



základy astronomie a astrofyziky

PROMĚNNÉ HVĚZDY,
MEZIHVĚZDNÉ PROSTŘEDÍ,
EXOPLANETY

Citát

„Premenné hviezdy sú všade kolem nás, ale ktoré to sú, to vám nepoviem, lebo to sám neviem ...“

slovenský stelárni astronom

RNDr. Ladislav Hric, CSc.

hvězdárna Ždánice

léto počátkem 80. let minulého století



Definice

- ▶ hvězdy, jejichž pozorovaná jasnost se s časem mění
- ▶ asi 10 % hvězd jsou hvězdy zjevně proměnné
- ▶ rozvoj diagnostických metod = vyšší procento proměnných hvězd v náhodném vzorku hvězd
- ▶ rozpětí pozorovaných světelných změn od 1 milimagnitudy ($0,001 \text{ mag} \cong 1 \text{ ‰}$) do desítek magnitud ($10 \text{ mag} = 1 : 10^4$, $15 \text{ mag} = 1 : 10^6$)
- ▶ časové škály: od 10^{-4} s do časových měřítek změn vlivem hvězdného vývoje

Historie

- ▶ Tycho Brahe objevil r. 1572 „novou“ hvězdu v souhvězdí Kasiopeji
- ▶ periodicky proměnná hvězda – r. 1596, David Fabricius, o Ceti
- ▶ systematický výzkum E. Pigott a J. Goodricke (G. objevil světelné změny Algolu 1782-3)
- ▶ 1786 Pigott publikoval *první katalog proměnných hvězd* - 12 exemplářů

Historie

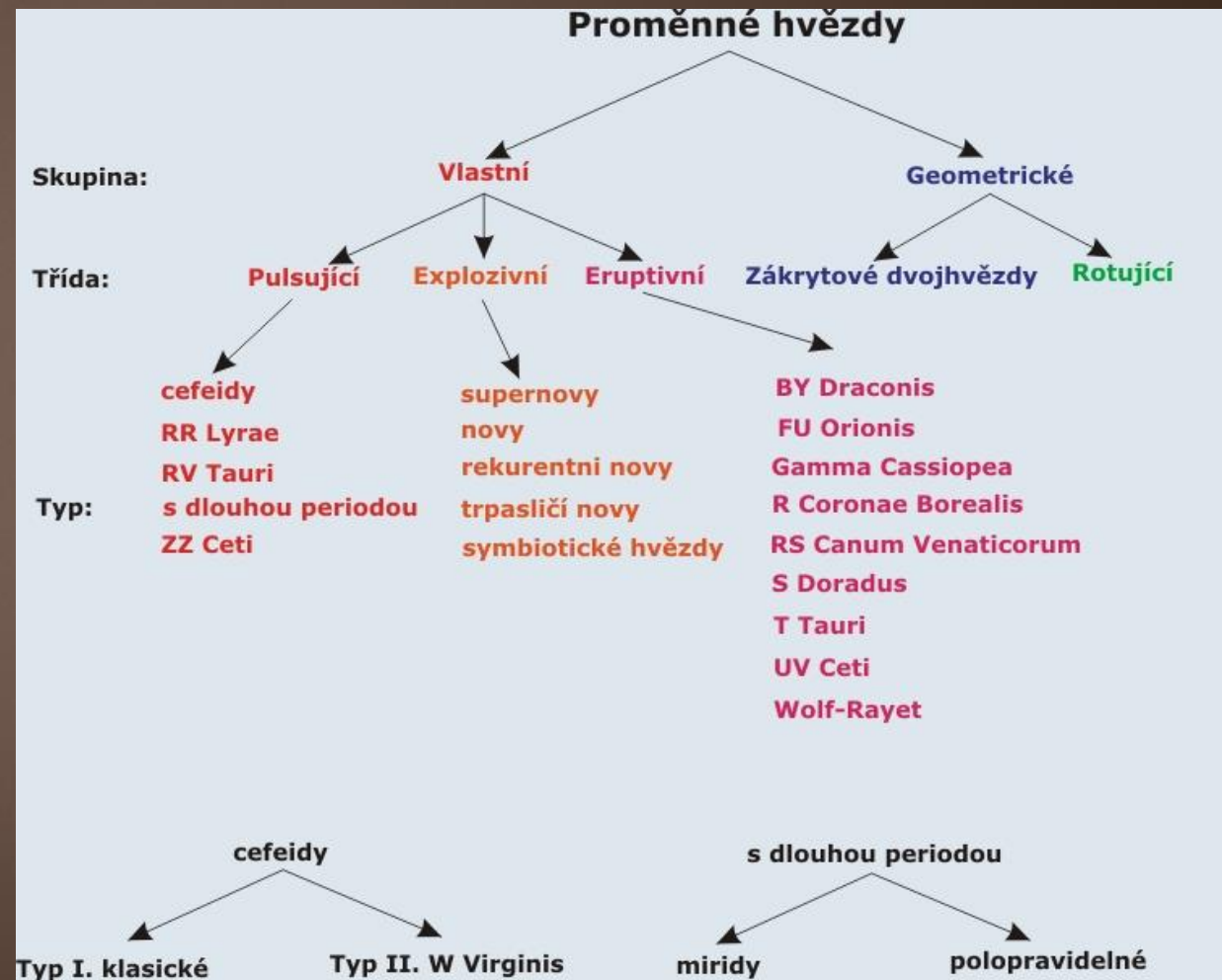
- ▶ fotografické metody – pořizovaly se skleněné archívy
- ▶ počet známých proměnných hvězd během 20. století vzrostl ze 700 na dnešních více než 2 000 000 viz [AAVSO](#)
- ▶ astrometrická družice *Hipparcos*, 12 000 nových PH
- ▶ základním katalog - *General Catalogue of Variable Stars*
- ▶ před latinským názvem souhvězdí ve 2. pádu se uvádí kombinace písmen nebo čísel v tomto pořadí: R, S, T, ...Z, RR, RS, RT, ...RZ, SS, ST, ..., SZ, TT,...ZZ, AA, AB, ...) QQ, QZ, V 343, V 344 ...například V 3891 Sgr.
- ▶ jiné typy proměnných hvězd – rentgenové nebo radiové zdroje, označení z příslušného katalogu, označení obsahuje zaokrouhlenou rektascenzi a deklinaci

Mechanismy proměnnosti

▶ dva základní typy

▶ **geometrické**, kde se světelný tok z hvězdy nebo hvězdné soustavy nemění, mění se však její svítivost

▶ **fyzické**, skutečné proměnné hvězdy, u nichž se reálně mění jejich zářivý výkon



Geometrické proměnné hvězdy

- ▶ rotující proměnné hvězdy
 1. sledovaná hvězda rotuje
 2. hvězda je členkou podvojně soustavy
- ▶ magnetické hvězdy
- ▶ hvězdná aktivita
- ▶ dvojhvězdy
 1. zákrytové dvojhvězdy
 2. interagující dvojhvězdy

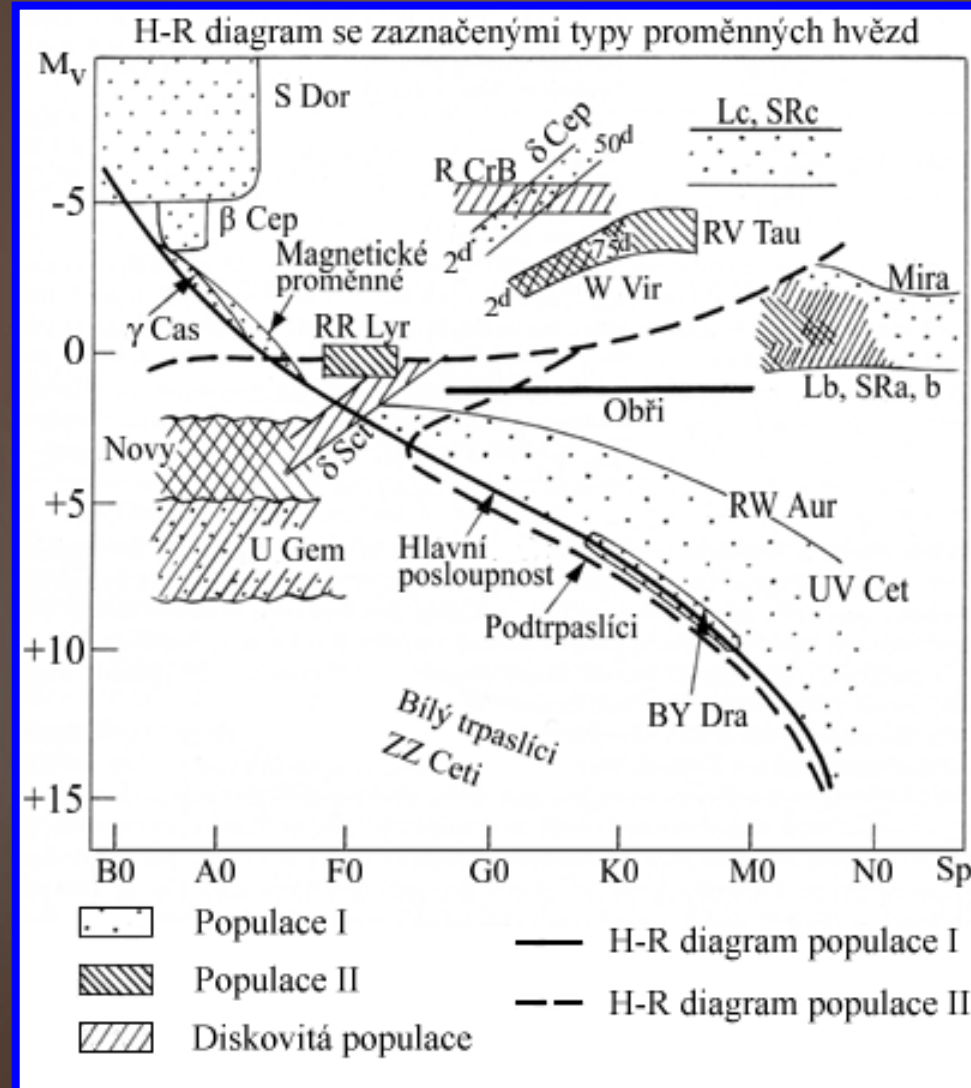
Fyzické proměnné hvězdy

- ▶ nestacionární děje v okolí hvězdy
- ▶ nestacionární děje na povrchu hvězdy
- ▶ pulzující proměnné hvězdy
- ▶ supernovy
- ▶ záblesky záření gama

Typy proměnných hvězd

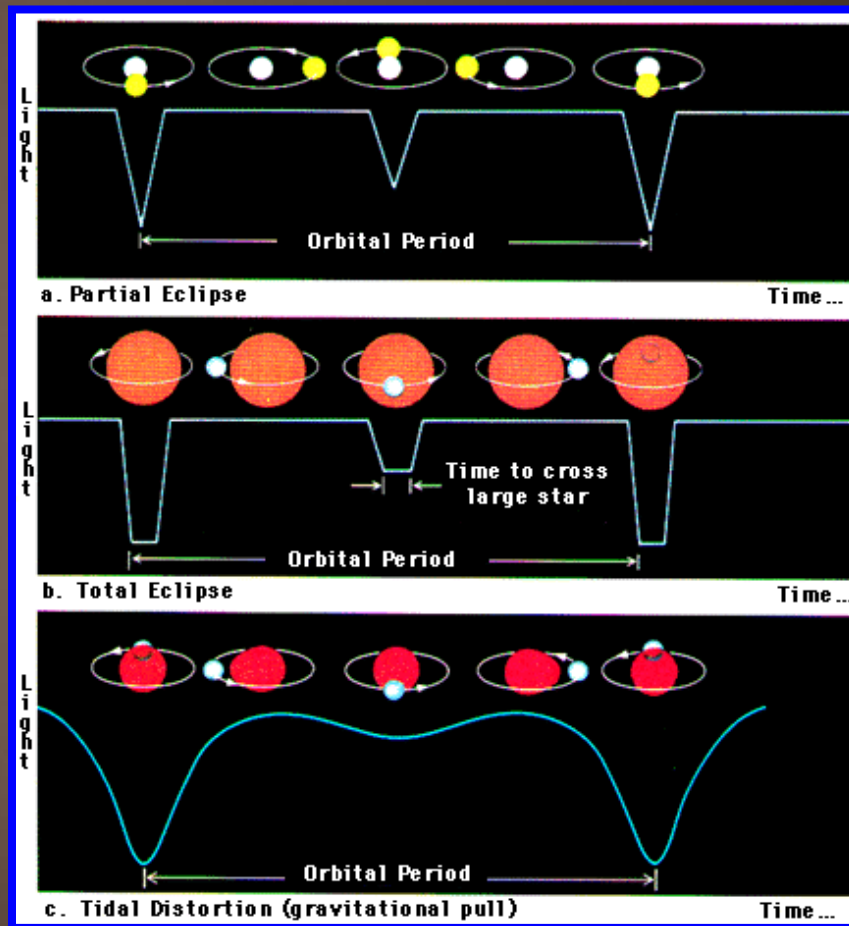
- ▶ alolidy, cefeidy, eruptivní trpaslíci, heliové proměnné
- ▶ hvězdy typu SR, hvězdy typu RS CVn, hvězdy typu α^2 CVn, hvězdy typu β Cephei, hvězdy typu ZZ Ceti, hvězdy typu R CrB, hvězdy typu S Doradus, hvězdy typu γ Doradus, hvězdy typu BY Draconis, hvězdy typu RR Lyrae, hvězdy typu β Lyrae, hvězdy typu YY Orionis, hvězdy typu FU Orionis, hvězdy typu δ Scuti, hvězdy typu T Tauri, hvězdy typu RV Tauri, hvězdy typu W Uma, hvězdy typu W Vir
- ▶ miridy, novám podobné hvězdy, novy, polary, pulzary, Ap hvězdy, supernovy, symbiotické hvězdy, trpasličí novy

