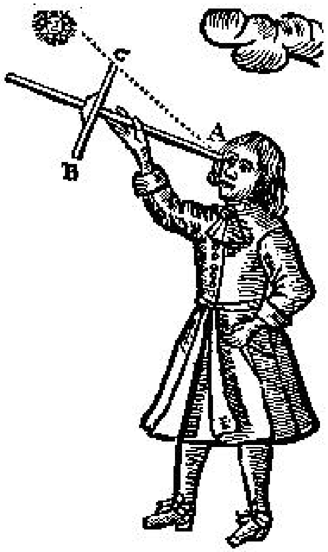
Měříme vesmír

15. března 2008

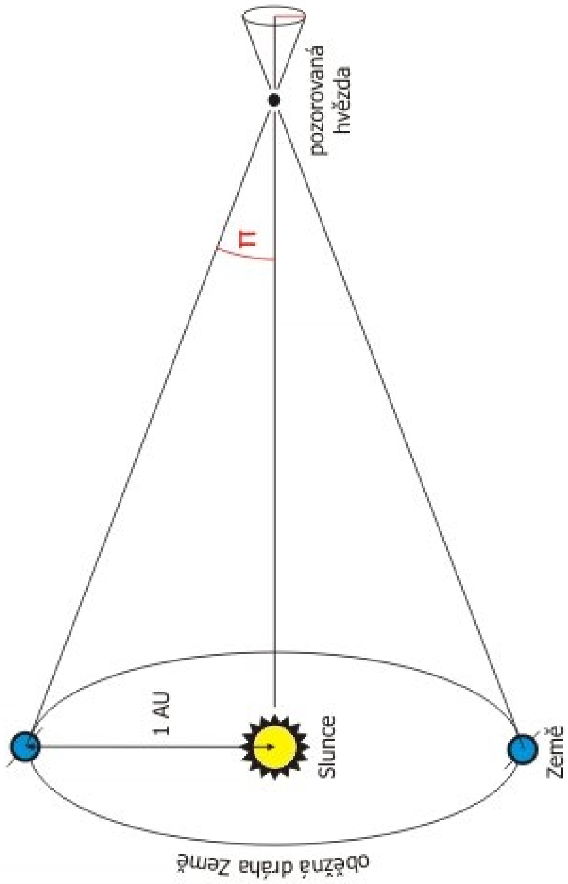


Paralaxa

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

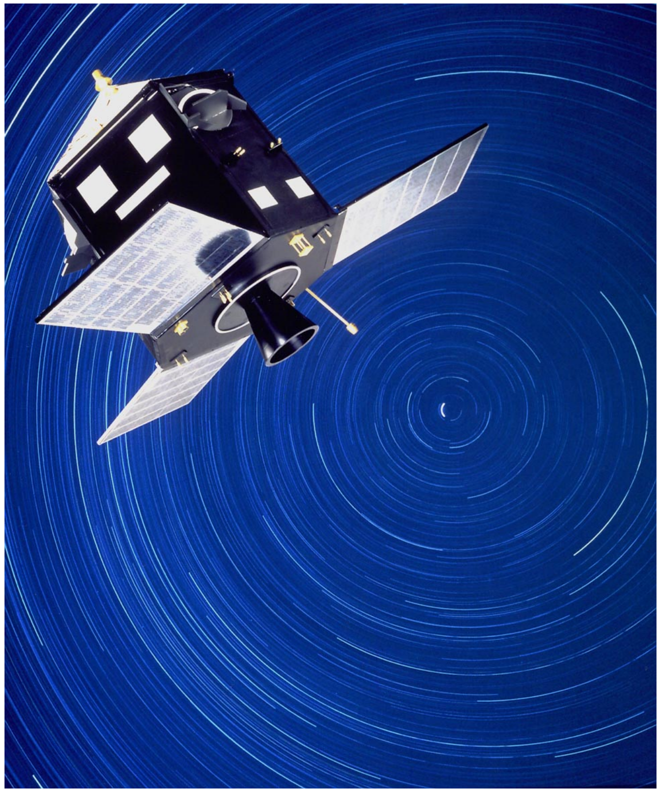
$$D = \frac{1\mathrm{AU}}{\tan p} \approx \frac{1}{p''}[\mathrm{pc}]$$

