

Il Gamma Ray Observatory

GIOVANNI F. BIGNAMI

Lanciato lo scorso 5 aprile dallo Shuttle, rappresenta il secondo dei grandi Osservatori orbitali che la NASA lancerà in questo decennio. Dedicato allo studio dei raggi gamma, porta quattro strumenti che indagheranno lo spazio profondo con una sensibilità mai prima raggiunta.

Con tutte le difficoltà dello Shuttle Transportation System, e nonostante i problemi dell'Hubble Space Telescope (HST), è il momento di fare il tifo per il secondo della serie dei grandi Osservatori orbitanti della NASA, il Gamma Ray Observatory, GRO. Lanciato il 5 aprile scorso, è già operativo e potrà funzionare anche congiuntamente con l'HST e il satellite per astronomia X ROSAT per un tentativo di realizzare osservazioni coordinate profonde in modo sistematico, un sogno non ancora realizzato.

La storia dell'Osservatorio per astronomia-gamma è naturalmente lunga e tormentata, come si conviene ad un grande progetto. Per apprezzare GRO è necessario riflettere un po' sulle basi dell'astronomia gamma e del suo livello di sviluppo, soprattutto negli Stati Uniti, a partire dalla seconda metà degli anni Settanta. Fare astronomia con i fotoni gamma significa ottenere informazioni sugli oggetti celesti (da quelli puntiformi al fondo stesso del cielo) utilizzando la banda di frequenza che comprende tutti i fotoni con energie al di là delle decine o delle centinaia di keV, dove, per convenzione, terminano i raggi X. A queste energie è chiaro che i fotoni gamma ci portano informazioni su processi non termici, a differenza della quasi totalità di tutti gli altri fotoni celesti. I processi che generano raggi gamma [v. *l'astronomia n. 23 pag. 6 e 14*] sono molteplici e comprendono la produzione di righe gamma grazie al decadimento di stati eccitati di nuclei o all'annichilazione di particelle con le rispettive antiparticelle (ad esempio elettroni e positoni), l'interazione di particelle cariche (protoni ed elettroni) con campi elettromagnetici e, infine, l'interazione tra particelle cariche e materia.

L'interesse astrofisico di ciascuno di questi processi è abbastanza evidente: ad esempio, nel caso delle righe nucleari c'è la possibilità di diagnostica spettroscopica

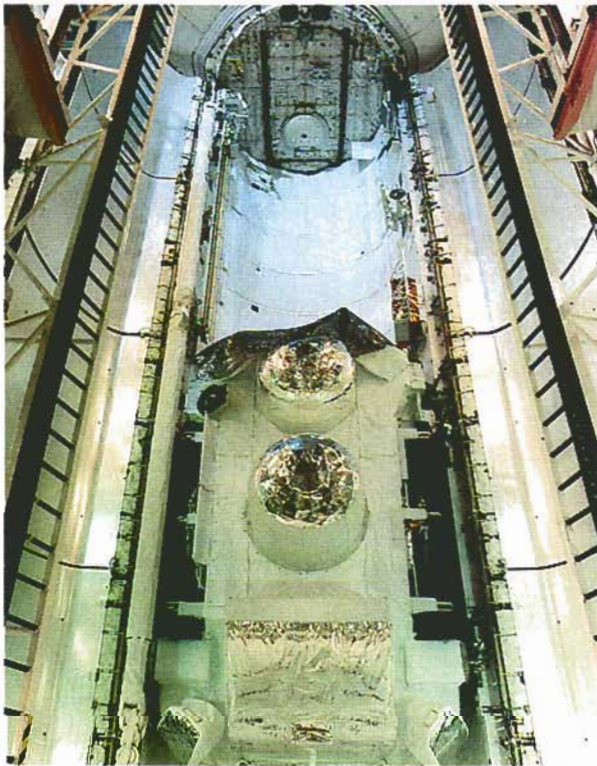
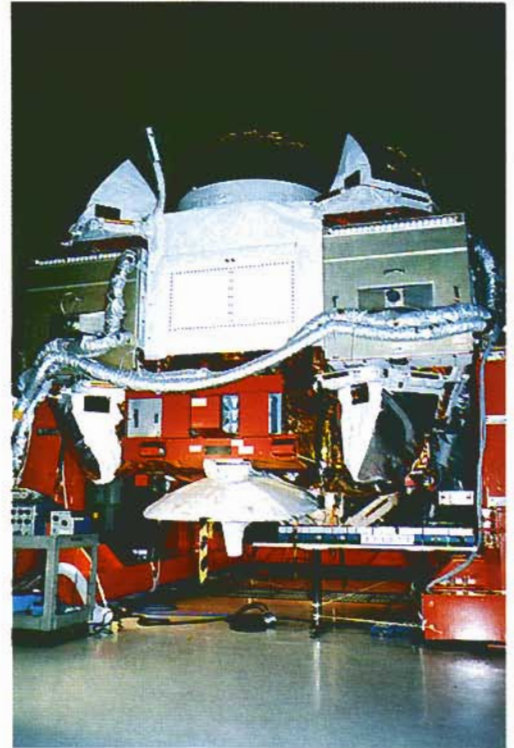
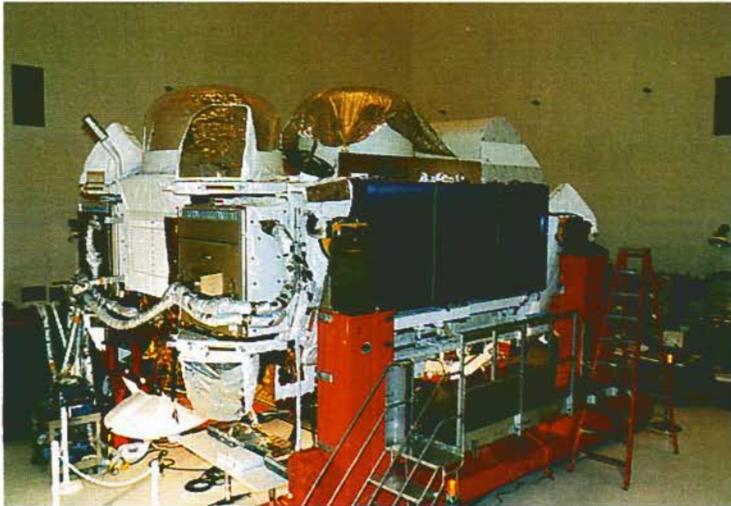
non relativa ai livelli energetici degli elettroni nell'atomo (come avviene per la spettroscopia ottica o X), ma dei nucleoni nel nucleo. In più, il vantaggio di un'altra dimensione, cioè il tempo di decadimento dei vari isotopi, permette di datare fenomeni singoli (esplosioni di supernovae, nascita di stelle), fino al caso più generale della cosmologia. Per i processi "continui", invece, come la radiazione gamma che si produce nell'interazione tra particelle cariche e i campi elettrici o magnetici, o anche per le righe di decadimento di certi isotopi, si ottengono informazioni sui modi in cui si sviluppano le interazioni tra radiazione, materia e campi magnetici, anche su larga scala, ad esempio nel mezzo interstellare.

I raggi gamma, cioè i fotoni con energia al di sopra delle decine di keV, hanno un importante vantaggio su quasi tutti gli altri fotoni dello spettro elettromagnetico: possono attraversare distanze molto grandi, anche miliardi di anni luce, senza essere assorbiti dalla materia o dalla radiazione diffusa interstellare ed intergalattica. Hanno cioè la capacità di portare inalterata, fino al nostro rivelatore, l'informazione sulla zona in cui sono stati prodotti. Naturalmente, sono arrestati negli ultimi 30 km di gas denso che forma l'atmosfera terrestre; per questo i telescopi per i raggi gamma devono essere montati su satellite.

