



Le più luminose esplosioni dell'universo

Ogni lampo di raggi gamma segnala la nascita di un buco nero

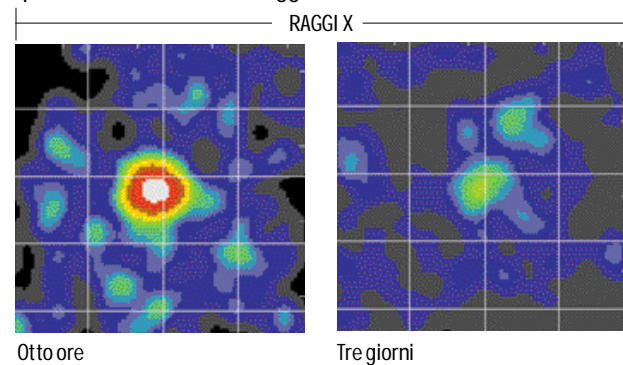
di Neil Gehrels, Luigi Piro e Peter J. T. Leonard

Nelle prime ore del mattino del 23 gennaio 1999, un telescopio automatico nel New Mexico individuò un debole lampo di luce nella costellazione della Corona Boreale. Sebbene fosse a malapena visibile con un binocolo, si trattava in realtà di una delle esplosioni più brillanti mai apparse a occhi umani. Era visibile da una distanza di 9 miliardi di anni luce: oltre metà dell'universo osservabile. Se lo stesso evento avesse avuto luogo a qualche migliaio di anni luce da noi, sarebbe stato luminoso quanto il Sole a mezzogiorno e avrebbe bombardato la Terra con una tale dose di radiazioni da uccidere quasi ogni essere vivente. Il lampo era uno dei famosi impulsi di raggi gamma (*gamma-ray burst* o GRB) che da alcuni decenni sono uno dei misteri più interessanti dell'astronomia. La prima osservazione di un GRB fu compiuta il 2 luglio 1967, da parte di satelliti militari destinati a rilevare eventuali test nucleari nello spazio. Queste esplosioni cosmiche si rivelarono assai diverse da quelle artificiali che i satelliti avevano il compito di individuare e, per gran parte dei 35 anni successivi, ogni nuovo lampo non fece altro che accrescere la perplessità.

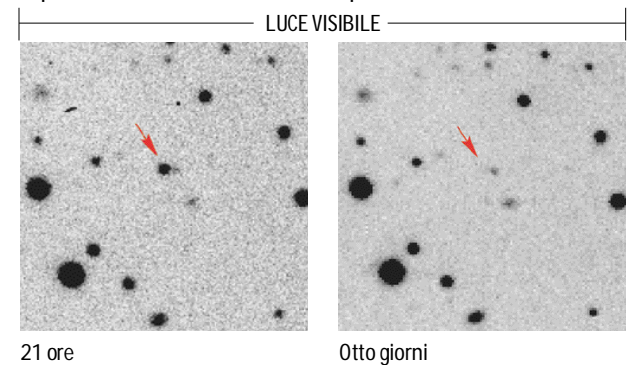
UN'IMMAGINE COME QUESTA non avrebbe potuto essere realizzata solo 10 anni fa, dato che nessuno ancora supponeva quale fosse la causa degli impulsi di raggi gamma, i lampi di radiazione di alta energia che appaiono nel cielo circa due volte al giorno. Ora gli astronomi li considerano come un «canto del cigno» stellare: un buco nero, creato dall'implosione di una stella gigante, inghiotte i resti dell'astro e ne espelle una parte in un getto. Una serie di onde d'urto emette radiazione.

UN BAGLIORE RESIDUO MOLTO CALDO

RAGGI X: otto ore dopo la comparsa di un impulso il 28 febbraio 1997, il satellite BeppoSAX scoprì un'emissione residua nei raggi X. La seconda immagine è stata ottenuta due giorni dopo, quando la luminosità nei raggi X era diminuita di un fattore 20.



LUCE VISIBILE: La stessa emissione residua fu osservata anche nel visibile. Nel giro di una settimana la luce si ridusse a un sesto della luminosità iniziale, e nel contempo la galassia ospite cominciò lentamente a comparire.



Ogni volta che qualche scienziato pensava di aver trovato la soluzione, nuovi dati sperimentali costringevano a ricominciare tutto daccapo. Eccezionali scoperte degli ultimi anni hanno finalmente avvicinato gli astronomi a una risposta esauriente. Prima del 1997, gran parte di ciò che si sapeva sui GRB si basava su osservazioni compiute dal Burst and Transient Source Experiment (BATSE) a bordo del Compton Gamma Ray Observatory. BATSE rivelò che tipicamente ogni giorno appaiono 2-3 GRB in qualche punto dell'universo osservabile: essi superano per luminosità qualsiasi altro oggetto celeste nei raggi gamma. E sebbene ciascuno di essi abbia caratteristiche singolari, gli impulsi si possono suddividere in due grandi categorie: quelli che durano meno di due secondi sono «brevi» e gli altri - la maggioranza - si definiscono «lunghi».

