

# Come BeppoSAX svelò l'enigma dei Lampi Gamma

I ricercatori protagonisti della brillante stagione di scoperte sui GRB raccontano le imprese del satellite italiano, la cui eredità sta per essere raccolta dalla nuova missione SWIFT.

20

ENRICO COSTA  
FILIPPO FRONTERA  
LUIGI PIRO



**D**A 7 ANNI L'ASTROFISICA HA UNA NUOVA CLASSE DI OGGETTI dalla cui osservazione si spera di ricavare informazioni cruciali sulla struttura e l'evoluzione dell'Universo: i Lampi Gamma (in inglese Gamma-Ray Burst, GRB). Questi fenomeni sono noti dal 1972, quando gli scienziati di Los Alamos che analizzavano i dati della rete di satelliti militari VELA giunsero alla conclusione che i misteriosi e intensissimi fiotti di raggi gamma, rivelati dai satelliti, non erano di origine umana, cioè non erano generati da armi nucleari. Per un quarto di secolo, i Lampi Gamma sono stati un mistero assoluto. Non si sapeva che cos'erano e dove stavano. L'incertezza sulla loro energia copriva più di 20 decenni! Quindi non potevano certo contribuire a risolvere alcun quesito di Astrofisica, ma erano essi stessi un problema, forse uno tra i più elusivi. Tutto ciò è cambiato drasticamente nel 1997 quando,



*Il satellite BeppoSAX  
naviga attraverso  
fantastici  
Lampi Gamma.*



nel giro di 6 mesi, il satellite italiano BeppoSAX e la rete dei più grandi telescopi del mondo, guidati dai dati di BeppoSAX, hanno scoperto che i Lampi Gamma sono esplosioni che avvengono in galassie remotissime (miliardi di anni luce).

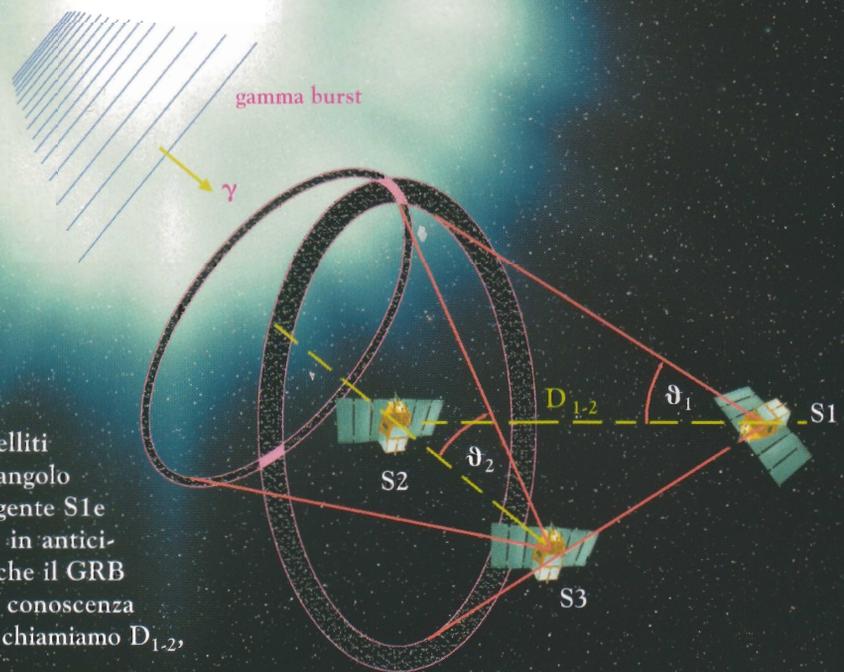
Per 6 anni, fino allo spegnimento di BeppoSAX (il 30 aprile 2002); si sono susseguite scoperte di nuovi eventi, tali da rendere questo settore uno dei più evolutivi dell'Astrofisica moderna. Qualunque teoria sulle fasi finali dell'evoluzione, sulla struttura della materia degenera, ma anche sulle regioni di formazione delle stelle, sulle supernovae, sulla nascita dei metalli deve fare i conti con i dati sui Lampi Gamma. La nostra

## La rete interplanetaria (IPN)

IL PRINCIPIO È MOLTO SEMPLICE: dal tempo di arrivo dell'impulso si ricava la direzione di provenienza del GRB.

Nella figura viene mostrato come l'IPN lavora. Siano S1, S2 e S3 tre satelliti che rivelano lo stesso GRB, e sia  $\vartheta_1$  l'angolo fra la direzione del Lampo e la congiungente S1 e S2. Allora il GRB viene rivelato da S2 in anticipo di T secondi rispetto a S1. Sapendo che il GRB si propaga alla velocità della luce, dalla conoscenza della distanza tra i satelliti S1 e S2, che chiamiamo  $D_{1-2}$ , e da T si ricava l'angolo  $\vartheta_1$ .

La soluzione in realtà è rappresentata da un anello, la cui larghezza dipende dalle incertezze nella determinazione del ritardo T e dalla mutua distanza tra S1 e S2. Più lontani sono tra loro i satelliti, maggiore è la precisione nel calcolo di  $\vartheta_1$ . Se si considera anche il satellite S3, il numero di coppie indipendenti di satelliti e quindi di anelli diventa due. In tal caso la direzione del Lampo deve essere dentro una delle due regioni di



intersezione degli anelli, che possono essere lontani anche molti gradi l'una dall'altra. Quando si dispone di un altro satellite S4, non si ha più nessuna ambiguità. Se poi uno dei satelliti S1, S2, S3 ha un rivelatore con una certa capacità di localizzazione, bastano tre satelliti per scartare una delle due posizioni.

visione dell'Universo primordiale potrebbe spingersi dall'attuale limite di spostamento verso il rosso cosmologico (in inglese *redshift*) di 6 a *redshift* di 20, in regioni oscure inaccessibili alla strumentazione ottica, nelle fasi di formazione delle prime stelle e galassie.