Rivelare i raggi gamma è un problema comunque non facile, proprio a causa del loro alto potere penetrante, cioè alla loro limitata propensione ad interagire con la materia. Ancora più complicato è cercare di fare astronomia in raggi gamma, cioè non solo rivelare i fotoni, con la maggior superficie di raccolta e la migliore efficienza possibili, ma anche misurarne la direzione di arrivo, l'energia e, se possibile, lo stato di polarizzazione.

Il parametro più importante, la direzione di arrivo, è anche il più difficile da determinare, perché i fotoni gamma non possono essere focalizzati o riflessi come quelli ottici o X. La ragione è legata ai fondamenti della struttura della materia: le distanze interatomiche tra i solidi sono paragonabili o maggiori della lunghezza

Il Gamma Ray Observatory (GRO), lanciato il 5 aprile scorso, dovrebbe segnare una svolta nell'astronomia in raggi gamma. Nel disegno della NASA è illustrata, in spaccato, la ricca strumentazione di bordo.



6

Immagini delle fasi finali di assemblaggio del GRO e, qui a sinistra, la sua sistemazione nella stiva di carico della navetta Atlantis con cui è stato portato in orbita. (cortesia NASA)

d'onda dei fotoni gamma. Essi perciò "vedono" sempre la materia unicamente nei suoi componenti elementari, e solo con quelli interagiscono. La misura della direzione di arrivo di un raggio gamma dovrà perciò essere sempre basata sulla semplice collimazione degli strumenti: in pratica, se ne riduce il campo di vista, ma questo evidentemente risulta penalizzante dal punto di vista della efficienza di rivelazione; oppure ci si affida alla ricostruzione della dinamica della interazione singola.

Questo significa trattare il fotone come una particella interagente con altre della materia che fa da bersaglio e stabilire con la migliore precisione possibile la direzione di ciascuno dei prodotti della interazione per risalire infine alla direzione d'arrivo del raggio gamma originario. Questo metodo, che finora è il più seguito,

specie alle alte energie, soffre di severe limitazioni, proprio a causa della fisica della interazione.

Un metodo interessante per la misura della posizione delle sorgenti gamma nel cielo è un caso speciale di collimazione, quello che fa uso di una maschera cosiddetta ad "apertura codificata". Non ne parleremo in questa sede, perché il sistema non è utilizzato a bordo di GRO.

È importante tuttavia ricordare che si tratta di un metodo relativamente nuovo e molto promettente che attualmente sta raccogliendo successi con il telescopio Sigma a bordo della missione Granat, un satellite franco-sovietico per astronomia X. E' anche previsto per altre future missioni di astronomia gamma, come Integral dell'ESA e se non è impiegato su GRO è solo perché non era ancora ben noto e provato al momento

Le date dell'astronomia gamma

1958 - Compare sulla rivista italiana *Nuovo Cimento* l'articolo di P. Morrison che suggerisce la possibilità di fare astronomia nei raggi gamma.

1961 - EXPLORER 1: il satellite della NASA ha l'onore di rivelare per primo alcuni (21!) fotoni gamma extraterrestri.

1967 - VELA: la serie di satelliti-spia americani scopre i *gamma-ray bursts*. La scoperta è tenuta segreta e verrà resa pubblica solo sei anni dopo.

1968 - OSO-3: con 621 fotoni, questo satellite scopre un'emissione dal centro e dal disco galattico e, forse, un fondo diffuso extragalattico.

1972 - SAS-2: con solo 8 mesi di missione e 8000 fotoni, per la prima volta fa davvero astronomia nei raggi gamma. Scopre una struttura nel disco galattico; scopre l'emissione gamma delle due pulsar nei resti di supernova Crab e Vela; scopre la sorgente peculiare Geminga.

1975 - COS-B: il satellite dell'ESA inizia la sua missione di quasi sette anni, nella quale rivela 210.000 fotoni gamma

cosmici di alta energia; esegue una mappa dettagliata della Galassia, scopre sorgenti nel disco e la prima sorgente extragalattica.

1977 - HEAO-1: esegue la prima mappatura completa del cielo nei raggi gamma di bassa energia (intorno a 100 keV).

1979 - HEAO-3: scopre la riga gamma di decadimento dell'alluminio-26 nel piano galattico.

1980 - Solar Maximum Mission: scopre le righe di decadimento del Cobalto-56 prodotto nei resti gassosi della supernova 1987A.

1989 - Sigma: un telescopio a bordo di un satellite franco-sovietico scopre la variabilità e localizza la sorgente della riga a 511 keV (annichilazione elettrone-positone) nella zona del centro galattico.

1991 - Inizia la missione del Gamma Ray Observatory.

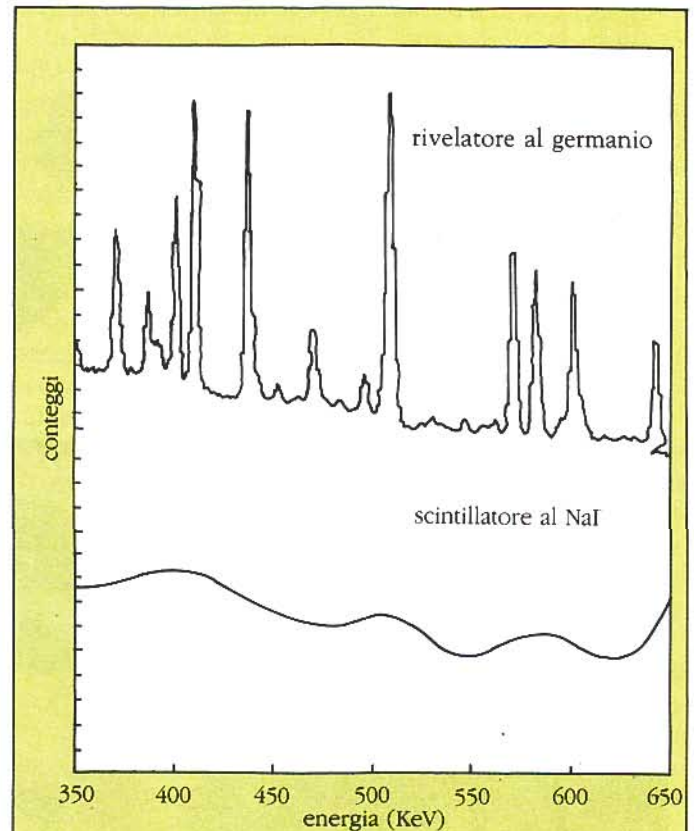
Le date riportate sono quelle del lancio degli strumenti.

7

della progettazione della missione, vale a dire circa quindici anni fa.

La misura dell'energia trasportata dai raggi gamma avviene quasi sempre per assorbimento del fotone, assorbimento che può essere totale oppure no a seconda della sua energia. Le interazioni del fotone con la materia possono dar luogo direttamente a scintillazione, scegliendo un apposito materiale scintillante: schematicamente, l'energia assorbita viene riemessa da questo materiale a lunghezze d'onda maggiori e viene misurata dopo essere stata raccolta da un fotomoltiplicatore. Oppure il fotone può creare una *cascata* elettromagnetica di elettroni e fotoni, che sarà più o meno totalmente assorbita nel materiale e vi produrrà scintillazione. La precisione della misura di energia, in questo caso, dipende dalla statistica di almeno due processi aleatori, quali le interazioni multiple del fotone e la scintillazione. La risoluzione in energia del rivelatore (cioè la precisione della misura) sarà perciò limitata, anche senza tener conto della statistica intrinseca relativamente povera dovuta ai bassi flussi di fotoni gamma.

