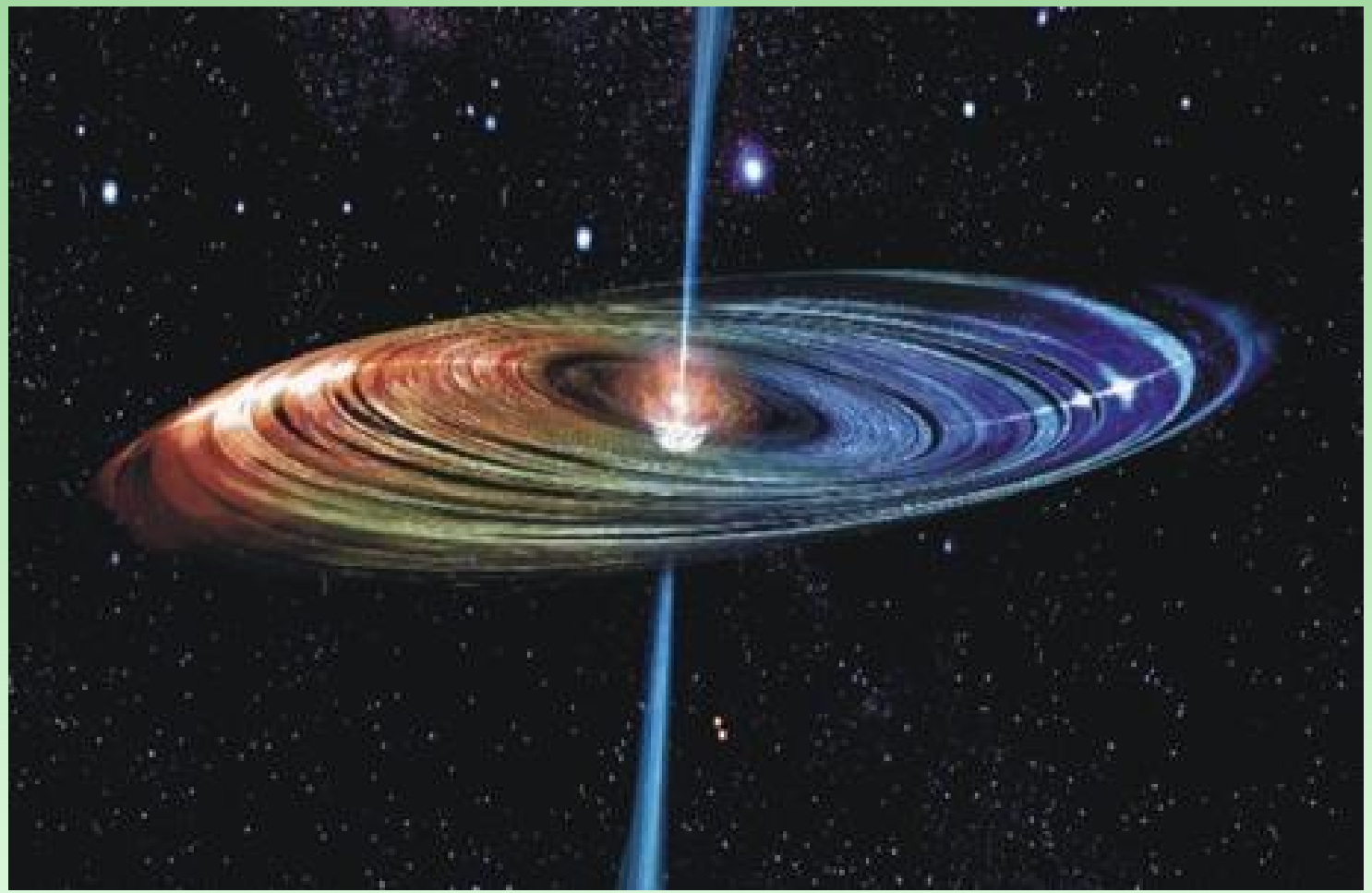
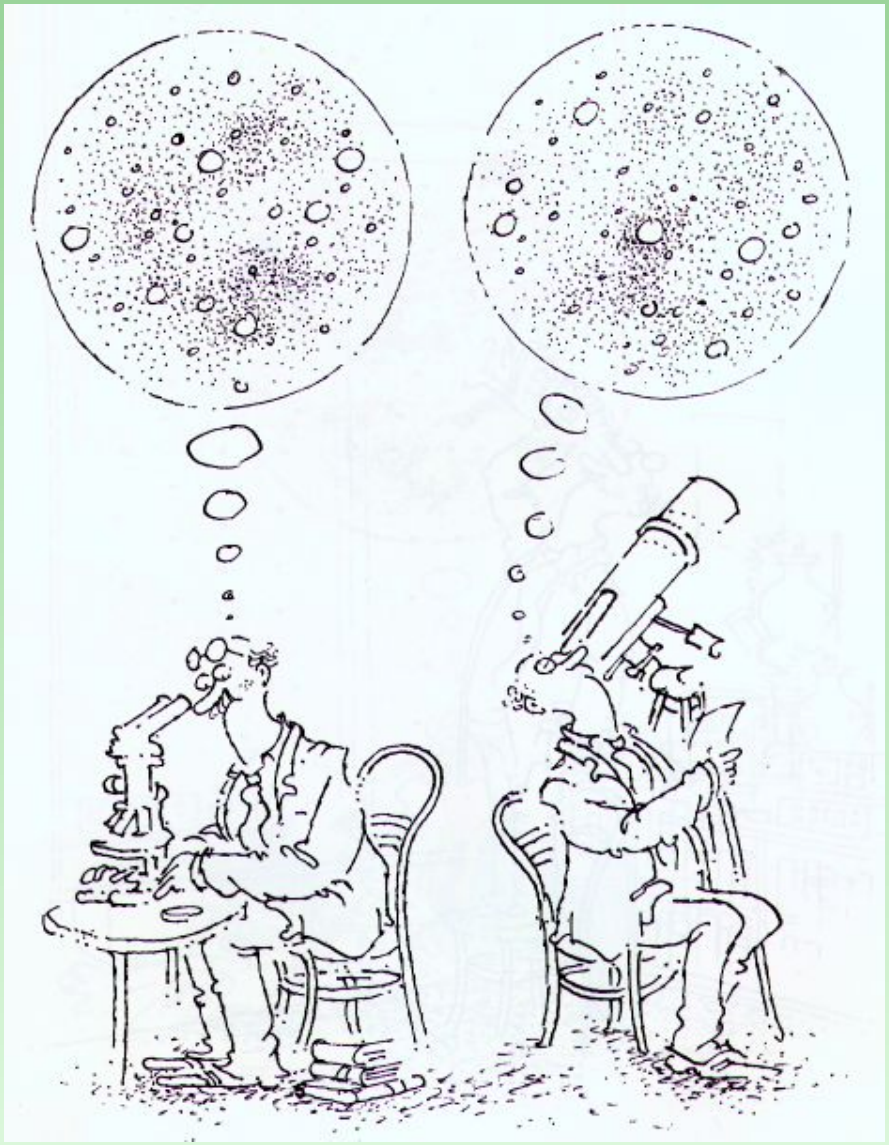
O PLEŠATOSTI ČERNÝCH DĚR



– Typeset by FoilTEX –

OSNOVA

- Předpověď a zavržení černých děr
- Umírající hvězdy a gravitační kolaps
- Pátrání ve vesmíru
- „Motory“ v centrech galaxií
- Symfonie černých děr
- Vypařování černých děr
- Svět pod horizontem



PŘEDPOVĚDI – TEMNÉ HVĚZDY

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

PŘEDPOVĚDI – TEMNÉ HVĚZDY

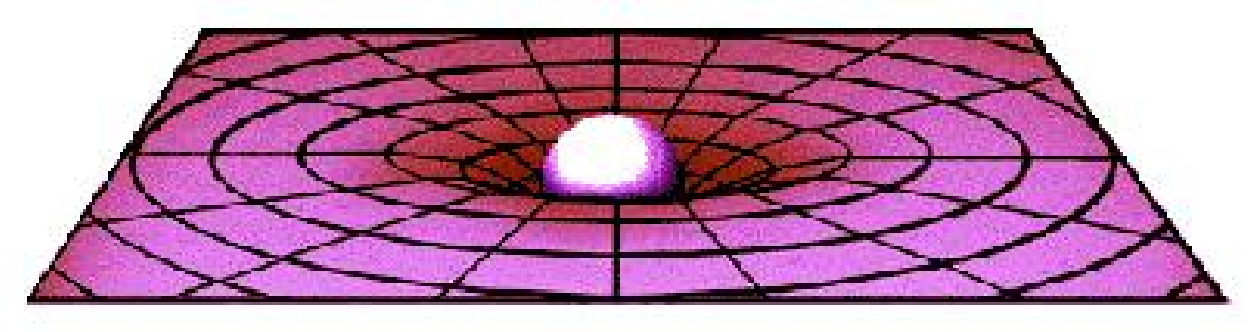
- filozofové přírody 18. století: světlo se skládá z korpuskulí

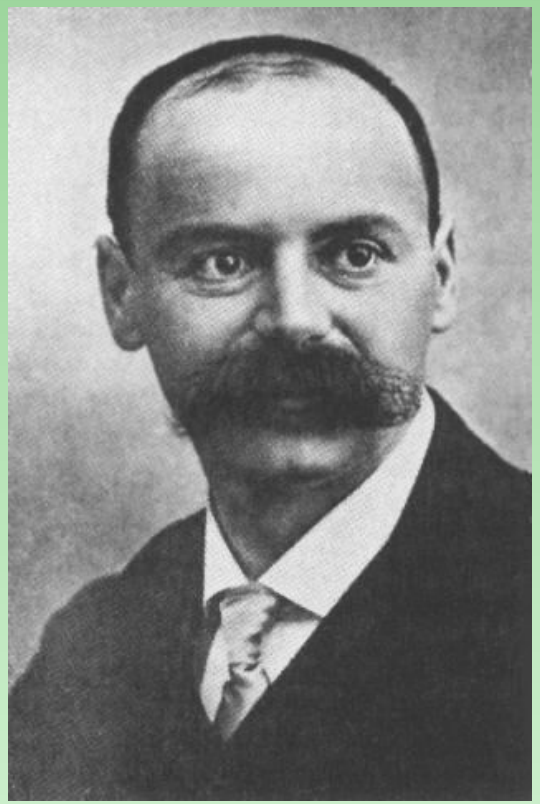
OBECNÁ TEORIE RELATIVITY

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

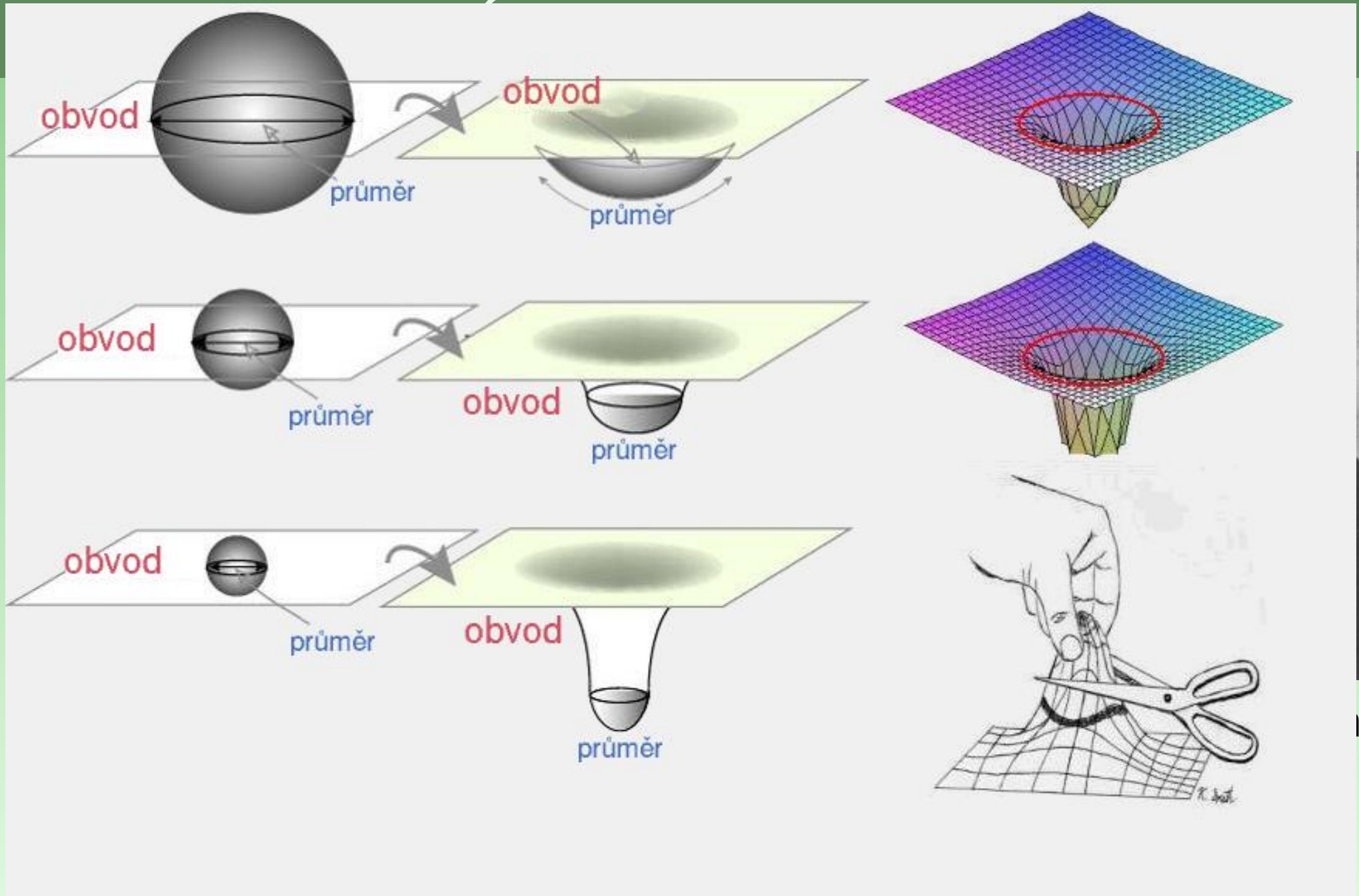
Gravitace je důsledkem zakřivení prostoročasu!

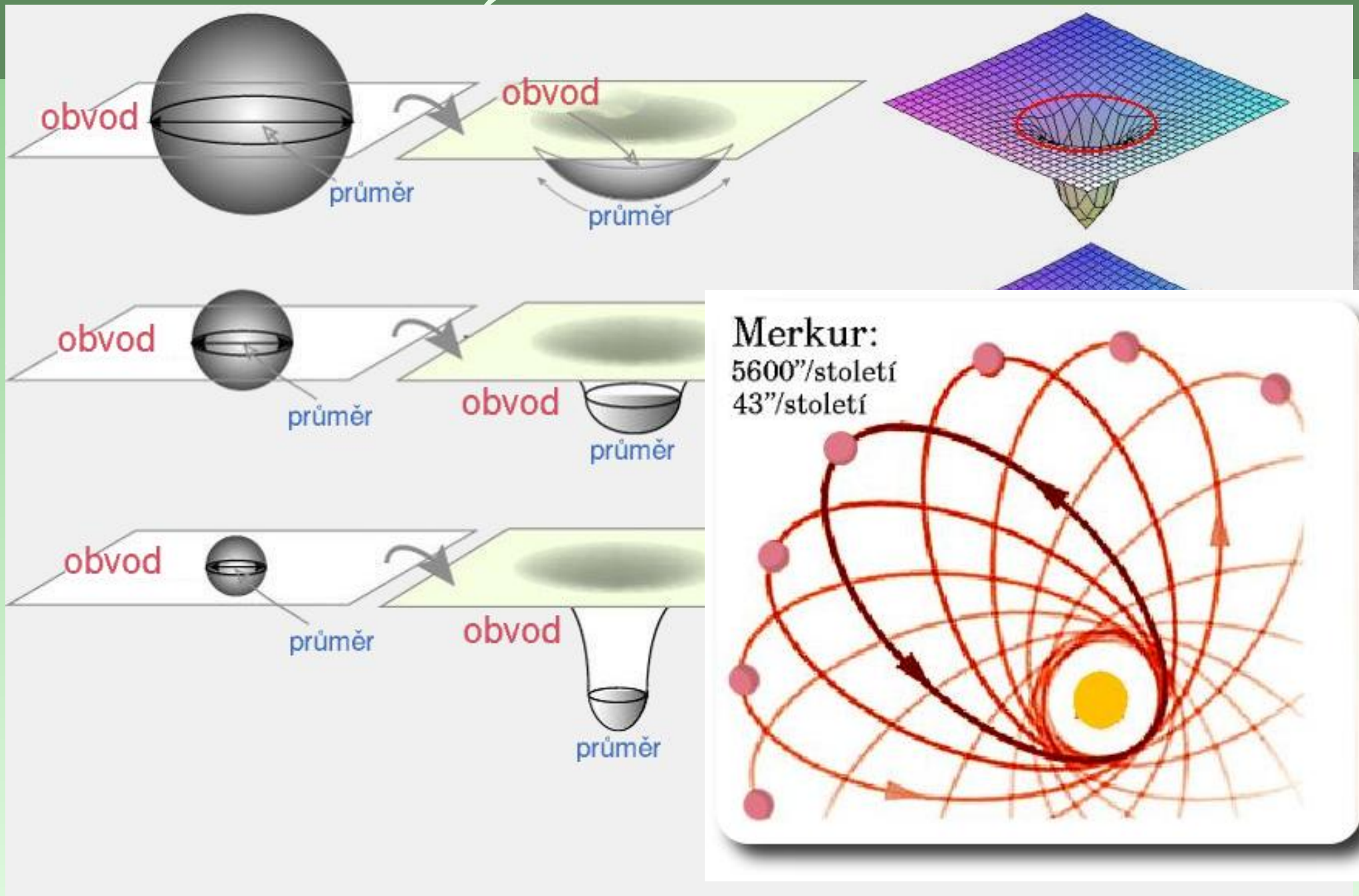
- Karl Schwarzschild (13. ledna 1916): prostoročas vně sférické nerotující hvězdy, kritický poloměr stejný jako Michellův





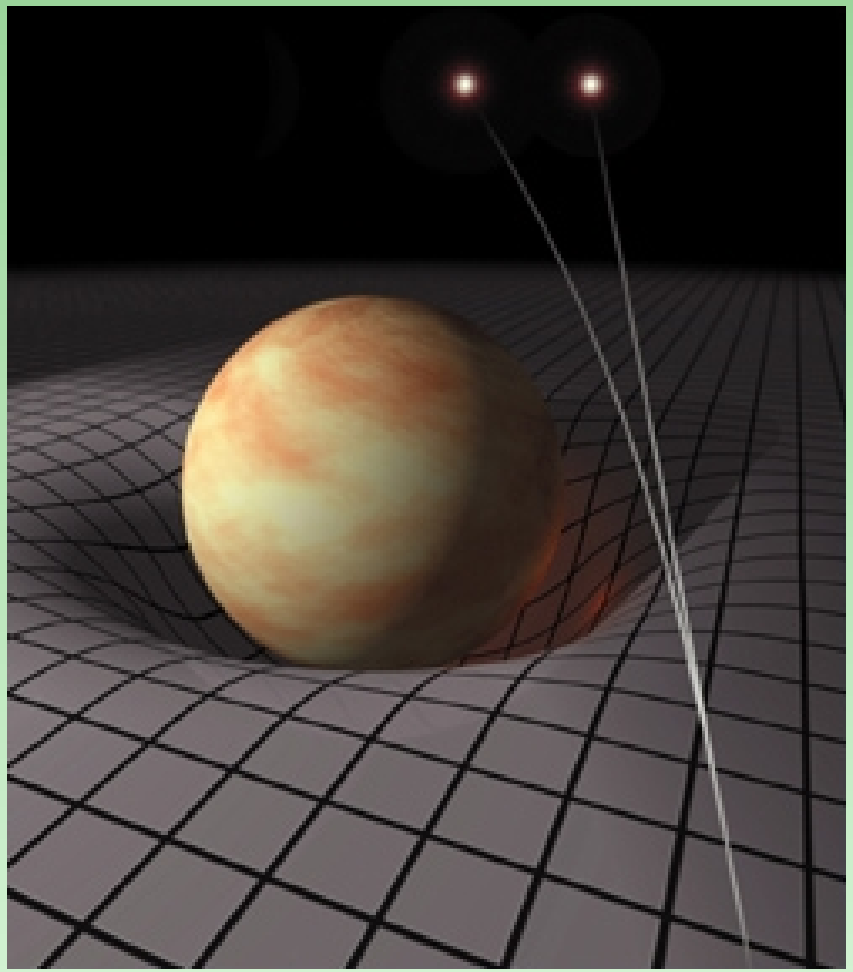
ředitel hvězdáren v Göttingen a Potsdami


obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr

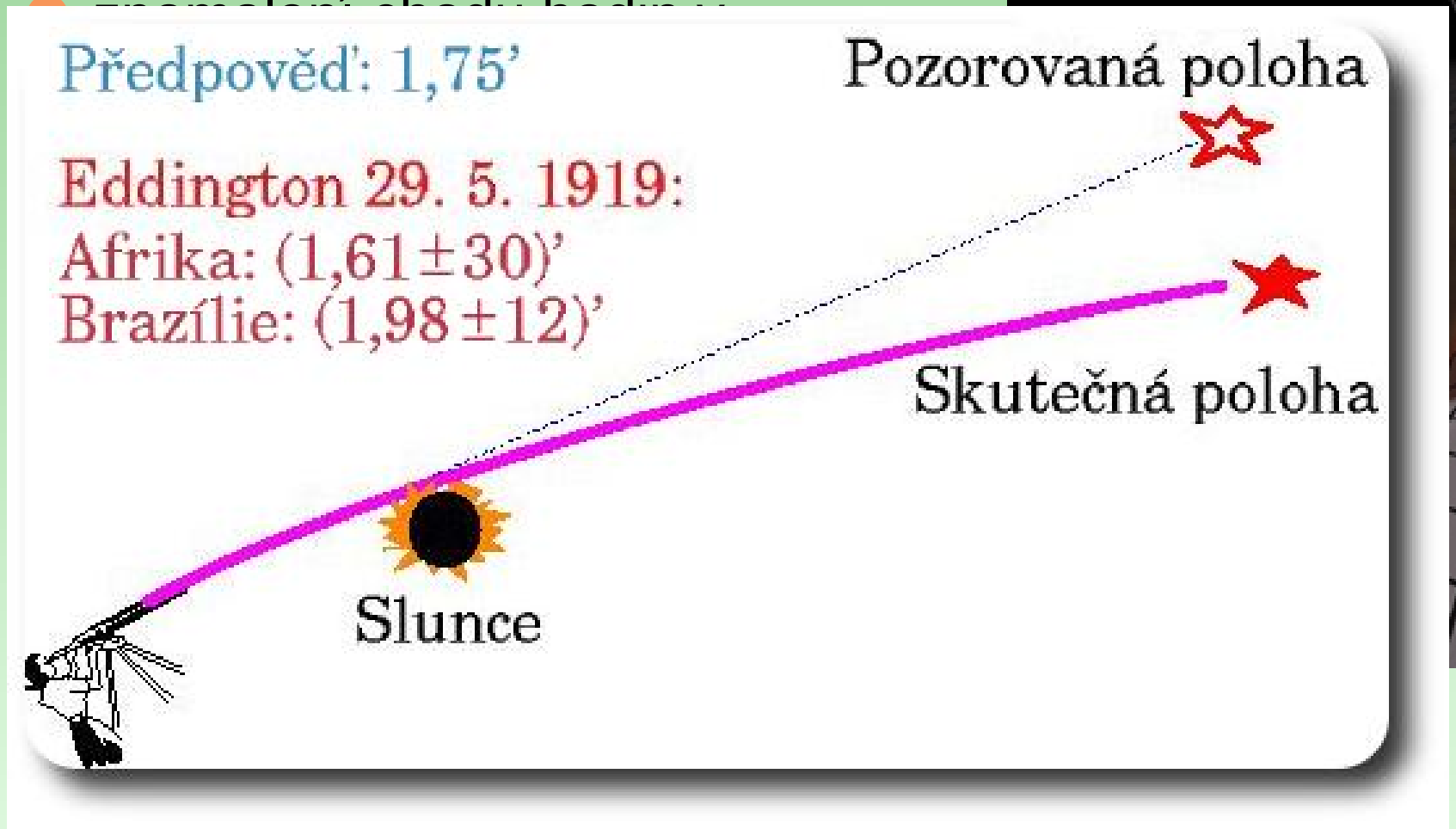

obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
obvod
průměr
Merkur:
5600”/století
43”/století

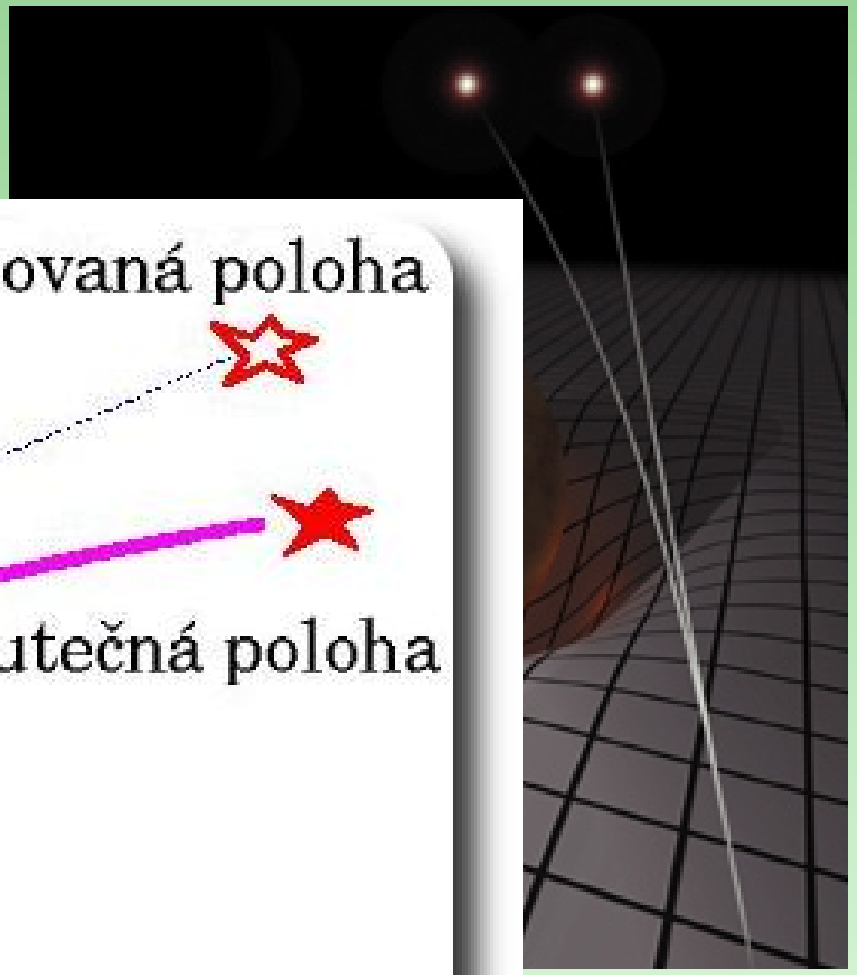
OHYB SVĚTLA A RUDÝ POSUV

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

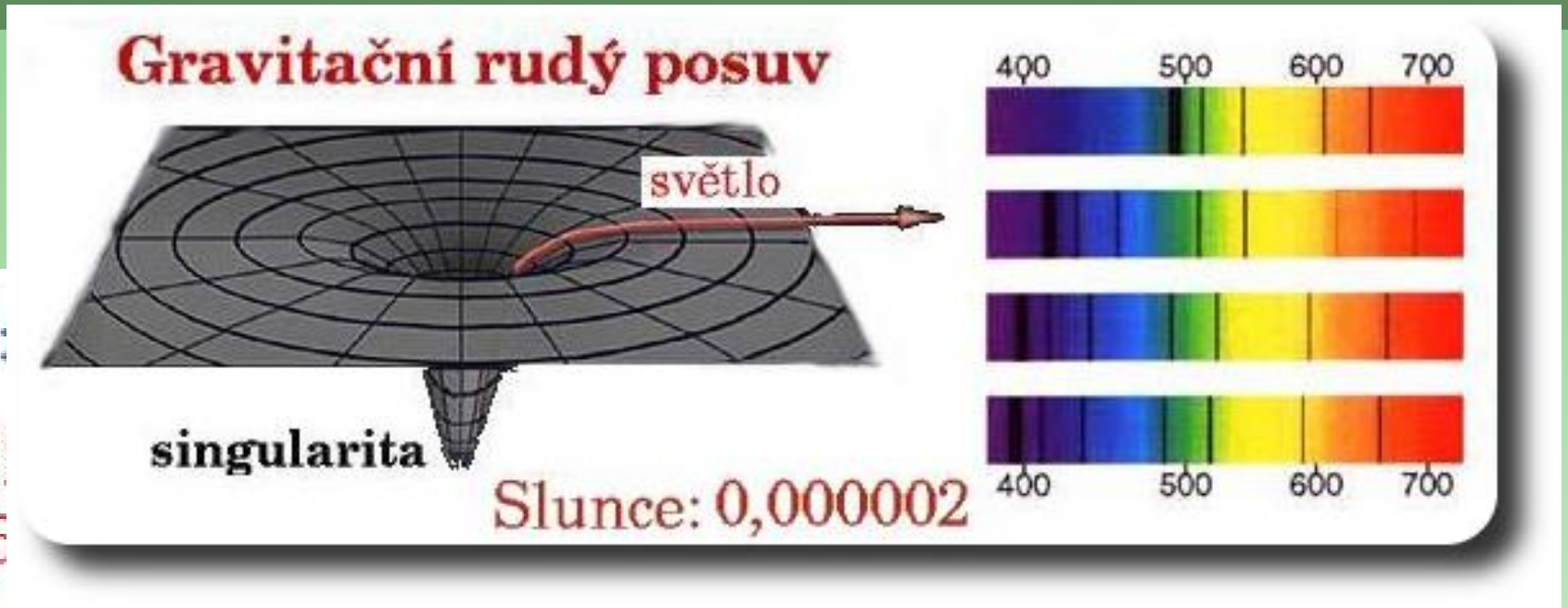


OHYB SVĚTLA A RUDÝ POSUV





OHYB SVĚTLA A RUDÝ POSUV

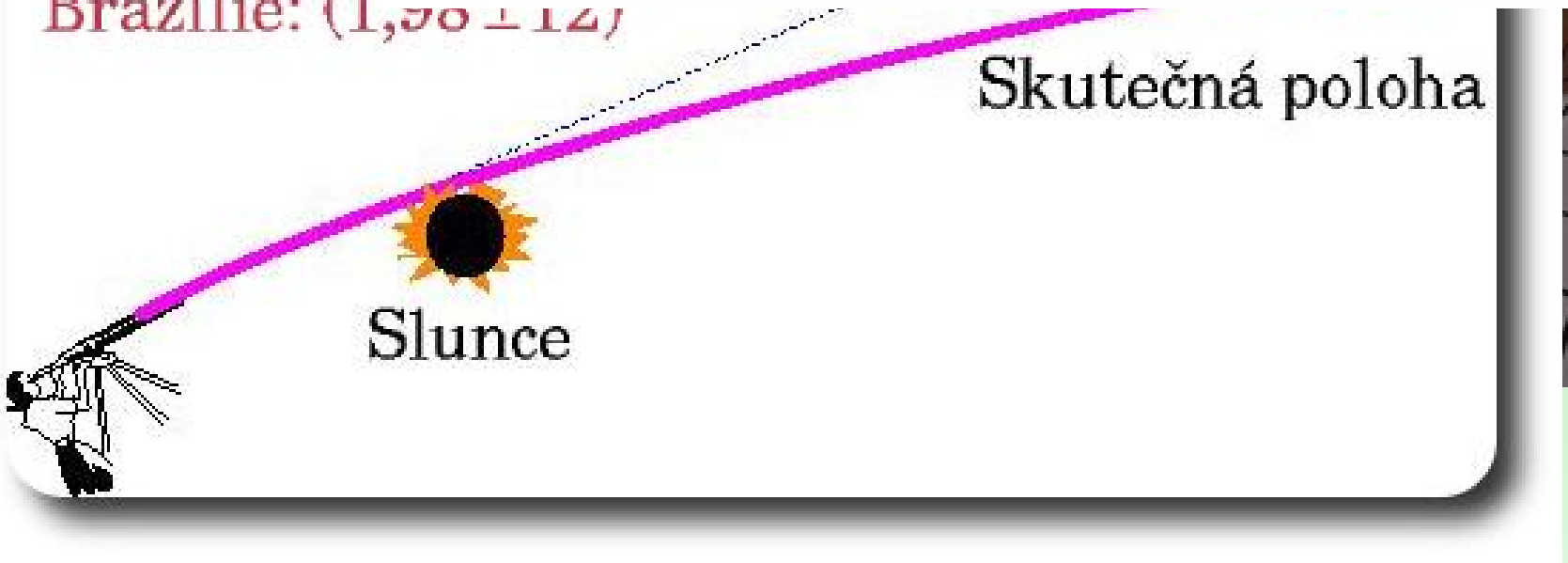


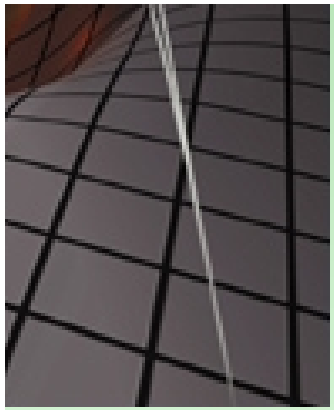
Předpověď:

Eddington

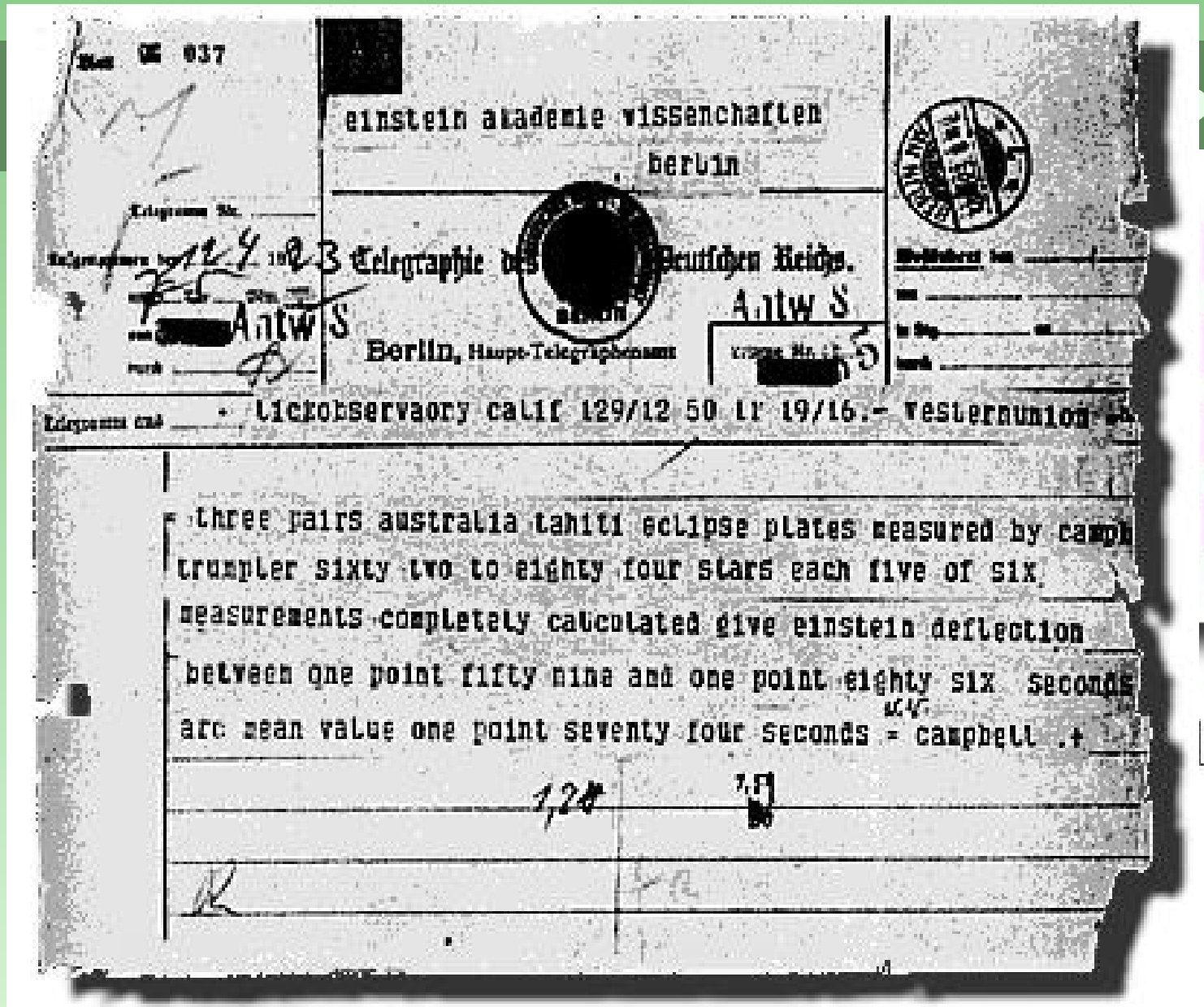
Afrika: (1,6

Brazílie: (1,98 ± 12)





POSUV



einstein akademie wissenschaften
berlin

Telegraphie des Deutschen Reichs.