Le due categorie differiscono da un punto di vista spettroscopico, dato che gli impulsi brevi contengono raggi gamma di energia relativamente più alta rispetto a quelli lunghi. L'impulso del gennaio 1999 emise raggi gamma per un minuto e mezzo.

Probabilmente il più importante fra i risultati ottenuti da BATSE riguarda la distribuzione degli impulsi, che è risultata isotropa: essi cioè sono ripartiti uniformemente in tutto il cielo. Questa scoperta gettò dubbi sull'interpretazione prevalente, secondo la quale le sorgenti degli impulsi si sarebbero trovate nell'interno della Via Lattea; in questo caso, infatti, la forma della nostra galassia e la posizione eccentrica della Terra rispetto a essa avrebbero fatto sì che gli impulsi si raggruppavano in certi settori del cielo. L'uniformità della distribuzione condusse la maggior parte degli astronomi a conclu-

IN SINTESI

- Per 30 anni dopo la loro scoperta, lo studio degli impulsi di raggi gamma rimase più o meno al punto di partenza: gli astronomi non concordavano neppure su un modello schematico dell'origine di questi fenomeni cosmici.
- Nell'ultimo quinquennio, tuttavia, le osservazioni hanno permesso di correlare gli impulsi alla nascita di buchi neri. Probabilmente questi ultimi vengono generati in gran parte nel collasso di stelle di grande massa, che emette un impulso di radiazione visibile a miliardi di anni luce di distanza.
- Ora le ricerche possono dedicarsi a problemi più di dettaglio, quali il completamento della teoria e lo studio di questioni come l'incredibile diversità degli impulsi gamma.

dere che le osservazioni si riferissero a un qualche tipo di evento diffuso in tutto l'universo. Purtroppo i raggi gamma, da soli, non fornivano informazioni sufficienti per risolvere definitivamente il problema. Sarebbe stato necessario osservare la radiazione degli impulsi ad altre lunghezze d'onda. In luce visibile, per esempio, sarebbe stato possibile determinare in quali galassie erano avvenuti gli impulsi e quindi misurarne la distanza. Si fecero perciò alcuni tentativi per individuare le controparti ottiche degli impulsi, ma senza ottenere risultati.

Un balzo in avanti

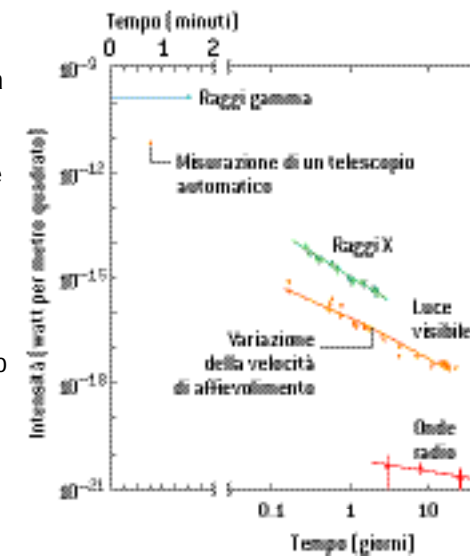
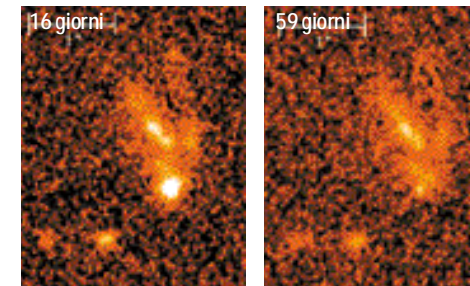
Un grande progresso si ebbe nel 1996 con il lancio della sonda per raggi X BeppoSAX, costruita e gestita dall'Agenzia spaziale italiana con la partecipazione dell'Agenzia spaziale dei Paesi Bassi. BeppoSAX fu il primo satellite capace di localizzare esattamente i GRB e di osservarne il bagliore residuo nei raggi X. Quest'ultima radiazione appare dopo la scomparsa dei raggi gamma e persiste per giorni o mesi, diminuendo di intensità col tempo e decadendo da raggi X in radiazione di minore energia, fino alla luce

visibile e alle onde radio. Sebbene BeppoSAX abbia rilevato bagliori residui solo dopo gli impulsi lunghi - finora non sono state identificate controparti di impulsi brevi - il suo contributo rese possibile proseguire le osservazioni nel tempo. Disponendo delle informazioni di posizione fornite dal satellite, i telescopi ottici e radio poterono identificare le galassie nelle quali avevano avuto luogo i GRB. Quasi tutte si trovano a miliardi di anni luce di distanza, il che implica che gli impulsi abbiano una potenza enorme (si veda l'articolo *Impulsi di raggi gamma* di Gerald J. Fishman e Dieter H. Hartmann in «Le Scienze» n. 349, settembre 1997). Energie così elevate comportano a loro volta cause fuori dal comune, e i ricercatori cominciarono ad associare ai GRB gli oggetti più estremi che si conoscessero: i buchi neri.

