

# Sapere

bimestrale, giugno 2002

ISSN 0036-4681 edizioni Dedalo  
anno 68°, numero 3 (1020) 88-220-9335-6 / € 7,50

## DOSSIER /

### FINO ALL'ULTIMA GOCCIA

Siccità, inquinamento, privatizzazione. In tutto il pianeta è emergenza acqua. *Interventi di:* Mario Dall'Aglio, Pietro Laureano, Riccardo Petrella

### ENERGIA NUCLEARE

Un esperimento americano riapre la discussione sulla fusione fredda

### GLI ERRORI DI GALILEO

Per dimostrare alcune sue giuste intuizioni, il padre del metodo scientifico utilizzò anche ragionamenti sbagliati

### ASTROFISICA

Una nuova teoria sull'origine dei lampi gamma: a generarli sono i buchi neri in formazione

### SALUTE

Il mercato della fecondazione assistita



# Buchi neri, sorgenti di energia

R. Ruffini, S.S. Xue, C.L. Bianco, F. Fraschetti, P. Chardonnet

**I**n 15 secondi rilascia più energia del Sole in 10 miliardi di anni, oppure, e ciò è ancora più impressionante, in un secondo ha la luminosità di tutte le stelle dell'intero universo visibile in quel medesimo secondo: è un lampo gamma cosmico, o Gamma Ray Burst (GRB), da trent'anni uno dei più fitti misteri dell'Universo, che ora potrebbe aver trovato una soluzione. Coppie formate da un elettrone e dalla sua anti-particella, il positrone, create dal vuoto, possono estrarre l'energia di un buco nero dotato di un campo elettromagnetico. Espulso a una velocità prossima a quella della luce, questo flusso collide con la materia residua dal collasso da cui ha avuto origine il buco nero e con il mezzo interstellare. Il modello descritto, che spiega sia le sorgenti di breve durata che quelle di lunga durata, è corroborato dall'evento del 16 dicembre 1999. Quel giorno, un'emissione di raggi gamma cosmici fu rilevata dal Burst and Transient Source Experiment (BATSE) del Compton Gamma-ray Observatory della Nasa. Il lampo di raggi cosmici, uno dei più luminosi mai catturati da quello strumento, fu localizzato con maggiore precisione dal telescopio Rossi X-Ray Transient Explorer. Anche il telescopio spaziale Chandra X-Ray poté osservarlo, riuscendo a riorientarsi verso l'evento quando il flusso di energia era ancora elevato. Chandra ha mostrato l'*afterglow* di un lampo di raggi gamma alla più alta risoluzione di sempre, permettendone l'esatta locazione in una galassia lontana circa 8 miliardi di anni luce dalla Terra.

Lev Landau, premio Nobel per la Fisica nel 1962, notava «l'enorme potenza della scienza che ci permette di scoprire e di comprendere fenomeni che la mente umana non sarebbe capace di immaginare». L'avventura dei lampi gamma ce ne dà un esempio stupefacente. Utilizzando i concetti della relatività generale di Einstein e la conoscenza della teoria quantistica dei campi (1), introdotta da Werner Heisenberg, noi abbiamo sviluppato un mo-

dello completo che spiega, con una precisione di qualche millisecondo, fenomeni che avvengono a miliardi di anni-luce dalla Terra. Questa scoperta è stata possibile, non solo utilizzando il fiore delle teorie fisiche, ma anche con uno dei più grandi sforzi osservativi mai compiuti: vi hanno partecipato non meno di sei satelliti, i più grandi osservatori terrestri e una rete di antenne radio. Noi ne concludiamo che i lampi gamma, bruschi flash di luce molto energetici provenienti da galassie lontane, sono emessi da buchi neri in formazione.

