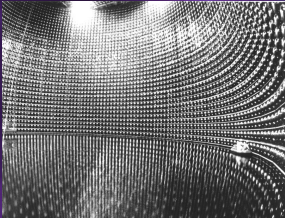


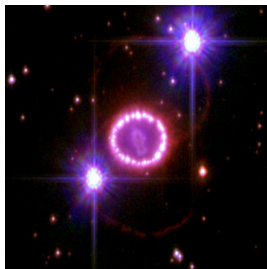
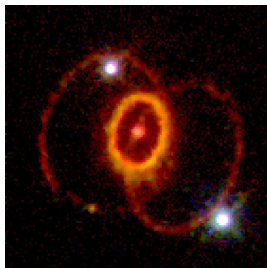
SUPERNOVY



Petr Kurfürst
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky - Masarykova univerzita
Brno, 19. listopadu 2024

Co jsou supernovy?

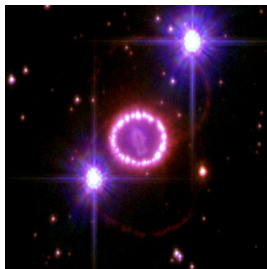
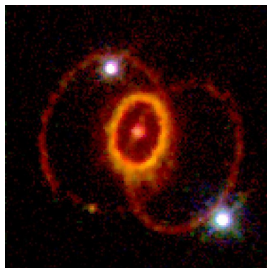
- Explodující velmi hmotné hvězdy v závěrečném stadiu vývoje
- Historické dělení na typy I, II - podle výskytu vodíkových čar ve spektru



SN 1987A

Co jsou supernovy?

- Explodující velmi hmotné hvězdy v závěrečném stadiu vývoje
- Historické dělení na typy I, II - podle výskytu vodíkových čar ve spektru
- Jiné možné dělení - podle druhu zárodečné hvězdy
- Typ Ia - termonukleárně explodující “bílé trpaslíci” - následkem přetoku látky ve vícenásobném systému
- Ostatní typy - exploze je způsobena rázovou vlnou - příčinou je gravitační kolaps velmi hmotné hvězdy



SN 1987A

Co jsou supernovy a čím jsou významné?

● Základní klasifikace:

● Supernovy typu Ia

Termonukleární exploze uhlíko-kyslíkového (C-O) bílého trpaslíka v těsném podvojném systému

● Supernovy typu Ib,c

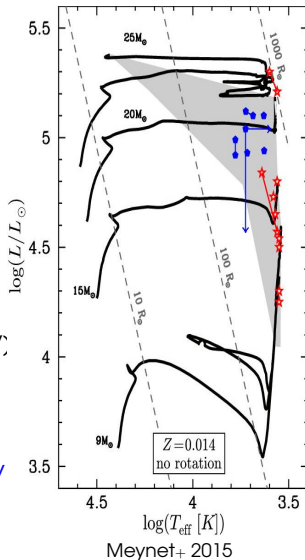
Gravitačně kolabující (cc) hmotné „obnažené“ hvězdy, He-hvězdy, Wolf-Rayetovy (WR) hvězdy

● Supernovy typu II

Gravitačně kolabující velmi hmotné hvězdy, zejména červení veleobří (také žlutí, modří a LBV)

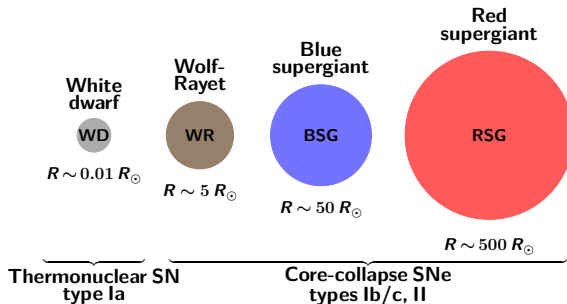
● Supernovy chemicky obohacují „své“ galaxie a pohání tvorbu příštích generací hvězd

● Expanze supernovy „mapuje“ historii ztráty hmoty původního hvězdného systému $\sim 10^3 - 10^4$ roků zpět



Co jsou supernovy a čím jsou významné?