Uno fra i primi GRB localizzati da BeppoSAX fu GRB970508, così chiamato perché comparve l'8 maggio 1997. Le osservazioni radio del suo bagliore residuo fornirono un indizio cruciale. La luminosità residua variò irregolarmente di circa un fattore 2 nelle prime tre settimane, dopo di che si stabilizzò e iniziò a diminuire. Le ampie variazioni probabilmente

COME SVANISCE UN IMPULSO

IL PIÙ BRILLANTE IMPULSO GAMMA mai registrato è quello del 23 gennaio 1999. L'andamento della sua luminosità è stato seguito nei raggi gamma (*in blu nel grafico*), nei raggi X (*in verde*), nel visibile (*in arancione*) e nelle onde radio (*in rosso*). A un certo punto, la velocità di affievolimento è cambiata all'improvviso: un indizio del fatto che la radiazione proveniva da getti sottili di materia ad alta velocità. Due settimane dopo l'impulso, allorché la luce visibile si era indebolita di un fattore 4 milioni, in un'immagine dello Hubble Space Telescope si è evidenziata una galassia estremamente distorta. Tipicamente, simili galassie sono sede di intensa formazione stellare. Se gli impulsi sono esplosioni associate a giovani stelle massicce, dovrebbero effettivamente avvenire in questi siti.



Cornelia Blak (grafico); Andrew Fruchter, Space Telescope Institute/NASA

non erano dovute alla sorgente stessa dell'impulso, ma erano legate alla propagazione della radiazione residua nello spazio. Esattamente come l'atmosfera terrestre fa vacillare la luce delle stelle, così il plasma interstellare provoca scintillamenti nelle onde radio. Perché questo effetto si manifesti la sorgente deve essere così piccola e lontana da apparire puntiforme. I pianeti non presentano questo fenomeno in quanto, essendo piuttosto vicini, appaiono come dischi e non come punti.

Pertanto, se GRB970508 dapprima scintillava alle lunghezze d'onda radio e poi ha cessato di farlo, la sua sorgente deve aver aumentato le proprie dimensioni, passando da semplice punto a disco discernibile. In questo caso, «discernibile» significa con un diametro di alcune settimane luce. Per raggiungere tali dimensioni, la sorgente deve aver subito un processo di espansione assai rapido, a una velocità vicina a quella della luce.

Le osservazioni di BeppoSAX e successive hanno modificato radicalmente la concezione dei GRB. Il vecchio modello che prevedeva un'improvvisa liberazione di energia concentrata in pochi secondi è stato scartato. In effetti, anche il termine

di «bagliore residuo» è ora riconosciuto come fuorviante: l'energia emessa in entrambe le fasi è confrontabile. Lo spettro della luminosità residua è caratteristico di elettroni in movimento in un campo magnetico a velocità vicinissime a quella della luce.

L'impulso del gennaio 1999 (chiamato GRB990123) è stato fondamentale nel dimostrare l'enorme potenza di questi eventi. Se l'impulso ha emesso la propria energia egualmente in tutte le direzioni, la sua luminosità deve essere stata dell'ordine di 10^{45} watt, ovvero 10^{19} volte superiore a quella del Sole. Anche un altro ben noto tipo di catastrofi cosmiche, le esplosioni di supernova, libera quasi altrettanta energia, ma la maggior parte di questa sfugge sotto forma di neutrini, e il resto viene liberato più gradualmente che in un GRB. Di conseguenza, in ogni dato momento, la luminosità di una supernova è solo una piccola frazione di quella di un impulso gamma. Anche i quasar, che sono oggetti incredibilmente brillanti, hanno un'emissione non superiore a 10^{40} watt circa.

Se invece l'impulso ha emesso la propria energia in direzioni preferenziali, la luminosità stimata sarebbe più bassa.

Elementi a sostegno di una direzionalità dell'emissione sono forniti dal modo in cui il bagliore residuo di GRB990123, fra gli altri, si è affievolito nel tempo. Due giorni dopo l'inizio dell'impulso, la velocità di affievolimento è aumentata all'improvviso, come accadrebbe naturalmente se la radiazione osservata provenisse da un getto sottile di materia in moto a velocità vicina a quella della luce. A causa di un effetto relativistico, l'osservatore vede una parte sempre maggiore del getto via via che questo rallenta. A un certo punto, il getto è interamente visibile e la luminosità apparente comincia a ridursi più rapidamente (si veda l'illustrazione a pagina 106). Nel caso di GRB990123 e di diversi altri impulsi, l'ampiezza ipotizzata dell'angolo di apertura del getto è di pochi gradi; solo se quest'ultimo fosse diretto lungo la nostra linea di vista vedremo l'impulso. Questo effetto riduce l'energia totale emessa dall'impulso all'incirca in proporzione al quadrato dell'angolo di apertura del getto. Per esempio, se quest'ultimo sottende 10 gradi, copre circa 1/500 del cielo, sicché l'energia calcolata si riduce di un fattore 500; inoltre, per ogni GRB che si osserva, altri 499 restano invisibili. Anche dopo aver tenuto conto dell'emissione in getti, comunque, la luminosità di GRB990123 rimaneva impressionante, intorno a 10^{43} watt.