Antw S

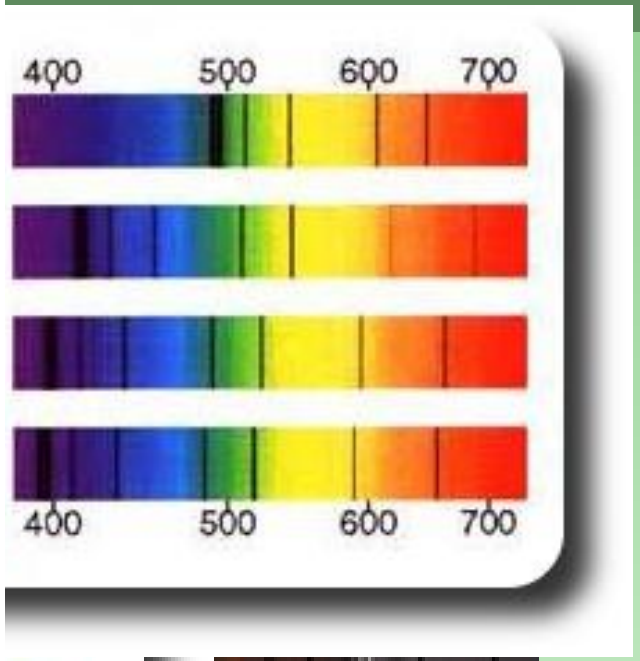
Berlin, Haupt-Telegraphenamt

Antw S

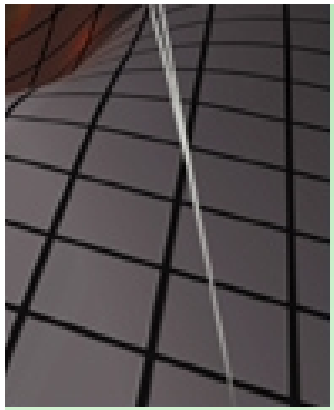
Lickobservatory calif 129/12 50 lr 19/16.- Westernunion

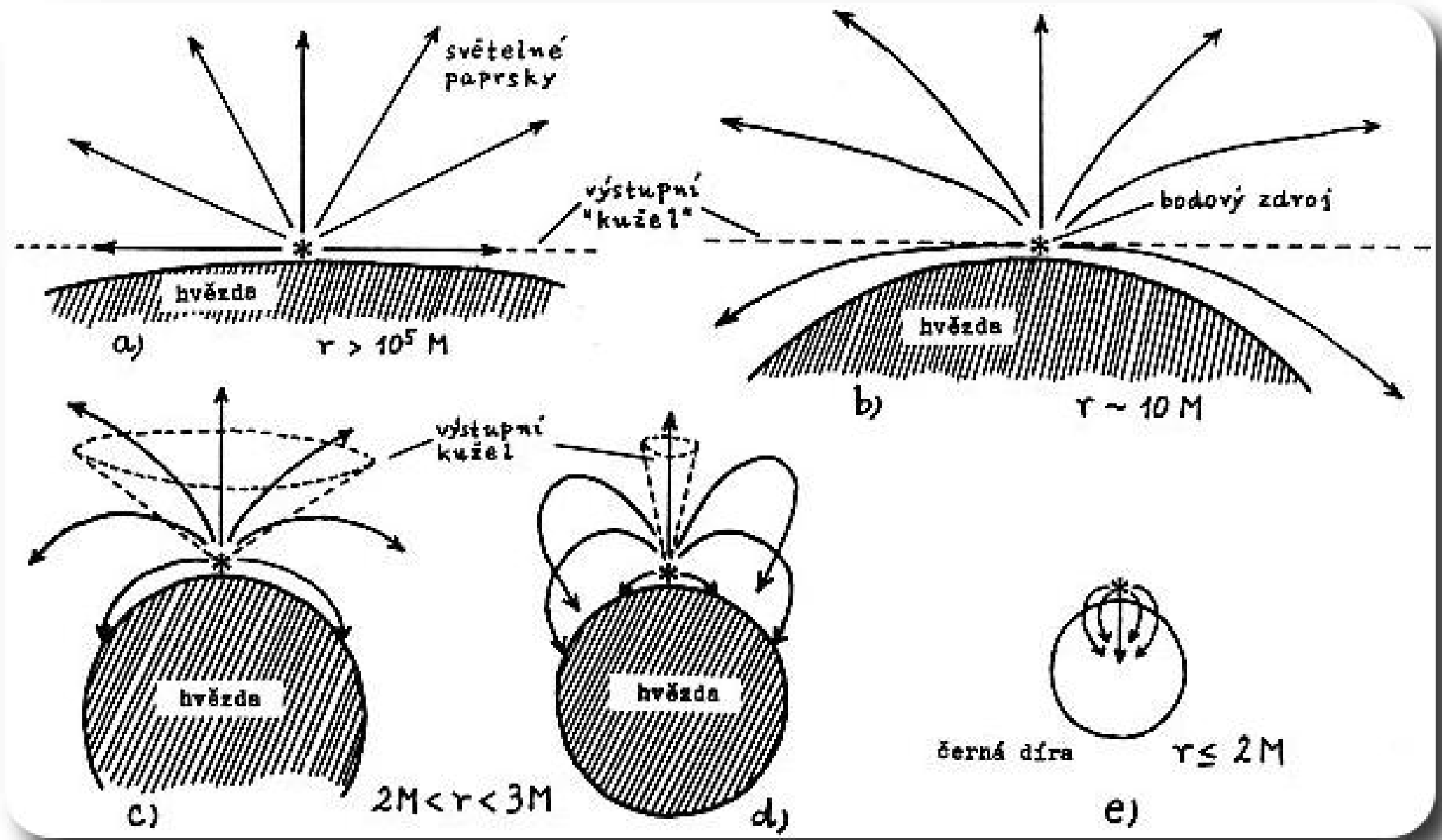
three pairs australia tahiti eclipse plates measured by campbell trumpler sixty two to eighty four stars each five of six measurements completely calculated give einstein deflection between one point fifty nine and one point eighty six seconds arc mean value one point seventy four seconds = campbell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

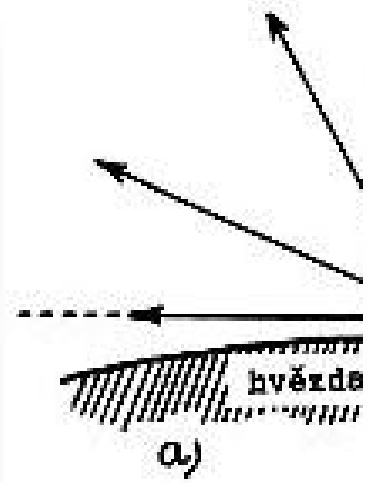
1,28

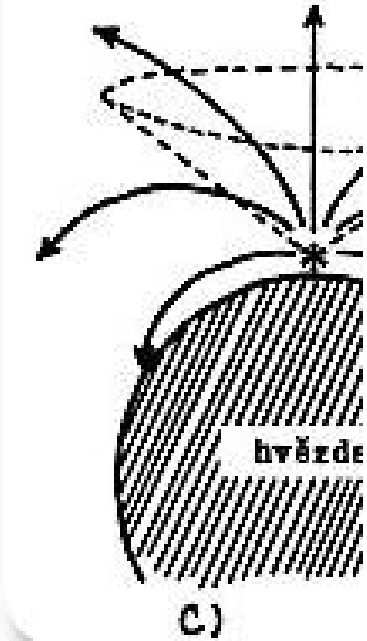


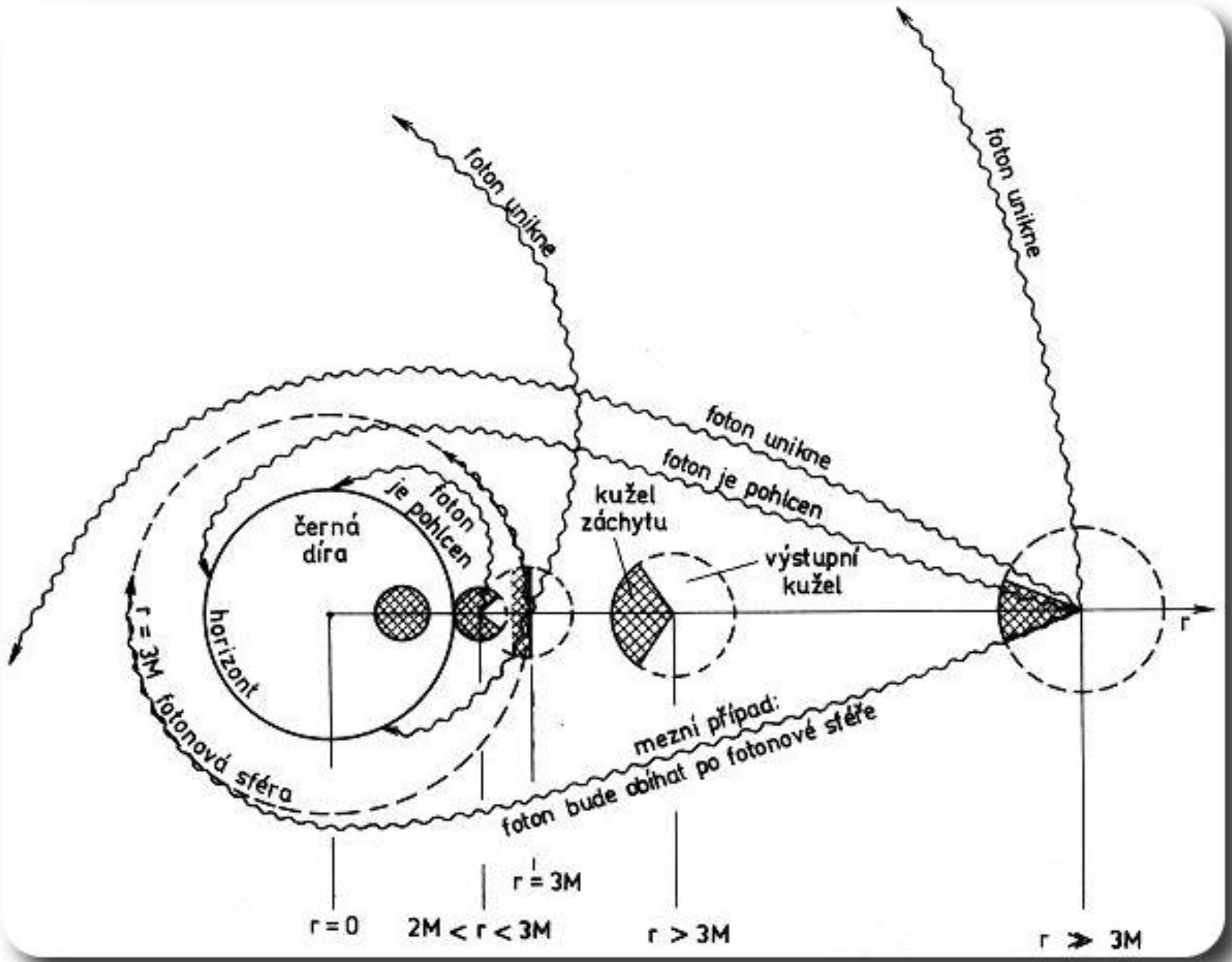
loha



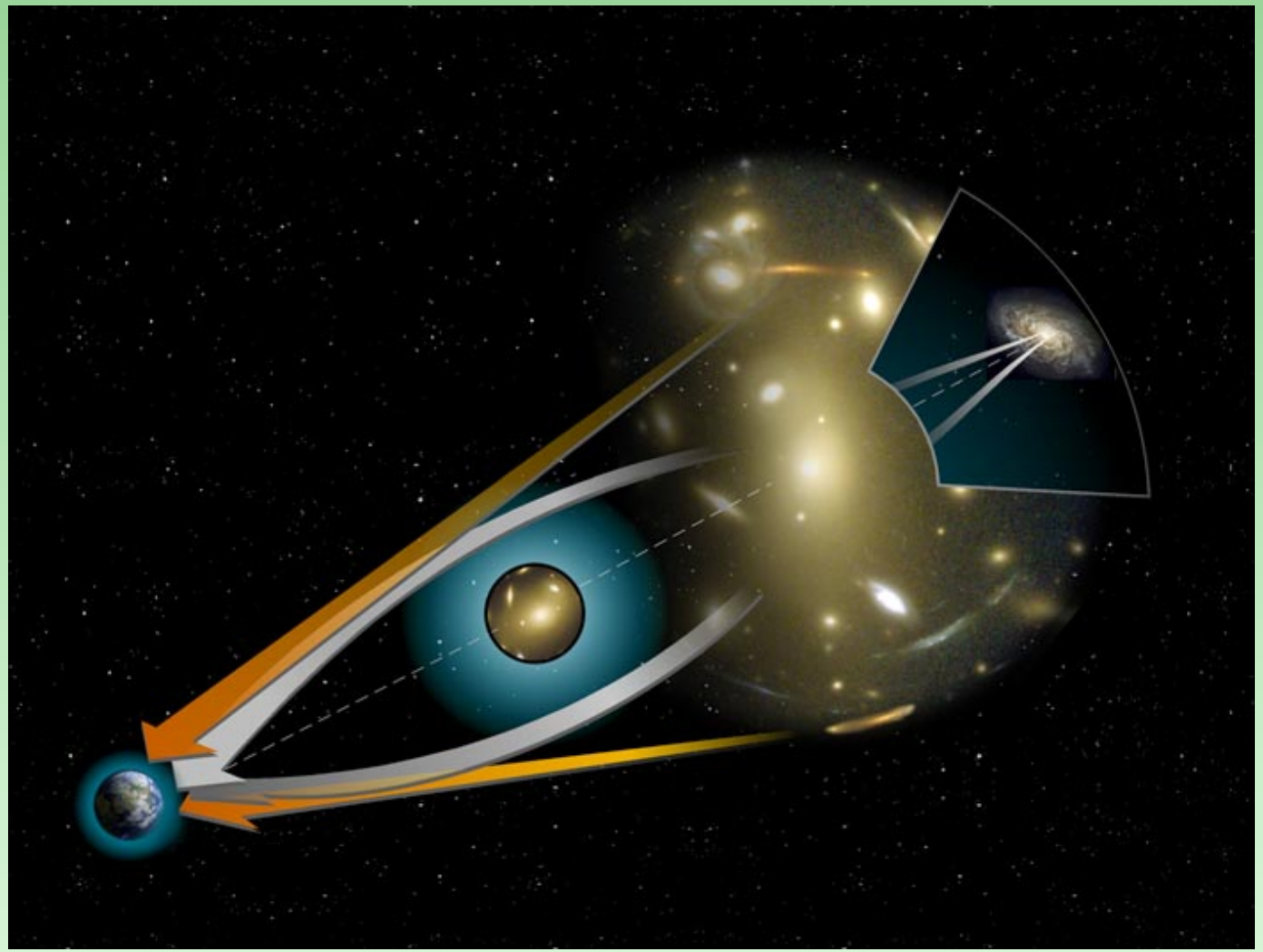

světelné
paprsky
výstupní
"kužel"
hvězda
a)
r > 10^5 M
bodový zdroj
hvězda
b)
r ~ 10 M
výstupní
kužel
hvězda
c)
2M < r < 3M
hvězda
d)
černá díra
r ≤ 2M
e)

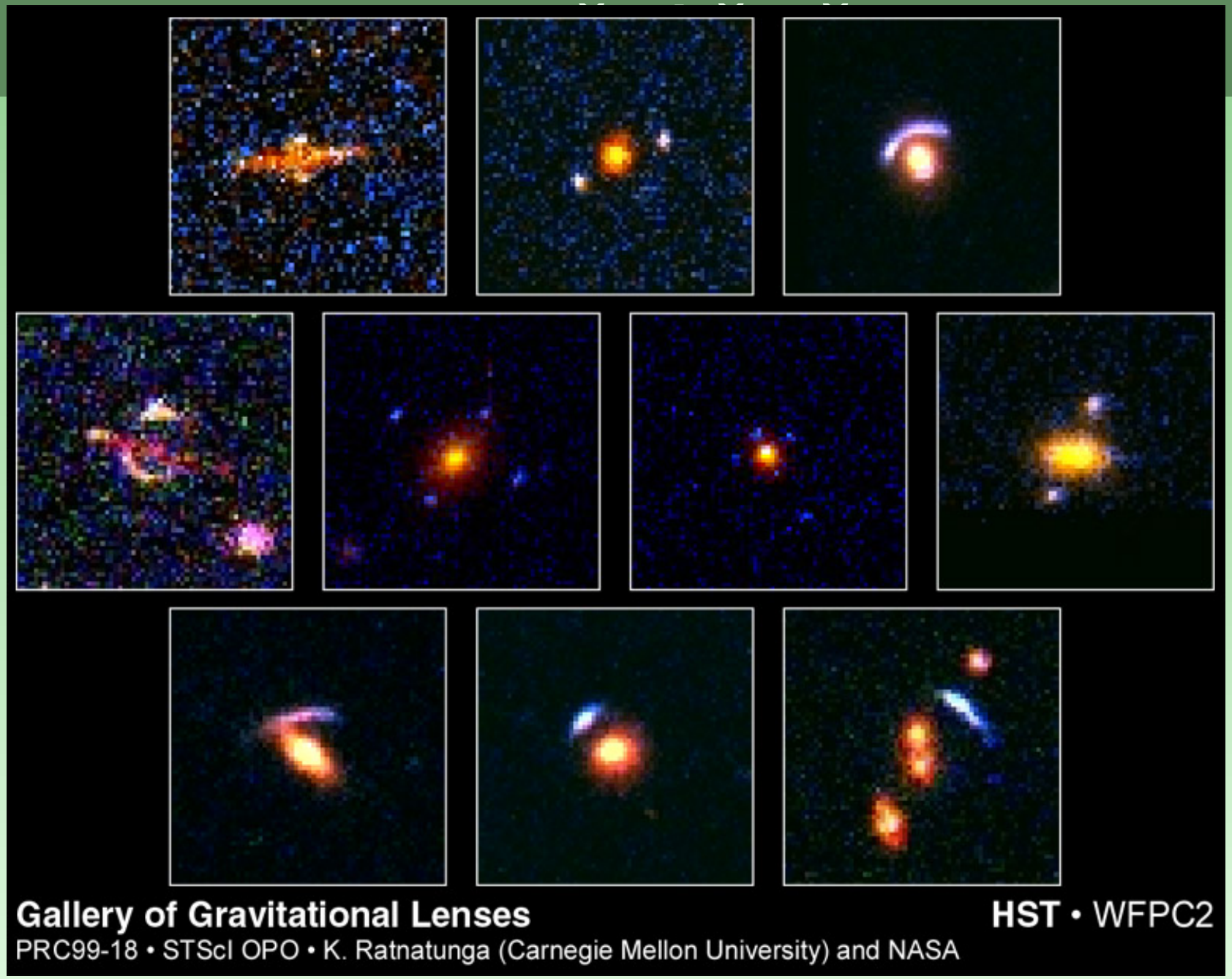

hvězda
a)


hvězda
c)


foton unikne
foton unikne
foton unikne
foton je pohlcen
foton je pohlcen
černá díra
kužel záchytu
výstupní kužel
horizont
r = 3M fotonová sféra
mezní případ:
foton bude obíhat po fotonové sféře
r
r = 0
2M < r < 3M
r = 3M
r > 3M
r ≫ 3M

GRAVITAČNÍ ČOČKY



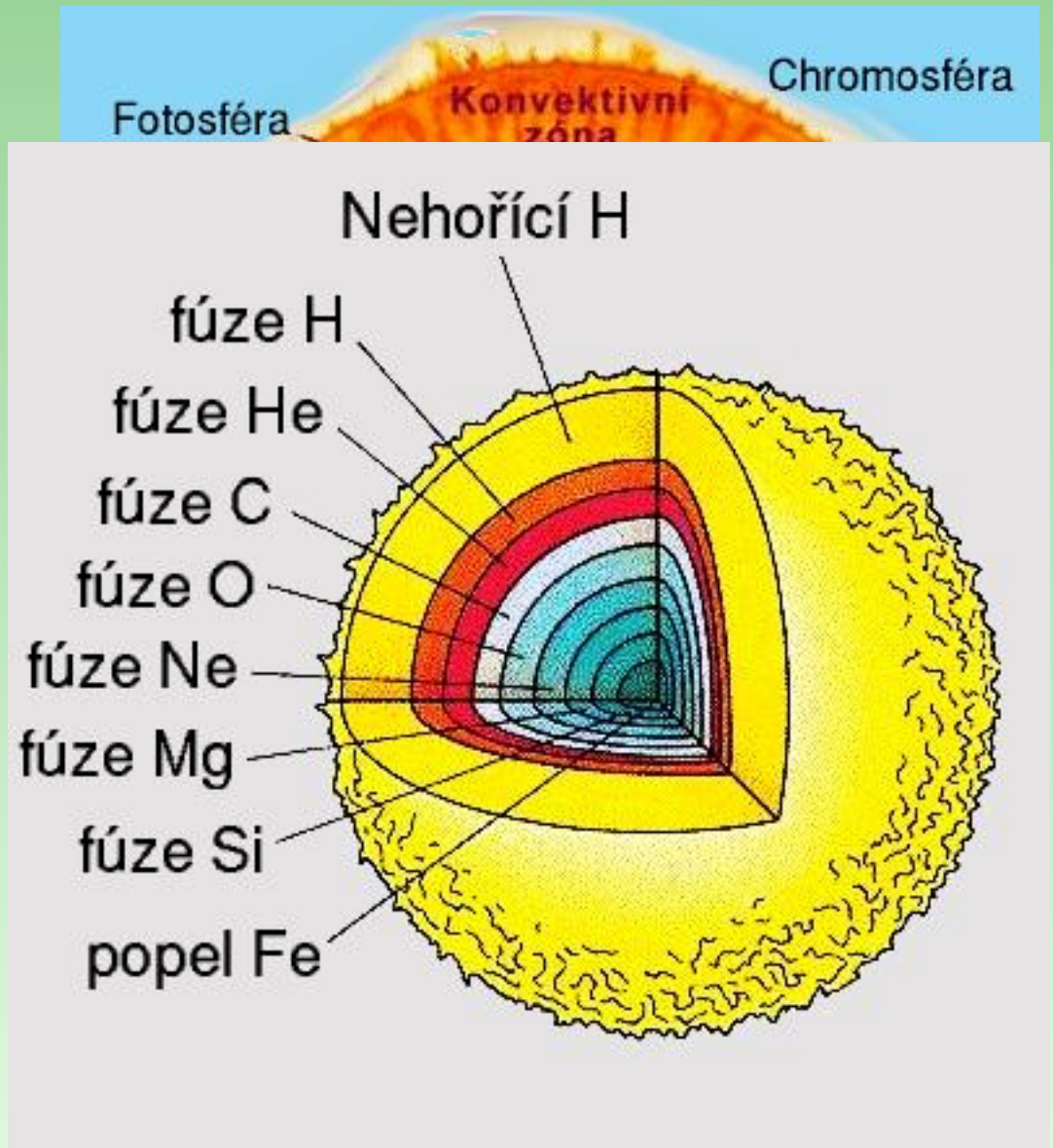

Gallery of Gravitational Lenses
HST • WFPC2
PRC99-18 • STScI OPO • K. Ratnatunga (Carnegie Mellon University) and NASA

ŽIVOT HVĚZD

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

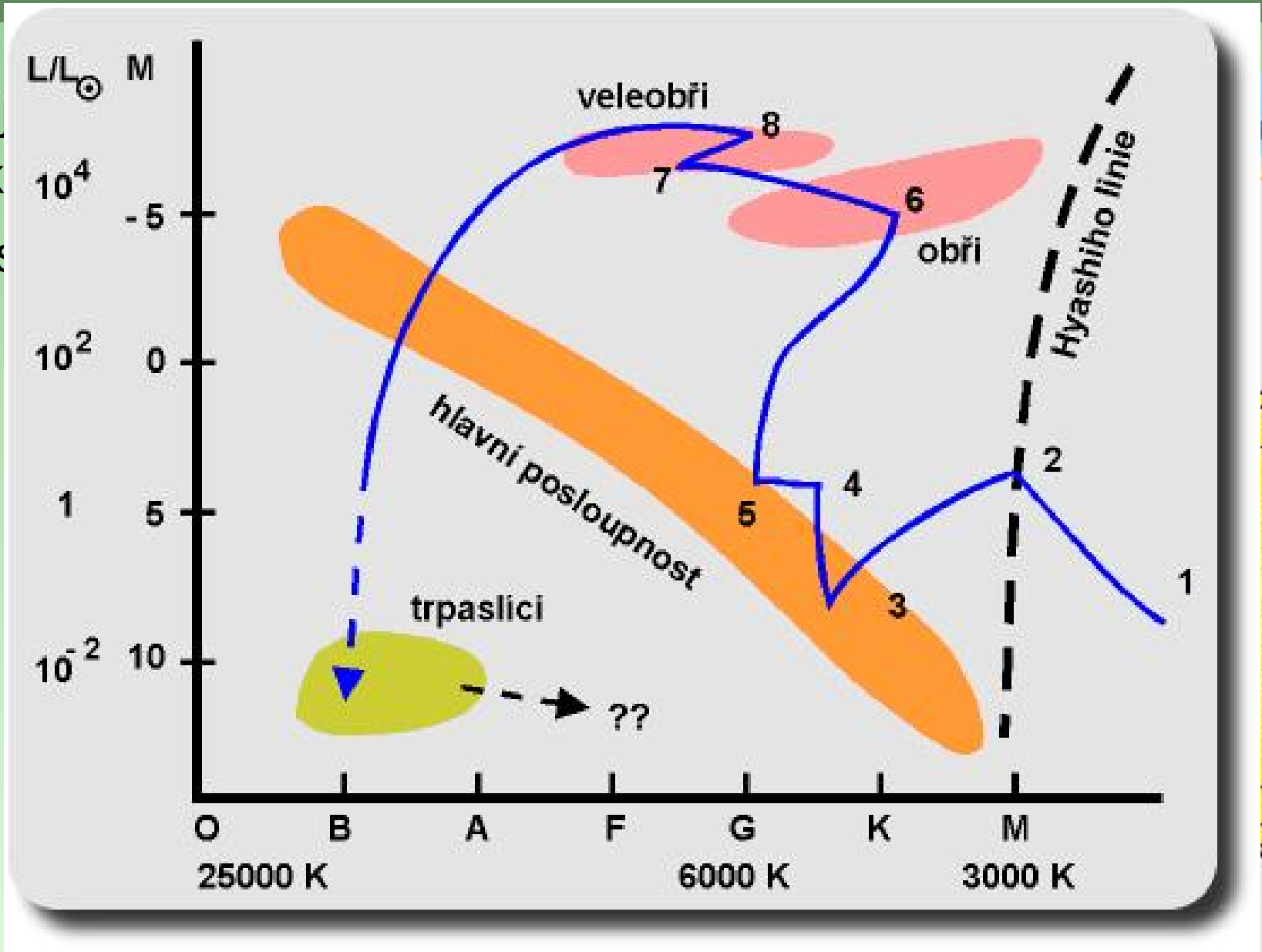
ŽIVOT HVĚZD

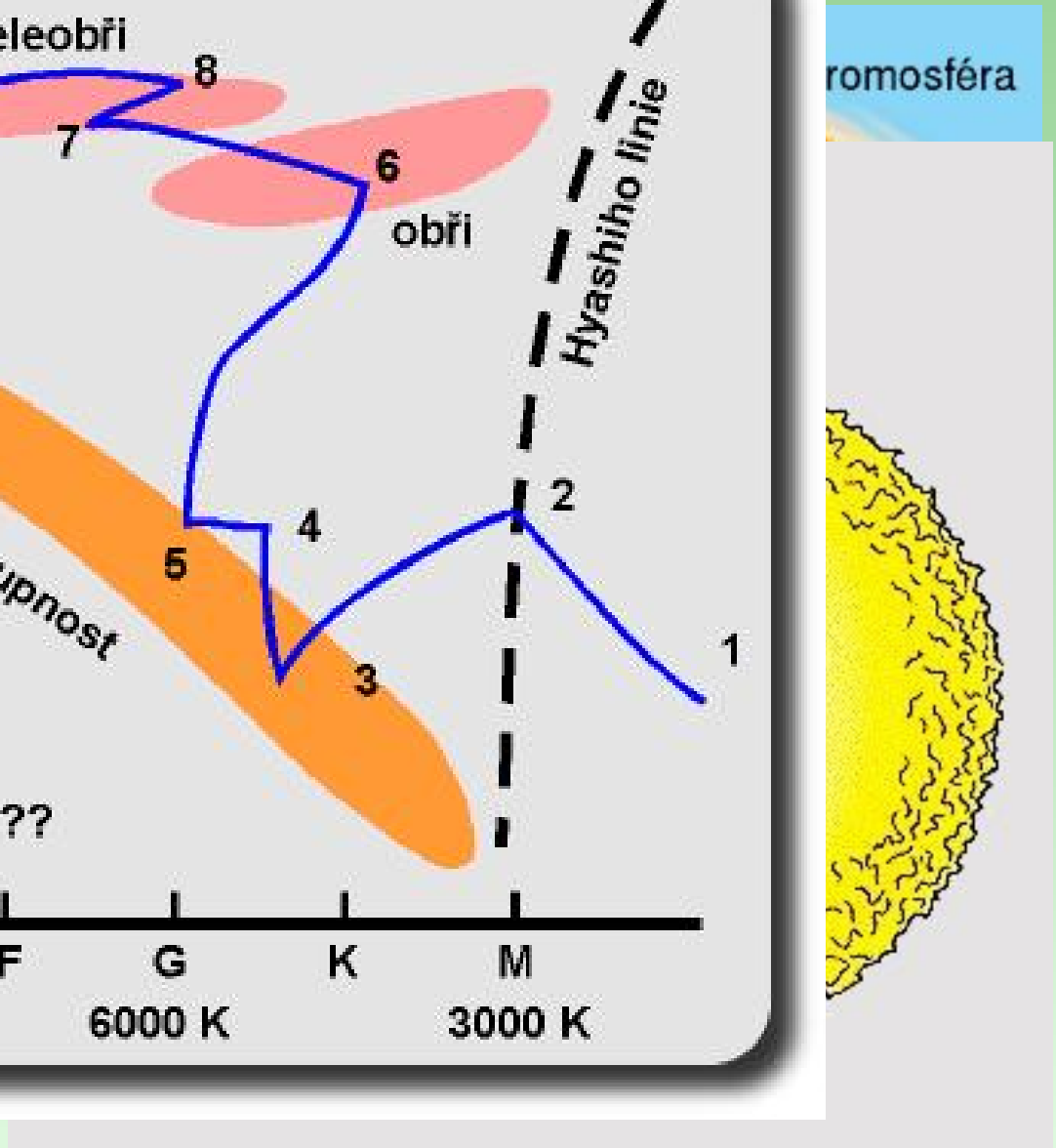
- zdroj energie: termonukleární reakce
- Hans Bethe (1938): p-p cyklus, C-N cyklus, NC 1967



ŽIVOT HVĚZD

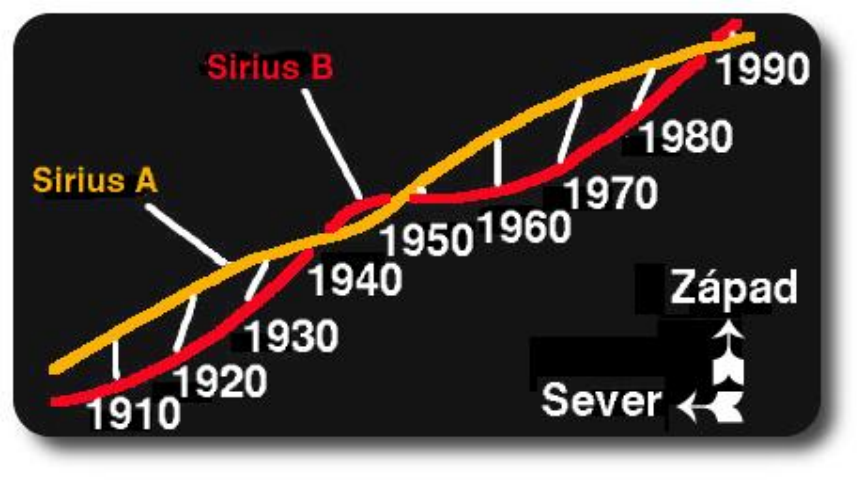
- zdro
  reak
- Hans
  C-N

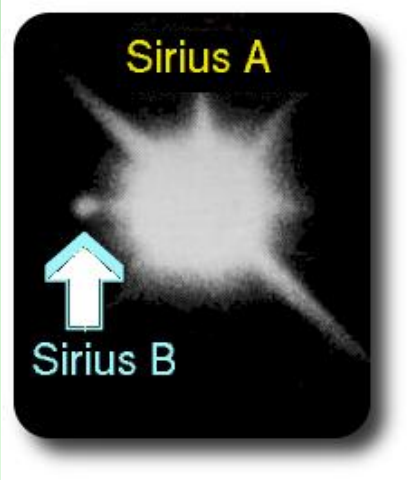




BÍLÍ TRPASLÍCI

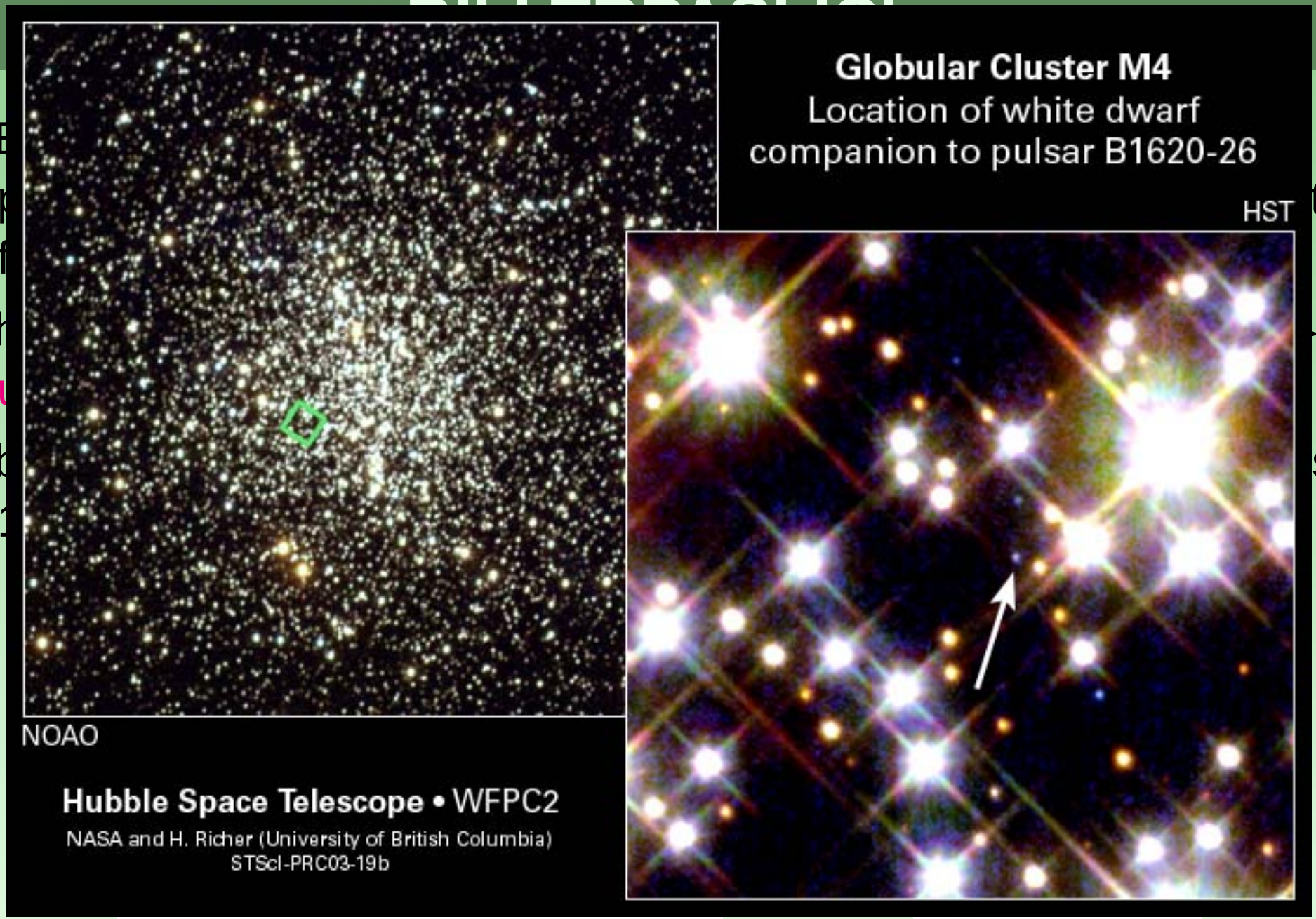
- Einstein 1939: „Základním výsledkem tohoto výzkumu je jasné pochopení proč Schwarzschildovy singularity nemohou existovat ve fyzikální realitě...“
- hvězda konstantní hustoty: při $r = 1{,}125\, r_{\mathrm{g}}$ nekonečný tlak $\Longleftrightarrow$ za určitých podmínek gravitace překoná všechny ostatní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





