Richer (University of British Columbia)
STScI-PRC03-19b

Globular Cluster M4
Location of white dwarf
companion to pulsar B1620-26

HST



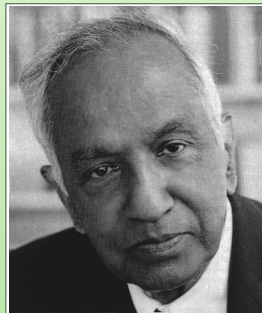
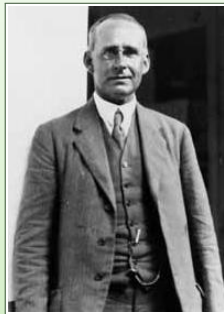
Chandrasekharova mez

- Subrahmanyan Chandrasekhar
1930–1931: rovnováhu udržuje
degenerovaný elektronový plyn, NC
1983 s Williamem Fowlerem

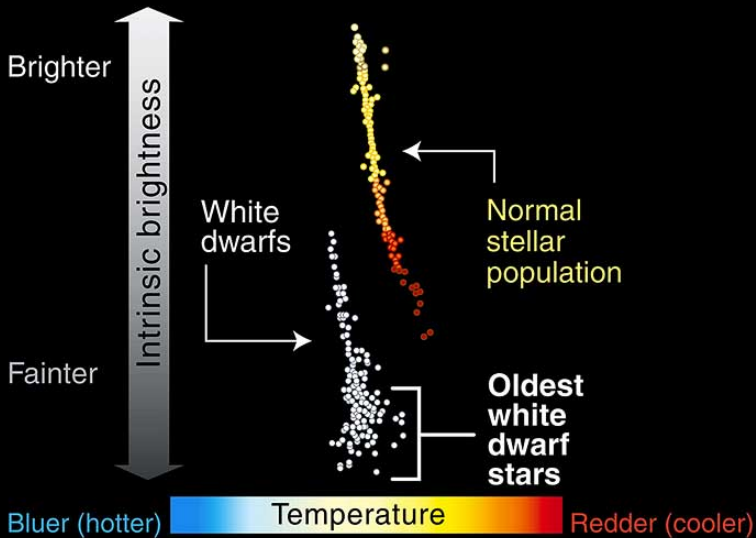
Chandrasekharova mez:

bílý trpaslík nemůže mít hmotnost větší
než $M = 1,4 M_{\odot}$

- Arthur Eddington 11. 1 1935:
„Domnívám se, že by měl existovat
přírodní zákon, který by zabránil
hvězdám, aby se chovaly tak
absurdním způsobem!“



White Dwarfs in Globular Cluster M4



Neutronové hvězdy

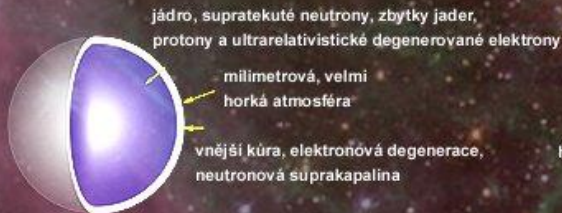
- James Chadwick (1932): experimentální objev neutronu
- Fritz Zwicky, 30-tá léta: představa neutronové hvězdy, poloměr okolo 10 km, hustota $10^{13} - 10^{15} \text{ g} \cdot \text{cm}^3$, centrální teplota 10^9 K
- Walter Baade (Göttingen, Hamburg, Mount Wilson): pozorování velmi zářivých nov $10^{10} \times$ zářivějších než Slunce – **supernovy**
- Antony Hewish a Jocelyn Bell (1967): **pulsary**, perioda rotace 0,0016 – 4 s, NC 1974 s Martinem Ryleem
- Joseph Taylor a Russell Hulse (1974): binární pulsar **PSR1913+16**, perioda rotace 0,0059 s, zkracování periody oběhu o $76 \cdot 10^{-6} \text{ s/rok}$,



Neutronové hvězdy

Neutronové hvězdy

Husté, gravitačně vázané objekty, složené z větší části z neutronů, vznikají zhroucením vnitřku velmi hmotných hvězd při výbuchu supernovy.



