

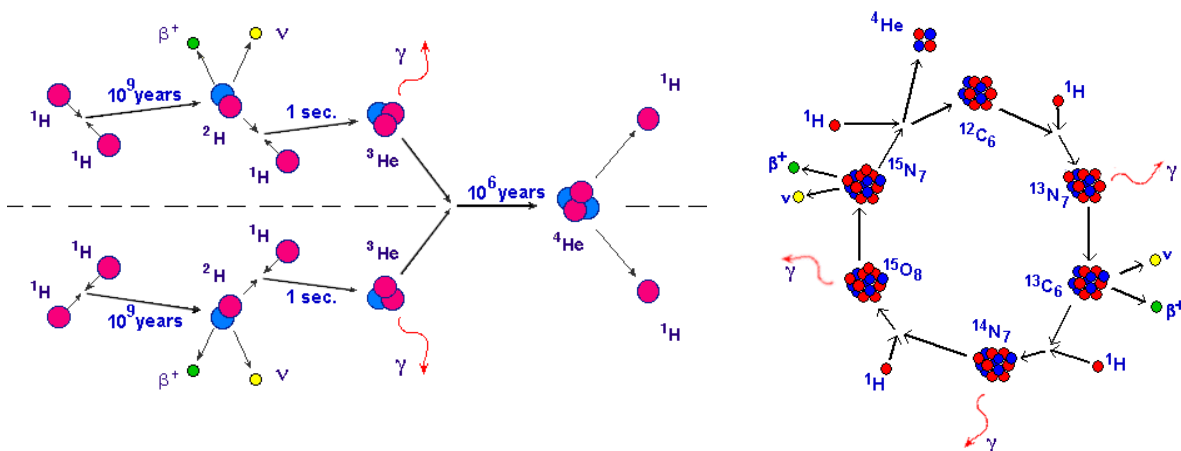
Nucleosintesi

Introduzione

Il decadimento radioattivo dei nuclei instabili è uno dei principali processi di produzione di fotoni gamma di bassa energia. I nuclei instabili sono il risultato di complesse reazioni nucleari che producono isotopi radioattivi intermedi. I processi che possono portare alla produzione di fotoni gamma sono essenzialmente due:

- il decadimento gamma che produce una transizione da uno stato eccitato del nucleo ad uno di minore energia con emissione di un fotone gamma avente energia pari alla differenza di energia tra i due stati
- il decadimento beta che può provocare l'emissione di positrone, il quale, una volta termalizzato (cioè portato ad un basso livello di energia cinetica), può annichilirsi con un elettrone e provocare la ben nota emissione di due fotoni da 511 keV.

I luoghi di produzione di questi elementi instabili sono gli strati interni delle stelle, le esplosioni di supernovae e novae, e regioni del mezzo interstellare dove avvengono collisioni di nuclei atomici con raggi cosmici di elevata energia.



Cicli nucleari all'interno delle stelle

L'universo che cambia

La composizione iniziale dell'universo era stabilita dalla nucleosintesi primordiale avvenuta pochi istanti dopo il BIG BANG. Il gas nucleare primordiale era costituito per il 76% da Idrogeno e in parte molto minore deuterio, il 24% da ^3He e ^4He con prevalenza di ^4He e tracce di 10 parti per milione di ^7Li e ^6Li . La nucleosintesi stellare ha portato alla formazione di elementi più pesanti che

gli astronomi chiamano metalli. L'osservazione degli isotopi radioattivi nella banda di energia gamma consente di studiare l'evoluzione chimica dell'universo e i procedimenti di "inquinamento" del gas interstellare con i metalli.

Regole fondamentali

Gli isotopi radioattivi vanno distinti in tre categorie: gli isotopi a tempo vita breve (qualche ora) che sono destinati a permanere nella regione di produzione, gli isotopi a vita media (un centinaio di giorni) che possono spargersi nella regione circostante la sorgente ed infine gli isotopi di lunga durata (10^6) anni che possono allontanarsi anche di diverse centinaia di anni luce.

