

SUPERNOVOR

Anders Jerkstrand, SU

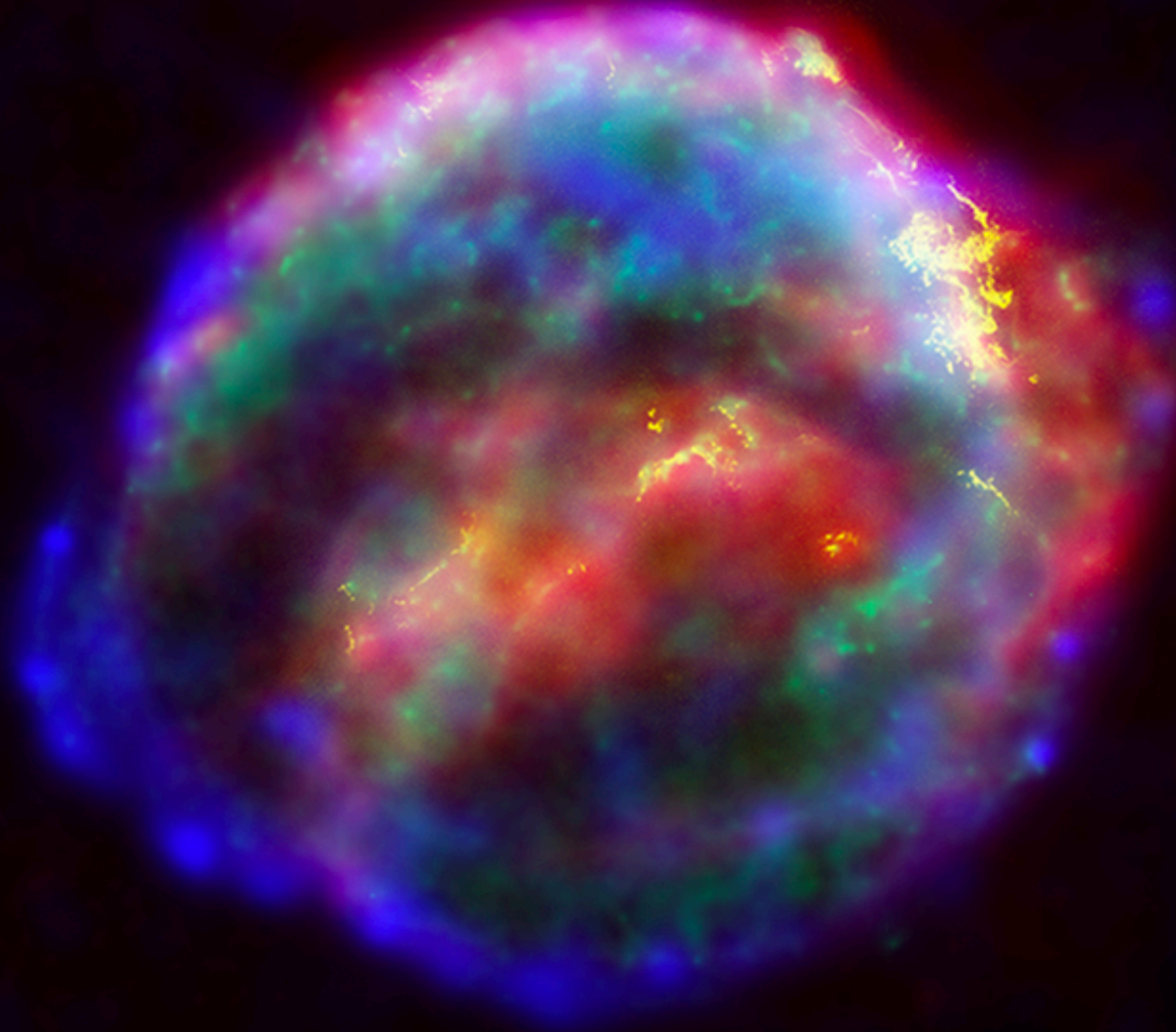
Supernovor har setts och dokumenterats av människor i >2000 år.

Teckning av när **Tycho Brahe** observerade supernovan 1572 från Herrevads Kloster i Skåne.



Quiz: Vilken var den senaste galaktiska supernovan?

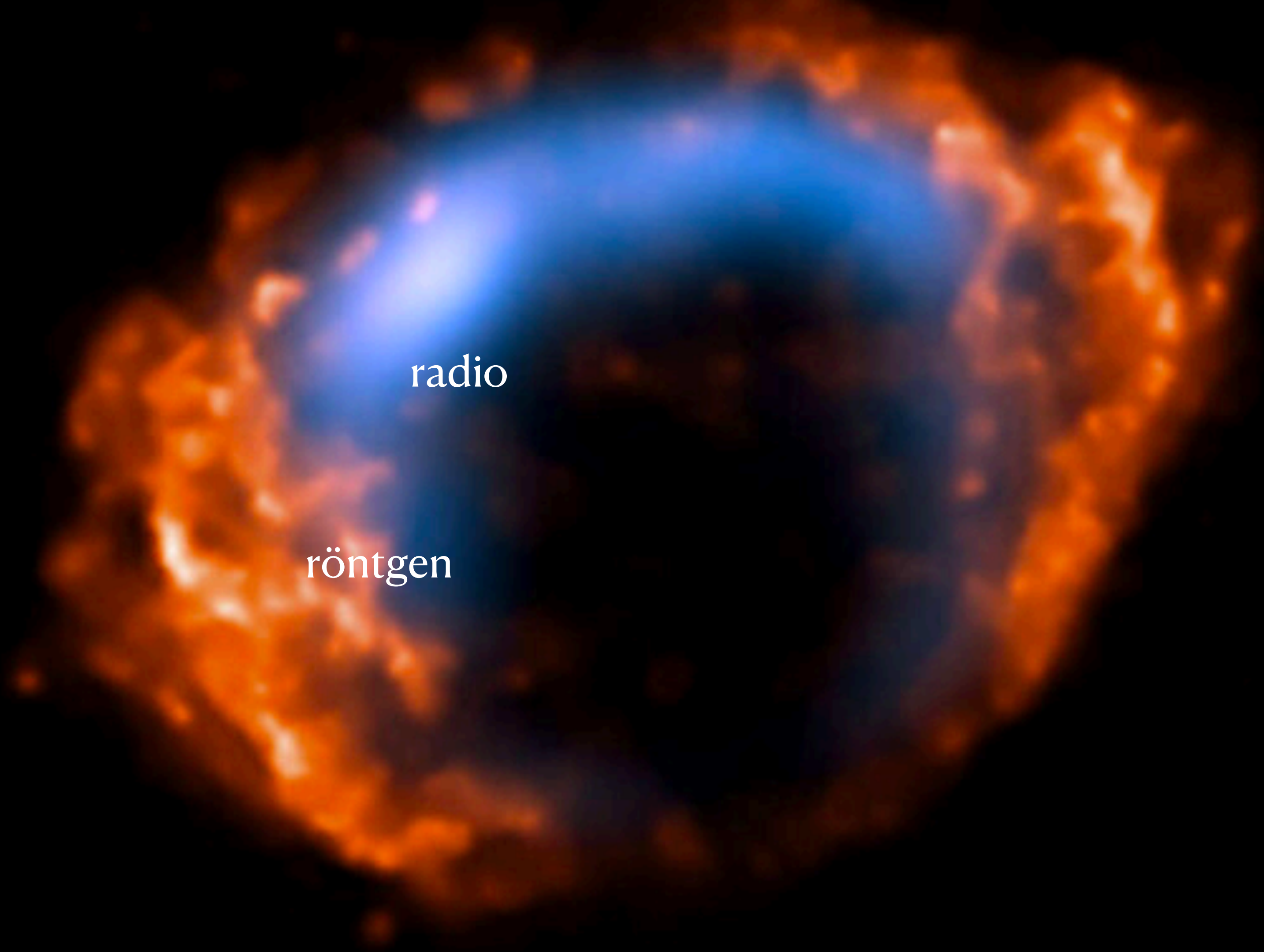
Keplers supernova 1604 :
sista supernovan som sågs *då den exploderade.*



Cas A supernovan (~1670) :
senaste supernovan som vi ser i optiskt ljus idag.



G1.9+0.3 (~1900) :
senaste supernovan som vi ser *någon strålning från idag* (radio, röntgen).



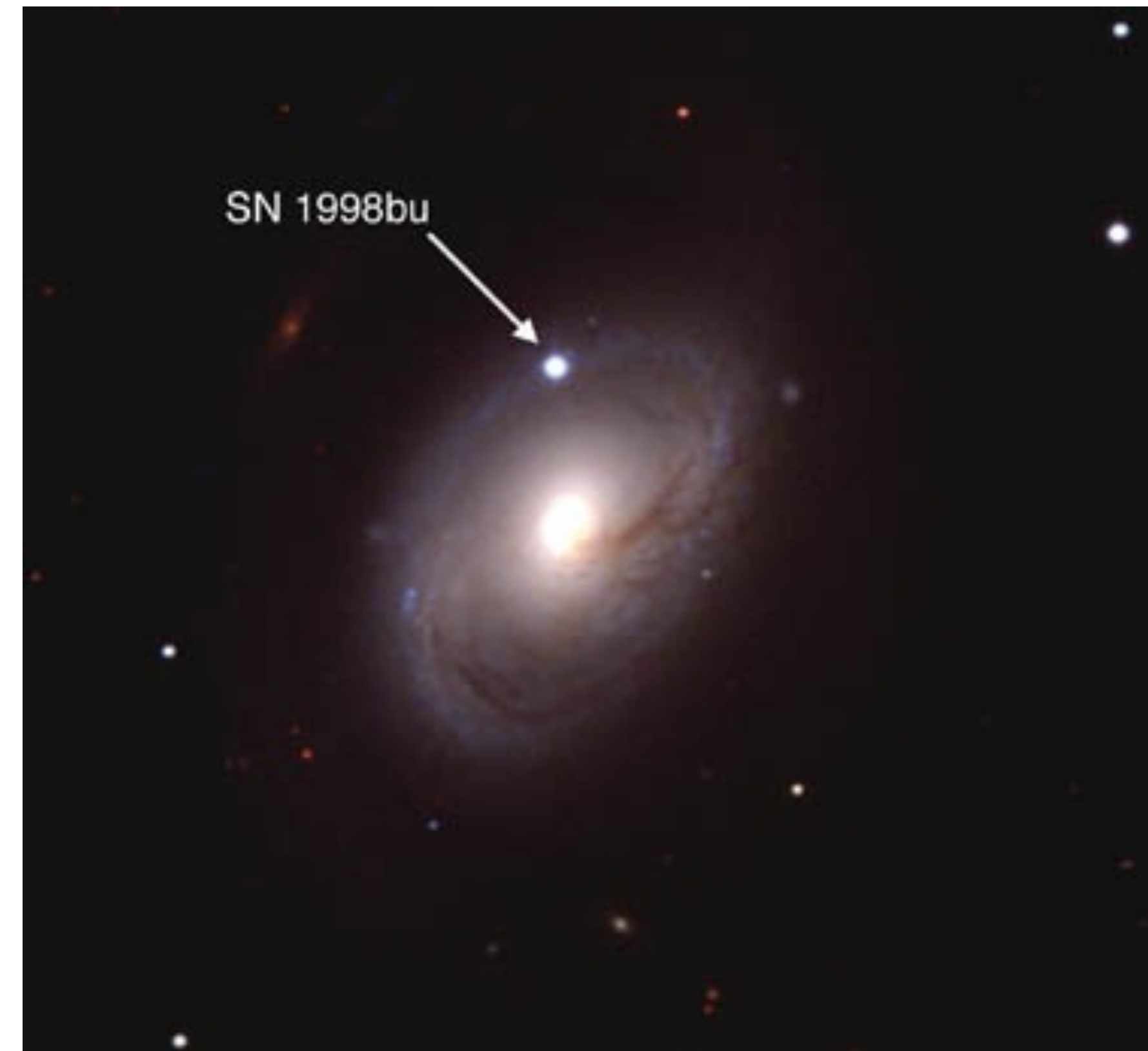
Quiz: Vilken var den senaste galaktiska supernovan?

Svar: Vi vet ej, antagligen inte upptäckt (ännu).

Sker ungefär 2 per århundrade i galaxen.

Supernovor är så ljusstarka att vi lätt ser dem i andra galaxer

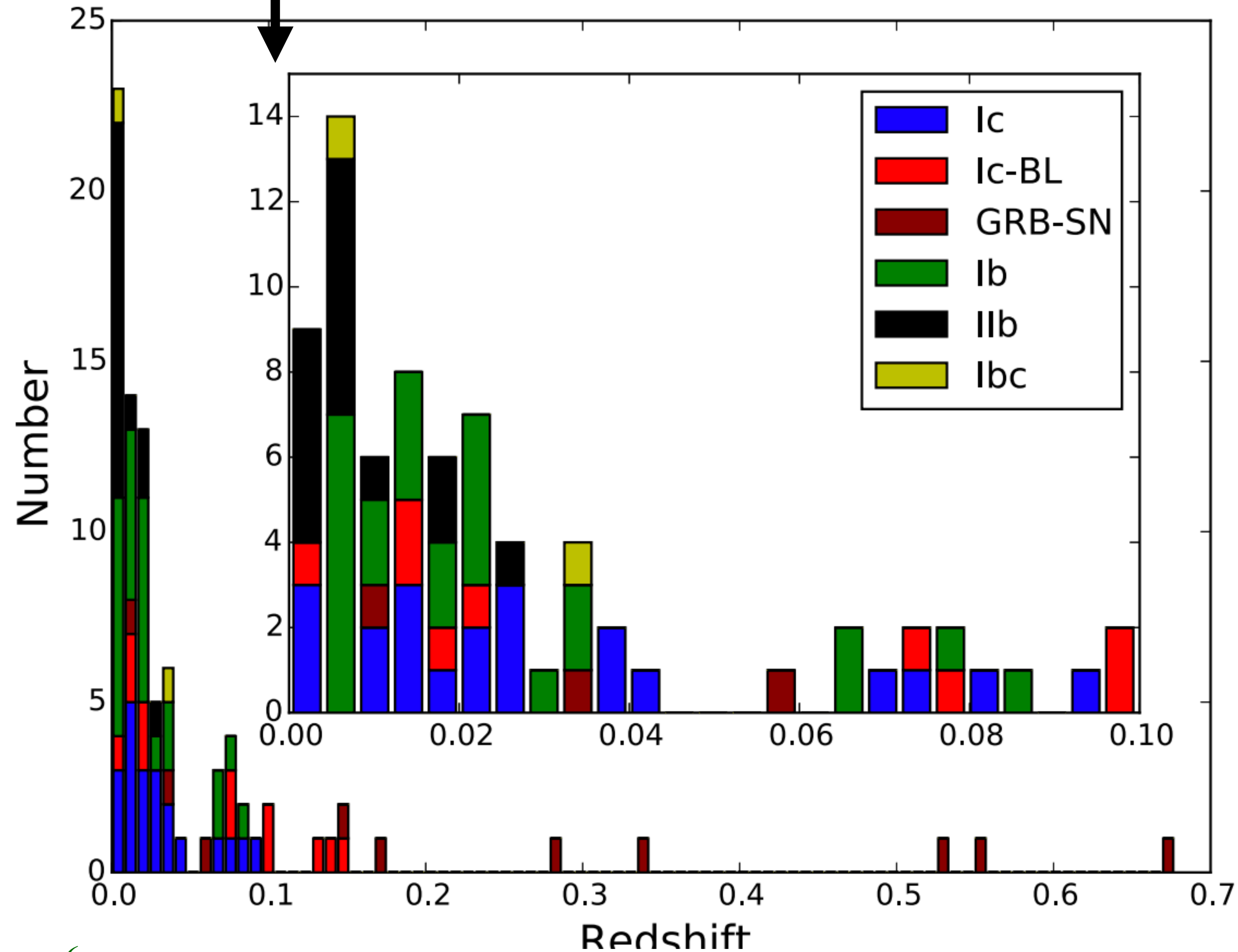
Under några veckor/månader lika ljusstarka som en hel galax.



Credit: O.Trondal/N Suntzeff.

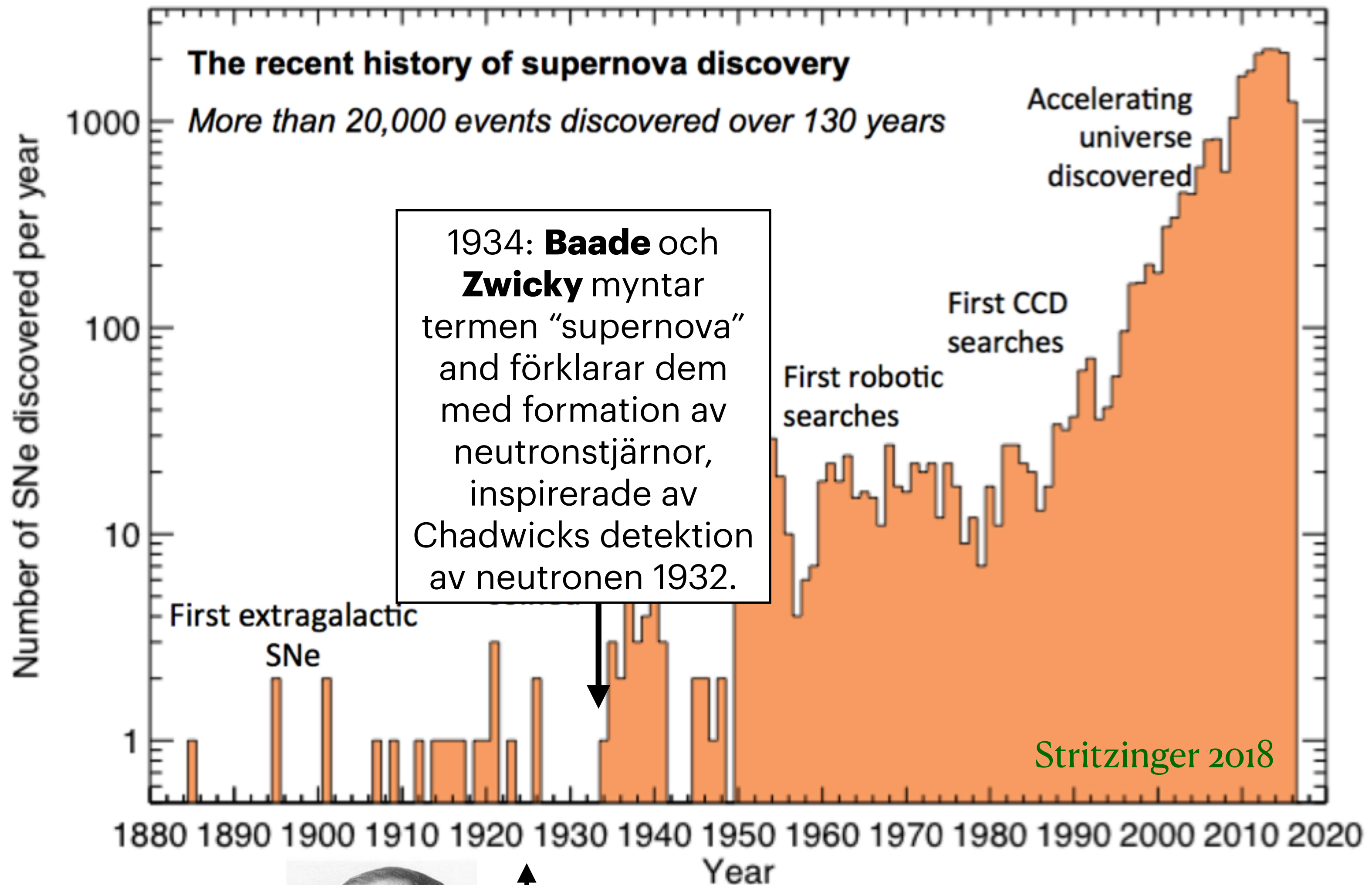
$z = 0.1 \sim 400$ Mpc.
*Livet på jorden
bestod av
vattensvampar.*

Avstånden till supernovor



- De flesta detekterade SN inom rödförskjutning $z \sim 0.05$ (~200 Mpc). (Andromeda ligger 0.8 Mpc bort).
- Upptäckter bortom $z \sim 0.15$ (~600 Mpc) oftast efter Gamma Ray Burst (GRB) triggers.

Supernovaupptäckter



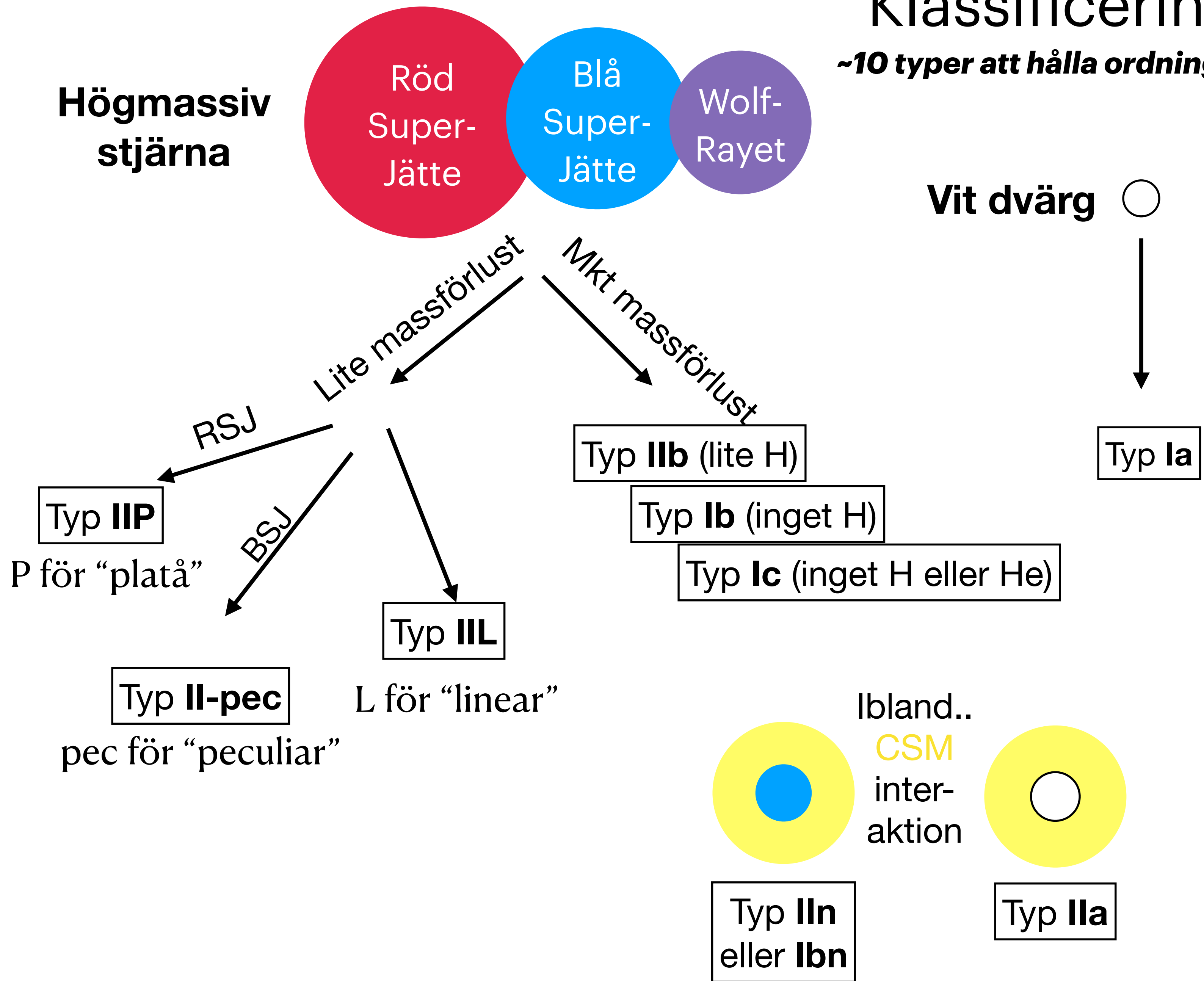
- Idag flera tusen per år : automatiska survey-teleskop har revolutionerat.
- Ungefär 1 SN sker varje sekund i universum : vi upptäcker idag ca 1 på 30,000 av dessa.



