

# Spektri ostataka supernovih

Velibor Velović 1076/2016

Katedra za astronomiju, Matematički fakultet



# Uvod

- ▶ Zašto SNR?
  - ▶ Veoma interesantni i bitni objekti.
  - ▶ Daju uvid o mehanizmu nastanka supernovih, konačnih stadijuma zvezda.
  - ▶ Ispitivanje mehanizama za ubrzanje čestica.
  - ▶ Veliki izvori galaktičkih kosmičkih zraka


- ▶ Kako proučavamo?

Uglavnom radio i X zračenje.



# Značaj SNR

- Supernove su retki događaju (2-3 u 100 godina).
- Mladi SNR daju informacije o nukleosintezi i nesimetričnostima kod eksplozija supernovih.
- Ispitivanje bliske okoline supernovih, koju je oblikovala zvezda predak.
- Deo energije udarnih talasa se pretvara u energiju kosmičkog zračenja
- Ispitivanje fizičkih procesa:
  - Udarni talasi : primeri bezsudarnog udarnog talasa sa velikim mahovim brojem
    - Udarni talasi u retkim sredinama kakve se nalaze kod SNR nazivaju se bezsudarni udarni talasi.
  - Bezsudarno zagrevanje sredine : čestice ne interaguju kulonovski već na mnogo većim rastojanjima, preko elektromagnetnih fluktuacija i talasa u plazmi.

- 
- Supernove imaju veliki značaj u modernoj astrofizici i uticaj na MZM.
  - Hemijska evolucija univerzuma
  - Glavni izvor energije u MZM.
  - Pokretači stvaranja novih zvezda.
  - SN Tip Ia mogu da se posmatraju na velikom crvenom pomaku ( do  $z = 1.7$ )
  - Korišćenjem baš ovog tipa SN dokazano je da se svemir ubrzano širi (Perlmutter et al. 1998; Garnavich et al. 1998).
  - J.T. Nielson, A. Guaffanti, S. Sarkar - Na uzorku od 740 SN tipa Ia, dobili su da se univerzum širi konstantnom brzinom.  
(<http://www.nature.com/articles/srep35596>)

# Posmatranja SN i SNR

- ▶ Najznačajnije informacije dobijamo posmatranjem u X domenu.
- ▶ Spektroskopijsko X zračenje:
- ▶ Određivanje zastupljenosti elemenata nastalih nukleosintezom:
  - ▶ O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca (alfa elementi)
  - ▶ Fe, Ni i elementi iz okoline gvožđa ( $20 < Z < 28$ )
- ▶ Svi elementi imaju istaknute linije u opsegu 0.5 – 10 keV na temperaturama između 0.2 i 5 keV.
- ▶ Baš u ovom opsegu je tipična elektronska temperatura za plazmu zagrevanu udarnim talasima u ostacima supernovih.



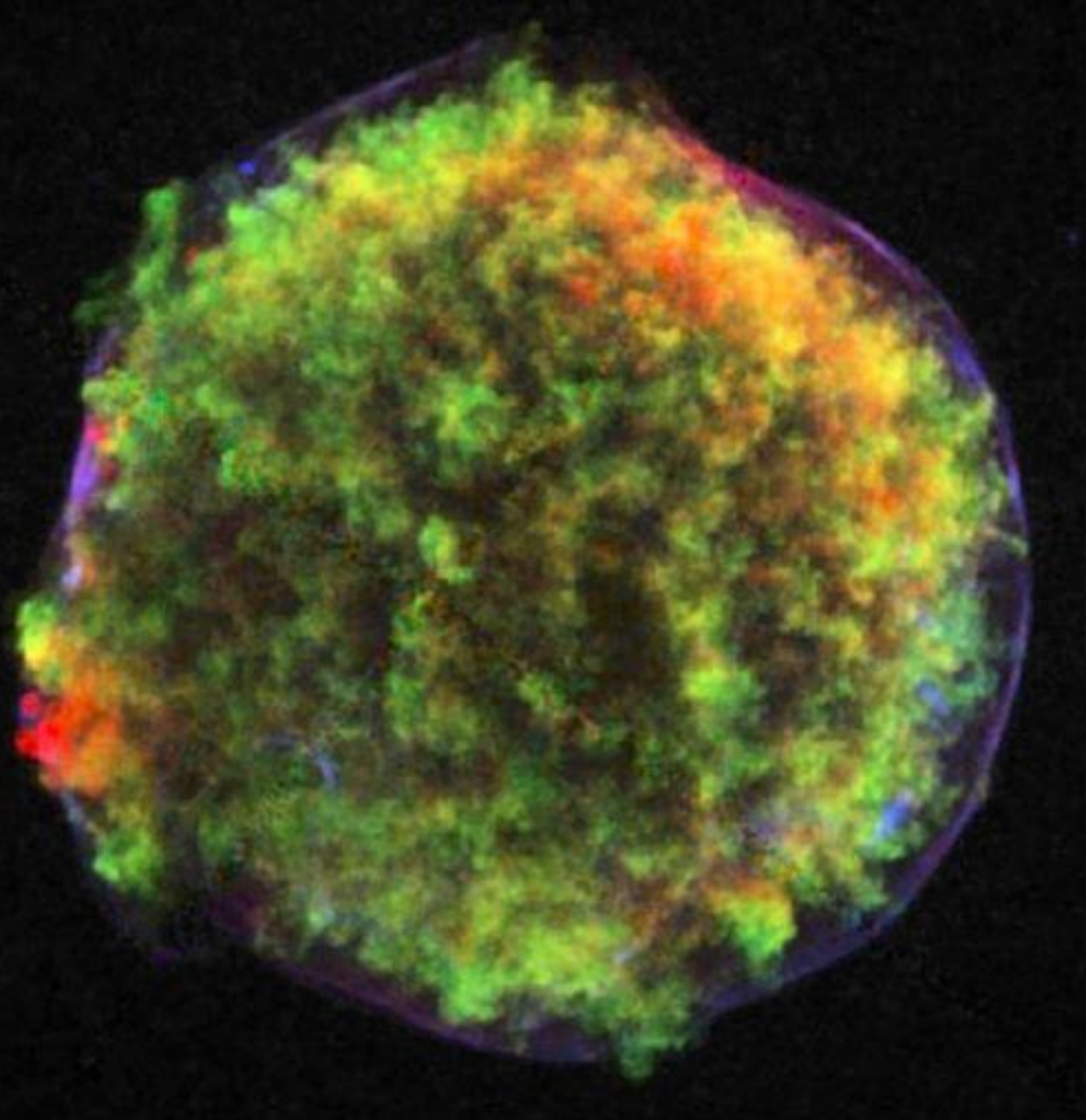
# Spektroskopija X zračenja

- ▶ Vrela plazma SNR kao i MZM je optički retka za X zračenje.
- ▶ Iako je spektroskopija u X domenu i dalje prilično ograničena, omogućava direktno mapiranje prostorne raspodele temperature i zastupljenosti elemenata u SNR. Za mlade ostatke možemo da razdvojimo termalno i netermalno, sinhrotronsko zračenje.
- ▶ Na osnovu emisionih linija u spektru dobijamo informacije o temperaturi i jonizacionom dobu ostatka.
- ▶ Kod mladih ostataka, u prostornom delu gde ne vidimo emisione linije, ili su one slabe, očekujemo sinhrotronsko X zračenje.
- ▶ Proučavanje sinhrotronskog X zračenja je dobar alat za proučavanje ubrzanja kosmičkog zračenja, jer sinhrotronsko zračenje zavisi od osobine ubrzavanja udarnim talasom.
- ▶ Na osnovu veličine regiona koji zrači sinhrotronsko možemo proceniti jačinu magnetnog polja.

- Spektroskopija X zraka uz pomoć Chandra teleskopa

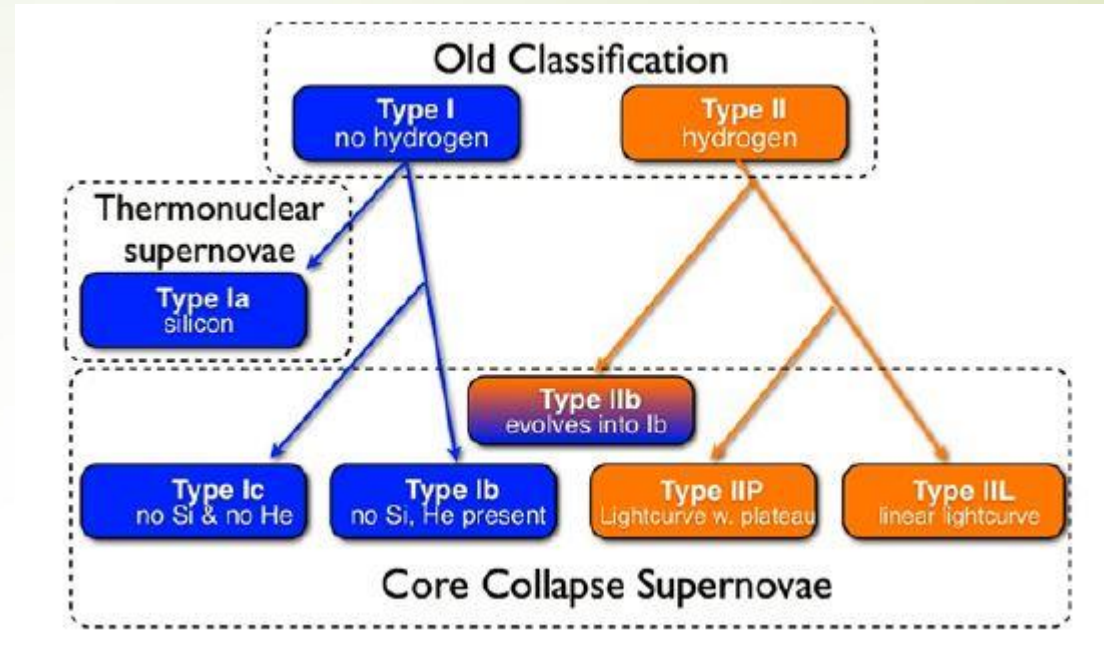
## SNR 1572 - Tycho

- Prostorna raspodela gvožđa i silicijuma
- Crvena boja prikazuje emisijske linije gvožđa iz L ljuske.
- Zelena boja linija Si XIII.
- Plava boja označava Sinhrotronski kontinuum (4-6 keV) koji nastaje blizu udarnog talasa. Emitovan elektronima koji imaju energije do 100 TeV




# Supernove

► Delimo na dva tipa:  
Termonuklearne  
Kolapsirajuće



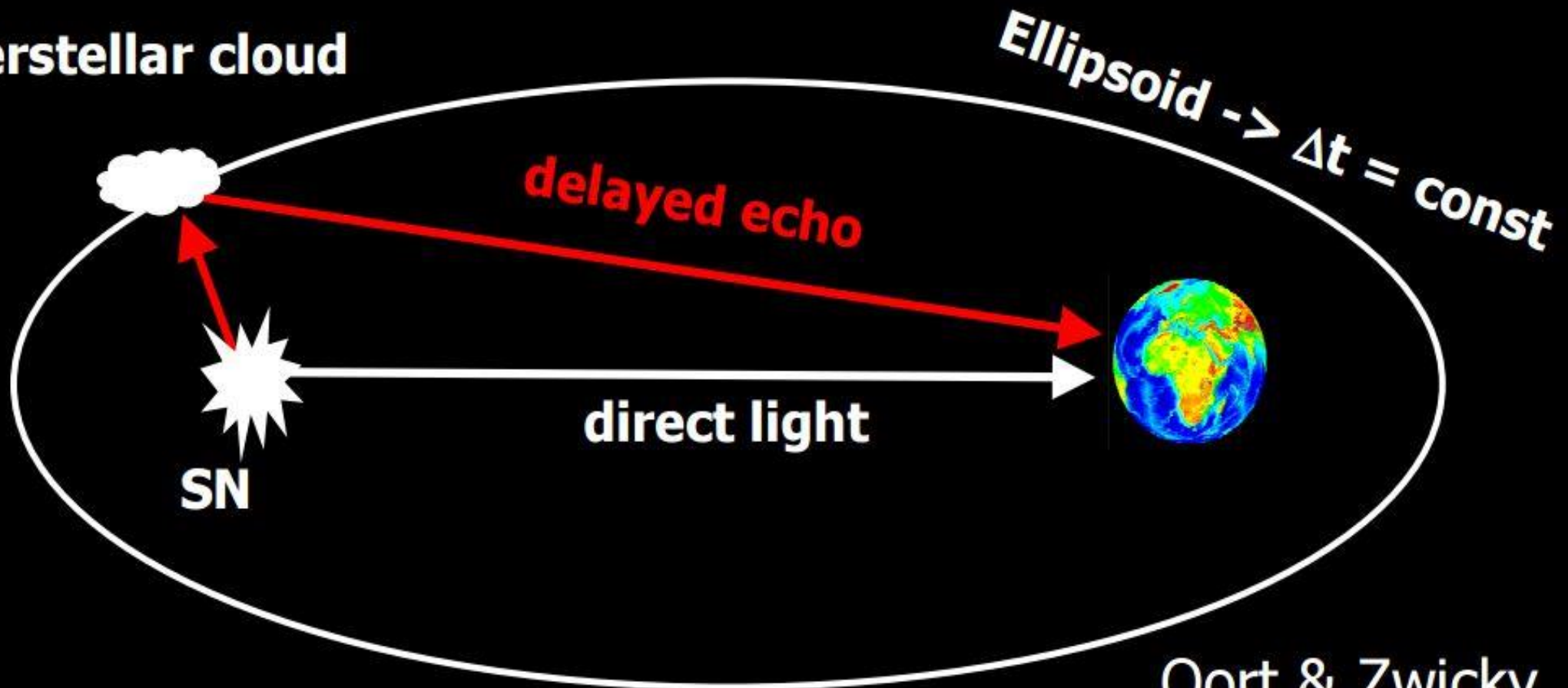
- Tip Ia – apsorpcioni spektar silicijuma.
- Tip Ib – zvezda predak je oduvala omotač koji je sastavljen uglavnom od vodonika, prisutne linije helijuma.
- Tip Ic – ne vidimo ni linije helijuma.
- Drugi tip se deli na osnovu oblika krive sjaja i spektroskopije.
- P- plato, L- Linearna kriva sjaja, n – uska linija vodonika.



