

# Kroužíme kolem černé díry?

O tom, co skrývají centra galaxií

F. Hroch

ÚTFA MU, Brno

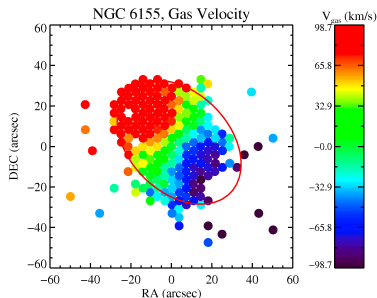
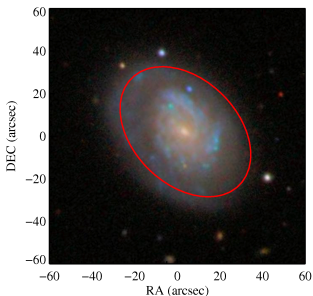
26. březen 2015

## Kroužíme kolem černé díry?

- Jak zkoumat neviditelné objekty?
- Specifika černých děr
- Objekty trůnící v centrech galaxií
- Galaxie v pohybu
- Zvrat na závěr

# Černá díra

Neviditelná, ale přitahující



- světlo – gravitace
- množství fotonů – rychlost pohybu
- oči, fotografie – tachometr, posuv čar
- obrázky – rychlostní mapy

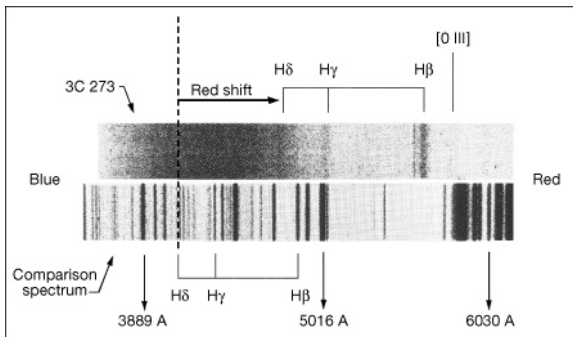
# Měření rychlosti

Dopplerův jev

- Změna vlnové délky

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$v$  je radiální rychlost objektu,  $\lambda$ ,  $\lambda_0$  vlnové délky,  $c$  rychlost světla (platí pro menší rychlosti).

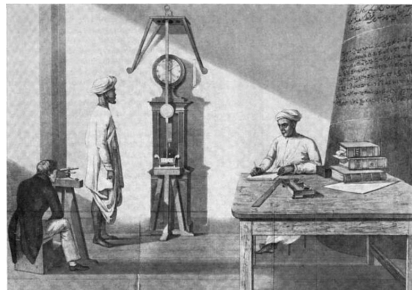
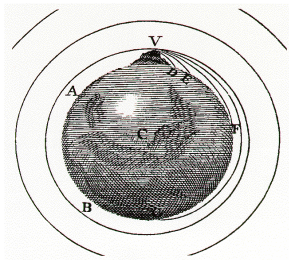




# Detekce neviditelné hmoty

## Mapování gravitačního potenciálu

- testovací částice – zaznamenáváme polohu a rychlost  $v$
- na Zemi: pružina (síla), volný pád (čas), kyvadlo (perioda)
- Sluneční soustava: sondy, smetí (zpoždění signálů)
- vzdálený Vesmír: pouze rychlost a poloha



# Gravitační potenciál a rychlost I.

Planety, hvězdy

- gravitační pole je popsáno potenciálem  $V(r)$  (souvisejícím s energií a prací)

$$V(r) = -G \frac{M}{r}$$

( $M$  je hmota tělesa,  $r$  vzdálenost,  $G$  gravitační konstanta)

- Oběžná rychlost tělesa:

$$v^2 = G \frac{M}{r}$$

- Hmota tělesa (měříme rychlost  $v$  ve vzdálenosti  $r$ ):

$$M = \frac{r}{2G} v^2$$

## Gravitační potenciál a rychlost II.

### Keplerova úloha

Pro dvojici částic s pohybem v souřadnicích  $r, \varphi$  je efektivní potenciál

$$V_{\text{eff}}(r) = -G \frac{M}{r} + \frac{L^2}{2mr^2}$$

(gravitační potenciál + geometrická vazba)