hmotnost: 1,3 Slunce

poloměr: 10 - 18 km

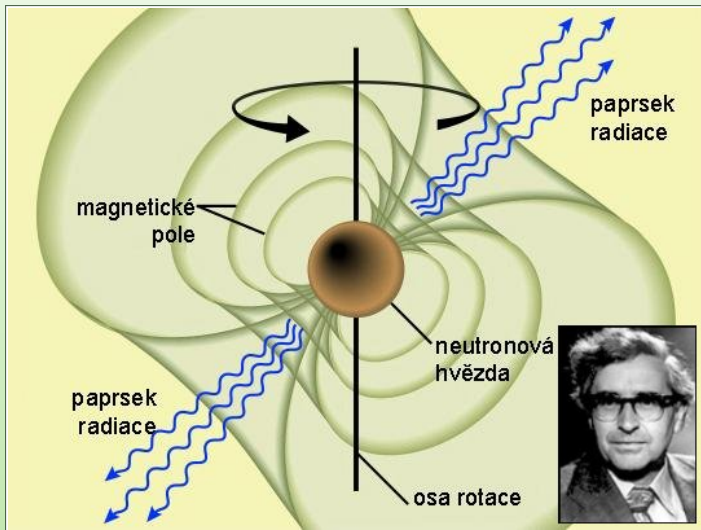
téměř ideální koule

povrchová teplota: miliony °C

rychlost rotace: až milisekundy

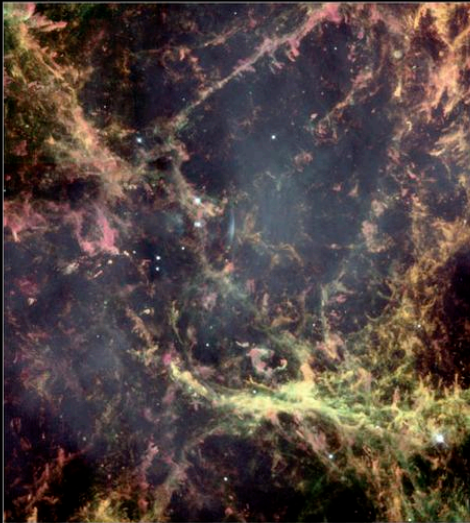
počet známých: více než tisíc

Neutronové hvězdy



Neutronové hvězdy

Crab Nebula



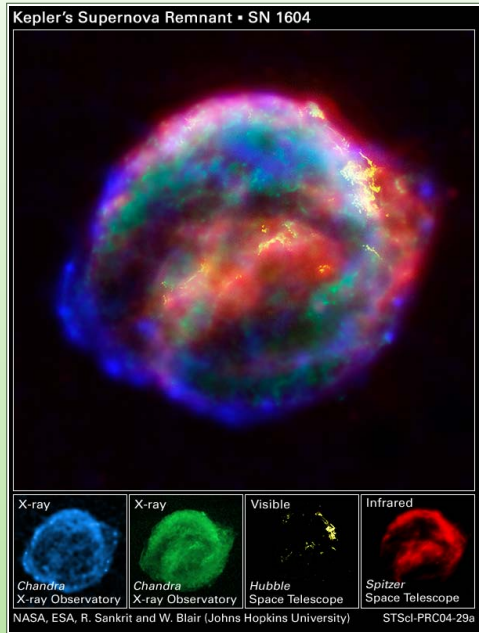
Hubble
Heritage

PRC00-15 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Neutronové hvězdy

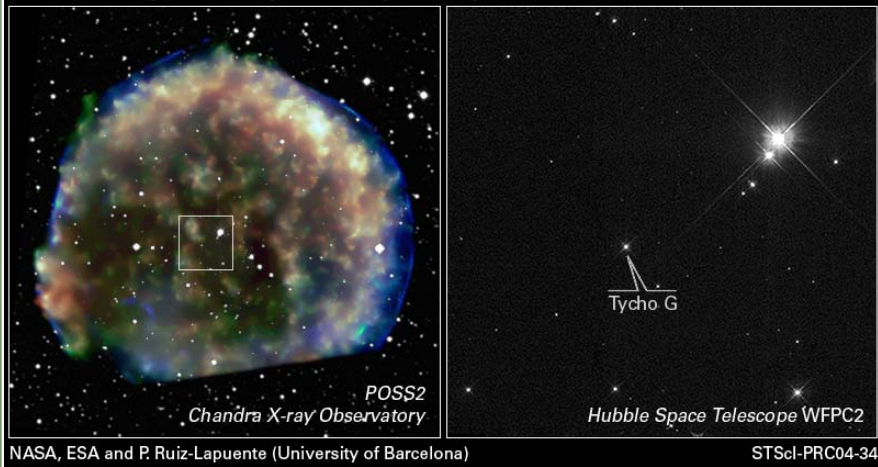


Neutronové hvězdy

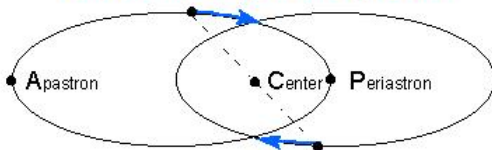


Neutronové hvězdy

Candidate Progenitor Companion to Tycho's Supernova 1572



Hulseův–Taylorův pulsar

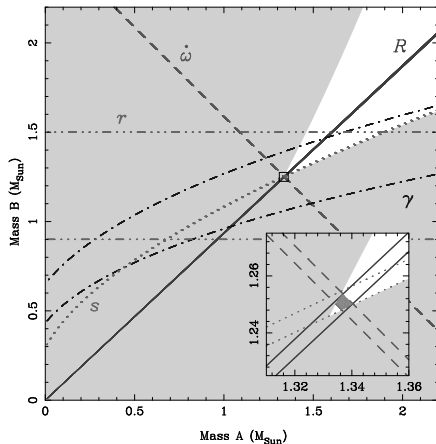
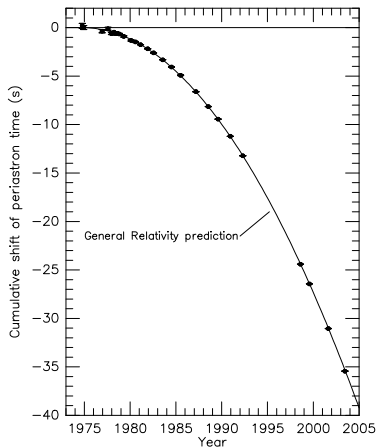


$T=7\text{h } 45\text{ min}$

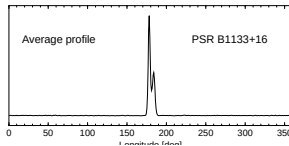
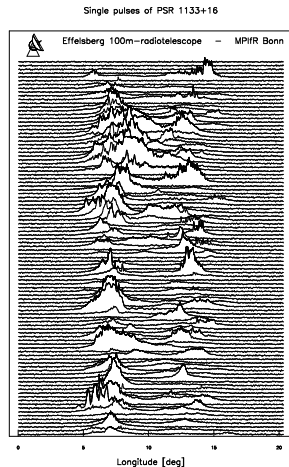
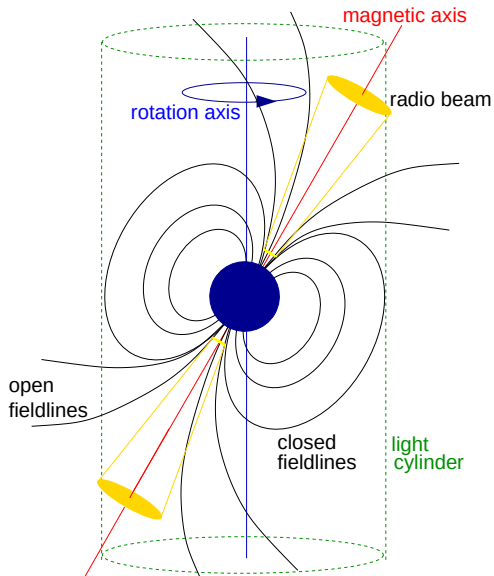


Binární pulsar J0737-3039

- objev v roce 2003, $T = 2,4 \text{ h}$, $\dot{\omega} = 16,88 \pm 0,09^\circ/\text{year}$,
- splynutí asi za 85 miliónů let

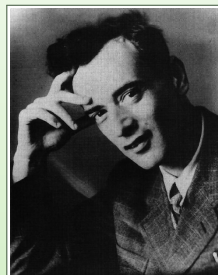


Binární pulsar J0737-3039

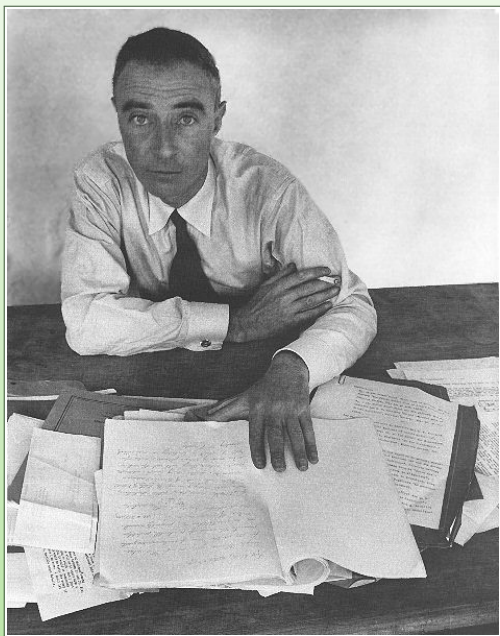


Nevyhnutelnost kolapsu

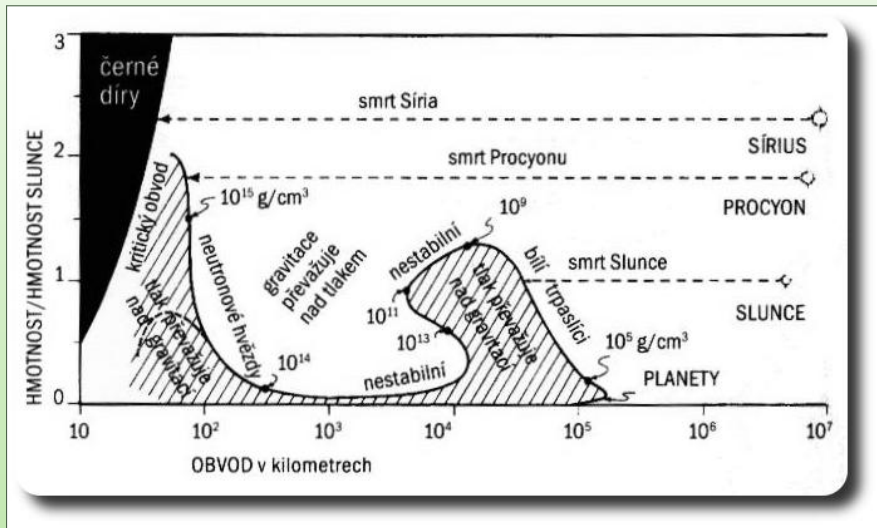
- Lev Davidovič Landau (Nature, 1938): hvězdy jako Slunce ve svém středu neutronová jádra, účinnost přeměn energie 10 %, NC 1962
- Robert Oppenheimer, George Volkoff: L. nezapočetl jaderné síly, existuje maximální hmotnost n. hvězd asi $1,4 - 3 M_{\odot}$, u známých blízko $1,4 M_{\odot}$, se Snyderem studuje kolaps; přerušeno válkou
- John Archibald Wheeler, Harrison, Wakano (1956): stavová rovnice n. hvězd, studium kolapsu
- Kolik hmoty se odvrhne do okolí?
- J. A. Wheeler (1967): „zamrzlé hvězdy“ $\Rightarrow$ černé díry
- Wolfgang Rindler (50-tá léta): horizont



