

Neutrini e Supernovae

Alessandro Mirizzi

Dipartimento Interateneo di Fisica "Michelangelo Merlin" e INFN Bari

La sorgente di neutrini più spettacolare dell'Universo è l'esplosione di una supernova, che corrisponde alla fase terminale di una stella di grande massa. Durante questo processo la luminosità dei neutrini è paragonabile a quella dell'intero Universo. Per questa ed altre eccezionali caratteristiche, la rivelazione di neutrini da supernova, in rivelatori sotterranei, rappresenta una delle prossime frontiere dell'astrofisica dei neutrini.

Collasso stellare ed esplosione di una supernova

Le stelle di massa superiore a 8 masse solari (M_{\odot}) diventano inevitabilmente instabili nelle fasi terminali della loro evoluzione. Esse, come d'altronde tutte le stelle, generano energia attraverso la fusione nucleare dei loro nuclei d'idrogeno in elio. Tuttavia, a differenza del Sole, queste stelle, giunte ad una fase avanzata del proprio ciclo vitale, non si limitano a fondere l'elio in carbonio, ma in virtù della loro massa sufficientemente elevata, sono in grado di attuare dei cicli di fusione che dal carbonio portano alla produzione di elementi sempre più pesanti. Esse evolvono dunque in una struttura "a cipolla", con una sequenza di strati concentrici dentro i quali avvengono reazioni nucleari di natura diversa. Lo strato più esterno è costituito di idrogeno (H). Procedendo verso il centro della stella, si trovano in sequenza gli strati di elio (He), carbonio (C), ossigeno (O),

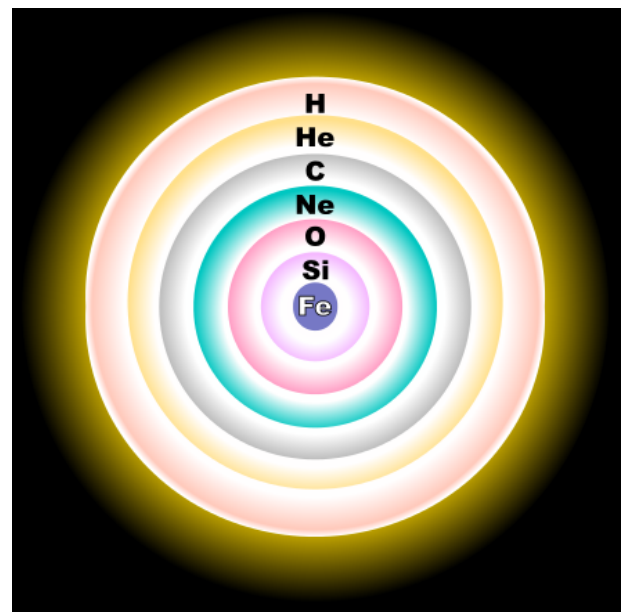


Figura 1: Schema degli strati "a cipolla" di una stella di grande massa nelle ultime fasi di vita. (Non in scala).

neon (Ne), magnesio (Mg), silicio (Si), e il nucleo centrale composto da ferro (Fe) (Fig. 1).

Quest'ultimo, di raggio $\sim 10^3$ km, è sostenuto dalla *pressione di degenerazione* degli elettroni (vedi il riquadro), finché la sua massa supera la massa critica di Chandrasekhar, che indica il limite superiore di massa per stelle sostenute della pressione di degenerazione. Quando la massa del nucleo supera tale limite ($\sim 1.3M_{\odot}$) questo diventa instabile e collassa a causa della gravità. Il collasso è arrestato dalle forze repulsive nucleari in corrispondenza al valore di densità $\rho_{\text{nucl}} \sim 2.8 \times 10^{14}$ g/cm³, oltre la quale la materia nucleare diventa difficilmente comprimibile. A questo punto, la pressione è sufficiente a fer-

