

Patrizia
Caraveo

I cataloghi delle sorgenti gamma di Agile e Fermi

*FINTO SOMMARIO I cataloghi delle sorgenti gamma di Agile e Fermi
Od eugue dipit velestrud tatem eu feup ea core feugiam iure dunt alissi.
Agnit luptat ad delit adit ullum dolestin hent amet augait nis nim dolor-
per iustrud ming elent nullandreet adipsumsan vulla feugue consequisit*

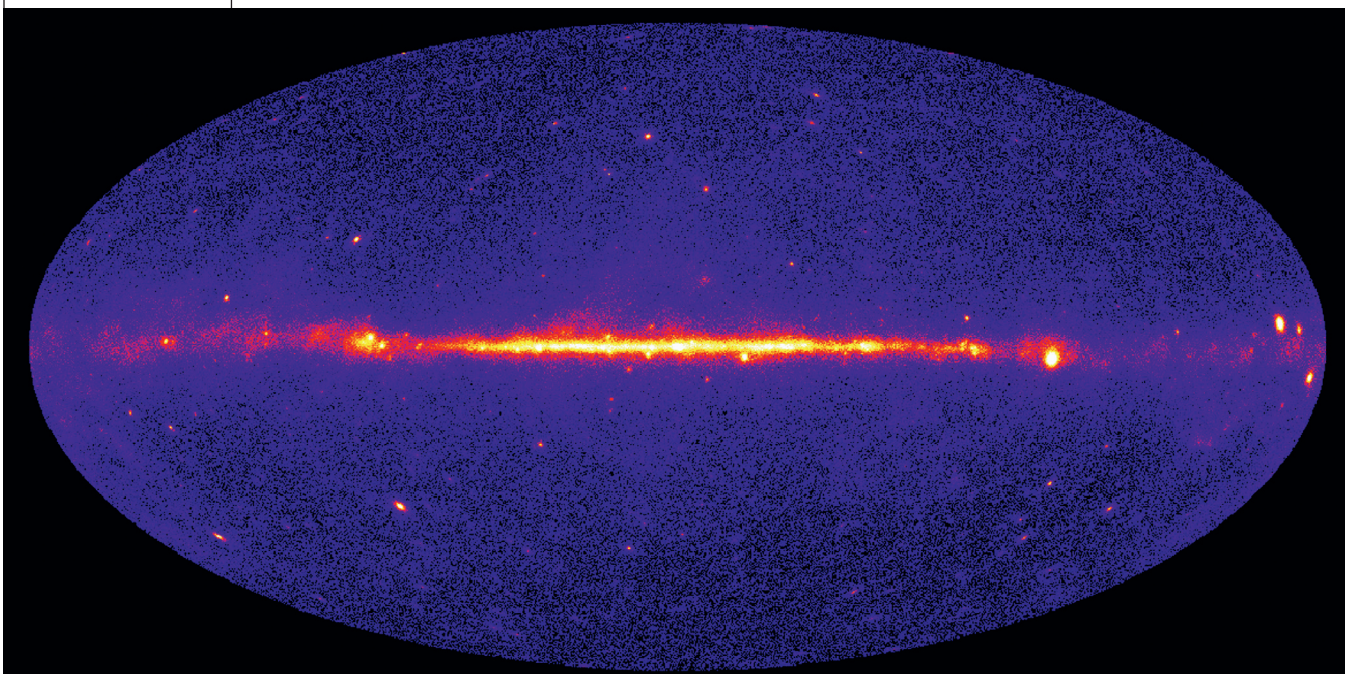
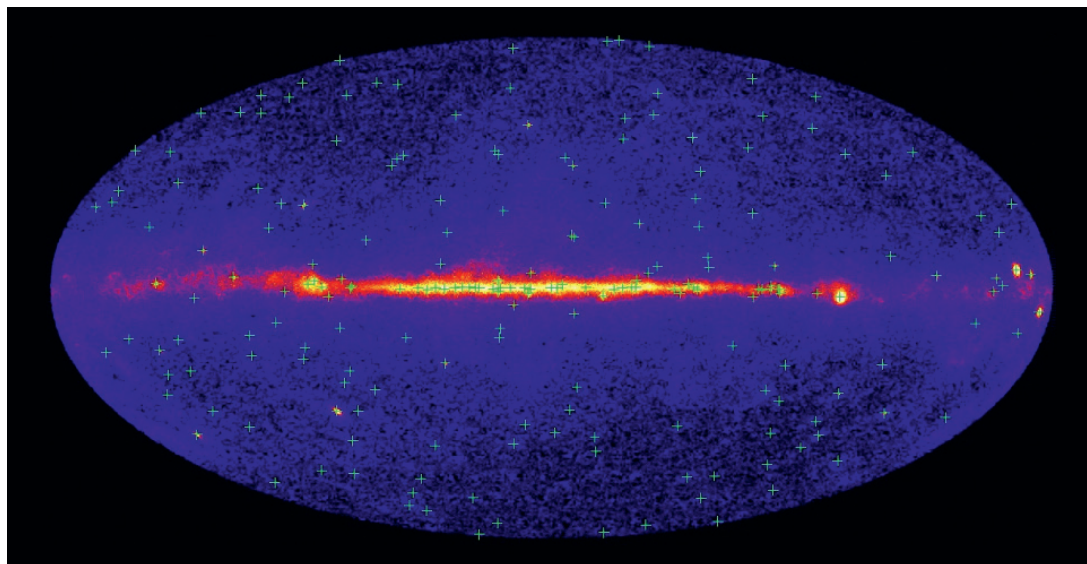


