

# Měříme vesmír

11. dubna 2008

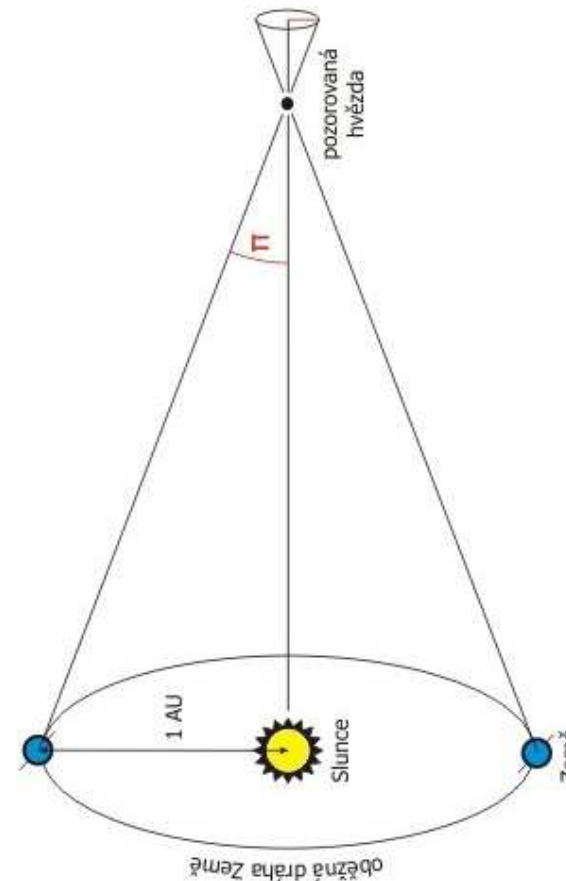


# Paralaxa

- Vztah mezi úhlem, pod kterým vidíme objekt a jeho vzdáleností
- Je třeba dostatečně velké základny
- Vzdálenost je dána

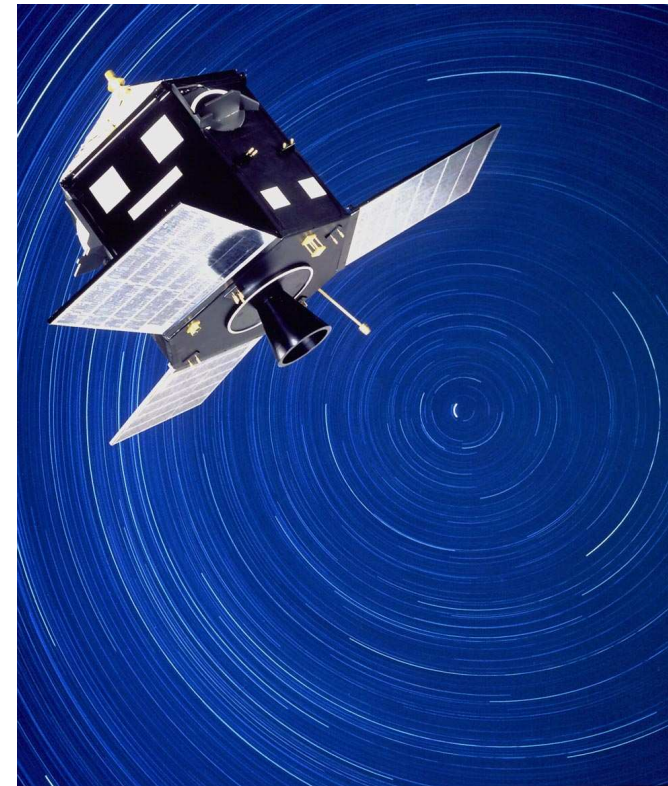
$$D = \frac{1 \text{ AU}}{\tan p} \approx \frac{1}{p''} [\text{pc}]$$

- Pouze pro nejbližší hvězdné okolí



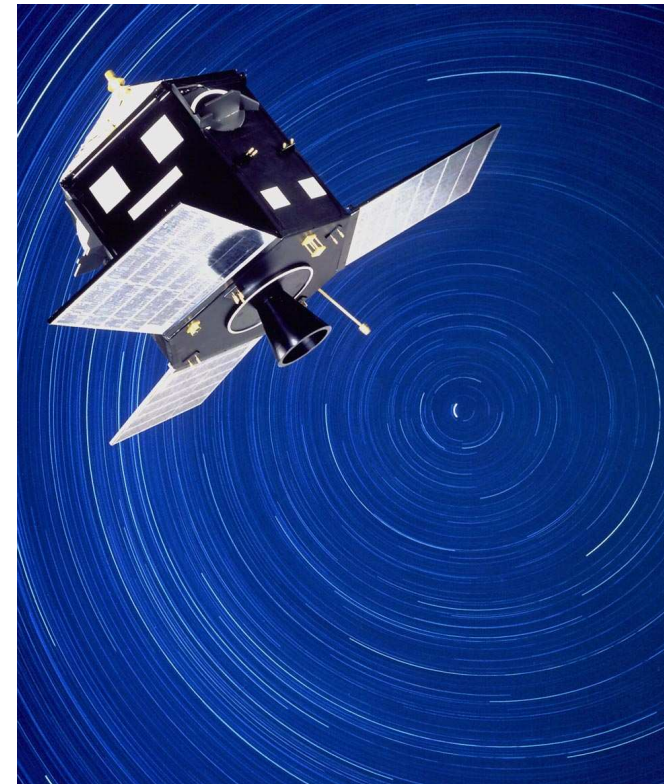
# Hipparcos

- Satelit pro přesnou astrometrii  
(  $\approx 0.001$  arcsekund)



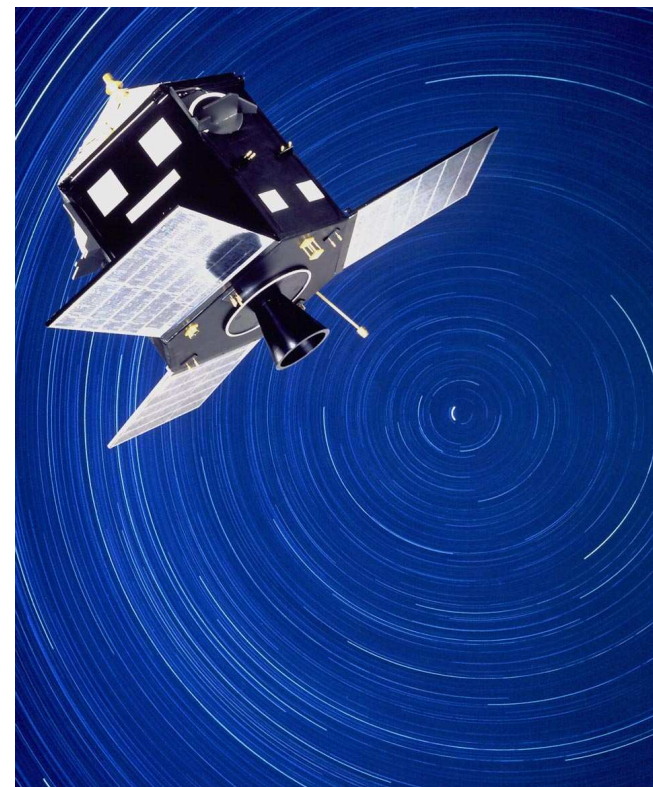
# Hipparcos

- Satelit pro přesnou astrometrii ( $\approx 0.001$  arcsekund)
- Vypuštěn v roce 1989



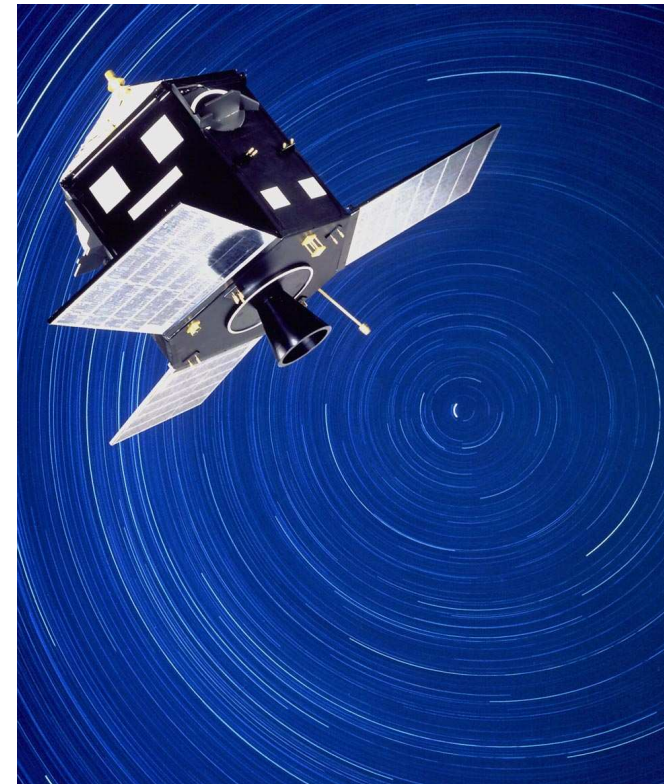
# Hipparcos

- Satelit pro přesnou astrometrii ( $\approx 0.001$  arcsekund)
- Vypuštěn v roce 1989
- Katalog Hipparcos (120 000 hvězd)



# Hipparcos

- Satelit pro přesnou astrometrii ( $\approx 0.001$  arcsekund)
- Vypuštěn v roce 1989
- Katalog Hipparcos (120 000 hvězd)
- Katalog Tycho (400 000 hvězd)

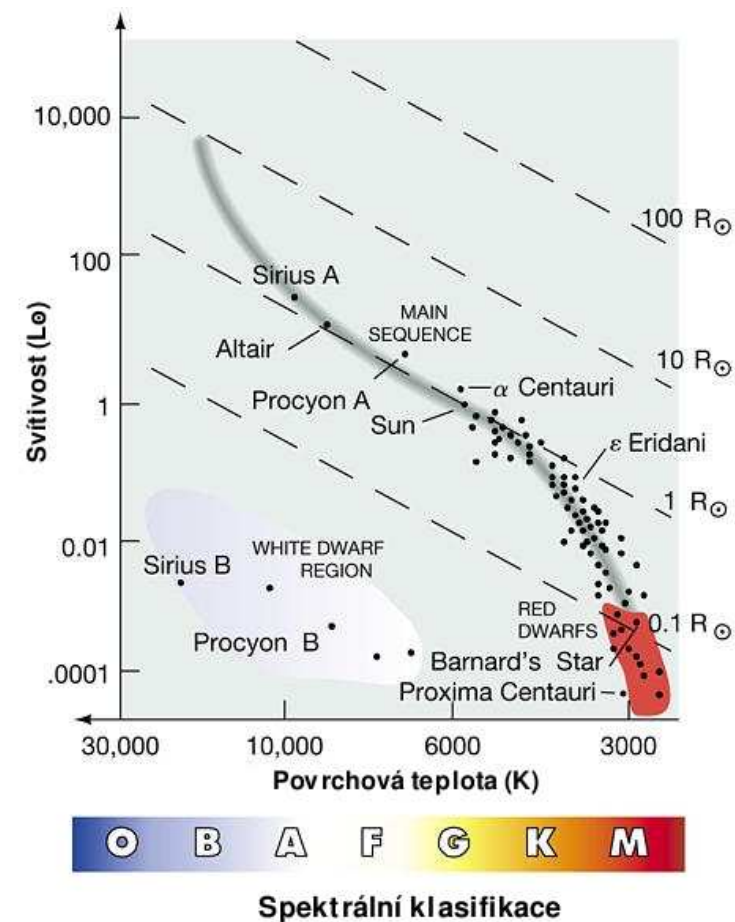


# Spektroskopická paralaxa

- Podrobnou analýzou spekter určíme pozici na HR diagramu
- Následně určíme svítivost hvězdy a absolutní hvězdnou velikost
- Vzdálenost je dána Pogsonovou rovnicí

$$D = 10^{(m-M+5)/5} \quad [\text{pc}]$$

Metoda patří spíše do standardních svíček



# Pohybové hvězdokupy

- Využívá perspektivního zobrazení
- Ze znalosti složek rychlosti pohybu hvězd a jejich změn lze určit vzdálenosti
- S úspěchem aplikováno: Hyady, UMa, Sco-Cen