La connessione GRB-supernove

Una delle scoperte più interessanti è stata quella del rapporto fra GRB e supernove. Quando i telescopi furono puntati su GRB980425, individuarono anche una supernova, denominata SN1998bw, che era esplosa quasi contemporaneamente all'impulso. La probabilità di una coincidenza casuale era di 1 su 10.000.

Un legame fra GRB e supernove è stato anche rivelato dall'individuazione del ferro negli spettri X di diversi impulsi. Si sa che gli atomi di ferro vengono sintetizzati e dispersi nello spazio interstellare dalle esplosioni di supernova. Quando questi atomi perdono elettroni e più tardi li riacquisiscono, emettono radiazione a lunghezze d'onda caratteristiche, denominate righe di emissione. Le prime, e ancora ambigue, osservazioni di queste righe compiute nel 1997 da BeppoSAX e dal satellite giapponese per raggi X ASCA sono state seguite da misurazioni più affidabili. In particolare, il Chandra X-ray Observatory della NASA ha rivelato righe del ferro in GRB991216, ricavandone una misurazione diretta della distanza dell'evento. Il valore trovato concorda con la distanza stimata della galas-

sia ospite dell'impulso. Ulteriori osservazioni danno conferma alla connessione fra GRB e supernove. Una riga di assorbimento del ferro è stata rilevata nello spettro X di GRB990705. Nel guscio di gas circostante a un altro impulso, GRB011211, il satellite X-ray Multi Mirror dell'Agenzia spaziale europea ha evidenziato righe di emissione di silicio, zolfo, argo e altri elementi comunemente liberati nelle esplosioni di supernova.

Sebbene la questione sia ancora dibattuta, un gruppo sempre più numeroso di studiosi ritiene che lo stesso oggetto possa produrre, in taluni casi, sia un impulso di raggi gamma sia una supernova. Dato che i GRB sono molto più rari delle supernove - se ne manifestano circa due al giorno nell'universo, contro centinaia di migliaia di supernove - è chiaro che i due eventi non sono sempre associati; ma alcuni potrebbero esserlo. Secondo una versione di questa ipotesi, le esplosioni di supernova occasionalmente espellono getti di materia che generano un GRB. Nella maggior parte di questi casi, si osserva o una supernova o un impulso gamma, ma non entrambi. Se i getti fossero diretti verso la Terra, la luce dell'impulso maschererebbe totalmente quella della supernova; se fossero puntati in un'altra direzione, sarebbe visibile solo la supernova. In alcuni casi, tuttavia, il getto può essere appena spostato rispetto alla nostra linea di vista, permettendoci di vedere entrambi. Questo lieve disallineamento spiegherebbe GRB980425.

Questa ipotesi presuppone che tutti o quasi i GRB siano associati alle supernove; ma uno scenario leggermente diverso stabilisce una correlazione solo con un sottoinsieme di impulsi gamma. Circa il 90 per cento degli impulsi osservati da BATSE costituisce una classe distinta, definita da luminosità ultrabasse e lunghi ritardi spettrali (ovvero, gli impulsi di raggi gamma di alta energia e quelli di bassa energia arrivano distanziati di diversi secondi). Non si sa per quale motivo gli impulsi non siano sincroni. Ma, quale che sia la ragione, questi strani GRB hanno circa la stessa frequenza di un particolare tipo di esplosione di supernova, chiamato Ib/c, che avviene quando il nucleo di una stella massiccia implode.

Grandi palle di fuoco

Anche tralasciando il problema di come possa essere generata l'energia dei GRB, la loro enorme luminosità crea un paradosso. Le rapide variazioni di luminosità fanno pensare che l'emissione abbia origine in una piccola regione: una luminosità 10^{19} volte superiore a quella del Sole è prodotta in un volume circa

pari a quello della nostra stella. Con una simile quantità di radiazione che fuoriesce da uno spazio così ridotto, i fotoni devono essere impacchettati tanto strettamente che dovrebbero interagire e impedirsi reciprocamente la fuga. È come se una folla di persone corresse verso una porta creando una calca tale che nessuno riesce a uscire. Ma se i raggi gamma non sono in grado di sfuggire, come possiamo osservare i GRB?

La soluzione di questo dilemma, elaborata nel corso degli ultimi anni, è che i raggi gamma non vengono emessi immediatamente. Invece l'energia iniziale dell'esplosione è immagazzinata nell'energia cinetica di un guscio di particelle - una palla di fuoco - in moto a velocità vicina a quella della luce. Le particelle comprendono fotoni, elettroni e le controparti di antimateria di questi ultimi, i positroni. La palla di fuoco si espande fino a un diametro di 10-100 miliardi di chilometri, ossia fino a che la densità dei fotoni non diminuisce a sufficienza perché i raggi gamma sfuggano senza impedimento. A questo punto, la palla di fuoco converte parte della propria energia cinetica in radiazione elettromagnetica, producendo un GRB.