Le famiglie isotopiche più importanti e osservate in astronomia gamma sono elencate nella seguente tabella:

isotopo	Decadimento	Fotone gamma	Vita media	Sorgente
^7Be	$^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}$	478 keV	77 giorni	Novae
^{56}Ni	$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	847 – 1238 keV	111 giorni	Supernovae
^{57}Ni	$^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$	122 keV	390 giorni	Supernovae
^{22}Na	$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + e^+$	1275 – 511 keV	3,8 anni	Novae
^{44}Ti	$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$	1156 – 68 – 78 keV	89 anni	Supernovae
^{26}Al	$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + e^+$	1809 – 511 keV	$1,04 \cdot 10^6$ anni	Supernovae, Novae
^{60}Fe	$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co}$	59 – 1173 – 1332 keV	$2 \cdot 10^6$ anni	Supernovae
e^+	$e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$	511 keV	$\sim 10^5$ anni	Supernovae, Novae

L'intensità di una specifica riga in emissione gamma ci permette di ricavare l'abbondanza di nuclei X radioattivi:

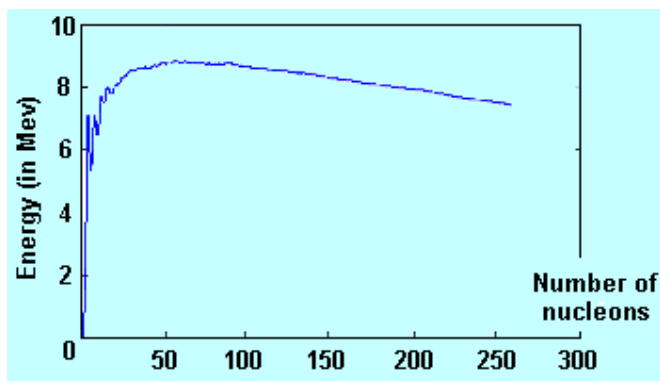
$$n_X = I_\gamma 4\pi \cdot d^2 \tau_X$$

I_γ flusso della riga
 τ_X tempo di dimezzamento

Nel caso siano possibili più modi di decadimento occorre calcolare la probabilità di ciascun decadimento per poi risalire alla quantità originale

$$n_{X0} = n_X \cdot e^{t/\tau_X}$$

L'energia di legame per nucleone generalmente si attesta sugli 8 MeV mentre la differenza di energia tra uno stato e il suo successivo cade nell'intervallo compreso tra 100 keV e 2 MeV. È quindi normale che le principali emissioni gamma prodotte da decadimento radioattivo cadano in questo intervallo di energie.



Esiste una terza reazione responsabile della produzione di nuclei instabili, questa reazione è la cattura neutronica. La sua importanza è legata all'assenza di carica per il neutrone che, non risentendo della repulsione Coulombiana, è anche responsabile della produzione di tutti gli isotopi più pesanti del ^{56}Fe . Infatti il ^{56}Fe è

l'elemento di minore energia nucleare. Tutti gli elementi sono destinati a convertirsi in questo isotopo del Ferro attraverso le reazioni nucleari di fusione o fissione. Il passaggio dal ^{56}Fe ad un elemento di massa nucleare maggiore non produce energia ma la richiede. In queste condizioni solo un neutrone energetico può produrre elementi più pesanti cedendo la sua energia cinetica. In realtà il neutrone libero non è una particella stabile e presenta un tempo di vita medio di circa 8 minuti. Queste reazioni devono quindi essere veloci e avere luogo in istanti in cui si liberano grandi quantità di neutroni. Queste condizioni vengono raggiunte soltanto durante l'esplosione di supernova e l'espulsione dei gusci esterni.