Immagine del cielo gamma ottenuta integrando 3 mesi di osservazione dello strumento LAT (Large Area Telescope) a bordo del satellite Fermi, inizialmente denominato GLAST

L'ultimo catalogo delle sorgenti gamma di alta energia era stato pubblicato nel 1999 a coronamento della missione della NASA EGRET a bordo del Compton Gamma Ray Observatory. Nel febbraio 2009, a pochi giorni di distanza l'una dall'altra, le due missioni di astronomia gamma attualmente operative hanno presentato il loro primo catalogo di sorgenti: 40 per Agile, una piccola missione in orbita dall'aprile 2007, e 205 per Fermi, uno strumento di maggiori dimensioni lanciato nel

giugno 2008 (v. *Le Stelle* n. 67, pp. 46-47).

La capacità di rivelare le sorgenti celesti dipende dalle dimensioni dello strumento che utilizziamo e dal tempo che dedichiamo all'osservazione. Quanto maggiori sono le dimensioni dello strumento e il tempo dedicato, tanto maggiore sarà la capacità di studiare il cielo alla ricerca di sorgenti sempre più deboli. Il miglioramento però cresce non linearmente in funzione del tempo impiegato e delle dimensioni strumentali, ma piuttosto come la loro radice quadrata. Utilizzando lo stesso



Alla mappa del cielo gamma sono qui sovrapposte le posizioni delle 205 sorgenti, indicate da crocette verdi.

strumento, per esempio, per migliorare di un fattore due il flusso limite rivelabile bisogna quadruplicare il tempo di osservazione. Se invece si vuole ottenere lo stesso risultato tenendo costante il tempo di osservazione, occorre quadruplicare la superficie di raccolta dell'informazione, cioè usare uno strumento 4 volte più grande. In prima approssimazione, quello che conta è la radice quadrata del prodotto tra l'area sensibile e il tempo dedicato alle osservazioni. In questo modo è possibile fare confronti tra strumenti diversi e capire come risultati all'apparenza dissimili siano, in effetti, perfettamente compatibili. Agile ha una superficie di raccolta circa 20 volte più piccola di quella di Fermi e, nonostante sia in orbita da più tempo, opera in modo puntato, una scelta che semplifica la gestione della missione, ma permette di osservare il cielo solo per metà del tempo. Fermi, oltre a essere più grande, punta sempre verso lo zenit, quindi non ha mai il suo campo d'azione disturbato dalla Terra. Grazie a ciò, sfrutta meglio il tempo, anche se ciò comporta una maggiore complessità del sistema di analisi dei dati. Tutto considerato, è giusto aspettarsi che Fermi veda un numero di sorgenti 4 o 5 volte superiore a quello di Agile. Ovviamente, anche se con modalità diverse, i due strumenti guardano lo stesso cielo. Quindi non c'è da stupirsi che nel catalogo Fermi si trovino tutte le sorgenti Agile. A essere precisi, in realtà ne manca una, ma è probabile che si tratti di una sorgente variabile, che si è fatta vedere da Agile nel momento dell'osservazione ma che poi è rimasta tranquilla durante i mesi di attività di Fermi.