BÍLÁ TRASLÍCE

- B
  k t ve
  f
- h za
  u
- b ssel
  1

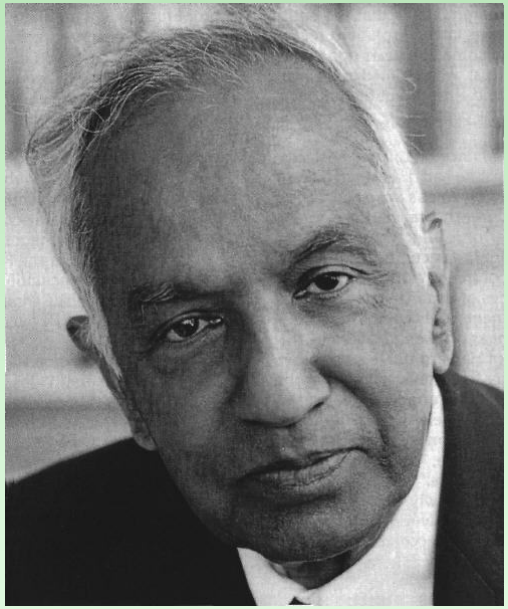


CHANDRASEKHAROVA MEZ

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

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!“

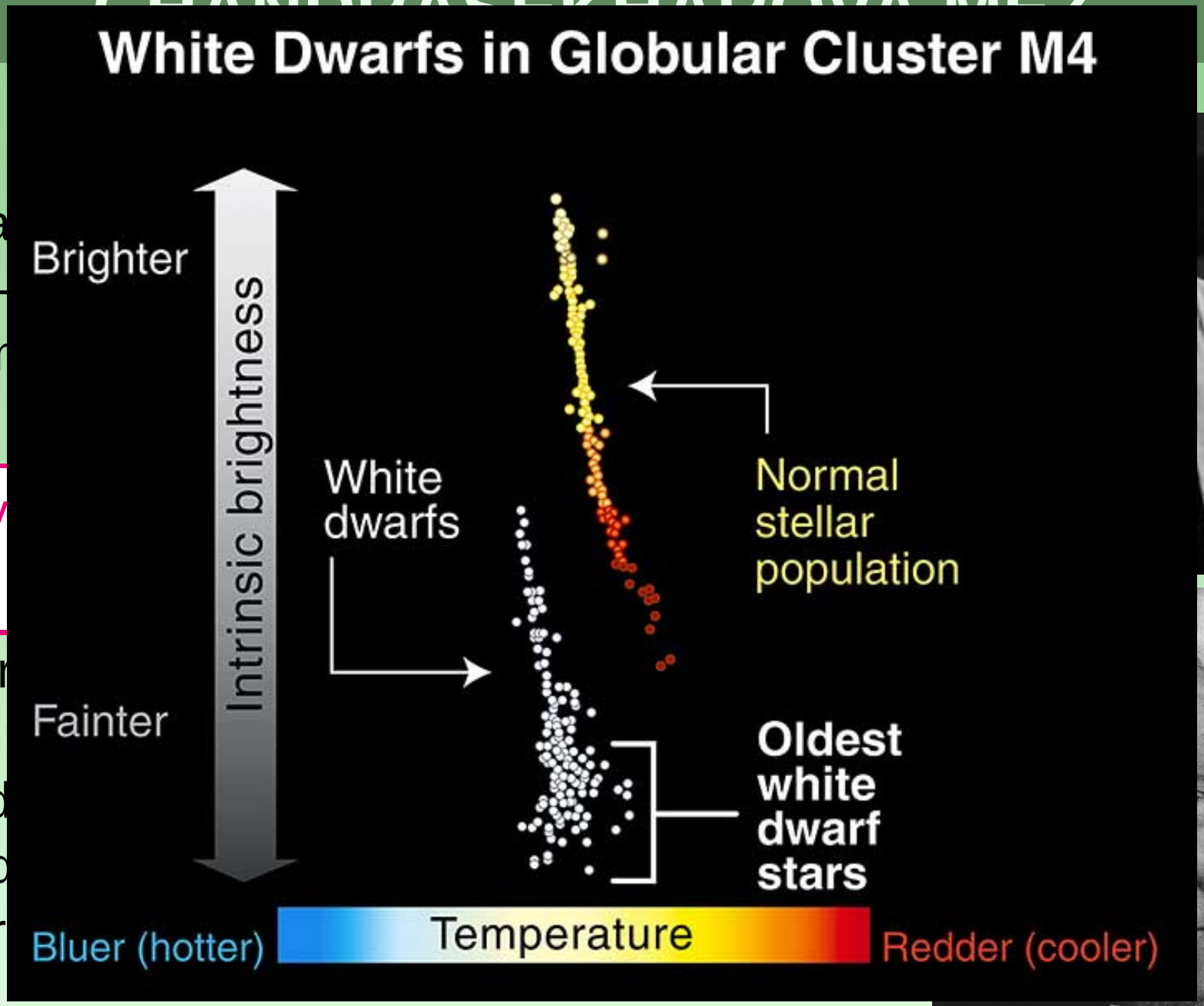


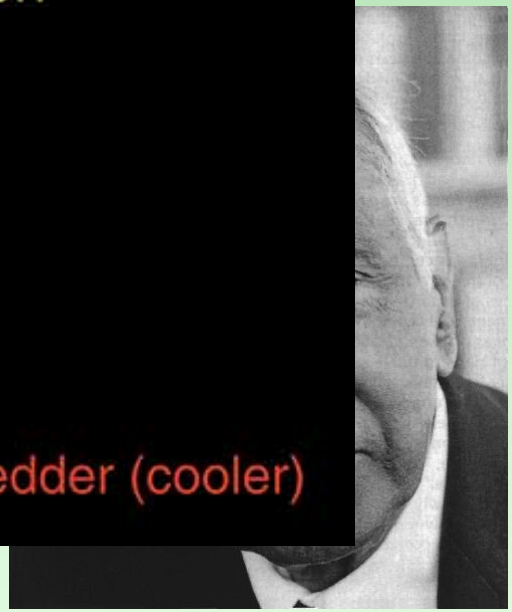
CHANDRASEKHAROVA MEZ

- Subra
  1930–
  deger
  1983

  bílý

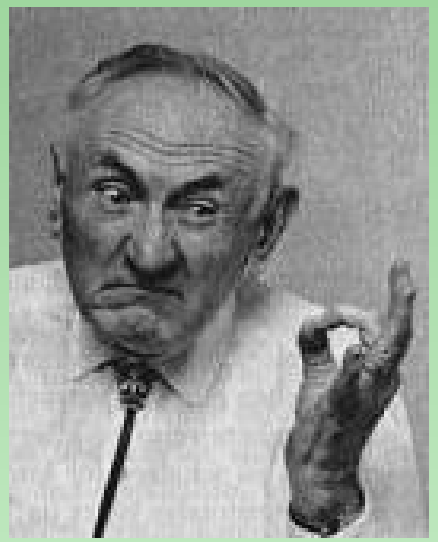
- Arthur
  „Dom
  přírod
  hvězd
  absur



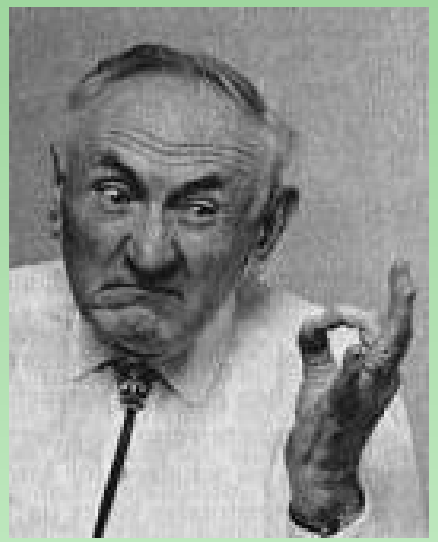


NEUTRONOVÉ HVĚZDY

- James Chadwick (1932): experimentální objev neutronu
- Fritz Zwicky, 30-tá léta: představa neutronové hvězdy, poloměr okolo $10\,\mathrm{km}$, hustota $10^{13} - 10^{15}\,\mathrm{g{\cdot}cm^3}$, centrální teplota $10^9\,\mathrm{K}$
- 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 $0{,}0016 - 4\,\mathrm{s}$, NC 1974 s Martinem Ryleem
- Joseph Taylor a Russell Hulse (1974): binární pulsar PSR1913+16, perioda rotace $0{,}0059\,\mathrm{s}$, zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,



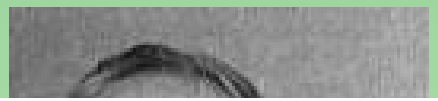
NEUTRONOVÉ HVĚZDY

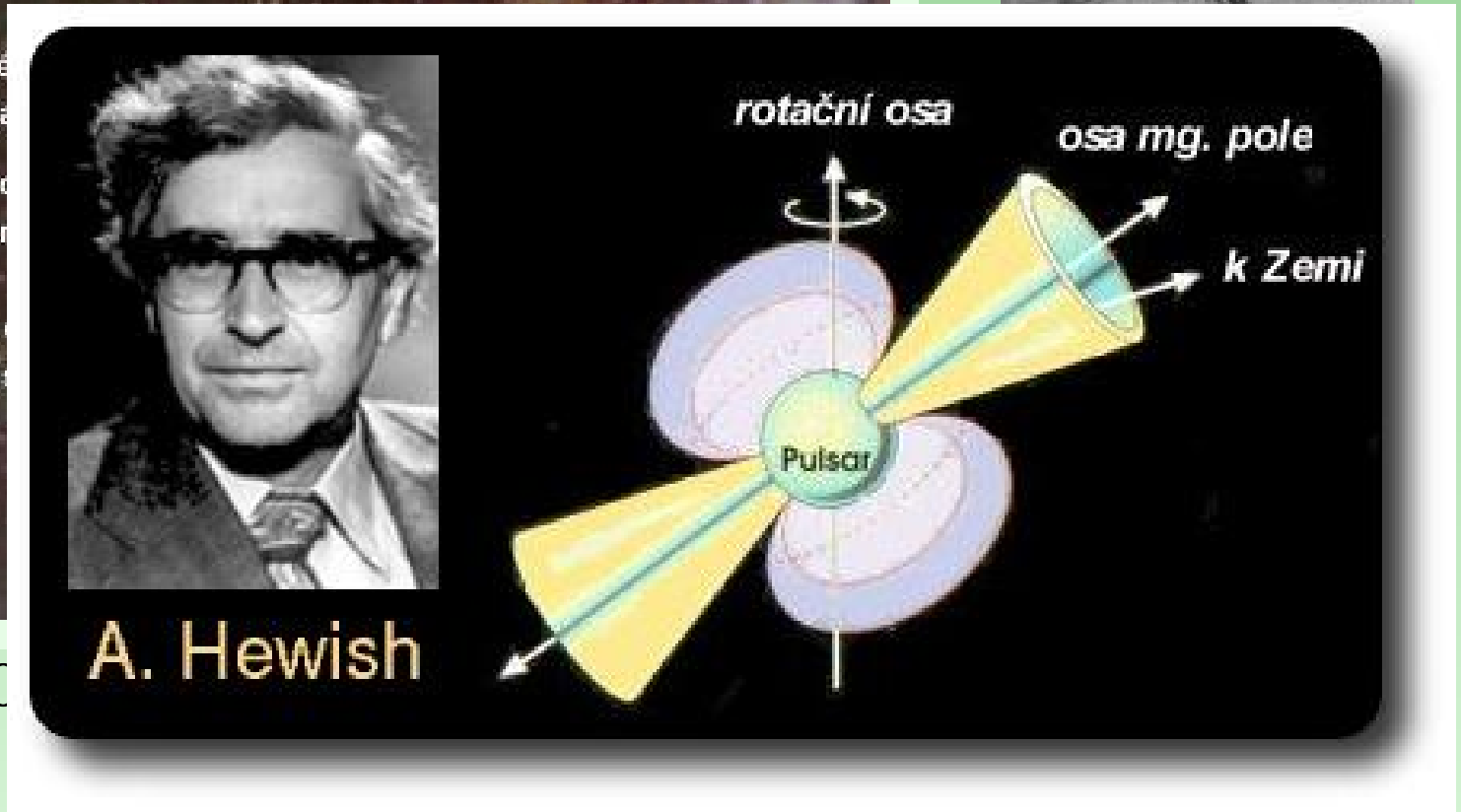


perioda rotace $0{,}0016 - 4\,\mathrm{s}$, NC 1974 s Martinem Ryleem

- Joseph Taylor a Russell Hulse (1974): binární pulsar PSR1913+16, perioda rotace $0{,}0059\,\mathrm{s}$, zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,

NEUTRONOVÉ HVĚZDY

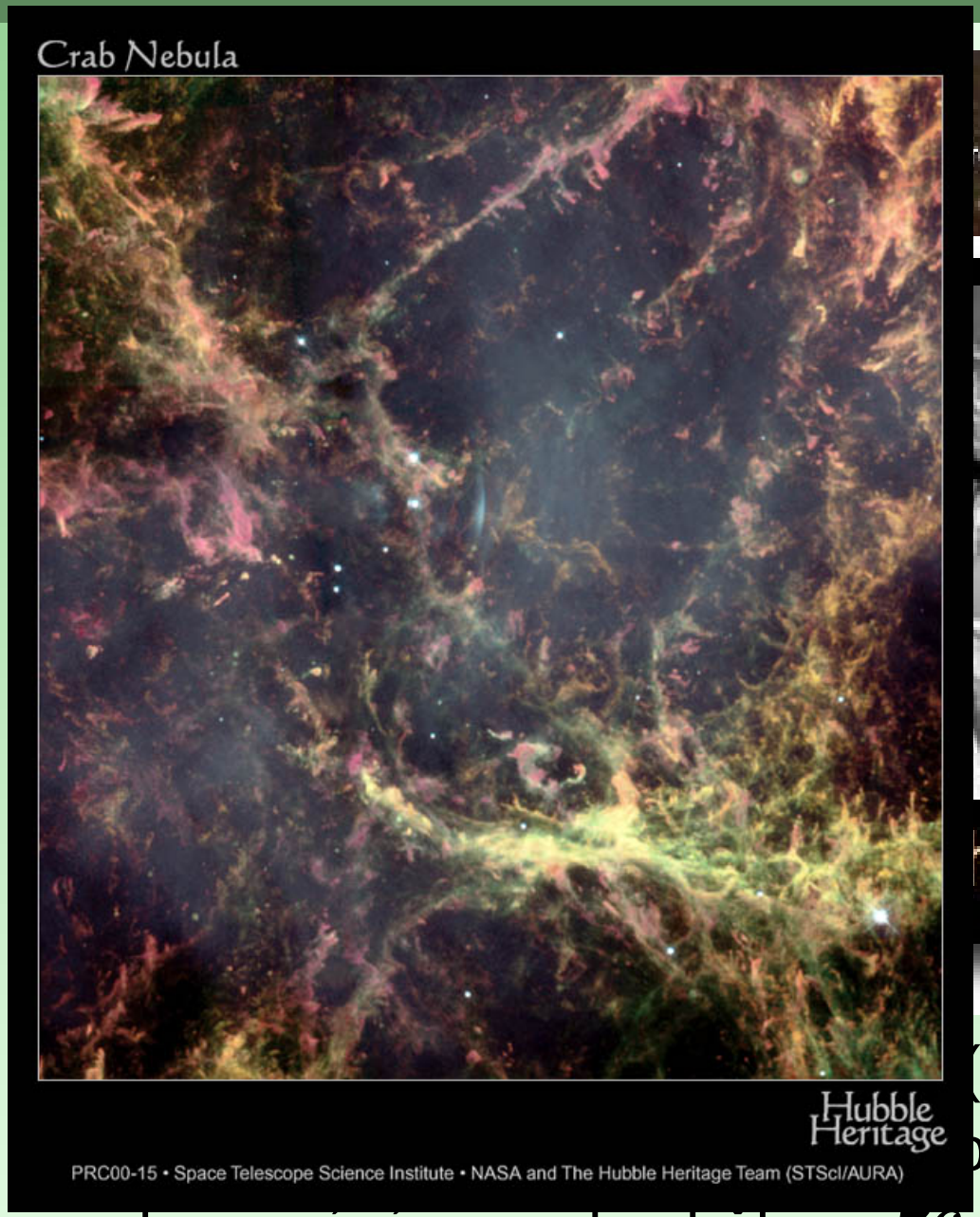


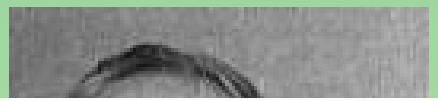


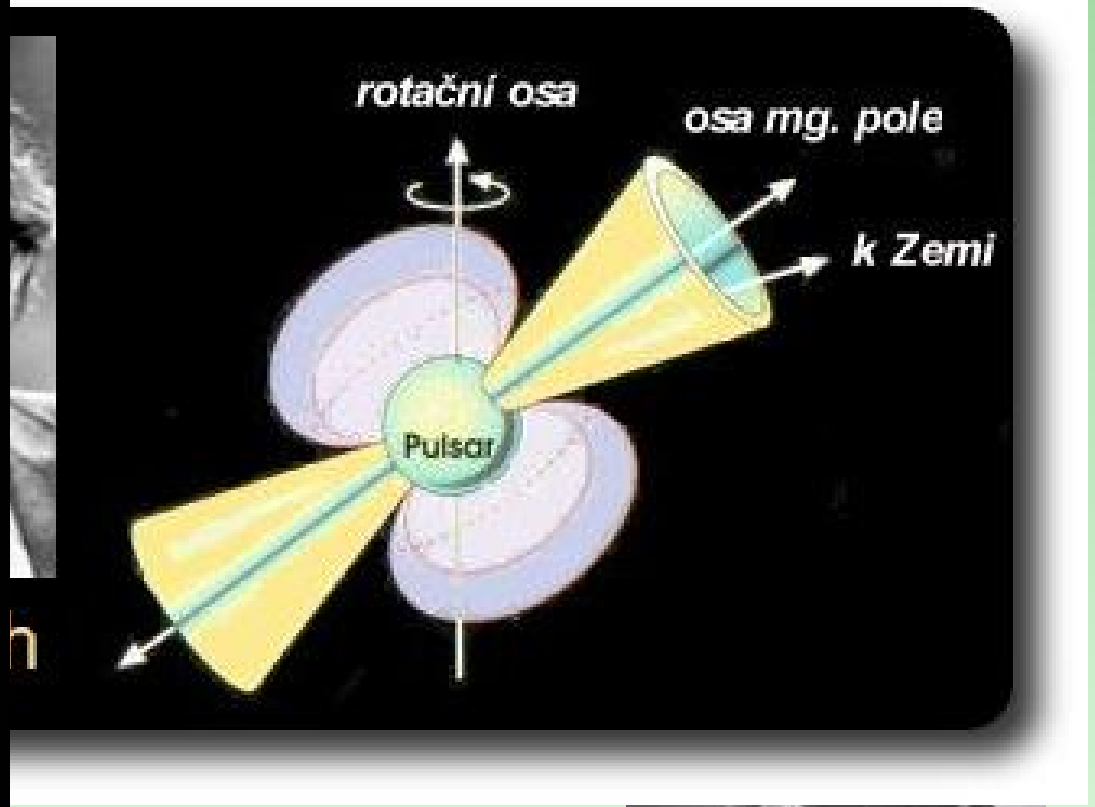
perioda rotace $0{,}0$
Ryleem

- Joseph Taylor a Russell Hulse (1974): binární pulsar PSR1913+16, perioda rotace $0{,}0059\,\mathrm{s}$, zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,

NEUTRONOVÉ HVĚZDY

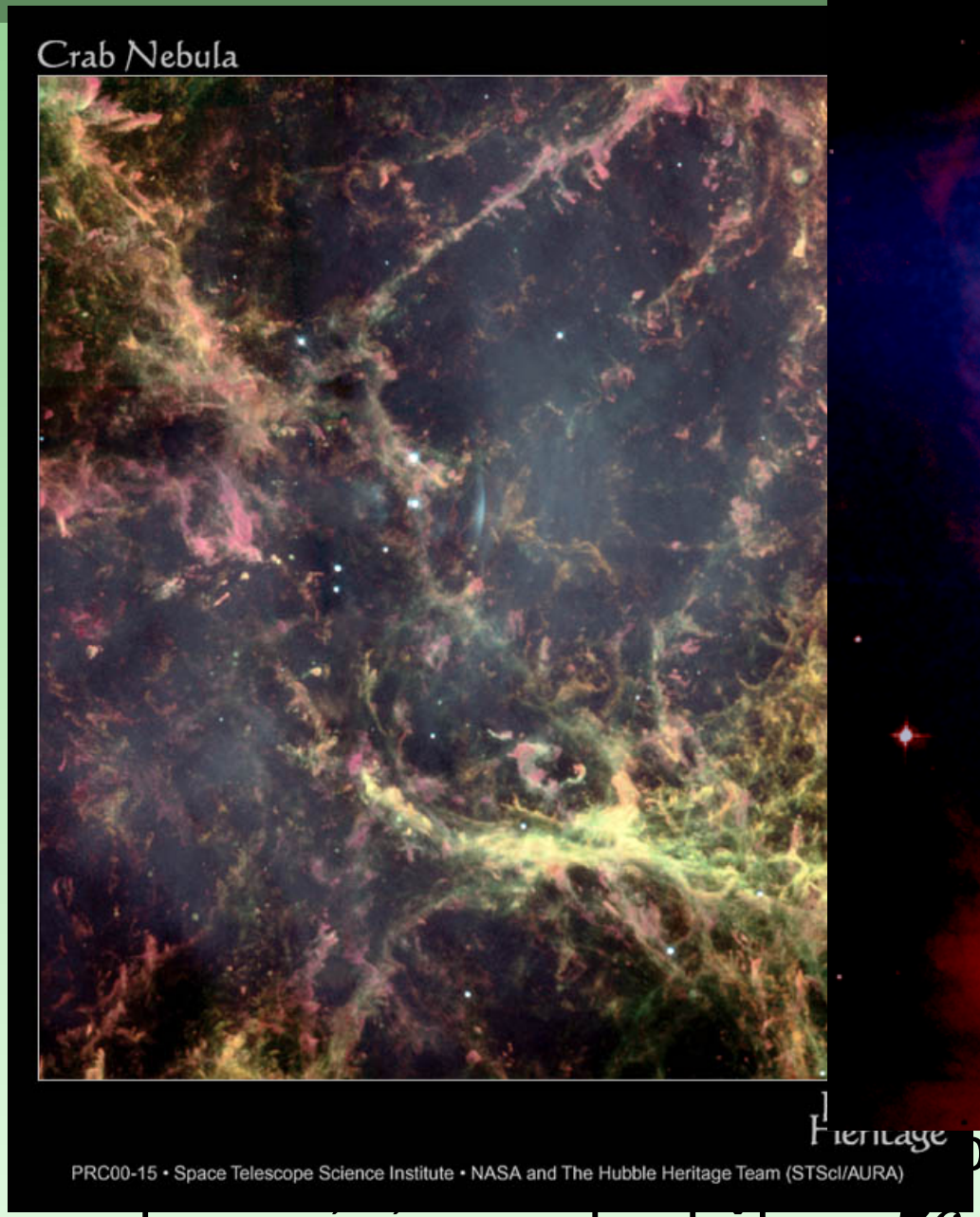


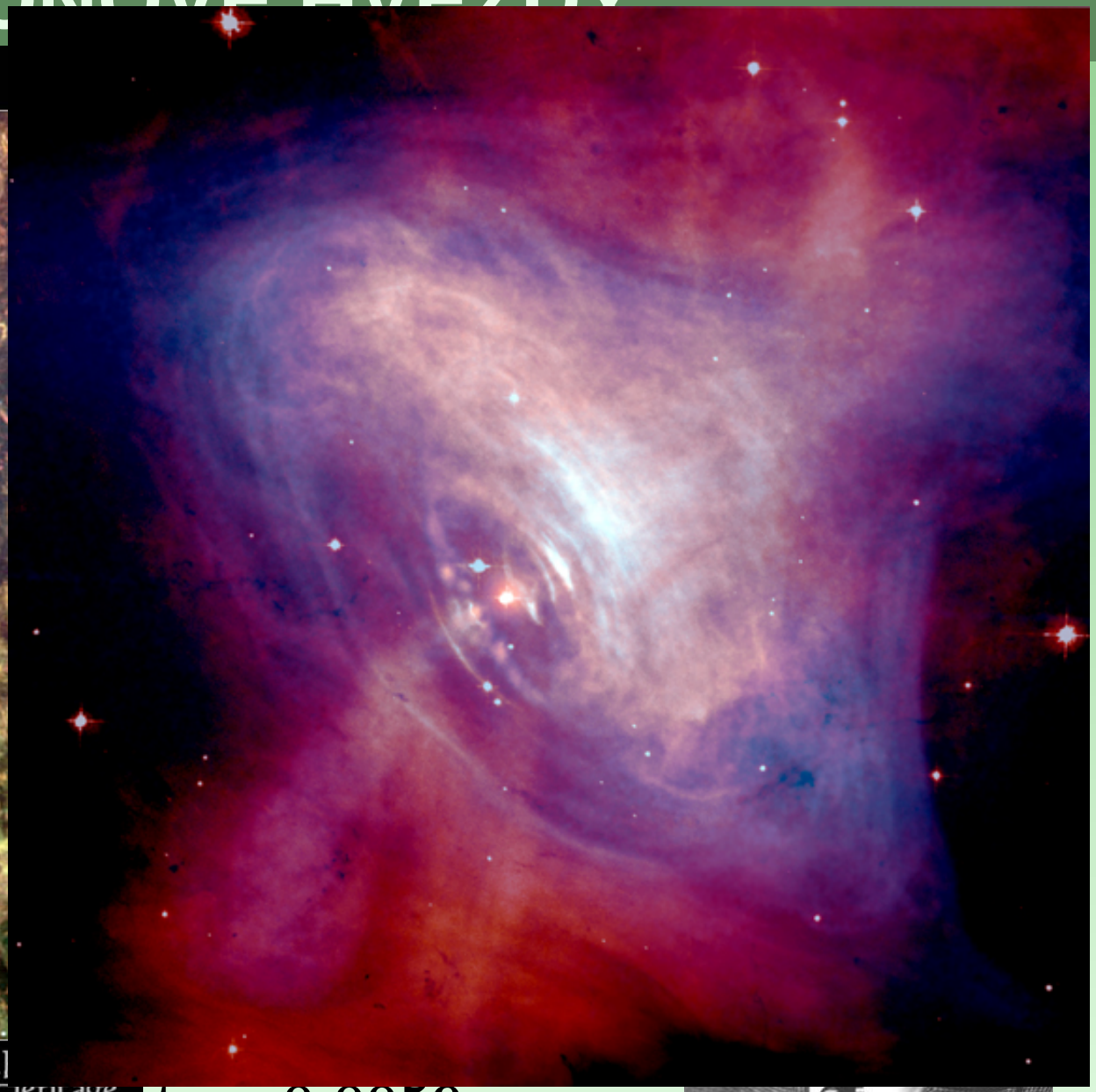




(1974): binární
otace $0{,}0059\,\mathrm{s}$,
zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,

NEUTRONOVÉ HVĚZDY

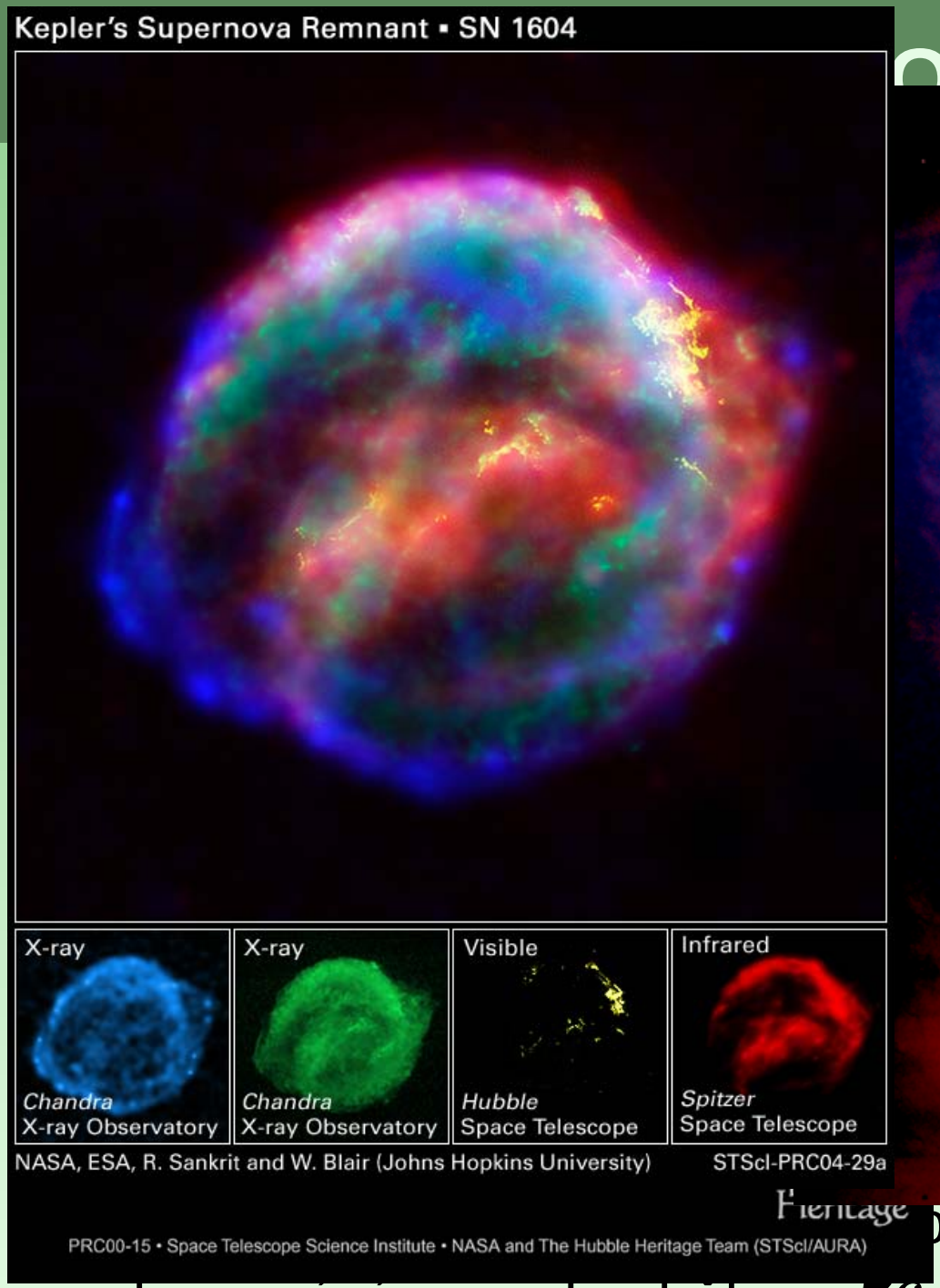




otace $0{,}0059\,\mathrm{s}$,

zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,

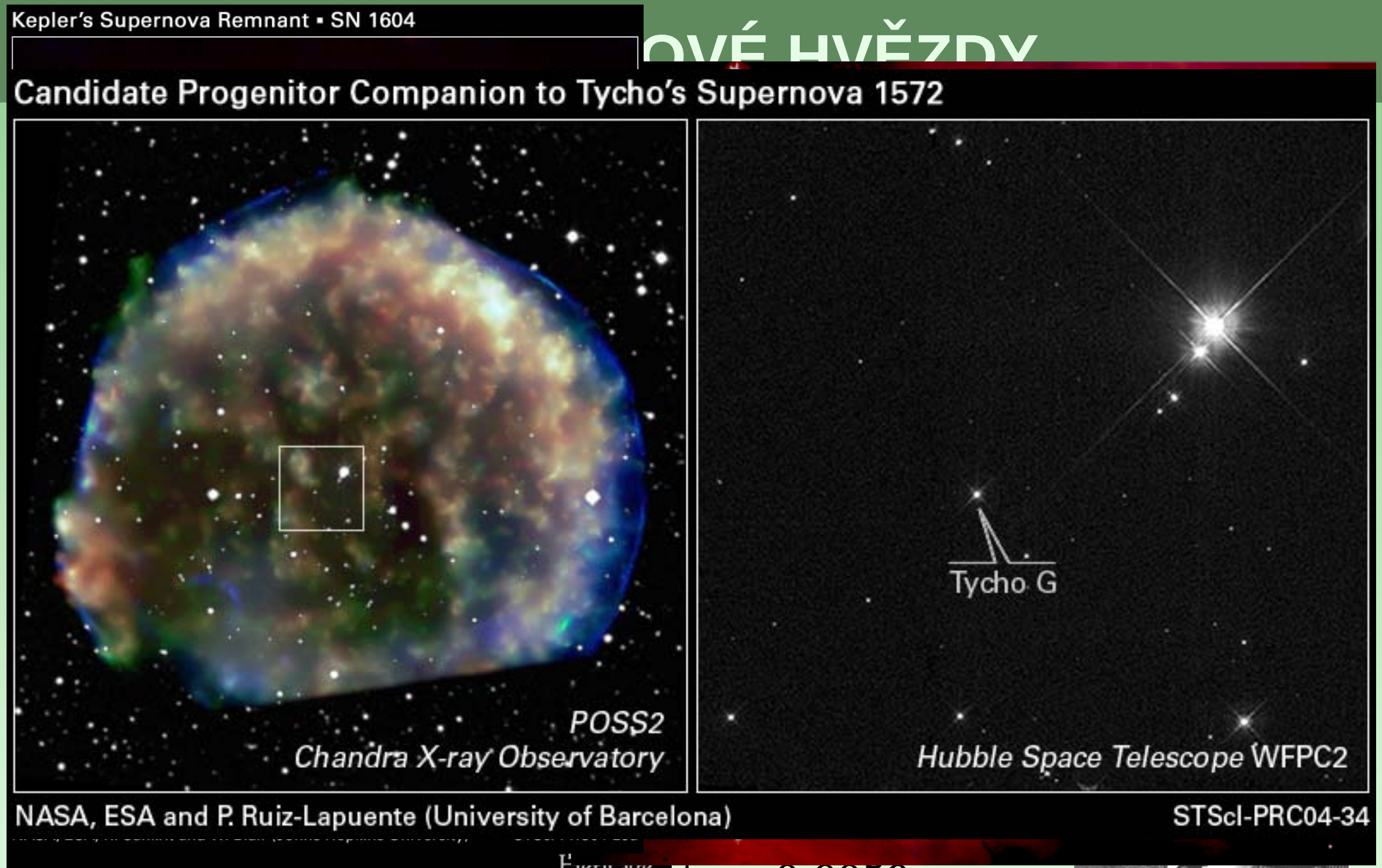
OVÉ HVĚZDY



otace $0{,}0059\,\mathrm{s}$,

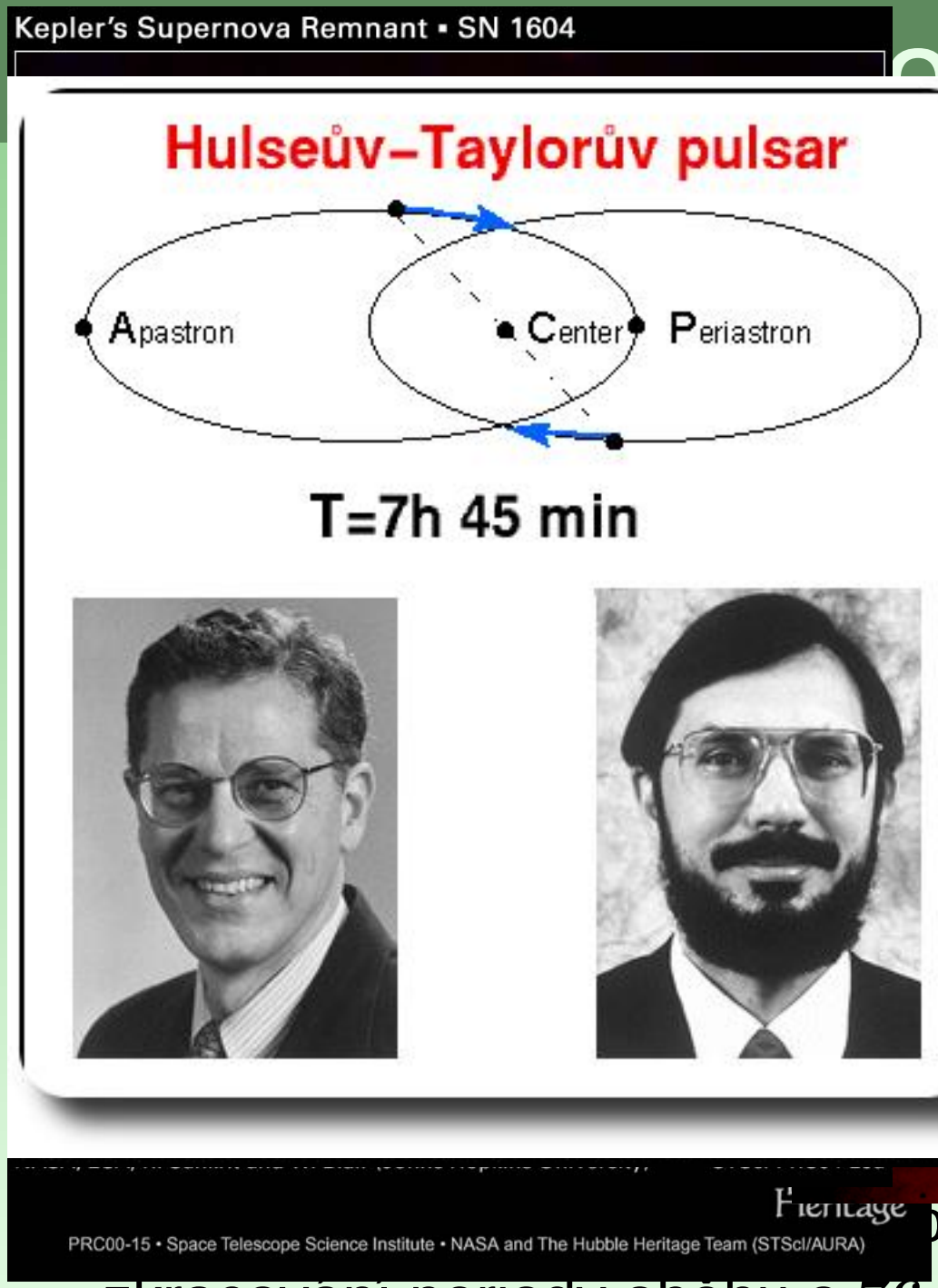
zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,