Basic SN types and their progenitors



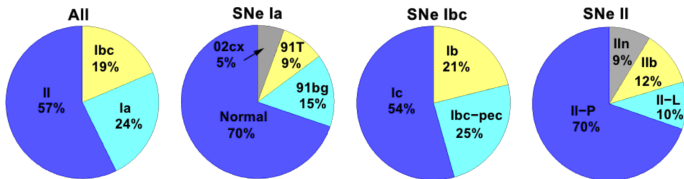
- Gravitačně kolabující (cc) supernovy - obecně nad $\sim 8 M_{\odot}$
- cc supernovy $\sim 8 - 10 M_{\odot}$ s degenerovaným O+Ne+Mg jádrem - elektronový záchyt (ec)
- cc supernovy $\sim 10 - 90 M_{\odot}$ - kolaps Fe jádra $\rightarrow$ různé scénáře
- cc supernovy - přes $\sim 100 M_{\odot}$ - „párově nestabilní“ (PPISNe, PISNe)

Otázka: Která je to mlhovina a která supernova je poblíž?

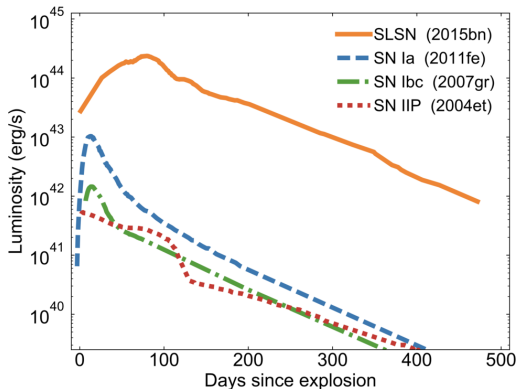


- Klasifikace supernov téměř výhradně podle maxima ve V-spektru
- První klasifikace: Minkowski 1941 (+ Baade) - **type I/II** (9/5 SNe)
- Dnes už „klasický“ přehled - Alex Filippenko 1997
- Moderní přehled v „*Handbook of Supernovae*“ 2017

ZOO supernov: „současná“ typologie supernov

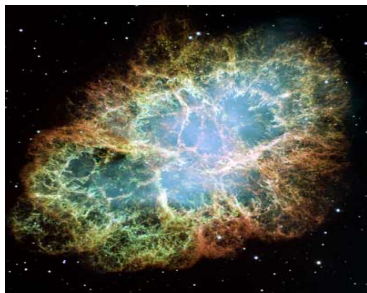


Zdroj: Dan Kasen

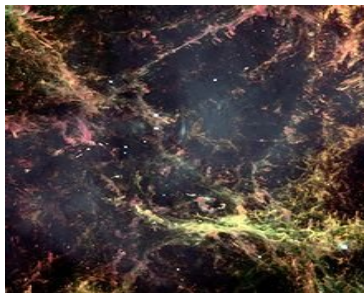


Historie pozorování supernov

- V *Mléčné dráze* alespoň pětkrát během minulého tisíciletí pozorováno vzplanutí supernovy
- V roce 1006 exploduje supernova v souhvězdí *Vlka* (čínské záznamy)
- V roce 1054 exploduje supernova v souhvězdí *Býka* (čínské záznamy) - pozůstatkem známá *Krabí mlhovina*
- V roce 1181 exploduje supernova v souhvězdí *Cassiopeia* - pozůstatkem Parkerova hvězda a mlhovina PA 30



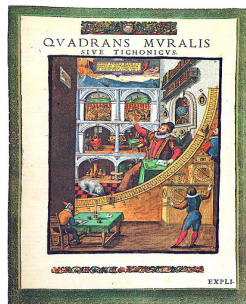
Crab Nebula, M1



Crab Nebula, fragment

Historie pozorování supernov

- V roce 1572 *Tychonova* supernova v souhvězdí *Kassiopeia*
- Tehdejší měření prokázala, že se nachází ve "sféře stálic"
- Propracovaná a "nehybná" středověká kosmologie se počala hroutit



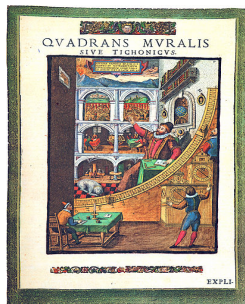
Tycho Brahe



Johannes Kepler

Historie pozorování supernov

- V roce 1572 *Tychonova* supernova v souhvězdí *Kassiopeia*
- Tehdejší měření prokázala, že se nachází ve "sféře stálic"
- Propracovaná a "nehybná" středověká kosmologie se počala hroutit
- 9. října 1604 *Keplerova* supernova v *Hadonoši*
- První vážné astronomické pozorování *Galilea Galilei*
- Pokus o změření paralaxy neúspěšný - definitivně odsunuta mezi stálice