Questo rappresenta, purtroppo, una forte limitazione in uno strumento classico a scintillazione, soprattutto per quanto riguarda il riconoscimento di righe gamma di origine nucleare. Queste righe, in condizioni normali, sono molto strette e, d'altra parte, proprio il valore accurato dell'energia dei fotoni permette l'individuazione della specie nucleare in esame. La spettroscopia nucleare moderna utilizza, per la misura di energia dei raggi gamma, rivelatori a stato solido nei quali l'assorbimento del fotone avviene in cristalli di germanio opportunamente raffreddati. Con questi rivelatori la precisione che si ottiene è migliore o uguale a quella della larghezza intrinseca delle righe gamma, ed è perciò ideale per la individuazione delle varie specie nucleari. Ancora una volta, purtroppo, i lunghissimi tempi di preparazione, progettazione ed atte-



Il grafico mette a confronto la risoluzione ottenibile, nell'analisi di un tipico spettro gamma attorno a 500 keV, da un rivelatore a semiconduttore (sopra) e da un classico rivelatore a scintillazione (sotto) come quelli utilizzati negli strumenti del GRO. La superiorità dei nuovi rivelatori al germanio risulta evidente, ma purtroppo la loro tecnologia era ancora inaffidabile quando iniziò il progetto del GRO e così non venne prevista la loro installazione.

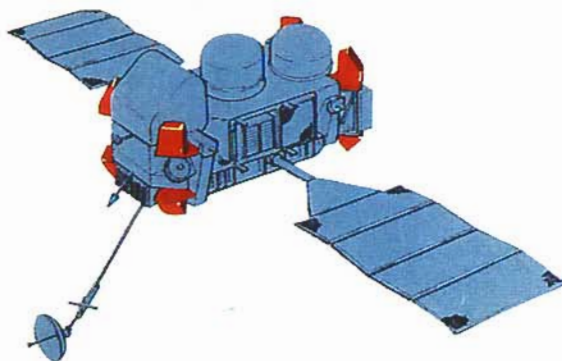
sa non hanno permesso di imbarcare su GRO uno o più spettrometri al germanio, divenuti operativi per lo spazio solo negli ultimi anni, ed anch'essi previsti nella missione Integral.

Pur se queste due grosse limitazioni tecnologiche, cioè l'assenza di una maschera ad apertura codificata e di uno spettrometro al germanio limitano l'Osservatorio proprio in due aspetti cruciali per l'astronomia gamma (risoluzione spaziale ed energetica), GRO rimane uno strumento di punta, caratterizzato soprattutto da un'alta sensibilità. Vediamo più in dettaglio come è composto il carico utile dell'Osservatorio. Su di una struttura portante comune, destinata a riempire gran parte della stiva di carico dello Shuttle, sono montati quattro strumenti, sostanzialmente separati e destinati a lavorare in modo indipendente.

8 **BATSE** (*Burst And Transient Source Experiment*) è unico nel suo genere, perché consiste di otto moduli separati, sistemati ai quattro angoli della piattaforma, quattro sul piano superiore e quattro sulla faccia inferiore. Lo scopo è quello di tenere sempre sotto osser-

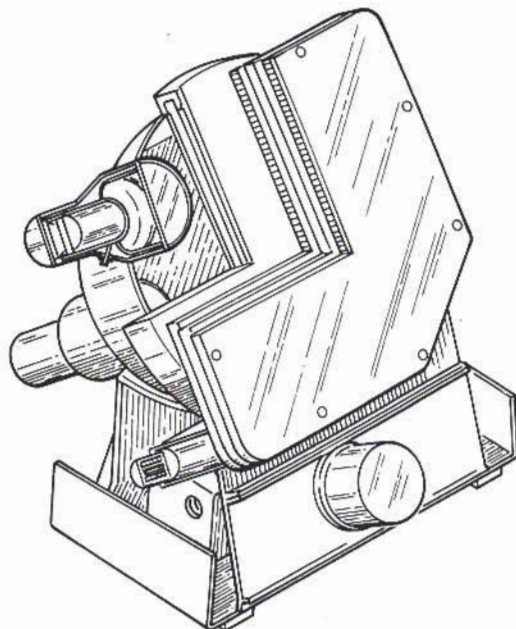
vazione tutto il cielo non occultato dalla Terra (e cioè circa 2/3 della volta celeste), per rivelare fotoni transienti di alta energia, cioè i famosi "lampi" in raggi gamma (*gamma ray burst*, GRB). Si tratta di fenomeni estremamente energetici ma molto brevi, della durata di qualche secondo o anche meno, nei quali un intenso flusso di raggi gamma di bassa energia (tipicamente al di sotto del MeV), colpisce il rivelatore.

Proprio a causa della loro imprevedibilità e della loro breve durata i GRB rappresentano ancora un mistero astronomico, a quasi vent'anni dall'annuncio della loro scoperta, nel 1973. A suo tempo, essi furono al centro di un interessante "caso" politico- astronomico tra le due superpotenze. I satelliti USA della serie Vela, in orbita alla fine degli anni '60, avevano a bordo sensibili rivelatori di raggi gamma per controllare il rispetto del trattato di bando delle esplosioni nucleari in atmosfera. La scoperta di improvvisi, ripetuti aumenti di conteggi di radiazioni gamma aveva dapprima fatto pensare ad esplosioni tenute segrete; analisi più accurate permisero invece di attribuire agli eventi un'origine celeste, anche se misteriosa. I dati vennero final-



BATSE (*Burst And Transient Source Experiment*)

Si tratta di otto moduli (disegno sotto) collocati ai vertici della piattaforma dell'Osservatorio, come illustrato nello schema qui a sinistra. Nella foto si vede il montaggio dei fotomoltiplicatori che costituiscono lo stadio finale del rivelatore.



mente "declassificati" e presentati alla comunità astronomica mondiale nel 1973, solo per scoprire che anche i sovietici, naturalmente, avevano fatto volare rivelatori gamma e anch'essi non sapevano come interpretare i dati.

Ancora oggi l'origine astrofisica dei "lampi" di raggi gamma non è sicura; probabilmente sono di origine galattica, come suggerito soprattutto dalla loro distribuzione in cielo e da considerazioni sulla quantità totale di energia coinvolta nel fenomeno. Con ogni probabilità si tratta di fenomeni transienti che hanno luogo nelle immediate vicinanze di una stella di neutroni, e diversi modelli sono stati proposti in questo senso. Per arrivare a una comprensione piena del fenomeno, è ovvio che per prima cosa è necessaria un'identificazione delle sorgenti ad altre lunghezze d'onda, ad esempio in ottico e in raggi X. Per questo la direzione di arrivo deve essere localizzata con la massima precisione possibile, cosa molto difficile per un evento transiente molto breve ed imprevedibile.

BATSE riuscirà a localizzare i GRB all'interno di circa un grado: una precisione di per sé non sufficiente, ma che accoppiata ai dati di altri strumenti può produrre una posizione finale con un'indeterminazione di sole poche decine di secondi d'arco, cioè significativamente meglio di quanto sia possibile finora. La separazione dello strumento in otto moduli distribuiti agli angoli dell'Osservatorio è proprio voluta per ottenere la miglior risoluzione angolare sull'evento singolo.

Ogni modulo di BATSE contiene un disco di ioduro di sodio (NaI), lo speciale materiale scintillante interagendo sul quale i raggi gamma danno luogo ad emissione di luce. Questa viene raccolta da un'apposita "guida di luce" e portata a tre fotomoltiplicatori, capaci di produrre un segnale elettronico veloce che può essere opportunamente codificato e poi trasmesso a terra. Gli otto cristalli di NaI di BATSE sono, ciascuno, i più grandi mai volati su satellite: venti pollici di diametro, più di mezzo metro, assicurano una sensibilità dello strumento almeno venti volte maggiore dei precedenti telescopi per GRB.