- Pouze pro nejbližší hvězdné okolí



Hipparcos

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

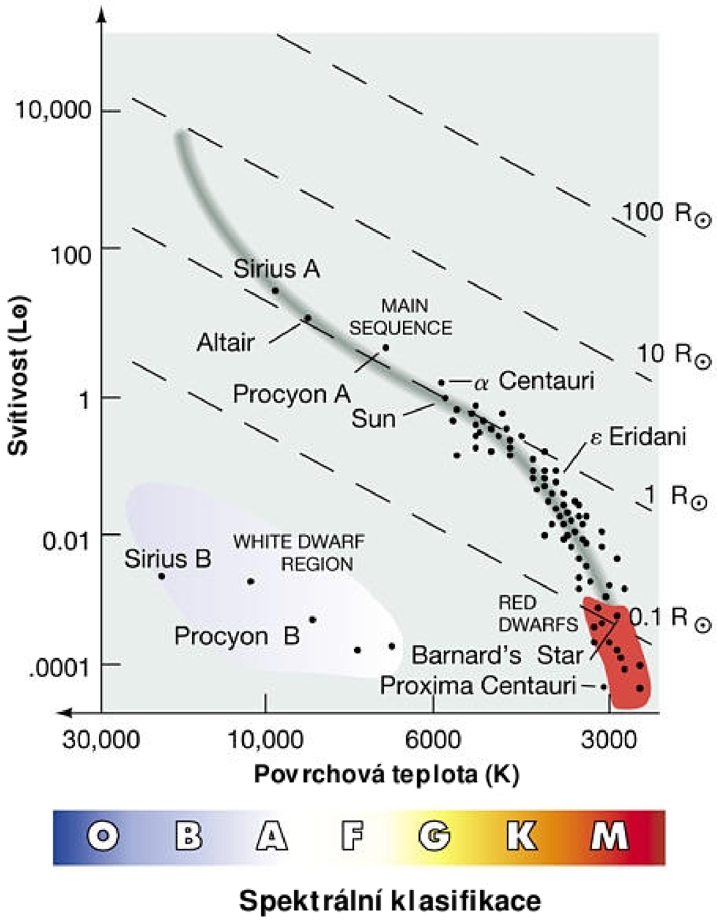


Spektroskopická paralaxa

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

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

Metoda patří spíše do standartních 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

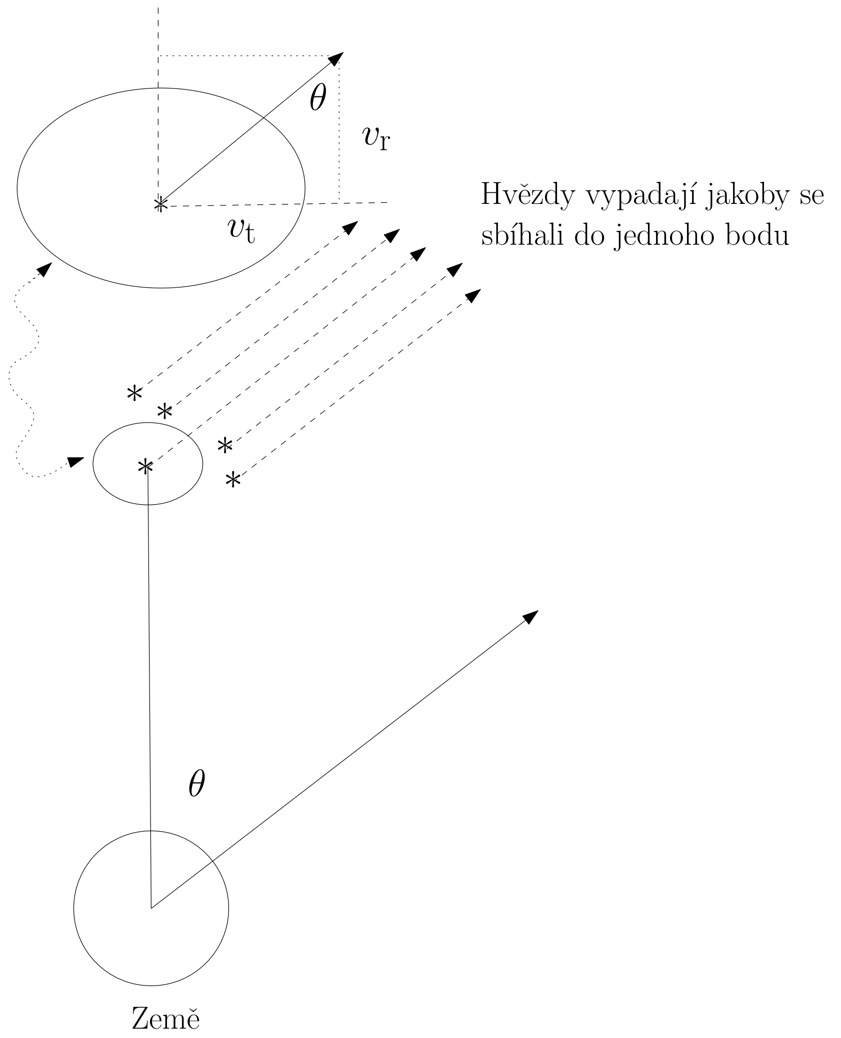
Pohybové hvězdokupy

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

$$v_{\mathrm{t}} = v_{\mathrm{r}} \tan\theta$$

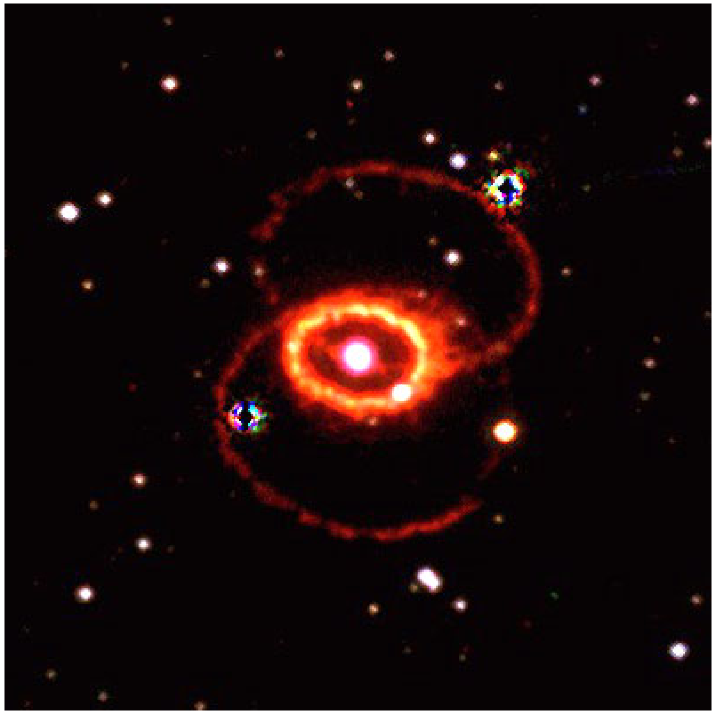
- Z dlouhodobého pozorování určíme změnu úhlu a stanovíme vzdálenost

