

# Carlo Castagnoli

---

Nel centenario  
dalla nascita

1924-2024

Opuscolo realizzato in occasione del Centenario dalla nascita  
dell'Accademico Virgiliano, prof. Carlo Castagnoli

Premessa a cura di LEDO STEFANINI  
presidente della Classe di Scienze matematiche, fisiche e naturali

CARLO CASTAGNOLI, *Morte delle stelle: le supernova storiche e quella del 1987*  
in *Grandi modelli scientifici del Novecento*, Mantova, ANV, Dicembre 1990

Accademia Nazionale Virgiliana  
Mantova, 13 dicembre 2024

LEDO STEFANINI

## OMAGGIO A CARLO CASTAGNOLI, FISICO MANTOVANO

Nel 1989 Carlo Castagnoli raccolse le relazioni tenute presso l'Accademia Nazionale Virgiliana da sette dei più illustri scienziati del tempo: Bruno Bertotti, Piero Galeotti, Carlo Rubbia, Raoul Gatto, Arturo Falaschi, Arnaldo Longhetto e da lui stesso. La raccolta venne pubblicata come quaderno degli *Atti e Memorie* dell'Accademia l'anno successivo, sotto il titolo: «Grandi modelli scientifici del Novecento» che, a distanza di 34 anni, continua a presentare grandi motivi di interesse. Per onorare la memoria di uno fra i suoi membri più illustri, l'Accademia ripropone l'originale contributo di Castagnoli su «Morte delle stelle: le supernovae storiche e quella del 1987», in cui esamina problemi astrofisici relativi al fenomeno delle supernovae.

### GENERALITÀ SULLA FINE DELLE STELLE DI GRANDE MASSA

Per fondere due nuclei è necessario vincere la loro repulsione coulombiana, che aumenta rapidamente al crescere del numero atomico. La fusione di elementi complessi (Carbonio, Ossigeno, Neon) richiede temperature sempre più elevate, che si realizzano solo nelle stelle che partono con masse molto superiori ad una massa solare.

Per la fusione dell'idrogeno si richiede una temperatura di  $4 \times 10^7 K$ , con una densità di  $5 \times 10^3 \frac{kg}{m^3}$ , per quella dell'elio una temperatura di  $20 \times 10^7 K$ , con una densità di  $7 \times 10^5 \frac{kg}{m^3}$ , per quella dell'ossigeno di  $150 \times 10^7 K$ , con una densità di  $10^{10} \frac{kg}{m^3}$ , per quella del silicio di  $270 \times 10^7 K$ , con una densità di  $3 \times 10^{10} \frac{kg}{m^3}$ . Dalla fusione del silicio si ottiene il ferro: oltre non si può andare.

I nuclei di numero atomico (e massa) maggiore si producono nelle fasi di collasso del nucleo di ferro, quando si crea un ambiente ricco di neutroni di alta energia.

Prossima alla fine della sua vita, una stella di massa iniziale superiore a 8 masse solari, diventa una supergigante rossa, con dimensioni paragonabili a quelle dell'orbita di Giove. L'energia della stella non viene dal nucleo centrale di ferro (che non può fondere in nuclei più pesanti), ma è distribuita in una serie di strati sferici concentrici dove la fusione è consentita.

Finito il combustibile, il *core* collassa per gravitazione dando origine a una stella di neutroni. Gli strati esterni collassano rimbalzando sul *core* centrale cosicché si genera un'onda d'urto che spazza l'atmosfera, fino ad arrivare all'esterno della stella. Solo ora un'intensa radiazione di neutrini annuncia la supernova. La luce si produce solo qualche ora dopo.

## LA SUPERNOVA SN 1987A (NUBE DI MAGELLANO)

Il 23 febbraio 1987, nella Grande Nube di Magellano, si manifestò una supernova di una potenza quale non si era mai osservata, che fornì agli scienziati l'opportunità di studiare direttamente le fasi della morte di una grande stella. Il meraviglioso corpo celeste emetteva luce come cento milioni di soli ed ebbe la durata di alcuni mesi.

La Supernova SN1987A fu scoperta da Ian Shelton ed Oscar Duhalde dell'Osservatorio Las Campanas in Chile e, dopo poche ore, indipendentemente, da Albert Jones in Nuova Zelanda. Il 4 marzo fu osservata nell'ultravioletto da Astron, il più grande telescopio del tempo nella banda ultravioletta.

Due o tre ore prima dell'arrivo dell'immagine nel visibile, arrivò un *burst* di neutrini registrato da tre diversi osservatori neutrinici. Questo, probabilmente provocato dall'emissione di neutrini che si verifica quando il *core* della stella collassa e precede l'emissione di luce visibile. Infatti, la trasmissione di luce visibile si attiva solo dopo che l'onda d'urto raggiunge la superficie della stella.

Alle 7 e 35 (T.U.) Kamiokande II (il grande osservatorio giapponese di neutrini) registrò 11 antineutrini; IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven Detector, operativo dal 1982 al 1991) 8 antineutrini e Baksan (situato alle pendici del Monte Elbrus) 5 antineutrini in un getto della durata di 13 secondi.

Circa 3 ore prima lo scintillatore liquido del Monte Bianco registrò il passaggio di 5 neutrini, che però si giudicò non provenissero dalla supernova.

Sebbene il numero dei neutrini contati fosse solo 24, si trattava di un valore significativo rispetto al fondo precedentemente osservato. Fu la prima volta che vennero osservati neutrini provenienti da una supernova, e l'evento segnò la nascita dell'astronomia neutrinica. Le osservazioni erano in accordo con i modelli standard di supernova che prevedono l'emissione del 99% dell'energia del collasso sotto forma di neutrini. E anche con la previsione teorica con il numero teorico di neutrini:

1058 con un'energia totale di 1046 J.

Le misure compiute sulle particelle consentivano anche di stabilire un limite superiore per la massa e la carica del neutrino e anche per il numero di *flavours* neutrinici e altre caratteristiche.<sup>1</sup> Per esempio, i dati dimostrano (con solo il 5% di incertezza) che la massa a riposo del neutrino elettronico è al massimo di 16 eV, ovvero un 30 milionesimo della massa di un elettrone.

---

<sup>1</sup> I neutrini sono di tre specie (chiamate *flavours*): il neutrino elettronico, il neutrino muonico, e il neutrino tau. Negli anni Sessanta ebbero inizio i primi esperimenti per la misura del flusso di neutrini elettronici emessi dal Sole. L'esperimento dimostrò che il flusso non si accordava con i valori previsti teoricamente. Furono avanzate molte ipotesi per spiegare la mancanza parziale di neutrini, fino a quando la misura del flusso di neutrini di tutte le specie si rivelò compatibile con il modello teorico. Si affermò l'idea che la previsione sul flusso di neutrini prodotti dal Sole era corretta e che i neutrini elettronici si convertivano in altri di diverso *flavour* nel viaggio verso la Terra. Il fenomeno è noto come «oscillazione neutrinica» e fu confermato in contesti diversi. Si tratta di un fenomeno spiegabile nell'ambito quantistico; ma che introduce un'altra difficoltà: che il neutrino abbia una massa.