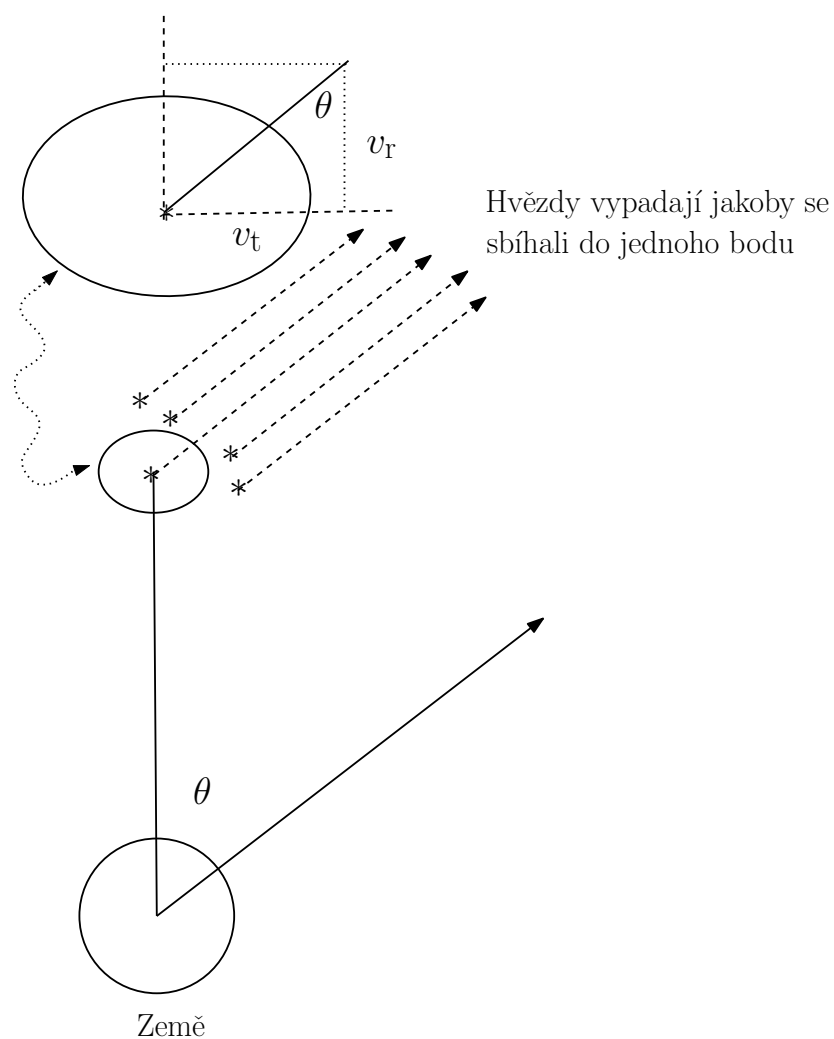
## Pohybová hvězdokupa Hyády





# Pohybové hvězdokupy

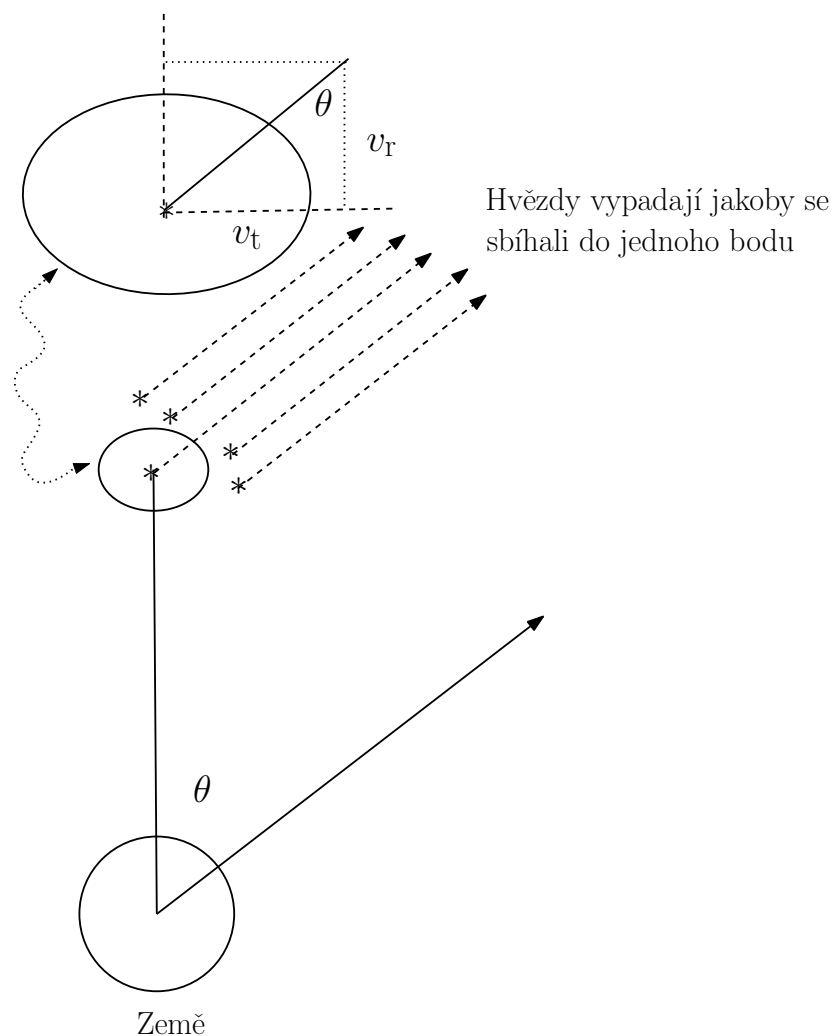
- Z měření spekter známe radiální složku rychlosti



# Pohybové hvězdokupy

- Z měření spekter známe radiální složku rychlosti
- Dále určíme tangenciální složku rychlosti

$$v_t = v_r \tan \theta$$



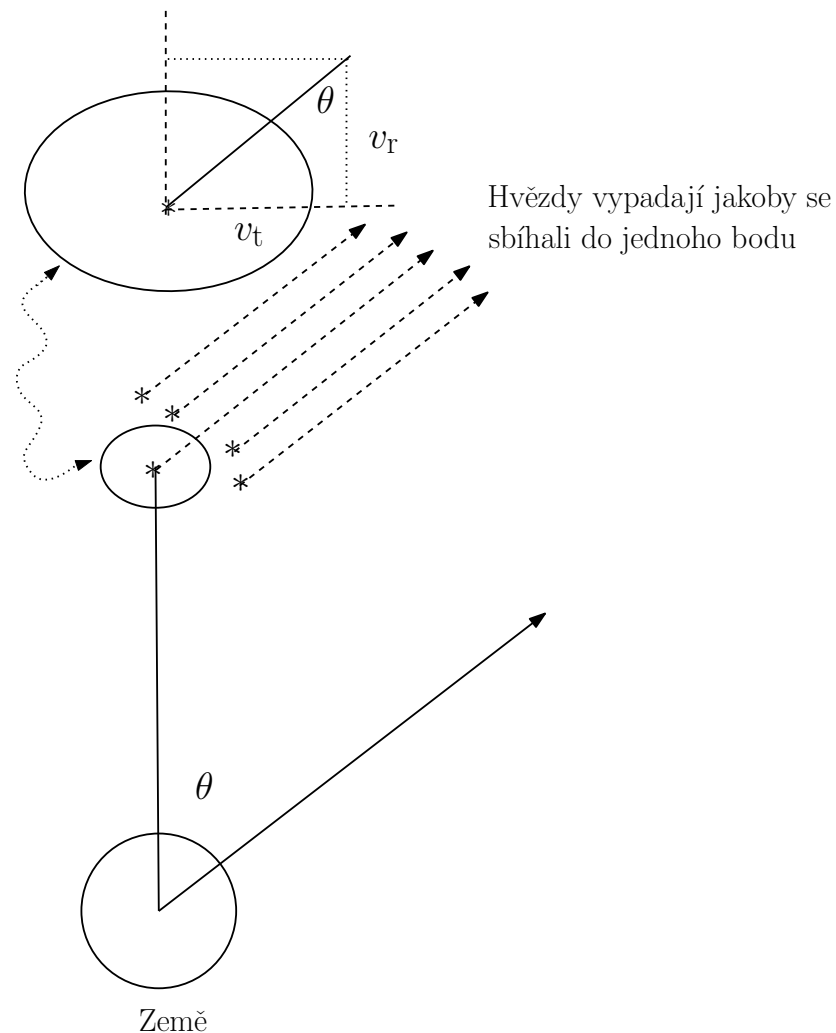
# Pohybové hvězdokupy

- Z měření spekter známe radiální složku rychlosti
- Dále určíme tangenciální složku rychlosti

$$v_t = v_r \tan \theta$$

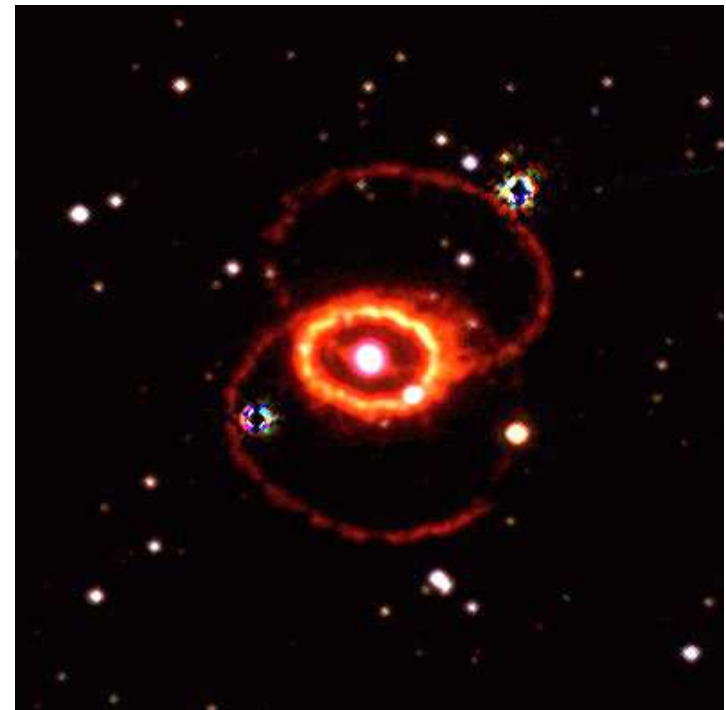
- Z dlouhodobého pozorování určíme změnu úhlu a stanovíme vzdálenost

$$D = \frac{v_t}{d\theta/dt}$$



# Světelné echo

- Metoda založena na existenci pravítka
- SN 1987 ve Velkém Magelanově mračnu
- Detekce prstence kolem středu supernovy



# Světelné echo

- Z rozdílů časů mezi detekcí výbuchu supernovy a detekcí prstence lze zjistit skutečné rozměry prstence  $R$

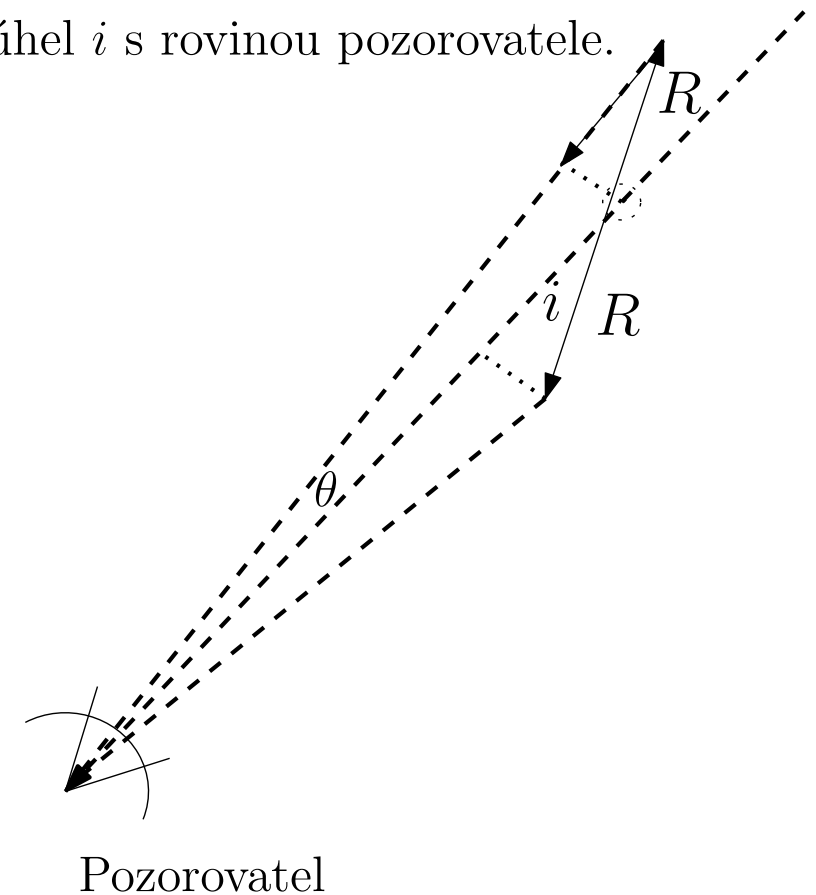
$$t_{1,2} - t_0 = R(1 \pm \cos i)/c$$

$$R = c(t_1 - t_0 + t_2 - t_0)/2$$

- Z měření úhlových rozměrů prstence zjistíme vzdálenost

$$D = \frac{R}{\theta}$$

Kruhový prstenec o poloměru  $R$  svírající úhel  $i$  s rovinou pozorovatele.