Pressione di degenerazione

La pressione che si instaura in un corpo soggetto ad altissime compressioni, chiamata pressione di degenerazione, trae la sua origine dal fatto che il principio di esclusione di Pauli impedisce alle particelle che costituiscono la materia (fermioni) di occupare lo stesso stato quantico. Pertanto, se si prova ad avvicinare continuamente le particelle fino al punto che la loro posizione diventi indistinguibile, esse si devono posizionare in stati energetici differenti. La riduzione forzata del volume a loro disposizione costringe le particelle a occupare anche gli stati quantici ad alta energia. La resistenza presentata a un'ulteriore compressione si manifesta nella forma di una pressione che si oppone alla compressione, la pressione di degenerazione.

mare il collasso, causando il *rimbalzo* della parte più interna del nucleo. Forti onde di pressione sono riflesse dal centro e, quindi, procedono verso l'esterno. Come risultato, il nucleo interno della stella, agendo come un pistone, genera un'onda d'urto nella parte più esterna, a 50-100 km dal centro. Questo meccanismo può capovolgere l'iniziale scenario di implosione del nucleo stellare. Se abbastanza energia è immagazzinata nell'onda d'urto, quest'ultima espelle il mantello stellare fuori dal nucleo di ferro. Infatti, l'onda d'urto può raggiungere la superficie della stella ed erompere in una esplosione violenta. Si ha così una *supernova a collasso gravitazionale*. Le fasi dell'esplosione di una supernova sono illustrate in Fig. 2.

Neutrini da supernova

L'onda d'urto propagandosi dissipa energia dissociando i nuclei atomici di ferro, nelle regioni che attraversa. I protoni liberati dalla scissione dei nuclei di ferro, permettono una veloce neutronizzazione del nucleo stellare, grazie al *processo beta*: $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$, causando un'emissione di neutrini elettronici chiamata *emissione di neutronizzazione*. Grazie a questo processo il nucleo originario evolve in una protostella di neutroni. La parte esterna del nucleo, intanto, continua a cadere verso il centro, depositandosi sulla protostella, la cui massa raggiunge $1.4 - 1.6 M_\odot$. I neutrini elettronici emessi sfuggono liberamente finché la densità del nucleo diventa così alta da renderlo opaco per i neutrini. I processi più importanti per l'intrappolamento dei neutrini sono: (i) diffusione su nucleoni liberi ($\nu + N \rightarrow \nu + N$), (ii) diffusione coerente

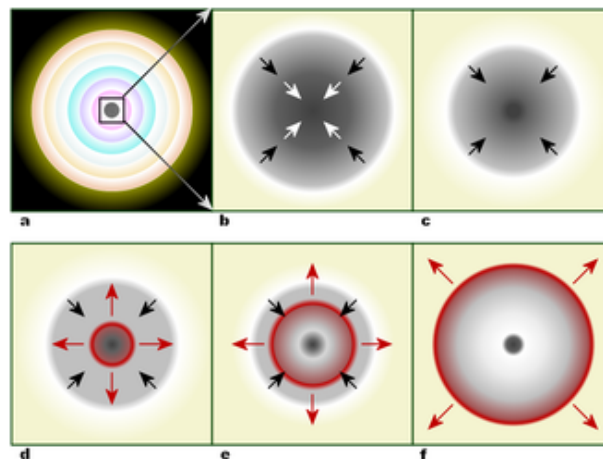


Figura 2: Le fasi del collasso gravitazionale del nucleo di una stella di grande massa. All'interno della stella in un avanzato stadio evolutivo (a), la fusione nucleare termina con la sintesi del ferro, che, depositandosi al centro dell'astro, va a costituire un nucleo inerte (b) che in breve tempo raggiunge la massa limite di Chandrasekhar, iniziando a collassare. La materia della parte più interna del nucleo degenera in neutroni ed emette neutrini (c), causando un rimbalzo della materia (d) che dà origine ad un'onda d'urto (in rosso). Il fronte d'urto inizialmente tende a rallentare (e), ma è rinvigorito da processi che includono interazioni tra i neutrini. L'onda spazza via gli strati circostanti il nucleo (f), lasciando solo un residuo di materia degenera: una stella di neutroni compatta.