Questa idea può sembrare paradossale. Come può un buco nero, gigantesco aspiratore di materia, emettere energia? Ciò è teoricamente possibile. Se l'inglese Stephen Hawking ha dimostrato che buchi neri microscopici possono evaporare, Demetrios Christodoulou e uno di noi (Remo Ruffini), nel 1971, hanno ipotizzato che buchi neri più massicci possono trasformare la loro massa in energia, secondo una formula detta di massa-energia [1]. Questa trasformazione si traduce sia in un aumento della loro energia di rotazione, sia in una amplificazione del loro campo elettromagnetico; o entrambi. Perché i buchi neri possano ruotare più velocemente, bisogna tuttavia che essi ruotino. Analogamente, per amplificare il loro campo elettromagnetico, bisogna tuttavia che abbiano sia un campo magnetico che un campo elettrico, come in questo caso. Siccome tutte le stelle sono in rotazione, il cuore di una stella massiccia che collassa in un buco nero inizia a ruotare più velocemente, come un pattinatore che incrocia le sue braccia sulla pista. Per il campo elettromagnetico, il processo è molto simile. Le nubi molecolari che danno luogo alle stelle hanno un campo magnetico e materia elettricamente carica, elettroni e protoni. Mentre la nube si contrae, il campo magnetico si concentra nella stella nascente, in cui le cariche si ripartiscono tra il cuore e l'involucro gassoso. Oppure, come Faraday ha mostrato nel

*I Gamma Ray Burst sono da 30 anni uno dei più fitti misteri dell'Universo. Ora un gruppo di ricercatori italiani propone un modello che spiega la loro origine grazie ai dati provenienti da sei satelliti a cui si è applicata la teoria quantistica dei campi. Il risultato, per alcuni versi paradossale, è che i lampi gamma sono emessi dai buchi neri in formazione*

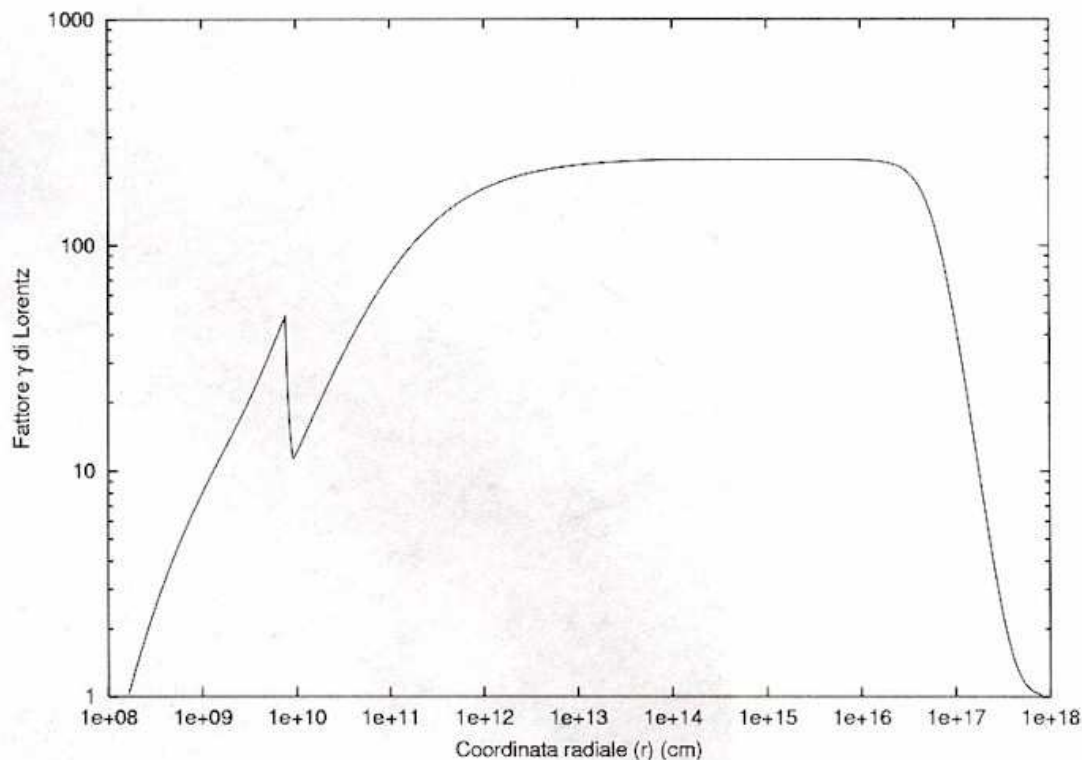


Fig. 1. Quando una stella molto massiccia collassa in un buco nero dotato di un campo elettromagnetico elevato, la zona circostante il buco nero si riempie di elettroni e di positroni che si allontanano molto rapidamente e si annichilano per dare luogo a un piccolo primo lampo gamma (P-GRB). Il flusso di materia, d'anti-materia e di fotoni collide successivamente con la materia interstellare e produce il lungo lampo gamma, seguito dalle emissioni in X, luce visibile e onde radio. Questo modello permette di seguire l'evoluzione di tutti i parametri fisici del sistema dall'istante iniziale. Si noteranno i valori estremamente elevati del fattore gamma di Lorentz, indice della velocità relativistica delle particelle. Al massimo, la loro velocità d'espansione si avvicina a quella della luce per 50 milionesimi.