La comprensione dei GRB, del loro meccanismo fisico di emissione, richiede anche una buona conoscenza del loro spettro di energia. Il materiale scintillante, rivelando un raggio gamma, ne fornisce una misura dell'energia, che è proporzionale alla quantità di luce vista dal fotomoltiplicatore. La bontà della misura, però, dipende anche dallo spessore del materiale e per migliorare la risoluzione energetica BATSE possiede anche rivelatori di minor superficie (12 cm di diametro), ma di maggior spessore, più di 7 centimetri. In questo modo si potrà vedere, finalmente con certezza, se lo spettro dei raggi gamma da GRB contenga o meno quelle righe spettrali caratteristiche, ad esempio, della annichilazione elettrone-positone nelle vicinanze di una stella di neutroni. Se confermata, questa osservazione rafforzerebbe una delle teorie correnti sull'origine di questi fenomeni, basata su una speciale forma di accrescimento di materia, lento ed instabile, nell'intenso campo gravitazionale dell'oggetto collassato.

L'identificazione, e quindi gran parte della compren-

sione, dei GRB potrebbe avvenire correlando i dati posizionali ottenuti da BATSE con immagini in raggi X (per esempio di ROSAT), e soprattutto con osservazioni di eventuali *flash* in ottico, rapidi e spettacolari aumenti di brillantezza di una stella debole ed anonima.

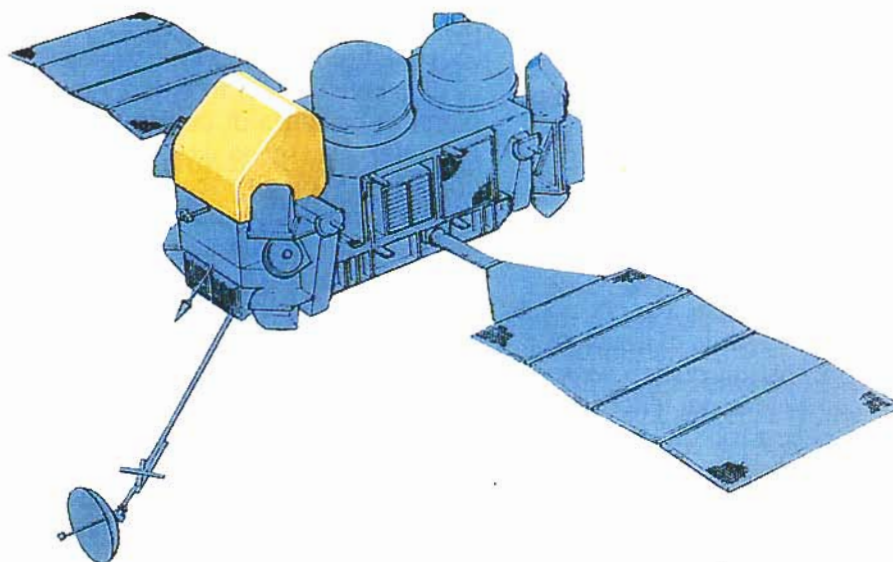
In totale, ci si aspetta da BATSE la rivelazione media di quasi un GRB al giorno, e per ognuno di essi sarà possibile misurare la variazione temporale dei conteggi e della forma spettrale. Insomma, per una missione prevista sulla durata di diversi anni, i dati su questo speciale aspetto dell'astronomia delle alte energie dovrebbero fare un salto di qualità (e di quantità) tale da portare vicino alla soluzione del mistero.

OSSE (*Oriented Scintillation Spectrometer Experiment*) è lo strumento dedicato alla spettroscopia ed allo studio della variabilità temporale delle sorgenti gamma, siano esse già note o nuove, appena scoperte da GRO. È ottimizzato per il lavoro tra 100 keV e 10 MeV, una delle regioni spettrali più interessanti, sia per l'emissione in spettro continuo sia per quella in righe nucleari, prodotte dal decadimento radioattivo.

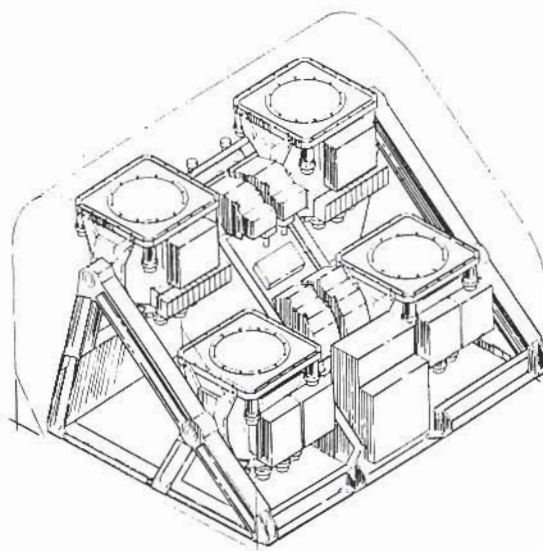
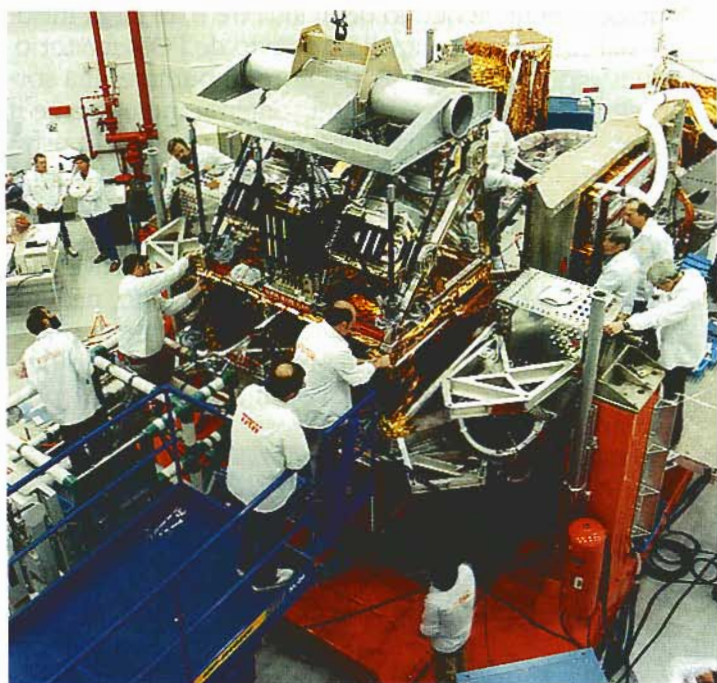
OSSE consiste di quattro rivelatori identici, ciascuno montato in un sistema di puntamento individuale ed indipendente da quello degli altri tre e, in larga misura, dal sistema di controllo d'assetto dell'Osservatorio. Questo permette ad un rivelatore di puntare una sorgente mentre un altro misura contemporaneamente il rumore di fondo puntando una regione di cielo priva di sorgenti. Oppure può consentire l'osservazione contemporanea di più sorgenti, o l'osservazione di sorgenti "secondarie" quando quella principale, verso la quale è puntato tutto l'Osservatorio, si trova momentaneamente occultata dalla Terra. Il tutto, naturalmente, senza alterare il programma generale di osservazione di GRO. Insomma, uno strumento molto flessibile, studiato anche per l'ottimizzazione del programma di osservazione.

Ciascuno spettrometro di OSSE consiste di un rivelatore centrale a scintillazione, circondato da rivelatori il cui compito è di riconoscere il contributo del rumore di fondo, soprattutto dovuto a particelle cariche e, di conseguenza, escluderlo. La riduzione drastica del fondo è uno dei requisiti principali per uno strumento gamma, che si trova ad operare in un ambiente dove gli eventi non voluti (appunto, di fondo) generano segnali molto simili ai raggi gamma, ma assai più numerosi. Il rivelatore centrale, lo spettrometro gamma vero e proprio di ciascuno dei quattro moduli, consiste di un *sandwich* di cristalli di ioduro di sodio e di ioduro di cesio, nei quali i raggi gamma interagiscono e producono luce di scintillazione in quantità proporzionale alla loro energia. I cristalli sono visti da sette fotomoltiplicatori che rispondono con un segnale proporzionale alla luce di scintillazione e, con un'opportuna calibrazione, è possibile misurare l'energia del gamma incidente. Infine, per dare una qualche capacità astronomica allo strumento, sopra al cristallo è piazzato un collimatore di tungsteno che definisce un campo di vista rettangolare di $3^{\circ},8 \times 11^{\circ},4$.