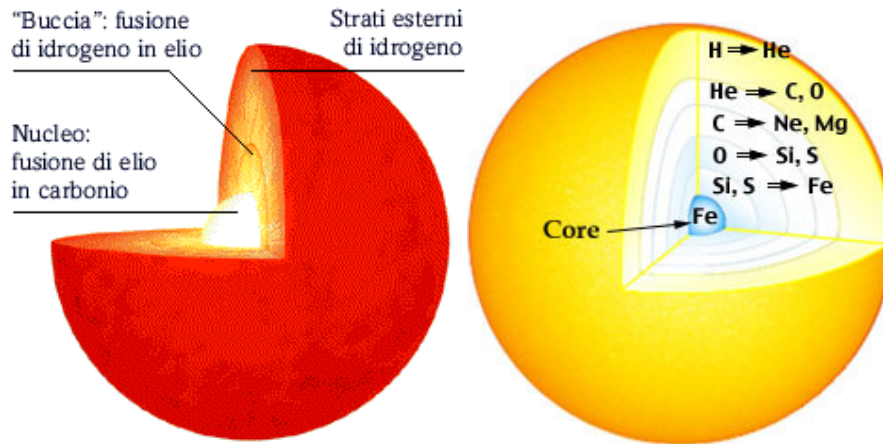
Regioni dove avviene la nucleosintesi

Il caso delle supernovae

Le regioni in cui avvengono i processi di nucleosintesi presentano parametri fisici molto differenti perché le reazioni in gioco, avvengono in condizioni fisiche molto diverse tra loro. Ad esempio la temperatura può variare di 3 ordini di grandezza: dai 10^6 °K del bruciamento dell'idrogeno a densità di 100 g/cm^3 a temperature di 10^9 °K con densità di 10^{12} g/cm^3 necessari per la sintesi del Ferro mediante fusione di nuclei di silicio¹.

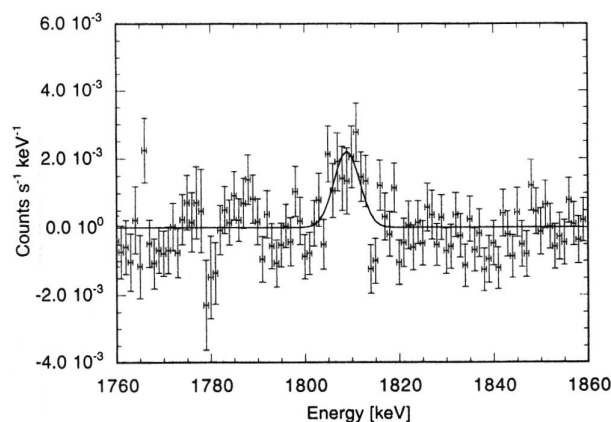
Durante la normale attività stellare queste reazioni producono fotoni gamma che vengono assorbiti e riemessi con energia leggermente inferiore provocando il riscaldamento della materia attraversata.

¹ Ricordiamo che la densità della materia ordinaria è dell'ordine di qualche g/cm^3



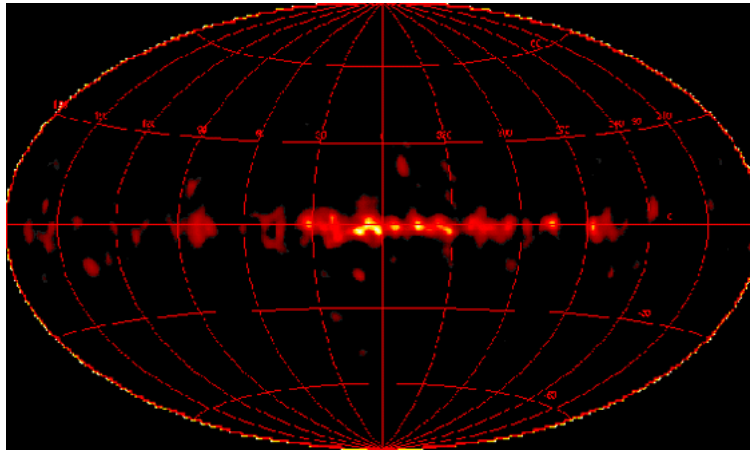
Dal punto di vista dell'astronomia gamma assumono un interesse particolare le stelle con massa superiore alle 25 masse solari. In queste stelle il bruciamento dell'idrogeno dura qualche milione di anni per proseguire successivamente con il bruciamento degli elementi più pesanti. Questi bruciamenti avvengono ad un ritmo molto più veloce e hanno una durata molto più breve di quella del bruciamento dell'idrogeno, ad esempio in una stella di 25 masse solari si esauriscono le scorte di carbonio in 600 anni e quelle di silicio in un solo giorno!

Nelle stelle supergiganti la fusione dell'idrogeno, dell'elio e del carbonio avvengono in gusci esterni mentre nel centro si verifica la fusione del magnesio. Questi gusci si arricchiscono di parecchi elementi pesanti, spesso si tratta di nuclei instabili e radioattivi.