1925 : **Knut Lundmark** är den första personen som inser att supernovor är ett distinkt fenomen från novor.

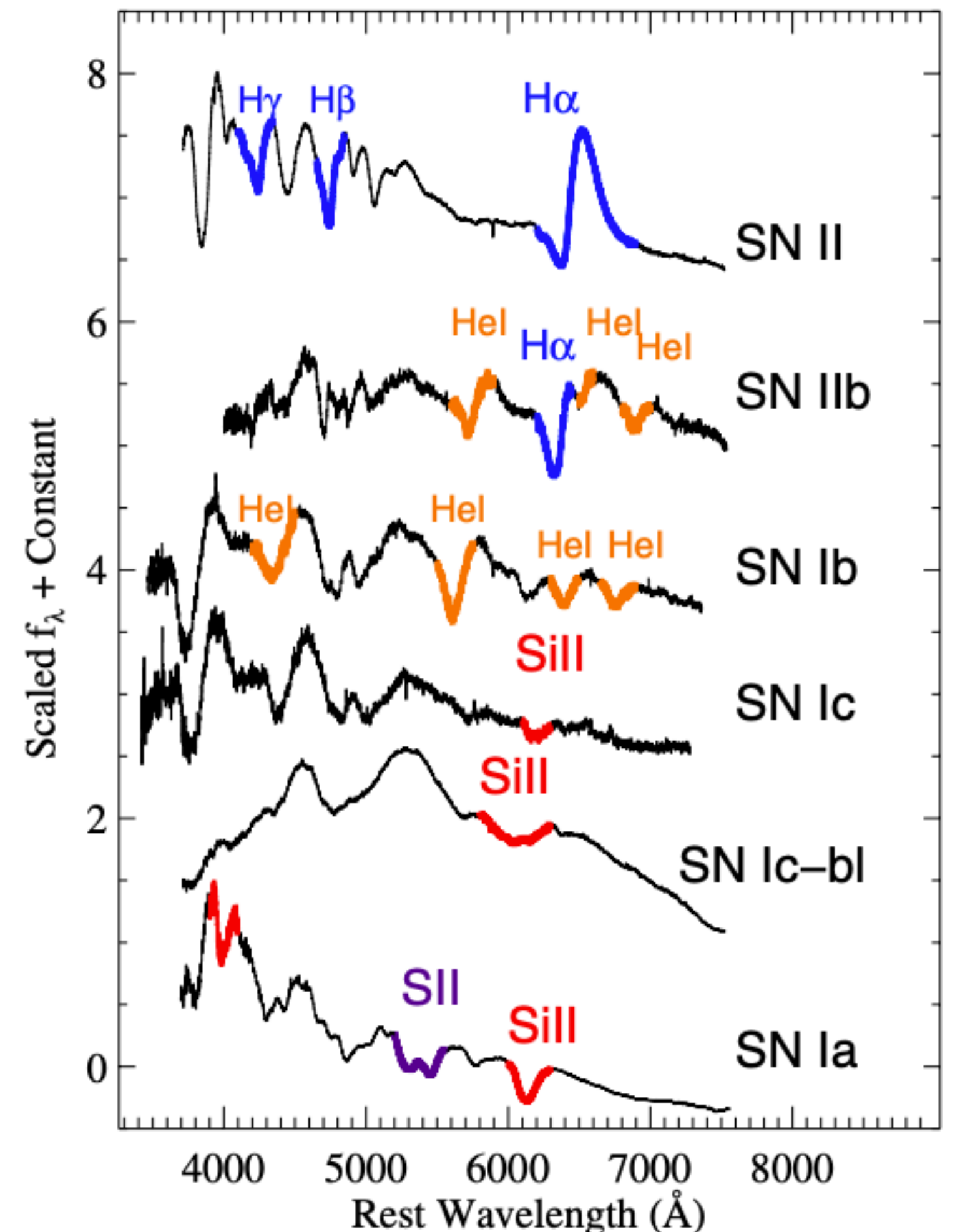
Klassificering

~10 typer att hålla ordning på!



Mass-ackretion värmer upp den vita dvärgen tills kol antänds.

Starkt degenererade förhållanden → explosion.



Ia supernovor

- 1931 : **Chandrasekhar** härleder högsta möjliga massa för en vit dvärg ($1.4 M_{\text{sun}}$). *Vad händer om ett sådant objekt samlar på sig mer material?*



- 1) Potentiell kärnenergi tillgänglig (om man förbränner en solmassa C och O till Fe) : $2 \cdot 10^{51}$ erg
- 2) Gravitationell bindningsenergi : $3 \cdot 10^{50}$ erg
- 3) Degenerade förhållanden
—> *kan få en explosiv disruption.*

- Producerar mest järn-grupp ämnen: ungefär halva kosmiska produktionen här.

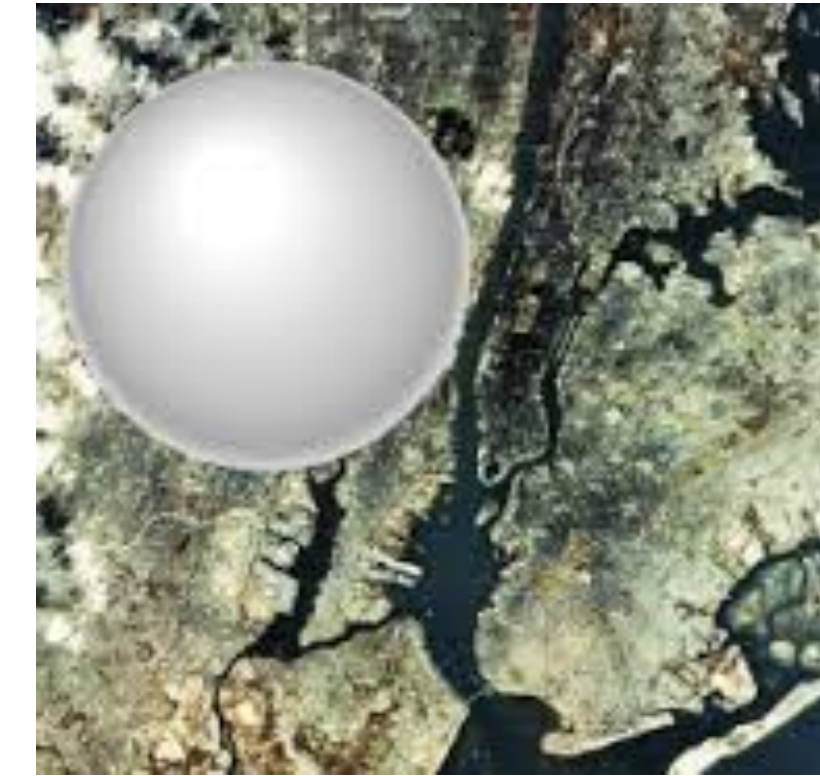
- De flesta Ia supernovor antagligen från två vita dvärgar som smälter samman.

- Kan användas som standardljus and därför mäta avstånd —> Upptäckt av den kosmiska accelerationen and mörk energi 1998.



Supernovor från massiva stjärnor

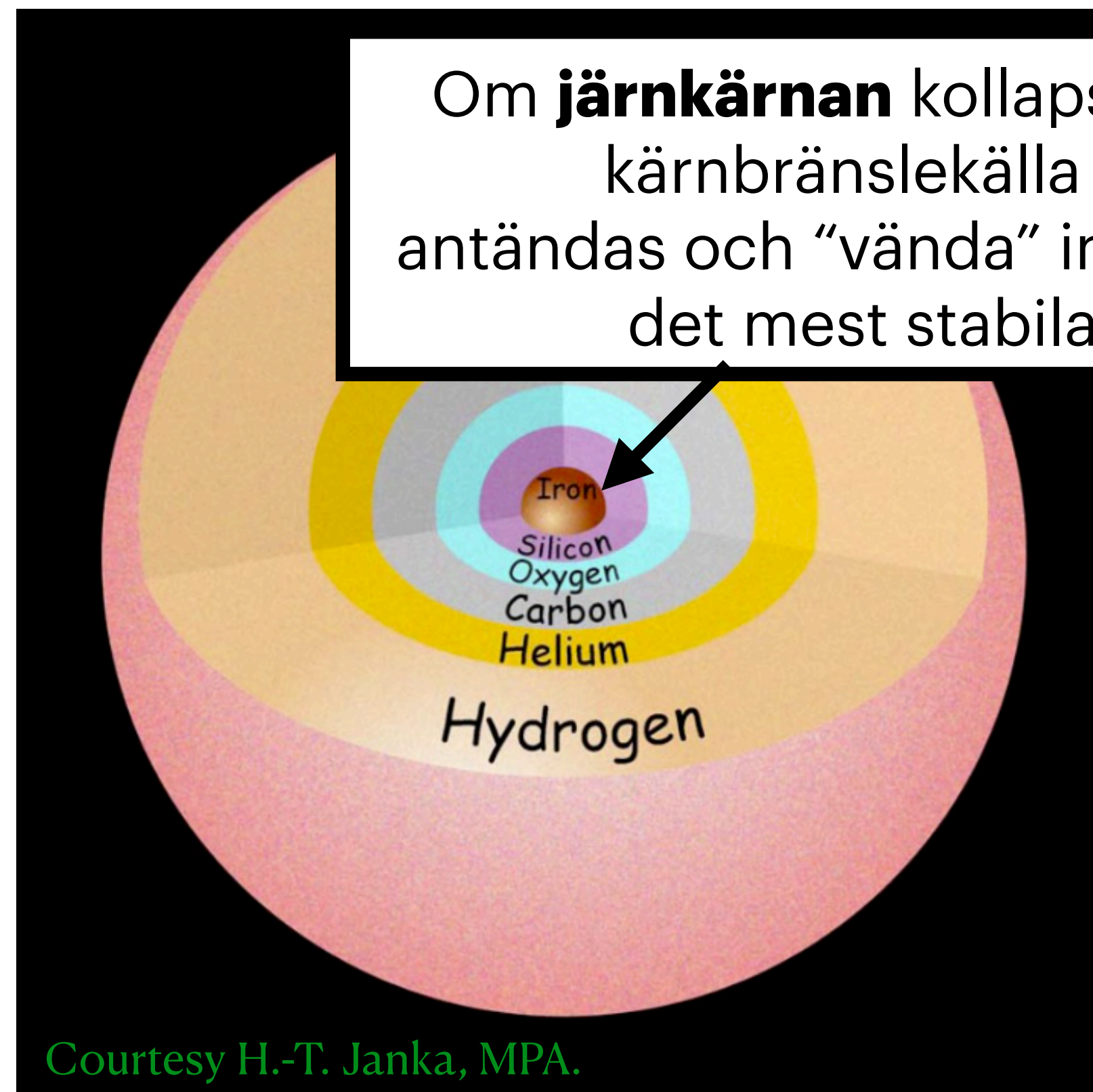
Förbränning	Tid	T (K)	Kylning	T _{yta} (K)	HR
Väte	10 ⁷ år	10 ⁷	fotoner	20,000-40,0	O,B
Helium	10 ⁶ år	10 ⁸	"	3,000-4,000	K,M
Kol	10 ³ år	8*10 ⁸	neutriner	3,000-60,00	O-M
Neon	1 år	1.8*10 ⁹	"	"	"
Syre	1 år	2.1*10 ⁹	"	"	"
Kisel	1 dag	3.7*10 ⁹	"	"	"



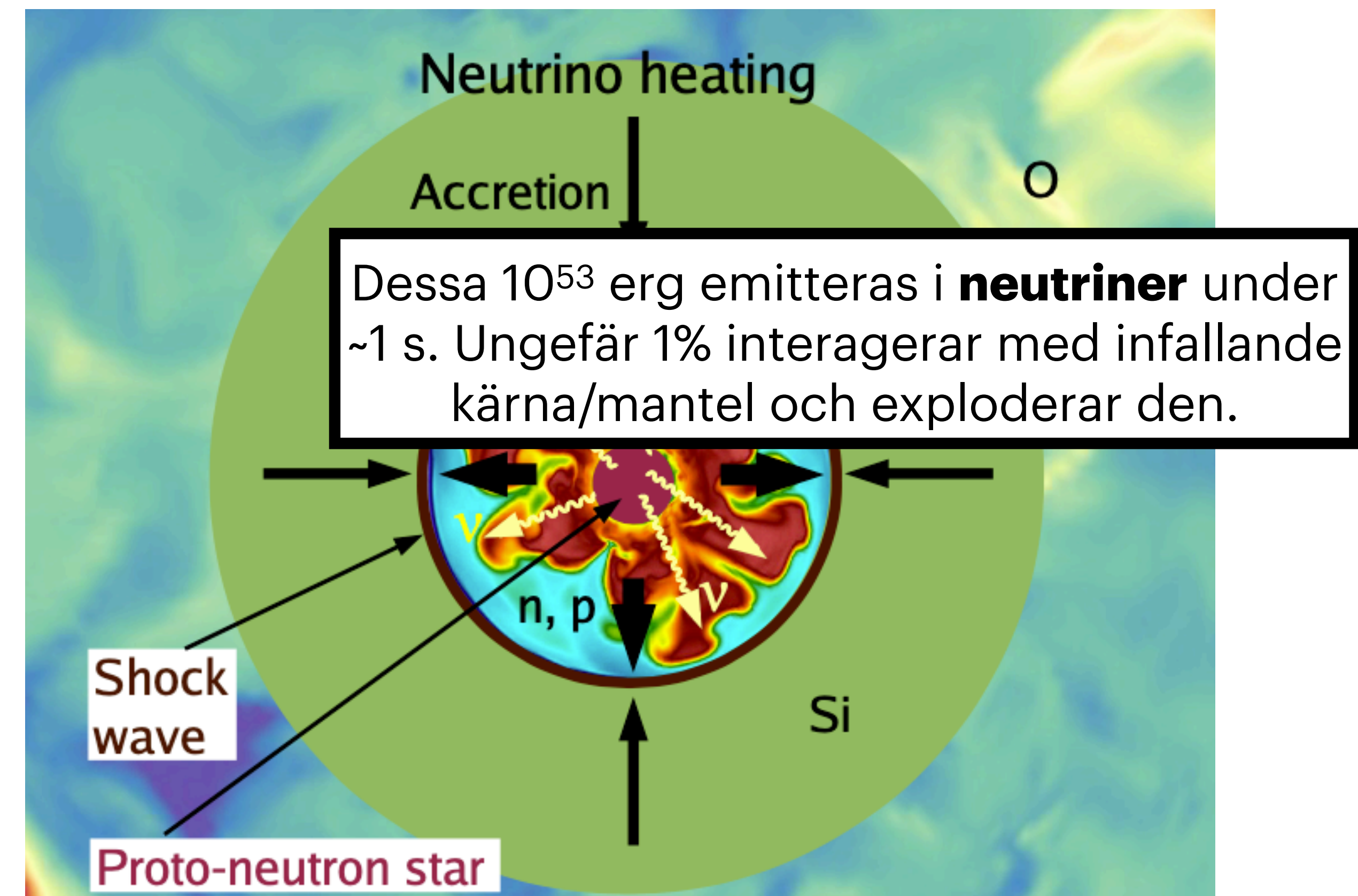
Kärnan kollapsar till en **neutronstjärna**.

Bindningsenergi:
 $E \sim GM^2/R \sim 10^{53}$ erg

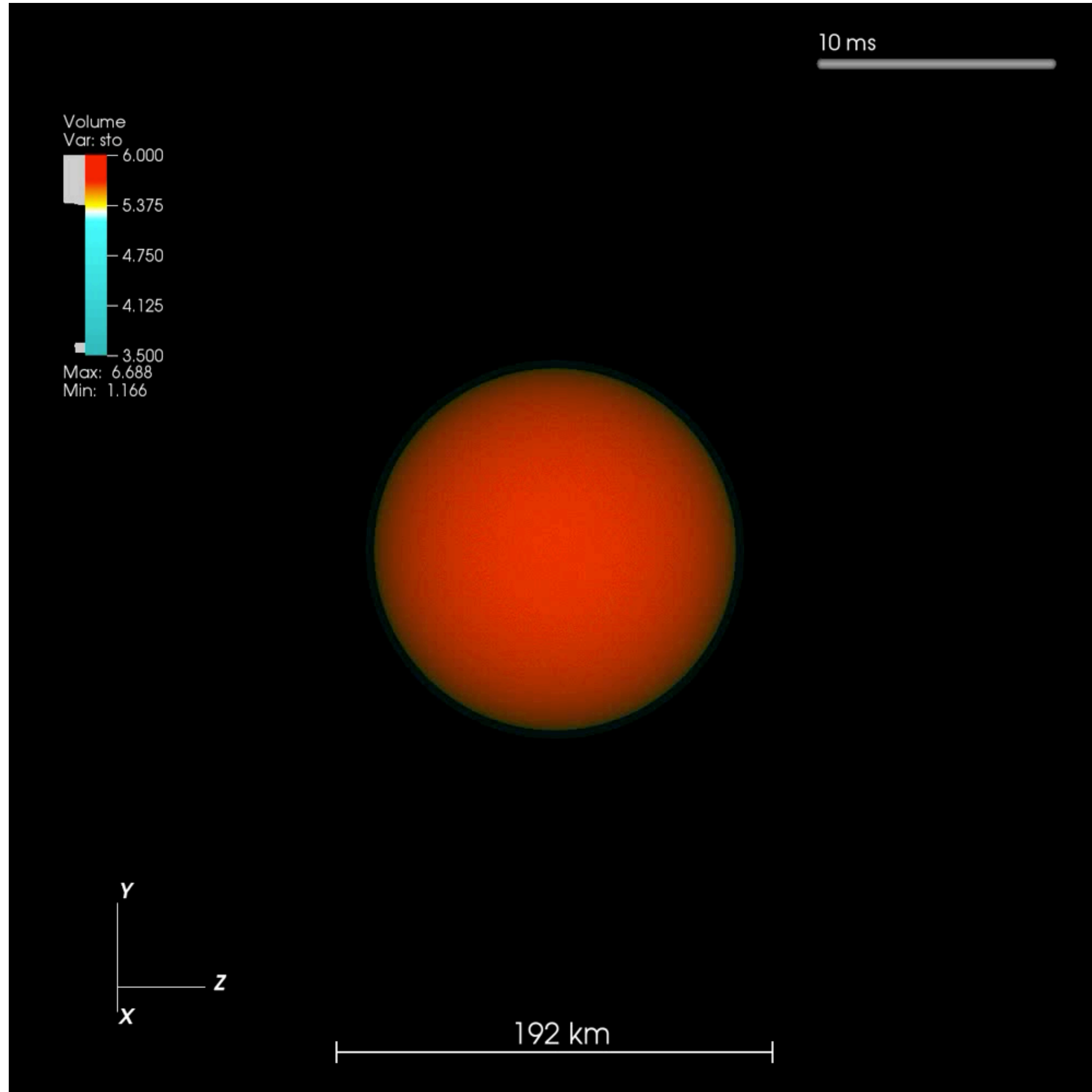
Om **järnkärnan** kollapsar finns ingen kärnbränslekälla som kan antändas och "vända" infallet då järn är det mest stabila ämnet.