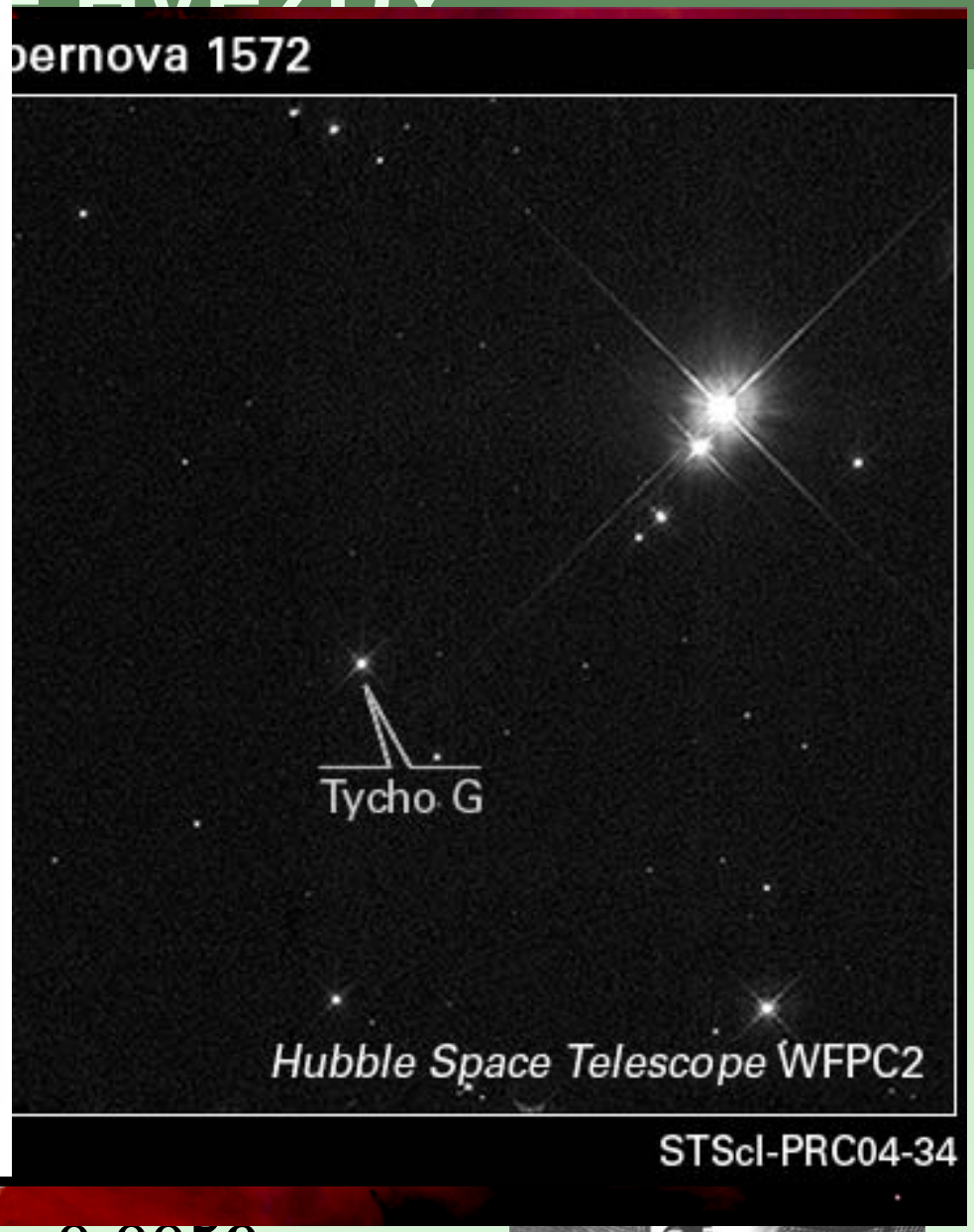
OVÉ HVĚZDY



otace $0{,}0059\,\mathrm{s}$,

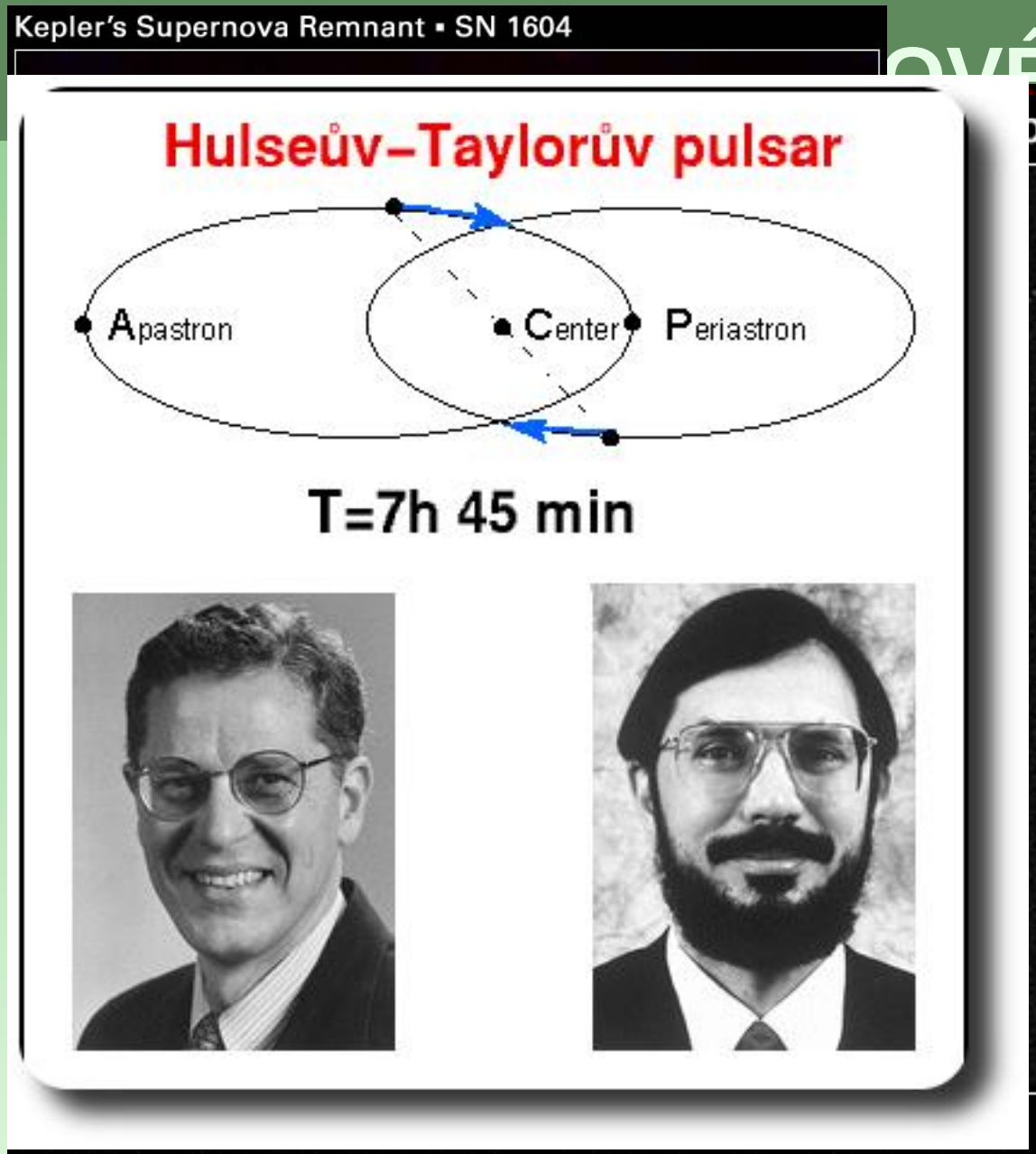
zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,

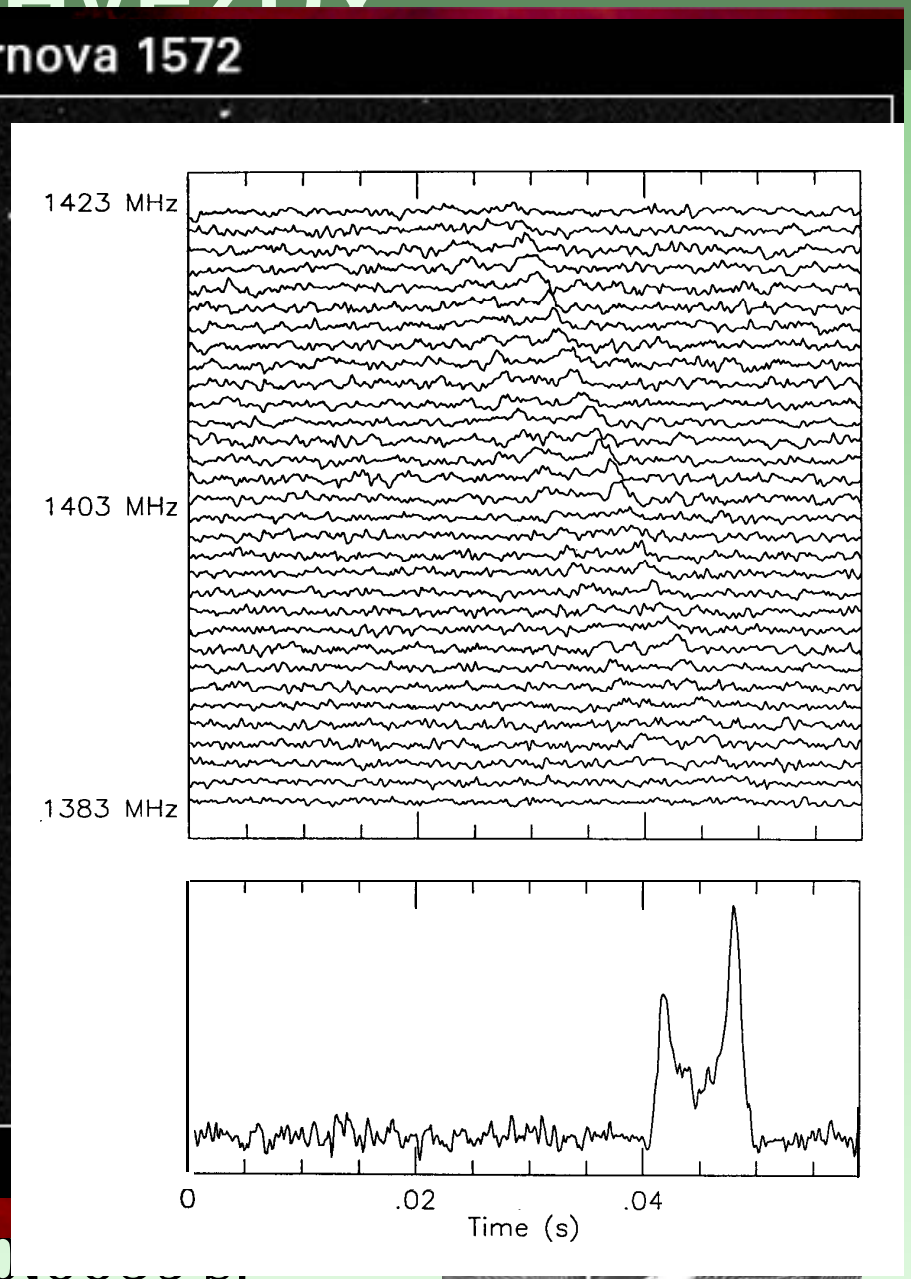




otace $0{,}0059\,\mathrm{s}$,

zkracování periody oběhu o $76{\cdot}10^{-6}\,\mathrm{s/rok}$,



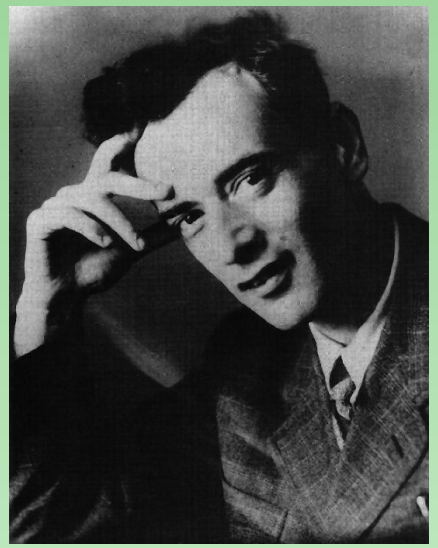


otace 0,

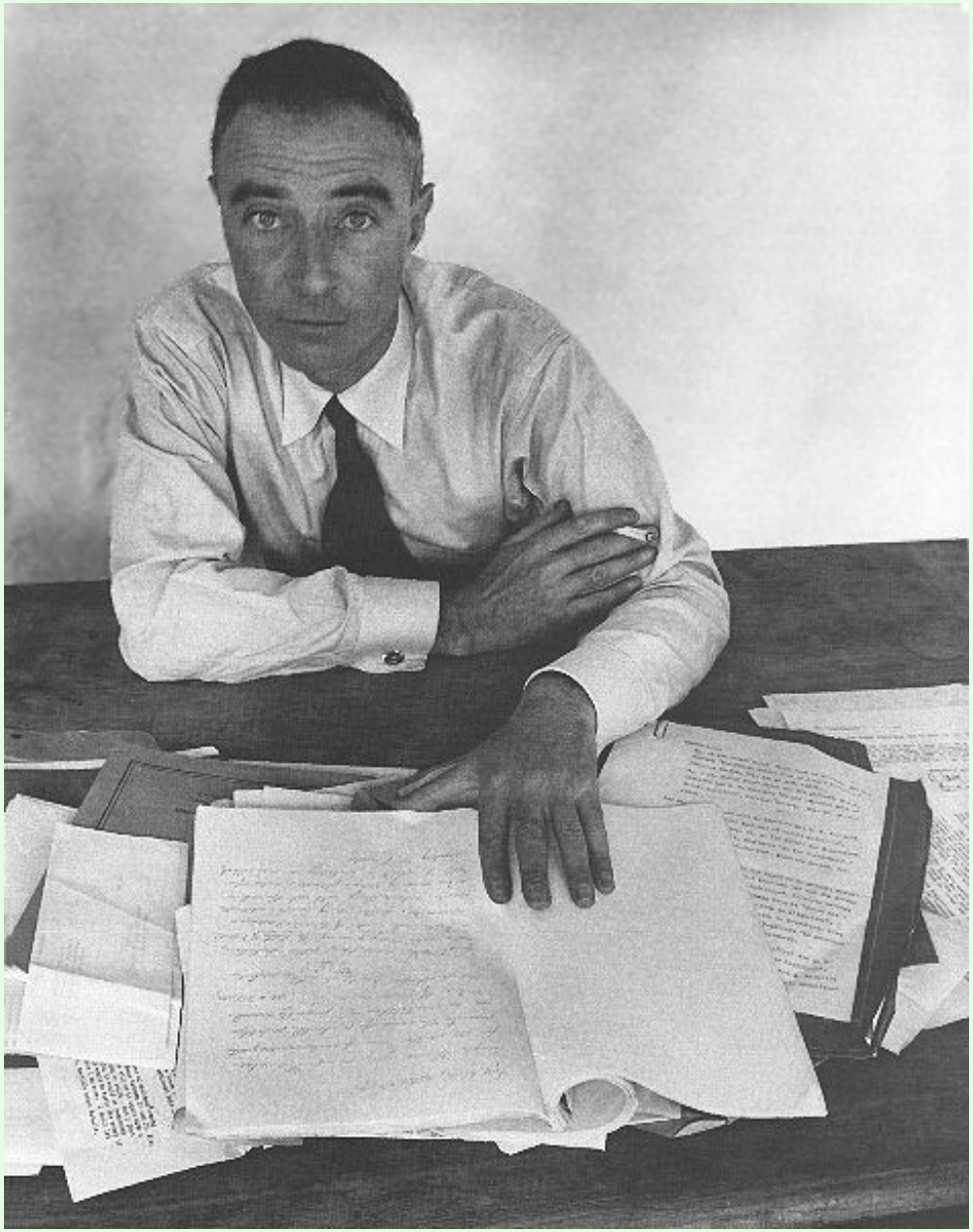
zkracování periody oběhu o $76 \cdot 10^{-6}$ s/rok,

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“ $\Longrightarrow$ černé díry
- Wolfgang Rindler (50-tá léta): horizont



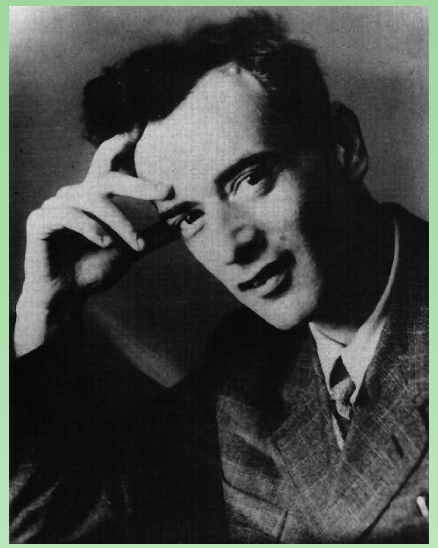
NEVYHNUTELNOST KOLAPSU



1938): hvězdy
utronová jádra,
NC 1962

olkoff: L.
e maximální
$M_\odot$, u známých
uduje kolaps;

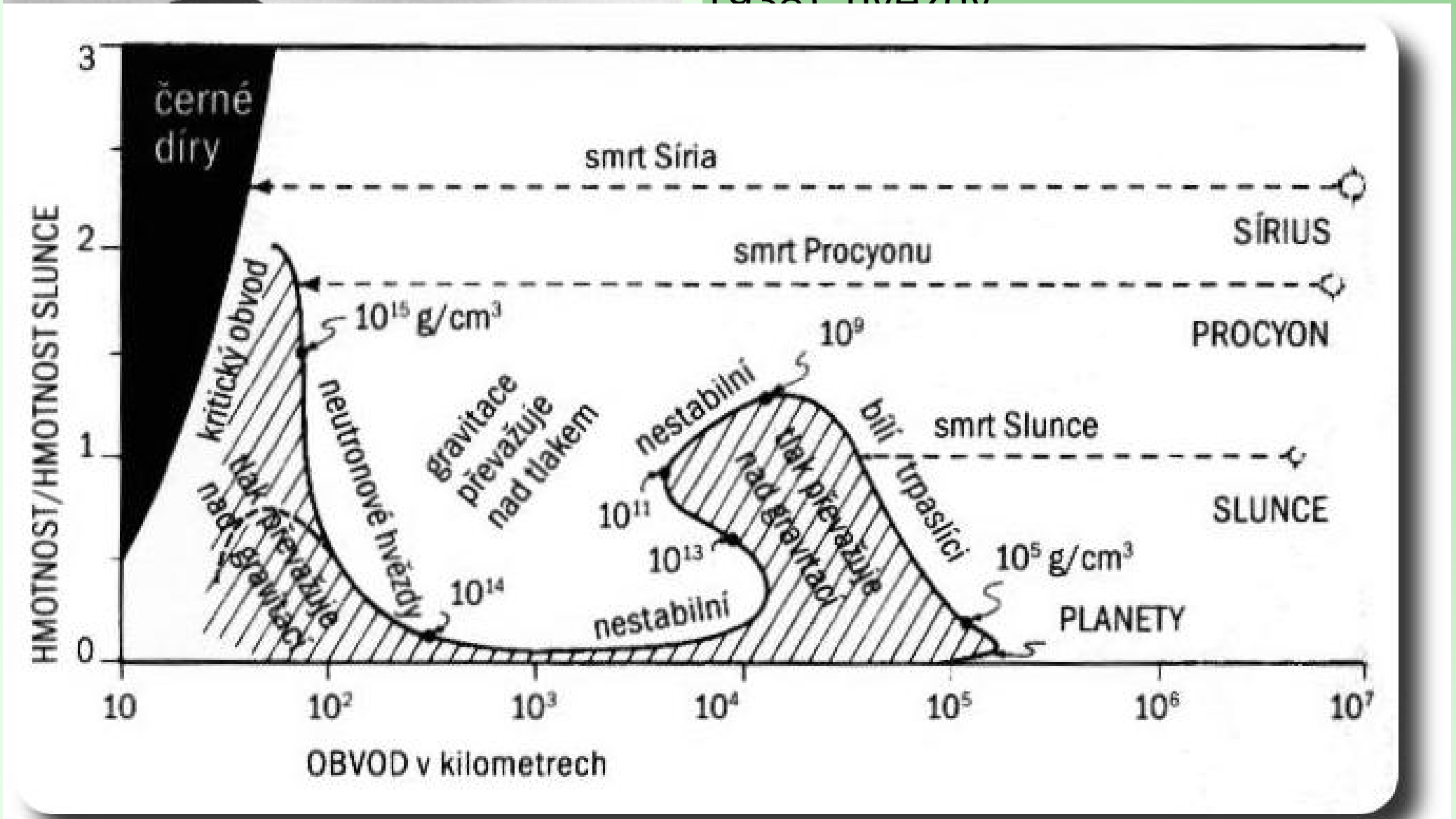
on, Wakano
d, studium kolapsu
í?
hvězdy“ $\Longrightarrow$ černé



- Wolfgang Rindler (60-tá léta): horizont

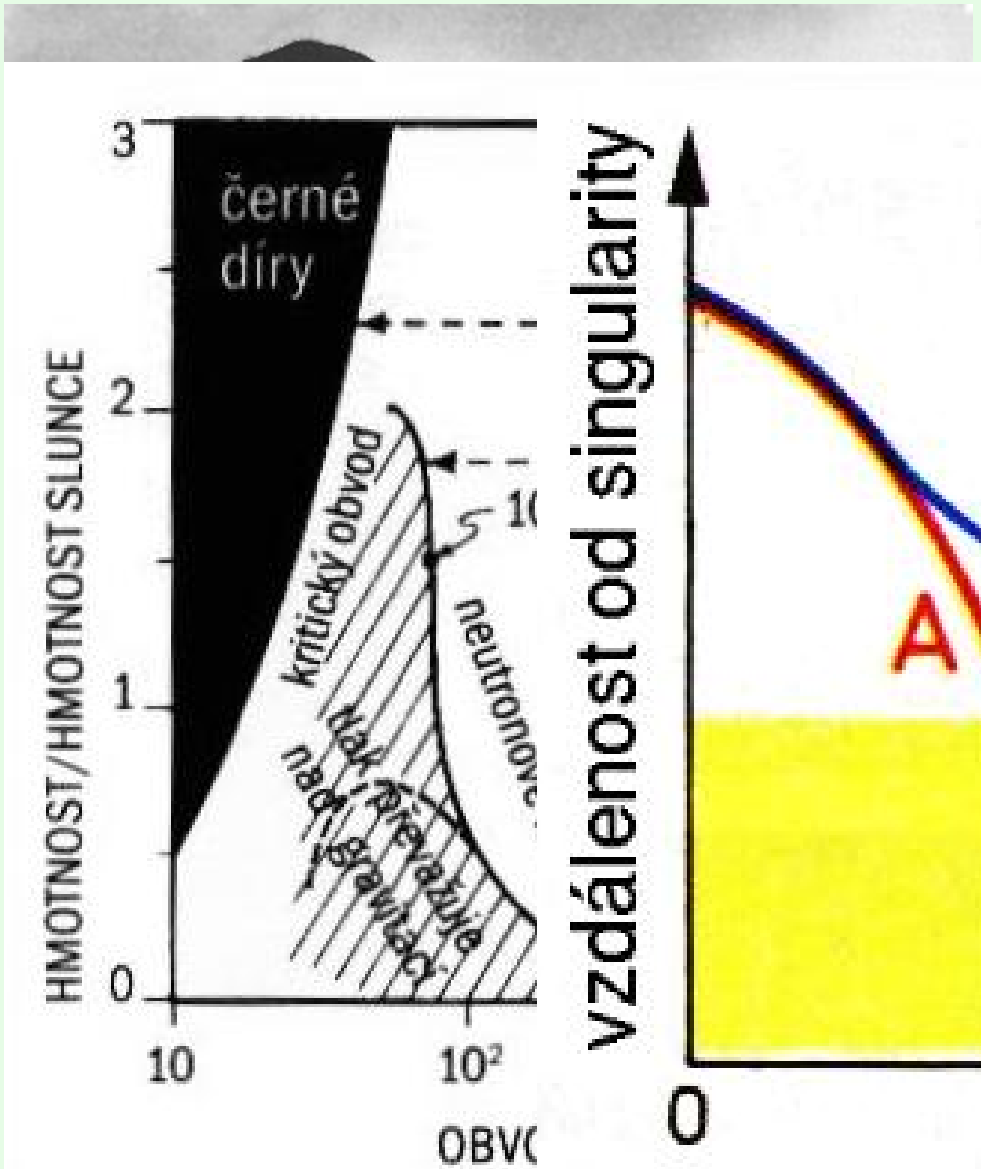
NEVYHNUTELNOST KOLAPSU

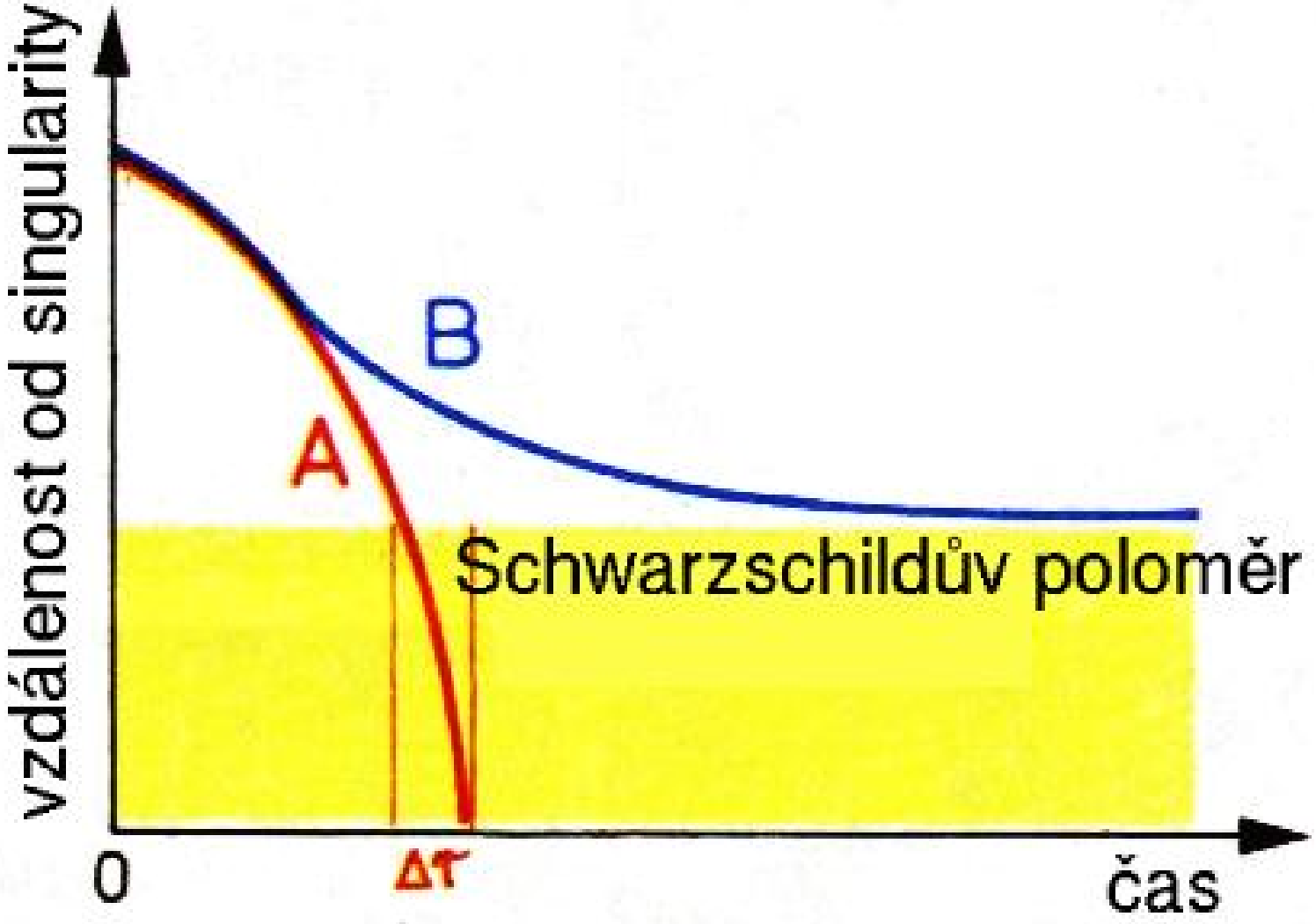
1938): hvězdy



NEVYHNUTELNOST KOLAPSU

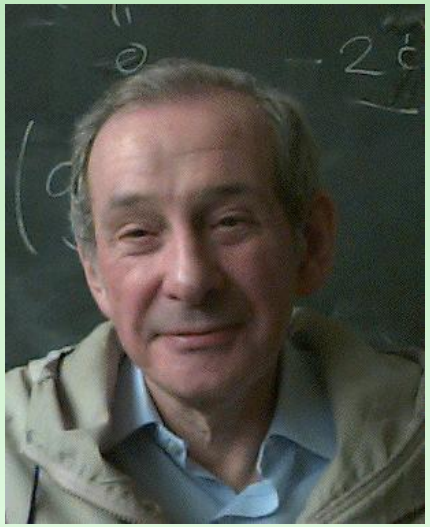
1938): hvězdy



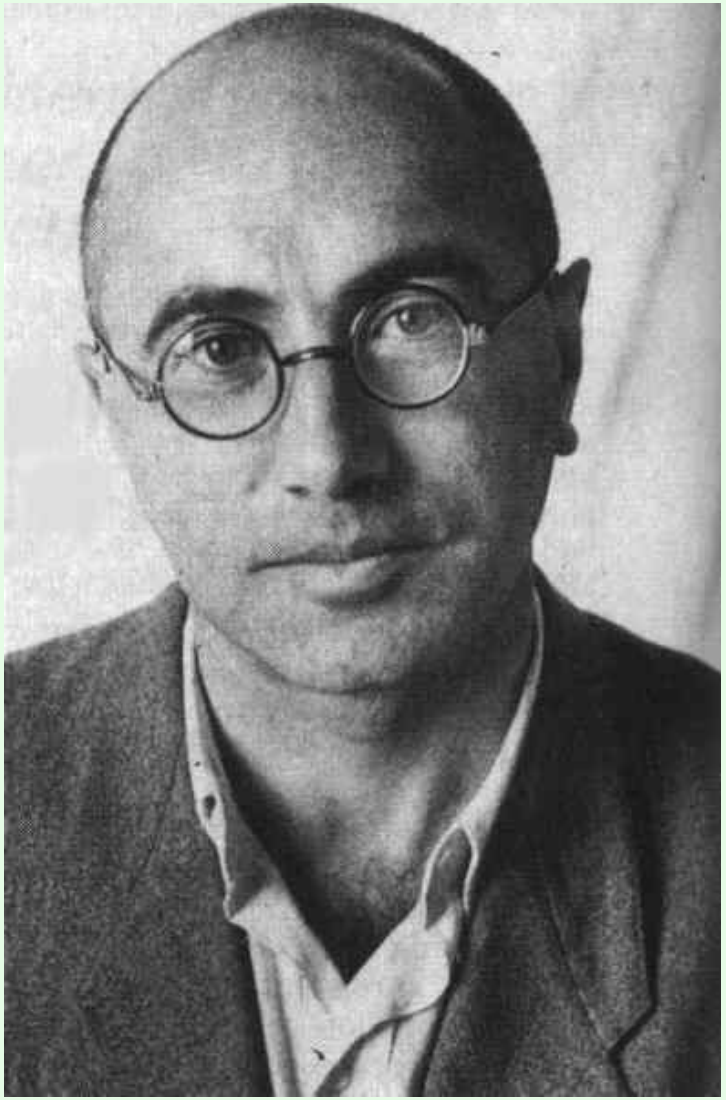


ČERNÁ DÍRA NEMÁ VLASY

- 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

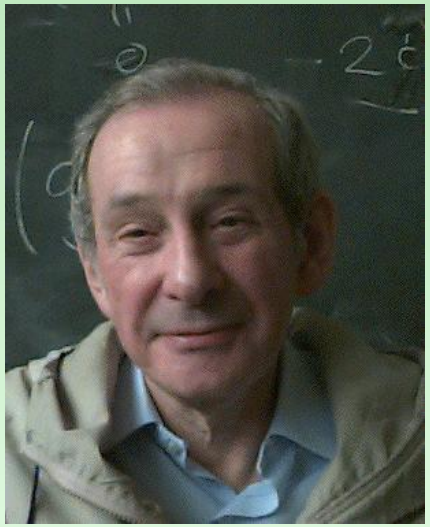


ČERNÁ DÍRA NEMÁ VLASY



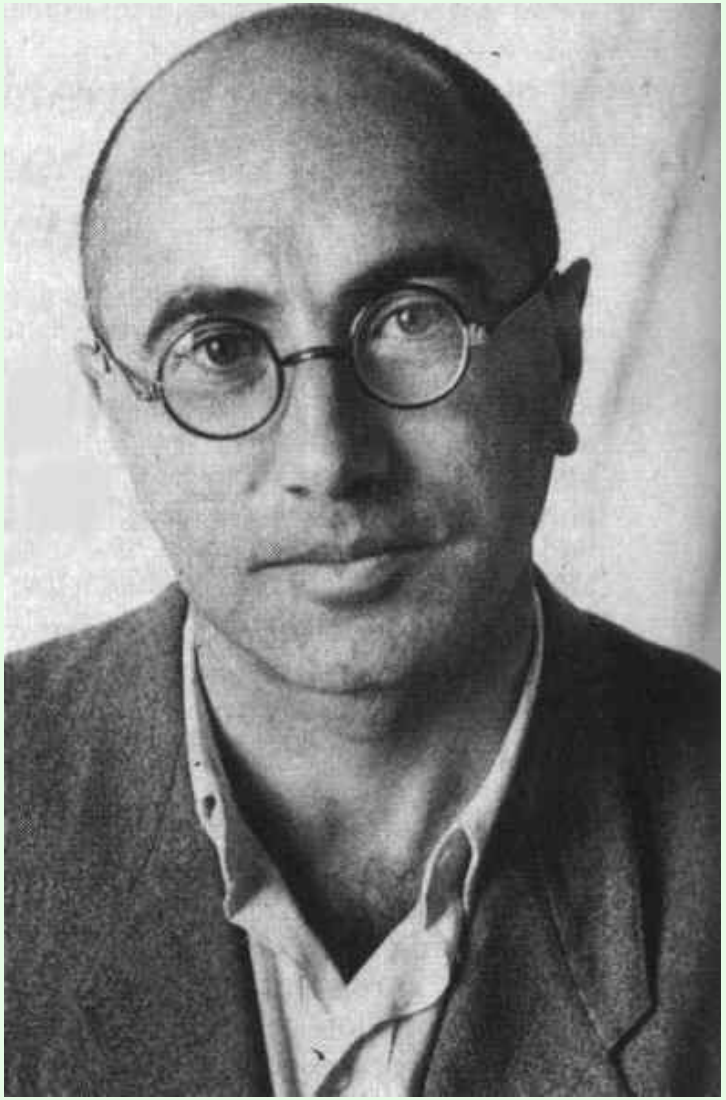
urg (1964): kolapsem zmizí
003
oškevič: horizont sférický
67): *nesférický kolaps může*
l' nevznikne ČD nebo
á ČD
o se může vyzářit, se
, grav. vlnami)
má vlasy (téměř!), nelze

otnost, moment hybnosti,



- Obecný důkaz: Brandon Carter, Stephen Hawking, Werner Israel

ČERNÁ DÍRA NEMÁ VLASY



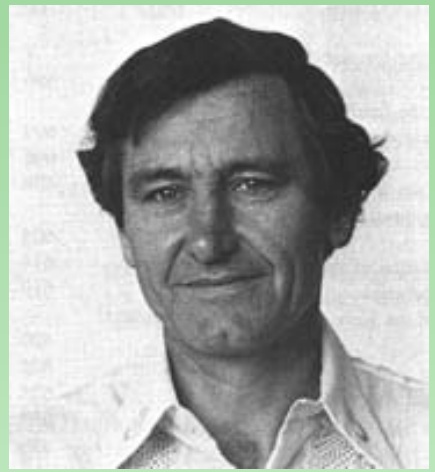
urg (1964): kola
003
oškevič: horizon
67): *nesférický*
ď nevznikne ČD
á ČD
so se může vyza
, grav. vlnami)
má vlasy (témě