La **figura 1** mostra l'immagine del cielo gamma prodotta da Fermi utilizzando 3 mesi di dati. Ovviamente, è simile a quella prodotta da Agile e già pubblicata dalla rivista (v. *Le Stelle* n. 64, pp. 40-42), ma la capacità di Fermi di rivelare fotoni di energia superiore al GeV, dove la risoluzione dello strumento è migliore, la rende più definita. Molte sono le sorgenti facilmente riconoscibili a occhio nudo, tuttavia l'occhio non basta; i parametri delle sorgenti devono essere ottimizzati utilizzando metodi statistici per arrivare ad avere la migliore posizione possibile, insieme ad informazioni sul flusso e sulla forma spettrale di ogni sorgente. Sono questi metodi che permettono di stabilire il livello di accuratezza delle posizioni e quindi la regione di errore da associare a ogni sorgente. L'ottimizzazione deve anche tenere conto che le sorgenti vengono viste contro la brillante radiazione gamma prodotta dal gas della galassia colpito dai raggi cosmici. Poiché circa il 90% dei fotoni gamma rivelati è dovuto alla galassia, è essenziale riuscire a descrivere questa componente maggioritaria, che ha una sua struttura molto ben definita, fatta di picchi e valli. Capire se un picco è dovuto alla radiazione della galassia o a una sorgente non è sempre facile e si procede per tentativi. Quello che descriviamo oggi è il primo risultato di questi sforzi. A riprova del fatto che si tratta di un prodotto ancora non definitivo è stato deciso di chiamarlo Catalogo 0 e le sorgenti vengono identificate dalla sigla 0FGL (per Fermi Gamma Lat) seguita dal valore dell'ascensione retta e della declinazione.

La posizione delle 205 sorgenti è data in **figu-**

ra 2, nella quale appare chiaro che esse sono equamente divise tra sorgenti sul piano della galassia e sorgenti lontano dallo stesso; in prima approssimazione questo si traduce nella divisione tra sorgenti galattiche e sorgenti extragalattiche. Questa facile regoletta ha però molte eccezioni, con sorgenti nel piano della galassia che risultano essere galassie attive e sorgenti ad alta latitudine galattica che sono invece oggetti della nostra galassia, così vicini a noi che appaiono alti sul piano (non dimentichiamo che il sistema di coordinate galatti-

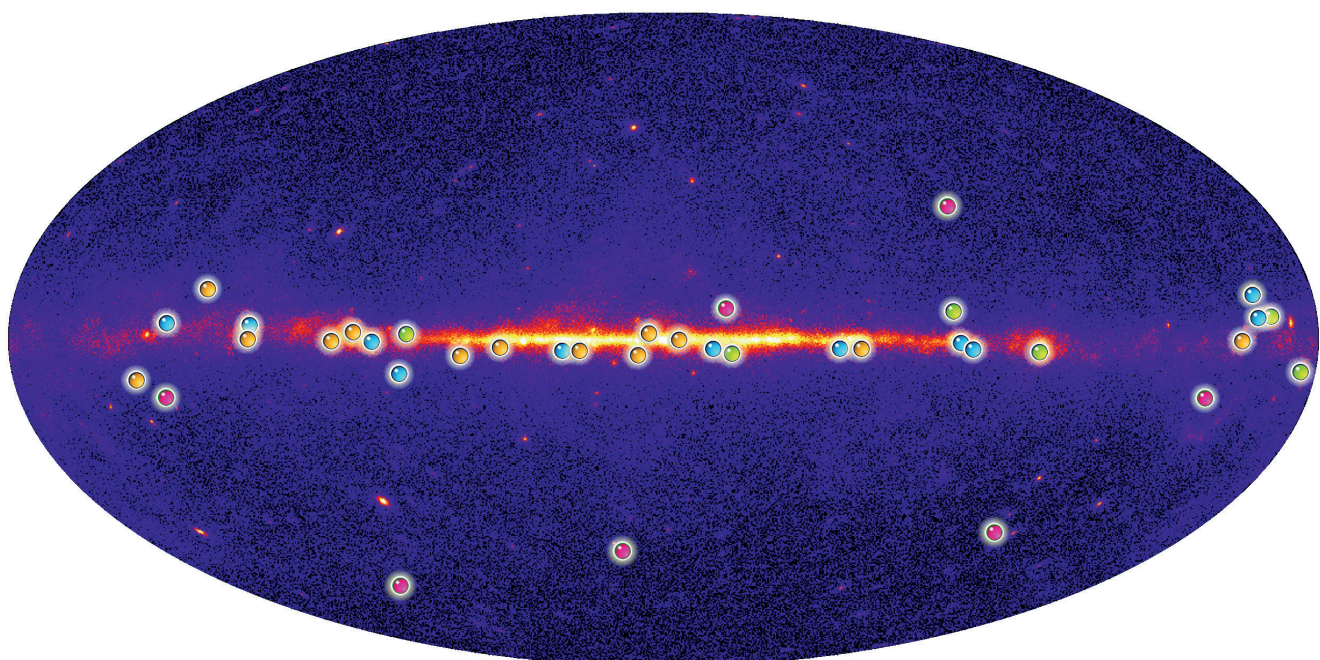
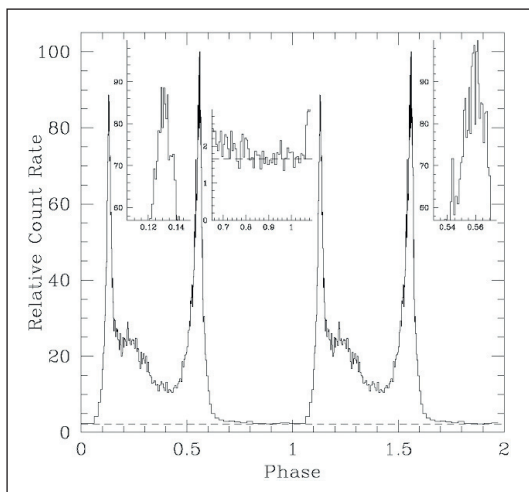
che che stiamo usando per rappresentare il cielo è centrato su di noi, che siamo a nostra volta immersi nel piano della Via Lattea).