1831, per tutti i corpi in movimento con un campo magnetico questo genera un campo elettrico tanto più forte quanto più la rotazione e il campo magnetico sono elevati. Il buco nero è tuttavia un caso speciale, estremo, cui si applica la teoria della relatività generale. Essa indica che campo magnetico, carica elettrica e rotazione sono parametri legati, come nel caso delle particelle elementari. Così è teoricamente possibile che i buchi neri ruotino su sé stessi e abbiano un campo elettromagnetico molto elevato. La prova tanto cercata è là, sotto i nostri occhi: come noi mostriamo nei nostri articoli [2], è l'estrazione di energia da questi buchi neri elettromagnetici a creare i lampi gamma nonché le emissioni di luce X, visibile e radio, osservate a tempi più grandi, gli *afterglows*.

Dopo più di trenta anni, la maggiore difficoltà consisteva nel trovare una descrizione dettagliata dei processi fisici che contribuivano a una tale trasformazione della massa-energia di un buco nero in energia di rotazione o in amplificazione del campo elettromagnetico. Roger Penrose, nel 1970, aveva tentato la prima soluzione [3]. Nel 1975, a Princeton, il francese Thibault Damour, ora all'Institut des hautes études scientifiques, e uno di noi (Ruffini) avevano mostrato un'altra via: l'energia elettromagnetica può essere estratta tramite il processo quantistico detto di polarizzazione del vuoto (2), nel quale sono create, in un tempo estremamente breve, coppie for-

mate da un elettrone e dalla sua anti-particella, il positrone [4]. Ma il campo elettromagnetico deve essere elevato. Questo può avvenire in una zona chiamata diadosfera (dal greco *duas-duados*, coppia), che circonda l'orizzonte del buco nero, limite della regione dalla quale nulla può sfuggire. Per un buco nero di 10 masse solari, il raggio dell'orizzonte è di 10 km, quello della diadosfera di 1000 km [5] (vedi Fig. 1).

Secondo la formula di massa-energia dei buchi neri, l'energia immagazzinata in questa diadosfera è esattamente dell'ordine osservato nei più potenti lampi gamma ( $10^{54}$  erg). In meno di un centomillesimo di miliardesimo di secondo, per il processo di polarizzazione del vuoto, si creano coppie elettrone-positrone che si annichilano in fotoni gamma che a loro volta si rimaterializzano in coppie elettrone-positrone. Questo plasma di elettroni, positroni e fotoni inizia a espandersi a velocità relativistiche, ovvero prossime a quelle della luce, in modo simile a una bomba termonucleare in cui si produce un flash elettromagnetico di fotoni, l'EM pulse. Nel nostro caso noi trattiamo un fenomeno più energetico: non solamente fotoni ma anche coppie elettrone-positroni. Per questo abbiamo scelto di chiamare tale plasma in rapida espansione PEM pulse, dove la «P» sta per coppie (*pair* in inglese).

Allo scopo di verificare la nostra idea, Jim Wilson, direttore del gruppo di teorie dei modelli di bombe atomiche del Livermore

Fig. 2. Immagine della nebulosa della tarantola.

Numerosi lampi gamma di cui si è potuto verificare la localizzazione hanno luogo in regioni popolate da stelle giovani come la regione Hodge 301 della nebulosa della Tarantola, situata nella Grande Nube di Magellano, una galassia satellite della nostra. Sono sicuramente presenti buchi neri provenienti da stelle molto massicce già collassate, mentre la maggior parte delle stelle, più piccole, sono ancora molto giovani.