su nuclei pesanti ($\nu + (Z, A) \rightarrow \nu + (Z, A)$), (iii) assorbimento da nucleone ($\nu_e + n \rightarrow p + e^-$), (iv) diffusione neutrino-elettrone ($\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$). L'effetto di questi processi può essere stimato valutando il libero cammino medio per i neutrini $\lambda = 1/\rho\sigma \sim 10$ m, dove $\rho \sim 10^{38}$ nucleoni/cm³ è la densità della protostella, e $\sigma \sim 10^{-41}$ cm² è l'ordine di grandezza tipico delle sezioni d'urto per i processi indicati. Il libero cammino medio

Classificazione delle supernovae

La classificazione più utile per le supernovae è basata sul meccanismo fisico di esplosione: termonucleare oppure collasso gravitazionale. Stelle con massa $4 < M < 8M_{\odot}$ che sono evolute in nane bianche e si trovano in sistemi binari possono inglobare una massa critica di materia dalla stella compagna. La quantità di materiale ricevuto può essere tale da innalzare la temperatura del suo nucleo fino al punto di fusione del carbonio. A questo punto si innesca una serie di processi termici che disgrega completamente la nana bianca. Nel caso di supernovae di tipo termonucleare l'emissione dei neutrini è trascurabile. Le stelle di massa maggiore ($M > 8M_{\odot}$) esplodono invece attraverso collasso gravitazionale come illustrato nel testo principale.

Le supernovae sono classificate anche sulla base delle caratteristiche delle loro curve di luce e delle linee di assorbimento dei diversi elementi chimici che appaiono nei loro spettri. Una prima divisione viene effettuata sulla base della presenza o dell'assenza delle linee dell'idrogeno. Se lo spettro della supernova presenta tali linee (chiamate serie di Balmer nella porzione visibile dello spettro), essa viene classificata come di *Tipo II*; altrimenti è di *Tipo I*. Ognuna di queste due classi è a sua volta suddivisa in base alla presenza di altri elementi chimici o alla forma delle curve di luce. In particolare, le supernovae di *Tipo Ia* presentano la linea del silicio ionizzato (Si II). Le supernovae di *Tipo Ib/c* non presentano alcuna linea del silicio. Le supernovae di *Tipo Ib* presentano la linea dell'elio non ionizzato, mentre quelle di *Tipo Ic* non presentano alcuna linea dell'elio. Le supernova di tipo termonucleari corrispondono al Tipo Ia. Le curve di luminosità delle SN Ia sono sorprendentemente riproducibili, nel senso che diverse supernovae presentano lo stesso tipo di curve di luce. Per questa ragione sono utilizzate come candele standard in cosmologia. Le supernovae a collasso gravitazionale invece corrispondono a quelle di tipo Ib/c e II.

risulta molto più piccolo del raggio della protostella di neutroni. Dunque, i neutrini intrappolati diffondono attraverso la protostella. Una stima del tempo di diffusione è data dal prodotto della durata fra due successivi urti per il numero di passi $\tau \sim (\lambda/c)(R/\lambda)^2 \sim 10$ s. È utile introdurre il concetto di *neutrinosfera*, che indica il raggio oltre il quale un neutrino in media subisce l'ultimo urto prima di uscire liberamente dal nucleo. All'interno della neutrinosfera il moto dei neutrini è di diffusione (termica), all'esterno è libero.

Nell'intervallo temporale fra 0.5 e 10 s dopo l'inizio dell'esplosione, la protostella di neutroni può essere vista come una stella di raggio di circa 30 km, che si contrae lentamente e si raffredda attraverso l'emissione di neutrini e antineutrini di tutti i sapori. I processi più importanti di emissione sono: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$, $n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e$, $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$, $N + N \rightarrow N + N + \nu + \bar{\nu}$. Questa fase è detta *emissione termica*. Alla fine di questa fase si è formata una vera *stella di neutroni*.