### GLI SFORZI PRIMA DI BEPOSAX

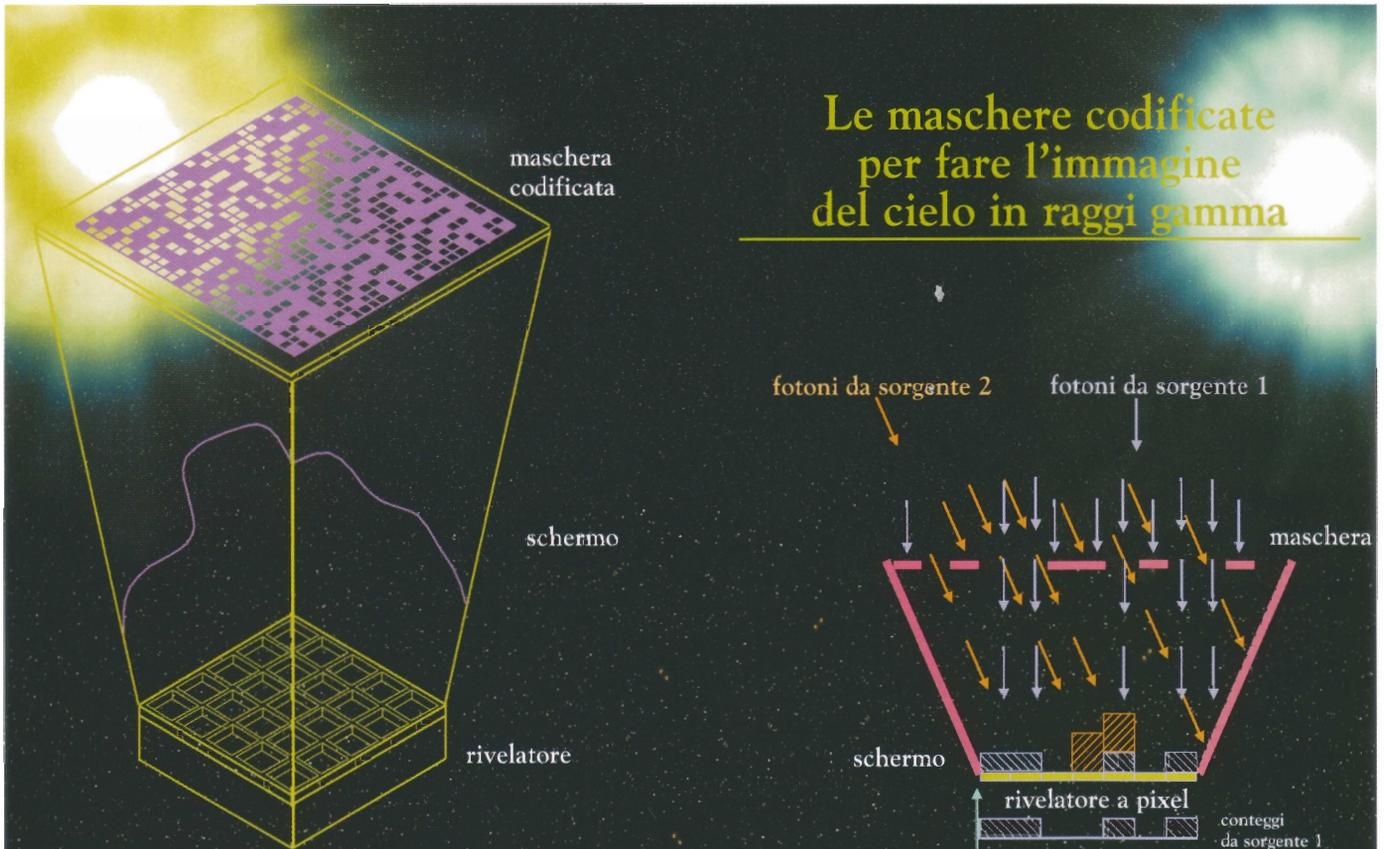
Dopo l'annuncio della scoperta del 1972, molti sforzi furono fatti dagli scienziati, soprattutto americani, russi e francesi, per risolvere l'enigma della loro natura. La difficoltà principale era quella di localizzare con precisione tali eventi, che sono imprevedibili sia nel tempo di arrivo che nella direzione di provenienza. Solo la scoperta di una controparte X, ottica o radio, poteva ricondurre il fenomeno a una classe di oggetti noti, fornendo le basi per una ragionevole teoria. La localizzazione ottenuta coi satelliti Vela, basata sui ritardi nei tempi di arrivo dell'impulso gamma ai diversi satelliti (si veda il riquadro in questa pagina), era molto grossolana. La tecnica fu migliorata collocando gli strumenti a distanze tra loro molto più grandi, a bordo di missioni interplanetarie. Tale rete interplanetaria (IPN) è capace di ricostruire le posizioni sino a pochi minuti d'arco. Nonostante ciò, con la rete

IPN non fu possibile associare ad alcun Lampo Gamma una sorgente X o ottica permanente o transiente. Solo se si fosse potuto puntare la direzione del Lampo in un tempo abbastanza breve si sarebbe, forse, trovato un oggetto che continuava a emettere in una qualche banda di energia: la cosiddetta pistola fumante. Ma la IPN è un sistema molto lento in quanto basato sull'analisi a posteriori dei dati di strumenti diversi su satelliti diversi.

Negli Anni Ottanta e fino all'inizio degli Anni Novanta, sono state impiegate altre tecniche per la localizzazione dei GRB, tra cui quella che fa uso di maschere codificate (si veda il riquadro nella pagina a fronte). Per esempio, l'esperimento SIGMA a bordo del satellite sovietico GRANAT, con questa tecnica, localizzò alcuni GRB con un'accuratezza migliore, ma gli eventi furono analizzati e divulgati anni dopo.

Negli Anni Novanta il gruppo americano guidato da Gerald Fishman del Marshall Space Flight Center della NASA, realizzò il Burst and Transient Source Experiment (BATSE) a bordo del "Compton" Gamma Ray Observatory (CGRO), con l'obiettivo di monitorare buona parte del cielo per la ricerca di GRB. La direzione poteva essere ricostruita comparando i segnali da più rivelatori diversamente orientati e distribuita rapi-