L'emissione iniziale di raggi gamma è molto probabilmente la conseguenza di onde d'urto interne nella palla di fuoco in espansione. Le onde insorgono quando masse più veloci di materia in espansione raggiungono e investono masse più lente. Poiché la palla di fuoco si sta espandendo a una velocità vicinissima a quella della luce, la scala temporale percepita da un osservatore esterno è fortemente compressa, conformemente ai principi della relatività. Perciò l'osservatore vede un impulso di raggi gamma che dura solo pochi secondi, anche se per produrlo è stata necessaria un'intera giornata. La palla di fuoco continua a espandersi, e prima o poi incontra e spazza via il gas circostante. Si forma una nuova onda d'urto, questa volta al confine fra la palla di fuoco e il mezzo esterno, che persiste via via che la palla di fuoco rallenta. Questa onda d'urto esterna spiega perfettamente il bagliore residuo del GRB e il graduale decadimento dell'emissione dai raggi gamma, ai raggi X, alla luce visibile e, infine, alle onde radio.

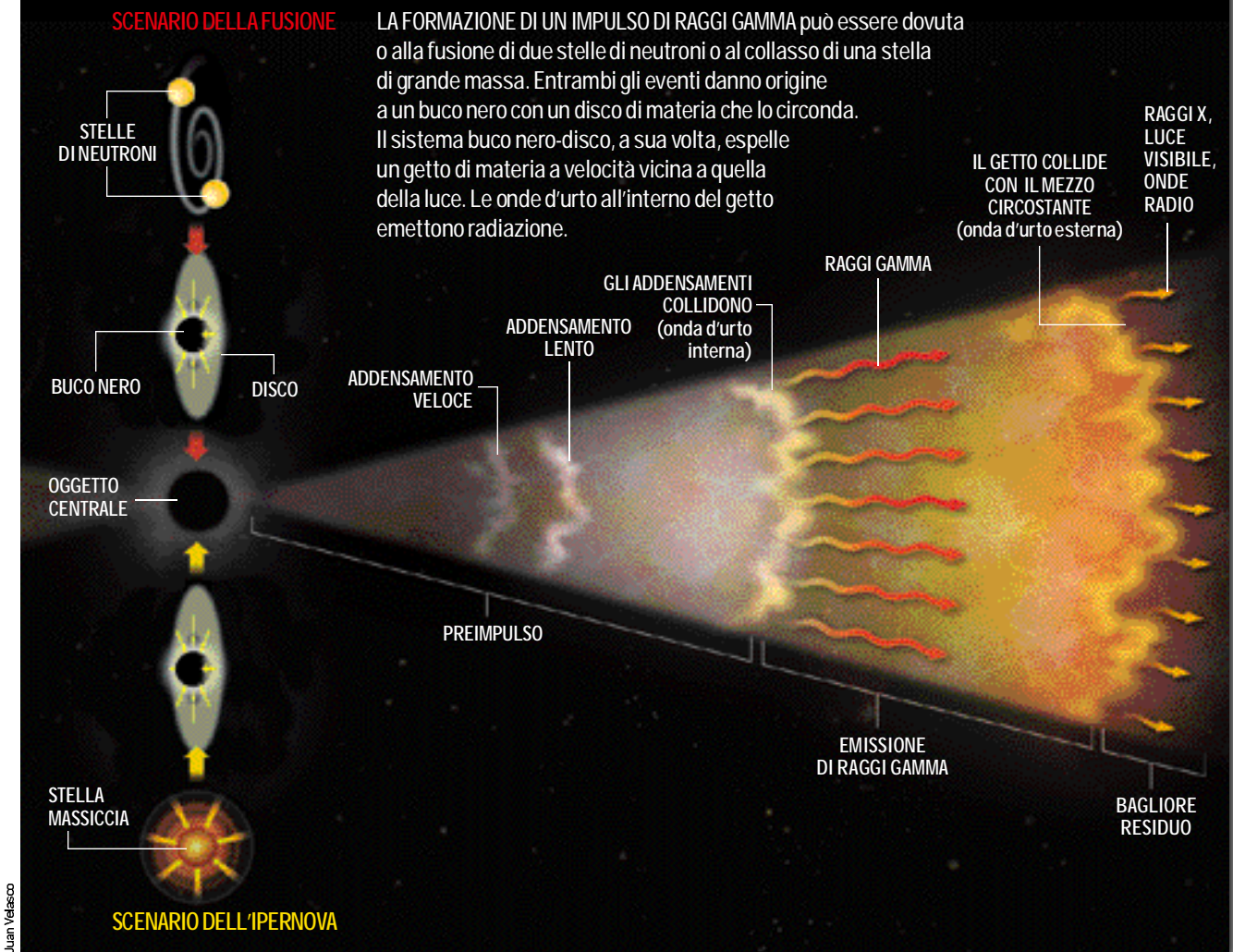
Sebbene la palla di fuoco possa trasformare l'energia dell'esplosione nella radiazione che si osserva, che cosa genera l'energia in primo luogo? È un problema distinto, e gli astronomi hanno ancora opinioni discordanti. I modelli delle cosiddette ipernove o collapsar chiamano in causa stelle con masse iniziali maggiori di 20-30 masse solari. Le simulazioni indicano che il nucleo di una simile stella



finisce per collassare e formare un buco nero in rapida rotazione circondato da un disco di materia residua.