$$D = \frac{v_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t}$$



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

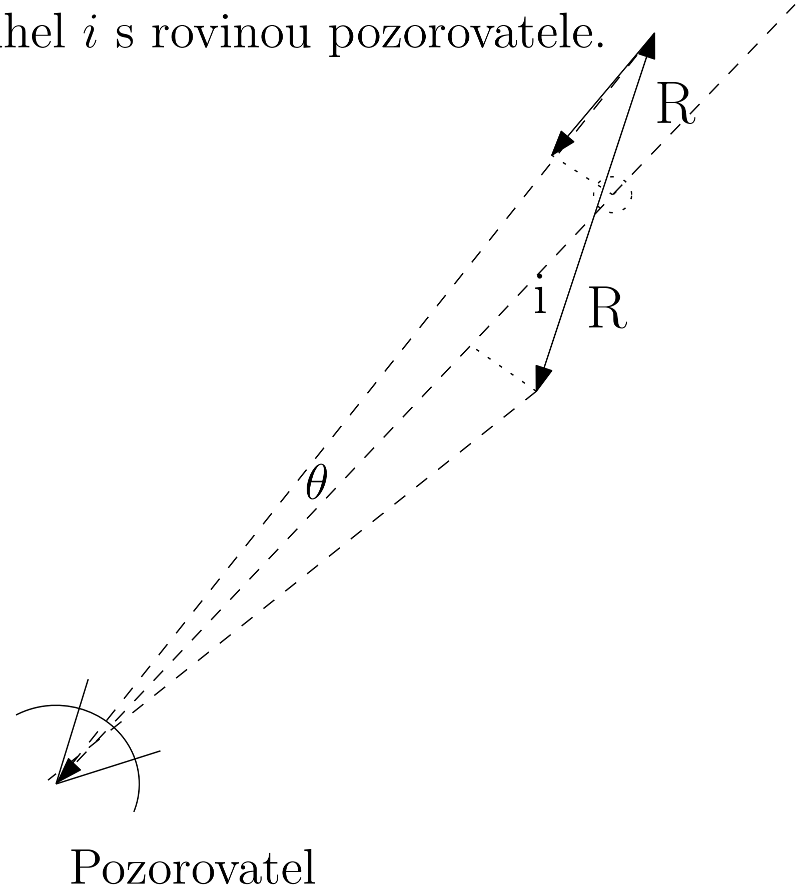
$$t_{1,2} - t_0 = R(1 \pm \cos i)/c$$

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

- Z měření úhlových rozměrů zjistíme vzdálenost

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

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

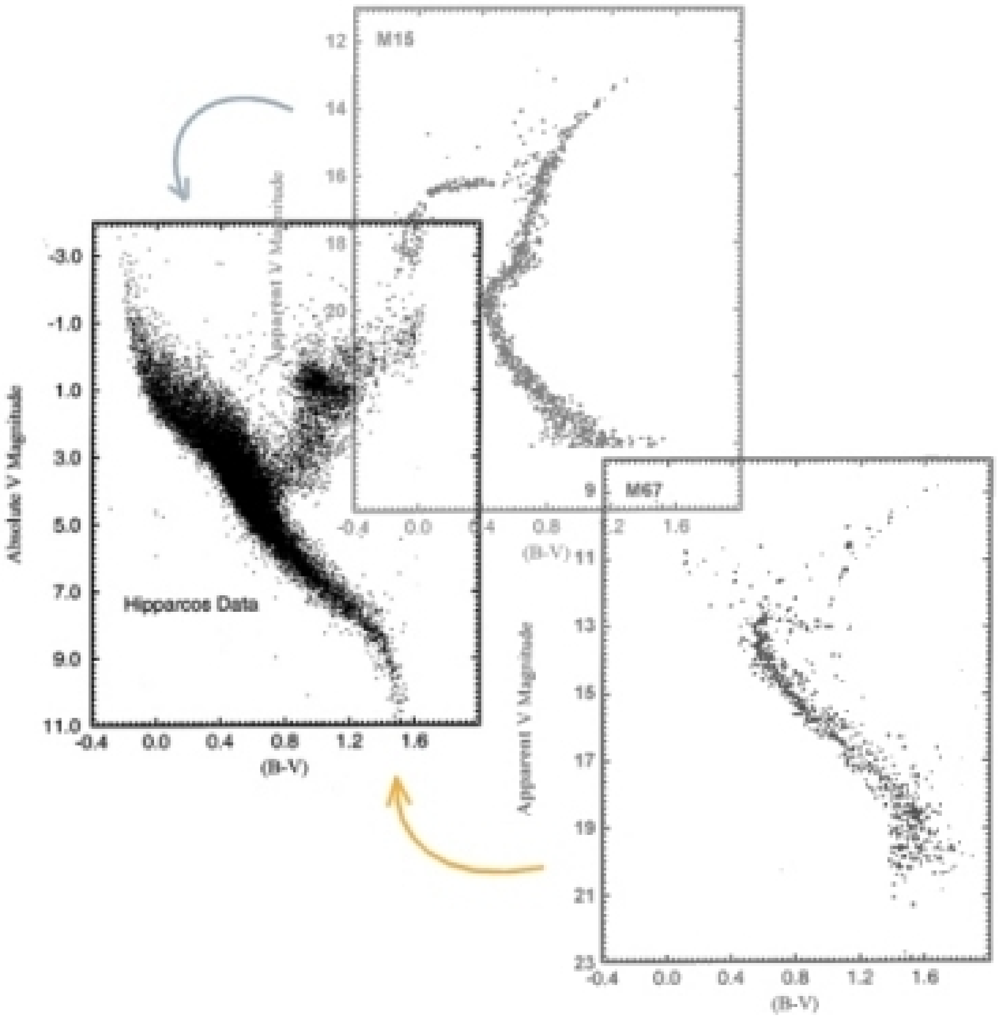


Standardní svíčky

- U takovýchto objektů známe jejich svítivost L
- 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
- 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