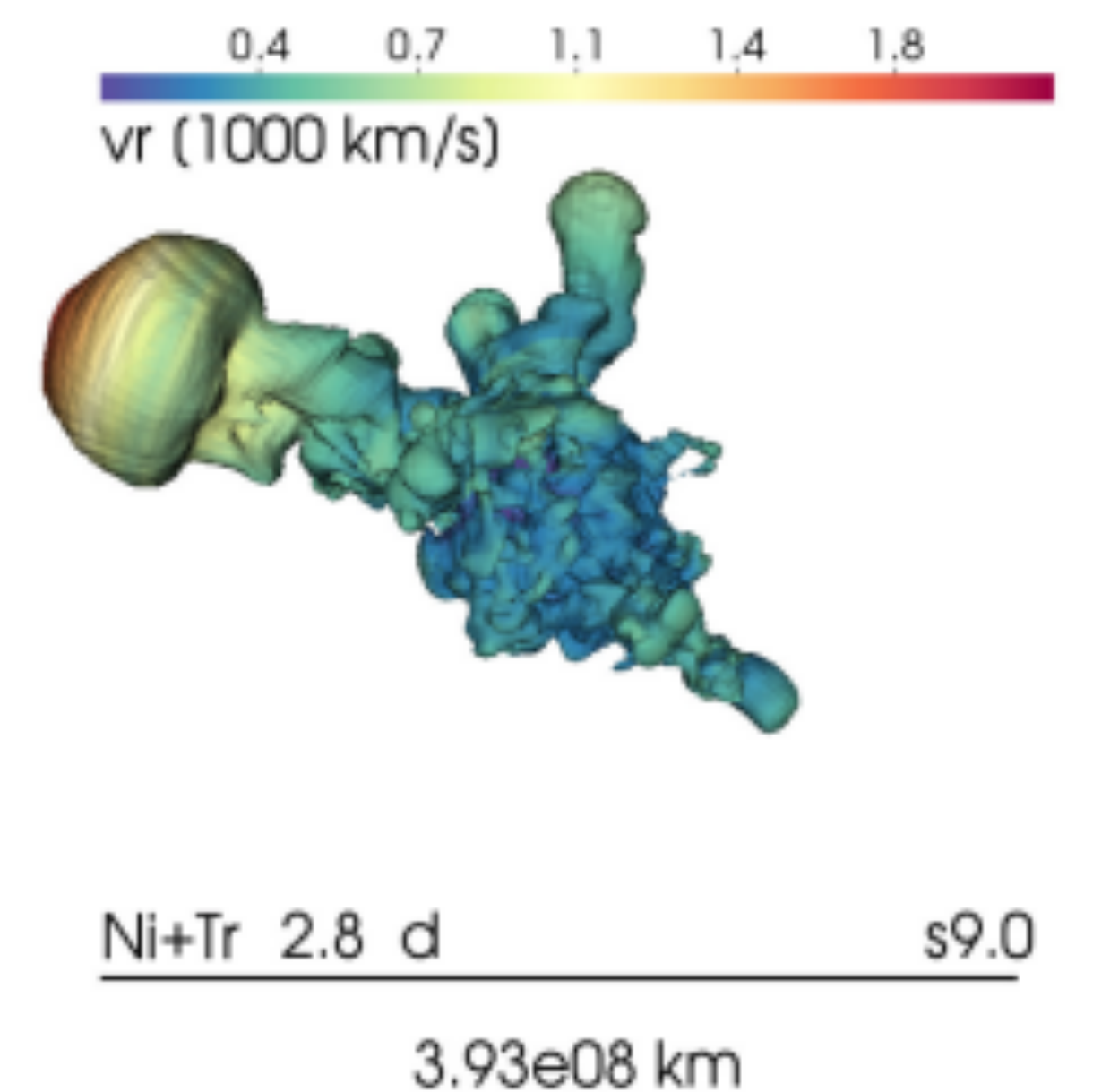
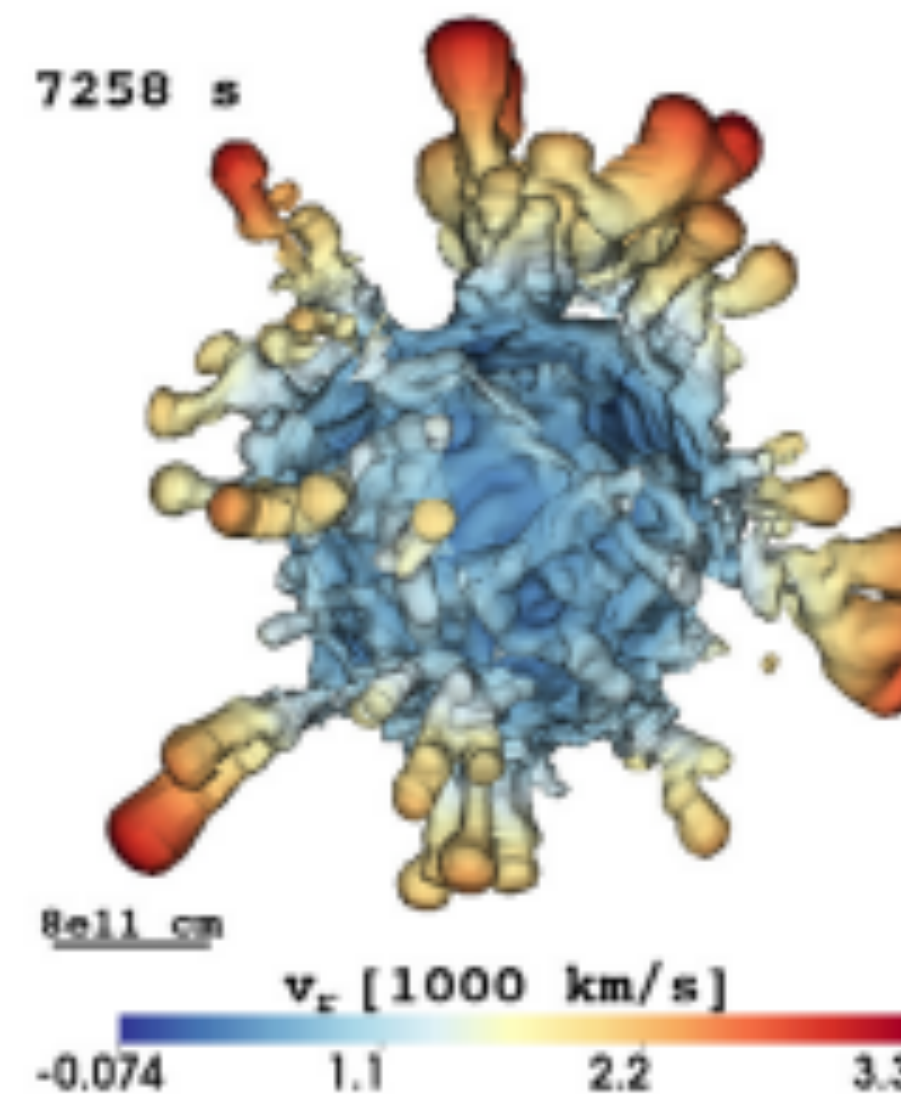
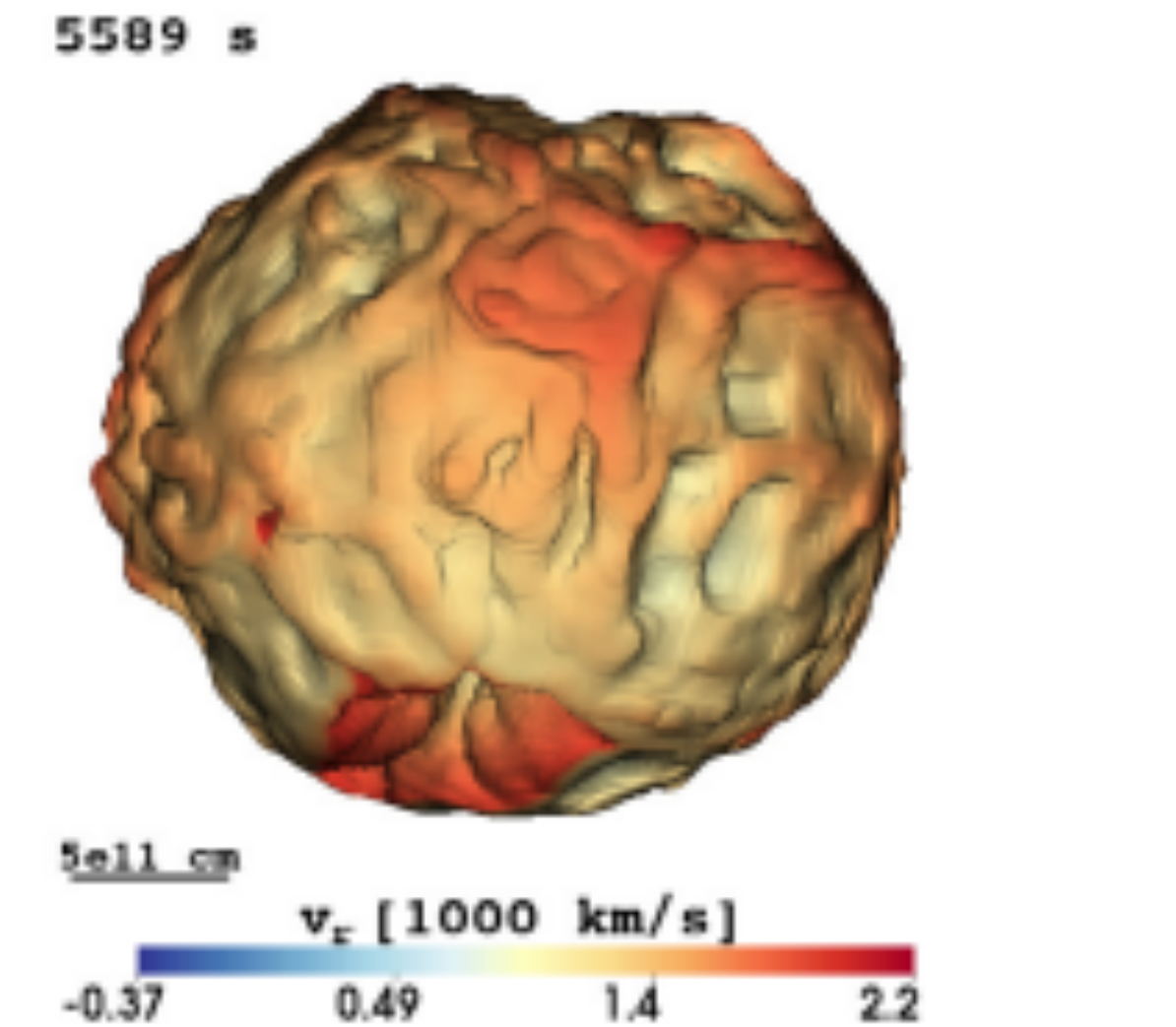
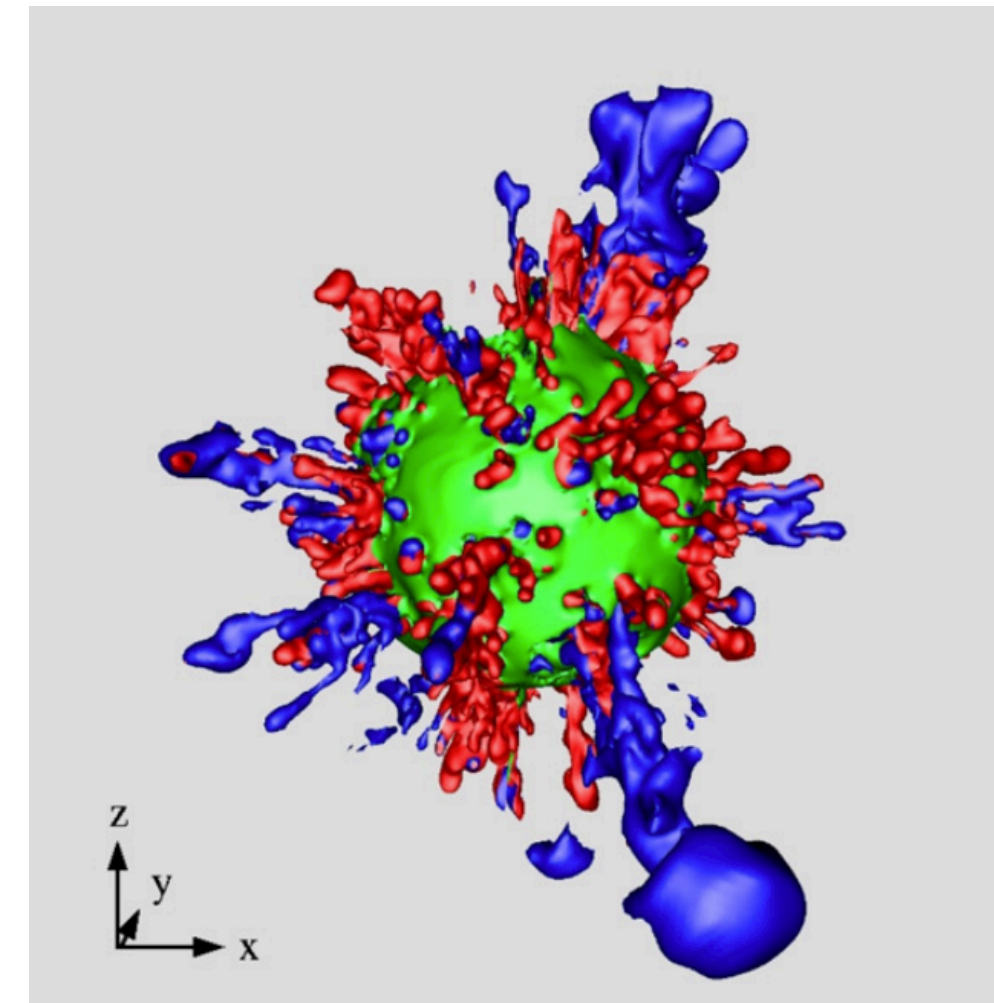
Courtesy H.-T. Janka, MPA.



Supernovor från massiva stjärnor i 3D

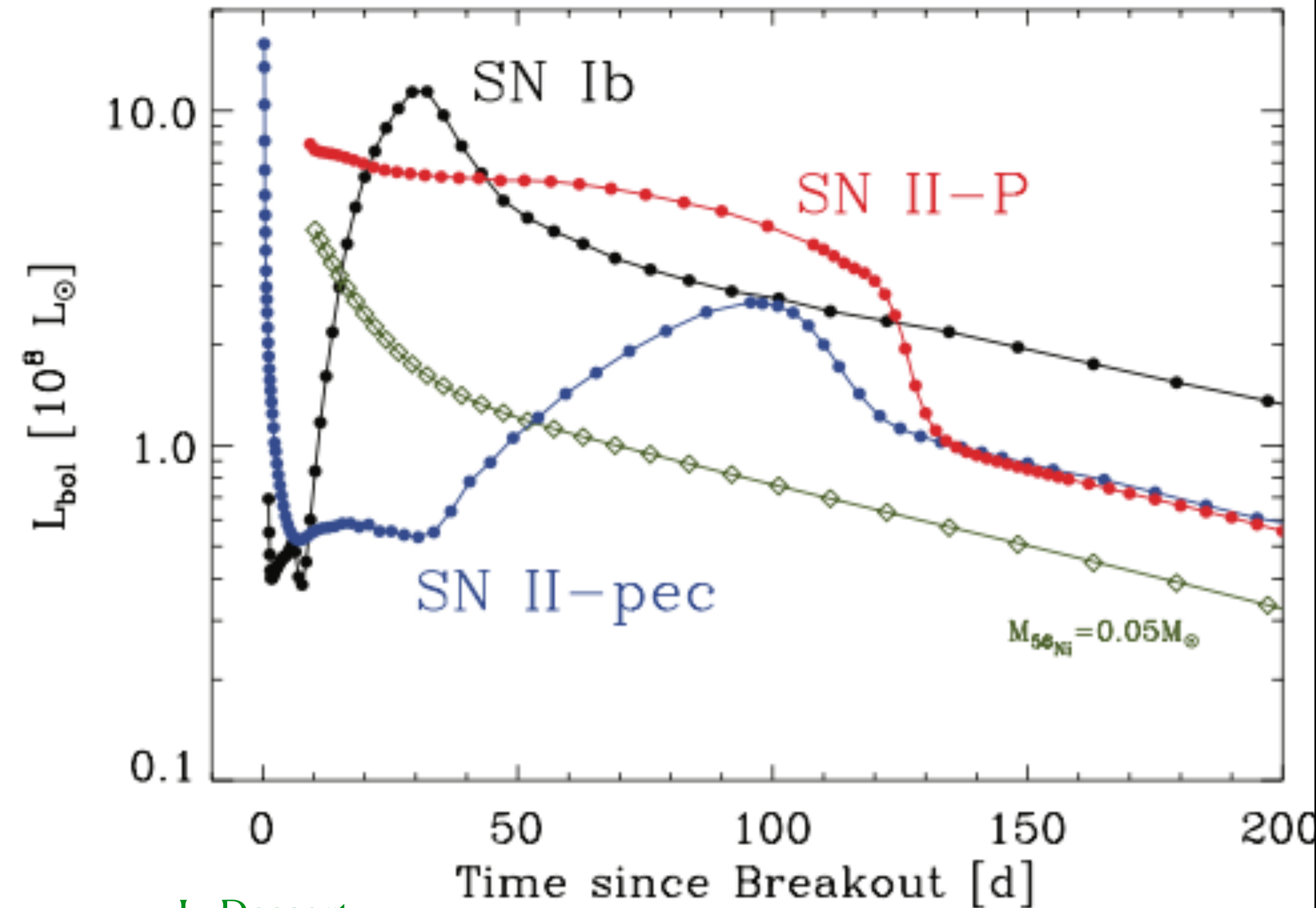


Melson 2015



Wongwathanarat 2015, Stockinger 2020.

Ljuskurvor



L. Dessart

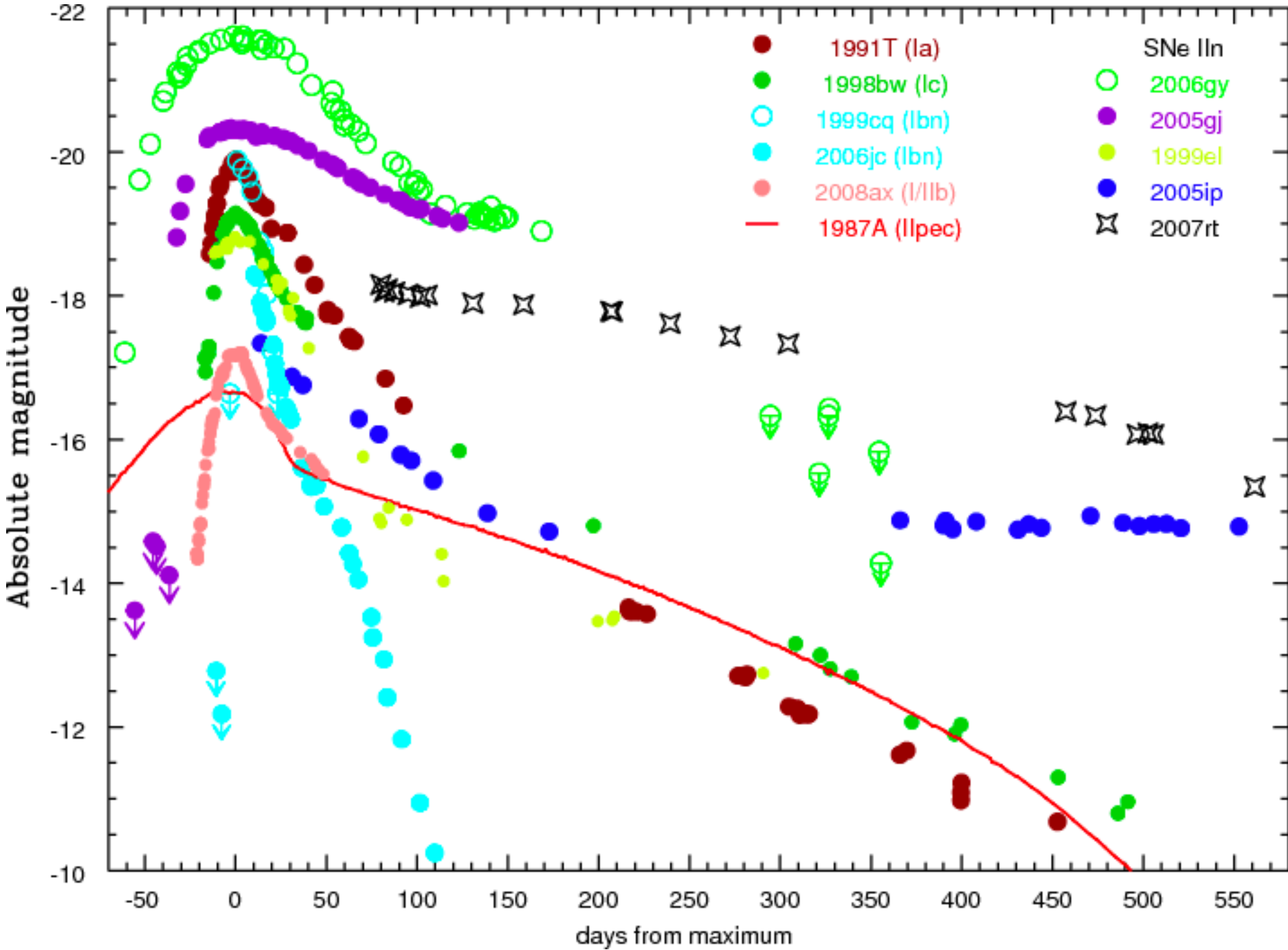
- Maximal ljusstyrka $\sim 10^9 L_{\text{sun}}$ efter några veckor. De ljusstarkaste når $10^{11} L_{\text{sun}}$ och strålar ut en total energi runt 10^{51} erg : lika mycket som solen producerar över hela sitt liv.
- Det mesta av ljuset i "normala" supernovor kommer från reprocessing av radioaktivt förfall i kedjan:



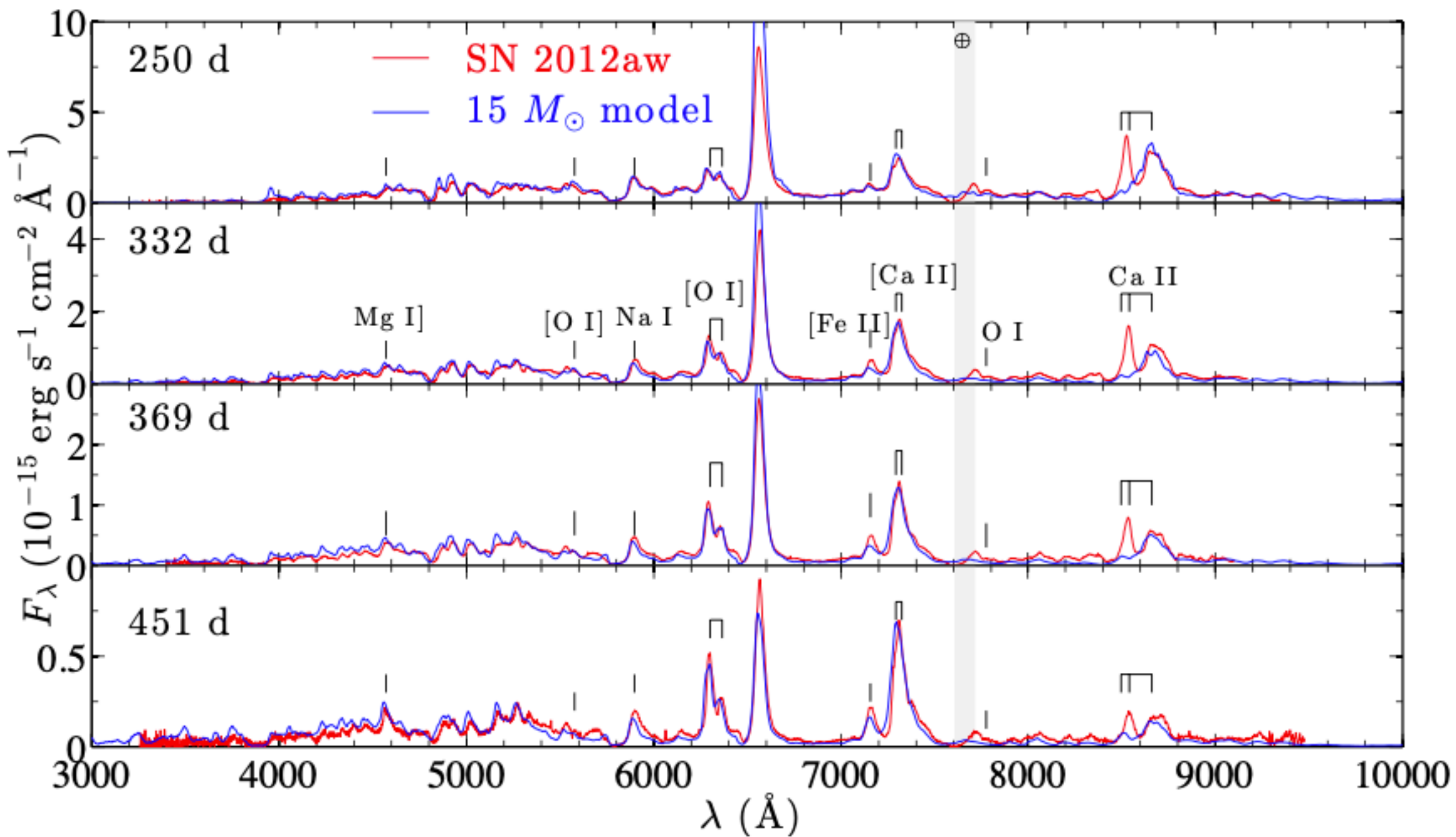
Andra energikällor kan dock spela in:

- Cirkumstellär interaktion.
- Spin-down av, eller ackretion på, kompakta objektet skapat i kollapsen (neutronstjärna eller svart hål).
- Andra radio-isotoper.