La riga del ^{26}Al

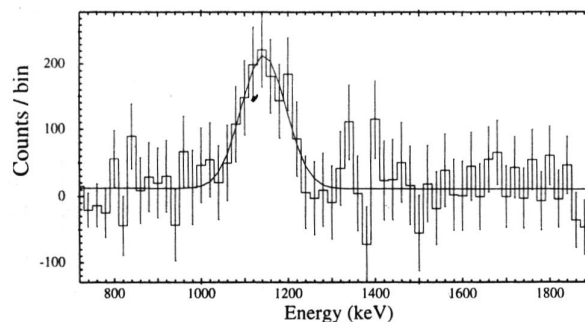
Nelle supergiganti rosse l'isotopo ^{26}Al è prodotto con elevata efficienza nei gusci interni dove avviene la fusione del magnesio. Moti convettivi possono portare rapidamente l'isotopo ^{26}Al nei gusci più esterni della stella dove gli intensi venti stellari che caratterizzano le supergiganti rosse lo trascinano nel mezzo interstellare.



Mappa del ^{26}Al nella galassia

Gli eventi esplosivi di supernovae e novae sono i luoghi primari di nucleosintesi. Infatti queste esplosioni rilasciano una grande quantità di energia sotto forma di particelle accelerate. Mentre il nucleo di queste stelle, composto da Ferro, collassa fino al raggiungimento della situazione limite di stella di neutroni o di buco nero, gli strati più esterni vengono espulsi a velocità superiori ad un decimo della velocità della luce.

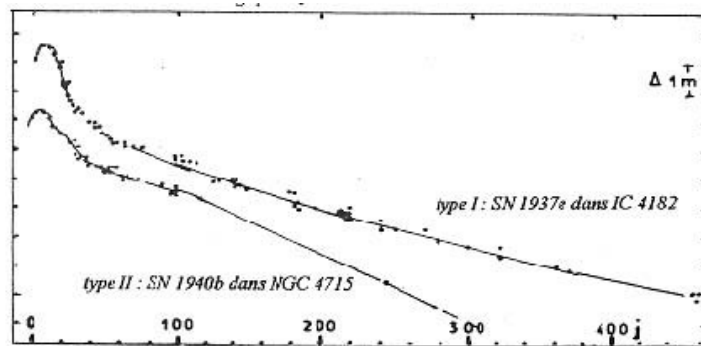
Nel nucleo un decadimento β inverso compatta protoni ed elettroni nei neutroni producendo anche in grandi quantità particelle neutre e di massa quasi nulla chiamate neutrini. A quelle densità i neutrini hanno una grossa probabilità di interagire con la materia producendo un'onda d'urto di compressione, in questo fronte d'onda la nucleosintesi di elementi pesanti avviene ad un tasso elevato tramite processi di cattura neutronica veloce. Il fronte d'onda creatosi è in grado di fornire energia cinetica a sufficienza ai gusci sovrastanti scaraventarli tutti nel mezzo interstellare con una violenta esplosione.



Riga del ^{44}Ti in Cas-A

In questi gusci durante l'esplosione possono prodursi isotopi radioattivi del ^{56}Ni e ^{44}Ti . Il ^{56}Ni è anche responsabile della luminosità delle supernovae settimane e mesi dopo l'esplosione

(esponenziale per quanto riguarda la potenza emessa perché la scala delle magnitudini è una scala logaritmica).



Curva di luce di Supernovae

Quali sono allora le emissioni gamma dai resti di supernovae?

Gli isotopi più appariscenti sono il ^{56}Ni e ^{57}Ni che forniscono una prima mappa morfologica del resto di supernova. L'emissione gamma del ^{44}Ti invece proviene da gas espulso da strati più profondi e fornisce un'importante indicazione sul moto in espansione dei gusci di supernova espulsi. Queste emissioni non si rendono visibili durante l'esplosione ma soltanto qualche mese più tardi quando l'involuppo in cui sono stati prodotti gli isotopi radioattivi diventa trasparente alle emissioni di fotoni gamma.