Radiation Laboratory, ha simulato l'evoluzione di questo plasma sul suo super-computer [6]. Sembrava che tale espansione potesse effettivamente avvenire a una velocità estremamente vicina a quella della luce. Il suo fattore di Lorentz, che è usato in relatività speciale per indicare le velocità più elevate, può raggiungere il valore 1000, laddove un fattore di Lorentz di 100 corrisponde già a una velocità vicina per 50 milionesimi a quella della luce. Queste velocità sono, per una massa un miliardo di miliardi di miliardi di miliardi ( $10^{36}$ )

più grande, equivalenti a quelle che saranno impresse ai protoni del futuro Large Hadron Collider (LHC) del CERN. Siamo dunque in presenza dei più potenti acceleratori cosmici mai osservati. Questa necessità di tener conto degli effetti di relatività generale e speciale è un elemento chiave per la comprensione dei lampi gamma. Questa è, dal nostro punto di vista, la debolezza dei modelli esistenti, compreso il cosiddetto modello a «fireball» di Martin Rees e Peter Meszaros.

A questo istante del nostro scenario, il lampo gamma non ha ancora avuto luogo; ma non tarderà. Il gigantesco *pulse* relativistico collide violentemente con il materiale residuo della stella che non è collassato nel buco nero e cattura protoni ed elettroni. Il nuovo *pulse*, formato da elettroni e positroni che si annichilano, da fotoni e protoni, prosegue la sua espansione relativistica mentre si raffredda. I fotoni divengono meno energetici e si rimaterializzano progressivamente meno in elettroni e positroni che invece continuano ad annichilarsi. Le collisioni tra fotoni e particelle divengono più rare, finché i fotoni riescono a continuare il loro cammino senza essere assorbiti: questa è l'emissione di un primo flash di fotoni, una sorgente gamma visibile nelle osservazioni come «precursore» ma che, nel nostro modello, è il vero lampo gamma o P-GRB (Proper Gamma Ray Burst) (Figura 1). Questa predizione totalmente nuova rispetto agli altri modelli è stata confermata dall'osservazione della sorgente GRB991216, rivelata

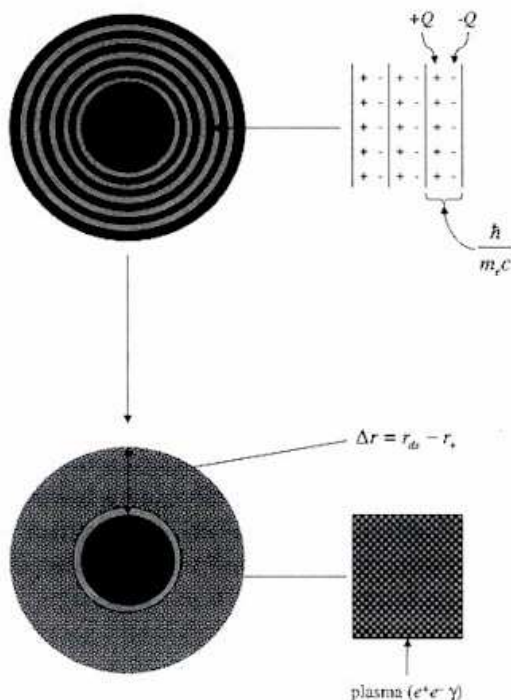


Fig. 3. Per il processo di polarizzazione del vuoto, si crea una enorme quantità di coppie elettroni-positroni distribuite in gusci concentrici in una zona prossima all'orizzonte del buco nero, la diadosfera. La densità e la temperatura sono tali che esse formano un plasma in equilibrio termico.

dai tre satelliti americani Compton GRO, Chandra e Rossi-XTE, in quanto, questa volta, l'intensità di tale flash era superiore al rumore di fondo (vedi Fig. 4). La simulazione dell'intensità di questa sorgente e della sua sequenza temporale sono in perfetto accordo con le osservazioni [7].