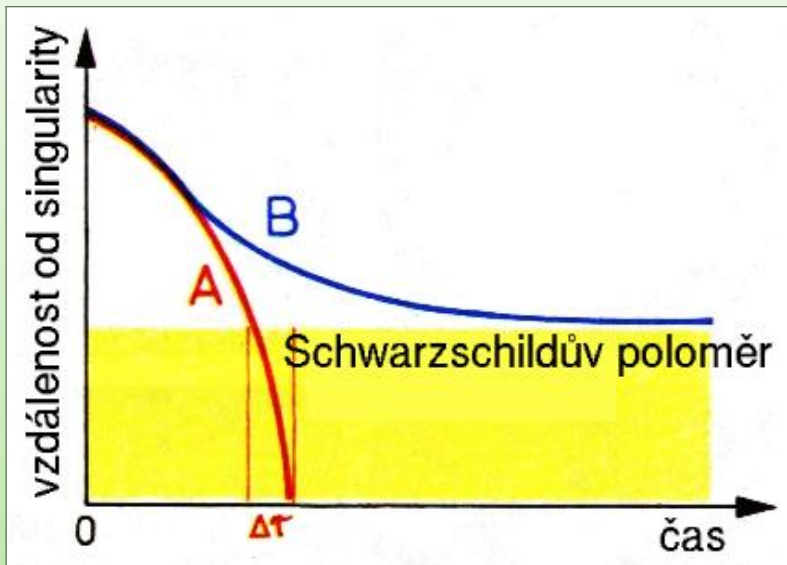
Nevyhnutelnost kolapsu



Nevyhnutelnost kolapsu

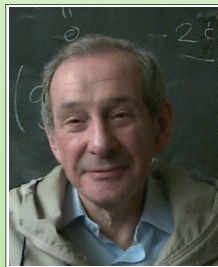


Nevyhnutelnost kolapsu

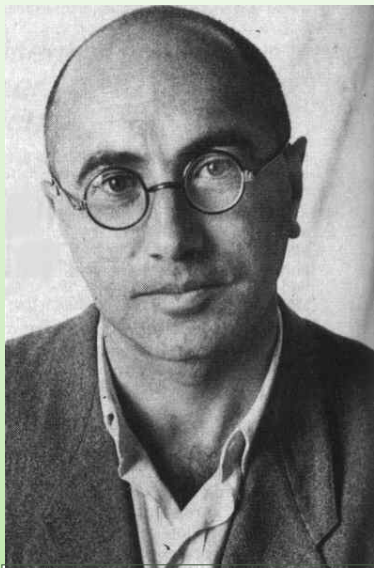


Černá díra nemá vlasy

- Vitalij Lazarevič Ginzburg (1964): kolapsem zmizí magnetické pole, NC 2003
- Zeldovič, Novikov, Doroškevič: horizont sférický
- Werner Israel (8. 2. 1967): *nesférický kolaps může mít dva důsledky – buď nevznikne ČD nebo vznikne přesně sférická ČD*
- Priceova věta (1968): co se může vyzářit, se opravdu vyzáří (elmag., grav. vlnami)
- Wheeler: **černá díra nemá vlasy** (téměř!), nelze určit, z čeho vznikla
- Zákony zachování: hmotnost, moment hybnosti, el. náboj
- Obecný důkaz: Brandon Carter, Stephen Hawking, Werner Israel

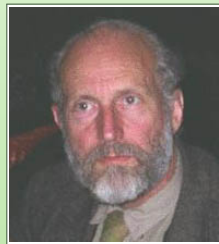
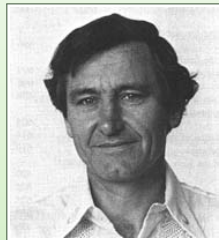


Černá díra nemá vlasy

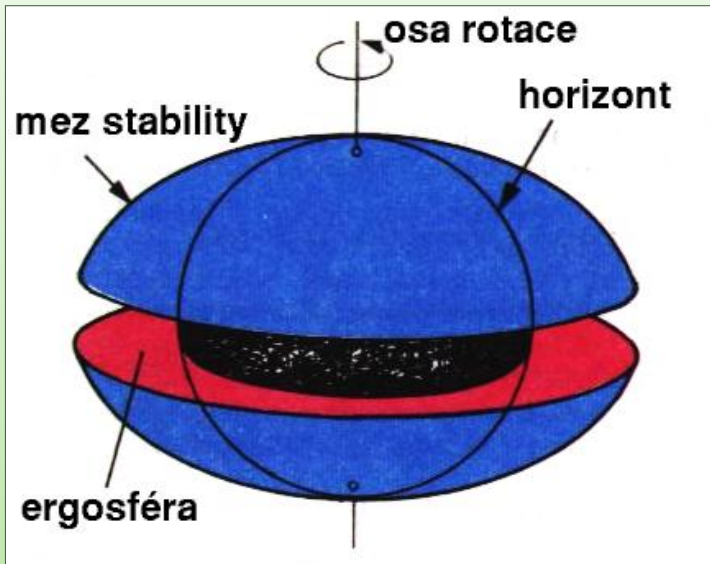


Rotující černé díry

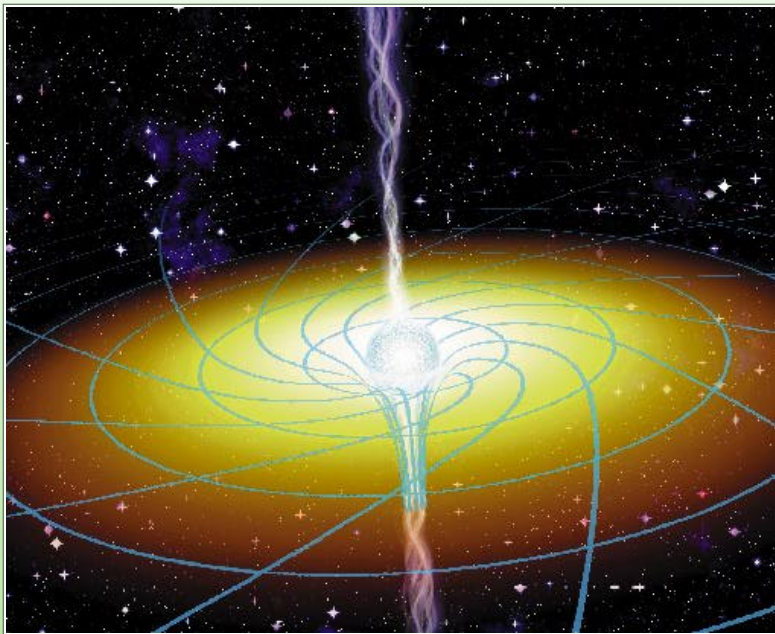
- Roy Kerr (1964): řešení pro prostoročas v okolí rotující hvězdy
- Brandon Carter (70-tá léta): Kerrovo řešení popisuje *všechny* možné rotující ČD
- limitní rotace: horizont rotuje maximálně, rychlostí c , pro Slunce $62 \mu\text{s}$, jinak horizont rozmetán
- Roger Penrose (1969): lze odčerpávat rotační energii, 48x účinnější než fúze
- rotující nabitá ČD může mít i magnetické pole
- Ted Newman (1965): obecné řešení nabité černé díry
- ČD může i pulzovat (zvlnění prostoročasu), pulzace stabilní