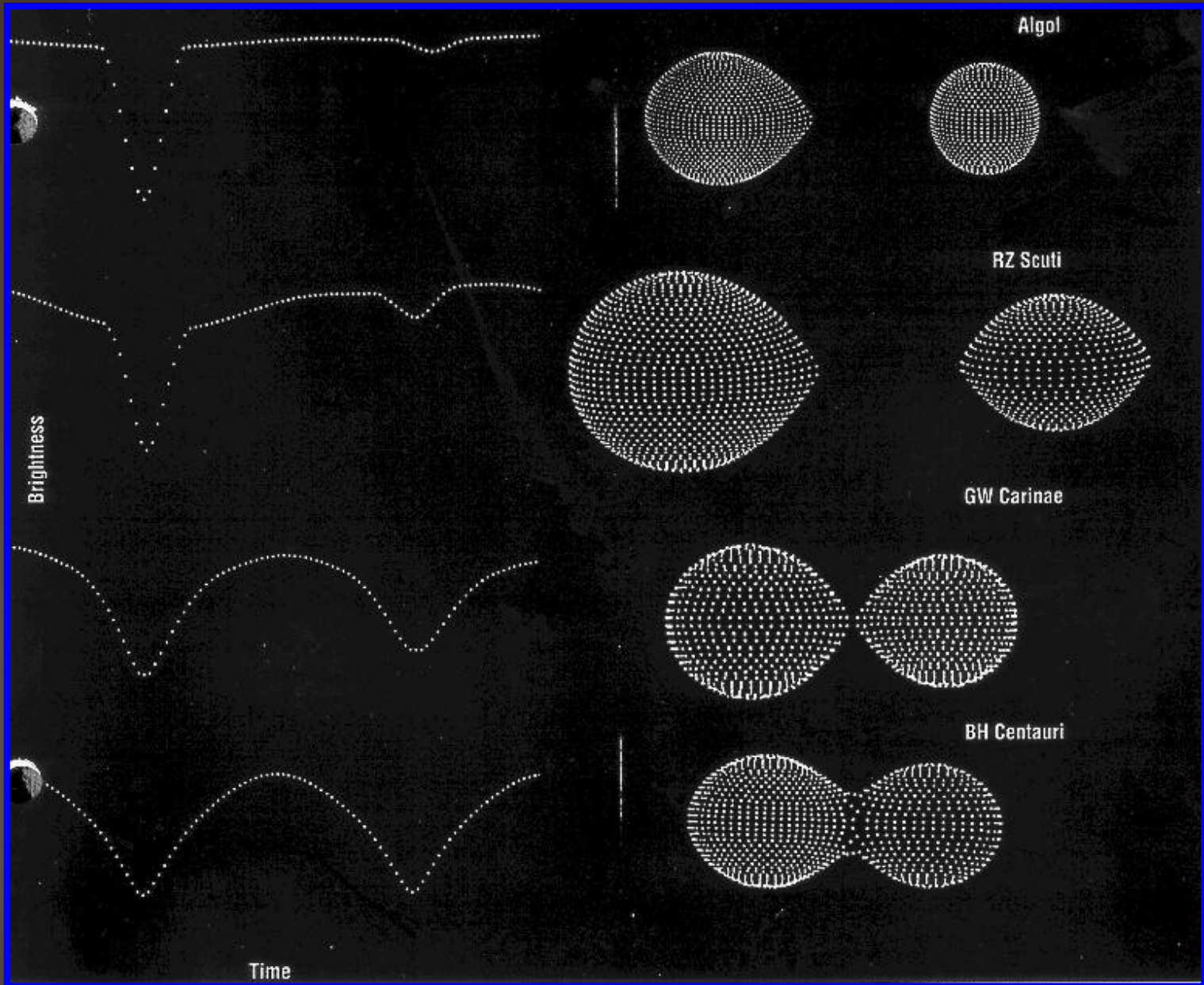
Poloha PH na HR diagramu



Zákrytové proměnné hvězdy

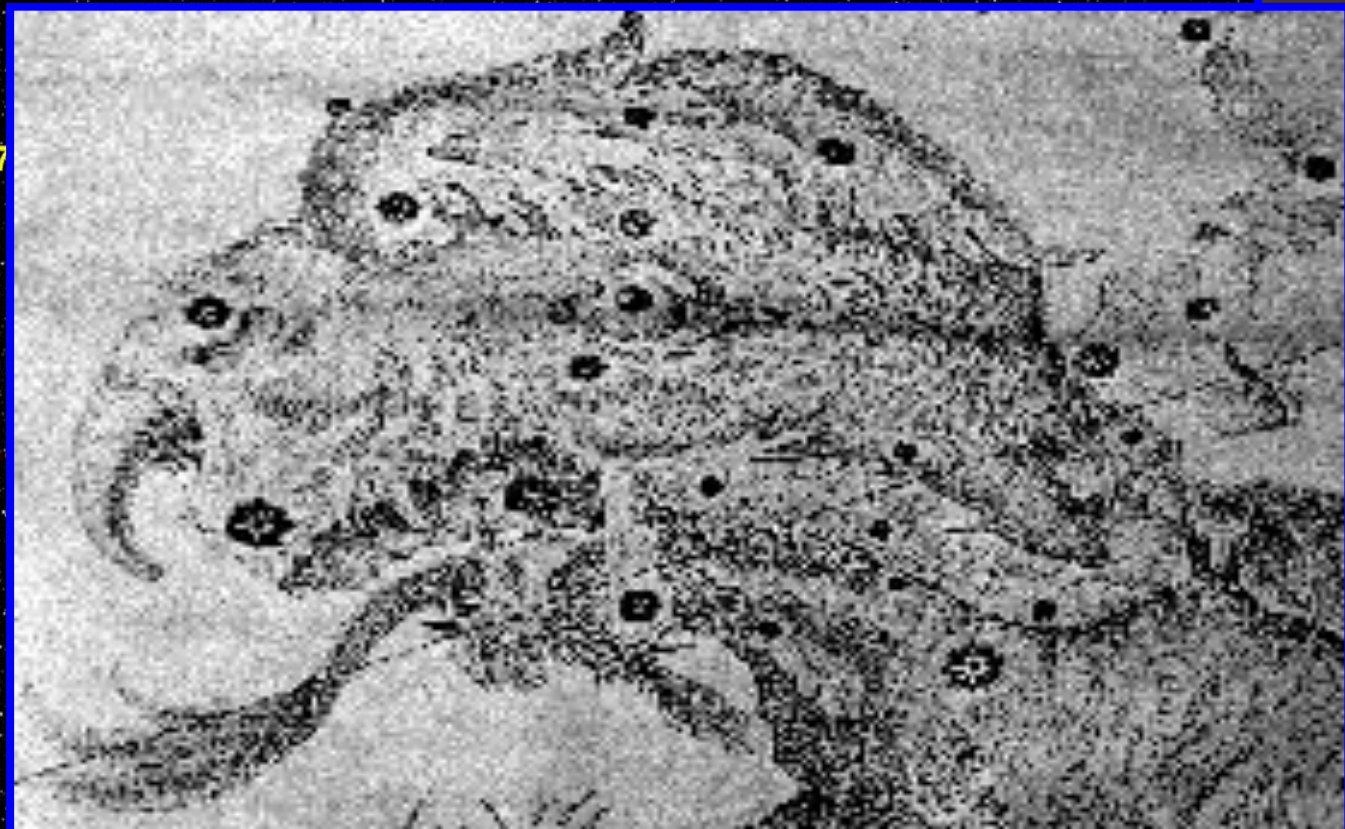
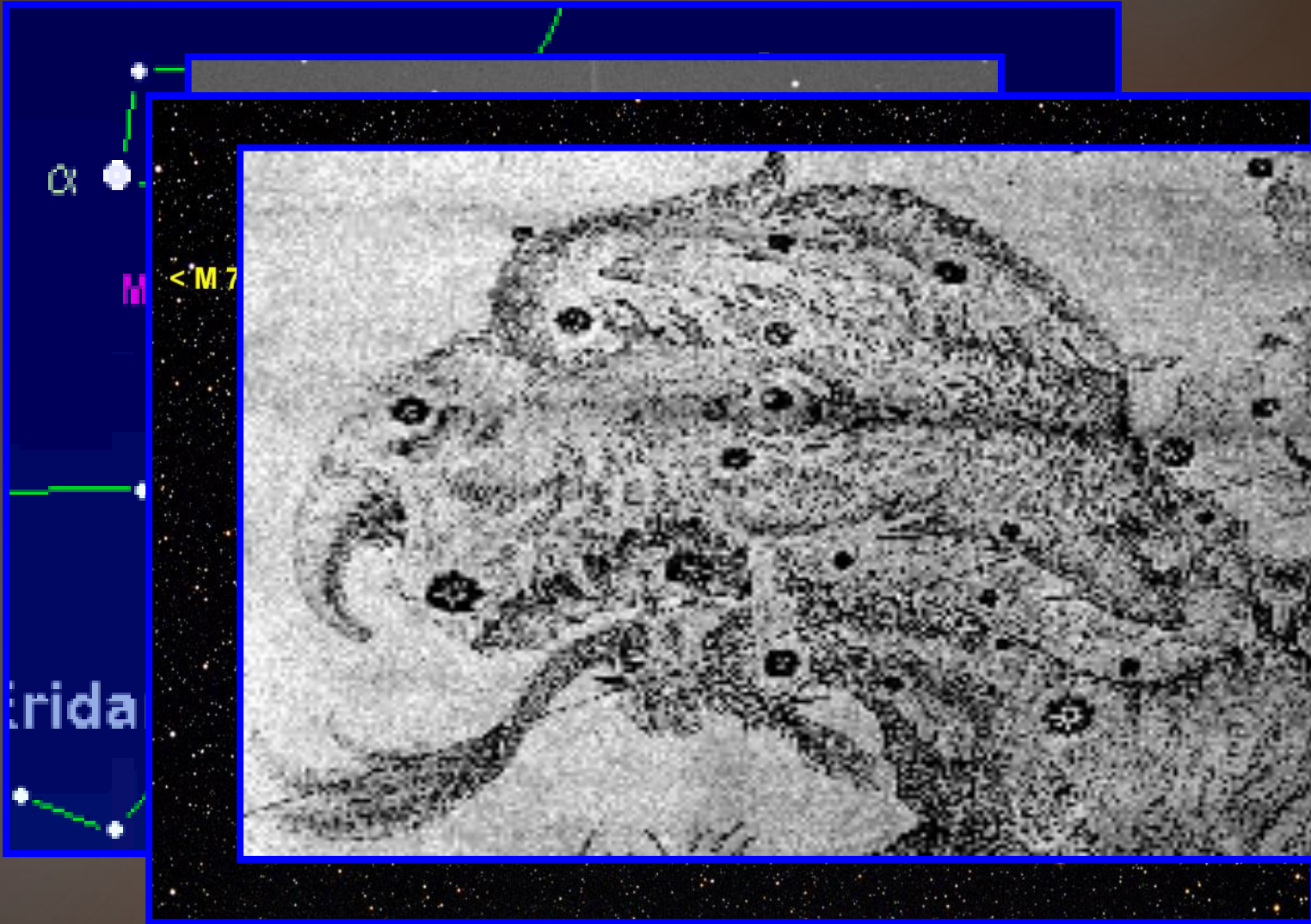
- ▶ složky opticky nerozlišitelné, spektroskopicky někdy ano
- ▶ rovina oběhu musí ležet poblíž směru pozorovatel-soustava
- ▶ těsné dvojhvězdy – přetok hmoty mezi složkami





Mira aneb o Ceti

- ▶ objevena v roce 1596 (David Fabricius 1564-1617) jako první proměnná hvězda, která nebyla N nebo SN
- ▶ označení o Ceti pochází od Bayera 1603
- ▶ v době objevu považována za novu, přestože ji Fabricius pozoroval i v r. 1609
- ▶ poté byla zapomenuta, znovuobjevení Johannem Heveliem 1639 a 1642 ji pojmenovává Mira (Podivuhodná)
- ▶ Fabricius se toho nedožil
- ▶ bylo však dohledáno několik mnohem starších pozorování, zejména v Asii (Čína, Korea)
- ▶ 1997 zobrazení kotoučku proměnné hvězdy pomocí HST, je patrná rozsáhlá atmosféra Miry o poloměru 0,03", což při vzdálenosti 120 pc dává poloměr hvězdy 3,3 AU
- ▶ z kotoučku navíc vybíhá plynný proud směrem k průvodci Miry, kterým je bílý trpaslík, obíhající ve vzdálenosti 70 AU
- ▶ 2001 určeny parametry průvodce proměnné hvězdy Miry, vzdálené od nás 128 pc, průvodce - $0,6 M_{\odot}$ a T_{ef} teplotu 9000 K, jde o mladého BT (850 milionů let)