- 
- ▶ Tip IIp je najčešći. Zvezde sa početnom masom 8 - 17  $M_{\odot}$ , eksplodiraju u fazi crvenog superdžina, dok i dalje imaju veliku količinu vodonika u omotaču.
  - ▶ Tip IIL ima znatno manji omotač. Razlog može biti razorniji zvezdani vetrovi ili interakcija u dvojnog sistema.
  - ▶ Tip IIb je klasa posrednik između Ib i IIb. U početku spektar ima jake linije vodonika i identifikuje se kao Tip II, da bi u poznom dobu evoluirao u Tip Ib sa jakim linijama helijuma. ( Proto-typical SN 1993J)
  - ▶ Koristeći spektroskopiju svetlosnog eha (videti sledeći slajd) identifikovan je SNR Cassiopeia A. A potom pokazano da je to ostatak supernove tipa IIb (Krause et al. 2008a).
  - ▶ Tip IIn – Još uvek ne mogu da se svrstaju ni u jednu grupu. Posmatrana je samo jedna supernova SN 200lic koja je smatrana za Tip Ia, da bi kasnije evoluirala u Tip IIn. (Hamuy et al. 2003).

# Time travel with light echos - Connecting SNe with their remnants

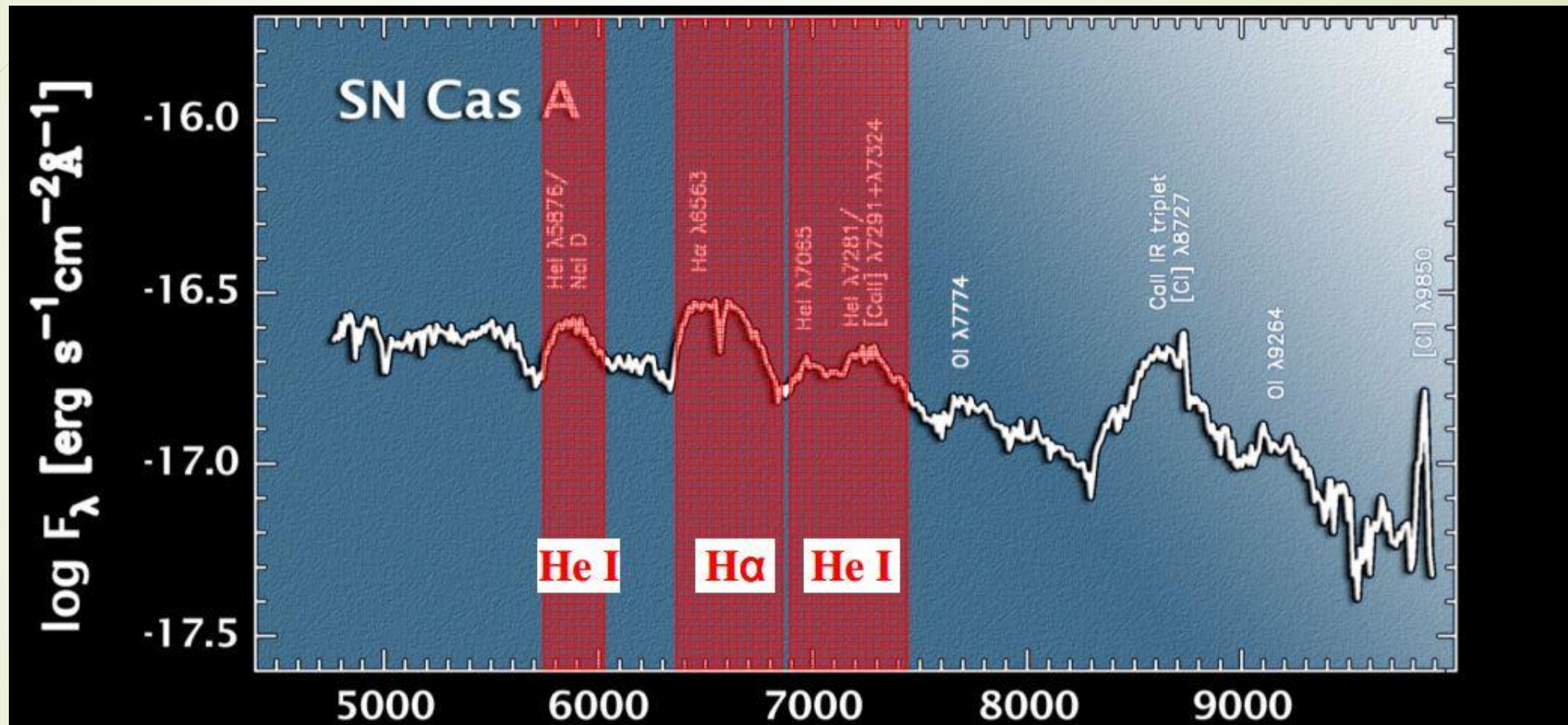
interstellar cloud



Oort & Zwicky

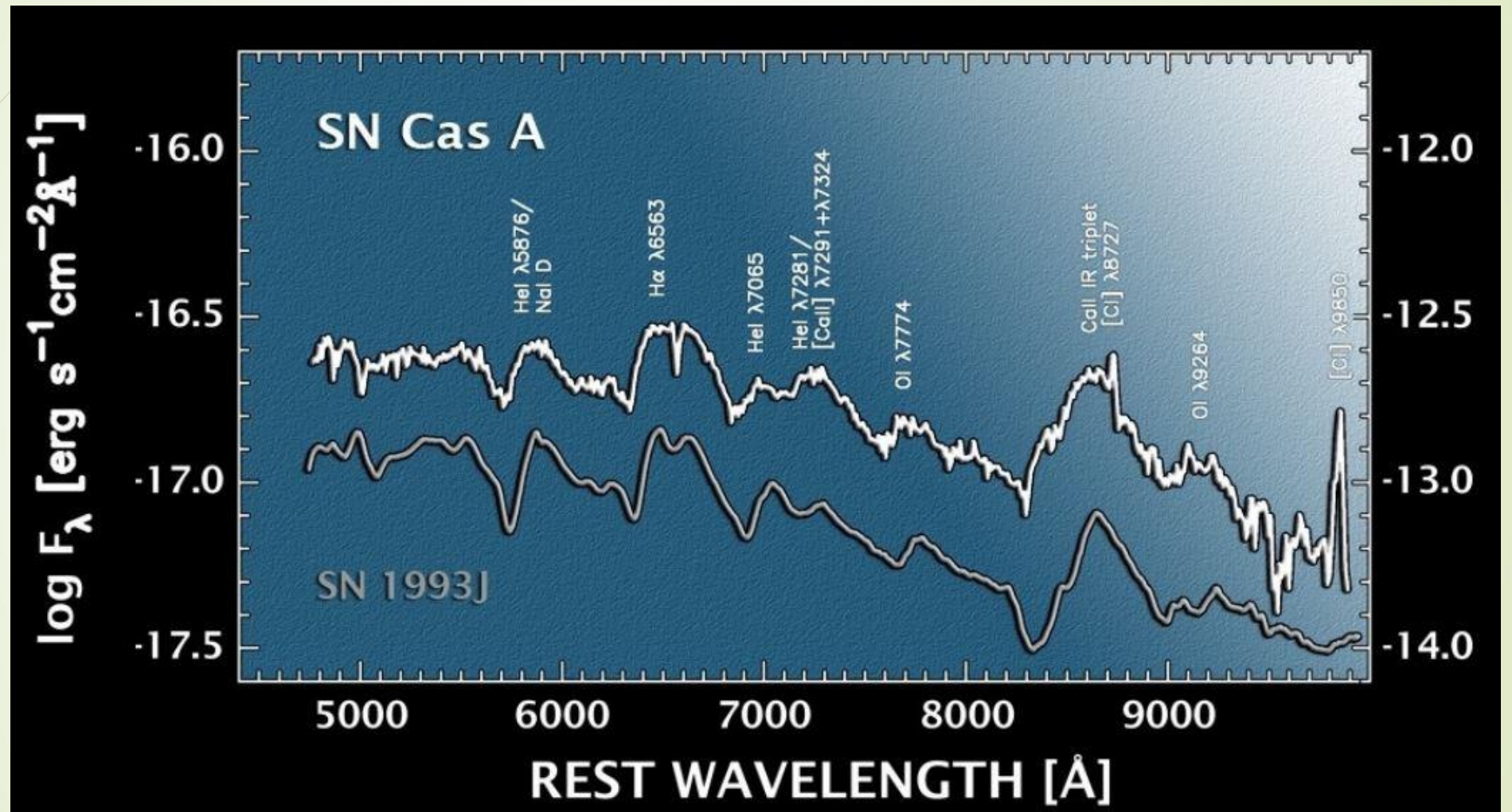
Zwicky Rev. Mod. Phys. 12, 66 (1940)

# Spektar SN Cas A



Spektar je dobijen metodom svetlosnog eha, posmatran 327 godina nakon prvobitnog dolaska do zemlje.

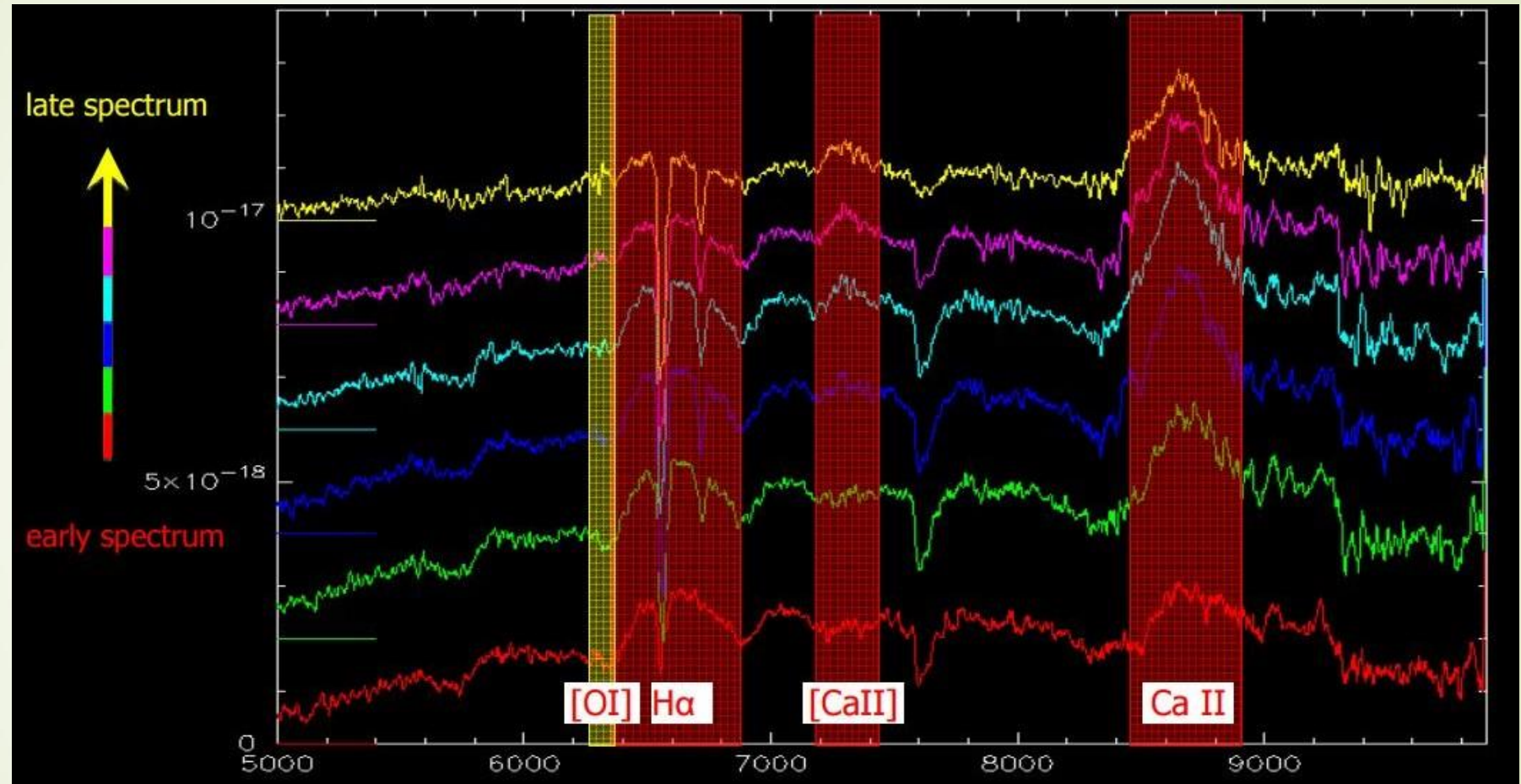
## Poređenje sa spektrom prototipične SN Tipa IIb – 1993J