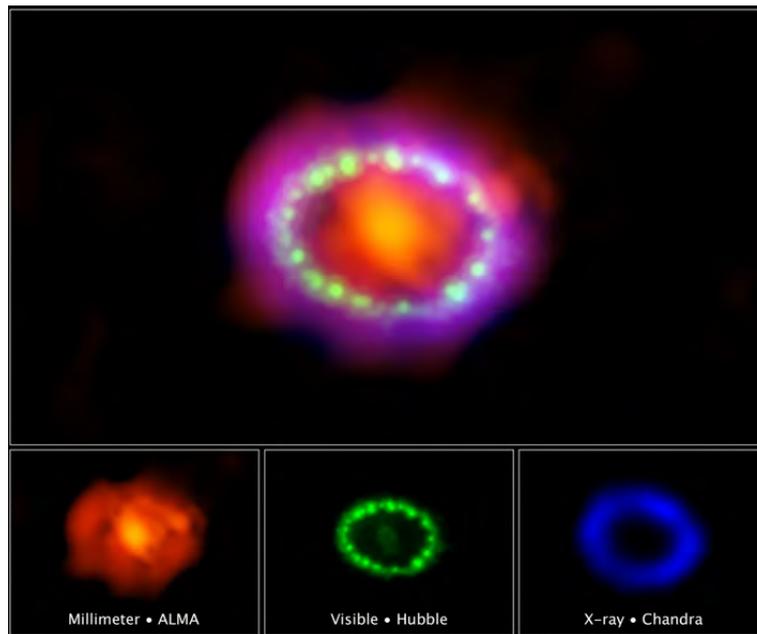


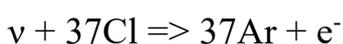
Fig. 1. Immagini dei resti della Supernova 1987A in luci diverse.

La sua distanza dal Sole era di 51,4 kparsec. Dopo 80 giorni dall'esplosione raggiunse il picco di magnitudine visuale apparente di circa 3, quindi visibile ad occhio nudo. La sua evoluzione venne accuratamente seguita su bande di differente lunghezza d'onda, dall'infrarosso all'ottica (con il telescopio Hubble Space) fino ai raggi X. La ricchezza e la qualità dei dati raccolti ha reso la SN1987A un laboratorio ideale per studiare la relazione fra la Supernova e i Supernova Remnants. Infatti, grazie alla sua giovinezza e vicinanza la SN rappresenta un'opportunità unica di gettare un ponte fra la SN progenitrice e i suoi *remnants*.

I neutrini sono particelle neutre che si possono presentare con tre 'sapori' diversi ma accomunati dal fatto che interagiscono in maniera estremamente debole con la materia. Inoltre mutano il loro 'sapore' mentre viaggiano nello spazio e nel tempo: fenomeno che i fisici definiscono *oscillazioni*.

A motivo delle oscillazioni, si presentò negli anni Sessanta uno dei più appassionanti gialli della fisica: il mistero della mancanza di una consistente parte dei neutrini elettronici emessi dal Sole, rispetto al numero atteso in base alla conoscenza della nostra stella e alla misura della sua luminosità. Il mistero dei neutrini mancanti si infittì quando si scoprì che anche i neutrini muonici, prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre, erano in numero minore rispetto a quelli attesi. La misteriosa scomparsa ha intrigato gli astrofisici fino a che, negli anni Ottanta si è capito che il fenomeno è dovuto alla capacità dei neutrini di mutare *sapore*.

I rivelatori di neutrini sono costituiti da grosse quantità di materiale situato in cavità sotterranee o miniere abbandonate, per proteggerli dai raggi cosmici e da tutti i tipi di radiazioni. Il rivelatore classico utilizza un enorme serbatoio contenente tetracloruro di carbonio nel quale un neutrino converte un atomo di cloro in uno di argon cioè nel quale avviene la reazione inversa del decadimento beta dell'argon 37:



Il fluido viene periodicamente trattato con elio, per raccogliere l'argon, in quanto il tempo di dimezzamento in cui l' $^{37}\text{Ar}$  si ritrasforma in cloro è di 37 giorni. La radioattività del gas così estratto permette di calcolare il numero di atomi di *Ar* prodotti. Con questi rivelatori si può conoscere il flusso medio neutrino nell'arco di un mese, ma non la direzione dei neutrini incidenti o la loro energia. Il rivelatore al cloro della miniera di Homestake, South Dakota, costruito alla fine del 1960, fu il primo a scoprire il deficit di neutrini provenienti dal Sole. Conteneva 520 tonnellate di  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  ed è rimasto operativo fino al 1998.

Da allora sono stati realizzati molti altri rivelatori di neutrini. Tra quelli in grado di misurare i flussi di neutrini prodotti dall'esplosione di supernovae possiamo ricordare il BAXAM, entrato in funzione nel 1980, che utilizza uno scintillatore liquido da 330 tonnellate, l'ICECUBE, inaugurato nel 2005, che utilizza un gigantesco cubo di ghiaccio, e il BOREXINO, entrato in funzione nel 2007, con uno scintillatore liquido da 300 tonnellate.

#### LA SUPERNOVA PER ECCELLENZA

È particolarmente significativo il fatto che Carlo Castagnoli inizi il suo contributo dedicato alle supernovae osservando che:

Nell'anno 1006, in cui Tedaldo di Canossa fece la donazione per il Monastero di San Benedetto in Polirone, è molto probabile che qualche nostro concittadino mantovano, la notte del 30 aprile, abbia assistito a un evento celeste straordinario (nebbia permettendo). Lo sappiamo dal *Chronicon* di Iohannis Venetus, cioè da un vicino di casa.

Chiosava Bernardi-Perini nella sua premessa al volume *Carlo Castagnoli. Un'antologia 1924-2005* (Fondazione Banca Agricola Mantovana, 2008): «c'è in questo *incipit* tutta l'affettuosa carità del natio loco, bilanciata da un salutare spruzzo di *humor*, di stampo anglosassone». E non possiamo non sorridere ancora oggi di questa apertura di un discorso molto denso di contenuti scientifici d'avanguardia. Un *excursus* storico sulle supernovae, che non trascura neppure di segnalare quella interpretata da Giovanni Veneto come cometa foriera di sventure. Oggi viene indicata con la sigla SN1006 del Lupus. Straordinariamente ampia doveva essere la cultura storica di Castagnoli se arrivava a segnalare le ricerche di Bessel e Biot.<sup>2</sup> Possiamo rimproverare al Maestro di aver evitato di citare le celebri supernove di casa: quella del 1572, detta «di Ticho Brahe» e quella del 1604, detta «di Keplero», che suscitavano l'interesse degli astrologi e dei grandi astronomi dell'epoca, tra i quali Galileo; ma forse erano temi sui quali era difficile dire qualcosa di nuovo. A noi rimane l'orgoglio di aver ospitato nelle antiche e venerabili sale dell'Accademia le profonde riflessioni fisiche di uno scienziato che ha lasciato un segno profondo nella storia dell'astrofisica italiana.