Una supernova può dunque essere considerata come un *corpo nero* che si raffredda attra-

verso l'emissione dei neutrini di tutti i sapori. Quasi tutta l'energia di legame gravitazionale (3×10^{53} erg) viene portata via dai neutrini, emessi con spettri quasi-termici, con una energia media di ~ 15 MeV.

Supernova 1987A

Rivelatori in grado di misurare un segnale di neutrini da supernova provenienti dalla nostra galassia sono operativi dal 1980, quando il telescopio BST (Baksan Scintillator Telescope) entrò in funzione. Ma bisogna aspettare l'esplosione della prima supernova osservata nel 1987 (SN 1987A) per ricevere un segnale di neutrini stellari. Questa supernova è esplosa il 23 Febbraio nella Grande Nube di Magellano, una piccola galassia satellite della Via Lattea, ad una distanza da noi di circa 170.000 anni-luce (Fig. 3).

Per la prima volta è stato possibile rintracciare negli archivi fotografici la posizione dell'esplosione e localizzare la stella progenitrice, una supergigante blu di massa di $20 M_{\odot}$. Grazie alla



Figura 3: Esplosione della SN 1987A: prima (sinistra) e dopo (destra).

relativa vicinanza della stella, e dunque alla luminosità della supernova, è stato possibile condurre osservazioni con un'accuratezza senza precedenti. Inoltre, per la prima (e tuttora unica) volta è stato possibile misurare il segnale dei neutrini associato all'esplosione della supernova.

Due rivelatori sotterranei, sensibili ad antineutrini elettronici, Kamiokande II in Giappone e IMB nell'Ohio, rivelarono 11 (Fig. 4) e 8 antineutrini, rispettivamente, su un arco temporale di 10 s. Le misure del telescopio BST risultarono meno significative. Nonostante la bassa statistica, la quantità di informazioni che gli scienziati hanno estratto da questi pochi eventi è stata considerevole.

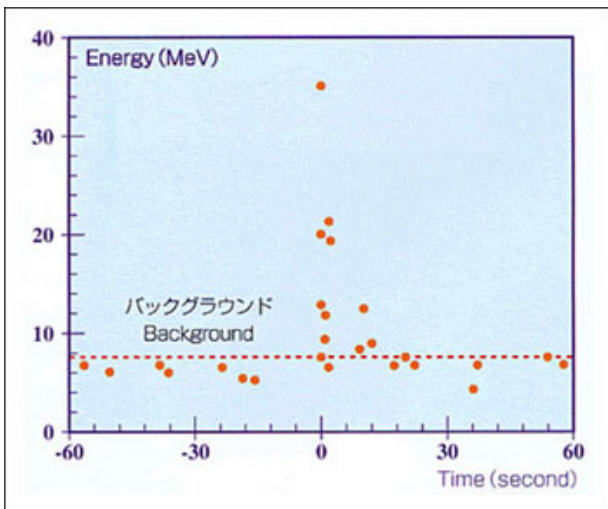


Figura 4: Gli 11 punti a 0 secondi mostrano gli eventi dei neutrini dalla SN 1987A osservati da Kamiokande II.

Principalmente, il segnale dei neutrini della SN 1987A ha confermato la descrizione di una protostella di neutroni che si raffredda attraverso

l'emissione dei neutrini. L'energia misurata dei singoli neutrini corrisponde alla temperatura iniziale attesa per la protostella di neutroni, mentre la durata del segnale dei neutrini è in accordo con il tempo scala di ~ 10 s per il raffreddamento della stella. L'accordo eccellente fra la teoria e le osservazioni ha permesso di escludere che la supernova abbia perso energia attraverso processi misteriosi, associati all'emissione di particelle esotiche come assioni o neutrini sterili. Allo stesso tempo lo spettro di energia dei neutrini ha permesso di ottenere una stima dell'energia totale emessa dalla supernova, consistente con la creazione di una stella di neutroni di massa $1.4M_{\odot}$ e raggio di 15 km.

