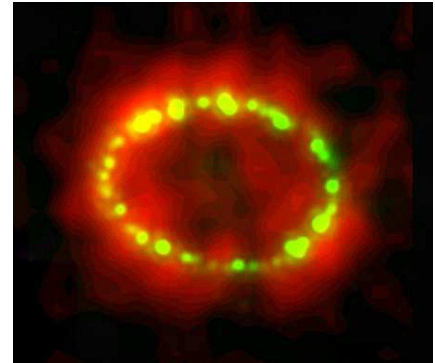

I neutrini dalla supernova 1987A vent'anni più tardi

Francesco Vissani

Laboratori Nazionali del Gran Sasso, INFN

E-mail:

francesco.vissani@lngs.infn.it



ABSTRACT: Vent'anni fa, il 23 febbraio 1987, è una delle date cruciali dell'astronomia. Nel giro di pochi secondi, vengono osservati 30 eventi dovuti a neutrini. Di lì a poche ore infatti venne osservata nella Grande Nube di Magellano la prima supernova dell'87. Questo saggio di Francesco Vissani ripercorre quella storia.

PAROLE CHIAVE: Neutrini, supernova, astronomia.

La supernova e gli eventi osservati (il passato)

Una delle date cruciali della astronomia con neutrini è il 23 febbraio 1987. Difatti, come riportato nella tabella, quattro rivelatori sotterranei videro 30 eventi in finestre temporali di pochi secondi, interpretabili come eventi dovuti a neutrini provenienti da una supernova. Di lì a poche ore infatti venne osservata nella Grande Nube di Magellano la prima supernova dell'87, che venne perciò chiamata SN1987A. L'osservazione dei neutrini non era un evento inaspettato. Si ritiene che una gran parte di stelle di grande massa (sopra 8 masse solari circa) producano nel nucleo al loro interno una gran quantità di scorie nucleari sostanzialmente inerti. Quando la massa supera un certo limite, il nucleo è costretto a collassare sotto il suo peso, e così facendo può dar origine ad un oggetto estremamente compatto. Questa ipotesi riconduce nel naturale contesto della vita naturale delle popolazioni stellari l'origine delle stelle di neutroni, dei buchi neri di massa stellare e possibilmente anche di altri oggetti compatti, che gli astronomi riescono ad osservare più o meno direttamente. La condizione posta dalla teoria era quella di irradiare in neutrini l'eccesso di energia potenziale, che si quantifica intorno ad un decimo o due della massa del sole; ne approfittiamo per ricordare che $M_{\odot} c^2 = 1.8 \times 10^{54}$ erg. L'osservazione sperimentale era in buon accordo con le aspettative. Si pensava inoltre che questo 'collasso gravitazionale' causasse in qualche modo l'espulsione del mantello stellare, cosa che a sua volta accadde varie ore dopo l'emissione dei neutrini. Fu verificato inoltre 1) che il precursore della supernova fosse una stella con le caratteristiche aspettate 2) che la curva di luce della supernova obbedisse le aspettative nei successivi mesi, e 3) che il gas espulso dalla supernova si evolvesse secondo le previsioni. Insomma, l'osservazione sperimentale fu salutata con grande entusiasmo da fisici ed astronomi e M Koshiba, il leader di uno di quei quattro esperimenti (Kamiokande-II) risultò vincitore del premio Nobel 2002 per la fisica, assegnato per l'osservazione di neutrini cosmici.

Problemi e dubbi (il presente)

Però, come si usa dire, il diavolo si nasconde nei dettagli. Una prima, fastidiosa circostanza è che non si è ancora scoperta la stella di neutroni che, nella interpretazione più popolare, ci si aspetta sia nata da quel collasso gravitazionale; più precisamente, si predice che nei resti della supernova ci sia una sorgente puntiforme di radiazione X con caratteristiche note, di cui non si vede traccia. Tra le possibili interpretazioni (o speranze) è che questo indichi che il raffreddamento della stella di neutroni sia più veloce di quanto ci si aspetta, o che si sia successivamente formato un buco nero, o che la stella di neutroni sia ancora nascosta in una nube di polveri e gas. I maggiori dubbi, però, emergono esaminando proprio i 30 eventi attribuiti a neutrini. Per prima cosa, i 5 eventi del rivelatore LSD furono osservati 5 ore prima degli altri. I restanti 25 eventi erano invece contemporanei, qualora si tenesse conto che Kamiokande-II e Baksan avevano un errore di parecchi secondi nella misura dei tempi. L'interpretazione più popolare di questo disaccordo sui tempi fu di 'liquidare' gli eventi di LSD come eventi dovuti ad un fondo sperimentale.¹ Ma anche così facendo, va sottolineato che l'accordo tra i restanti tre rivelatori non è