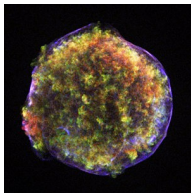
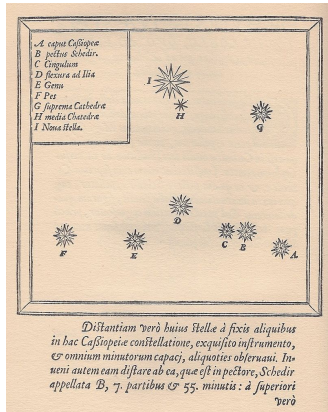
Tycho Brahe



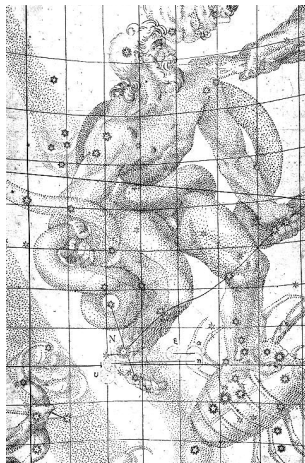
Johannes Kepler

Historická pozorování

- Tycho 1572 "Nova stella" (Cas B)



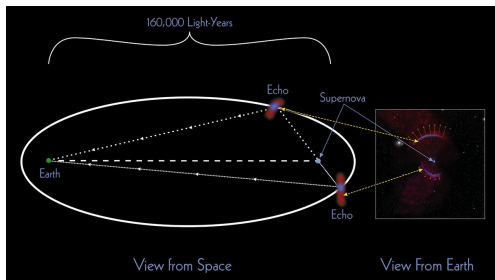
- Kepler 1604 "Nova stella"



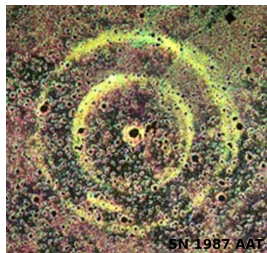
- žádné optické přístroje v těch dobách (pozorování pouhým okem)
- přesná měření relativní polohy mechanickými prostředky
- sledování „barevného vývoje“ (podle známých barev planet)

„Spojení“ na dávné supernovy: (V838 Mon, 1987A, Cas B, Cas A, etc.)

● světelná echa - geometrická schemata

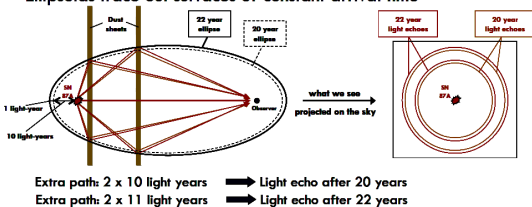


světelné echo SN 1987A

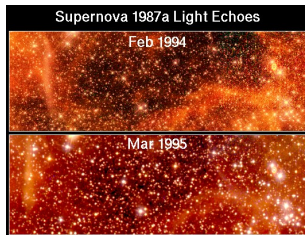


Credit: P. Marenfeld and NOAO/AURA/NSF

Ellipsoids trace out surfaces of constant arrival time



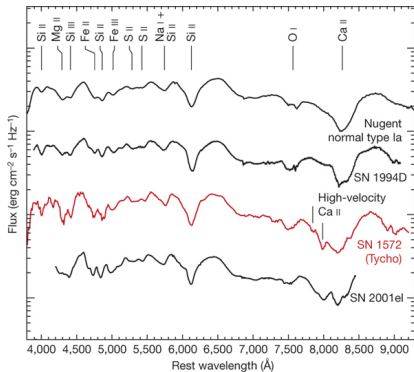
Credit: A. Rest - SuperMACHO & EHS collaboration



„Spojení“ na dávné supernovy (V838 Mon, 1987A, Cas B, Cas A, etc.)