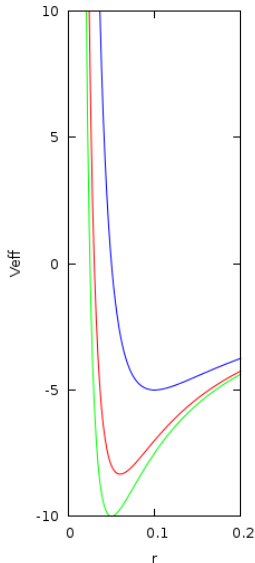
- Keplerův zákon

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

$P$  je perioda,  $a$  velká poloosa elipsy

- Měřením velké poloosy  $a$  a periody  $P$

$$M = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{P^2}$$



# Gravitační potenciál a rychlost III.

Pohyb kolem černých děr

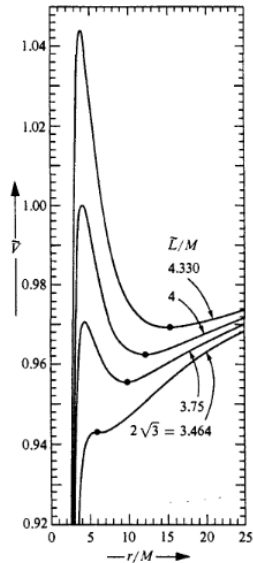
- Efektivní potenciál nerotující černé díry

$$V_{\text{eff}} \sim \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) \left(c^2 + \frac{L^2}{2mr^2}\right)$$

- Schwarzschildův poloměr

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 3\text{km}/M_{\odot}$$

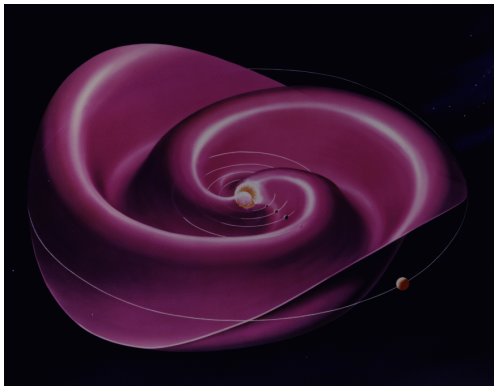
- Rychlost ani hmotu nelze vyjádřit jednoduchým vztahem.



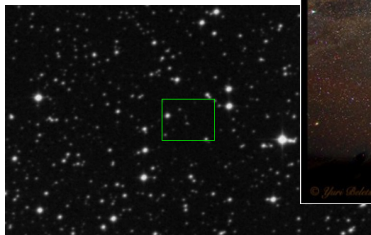
# Detekce černých děr

V centrech galaxií či jinde

- černá díra je charakterizována: hmotou, moment hybnosti, náboj
- předpoklad: reálné černé díry nejsou nabité
- základní metody odhadují hmotu objektu
- přesná metoda mapuje prostoročas okolí objektu

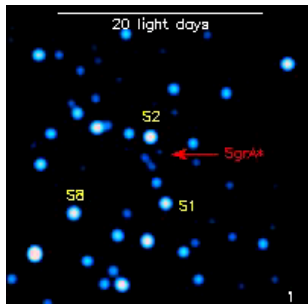


## Střed Mléčné dráhy v oblacích

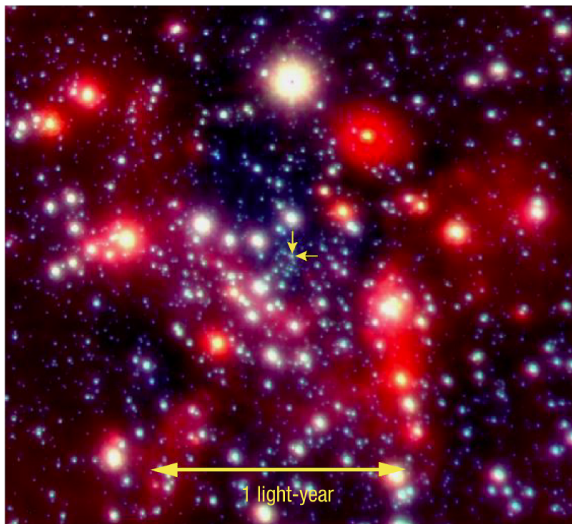


## Infračervené oči ESO

- R.Genzel & spol.
- <http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/>
- pozorování od roku 1990
- vlnové délky: 1.6, 2.2 a 3.8  $\mu\text{m}$
- lokalizace díky vzplanutí



