

# **Světla vzdálených světů**

## **Pod pláštěm temné hmoty**

Filip Hroch



# Temná hmota



- Absolutně neviditelná substance – necloní, nezáří, neodráží
- Má pouze gravitační a kosmologické projevy.
- Neinteraguje s běžnou hmotou, ani sama se sebou (!).
- Podstata je zahalena v temnotě.

# Astronomie temné hmoty

## Oblasti našeho zájmu:

- klasická galaktická dynamika,
- rentgenová hala kup galaxií,
- kosmické mikrovlnné pozadí.

## Související oblasti:

- gravitační „čočkování“ (lensing) – Pryšo,
- slupkové galaxie,
- temné mlhoviny (matoucí název),
- temná energie (neřešíme),
- co by to mohlo být? (neřešíme)

# Galaktická dynamika



# První podezření

Fritz Zwicky, 1937\*

## „Vážení“ kup

- kupa galaxií v Panně (♍)
- všechny galaxie a celá kupa
- viriálový teorém

$$\langle T \rangle = -\frac{1}{2} \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i \quad V(r) \sim r^{-1} \quad -\frac{1}{2} \langle \Phi \rangle$$

- „konverzní faktor“

$$\Upsilon = \frac{\text{hmota}}{\text{svítivost}} \left[ \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \right]$$

- 500 pro ♍, 3 pro „lokální systém“

<https://apod.nasa.gov/apod/ap150804.html>



# Měření svítivosti galaxií

## Duch Mirachu



- Tok energie nesené elmag. vlněním (světlem)

$$F \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

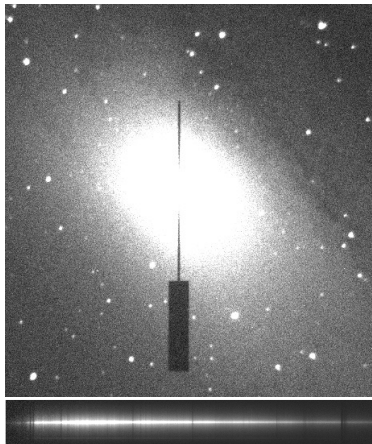
- Svítivost (vyzářený výkon) hvězdy ( $\star$ ) vzdálené  $d$

$$L_{\star} = 4\pi d_{\star}^2 F_{\star} \text{ (W)}$$

- Svítivost galaxie  $L$  v  $d$

$$L = L_{\star} \frac{F}{F_{\star}} \frac{d^2}{d_{\star}^2} \text{ (W)}$$

# Měření radiálních rychlostí galaxií



<http://www.astrosurf.com/buil/redshift/demo.htm>

## Odhad hmoty

- Dopplerův jev ze spektra:

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

- Kruhová rychlost:

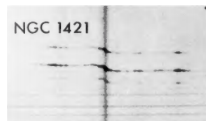
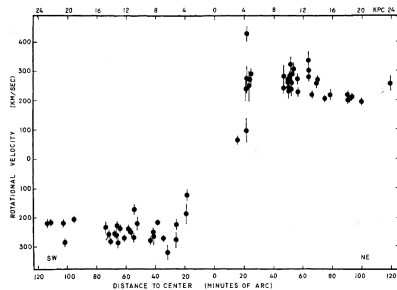
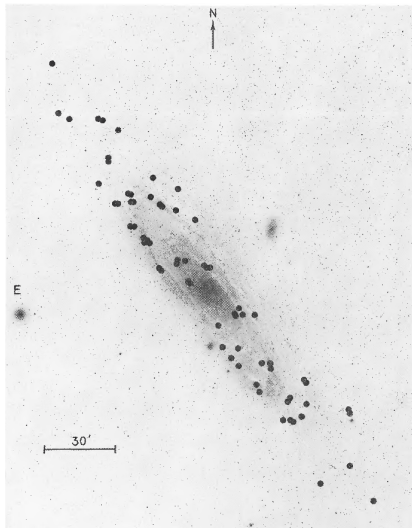
$$v^2(r) = r \frac{d\Phi(r)}{dr}$$