Krause et al. Science 320, 1195 (2008)

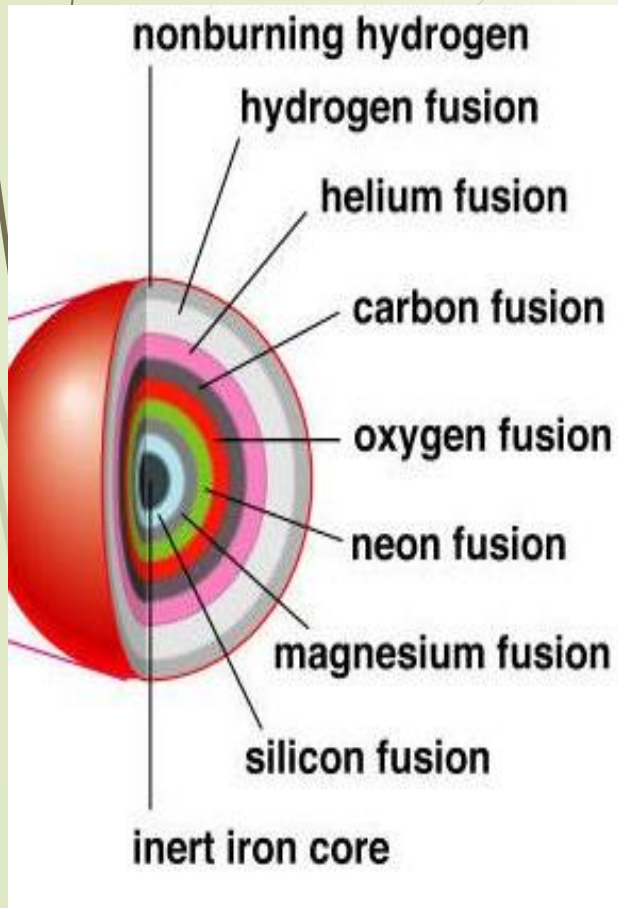
# Evolucija spektra SN Cas A

Usuda et al.2008





Emisione linije vodonika slabe, dok linije kalcijumovog tripleta i nebularne linije kiseonika rastu

# Kolapsirajuće supernove



- ▶ Obeležavaju konačnu fazu evolucije masivnih zvezda,  $M \geq 8M_{\odot}$
- ▶ Formiranje gvoždenog jezgra je početak završne faze u životu zvezde, jer fuzija 2 jezgra Fe daje negativan energetski bilans. Jezgro kolapsira u proto-neutronske zvezde, ili crnu rupu u slučaju najmasivnijih zvezda.
- ▶ Većina gravitacione energije se oslobađa u vidu neutrina.
- ▶ Sam mehanizam supernove koji zahteva energije  $\geq 10^{51}$  erg u spoljašnjim slojevima i dalje nije dobro razjašnjen.
- ▶ Formiranje proto-neutronske zvezde zaustavlja kolaps i pokreće udarni talas kroz materijal koji se urušava.
- ▶ Numeričke simulacije pokazuju da talas nema dovoljno energije da pokrene eksploziju, i prigušuje se.
- ▶ Smatra se da talasi dobijaju energiju apsorbujući deo neutrina oslobođenih sa proto-neutronske zvezde, ali i dalje simulacije ne mogu da reprodukuju eksploziju supernovih.

- 
- ▶ Noviji modeli se fokusiraju na akrecionim nestabilnostima, što povećava šansu za apsorbovanje neutrina u neposrednoj blizini neutronske zvezde. Non-spherically symmetric standing accretion shock instability (SASI).  
(SASI, Blondin et al. 2003)
  - ▶ Mogu pomoći i u shvatanju pojave dodatnog impulsa kod pulsara (Pulsar kick) i njihovu rotaciju.  
(Blondin and Mezzacappa 2007).
  - ▶ Acoustic power, model u kome g oscilacije na proto-neutronske zvezdi dovode do uspešne eksplozije supernove.  
(Burrows et al. 2007), (Weinberg and Quataert 2008).
  - ▶ Magneto-centrifugalni model: Doprinos neutrina nije najbitniji za realizovanje eksplozije već pojačavanje magnetnog polja zvezde zbog diferencijalne kompresije, koje dovodi do stvaranja magneto centrifugalnih mlazeva (džetova), koji daju dovoljno energije za SN. (Wheeler et al. 2002)

- 
- Izbačeni materijal kod kolapsirajuće supernove sadrži uglavnom materijal sa zvezde, osim najdubljeg sloja. Koji je sastavljan uglavnom od Fe i Si – grupe elemenata.
  - Ovi elementi nastaju sintezom protona i  $\alpha$  čestica koji nastaju dezintegracijom ostataka težih elemenata u najdubljem sloju oko kolapsirajućeg jezgra.
  - Produkti nukleosinteze mogu biti radioaktivni ( $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ )
  - Energija oslobođena ovim elementima i njihovim raspadima zagreva izbačeni materijal, što utiče na evolucije krive sjaja supernove.
  - Doprinos ovih elemenata zavisi od samih osobina supernove.





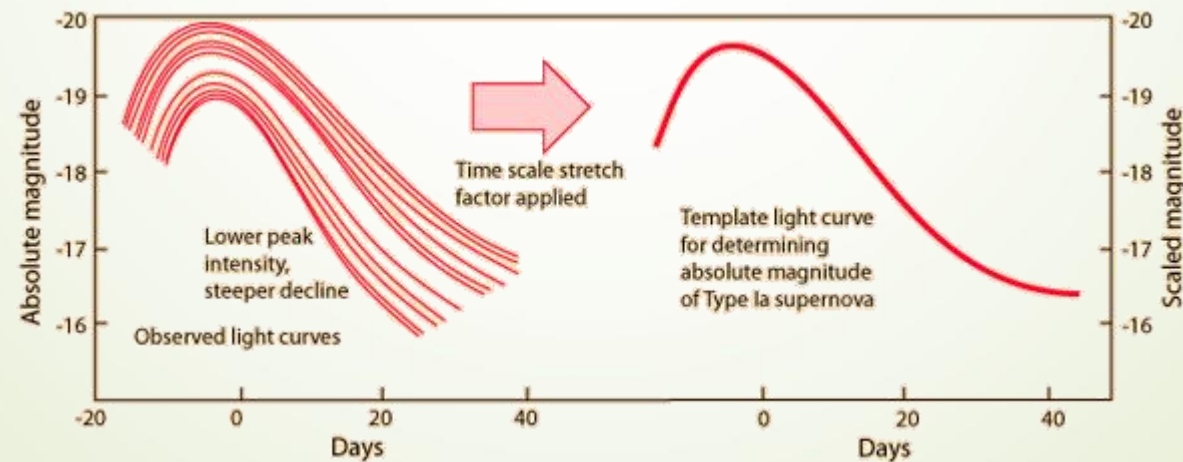
# Osobine SN koje utiču na doprinos elemenata

- ▶ Doprinos elemenata ne možemo pouzdano da odredimo jer zavisi od osobina SN koje ne možemo da izmerimo sa sigurnošću i oni variraju u zavisnosti od modela do modela.
  - ▶ Mass cut (granica između materijala koji akreciono pada na neutronske zvezde, ili crnu rupu, i materijala koji biva izbačen) i masa neutronske zvezde/crne rupe
  - ▶ Energija eksplozije
  - ▶ prisutnost asimetričnosti eksplozije
- ▶ Najveći doprinos kod kolapsirajućih SN daju produkti različitih faza sagorevanja zvezde kao što su: C, O, Ne, Mg.
- ▶ Ovi elementi su uglavnom funkcije početne mase zvezde pretka. Zbog čega smatramo da su ostaci supernovih bogati kiseonikom nastali od najmasivnijih zvezde.
- ▶ Modeli za određivanje doprinosa elemenata:

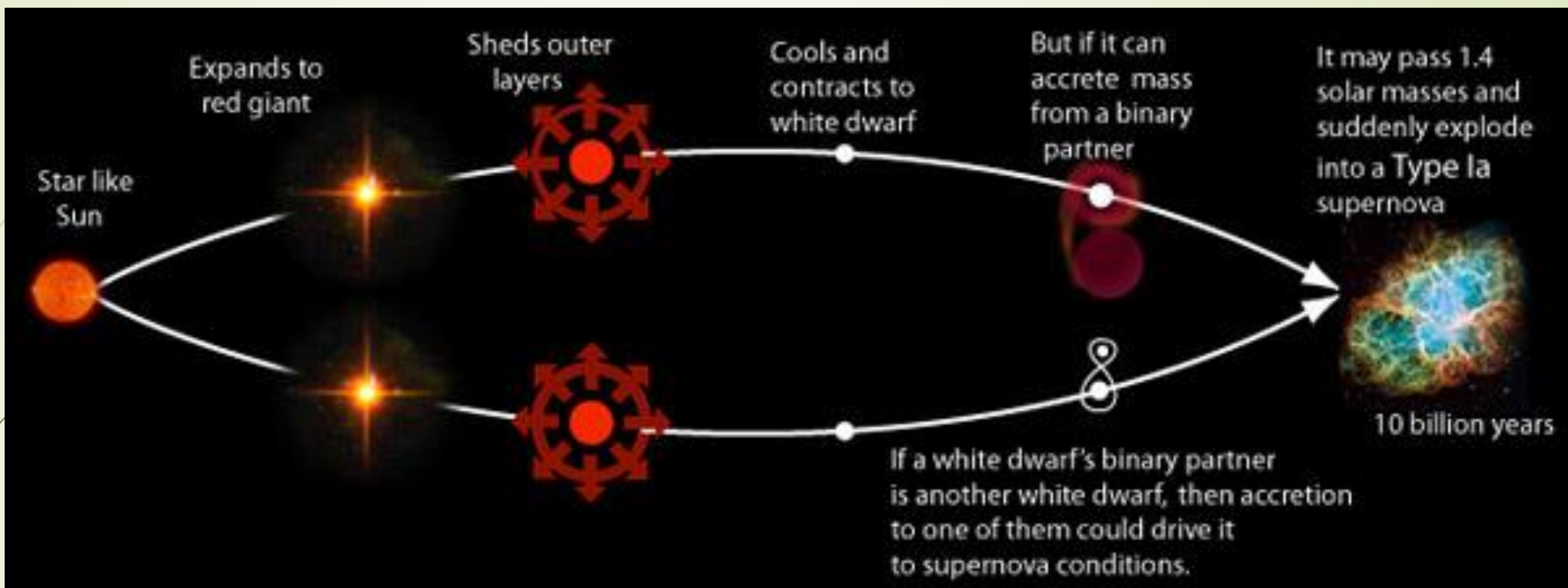
(Woosley and Weaver 1995; Thielemann et al. 1996; Chieffi and Limongi 2004)

# Termonuklearne supernove

- ▶ Tip Ia supernove nastaju u dvojnog sistema gde se vrši transfer mase sa zvezde pratioca na belog patuljka, koji kada dostignu Čandrasekarovu granicu započinju termonuklearnu eksploziju.
- ▶ Postoji empirijska relacija između maksimuma krive sjaja i njenog opadanja, uz pomoć čega dobijamo apsolutni sjaj supernovih. Što ih čini veoma dobrim indikatorima razdaljine.