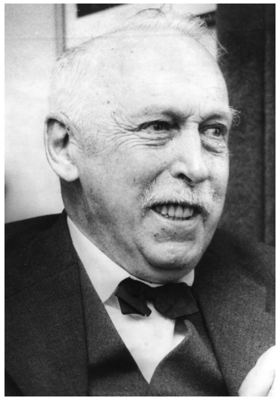
- Pozorovaní cefeid v SMC
- Objev relace mezi hvězdnou velikostí a periodou
- Nutná kalibrace vzdálenosti např. v hvězdném okolí (Hertzsprung, Shapley)

Henrietta Swan Leavitt

(1868 -1921)

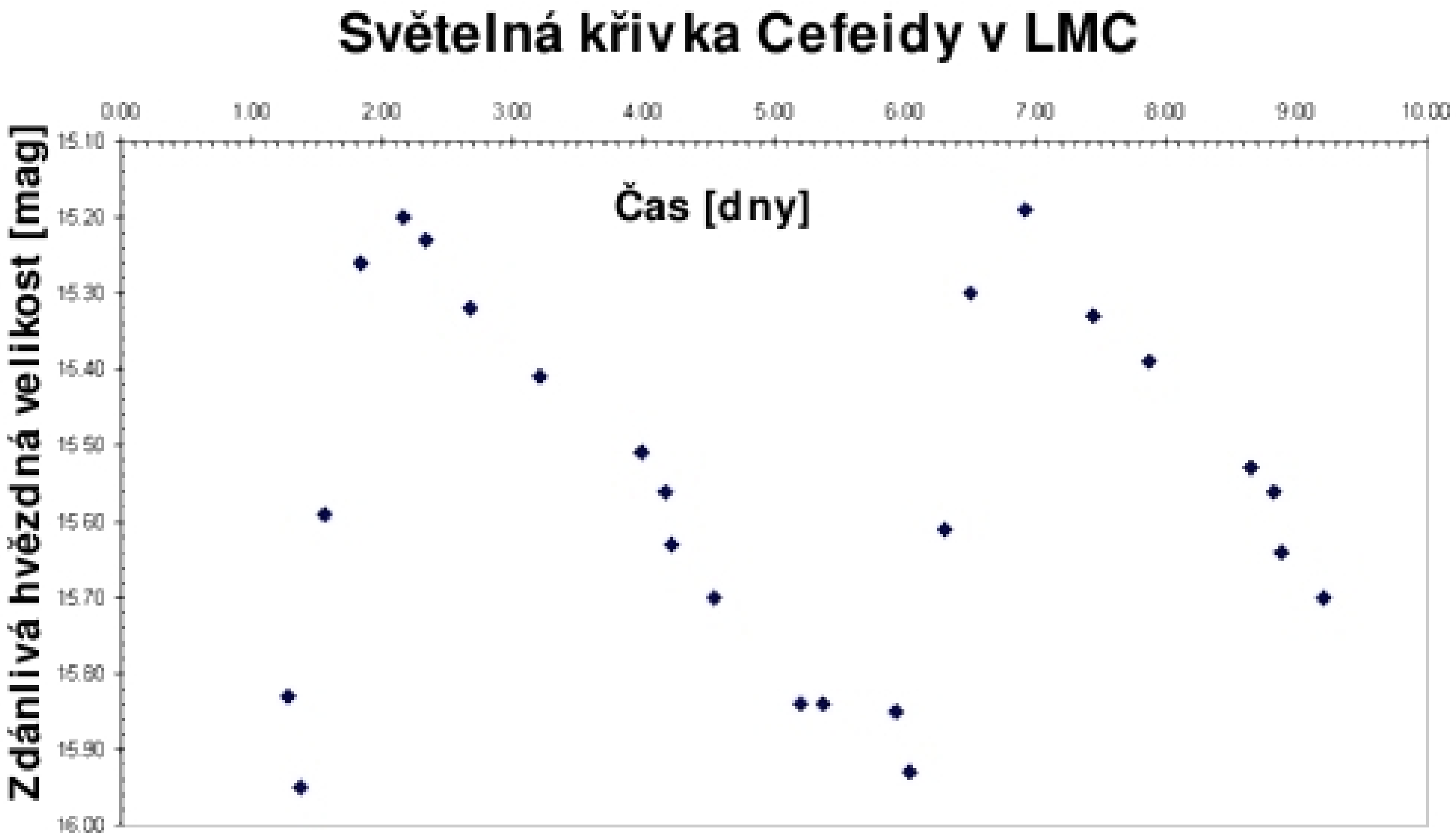
Ejnar Hertzsprung

(1873-1697)