- Odhad hmoty pro Keplerův potenciál:

$$M(r) = \frac{rv^2(r)}{G}$$

# Rotační křivky galaxií

Vera Rubin, 1970<sup>†</sup>

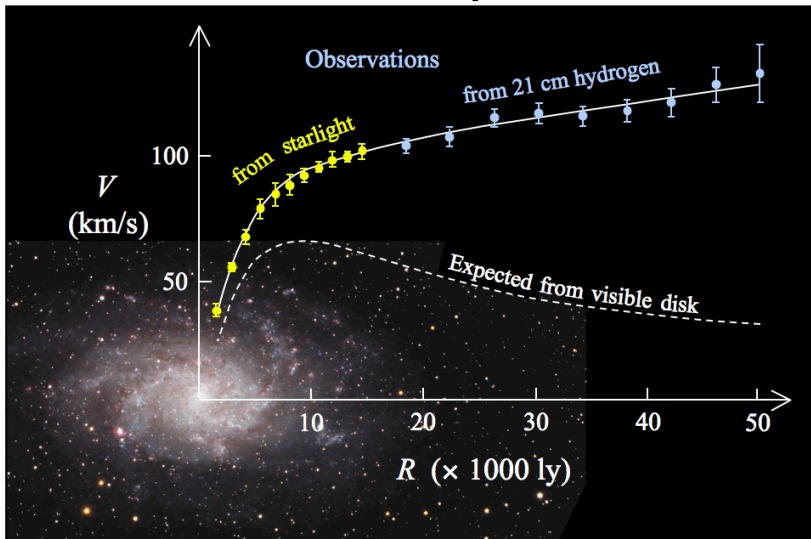


(podle ApJ 159, 379)

<sup>†</sup>ApJ 159, 379



# Rotační křivky M 33

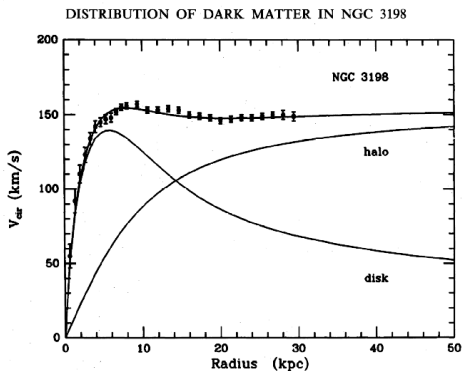


# M 33

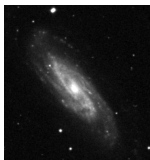


Snímek vlastnoručně pořídil Roman Ponča na Hvězdárně ve Vyškově

# Interpretace rotačních křivek



van Albada & spol, ApJ 295, 305



- Keplerův potenciál (sluneční soustava)

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- Pevné těleso

$$v = \omega r$$

- Hrubý model galaxie

$$v \neq f(r)$$

(slabá závislost na  $r$ )

# Temná hmota klasická

Optický obor, zlatá léta '80

## Slupková galaxie NGC 474



- Galaxie obsahují halo z neviditelné, avšak gravitačně působící hmoty.
- Pracovní skupina kolem Bruno Jungwierta
- Binney: Galactic dynamics (1994)

# Kupy galaxií



# Galaktické kupy v rentgenu

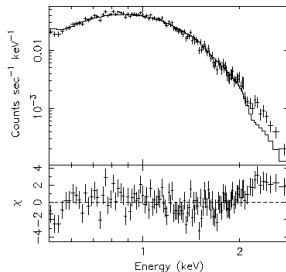
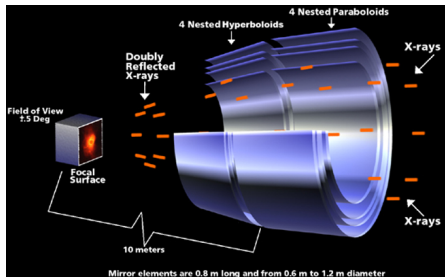
Vizualizace potenciálu



<http://chandra.harvard.edu/photo/2016/idcs1426/>  
Kompozitní snímek: optický (zelená), infračervený (červená) a rentgenový (modrá).

- Ideální plyn,
- brzdné záření,
- teplota milióny stupňů,
- malá hustota.

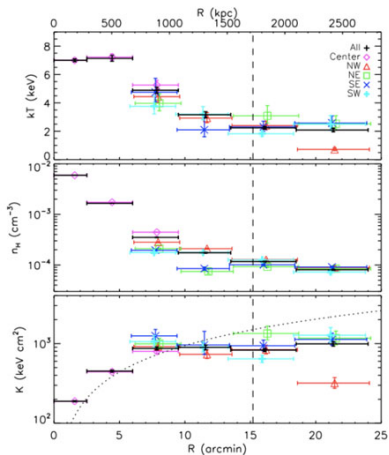
# Rentgenová astronomie



## Specifika:

- Totální odraz,
- dlouhé expozice (kilo-sekundy),
- detekujeme jednotlivé fotony (energie, směr),
- obrázky a spektra v jednom.
- Měříme hustotu  $\rho$ , teplotu ( $T$ ) a chemické složení.