Ljuskurvor



Modellering och tolkning av supernovaspektra

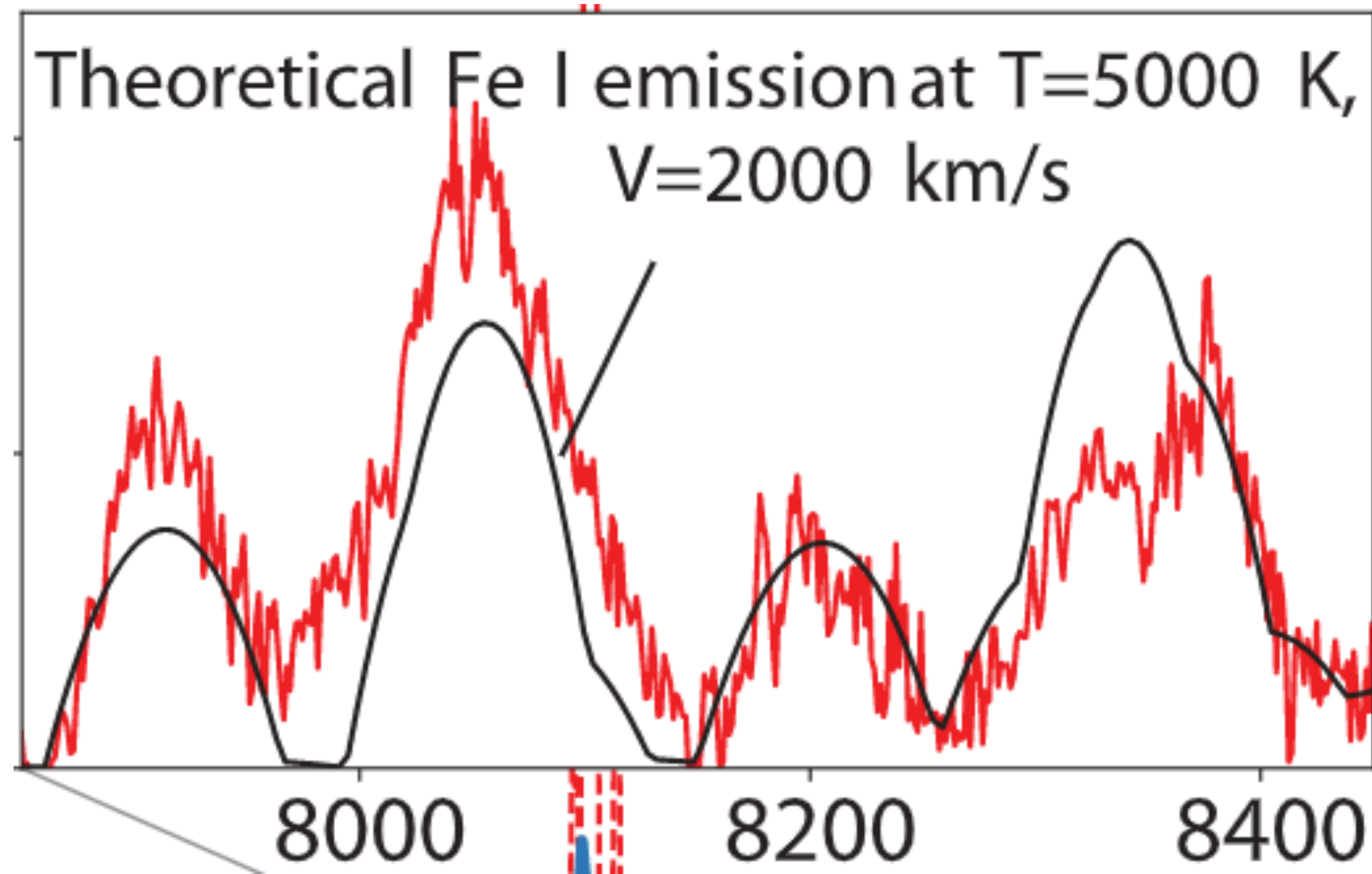


Jerkstrand 2014

Ab.	El.	Main source	Nebular lines seen in SNe
1	H	Big Bang	Many
2	He	Big Bang	He I 5016, 7065, 1.08 μm , 2.06 μm
3	O	CCSN	[O I] 5577, [O I] 6300, 6364, O I 7774, O I 9263 + ..
4	C	AGB stars+CCSN	[C I] 8727, 9824/9850, 1.44 μm , CO lines
5	Fe	CCSN+TNSN	[Fe II] 7155, 1.26 μm , 1.64 μm , 18 μm , 26 μm
6	Ne	CCSN	[Ne II] 12.8 μm
7	Si	CCSN+TNSN	[Si I] 1.10 μm , 1.20 μm , 1.60/1.64 μm , SiO lines
8	N	AGB stars	[N II] 6548, 6583
9	Mg	CCSN	Mg I] 4571, 1.50 μm
10	S	CCSN	[S I] 1.082 μm , 1.13 μm
11	Ar	CCSN	[Ar II] 6.99 μm
12	Ni	CCSN+TNSN	[Ni II] 7378, 1.93 μm , 6.6 μm , 10.7 μm , [Ni I] 3.1 μm
13	Ca	CCSN	[Ca II] 7300, NIR triplet, Ca I 4200
14	Al	CCSN	-
15	Na	CCSN	Na I 5890, 5896, 1.14 μm

CCSN = Core Collapse Supernova
 TNSN = Thermo-Nuclear Supernova

Modellering och tolkning av supernovaspektra



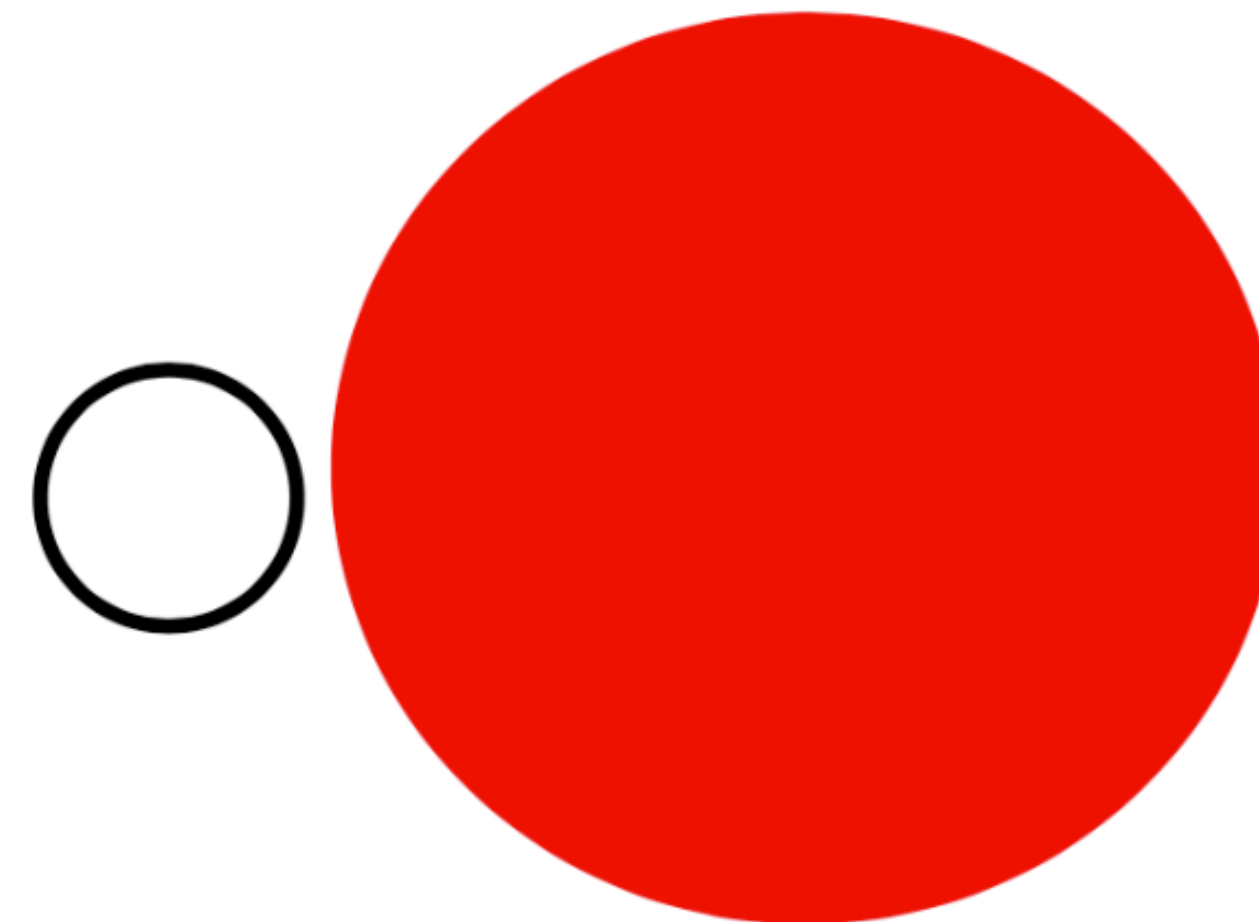
Jerkstrand, Maeda, Kawabata 2020, Science

- I **SN 2006gy** - linjer som aldrig setts innan identifierade med Fe I.

- Modellering av Fe massan ger:

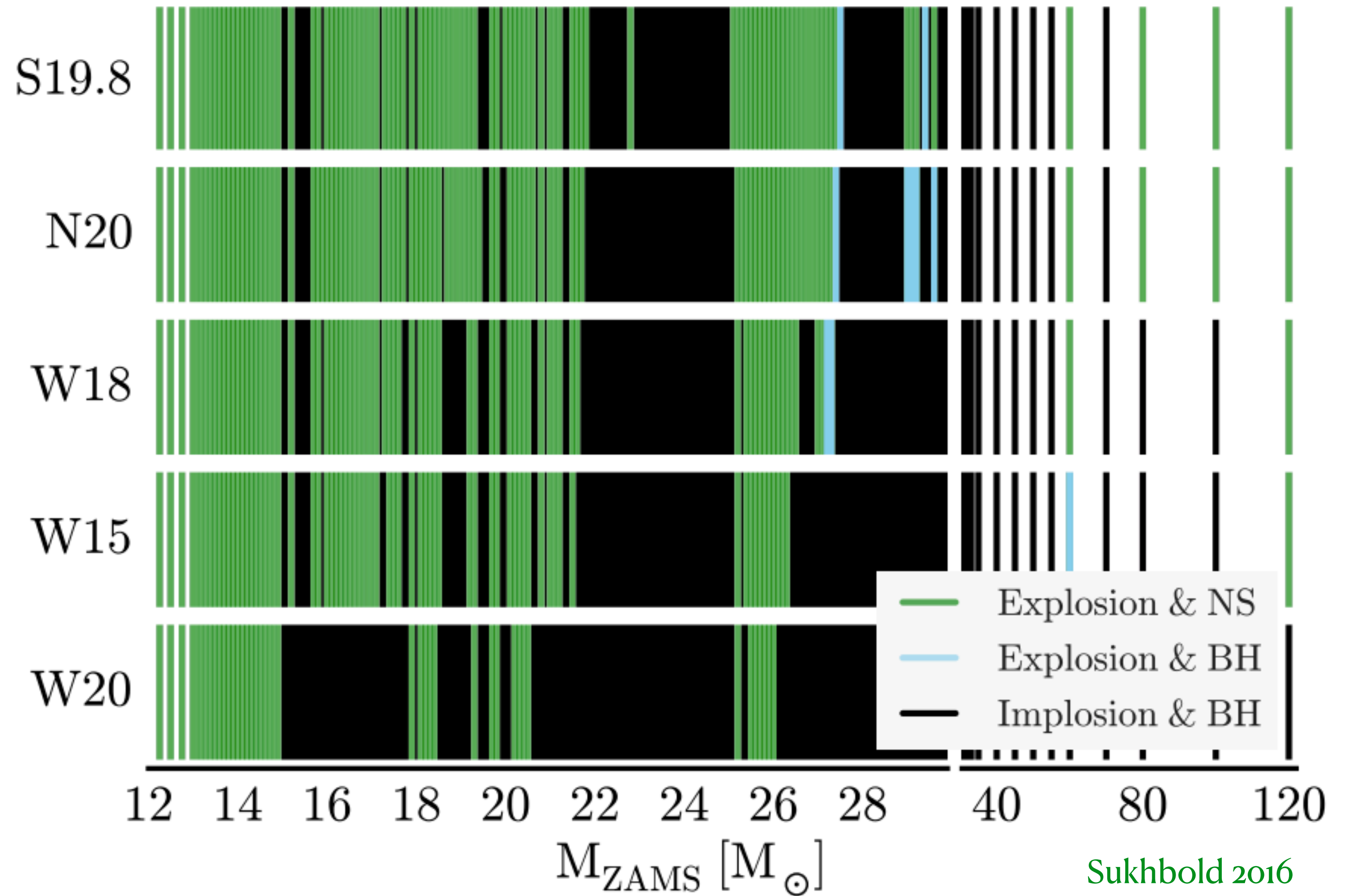
$$0.3 M_{\text{sun}} < M(\text{Fe}) < 2 M_{\text{sun}}$$

Tyder på en **la supernova** som exploderat inuti ett massivt CSM.



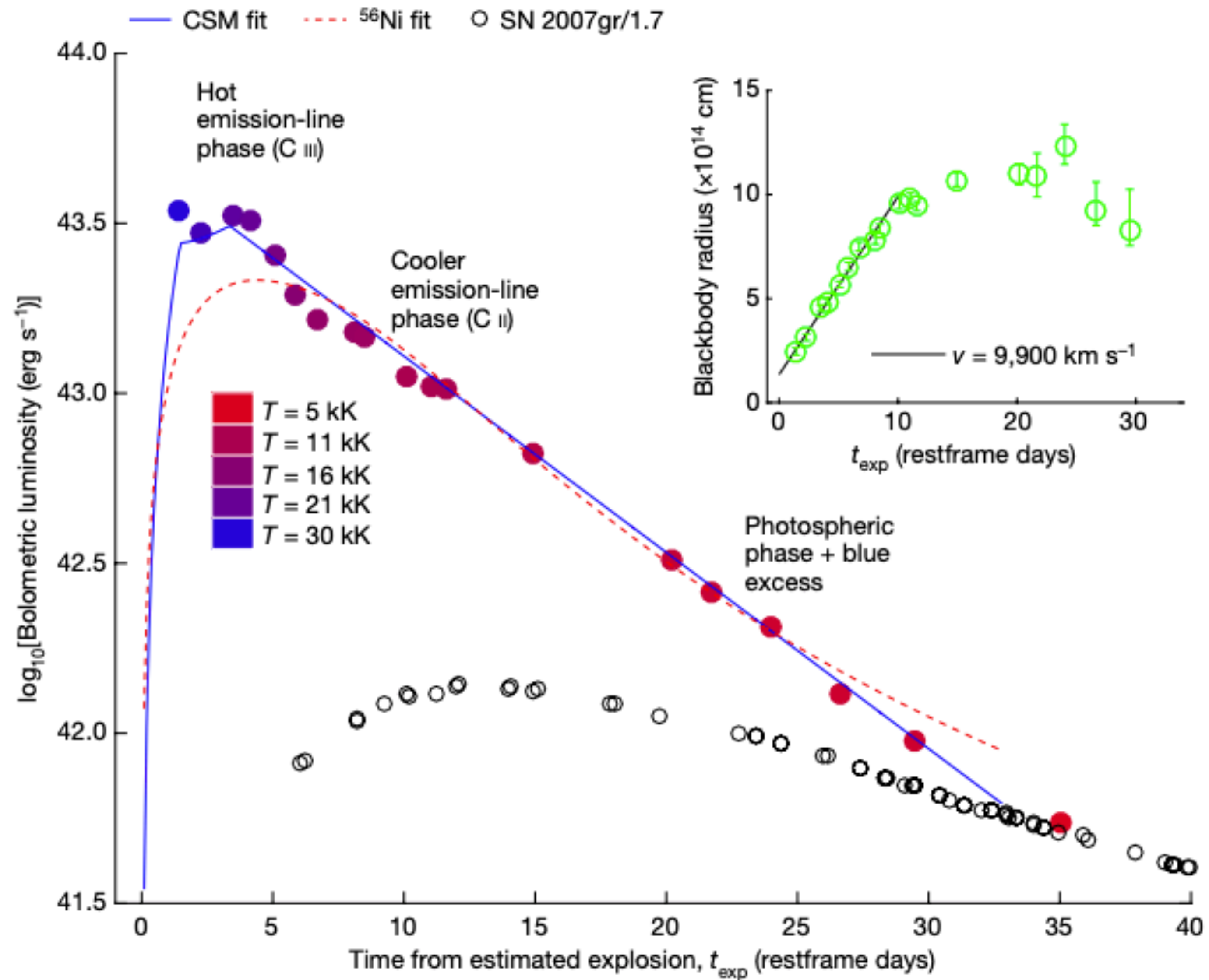
Öppna frågor och "hot topics"

Vilka
massiva
stjärnor exploderar
och vilka
kollapsar direkt
till svarta hål?



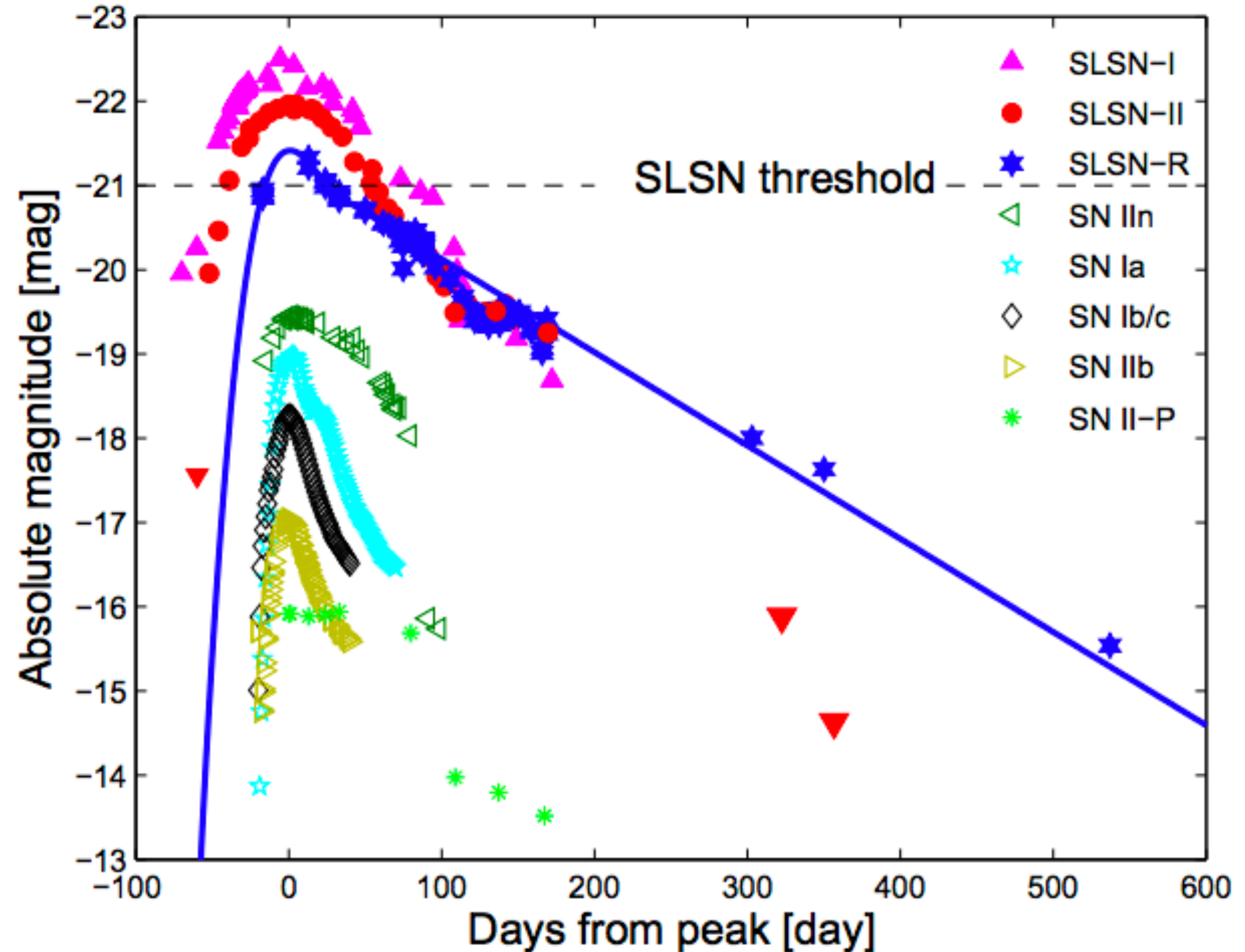
Öppna frågor och "hot topics"

Vad händer inuti och utanför stjärnor de sista månaderna/veckorna?



Öppna frågor och "hot topics"

Varifrån
kommer
superluminösa
supernovor och
vad är deras
energikälla?