Anche da questa descrizione affrettata e semplificata di OSSE si possono vedere bene i difetti e i pregi dello



10

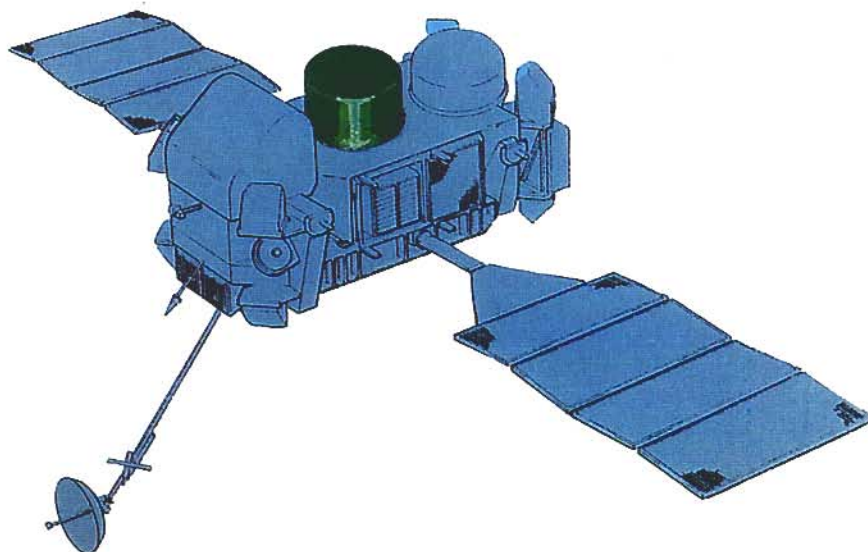


OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment)
 Lo strumento consiste di quattro rivelatori identici (disegno qui sopra) collocati in batteria ad una estremità della piattaforma (in alto). Nella foto a sinistra si vede la fase di montaggio dello strumento sul satellite.

strumento. I difetti sono nei pesanti limiti di risoluzione angolare e di energia. La prima è ottenuta con il classico, ma superato, metodo del collimatore a grande campo; la seconda è dell'ordine del 10%, quella tipicamente consentita dal processo fisico di interazione del raggio gamma nel cristallo e dalla susseguente raccolta di luce. Gli spettrometri gamma moderni sono invece basati sulla rivelazione del fotone in germanio con un potere risolutivo dell'ordine dello 0,1%, cioè quanto necessario per l'osservazione delle righe nucleari. Nella figura di pag. 7 viene proposto un paragone tra la risoluzione energetica dei migliori cristalli a scintillazione e quella di un rivelatore al germanio, per un caso realistico di spettroscopia di righe nucleari: la differenza c'è e si vede bene.

Insomma, i limiti di OSSE sono essenzialmente dovuti alla sua età, cioè al tempo intercorso tra la sua progettazione e la realizzazione. I pregi dello strumento, d'altro canto, sono nella sua flessibilità, nella capacità di misurare bene il fondo e, soprattutto, nella sua grande superficie di raccolta, che lo rende uno strumento molto sensibile. Il che fa decisamente onore agli scienziati progettisti i quali, con gli strumenti e la tecnologia realisticamente disponibili al momento, pensarono in grande, realizzando uno strumento ancora oggi estremamente attuale e destinato a restare ancora per molto tempo il più sensibile nel suo intervallo di energia.

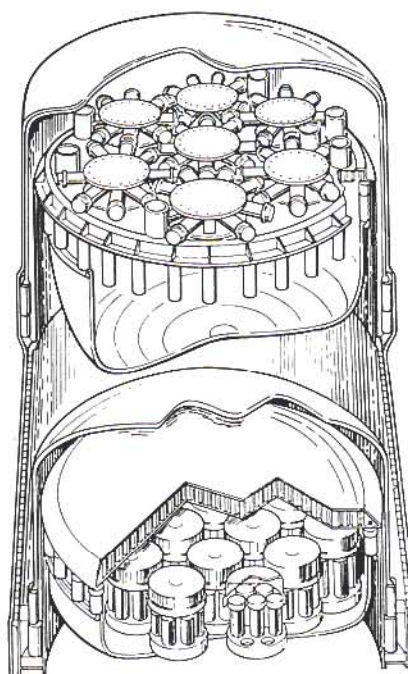
COMPTEL, il telescopio Compton per immagini è de-



COMPTEL (Imaging Compton Telescope)

In questo strumento sono abbinati dei rivelatori di effetto Compton destinati a rivelare il raggio gamma primario e dei rivelatori a scintillazione che assorbono il fotone diffuso dal primo urto (disegno sotto a destra); esso è collocato al centro della piattaforma del GRO (in alto). Nella foto si vede la fase di installazione dello strumento.

11



dicato al fisico americano A.H Compton, il cui nome è legato al principale meccanismo di interazione dei raggi gamma con la materia nell'intervallo di energia dei fotoni da circa 1 a circa 30 MeV. E' un telescopio ad immagini, perché, a differenza di BATSE ed OSSE, è in grado di fornire la visione di una porzione di cielo relativamente ampia, all'interno della quale possono essere localizzate una o più sorgenti, pur sulla base della rivelazione del fotone singolo, di cui si può misurare l'energia.

Il principio di funzionamento di COMPTEL sfrutta la cosiddetta *diffusione Compton* dei fotoni con la materia. Un raggio gamma incidente interagisce con un elettrone a riposo al quale cede una parte della sua energia e, in seguito all'interazione, modifica la dire-

zione della sua traiettoria secondo un angolo che è funzione del bilancio energetico. In COMPTEL, questa prima interazione avviene nel piano superiore del rivelatore, composto da 7 moduli a scintillatore liquido (diametro 80 cm ciascuno), nei quali gli elettroni di rinculo producono un segnale luminoso rivelato e localizzato (con la precisione di 0,5 cm) da un insieme di 8 fotomoltiplicatori per modulo. Il fotone "diffuso", cioè con energia diminuita e direzione di moto modificata, prosegue e viene raccolto nel piano di rivelazione inferiore, a 150 cm di distanza. Esso è formato da 14 moduli scintillatori di ioduro di sodio, di 28 cm di diametro, per un'area totale di 8620 cm². In questi blocchi di scintillatore il raggio gamma viene completamente assorbito, producendo un segnale luminoso

A.H. Compton, chi era costui?

Arthur Holly Compton (1892-1962) è lo scienziato statunitense al quale GRO è dedicato. Forse influenzato dalla scuola di Cambridge del grande Rutherford, iniziò una serie di esperimenti sulla diffusione di fasci di raggi X in paraffina, culminati nell'osservazione del 1923, con Debye, che essi perdevano energia di una quantità proporzionale alla variazione della loro lunghezza d'onda. Poco dopo, Compton fece anche la cruciale osservazione, in immagini prese entro una camera a nebbia di Wilson, della diffusione degli elettroni sui fotoni. Erano gli anni critici per la meccanica quantistica e per la comprensione del dualismo onda-particella: le osservazioni (e le interpretazioni) di Compton e Wilson valsero loro il premio Nobel nel 1927.

Ormai tutto il mondo aveva accettato *l'effetto Compton*, ovvero l'interazione dinamica tra fotoni e particelle ca-

riche leggere, in particolare elettroni. A.H. Compton continuò una brillante carriera negli anni Trenta come professore a Chicago, con studi sui raggi cosmici e la loro interazione con il campo magnetico terrestre, rivelando, tra l'altro, di possedere notevoli doti come organizzatore di progetti scientifici.