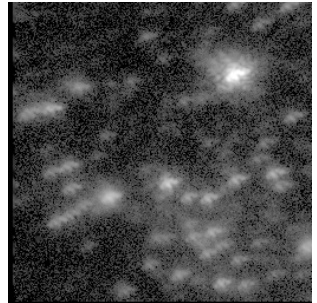
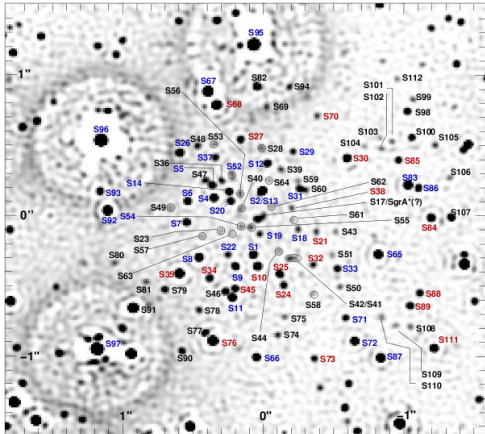
Za mlhou ...



The Centre of the Milky Way  
(VLT YEPUN + NACO)



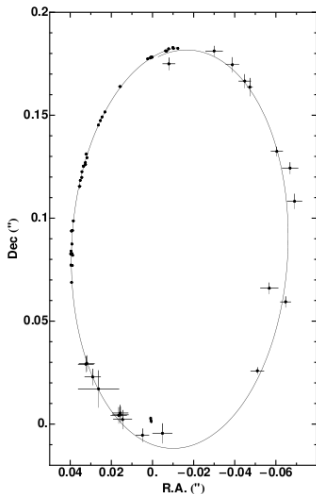
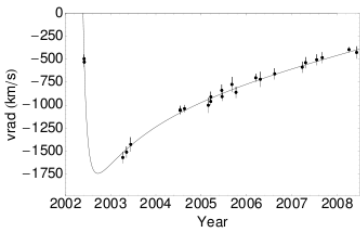
... a turbulencemi



# Dráha S2

Gillessen et al.: ApJ, **692**, 1075–1109 (2009)

- běžná hvězda
- perioda 15 let
- perinigricon (přídíří)  
17 světelných hodin
- obíhá po elipse