Il resto del plasma, ora costituito principalmente da protoni ed elettroni, prosegue il suo corso ultra-relativistico e incontra il terzo attore: il mezzo interstellare. Questa collisione estremamente violenta produce un gigantesco fuoco d'artificio. Durante tale fase, il nostro modello predice che l'emissione aumenta, attraversa un picco, poi decresce seguendo la granularità del mezzo interstellare che circonda il buco nero, poiché la luminosità dell'*afterglow* è con buona approssimazione proporzionale alla quantità di materia interstellare incontrata. Nel caso di GRB991216 tale emissione ritardata è ben maggiore del P-GRB. Questo secondo flusso di emissione gamma in prossimità del picco o E-APE (Extended Afterglow Peak Emission) è proprio il lampo gamma che i vari modelli tentano di spiegare. Questa non è in realtà una sorgente ma il seguito dell'emissione che è stato erroneamente interpretato come una sorgente a causa del fatto che la sensibilità dei rivelatori non era sufficientemente elevata. Dunque le sorgenti di lunga durata non sono altro che E-APE. Mentre il flusso di protoni rallenta e si raffredda, l'E-APE è seguito dall'emissione in X, visibile e radio: tale emissione ritardata, o *af-*

*terglow*, è stata osservata in quasi tutte le sorgenti.

E funziona! Il nostro modello permette di seguire, secondo per secondo, l'evoluzione di questo *pulse* e dei suoi parametri fisici come la temperatura, la densità o la velocità di propagazione, come il dettaglio delle onde di *shock*. Siamo lontani dal modello del *fireball* che suppone l'esistenza di *shock* interni e di un meccanismo che, come la sorgente, genera queste differenti onde. Viceversa, il nostro modello si avvicina a quello sviluppato da Charles Dermer del Naval Research Laboratory [8] che aveva previsto la possibilità di utilizzare i lampi gamma per effettuare una tomografia del mezzo interstellare.

Tuttavia è chiaro che ogni spiegazione del fenomeno dell'*afterglow* passa per la necessaria conoscenza del processo sin dall'istante iniziale. Questo fenomeno non può essere dissociato da ciò che è avvenuto nella sorgente e che a esso ha dato origine. Questo punto di vista globale di spiegazione dei lampi gamma ci permette, per la prima volta, di stabilire le trasformazioni spazio-temporali relativistiche corrette per descriverlo, tenendo conto anche del *redshift* cosmologico (3). Questo dipende da tre parametri: la massa del buco nero, la sua carica e la quantità di materiale residuo della stella non collassato nel buco nero. D'altra parte, questa evoluzione si svolge su una scala temporale che va da qualche millisecondo a

