

Tajemství galaktických jader

Supermasivní černé díry v srdcích galaxií

Filip Hroch

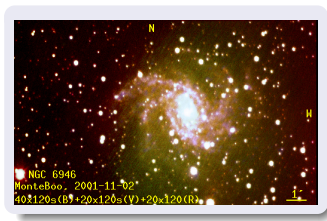
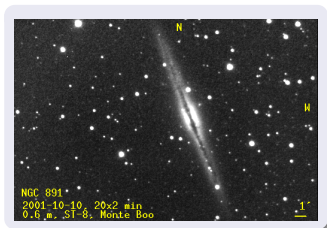
ÚTFA, MU

22. duben 2005

- 1 O čem to dneska je?
 - Popis galaxií
- 2 Galaxie – Mléčná dráha
 - S2 pozorovaná pomocí NaCo
 - Kinematika hvězd v blízkosti galaktického jádra
- 3 Masery v M 106
 - Masery v M 106
- 4 Dynamika hmoty v M 87
 - Spektra okolí jádra M 87
- 5 Dynamika jetů

Co jsou galaxie a Galaxie?

- Z pohledu pozorovatele jsou galaxie mlhoviny s určitou strukturou (“spirální mlhoviny”).
- Obecně je galaxie představována gravitačně vázanými podsystemy menších objektů (hvězdy, planety, plyn atd.).
- Naše Galaxie se na obloze zobrazuje jako Mléčná dráha.



Jedna ze světočár výzkumu galaxií

Trocha historie

- 1912, H. Leavitt našla vztah mezi periodou a zářivým výkonem u Cepheid (typ proměnné hvězdy)
- 1923, E. P. Hubble použil tento objev k odhadu vzdálenosti galaxie M31 a dokázal, že leží mimo naši Galaxii
- 1935, A. Hoffmeister objevil BL Lac
- 1943, Seyfert poprvé pořídil spektra “aktivních galaxií”
- 1963, A. Sandage rozlišuje 3c273 jako kvasar
- 1966, M. Rees popsal tzv. nadsvětelný pohyb

Detekce černých děr

- černá díra je charakterizována třemi parametry: hmota, moment impulsu, náboj
- předpoklad: reálné černé díry nejsou nabitě (vznikly z neutrální hmoty)
- základní metody detekce BH jsou měří hmotu objektu

Pozorování dráhy objektu S2

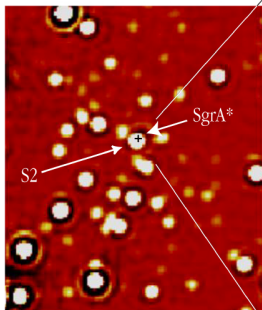
Pozorování

- dalekohled YEPUN (jeden ze čtyř 8.2 m dalekohledů VLT ESO v Chile)
- NaCo (NAOS-CONICA) je systém adaptivní optiky v blízkém infračerveném oboru ($1.6 \mu\text{m}$, $3.5 \mu\text{m}$)
- předchozí data: KECK/NIRC (10 m), NTT/SHARP (3.6 m)
- Eckart et al: MNRAS **331** 917 – 934 (2002)

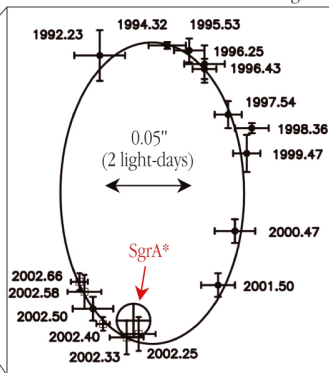


Dráha S2 kolem Sgr A*

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

Drahové elementy S2 kolem Sgr A*

Tabulka elementů

Sklon dráhy i [°]	70^{+6}_{-17}
úhlová délka přídíří ω [°]	190^{+10}_{-10}
úhlová délka výstupného uzlu Ω [°]	23^{+27}_{-11}
excentricita e	$0.8^{+0.15}_{-0.40}$
velká poloosa a [mpc]	$5.6^{+0.7}_{-1.1}$
doba průchodu přídířím T [rok]	$2002.6^{+6.8}_{-2.2}$
perioda oběhu P [rok]	$19.4^{+7.4}_{-3.0}$