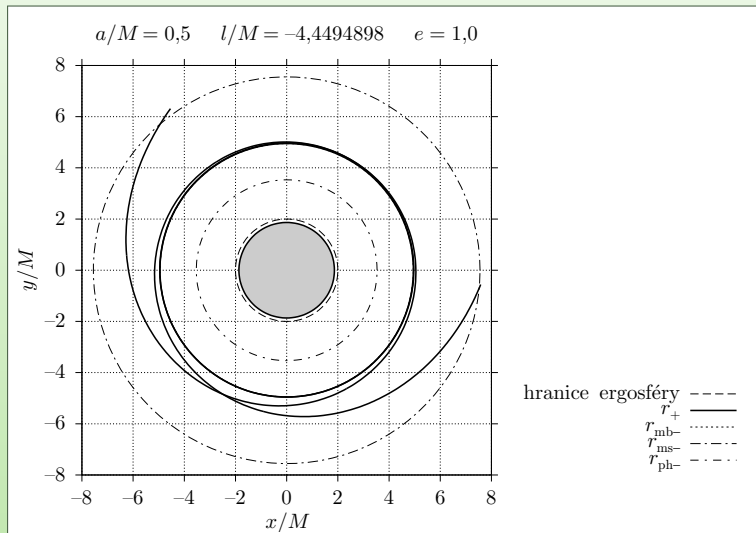
Rotující černé díry



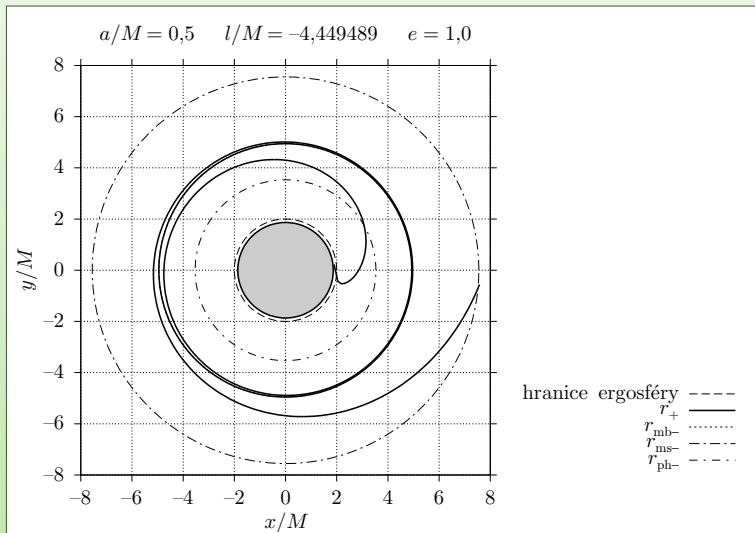
Rotující černé díry



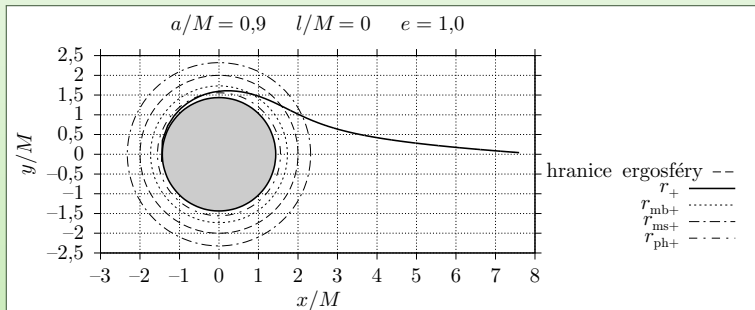
Trajektorie částic v poli Kerrovy ČD



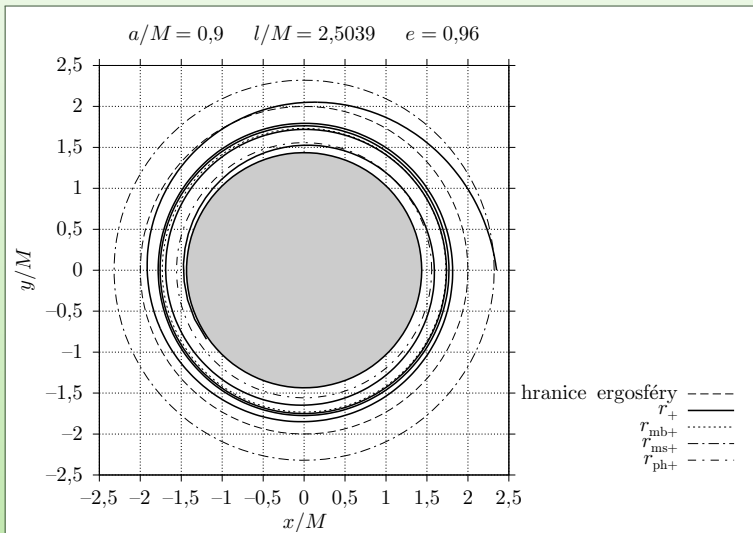
Trajektorie částic v poli Kerrovy ČD



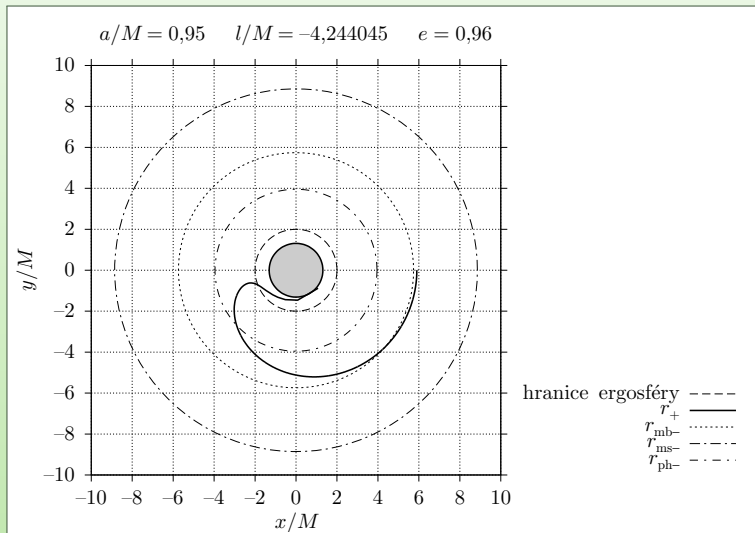
Trajektorie částic v poli Kerrovy ČD



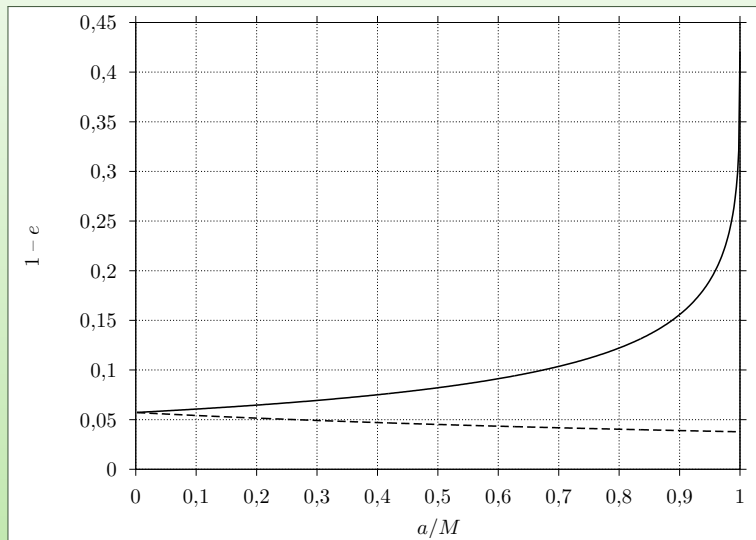
Trajektorie částic v poli Kerrovy ČD



Trajektorie částic v poli Kerrovy ČD



Trajektorie částic v poli Kerrovy ČD



- ČD o obvodu 50 km ve vzdálenosti 4 ly pod úhlem $10^{-7}''$ (vlas z Měsíce); izolovanou ČD nezaznameníme ani jako gr. čočku
- Zeldovič a Novikov, Salpeter (1964): okolí ČD v **binárních systémech** zdrojem RTG záření
- Ricardo Giacconi – NC 2002, Uhuru (1970), Einstein (1978), Chandra (1999)
- Cygnus X-1: hvězda $20 - 35 M_{\odot}$ a průvodce HDE226868 min. $6 M_{\odot}$, 6 000 ly, 2. nejjasnější RTG zdroj
- RXJ1242: **rozmetání hvězdy** v souhvězdí Panny, 700 miliónů ly

