

È TEMPO DI CATALOGHI PER LA MISSIONE FERMI

Superato brillantemente il decimo compleanno della missione, è stato presentato recentemente il quarto catalogo basato su 8 anni di dati

Patrizia Caraveo



È dirigente di ricerca all'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) e lavora all'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica di Milano.

A 11 anni dal lancio, avvenuto l'11 giugno 2008, ed alla successiva entrata in attività, il 4 agosto 2008, il satellite Fermi continua a produrre dati importanti che influenzano tutti i campi dell'astrofisica. Il *Large Area Telescope* (LAT) ha registrato 640 miliardi di *trigger*, un quinto dei quali sono stati inviati a terra. 3,13 miliardi di eventi sono disponibili al *Fermi Science Support Center* e 1,19 miliardi di questi sono stati catalogati come fotoni "source", cioè di buona qualità utilizzabili per l'analisi scientifica. Dopo un 2018 dedicato ai festeggiamenti per i 10 anni di vita orbitale, con un grande simposio che si è svolto a Baltimore nell'ottobre del 2018, il 2019 è all'insegna dei nuovi cataloghi, uno dei prodotti più popolari e più utilizzati dalla comunità astrofisica mondiale.

È stato recentemente reso disponibile il quarto catalogo delle sorgenti Fermi (4FGL) basato su 8 anni di dati, un grande balzo, visto che il terzo catalogo, noto come 3FGL, copriva 4 anni.

Il paragone tra i quattro cataloghi pubblicati dalla collaborazione Fermi nel corso della vita della missione dimostra chiaramente quanto la mole sempre crescente dei dati, unita alle modifiche apportate al software di ricostruzione degli eventi ed alla più accu-



▲ La torta che era stata preparata per festeggiare i dieci anni della missione.

rata modellizzazione della radiazione diffusa, prodotta dalle nubi di gas della nostra Galassia quando vengono colpite dai raggi cosmici, abbia permesso di migliorare la nostra conoscenza del cielo gamma delle alte energie. Ecco in sintesi i "numeri" dei 4 cataloghi finora rilasciati:

Nome	Intervallo energia	tempo	risultato
1FGL	100 MeV-100 GeV	11 mesi	1451 sorgenti
2FGL	100 MeV-100 GeV	24 mesi	1873 sorgenti
3FGL	100 MeV-300 GeV	48 mesi	3033 sorgenti
4FGL	50 MeV- 1 TeV	96 mesi	5098 sorgenti

La realizzazione di un catalogo

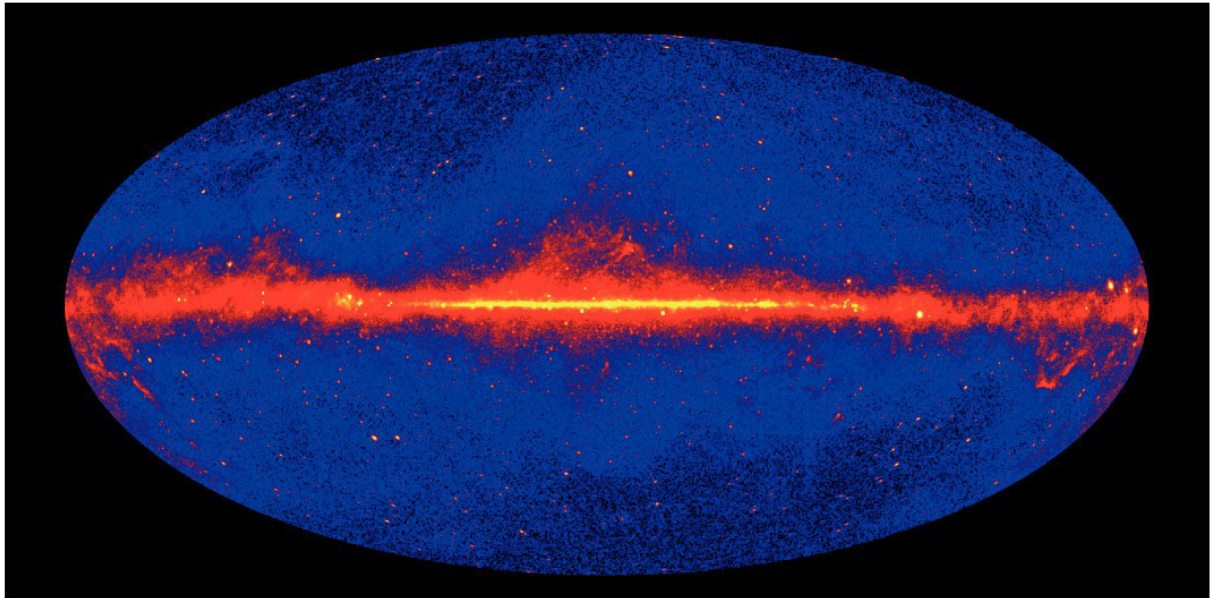
Costruire un nuovo catalogo richiede uno sforzo importante da parte di un nutrito gruppo di esperti in diverse tematiche dell'analisi dei dati gamma e non solo.