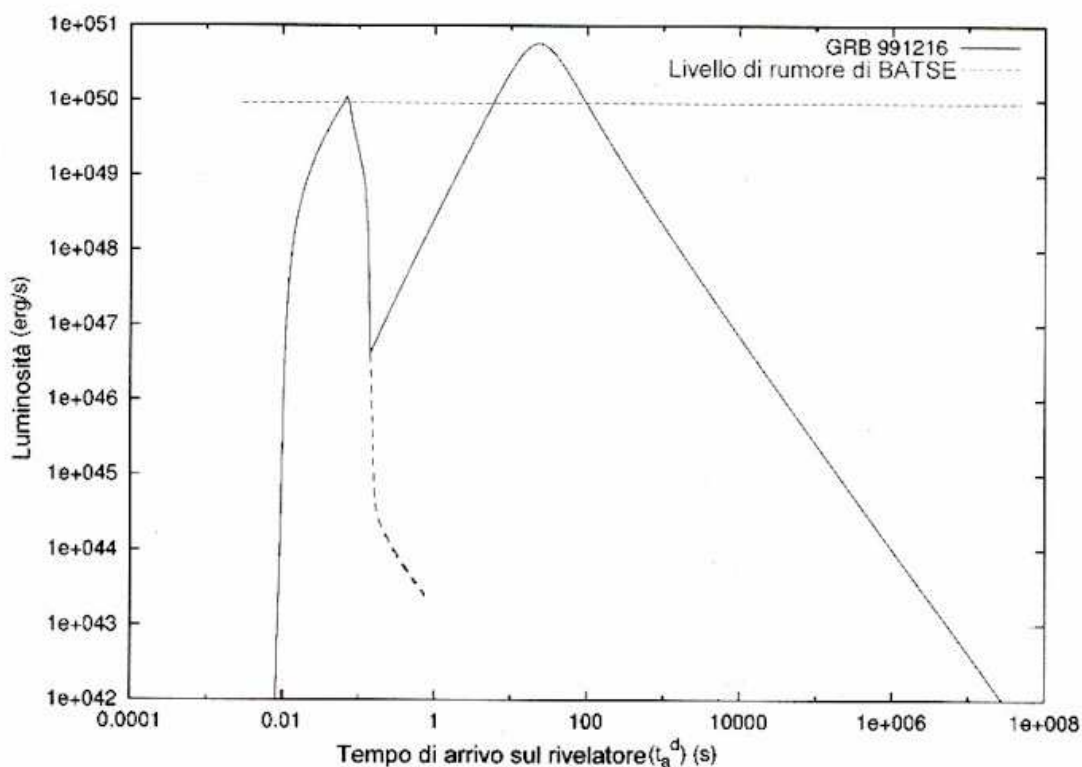
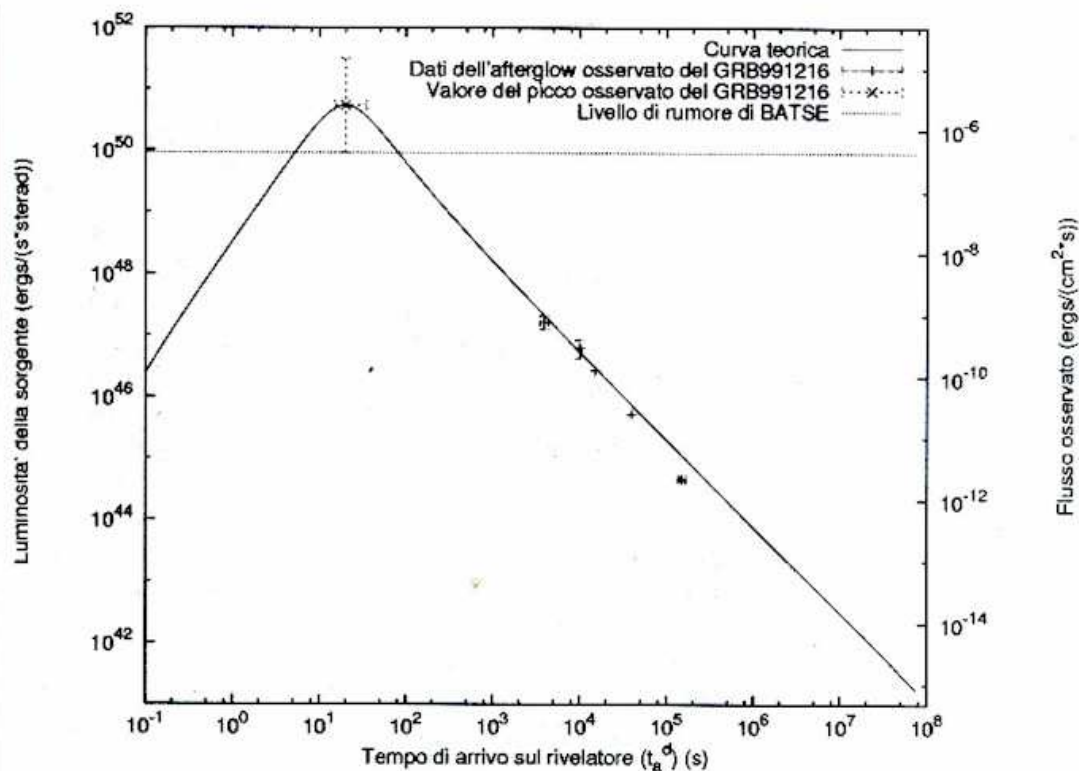


Fig. 4. Il nostro modello predice l'esistenza di un primo lampo, chiamato precursore negli altri modelli, spesso nascosto dal rumore di fondo degli strumenti. Questo è stato osservato almeno una volta, nel caso della sorgente del 16 dicembre 1999, nei dati del rivelatore BATSE installato sul satellite americano Compton Gamma-Ray Observatory. La sorgente non è che il massimo dell'emissione successiva.

Fig. 5. La nostra teoria è in perfetto accordo con l'osservazione della sorgente del 16 dicembre 1999, se il 99 per cento della massa iniziale della stella, circa 20 volte quella del Sole, si è trasformata in un buco nero con un intenso campo elettromagnetico.



più giorni, come i lampi gamma osservati. Le distanze coinvolte vanno dal raggio della diadosfera, ovvero qualche migliaio di chilometri, a qualche decina di migliaia di miliardi di chilometri dove il plasma è rallentato dal mezzo interstellare. Anche in quella regione, le osservazioni del GRB 991216 e la curva teorica sono in perfetto accordo (vedi figura 5). È importante notare che la nostra analisi suppone una simmetria sferica, mentre molti modelli propendono per l'esistenza di jet colli-

mati. Essi sottostimano così la potenza energetica dei lampi gamma.