¹ Per 'fondo' si intendono eventi dovuti a cause differenti dal segnale che si intende rivelare (ad esempio, alla radioattività residua presente nel rivelatore) Ricordiamo che nel periodo di tempo tra i primi 5 ed i successivi 25 eventi fu notato un aumento del numero di correlazioni tra singoli eventi di LSD, di Baksan e di Kamiokande-II, e che allo stesso tempo due

	Massa in ton.	Numero eventi	Tempo universale	Intervallo temporale	Energia visibile	Angolo medio con SN
Kamiokande-II	2140	12	7h35m35s	12.4 s	14.7 MeV	67°
IMB	6800	8	7h35m41s	5.6 s	31.9 MeV	48°
Baksan	130+160	5	7h36m12s	9.1 s	18.3 MeV	—
LSD	90+200	5	2h52m37s	7.0 s	7.0 MeV	—

Tabella 1. I 4 rivelatori di neutrini attivi durante la SN1987A (prima colonna). Le masse utilizzate per la rivelazione (seconda colonna) sono: acqua per i primi 2, liquido scintillatore + ferro per i secondi 2. Le restanti 5 colonne riportano alcune caratteristiche degli eventi rivelati; ricordiamo che solo i primi 2 rivelatori sono in gradi di desumere la direzione dell'evento.

perfetto: 1) l'energia media degli eventi di Kamiokande-II è la metà di quella vista da IMB; 2) gli eventi di questi due rivelatori puntano nella direzione che dalla supernova va verso di noi, mentre ci si aspettava che fossero distribuiti in modo pressoché isotropo; 3) gli eventi visti da Baksan sono 2 – 3 volte di più di quelli attesi (stante il fatto che il rivelatore è più piccolo); 4) gli eventi di Kamiokande-II non sono distribuiti uniformemente nel rivelatore, come ci si aspetta, ma presentano un eccesso vicino alle pareti. Chiariamo il senso di queste aspettative: si immagina che la gran parte dei neutrini osservati provengano da una fase in cui la stella di neutroni si raffredda molto rapidamente ed emette neutrini di tutti i tipi in simili quantità. Ma gli antineutrini dell'elettrone sono i soli che possono dare un segnale interagendo con i protoni presenti nei rivelatori di neutrino. Siccome l'interazione con i protoni sembra proprio essere la più grande tra tutte quelle disponibili, ci ritroviamo con alcune aspettative (tra cui quelle sopra ricordate) e, se si vuole, i relativi dubbi di interpretazione.

Nel frattempo ci sono stati progressi nella fisica delle particelle ed in particolare, si sono accumulate pesanti evidenze che i neutrini abbiano massa ed oscillino. Al momento, sembra difficile che il fenomeno delle oscillazioni sia di aiuto per risolvere questi numerosi e noiosi dubbi. Piuttosto, l'attenzione principale si viene via via rivolgendo ai problemi astrofisici ancora aperti. È bene ricordare con chiarezza che, ancor oggi, non si sa come funzioni l'esplosione. Né è noto se il fenomeno della esplosione abbia una natura universale o dipenda in modo sostanziale dalle caratteristiche del progenitore (quali la composizione, la massa e lo stato di rotazione). Da questo punto di vista può risultare sconcertante la sicurezza con cui sono state proposte discusse ed accettate nella comunità scientifica interpretazioni di quegli eventi. La cosa si spiega perlomeno in parte con il fatto che il fenomeno della esplosione coinvolge una quantità di energia cinetica dell'ordine di 10^{51} erg.² Una tale energia è molto piccola rispetto alle energia emesse in neutrini, e quindi in un certo senso si sostiene, per così dire, che l'esplosione sia solo un dettaglio, o in altre parole che i neutrini siano molto più importanti del resto. Non è difficile capire il punto di vista dei detrattori di questo argomento. Ad esempio si obietta: come si può esser certi che la teoria che spiega l'esplosione non cambi radicalmente le aspettative per il tasso di emissione e magari anche per il tipo di neutrini emessi?

antenne gravitazionali riportarono un eccesso di eventi; risultati che l'interpretazione più popolare tende nuovamente a relegare ad effetti di fondo sperimentale.

² Ad esempio, questa è l'energia di una massa di gas di $15 M_{\odot}$ che si muove con velocità di 2500 km/sec—valoriragionevoli per un resto di supernova.