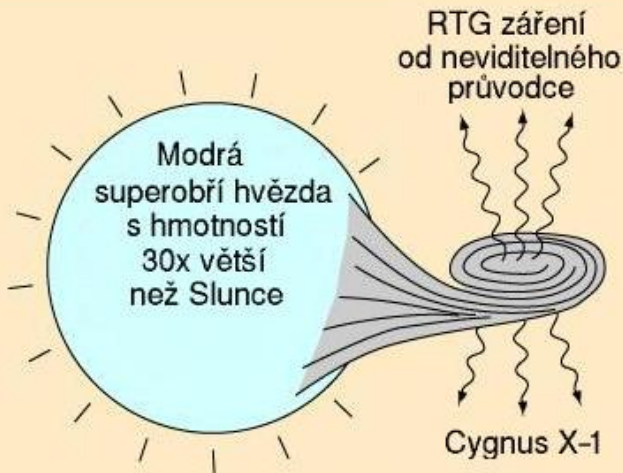


Chandra

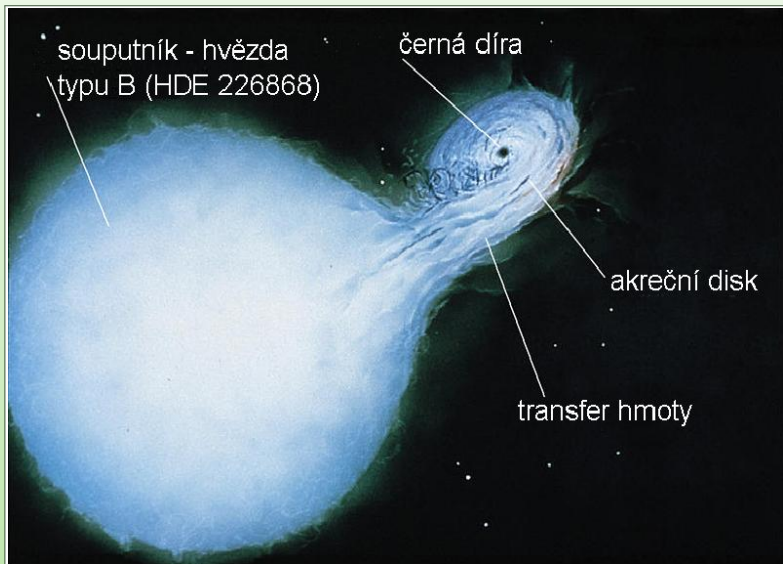


XMM-Newton

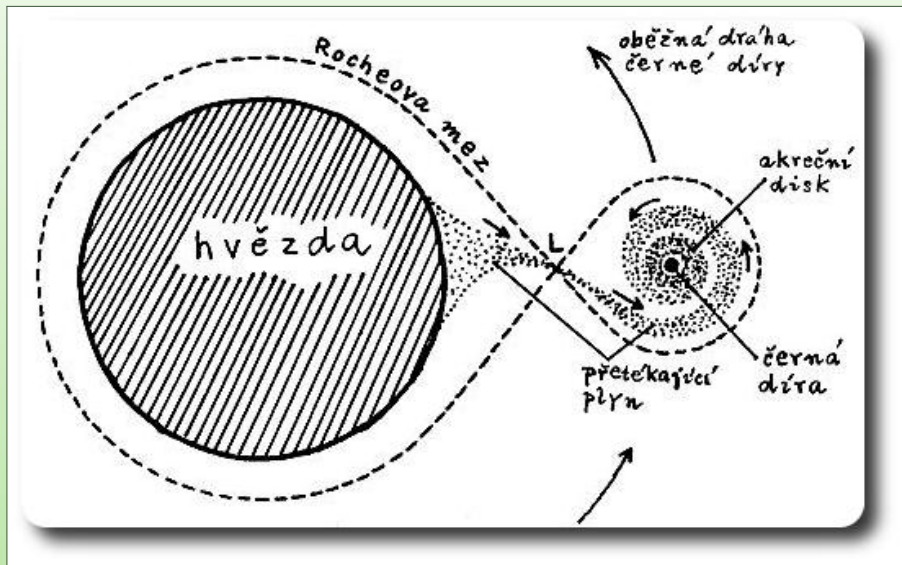


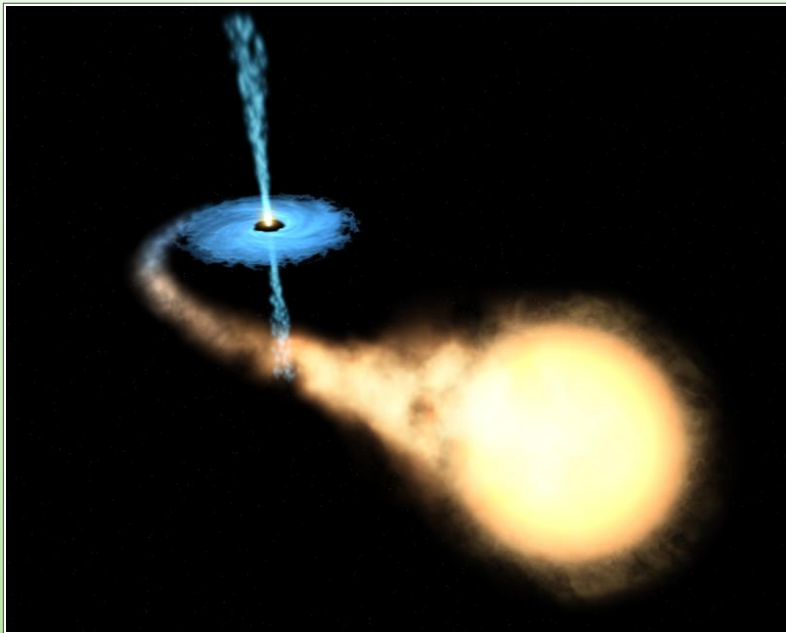


Pátrání ve vesmíru

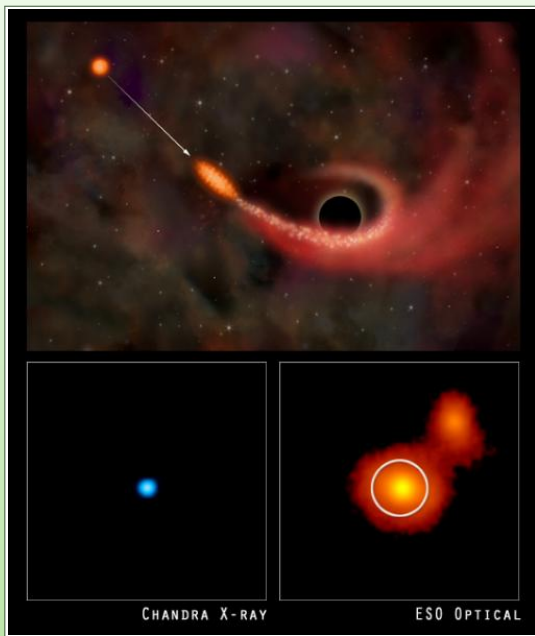


Pátrání ve vesmíru



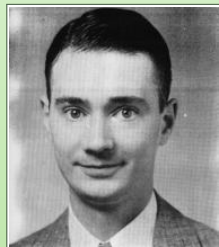
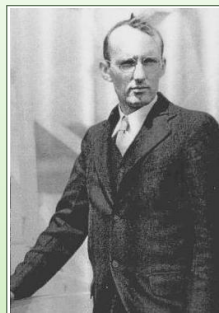


Pátrání ve vesmíru



Obří černé díry

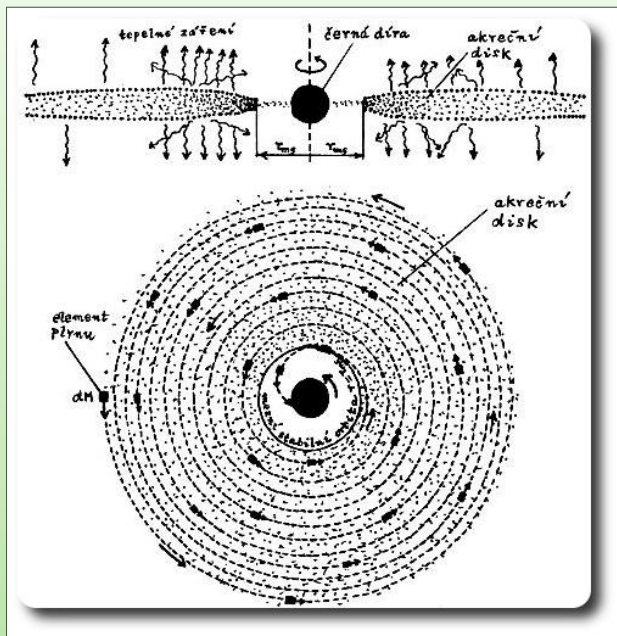
- Karl Jansky (1935): rádiový šum z centra Galaxie; dokonce silnější než ze Slunce
- Grote Reber (1939): radioamatér, na dvorku své matky, zdroje Cyg A, Cas A – 1. pozorování černých děr
- 1951: první rádiová galaxie (Ryle, opt. identifikace Baade), záření z gigantických laloků na obou stranách
- Maarten 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)