Il nostro modello permette di andare più lontano nella comprensione delle osservazioni delle diverse sorgenti. Esso propone una spiegazione naturale allo spinoso problema della distribuzione bimodale delle sorgenti classificate corte (da qualche millisecondo a circa due secondi) e lunghe (più lunghe di due secondi). Esse sono due manifestazioni di uno stesso fenomeno. Le sorgenti corte corri-

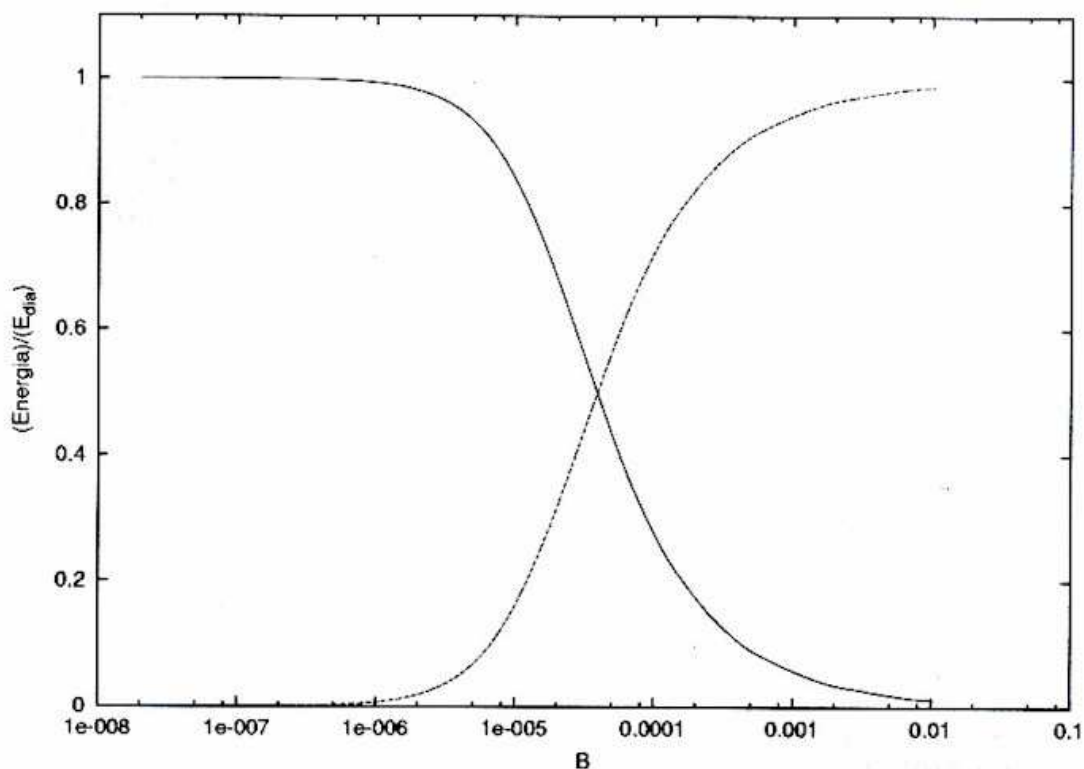


Fig. 6. Intensità relativa del P-GRB e dell'E-APF in funzione della materia barionica B residua dopo il collasso gravitazionale. Tutte queste quantità sono espresse in unità dell'energia estraibile dal buco nero.

spondono al precursore (P-GRB) e le sorgenti lunghe al massimo d'intensità dell'emissione gamma dell'*afterglow* (E-APE). La presenza o meno delle sorgenti lunghe dipende dalla quantità di materia presente intorno al buco nero. In realtà l'intensità relativa del P-GRB rispetto all'E-APE è una funzione molto forte della quantità di materia intorno al buco nero (vedi Fig. 6). Quando la materia diminuisce l'E-APE diminuisce e praticamente tutta l'energia estratta dal buco nero è emessa nel P-GRB. Questa è la soluzione dell'enigma della differenza tra le sorgenti corte e quelle lunghe. Possiamo anche spiegare la presenza di righe di emissione del ferro, osservate dal satellite X americano Chandra, con un meccanismo originale. Questo nuovo concetto suggerisce che l'immenso flash gamma induce la formazione di una supernova nella sua collisione con una stella massiccia vicina in un avanzato stadio della sua evoluzione. Si tratterebbe dunque di un nuovo meccanismo di formazione di supernova [9]. Inoltre, contrariamente a quanto ritengono molti astrofisici, non sarebbero le supernovae a produrre i lampi gamma, ma i lampi gamma a indurre questa nuova famiglia di supernovae.