Prima di soffermarci sulla natura delle 205 sorgenti, vediamo di ricordare quale fosse la situazione delle sorgenti gamma prima delle missioni Agile e Fermi.

La missione EGRET (che è stata attiva dal 1990 al 1999) aveva prodotto un catalogo di 271 sorgenti. Decidendo a priori che le sorgenti vicine al piano della galassia sono galattiche e quelle lontano sono extragalattiche, si arrivava a un censimento di 80 sorgenti galattiche e 191 extragalattiche. Mentre metà delle sorgenti lontane dal piano della galassia potevano essere associate con maggiore o minore certezza a galassie attive, caratterizzate da emissione radio variabile, solo 6 sorgenti galattiche potevano essere identificate con sicurezza come pulsar. Tutte le altre restavano un mistero, reso impenetrabile dall'incertezza delle posizioni fornite dal telescopio gamma. EGRET aveva reso ancora più acuto il problema già sollevato da COS-B, una missione precedente di astronomia gamma. Nel cielo gamma si vedono dei picchi di radiazione, ma le posizioni che si ricavano sono talmente incerte che è difficilissimo capire che tipo di oggetto astronomico produca la

(Sotto) Mappa delle stelle di neutroni pulsanti viste con l'osservatorio Fermi. I pallini verdi rappresentano le stelle di neutroni già note, tutti gli altri indicano le stelle di neutroni scoperte da Fermi. I pallini blu corrispondono a pulsar radio normali, quelli rosa a pulsar radio super-veloci, mentre i pallini gialli indicano le posizioni di rivelazioni di sorgenti gamma pulsanti senza una controparte radio.

(A destra) Curva di luce della pulsar delle Vele.



Fermi Pulsar Detections

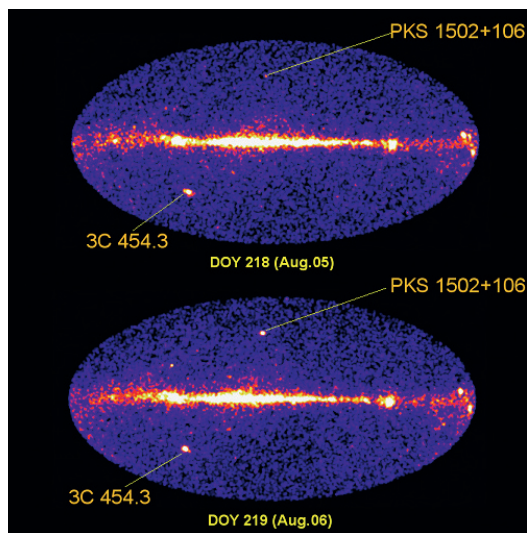
- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