Fit metodou nejmenších čtverců:

$$\sum \frac{(|\mathbf{r}_i - \mathbf{c}(t_i)|)^2}{\sigma^2} \rightarrow \min$$

Hmota Sgr A* z měření vlastního pohybu S2

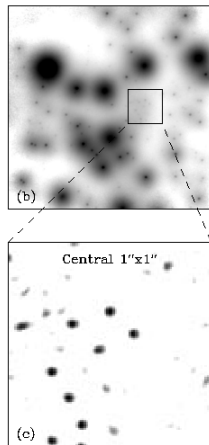
- jde o běžnou hvězdu pozdního typu
- oběžná perioda asi 20 let, peri-holum (přídíří) nastalo na jaře 2002 (oficiální názvy: perenigricon, aponigricon)
- projekce nejkratší vzdálenosti byla asi 17 světelných hodin ($3\times$ vzdálenost Slunce – Pluto)
- rychlost v přídíří byla kolem 5000 km/s (Země kolem Slunce obíhá rychlostí 30 km/s)
- hmota v ohnisku dráhy (Sgr A*) je $(5 \pm 3) \times 10^6 M_{\odot}$:

$$M_{BH} + M_{S2} = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{P^2}$$

Určení hmoty jádra z pohybů skupiny hvězd

Kinematika hvězd v okolí Sgr A*

- měření poloh objektů v blízkém IR oboru s KECK po dobu několika let
- 90 hvězd, známe projekce rychlostí a vzdáleností
- Ghez et al: ApJ **509**, 678-686 (1998)



Rychlosti

Jak to vypočít

- zachování energie dává odhad minimální hmoty centrálního tělesa

$$M_{\min} = \frac{v^2 R}{2G}$$

- přesnější odhad dostaneme použitím viriální hmoty

$$M_{\text{vir}} = \frac{3\pi}{2G} \frac{\langle v^2 \rangle}{\langle 1/R \rangle}$$

Projekce rychlosti u Sgr A*

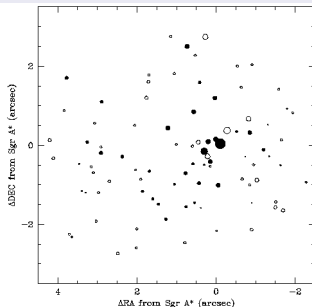


FIG. 4.—Positions of the 90 stars that were unambiguously detected in all 3 years are displayed with point sizes scaled to the velocities of the stars. Proper-motion measurements with signal-to-noise ratios of at least 4 are plotted as filled points. A clear increase in the velocities is visible at the field center, where stars reach velocities of 1400 km s^{-1} .

Časové změny poloh a rychlostí hvězd - I. díl.

Viriál

- popis statistického souboru pohybů a poloh hvězd je založen na jejich polohách \mathbf{r}_i a hybnostech \mathbf{p}_i ,
- definujeme veličinu $G \equiv \sum \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r}_i$ jako míru středních hodnot poloh a rychlostí hvězd
- běžnými upravami dojdeme k časové změně $dG/dt = 2T + \sum \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i$ kde kinetická energie je $T = 1/2 m_i v_i^2$
- pro centrální pole a částici obíhající periodicky nebo je pokud perioda mimořádně dlouhá a G konečné číslo:

$$\text{pro } G \ll P : \frac{1}{P} \int_0^P \frac{dG}{dt} dt \rightarrow 0$$

Časové změny poloh a rychlostí hvězd - II. díl.