Verso la teoria del collasso (il futuro)

Nelle ultime righe, analizziamo un pò più in dettaglio la situazione attuale delle interpretazioni di quegli eventi. Il quadro di riferimento standard è stato proposto da Bethe e Wilson nel 1985 ed è l'unico che al momento è stato considerato ed analizzato in un certo dettaglio. Esso prevede (come già ricordato) che la gran parte dei neutrini siano emessi per raffreddare la stella di neutroni in un processo termico quasi stazionario, ma anche che ci sia una fase iniziale di emissione di natura non-termica e coinvolgente una emissione di neutrini 10-20 volte più grande dei 10^{51} erg necessari, che riesce ad assistere l'esplosione e far in modo che questa abbia luogo (per inciso, è questa la fase che non si è riusciti a simulare). È molto interessante che una analisi combinata dei 25 eventi di neutrino di Kamiokande-II, IMB e Baksan suggerisca che nel primo secondo circa sia avvenuto proprio qualcosa del genere. Questo permette anche di risolvere alcuni dei dubbi relativi ai 25 eventi. Gli eventi rilevanti sono davvero pochi, ma a mio personale avviso non si dovrebbe ignorare che la quantità di energia che si stima emessa nel primo secondo sia varie volte più grande di quello che ci si aspetterebbe. Comunque, l'opinione di massima che ci si forma sulla scorta del quadro di riferimento standard è che, mentre si aspetta la prossima supernova, si devono raffinare i calcoli per capire quale sia il dettaglio al momento trascurato che causa della esplosione. Passiamo adesso alle altre interpretazioni di cosa sarebbe successo durante il collasso gravitazionale della SN1987A. Come abbiamo già ricordato i dati stessi motivano ad avanzare proposte diverse da quella standard; in particolare, il fatto che LSD abbia visto 5 eventi interpretabili come neutrini da supernova. Questa osservazione ha condotto diversi autori a proporre un collasso (ed una emissione di neutrini) a più stadi, cosa che solo a prima vista sembra essere incompatibile con l'insieme delle osservazioni. I modelli più interessanti sono quelli che introducono un ruolo essenziale della rotazione e possibilmente del campo magnetico nel collasso. Nel modello con rotazione proposto da Imshennik nel 1995 e recentemente elaborato insieme a Ryazhskaya la prima fase del collasso termina non appena il nucleo della stella si frammenta a causa della rapida rotazione. L'emissione di neutrini somiglia a quella da una fase di neutronizzazione³ particolarmente lunga, e pertanto vengono emessi principalmente neutrini elettronici. I frammenti formano un sistema gravitante che si scambia massa e perde momento angolare tramite l'emissione di onde gravitazionali. Dopo poche ore, il collasso può terminare con una successiva emissione di neutrini. Al momento, sembra che questi modelli (il cui studio è appena iniziato) possano spiegare tutti i 30 eventi e prevedere altri interessanti fenomeni, quali una ulteriore emissione di neutrini di energia molto alta tra le due (o più) fasi del collasso gravitazionale. Alcuni dubbi provengono dagli effetti di oscillazioni di neutrino, che sembrerebbero diminuire il numero di eventi attesi e rendere meno agevole questa interpretazione. È bene sottolineare che, tanto per i collassi standard quanto per quelli non standard, le simulazioni della esplosione richiedano calcoli estremamente complessi ed impegnativi. Al momento possiamo solo sperare che la prossima generazione di fisici e di computers (nell'ordine!) ci permetta di capire come funzionano le esplosioni di supernova. Nel frattempo, penso sia saggio continuare a riflettere sul significato di quelle osservazioni di 20 anni fa: altro non abbiamo.

³ La reazione nucleare corrispondente è $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$.

Bibliografia

Per chi è curioso di saperne di più, rimando ai siti web di 4 conferenze tenutesi rispettivamente a Mosca, Hawaii, Venezia e Torino nel ventennale della osservazione dei 30 eventi:

<http://lvd.ras.ru/SN1987A/en/materials/index.php>;

<http://sn1987a-20th.physics.uci.edu/Program1.htm>;

<http://neutrino.pd.infn.it/conference2007/talks.html>;

<http://www.to.infn.it/activities/schedules/SN1987A/congr-SN1987A.html>.

La domanda posta da Francesco Frontera al nostro risponditore Ciro Marmolino fornisce una bella introduzione al collasso standard e ad alcune delle relative problematiche:

<http://ulisse.sissa.it/chiediAulisse/domanda/2004/Ucau041129d004/>

Per gli specialisti, richiamo le referenze alle osservazioni e due lavori teorici importanti:

- [1] K. Hirata et al [Kamiokande-II Collaboration], *Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A*, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 1490;
R.M. Bionta et al., *Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova SN1987A in the large Magellanic Cloud*, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 1494;
E.N. Alekseev, L.N. Alekseeva, I.V. Krivosheina and V.I. Volchenko, *Detection of the neutrino signal from SN1987A in the LMC using the INR Baksan underground scintillator telescope*, *Phys. Lett.* **B 205** (1988) 209;
M Aglietta et al., *On the event observed in the Mont Blanc Underground Neutrino observatory during the occurrence of Supernova 1987A*, *Europhys. Lett.* **3** (1987) 1315.
- [2] H.A. Bethe, *Supernova mechanisms*, *Rev. Mod. Phys.* **62** (1990) 801;
V.S. Imshennik and O.G. Ryazhskaya, *A rotating collapsar and possible interpretation of the LSD neutrino signal from SN 1987A*, *Astron. Lett.* **30** (2004) 14.