Perlmutter,  
Physics Today  
56, No.4, 53,  
2003



- Za stabilan rast belog patuljka, prenos mase mora biti u opsegu:  
 $4 \times 10^{-8} - 7 \times 10^{-7} M_{\odot}/yr$

# Modeli TN supernovih:

- ▶ Tri modela termonuklearnih supernova:
  - ▶ Detonacija
  - ▶ Deflagracija (brzo sagorevanje)
  - ▶ Odložena detonacija
- ▶ Detonacija: Eksplozivna nukleosinteza dešava se zbog kompresije i zagrevanja plazme zbog kretanja udarnog talasa kroz zvezdu.
- ▶ Deflagracija: front sagorevanja prostire se sporije od lokalne brzine zvuka. Nuklearna fuzija u sagorevajućem frontu je omogućen zbog konvektivnog kretanja koji meša nesagoren materijal u vrelu zonu sagorevanja.
- ▶ Odložena detonacija: Eksplozija počinje kao deflagracija, ali u nekom trenutku imamo detonaciju i sagori ostatak BP u elemente srednje mase, kao što je silicijum. (Khoklov et al. 1991)

- U modelu detonacije sav materijal belog patuljka pretvara se u elemente Fe grupe. Posmatranja pokazuju da supernove Ia imaju velike količine elemenata srednje mase.
- Deflagracija predviđa previše stvaranja  $^{54}\text{Fe}$  u odnosu na  $^{56}\text{Fe}$ . Kao i previše uske intervale brzine sagorevanja u poređenju sa posmatranjima.
- Za model odložene detonacije potvrđeno je posmatranjima da C/O nakon detonacije sagorevaju približno konstantnom brzinom  $M = 1.1M_{\odot}$ .
- Različiti maksimumi sjaja kod SN tipa Ia uzrokovani su:
  - odnosom elemenata gvozdene grupe i proizvoda elemenata srednje mase proizvoda.
  - Odnos stabilnog  $^{56}\text{Fe}$  i radioaktivnog  $^{56}\text{Ni}$ , koji se raspada na  $^{56}\text{Fe}$  i određuje energiju koja se oslobađa i tako određuje sjaj supernove tipa Ia
- U poređenju sa kolapsirajućim supernovama, termonuklearne SN stvaraju mnogo više elemenata Fe grupe ( $\sim 0.6 M_{\odot}$ )
- Energija eksplozije određena je masom svih elemenata:

$$E_{51} = 1.56M_{\text{Ni}} + 1.74M_{\text{Fe}} + 1.24M_{\text{IME}} - 0.46$$

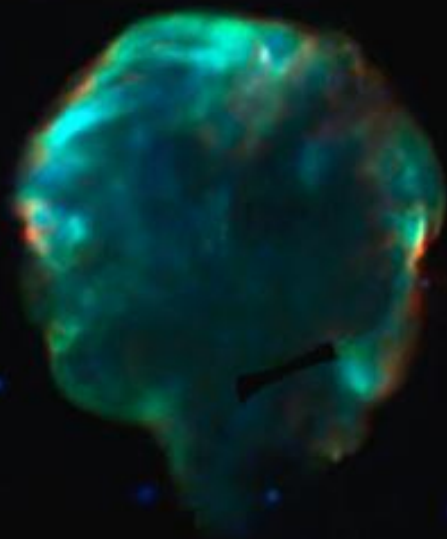
$E_{51}$  - kinetička energija  $10^{51} \text{ erg}$



# Klasifikacija ostataka supernovih

- Supernove delimo :
  - Termonuklearne
  - Kolapsirajuće
- Za ostatke SN je teško odrediti poreklo i tip SN pa se ostaci supernovih klasifikuju po morfologiji:
  - Ljuskasti
  - Plerioni – ispunjen centar
  - Kombinovani
  - Termalne kombinovani

Tipovi SNR



Ljuskasti




Plerioni



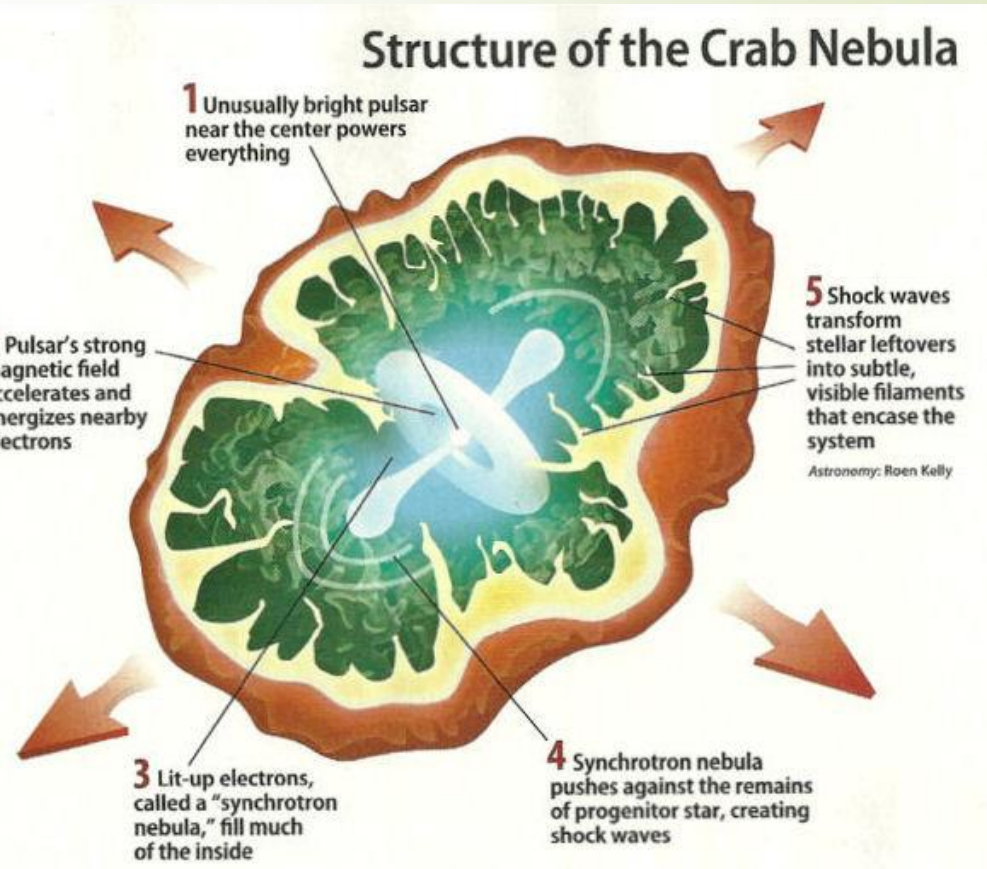
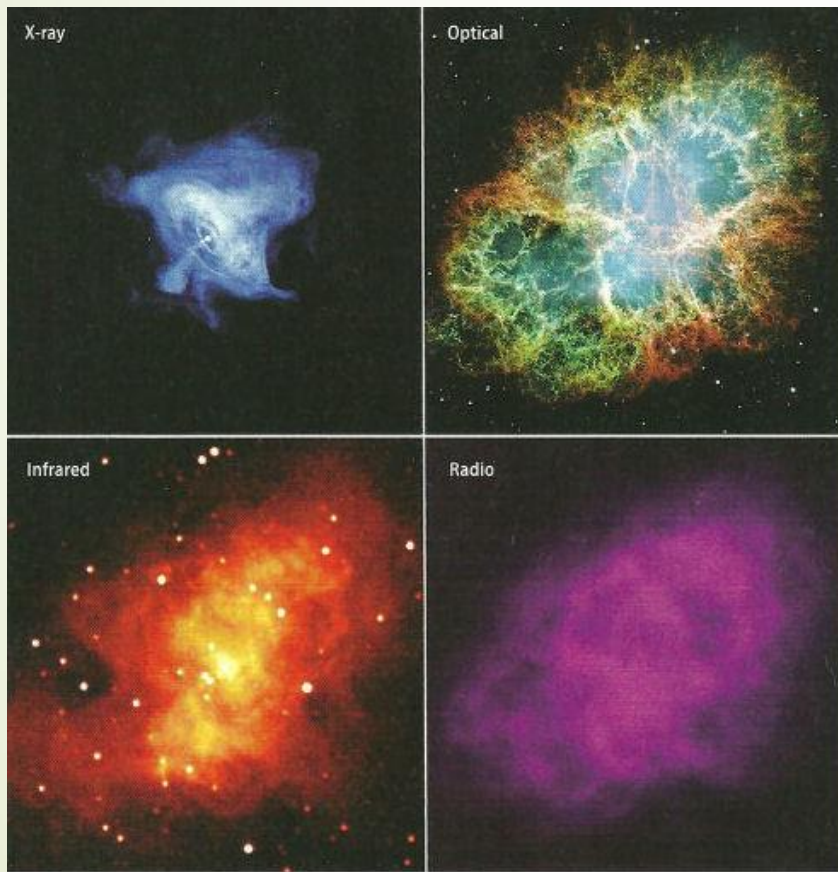
Kombinovani







Termalno kombinovani

- 
- ▶ Ljuskaste: Udarni talas se širi kroz međuzvezdanu materiju i zagreva plazmu, pri čemu nastaje ljuskasti ostatak supernove sa posvetljenjem ka rubu.
  - ▶ Plerioni: Kod kolapsirajućih supernovih očekujemo brzo rotirajuću neutronske zvezde. Prvobitno nazvane – pulsar wind nebula
  - ▶  $\dot{E} = I\Omega\dot{\Omega} = 4\pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3}$   
 $\Omega$  – ugaona frekvencija,  $P$  – period rotacije,  $I \approx 10^{45} g cm^2$  – moment inercije
  - ▶ Gubitak energije neutronske zvezde stvara relativističke elektrone i pozitroni koji se u udarnom talasu ubrzavaju do ultra relativističkih energija.
  - ▶ Emituju sinhrotronsko zračenje u radio i mekim  $\gamma$  zracima.
  - ▶ Inverzno Komptonovo rasejanje od mekih  $\gamma$  zraka do energija reda TeV.
  - ▶ Radio i X emisija ovog tipa ostataka nastaju od zvezdanog vetra sa pulsara a ne od supernove.
  - ▶ U Crab maglini linije u optičkom delu spektra pokazuju da je to zaista ostatak supernove.





- 
- 
- ▶ Na osnovu posmatranja u X domenu, pre svega sa satelita ROSAT i Ajnštajn pokazalo se da mnogi ostaci supernovih koji imaju ljuskasti tip u radio domenu, dok u centru emituju jako X zračenje. (Kombinovani tip)
  - ▶ Ukoliko X zračenje u centru SNR e potiče od pulsara već od termalne emisije vrela plazme. (termalni kombinovani tip)

- 
- 
- ▶ Sa razvojem spektroskopije X zračenja imamo mogućnost da klasifikujemo ostatke supernovih na osnovu načina nastanka.
    - ▶ SNR Tip Ia
    - ▶ SNR bogati kiseonikom (ostaci najmasivnijih i vrelih zvezda)
  - ▶ Nova klasifikacija ne isključuje prethodnu, tako da imamo za ostatke:  
G292.0+1.8 i LMC SNR B0540-69.3 da su bogati kiseonikom i PWN (Pulsar Wind Nebula)



# Zračenje ostataka supernovih u X domenu

- ▶ Vrela plazma zagrejana udarnim talasima ima dve bitne osobine
  - ▶ Optički retka
  - ▶ Nije u jonizacionoj ravnoteži
- ▶ Spektroskopija X zračenja je veoma dobar alat za proučavanje ostataka supernovih.
- ▶ Pošto je MZM optički retka sredina za X zračenje nisu potrebni kompleksni modeli prenosa zračenja.
- ▶ Za starije ostatke spektroskopijom pouzdano određujemo zastupljenosti elemenata u MZM. (Hayashi et al. 1998)
- ▶ Kod mladih ostataka spektroskopijom određujemo zastupljenost elemenata i povezujemo ih sa tipom SN kao i doprinosom obogaćivanja MZM izbačenog materijala.

# Emisija u kontinuumu

- ▶ Termalni kontinuum se sastoji
  - ▶ Slobodno – slobodni prelazi (zakočno zračenje)
  - ▶ Slobodno – vezani prelazi (rekombinacioni kontinuum)
  - ▶ Dvofotonska emisija
- ▶ Za Maksvelovu raspodelu elektrona emisivnost je data kao:

$$\varepsilon_{\text{ff}} = \frac{2^5 \pi e^6}{3 m_e c^3} \left( \frac{2\pi}{3 k m_e} \right)^{1/2} g_{\text{ff}}(T_e) T_e^{-1/2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_e}\right) n_e \sum_i n_i Z_i^2 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1}$$



- Slobodno-vezani prelazi i dvofotonska emisija mogu biti dominantan izvor kontinuuma u mladim ostacima velikih metaličnosti.

$$\varepsilon_{\text{fb}} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} n_e n_{z+1} \frac{g_i}{g_{i+1}} c \sigma(h\nu) \left(\frac{h\nu}{\chi_n}\right) \left(\frac{\chi_n^2}{m_e c^2 kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{(h\nu - \chi_n)}{kT_e}\right) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \text{ Hz}^{-1}$$