α

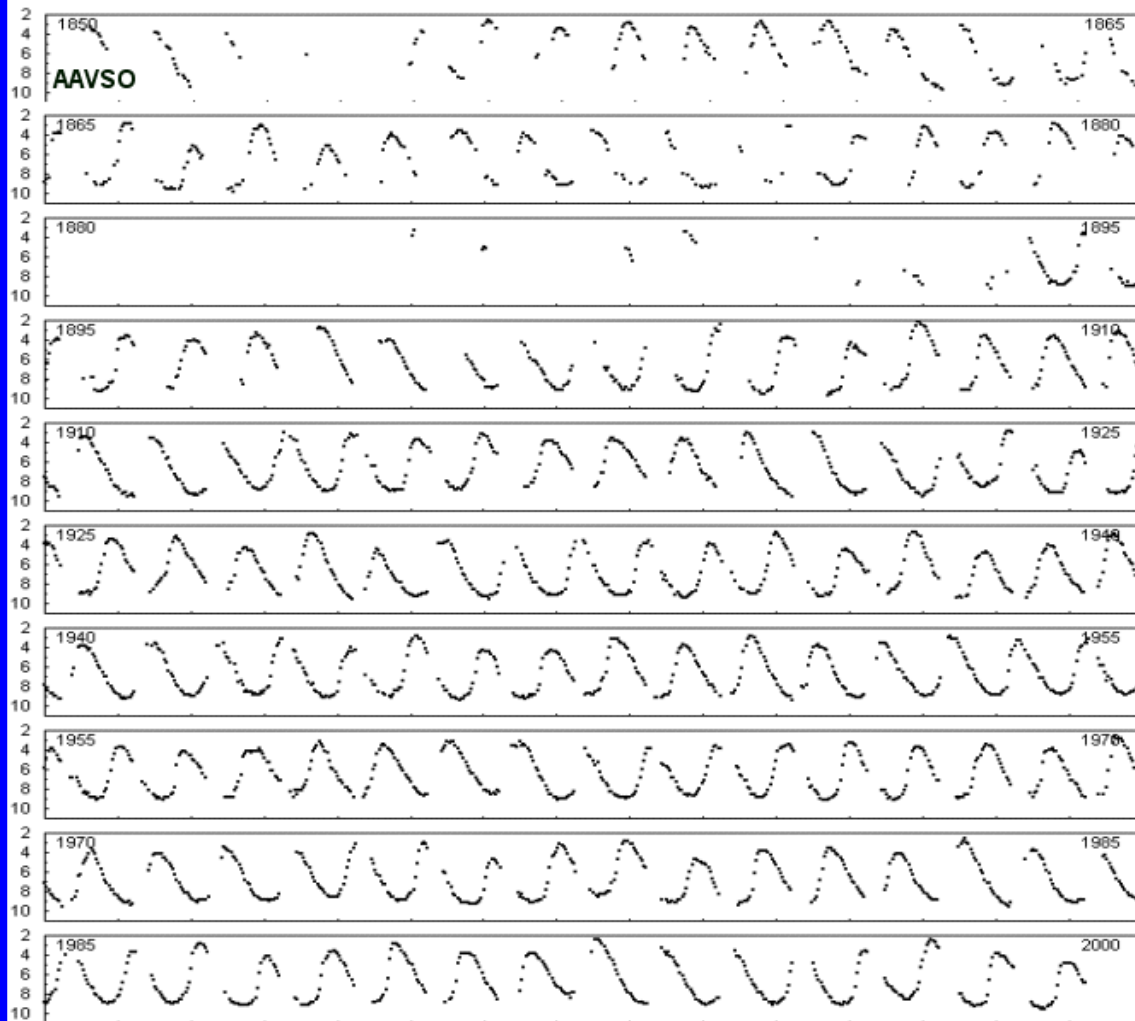
M < M.7

rida

Mira (LPV) 1850-2000 (10-day means)

Mira (omicron Ceti) is the prototype of pulsating long period variables and the first star recognized to have changing brightness. It has a period of 332 days. Generally, Mira varies between magnitudes 3.5 and 9, but the individual maxima and minima may be much brighter or fainter than these mean values. Its large amplitude of variation and its brightness make Mira particularly easy to observe.

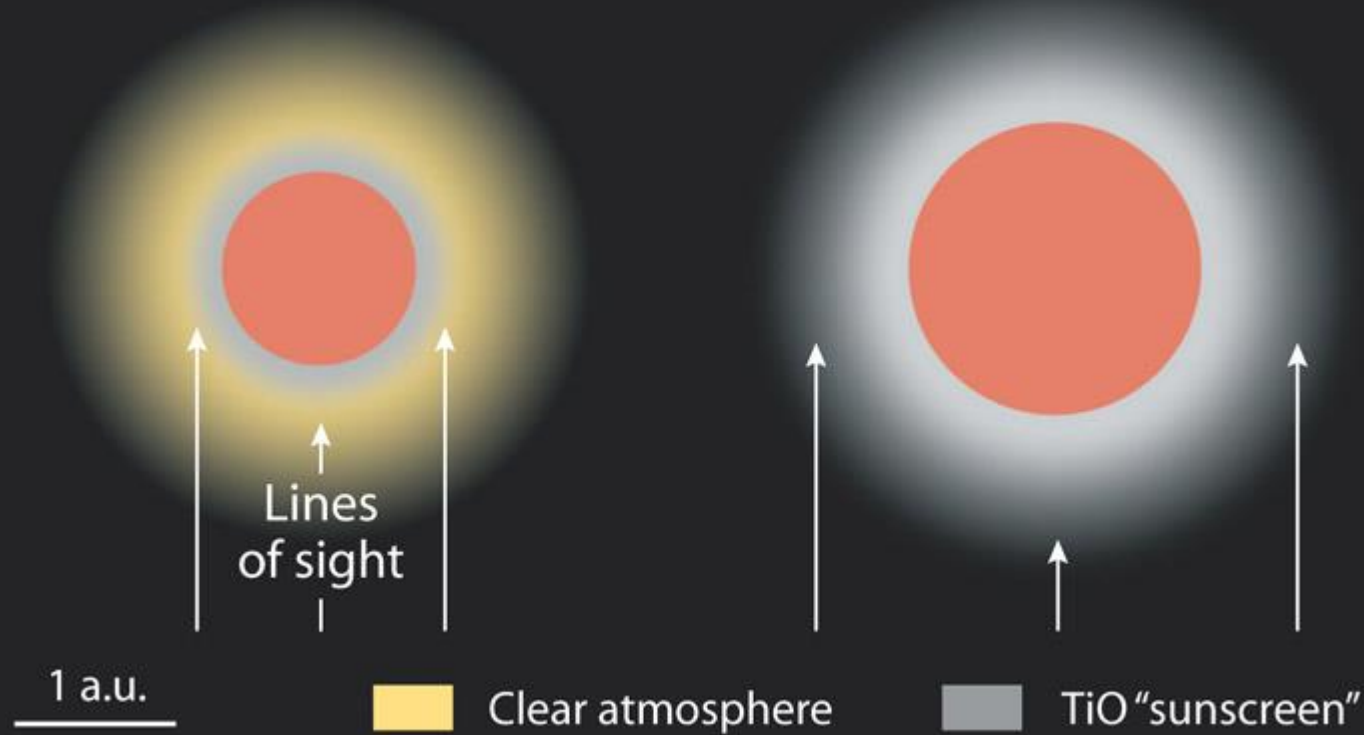
Mira is one of the few long period variables with a close companion which is also variable (VZ Ceti).