I lampi gamma sono la prima evidenza dell'estrazione di energia da un buco nero? La risposta è nelle mani dei cacciatori di questi fenomeni ultra-energetici. La posta è forte, perché se la risposta è positiva, l'astrofisica relativistica degli oggetti compatti ne sarà sconvolta. Dopo la nascita dei buchi neri come oggetti teorici negli anni Trenta e la loro rinascita negli anni Settanta grazie all'osservazione del fatto che essi trascinano la materia di una stella vicina, noi assistiamo a una terza rivoluzione: la scoperta di una nuova sorgente di energia. ●

#### NOTE

- (1) La teoria quantistica dei campi è lo sviluppo moderno della meccanica quantistica il cui scopo è la spiegazione dei fenomeni della microfisica. Il prototipo è l'elettrodinamica quantistica che raggiunge una precisione dell'ordine di uno su dieci milioni nel confronto tra la teoria e l'esperienza.  
(2) La polarizzazione del vuoto è un processo quantistico che permette la formazione, in un tempo molto corto, di particelle virtuali. Un campo elettromagnetico molto intenso può trasformarle in coppie reali di elettrone e positrone, l'anti-particella dell'elettrone.  
(3) Il *redshift* cosmologico, o spostamento verso il rosso, è una conseguenza dell'espansione dell'universo. A causa di questo fenomeno, i fotoni di lunghezza d'onda  $\lambda_0$  emessi da una galassia saranno ricevuti sulla Terra alla lunghezza d'onda  $\lambda_1$  tale che  $\lambda_1 = (1+z)\lambda_0$ . Per deboli *redshift*, si può stimare la distanza con la relazione:  $D = cz/H$  dove  $H$  è la costante di Hubble e  $c$  la velocità della luce.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] CHRISTODOULOU D., RUFFINI R., *Phys. Rev.*, D4 3552, 1971  
[2] RUFFINI R. ET AL., *ApJ Let.*, 555, L107, 2001; *ApJ Let.*, 555, L113, 2001; *ApJ*, 555, L117, 2001.  
[3] PENROSE R., *Rev. Nuovo Cimento*, 1, 252, 1969  
[4] DAMOUR ET RUFFINI R., *Phys. Rev. Lett.*, 35, 463, 1975  
[5] PREPARATA G., RUFFINI R. ET XUE S.S., *A&A* 338, L87, 1998  
[6] RUFFINI R., SALMONSON J.D., J.R. WILSON AND S.-S. XUE, *A & A*, 350, 334, 1999; *A&A*, 359, 855, 2000.  
[7] HALPERN ET AL., *ApJ*, 543, 697, 2000.  
[8] DERMER C.D., MITMAN K.E., *ApJ Let.*, 513, L5, 1999.  
[9] RUFFINI R. ET AL., *ApJ Let.*, 555, L117, 2001.

Remo Ruffini

è ordinario di fisica all'Università di Roma «La Sapienza» e presidente del Centro internazionale di astrofisica relativistica (ICRA) di Roma

She-Sheng Xue

è ricercatore all'Università di Roma «La Sapienza»

Carlo Luciano Bianco

è dottorando presso l'Università di Roma «La Sapienza»

Federico Fraschetti

è dottorando presso l'Università di Trento

Pascal Chardonnet

è ricercatore al Laboratorio di Annecy-le-Vieux di fisica teorica (LAPTH-CNRS) e insegna all'Università di Savoia



Il gruppo dell'ICRA che si occupa del modello dei lampi gamma. Da sinistra: Luca Vitagliano, Carlo Luciano Bianco, She-Sheng Xue, Remo Ruffini, Pascal Chardonnet, Federico Fraschetti.