MULTI-BUDBÄRARAR-ERAN OCH KILONOVOR

Neutriner

Fotoner

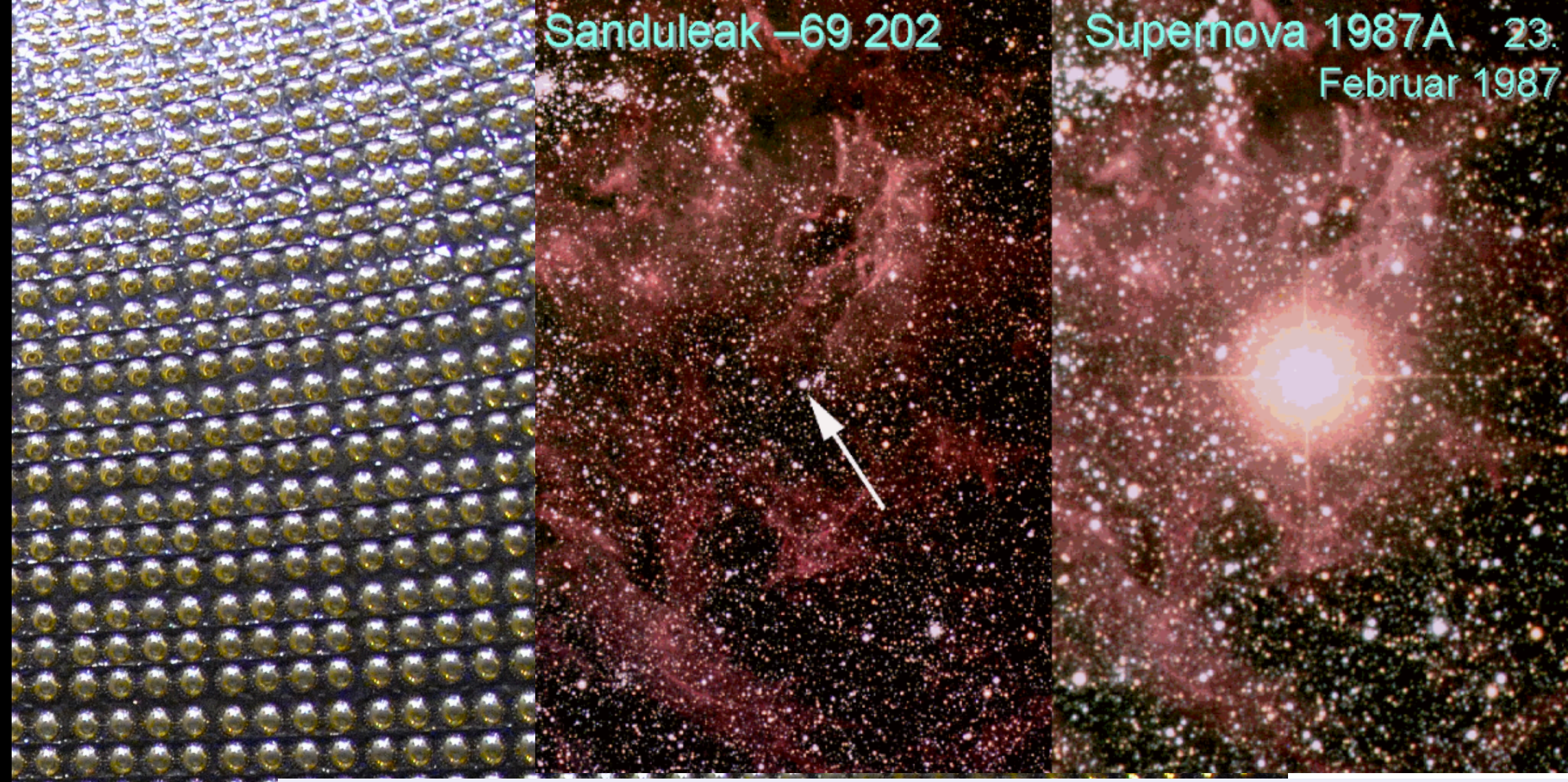
Gravitations-
vågor



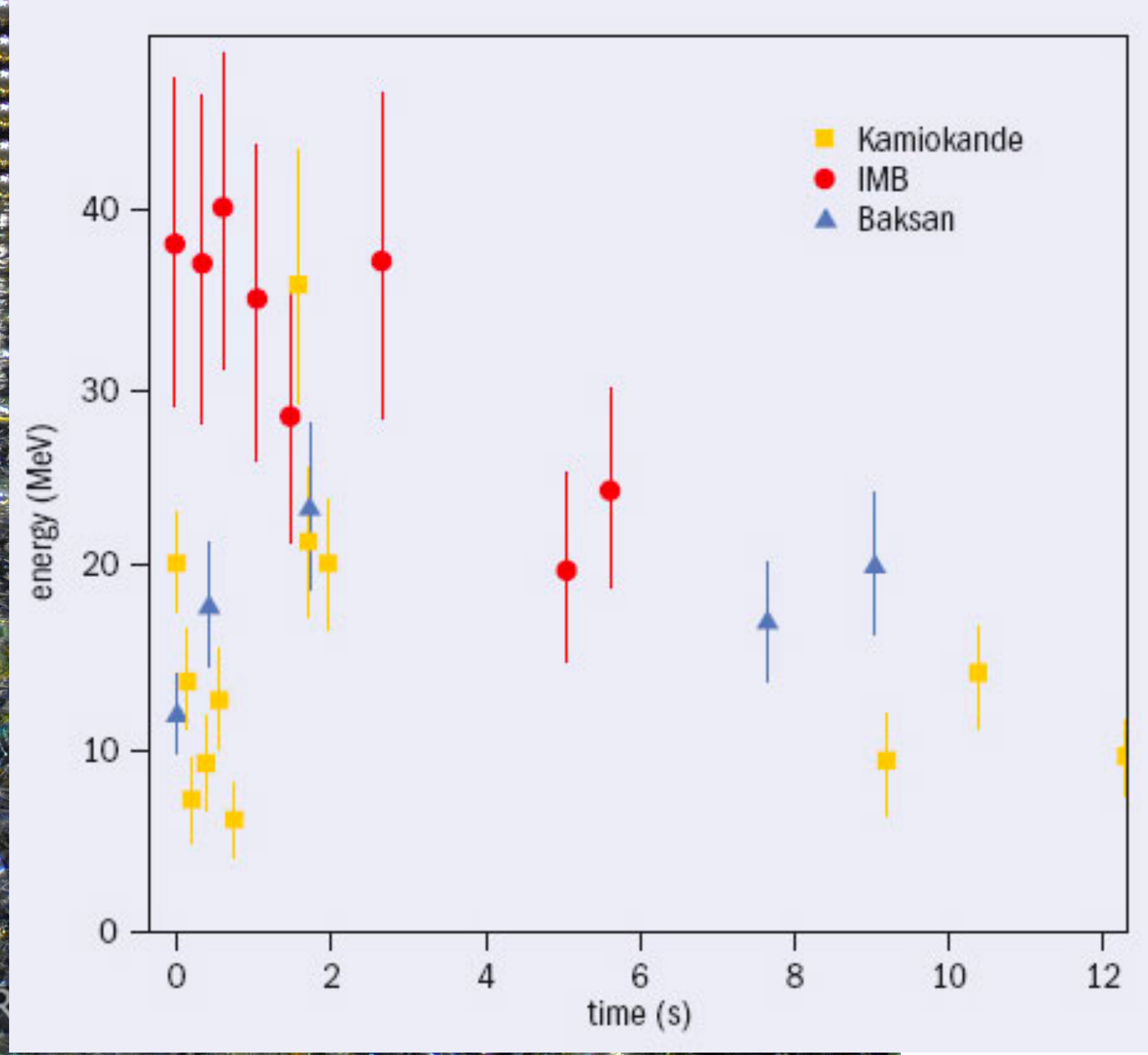
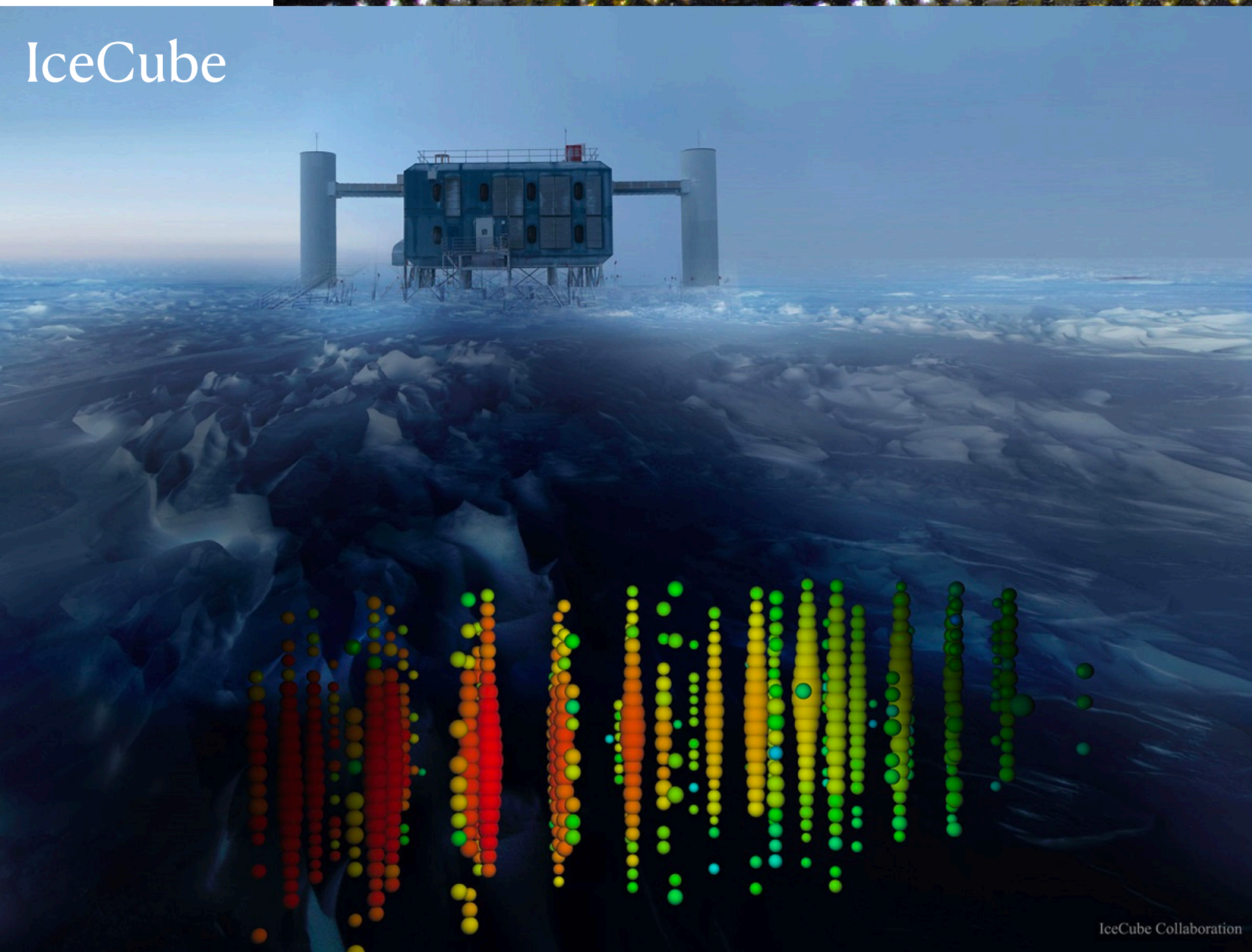
<https://www.ligo.caltech.edu/page/gw-sources>

Neutriner:

- Bara detekterade i en SN hittills : **SN 1987A** i Stora Magellanska Molnet 50 kpc bort (27 neutriner infångade av 10^{58} emitterade).
- Kommer bli viktig diagnostik för nästa galaktiska SN, men extragalaktiska SN fortfarande svåra att observera.

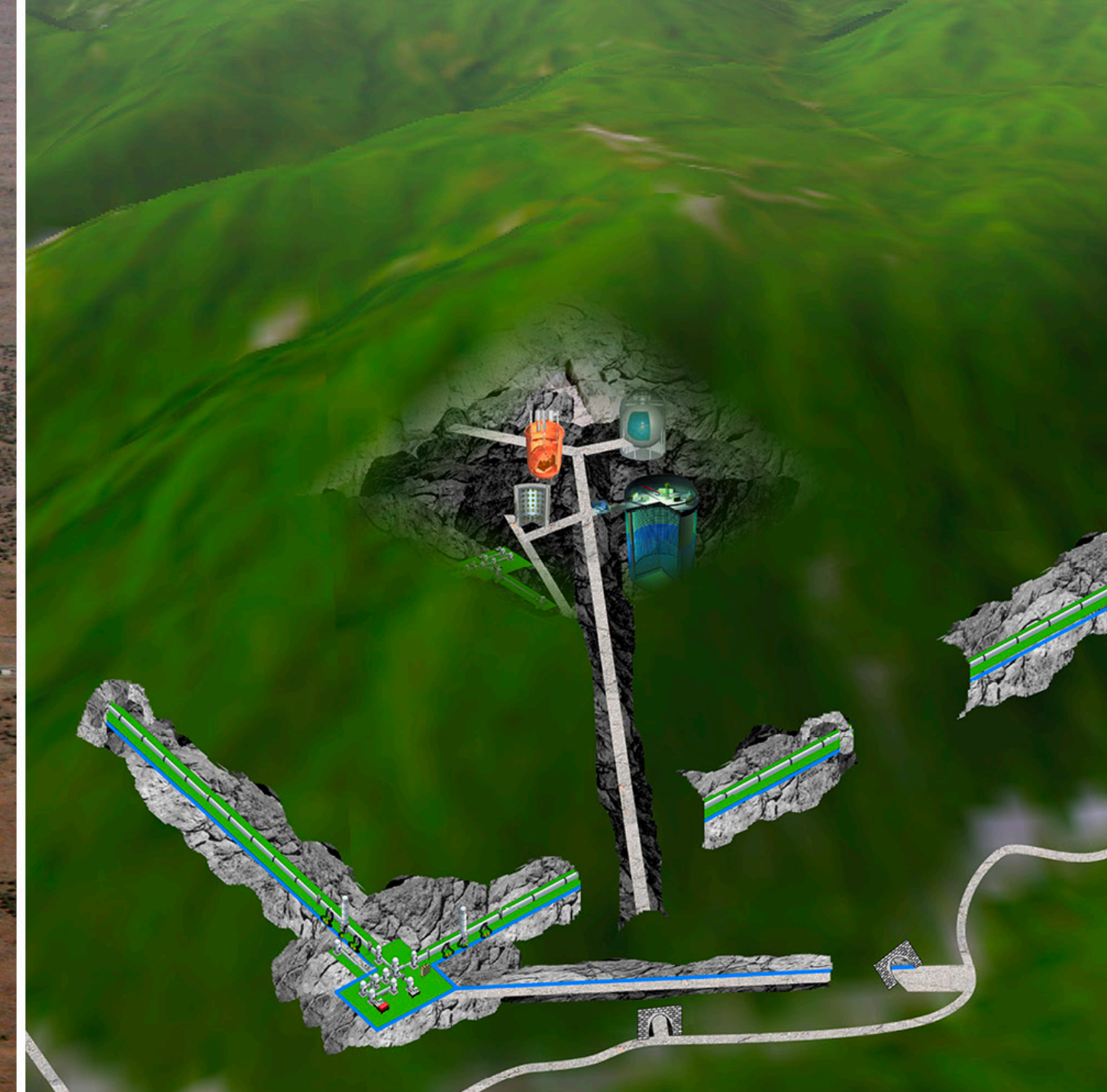


IceCube



ervatory, ICRR(Institute for Cosmic R

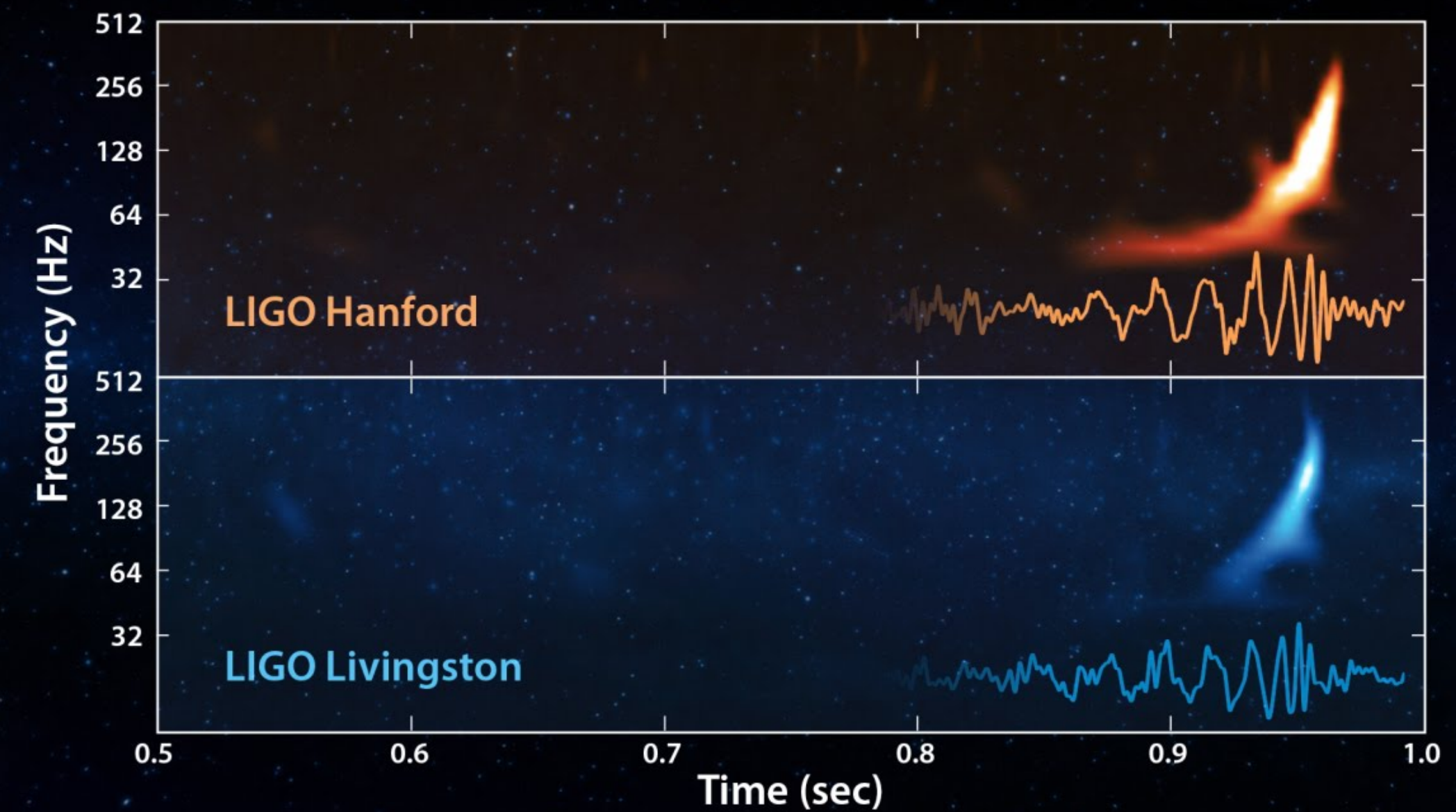
LIGO-Virgo-KAGRA



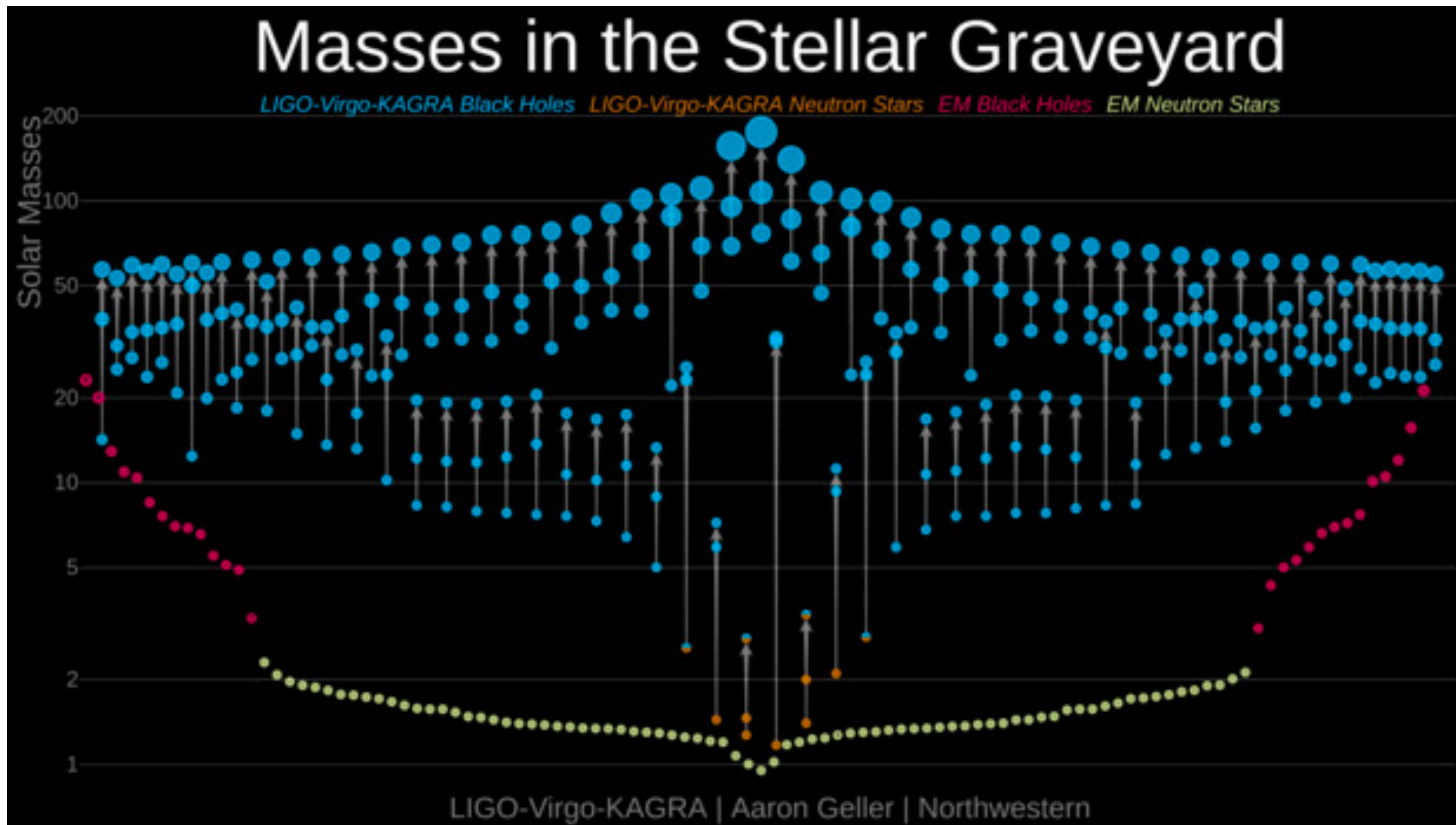
Gravitationsvågor

Historisk första detektion 2015.
En sammansmältning
av två svarta hål med massor 36
och 29 M_{sun} .

10^{65} erg emitterade under ~ 0.1
sekunder.