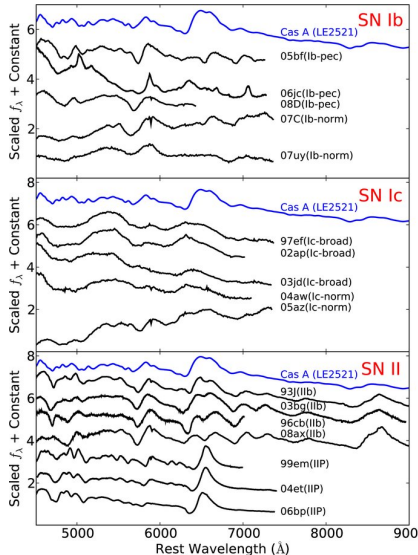
● světelná echa - spektra

Cas B



Credit: Krause et al. 2008

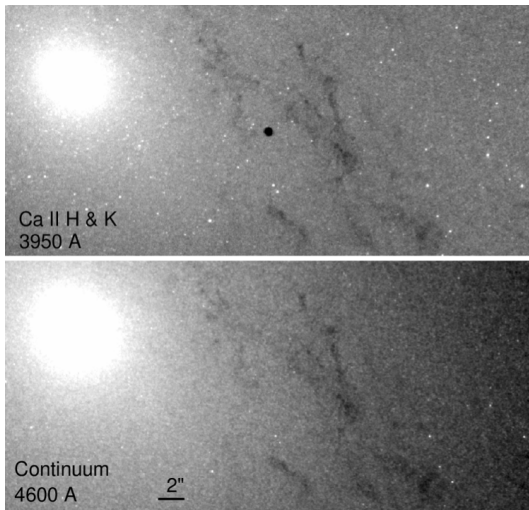
Cas A



Credit: Rest et al. 2011

Počátek moderní éry

- SN 1885A (S Andromeda)



- pozůstatek SN 1885A (černý kroužek) v absorpci CA II (HST)
- pozůstatek není viditelný bez absorpce (ve spojitém spektru)
- pravděpodobně typ Ia (nebo jiný typ supernovy chudé na vodík)

Vývoj pozorovací techniky

Fritz Zwicky - fotografické desky -
120 supernov během 50 let

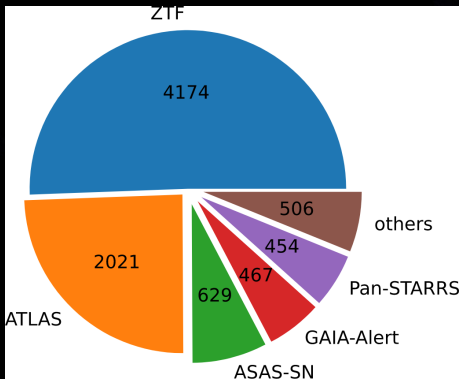
SN 1987A



- **vizuální pozorování, fotografické desky**
- **amatérští astronomové** - důležití přispěvatelé k vědě:
- **R. Evans** - 42 supernov objevených vizuálně, **F. Garcia** - SN 1993 in M81, SN 2011dh v M51 ("**twitter supernova**"), a další

Systematické vědecké průzkumy (optické přehlídky)

- **Současné širokopásmové přehlídky:** rozsáhlé, dostupné, objektivní
- Téměř 95% všech supernov za posledních 7 let poprvé oznámeno některou z pěti přehlídek: ZTF (následovník PTF, iPTF), ATLAS, ASAS-SN, GAIA-Alert, Pan-STARRS
- ZTF je 47 deg² optická kamera na Samuel Oschin Palomar 48-palcovém teleskopu (gri-pásma, aspoň každé 2 noci, až po 20,4 mag)



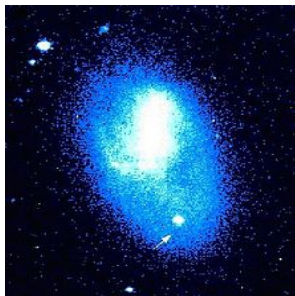
Credit: Cappellaro et al. 2022

Historie pozorování supernov

- Termín **supernova** byl zaveden okolo roku 1931 Walterem Baade and Fritzem Zwicky



SN 1994D, NGC 4526



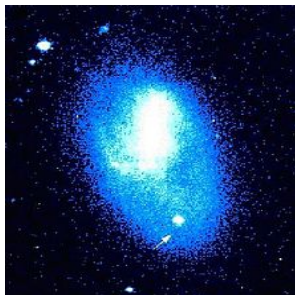
SN 1997D

Historie pozorování supernov

- Termín **supernova** byl zaveden okolo roku 1931 Walterem Baade and Fritzem Zwicky
- Hvězdy, podobně jako tehdy již známé tzv. **novy**, náhle zvýší svoji jasnost



SN 1994D, NGC 4526



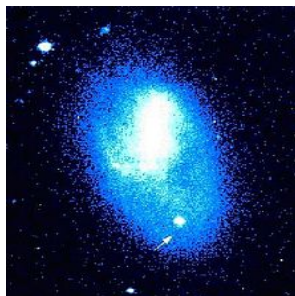
SN 1997D

Historie pozorování supernov

- Termín **supernova** byl zaveden okolo roku 1931 Walterem Baade and Fritzem Zwicky
- Hvězdy, podobně jako tehdy již známé tzv. **novy**, náhle zvýší svoji jasnost
- Amplituda jasnosti **supernov** je na rozdíl od **nov** o několik řádů větší