Forse per questo fu chiamato, nel 1941, ad un'importante posizione nel progetto Manhattan, per lo sviluppo della prima bomba nucleare. Nonostante i suoi scrupoli religiosi accettò, e fu a Chicago con Fermi nello sviluppo della prima pila atomica, ancora conservata nel cortile dell'Università. Fu lui che, il 2 dicembre 1942, fece la storica telefonata al comando del progetto Manhattan, riferendo in codice il successo della reazione a catena e l'apertura dell'era atomica: "Il navigatore italiano è appena sbarcato nel Nuovo Mondo".

12

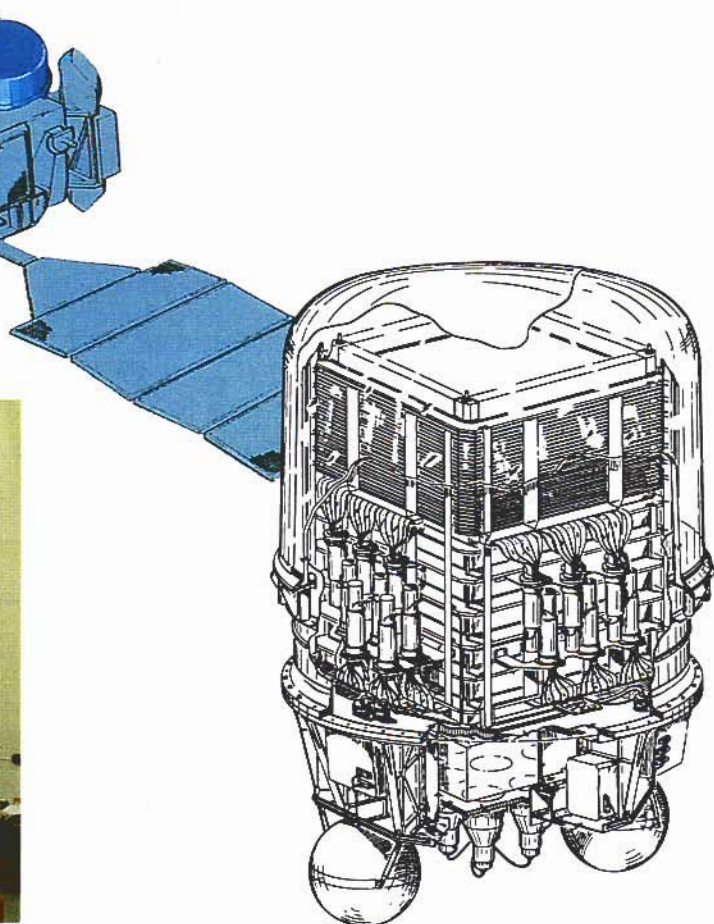
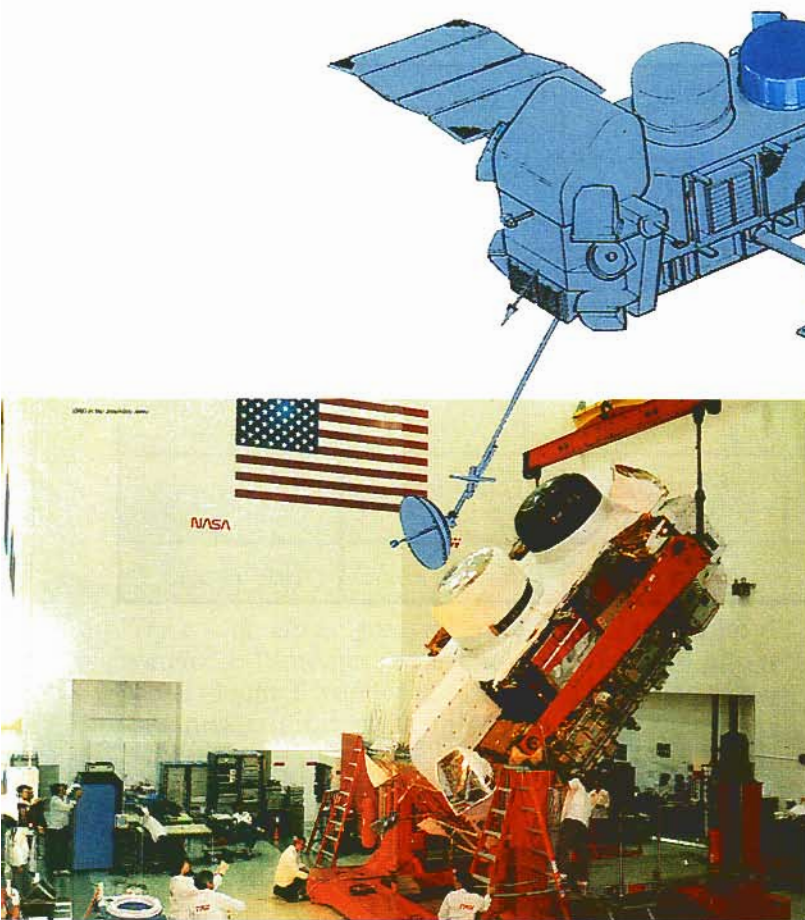
proporzionale alla sua energia. Il segnale viene poi rivelato e posizionato dal gruppo di fotomoltiplicatori che guardano ciascun modulo, completando la descrizione dell'evento iniziato nel piano superiore di rivelazione.

Per poter risalire all'energia e alla direzione di arrivo del fotone cosmico primario, è necessario ricostruire in qualche modo il processo fisico a due stadi descritto più sopra. Non è una cosa facile; ed infatti la procedura di analisi dati di COMPTEL è di gran lunga la più complicata di tutti gli strumenti di GRO. Le incertezze sulle misure di posizione e di energia nelle due interazioni si tradurranno probabilmente in una limitata capacità di localizzazione delle sorgenti sulla sfera celeste, dell'ordine di un grado nella migliore delle ipotesi, e in una limitata accuratezza nella misurazione spettrale. Inoltre, la bassa probabilità che si verifichino entrambe le interazioni - solo così l'evento è ritenuto valido - e la complicazione del sistema di analisi dati contribuiscono a ridurre il numero degli eventi osservabili: di fatto l'area sensibile dello strumento risulta essere mezzo centesimo dell'area geometrica del solo rivelatore superiore.

Per tutte queste ragioni, COMPTEL si presenta come lo strumento più incerto ma anche, per certi versi, più interessante di GRO. Questa tecnica di rivelazione e di misura non è mai stata utilizzata in missioni spaziali, sebbene sia stata provata con buon successo su palloni stratosferici. Proprio per tale motivo l'intervallo di energie da 1 MeV alla decina di MeV è ancora essenzialmente inesplorato, almeno per quanto riguarda

strumenti con capacità di fare immagini. Con un pizzico di fortuna e con molta buona volontà, è probabile che COMPTEL generi delle interessanti sorprese, sia per il cielo galattico che, soprattutto, per quello extragalattico, dove Sigma, il già citato telescopio orbitale a raggi X di alta energia, ha avuto finora minor successo. Certo, stando ai risultati delle accurate calibrizioni eseguite prima del lancio, la sensibilità di COMPTEL dovrebbe essere tale (da un decimo ad un centesimo circa del flusso della Crab Nebula) da permettere una significativa esplorazione totale del cielo, che verrà completata nel corso del primo anno circa della missione GRO.