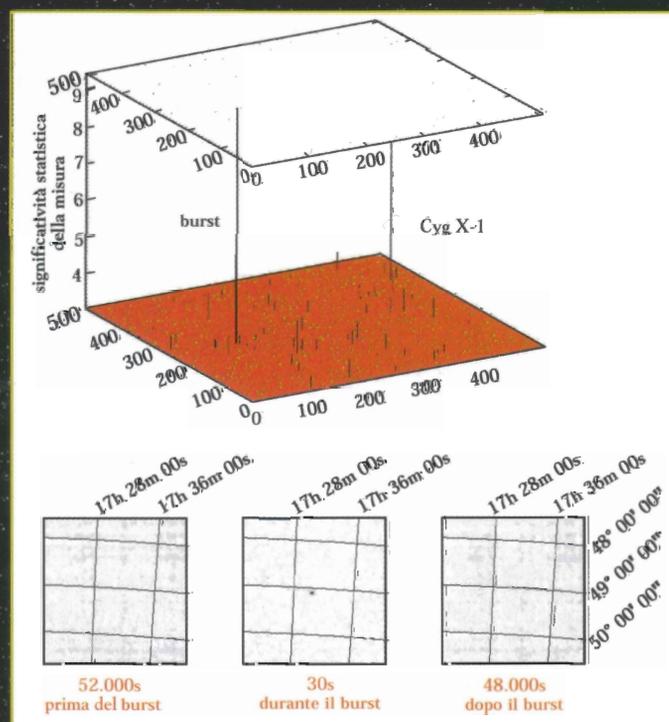
## Le maschere codificate per fare l'immagine del cielo in raggi gamma

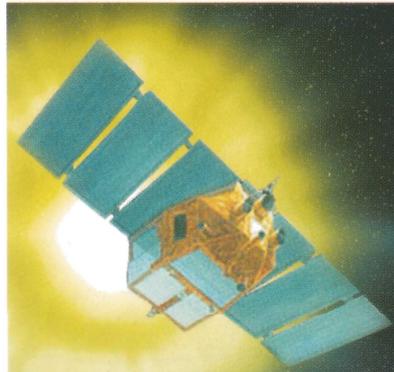


IL PRINCIPIO CONSISTE NEL RIVELARE l'ombra di una maschera posta in cima al telescopio e fatta di elementi sia opachi che trasparenti ai raggi gamma. I raggi gamma proiettano l'ombra della maschera sul rivelatore. Se c'è una sola sorgente, lo spostamento dell'ombra proiettata rispetto all'asse del telescopio permette di conoscere la direzione della sorgente e quindi la sua posizione in cielo. Se c'è più di una sorgente, le diverse ombre della maschera si sovrappongono. Il profilo di luci e di ombre rivelato consente di ricostruire l'immagine del cielo con una tecnica chiamata "deconvoluzione" dell'immagine. L'effetto di due sorgenti sul conteggio di un rivelatore con maschera codificata si può vedere dalla figura sopra a destra. Ogni sorgente contribuisce al conteggio in modo diverso in dipendenza della direzione della sorgente e della sua intensità. Il profilo complessivo è mostrato nel grafico più in basso. La deconvoluzione dell'immagine consiste appunto nel determinare la direzione delle due sorgenti e la loro intensità da questo profilo.

La prima missione a fare uso di maschere codificate per la localizzazione delle sorgenti X celesti nella banda 35-1300 keV fu l'esperimento SIGMA a bordo del satellite sovietico GRANAT, che operò negli Anni Ottanta - inizio Anni Novanta. Si poté raggiungere un'accuratezza migliore di 0,5°.

La figura qui a lato (estratta da "Astronomy and Astrophysics") suggerisce le potenzialità delle maschere codificate nel caso delle WFC a bordo di BeppoSAX. Essa mostra l'immagine del primo GRB (20 luglio 1996) localizzato. Oltre che il GRB, è visibile la ben nota e brillante sorgente di raggi X Cyg X-1, candidata buco nero in un sistema binario, ubicata nella costellazione del Cigno. L'incertezza nella direzione del GRB è di soli 3 minuti d'arco.



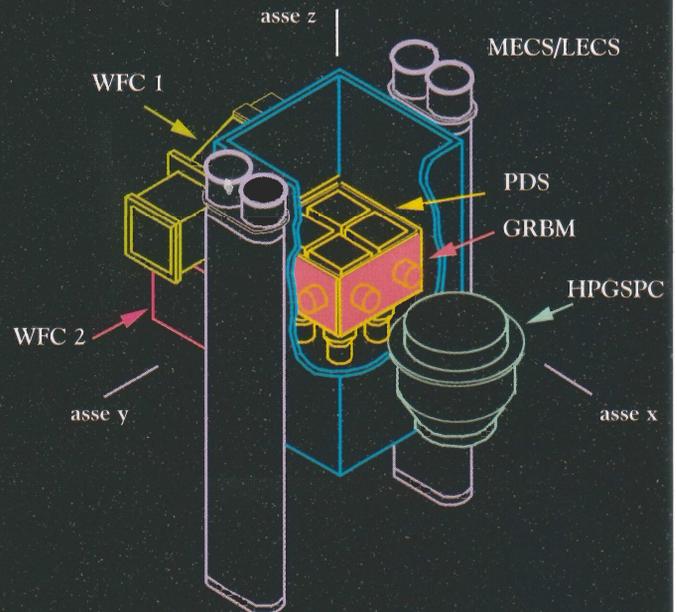


24

LA FIGURA A SINISTRA È UNA RAPPRESENTAZIONE ARTISTICA DEL SATELLITE, mentre quella a destra mostra la disposizione dei telescopi a bordo. Gli strumenti a campo stretto (LECS, MECS, HPGSPC, PDS) puntano nella direzione z, mentre quelli a campo largo (GRBM e WFC) guardano nel piano perpendicolare a z. I tre telescopi MECS (acronimo di Medium-Energy Concentrator Spectrometer) e il telescopio LECS (Low-Energy Concentrator Spectrometer) erano dotati di un campo di vista di circa  $0,5^\circ$  e facevano uso di ottiche focalizzanti. I MECS lavoravano nella banda 2-10 keV, mentre il LECS nella banda 0,1-10 keV. Grazie a essi, SAX poteva fornire immagini X con una definizione migliore di un minuto d'arco e con una sensibilità senza precedenti in 2-10 keV. Al di sopra di 10 keV operavano due strumenti con un campo di vista di circa  $1^\circ$ : l'HPGSPC (High Pressure Gas Scintillator Proportional Counter) che operava in 4-60 keV con ottime capacità spettroscopiche, e il PDS (Phoswich Detection System) che operava in 15-300 keV con un bassissimo rumore strumentale.