Il caso delle novae

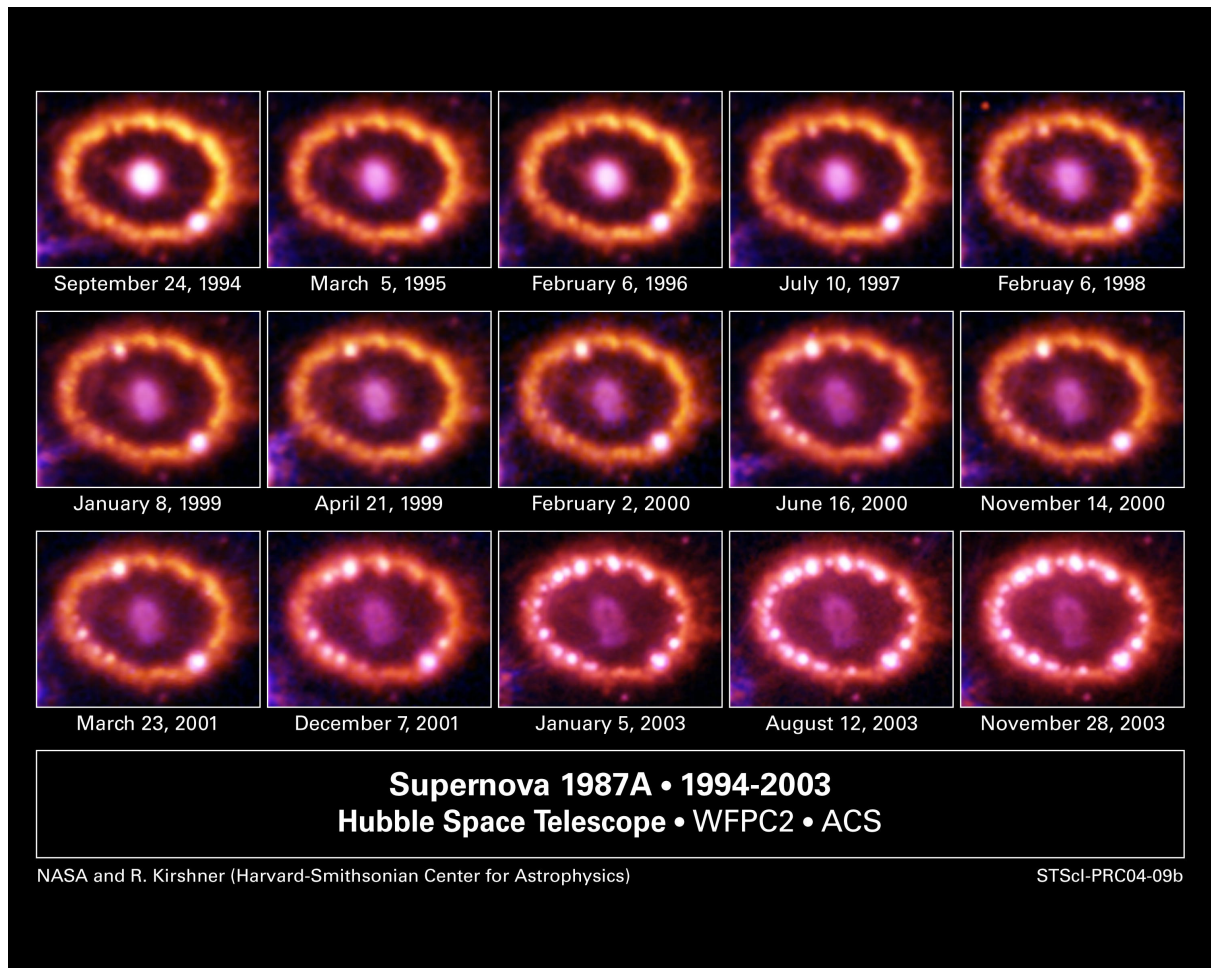
La nova è prodotta da un evento di fusione termonucleare che avviene sulla superficie di una stella collassata, generalmente una nana bianca, appartenente ad un sistema binario stretto. L'evento non è distruttivo come quello di supernova, quindi non bisogna aspettarsi di osservare nei residui emissione gamma di elementi pesanti. Tuttavia si producono isotopi relativamente leggeri che sono radioattivi e possono emettere fotoni gamma come ^{19}F , ^{15}N e ^{13}C .