Viriál - pokračování

- uvažujme jak se tato veličina bude v průměru měnit s časem

$$\left\langle \frac{dG}{dt} \right\rangle = 2\langle T \rangle + \sum \langle \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i \rangle$$

- pro pro případ potenciálu $F = \nabla V$ s $V \sim r^{n+1}$ je $F \sim r^n$ a tedy pro gravitační sílu platí viriálový teorém

$$\langle T \rangle = -\frac{1}{2}\langle V \rangle$$

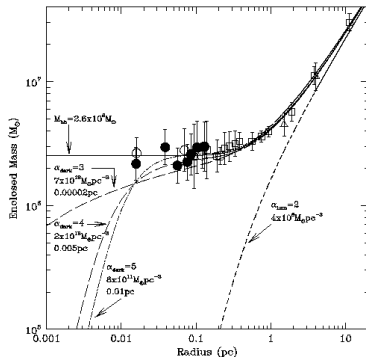
- z hlediska viriálu je ekvivalentní úplný oběh jedné hvězdy kolem centra nebo různé objekty v jednom čase

Odhad hmoty Sgr A*

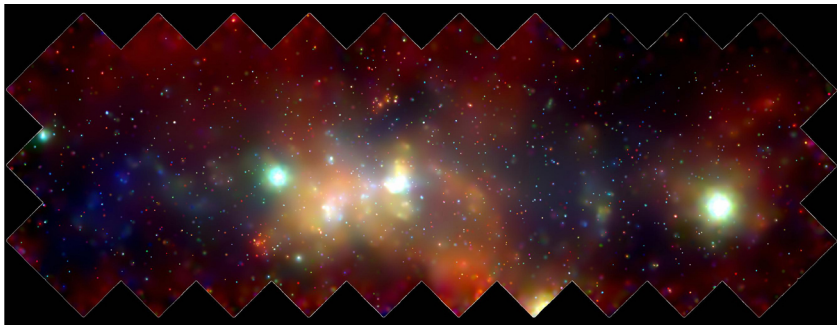
Hmota Sgr A*

- minimální hmota
 $M_{\min} = (2 - 3) \times 10^6 M_{\odot}$
- viriálová hmota
 $M_{\text{vir}} = (2.5 \pm 0.2) \times 10^6 M_{\odot}$ v
 oblasti menší než 0.23 pc
- vzdálenost Slunce — Proxima Centauri je asi 1.3 pc

Měření hmoty Sgr A*



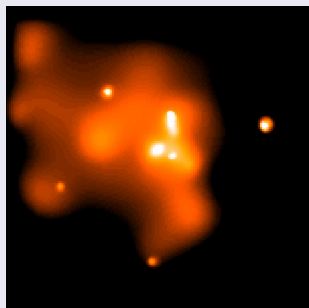
Okolí Galaktického centrum z družice Chandra



Mozaika 900 na 400 světelných let okolí Galaktického centra v pseudobarvách složených z několika kanálů X záření.

Galaktické centrum z družice Chandra

Bezprostřední okolí centra

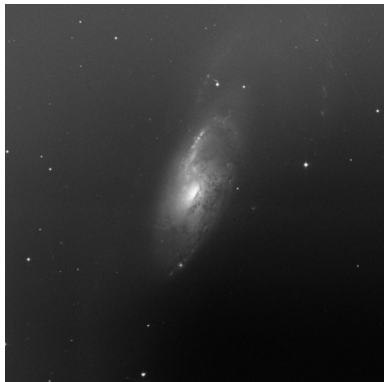


Snímek centra Galaxie o straně přibližně 10 ly pomocí X-ray přístroje ACIS (5 – 10keV) satelitu Chandra.

M 106

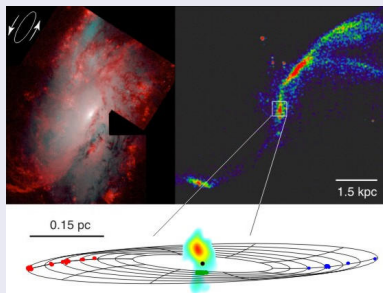
M 106

- vzdálenost 7 Mpc
- systematická rychlost 472 ± 4 km/s
- VLBI mapa z rádiové syntézy H_2O maserů
- mechanismus vzniku mega-maserů není objasněn
- Greenhill et al.: ApJ **440** 619-627 (1995)