A  $90^\circ$  rispetto alla strumentazione a campo stretto vi erano gli strumenti a campo largo: due WFC (Wide Field Cameras) e il GRBM (Gamma Ray Burst Monitor). Le due WFC erano telescopi di raggi X da 2 a 28 keV sensibili alla posizione, sormontati da maschere codificate, che puntavano in direzioni opposte. Ciascuna WFC aveva un campo di vista di  $40^\circ \times 40^\circ$  ed era in grado di ottenere immagini X del cielo con una definizione di 3 minuti d'arco. Il GRBM era costituito di quattro rivelatori

## Il satellite BeppoSAX



tori indipendenti operanti nella banda dei raggi gamma da 40 a 700 keV, in grado di monitorare oltre la metà del cielo, alla ricerca di un GRB, anche se con scarse capacità di localizzarlo (incertezza di una decina di gradi). Il campo di vista del GRBM includeva quello delle WFC, per cui, se la direzione di un Lampo identificato dal GRBM era nel campo di vista delle WFC, veniva localizzato accuratamente. SAX fu lanciato 7 anni più tardi della data ipotizzata all'avvio del progetto, ma il ritardo parallelo dei satelliti americani Compton-GRO (6 anni), Rossi-XTE (6 anni) e Chandra-AXAF (7 anni), tutti bloccati come SAX dal disastro dello Shuttle del 1986, presero a conservare l'alta competitività della missione. Il ritardo consentì il miglioramento della strumentazione, mentre il nuovo lanciatore (Atlas-Centaur) permise un carico maggiore su un'orbita quasi equatoriale, che minimizzava il rumore dovuto ai raggi cosmici e consentiva di sfruttare per la ricezione dei dati la stazione italiana di Malindi in Kenia.

damente con un sistema di trasmissione automatica. Purtroppo con questa tecnica, a causa di vari errori sistematici, non si riuscì a determinare la direzione dei GRB con un'accuratezza migliore di 1-2 gradi, e non si riuscì a localizzare, prima di BeppoSAX, nessuna sorgente legata ai GRB.

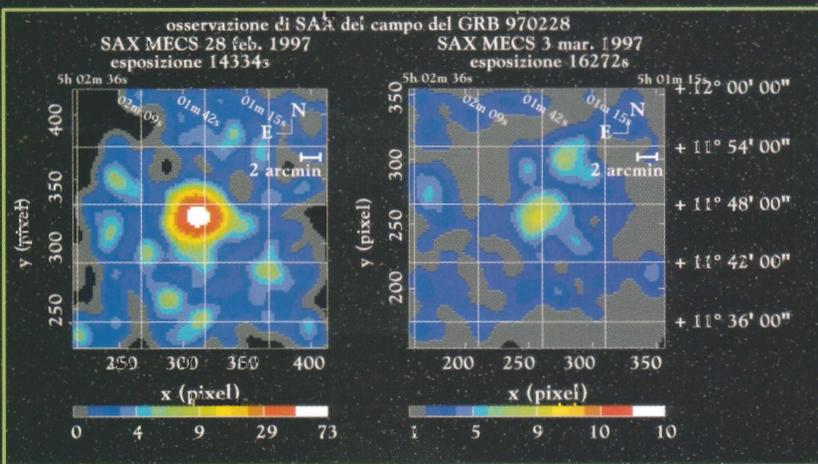
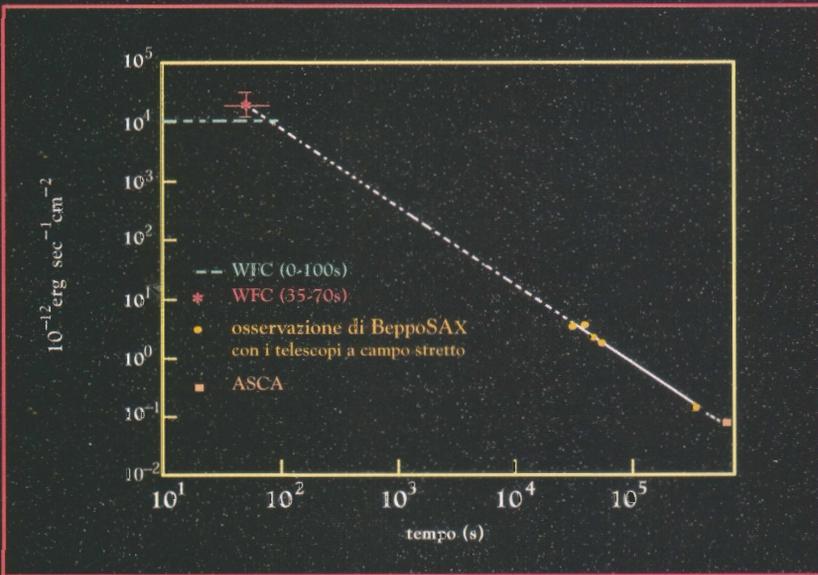
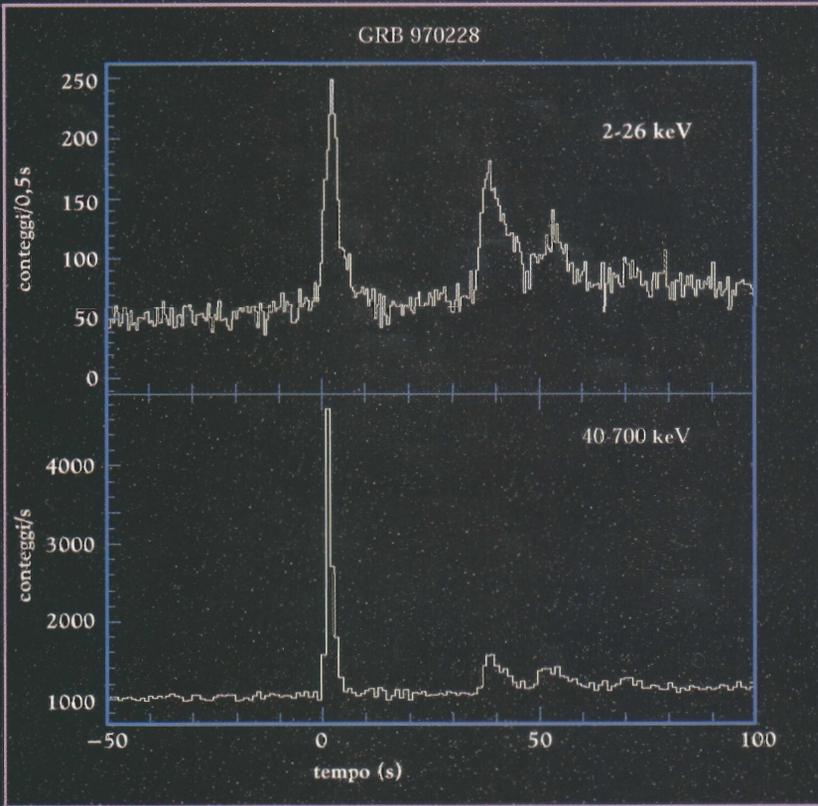
### Perché BeppoSAX?