---

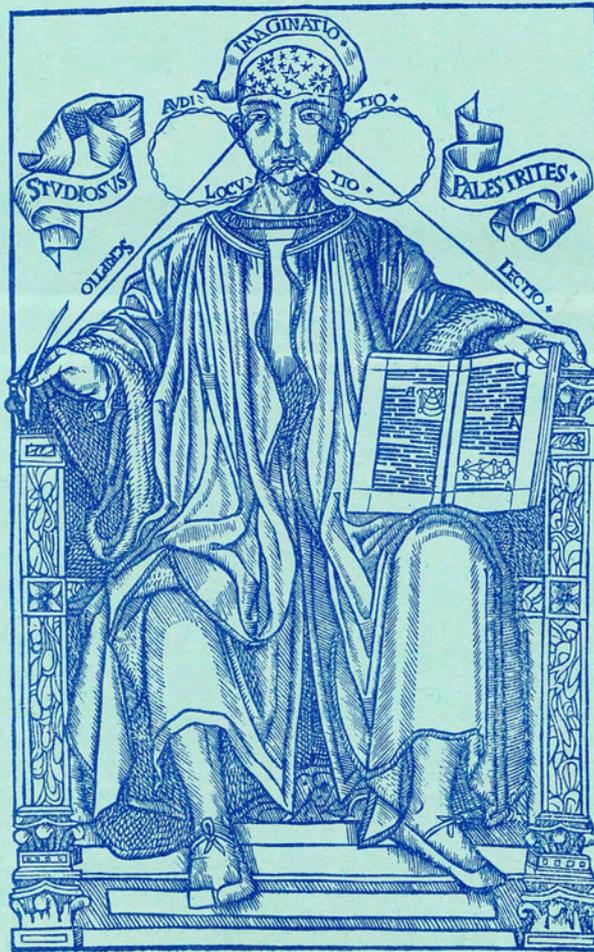
<sup>2</sup> J.B. BIOT, *Études sur l'astronomie indienne et sur l'astronomie chinoise*, Paris, Levy frères 1862.





ACCADEMIA NAZIONALE VIRGILIANA

# GRANDI MODELLI SCIENTIFICI DEL NOVECENTO



Mantova - Dicembre 1990

CARLO CASTAGNOLI

## MORTE DELLE STELLE: LE SUPERNOVAE STORICHE E QUELLA DEL 1987

*Direttore degli Istituti di Fisica  
della Università e di Cosmogeofisica del CNR di Torino*

### 1) LE SUPERNOVAE STORICHE

Nell'anno 1006, in cui Teodaldo di Canossa fece la donazione per il Monastero di S. Benedetto in Polirone, è molto probabile che qualche nostro concittadino mantovano, la notte del 30 aprile abbia assistito ad un evento celeste straordinario (nebbia permettendo).

Lo sappiamo dal *Chronicon di Iohannis Venetum*, cioè da un vicino di casa: «A quel tempo una cometa, il cui apparire sempre annuncia umane sventure, apparve nella regione Sud, e fu seguita da una grande pestilenza in tutti i territori di Italia e Venezia». Ma non si trattava di una cometa, come risulta da una descrizione più accurata. Negli *Annales Sangallenses Maiores* che i Benedettini hanno tenuto dal 915 al 1044, in quel giorno è scritto «Una nuova stella di inusuale grandezza apparve causando allarme. Fu interessante il fatto che essa prima si contrasse per un pò, poi si allargò ed infine si estinse. Essa fu poi vista per tre mesi in zona sud (in intimis finibus austri)». Questa descrizione di una nuova stella di intensità variabile è confermata dagli *Annales Beneventani* del Monastero di Santa Sofia (che vanno dal 750 al 1128): «Nel 25° anno del nostro maestro Pandolfo e nel 19° del nostro maestro Landolfo, suo figlio, una "clarissima" stella apparve producendo un grande splendore per 3 mesi».

Altre menzioni di questo evento celeste si leggono nel *Diversitate Temporum* (liber 1°) di Alberto da Metz e negli *Annales Mosomagenses* (Mousson). Noi oggi sappiamo che si trattava della Supernova apparsa nella costellazione del Lupus.

Questi brevi cenni storici servono a farci capire come questo fenomeno celeste sia così clamoroso da lasciare profonda traccia di sè, anche nell'Occidente e non solo nei documenti astronomici dell'Oriente (Cina e Corea) come per molto tempo (fino quasi a metà

del nostro secolo) si è creduto. Certo, anche di questa supernova l'Oriente ci dà traccia. Per esempio un documento della Corea ci dice «Durante il 9° anno di Mokchong una stella ospite (Konyo-sa) è stata vista ad ovest di Ti. I suoi raggi brillavano come se fosse su un disco d'oro».

E gli Arabi non sono da meno.

Alì ibn Ridwan nel suo Commentario sul Tetrabiblos di Tolomeo così scrive: «Vi descrivo uno spettacolo che io ho visto all'inizio dei miei studi. Lo spettacolo apparve nel segno dello Scorpione in opposizione al Sole. Il Sole quel giorno era 19° nel Toro e lo spettacolo al 19° nello Scorpione. Lo spettacolo era un grande corpo circolare, grande circa 2,5-3 volte Venere. Il cielo era splendente a causa della sua luce la cui intensità era ca. 1/4 di quello della luna piena. Esso rimase dove era e si muoveva giornalmente con il segno zodiacale finchè il Sole fu in sestile con esso (cioè a 60°) in Virgo quando scomparve all'improvviso. Poichè lo Scorpione è di cattivo presagio per la religione Islamica si combatterono aspre battaglie e alcune delle maggiori città furono distrutte. Capitarono incidenti ai re delle due città Sante (Mecca e Medina), ci fu siccità, fame e aumento dei prezzi e innumerevoli migliaia di persone morirono a causa delle armi, della fame e della pestilenza. E ciò durò per vari anni dopo lo spettacolo».

Naturalmente la SN1006 del Lupus non è la sola di cui abbiamo notizie, grazie ad un esteso lavoro di ricerca che, sia pure iniziato da Bessel e Biot più di un secolo fa, ha avuto il suo grande sviluppo negli ultimi due decenni per merito soprattutto degli storici (astronomi) cinesi e che è terminato da un paio di anni.

Sotto la guida di Zhuang Weigeng e di Li Qibin, dell'osservatorio di Pechino duecento ricercatori hanno lavorato per tredici anni per analizzare tutti i documenti e le cronache cinesi disponibili (e che risalgono a prima della dinastia Han) per fare il catalogo di dieci tipi di eventi celesti inusuali (comete, meteore, meteoriti, macchie solari, eclissi solari e lunari, occultazioni, aurore boreali, novae e Supernovae).