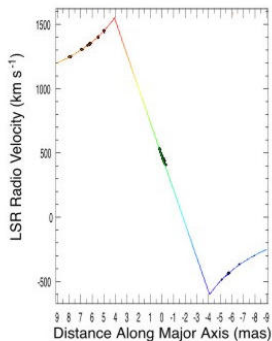


Masery

Rádiové snímky



Závislost rychlosti na poloze



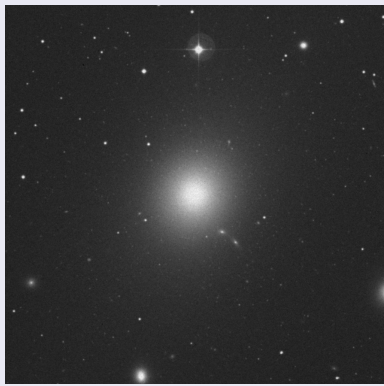
Hmota M 106

Tajemství centra M 106

- masery mají izotropní svítivosti $10^2 - 10^4 L_{\odot}$
- vnitřní poloměr disku je asi 0.15 pc
- hmota je $\sim 10^7 M_{\odot}$

Galaxie M 87 z pozemských dat

M87

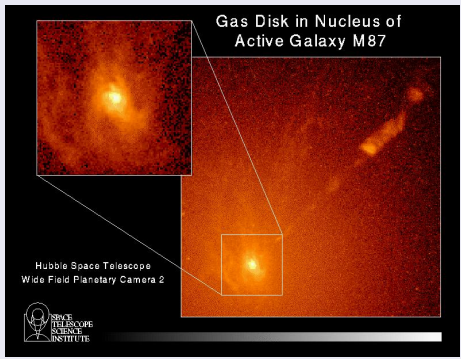


Pozorovací údaje

- srdce kupy galaxií v Panně
- aktivní galaxie
- vzdálenost 15 Mpc

Jet v M 87

M87

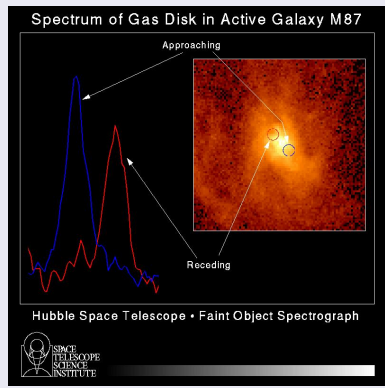


Aktivita M 87

- snímek centra z HST přes $H\alpha + [N II]$ filtr
- výtrysk z jádra – jet
- v centru je disk

Spektroskopie disku M 87

Spektra z okolí jádra



spektra M 87

- snímek centrálního disku z HST
- spektrální čáry jsou posunuté v závislosti na tom, kde pořizujeme spektrum
- posunutí $\Delta\lambda$ je úměrné rychlosti materiálu

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (v \ll c)$$

Spektroskopie disku M 87

Spektroskopie okolí jádra M 87

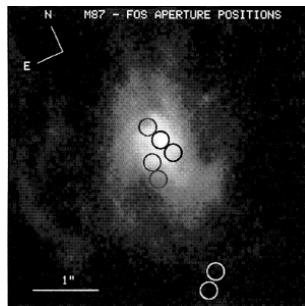
- Harms et al.: ApJ **435**, L35-L38 (1994)
- byl použit Faint Object Spectrograf (FOS), 1000 – 6000 sec expozice
- odečteno kontinuum přes $H\alpha$ a [N II] filtr
- zjištěny polohy význačných emisních čar v různých místech vůči jádru
- nejsilnější čáry: [O III] 5007 Å, [N II] 6584 Å