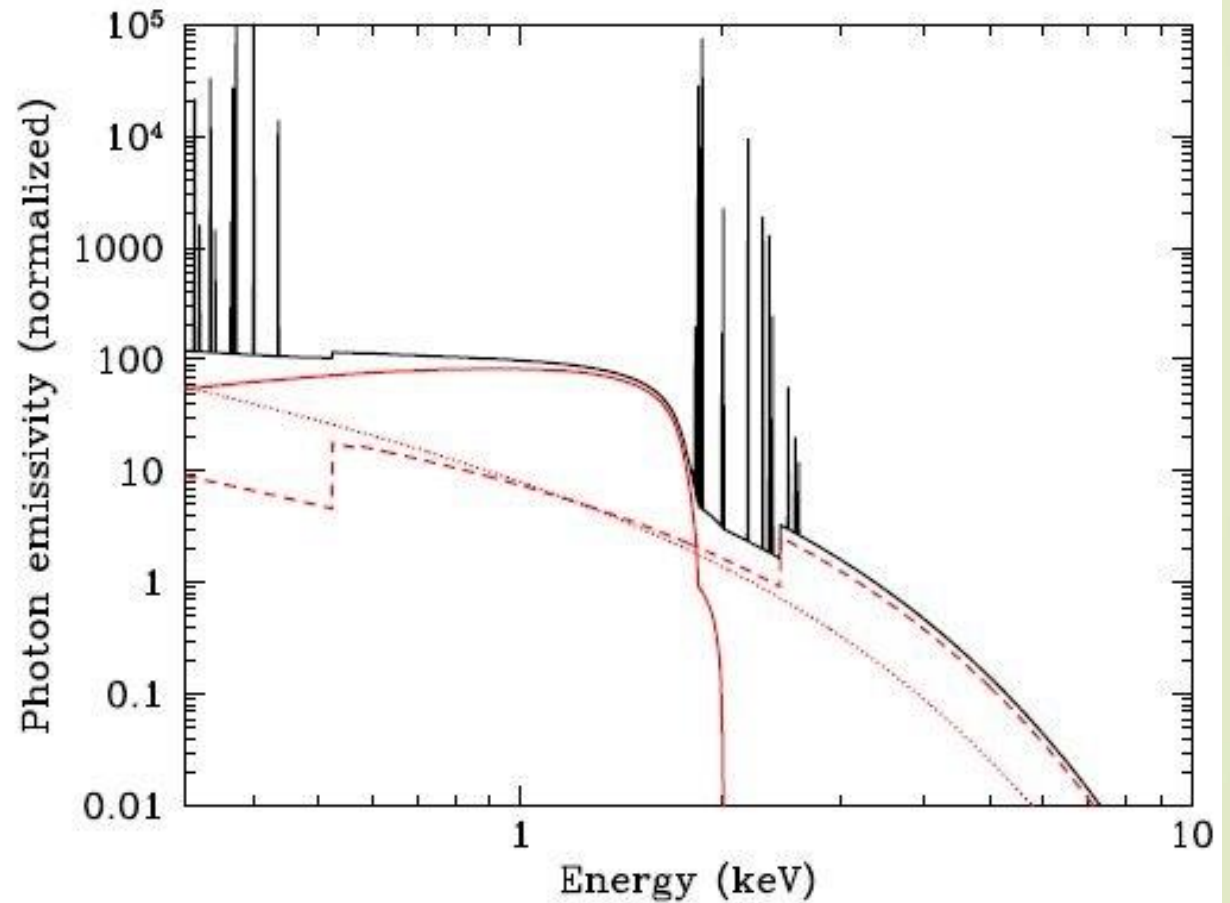
- $n_{z+1}$  - koncentracija jona sa naelektrisanjem  $z+1$ .
- Energija emitovanog fotona slobodno vezanog prelaza iznosi

$$h\nu_n = E_e + \chi_n$$

- Elektron će najčešće biti zahvaćen u ljusku sa velikim kvantnim brojem  $n$ , a kako su razlike u energijama male, imamo oštre pikove na granicama serija.
- Ukoliko je  $h\nu \gg \chi_n$  spektar će ličiti na zakočno zračenje.
- Dok za  $kT \ll h\nu$ , što se javlja u foto jonizovanoj i prejonizovanoj plazmi imamo uske pikove na granicama serija.
- Radiativni rekombinacioni kontinuum

- 
- 
- Dvofotonska emisija nastaje kada se elektron nađe u metastabilnom stanju, recimo 2s vodoniku sličnog atoma, pošto je prelaz na 1s zabranjen  $\Delta s = 0$ .
  - Sudarna deekscitacija je malo verovatna.
  - Deekscitacija emitovanjem dva fotona preko imaginarnog stanja.
  - Zbir energije ovako emitovana dva fotona jednaka je energiji prelaza, ali su raspodele prozvoljne  $\gg$  kontinuum.

The emissivity of a pure silicon plasma out of ionization equilibrium ( $kT_e = 1$  keV,  $n_e t = 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ ). Shown are the contributions of two-photon emission (*red solid line*), free-bound continuum (*red dashed line*) and bremsstrahlung (free-free emission, *red dotted line*). The total emissivity is also shown, including Si-L- and Si-K-shell line emission (based on calculations made with the spectral code *SPEX*, Kaastra et al. 2003)









# Emisione linije ostataka supernovih


- Ostaci supernovih nisu u jonizacionoj ravnoteži. (Non-Equilibrium Ionisation)
- Nije prošlo dovoljno vremena od udarnog talasa da se sredina uravnoteži, i dogodilo se samo par jonizujućih sudara za bilo koji atom.
- Emisione linije nastaju sudarnom ekscitacijom jona.
- Zbog male gustine sredine možemo pretpostaviti da su svi joni u osnovnom stanju.
- Nakon ekscitacije, sudarna deekscitacije ili dalje ekscitacija/ionizacija je zanemarljiva.

# Linije unutrašnjih ljuski elemenata

- Karakteristične linije plazme van jonizacione ravnoteže su linije jonizacije unutrašnjih ljuski.
- Izbačen elektron iz unutrašnje luske : K, L, M ( $n = 1,2,3$ )
- K ,  $n=1$  – izbačen L i M su i dalje popunjeni.
- Radijativna (fluorescencija) ili dalja jonizacija Augérovim efektom.
- Verovatnoća da se emituje foton kod gvožđa ( Fe – K) iznosi 34%.
- Emisiona linija gvožđa je važan alat u za određivanja stanja plazme.
- Velika verovatnoća fluorescencije, za Fe – K liniju mogu se posmatrati sva jonizaciona stanja gvožđa.
- Fe I do Fe XVII. ( srednja energija je oko 6.4 keV)

- 
- Gvožđe ima i jaku Fe – L liniju. ( $E = 0.7 - 1.12 \text{ keV}$ )
  - Fe XVII – XXIV, svako jonizovano stanje ima specifičnu emisionu liniju, kojima se povećava energija sa porastom jonizovanog stanja.
  - Fe – K se događa na elektronskim temperaturama ( $kT_e \geq 2 \text{ keV}$ )
  - Fe – L  $kT_e \geq 0.15 \text{ keV}$
  - Koristeći i Fe – K i Fe – L linije možemo tačno odrediti jonizaciono stanje plazme.
  - Fe – K emisija sa energijama oko 6.4 keV znači da imamo Fe XVII – XIX ili niža jonizaciona stanja. Dok za linije energija oko 6.7 keV-a imamo Fe XXV, i konačno oko 6.96 keV XXVI (Vodoniku sličan atom).
  - Spektroskopija visoke rezolucije nam omogućava da vidimo razdvojene linije Fe – L ljuske, dok za Fe – K mogu da se vide različita jonizaciona stanja,.

- 
- ▶  $K_\alpha$  linije slabo jonizovanog gvožđa mogu poticati od čestica prašine uronjenih u vrelu plazmu. Elektron prodire do jezgra Fe u čestici i otpušta  $K_\alpha$  foton, povećavajući tako broj fotona iz unutrašnjih ljuski.
  - ▶ Čestice prašine u vreloj plazmi polako uništavaju ubacujuću u nju slabo jonizovano gvožđe.
  - ▶ Dijagnostika linija spektroskopa visoke rezolucije – triplet blendiranih emisionih linija He sličnih atoma.
    - ▶  $w$  – rezonantne
    - ▶  $x + y$  – interkombinacione
    - ▶  $z$  – zabranjene
  - ▶ Nas interesuje odnos  $G \equiv (z + x + y)/w = (f + i)/r$  osetljiv na temperaturu i jonizaciono stanje plazme.

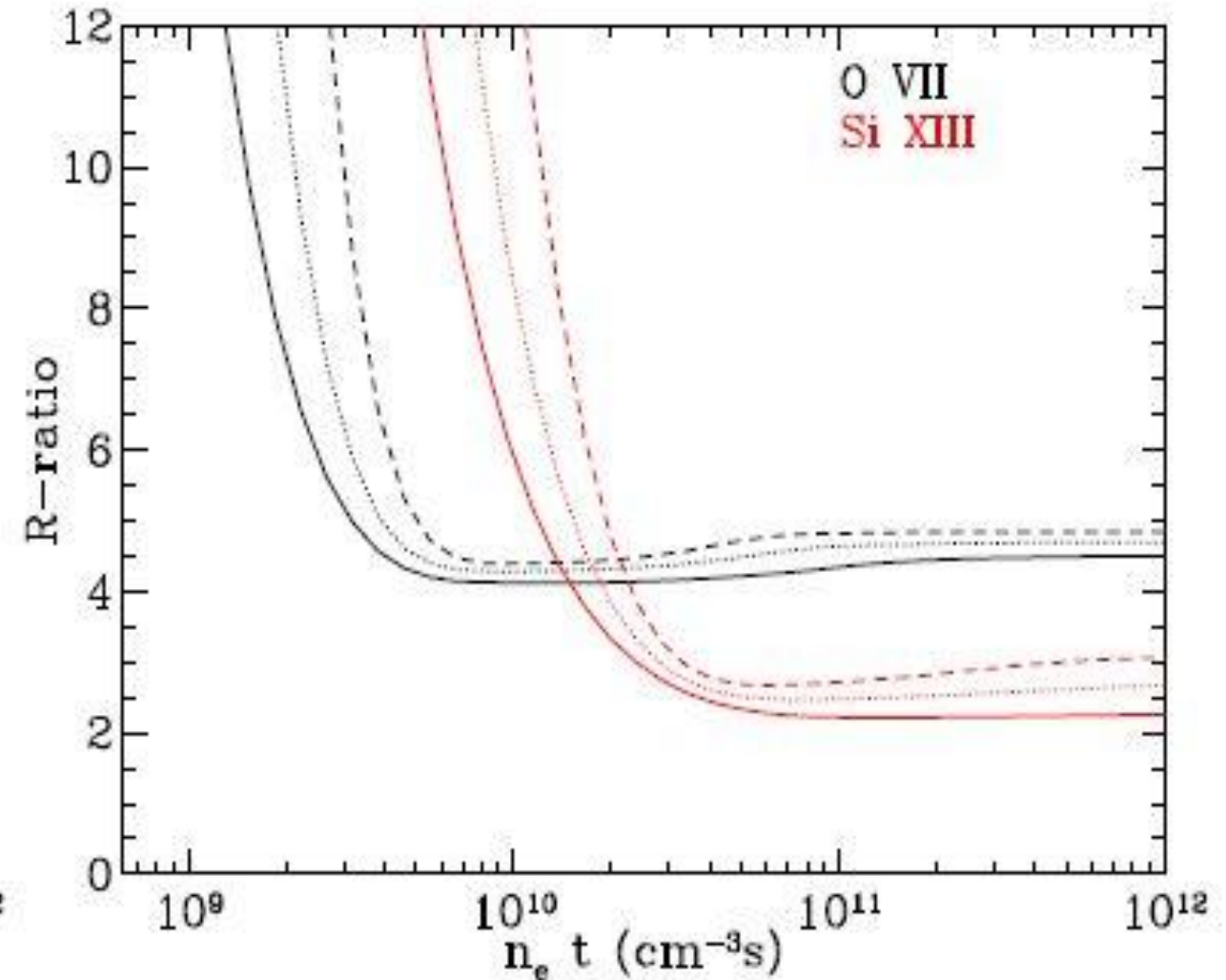
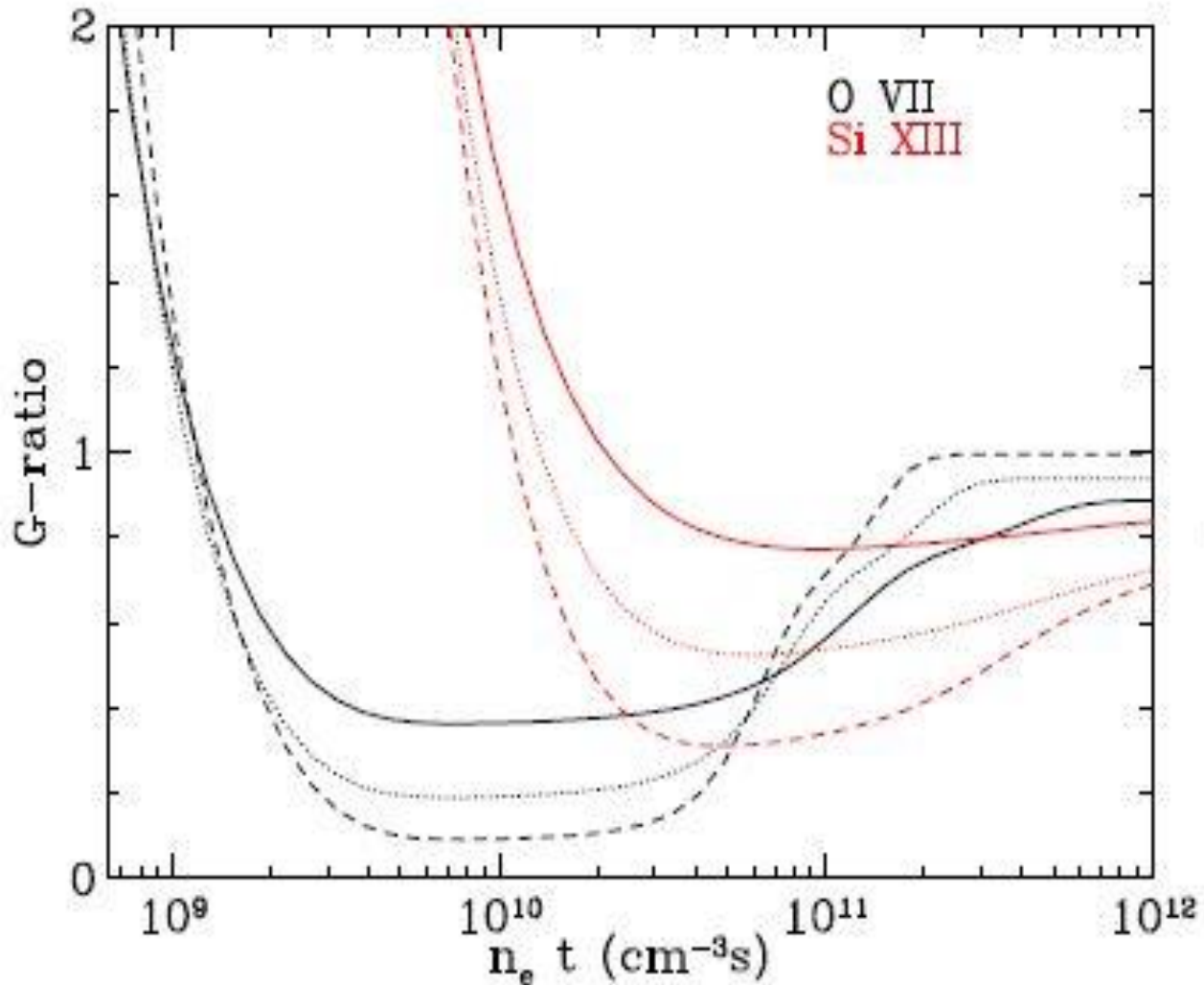
- 
- Uz pomoć odnosa  $G$  možemo odrediti uticaj rasejanja rezonantnih linija.
  - Rasejanje utiče na intenzitet rezonantne linije. Ako imamo veliku vrednost  $G$  - Veliki broj zabranjenih linija, ukoliko možemo odrediti  $n_e t$  i  $kT_e$  nezavisno od  $G$  možemo proceniti uticaj rasejanja.
  - Parametar  $n_e t$  se naziva jonizaciono doba plazme. (*Ionization age*)