Così oggi sappiamo che sicuramente si sono osservate otto supernovae galattiche nel 185, 393, 1006, 1054, 1181, 1408, 1572 e 1604, che sei altre sono probabili (124, 483, 1087, 1244, 1408, 1431).

Sulla base di queste informazioni storiche è stato possibile programmare nuovi metodi di osservazione di questo straordinario fenomeno astrofisico, che hanno portato nel 1987 ad osservare con una grande varietà di tecniche (e non solo con l'osservazione visuale come per le supernove storiche) la supernova esplosa nella Grande Nube di Magellano (e quindi a stretto rigore non galattica) contribuendo in modo determinante ad interpretare la fase dell'evoluzione delle stelle.

## 2) FREQUENZE DI SUPERNOVE

Delle supernove AD 1572 (studiata fra gli altri da Tycho Brahe) e AD 1604 (la supernova di Keplero, che però è stata osservata per la prima volta dall'Antonelli a Verona) è stato possibile ricostruire le curve luce, cosa che non si è potuto fare per le altre, a causa della scarsità dei dati. Le 8 supernove nell'arco di due millenni danno un rateo di 250-300 anni per supernova entro una distanza di ca. 6 Kilo-parsec dal Sole. È questa la distanza massima a cui una supernova (di magnitudine assoluta -19) è visibile ad occhio nudo da Terra, se si considera un assorbimento della luce dovuto al mezzo interstellare in media di 1.5 magnitudini per Kpc. Di conseguenza nel passato, è stata tenuta sotto osservazione solo una frazione della Galassia pari a 1/7 del totale (in questo calcolo abbiamo assunto in 16 Kpc il raggio della Galassia). Perciò, considerando tutta la Galassia, il rateo dovrebbe salire a 1 evento ogni ca. 40 anni.

Un ulteriore aumento valutabile in circa un fattore 2 compensa poi l'incompletezza dei resoconti storici. Alcuni dati infatti possono essere andati perduti; supernove potrebbero essere esplose solo dall'emisfero australe, e quindi non registrate dalle civiltà dell'emisfero settentrionale. Certe supernove possono essere state troppo poco luminose, sia per ragioni intrinseche che a causa dell'oscuramento interstellare, oppure per le cattive condizioni atmosferiche. Infine una supernova che fosse durata al massimo di luminosità un solo giorno, potrebbe essere stata troppo debole per la rivelazione diurna, e già abbastanza esaurita da non essere notata all'arrivo della notte. Tutto questo porta la frequenza di supernove nella nostra Galassia a circa 1 ogni 20 anni, ma fa sorgere la questione di come mai siano passati già 382 anni dall'ultima osservazione storica riportata (Keplero nel 1604). Eppure dall'avvento del telescopio è

difficile che qualcuno di questi eventi sia sfuggito all'osservazione. Inoltre l'esame della distribuzione temporale delle supernove storiche rivela l'esistenza di periodi molto lunghi in cui non sono state osservate supernove, mentre tra quella di Tycho e di Keplero, per esempio, sono trascorsi solo 32 anni.

Per verificare se circostanze di questo tipo siano o no conciliabili con il rateo stimato di 1 supernova ogni 20 anni, si è proceduto al calcolo di una simulazione al computer. Il modello adottato è quello di una Galassia a disco sottile (di raggio 16 Kpc) in cui si assume un rateo medio di 1 esplosione di supernova ogni 20 anni. Ogni supernova viene collocata in una posizione casuale; si assume che solo gli impulsi luminosi che arrivano da una stella distante meno di 6 Kpc possano raggiungere la Terra. Il risultato è che il fattore di maggior peso nella stima del rateo è il tempo che impiega la luce ad arrivare fino a noi. Cioè un intervallo di tempo molto piccolo registrato tra lo scoppio di una supernova e la supernova successiva può essere conseguenza della diversa distanza delle due stelle dalla Terra.

La frequenza calcolata comprende supernove di tipo I e supernove di tipo II. Si ritiene che le prime originino da stelle di piccola massa, che sono la maggioranza nella nostra Galassia, ma hanno tempi evolutivi più lunghi. Possiamo quindi pensare che il rateo di SNI e di SNII sia circa lo stesso, e la metà di quello totale. La frequenza di SNII, (le più importanti dal punto di vista di emissione neutrinica), sarebbe allora di 1 evento ogni ca. 40 anni.

Tutti questi risultati sono stati ottenuti calcolando la frequenza di supernove basandosi su dati riguardanti sia galassie esterne che su quelli interne alla nostra Galassia.

La proiezione delle 8 supernove sul piano galattico occupa un settore angolare di ca. 50 gradi; inoltre la loro distribuzione radiale, raffrontata con quella delle SN nelle galassie spirale di tipo Sc (visibili di faccia), mostra che le supernove storiche giacciono a quelle distanze in cui è più probabile trovare una supernova. Il confronto suggerisce però che un 20% delle SN più lontane non siano state storicamente osservate.

Assegnando dunque 8.8 SN al settore di  $50^\circ$ , si trova 63.4 SN in 1000 anni in tutto il disco galattico. La frequenza di supernove è allora 1/15 anni.

### 3) CORRELAZIONE PULSARS - SUPERNOVA REMNANTS

Nel 1934, Baade e Zwicky (cioè 1 anno dopo la scoperta dei neutroni) fecero l'ipotesi che le supernove fossero il meccanismo con cui alcune stelle ordinarie possono trasformarsi in stelle di neutroni. Dopo la scoperta delle pulsars e la loro spiegazione in termini di stelle di neutroni in rotazione, venne automatico pensare ad una connessione tra pulsars e supernova remnants.

Purtroppo i dati osservativi non confermano questa associazione con chiarezza: delle 370 pulsars conosciute, solo 3 sono identificate con altrettanti remnants.

La distribuzione delle pulsars conosciute in funzione delle coordinate galattiche mostra una concentrazione di queste stelle lungo il piano galattico, anche se bisogna tener conto del fatto che non è possibile investigare uniformemente ogni parte della Galassia.

La rarefazione delle pulsars nel centro galattico, ad esempio, dipende, almeno in parte, dalla ridotta sensibilità di ricezione dei nostri strumenti causata dall'alto rumore di fondo galattico in quella direzione. Recenti misure del moto proprio di alcune pulsars mostrano che esse si sono formate vicino al piano galattico, e si sono successivamente allontanate da esso ad una velocità media di circa 200 Km/s. Se l'altezza scala sul piano galattico delle pulsars è oggi in media ca. 350 pc, quella dei loro progenitori doveva essere minore di 100 pc. Le pulsars derivano dunque da stelle massicce, stelle cioè di popolazione I, che si trovano di preferenza a piccole latitudini galattiche. L'associazione tra pulsars e remnants sembra allora riguardare solo le supernove di tipo II, tanto più che le pulsars, così come le SNII, sono concentrate sui bracci a spirale.