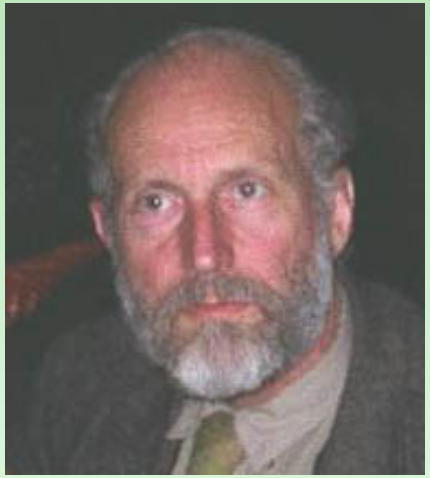
otnost, moment

- Obecný důkaz: Brandon Carter, Steph
  Hawking, Werner Israel

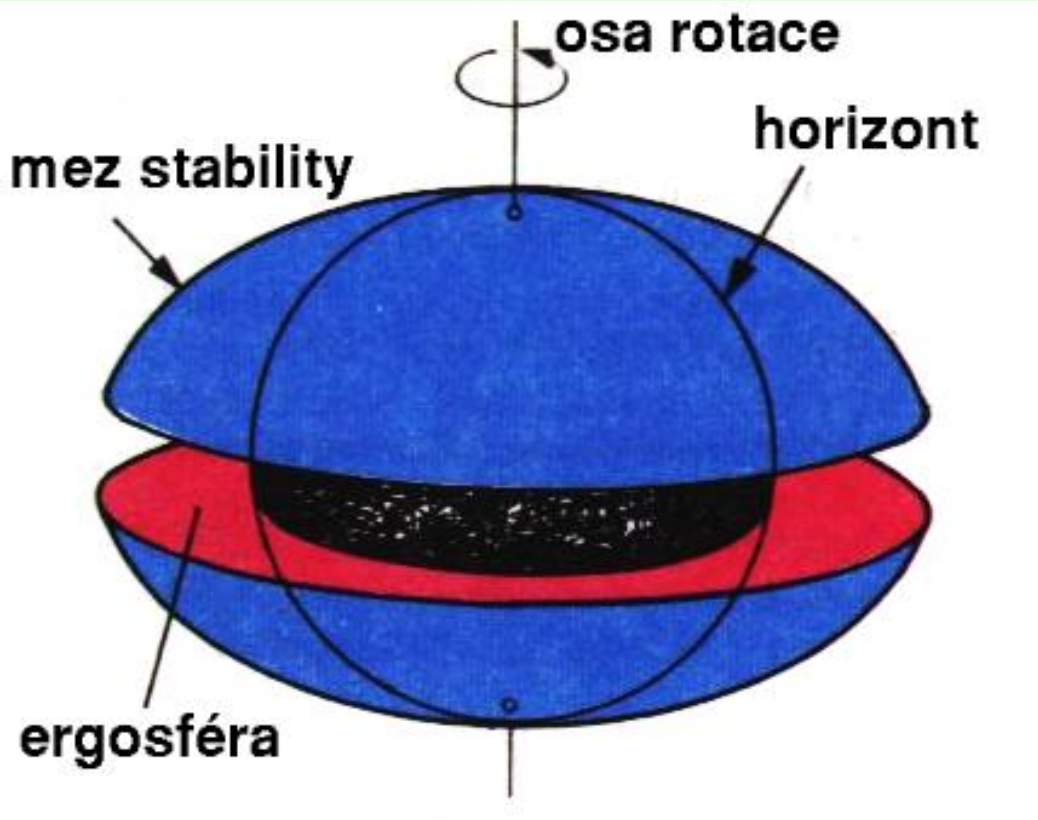
ROTUJÍCÍ ČERNÉ DÍRY

- 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 $62\ \mu\mathrm{s}$, 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



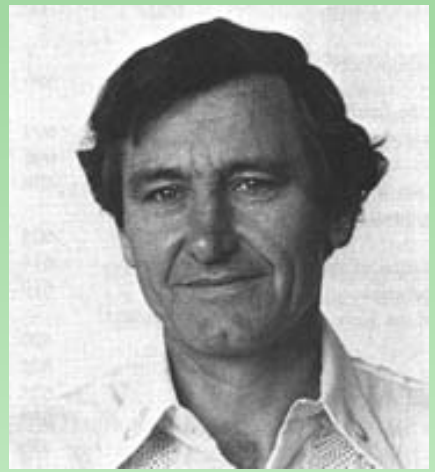
ročas v okolí

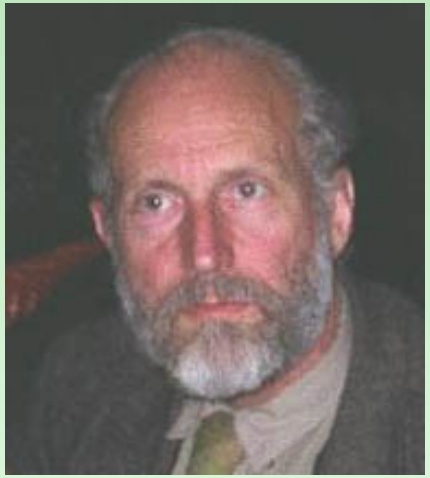
vo řešení
ČD

málně, rychlostí
rozmetán

ávat rotační

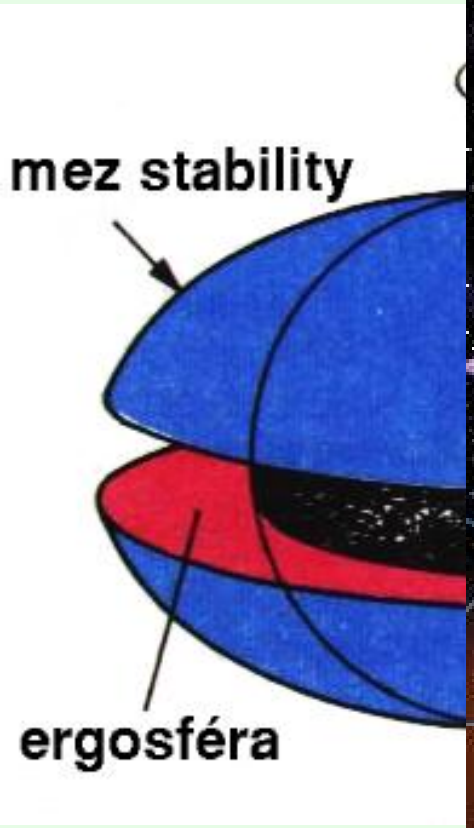
netické pole

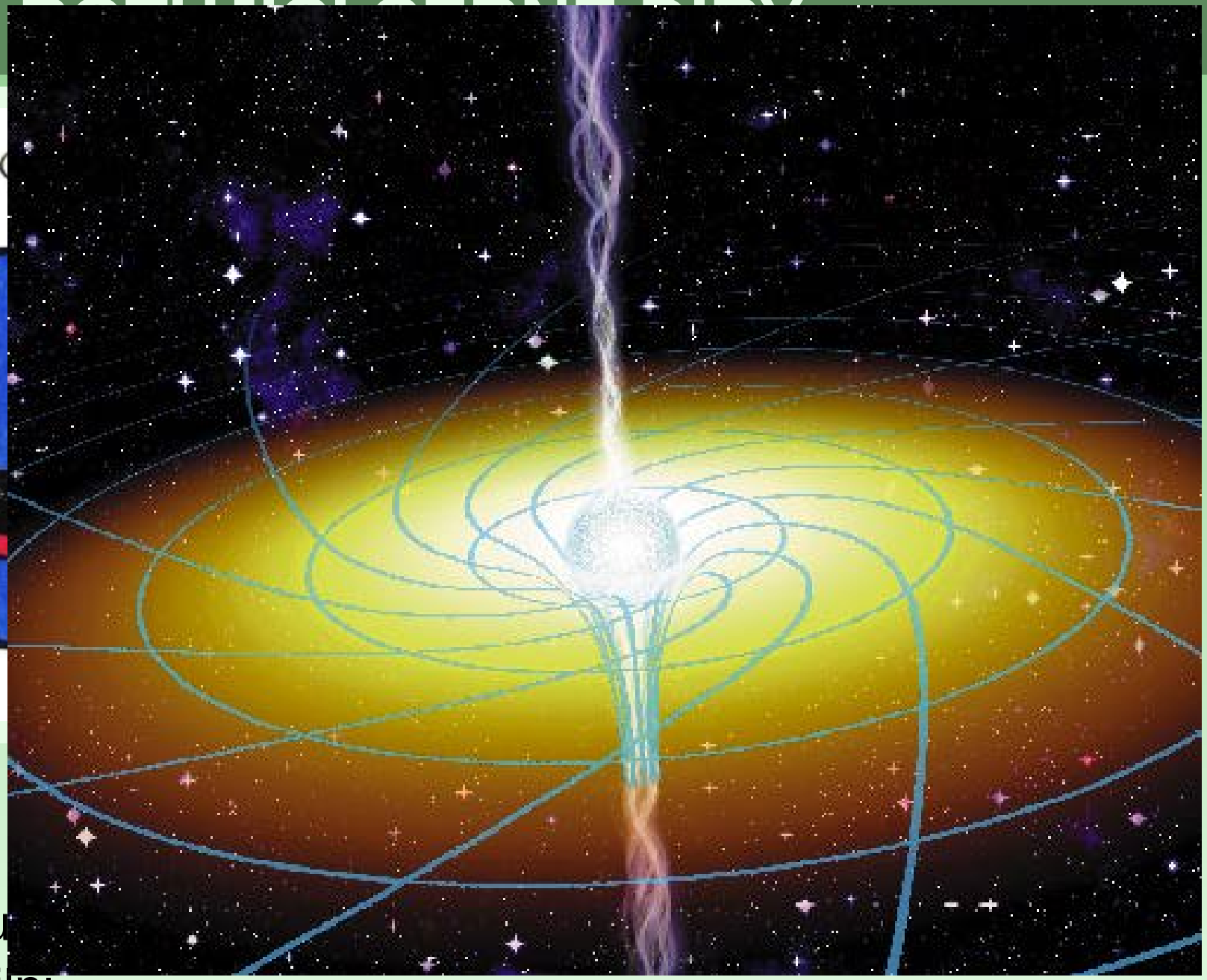




- Ted Newman (1965): obecné řešení nabité černé díry
- ČD může i pulzovat (zvlnění prostoročasu), pulzace stabilní

ROTUJÍCÍ ČERNÉ DÍRY





- Ted Newman
  díry
- ČD může i pu
  pulzace stabilní

PÁTRÁNÍ VE VESMÍRU

- ČD o obvodu 50 km ve vzdálenosti 4 ly pod úhlem $10^{-7}\,''$ (vlas z Měsíce); izolovanou ČD nezaznamenáme 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

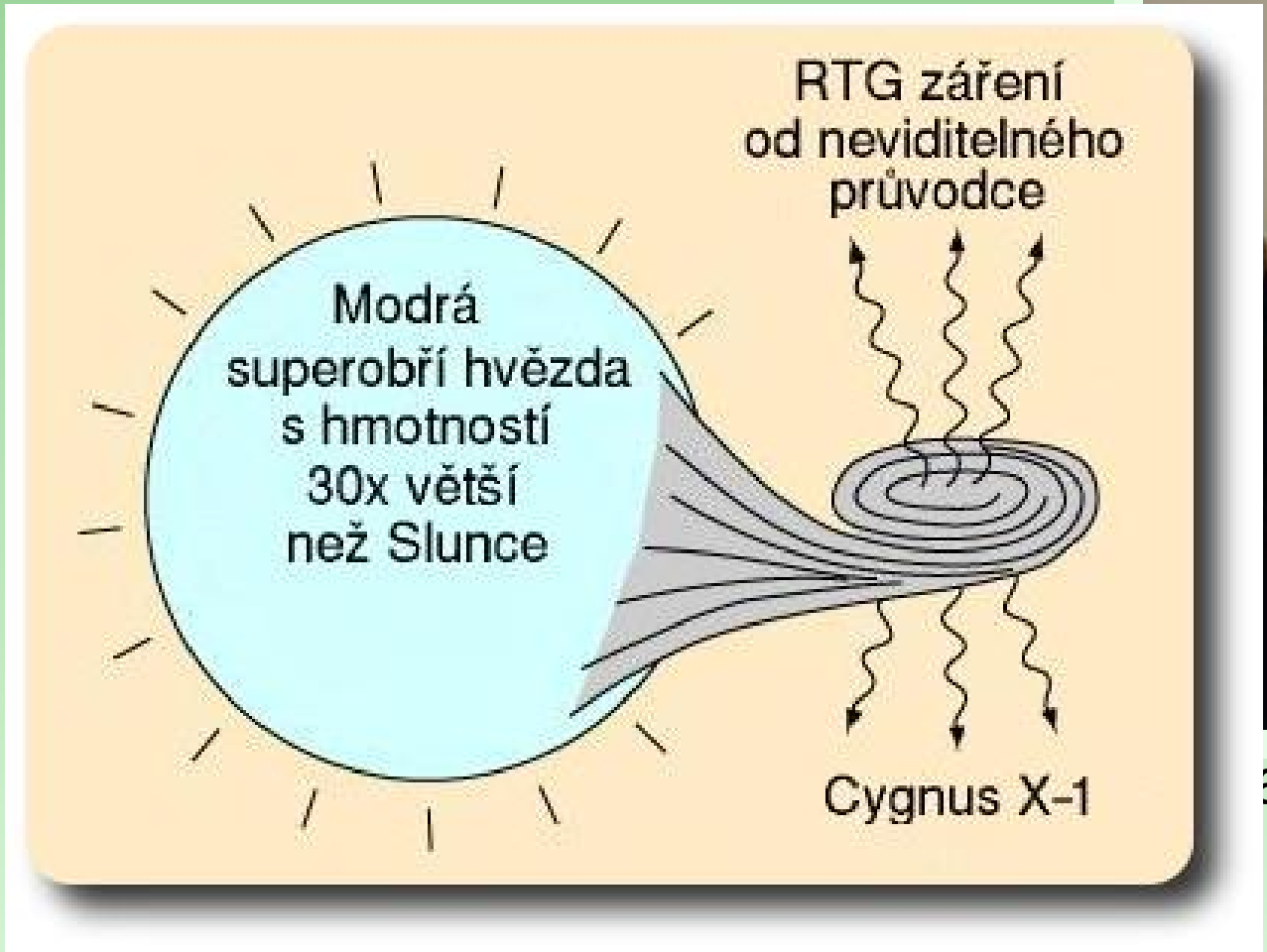
XMM-Newton

PÁTRÁNÍ VE VESMÍRU

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

XMM-Newton

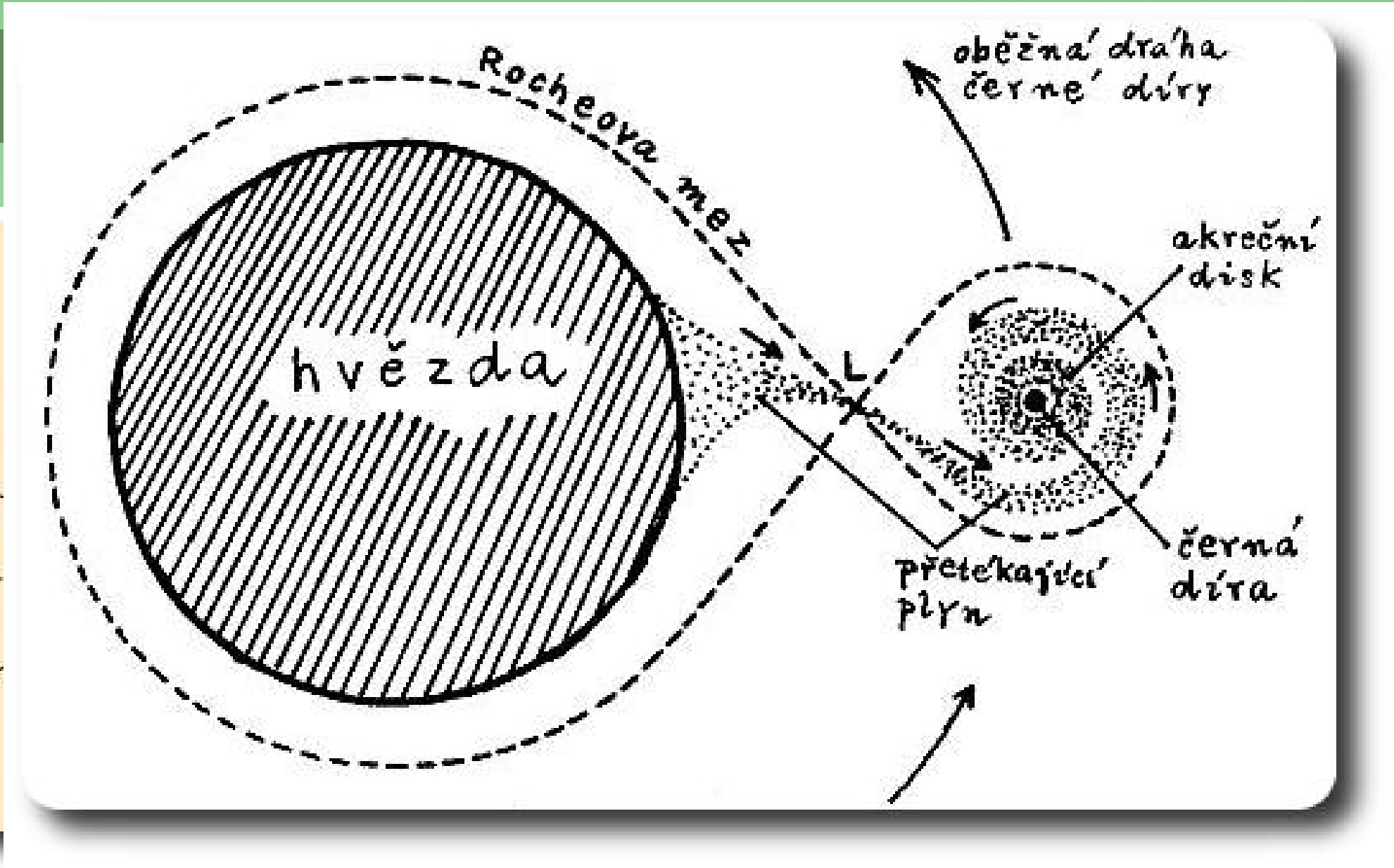
PÁTRÁNÍ VE VESMÍRU



asnější

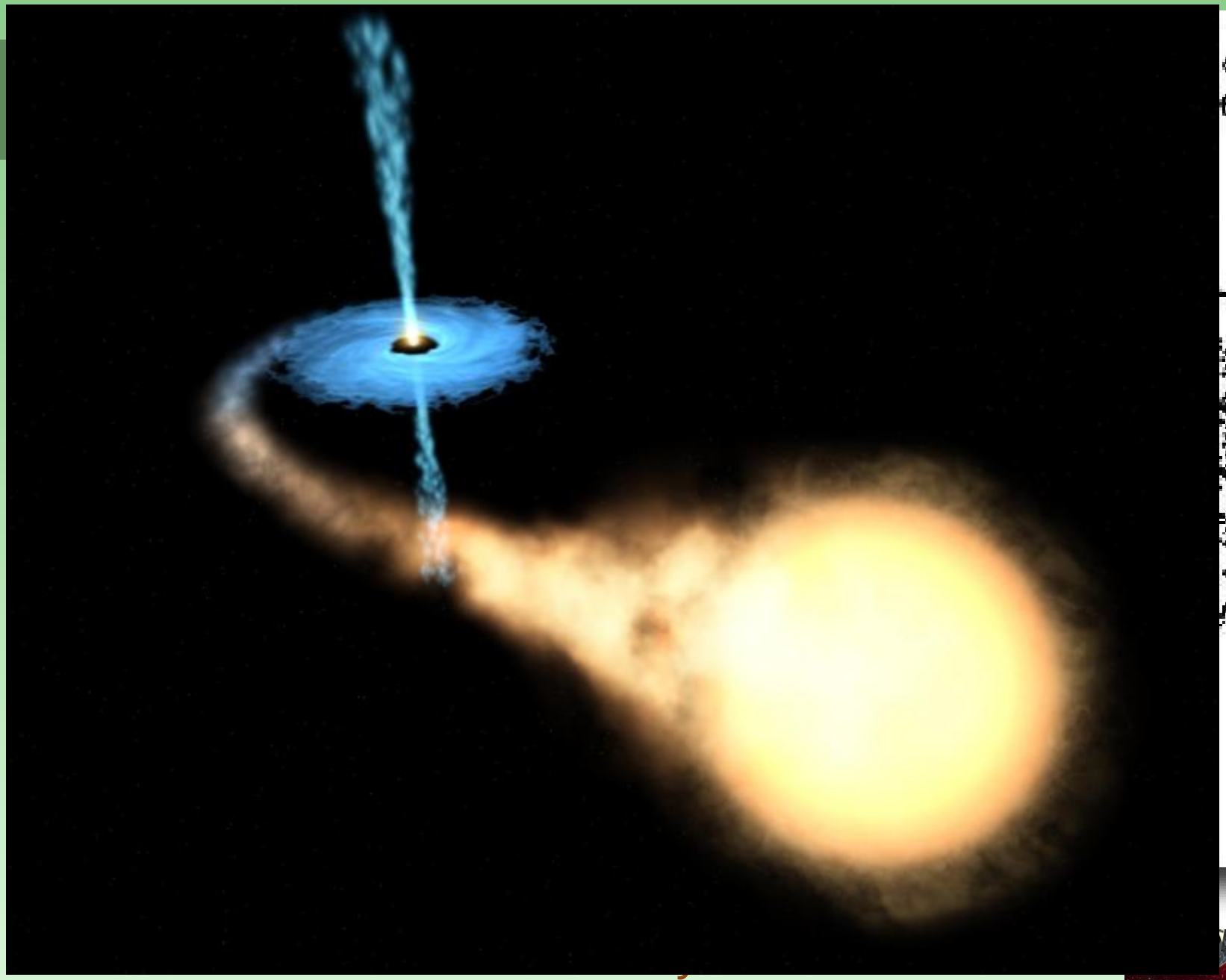
XMM-Newton

- RXJ1242: rozmetání hvězdy v souhvězdí Panny, 700 miliónů ly



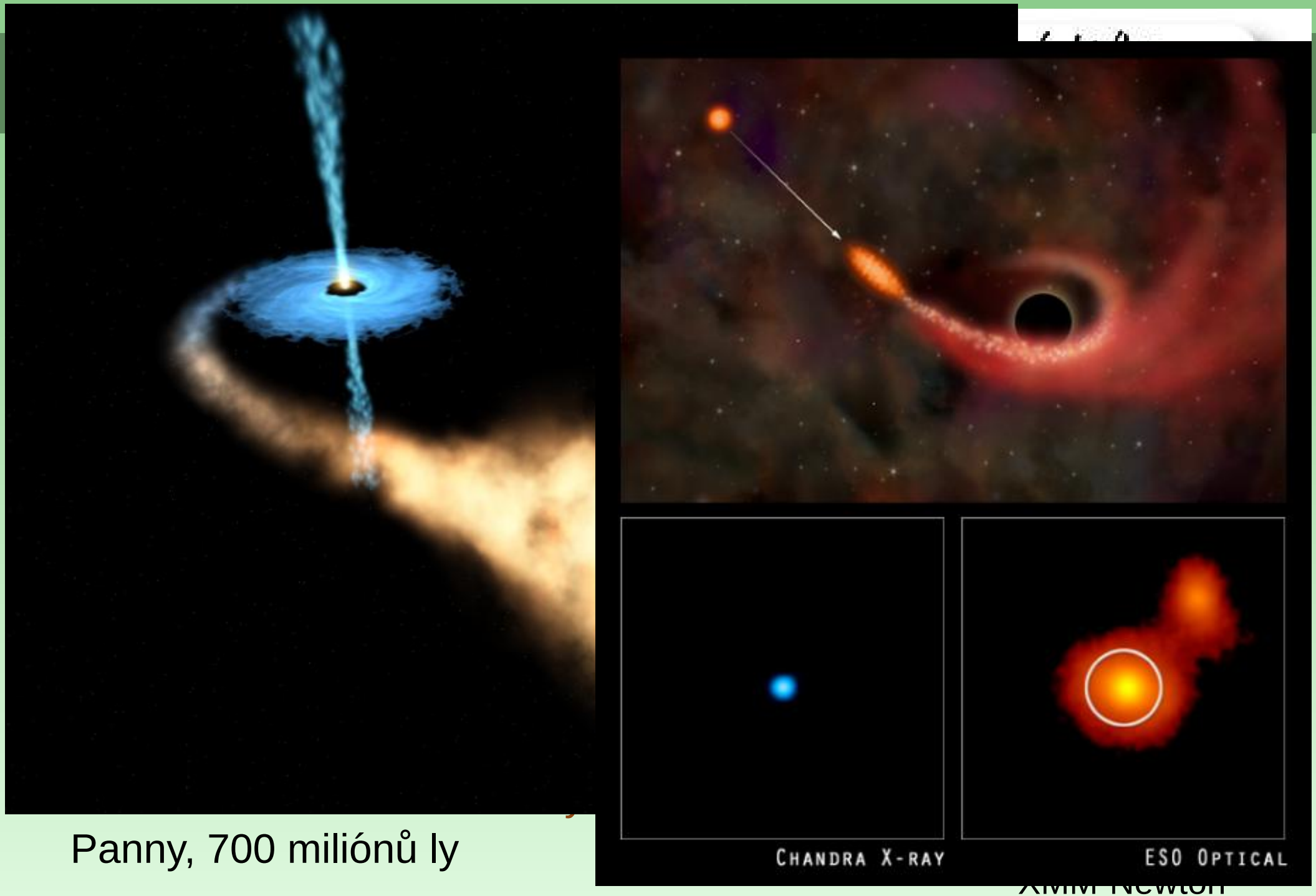
- RXJ1242: rozmetání hvězdy v souhvězdí Panny, 700 miliónů ly

XMM-Newton



Panny, 700 miliónů ly

XMM-Newton

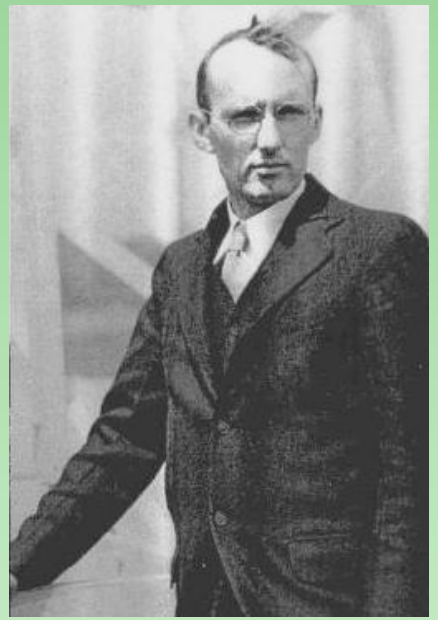


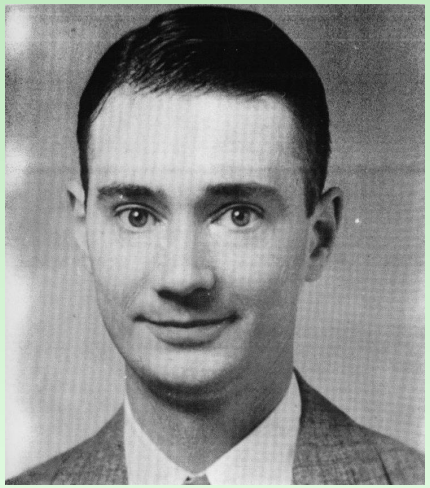
Panny, 700 miliónů ly

XMM Newton

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)

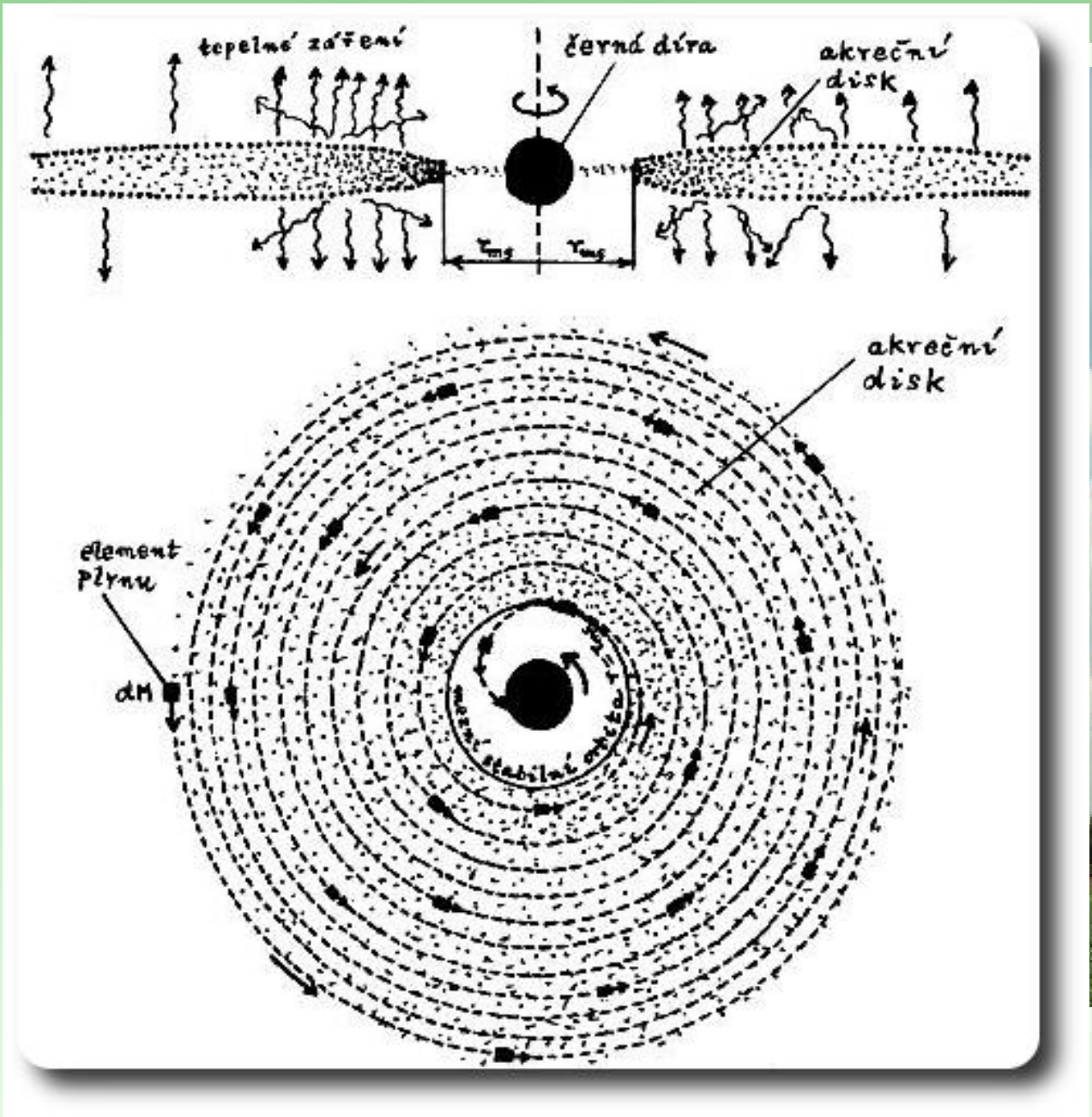




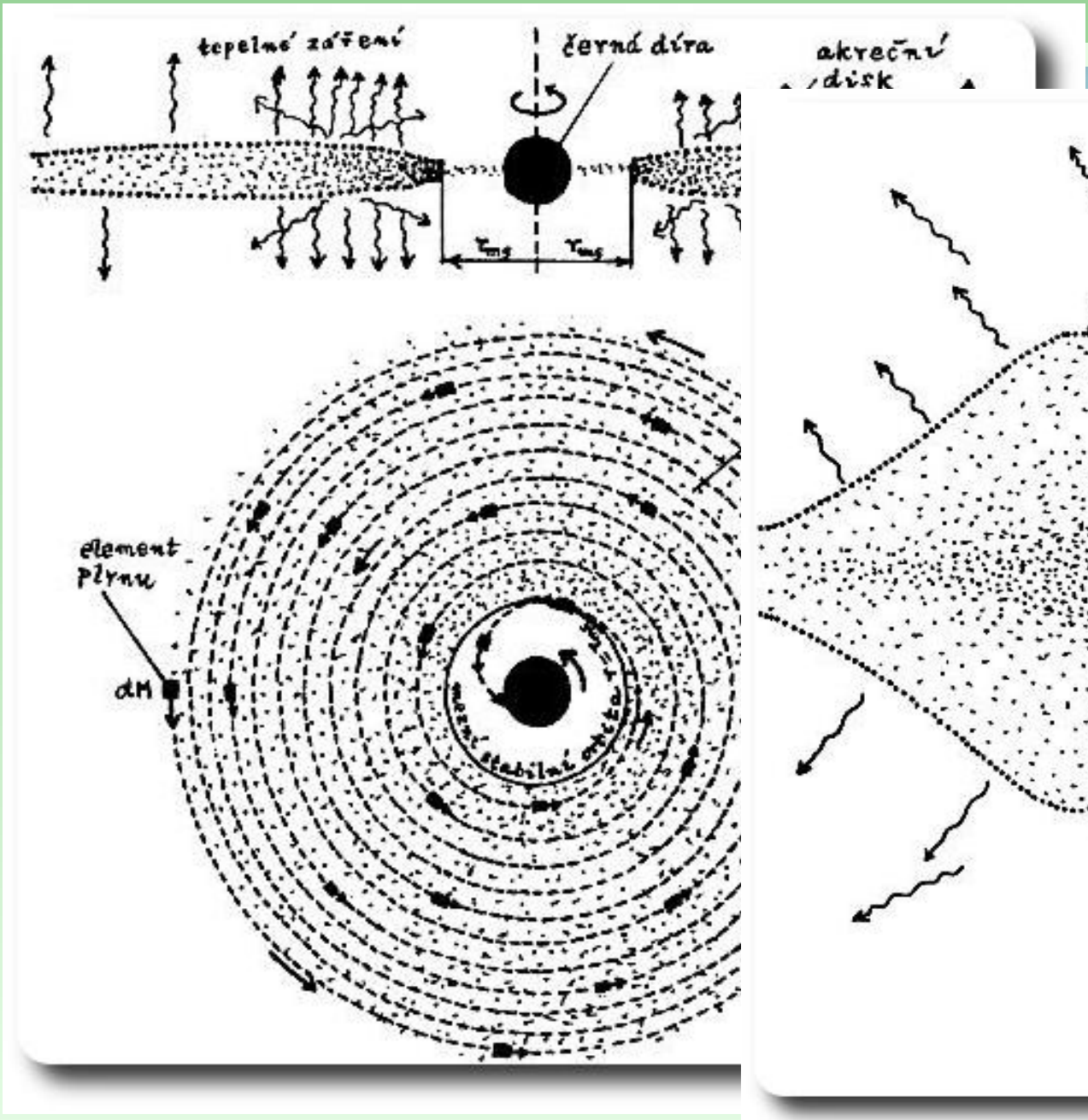
OBŘÍ ČERNÉ DÍRY

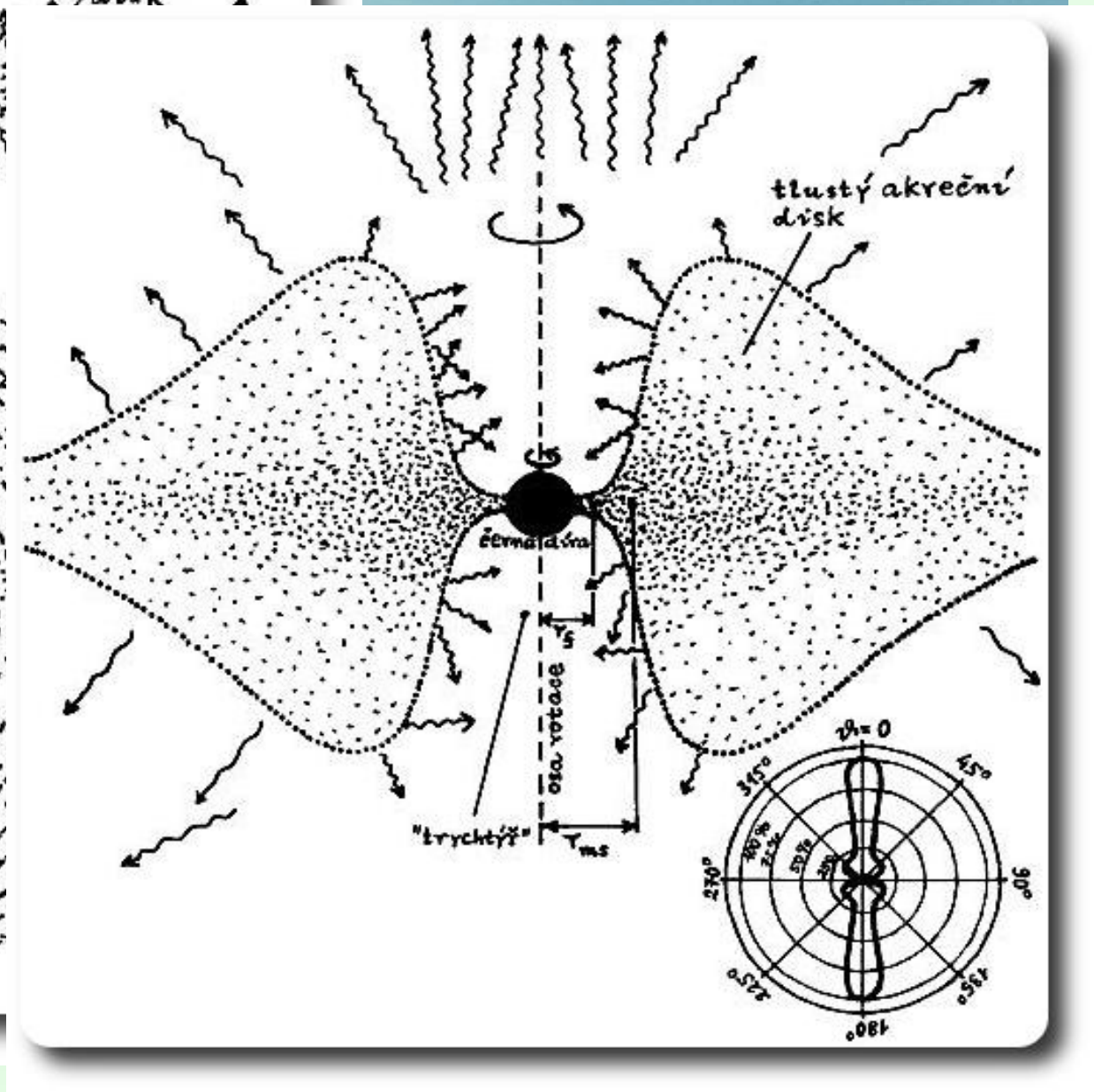
- Karl Jansky
  dokonce si
- Grote Rebe
  matky, zdro
  černých dě
- 1951: první
  Baade), zá
  stranách
- Maarten Sc
  $z = 0{,}16$, v
  galaxie z p
- nejpravděp
  černá díra
  1969)