$$R = \frac{z}{x+y} = f/i .$$

- U plazmi koja je jonizacionoj sudarnoj ravnoteži odnos  $R$  služi za merenje elektronske koncentracije, ako je ona u opsegu  $n_e = 10^8 - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  - što je mnogo veća vrednost nego kod ostataka supernvih.
- Kod SNR nas zanima odnos  $R$  jer je osetljiv na jonizaciono doba ostatka, a od temperature ne zavisi.
- Odnos uglavnom zavisi od zabranjenih linija unutrašnjih ljuski za niske vrednosti  $n_e t$ . Kada litijumu slični atomi postanu zanemarljivi u plazmi odnos  $R$  postaje relativno konstantan.
- Ovaj odnos takođe može da pomogne da se razdvoji rasejanje rezonantnih linija od samih uticaja plazme.

G i R odnosi na tri različite temperature za jone slične helijumu.  
0.5 KeV – puna linija, 1 KeV – tačkasta linija, 2 KeV isprekidana linija.

SPEX code (Kaastra et al. 2003)




# Radioaktivne linije

- Radioaktivni elementi nastali u zvezdi i u SN su od velikog značaja. Posebno  $^{56}\text{Ni}$  koji ima period raspada 8.8 dana.

	Decay time	Process	Lines (keV)
$^{56}\text{Ni} \rightarrow$	8.8 d	EC	158, 812
$^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	111.3 d	EC, $e^+$ (19%)	847, 1238
$^{57}\text{Ni} \rightarrow$	52 hr	EC	1370
$^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$	390 d	EC	122
$^{44}\text{Ti} \rightarrow$	86.0 yr	EC	67.9, 78.4
$^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$	5.7 hr	$e^+$ , EC (1%)	1157

EC – elektronski zahvat

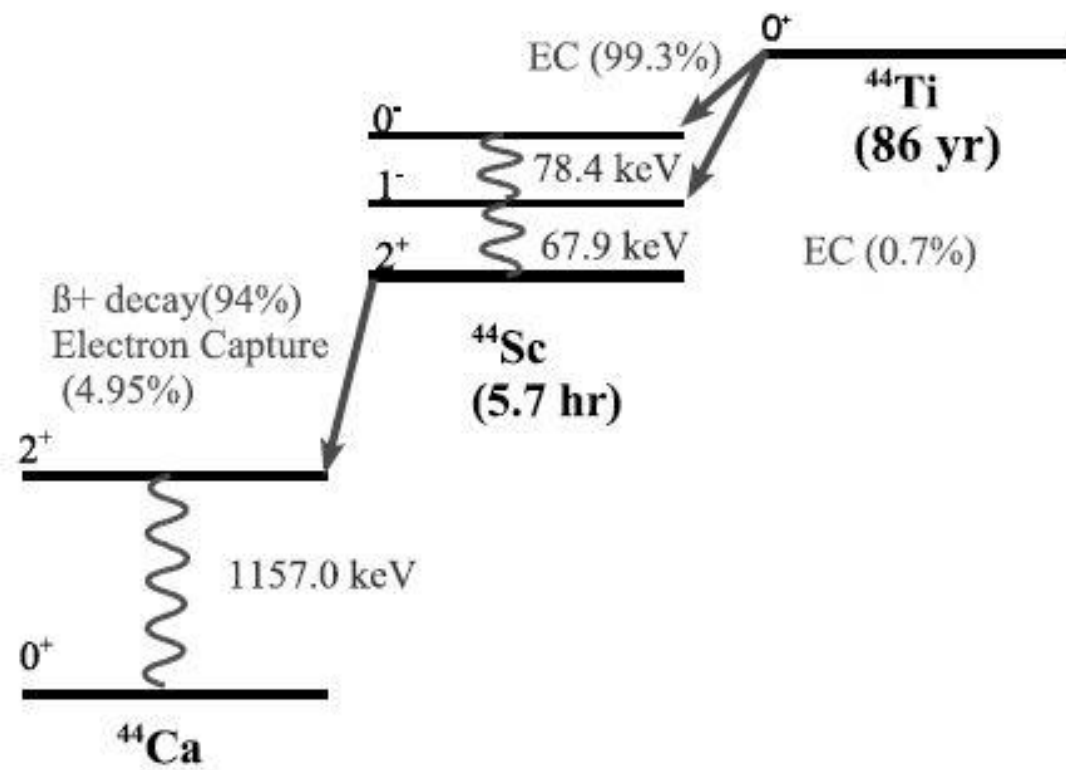
- Dominantan izvor energije za širenje ostatka supernove tokom prve godine.
- $^{56}\text{Fe}$  je najzastupljeniji izotop u svemiru, a veliki deo se proizvodi u SN tipa Ia, oko  $0.6M_{\odot}$ .

- 
- ▶ Radioaktivni titanijum  $^{44}\text{Ti}$  ima mnogo veće vreme raspada – 85 godina.
  - ▶ Uticaj ovog elementa određuje količina alfa čestica nakon početne faze eksplozivnog nuklearnog sagorevanja.
  - ▶ Daje nam uvid o brzini širenja unutrašnjih slojeva izbačenog materijala.
  - ▶ Iz količine  $^{44}\text{Ti}$  možemo da procenimo brzinu širenja koja je direktno povezana sa gustinom materijala u unutrašnjim, što dalje utiče na količinu stvaranja težih elemenata poput  $^{56}\text{Ni}$ .
  - ▶ Osetljiv na graničnu vrednost mase – Šta će ostati na akrecionom disku oko neutronske zvezde, a šta će biti izbačeno



# Linije $\gamma$ zraka

- ▶ Produkti radioaktivnih elemenata su uglavnom u pobuđenom stanju.
- ▶ Sledi brza deekscitacija emitovanjem  $\gamma$  fotona
- ▶  $^{56}\text{Co}$  emituje linije na 847 i 1238 KeV
- ▶ Lanac  $^{44}\text{Ti}$  emituje linije u tvrdim X zracima na 67.9 i 78.4 KeV pri deekscitaciji skandijuma i  $\gamma$  liniju kalcijuma na 1577 KeV
- ▶ Očekujemo i detekciju linija na 511 KeV anihilacijom elektrona-pozitron para, ali još uvek nismo uspeli da detektujemo ove linije.
- ▶ Pored  $\gamma$  linija, radioaktivni raspadi povećavaju i zračenje u X domenu.
- ▶ Elektronskim zahvatom iz K ljuske stvara se šupljina u tom nivou. Popunjavajući tu šupljinu naredni elektron emituje  $K\alpha$  foton.
- ▶ Za ostatke supernovih najbitniji su  $K\alpha$  fotoni  $^{44}\text{Ti}$  i  $^{59}\text{Ni}$ , jer je vreme raspada ovih elemenata uporedivo sa vremenom života ostataka.
- ▶ Periodi raspada za 17 elemenata dati su (Bookbinder, 2010 i Leising, 2001)





# Netermalno zračenje



- Relativistički elektroni zahvaćeni u magnetnom polju emituju sinhrotronsko zračenje.
- Sinhrotronski izvori zrače u širokom opseg frekvencija od radio ( $\sim 10$  MHz) do X zračenja ( $\sim 10^{18}$  MHz).
- SNR su uglavnom sinhrotronski izvori.
- Radio zračenje koje potiče iz ljuske.
- U kompozitnim tipovima ostataka sinhrotronsko X zračenje potiče od vetra sa pulsara.
- Detektovano je i X zračenje iz ljuske kod veoma mladih ostataka.
- X zračenje, zahteva velike brzine udarnog talasa ( $\geq 2000$  km/s), koji postoje samo u mladim ostacima.

- Relativistički elektroni sa energijom  $E$  kreću se u magnetnom polju jačine  $B$  emitovaće sinhrotronsko zračenje sa maksimalnom emisivnosti na nekoj karakterističnoj frekvenciji  $\nu_{ch}$ .

$$\nu_{ch} = 1.8 \times 10^{18} B_{\perp} \left( \frac{E}{1 \text{ erg}} \right)^2 \text{ Hz},$$

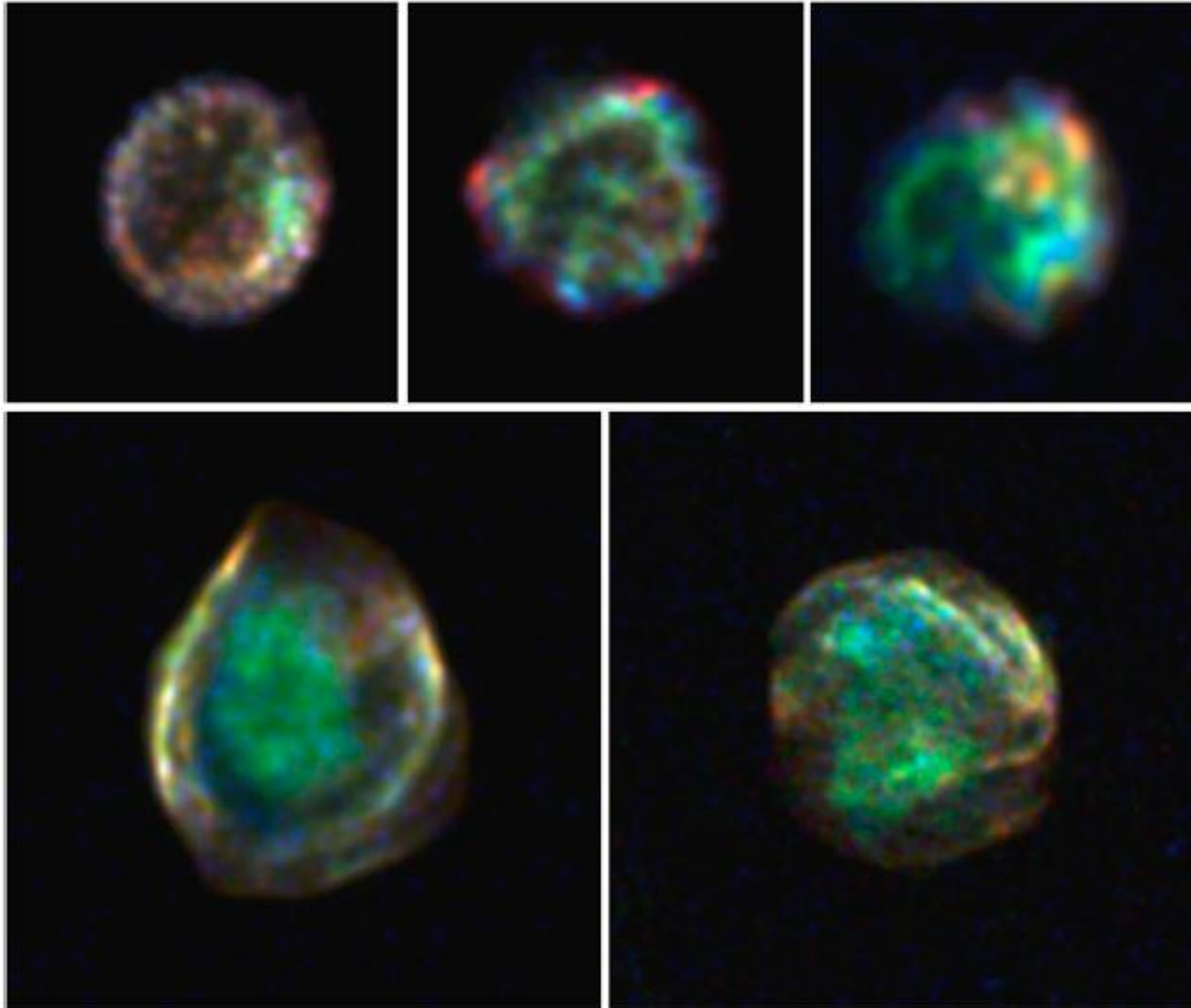
$$h\nu_{ch} = 13.9 \left( \frac{B_{\perp}}{100 \mu\text{G}} \right) \left( \frac{E}{100 \text{ TeV}} \right)^2 \text{ keV}.$$

- $B_{\perp} \approx \sqrt{2/3} B$
- U ostacima supernovih  $B = 10 - 500 \mu\text{G}$ , a emitovani elektroni imaju energiju reda 10-100 TeV.