Sammanmältning av kompakta objekt upptäckta med LIGO



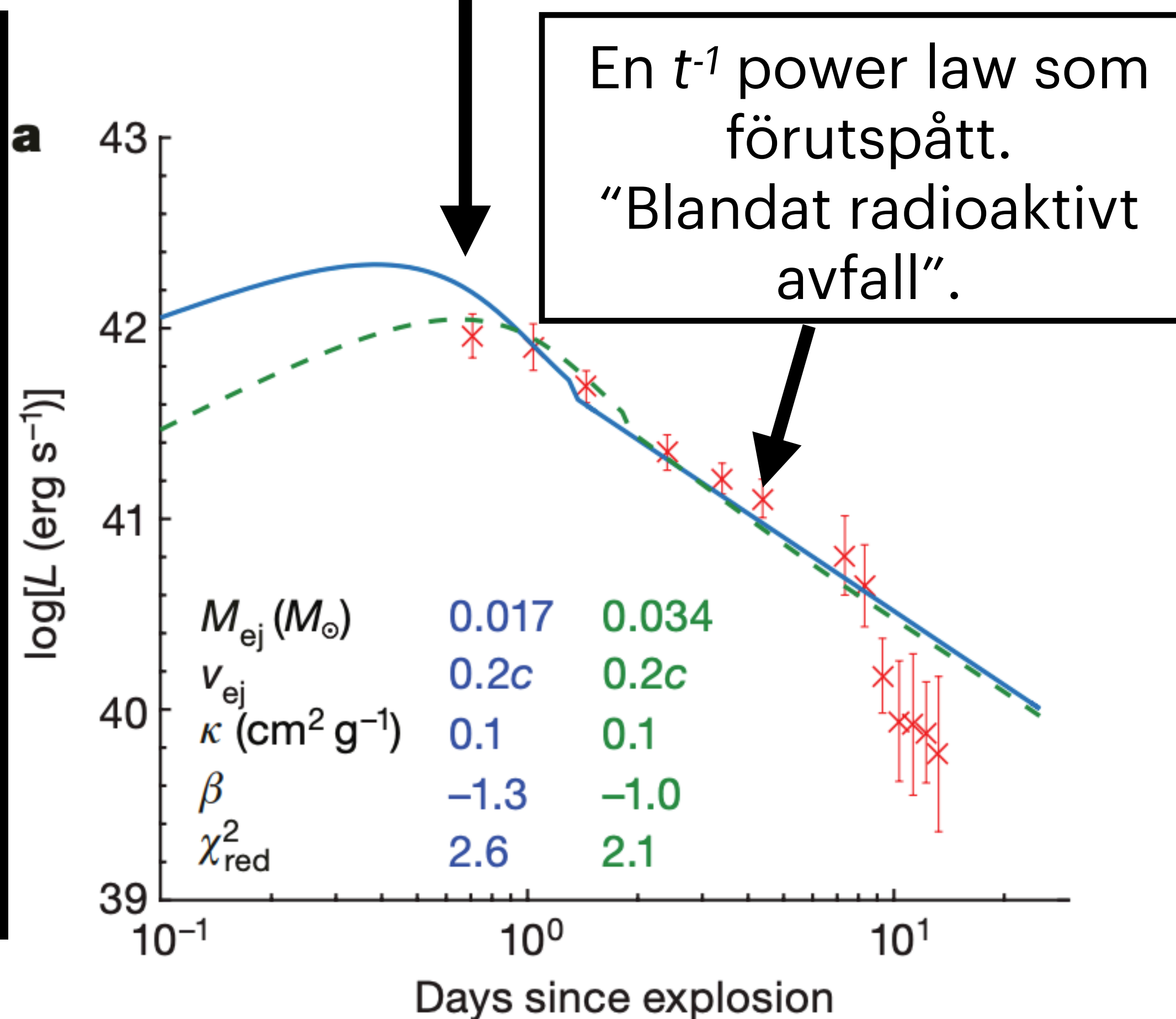
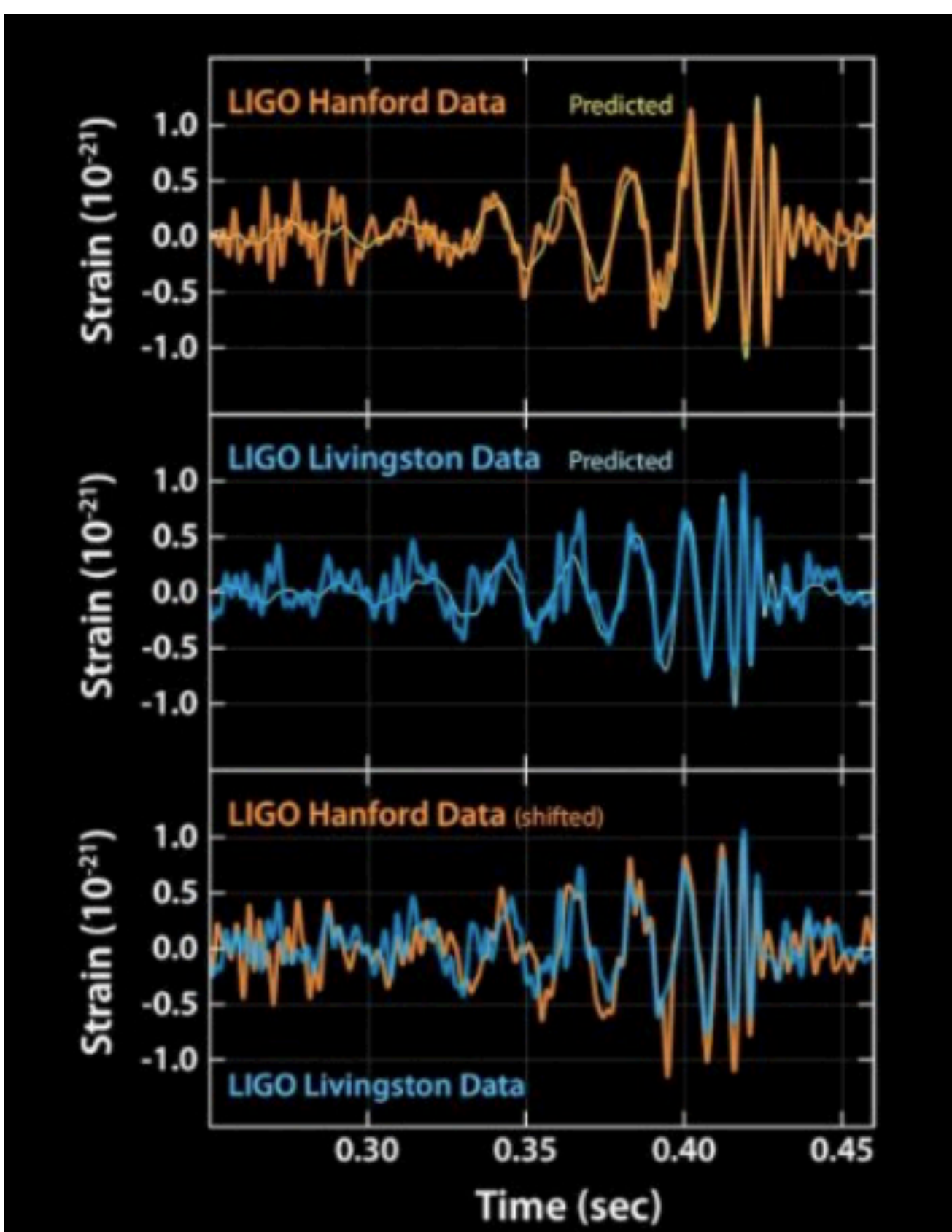
- ~80 Svart Hål-Svart Hål system
- 4 Svart Hål-Neutronstjärna
- 2 Neutronstjärna-Neutronstjärna

← Mass-gapp av kompakta objekt mellan 3-5 M_{sun} hittills bekräftat.

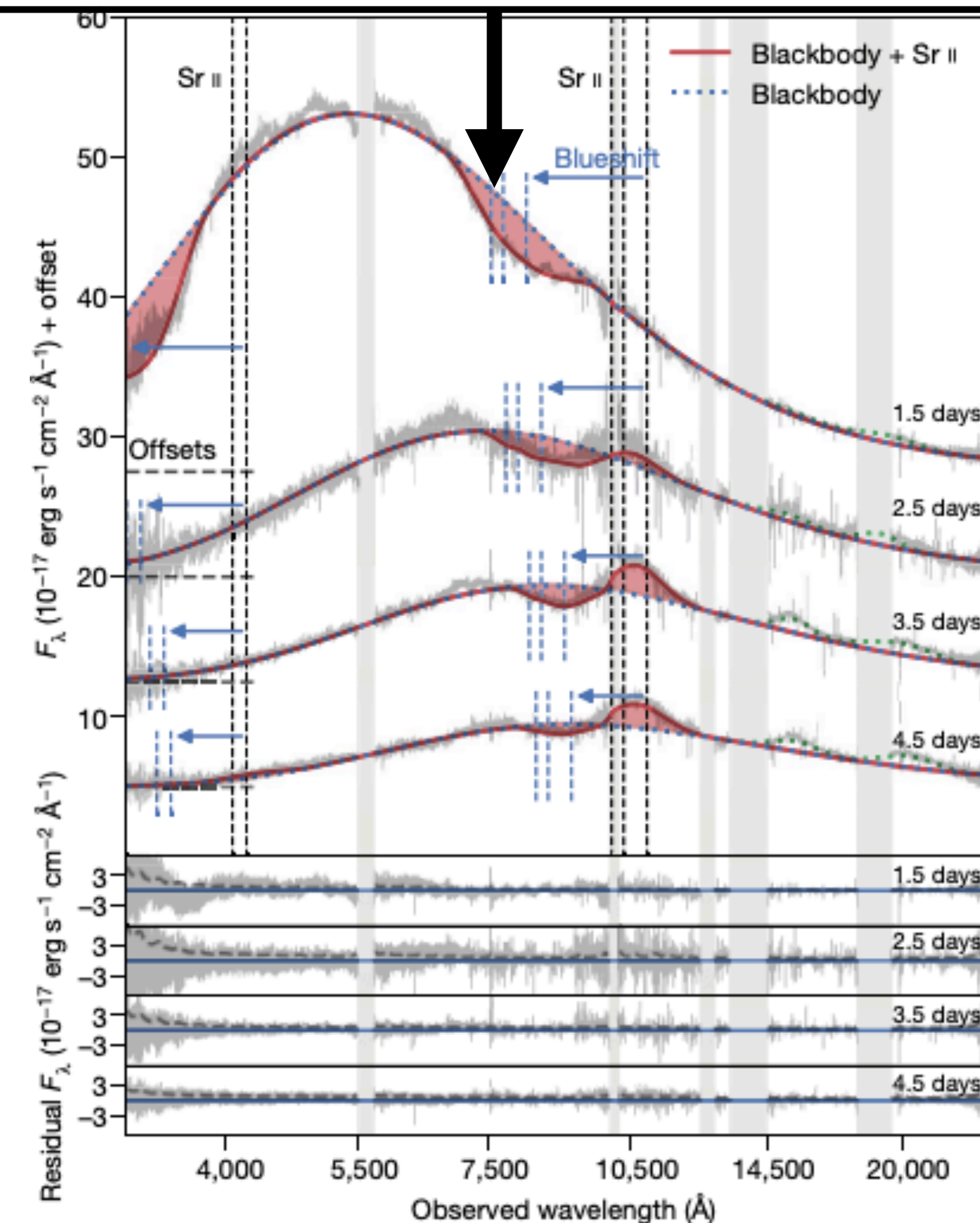
AT2017gfo och skapandet av de tyngsta ämnena

Optisk transient upptäckt 11 timmar efter gravitation-
våg triggers : redan avtagande.

Mest övertygande
ämnesidentifikation
hittills är **strontium (Z=38)**



Smartt et al. 2017, Nature

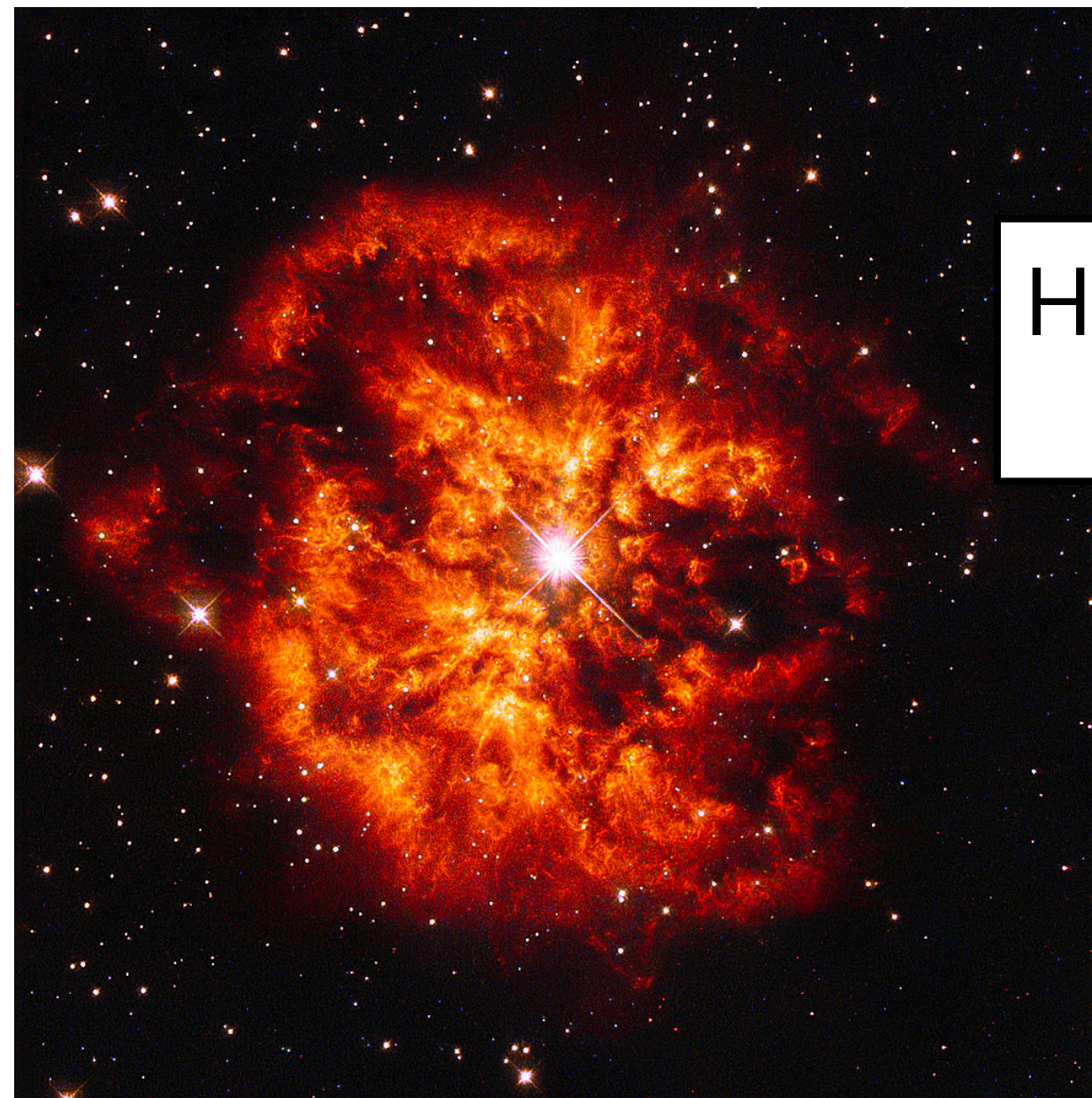


Watson et al. 2019, Nature

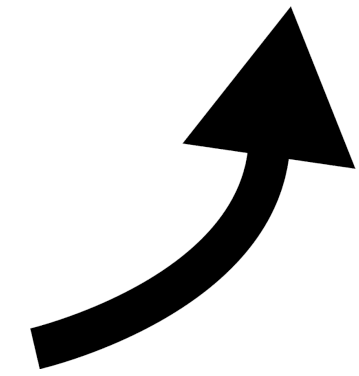
De tre faserna av ämnesinjektion till det interstellära mediet

Stjärnvindar:

Lätta elements (He till N) och några tunga (s-process)

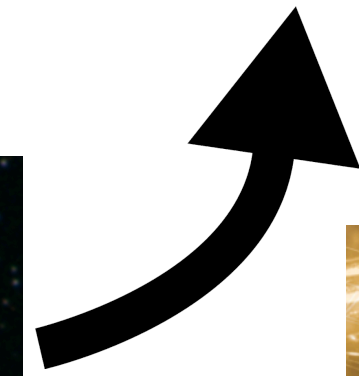
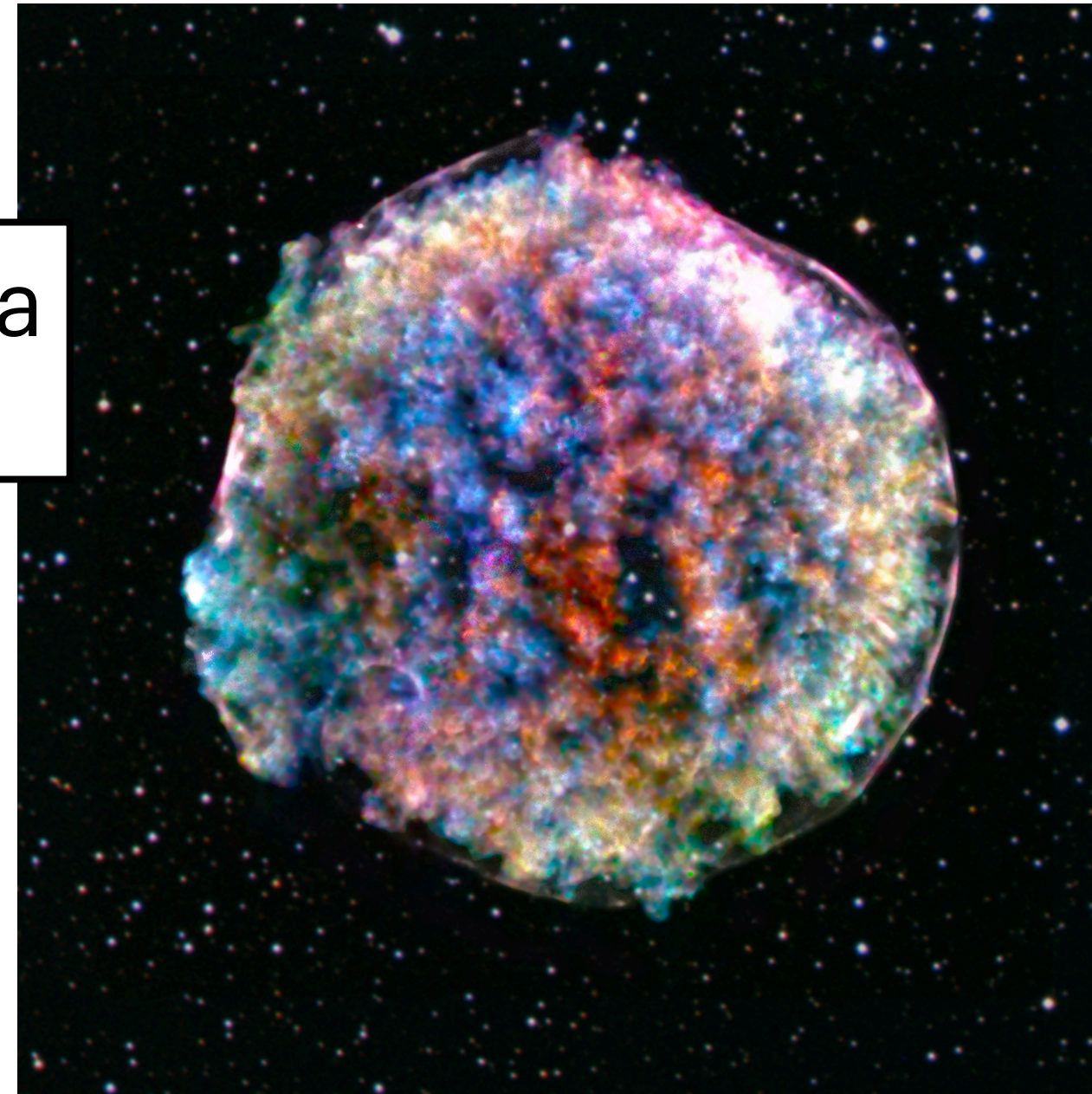


Högmassiva stjärnor



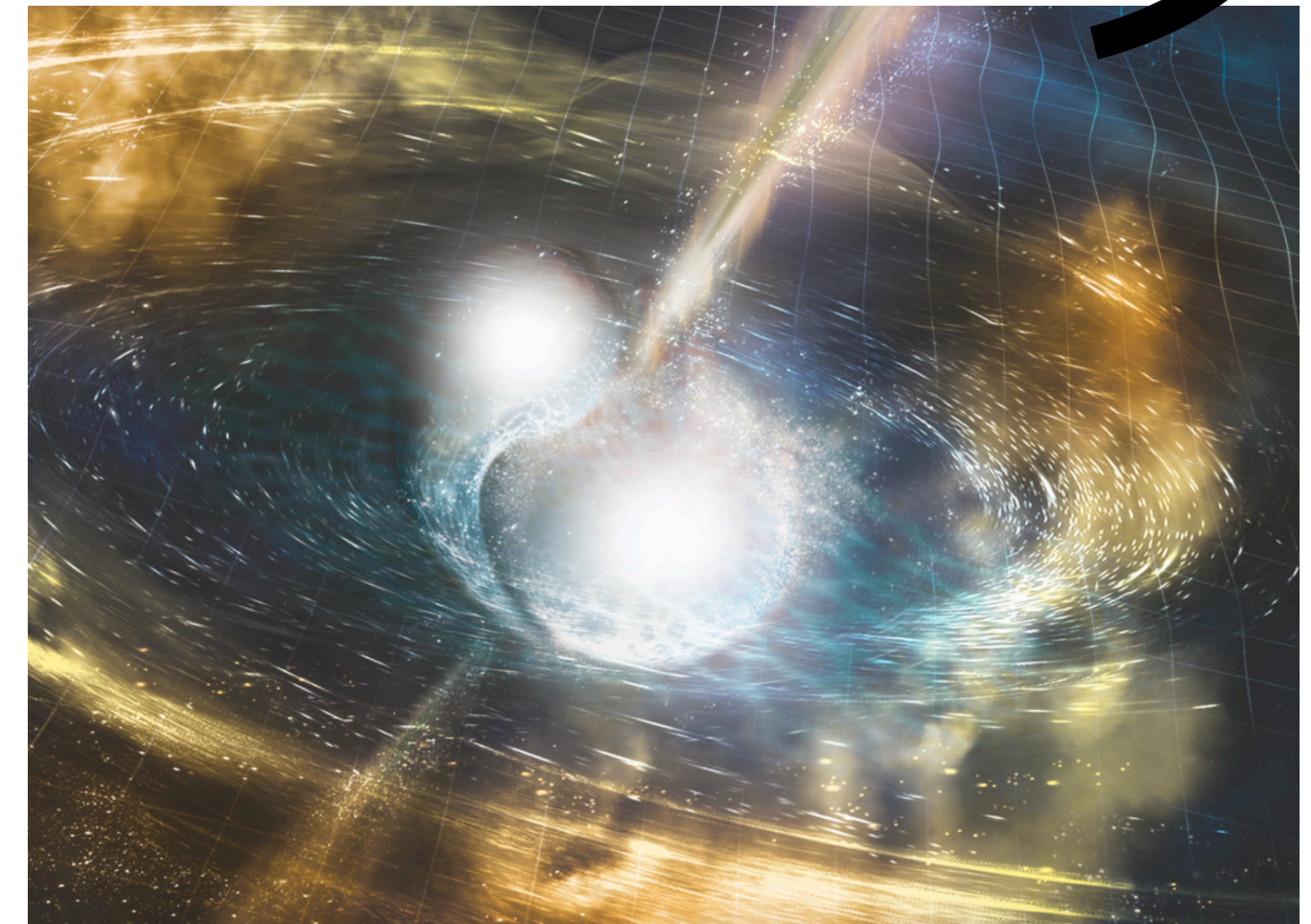
Supernovor:

Medeltunga ämnen (syre till rubidium)

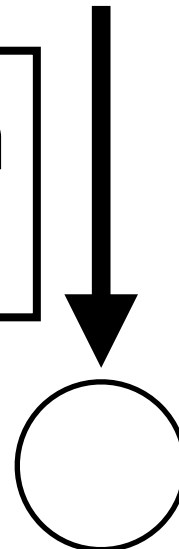


Kilonovor:

Tunga ämnen (r-process)

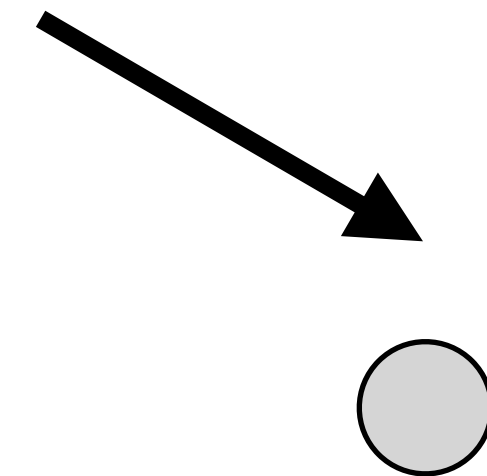


Lågmassiva stjärnor



Vit dvärg

Några av dessa (om i nära binär)



Neutronstjärna

Några av dessa (om i nära binär)



Svart hål

Tack för att ni lyssnat!