OBŘÍ ČERNÉ DÍRY

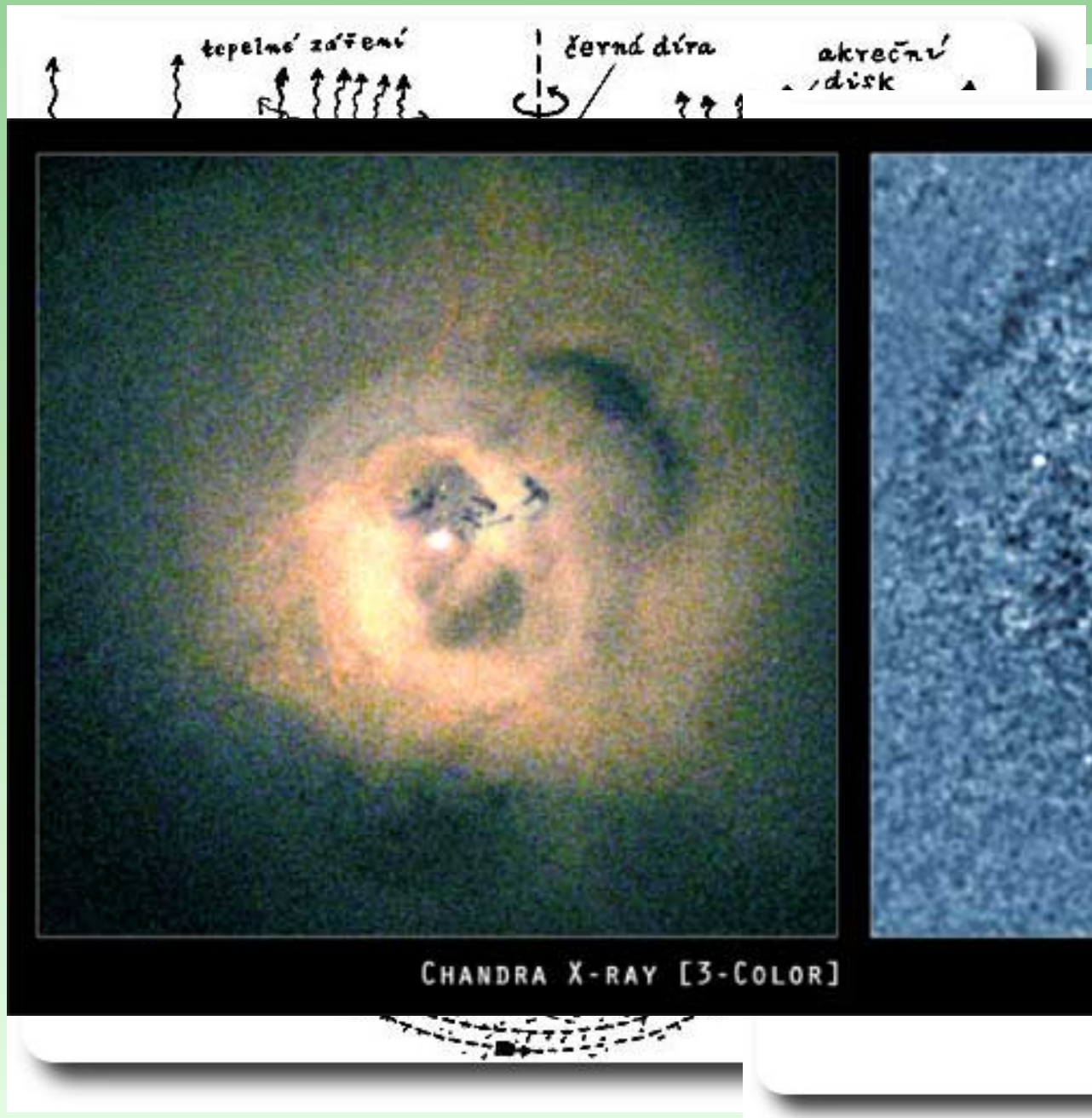


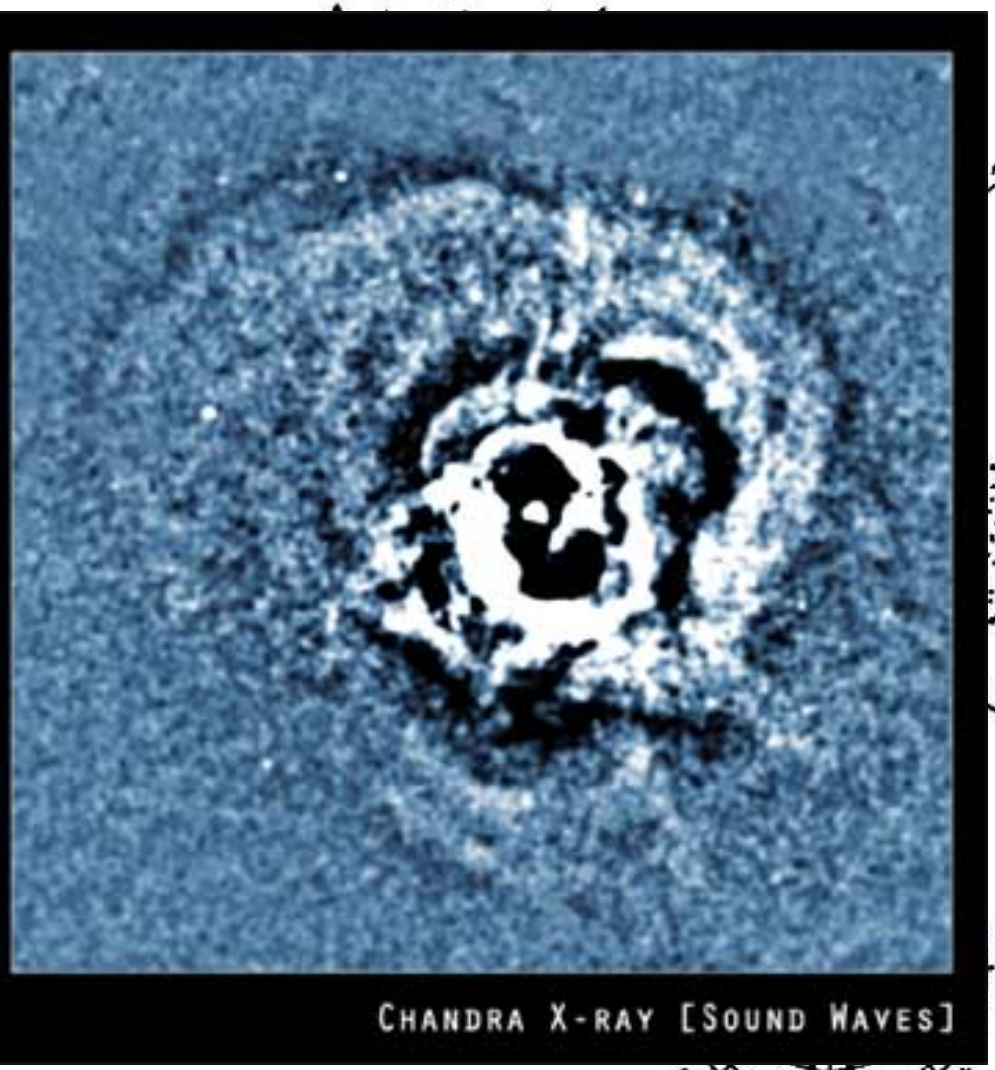
OBŘÍ ČERNÉ DÍRY





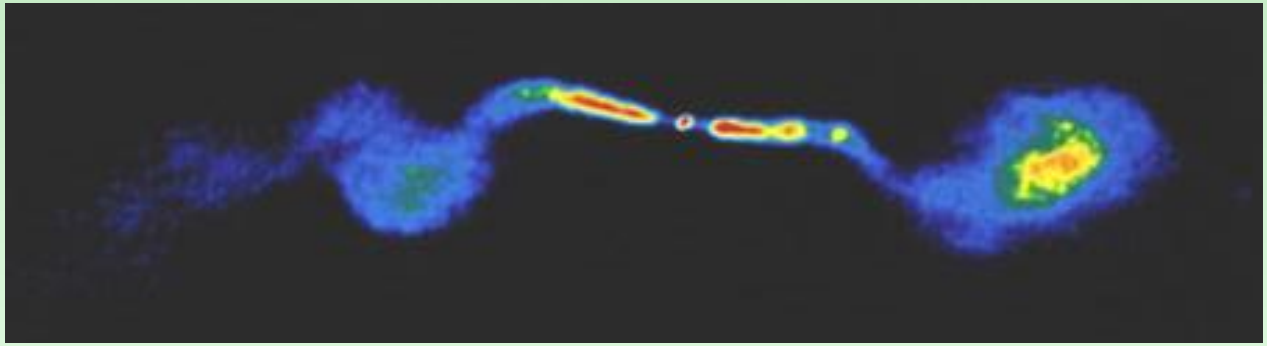
OBŘÍ ČERNÉ DÍRY





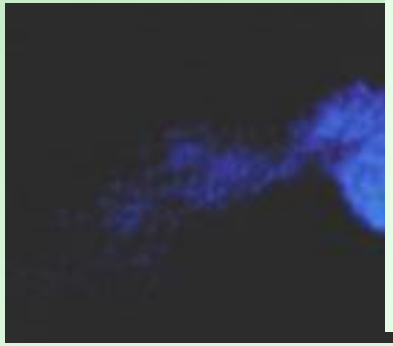
„MOTORY“ V CENTRECH GALAXIÍ

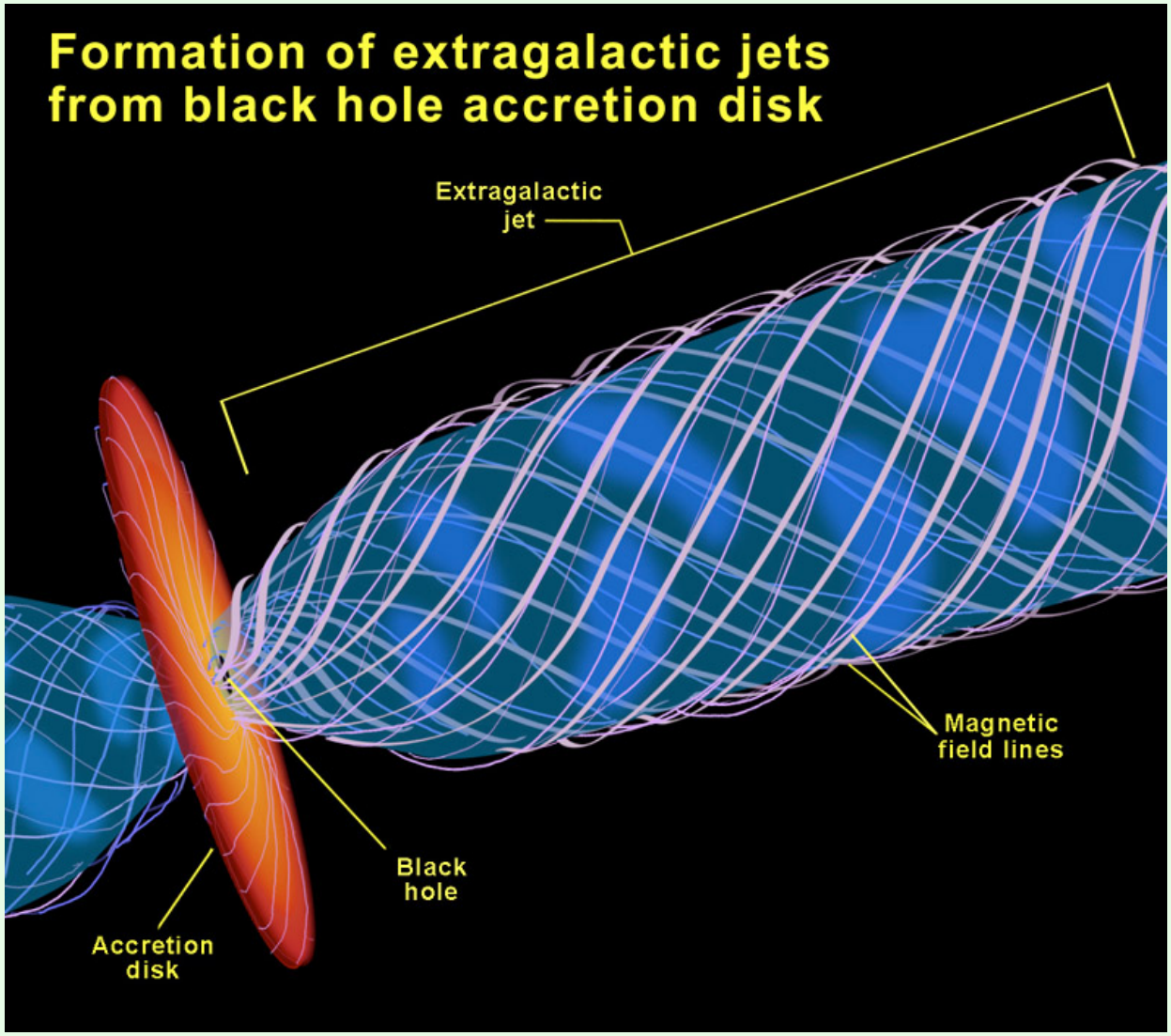
- zdroj energie v akr. disku: tření, $\eta \leqq 40\,\%$
- „krmení“ roztáčí ČD na maximální otáčky
- vznik výtrysků: Blandfordův-Znajekův proces
- Aktivní galaktická jádra, u kvazarů intenzivnější „krmení“, přezáří okolí; významný vliv rotace
- M87 v Panně: vzdálenost 50 milliónů ly, kolimace $10°$ na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



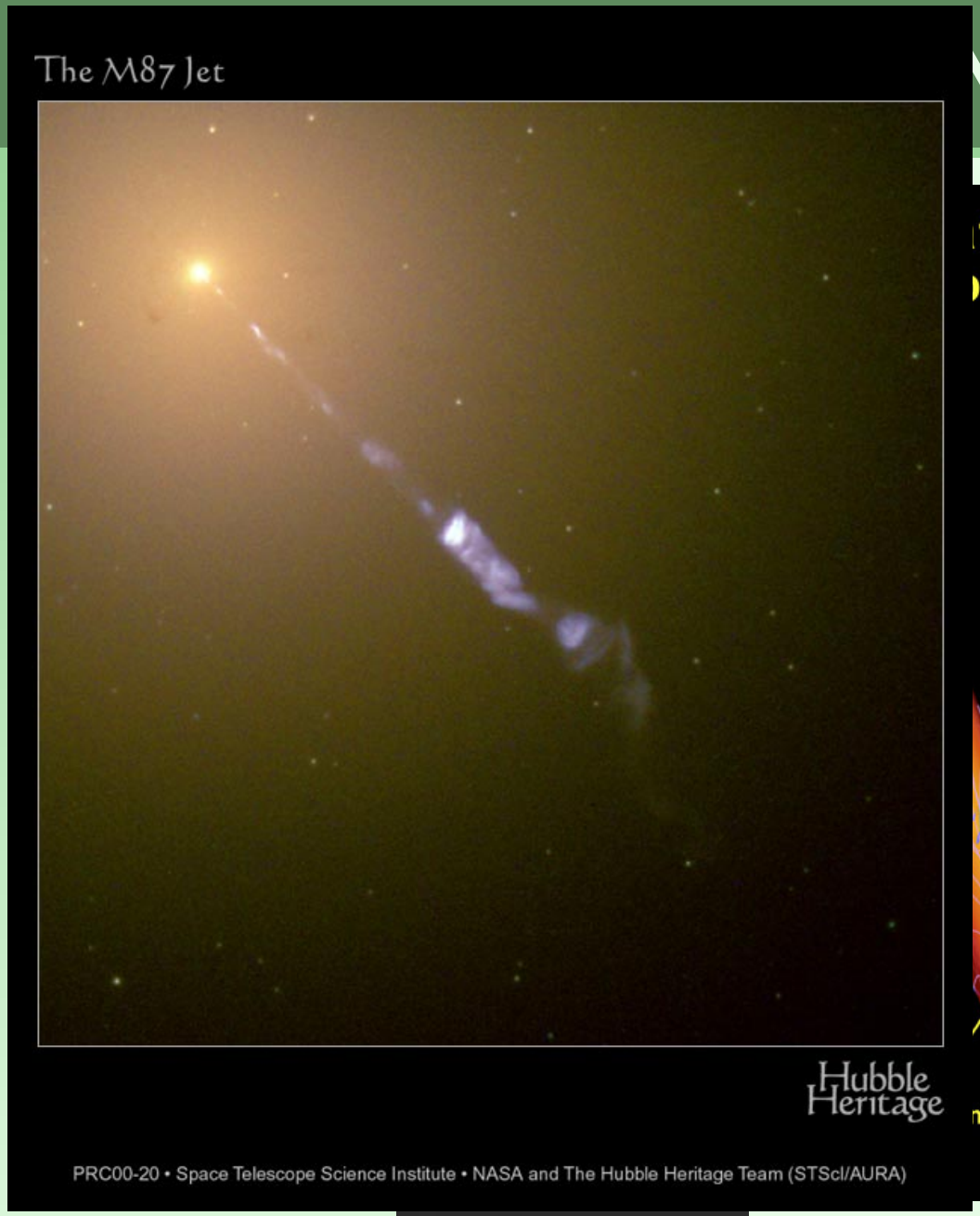
„MOTORY“ V CENTRECH GALAXIÍ

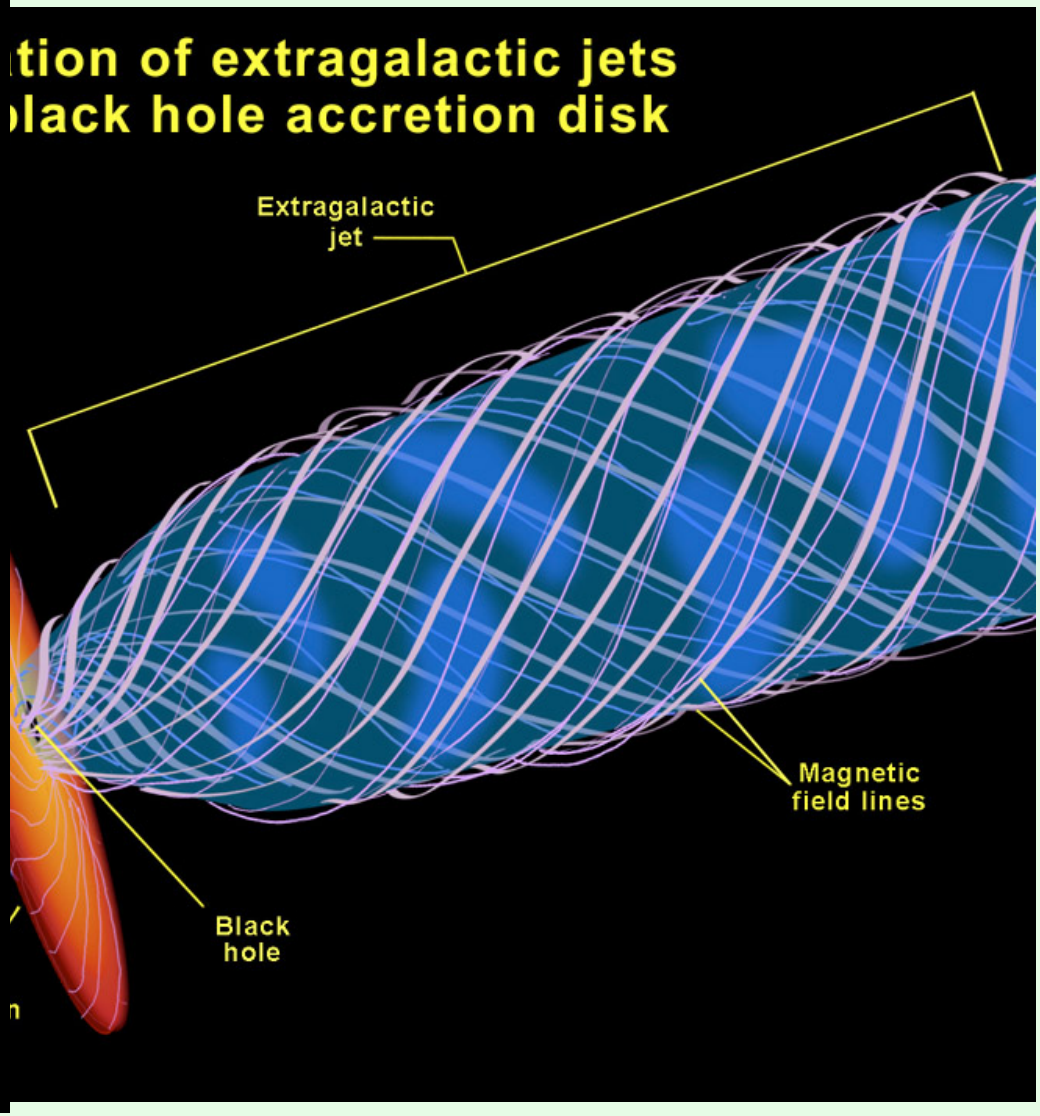
- zdroj energie v akr. disk
- „krmení“ roztáčí ČD na r
- vznik výtrysků: Blandfor
- Aktivní galaktická jádra, okolí; významný vliv rota
- M87 v Panně: vzdálenos 100 miliónů ly
- v centru naší Galaxie Č