## Kolem čeho kroužíme?

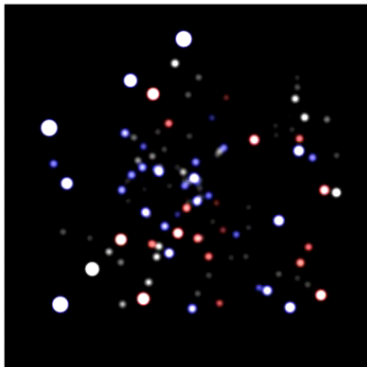
### Klíčová fakta o galaktickém centru

- hmota

$$(4.31 \pm 0.36) \times 10^6 M_{\odot}$$

- distance

$$8.33 \pm 0.17 \text{ kpc}$$



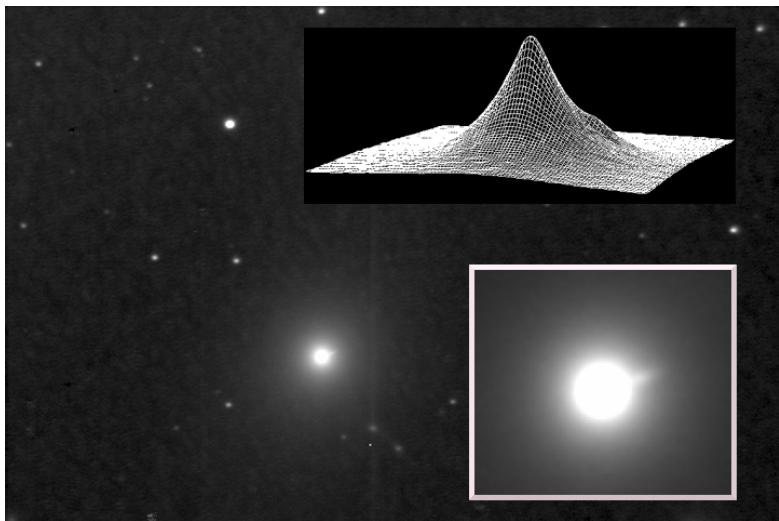
## Úvahy o centrálním tělesu

- Schwarzschildův poloměr

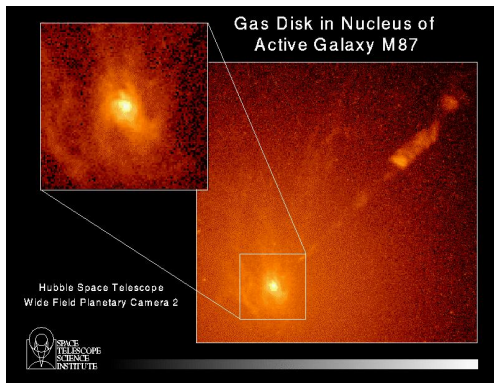
$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 3\text{km}/M_\odot$$

- pro  $4 \cdot 10^6 M_\odot$  je  $r_s \approx \cdot 10^7$  km ( $100 \times R_\odot = 10$  AU)
- nejbliže 17 světelných hodin (=130 AU, Pluto nejdál 50 AU)
- hustota  $> 10^3$  g/cm<sup>3</sup>
- hustota pro NS:  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> (voda, Slunce)
- hustota pro WD:  $10^6$  g/cm<sup>3</sup>
- olovo: 11 g/cm<sup>3</sup>

## M 87 — srdce kupy v Panně

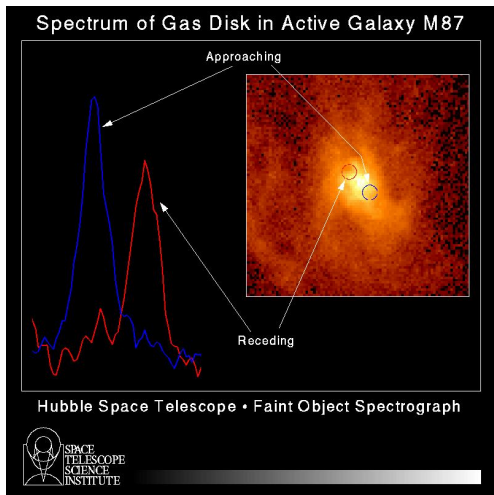


## Aktivní jádro M 87



- aktivní galaxie
- vzdálenost 15 Mpc
- snímek centra z HST přes  $H\alpha + [N II]$  filtr
- výtrysk z jádra – jet
- v centru je disk

# Spektroskopie disku 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

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

## Jádro M 87

Harms et al.: ApJ **435**, L35-L38 (1994)

- Faint Object Spectrograf (FOS),  
1000 – 6000 sec
- odečteno kontinuum přes  $H\alpha$  a  
[N II] filtr
- čáry: [O III] 5007 Å, [N II] 6584 Å
- sklon dráhy  $42^\circ \pm 5^\circ$
- poziční úhel  
 $1^\circ < \theta < 14^\circ$
- hmota centra  
 $(2.4 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$

### Klíčová fakta o centru M 87

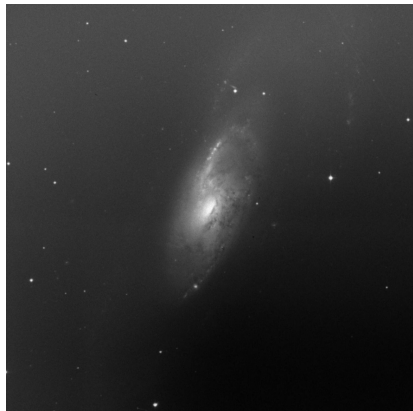
- nerozlišený netermální zdroj s jasem koncentrovaným do  
středu
- velikost není větší než 1 pc
- hmota je  $\sim 10^9 M_\odot$



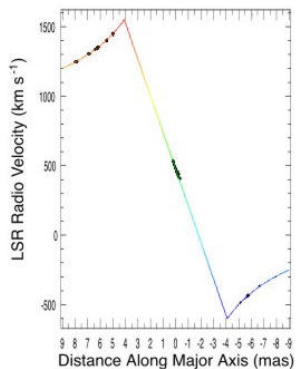
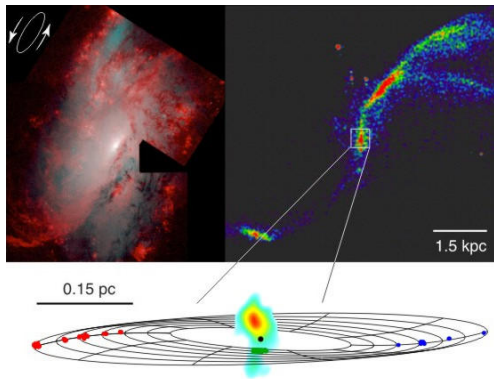
## M 106