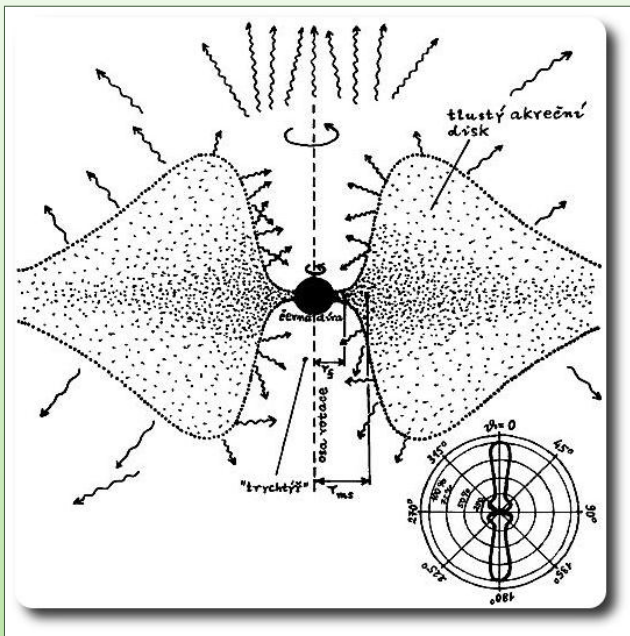
Obří černé díry



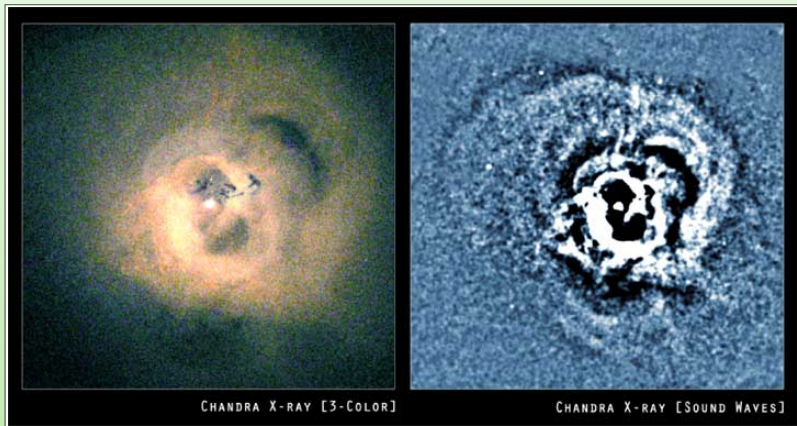
Obří černé díry



Obří černé díry

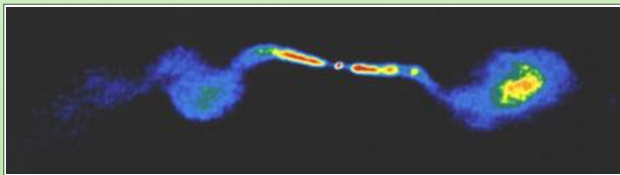


Obří černé díry

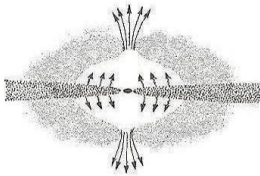


„Motory“ v centrech galaxií

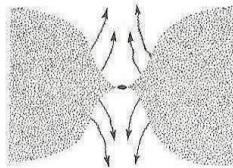
- zdroj energie v akr. disku: **tření**, $\eta \leq 40\%$
- „krmení“ roztáčí ČD na maximální otáčky
- vznik výtrysků: **Blandfordův-Znajekův proces**
- **Aktivní galaktická jádra**, u kvazarů intenzivnější „krmení“, přezáří okolí; významný vliv rotace
- M87 v Panně: vzdálenost 50 miliónů ly, kolimace 10° na 100 miliónů ly
- v centru naší Galaxie ČD $M = 3 \cdot 10^6 M_\odot$



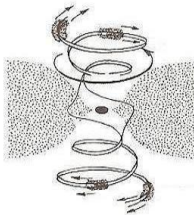
„Motory“ v centrech galaxií



(a)



(b)

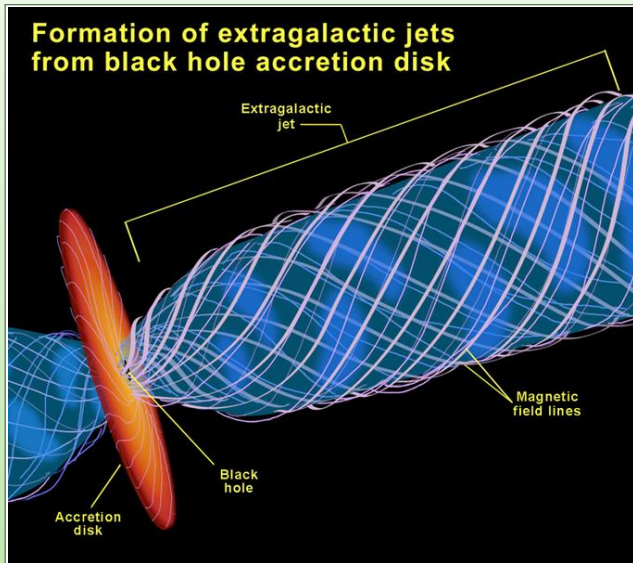


(c)

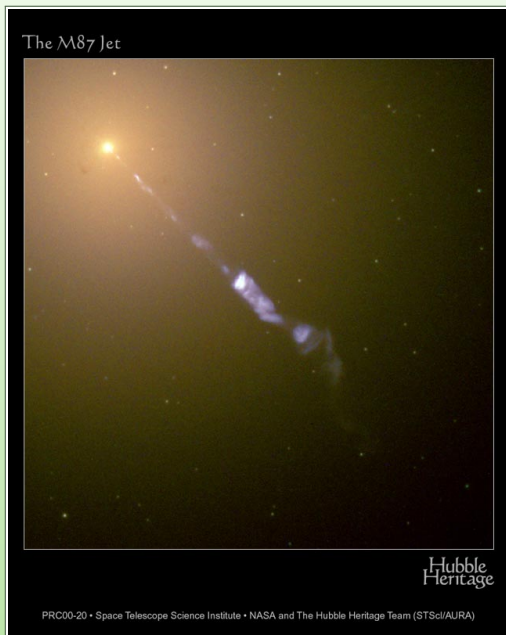


(d)

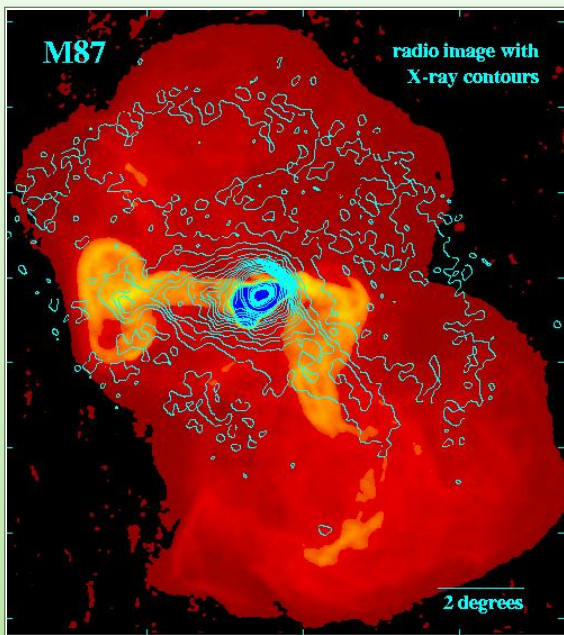
„Motory“ v centrech galaxií



„Motory“ v centrech galaxií

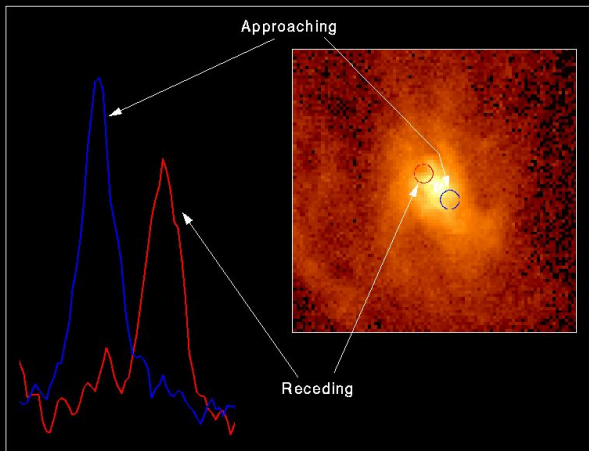


„Motory“ v centrech galaxií



„Motory“ v centrech galaxií

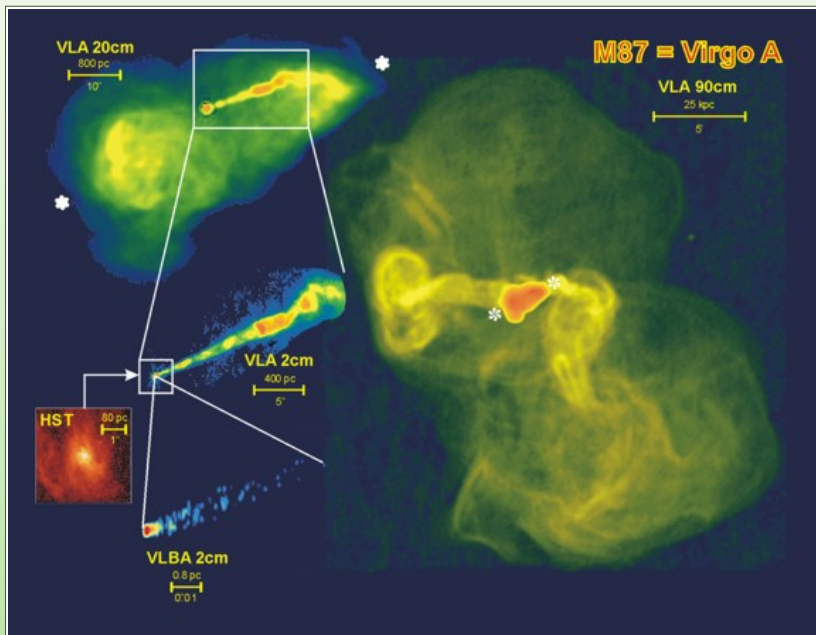
Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph



„Motory“ v centrech galaxií

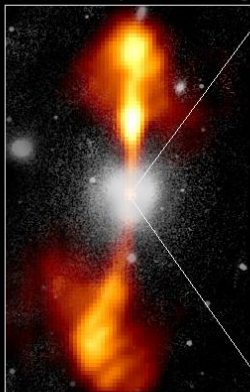


Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



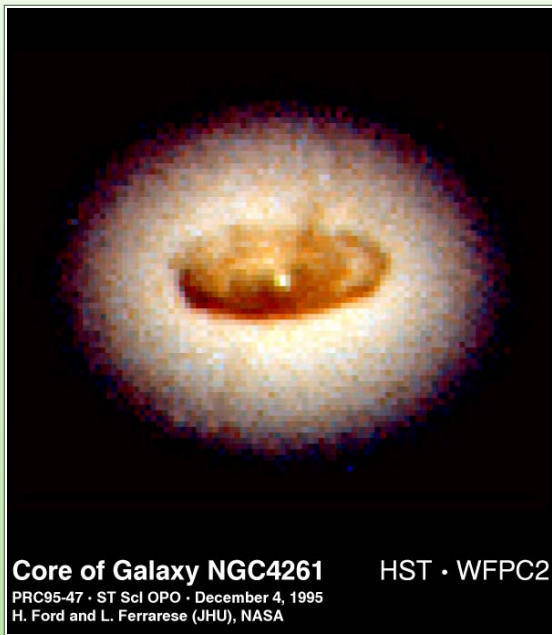
380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk

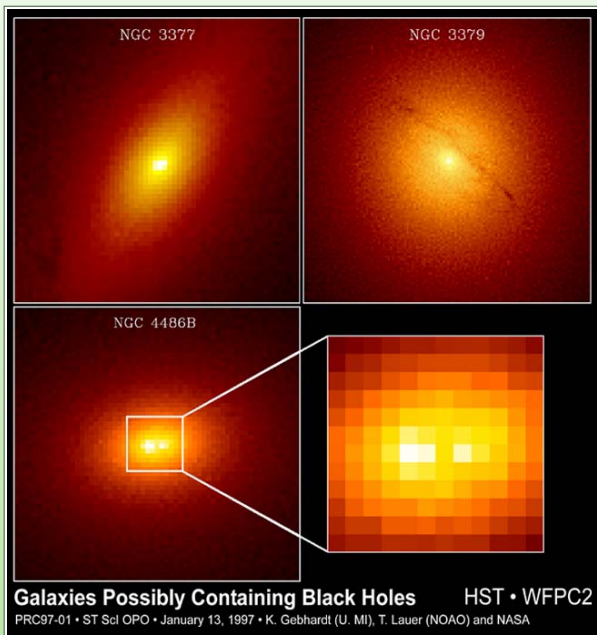


17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

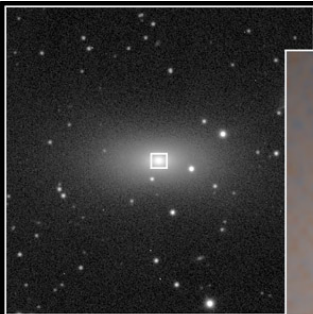
„Motory“ v centrech galaxií



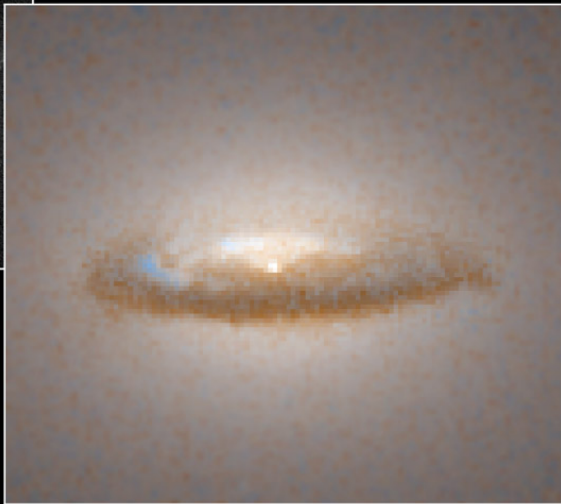
„Motory“ v centrech galaxií



„Motory“ v centrech galaxií



Ground



Disk in Galaxy NGC 7052

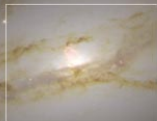
HST • WFPC2

PRC98-22 • June 18, 1998 • ST ScI OPO

R. P. van der Marel (ST ScI), F. C. van den Bosch (University of Washington) and NASA

„Motory“ v centrech galaxií

Active Galaxy
NGC 4438

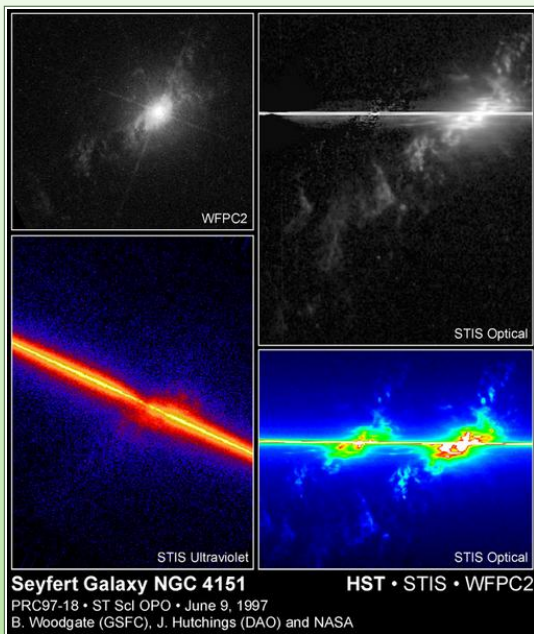


Hubble Space Telescope
WFPC2

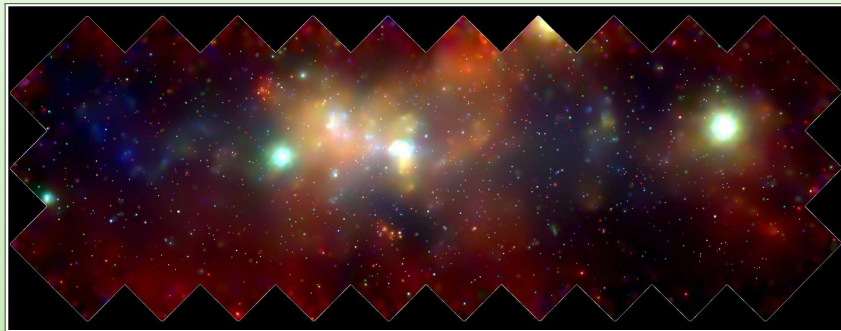
NASA and J. Kenney (Yale University)
STScI-PRC00-21