SN 1994D, NGC 4526



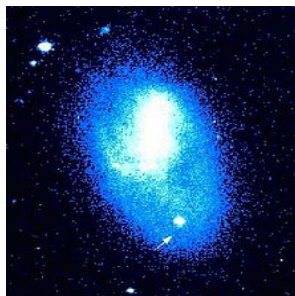
SN 1997D

Historie pozorování supernov

- Termín **supernova** byl zaveden okolo roku 1931 Walterem Baade and Fritzem Zwicky
- Hvězdy, podobně jako tehdy již známé tzv. **novy**, náhle zvýší svoji jasnost
- Amplituda jasnosti **supernov** je na rozdíl od **nov** o několik řádů větší
- **Supernova** neznamená pouze větší či jasnější **novu**, jedná se o kvalitativně zcela jiný jev



SN 1994D, NGC 4526



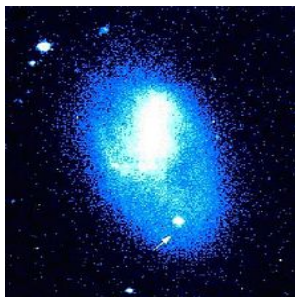
SN 1997D

Historie pozorování supernov

- Termín **supernova** byl zaveden okolo roku 1931 Walterem Baade and Fritzem Zwicky
- Hvězdy, podobně jako tehdy již známé tzv. **novy**, náhle zvýší svoji jasnost
- Amplituda jasnosti **supernov** je na rozdíl od **nov** o několik řádů větší
- **Supernova** neznamená pouze větší či jasnější **novu**, jedná se o kvalitativně zcela jiný jev
- Pojem **nova** může zahrnovat různé jevy, hvězdy však nejsou dezintegrovány
- **Nova** - opakující se jev, perioda zpravidla mnohokrát přesahuje délku lidského života



SN 1994D, NGC 4526



SN 1997D

Historie pozorování supernov

- Zásadní význam supernov v tzv. *velké debatě* o povaze a vzdálenostech "mlhovin"



Edwin Hubble



Saul Perlmutter

Historie pozorování supernov

- Zásadní význam supernov v tzv. *velké debatě* o povaze a vzdálenostech "mlhovin"
- V moderní době neustále vzrůstá počet supernov, pozorovaných v jiných galaxiích



Edwin Hubble



Saul Perlmutter

Historie pozorování supernov

- Zásadní význam supernov v tzv. *velké debatě* o povaze a vzdálenostech "mlhovin"
- V moderní době neustále vzrůstá počet supernov, pozorovaných v jiných galaxiích
- Nejvelkolepější úkaz tohoto druhu nastal 23. února 1987 - exploze SN 1987A ve Velkém Magellanově mračnu



Edwin Hubble



Saul Perlmutter

Historie pozorování supernov

- Zásadní význam supernov v tzv. *velké debatě* o povaze a vzdálenostech "mlhovin"
- V moderní době neustále vzrůstá počet supernov, pozorovaných v jiných galaxiích
- Nejvelkolepější úkaz tohoto druhu nastal 23. února 1987 - exploze SN 1987A ve Velkém Magellanově mračnu
- V současnosti velké množství výzkumných projektů - pozorování supernov v kosmologických vzdálenostech



Edwin Hubble



Saul Perlmutter

Historie pozorování supernov

- Zásadní význam supernov v tzv. *velké debatě* o povaze a vzdálenostech "mlhovin"
- V moderní době neustále vzrůstá počet supernov, pozorovaných v jiných galaxiích
- Nejvelkolepější úkaz tohoto druhu nastal 23. února 1987 - exploze SN 1987A ve Velkém Magellanově mračnu
- V současnosti velké množství výzkumných projektů - pozorování supernov v kosmologických vzdálenostech
- Potvrzení zrychlujícího se rozpínání vesmíru - *Nobelova cena za fyziku 2011*