# Isotermální sféry temné hmoty



- Modifikace klasického astronomického problému,
- systém udržovaný vlastní gravitací,
- řešení  $p(r), \rho(r), T(r)$  dle

$$\frac{dp}{dr} = \frac{k_B T}{m} \frac{d\rho}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2},$$

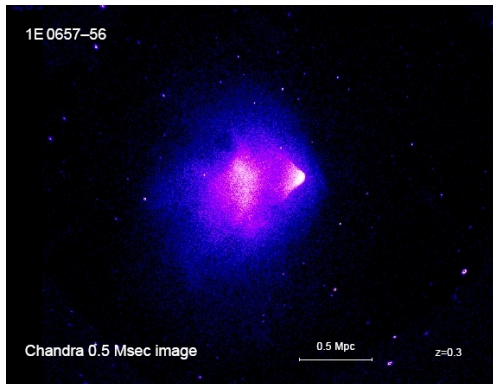
- a experimentálně  $n_H, T,$
- určení hmoty  $M(r)$ .
- Temná hmota dominuje ( $> 90\%$ ).



# Temná hmota galaktických kup

Rentgenový obor, posledních deset let

## Bullet cluster

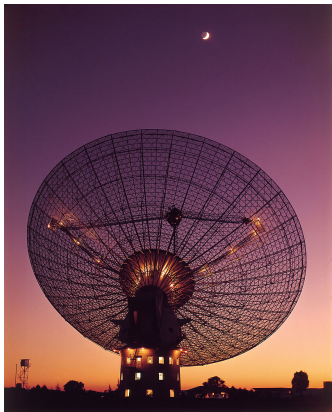


- Při srážkách galaxií se slučuje i temná hmota?
- Pracovní skupina kolem Norberta Wernera
- Longair: High Energy Astrophysics

# Kosmické mikrovlnné pozadí



# Rádioastronomie



[https://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_telescope](https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_telescope)

## Rádiové pozorování

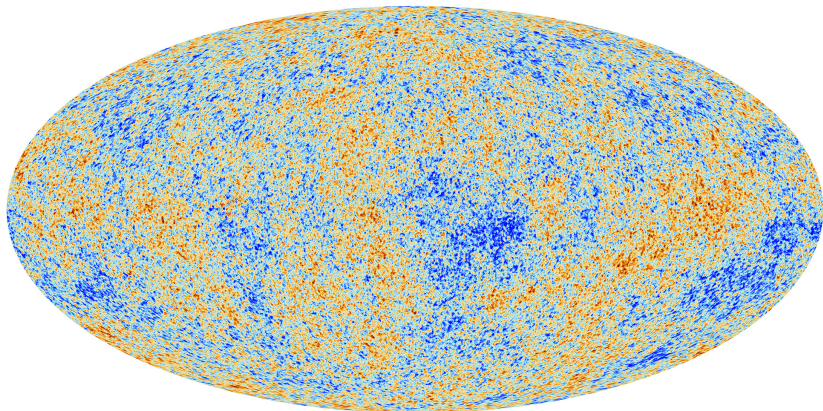
- Měříme výkon na detektoru ( $P = UI$ )
- Tok energie  $P_\nu = k_B T d\nu$ , ( $h\nu \ll k_B T$ )

## Pozadí samotné

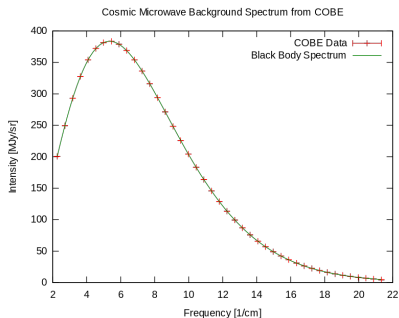
- Pozůstatek po velkém třesku
- Barevná teplota oblohy  $T(\Omega)$
- Vlastnosti:  $T \approx 2.73$  K,  $\nu \approx 6 \cdot 10^{10}$  Hz,  $\lambda \approx 1.8$  mm

# Mikrovlnné pozadí

Mapa fluktuací  $\Delta T/T$



# Fluktuační spektrum v kosmickém šumu



[https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_microwave\\_background](https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background)

## Analýza

- Teplotní fluktuační spektrum:

$$\frac{\Delta T}{T}(\Omega)$$

- Auto-korelační funkce ( $\pm$  kvadratická odchylka):