radiazione gamma. Pulsar e galassie attive possono essere riconosciute grazie alla loro variabilità: rapidissima per le stelle di neutroni, e su tempi scala di giorni, settimane o mesi per le galassie attive. Se nella regione di incertezza di una sorgente gamma c'è una galassia attiva che mostra una qualche variabilità riconoscibile anche nei dati gamma, il gioco è fatto. Si può anche fare un passo un pochino più lungo e dire che se si trovano galassie di tipo simile a quelle che già si sono identificate grazie alla variabilità, si può tentare di suggerire un'identificazione anche in assenza di variabilità. Per le pulsar, invece, le identificazioni ottenute procedendo per tentativi sono molto rischiose. Il piano della galassia contiene poco meno di 2000 pulsar radio e un *error box* gamma di una sorgente EGRET generalmente ne contiene più di uno, producendo confusione. Inoltre, i dati gamma avevano rivelato l'esistenza di una stella di neutroni senza emissione radio, la famosa Geminga. Questa scoperta aveva fatto aggiungere alla lista delle potenziali sorgenti gamma, oltre alle galassie attive e alle pulsar radio, una nuova classe di stelle di neutroni radio quiete.

Sapendo di avere a che fare con pulsar e galassie attive, gli astronomi gamma si sono organizzati per avere le migliori informazioni possibili per queste classi di oggetti. Da un lato hanno siglato accordi con i radioastronomi per lo studio contemporaneo di alcune centinaia di pulsar potenzialmente interessanti, dall'altro hanno organizzato una rete di telescopi ottici piccoli e grandi per seguire il comportamento delle galassie più promettenti allo scopo di poter sempre paragonare i dati gamma con dati ottici. In più, hanno organizzato campagne di osservazione nella banda radio e nei raggi X da attivare in caso di attività gamma di una qualsiasi sorgente. Questo è il punto di partenza per la comprensione delle sorgenti viste da Agile e da Fermi.

Prima di tutto, appena dopo il lancio, l'attenzione è stata concentrata sulla pulsar della costellazione delle Vele, la sorgente più brillante del cielo che è stata usata per calibrare la missione, cioè per verificare che lo strumento si comportasse come ci si aspettava sulla base del lavoro fatto a terra.

I dati di questa pulsar sono stati usati per verificare la catena temporale di bordo, attraverso la pulsazione a 89 millisecondi della sorgente, e la bontà della ricostruzione degli eventi. Tutte le verifiche hanno dato esito



positivo producendo una splendida curva di luce della sorgente (*v. Figura 3*) e una posizione molto accurata grazie all'utilizzo dei fotoni di alta energia. Poi sono iniziate le osservazioni di routine del cielo gamma con un programma di osservazione in modo scanning, studiato in modo da produrre un'immagine dell'intero cielo ogni 3h, corrispondenti a due orbite del satellite.

Nessuno è rimasto sorpreso nel vedere molte più pulsar radio; ricerche *ad hoc* avevano rivelato una serie di nuovi candidati e la disponibilità di dati radio e gamma contemporanei ha permesso di triplicare il bottino di EGRET arrivando rapidamente a 15 pulsar. La vera novità è stata la rivelazione di altrettante pulsar radio quiete, un risultato che è stato possibile ottenere grazie alla quantità di fotoni disponibili e ad algoritmi di ricerca particolarmente efficaci. Geminga non è così più sola ma ha ben 14 sorelle, trovate nei primi 3 mesi di attività di LAT. Sono tutte sorgenti già rivelate da EGRET, e in molti casi anche da COS-B, ma solo ora si riesce a vederne la pulsazione e a capire che si tratta di stelle di neutroni. Dai dati gamma è stato possibile misurare il periodo di rotazione e il tasso di rallentamento di queste stelle di neutroni, che si rivelano sorprendentemente simili a quelli delle loro cugine con emissione radio. Si tratta di stelle di neutroni abbastanza giovani (diciamo meno di 10.000 anni) con una riserva di energia medio-alta. Tuttavia non mancano quelle più vecchiotte, quindi con meno energia da irradiare, che vengono viste solo perché sono molto vicine, esattamente come è successo per Geminga, che è una stella di neutroni di mezza età non par-

Esempio di variabilità su tempo scala di 1 giorno. PKS 1502+106, una galassia attiva, è appena visibile sulla mappa gamma relativa al 5 agosto 2008, ma il giorno dopo è diventata una sorgente molto brillante. Nella stessa immagine è anche indicata la sorgente 3C454.3, un'altra sorgente violentemente variabile.