# Standardní svíčky

- U takovýchto objektů známe jejich svítivost  $L$



# Standardní svíčky

- U takovýchto objektů známe jejich svítivost  $L$
- Pozorovaný jas objektů klesá se čtvercem vzdálenosti



# Standardní svíčky

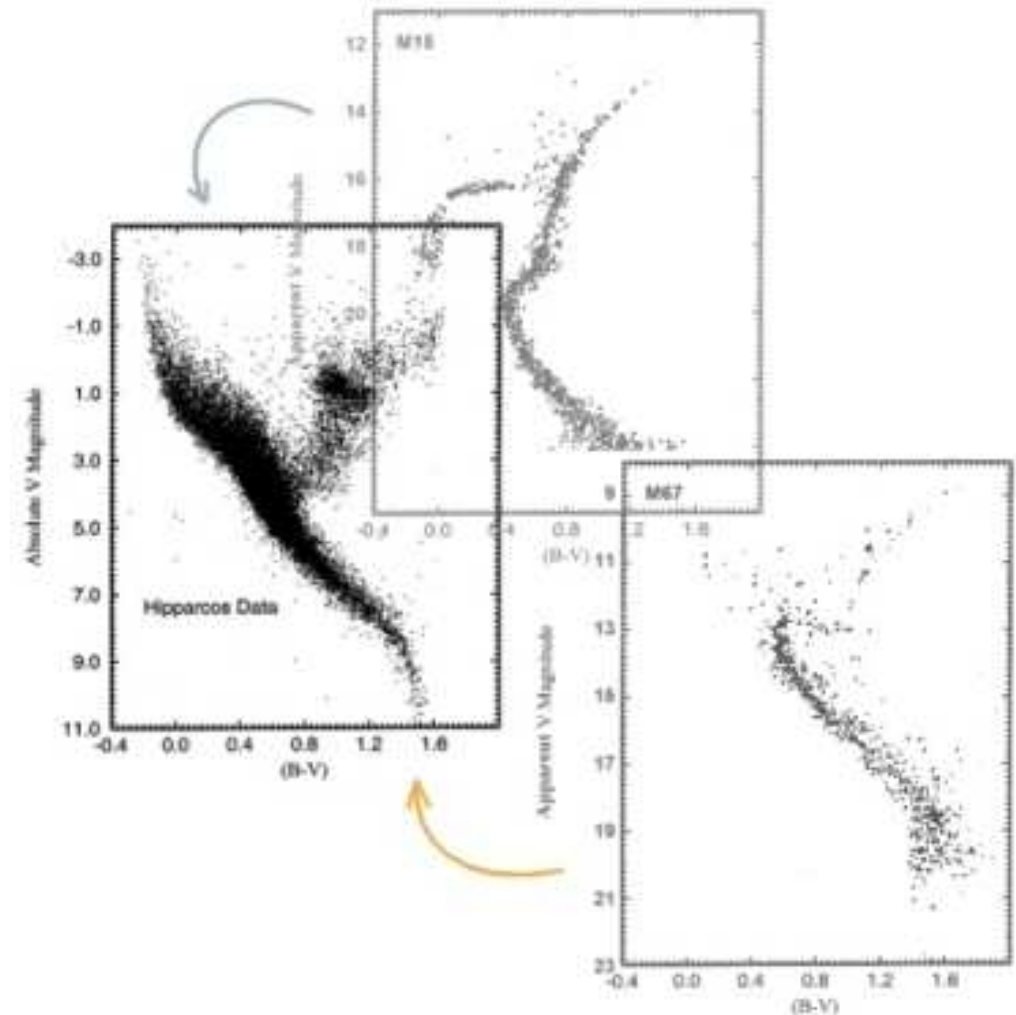
- U takovýchto objektů známe jejich svítivost  $L$
- Pozorovaný jas objektů klesá se čtvercem vzdálenosti
- Díky znalosti svítivosti, lze určit vzdálenost (Pogsonův vztah)





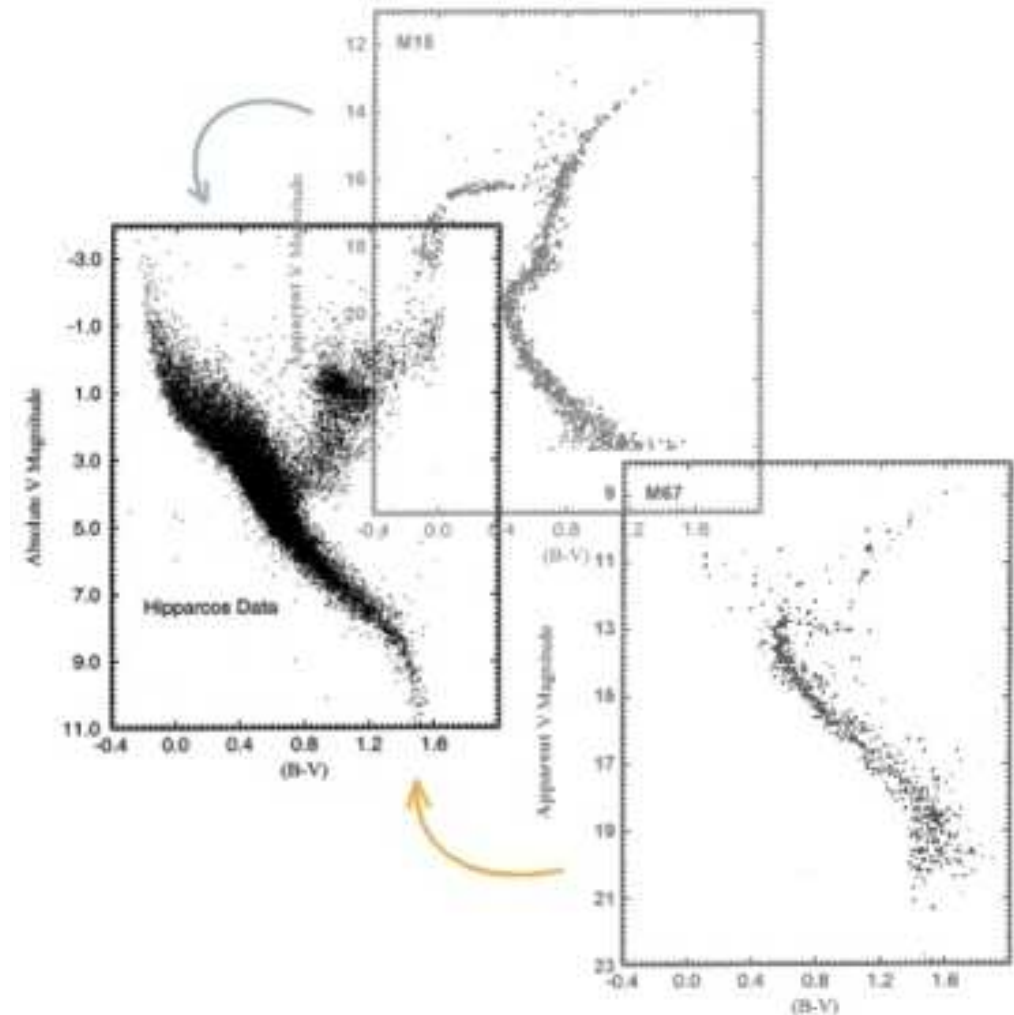
# Hvězdokupy a HR diagram

- Využívá se faktu, že ve hvězdokupách jsou hvězdy od nás zhruba stejně daleko



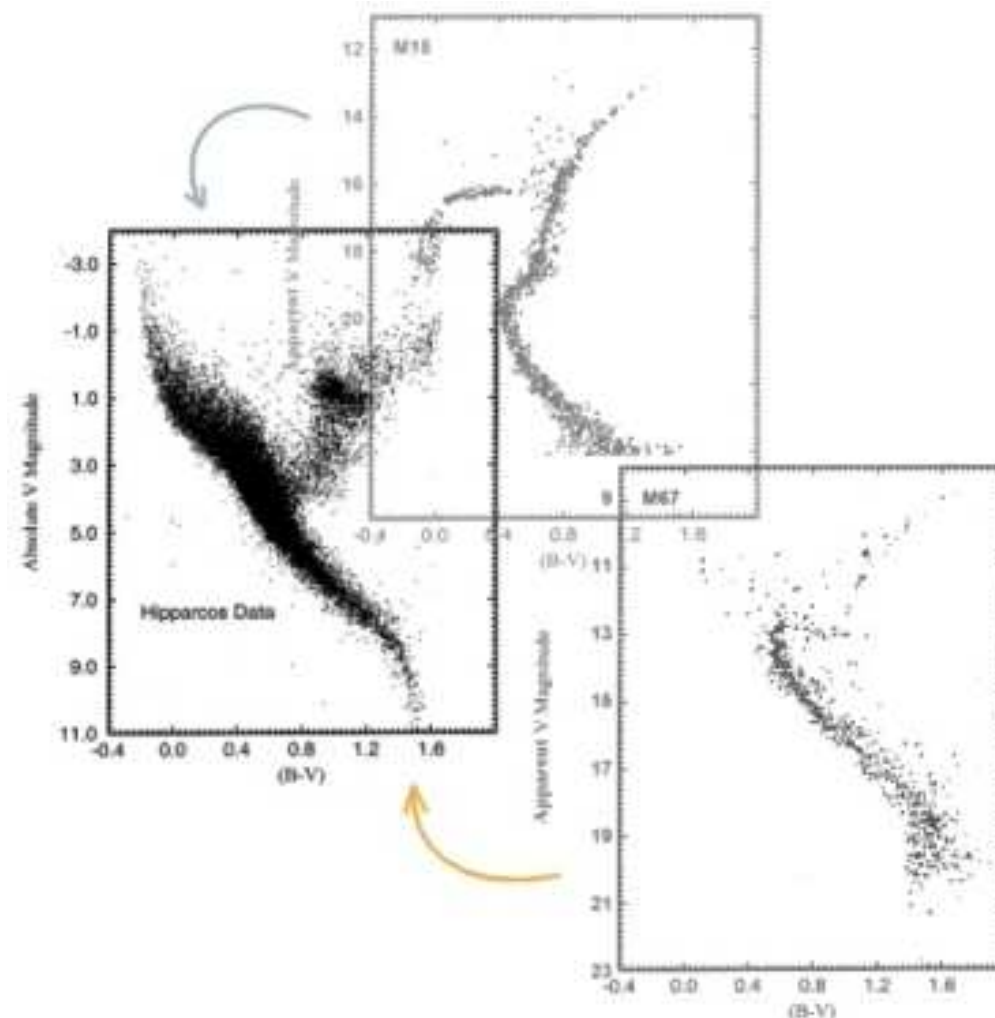
# Hvězdokupy a HR diagram

- Využívá se faktu, že ve hvězdokupách jsou hvězdy od nás zhruba stejně daleko
- Sestrojíme HR diagram pro dostatečný počet hvězd z hvězdokupy s použitím zdánlivé hvězdné velikosti  $m$



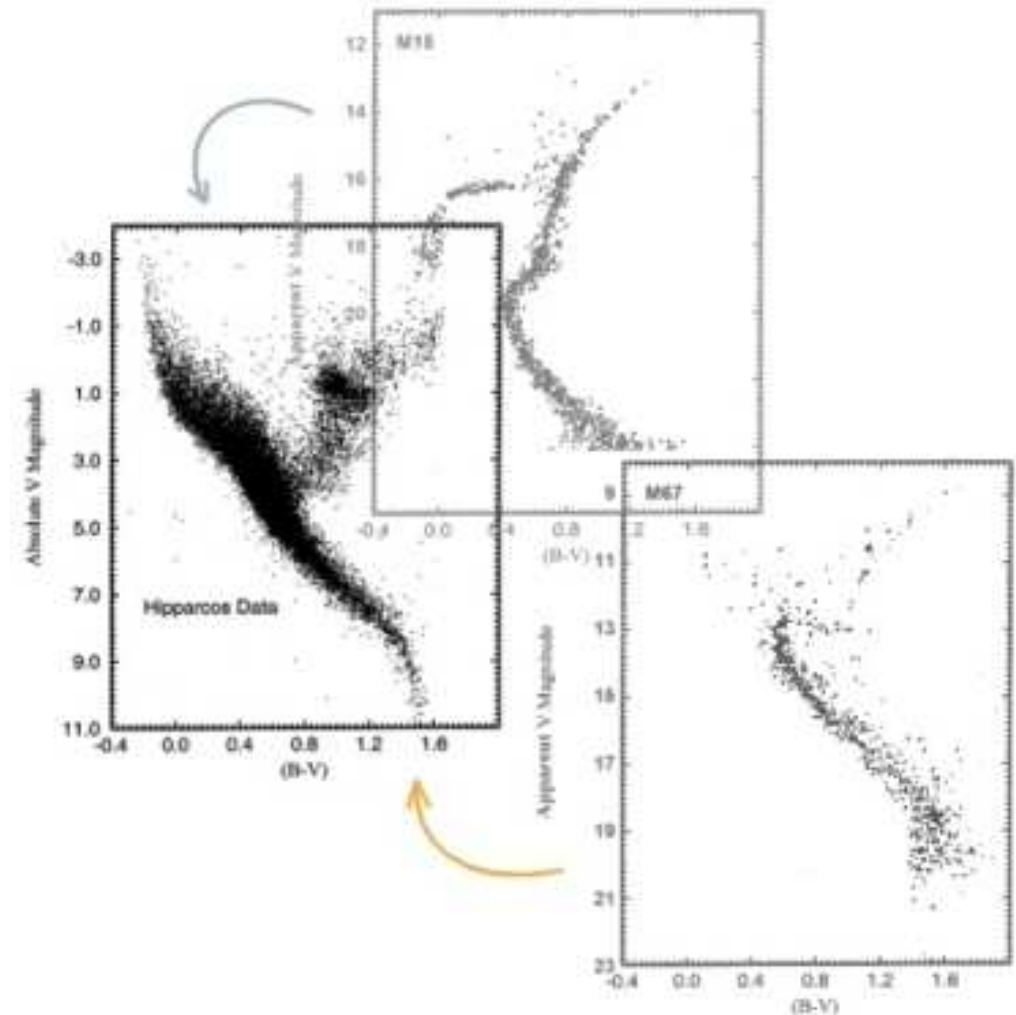
# Hvězdokupy a HR diagram

- Využívá se faktu, že ve hvězdokupách jsou hvězdy od nás zhruba stejně daleko
- Sestrojíme HR diagram pro dostatečný počet hvězd z hvězdokupy s použitím zdánlivé hvězdné velikosti  $m$
- Porovnáme námi zkonstruovaný diagram s HR diagramem škálovaným v absolutních hvězdných velikostech