„Motory“ v centrech galaxií

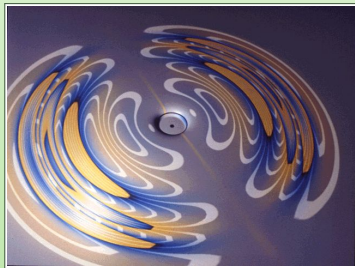


„Motory“ v centrech galaxií

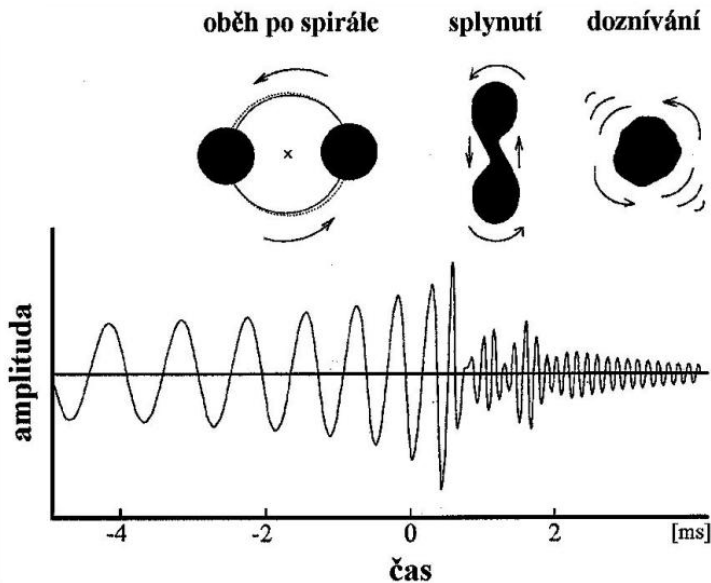


Symfonie černých děr

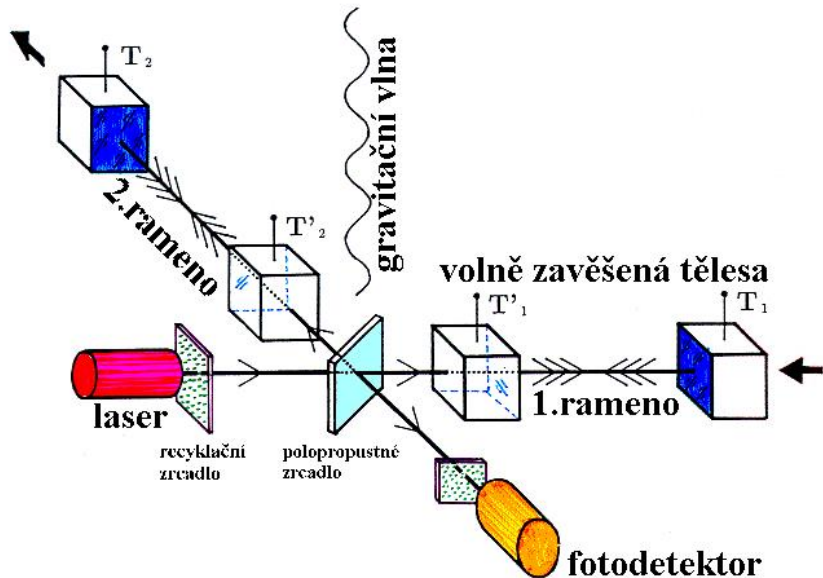
- splynutí černých děr: simulace,
vyzařovány **gravitační vlny**;
splynutí horizontů; doznívání
- urychlují přibližování černých děr,
zaznamenávají historii splynutí,
tvar dráhy, rotaci, vzdálenost od
Země, nezakresleny mezihvězdnou
hmotou; nelinearita
- pro černé díry s $M = 10 M_{\odot}$ ve
vzd. miliardy ly síla vln 10^{-21}
(supernovy v Galaxii)



Symfonie černých děr



Symfonie černých děr

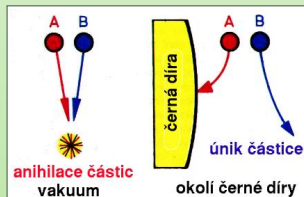
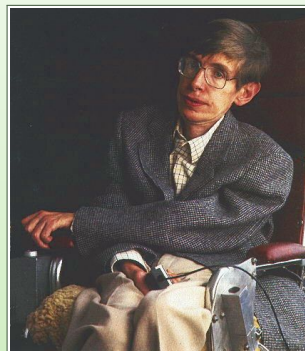


Symfonie černých děr

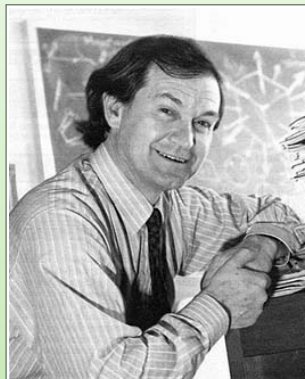


Vypařování černých děr

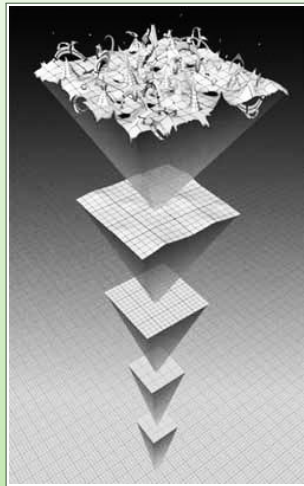
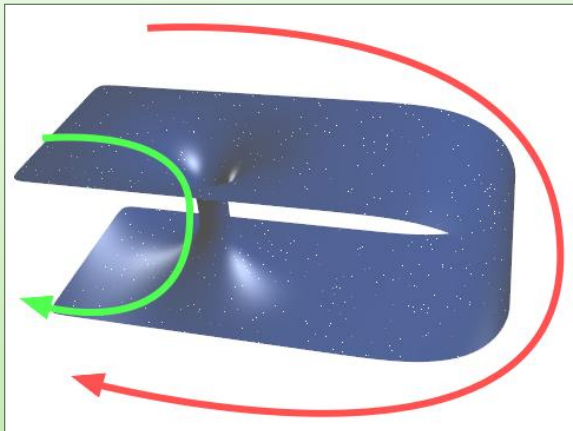
- Stephen Hawking (1970): zákon růstu plochy horizontu
- 2. věta termodynamická: ČD by mohla mít entropii, ale nezáří, entropie
- Hawking (1974): ČD vyzařují, ztrácejí energii
- entropie ČD dána logaritmem počtu způsobů jejího vzniku, při $M = 10 M_{\odot}$ asi 10^{79} , vhozením do ČD se entropie v okolí zmenší, ale celkem vzroste, podobně při vypařování
- doba života úměrná M^3 , pro $M = 2 M_{\odot}$ asi 10^{67} let; problém prvotních (primordiálních) ČD, γ -záření



- podle OTR za singularitou nic neexistuje
- hledání kvantové gravitace (J. A. Wheeler)
- Roger Penrose (1964): každá černá díra musí obsahovat singularity
- i singularita může „stárnout“
- kvantová gravitace: oddělí prostor a čas, pravděpodobnosti křivosti a topologie
- Penrose (1969): hypotéza kosmické cenzury

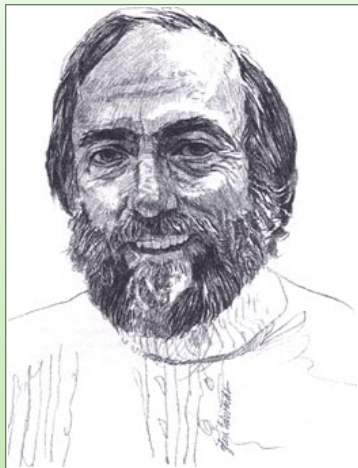


Svět pod horizontem



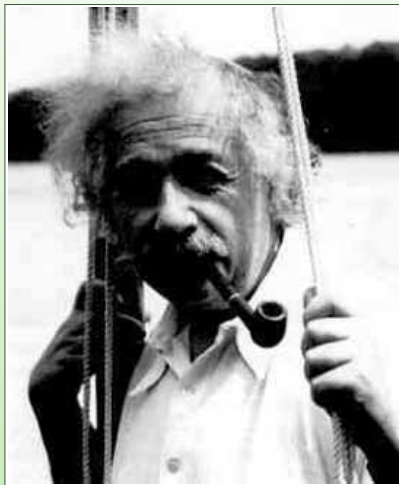
Mezi všemi výtvary lidského ducha – od jednorožců a chimér až po vodíkovou bombu – je skutečně tím nejfantastičtějším obraz černé díry, oddělené od ostatního prostoru hranicí, kterou nic nemůže proniknout, díry, jejíž silné gravitační pole ve svém smrtelném sevření zachytí i světlo, díry, která zakřivuje prostor a brzdí čas. Zdálo by se, že podobně jako jednorožci a chiméry patří černé díry spíš do vědeckofantastických románů nebo dávných mýtů než do reálného vesmíru. A přesto zákony současné fyziky skutečně vyžadují, aby černé díry existovaly. Je možné, že jen v naší Galaxii je jich hned několik miliónů.

Kip S. Thorne



Teorie černých děr byla vytvořena dříve, než byly známy jakékoli experimentální výsledky naznačující, že černé díry skutečně existují. Neznám ve vědě jiný příklad tak dalekosáhlé úspěšné extrapolace učiněné jen na základě teoretických úvah. Ukazuje to na neobyčejnou sílu a hloubku Einsteinovy teorie.

Stephen Hawking



A. Einstein

Použité prameny

-  Thorne, K. S.: *Černé díry a zborcený čas (Pozoruhodná dědictví Einsteinova génia)*. Praha: Mladá fronta, 2004. ISBN: 80-204-0917-3.
-  Hartle, J. B.: *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley, 2003, ISBN: 0-8053-8662-9..
-  Novikov, I.: *Černé díry a vesmír*. Praha: Mladá fronta, 1989, ISBN: 80-204-0028-1.
-  Raine, D.; Edwin, T.: *Black Holes: An Introduction*. Imperial College Press, 2009, ISBN: 1-84816-382-7
-  Schutz B.: *Gravity from the ground up*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. URL: <http://www.gravityfromthegroundup.org/>.
-  Ullmann, V.: *Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu*. Ostrava: ČAS, 1986.
URL: <http://www.sweb.cz/AstroNuklFyzika/GravitCerneDiry.htm>.
-  Podolský, J.: „Pátrání po gravitačních vlnách“ [online]. URL: <http://utf.mff.cuni.cz/~podolsky/gravlny2/gravitvln.htm>.
-  Thorne, K. S.: „Homepage of Kip S. Thorne“ [online].
URL: <http://www.its.caltech.edu/~kip/>.
-  Wikipedie, otevřená encyklopedie. URL: <http://cs.wikipedia.org>.

Zdroje obrázků: NASA, ESA, Wikipedie