Una seconda famiglia di modelli riguarda sistemi binari costituiti da due oggetti compatti, come una coppia di stelle di neutroni (residui stellari ultradensi) o una formata da una stella di neutroni e un buco nero. I due oggetti si avvicinano l'uno all'altro su traiettorie a spirale e si fondono. Proprio come nello scenario dell'ipernova, il risultato è la formazione di un buco nero singolo circondato da un disco.

COME NASCE UN IMPULSO GAMMA



GLI AUTORI

NEIL GEHRELS, LUIGI PIRO e PETER J. T. LEONARD studiano i burst di raggi gamma dal punto di vista teorico e osservativo. Gehrels è direttore del Gamma Ray, Cosmic Ray and Gravitational Wave Astrophysics Branch del Laboratory for High Energy Astrophysics presso il Goddard Space Flight Center della NASA e responsabile scientifico del Compton Gamma Ray Observatory. Piro è membro dell'Istituto di astrofisica spaziale e fisica cosmica del CNR a Roma e responsabile scientifico del satellite BeppoSAX. Leonard lavora per la Science Systems and Applications a supporto delle missioni del Goddard.

Molti fenomeni celesti includono una combinazione buco nero-disco. Ciò che distingue questo particolare tipo di sistema è la massa enorme del disco (che permette la liberazione di quantità colossali di energia) e la mancanza di una stella compagna capace di rifornire il disco stesso di materia (il che significa che l'emissione di energia deve essere un evento non ripetibile). Il buco nero e il disco hanno due grandi serbatoi di energia: l'energia gravitazionale del disco e quella rotazionale del buco nero. Non è noto esattamente in che modo esse possano

venire convertite in radiazione gamma. Può darsi che un campo magnetico, 10^{15} volte più intenso del campo terrestre, si accumuli durante la formazione del disco. Quest'ultimo, a sua volta, si riscalda fino a temperature così elevate da emettere una palla di fuoco di plasma e raggi gamma. La palla di fuoco è convogliata in una coppia di getti sottili che fuoriescono lungo l'asse di rotazione.

Poiché l'emissione dei GRB è spiegata altrettanto bene sia dal modello delle ipernove sia da quello della fusione di oggetti compatti, è necessario esaminare

qualche altra qualità degli impulsi per decidere fra i due scenari. L'associazione dei GRB con le supernove, per esempio, è un punto a favore del modello delle ipernove, che, dopo tutto, sono essenzialmente grandi supernove. Oltre a ciò, i GRB sono stati individuati proprio dove ci si aspetterebbe di trovare le ipernove, ossia in regioni di formazione stellare recente nell'interno delle galassie. Una stella massiccia esaurisce il proprio combustibile abbastanza rapidamente (in pochi milioni di anni), sicché la sua morte in genere avviene non lontano dal luogo della sua nascita. Viceversa, la coalescenza di stelle compatte è un processo che riguarda oggetti dalla lunga vita (miliardi di anni), i quali, dalla loro nascita, hanno avuto il tempo di migrare un po' in tutta la galassia. Se essi fossero associati ai GRB, questi ultimi non dovrebbero manifestarsi preferenzialmente nelle regioni di formazione stellare.

Sebbene le ipernove probabilmente spieghino la maggior parte dei GRB, la

coalescenza di stelle compatte potrebbe comunque avere un suo ruolo nel quadro più ampio. Questo meccanismo potrebbe essere all'origine degli ancora poco conosciuti GRB di breve durata. Oltre a ciò, non sono stati ancora esclusi altri modelli per gli impulsi gamma. In uno scenario, la palla di fuoco si produce per estrazione di energia da un buco nero elettricamente carico. Secondo questo modello, sia l'emissione immediata sia il bagliore residuo sarebbero conseguenze della palla di fuoco che investe il mezzo esterno.

Gli astronomi hanno compiuto molti progressi nella conoscenza degli impulsi di raggi gamma, ma ancora non sanno esattamente che cosa provochi queste esplosioni né hanno un quadro chiaro della ricca varietà e delle numerose sotto-classi di impulsi.

Tutti questi risultati recenti hanno dimostrato come il settore dei GRB sia potenzialmente in grado di fornire una risposta ad alcune delle domande più fondamentali in astronomia: in che modo le stelle terminano la propria vita? Come e dove si formano i buchi neri? Qual è la natura delle emissioni a getto dei corpi collassati?

Impulsi gamma dal passato

Una importante questione che rimane in sospeso è quella dei GRB oscuri, o «fantasma». Dei circa 30 impulsi che sono stati localizzati e studiati a lunghezze d'onda diverse dai raggi gamma, il 90 per cento è stato osservato nei raggi X. Viceversa, solo il 50 per cento circa era individuabile alle lunghezze d'onda ottiche. Perché alcuni impulsi non hanno emissioni nel visibile?