# Hvězdokupy a HR diagram

- Využívá se faktu, že ve hvězdokupách jsou hvězdy od nás zhruba stejně daleko
- Sestrojíme HR diagram pro dostatečný počet hvězd z hvězdokupy s použitím zdánlivé hvězdné velikosti  $m$
- Porovnáme námi zkonstruovaný diagram s HR diagramem škálovaným v absolutních hvězdných velikostech
- Určíme  $m - M$  a opět z Pogsonovy rovnice také vzdálenost







# Cefeidy

- Pozorování cefeid v SMC
- Objev relace mezi hvězdnou velikostí a periodou
- Nutná kalibrace vzdálenosti např. v hvězdném okolí (Hertzsprung, Shapley)

Henrietta Swan Leavitt

(1868 -1921)



Ejnar Hertzsprung

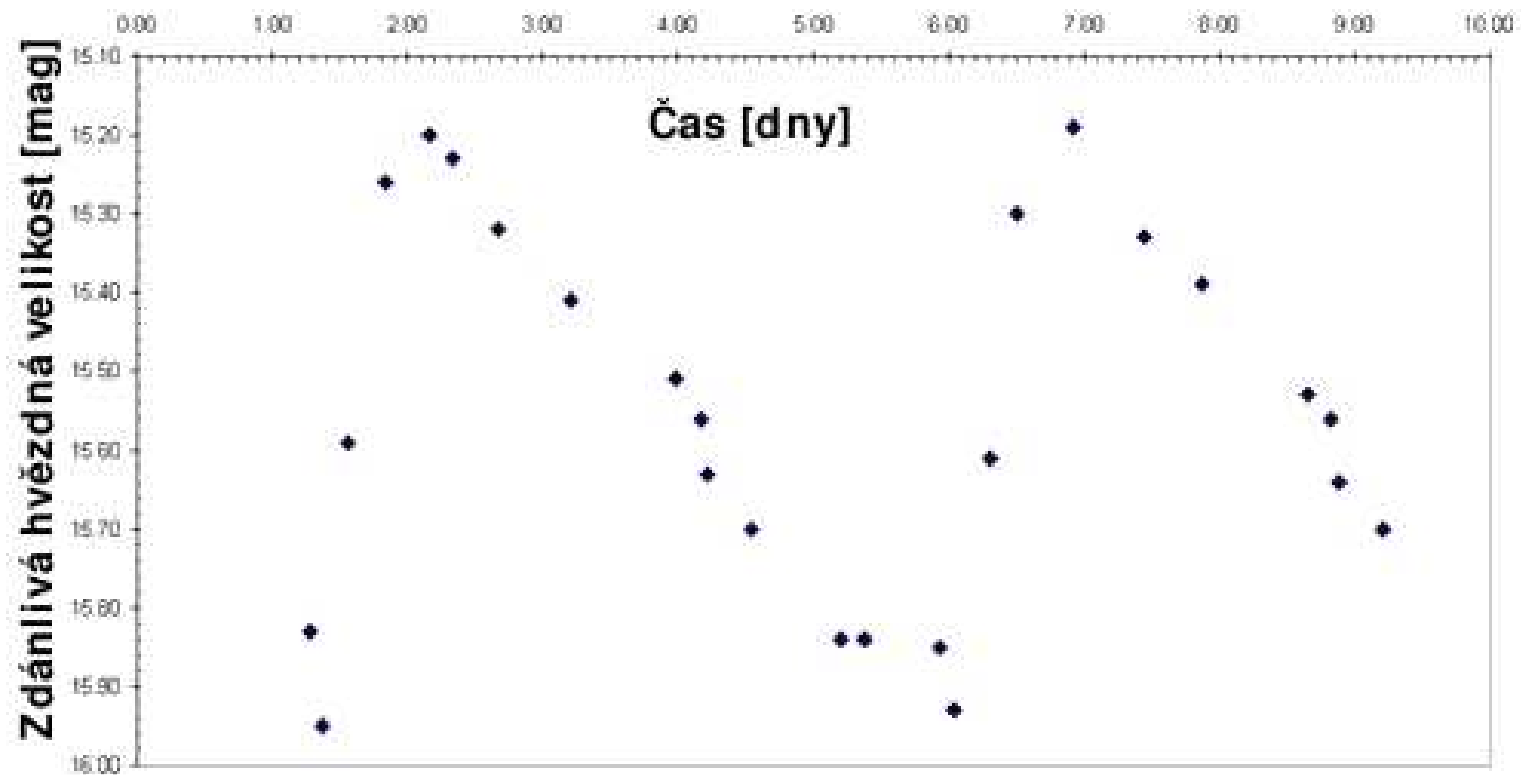
(1873-1697)