Esistono molte stime della frequenza con cui le pulsars nascono. Si può pensare ad un rateo di 1 pulsar ogni 20 anni fino ad una pulsar ogni 50 anni. Un rateo dunque in accordo con quello delle supernove di tipo II.

### 4) IL COLLASSO GRAVITAZIONALE STELLARE

Teoricamente si è soliti distinguere due tipi di supernove. Le SN di tipo I, osservate in stelle presenti in qualunque tipo di galas-

sia, ma che appaiono dominanti in quelle ellittiche, sono caratterizzate da una particolare curva di luce con una rapida decrescita di circa tre magnitudini del massimo di luminosità. Le SN di tipo II, con curve di luce più irregolari, sono invece osservate soprattutto nelle galassie a spirale, ricche di stelle di popolazione I, giovani.

I due fenomeni emettono circa la stessa energia nell'ottico (ca.  $10^{51}$  erg) ed in entrambi i casi vengono prodotti elementi pesanti, ma richiedono interpretazioni diverse.

Le SN II sono il risultato di un'instabilità prodottasi all'interno di una stella massiva, principalmente per la fotodisintegrazione del Ferro, che conduce alla formazione di una stella di neutroni o di un buco nero. Le SN di tipo I sono invece interpretate come l'esplosione in un sistema binario, in cui una nana bianca accresce la propria massa a spese del compagno, fino alla deflagrazione esplosiva del carbonio. La rivelazione dei neutrini è associata all'esplosione di SN di tipo II.

L'evoluzione di una stella massiva è costituita da una progressiva contrazione gravitazionale intervallata da «stop» nucleari in corrispondenza delle varie reazioni termonucleari che rendono possibile l'equilibrio della struttura stellare. Una stella, se sufficientemente massiva, sintetizzerà nel suo interno successivamente H in He, He in C e O ed in seguito in Ne, Mg e Si sino alla formazione di un nucleo centrale di Ferro, assumendo una struttura finale a gusci concentrici con composizione chimica diversa. Prima di questo forse altri fenomeni possono innescare un'esplosione SN: la formazione di un nucleo degenere di C e O e processi di cattura elettronica dopo la combustione del carbonio. Però tali meccanismi potrebbero essere meno probabili a causa dei fenomeni di perdita di massa in fase di gigante rossa.

Il limite di massa oltre il quale un nucleo di Ferro collassa (limite di Chandrasekhar) è

$$M_{\text{Ch}} = 5.87 M_{\odot} \mu^2$$

ove  $\mu$  è l'abbondanza elettronica e  $M_{\odot}$  la massa del Sole. Per esempio se  $\mu = 0.5$  si trova  $M_{\text{Ch}} = 1.47 M_{\odot}$ .

Una stella la cui massa centrale di Ferro sia maggiore di tale limite si raffredda rapidamente, la pressione interna diminuisce e può generarsi il collasso gravitazionale. La stella continua a collas-

sare o, se sufficientemente riscaldata durante tale fase, esplose diventando una SN. Se in questa fase la stella perde abbastanza materia, la massa del nucleo può scendere sotto il limite di Chandrasekhar; in questo caso la materia rimasta, altamente compressa, può dar vita ad una stella di neutroni o ad oggetti ancora più collassati quali stelle formate di quark (*strange star*). Non c'è per ora accordo né sulla massa della stella in cui è possibile il collasso né sulle cause dell'esplosione.

## 5) LA DINAMICA DEL COLLASSO

Molte valutazioni teoriche sembrano indicare la possibilità di un collasso per deflagrazione del carbonio per una massa compresa tra 8 e 11  $M_{\odot}$ , e per fotosintegrazione del Ferro per masse maggiori.

In ogni caso la contrazione fa aumentare la pressione, ma non tanto rapidamente quanto la gravità, poiché una parte di energia viene spesa nella dissociazione dei nuclei di ferro in particelle  $\alpha$ . Se l'indice adiabatico  $\gamma$  diventa minore di  $4/3$  la stella non può più essere stabile: dalla contrazione la stella non ottiene più energia per sostenere la struttura.

Questo meccanismo di innesco del collasso è abbastanza chiaro, ma estremamente controversa è invece la descrizione degli eventi successivi, dall'inizio della contrazione del nucleo stellare all'esplosione della stella. I meccanismi proposti per giustificare l'esplosione non hanno infatti molto spesso trovato conferme nelle simulazioni al computer.

Uno dei primi meccanismi, consisteva in un modello in cui il trasporto dell'energia necessaria all'esplosione degli strati esterni della stella era dovuto ai neutrini. Questo modello, anche se successivamente migliorato dopo la scoperta delle correnti neutre, non ha mai portato «all'osservazione» di un'esplosione attraverso le simulazioni al computer, in quanto una frazione troppo grande di neutrini rimaneva intrappolata nel core. Così un impulso inadeguato per fare esplodere la stella veniva trasferito agli strati esterni.

Il mancato trasporto era dovuto al fatto che, da un lato i neutrini di più alta energia hanno un cammino libero medio più corto del raggio stellare e, dall'altro, che i neutrini di energia più bassa tendono a diventare degeneri e ciò riduce la loro produzione.

Questi problemi portarono a riconsiderare la possibilità che l'energia meccanica del core fosse trasportata all'esterno da un'onda d'urto (*shock*). Questa ipotesi è stata giustificata dalle conoscenze nel frattempo acquisite in fisica nucleare; in particolare la possibilità che il nucleo collassante rimanga molto più freddo di quanto precedentemente ipotizzato, supponendo un elevato calore specifico degli stati nucleari eccitati dei nuclei pesanti. In questo caso, il collasso non terminerebbe a densità  $\rho$  ca.  $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^3$  per effetto della pressione termica dei nucleoni caldi (generati dalla fotodisintegrazione della materia) ma continuerebbe fino a densità superiori alla densità nucleare (ca.  $2.7 \cdot 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ )! Una conseguenza della persistenza dei nuclei pesanti nel core è che i neutrini vengono intrappolati ancora più facilmente: «*il neutrino transport model*» era così una volta di più sfavorito.

Lo scenario che ora riceve il maggior consenso è il seguente. Il nucleo della stella che implode è separato in due parti: la prima, più centrale, in cui la velocità di caduta della materia è subsonica e proporzionale al raggio ( $v \div r$ ), ed una seconda, il core esterno, in cui la velocità di caduta è supersonica e va con  $R^{1/2}$ . La massima velocità di caduta raggiunge i 70/80 km/ms. Quando le regioni centrali raggiungono o superano la densità nucleare, la materia diventa incompressibile e la velocità di caduta cade rapidamente a zero, prima al centro e poi per raggi più grandi. Questo improvviso cambio di velocità genera un'onda di pressione che si allontana verso l'esterno della stella alla velocità del suono. Per effetto della pressione la densità della stella cresce di una frazione pari al rapporto tra le velocità di caduta della materia e del suono locali.