L'AUTORE

Patrizia Caraveo

si è laureata in Fisica all'Università di Milano nel 1977. Ha lavorato all'estero, prima al Goddard Space Flight Center della NASA, poi al Centre d'Etudes Atomiques de Saclay, e poi in Italia all'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica. Ha collaborato a diverse missioni spaziali internazionali dedicate all'astrofisica delle alte energie e attualmente è coinvolta nella missione europea Integral, nella missione della NASA Swift, nella missione italiana Agile e nella nuova missione NASA GLAST. Il suo campo d'interesse principale è il comportamento delle stelle di neutroni alle diverse lunghezze d'onda.

ticolarmente potente ma che, trovandosi ad “appena” 500 anni luce da noi, è la seconda sorgente del cielo gamma.

Le ricerche di pulsazioni hanno anche dato un altro risultato, tanto più interessante in quanto del tutto inaspettato: la scoperta di emissione gamma da pulsar velocissime, quelle che ruotano con periodi di pochi millisecondi. Non compaiono nel catalogo perché si tratta di sorgenti abbastanza deboli, ma la loro rivelazione è assolutamente sicura. Nel catalogo compare invece una sorgente coincidente con l’ammasso globulare 47 Tucanae, una palla di stelle nel cielo sud, non lontano dalla piccola nube di Magellano. Poiché gli ammassi globulari contengono moltissime pulsar superveloci, è ragionevole pensare che le 23 pulsar già note all’interno di 47 Tucanae

siano responsabili di questa emissione, assolutamente non prevista.

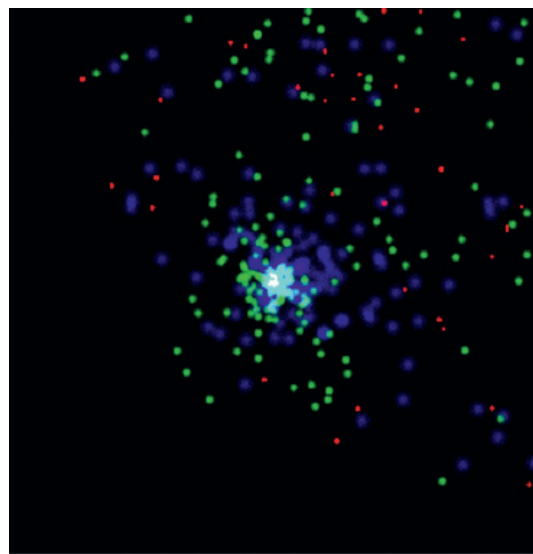
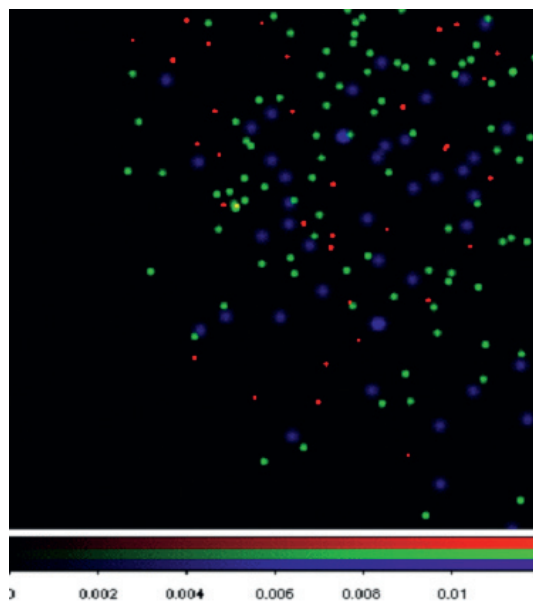
La **figura 4** offre una visione di tutte le stelle di neutroni che sono state viste fino ad ora. Da notare la posizione lontanissima dal piano delle pulsar superveloci. È un effetto di prospettiva: le pulsar sono in effetti molto vicine a noi, immerse nel disco della Via Lattea, nel nostro immediato vicinato. Sono così vicine che sono letteralmente sopra o sotto il Sole nel disco e questo si riflette in posizioni apparentemente fuori dal piano della galassia. La figura “invecchierà” presto perché senza dubbio molte altre stelle di neutroni saranno trovate nei prossimi mesi.

Per il momento, circa metà delle 70 sorgenti galattiche viste da Fermi sono identificate con stelle di neutroni.