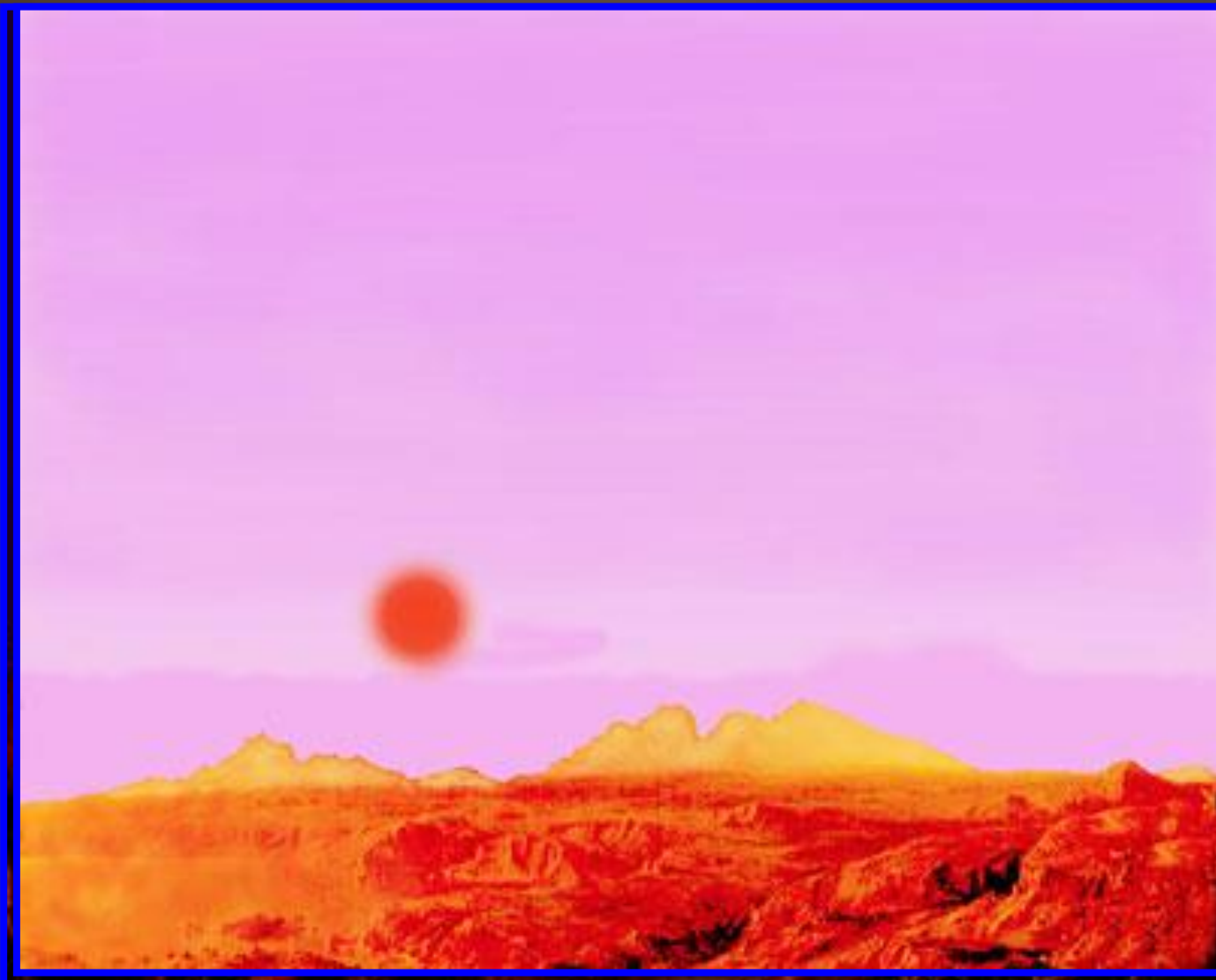
Pulsing Mira-Type Star

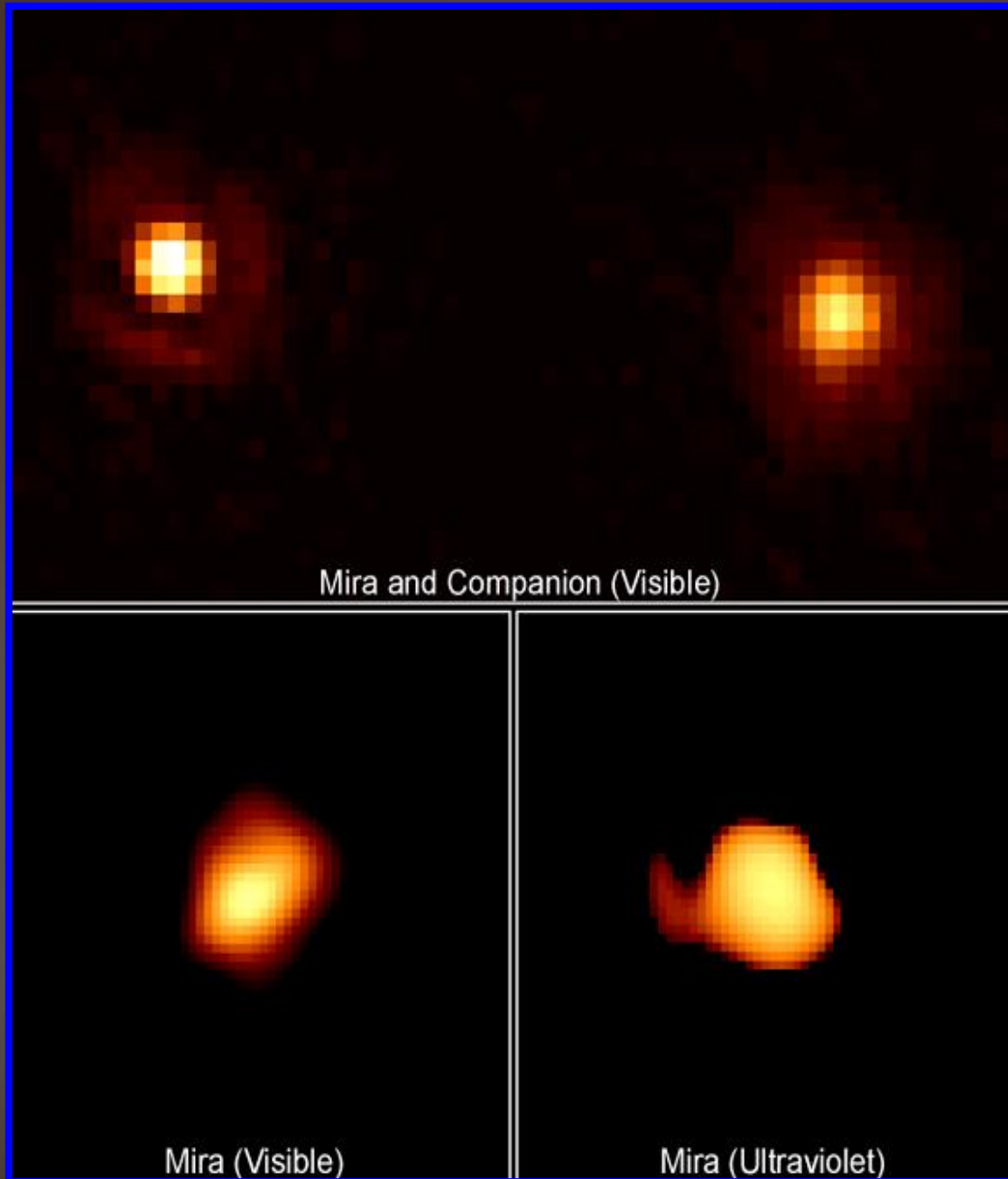
Maximum light

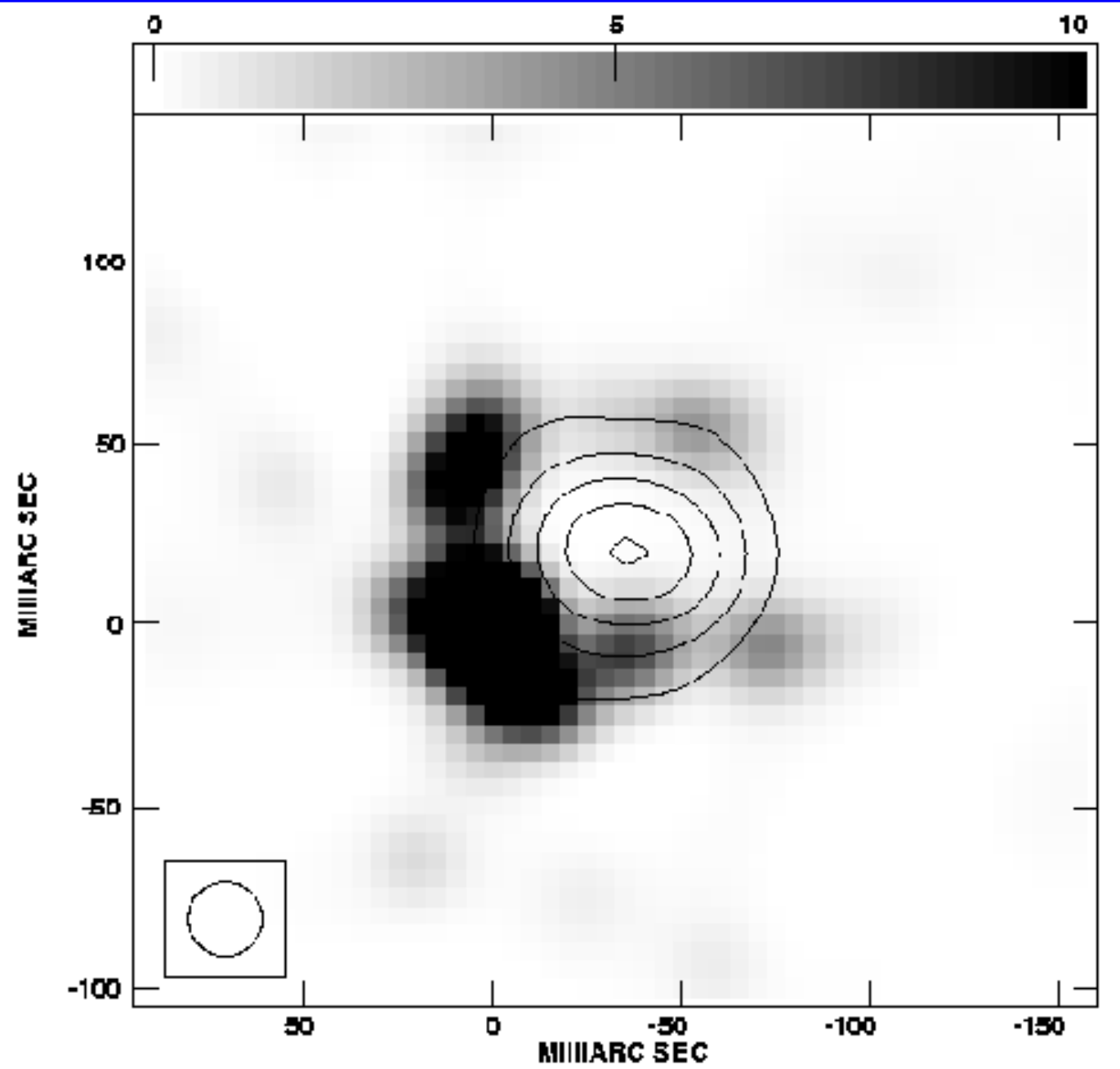
Minimum light



© 2002 Sky & Telescope







Hvězdy typu Mira

- ▶ prototyp: hvězda o Ceti pojmenovaná jako Mira
- ▶ pulzující chladní obři s periodami 100-500 dnů
- ▶ jsou to hvězdy sluneční hmotnosti v pokročilém vývojovém stadiu
- ▶ amplituda změny jasnosti (V) $> 2,5$ mag
- ▶ katalog GCVS obsahuje přes 6000 mirid
- ▶ dále se miridy dělí na typy: M - v optické oblasti pásy TiO, S - pásy ZrO, TiO, C - pásy molekul uhlíku (např. C₂)

Hvězdy typu Mira

- ▶ Miridy jsou rovněž důležité jako "standardní svíčky" sloužící k určování vzdáleností v naší Galaxii a také vzdáleností galaxií nejbližších (Velké a Malé Magellanovo mračno)
- ▶ proces, kterým miridy ztrácejí látku není zcela objasněn
- ▶ červení chladní obři a veleobři představují velice heterogenní skupinu. Miridy patří k chladným hvězdám (povrchové teploty 3500-3000 K) s velmi pravidelnou periodou a amplitudou větší než 2,5 mag
- ▶ velký interval změn jasnosti ve vizuální oblasti je částečně způsoben nízkou povrchovou teplotou těchto hvězd. Pro většinu mirid je maximum energie vyzářeno v IR oblasti

Supernovy - historická zastavení

- ▶ Lundmark ve 20. letech 20. století publikoval názor, že nova pozorovaná Hartwigem v roce 1885 ve Velké mlhovině v Andromedě se nachází v této galaxii, pak její zářivý výkon musí být mnohem větší než u jiných nov
- ▶ slovo **supernova** poprvé použili Baade & Zwicky v roce 1934

jejich charakteristika jevu supernovy:

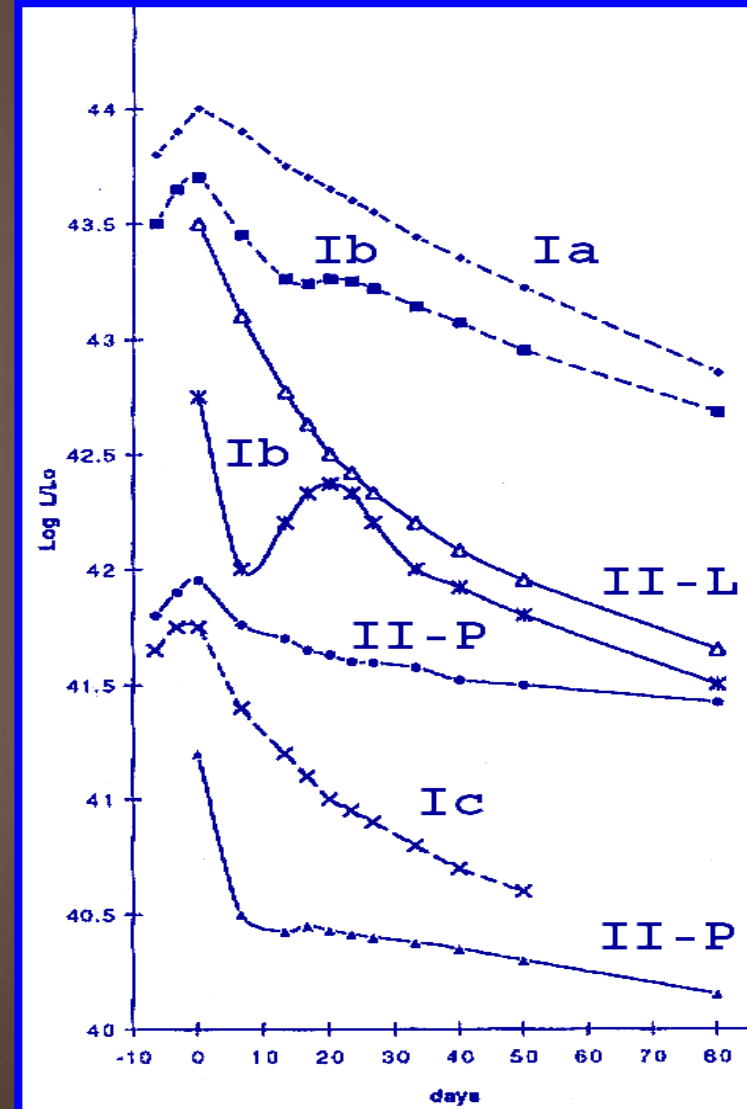
- ✓ celková uvolněná energie řádu 10^{44} až 10^{46} J
- ✓ pozůstatek může vytvořit neutronovou hvězdu
- ✓ při explozi se uvolní rozpínající se obálka ionizovaného plynu

Historické supernovy v Galaxii

<u>rok</u>	<u>rektascenze</u>	<u>deklinace</u>	<u>souhvězdí</u>
▶ 185	14h 32m	-60 20	Kentaur
▶ 393	17h 11m	-38 20	Štír
▶ 1006	14h 59m	-41 45	Vlk
▶ 1054	05h 31m	+21 59	Býk
▶ 1181	02h 02m	+64 37	Kasiopeja
▶ 1572	00h 22m	+63 51	Kasiopeja
▶ 1604	17h 27m	-21 27	Hadonoš

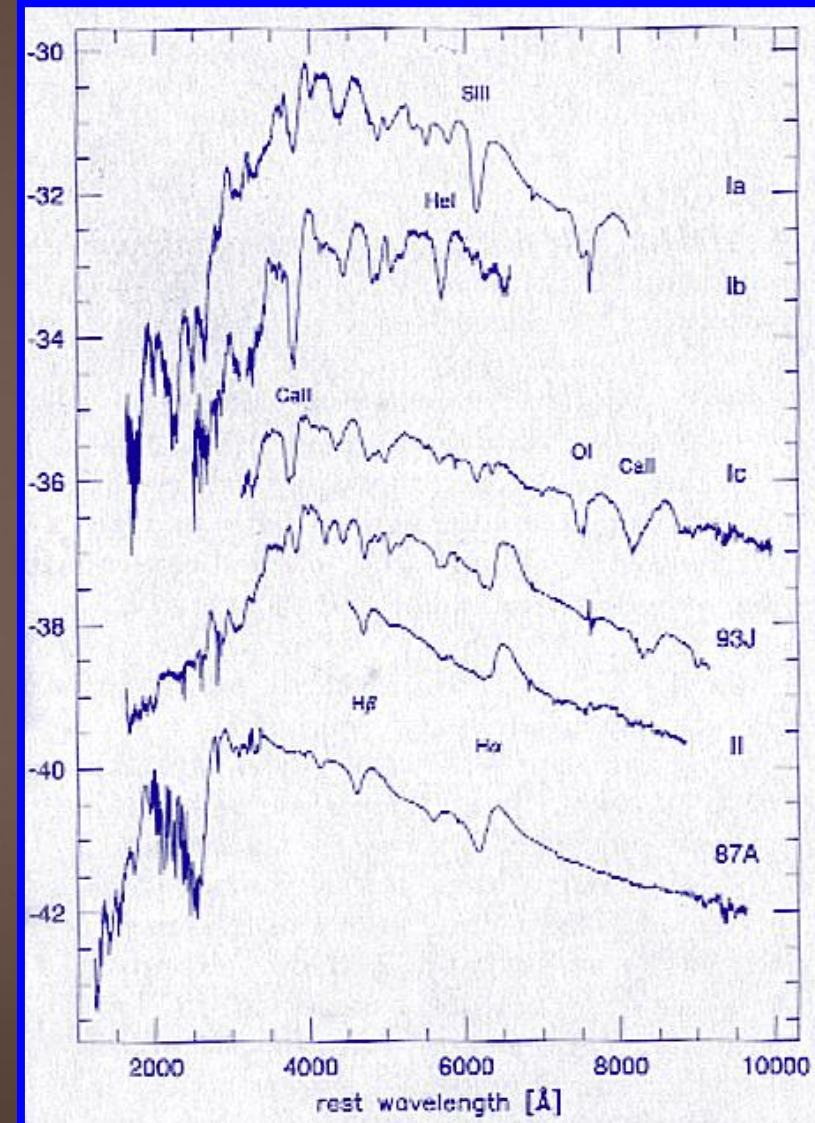
Světelné křivky a klasifikace

- ▶ **Ia** – ve všech typech galaxií i starých populacích
- ▶ **Ib** – mladé populace, silné He čáry
- ▶ **Ic** – mladé populace, bez He čar,
- ▶ **II-P** – spojena s populací I, po maximu zůstane L dlouho téměř konstantní
- ▶ **II-L** – po maximu L klesá lineárně