Ora vicino al centro questo rapporto è molto minore di 1, ma allontanandosi verso la periferia arriva ad 1 (e poi lo supera) in un punto detto punto sonico che separa il core collassante in due parti (interna ed esterna). Si vede così che vicino al centro della stella si ha una moderata onda di pressione, ma oltre al punto sonico essa cambia completamente di densità, entropia e velocità. Il punto sonico ha quindi due importanti funzioni: 1) le onde sonore provenienti dall'interno non possono muoversi oltre di esso; 2) delimita la superficie del core non sottoposto a shock.

L'entropia aumenta con il collasso provocando la dissociazione dei nuclei in nucleoni, con un conseguente rilascio di energia. Ciò

fa aumentare la pressione improvvisamente ed il materiale che si trova in questa regione inverte la direzione del moto e viene proiettato all'esterno. In conclusione, il core si comprime oltre la densità nucleare  $\rho_{\text{nuc}}$  e poi «rimbalza indietro» ed espelle il materiale ad alta velocità (*bounce shock mechanism*).

Se le simulazioni al computer di un tale processo sono riuscite così a mostrare l'esplosione della stella in SN, nascono però nuovi problemi teorici. Infatti, l'onda di shock subisce forti perdite di energia, mentre si muove verso l'esterno, dovute all'emissione neutrinica ed alla fotodisintegrazione. Perciò spesso essa «muore» prima di giungere nelle regioni in cui si può innescare l'esplosione. Il successo del meccanismo di rimbalzo del core dipende fortemente dalla massa del nucleo di Ferro, che non può essere troppo grande.

Il limite oltre il quale l'onda di shock diventa inefficace dipende fortemente dalla scelta dell'equazione di stato. Peraltro con sicurezza si ha che una stella con  $M_{\text{core}} \geq 2 M_{\odot}$  non può esplodere e, sono necessari altri meccanismi, specialmente per stelle con masse  $> 12-15 M_{\odot}$ .

Nel 1985 si è proposto un meccanismo che coinvolge nuovamente i neutrini e che richiede un iniziale fallimento dell'esplosione. In pratica una parte dei neutrini emessi ed assorbiti dai nucleoni liberi può rilasciare parte della energia in modo da «rivitalizzare» l'onda di shock e garantire l'esplosione.

Cruciale in questo meccanismo è il mantenimento di un flusso caldo di neutrini per un lungo periodo di tempo: anche i  $\nu_{\mu}$  e  $\nu_{\tau}$  (oltre ai  $\nu_e$ ) possono partecipare al processo di riscaldamento (eccitando i nuclei atomici di He, C, S, Fe).

Per prudenza occorre però osservare che tutti i modelli sono unidimensionali, senza momento angolare e senza campi magnetici, mentre invece le stelle di neutroni hanno elevato momento angolare e forti campi magnetici!

La rotazione sembra un fattore decisivo per ottenere l'esplosione: purtroppo è pressochè sconosciuta la distribuzione del momento angolare delle stelle in configurazione presupernova.

In conclusione: a) sembra impossibile individuare due famiglie di SN di tipo II: quelle con  $M < 12 - 15 M_{\odot}$  che esplodono attraverso l'onda di shock (*bounce shock mechanism*) e quelle con

$M > 12 - 15 M_{\odot}$  per cui lo shock è rivitalizzato dai neutrini (*neutrinic heating mechanism*); b) per quanto i neutrini non siano i responsabili diretti dell'esplosione (come ipotizzato nei primi modelli teorici), essi sono molto importanti nel collasso perchè attraverso di loro viene principalmente rilasciata l'energia verso l'esterno. Anche se il collasso del nucleo centrale non termina con l'esplosione della stella, l'emissione neutrinica avverrà lo stesso. Un telescopio neutrinico quale quello realizzato al Monte Bianco può rivelare anche tali eventi non visibili otticamente (*hidden sources*).

#### 6) EMISSIONE NEUTRINICA DA COLLASSO STELLARE

I modelli teorici concordano nel ritenere che la maggior parte dell'energia liberata durante il collasso di una stella  $\approx 10^{53}$  erg. venga emessa sotto forma di neutrini; solo una frazione dell'1% produce altri effetti, tra cui l'emissione luminosa e l'esplosione dell'involuppo.

Ci si aspetta a Terra per tutta la durata del *burst*, un flusso di circa  $10^{12}$  neutrini elettronici per  $\text{cm}^2$  e di  $10^{11}$  corrispondenti anti-neutrini. L'emissione di  $\nu$  può essere divisa in tre fasi, dominate da tre processi diversi: neutronizzazione, deileptonizzazione e raffreddamento. a) prima fase: gli elettroni vengono catturati dai  $p$  nel nocciolo stellare con emissione di  $\nu_e$ , in centesimi di sec. e con una luminosità  $> 10^{58}$  al sec; b) seconda fase i  $\nu$  sono emessi in coppie, in seguito all'annichilazione di coppie, (deileptonizzazione); c) terza fase: l'emissione di  $\nu$  continua dalla «neutrino-sfera» della stella di neutroni, formatasi in seguito all'intrappolamento dei neutrini nella stella collassante.

L'emissione neutrinica diventa superficiale (come avviene per la luce sulla fotosfera delle stelle ordinarie) e non più volumica a causa di processi che rendono il libero cammino medio dei  $\nu$  inferiore al raggio stellare; cioè i neutrini riescono ad abbandonare la stella solo da uno strato superficiale. I neutrini provenienti dall'interno diffondono verso la superficie facendosi strada attraverso la materia. La maggior parte dei neutrini viene emessa durante la fase di raffreddamento, mentre solo circa il 3% sfugge dalla stella durante il picco iniziale di neutronizzazione.

Almeno ca.  $0.1 M_c c^2$  è l'energia liberata sotto forma di neutrini durante il fenomeno: ciò equivale a un'emissione totale in  $\nu > 10^{53}$

erg per il collasso cioè uno dei processi con maggior liberazione di energia nel cosmo.

La struttura temporale del burst neutrino ha 3 fasi successive: neutrinizzazione, deletonizzazione e raffreddamento.

a) La neutrinizzazione è contemporanea al collasso gravitazionale vero e proprio, che avviene su tempi scala dell'ordine del tempo di caduta libera del core su se stesso (alcuni millesecodi). In questa fase vengono emessi solo  $\nu_e$ .

b) La deletonizzazione dura ca. 1s e comporta ancora emissione di  $\nu$  (da reazioni di neutrinizzazione) e di  $\nu_e$  e  $\bar{\nu}_e$  (da annichilazione di coppie  $e^-e^+$ ); la fase termina quando, soprattutto a causa delle correnti neutre, i  $\nu$  non possono più sfuggire dal core ma restano intrappolati nella stella, diffondendo comunque verso la superficie. Si viene così a formare una «neutrosfera» analoga alla fotosfera delle stelle ordinarie (responsabile della loro emissione luminosa).

c) Da essa si ha l'emissione di neutrini di ogni specie per alcuni secondi contemporaneamente al raffreddamento Kelvin della neonata stella di neutroni: l'emissione di neutrini diventa quindi superficiale e non più volumica.