Inoltre, le misure hanno rivelato anche informazioni fondamentali sulla natura dei neutrini stessi. Poiché i neutrini hanno raggiunto la Terra non più di tre ore prima che la supernova fosse catturata nelle immagini ottiche, essi devono aver viaggiato ad una velocità molto prossima a quella della luce. Poiché particelle più leggere viaggiano più velocemente di quelle più pesanti, gli scienziati hanno concluso che la massa dei neutrini è molto piccola. Ciò ha permesso di escludere la possibilità che i neutrini possano essere la componente dominante della materia oscura nell'Universo.

Future osservazioni di neutrini da supernova

La lezione impartita dalla SN 1987A è che i neutrini e la fisica delle supernovae sono strettamente legati. Dunque non è inaspettato che uno dei più grandi desideri degli astronomi e dei fisici del neutrino sia l'esplosione di una supernova nella nostra galassia. Soprendentemente non è stata rivelata alcuna supernova nella Via Lattea dal 1604, quando fu osservata una "nuova stella" nella costellazione Ophiuchus. Essa fu studiata fra gli altri dall'astronomo tedesco Johannes Kepler (di cui porta il nome) e dall'italiano Galileo. Appena tre decenni prima, nel 1572, gli astronomi in Europa, fra cui il leggendario astronomo danese Tycho Brahe, ne avevano avvistata un'altra. Le evidenze correnti suggeriscono che entrambe le supernova fossero di tipo termonucleare e non da collasso gravitazionale.

Basandosi sulle osservazioni nelle altre galassie, gli astronomi stimano che dovrebbero avvenire circa tre esplosioni di supernova per secolo nella Via Lattea. Anche se il materiale interstellare assorbisse la luce da una supernova nelle regioni più distanti della nostra galassia, esso non fermerebbe i neutrini, la cui rivelazione dunque annuncerebbe la morte di una stella di grande massa nella Via Lattea.

Poichè i neutrini da supernova sono emessi prima della luce, la loro rivelazione può dare in anticipo un allarme agli astronomi che una supernova sta per essere visibile. A tal riguardo esiste una rete ai rivelatori di neutrini, chiamata *Supernova Early Warning System* (SNEWS) progettata per dare un precoce avviso agli astronomi dell'evento di una supernova nella nostra galassia. Essa include tra l'altro i rivelatori Borexino e Large Volume Detector (LVD) ai Laboratori del Gran Sasso in Italia, Super-Kamiokande in Giappone e Icecube al Polo Sud. I suddetti rivelatori sono altamente sensibili ad un segnale di neutrini da una esplosione galattica. Per esempio, Super-Kamiokande dovrebbe registrare diverse migliaia di eventi da una supernova nel centro galattico, a più di 25.000 anni-luce da noi. Questi neutrini potrebbero permettere di localizzare la supernova nel cielo con una risoluzione di qualche grado. Icecube dovrebbe ricevere un milione di eventi, pertanto è il miglior rivelatore per ricostruire la struttura temporale del segnale dei neutrini.

L'alta statistica di neutrini attesa nei rivelatori attualmente in funzione fornirebbe un quadro dettagliato del collasso gravitazionale. Fra l'altro gli scienziati saranno in grado di determinare se il collasso gravitazionale della stella abbia portato ad un buco nero, da cui niente (neanche i neutrini) può sfuggire, piuttosto che ad una stella di neutroni. Nel caso della formazione di un buco nero, il flusso dei neutrini emessi dalla supernova subirebbe una brusca interruzione. Invece se il risultato dell'esplosione fosse una stella di neutroni, essa emetterebbe neutrini su un tempo scala di circa 10 s durante il suo raffreddamento, cosicché il flusso dei neutrini dovrebbe decrescere gradualmente piuttosto che subire una interruzione improvvisa.