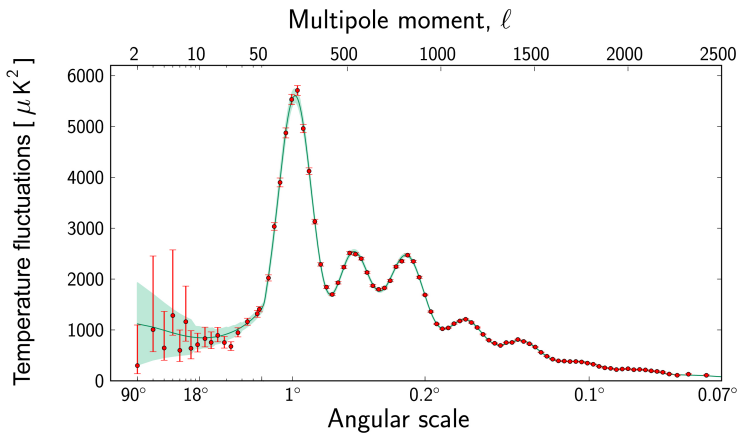
$$C(\theta) = \left\langle \frac{\Delta T}{T}(\Omega) \cdot \frac{\Delta T}{T}(\Omega') \right\rangle$$

Multipólový rozvoj ( $C_1$  dipólový,  $C_2$  kvadrupólový, ... moment):

$$C(\theta) \approx \frac{1}{4\pi} \left[ C_0 + 3C_1 \cos\theta + \frac{5}{2}C_2(3\cos^2\theta - 1) + \dots \right]$$

# Multipólový rozvoj

$C_l(\theta)$  z družice Planck

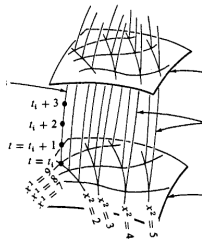


# Standardní kosmologický model $\Lambda$ CMD

Friedmann-Lemaître

Vzdálenost libovolných bodů  $a(t)$ :

$$dl^2 = a^2(t)d\Omega^2 - c^2 dt^2$$



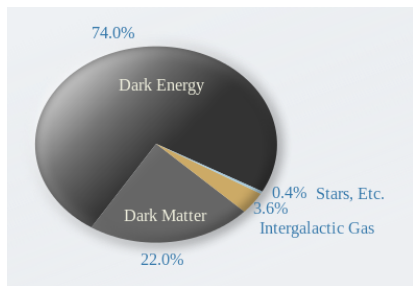
$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt}\right)^2 = H_0^2 \left[ (\Omega_b + \Omega_c) a^{-3} + \Omega_r a^{-4} + \Omega_\Lambda a^{-3(1+w)} \right]$$

$\Omega_b$  baryonová hustota,  $\Omega_c$  chladná (cold) temná hmota,  $\Omega_r$  záření,  $\Omega_\Lambda$  temná energie.

# Mikrovlnná temná hmota

Mikrovlnný obor, posledních roky

## Složení Vesmíru



[https://en.wikipedia.org/wiki/Friedmann\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Friedmann_equations)

- Primoidální fluktuační rostou úměrně příslušné dimenzi  $a$ ,
- temná energie na scéně,
- podstata temnoty je neznámá.
- Tento obor je u nás zcela opomíjený.
- MTW: Gravitation (pouze principy)
- Bahcall & spol: Unsolved problems in astrophysics

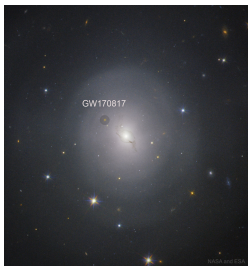


# Implikace



# Gravitační vlny

Úvahy ve světle dění posledních dnů



- Třímáme snad nový nástroj studia temné hmoty (?).
- Optická (elektromagnetická) astronomie poskytuje pouze zprostředkovaný pohled.
- Je tu snad analogie s optickou astronomií (chem. složení ze spektra)?

# Otevřené otázky kolem temné hmoty

- Jak to, že ve spirálních galaxiích je temná hmota na okraji, když nijak neinteraguje s normální hmotou?
- Proč není rovnoměrně rozdělená (když neinteraguje sama se sebou)?
- V kupách se temná hmota koncentruje do středu a splňuje Poissonovu rovnici. Je tedy nějak z center samotných galaxií vypuzována?
- Konvenční mechanika zůstává stejná

$$H = \frac{p^2}{2m} + V(q) + \mu V_{\text{temnota}}.$$

Nemohou se objevit neznámé efekty?

- V okolí Slunce je minimálně 30% hmoty ve formě temné. Kde tedy je? Je všude kolem nás?

# Úvahy nad neznámým

Zahalené do temnoty

## Dosud neobjasněné záhady?

- Jsou kolem nás duchové? Je tak možné vysvětlit nějaký nadpřirozený jev?
- Něco co dosud neumíme změřit či popsat?

## Hypotézy a jejich verifikace

- Popisuje běžné jevy, ale nepředpovídá nic nového a převratného (Ptolemaios).
- Je schopna nečekané předpovědi (Kepler, Young, ...).
- Verifikace jako experimentální ověření či logická část.

*Láska je solí života.*

Z pohádky „Sůl nad zlato“

*Hvězdy jsou solí Vesmíru.*

☯ FH