Restando sul piano della galassia, troviamo un’altra vecchia conoscenza che aspettava di essere identificata dai tempi di COS-B. La sorgente gamma contiene LSI 61° 303, un sistema binario molto strano che ha un periodo di circa 26 giorni. I dati di Fermi mostrano finalmente la variazione ritmica del flusso della sorgente con il periodo orbitale e permettono di identificare la sorgente con certezza dopo un’attesa di 30 anni. Non posso fare a meno di pensare che ho iniziato a lottare con questa sorgente nel 1977, quando si chiamava CG 135+01 (sigla che stava per Cos-B Gamma seguito delle coordinate galattiche della sorgente). L’idea di associare la sorgente gamma con LSI è del 1981 ed è stata proposta sulla base dell’osservazione di emissione X da questo sistema binario. Adesso, a distanza di 28 anni, Fermi ci ha dato ragione. In astronomia bisogna indubbiamente sapere aspettare.

Passiamo ora alle sorgenti lontane dal piano della galassia. Una volta cancellate le pulsar vicine e 47 Tucanae, rimangono 125 sorgenti, 106 delle quali sono quasi sicuramente associate a galassie attive. Per un’altra decina l’associazione è probabile ma non sicura e solo 9 sorgenti sono ancora non identificate.

A differenza del caso delle sorgenti galattiche, la lista delle sorgenti extragalattiche viste da Fermi non è sovrapponibile a quella di EGRET. Da un lato sono diversi i contributi delle diverse famiglie di galassie attive. Grazie alla sua sensibilità alle alte energie, Fermi vede un numero molto più alto di oggetti BL Lac (blazar). Inoltre, per un buon 70 per cento si tratta di sorgenti diverse. Come mai? Semplice: molte sono sorgenti variabili, a volte in modo spettacolare, che si accendono per poi



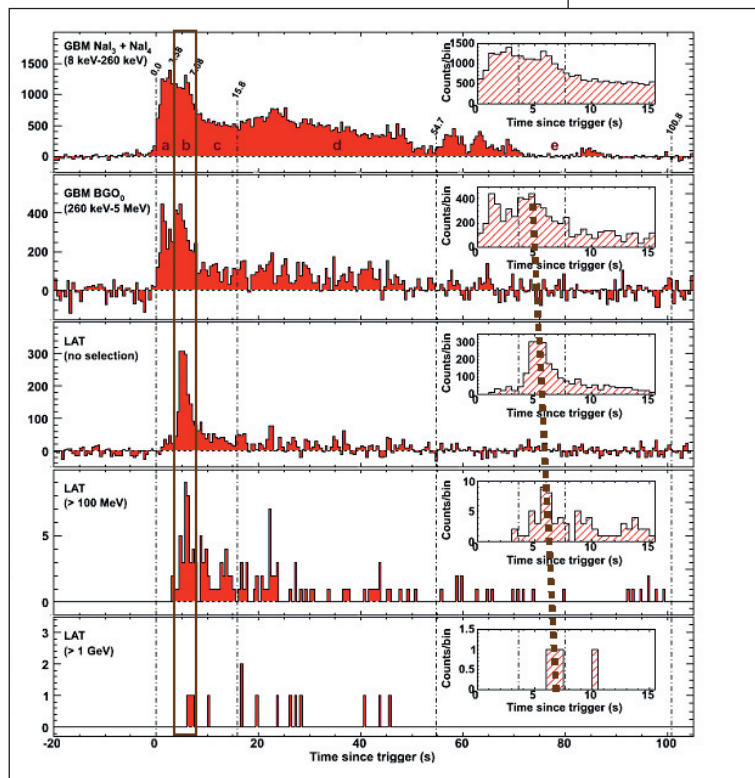
Rivelazione di un lampo gamma con lo strumento LAT. Sopra l’immagine del cielo gamma ottenuta selezionando i fotoni gamma rivelati in un intervallo di 100s, esattamente prima del lampo. A destra, sempre un’immagine da 100s a coprire il lampo gamma GRB080916C. I punti rossi corrispondono a fotoni con energia minore di 100 MeV, quelli verdi a fotoni con energia tra 100 MeV e 1 GeV, quelli blu a fotoni con energia superiore a 1 GeV.

spegnersi rapidamente come PKS 1502+106 (v. *Figura 5*), o che restano attive per mesi, come 3C454, che fa registrare un record dopo l'altro. Sorgenti che erano accese negli anni '90 adesso sono calme, mentre altre sono diventate attive. Per cogliere al volo queste variabilità repentine le missioni gamma organizzano dei turni di guardia per seguire in diretta il comportamento delle sorgenti celesti man mano che i dati vengono trasmessi a terra. Se si vede qualcosa di interessante (come nel caso mostrato in *figura 5*), vengono inviati dei telegrammi astronomici (ATEL, per gli addetti ai lavori) per informare il resto della comunità dello strano comportamento di questa o quella sorgente.