Il quarto strumento a bordo di GRO è EGRET, acronimo di *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope* ma anche "airone" in inglese. E' quello sensibile ai raggi gamma di energia più alta, da circa 20 MeV a circa 20 GeV, cioè ai fotoni prodotti nei processi più energetici che si sviluppano nei corpi celesti. Nell'intervallo di energia al di sopra di poche decine di MeV, il processo dominante nell'interazione dei raggi gamma con la materia è quello della produzione di coppie: il fotone si materializza in una coppia elettrone-positone nel campo elettrico di un nucleo del materiale assorbitore. Gli elettroni sono creati con un'energia cinetica pari a gran parte dell'energia del raggio gamma incidente e si muovono lungo una direzione prossima a quella originaria del fotone. Si hanno così a disposizione due particelle cariche, che possono essere rivelate e misurate facilmente, ad esempio con una



13

“camera a scintilla”, lo strumento già utilizzato con successo in missioni di astronomia gamma del passato come il SAS-2 della NASA ed il famoso COS-B dell'ESA. La camera a scintilla è uno strumento interessante perché fornisce una vera e propria immagine tridimensionale dell'interazione e permette, innanzitutto, un'identificazione abbastanza sicura dell'evento come originato da un raggio gamma e non dall'abbondantissimo rumore di fondo. Dall'immagine dell'evento, inoltre, si può dedurre, entro i limiti di accuratezza imposti dalla fisica dell'interazione, la direzione di arrivo e l'energia del fotone incidente.

Nel caso di EGRET, la camera a scintilla è di qualità particolarmente buona, anche perché ha potuto beneficiare dell'esperienza di SAS-2 e COS-B. Soprattutto, è di grande superficie, $80 \times 80 \text{ cm}^2$, molte volte più grande di quelle delle generazioni precedenti. Mentre dall'immagine fornita dalla camera a scintilla si può estrarre la direzione del fotone che ha generato la coppia elettrone-positone, l'energia totale dell'evento viene misurata in un grosso calorimetro, composto da più di 400 kg di ioduro di sodio. Il nome non deve trarre in inganno: non si misura il calore depositato dal fotone nel cristallo, bensì la quantità totale di luce di scintillazione che viene generata dai prodotti dell'interazione elettromagnetica dei due elettroni, materializzati nella camera a scintilla dal fotone incidente. La luce viene raccolta e misurata dal solito gruppo di fotomoltiplicatori che generano un segnale proporzionale all'energia depositata nel cristallo. Da qui l'espressione “calorimetro”, presa a prestito dalla fisica

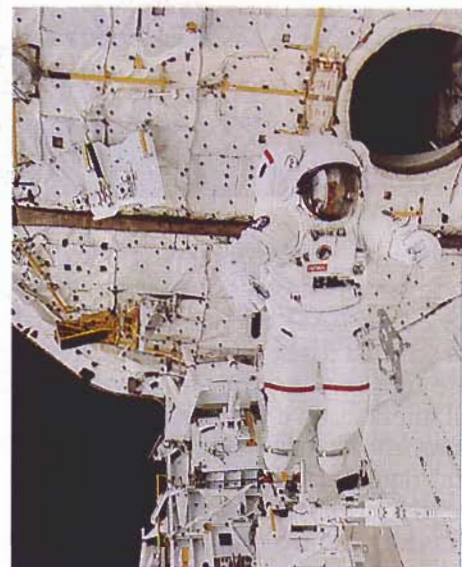
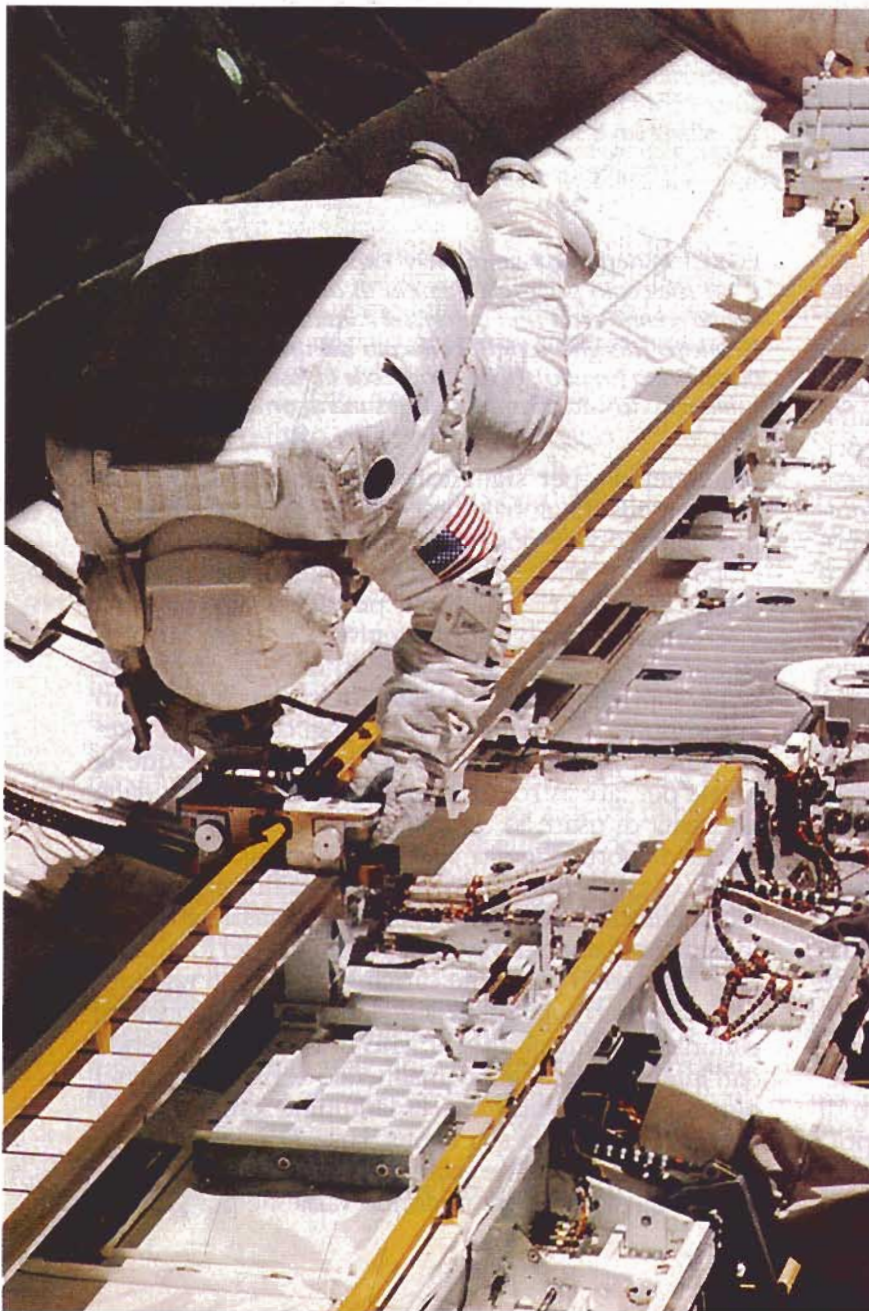
EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope)
 È un telescopio per raggi gamma di alta energia essenzialmente costituito da una camera a scintillazione e da un calorimetro (disegno sopra), collocato ad una estremità della piattaforma (in alto). Nella foto si vede la fase finale di assemblaggio del GRO con tutti gli strumenti ormai installati.

fondamentale per significare una macchina che esegue una misura globale dell'energia di un sistema. Infine, EGRET deve possedere un sistema di discriminazione degli eventi rispetto al fondo ancora migliore di quello degli altri strumenti, perché i raggi gamma energetici che sono il suo obiettivo sono i più rari, circa diecimila volte meno numerosi delle particelle cariche, soprattutto protoni energetici, che costituiscono la componente dominante tra i raggi cosmici. In questo senso, purtroppo l'orbita di GRO non è quella ideale per fare astronomia gamma. Essa è dettata dalla necessità di usare lo Shuttle come vettore, l'unico in grado di portare nello spazio le 17 tonnellate della massa di GRO; purtroppo ciò significa finire su un'orbita inclinata di circa 28° rispetto all'equatore e quindi in una condizione di variabilità continua del fondo. Infatti, il flusso di particelle cariche in grado di raggiungere un punto sulla superficie della Terra (o a qualche centinaio di km di altezza, che è lo stesso) dipende dall'intensità del campo magnetico terrestre in quel punto, la quale varia con la latitudine. Quindi GRO, nei 97 minuti della sua orbita, spazzerà una fascia di quasi 60° di latitudine, con diversi flussi di raggi cosmici e da ciò deriverà un fondo variabile per gli stru-