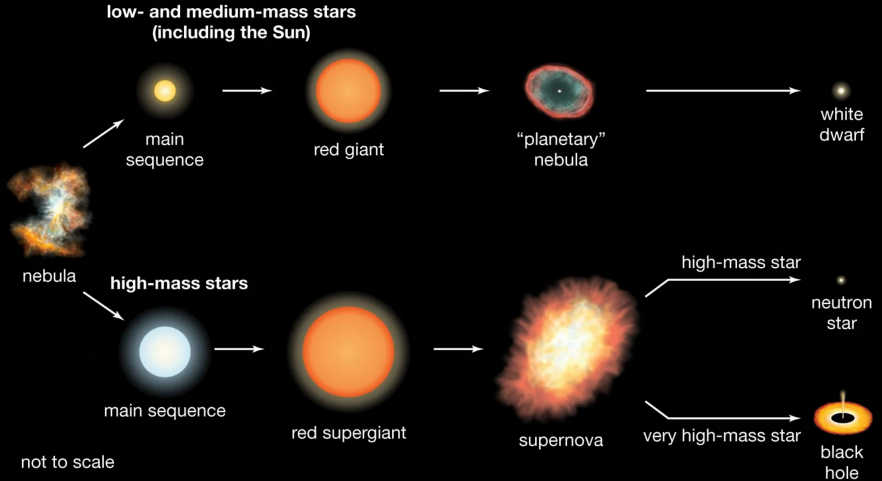


Edwin Hubble



Saul Perlmutter

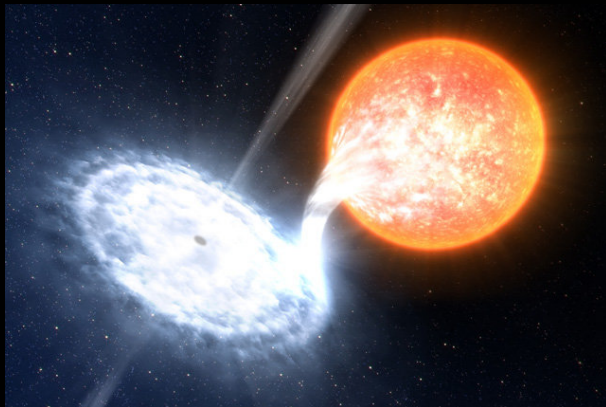
Stellar evolution



Akreující bílí trpaslíci - klasické novy nebo supernovy Ia

C/O bílý trpaslík

dárcovká hvězda - H/He nebo pouze He



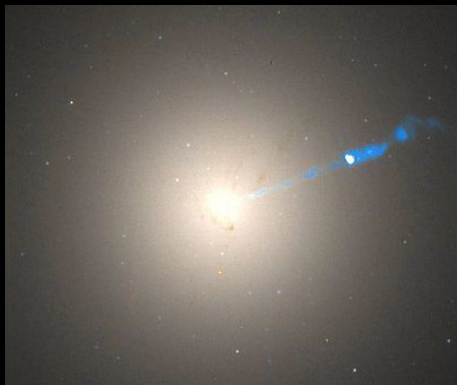
- $< 1\%$ bílých trpaslíků jsou v těsných dvojhvězdách, kde probíhá výměna látky, uvolňující gravitační energii $GM_1 m_p / R_1 \approx 100 - 300 \text{ keV/nukleon}$

- Zatímco jaderná fúze $\text{H} \rightarrow \text{He}$ nebo $\text{He} \rightarrow \text{C}$ uvolňuje energii $1 - 5 \text{ MeV/nukleon}$

- Tento kontrast je ještě zvýrazněn, když bílý trpaslík ukládá přenesené „palivo“ > 1000 let a „spálí“ je překotně, to způsobí, že tyto **dvojhvězdy jsou pozorovatelné ve vzdálených galaxiích během termonukleárního procesu**

Akreující bílí trpaslíci - klasické novy nebo supernovy Ia

Galaxie M87 (Virgo A)



Pár čísel:

- V průměru dva bílí trpaslíci 'vzniknou' za rok v galaxii $10^{11} M_{\odot}$

Pozorované počty jsou:

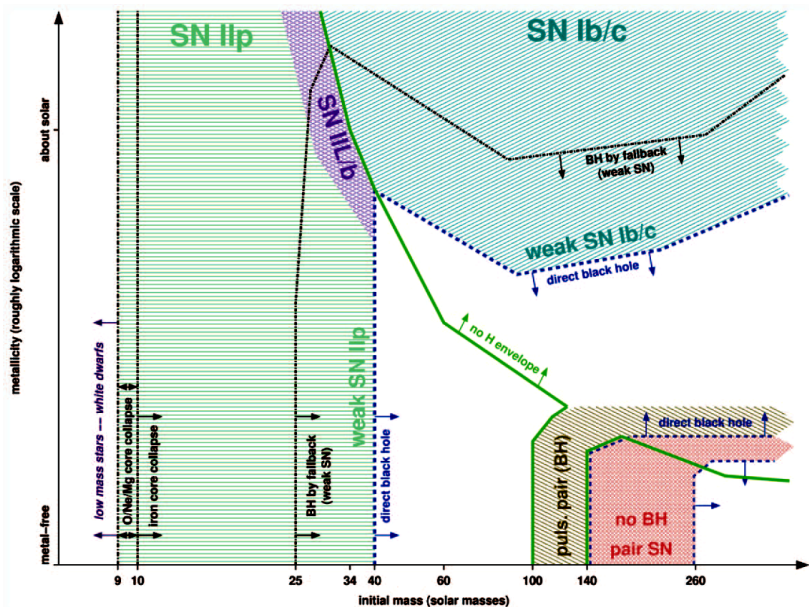
- ~20 klasických nov (palivo H) za rok, což znamená vznik těsné dvojhvězdy s „normální“ hvězdou/bílým trpaslíkem jednou za 400 let (Townsend & Bildsten (T&B) 2005)
- Jedna supernova typu Ia každých 250 let, to znamená **jedna na 500 klasických nov!**