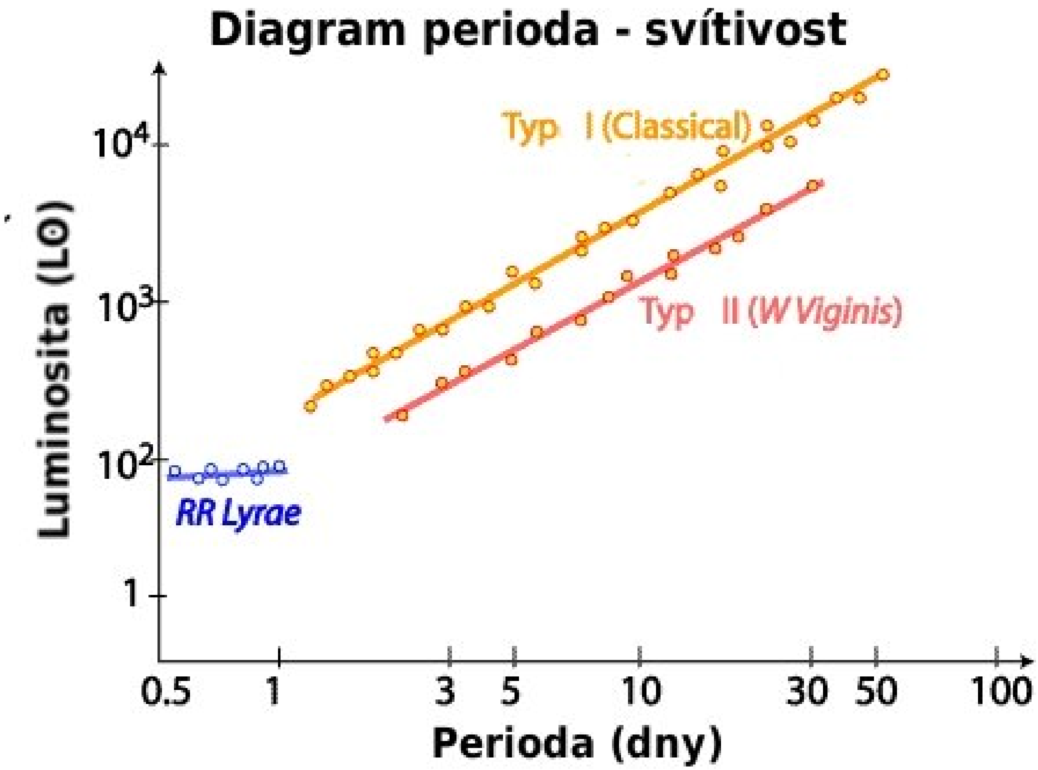


Cefeidy

Typický průběh světelné křivky Cefeid



Cefeidy



- Pro klasické cefeidy

$$M_{\mathrm{V}} = -2.81 \log P - 1.43$$

Supernovy typu Ia

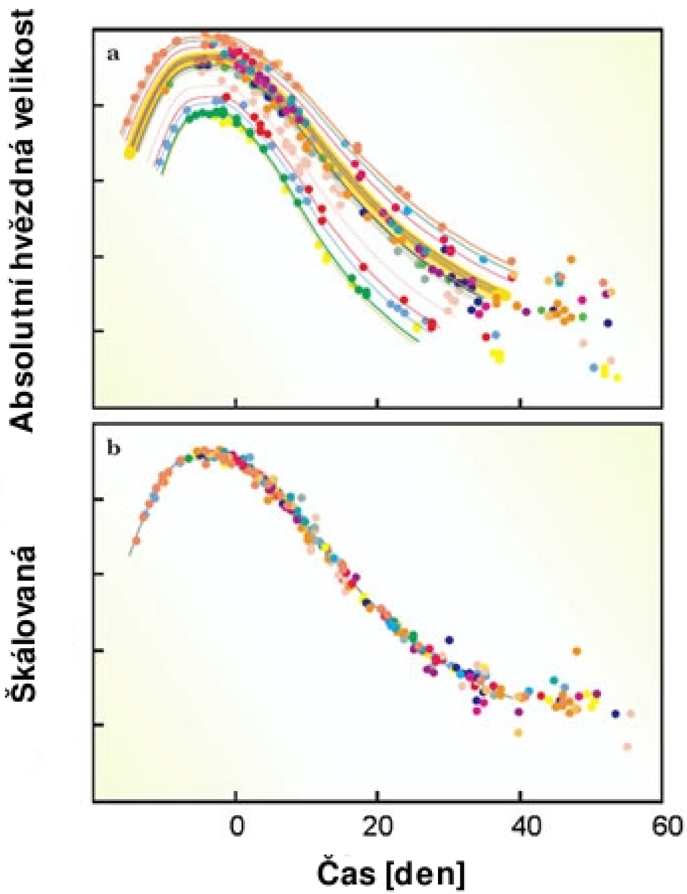
- Světelné křivky supernov typu Ia vykazují velkou podobnost
- Přímá souvislost mezi maximální jasností a rychlostí poklesu jasu světelné křivky
- Maximální absolutní hvězdná velikost