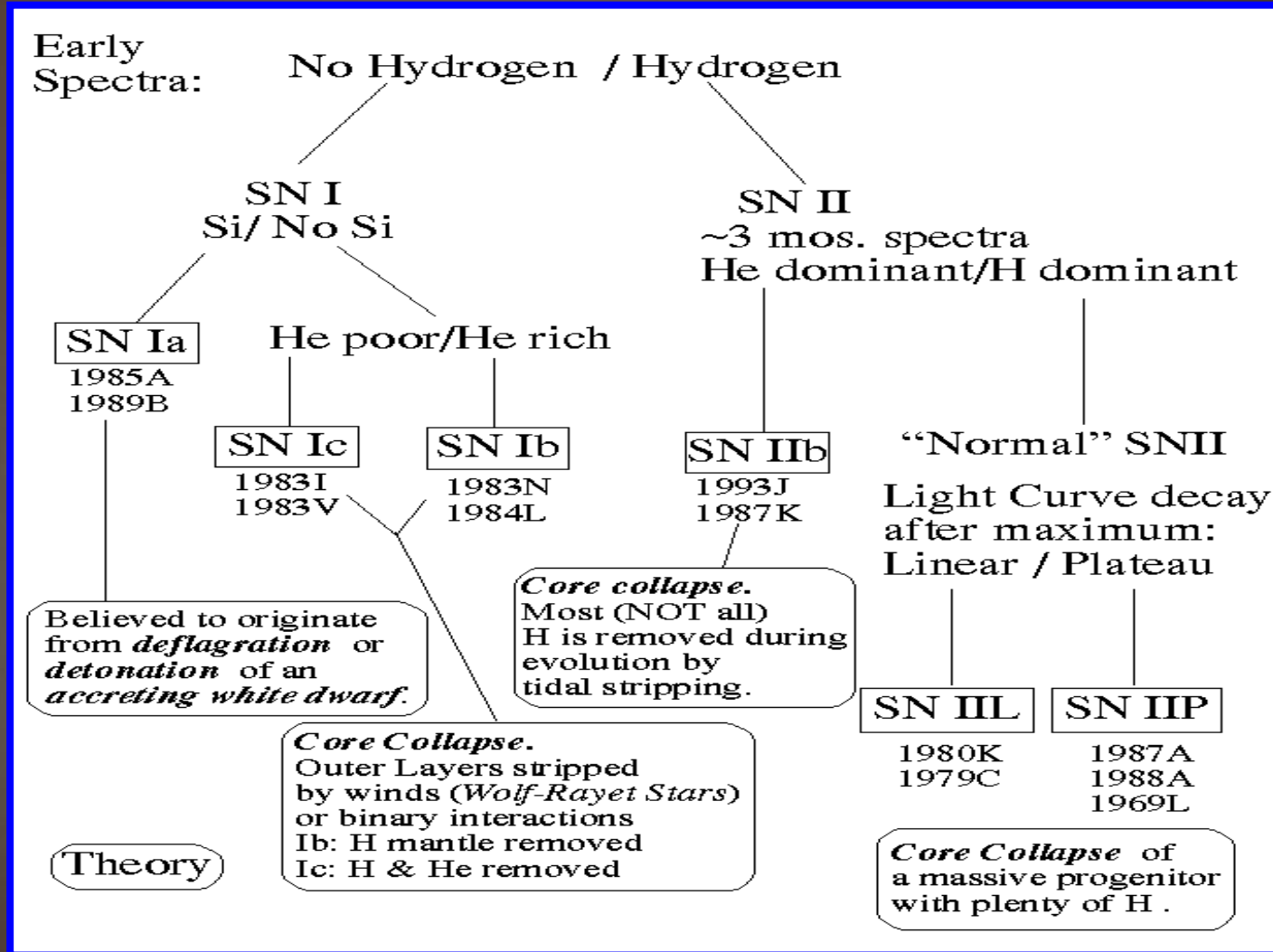


Spektra supernov

- ▶ **Ia** – ve všech typech galaxií i starých populacích
- ▶ **Ib** – mladé populace, silné He čáry
- ▶ **Ic** – mladé populace, bez He čar,
- ▶ **II-P** – spojena s populací I, po maximu zůstane L dlouho téměř konstantní
- ▶ **II-L** – po maximu L klesá lineárně



Klasifikační strom



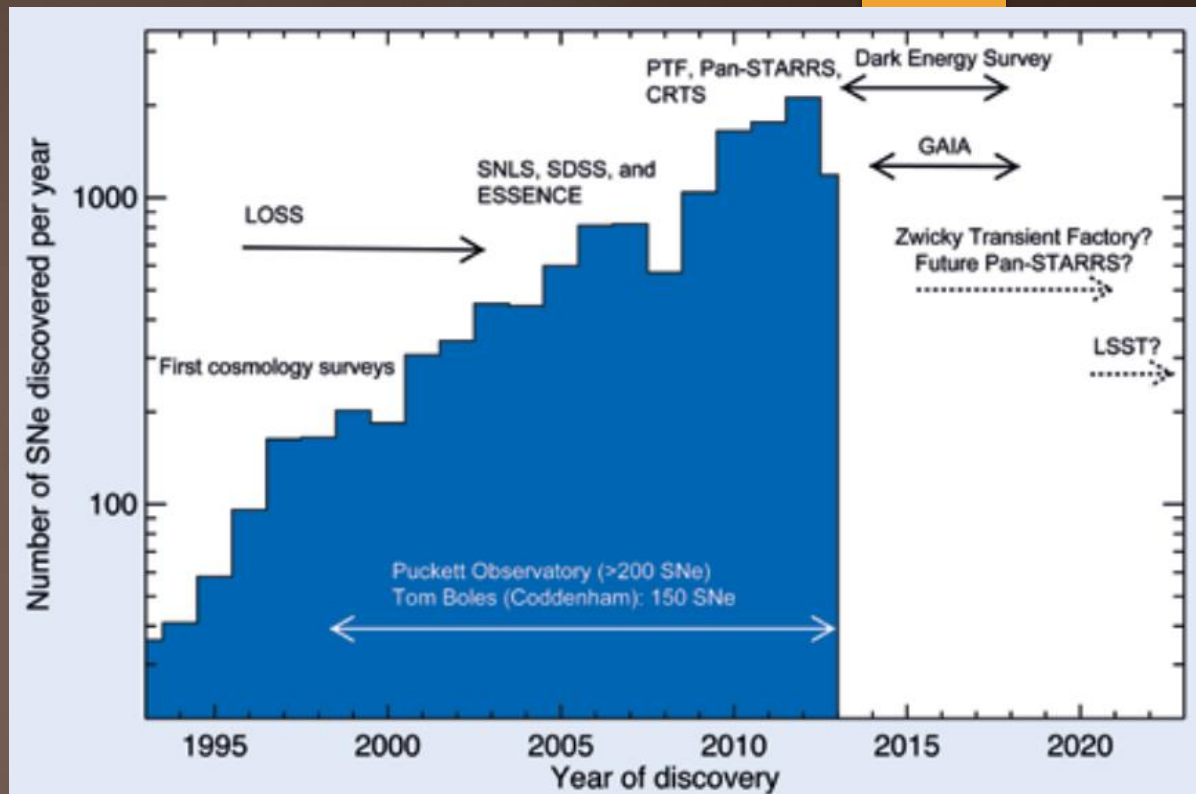
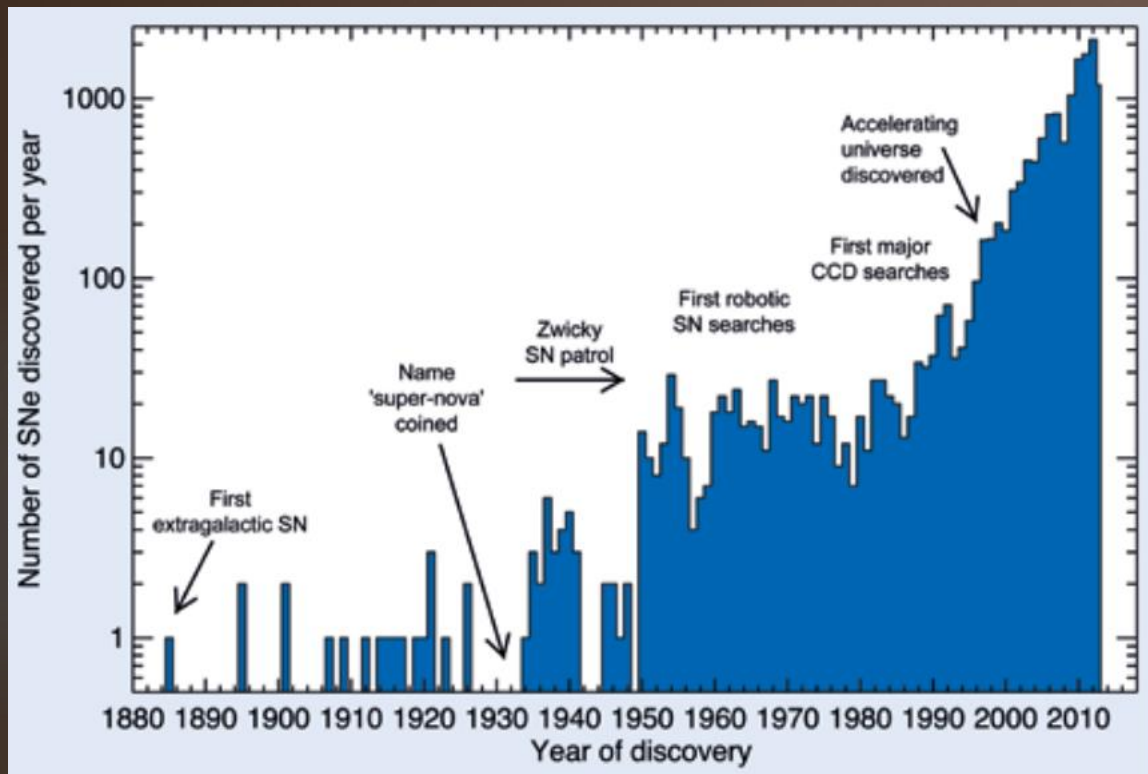
Podstata supernov

- ▶ vývoj velmi hmotných hvězd pak spěje k posloupnosti procesů, které souhrnně označujeme „výbuch supernovy“
- ▶ na supernovy lze pohlížet jako na specifický druh proměnných hvězd, kdy mechanismem proměnnosti jsou odezvy na rychlé děje v centrálních oblastech v důsledku hvězdné evoluce
- ▶ taková proměnnost je „na jedno použití“
- ▶ po „výbuchu“ se totiž hvězda kvalitativně zcela změní – rozplyne se nebo bude NH či ČD

Objevování supernov

- ▶ SN patří k nejžádanějším novým objektům a tak se stále zdokonalují technické prostředky k jejich vyhledávání
- ▶ SN označujeme rokem jejich objevu a velkým písmenem abecedy odpovídajícím pořadí objevu v daném roce (např. „SN 1987A“ je první SN objevenou v roce 1987), pokud velká písmena nestačí, používá se dvojice malých písmen: [rok] aa .. az, ba .. bz, atd; např. „SN 2004bk“
- ▶ v r. 1990 bylo objeveno 38 extragalaktických supernov
- ▶ v r. 1995 to bylo 57 SN, v r. 2000 bylo objeveno 173 SN
- ▶ v r. 2003 dokonce 334 SN atd.
- ▶ aktuální stav je [zde](#) a také [tady](#)
- ▶ má dnes vizuální pozorovatel šanci?

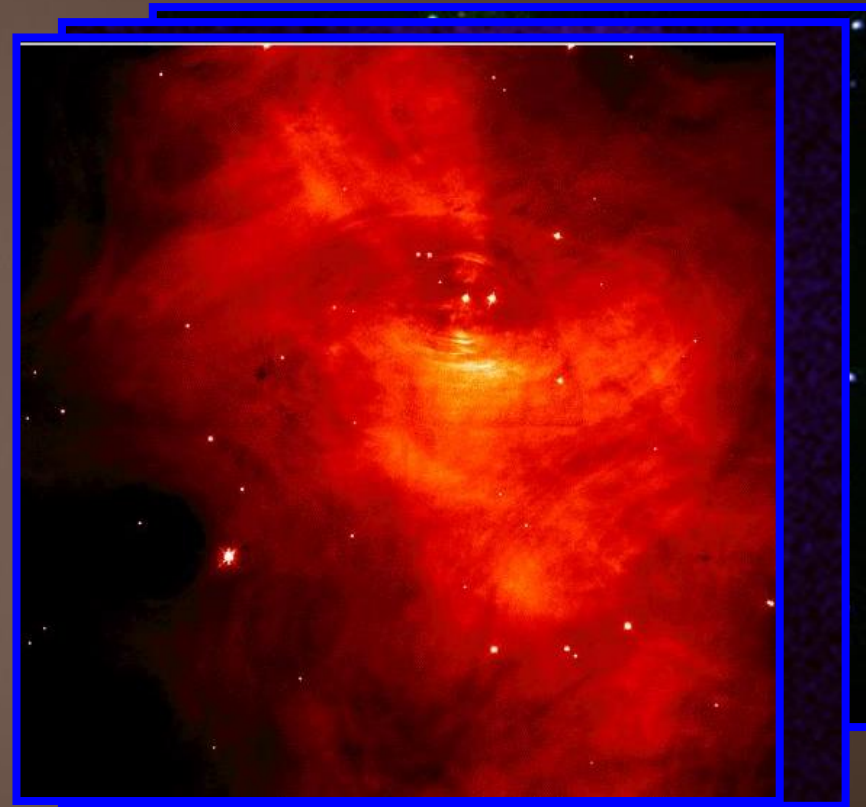
Objevování supernov



2: The discovery rate of approximately 14000 extragalactic supernovae located over the last century, complete up to 31 August 2013. This includes all supernovae announced via IAU circulars and Astronomer's Telegrams, as well as those discovered by the Palomar Transient Factory, the Supernova Legacy Survey, and Pan-STARRS. Several key dates and observations are highlighted in the figures. The top panel shows an overview of the last 130 years, while the bottom panel focuses on the last 20 years and the future.