La differenza di energia di legame tra la stella di neutroni e il core iniziale viene emessa sotto forma di neutrini ed altri effetti osservabili: a) ca. 20 MeV/nucleone sono spesi durante la fase iniziale per la formazione dell'onda d'urto, il rimbalzo e l'assestamento del core e per il burst di neutrini da neutrinizzazione (3% del totale); b) altri 20 MeV/nucleone circa vengono liberati nella successiva fase di deletonizzazione e diffondono sotto forma di  $\nu$  dal core verso la superficie della stella di neutroni. La maggior parte dei neutrini viene emessa nel raffreddamento della stella di neutroni dalla neutrosfera alla temperatura di alcuni MeV.

## 7) LA SN 1987A

Il 23 febbraio 1987 è stata osservata un'esplosione di supernova nella Grande Nube di Magellano. Per la prima volta è stato possibile registrare un evento di questo tipo con rivelatori di neutrini, di onde gravitazionali, oltre che nello spettro elettromagnetico, dalle onde radio ai raggi gamma. La posizione della supernova coincide con quella di una supergigante blu, Sanduleak - 69.202, identificata quindi come progenitore della SN.

Rispetto al modello standard la SN 1987A presenta numerose anomalie:

- la SN è esplosa in una piccola galassia irregolare per le quali il rateo previsto di SN è molto più basso che nelle galassie a spirale;
- la stella progenitrice non è una supergigante rossa, ma blu, mentre i modelli teorici attuali privilegiano appunto come configurazione tipica della stella pre - SN la supergigante rossa;
- la massima luminosità ottica è stata molto inferiore rispetto a quelle di altre SN dello stesso tipo;
- nei laboratori sotterranei sono stati registrati due distinti burst di neutrini separati nel tempo di 4,7 ore.

Senza dubbio quest'ultimo dato, se dovuto alla rivelazione di neutrini, è quello di più difficile interpretazione in quanto è in contrasto con le previsioni del modello standard. Il quadro degli eventi registrati al nostro Liquid Scintillation Detector (LSD) del Monte Bianco, al Baksan Scintillation Telescope (BST) in Unione Sovietica, a Kamioka (K2) in Giappone ed a IMB negli Stati Uniti è complesso. K2 e IMB sono rivelatori Cerenkov ad acqua, LSD e BST sono a scintillatore liquido. Tutti questi eventi sono generalmente considerati come dovuti al positrone prodotto dalla reazione sui protoni liberi indotta dai  $\bar{\nu}_e$ .

Dopo l'analisi delle correlazioni esistenti tra LSD e antenne gravitazionali di Roma e Maryland fatte subito dopo l'osservazione della SN, l'esame dei dati è stato recentemente arricchito da una dettagliata analisi delle correlazioni esistenti tra i segnali registrati nei rivelatori sotterranei di LSD, K2 e IMB, e tra questi e le antenne gravitazionali.

I 4 esperimenti sotterranei hanno caratteristiche diverse e ciò rende i dati non immediatamente confrontabili.

A causa di tutte queste differenze si può concludere che eventi di energia nel range 5.8 ca. 7.8 MeV osservato a LSD corrispondono ad energie visibili in acqua nel range 4.5 ca. 6.5 MeV (dove per esempio l'efficienza di K2 è inferiore a 0,1). È quindi facilmente giustificabile l'assenza di segnale a BST e IBM in contemporaneità col burst registrato a LSD per le piccole dimensioni o l'elevata soglia. La bassa statistica rende poi chiaramente incerte queste conclusioni.

Molti autori hanno evidenziato la difficoltà di interpretare il ritardo tra i due fiotti. Come si è visto però la non osservazione in Kamiokande di un numero di eventi consistente al tempo di LSD non è contraddittoria da un punto di vista strettamente sperimentale. Alcuni autori si sono limitati a scartare il segnale registrato a LSD, imputandolo ad una fluttuazione statistica.

La probabilità che si verificano 5 eventi in un intervallo di tempo di 10 secondi in LSD è circa  $3 \cdot 10^{-4}$ . Inoltre, come è stato analizzato, bisogna considerare che i 2 eventi in K2 al tempo di LSD e quello iniziale del burst registrato in K2 sono separati rispettivamente di  $4\text{h } 43\text{m } 13.2 \pm 2\text{s}$  e  $4\text{h } 43\text{m } 5 \pm 2\text{s}$ . Questi 2 eventi di K2 sono gli unici in un intervallo di 12 minuti, centrato sul tempo del segnale registrato a LSD. Il tempo tra il primo evento in LSD e IBM è di  $4\text{h } 43\text{m } 4.58\text{s}$ .

Calcolando la probabilità che si verifichi una coincidenza di eventi di questo tipo si ottiene che la probabilità totale che l'evento registrato a LSD sia non reale, ma dovuto ad una fluttuazione statistica, è pari a  $2.5 \cdot 10^{-5}$ , cioè molto piccola. L'evento registrato al Monte Bianco risulta quindi rafforzato dal segnale registrato in Giappone.

Considerando solo il segnale registrato a IMB e K2 i dati possono essere fittati con spettri termici con temperature ed energie totali rilasciate non in buon accordo tra loro, come si vede dalla seguente tabella

	K2	IMB
T (MeV)	$2.8 \pm 0.3$	$4.6 \pm 0.7$
$E_{\text{tot}} (10^{53} \text{ erg})$	$2.9 \pm 0.6$	$1.5 \pm 1.2/- 0.6$

I valori che si ottengono dai dati del Monte Bianco (e tenendo conto che non si è visto un burst consistente in Kamiokande) portano a stimare una  $T = 0.9 + 0.5/-0.2$  MeV ed un'energia totale rilasciata di  $1.8 \pm 1.2 \cdot 10^{54}$  erg, al limite della massima energia di legame per una stella di neutroni ( $6 \cdot 10^{53}$  erg).

#### 8) MODELLI NON STANDARD

Diversi scenari sono stati proposti per risolvere questi problemi che sorgono dall'interpretazione dei dati.

(1) La stella progenitrice diventa prima una stella di neutroni e successivamente collassa in un buco nero. I due eventi sono distanziati di qualche ora. È stato trovato un significativo accordo tra le previsioni teoriche e quelle sperimentali per l'emissione neutrinica del secondo burst. Se questo scenario fosse vero, non dovrebbe essere scoperta una sorgente intensa di raggi X dove si trovava la stella, pulsante o no.

(2) Una variante di questa ipotesi (da noi proposta) nasce dall'osservazione che poco si sa del comportamento della materia barionica a temperature e pressioni elevate come quelle che si verificano durante un collasso. Witten ha per primo postulato la possibilità dell'esistenza di stelle a *quark matter*, uno stato della materia ove i quark sono deconfinati. Questo stato della materia può essere pensato come un gas di Fermi di quark u, d e s e di qualche elettrone (per garantire la neutralità totale della carica).