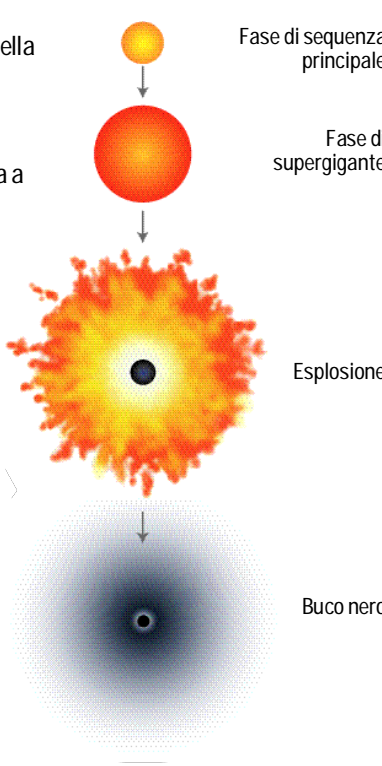
Una spiegazione è che questi GRB siano situati in regioni di formazione stellare, le quali tendono a essere ricche di polvere capace di bloccare la luce visibile (ma non i raggi X). Un'altra possibilità interessante è che i GRB fantasma si trovino a distanze enormi, nel qual caso le lunghezze d'onda della luce visibile prodotta dall'impulso verrebbero assorbite dal gas intergalattico. Per verificare questa ipotesi, saranno cruciali le misurazioni della distanza tramite gli spettri X. Una terza possibilità è che i GRB fantasma siano otticamente deboli per natura. I dati attuali sembrano favorire l'ipotesi della polvere; indagini ad alta sensibilità nelle regioni spettrali ottica e radio hanno identificato le probabili galassie ospiti di due GRB oscuri, ed entrambe si trovano a distanze relativamente modeste.

Un altro mistero riguarda una classe di eventi chiamati GRB ricchi di raggi X, o semplicemente lampi X. Si è stabilito che questi impulsi, scoperti da BeppoSAX e

IL DESTINO DELLE STELLE MASSICCE

LE STELLE TRASCORRONO GRAN PARTE DELLA PROPRIA ESISTENZA nella fase evolutiva relativamente tranquilla della sequenza principale, durante la quale esse convertono lentamente idrogeno in elio nel proprio nucleo tramite la fusione nucleare. Il Sole si trova in questa fase. Secondo la teoria stellare di base, le stelle di massa superiore a quella solare hanno una luminosità più elevata e bruciano più rapidamente il proprio combustibile. Una stella di 20 masse solari può vivere solo per un millesimo della vita del Sole.

Via via che l'idrogeno si esaurisce, il nucleo della stella si contrae, si riscalda e comincia a fondere elementi più pesanti, come elio, ossigeno e carbonio. La stella evolve quindi in una gigante e poi, se la massa è sufficiente, in una supergigante. Se la sua massa iniziale è almeno 8 volte quella solare, la stella fonde via via elementi sempre più pesanti fino a produrre ferro. La fusione del ferro, però, non genera energia; al contrario, ne richiede. Perciò la stella si ritrova all'improvviso priva di combustibile. Ciò che ne risulta è un collasso improvviso e catastrofico. Si ritiene che il nucleo dia origine a una stella di neutroni: un resto stellare che contiene almeno il 40 per cento di massa in più del Sole concentrata in una sfera con un raggio di soli 10 chilometri. Ciò che rimane della stella viene espulso violentemente nello spazio in una potente esplosione di supernova. C'è un limite alla massa di una stella di neutroni: specificamente, essa non può essere maggiore di 2-3 masse solari. In caso contrario, la teoria prevede che l'oggetto collassi in un buco nero; questo può accadere se una quantità sufficiente di materia cade sulla stella di neutroni. È anche possibile che un buco nero possa formarsi direttamente durante il collasso. Le stelle con massa iniziale superiore a circa 20 masse solari sarebbero destinate a diventare buchi neri; la nascita di questi ultimi costituisce una spiegazione naturale degli impulsi di raggi gamma.



in seguito confermati da nuove analisi dei dati di BATSE, rappresentano il 20-30 per cento di tutti i GRB. Essi emettono più radiazione X che radiazione gamma; in effetti, in casi estremi non si ha alcuna radiazione gamma individuabile.

Una possibile spiegazione è che la palla di fuoco contenga una quantità relativamente grande di materia barionica - protoni, per esempio - che la renderebbe «sporca». Simili particelle aumenterebbero l'inerzia della palla di fuoco, sicché essa si muoverebbe più lentamente e avrebbe una minore capacità di portare i fotoni alle energie dei raggi gamma. In alternativa, i lampi X potrebbero provenire da galassie molto lontane, persino più lontane di quelle proposte per spiega-

re i GRB fantasma. L'espansione dell'universo sposterebbe allora i raggi gamma nella regione spettrale X, e il gas intergalattico bloccherebbe ogni bagliore residuo visibile. Di fatto, nessuno di questi lampi X ha una controparte ottica rilevabile: un'osservazione coerente con questo scenario. Se i lampi X o i GRB fantasma sono realmente collocati in galassie a distanze estreme, potrebbero far luce su un'era della storia dell'universo che per il resto si sottrae quasi completamente allo studio.