Ytterligare läsning och material:

Stan Woosleys föreläsningsanteckningar om sen stjärnevolution och supernovor (2019):

<https://www.ucolick.org/~woosley/ay220cnotes19.html>

En review av mig om supernovaspektra i sena faser:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017hsn..book..795J/abstract>

1a supernova review by Dan Maoz:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ARA%26A..52..107M/abstract>

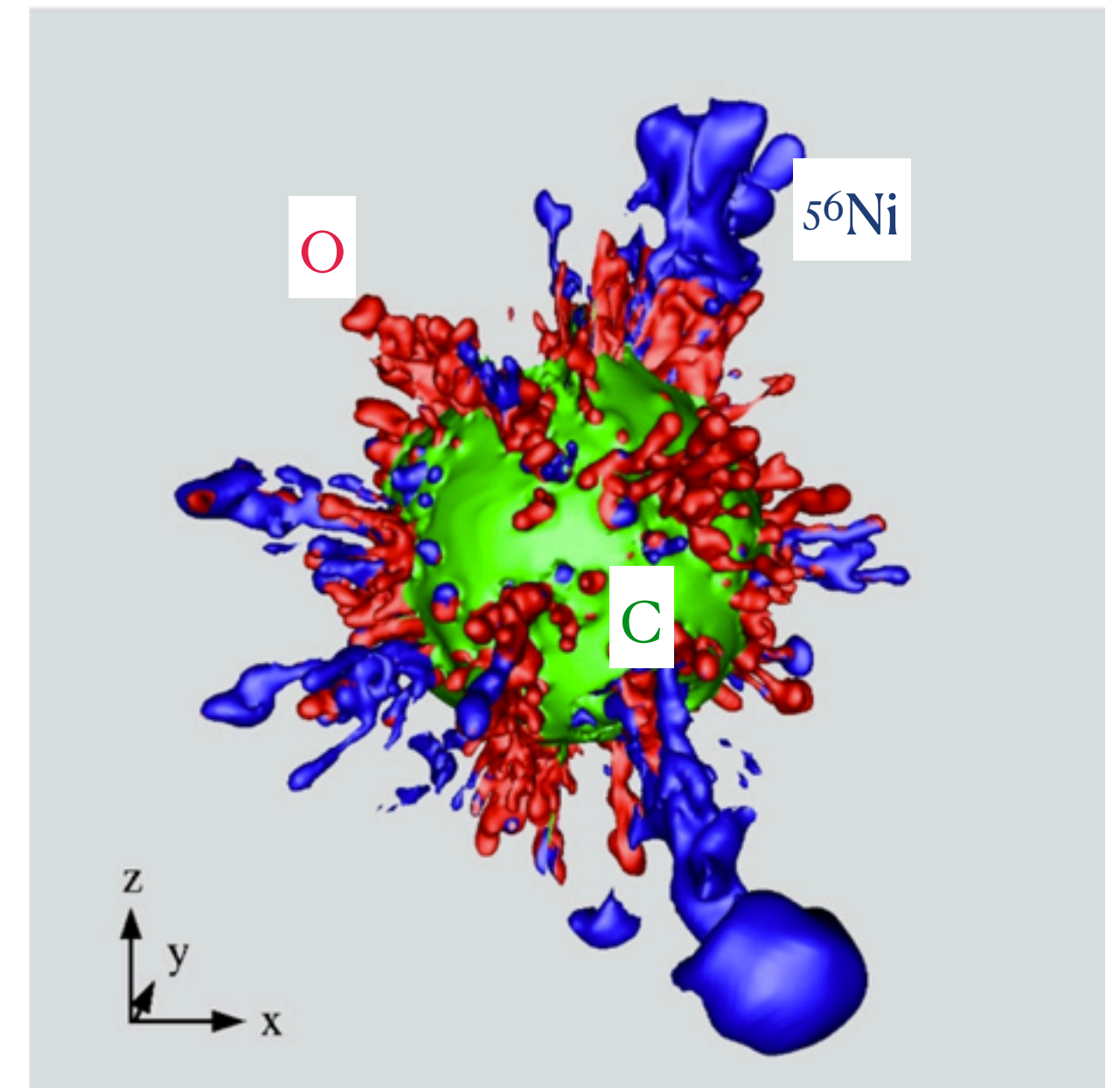
Kärnkollapssupernovor:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012ARNPS..62..407J/abstract>

och

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016PASA...33...48M/abstract>

RESERVES



Hammer, Janka & Muller 2010:
Radioactive fragments fly far out
into the envelope

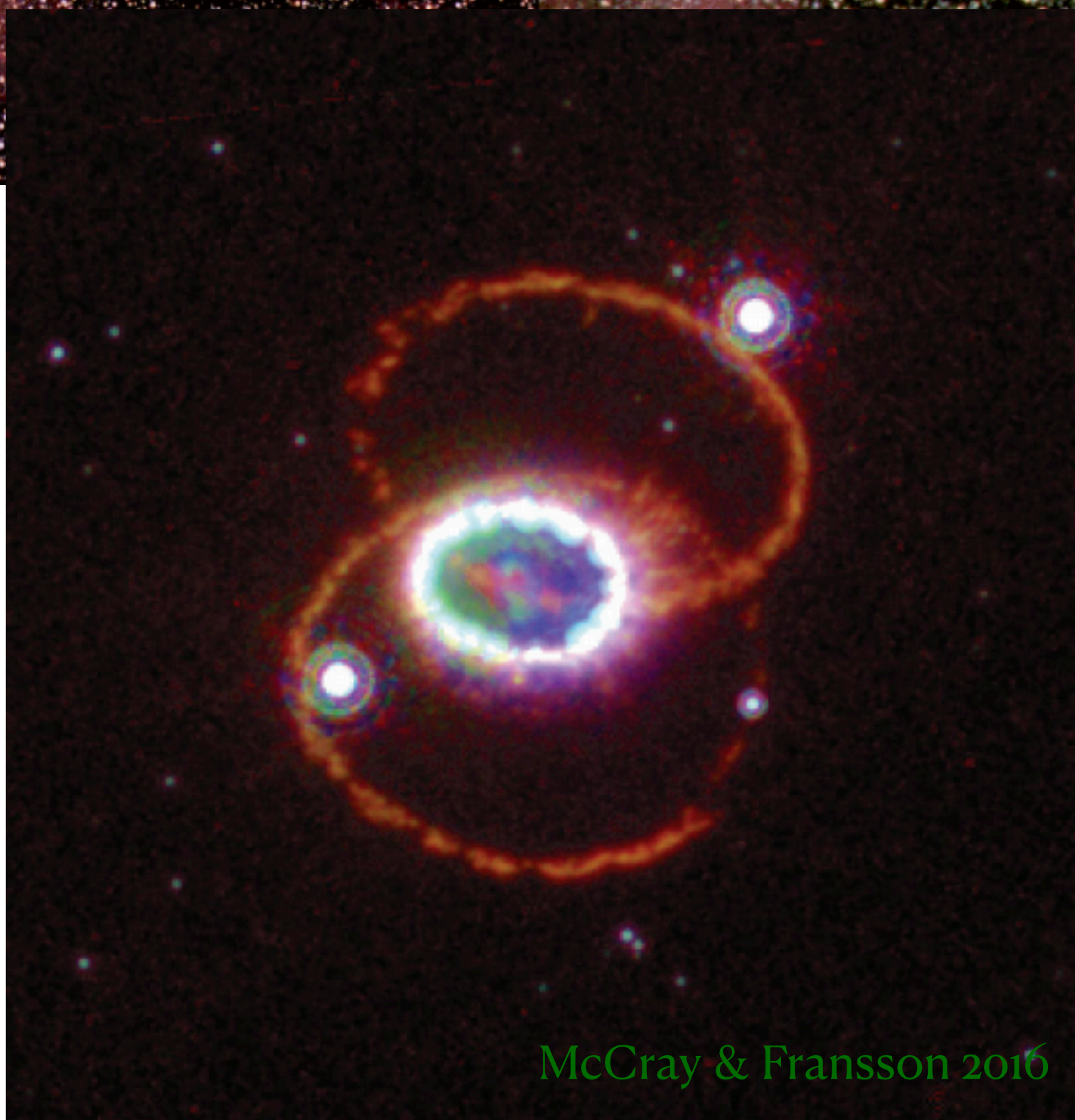
Sanduleak -69 202



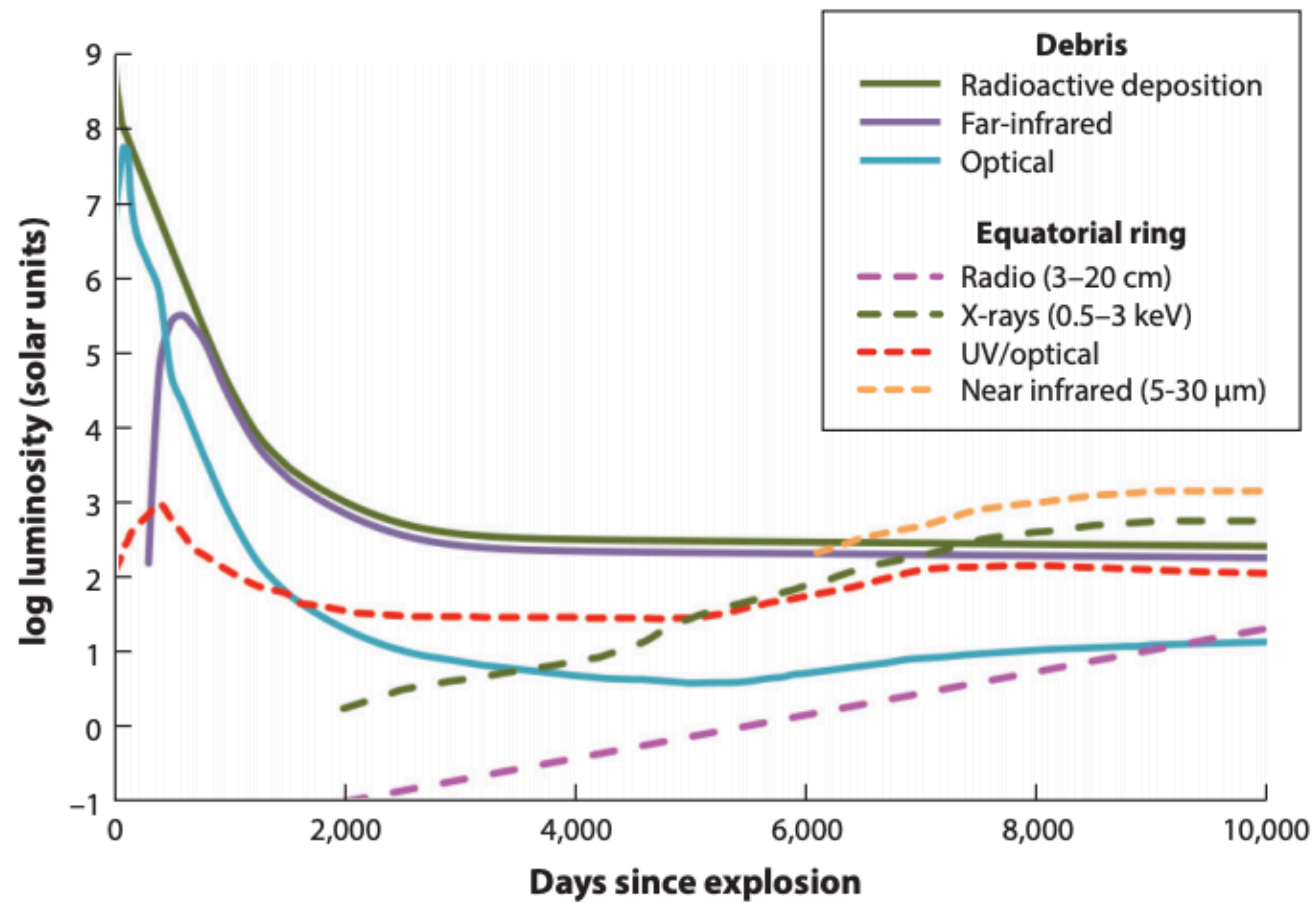
Supernova 1987A 23.
Februar 1987



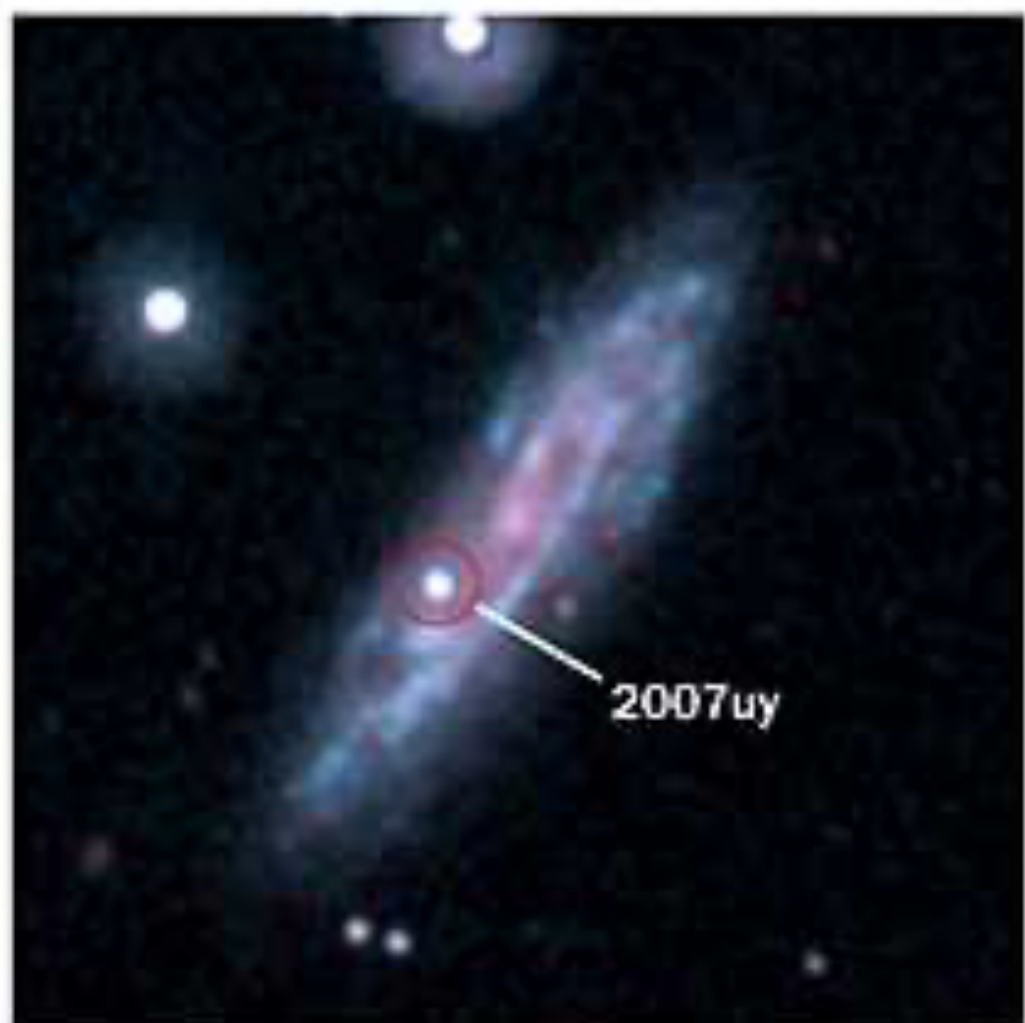
SN 1987A



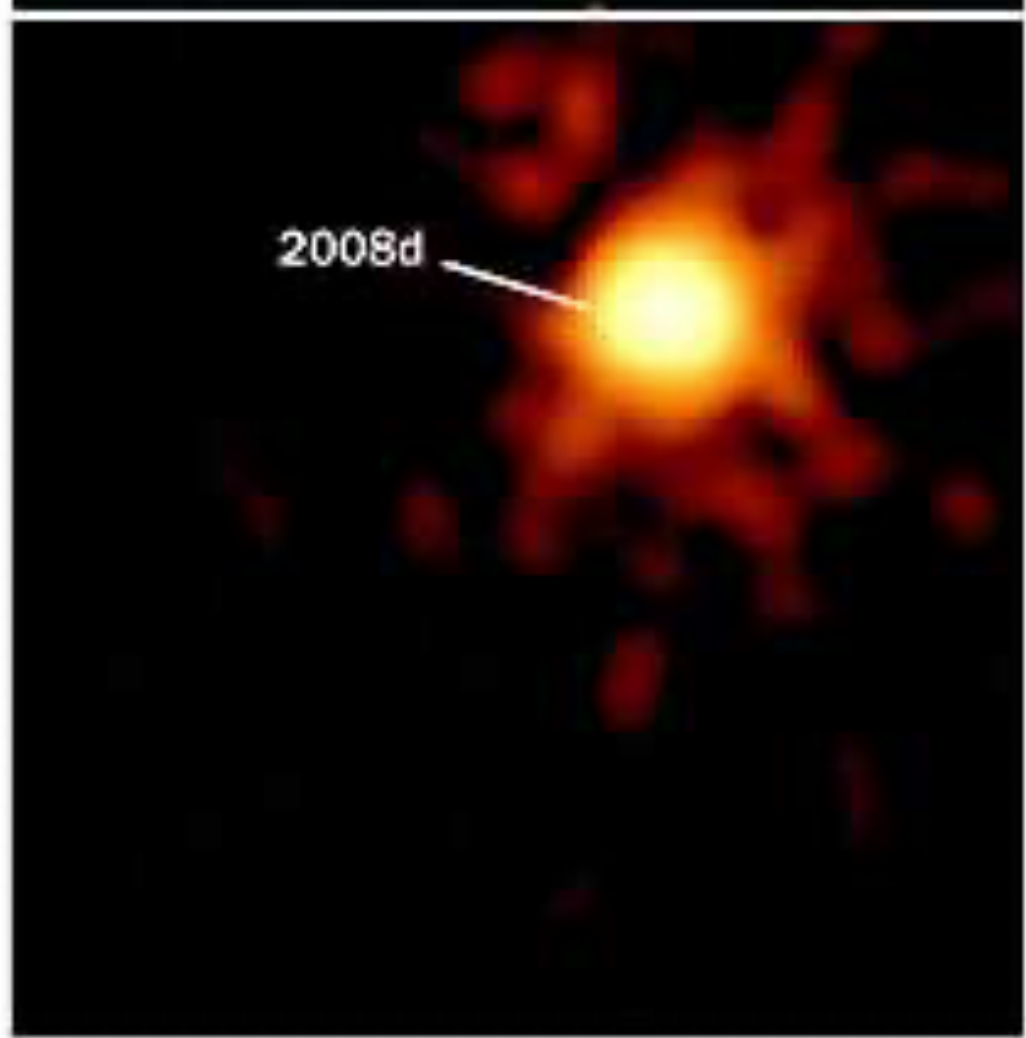
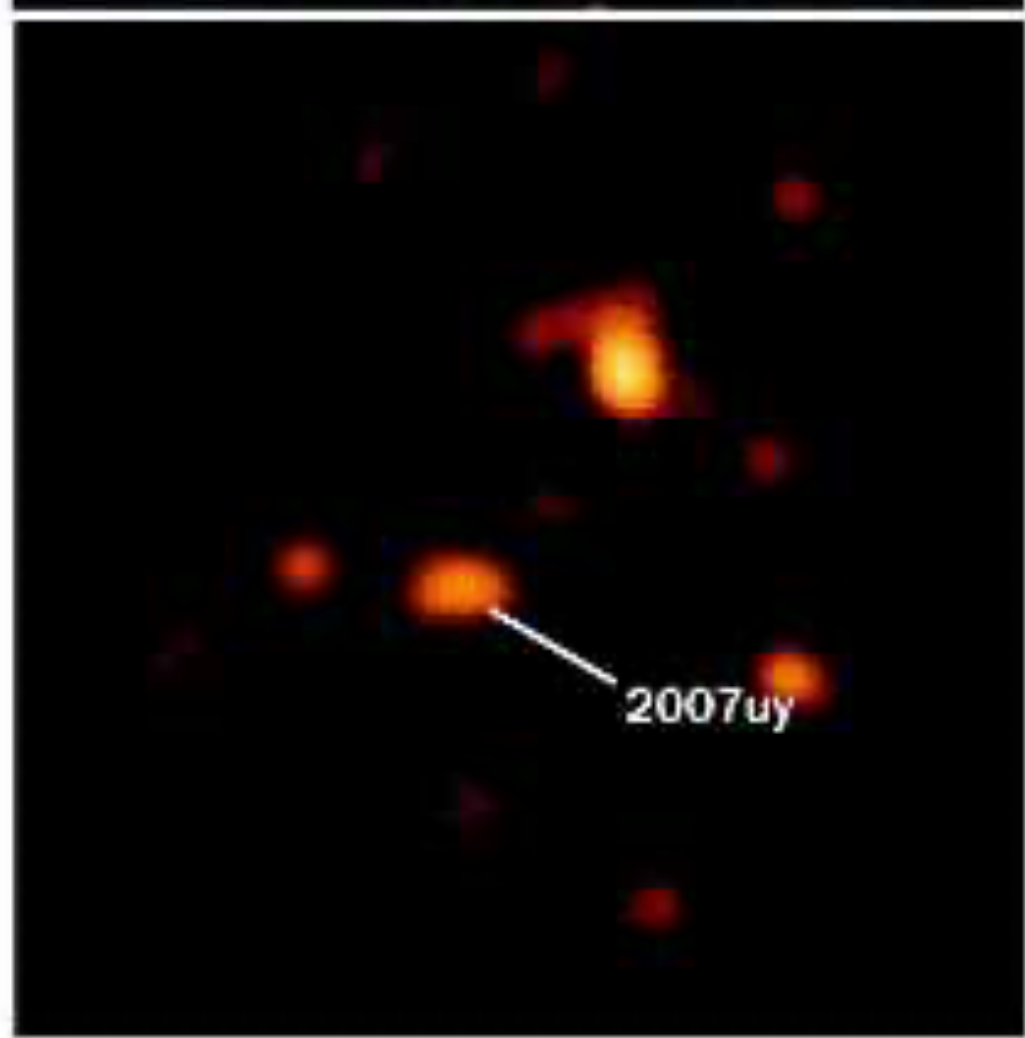
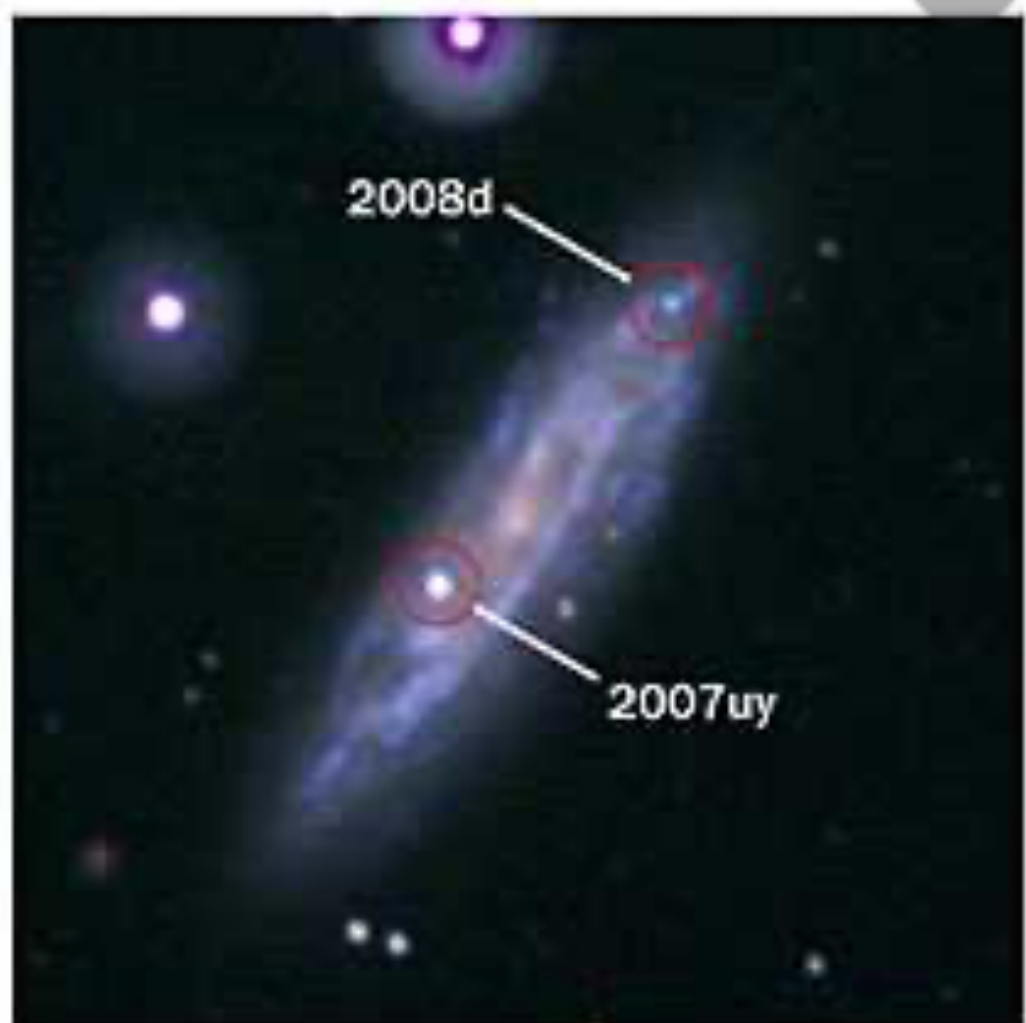
McCray & Fransson 2016