$$M_{\mathrm{B}} \simeq M_{\mathrm{V}} \simeq -19.3 \pm 0.03$$

- Pogsonova rovnice

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

A je odhad mezihvězdné extinkce



Galaxie: Tulyho -Fischerův vztah

- Pro spirální galaxie platí vztah mezi rychlostí hvězd a svítivostí

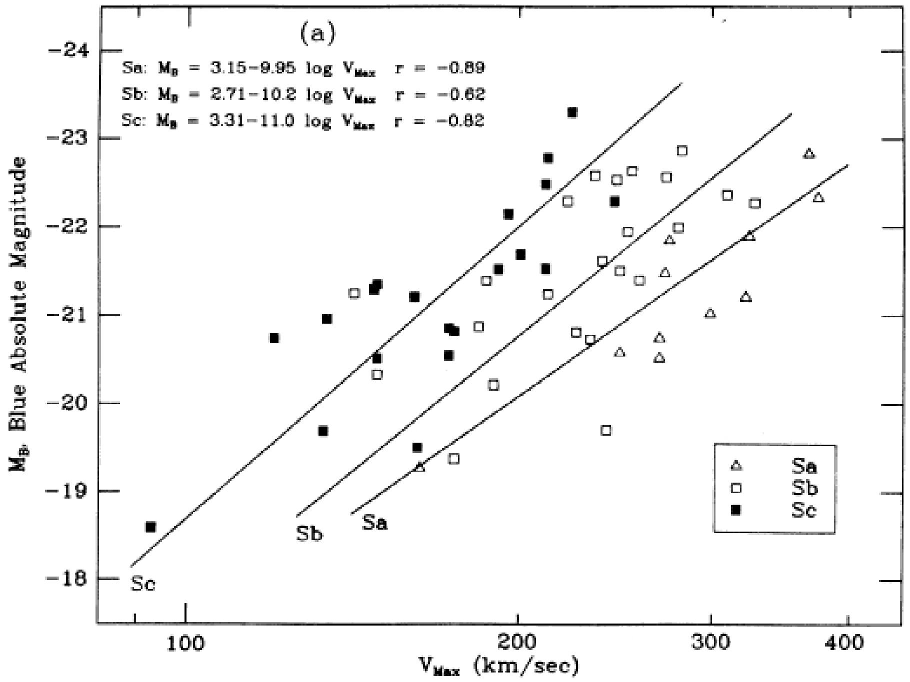
$$L \propto c V_{\mathrm{rot}}^4$$

- Ze spektroskopických měření určíme V_{max}
- Podle Hubleova typu galaxie platí relace

$$M_{\mathrm{B}} = -9.95 \log V_{\mathrm{max}} + 3.15\,(\mathrm{Sa})$$

$$M_{\mathrm{B}} = -10.2 \log V_{\mathrm{max}} + 2.71\,(\mathrm{Sb})$$

$$M_{\mathrm{B}} = -11.0 \log V_{\mathrm{max}} + 3.31\,(\mathrm{Sc})$$



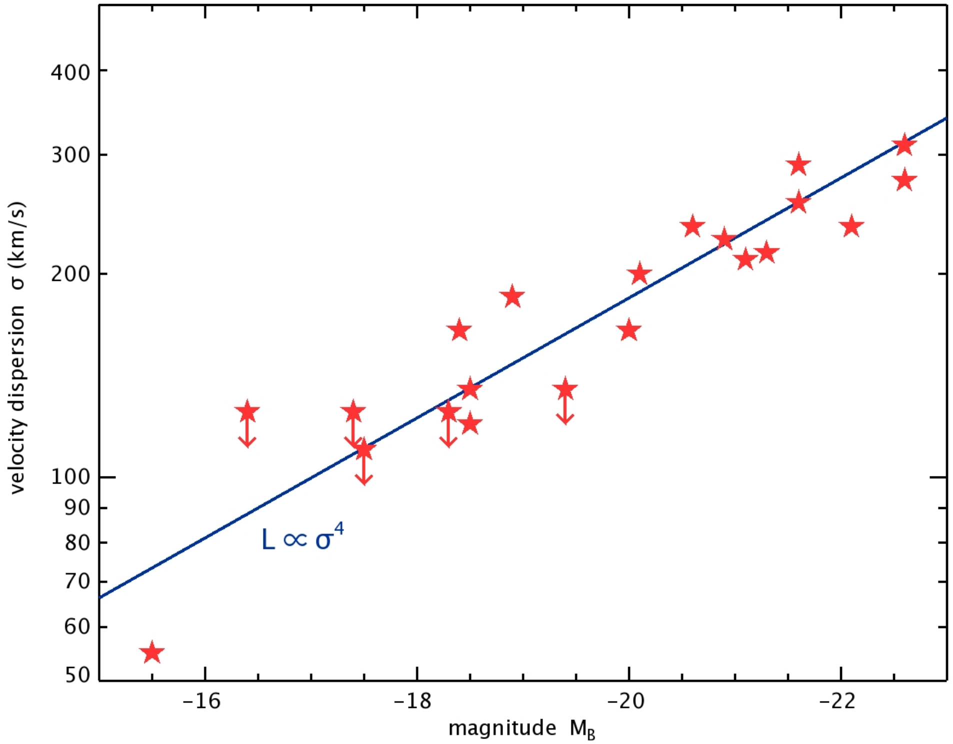
Galaxie: Faberův - Jacksonův vztah

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

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

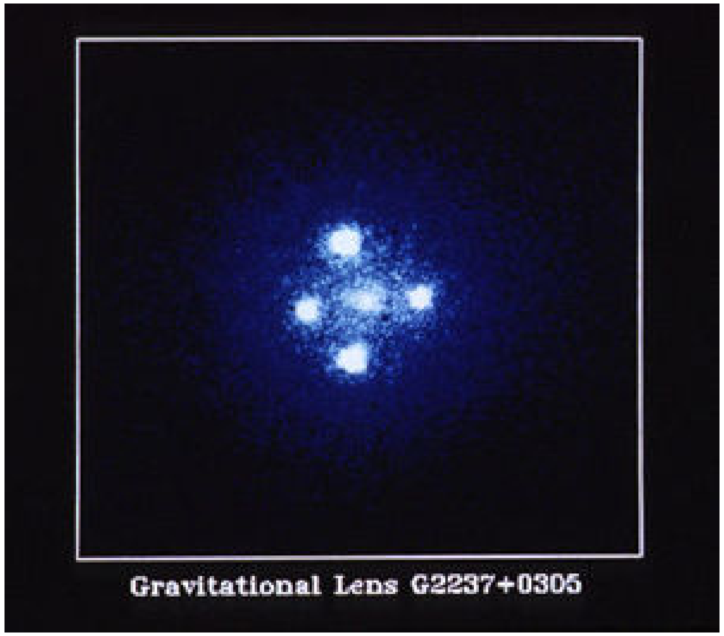
- Vyjádřeno pomocí absolutní hvězdné magnitudy