# Cefeidy

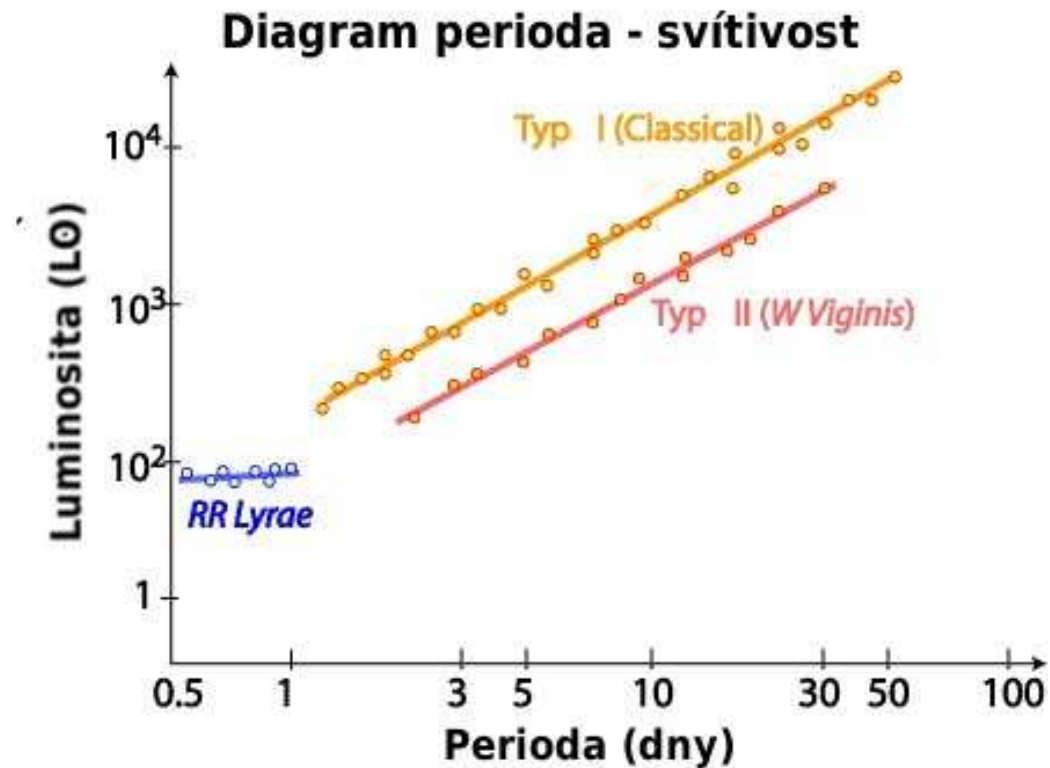
Typický průběh světelné křivky Cefeid

## Světelná křivka Cefeidy v LMC





# Cefeidy

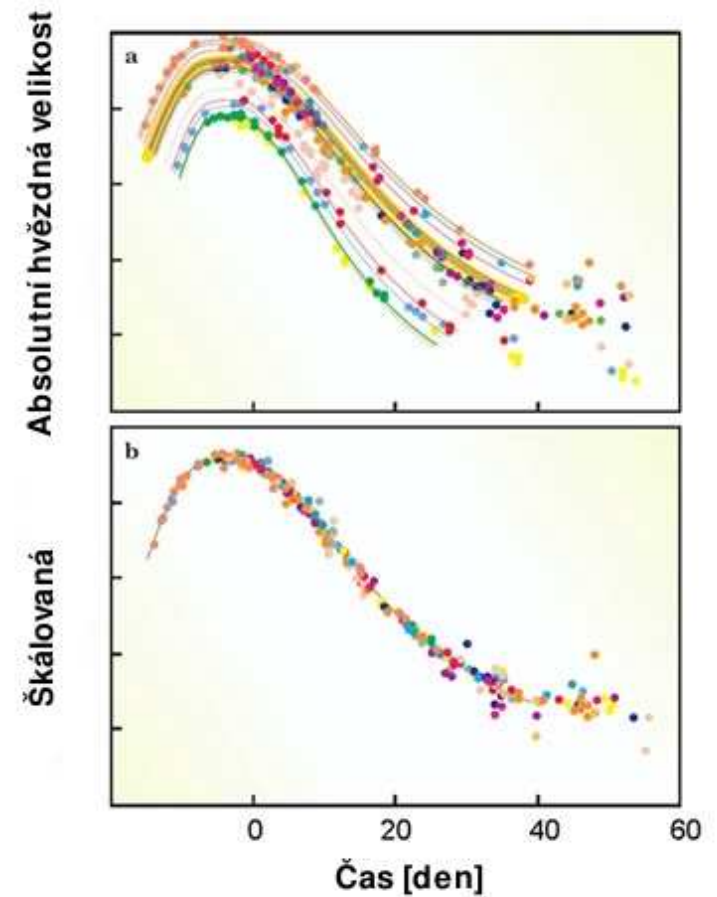


- Pro klasické cefeidy

$$M_V = -2.81 \log P - 1.43$$

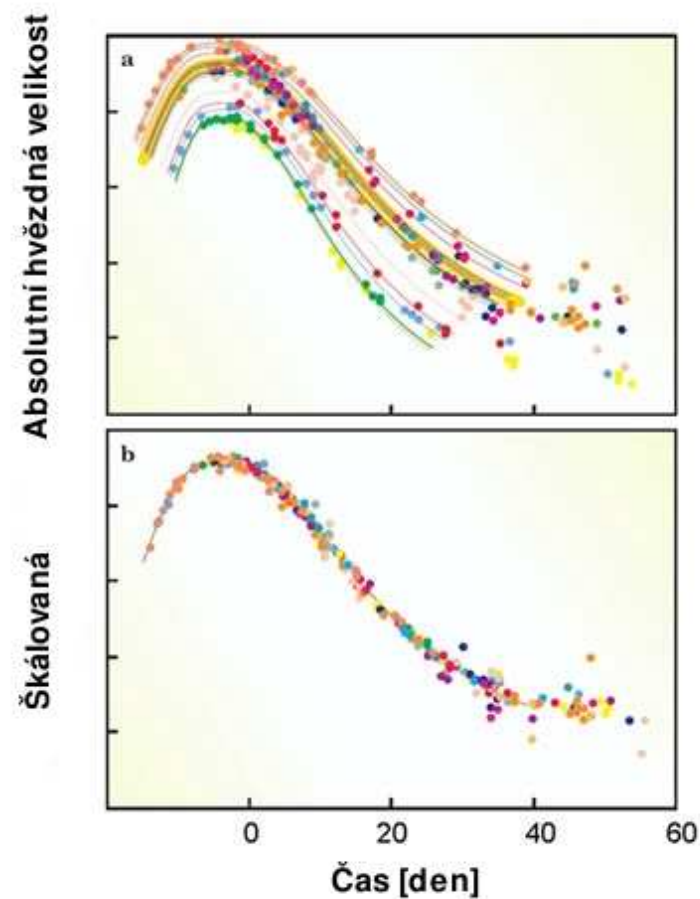
# Supernovy typu Ia

- Světelné křivky supernov typu Ia vykazují velkou podobnost



# Supernovy typu Ia

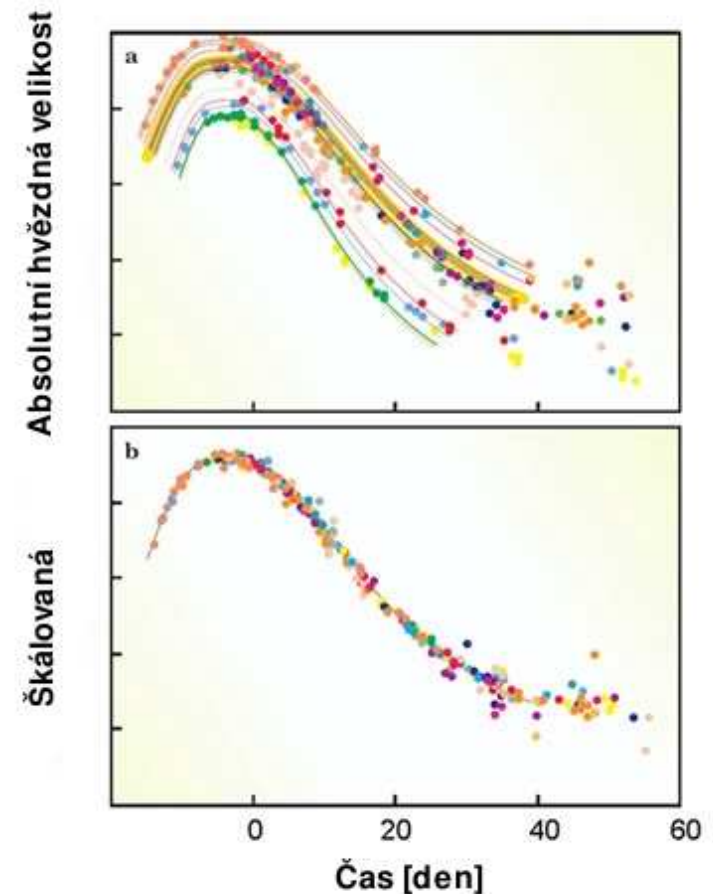
- Světelné křivky supernov typu Ia vykazují velkou podobnost
- Přímá souvislost mezi maximální jasností a rychlostí poklesu jasu světelné křivky



# Supernovy typu Ia

- Světelné křivky supernov typu Ia vykazují velkou podobnost
- Přímá souvislost mezi maximální jasností a rychlostí poklesu jasu světelné křivky
- Maximální absolutní hvězdná velikost

$$M_B \simeq M_V \simeq -19.3 \pm 0.03$$



# Supernovy typu Ia

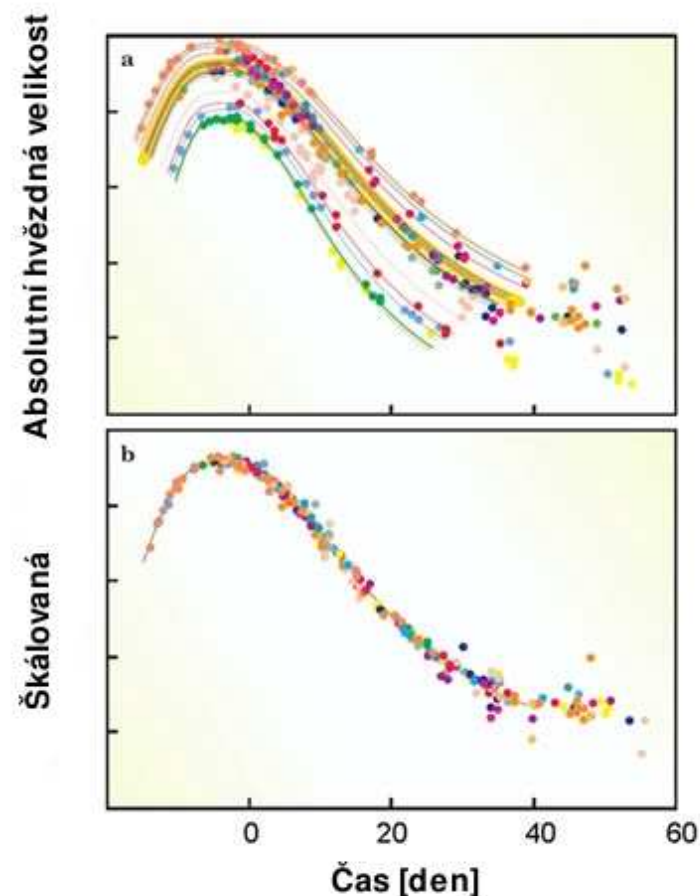
- Světelné křivky supernov typu Ia vykazují velkou podobnost
- Přímá souvislost mezi maximální jasností a rychlostí poklesu jasu světelné křivky
- Maximální absolutní hvězdná velikost

$$M_B \simeq M_V \simeq -19.3 \pm 0.03$$

- Pogsonova rovnice

$$D = 10^{(m-M-A+5)/5}$$

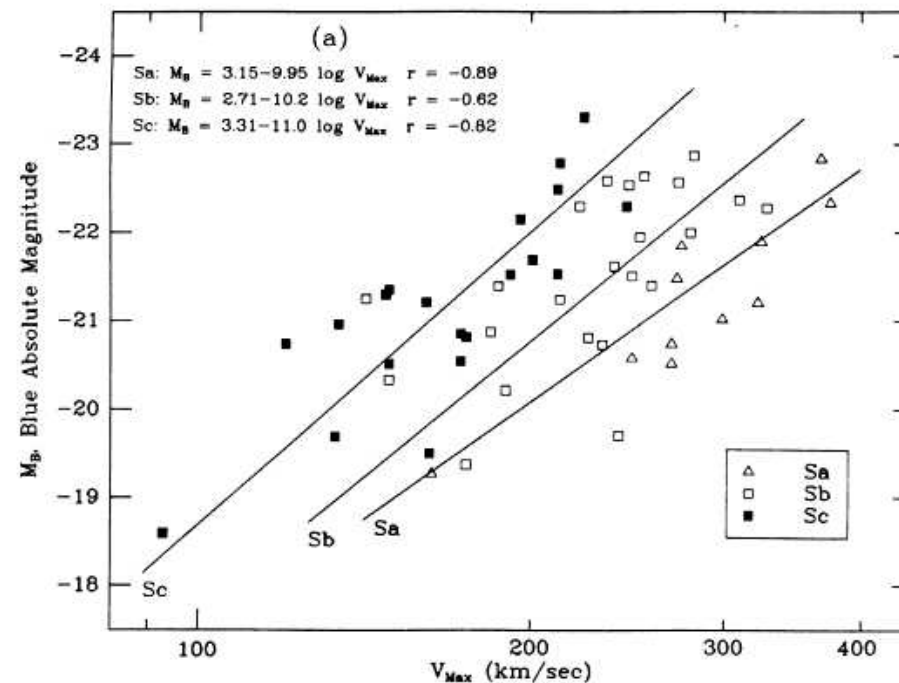
A je odhad mezihvězdné extinkce



# Galaxie: Tullyho -Fischerův vztah

- Pro spirální galaxie platí vztah mezi rychlostí hvězd a svítivostí

$$L \propto cV_{\text{rot}}^4$$

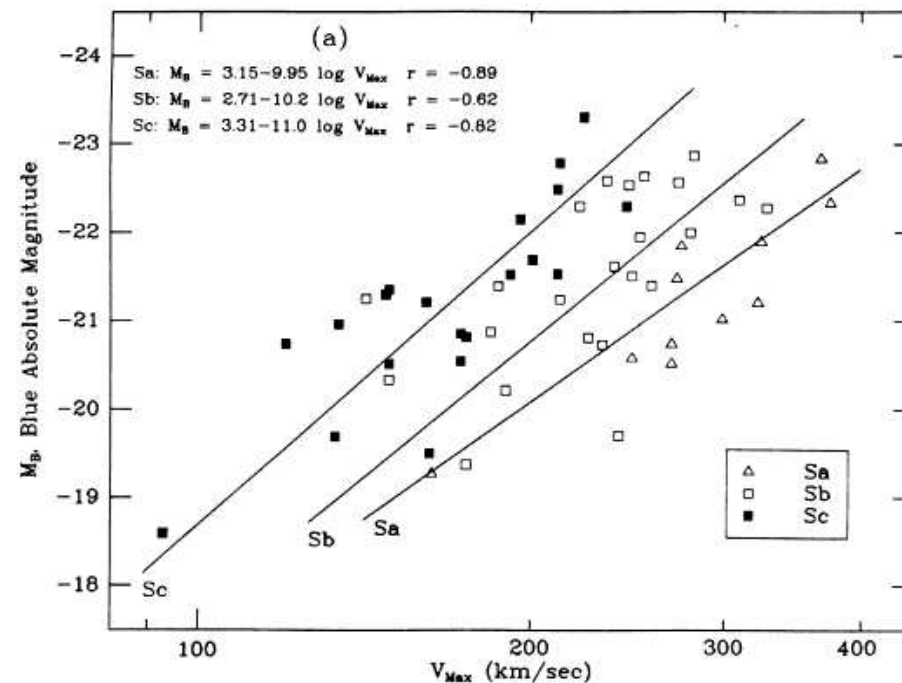


# Galaxie: Tullyho -Fischerův vztah

- Pro spirální galaxie platí vztah mezi rychlostí hvězd a svítivostí

$$L \propto cV_{\text{rot}}^4$$

- Ze spektroskopických měření určíme  $V_{\text{max}}$



# Galaxie: Tullyho -Fischerův vztah

- Pro spirální galaxie platí vztah mezi rychlostí hvězd a svítivostí

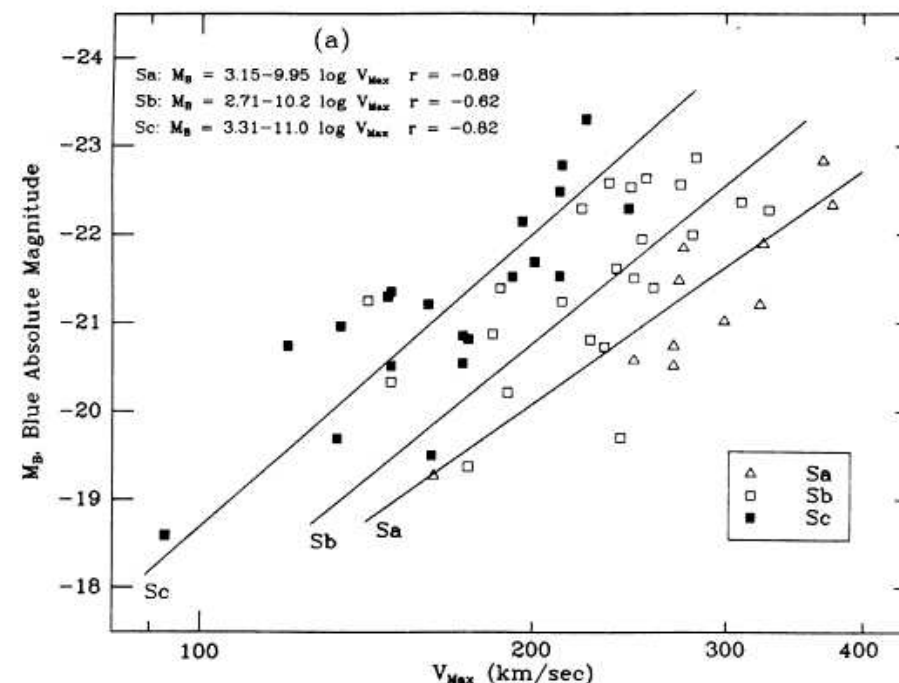
$$L \propto cV_{\text{rot}}^4$$

- Ze spektroskopických měření určíme  $V_{\text{max}}$
- Podle Hubbleova typu galaxie platí relace

$$M_B = -9.95 \log V_{\text{max}} + 3.15 \text{ (Sa)}$$

$$M_B = -10.2 \log V_{\text{max}} + 2.71 \text{ (Sb)}$$

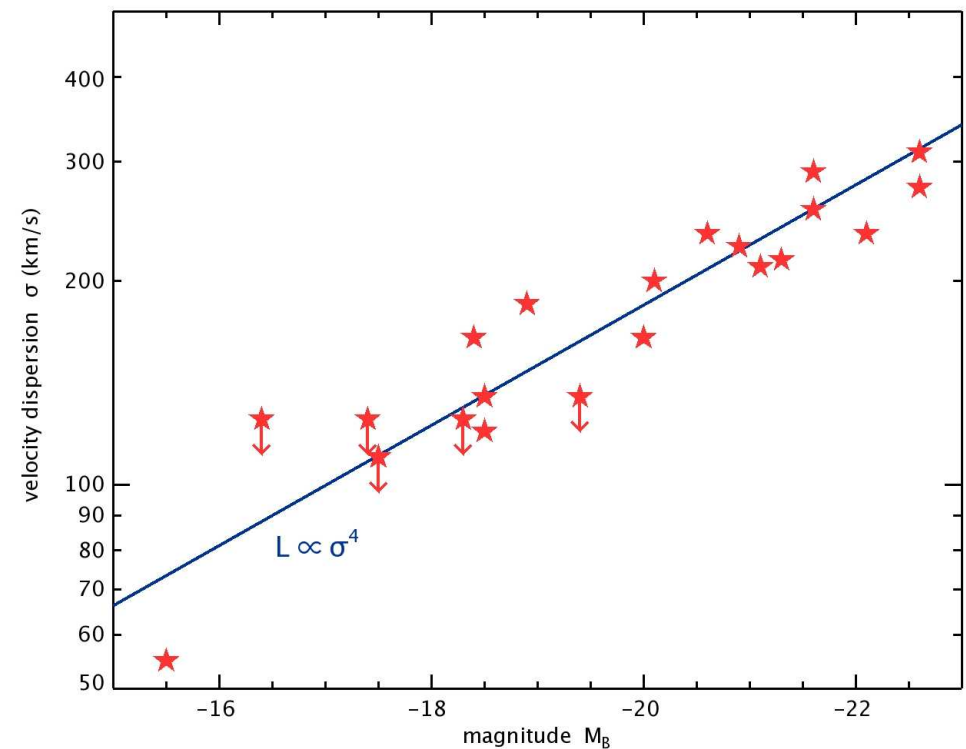
$$M_B = -11.0 \log V_{\text{max}} + 3.31 \text{ (Sc)}$$