Cosa aveva BeppoSAX di così peculiare da consentire le entusiasmanti scoperte sui GRB?

Il Satellite di Astronomia X (SAX) dell'Agenzia Spaziale Italiana, proposto e progettato dai quattro Istituti di Astrofisica del CNR e da gruppi universitari di Fisica

cosmica, e realizzato dall'industria nazionale (guidata da Alenia Spazio), includeva strumenti a campo stretto e a campo largo con due obiettivi principali: **1** lo studio degli spettri delle sorgenti di raggi X celesti in un'ampia banda (0,1-200 keV); **2** il monitoraggio del cielo X per studiare la variabilità delle sorgenti note e per identificarne di nuove tra cui i misteriosi GRB.

Grazie ai telescopi a campo stretto operanti a bassa energia (LECS e MECS, si veda il riquadro in questa pagina), SAX poteva fornire immagini X con una definizione migliore di un minuto d'arco e con una sensibilità senza precedenti in 2-10 keV. Al di sopra di 10 keV operavano due strumenti a campo stretto: HPGSPC e PDS. Il primo aveva ottime capacità spettroscopiche, mentre il secondo



## La prima scoperta, con BeppoSAX, del bagliore X lasciato da un Lampo Gamma.

NELLA FIGURA IN ALTO viene mostrato il profilo temporale del Lampo del 28 febbraio 1997, come rivelato dalle WFC (in alto) e dal GRBM (in basso). L'intensità raggiunge un massimo dopo pochi secondi, rimane bassa per circa 30 secondi, per poi mostrare un riverbero che apparentemente si esaurisce in meno di 50 secondi. In realtà, l'emissione X continua come mostrato nella figura al centro. È il bagliore residuo scoperto per la prima volta con i telescopi a campo stretto di BeppoSAX. L'intensità in 2-10 keV diminuisce seguendo una legge di potenza, a differenza di tutte le sorgenti X transitorie note che mostrano decadimenti esponenziali. Nella figura in basso, a sinistra, si vede l'immagine del bagliore lasciata 8 ore dopo il lampo, mentre, a destra, si vede il bagliore X, notevolmente affievolito (di circa un fattore 20) a 3 giorni dal lampo. (figure estratte da "Nature")

aveva un bassissimo rumore strumentale. La sensibilità di quest'ultimo è tuttora la più alta mai raggiunta in questa banda da uno strumento spaziale.

A 90° rispetto alla strumentazione a campo stretto vi erano due strumenti a campo largo (si veda il riquadro a pag. 24). Il primo (WFC) era costituito di due rivelatori di raggi X con campo di vista di 40°×40° orientati in direzioni opposte, in grado di ottenere, con la tecnica delle maschere codificate, immagini X del cielo con una definizione di 3 minuti d'arco. L'altro strumento era un monitor di Lampi Gamma (Gamma Ray Burst Monitor, GRBM) operante tra 40 e 700 keV, banda in cui i GRB emettono la maggior parte della loro energia. Esso era in grado di monitorare oltre metà del cielo, incluso il campo delle WFC, alla ricerca di un GRB. Fu proprio la presenza e l'uso combinato di questi due strumenti una delle chiavi del successo di SAX: i GRB potevano essere identificati dal GRBM e localizzati dalle WFC. In tal modo si potevano puntare rapidamente gli strumenti a campo stretto nella direzione del GRB per la ricerca di un'eventuale emissione residua.

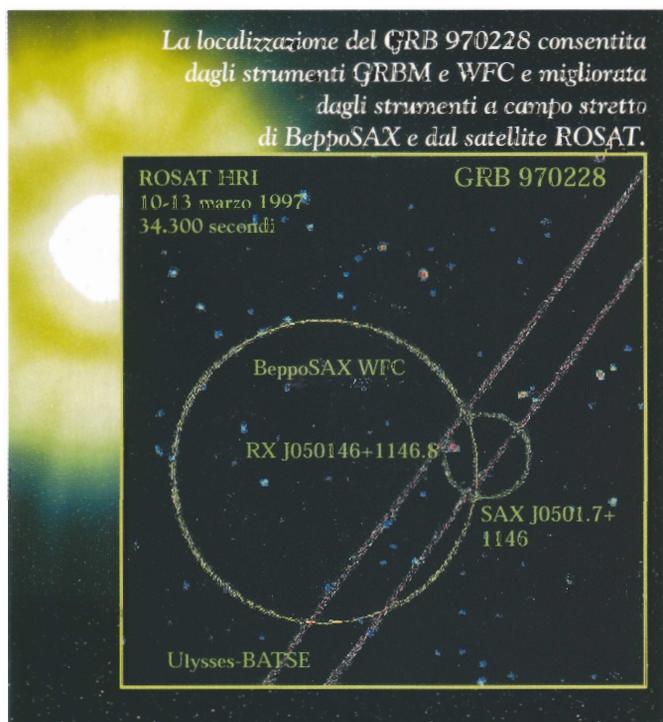
SAX fu lanciato da Cape Canaveral il 30 aprile 1996 con un razzo Atlas-Centaur che consentiva un'orbita quasi equatoriale, che minimizzava il rumore dovuto ai raggi cosmici e permetteva di sfruttare per la ricezione dei dati la stazione italiana di Malindi in Kenia. Subito dopo il lancio, SAX fu ridenominato BeppoSAX in omaggio a Beppo Occhialini, uno dei padri della Fisica e dell'Astrofisica delle alte energie italiane. I tre Centri di SAX (Controllo Operazioni Tecniche o OCC, Operazioni Scientifiche, Dati Scientifici) erano tutti ubicati a Roma e gestiti dall'ASI e da Telespazio con il largo coinvolgimento degli istituti scientifici. Questa organizzazione fu un'altra delle chiavi di successo di BeppoSAX. I dati,