Il prossimo passo per l'astronomia dei GRB sarà quello di ottenere dati più consistenti sulle caratteristiche degli impulsi, delle emissioni residue e delle galassie ospiti. È necessario misurare molte centi-

LE CLASSI DEGLI IMPULSI DI RAGGI GAMMA

CLASSE DELL'IMPULSO (sottoclasse)	PERCENTUALE DI TUTTI GLI IMPULSI	DURATA TIPICA DELL'EMISSIONE INIZIALE (secondi)	EMISSIONE INIZIALE DI RAGGI GAMMA	EMISSIONE RESIDUA DI RAGGI X	EMISSIONE RESIDUA NEL VISIBILE	IPOTETICO OGGETTO CENTRALE	SPIEGAZIONE DELLE PROPRIETÀ PECULIARI
Lungo (normale)	25	20	✓	✓	✓	Esplosione energetica di una stella massiccia	Non applicabile
Lungo (oscuro o fantasma)	30	20	✓	✓	✗	Esplosione energetica di una stella massiccia	Estremamente distanti, oscurati da polvere o intrinsecamente deboli
Lungo (ricco di raggi X o lampo X)	25	30	✗	✓	✗	Esplosione energetica di una stella massiccia	Estremamente distanti o «contaminati» da un eccesso di particelle
Breve	20	0,3	✓	?	?	Fusione di una coppia di oggetti compatti	Non avvengono in regioni di formazione stellare, sicché il gas circostante è meno denso e le onde d'urto esterne più deboli

BIBLIOGRAFIA

LEONARD PETER J. T. e BONNELL JERRY T., *Gamma-Ray Bursts of Doom* in «Sky & Telescope», 95, n. 2, pp. 28-34, febbraio 1998.
 PIRO LUIGI e altri, *Observation of X-ray Lines from a Gamma-Ray Burst (GRB991216): Evidence of Moving Ejecta from the Progenitor*, in «Science», 290, pp. 955-958, 3 novembre 2000.
 MÉSZÁROS PETER, *Gamma-Ray Bursts: Accumulating Afterglow Implications, Progenitor Clues, and Prospects*, in «Science», 291, pp. 79-84, 5 gennaio 2001.
 WOOSLEY STAN, *Blinded by the Light*, in «Nature», 414, pp. 853-854, 20 dicembre 2001.
 KATZ JONATHAN I., *The Biggest Bangs: The Mystery of Gamma-Ray Bursts, the Most Violent Explosions in the Universe*, Oxford University Press, 2002.
 SCHILLING GOVERT, *Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe*, Cambridge University Press, 2002.

naia di impulsi di tutte le varietà: lunghi e brevi, brillanti e deboli, composti principalmente di raggi gamma oppure di raggi X, dotati o meno di bagliore residuo nel visibile. Attualmente le posizioni degli impulsi vengono fornite dal secondo satellite High Energy Transient Explorer, lanciato nell'ottobre 2000, e dall'Interplanetary Network, una serie di piccoli rivelatori di raggi gamma montati sulle sonde per l'esplorazione planetaria. La missione Swift, il cui lancio è previsto per l'autunno, permetterà di osservare a molte lunghezze d'onda centinaia di GRB e le loro emissioni residue. Nell'individuare un impulso, il rivelatore di raggi gamma del satellite attiverà automaticamente altri strumenti per osservazioni nei raggi X

e nel visibile. Una rapida risposta determinerà se il GRB possiede un bagliore residuo X oppure ottico; la missione sarà quindi sensibile agli impulsi di breve durata, che finora non è stato quasi possibile studiare.

Un altro obiettivo è quello di indagare i raggi gamma di energia più estrema. GRB940217, per esempio, ha emesso raggi gamma di alta energia per oltre un'ora dopo l'impulso, come è stato rivelato dall'Energetic Gamma Ray Experiment Telescope a bordo del Compton Gamma Ray Observatory. Al momento è ignoto come possano prodursi emissioni residue così imponenti e di energia tanto elevata. Il satellite AGILE dell'Agenzia spaziale italiana, il cui lancio è previsto per il 2004,

osserverà i GRB a queste elevate energie. La missione ad alta sensibilità Gamma-Ray Large Area Space Telescope, che dovrebbe partire nel 2006, sarà anch'essa fondamentale per studiare questo enigmatico fenomeno.

Altre missioni, sebbene non formulate solo per lo studio dei GRB, forniranno anch'esse un importante contributo. Si prevede che l'International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, lanciato il 17 ottobre 2002, riveli 10-20 GRB all'anno. L'Energetic X-ray Imaging Survey Telescope, che dovrebbe essere lanciato fra una decina di anni, avrà a bordo uno strumento per raggi gamma ad alta sensibilità capace di rivelare migliaia di GRB.

Questo settore di ricerca ha vissuto anni fondamentali, con la scoperta che i GRB sono enormi esplosioni che avvengono in tutto l'universo.

Gli impulsi gamma forniscono un'opportunità di estremo interesse per studiare nuovi tipi di fisica e per scoprire com'era l'universo nelle più antiche epoche di formazione stellare. Le osservazioni da Terra e dallo spazio negli anni a venire dovrebbero consentirci di indagare nei dettagli la natura di questi oggetti davvero notevoli. Ormai gli impulsi gamma non possono più essere definiti misteriosi, ma questo non significa certo che il problema da essi posto sia completamente risolto.