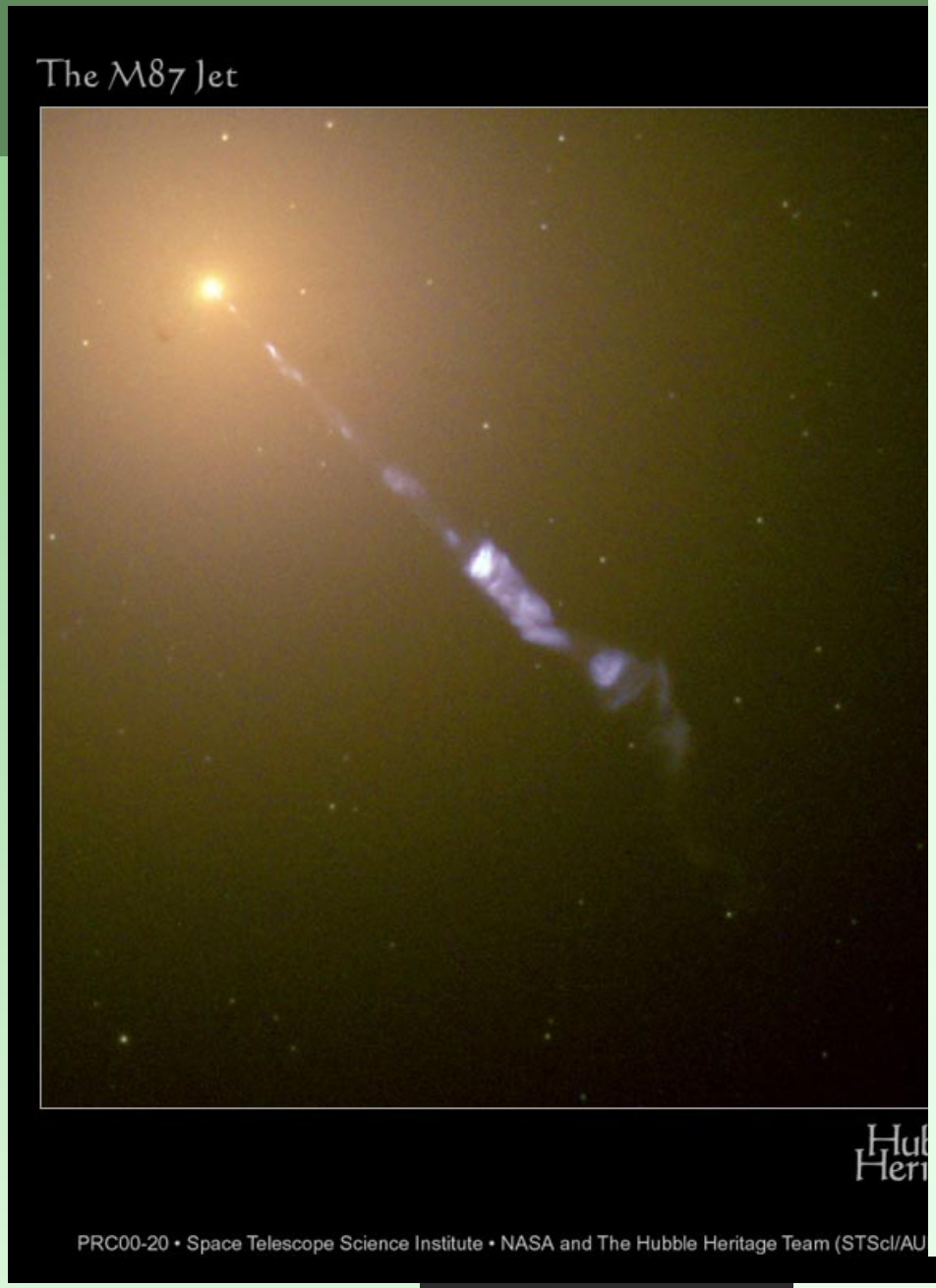


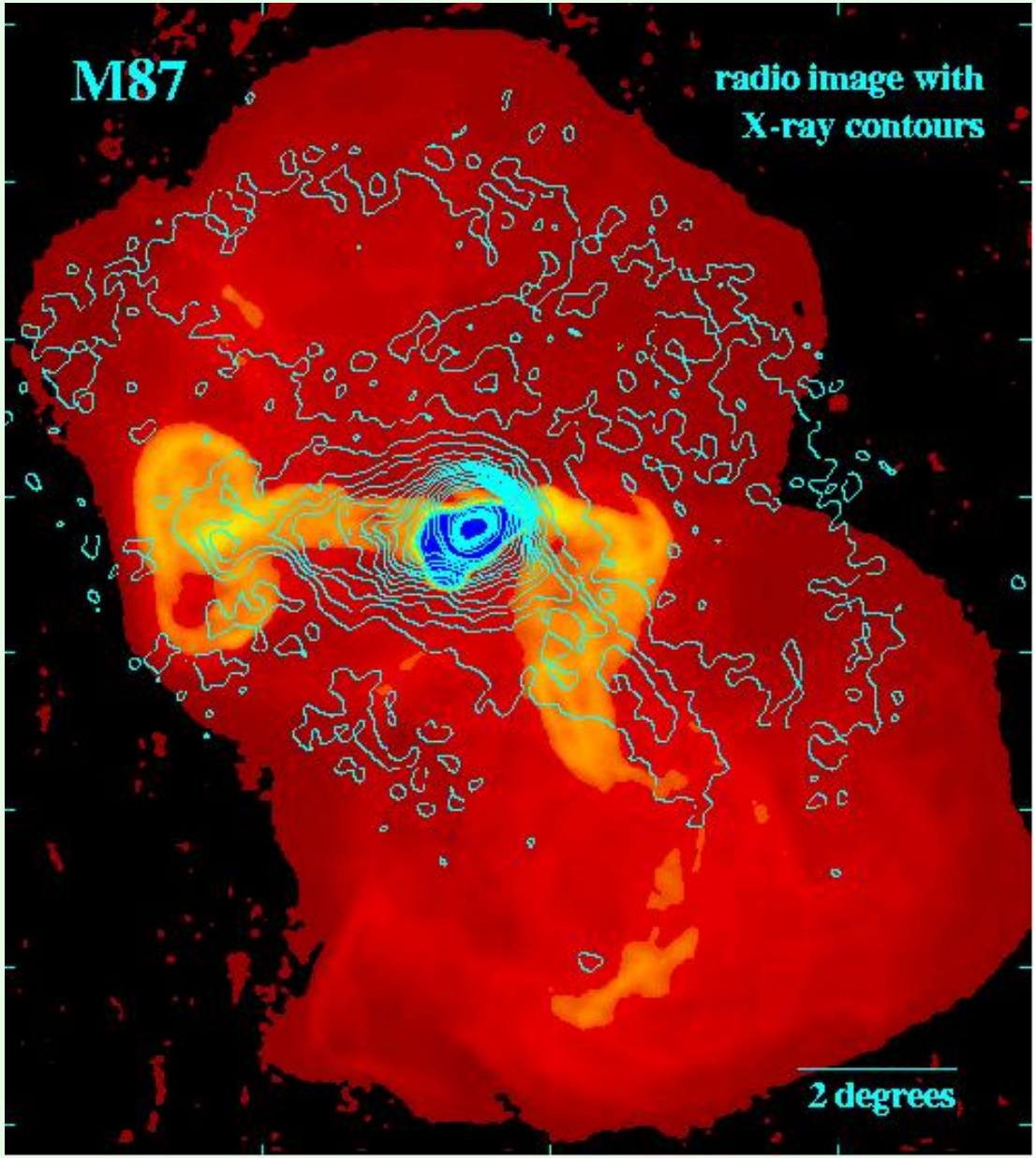


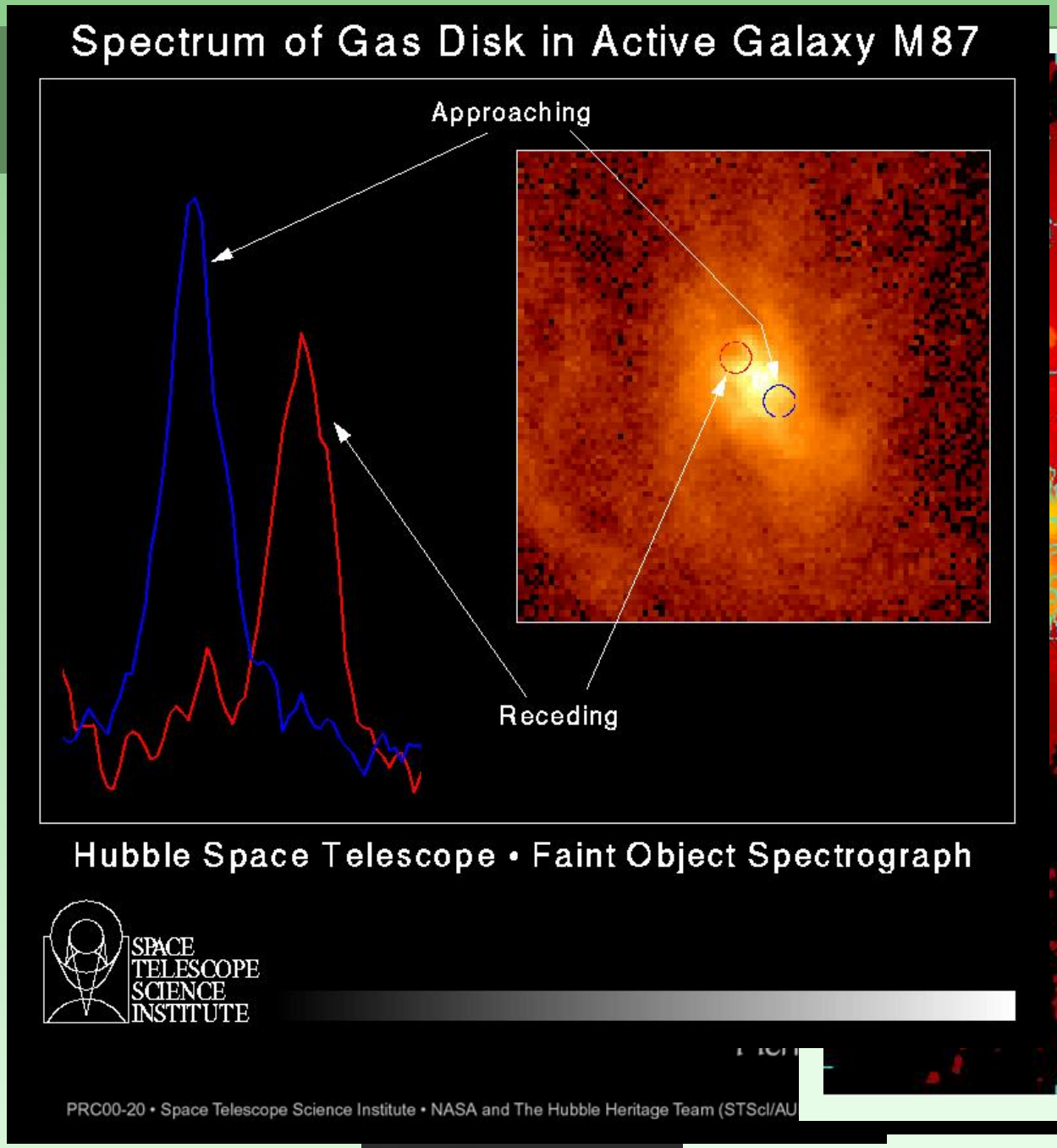
NTRECH GALAXIÍ

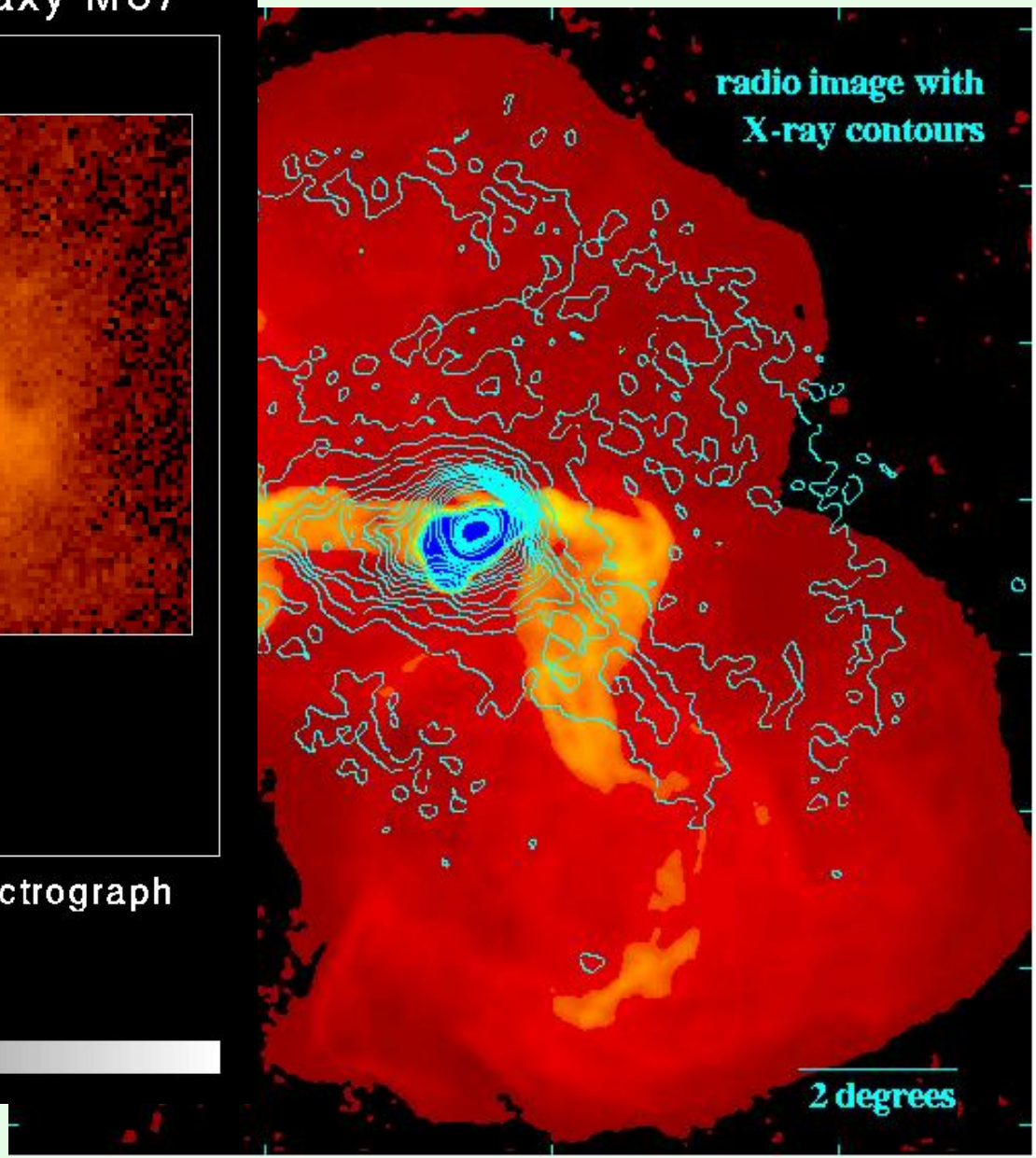


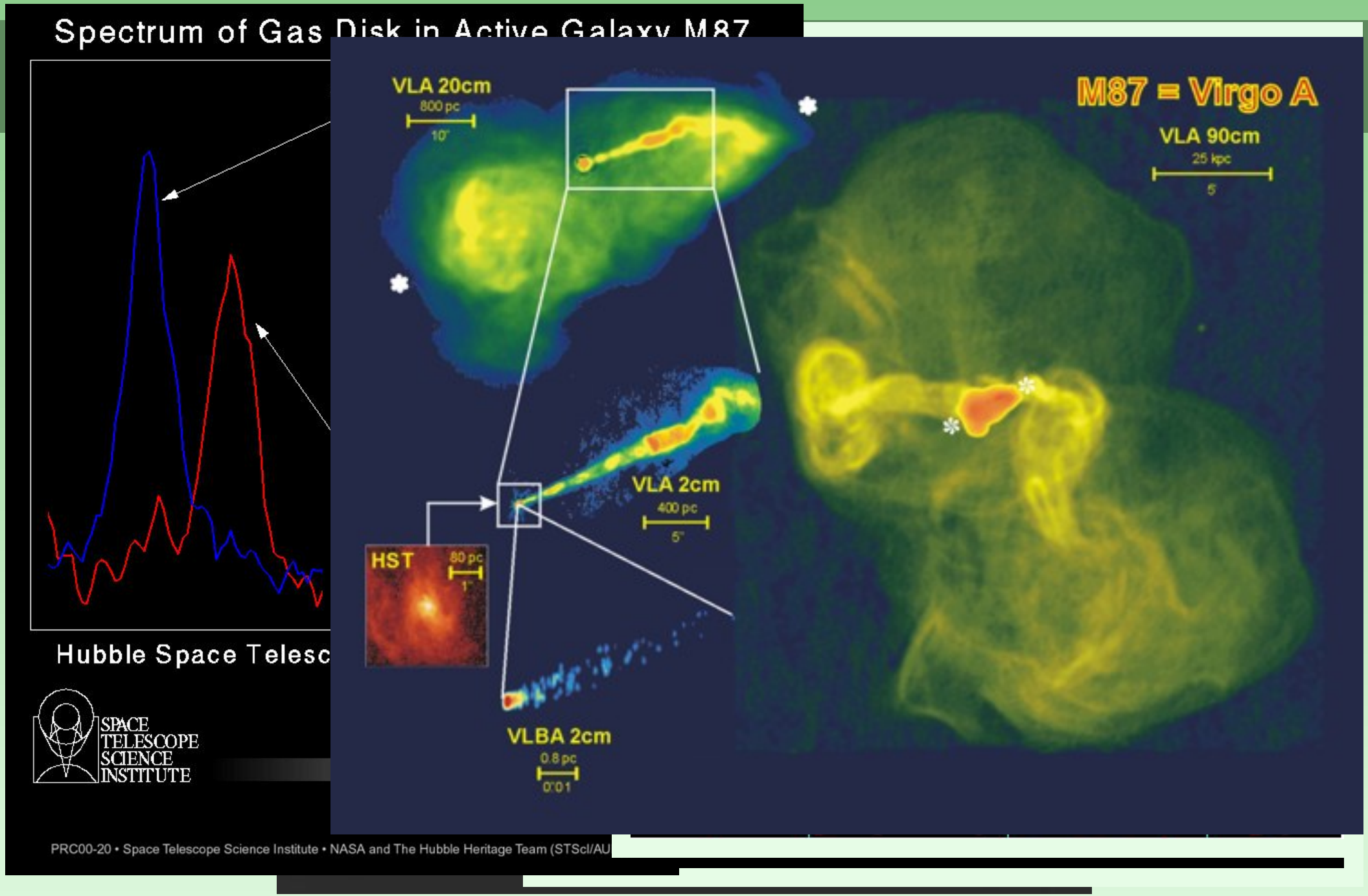


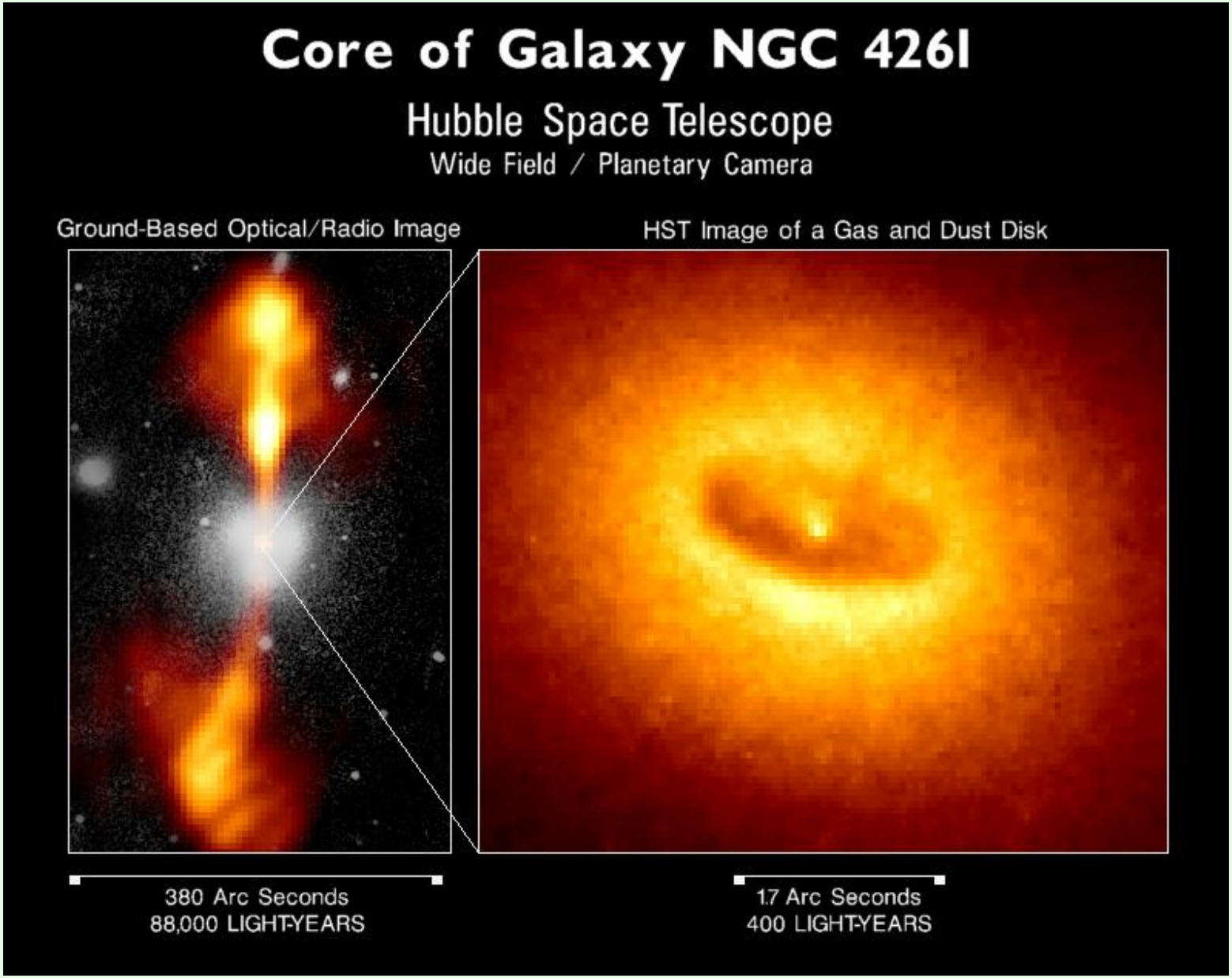

The M87 Jet
PRC00-20 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AU

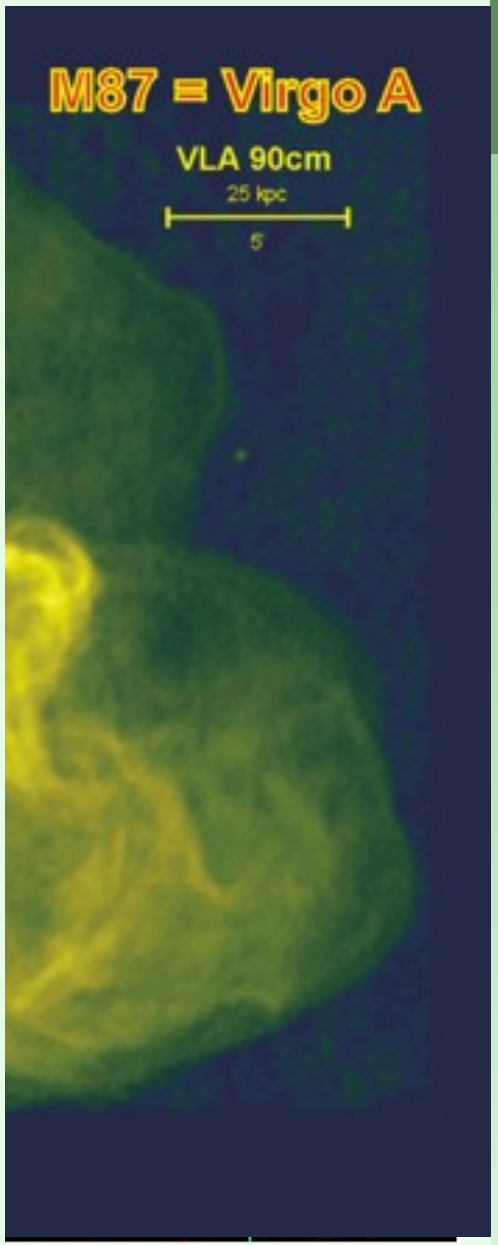

M87
radio image with
X-ray contours
2 degrees

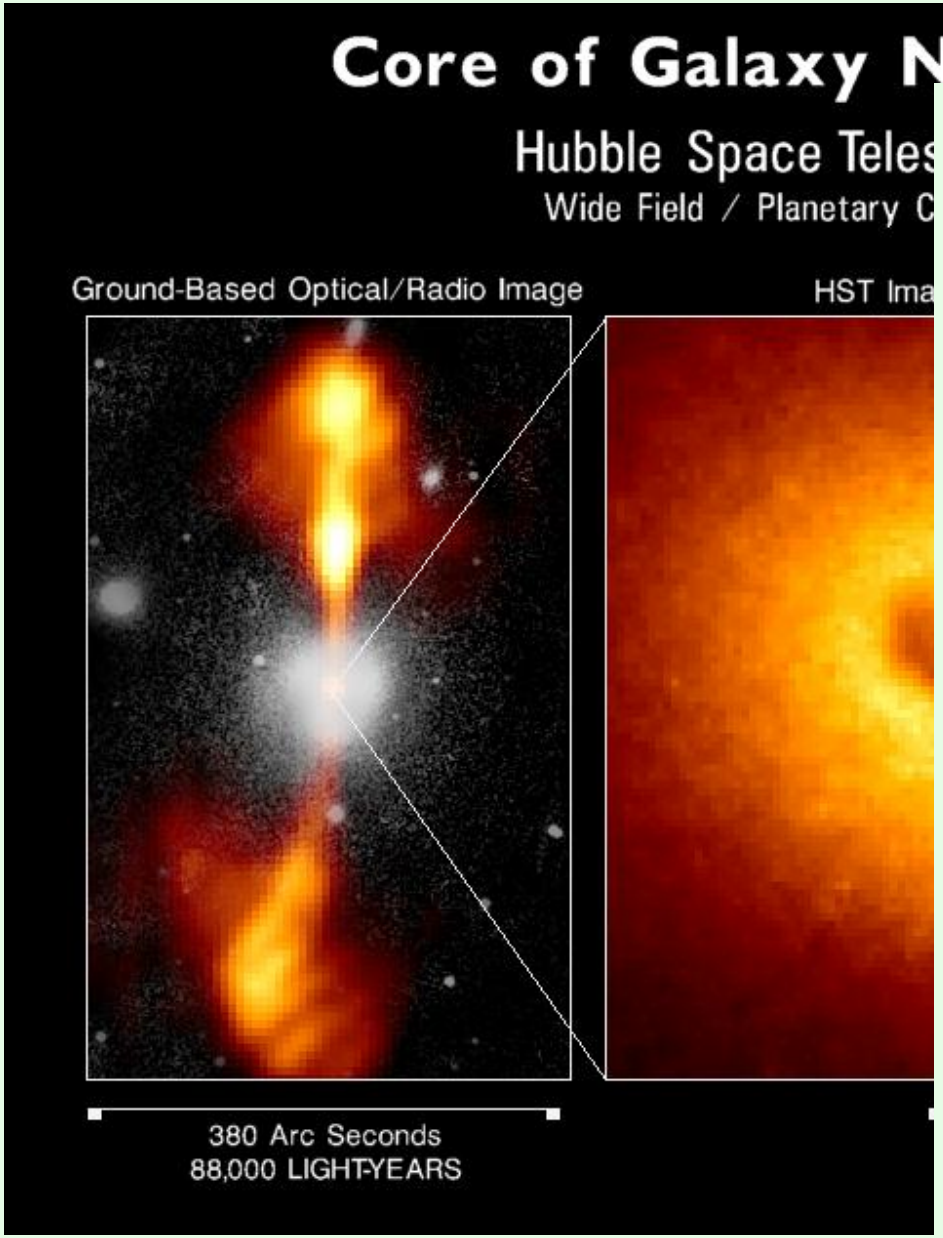

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87
Approaching
Receding
Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph
SPACE
TELESCOPE
SCIENCE
INSTITUTE
PRC00-20 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AU

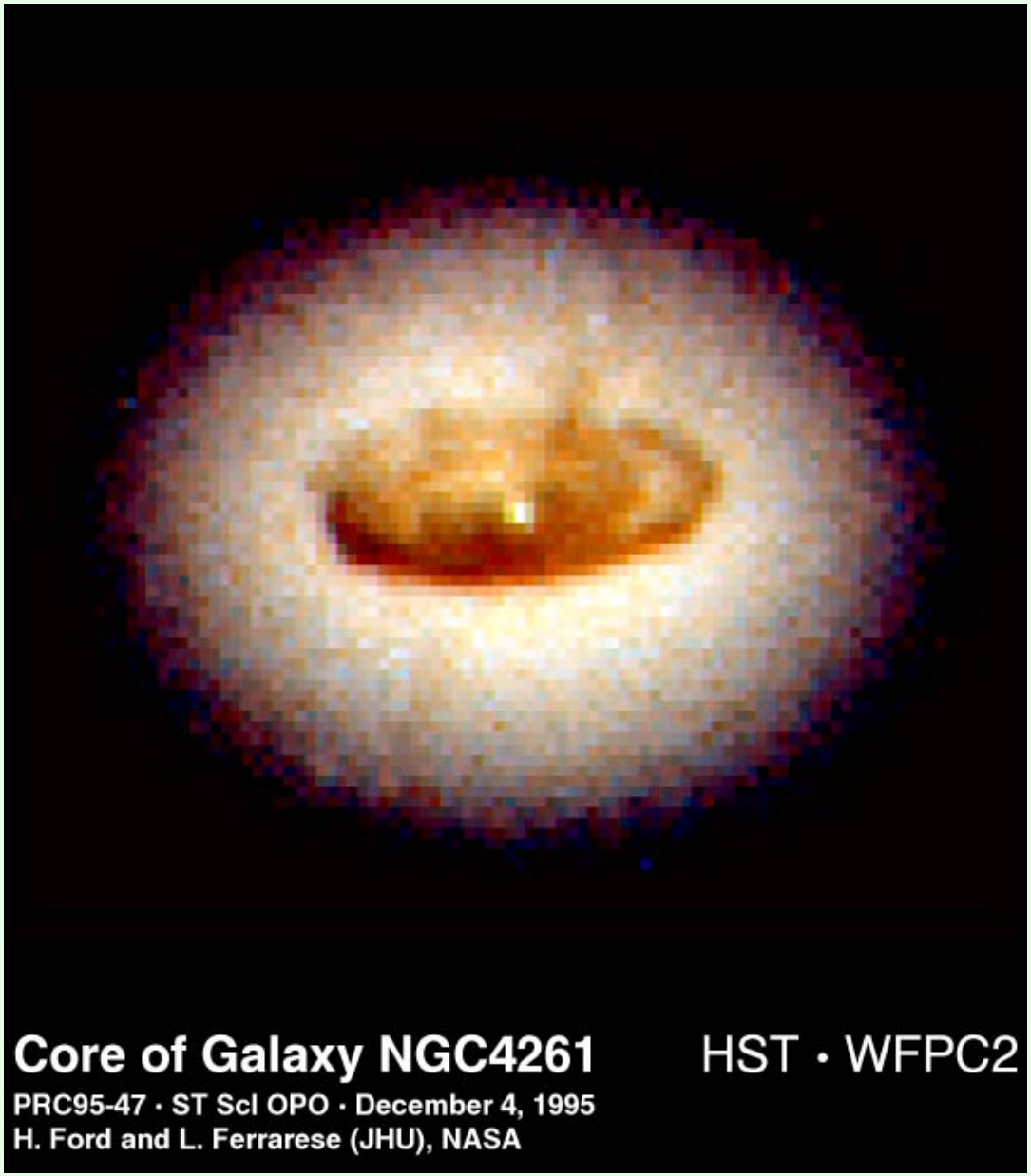

radio image with
X-ray contours
2 degrees


Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87
Hubble Space Telesc
SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE
PRC00-20 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AU
VLA 20cm
800 pc
10'
M87 = Virgo A
VLA 90cm
25 kpc
5'
VLA 2cm
400 pc
5"
HST
80 pc
1"
VLBA 2cm
0.8 pc
0"01

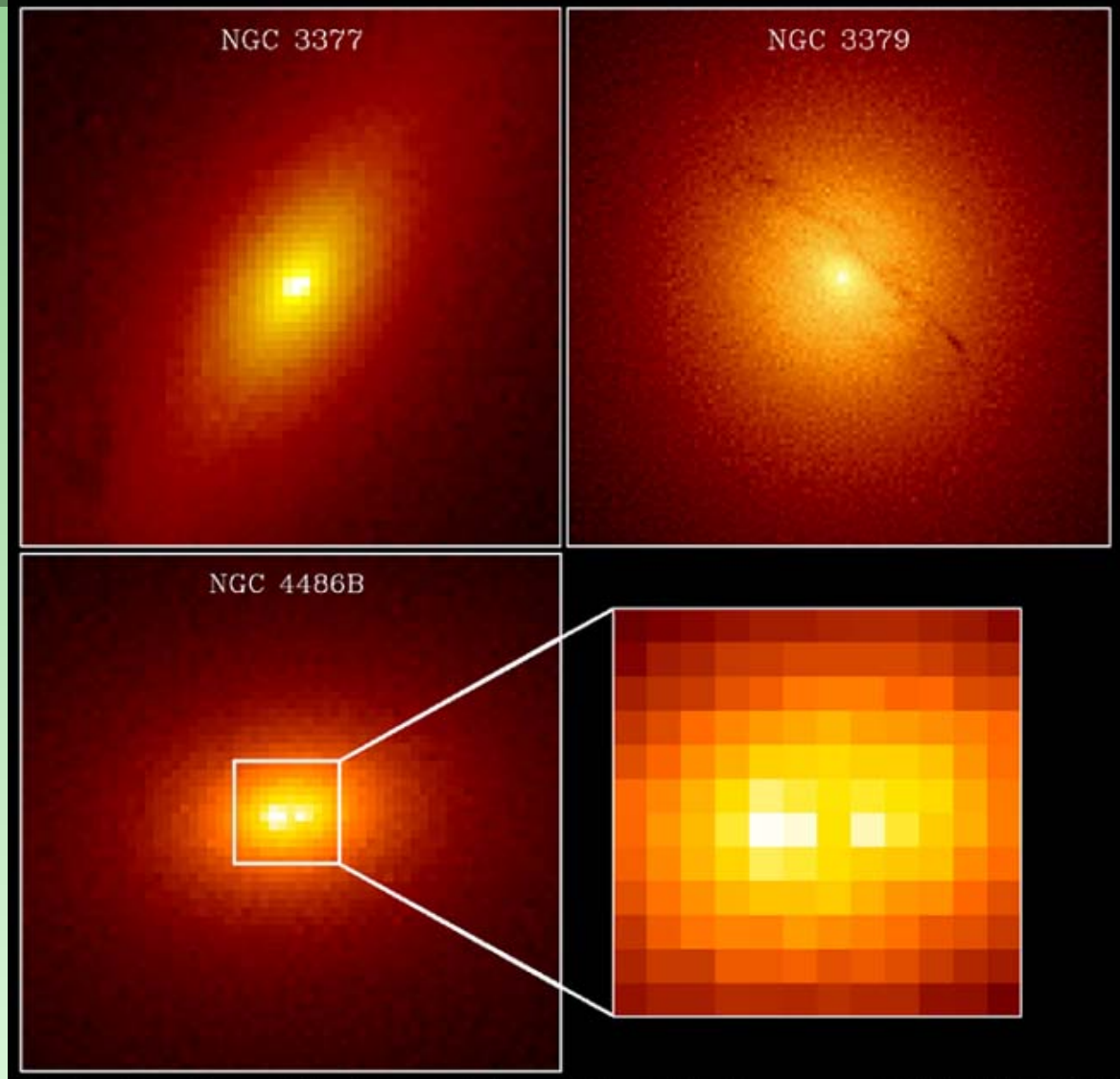

Core of Galaxy NGC 4261
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera
Ground-Based Optical/Radio Image
HST Image of a Gas and Dust Disk
380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS
1.7 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS


M87 = Virgo A
VLA 90cm
25 kpc
5


Core of Galaxy NGC 4261
Hubble Space Teles
Wide Field / Planetary C
Ground-Based Optical/Radio Image
HST Ima
380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS


Core of Galaxy NGC4261
HST • WFPC2
PRC95-47 · ST ScI OPO · December 4, 1995
H. Ford and L. Ferrarese (JHU), NASA

Core of Galaxy NGC 4261



Galaxies Possibly Containing Black Holes HST • WFPC2

PRC97-01 • ST ScI OPO • January 13, 1997 • K. Gebhardt (U. MI), T. Lauer (NOAO) and NASA

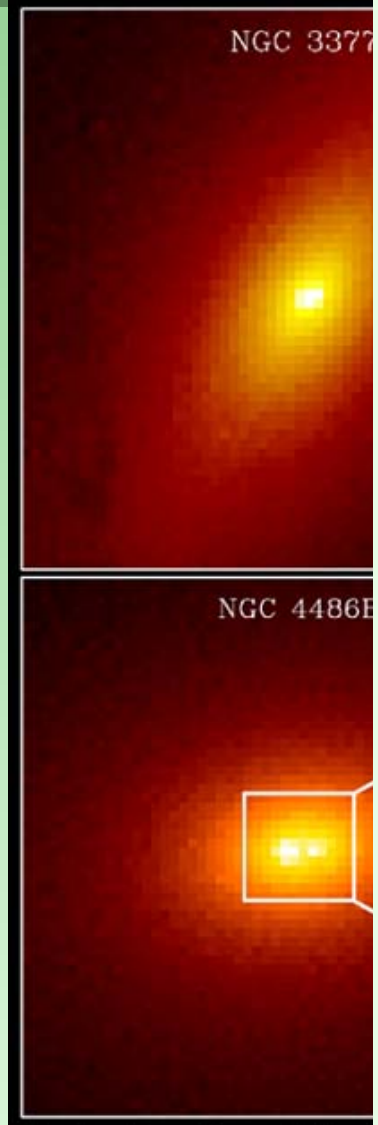
f Galaxy NGC4261 HST • WFPC2

ST ScI OPO · December 4, 1995

L. Ferrarese (JHU), NASA

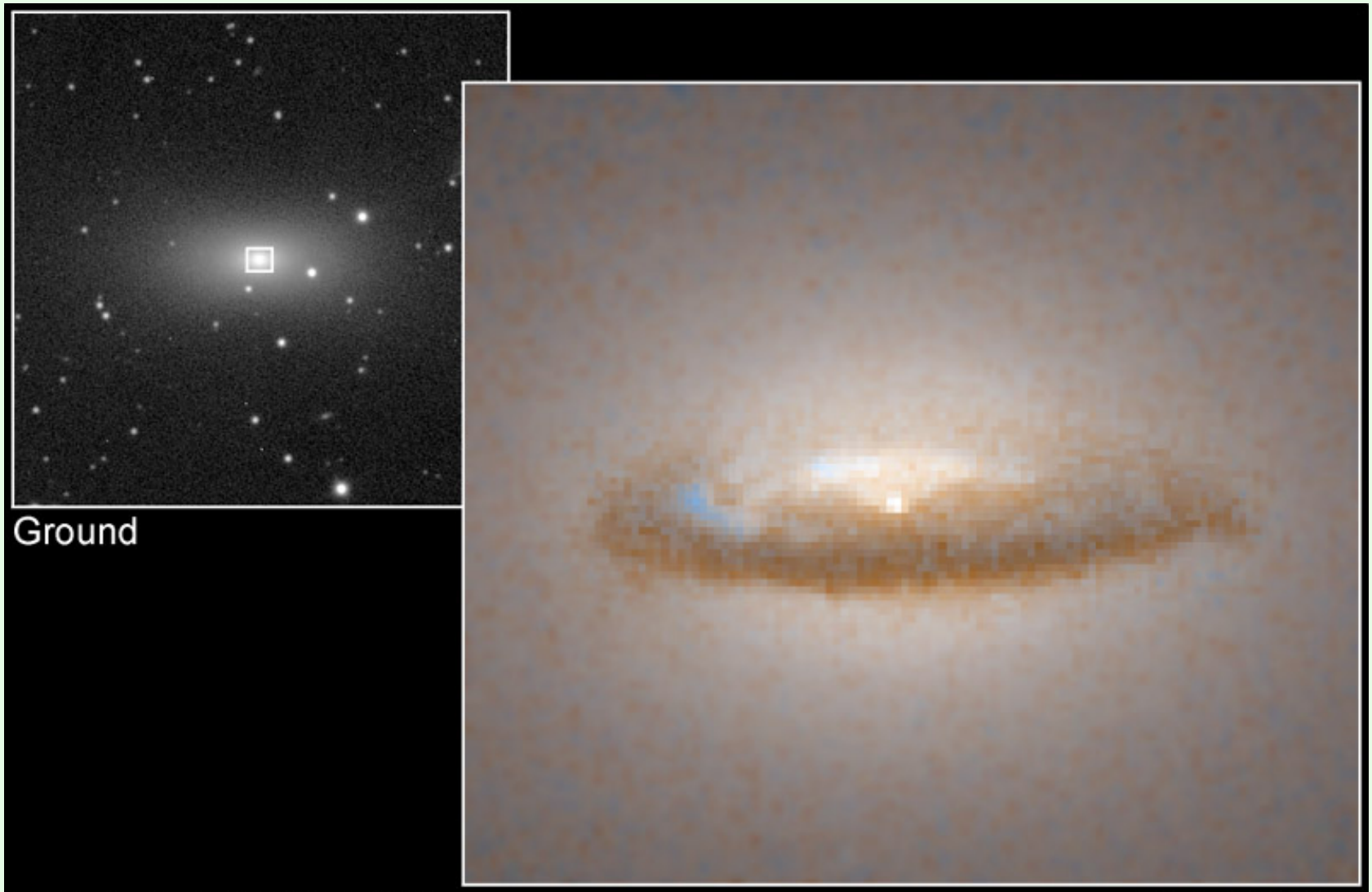
Core of Galaxy NGC 4261

M87 = Virgo A



Galaxies Possibly

PRC97-01 • ST ScI OPO • Janua



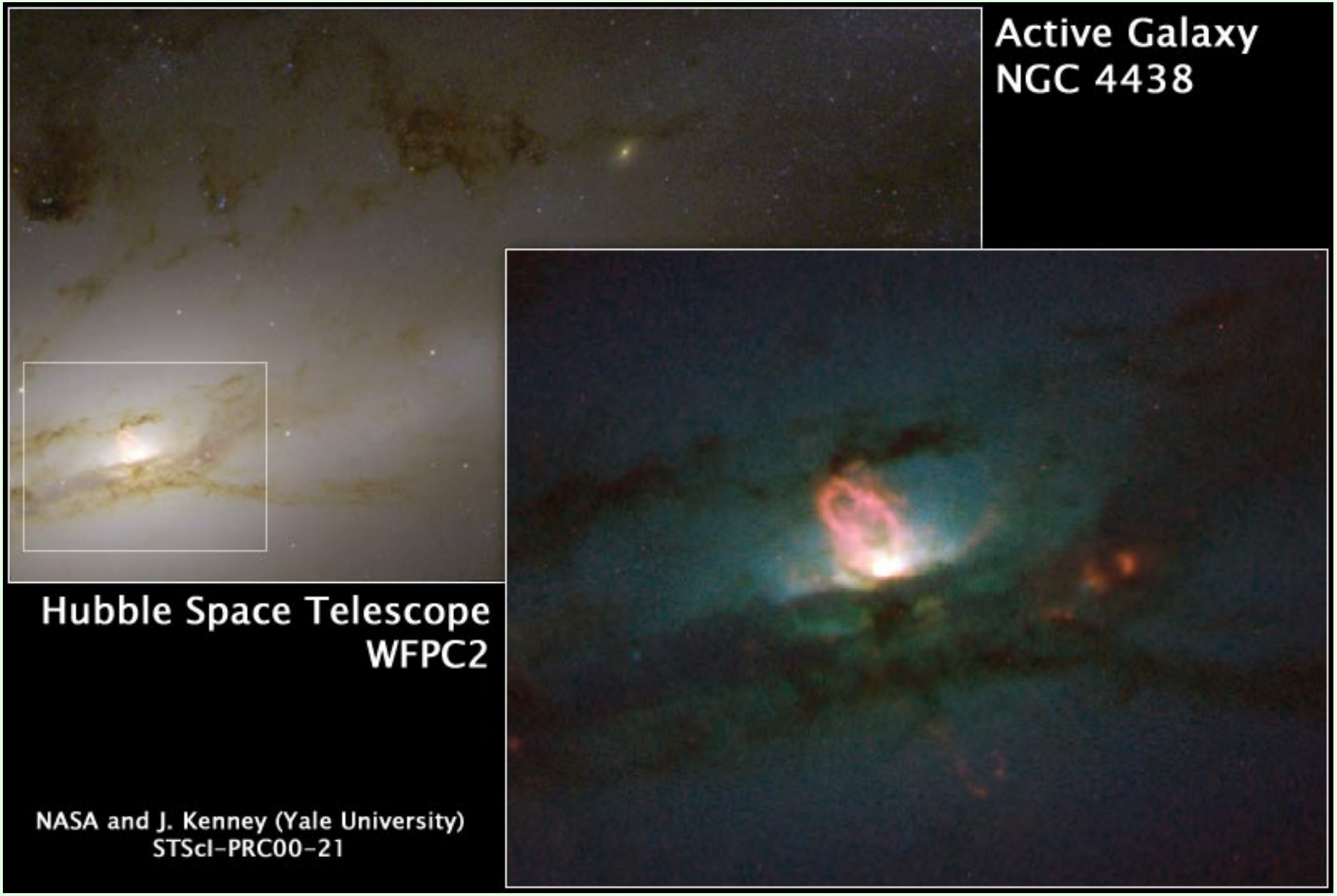
Disk in Galaxy NGC 7052

HST • WFPC2

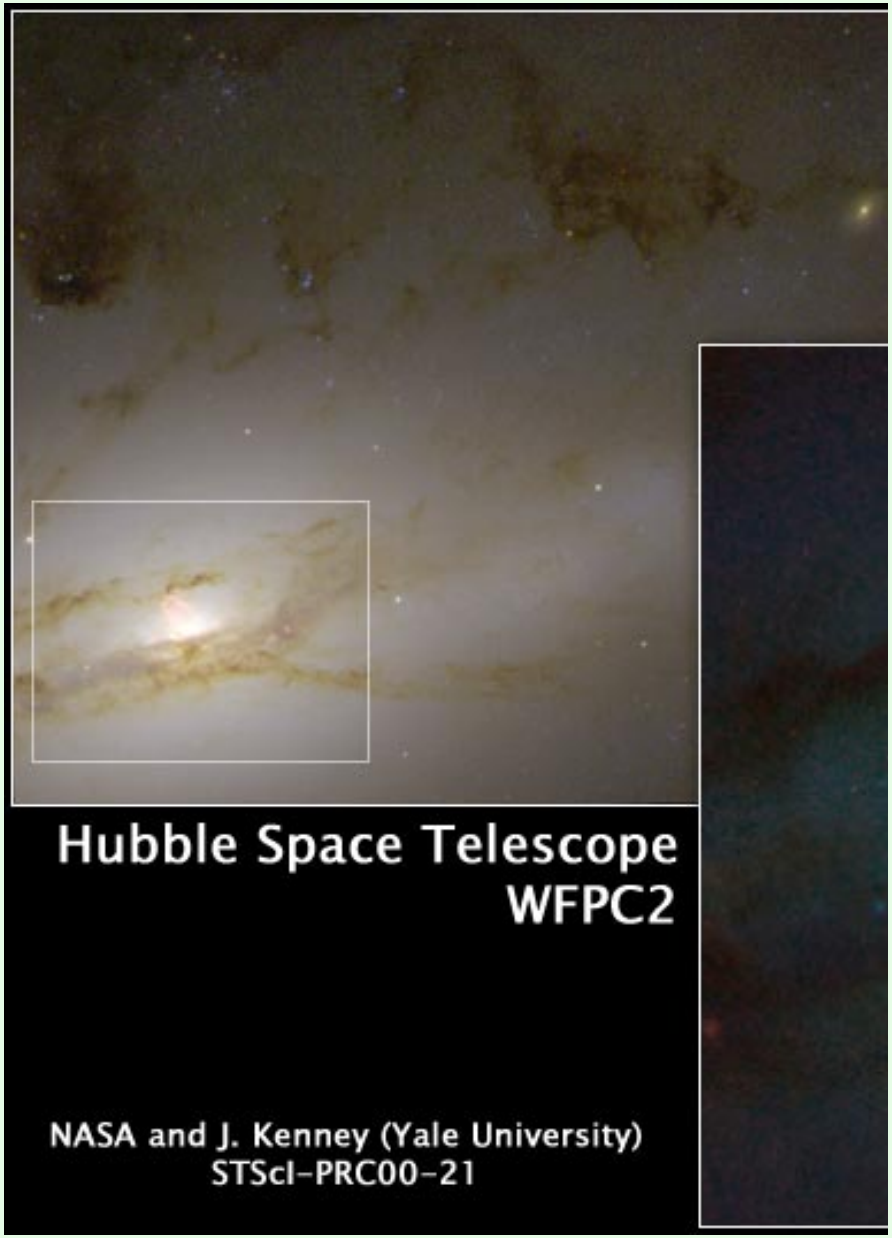
PRC98-22 • June 18, 1998 • ST ScI OPO

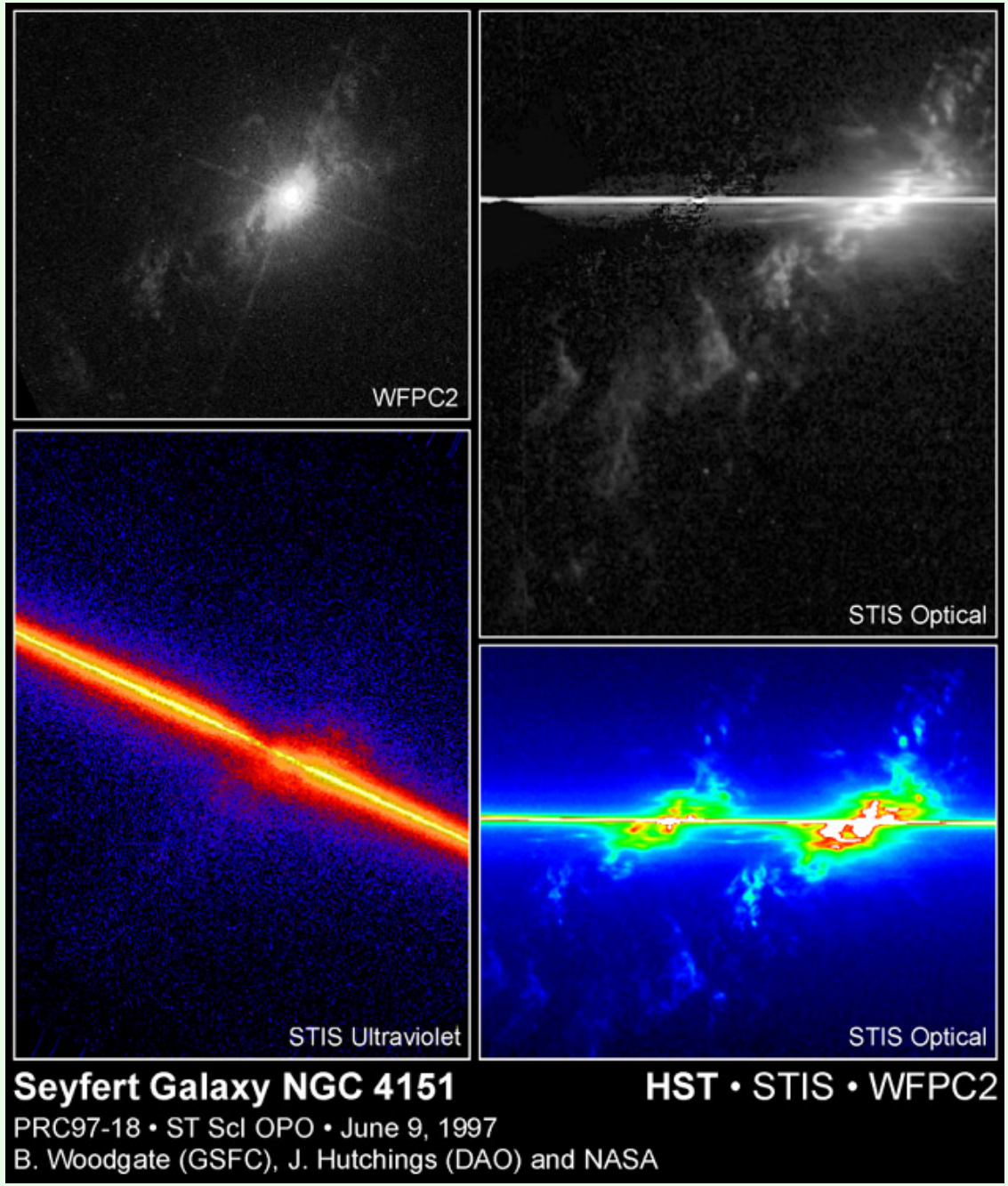
R. P. van der Marel (ST ScI), F. C. van den Bosch (University of Washington) and NASA