L'equilibrio chimico tra i tre tipi di quark è mantenuto dalle seguenti reazioni:



È quindi possibile supporre che sia rivelabile a Terra un segnale della conversione in materia strana. Ogni neutrone convertito libera circa 20 MeV e vengono rilasciati in tutto  $3 \cdot 10^{58}$  MeV di energia, irradiata in neutrini, fotoni e coppie  $e^+ e^-$ , ma solo i neutrini possono uscire dalla stella.

Lo scenario è allora quello della formazione, durante il primo collasso di un «seme» di materia strana, che progressivamente si espande verso l'esterno. Significativamente tale scenario può prevedere dei tempi scala di qualche ora. In LSD 42 minuti prima del burst di 5 eventi e 2h e 10m dopo sono stati registrati altri due segnali di 4 e 3 eventi ciascuno in un intervallo di tempo rispettivamente di 57s e 0.5s. Il quadro completo degli eventi registrati a LSD dà indicazione che l'emissione neutrinica segue tempi scala di qualche ora. Se si è formata una stella strana potrebbe essere visibile una pulsar. Nel 1989 era stata segnalata l'osservazione della pulsar della SN con un periodo di circa 0.5 ms. Ciò era una prova indiretta di questo scenario in quanto una pulsar costituita da neutroni sarebbe disintegrata dalle forze di marea associate a velocità di rotazione così elevate mentre una stella strana non si sarebbe disintegrata. Tale osservazione è stata però recentemente smentita (1989).

Permangono poi ovviamente dubbi sull'esistenza delle stelle strane, date le incertezze teoriche sul comportamento della materia a tali pressioni.

(3) Berezinsky, Castagnoli, Dokuchaev e Galeotti, partendo da un'analisi dei dati sperimentali hanno invece osservato come sia possibile ridurre il numero di eventi previsti in Kamiokande suggerendo uno spettro degenere per i neutrini emessi:

$$\frac{d n}{d E} = A \frac{E^2}{\epsilon \kappa \rho (E/\tau - \mu) + 1}$$

dove  $\tau$  è espressa in MeV e  $\mu$  è il potenziale chimico adimensionale. La presenza di un potenziale chimico diverso da zero implica una condizione di disequilibrio nelle reazioni che dovrebbero garantire l'equilibrio termico nell'irraggiamento dei neutrini. I valori che meglio descrivono i dati ( $\tau$  ca. 0.5 MeV e  $\mu$  ca. 12) comportano appunto una bassa densità di equilibrio dei positroni. Vengono emessi pochi neutrini  $\mu$  e  $\tau$  (prodotti solo attraverso il canale  $e^+$  e  $\nu$   $\bar{\nu}$ ). Queste ipotesi si traducono quindi in una drastica riduzione dell'energia totale rilasciata attraverso queste due specie neutriniche. Il ritardo tra i due burst viene spiegato nel modo seguente: la stella, soggetta ad una forte rotazione durante il collasso diventa uno sferoide appiattito, e si rompe in due pezzi, di massa  $M$  ca.  $20 M_{\odot}$  e  $m$  ca.  $1 \div 2 M_{\odot}$ . La componente più massiva collassa in un buco nero e produce il primo burst. Il frammento più piccolo orbita attorno alla componente più massiva fino a che vi precipita. La materia assorbita dal buco nero produce il secondo burst.

In modo del tutto indipendente Hillebrandt et al. hanno proposto come parametro per descrivere lo spettro di emissione dei neutrini proprio un potenziale chimico adimensionale, partendo da risultati ottenuti con una simulazione. La forma degli spettri, rispetto a quelli di corpo nero, presenta un restringimento attorno al picco ed un innalzamento della componente di bassa energia rispetto a quella di più alta energia, che risulta fittabile introducendo opportuni valori del potenziale chimico  $\mu$ .

## 9) CONCLUSIONI

La SN 1987A ha posto in evidenza come il modello standard delle Supernova sia inadeguato ad interpretare i dati sperimentali.

In particolare, per ciò che riguarda l'emissione neutrinica vanno sottolineati i seguenti punti:

1) La durata temporale dell'emissione è probabilmente più estesa di quanto si pensasse. Inoltre anche i dati sperimentali delle coincidenze tra rivelatori sotterranei e di onde gravitazionali indicano emissioni su lunghi tempi scala.

2) Una distribuzione di Fermi - Dirac non descrive bene l'effettiva forma dello spettro emesso: il numero di eventi attesi va quindi calcolato utilizzando sia lo spettro standard sia quello con un potenziale chimico diverso da zero.

3) Le correlazioni tra rivelatori di neutrini e di onde gravitazionali suggeriscono una fenomenologia di collasso più complicata di quella standard con semplice formazione di stella a neutroni.

4) Anche le osservazioni ottiche di tipo tradizionale danno una curva-luce (cioè una variazione della luminosità della SN198 a) completamente diversa da quella ottenibile dalle supernovae di tipo SN1 ed SN2 osservate nella nostra ed in altre galassie.

5) Le osservazioni con raggi X, UV, IR, radio non sono di immediata interpretazione con il modello standard.

6) Sarà molto importante vedere nei prossimi anni se apparirà una pulsar nel punto di collasso. Anche le fotografie che potrà fornire la stazione spaziale Hubble saranno di grande aiuto per l'interpretazione corretta dell'evento SN.

Il quadro generale del collasso stellare richiederà ancora decenni di lavoro per essere chiarito. Naturalmente sarà necessario ampliare gli apparati e migliorare le tecnologie.

La fisica italiana sta facendo uno sforzo notevole in questa direzione con la realizzazione del Laboratorio del G. Sasso che affianca, dopo venti anni, quello del M. Bianco.

L'esperimento LVD che stiamo costruendo con una collaborazione Italia-USA-URSS sarà pronto tra quattro/cinque anni, ed essendo più grande di quello LSD in funzione da un decennio nel M. Bianco (avrà ben 2000 tonnellate di scintillatore!) potrà osservare i futuri collassi di stelle sia nella nostra Galassia che nelle Nubi di Magellano con una statistica di neutrini molto ricca, dal 2000 in poi.

Comunque nei mille anni trascorsi dalla cronaca di Giovanni Veneto ad oggi, un certo progresso è stato fatto nella conoscenza delle «stelle ospiti» osservate dagli antichi nostri colleghi astronomi cinesi, coreani, arabi e dai monaci europei. Ancora molti problemi sono però aperti. La morte delle stelle resta ancora un difficile problema da studiare.

E intanto anche molti altri problemi restano irrisolti malgrado il progresso della civiltà. Come scriveva Alì ibu Ridwan nel 1006 all'apparire della SN-Lupus anche oggi, all'apparire della SN987A «...capitarono incidenti ai re delle due città sante di Mecca e Medina, ci fu siccità, fame e aumento dei prezzi e innumerevoli migliaia di persone morirono a causa delle armi, della fame e della pestilenza. E ciò durò per vari anni».