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



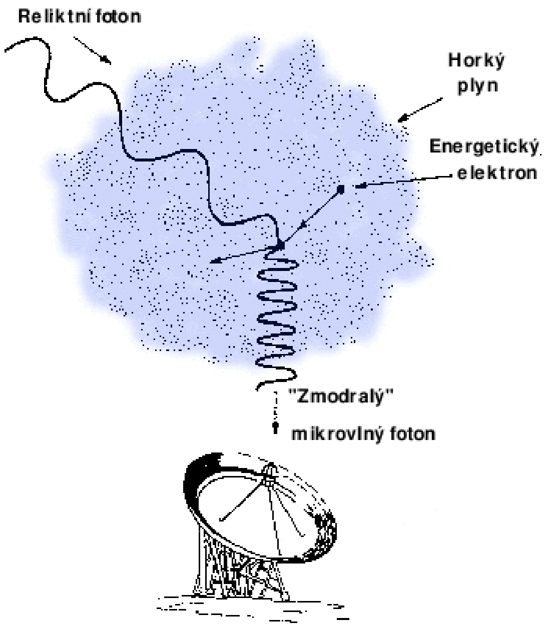
Gravitační čočky

- 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



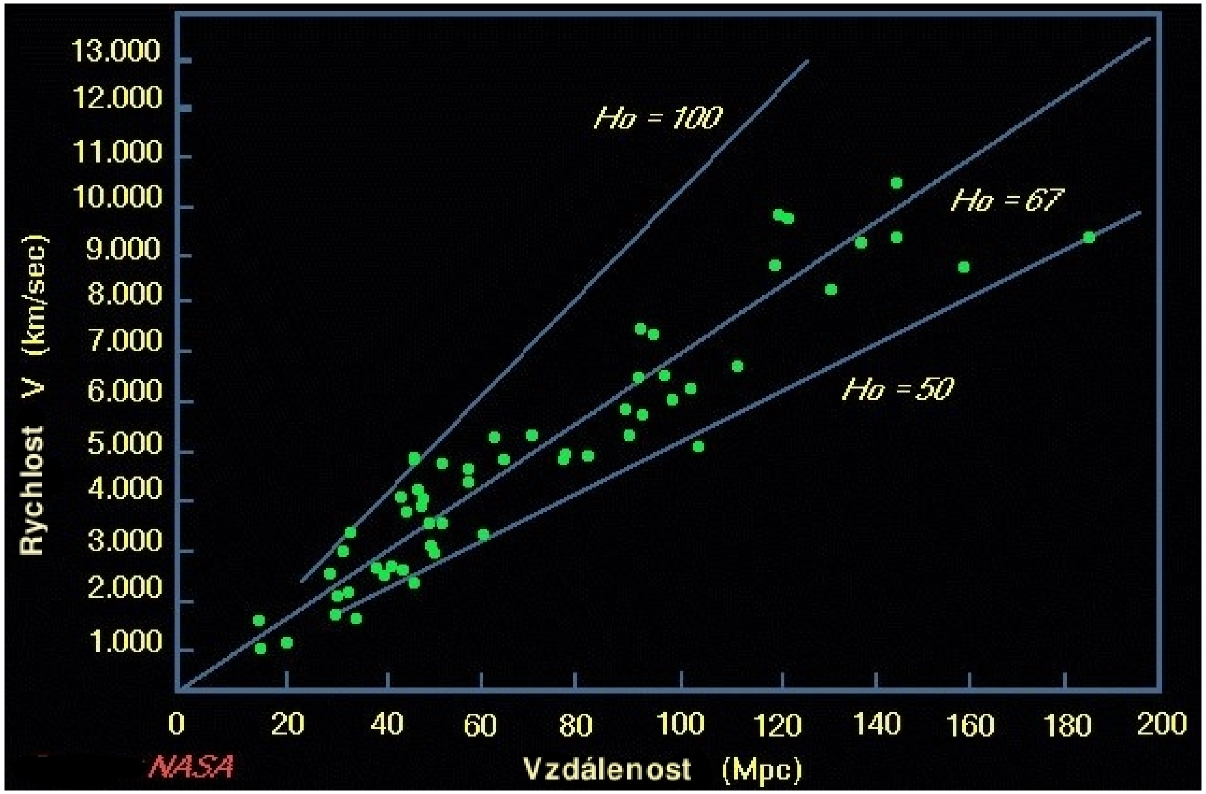
Sunyaevův-Zeldovichův efekt

- Detailní měření reliktního záření
- 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 galaxii
- Použitím měřeného úhlového průměru stanovíme vzdálenost