La vita è ancora più dura per i cacciatori di lampi gamma, che devono essere pronti a cogliere l'attimo 24 ore al giorno 7 giorni alla settimana. Nel caso che si verifichi un lampo gamma, una parte dei dati viene scaricata in tempo reale per permettere di fare subito delle analisi e vedere se lo strumento gamma ha visto qualcosa. Sia Agile sia Fermi hanno a bordo uno strumento indipendente per la rivelazione dei lampi gamma, tuttavia quello che conta è capire fino a che energia può arrivare la produzione dei fotoni nell'esplosione che genera il lampo gamma, e il contributo di un telescopio gamma è fondamentale. In questo campo le sorprese non sono state molto positive, perché i telescopi gamma di Agile e Fermi vedono meno lampi gamma di quanto ci si aspettasse. Tuttavia dai pochi eventi che si sono visti fino ad ora si è già imparato qualcosa di molto interessante.

I raggi gamma di alta energia arrivano qualche secondo dopo i fotoni di energia più bassa, quelli che servono per rivelare l'evento e dare l'allerta.

Questo fatto è particolarmente evidente nel comportamento di GRB080916C, il terzo lampo gamma rivelato il 16 settembre 2008, che ha fatto registrare centinaia di fotoni gamma dal telescopio gamma di Fermi (v. *Figura 6*). GRB080916C non è un lampo come tutti gli altri (v. *Le Stelle n. 67, p. 47*). Lo studio della controparte ottica ha permesso di calcolare un rispettabile *redshift* di 4,2, corrispondente a una distanza di circa 12 miliardi di anni luce. Benché si conoscano lampi gamma ancora più lontani, l'emissione di un così grande flusso di fotoni gamma di alta energia ha reso GRB080916C il lampo gamma più luminoso mai rivelato. Se l'esplosione fosse stata isotropica (cosa sicuramente non vera), sarebbe stata rilasciata energia pari a quella di un



migliaio di normali supernovae. Anche se si tratta di una stima un po' esagerata, visto che in questi casi l'emissione viene focalizzata in getti piuttosto stretti, stiamo parlando di un evento straordinariamente energetico.

Il grafico dei tempi di arrivo dei segnali alle diverse energie è chiarissimo e dimostra che quanto più si sale in energia tanto più aumenta il ritardo (v. *Figura 7*). Pochi secondi su 12 miliardi di anni possono sembrare insignificanti, invece contengono informazioni molto importanti sul meccanismo che emette (e assorbe) i fotoni prodotti dalle catastrofiche esplosioni che danno origine ai lampi gamma.

E il problema delle sorgenti non identificate?

Su 205 sorgenti del catalogo Fermi, una quarantina rimangono ancora misteriose, e non sembrano avere nessuna ovvia controparte. Tolle le 9 sorgenti lontano dal piano, le rimanenti sono perlopiù allineate quasi perfettamente con il piano della nostra galassia. Potrebbero dunque essere altre stelle di neutroni, questa volta molto lontane per essere allineate in modo così preciso, oppure potrebbero essere qualcosa d'altro. Ribadendo che in astronomia il fattore tempo è spesso decisivo, non rimane che attendere nuovi sviluppi. ■

Profilo temporale dell'emissione del lampo gamma GRB080916C come è stata rivelata dai due strumenti (GBM e LAT) a bordo della missione Fermi. Tutti i grafici riportano i conteggi rivelati in funzione del tempo.

Partendo dall'alto, i primi due grafici sono relativi ai conteggi dei due rivelatori del GBM (Gamma Burst Monitor, il secondo strumento a bordo di Fermi), mentre i successivi si riferiscono al LAT e indicano tutti gli eventi rivelati, poi solo gli eventi con energia >100 MeV e, a seguire, solo eventi con energia >1 GeV. Dall'alto in basso, i grafici si riferiscono a fotoni di sempre maggiore energia. È interessante notare che il picco dei fotoni di energia più alta è stato registrato dopo il picco dei fotoni di bassa energia.