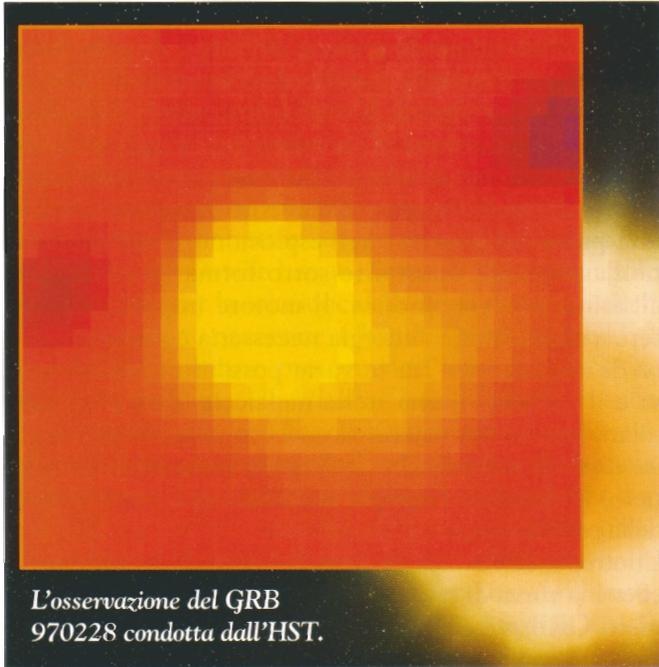
registrati a bordo del satellite, venivano scaricati a terra solo una volta per orbita, quando il satellite passava davanti alla stazione di Malindi (ogni 100 minuti), e ritrasmessi all'OCC. Qualunque azione conseguente all'analisi di un dato ricevuto comportava la procedura inversa di inviare una serie di telecomandi a Malindi, da inviare al satellite al passaggio successivo. La collaborazione con i tre Centri consentiva di minimizzare i tempi in modo rapido ed efficiente. La procedura di allerta prevedeva l'analisi immediata dei dati del GRBM. In caso di Lampo Gamma, la ricerca si estendeva alle WFC; se l'evento era rivelato anche da una WFC, veniva analizzata l'immagine per la localizzazione dell'evento. Le coordinate del GRB, così determinate, venivano inviate via "e-mail" alla comunità scientifica per una ricerca immediata con telescopi a terra. In parallelo, partiva la procedura per puntare i telescopi a campo stretto di BeppoSAX nella direzione del GRB. Il comando di nuovo puntamento veniva inviato al satellite al suo primo passaggio su Malindi. Il rapido e flessibile sistema di controllo di assetto del satellite, basato su 3 giroscopi, puntava i telescopi di BeppoSAX nella direzione del GRB in pochi minuti. Grazie a questa procedura il puntamento veniva fatto in un tempo totale che si poteva ridurre a 5-6 ore dal GRB, lo zoccolo duro ineliminabile era dovuto ai tempi di analisi delle WFC a terra e al fatto che BeppoSAX fosse visibile solo ogni 100 minuti. Per confronto, il record precedente era stato un riorientamento del satellite Einstein a due mesi dall'occorrenza del Lampo.

### LA SCOPERTA DI BEPPoSAX

L'11 gennaio 1997, un mese dopo che la procedura era stata da noi messa a punto, fu localizzato il primo GRB. Come previsto, il satellite fu riorientato in direzione del GRB in 17 ore, ma nessuna chiara controparte X dell'evento fu trovata. Il successivo tentativo fu coronato da successo. Il 28 febbraio 1997 un altro GRB venne rivelato dal GRBM e dalle WFC (si veda il riquadro a pag. 25). La posizione fu prontamente determinata. Dopo sole 8 ore dall'occorrenza del GRB, i telescopi a campo stretto puntavano la direzione del Lampo Gamma e indicavano la presenza di una sorgente sconosciuta di raggi X che stava rapidamente spegnendosi. Dopo tre giorni la sorgente si era affievolita già di un fattore 20, seguendo una legge potenza per il suo decadimento, a differenza delle altre sorgenti transitorie note di raggi X, che decadono in modo esponenziale. La direzione della sorgente era compatibile con l'incertezza nella posizione data dalle WFC (si veda l'immagine in questa pagina) e l'estrapolazione della sua curva di luce all'indietro mostrava che essa era consistente con quella del GRB, come se fosse il bagliore residuo dell'evento. Era la "pistola fumante" cercata per tanti anni! Allo scopo di migliorare ulteriormente la localizzazione, richiedemmo l'osservazione della sorgente col satellite tedesco ROSAT, sensibile a raggi X minori di 2 keV e in grado di determinare la direzione con un'accuratezza angolare di pochi secondi d'arco. Pur richiedendo 10 gior-

26





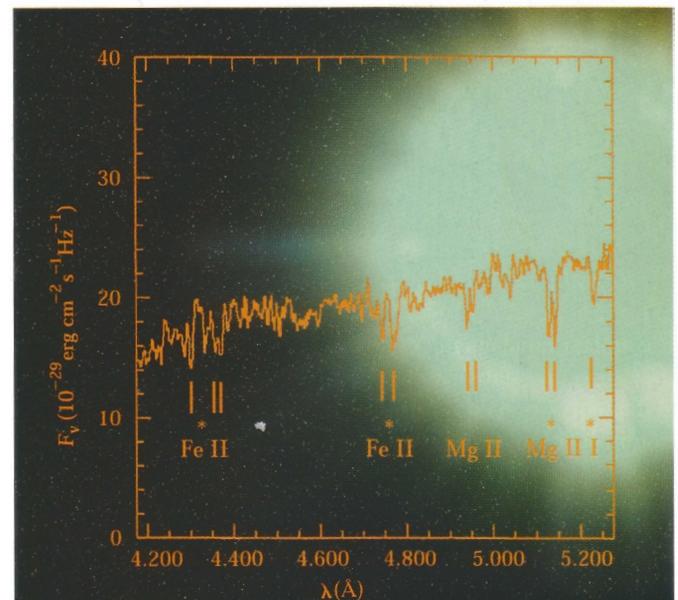
L'osservazione del GRB  
970228 condotta dall'HST.