Osservazioni spettroscopiche degli involucri di novae hanno messo in evidenza la riga in emissione a 511 keV dell'annichilazione elettrone-positrone, segno che successivamente all'esplosione superficiale avvengono alcune reazioni caratterizzate da decadimento β . La teoria ci dice che dovrebbero esistere due tipi di novae, quelle legate a nane bianche composte da elementi relativamente leggeri come Carbonio e Ossigeno e quelle composte da elementi più pesanti come il Sodio. L'osservazione gamma è uno strumento eccezionale per discriminare le due classi. Le novae associate a nane bianche al sodio produrrebbero infatti ^{22}Na , un isotopo radioattivo gamma con tempo caratteristico di 3,8 anni. Questo è uno dei compiti di INTEGRAL.

La supernova 1987A

Prima del 1987 gli astrofisici erano già convinti che l'osservazione delle righe prodotte dagli elementi radioattivi sintetizzati durante l'esplosione di una supernova avrebbero fornito delle informazioni importantissime sui processi di nucleosintesi esplosiva, responsabili della formazione di molti elementi presenti in tutto l'universo. Tra i numerosi isotopi sintetizzati durante l'esplosione, il cobalto, ^{56}Co , caratterizzato da una vita media di 114 giorni, è quello che si presenta in maggior quantità nei mesi che seguono l'esplosione. Il ^{56}Co è il prodotto del decadimento del Nichel, ^{56}Ni , un isotopo sintetizzato in grande quantità durante l'esplosione, la cui vita media è di soli 9 giorni. Le speranze degli astrofisici furono confermate in modo spettacolare grazie alle osservazione della supernova 1987a, comparsa il 24 febbraio 1987 nella grande Nube di Magellano.

Nessun telescopio gamma era in funzione nei giorni immediatamente successivi all'esplosione. Bisognò attendere fino all'agosto 1987 perchè lo strumento HEXE, a bordo del modulo Kvant, che era stato appena attaccato alla stazione spaziale MIR (allora sovietica), potesse osservare SN 1987a nell'intervallo tra 20 e 200 keV. 185 giorni dopo l'esplosione, HEXE scopriva una componente spettrale continua che arrivava fino a 200 keV e che veniva rivelata fino alla fine del 1988. Era ciò che rimaneva dei fotoni gamma emessi durante il decadimento del ^{56}Co in ferro, ^{56}Fe , degradati da numerose diffusioni Compton, avvenute durante l'attraversamento del guscio della supernova. Sebbene per nulla omogeneo, il guscio è totalmente opaco ai fotoni gamma nei mesi immediatamente seguenti l'esplosione: all'interno di esso i fotoni gamma interagiscono numerose volte, perdendo, insieme all'energia, la loro identità di riga nucleare. Con il passare del tempo il guscio, espandendosi, diventa più sottile. Il numero di interazioni diminuisce ed il guscio diventa più trasparente: la radiazione continua diminuisce d'intensità, un fenomeno chiaramente osservato da HEXE, e le zone meno dense del guscio cominciano a far filtrare i fotoni gamma senza che questi abbiano subito interazioni. Le righe nucleari, attese con tanta impazienza, sono finalmente rivelabili.



Il resto della supernova 1987A

L'emissione di righe nucleari fu scoperta a partire dalla fine del 1987 dallo spettrometro gamma a bordo del satellite americano SMM (Solar Maximum Mission) e confermata da numerosi spettrometri con rivelatori al Ge, caratterizzati da una risoluzione in energia di gran lunga più elevata. Due righe, risultanti dal decadimento del ^{56}Co in ^{56}Fe , furono rivelate a 847 keV e 1,238 MeV. Le osservazioni gamma di SN 1987a hanno dunque fornito una conferma storica di tutte le teorie classiche sull'origine degli elementi. L'intensa emissione gamma continua, osservata da HEXE a partire dal 185° giorno, non era attesa prima del 300° giorno dopo l'esplosione. Mentre l'intensità dell'emissione gamma e la sua evoluzione sono certamente compatibili con i modelli, per una produzione complessiva di $0.08 M_{\odot}$ di ^{56}Ni , lo studio ad alta risoluzione delle righe ha dimostrato che i modelli erano ben lungi dall'aver previsto fino a che punto la ripartizione degli isotopi radioattivi potesse essere inhomogenea e la distribuzione macroscopica della materia del guscio potesse essere lontana dall'ipotizzata simmetria sferica.