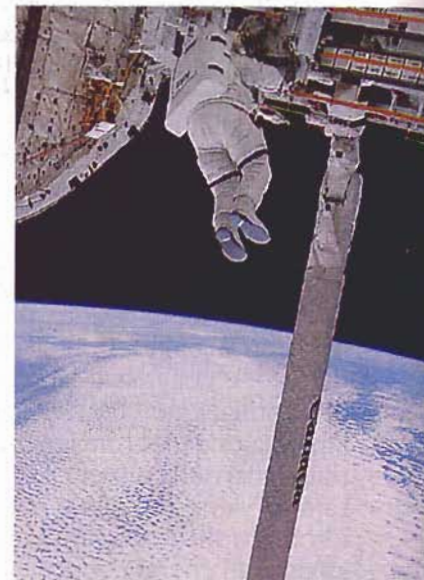
Caratteristiche dei rivelatori di GRO

	OSSE	COMPTEL	EGRET	BATSE	
				GRANDE CAMPO	SPETTROSCOPIA
Intervallo di energia (MeV)	da 0,10 a 10,0	da 1,0 a 30,0	da 20 a 3×10^4	da 0,03 a 1,9	0,015 - 110
Risoluzione spettrale (MeV)	dal 4% al 12%	dal 6% al 9%	~ 20%	dal 20% al 32%	dal 6% all'8%
Area efficace (cm ²)	2013 a 0,2 MeV 1480 a 1,0 MeV 569 a 5,0 MeV	25,8 a 1,27 MeV 29,3 a 2,75 MeV 29,4 a 4,43 MeV	1200 a 100 MeV 1600 a 500 MeV 1400 a 3000 MeV	1000 a 0,03 MeV 1800 a 0,1 MeV 550 a 0,66 MeV	100 a 0,3 MeV 127 a 0,2 MeV 52 a 3 MeV
Risoluzione (sorgenti intense)	10 primi d'arco	8,5 primi d'arco	da 5 a 10 primi d'arco	1° (burst intensi)	—
Campo inquadrato	$3^{\circ},8 \times 11^{\circ},4$	~ 64°	5% del cielo	tutto il cielo	tutto il cielo

14



(in queste pagine) Alcune fasi della messa in orbita di GRO. Gli astronauti dell'Atlantis hanno dovuto impegnarsi in una lunga attività extraveicolare per disincagliare l'antenna dell'Osservatorio che non voleva aprirsi automaticamente. Fortunatamente l'inconveniente è risolto senza problemi.



menti, cioè una difficoltà in più per l'analisi dei dati.

Comunque, il 5 aprile GRO è stato messo sull'orbita giusta dalla navetta Atlantis, pilotata da K.D. Cameron sotto la responsabilità del comandante S.R. Nagel. Per GRO, anche gli altri membri dell'equipaggio sono stati essenziali: Linda Godwin, l'unica donna a bordo, aveva la responsabilità di preparare il satellite per la liberazione dalla stiva di carico della navetta usando il braccio manipolatore apposito. Nella procedura di controllo Linda si è subito accorta che l'antenna dell'Osservatorio non era aperta: GRO sarebbe stato sordo ai comandi da terra e muto per quanto riguarda la trasmissione dati. Per fortuna era prevista una sessione di attività extraveicolare ed i due specialisti di missione, J. Apt e J.L. Ross, sono usciti dallo Shuttle con martelli e chiavi inglesi per riparare il guasto. È seguito un quarto d'ora piuttosto affannoso di tentativi vari, finché il controllo di missione, a corto di idee, ordina: "Try a little elbow grease...", cioè "prova con l'olio di gomito" e l'antenna recalcitrante si libera, tra gli applausi di tutti. È vero, si fa osservare, che se GRO fosse stato messo in orbita da un vettore convenzionale anziché dallo Shuttle, cioè senza nessuno per liberare l'antenna, la missione sarebbe finita prima di cominciare. Ma tutto tutto è bene quel che finisce bene.

Nella sua orbita quasi circolare, a 450 km di altezza, GRO sta iniziando a svolgere un piano di osservazioni piuttosto ambizioso. Dopo una parte iniziale di circa un mese di calibrazioni in volo, tutto l'Osservatorio verrà utilizzato per eseguire in 15 mesi la prima copertura completa del cielo in raggi gamma. Né SAS-2, né COS-B, né tanto meno le osservazioni più brevi in

pallone, avevano mai completato una *survey* del cielo; anzi, la copertura finora disponibile non supera il 50% della volta celeste. Solo da questa prima fase della missione è lecito aspettarsi grosse sorprese: nel caso di EGRET la sensibilità è circa un ordine di grandezza migliore di quella di COS-B, mentre COMPTEL ed OSSE si trovano davanti un cielo essenzialmente inesplorato (da 1 a 10 MeV), o esplorato solo ad un livello molto superficiale, tra 100 keV e 1 MeV.

Dopo questa fase, nel 1992 inizieranno i puntamenti dell'Osservatorio ad una serie di oggetti e zone celesti ritenute di particolare interesse. A questo punto inizierà anche il funzionamento di GRO come un Osservatorio vero e proprio con un programma di "osservatori ospiti". La NASA, infatti, ha investito risorse sotto forma di carburante di bordo per la correzione dell'orbita e di capacità di raccolta dati: come risultato, la durata della missione è prevista in numerosi anni, ben più dei due pianificati originariamente. In cambio, la NASA ha chiesto alla comunità astronomica di trasformare la missione nel secondo Grande Osservatorio orbitale, dopo l'Hubble Space Telescope e prima di AXAF, il prossimo Osservatorio nei raggi X. Questo compito non facile è stato affidato ad un Comitato degli Utenti (simile a quello di HST), che ha essenzialmente lo scopo di rappresentare e difendere gli interessi della comunità scientifica dei potenziali utenti di GRO. Come primo risultato, qualche mese fa è già uscita la prima richiesta di proposte osservative ed in luglio uscirà la richiesta per le proposte per il 1992. Tutti possono partecipare, l'importante è avere idee intelligenti.

In ogni caso, che cosa avrà l'astronomia da GRO? Certamente una visione molto più nitida dell'emissione di alta energia dalla nostra Galassia, con particolare attenzione al centro, dove il telescopio Sigma ha recentemente scoperto una sorgente inusuale, il "Grande Annichilatore". Poi, naturalmente, avrà osservazioni di numerose pulsar, da tempo sospette sorgenti gamma, di una selezione di binarie X e di altri oggetti in qualche modo connessi con astri collassati; e, naturalmente, una o più osservazioni di Geminga, senz'altro la sorgente più importante tra quelle scoperte dall'astronomia gamma alle alte energie.

Infine, c'è grande attesa per l'apertura della finestra gamma sul cielo extragalattico, di cui finora si conosce solo una manciata di sorgenti: i dati sono così scarsi che non consentono una caratterizzazione sistematica della popolazione di galassie dal nucleo attivo. Di particolare interesse è anche il problema della misura di un fondo extragalattico diffuso: ma prima di discuterne dottamente l'origine, sarà opportuno appurarne la natura veramente extragalattica.

GIOVANNI F. BIGNAMI, si è occupato per molti anni, tra l'altro, di astronomia gamma. Ha partecipato alle missioni SAS-2 e COS-B ed è osservatore invitato su Sigma. Attualmente è consulente scientifico per lo strumento EGRET e membro del NASA GRO Users Committee. È professore straordinario di Fisica Generale all'Università di Cassino e collabora con l'Istituto di Fisica Cosmica del CNR di Milano.