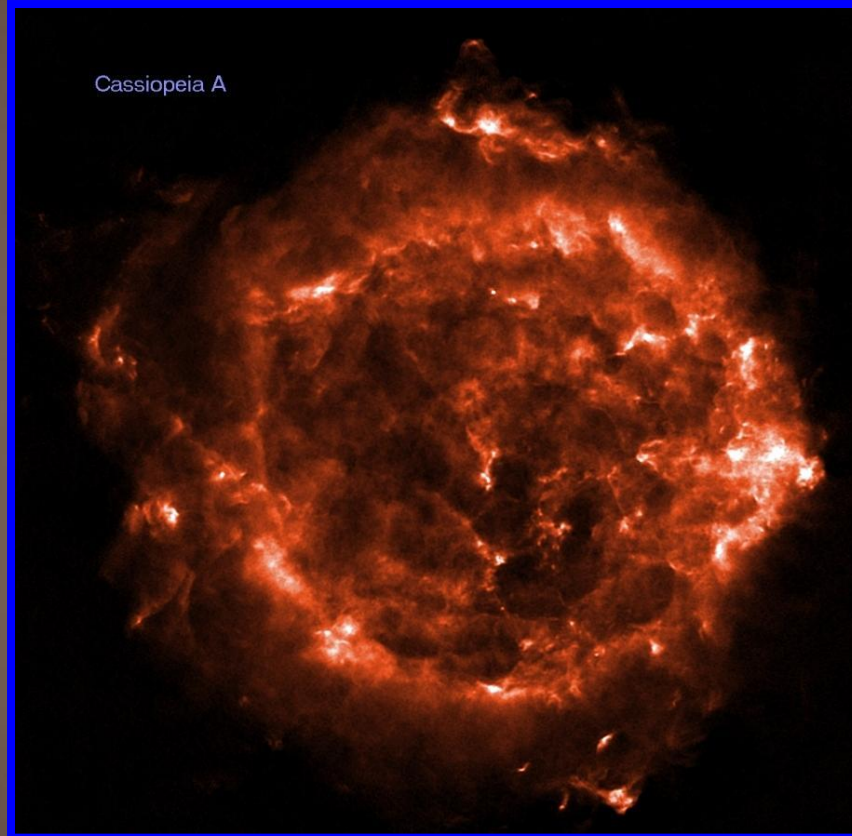
Od teorie k praxi – M1

- ▶ **Krabí mlhovina** je pozůstatkem po supernově z roku 1054, nachází se 6000 světelných roků daleko
- ▶ v centru jasné mlhoviny je rychle rotující neutronová hvězda - pulzar, který emituje pulzy záření s frekvencí 30 Hz



Od teorie k praxi – Cas A

- ▶ poslední SN v naší Galaxii, vzplanula někdy kolem r. 1680, zůstal silný radiový zdroj Cas A - nejsilnější radiový zdroj mimo sluneční soustavu
- ▶ družice Chandra měřila rázové vlny v pozůstatku po SN a odtud plyne vzdálenost na 11 000 ly

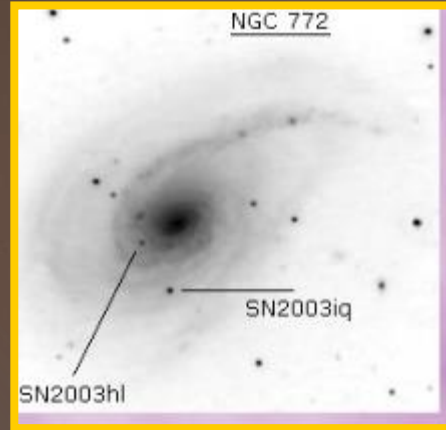


Od teorie k praxi – SN 1987A

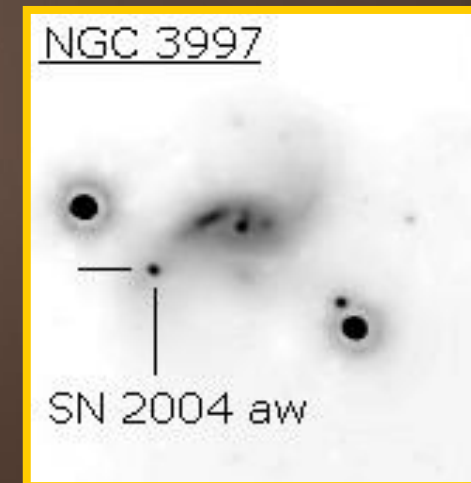


- ▶ 24. února 1987 v LMC, vzdálenost 165 000 ly
- ▶ poprvé zachycena neutrina generovaná SN pozemskými detektory
- ▶ systém tří prstenců zářícího plynu, který obklopuje SN 1987A

Od teorie k praxi – SN ve vzdálených galaxiích

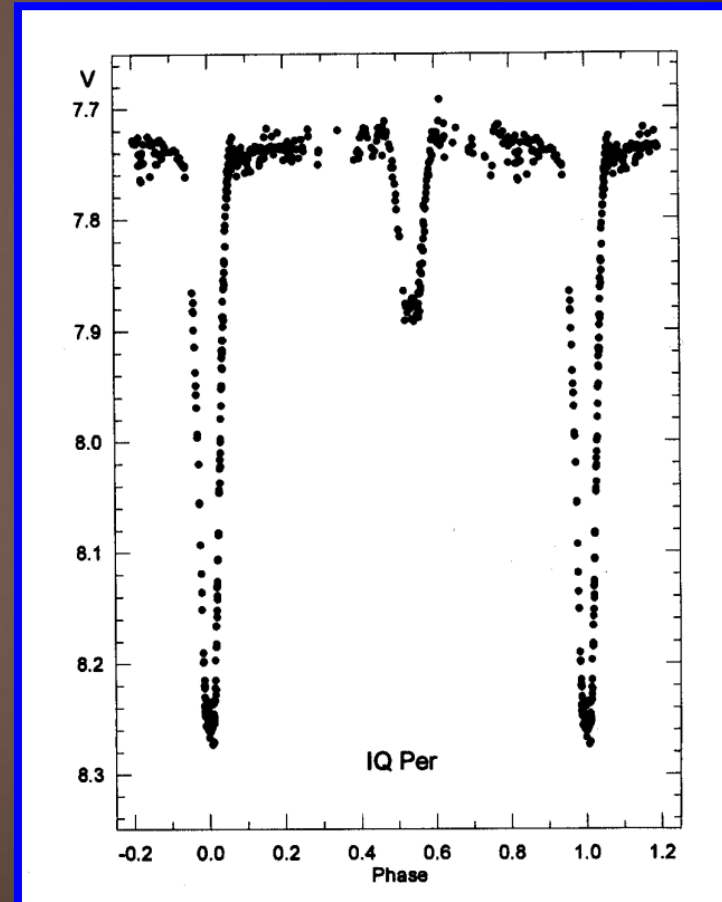


- ▶ Robert Evans objevil cca 40 SN vizuálně !



Metody výzkumu PH

- ▶ fotometrie
 - ▶ světelná křivka
 - ▶ čas minima (maxima)
 - ▶ vizuální
 - ▶ fotografická
 - ▶ CCD
- ▶ spektroskopie
- ▶ interferometrie



Role amatérských pozorovatelů

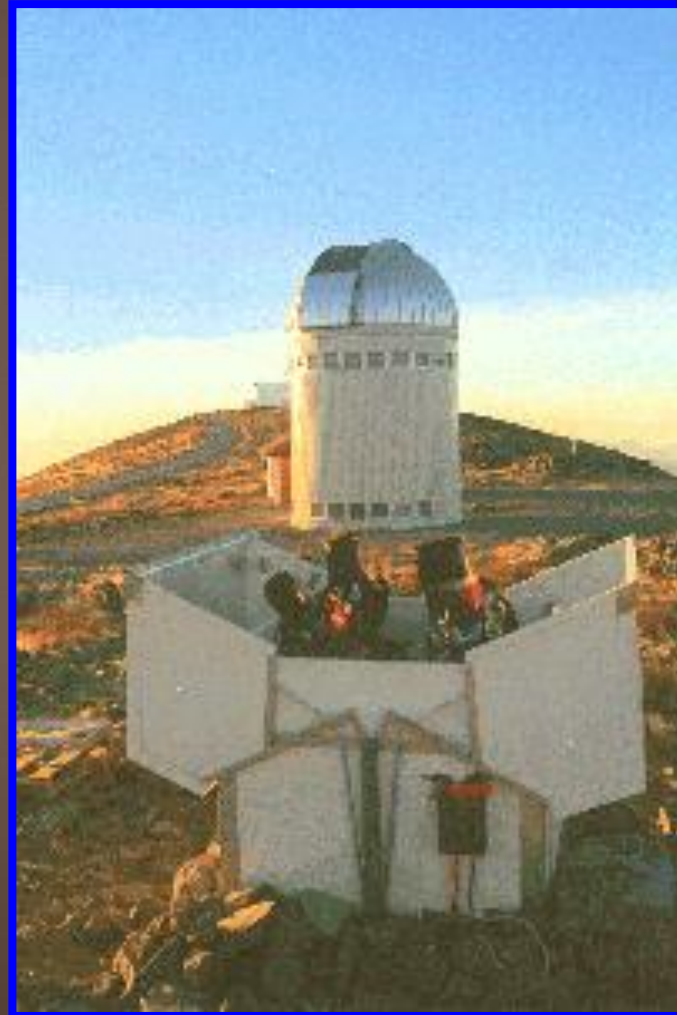
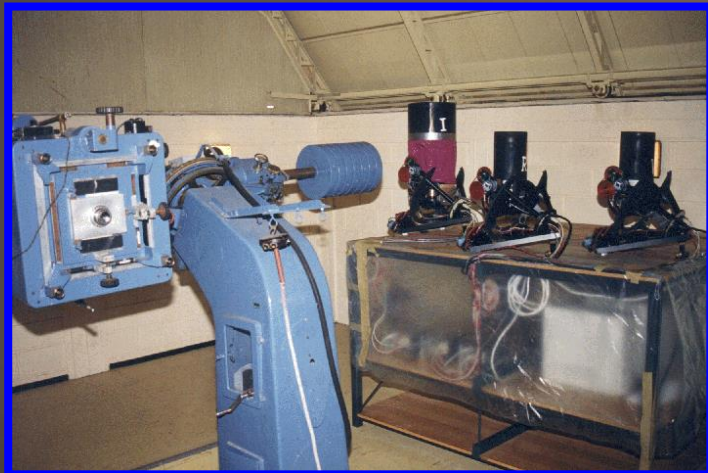
- ▶ zákrytové proměnné
 - ▶ určení okamžiku minima
 - ▶ stanovení (O – C)
 - ▶ sestavení celé světelné křivky
- ▶ miridy, dlouhoperiodické proměnné
 - ▶ světelná křivka
- ▶ novy, supernovy
 - ▶ objev
 - ▶ světelná křivka
- ▶ používanou metodou je metoda vizuální nebo CCD fotometrie

Robotizované dalekohledy



- ▶ projekt ASAS
- ▶ soumrak amatérských pozorování LPVs?
- ▶ na severní polokouli podobný projekt neexistuje
- ▶ role amatérů – krátkoperiodické PH, raději přechod na CCD fotometrii (lépe standardní UBVRI)


Robotizované dalekohledy




Literatura

- ▶ Zdeněk Mikulášek, Proměnné hvězdy, elektronická skripta MU Brno, 2002
- ▶ <https://www.aavso.org/vsx/>
- ▶ <http://var.astro.cz>
- ▶ <http://www.rochesterastronomy.org/supernova.html>

mezihvězdná látka

- 
- ▶ Prostor mezi hvězdami je vyplněn velmi zředěnou mezihvězdnou látkou v různých podobách. Nacházíme zde elementární částice všeho druhu, atomy, molekuly anorganických i organických látek, někdy i velice složitě strukturované prachové částice.
 - ▶ Do mezihvězdné látky by se měly zahrnout i velice rychle putující částice kosmického záření a fotony nejrůznějších energií. V této podobě látky je soustředěno cca 10% hmotnosti všech hvězd v Galaxii.

- 
- ▶ má dvě složky:
 - ▶ mezihvězdný prach
 - ▶ mezihvězdný plyn
 - ▶ Spojitou povahu zřejmě má i hypotetická *skrytá hmota* (temná) ve vesmíru, která nezáří ani nepohlcuje světlo, takže se o její existenci se tak dovídáme pouze zprostředkovaně podle jejích účinků na hmotu viditelnou.
 - ▶ Hmotnost ukrytá v této látce dosud neznámé povahy by mohla až o řád převýšit hmotnost běžné, tzv. *baryonové látky*.

exoplanety

Jak to všechno začalo ...