- **Předpovězené počty:** He nova každých 250 let, jedna **extrémně velká He exploze** každých 5000 let a **BT - BT splynutí** každých 200 let

Supernova typu Ia - explodující bílý trpaslík akreující látku v těsné dvojhvězdě

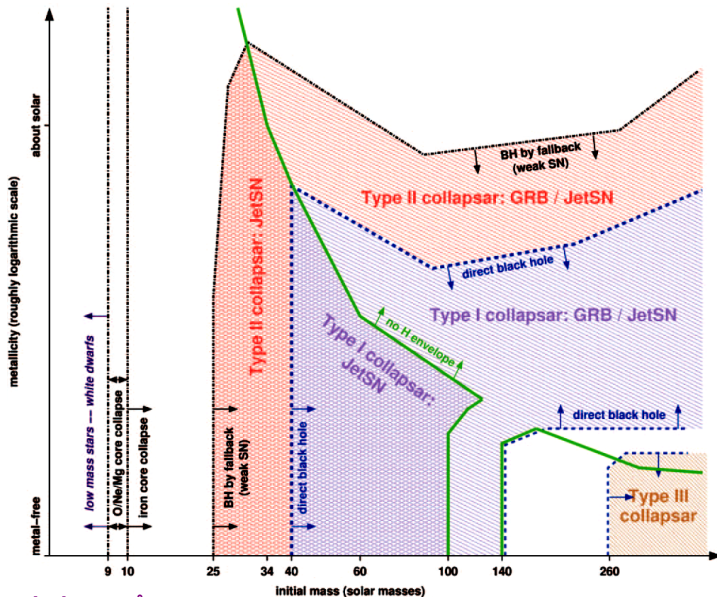


Cc supernovy: počáteční hmotnost vs. obsah těžších prvků



Zdroj: Heger+ 2003

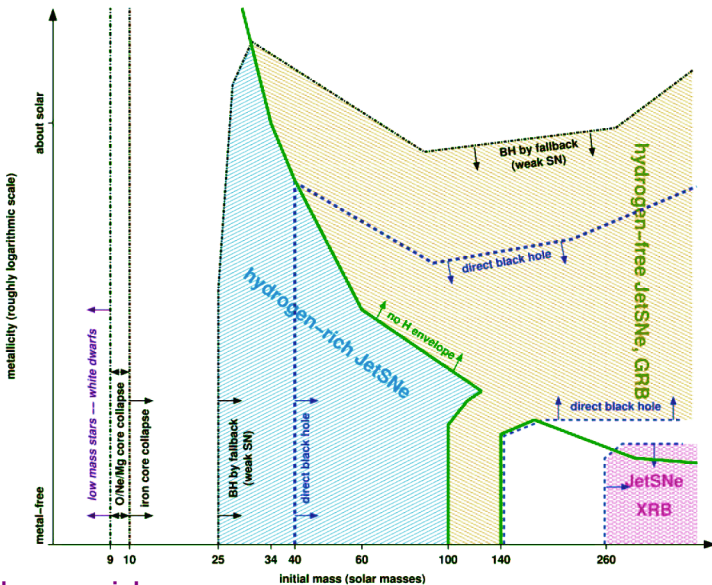
Cc supernovy: počáteční hmotnost vs. obsah těžších prvků