Hubbleův zákon



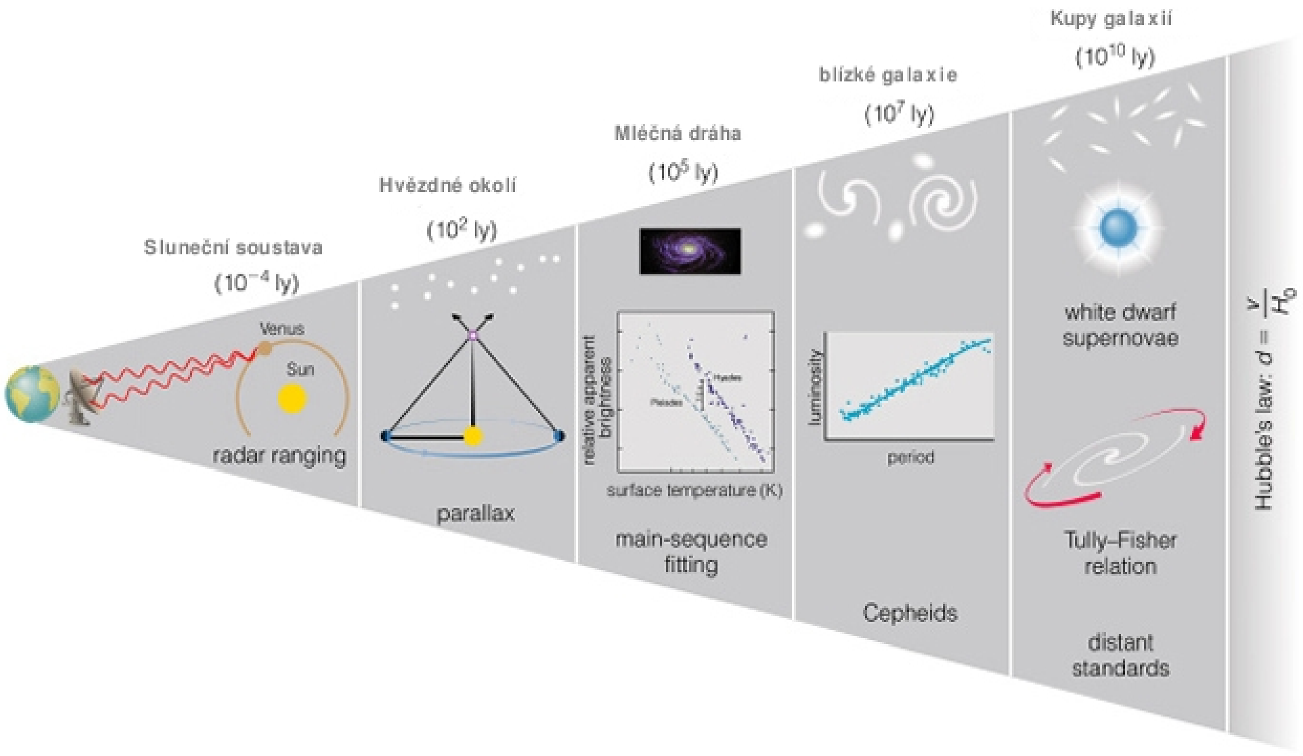
Pro malé hodnoty z platí,

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

Metody na které se nedostalo

- Planetární mlhoviny jako standardní svíčky
- Supernovy, novy, nejjasnější galaxie jako standardní svíčky
- Fluktuace povrchového jasu

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 ?
- Záleží na vlastnostech vesmíru ?

Vzdálenosti pomocí standardních svíček

- Pro vzdálenost určenou ze svítivosti platí

$$D_{\mathrm{L}} = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ve vesmíru popsaném RW metrikou má povrch sféry velikost

$$P_{\mathrm{sfera}} = 4\pi S_{\mathrm{k}}$$

kde

$$S_{\mathrm{k}} = \begin{cases} R_0 \sin r/R_0 \quad (\kappa = +1) \\ r \quad (\kappa = 0) \\ R_0 \sinh r/R_0 \quad (\kappa = -1) \end{cases}$$

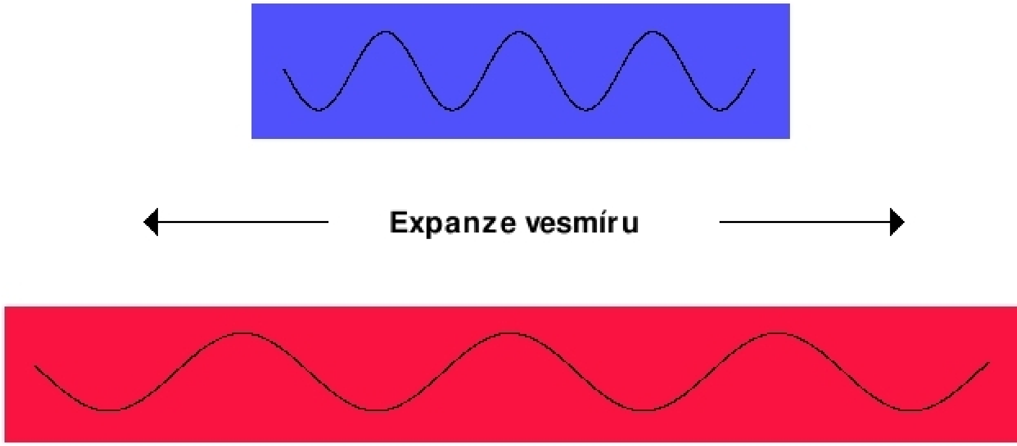
Vzdálenosti pomocí standardních svíček

V důsledku rozpínání vesmíru

- Klesá energie fotonu $\propto (1+z)$
- Foton detekujeme méně častěji $\propto (1+z)$

Zářivý tok, který detekujeme po zahrnutí těchto efektů

$$F = \frac{L}{4\pi S_{\mathrm{k}}(1+z)^2}$$



Pro plochý vesmír $\kappa = 0$

$$D_{\mathrm{L}} = r(1+z)$$

Stanovená vzdálenost je větší než ve skutečnosti !

Vzdálenosti pomocí úhlových rozměrů

- S pomocí znalosti rozměrů

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

- V důsledku rozpínání se mění "pravítko"

$$l = r_0 a(t_e) \mathrm{d}\theta$$

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

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

Stanovená vzdálenost je menší než ve skutečnosti !