- 
- 
- ▶ Pored sinhrotronskog zračenja možemo imati i emisiju X zračenja niskoenergetskih elektrona.
    - ▶ Netermalno zakočno zračenje
    - ▶ Inverzno komptonovo rasejanje
  - ▶ Ovo zračenje nema veliki doprinos u spektru, i teško ga je detektovati sa trenutnom tehnologijom.
  - ▶ Kulonova interakcija termalnih i netermalnih elektrona veoma brzo termalizuje elektrone sa nižim energijama, pa se netermalno zakočno zračenje može očekivati samo u uskim oblastima oko udarnog fronta.

# Spektroskopija X zraka SNR tipa Ia

- Karakteriše ih jaka emisija iz Fe – L ljuske
- Veliki broj SNR tipa Ia je identifikovan na osnovu ove linije.
- Ne pokazuju svi ostacitipa Ia jake linije Fe – L
- U spektru ostatka SN1006 uopšte nema Fe – L linija, delom zbog mladog jonizacionog doba ( $n_e t = 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ ), gde je dominantno stanje jonizacije ispod Fe XVII, i mogu da se očekuju K linije, ali ne i one iz L ljuske.
- Nedostatak Fe kod ovog ostatka ja posledica stvaranja velikog broja elemenata srednje mase i relativno malog broja elemenata gvozdene grupe. Ali bi i dalje spadali u SN tip Ia.
- Ovaj nedostatak je malo teže objasniti sa modelom koji predlaže da se ukupna masa elemenata Fe grupe ne razlikuje mnogo među supernovama tipa Ia. (Woosley et al. 2007)
- Ovaj model nedostatak Fe objašnjava da slojevi bogati gvožđem nisu stigli da se zagreju povrantim udarnim talasom.  
Primer: Tycho/SN 1572, iako ima emisiju u Fe – L linijama. pokazuje mnogo manji odnos Fe – L emisije u odnosu na Si XIII, nasuprot drugim ostacima.

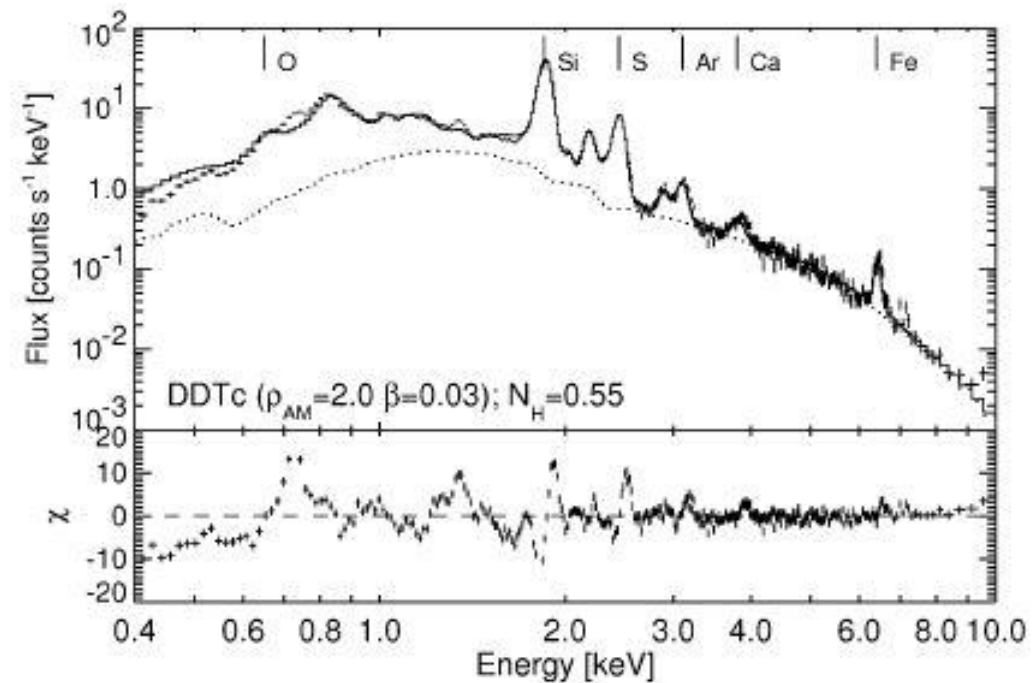
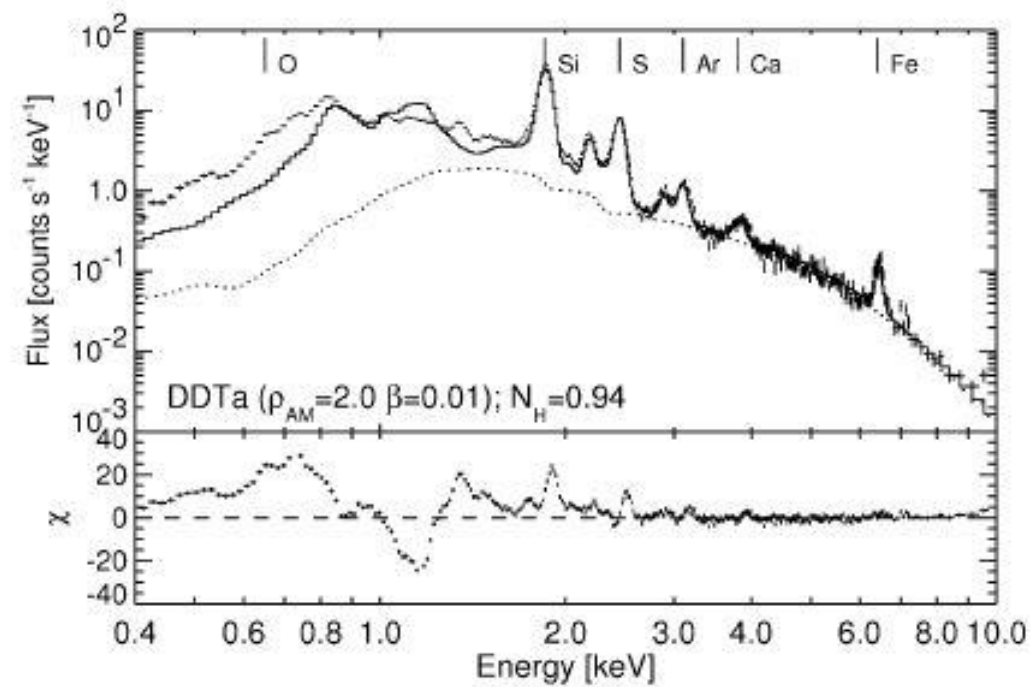


**Fig. 20** *Chandra* X-ray images of LMC Type Ia SNRs. These are three-color images, and in all cases *red* represents the O VII/O VIII band (0.5–0.7 keV), the color *green* represents Fe-L emission line ( $\sim 1$  keV). From *left to right, top to bottom*: B0509-67.5 (Warren and Hughes 2004), B0519-69.0 (Kosenko et al. 2010), N103B (Lewis et al. 2003), DEM L71 (Hughes et al. 2003a), and B0534-699 (Hendrick et al. 2003). The order of the figures is approximately indicative of the relative dynamical age (Images generated by the author using the *Chandra* archive)

- 
- 
- ▶ Određivanje zastupljenosti elemenata u ostacima SN svodi se na alfa elemente (C,O, Ne, Mg,Si, S, Ar, Ca) i Fe grupu (Fe, Ni).
  - ▶ Ovi elementi su najzastupljeniji u galaksiji, i najviše se proizvode nukleosintezom u supernovama.
  - ▶ Svi elementi imaju jake X linije.
  - ▶ Elementi sa neparnim atomskim brojem su previše retki da bi se detektovali u X domenu.

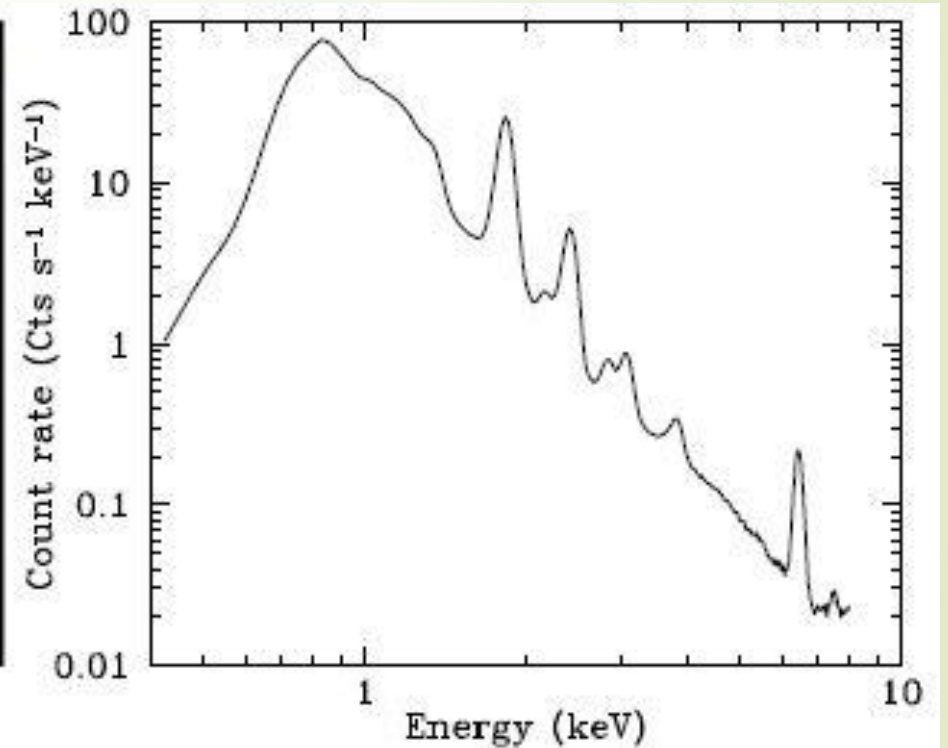
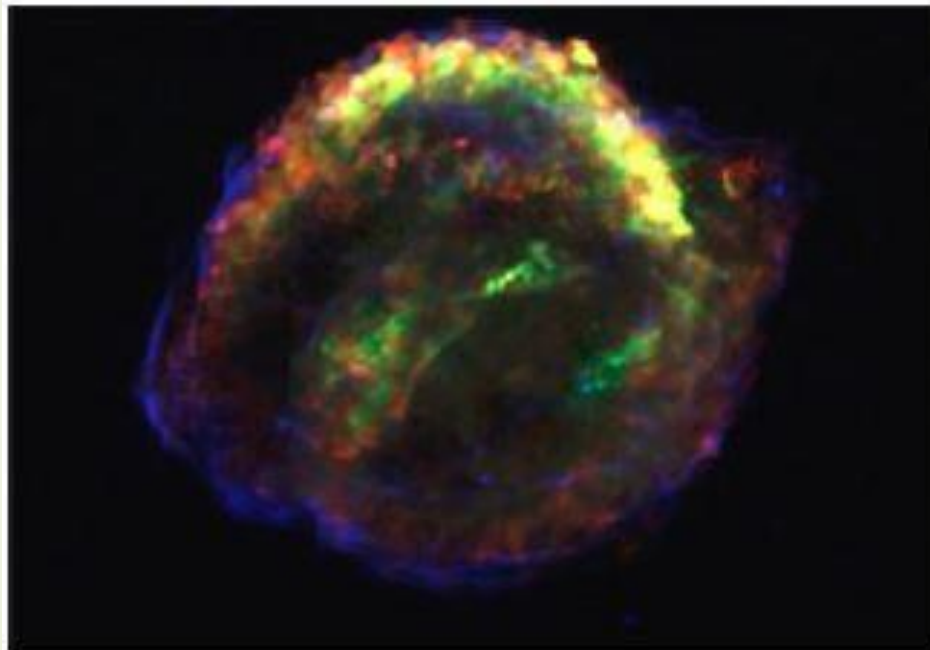


**Fig. 22** XMM-Newton MOS1 spectrum of western part of Tycho/SN 1572. The two panels show two models (solid lines) from an extensive grid of Type Ia models (Badenes et al. 2006). The model characteristics are indicated: the explosion model (here DDTc and DDTc), the circumstellar density,  $\rho_{AM}$  in units of  $10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$  and absorption column density,  $N_H$  in units of  $10^{21} \text{ cm}^{-2}$  (Courtesy C. Badenes)