● typy kolapsarů

Zdroj: Heger+ 2003

Cc supernovy: počáteční hmotnost vs. obsah těžších prvků



● kolapsary s jetem

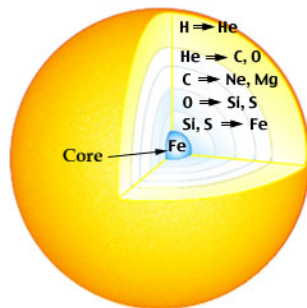
Credit: Heger+ 2003

Supernova - hmotná hvězda s kolabujícím jádrem



Závěrečné fáze vývoje hmotných hvězd

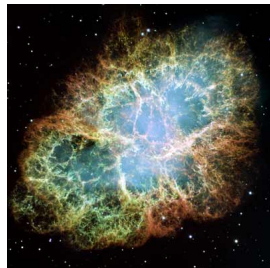
- α -proces: pomocí α částic (héliových jader) při teplotách 10^9 K syntéza prvků až do ^{40}Ca
- e-proces (equilibrium = rovnováha): probíhá při teplotách nejméně 4×10^9 K a vyšších, syntetizuje prvky skupiny železa, např. Ni, Co, Fe
- Zde veškeré exotermické jaderné reakce končí, další termojaderná syntéza není možná
- Následuje další rychlé smršťování a zahřívání "železného" jádra hvězdy
- V jádru hvězdy se hromadí železo, dokud jeho hmotnost nepřekročí tzv. Chandrasekharovu mez, $M_{\text{Ch}} \approx 1,44 M_{\odot} \rightarrow$ neutronová hvězda, černá díra



cibulová struktura vnitřní stavby hmotné hvězdy

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let



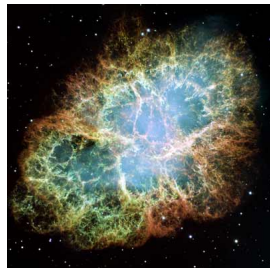
Krabí mlhovina



pulsar

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem



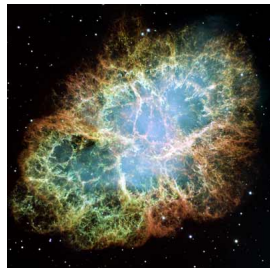
Krabí mlhovina



pulsar

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu



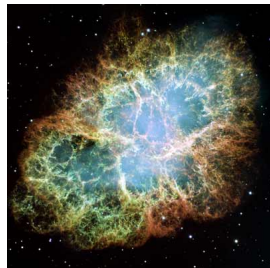
Krabí mlhovina



pulsar

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu
- Chemický vývoj galaxií a vesmíru vůbec



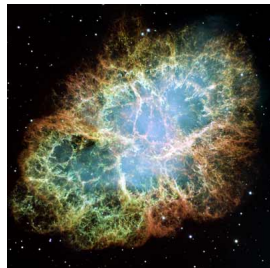
Krabí mlhovina



pulsar

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu
- Chemický vývoj galaxií a vesmíru vůbec
- Impulz k tvorbě nových hvězd



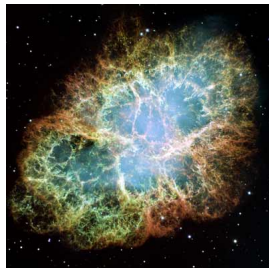
Krabí mlhovina



pulsar

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu
- Chemický vývoj galaxií a vesmíru vůbec
- Impulz k tvorbě nových hvězd
- Záblesky gama záření (*kolapsary*?)



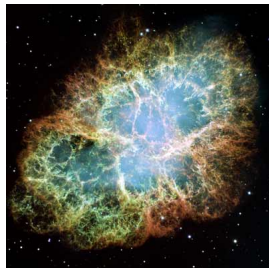
Krabí mlhovina



pulsar

Zbytky po supernovách

- *Mlhovinné zbytky*, pozorovatelné několik tisíc let
- *Pulsary* → rychle rotující neutronové hvězdy, záření směřované magnetickým polem
- *Světelné echo* - pozorováno u SN 1987A, SN 1993J, SN 1998bu
- Chemický vývoj galaxií a vesmíru vůbec
- Impulz k tvorbě nových hvězd
- Záblesky gama záření (*kolapsary*?)
- *Geminga*

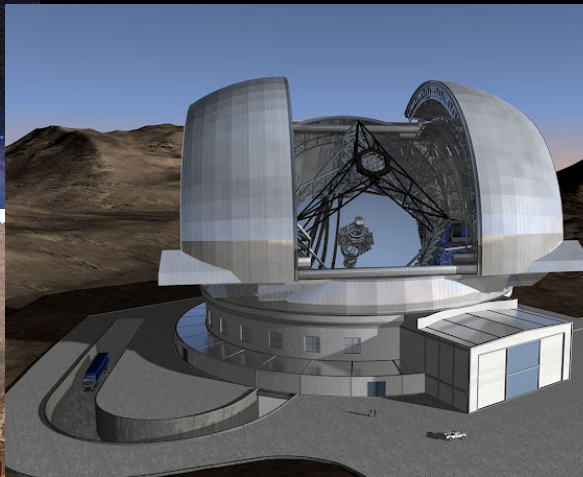


Krabí mlhovina



pulsar

Budoucnost: nová generace „obřích“ teleskopů



Děkuji za pozornost