ni per il puntamento, la sorgente risultò ancora visibile con ROSAT, con un flusso compatibile con l'estrapolazione della legge di decadimento trovata con BeppoSAX. Molti astronomi ottici, nel frattempo, avevano puntato i loro telescopi in direzione della sorgente X, alla ricerca di un analogo bagliore residuo. Il primo a ottenere due immagini a distanza di 8 giorni con lo stesso telescopio fu un gruppo diretto da Jan van Paradijs dell'Università di Amsterdam: una sorgente ottica debolissima (21<sup>a</sup> magnitudine) andava affievolendosi in modo analogo. La sua posizione coincideva entro 2 secondi d'arco con quella determinata con ROSAT: la sorgente X e quella ottica erano lo stesso oggetto. Anche il Telescopio Spaziale "Hubble", su nostra richiesta, fu puntato in direzione del GRB (si veda qui sopra). La sorgente appariva come un oggetto puntiforme situato in una debole nebulosità irregolare, apparentemente una galassia molto lontana. L'indicazione era forte ma non conclusiva. L'enigma si risolse due mesi dopo, l'8 maggio 1997, quando un altro evento venne rivelato dal GRBM e prontamente localizzato con le WFC. In questo caso l'informazione fu trasmessa alla comunità scientifica internazionale in tempi ancora più brevi (3 ore). Ciò permise al gruppo guidato da Shri Kulkarni del California Institute of Technology di identificare la controparte ottica del Lampo (in estinzione) e di determinarne lo spettro (si veda la figura a lato). Dalla presenza di righe di assorbimento dovute a ferro e magnesio a lunghezze d'onda spostate dall'espansione dell'Universo e dalla legge di Hubble ( $v = H_0 d$ ) che lega la velocità di espansione  $v$  alla distanza  $d$  da noi ( $H_0$  è nota), si poté desumere la distanza del Lampo: 10 miliardi di anni luce. A 25 anni dalla loro scoperta, finalmente si poté stabilire che i GRB sono a distanze cosmologiche. L'evento fu anche osservato col potente radiotelescopio Very Large Array di Socorro (New Mexico) dal gruppo guidato da Dale Frail del National Radio Astronomy Observatory. L'emissione radio mostrava

una variabilità detta "scintillazione interstellare" che cessava dopo un mese (si veda la figura a pag. 28), prova che si era in presenza di un oggetto molto compatto che si andava espandendo a una velocità vicina a quella della luce. Questo dato, insieme al decadimento con una legge di potenza, concordava con un modello già sviluppato da Peter Mészáros della Pennsylvania State University e Martin J. Rees dell'Università di Cambridge (UK), che assumeva all'origine del fenomeno una palla di fuoco (costituita essenzialmente di protoni, elettroni, positroni e raggi gamma) in rapida espansione, che, urtando con i gas circostanti, trasforma la sua energia cinetica in energia elettromagnetica di frequenza decrescente nel tempo, dai raggi X alle onde radio. Anche l'evento principale era assunto avere un'origine simile, in cui però questa volta le onde d'urto si verificano all'interno della palla di fuoco. Grazie alla scoperta del bagliore residuo da parte di BeppoSAX i GRB non erano più un "mistero".

A partire dal 28 febbraio 1997, in sei anni di vita di BeppoSAX, molti altri GRB (circa 50) sono stati prontamente rivelati e localizzati. Le prestazioni della missione

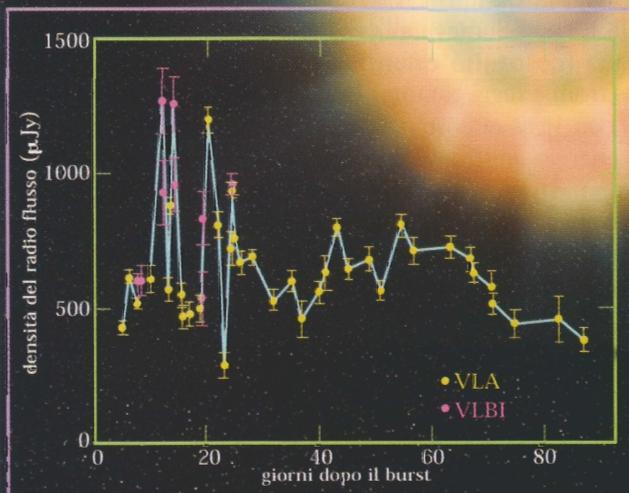
27



### Lo spettro ottico del bagliore residuo del Lampo Gamma occorso l'8 maggio 1997

Tale spettro ha consentito di misurare per la prima volta la distanza di un Lampo Gamma. Esso mostra varie righe di assorbimento dovute al ferro e al magnesio presente in una nube intercettata dalla luce del Lampo. Confrontando le lunghezze d'onda delle righe misurate nello spettro con quelle misurate in laboratorio si è potuta misurare la velocità di allontanamento della nube e quindi, la sua distanza, attraverso la legge di Hubble ( $v = H_0 d$ ) che lega la velocità di espansione dell'Universo  $v$  alla distanza  $d$  da noi ( $H_0$  è nota). Tale distanza è risultata coincidere con quella della galassia ospite del GRB (figura estratta da "Nature").

## Il bagliore residuo del Lampo Gamma dell'8 maggio 1997



Questo schema illustra il comportamento temporale dell'emissione radio del bagliore residuo del Lampo Gamma dell'8 maggio 1997.

Si osserva una variabilità molto accentuata che via via diminuisce al trascorrere del tempo. Il tipo di variabilità è tipico della cosiddetta scintillazione interstellare, che si verifica quando la sorgente ha dimensioni molto piccole. La scomparsa della scintillazione mostra che la sorgente si è andata rapidamente espandendo. Dalla distanza del GRB si è potuto stabilire che le dimensioni della sorgente del Lampo Gamma a due mesi dall'esplosione sono pari a 0,1 anni-luce: una vera palla di fuoco che si espande a velocità vicine a quelle della luce. (figura estratta da "Nature")

(strumentazione scientifica, sistema di trasmissione dati, sistema di controllo dell'assetto, ecc), sono rimaste pressoché invariate nel corso degli anni. I tempi di riorientamento del satellite, nonostante che alcuni dei 6 giroscopi a bordo avessero subito danni, grazie a una nuova strategia di puntamento (a 1 giroscopio), sono rimasti pressoché invariati (durata delle manovre allungata di solo una decina di minuti). È stato così possibile seguire con gli strumenti a campo stretto il 75% dei GRB localizzati con le WFC (il rimanente 25% era vietato dalla loro vicinanza al Sole).

### CHE COSA ABBIAMO IMPARATO SUI GRB GRAZIE A BEPPoSAX?

BeppoSAX ha consentito tra le maggiori e più eccitanti scoperte degli ultimi anni sui GRB.