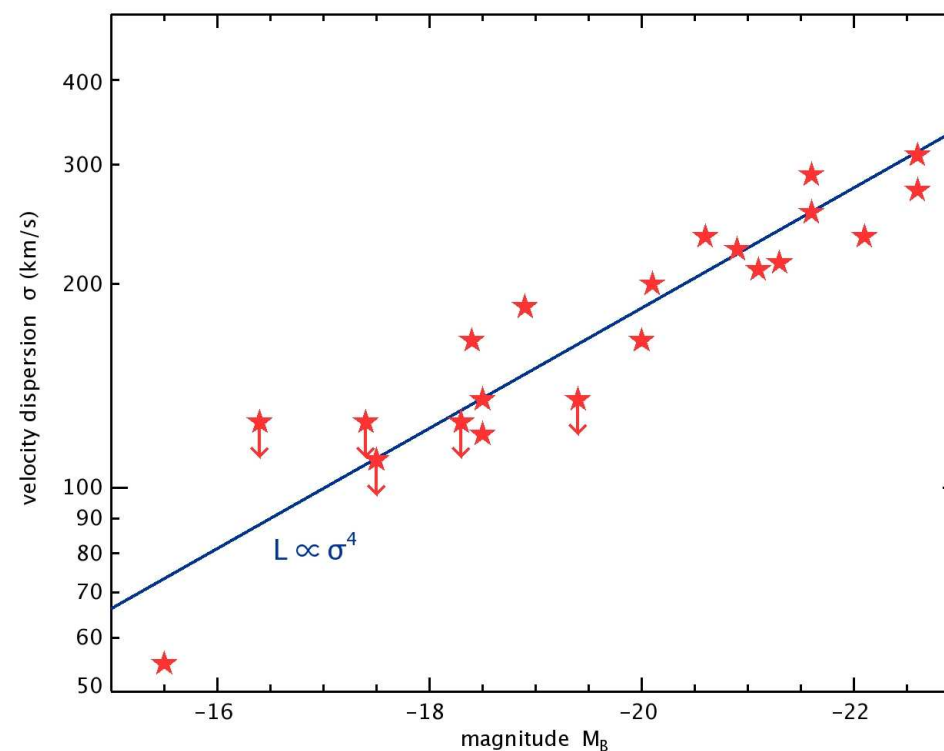
# Galaxie: Faberův - Jacksonův vztah

- Obdoba Tullyho - Fischerova vztahu pro eliptické galaxie



# Galaxie: Faberův - Jacksonův vztah

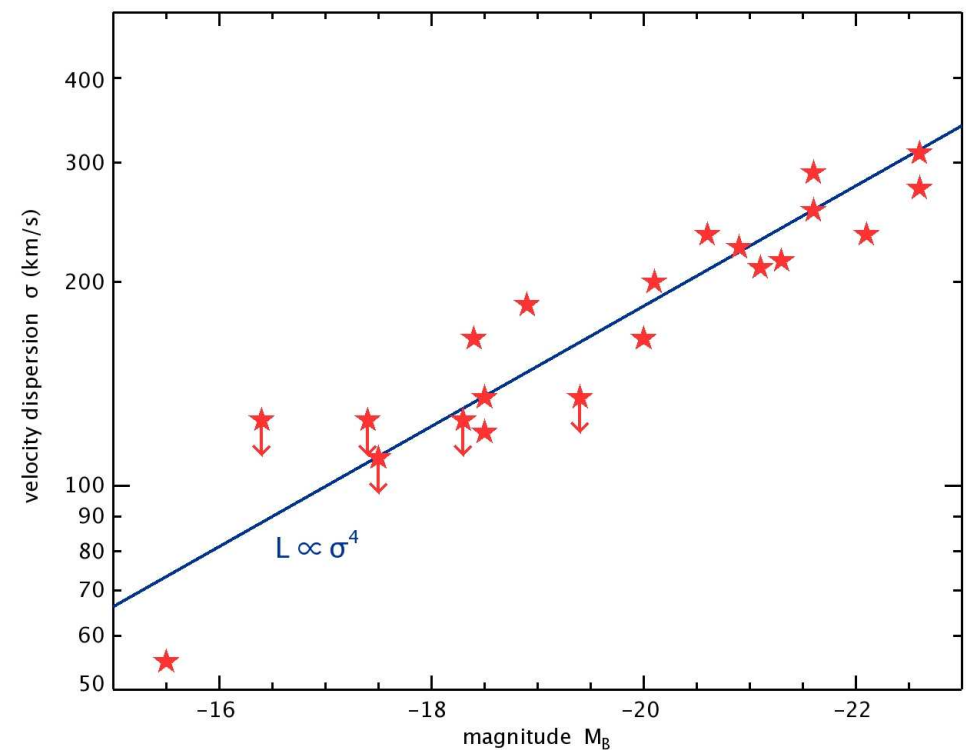
- Obdoba Tulyho - Fischerova vztahu pro eliptické galaxie
- Ze spektroskopických pozorování určíme rozptyl rychlostí hvězd v galaxii  $\sigma(v)$



# Galaxie: Faberův - Jacksonův vztah

- Obdoba Tullyho - Fischerova vztahu pro eliptické galaxie
- Ze spektroskopických pozorování určíme rozptyl rychlostí hvězd v galaxii  $\sigma(v)$
- Hodnota  $\sigma$  je indikátorem svítivosti eliptické galaxie

$$L \propto \sigma^4(v)$$



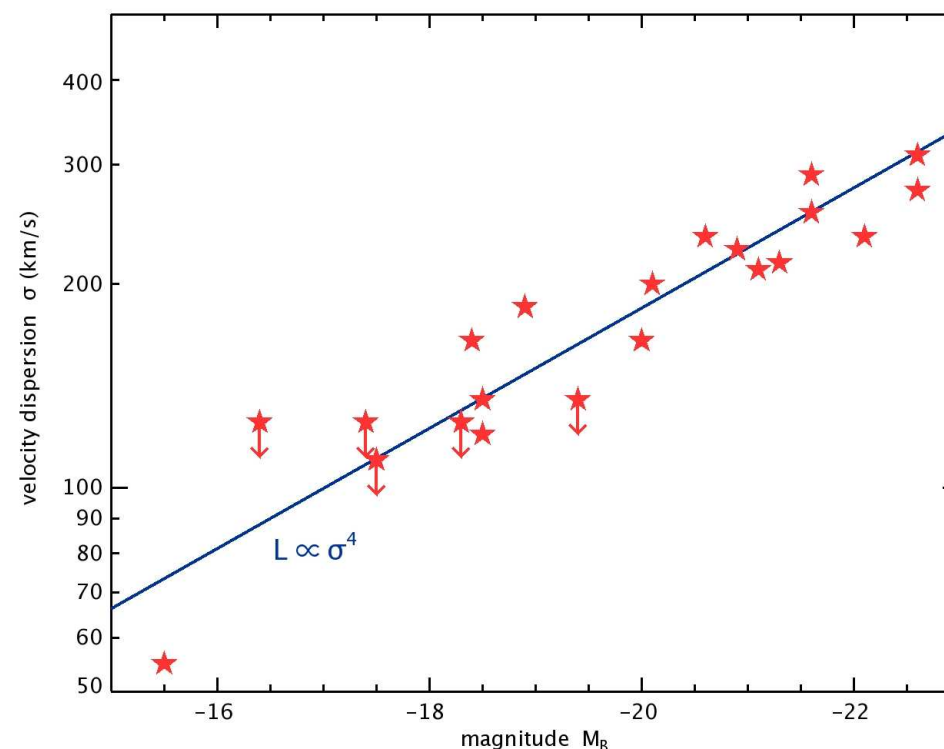
# Galaxie: Faberův - Jacksonův vztah

- Obdoba Tullyho - Fischerova vztahu pro eliptické galaxie
- Ze spektroskopických pozorování určíme rozptyl rychlostí hvězd v galaxii  $\sigma(v)$
- Hodnota  $\sigma$  je indikátorem svítivosti eliptické galaxie

$$L \propto \sigma^4(v)$$

- Vyjádřeno pomocí absolutní hvězdné magnitudy

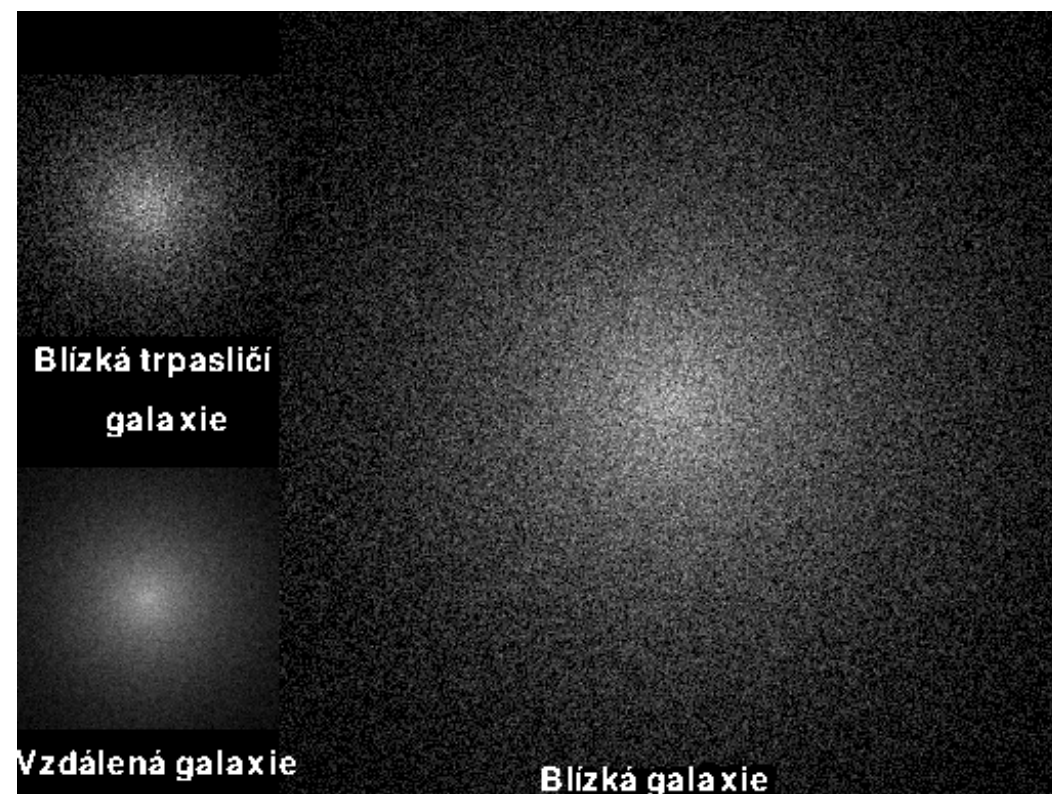
$$\log \sigma = -0.1M_B + c$$



# Metoda fluktuace povrchového jasu

Použitelná i pro velmi vzdálené galaxie, kde je téměř nemožné rozlišit samotné hvězdy.