January 7, 2008

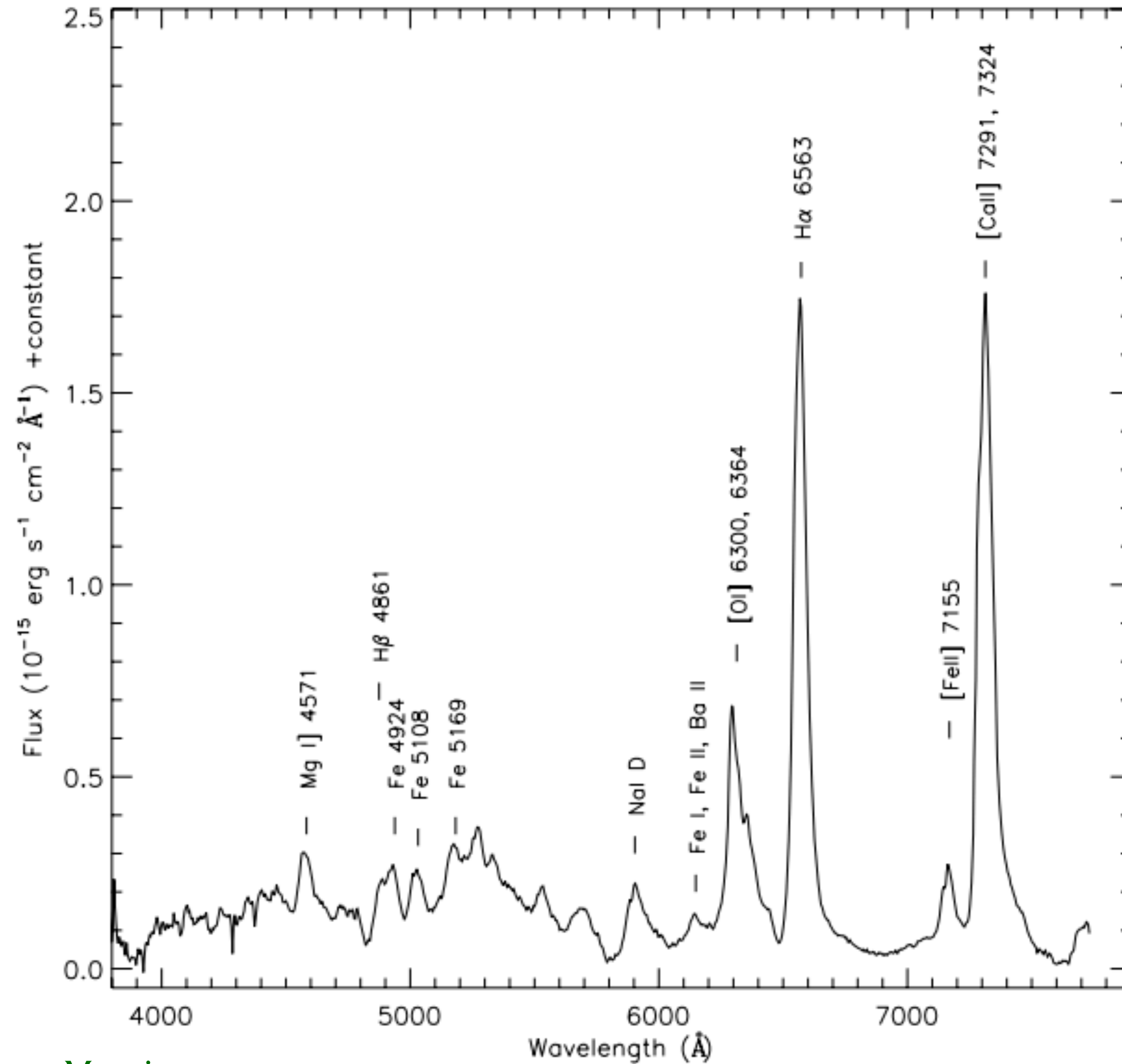


January 9, 2008



A Type IIP prototype : SN 2004et

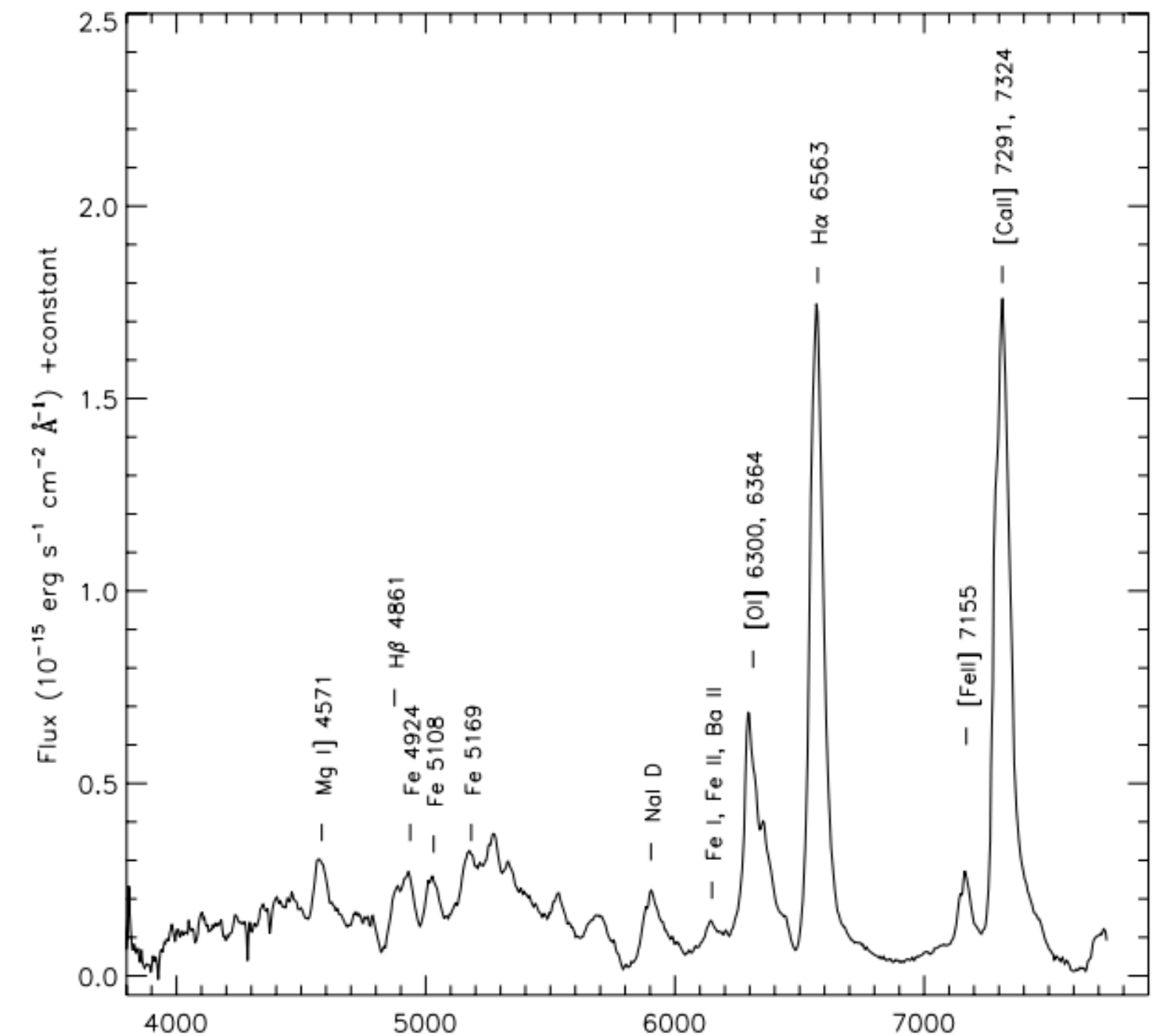
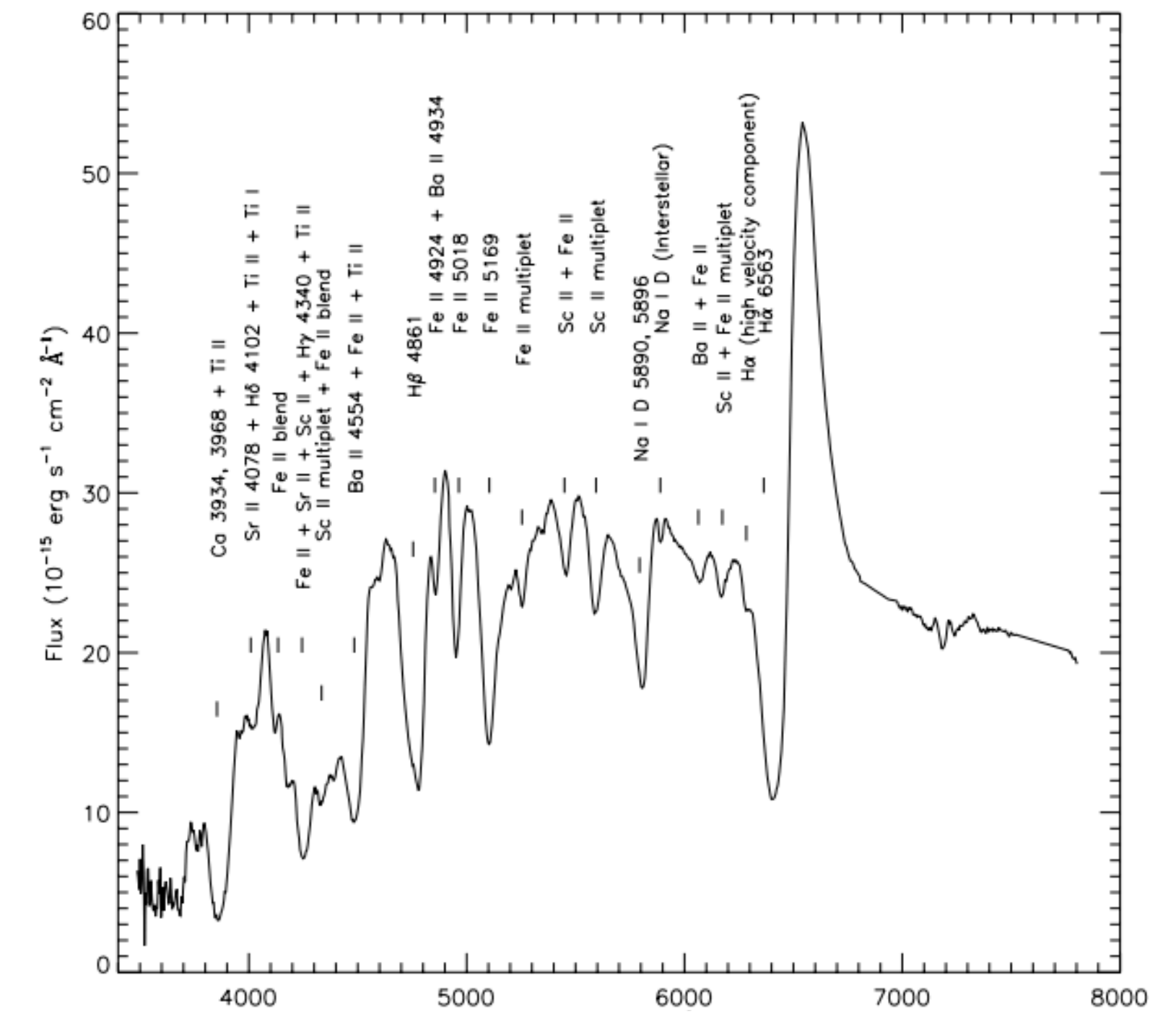
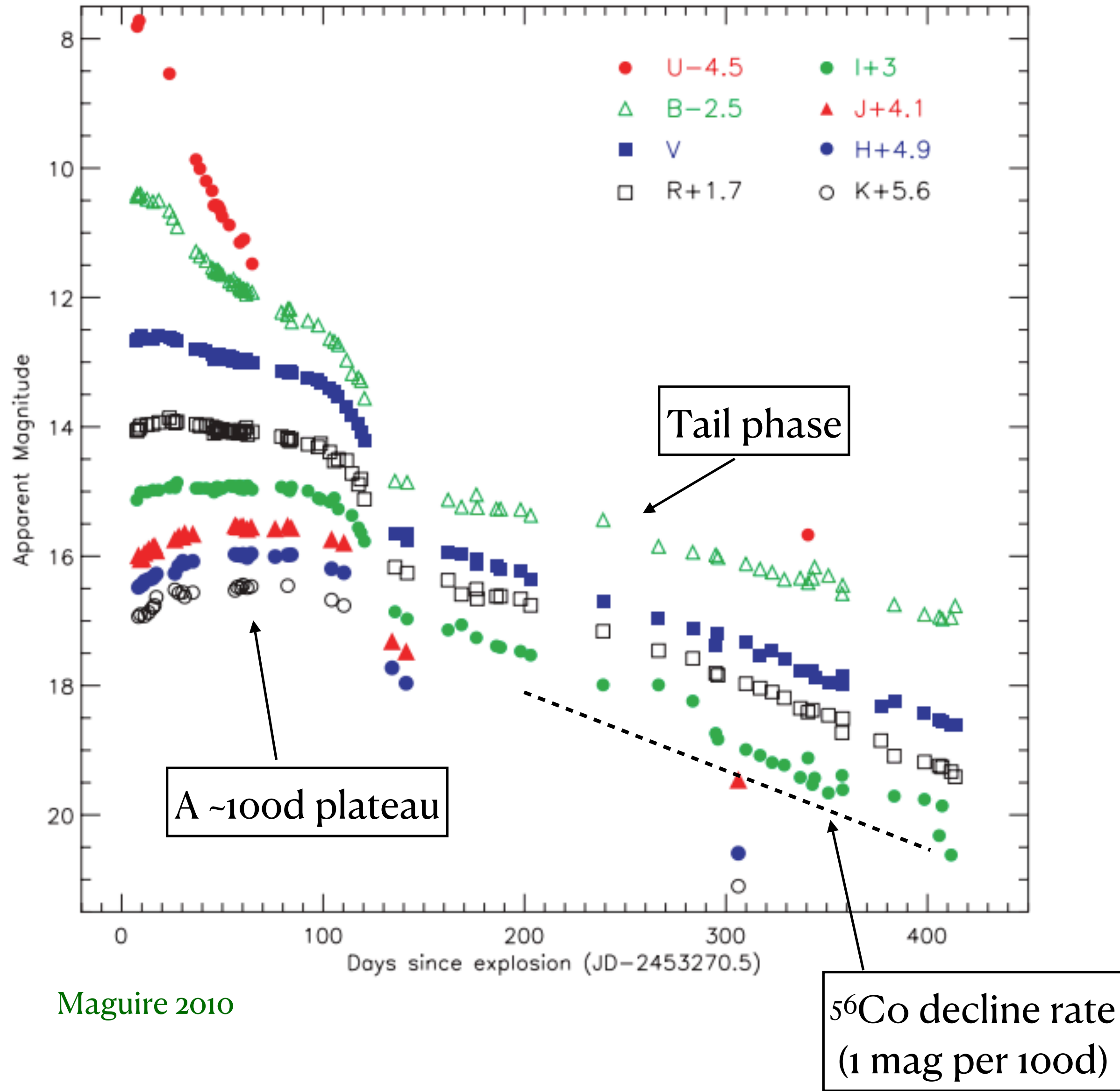
Nebular spectrum, 400d

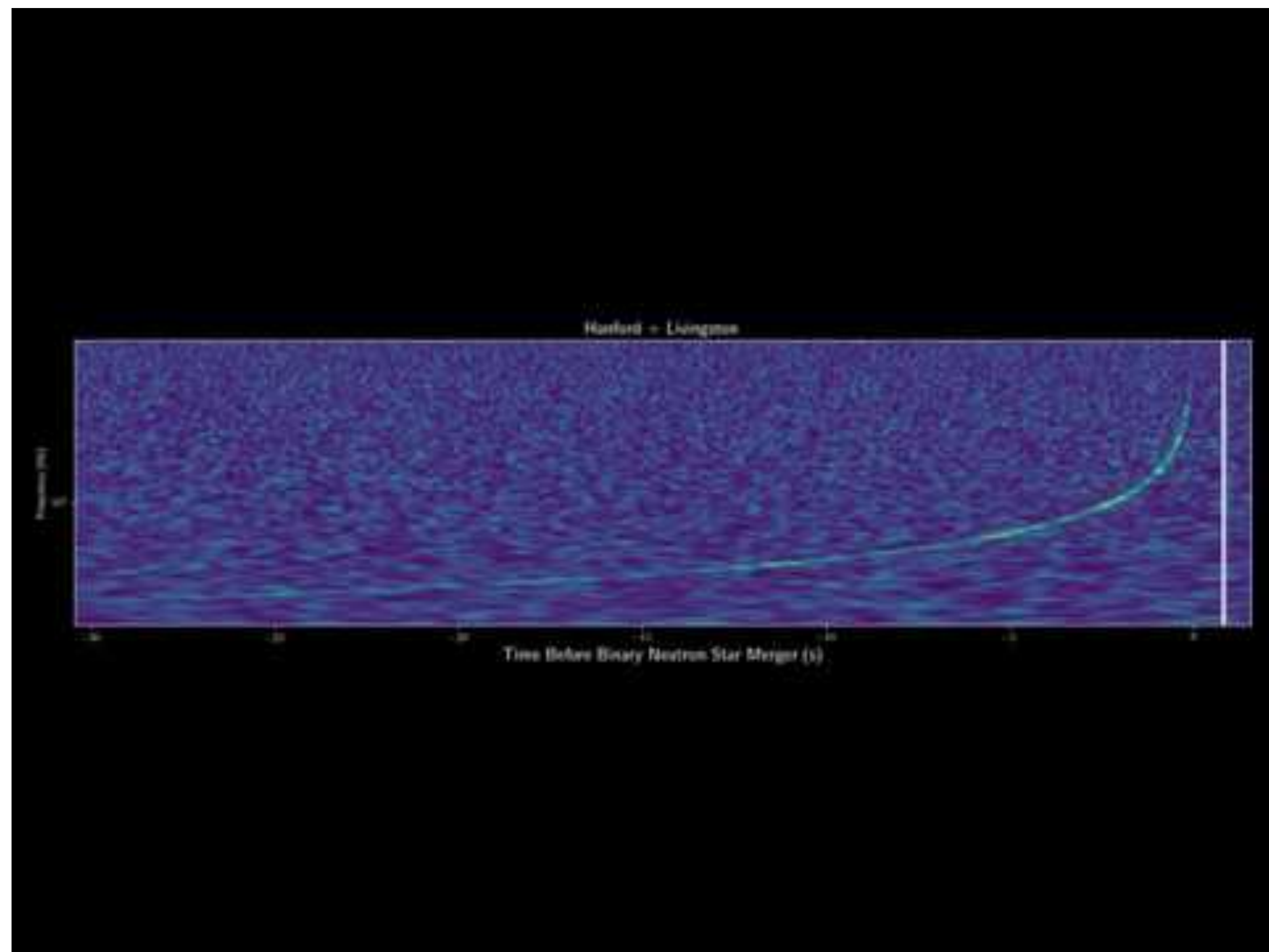


- Strong lines from Mg I, Na I, O I, H I, Fe II, Ca II
- Expansion velocities ~ 2000 km/s

A Type IIP prototype : SN 2004et

Light curve in different photometric bands





Mass loss

The star can lose mass in two principal ways:

- 1) Winds
- 2) Binary mass transfer.

Much of SN research goes towards constraining which of these mechanisms are at play when.