Odhad hmoty jádra M 87

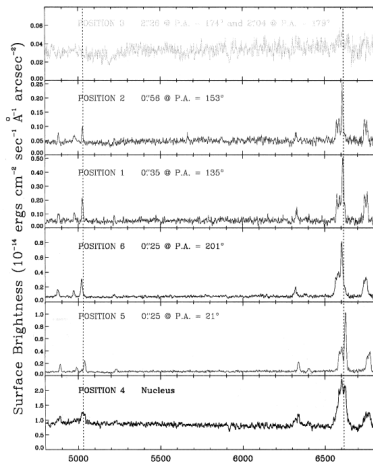
Rychlost v různých bodech

$$v_k^2 = \frac{GM_C}{R_k} \frac{\sin^2 i \cos^3 i}{\cos(\theta + \theta_k) [\cos^2 i + \tan^2(\theta + \theta_k)]^{3/2}}$$

sklon dráhy i	$42^\circ \pm 5^\circ$
poziční úhel θ	$1^\circ < \theta < 14^\circ$
hmota centra M_C	$(2.4 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$



Spektra disku M 87



Tajemství centra M 87

Tajemství centra M 87

- nerozlišený netermální zdroj s jasem koncentrovaným do středu
- velikost není větší než 1 pc
- hmota je $\sim 10^9 M_{\odot}$

Jetý

Základní vlastnosti

- Vznik a fungování jetů z center galaxií není dosud plně objasněné.
- Měřený tok energie dopadající na Zem je často srovnatelný s tokem od mateřské galaxie
- V jetech musí existovat mechanismus který jej zásobuje energií a je schopen ji distribuovat podél celého “těla” (čas za který klesne svítivost na polovinu je díky mimořádně malé hustotě několik dnů).
- Existence jetů je pravděpodobně největší důkaz existence černých děr.

Blandford – Znajek mechanismus

Stručná charakteristika

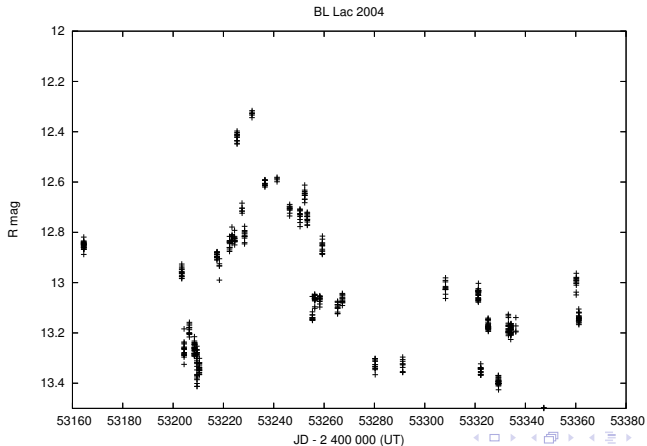
- Blandford, Znajek: MNRAS **179**, 433-456 (1977), Blandford, Payne: MNRAS **199**, 883-903 (1982)
- výpočet struktury magnetického pole kolem rotující černé díry
- jako medium pro interakci je disk v rovníkové rovině
- *magnetické pole nemá dipólový charakter*
- jedním z možných řešení jsou jety z pólů magnetického pole
- pokud míří jet na nás, pozorujeme tzv. blazary

Magnetohydrodynamický relativistický model jetu

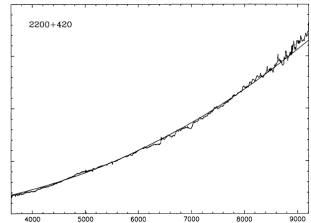
Základní vlastnosti

- parametry: $M_{BH} = 10^8 M_{\odot}$, vnitřní poloměr disku $10r_g$ ($r_g = GM/c^2$)
- typické řešení: $B \sim 10^4$ Gauss (mag. pole na povrchu disku), $\dot{M} \sim 10^{-4} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ (hmota potřebná na udržení mechanismu v chodu), $L \sim 10^{42} \text{erg} \cdot \text{sec}^{-1}$ (celková vyzařovaná energie), $\langle v_{\infty}/c \rangle \sim 0.5$ (asymptotická rychlost hmoty v jetu)

BL Lac – světelná křivka jetu



BL Lac – snímek v optickém oboru a spektrum



Důležitá fakta

- objekty ve vesmíru se sdružují do galaxií
- v centru (některých) galaxií jsou černé díry
- metody měření hmot BH: dráha objektu, spektrální posun čar, kinematika hvězdokupy
- černé díry produkují jety