Core of Galaxy NGC 4261

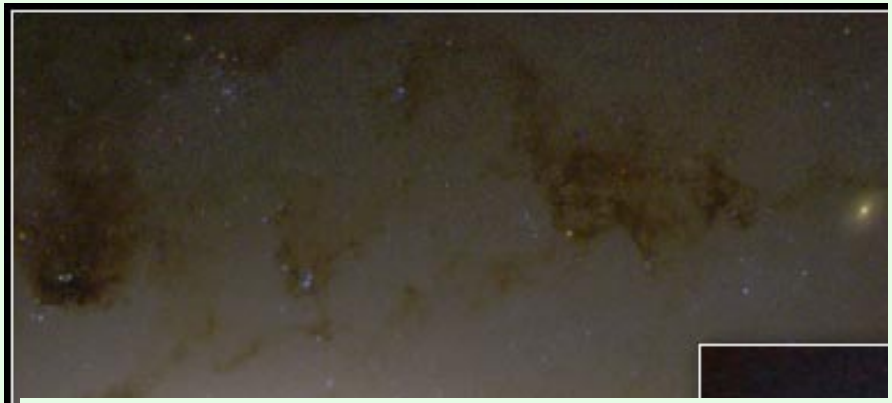


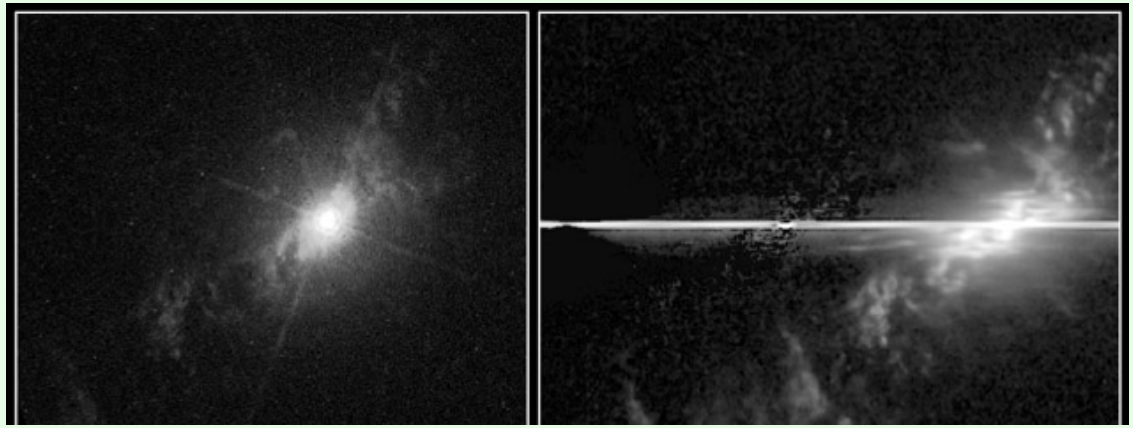
Core of Galaxy NGC 4261

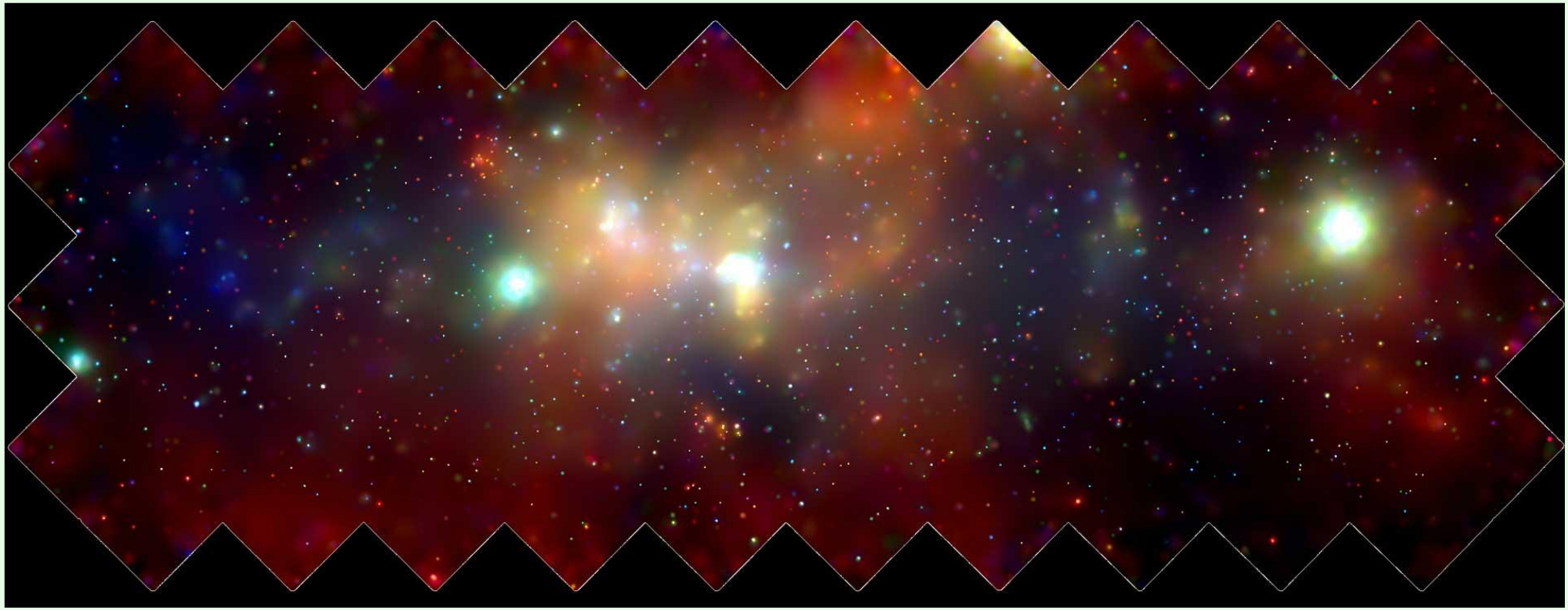




Core of Galaxy NGC 4261







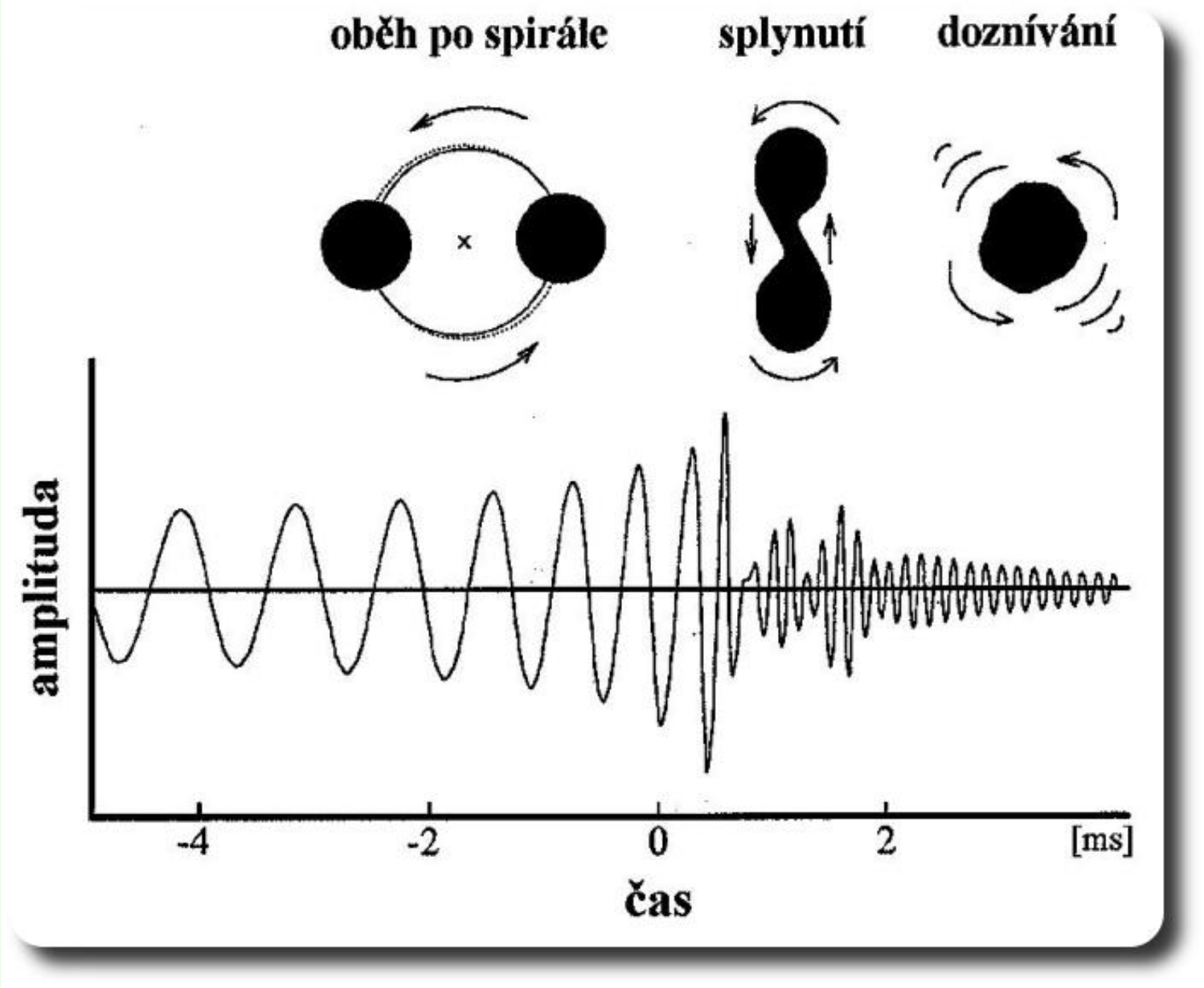
PRC97-18 • ST ScI OPO • June 9, 1997
B. Woodgate (GSFC), J. Hutchings (DAO) and NASA

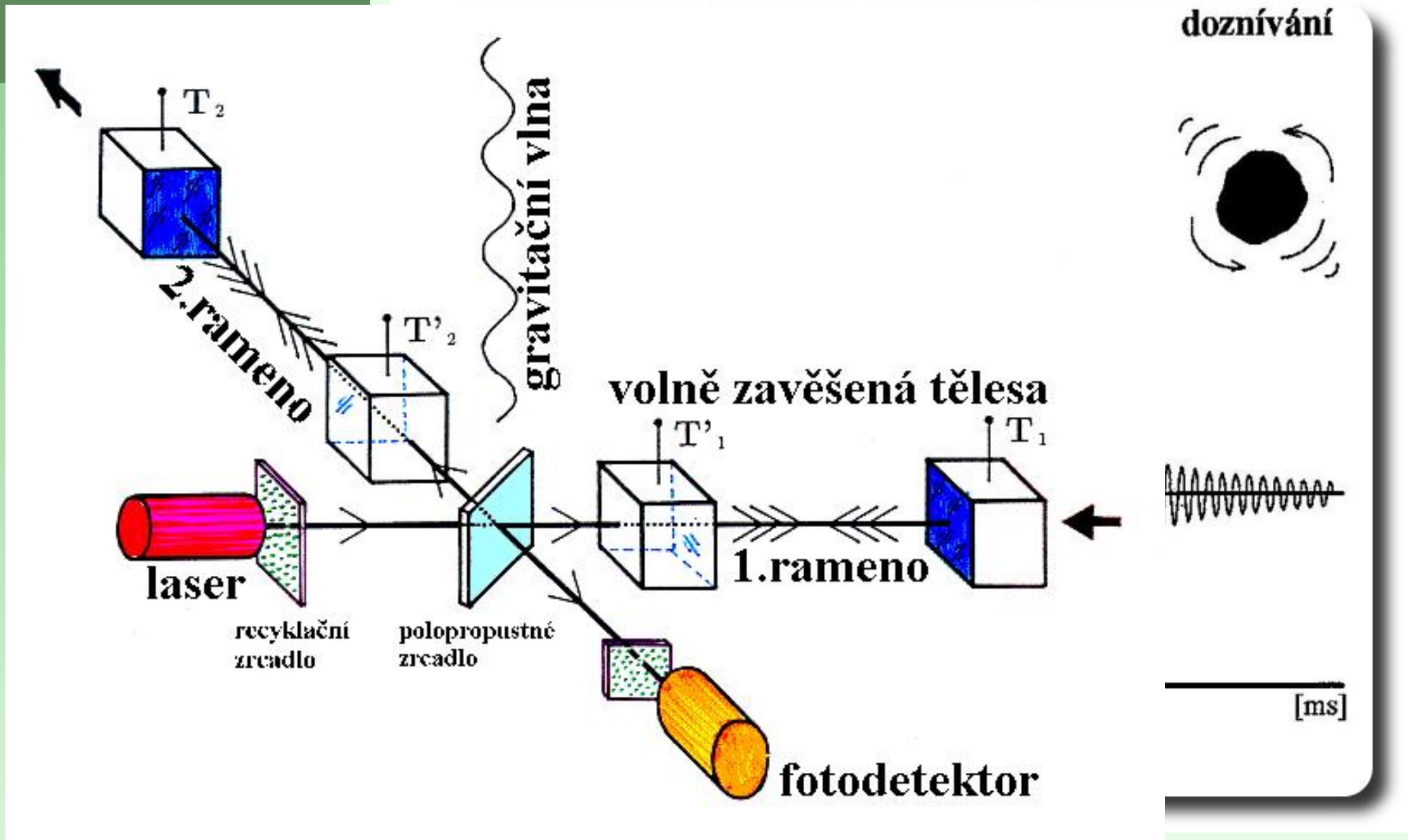
SYMFONIE ČERNÝCH DĚR

- splinutí černých děr: simulace, vyzařovány gravitační vlny; splynutí horizontů; doznívání
- urychlují přibližování černých děr, zaznamenávají historii splynutí, tvar dráhy, rotaci, vzdálenost od Země,nezkresleny mezihvězdnou hmotou; nelinearita
- pro černé díry s $M = 10\,M_\odot$ ve vzd. miliardy ly síla vln 10^{-21} (supernovy v Galaxii)
- LIGO II, Virgo by mělo dosáhnout 10^{-23}, LISA méně než 10^{-24}

SY

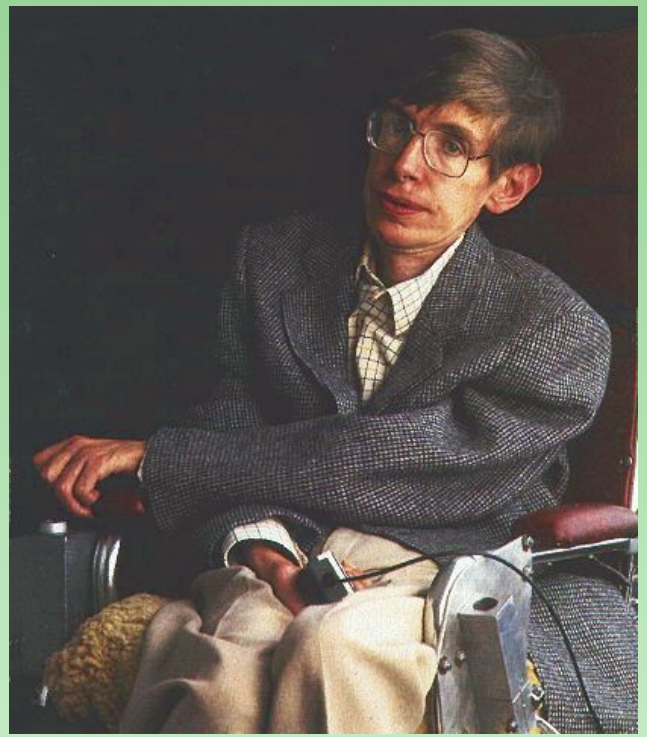
- splinutí černých
  gravitační vlny;
  doznívání
- urychlují přibliž
  zaznamenávaj
  rotaci, vzdálen
  mezihvězdnou
- pro černé díry s
  miliardy ly síla
  Galaxii)
- LIGO II, Virgo b
  LISA méně než

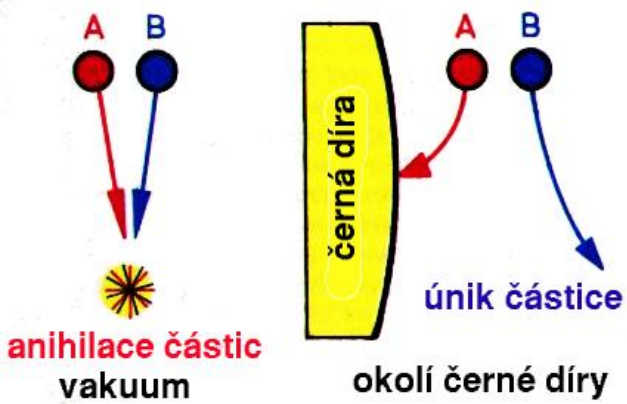



dozníváni
T 2
gravitační vlna
2.rameno
T'2
volně zavěšená tělesa
T'1
T1
laser
1.rameno
recyklační zrcadlo
polopropustné zrcadlo
fotodetektor
[ms]

VYPAŘOVÁNÍ ČERNÝCH DĚR

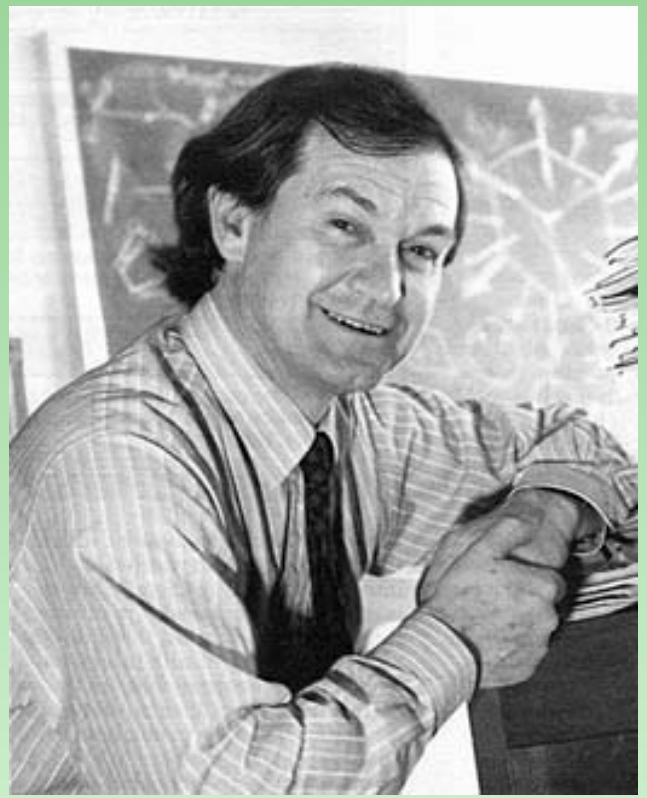
- Stephen Hawking (1970): zákon růstu plochy horizontu
- 2. věta termodynamická: ČD by mohla mít entropii, ale nezáří, entropie
- Hawking (1974): ČD vyzařují, ztrácejí energii
- entropie ČD dána logaritmem počtu způsobů jejího vzniku, při $M = 10\,M_\odot$ asi 10^{79}, vhozením do ČD se entropie v okolí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





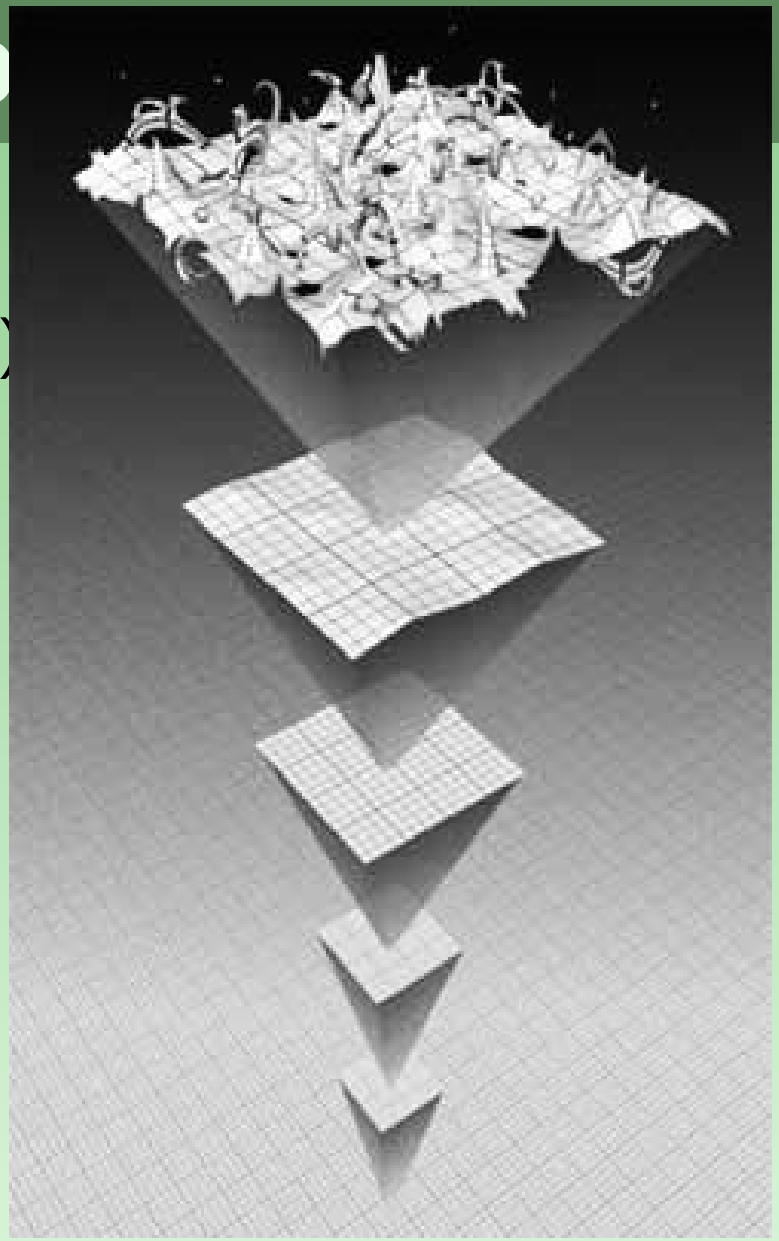
SVĚT POD HORIZONTEM

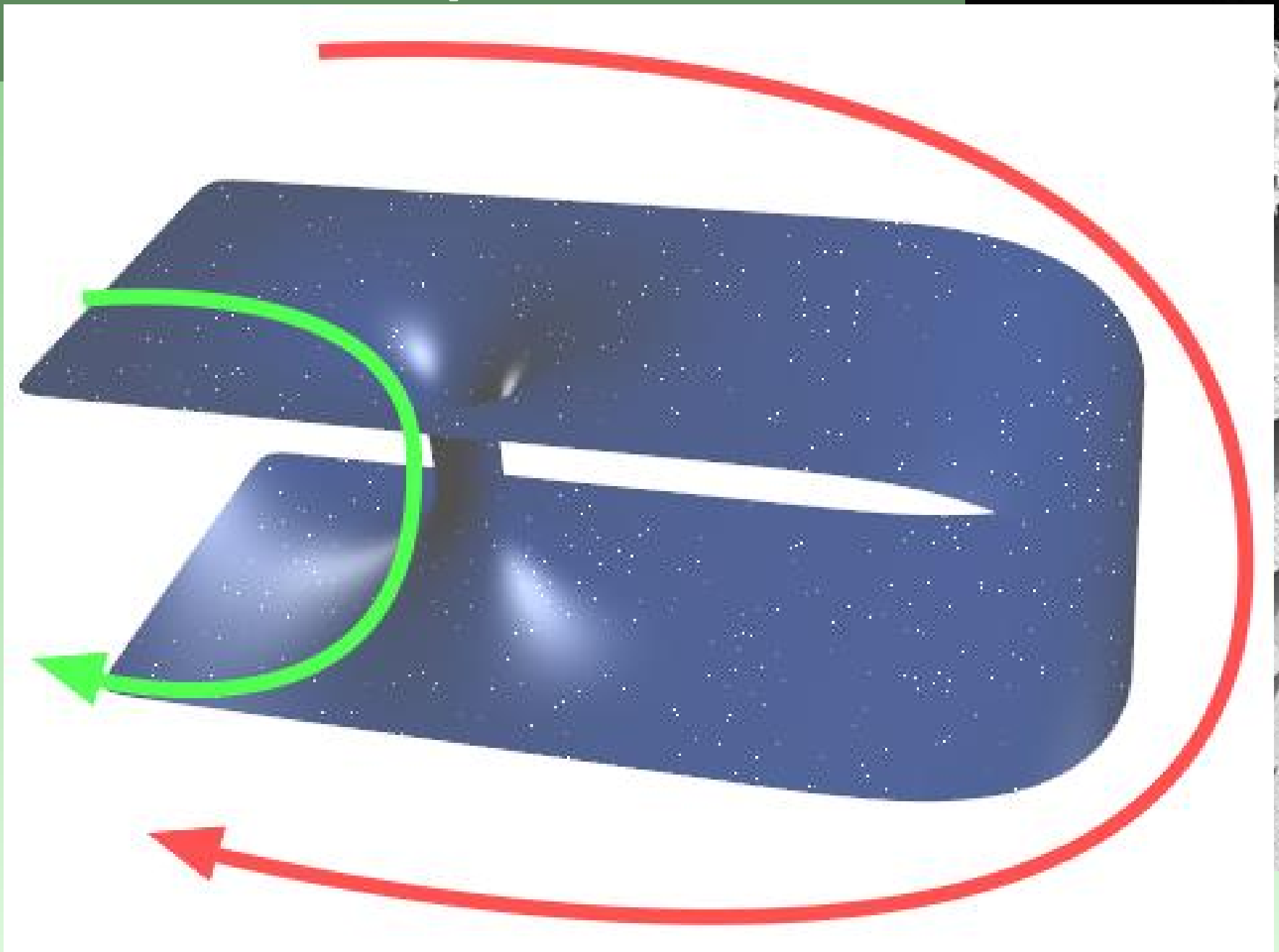
- podle OTR za singularitou nic neexistuje
- hledání kvantové gravitace (J. A. Wheeler)
- Roger Penrose (1964): každá černá díra musí obsahovat singularity
- i singularita může „stárnout“
- kvantová gravitace: oddělí prostor a čas, pravděpodobnosti křivosti a topologie
- Penrose (1969): hypotéza kosmické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



SVĚT POD HORIZO

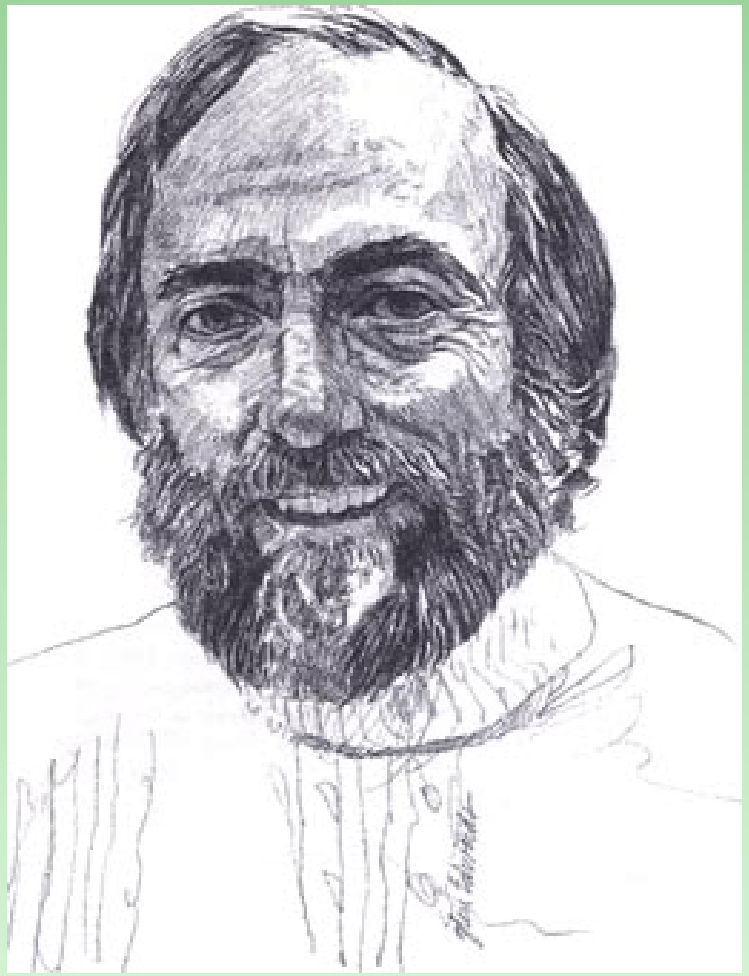
- podle OTR za singularitou nic neexistuje
- hledání kvantové gravitace (J. A. Wheeler)
- Roger Penrose (1964): každá černá díra musí obsahovat singularity
- i singularita může „stárnout“
- kvantová gravitace: oddělí prostor a čas, pravděpodobnosti křivosti a topologie
- Penrose (1969): hypotéza kosmické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





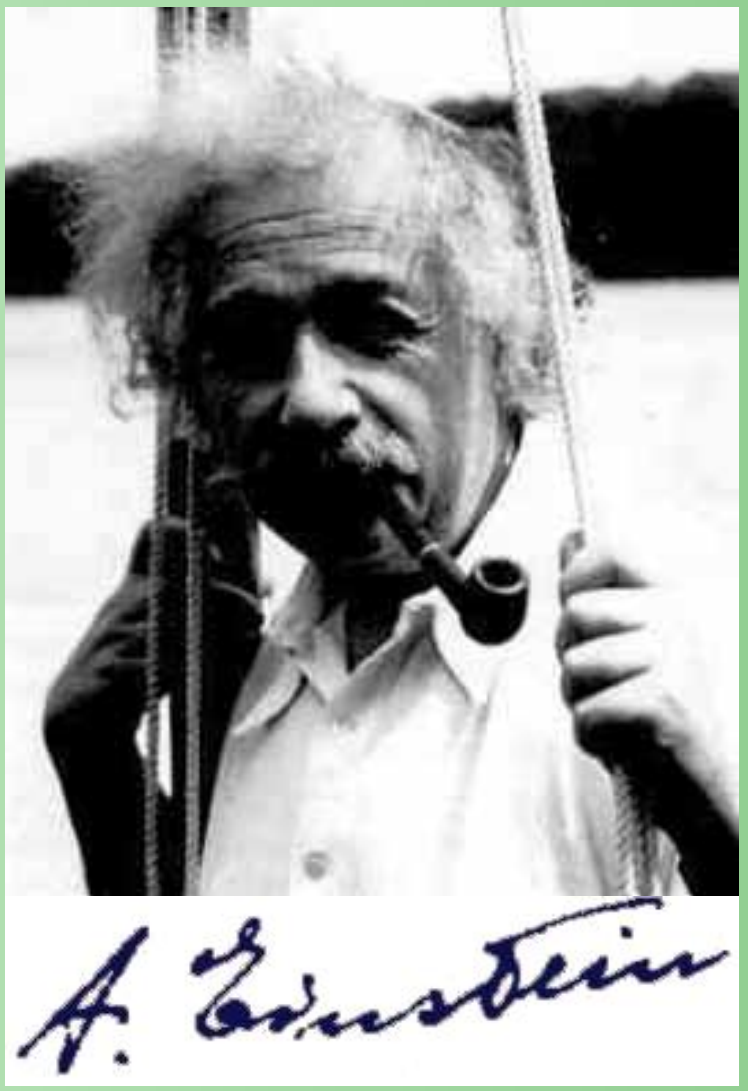
Mezi všemi výtvory lidského ducha – od jednorožců a chimér až po vodíkovou bombu – je skutečně tím nejfantastičtějším obraz černé díry, oddělené od ostatního prostoru hranicí, kterou nic nemůže proniknout, díry, jejíž silné gravitační pole ve svém smrtelném sevření zachytí i světlo, díry, která zakřivuje 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



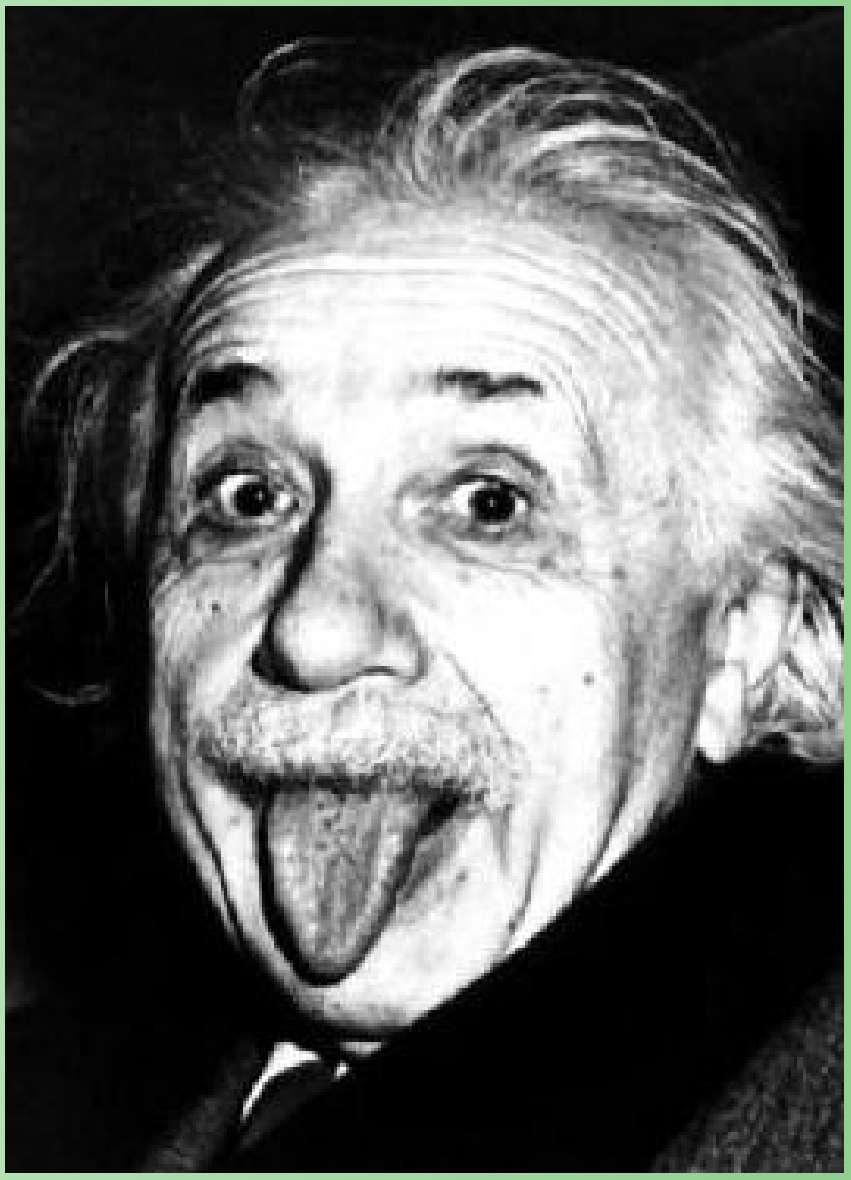
Teorie černých děr byla vytvořena dříve, než byly známy jakékoli experimentální výsledky naznačující, že černé díry skutečně existují. Neznám ve vědě jiný příklad tak dalekosáhlé úspěšné extrapolace učiněné jen na základě teoretických úvah. Ukazuje to na neobyčejnou sílu a hloubku Einsteinovy teorie.

Stephen Hawking



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



Vytvořeno programem PdfLaTeX (FoilTeX), poslední úpravy: 4. listopadu 2004