- ▶ za otázkou „Jsou u jiných hvězd také planetární soustavy?“ se vždy vloudí následné úvahy o existenci života mimo Zemi
- ▶ touha objevit planetu podobnou Zemi je logická, protože tam pak očekáváme možnou existenci života

Historie

- ▶ filozofické úvahy Démokrites, Epikúros
- ▶ inspirace spekulativních úvah Giordana Bruna, Goetha, Kanta ...
- ▶ první doložený pokus spatřit planetu u jiné hvězdy provedl svým dalekohledem Huygens

Historie

- ▶ nová naděje vznikla až počátkem 20. století s rozvojem přesné astrometrie a spektroskopie
- ▶ v 50. letech oznámil Van de Kamp objev planety u Barnardovy hvězdy, nikdy nepotvrzeno, omyl
- ▶ 1992 - Frail, Wolszczan objevili planetu u pulsaru

Epochální objev

- ▶ v říjnu 1995 oznamují Švýcaři Queloz a Mayor objev planety u hvězdy 51 Pegasi
- ▶ potvrzeno nezávisle Američany Marcym a Butlerem
- ▶ použitá metoda - spektroskopická měření RV

Epochální objev



Epochální objev

- ▶ David Gray zpochybňuje objev, podává vysvětlení - pulzace hvězdy
- ▶ spor trvá déle než rok, nakonec Gray sám uznává svou chybu

Definice exoplanety

- ▶ „planeta“ je těleso, které má hmotnost větší než Pluto, ale menší než stačí k „hoření“ deutéria v jeho nitru a obíhá kolem tělesa, v jehož centrálních oblastech jaderné reakce probíhají
- ▶ tato definice (Marcy, Butler) udává horní mez hmotnosti planet $\sim 10 - 12 M_{\text{Jupitera}}$

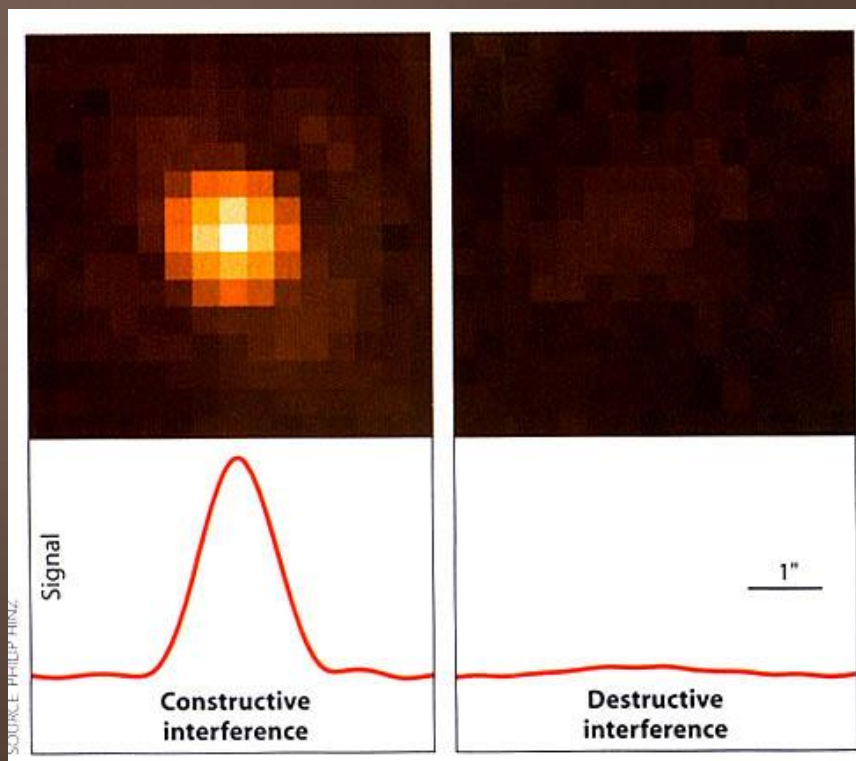
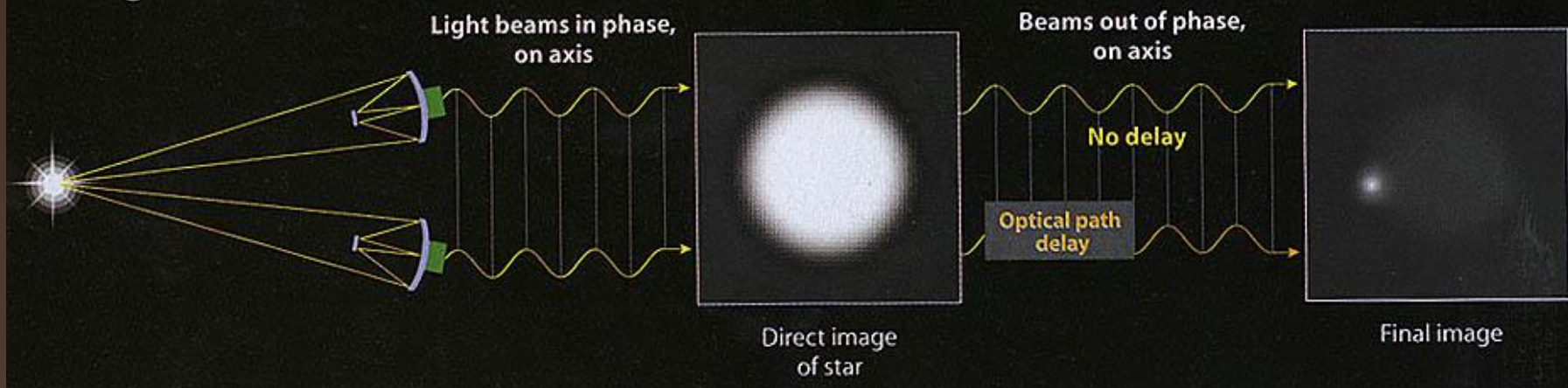
Metody detekce jinoplanet

- ▶ přímé zobrazení
- ▶ měření pohybů centrální hvězdy (astrometrie, spektroskopie)
- ▶ přechod planety přes hvězdný disk
- ▶ gravitační čočkování

Přímé zobrazení

- ▶ planety jsou velmi málo jasné a příliš blízko u centrální hvězdy
- ▶ snaha obejít kombinaci těchto dvou nepříjemných vlivů - speciální metody
- ▶ pozorování z povrchu Země - vliv turbulence atmosféry
- ▶ řešením může být adaptivní optika
- ▶ jsou parametry zjistitelné pouze přímým zobrazením

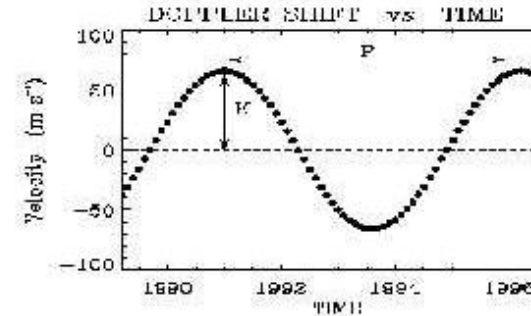
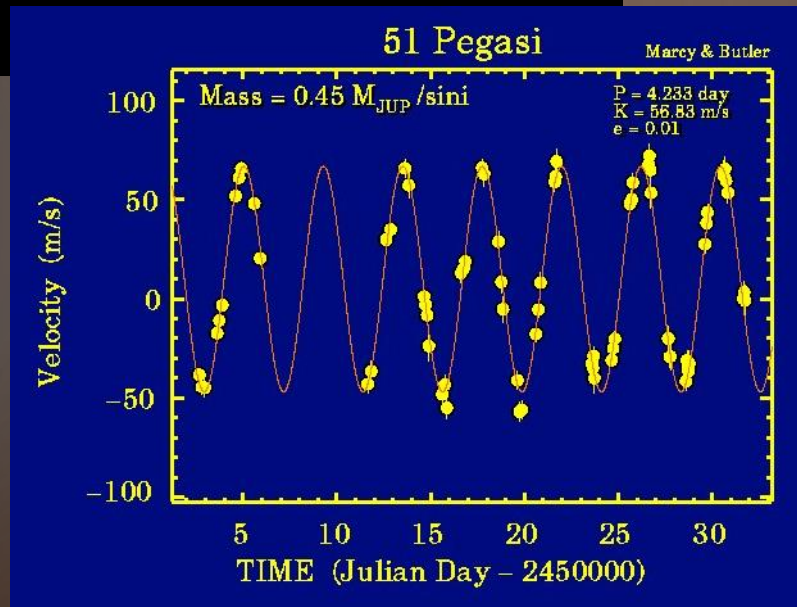
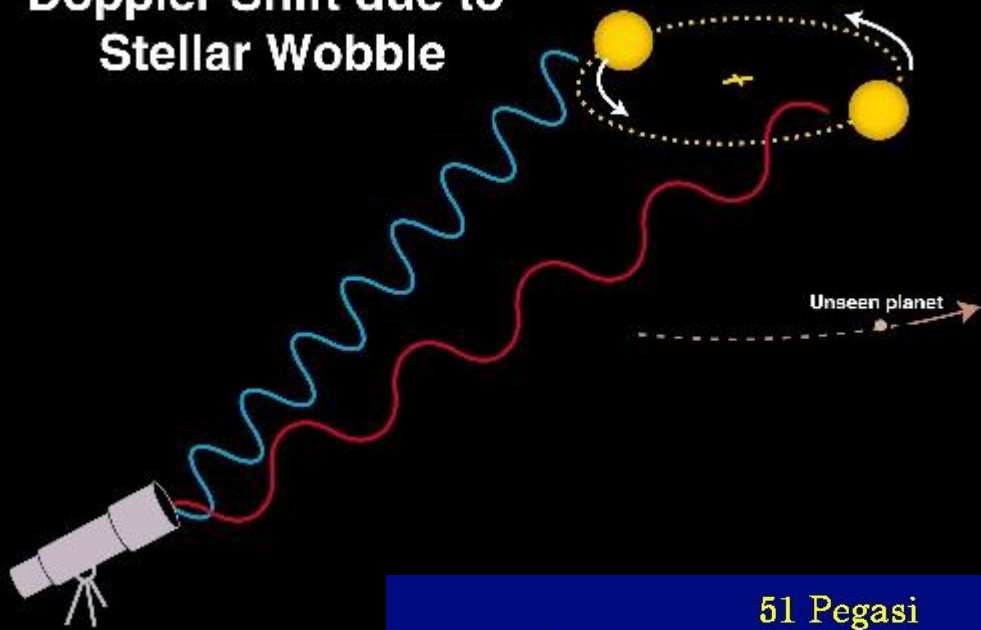
Nulling Interferometry



Měření pohybů centrální hvězdy

- ▶ centrální hvězda mění polohu
- ▶ poloměr dráhy je $a_H = a \cdot M_p / M_H$ perioda = doba 1 oběhu planety
- ▶ pozorovatel může měřit celkem tři měnící se veličiny: RV ($\Delta\lambda/\lambda = v_R/c$), polohu hvězdy a čas příchodu signálu pravidelně vysílaného hvězdou
- ▶ RV dává spodní mez hmotnosti !
- ▶ ± 3 m/s - Saturn (Země 10 cm/s)

Doppler Shift due to Stellar Wobble



Kepler:

$$r^3 = \frac{GM_*}{4\pi^2} P^2$$

Observe Period.

$$V_{PL} = \sqrt{GM_*/r}$$

→ Vel. of Planet

Momentum Conservation:

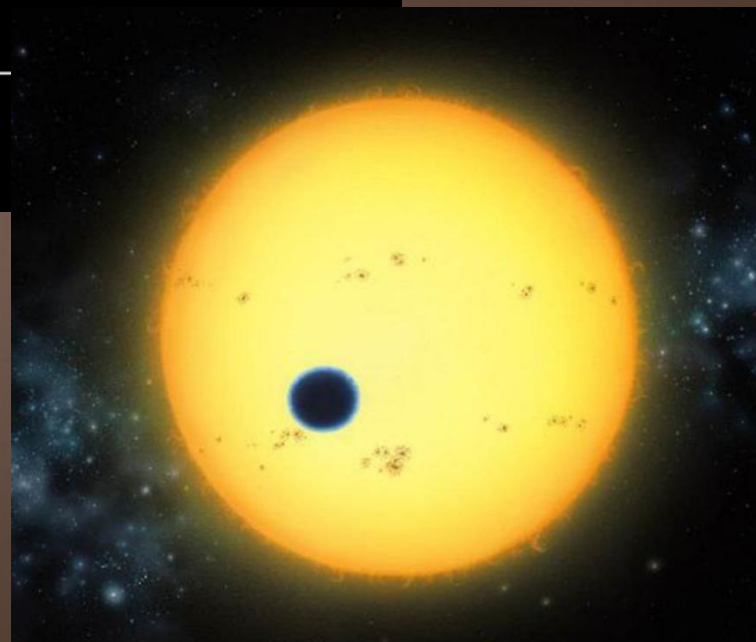
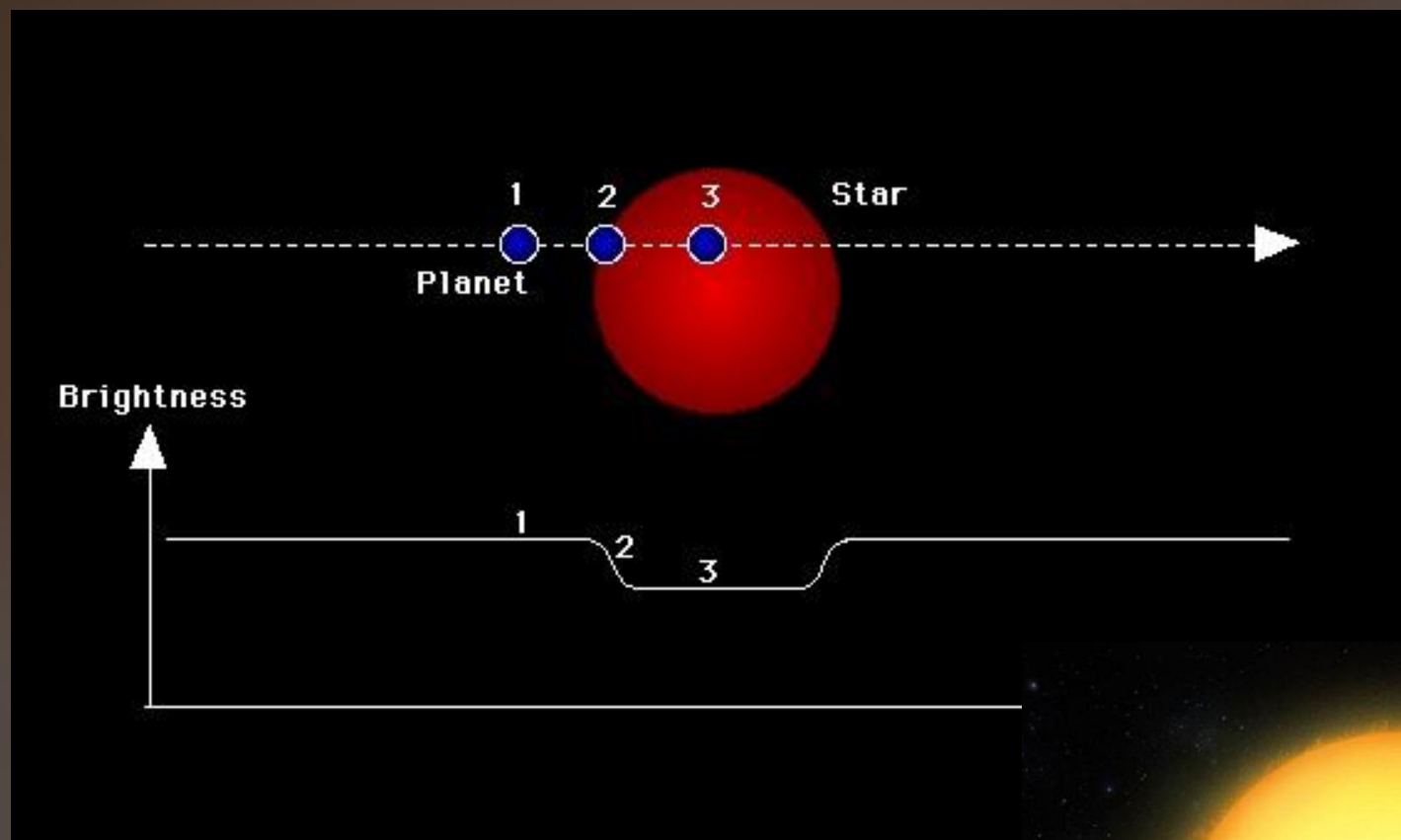
$$M_{PL} = M_* V_* / V_{PL}$$