Greenhill et al.: ApJ **440** 619–627 (1995)

- vzdálenost 7 Mpc
- systematická rychlost  $472 \pm 4$  km/s
- VLBI mapa z rádiové syntézy H<sub>2</sub>O maserů
- mechanismus vzniku mega-maserů není objasněn



## Masery v M 106



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

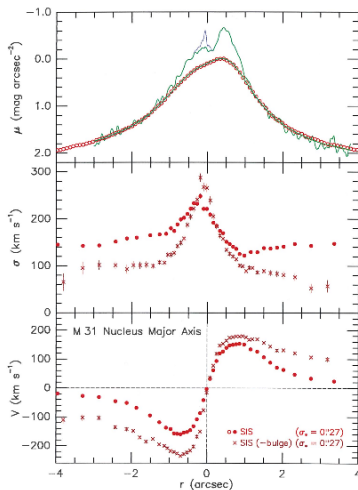
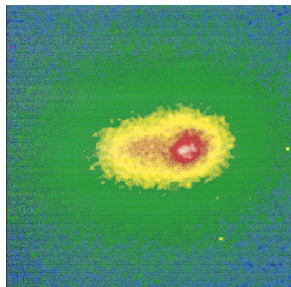
M 31



# Dvojité jádro u M31

Kormendy & Bender: ApJ 522 772 – 792 (1999)

- spektroskopie z HST
- hmota  $3 \times 10^7 M_{\odot}$
- druhé jádro: díra nebo hvězdokupa?



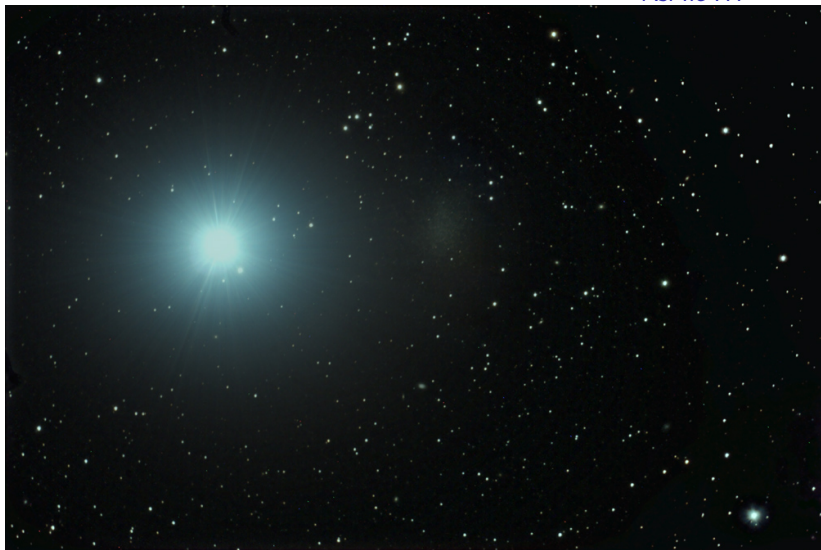
# Spirální metamorfózy

John Dubinski, <http://www.galaxydynamics.org/>



Leo I?

Asi ne ...



[http://en.wikipedia.org/wiki/Leo\\_I\\_\(dwarf\\_galaxy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Leo_I_(dwarf_galaxy))

## Závěr

I blyštivá slupka může skrývat temné jádro.

- <http://www.physics.muni.cz/~hroch/krouzeniI.pdf>
- <http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2008/phot-46-08.html>
- <http://www.galaxydynamics.org/>
- <http://chandra.as.utexas.edu/~kormendy/bhpix.html>
- <http://www.mpe.mpg.de/ir/GC>
- <http://blog.galaxyzoo.org/2010/07/23/observing-red-galaxies-with-virus-p/>

- 1 Úvod
- 2 Gravitační pole
- 3 Cesta do centra Mléčné dráhy
- 4 Disk v M 87
- 5 Masery v M 106
- 6 Dvojité jádro M 31
- 7 Srážky galaxií
- 8 Trpasličí galaxie
- 9 Závěr