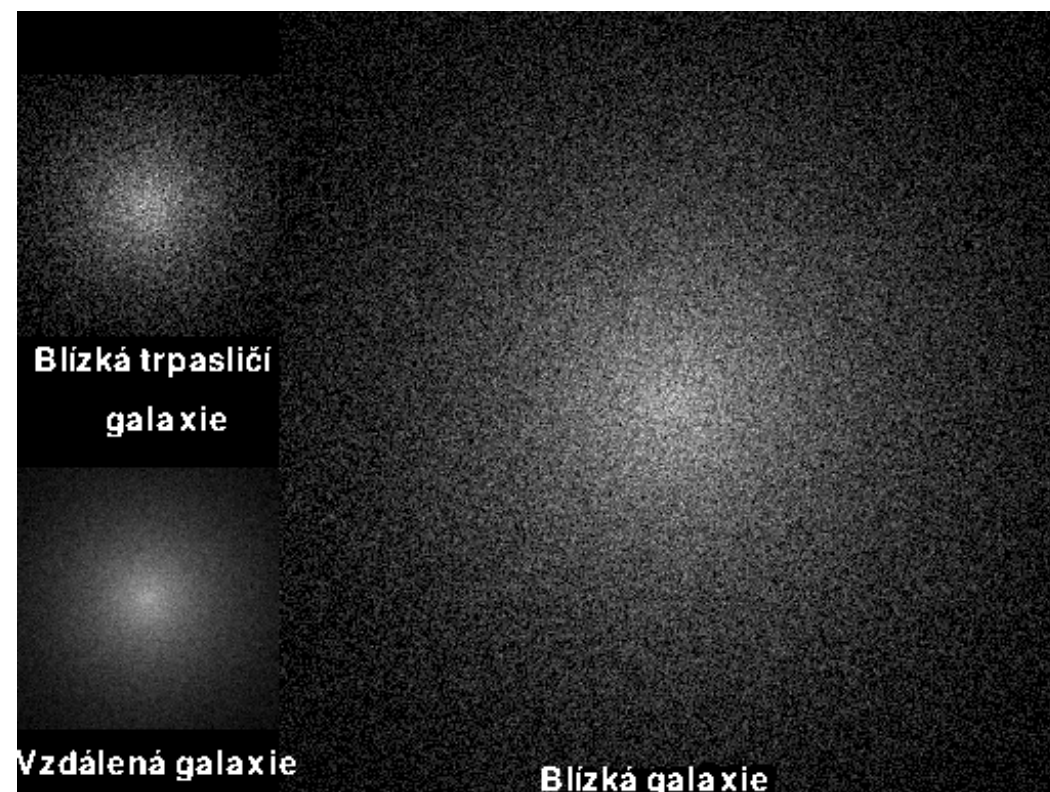
- Bližší galaxie zobrazují řekněmě 100 hvězd na 1 pixel obrazu



# Metoda fluktuace povrchového jasu

Použitelná i pro velmi vzdálené galaxie, kde je téměř nemožné rozlišit samotné hvězdy.

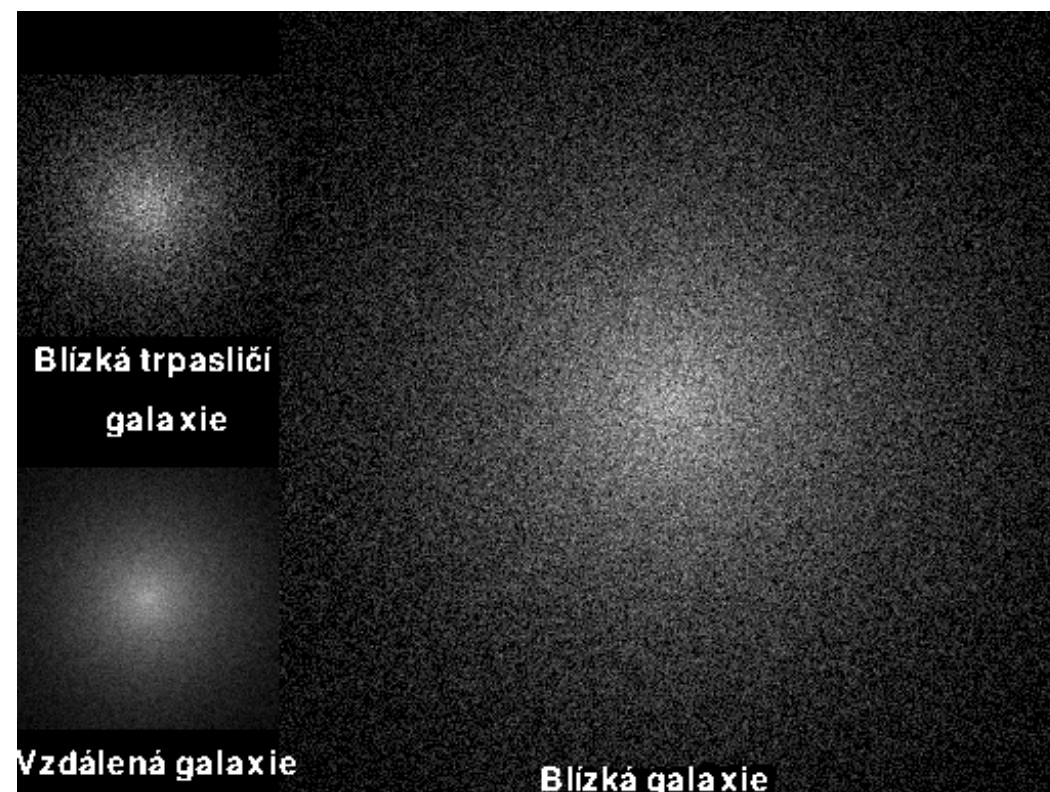
- Bližší galaxie zobrazují řekněmě 100 hvězd na 1 pixel obrazu
- Vzdálenější galaxie zobrazují více, řekněme 1000 hvězd na 1 pixel obrazu



# Metoda fluktuace povrchového jasu

Použitelná i pro velmi vzdálené galaxie, kde je téměř nemožné rozlišit samotné hvězdy.

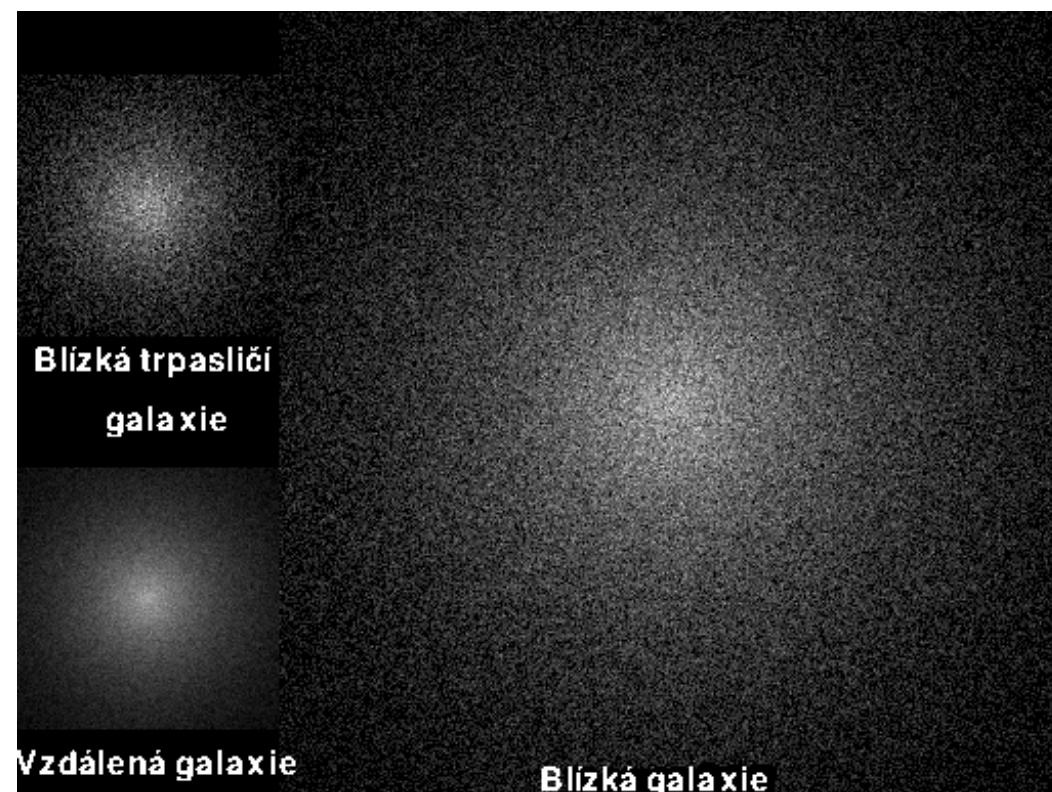
- Bližší galaxie zobrazují řekněme 100 hvězd na 1 pixel obrazu
- Vzdálenější galaxie zobrazují více, řekněme 1000 hvězd na 1 pixel obrazu
- Platí relace, čím bližší galaxie tím větší fluktuace povrchového jasu



# Metoda fluktuace povrchového jasu

Použitelná i pro velmi vzdálené galaxie, kde je téměř nemožné rozlišit samotné hvězdy.

- Bližší galaxie zobrazují řekněmě 100 hvězd na 1 pixel obrazu
- Vzdálenější galaxie zobrazují více, řekněme 1000 hvězd na 1 pixel obrazu
- Platí relace, čím bližší galaxie tím větší fluktuace povrchového jasu
- Kalibrace vztahu pomocí cefeid





# Gravitační čočky

- Vícenásobné obrazy vzdálených kvasarů



# Gravitační čočky

- Vícenásobné obrazy vzdálených kvasarů
- Časové okamžiky události (např. zjasnění) obecně různé



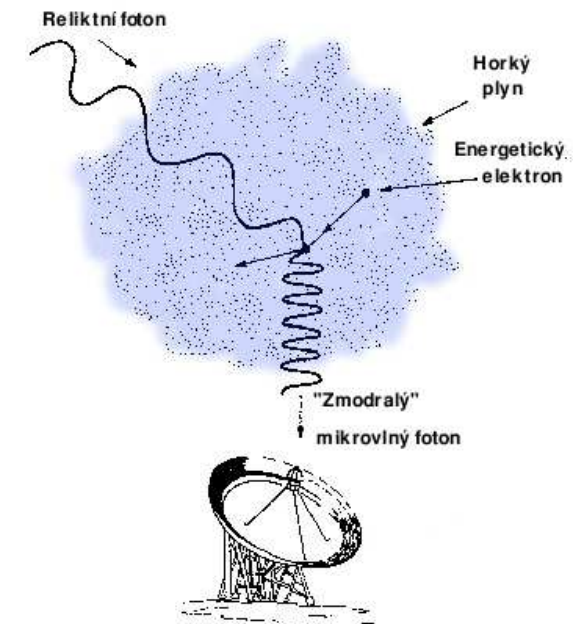
# Gravitační čočky

- Vícenásobné obrazy vzdálených kvasarů
- Časové okamžiky události (např. zjasnění) obecně různé
- Ze znalosti časového zpoždění, úhlových rozměrů mezi obrazy a vzdáleností čočky, lze určit vzdálenost



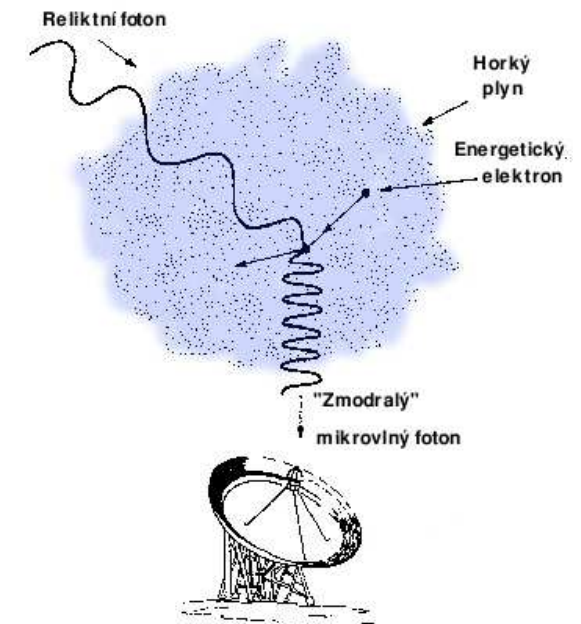
# Sunyaevův-Zeldovichův efekt

- Detailní měření reliktního záření



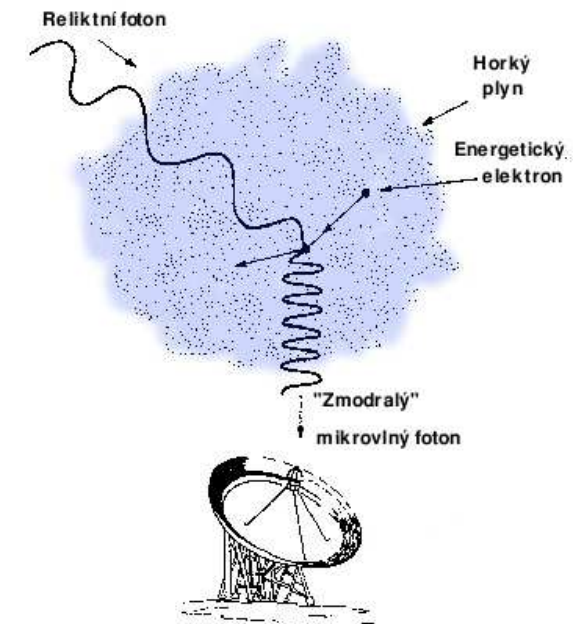
# Sunyaevův-Zeldovichův efekt

- Detailní měření reliktního záření
- V místě výskytu kupy galaxií, reliktní záření chladnější