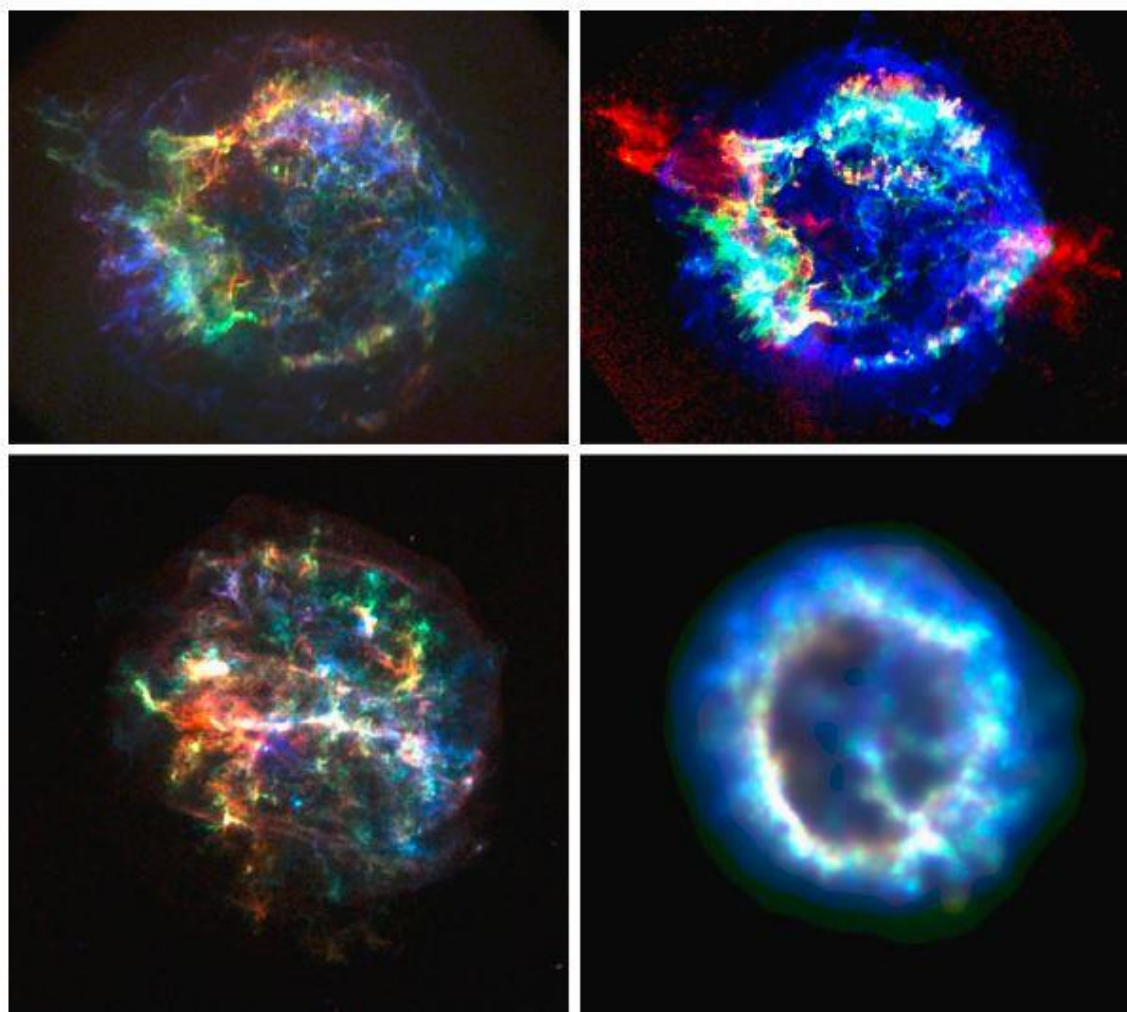


# Ostaci kolapsirajućih supernovih

- Kao što smo napomenuli kod kolapsirajućih SN najveći uticaj ima kiseonik.
- Količina kiseonika direktno je povezana sa zvezdom pretkom, koja je za ostatke bogate kiseonikom bila veoma masivna  $M > 18M_{\odot}$ .
- Ovi izvori se uglavnom detektuju u optičkom delu spektra uz pomoć zabranjene linije [OIII], ali i u X zračenju, posebno kod mladih ostataka.
- Kolapsirajuće supernove proizvode i velike količine neona i magnezijuma, pa u SNR bogatim kiseonikom očekujemo da vidimo i linije ovih elemenata.
- Kod mladog ostatka supernove bogatim kiseonikom Cas A Ne/Mg 5-10 puta ispod očekivane vrednosti.
- Očekujemo da je izbačeni materijal uglavnom sačinjen od visoko jonizovanog kiseonika.
- Cas A, pokazuje velike količine Silicijuma i sumpora.
- Dewey (et al. 2007.) diskutuje da je najzastupljeniji element u ovo ostatku Silicijum a ne kiseonik.



**Fig. 24** *Left: Chandra image of Kepler's SNR, with red indicating Si-K $\alpha$  emission (1.75–1.95 keV), green Fe-L emission (0.8–1.6 keV), and blue continuum emission (4–6 keV). The image is based on a deep, 750 ks, Chandra observation (Reynolds et al. 2007). Right: raw count rate spectrum from Kepler's SNR, based on the same observation. Note the dominant Fe-L emission between 0.7–1.5 keV.*





**Fig. 26** Multi-color *Chandra* X-ray images of four oxygen-rich SNRs (see Table 3 for the sizes). *Top left:* Cas A, with *red* indicating O VIII Ly- $\beta$  emission, *green* Si XIII He $\alpha$ , and *blue* Fe XXVI He $\alpha$  (based on the 1 Ms observation Hwang et al. 2004). *Top right:* A different view of Cas A, based on a combination of radio (*blue*), X-ray Si XIII emission (*green*), and the ratio of Si XIII over Mg XI emission (*red*). The latter brings out the jet-counter-jet system, which protrudes the radio/X-ray shell in the northeast-southwest region (Vink 2004b; Hwang et al. 2004; Schure et al. 2008). *Bottom left:* G292.0+1.8, with *red* O VIII Ly- $\alpha$  emission, *green* is Ne X Ly $\alpha$ , and *blue* Si XIII HE $\alpha$  emission. Image based on a 516 ks long observation (Park et al. 2007). *Bottom right:* The Small Magellanic Cloud SNR 1E 0102.2-7219, with *red* O VII and O VIII emission, *green* Ne IX and Ne X emission, and *blue* emission above 1.27 keV, which includes Mg XI, Mg XII, and Si XVIII emission (see also Figs. 17 and 28)

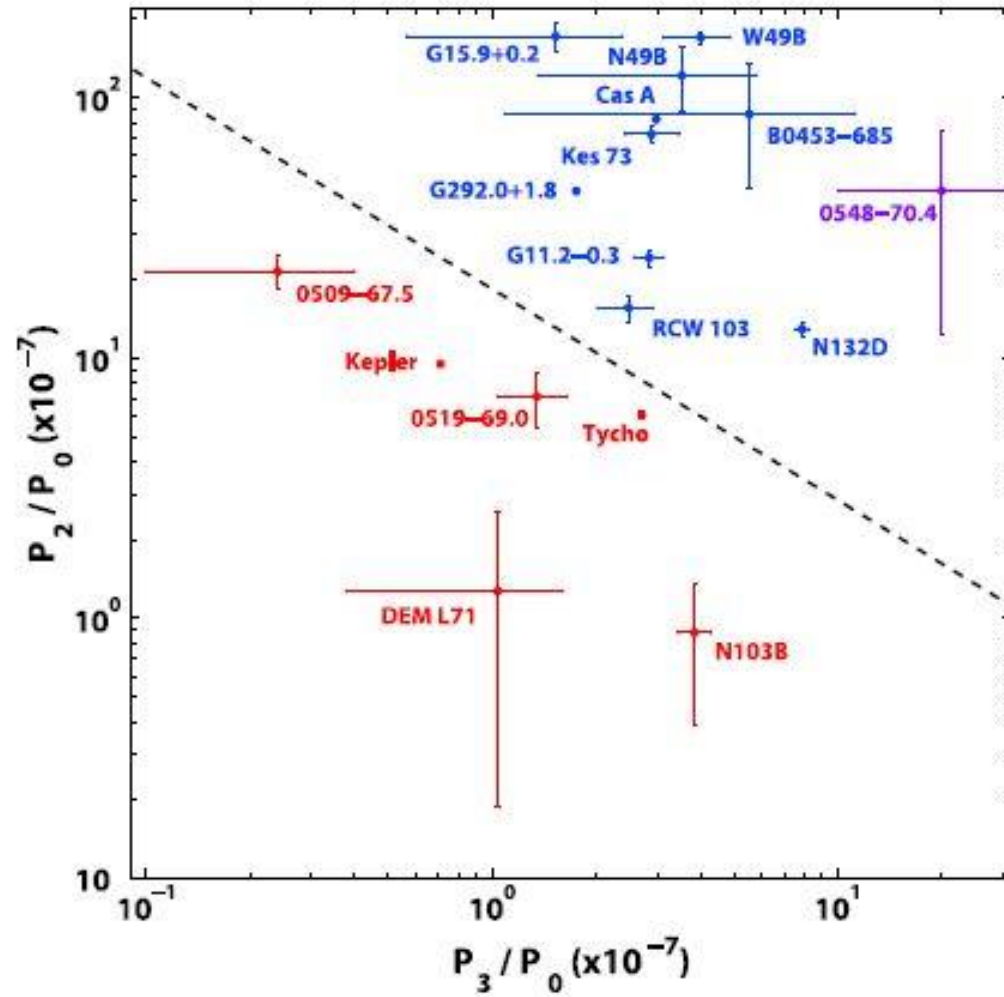


# Cas A:

- Jaka bipolarnost izbačenog materijala bogatog Si/S, posmatrana u optičkom, X i infracrvenom domenu.
- Posmatranja pokazuju materijal bogat Si/S izvan radijusa glavnog udarnog talasahock u severoistočnom i jugozapadnom delu.
- Prisutnost izbačenog materijala izvan udarnog talasa poznato je već neko vreme, a njegove osobine u optičkom delu spektra ukazuju da su to džetovi.
- U X domenu, dva suprotna džeta se najlakše posmatraju mapiranjem odnosa Si XIII i Mg XI  $K\alpha$ .
- Hidrodinamičke simulacije (Schure et al. 2008) pokazuju da ovi džetovi ne bi preživeli interakciju sa materijom u okolini zvezde.
- Najverovatniji scenario je da je zvezda eksplodirala u fazi crvenog superdžina.

- 
- 
- ▶ Na osnovu posmatranja X zračenja o kolapsirajućim ostacima možemo zaključiti da su veoma nepravilni, i da pokazuju velika odstupanja od simetrije i uslojenosti elemenata.
  - ▶ Elementi Fe grupe mogu biti izbačeni daleko brže od elemenata u gornjim slojevima.
  - ▶ Lopet et al. (2009, 2011.) napravio je analizu morfoloških razlika kolapsirajućih i termonuklearnih ostataka SN.



**Fig. 29** Results from a statistical analysis of the Si XIII emission images (around 1.85 keV) as observed with the *Chandra*-ACIS instrument. The numbers  $P_0$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  are linked to different symmetry properties of the SNR emissivity distribution, with  $P_3$  indicating an overall deviation from circular symmetry, whereas  $P_2$  is sensitive to mirror symmetry. Type Ia SNRs (red) clearly occupy a different region of the diagram than core collapse SNRs (blue) (Figure taken from Lopez et al. (2009))





# Detektovanje SNR u optičkom delu spektra

- ▶ Koristeći činjenicu da SNR u optičkom delu spektra imaju povećan odnos  $[SII]$  ( $\lambda=671.7\text{nm}$ ,  $\lambda=673.1\text{nm}$ ) i  $H_{\alpha}$  ( $\lambda=656.3\text{nm}$ ) u poređenju sa HII regionima Mathewson i Clarke su započeli potragu vangalaktičkih ostataka supernovih.
- ▶ Koristeći ovaj odnos emisije razlikujemo SNR regione zagrevane udarnim talasom ( $[SII]/H_{\alpha} > 0.4$ , ali često i mnogo veći), i fotojonizovane magline ( $[SII]/H_{\alpha} < 0.4$ , generalno je  $[SII]/H_{\alpha} < 0.2$ ), što je opravdano različitim načinima ekscitacije.
- ▶ SNR – Sudarna ekscitacija
- ▶ HII regioni – fotojonizacija



- 
- 
- U HII regionima imamo SIII što uzrokuje mali odnos  $[SII]/H_{\alpha}$ .
  - Kod ostataka supernovih kada udarni talas prođe kroz MZM i dovoljno ohladi da, imamo više jonizacionih stanja elementa, uključujući i SII.
  - Baš u ovoj, radijativnoj fazi, ostaci su najpogodniji za posmatranje u optičkom delu spektra i očekujemo veliki odnos  $[SII]/H_{\alpha}$ .
  - Empirijski je potvrđeno da za odnos  $[SII]/H_{\alpha} > 0.4$  uvek imamo SNR, a ne HII region.

- 
- 
- Sa modernim teleskopima i sve boljim CCD kamerama sve više novih ostataka supernovih se otkriva.
  - Leonidaki et al. (2013) je dao veliki doprinos ovoj metodi detektujući više od 400 SNR u 6 obližnjih galaksija: NGC2403, NGC3077, NGC4214, NGC4395, NGC4449 i NGC5204.
  - Sve češće se koriste veliki teleskopi za optičku detekciju ostataka supernovih.
  - Galaksije M31, M33 i M83 posmatrane su 4m teleskopom na Kitt Peak National Observatory.
  - M83 je posmatrana i uz pomoć HST (Dopita et al. 2010, Blair et al. 2014) i Magelan teleskopom (Blair, Winkler & Long 2012).
  - M83 – najdetaljnije pretražena galaksija u optičkom delu spektra.



HVALA NA PAŽNJI