Anche i fisici delle particelle sono interessati ai neutrini da supernova, i quali rappresentano una

rara opportunità per capire come queste particelle si comportano in condizioni estreme non riproducibili in laboratorio. In particolare, nelle regioni più interne di una supernova, la densità dei neutrini è così alta, che le loro auto-interazioni, di solito trascurabili, possono alterare la loro evoluzione di sapore. In queste condizioni i neutrini formano un gas denso che può mostrare un comportamento inusuale, sotto forma di *oscillazioni collettive*. Inoltre le oscillazioni dei neutrini nella supernova sono sensibili alla dinamica dell'esplosione. Infatti l'andamento temporale del segnale dei neutrini potrebbe permettere di seguire in tempo reale la propagazione dell'onda d'urto nella stella. Infine una delle questioni aperte nella fisica del neutrino è la cosiddetta "gerarchia di massa", cioè come sono ordinati gli autostati di massa dei neutrini. Sono permesse due possibilità: (i) gerarchia di massa normale se ci sono due autostati di massa leggeri più uno pesante, (ii) gerarchia invertita se è presente un autostato leggero e due pesanti. Misurando i neutrini da supernova si potrebbe ottenere una risposta a questa domanda fondamentale.

Da quanto discusso, emerge che la misura di un prossimo segnale di neutrini da una supernova galattica avrà un potenziale fisico enorme. Le esplosioni galattiche sono però eventi rari. D'altra parte ci sono circa 10 esplosioni di supernova per secondo nell'Universo visibile. L'emissione cumulativa dei neutrini da tutte le esplosioni di supernova passate ha prodotto un fondo cosmico di neutrini, il cosiddetto *fondo diffuso di neutrini da supernova*, la cui esistenza era stata predetta già prima della SN 1987A. Sebbene debole, questo flusso diffuso è un segnale garantito che può permettere di sondare una fisica diversa da quella di una esplosione galattica, compresi processi che avvengono su scale cosmologiche nel tempo o nello spazio. In particolare, il segnale diffuso di neutrini da supernova è sensibile al tasso di formazione stellare. Al momento questo segnale non è stato ancora rivelato, ma l'esperimento Super-Kamiokande ha ottenuto un limite stringente, che è al di sopra delle tipiche stime teoriche solo di circa un fattore 2. Questo limite è incoraggiante e attualmente in Super-Kamiokande è in corso lo studio di tecniche sperimentali avanzate per permettere la rivelazione di questo segnale nei prossimi anni.

Sebbene un evento di esplosione di una supernova galattica sia raro, vi sono buone possibilità che possa accadere nei prossimi decenni. Inoltre, la misura del flusso diffuso dei neutrini da supernova potrebbe essere imminente. Non resta, quindi, che essere pazienti e prepararsi, attraverso lo sviluppo di modelli teorici e procedure sperimentali, per poter rivelare e analizzare nel miglior modo possibile un simile evento, dal momento che si potrebbe presentare una sola volta nella vita media di un fisico.

Per approfondimenti si veda [1], che è in corso di pubblicazione.



- [1] A. Mirizzi, I. Tamborra, H.-T. Janka, N. Saviano, K. Scholberg, Robert Bollig, Lorenz Hüdepohl, and Sovan Chakraborty “Supernova Neutrinos: Production, Oscillations and Detection,” in preparazione per *La Rivista del Nuovo Cimento*, arXiv:1508.00785 [astro-ph.HE]



Alessandro Mirizzi: È un ricercatore in fisica teorica presso l’Università di Bari. Si è laureato e addottorato a Bari. Ha svolto attività di ricerca presso il Max Planck Institute for Physics di Monaco di Baviera e presso l’Università di Amburgo. Si occupa di fisica astroparticellare, con particolare interesse per l’astrofisica e la cosmologia dei neutrini e di particelle ipotetiche come gli assioni.