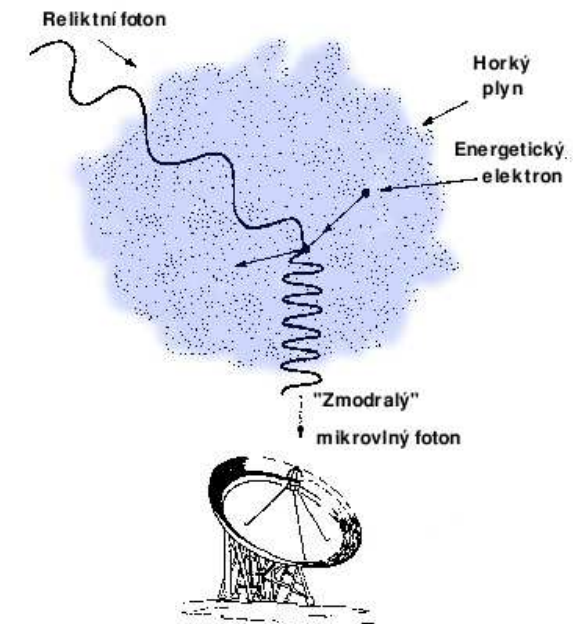
# Sunyaevův-Zeldovichův efekt

- Detailní měření reliktního záření
- V místě výskytu kupy galaxií, reliktní záření chladnější
- Interakce fotonů CMB s horkým plynem v kupě galaxií, rozptyl na elektronech



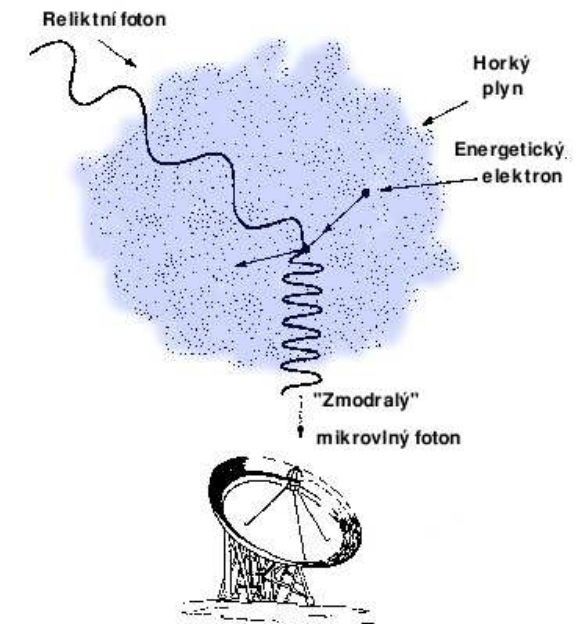
# Sunyaevův-Zeldovichův efekt

- Detailní měření reliktního záření
- V místě výskytu kupy galaxií, reliktní záření chladnější
- Interakce fotonů CMB s horkým plynem v kupě galaxií, rozptyl na elektronech
- Rozdíl v energii nízkoenergetických fotonů a energetických fotonů vůči CMB



# Sunyaevův-Zeldovichův efekt

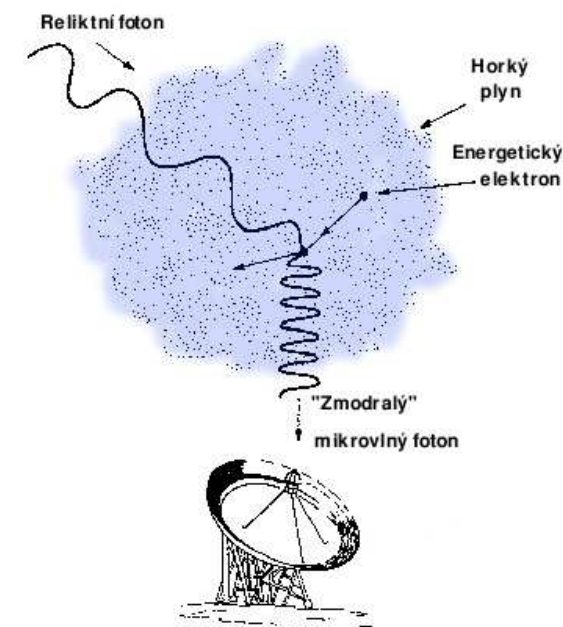
- Detailní měření reliktního záření
  - V místě výskytu kupy galaxií, reliktní záření chladnější
  - Interakce fotonů CMB s horkým plynem v kupě galaxií, rozptyl na elektronech
- 
- Rozdíl v energii nízkoenergetických fotonů a energetických fotonů vůči CMB
  - Lze odhadnout průměr kupy galaxií



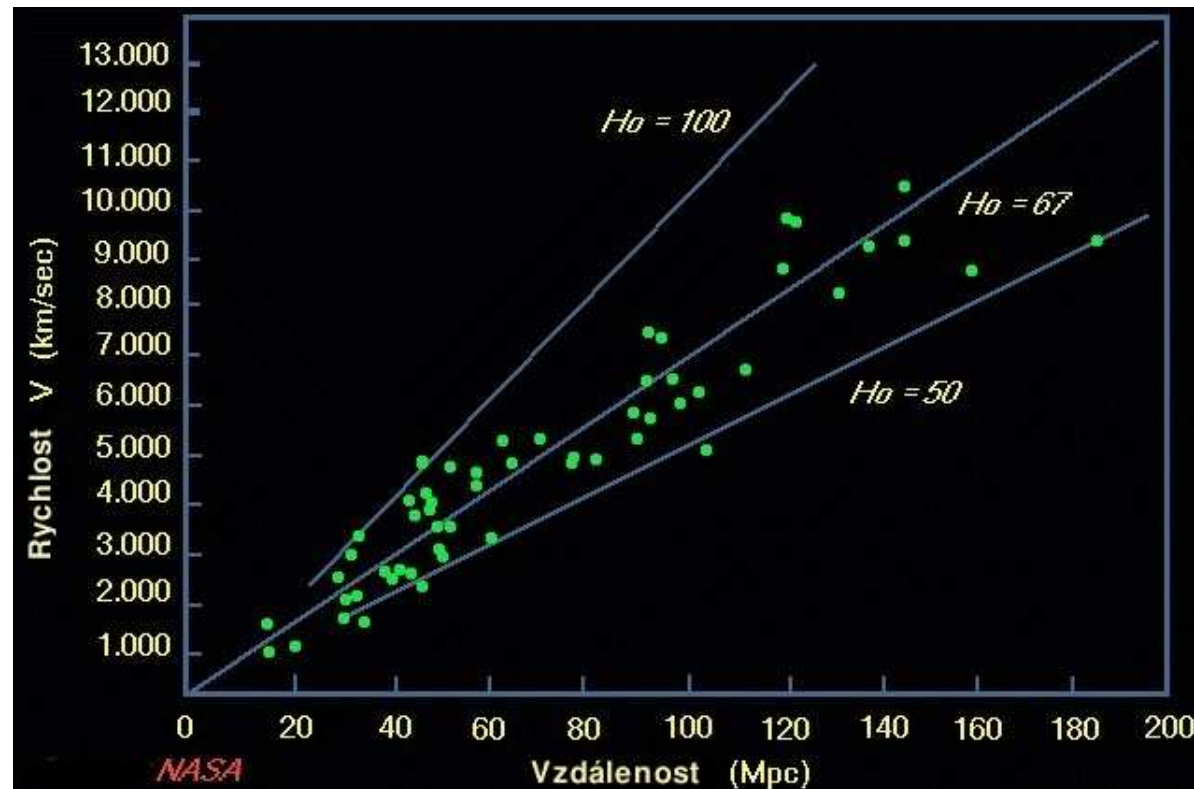


# Sunyaevův-Zeldovichův efekt

- Detailní měření reliktního záření
  - V místě výskytu kupy galaxií, reliktní záření chladnější
  - Interakce fotonů CMB s horkým plynem v kupě galaxií, rozptyl na elektronech
- 
- Rozdíl v energii nízkoenergetických fotonů a energetických fotonů vůči CMB
  - Lze odhadnout průměr kupy galaxií
  - Použitím měřeného úhlového průměru stanovíme vzdálenost



# Hubbleův zákon



Pro malé hodnoty z platí,

$$D = \frac{cz}{H_0}$$

# Metody na které se nedostalo

- Planetární mlhoviny jako standardní svíčky

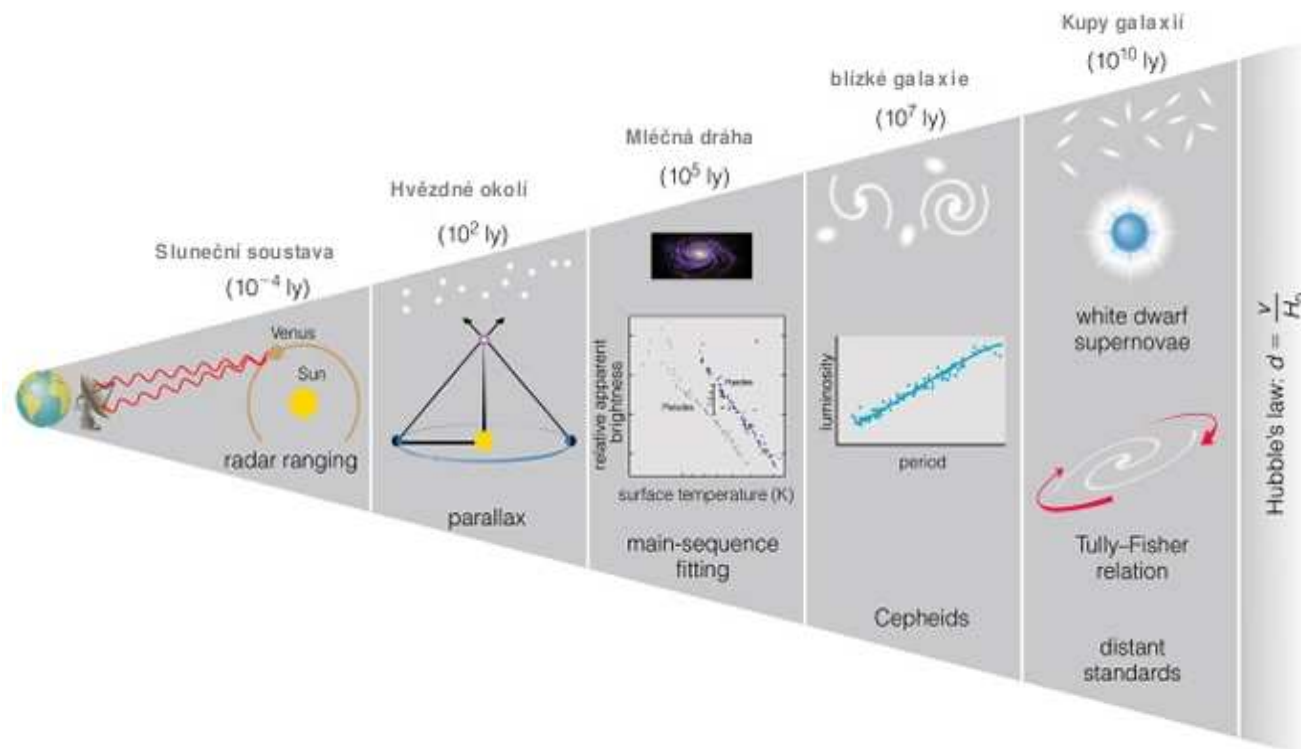


# Metody na které se nedostalo

- Planetární mlhoviny jako standardní svíčky
- Supernovy, novy, nejjasnější galaxie jako standardní svíčky



# Shrnutí metod



# Shrnutí metod

Metoda	Rozsah vzdáleností
Paralaxa	100 ly.
Cefeidy	29 Mpc
Tully-Fischer	> 100 Mpc
Faber-Jackson	> 100 Mpc
Supernovy Ia	> 1000 Mpc
Sunyaevův-Zeldovichův efekt	> 1000 Mpc
Gravitační čočkování	> 1000 Mpc
Hubbleův vztah	> 1000 Mpc

# Je vše v pořádku ?

- Jsou vzdálenosti určené různými metodami navzájem ekvivalentní ?



# Je vše v pořádku ?

- Jsou vzdálenosti určené různými metodami navzájem ekvivalentní ?
- Záleží na vlastnostech vesmíru ?





# Vzdálenosti pomocí standardních svíček

- Pro vzdálenost určenou ze svítivosti platí

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ve vesmíru popsaném RW metrikou má povrch sféry velikost

$$P_{\text{sfera}} = 4\pi S_k$$

kde

$$S_k = \begin{cases} R_0 \sin r/R_0 & (\kappa = +1) \\ r & (\kappa = 0) \\ R_0 \sinh r/R_0 & (\kappa = -1) \end{cases}$$



# Vzdálenosti pomocí úhlových rozměrů

- S pomocí znalosti rozměrů

$$D_{\text{uhl}} \approx \frac{l}{\theta}$$

- V důsledku rozpínání se mění "pravítko"

$$l = r_0 a(t_e) d\theta$$

$$d\theta = \frac{l(1+z)}{r_0 a_0}$$

$$D_{\text{uhl}} = \frac{a_0 r_0}{1+z}$$

**Stanovená vzdálenost je menší než ve skutečnosti !**