Innanzitutto si è potuto scoprire che tutti i lampi (o almeno quelli più lunghi di 2 s) hanno origine in galassie a distanza cosmologica. La distanza permette di determinare l'energia liberata nell'evento sotto-

forma di radiazione. Se fosse emessa in modo isotropo, essa sarebbe immensa (fino a  $10^{51}$  erg), di gran lunga maggiore dell'energia che il Sole è in grado di liberare in tutta la sua vita di 10 miliardi di anni. Il bagliore residuo di radiazione X, rivelato in circa il 90% dei Lampi, contiene un'energia che può essere dello stesso ordine di quella emessa nell'evento primario. Quindi, una parte dell'energia dell'esplosione viene immessa nell'ambiente circostante sotto forma di materia ad altissima energia cinetica. Il motore in grado di mettere a disposizione l'energia necessaria è ancora oggetto di discussione. Tra le varie possibilità considerate, vi è il collasso di una stella massiccia (fino a 50 masse solari) con la formazione di un buco nero circondato da un disco di materia, che, nell'essere inghiottito dal buco nero, libererebbe l'energia necessaria per la formazione della palla di fuoco.

Lisotropia dell'emissione è però oggetto di discussione. In effetti la curva di smorzamento della radiazione residua di molti GRB presenta, dopo un certo tempo (varie ore o giorni), un cambio di pendenza (*break*, in inglese) che suggerisce un'emissione tipo jet. Partendo da questa ipotesi, Dale Frail e i suoi collaboratori, utilizzando i tempi di break, hanno determinato gli angoli del jet e stimato che l'energia in raggi gamma associata all'evento è simile per tutti i GRB: circa  $5 \times 10^{50}$  erg. Perciò, se l'ipotesi del jet è vera (e noi vediamo solo quelli puntati verso di noi), il problema energetico è meno drammatico da spiegare.

BeppoSAX ha scoperto anche una classe di nuovi eventi transitori, chiamati flash di raggi X (XRF). Si tratta di eventi di durata tipica maggiore di 2s, che, a differenza dei normali GRB, emettono radiazione X e non gamma, probabilmente una sottospecie di lampi di cui non si sospettava l'esistenza.

Un altro aspetto problematico è che circa la metà dei GRB non mostra emissione di luce visibile ("GRB oscuri"). Alcuni potrebbero avere origine in regioni di formazione stellare molto dense, ma molti potrebbero accadere a distanze così grandi che la luce sia completamente assorbita dall'idrogeno presente tra le galassie. Per questi lampi, i raggi X risultano la sonda più potente per osservarli e quindi per osservare le regioni più estreme dell'Universo.

Con BeppoSAX si sono già ottenuti dati importanti sulle proprietà della materia che circonda il sito dell'esplosione. All'inizio dell'evento sono state osservate righe in assorbimento che dimostrano la presenza, lungo la linea di vista, di gas neutro che viene poi ionizzato dal lampo. Anche durante l'osservazione del bagliore residuo BeppoSAX ha osservato righe in emissione, confermate da satelliti più evoluti lanciati in seguito. Tutto ciò dimostra che il lampo avviene all'interno di un ambiente gassoso neutro o parzialmente ionizzato molto ricco di ferro: ci si aspetta una simile quantità di ferro solo in presenza di una supernova. L'associazione dei GRB con supernove risultanti dal collasso di stelle massicce è convalidata da altri elementi.

Il 25 aprile del 1998 BeppoSAX rivelò un GRB nella cui posizione fu osservata dopo qualche giorno una supernova. Tale legame è stato recentemente confermato dall'osservazione di un lampo occorso il 29 marzo 2003 e localiz-

zato col satellite HETE-2. Tutto ciò mostra che le osservazioni in raggi X e gamma con BeppoSAX hanno guidato a scoperte inattese, anche in altre bande di energia. È verosimile che, proprio con i raggi X e gamma, si arriverà a studiare gli oggetti più remoti dell'Universo, a determinarne la distanza e a comprendere come la materia visibile si è andata aggregando in forma di stelle e di galassie.

Molte questioni sono state lasciate irrisolte da BeppoSAX (vedi articolo di Davide Lazzati, *l'astronomia* n. 241, aprile 2003, pag. 18) per la soluzione delle quali nuove missioni X da satellite sono necessarie. Chandra, Newton, HETE-2 e INTEGRAL stanno proseguendo il lavoro di SAX. SWIFT, la missione USA/Italia/Gran Bretagna, è sulla rampa di lancio nel momento in cui scriviamo. BeppoSAX ha però tracciato la strada e ha aperto una nuova finestra d'indagine dell'Universo violento. Per due anni (1997 e 1999) le scoperte sui Lampi Gamma ottenute grazie a BeppoSAX sono state classificate dalla rivista "Science" tra le 10 più importanti dell'anno. Nel 1998 abbiamo ricevuto il Premio "Bruno Rossi" della American Astronomical Society e nel 2002 il Premio "René Descartes" per la Scienza della Commissione Europea.

*ENRICO COSTA, laureato in Fisica a Roma, è dirigente di ricerca presso l'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica (IASF) dell'INAF. Ha partecipato a esperimenti di Astronomia X e Gamma da pallone stratosferico, da razzo e da satellite (BeppoSAX, INTEGRAL, AGILE). Studia tecnologie innovative per la misura della polarizzazione dei raggi X.*

*FILIPPO FRONTERA è professore ordinario di Fisica Generale presso l'Università di Ferrara. Collabora anche con l'IASF del CNR/INAF, sezione di Bologna, dove è Coordinatore del gruppo in Astronomia X. Presso il Dipartimento di Fisica di Ferrara è responsabile del gruppo di Astrofisica delle Alte Energie. Nell'ambito della missione BeppoSAX, era responsabile dello strumento di alta energia PDS (Phoswich Detection System) e del Gamma Ray Burst Monitor (GRBM). È autore di numerose pubblicazioni in Astrofisica sperimentale e osservativa.*

*LUIGI PIRO è primo ricercatore dell'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica (IASF) del CNR ed è stato responsabile scientifico della missione BeppoSAX. Laureato in Fisica a Roma nel 1983 e divenuto ricercatore del CNR a Bologna nel 1985, ha lavorato in Giappone per più di un anno con il satellite per Astronomia X GINGA. Al ritorno nel 1989 si è trasferito nella attuale sezione di Roma dell'IASF e ha diretto numerosi programmi di osservazione in raggi X, in particolare, le attività di BeppoSAX sui Gamma-Ray Bursts.*

*Tutti e tre gli autori sono stati insigniti del Premio Bruno Rossi della Società Astronomica Americana (con il BeppoSAX team) nel 1998 e del Premio Cartesio della Comunità Europea nel 2002 (con un team europeo) per le scoperte sui Gamma-Ray Bursts.*