Observe $K = V_* \sin i$

$$\implies M_{PL} \sin i$$

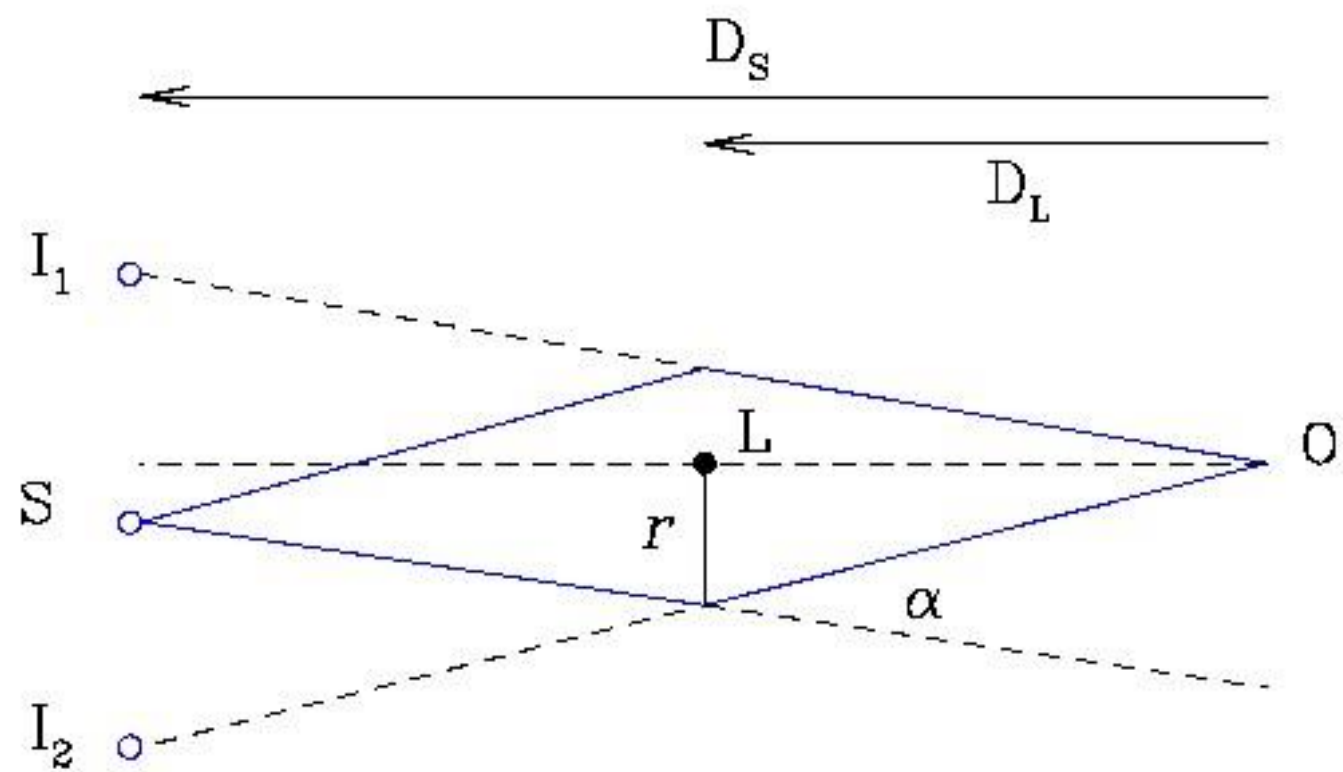
Přechod planety přes ...

- ▶ rovina oběhu planety musí být příznivě orientována (pravděpodobnost = R_H/a)
- ▶ přesnost fotometrického měření musí být lepší než „hloubka“ poklesu jasnosti
- ▶ pro Jupiter 1%, pro Zemi 10^{-4}
- ▶ ze Země cca 0,1%, z kosmu 10^{-5} !!



Gravitační čočkování

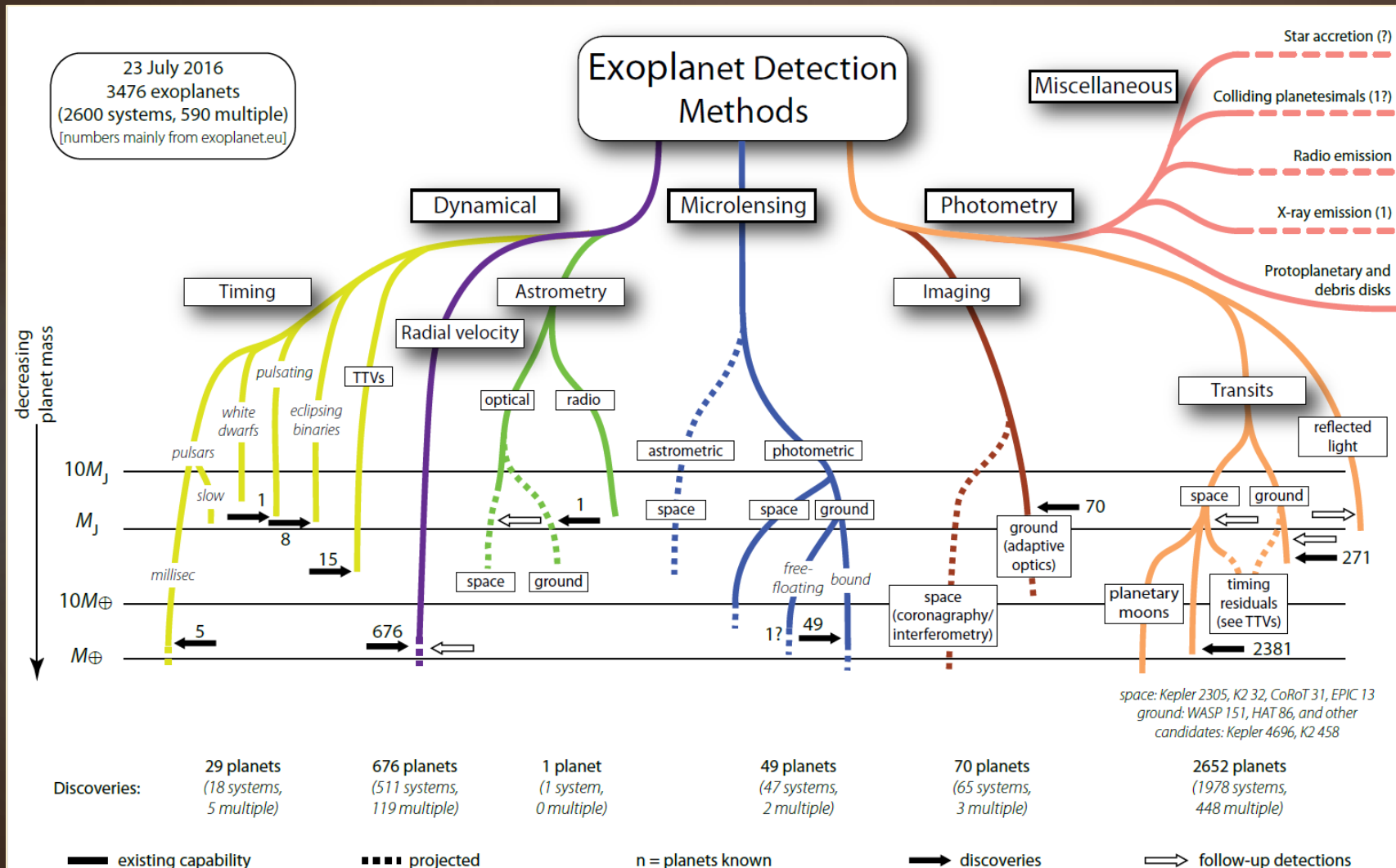
- ▶ gravitační zesílení \sim hmotnosti planety a její vzdálenosti od Země
- ▶ použitelné pro tělesa ve vzdálenostech řádově kpc a více
- ▶ další nevýhodou je jedinečnost
- ▶ tato metoda dokazuje, že průvodce o M_J ve vzdálenosti 3 AU (a větší) má méně než 25% hvězd



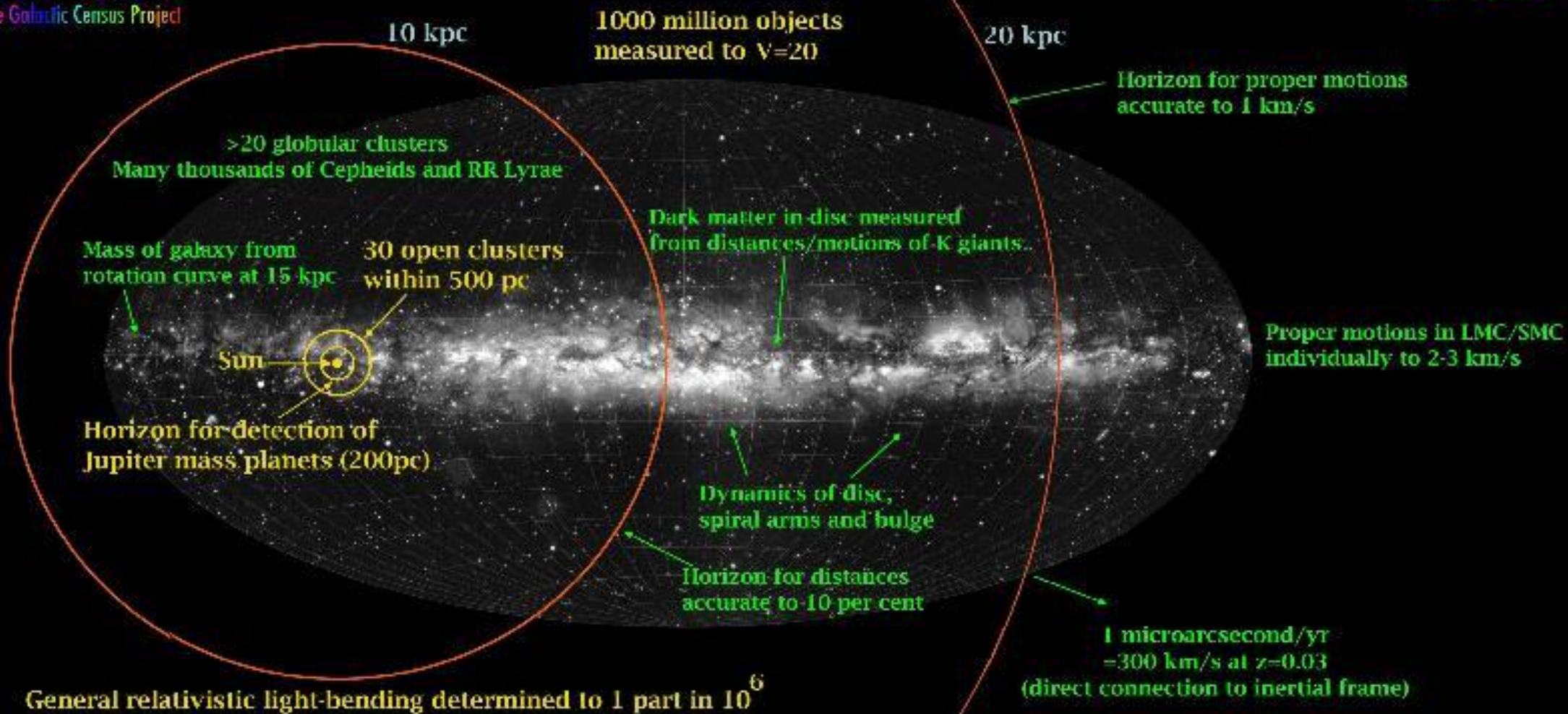
Exoplanetární ZOO

<http://exoplanet.eu/>

<https://exoplanets.nasa.gov/>







Hledání jinoživota

- ▶ obyvatelné zóny - rozmezí hmotnosti takové planety $0,1 - 10 M_Z$ a $T=300 \text{ K}$
- ▶ pak vzdálenost od centrální hvězdy musí být $a=0,7 \cdot R_H \cdot (T_H/300)^2$ a v závislosti na sp. typu hvězdy dostáváme $0,1$ až 2 AU
- ▶ hvězdy s povrch teplotou nad 6500 K se vyvíjejí příliš rychle než aby poskytly potřebné dlouhodobě stabilní prostředí, přestože jejich obyv. zóny jsou větší

Hledání jinoživota

- ▶ jaké jsou spektroskopické „otisky prstů“ života na jiných planetách ?
- ▶ pátrání po molekulárním kyslíku a ozónu
- ▶ pátrání po chlorofylu, ten na Zemi absorbuje 80% světla (400-700 nm)

... A TO JE VŠE, PŘÁTELÉ !