Si inizia dalla mappa del cielo gamma, qui rappresentata in coordinate galattiche utilizzando i dati raccolti da Fermi nel corso di 9 anni, e si passano al setaccio i fotoni per riconoscere le concentrazioni che puntano ad una sorgente

gamma. È un lavoro iterativo. Si inizia dalle sorgenti più brillanti e poi si esplorano quelle sempre meno brillanti.

Il catalogo 4FGL contiene 5098 sorgenti rivelate sopra la soglia di significatività di 4 sigma nell'intervallo di energia compresa tra 50 MeV e 1 TeV, una scelta che estende il contributo di Fermi sia verso le energie più basse, sia verso quelle più alte. Ogni sorgente deve, prima di tutto, essere localizzata con la maggior accuratezza possibile perché è dal posizionamento che si parte per cercare di individuare la controparte astrofisica dell'emissione gamma. In effetti, alla posizione viene sempre associato un errore ed è cercando di ridurre al minimo questo errore che si massimizza la possibilità di associare l'emissione gamma con un oggetto celeste.

Gli sforzi dedicati alla riduzione dell'errore di posizionamento sono evidenti nell'istogramma che mostra il numero di sorgenti (scelte tra quelle con flusso medio basso, che sono quelle più difficili da posizionare) in funzione del



▲ La mappa del cielo gamma realizzata con i dati raccolti da Fermi in 9 anni di attività.

raggio di errore per i 4 cataloghi Fermi. Mentre nel primo catalogo il picco della distribuzione degli errori era intorno a 10 minuti d'arco, nel quarto questo valore è sceso a 4, cosa che diminuisce di un fattore 6 l'area delle regioni di incertezza da esplorare alla ricerca di controparti.

Nonostante ciò, la superficie delle regioni di incertezza rimane troppo grande per permettere di andare a colpo sicuro ed identificare ogni sorgente gamma con un determinato oggetto celeste.

Per annunciare un'identificazione sicura occorre trovare altre prove che possono essere di natura spa-

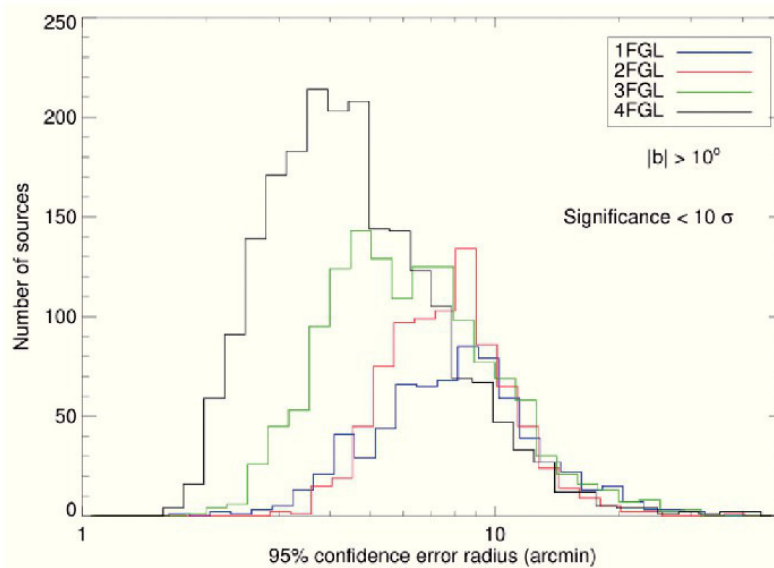
ziale oppure di natura temporale. Quando si cerca di posizionare al meglio le sorgenti ci si rende conto se la forma dell'emissione gamma è compatibile con quella di una sorgente puntiforme oppure si tratta di una sorgente estesa. In questo caso, è facile cercare un oggetto esteso all'interno della regione di incertezza. Quasi sempre si casca su un resto di supernova, i sospettati numero uno per l'accelerazione dei raggi cosmici che, interagendo con il gas circostante, producono raggi gamma. Se invece ci spostiamo nel dominio temporale, vedere variare in gamma una sorgente che si è accesa anche in ottico o in

radio è una vera *pistola fumante*.

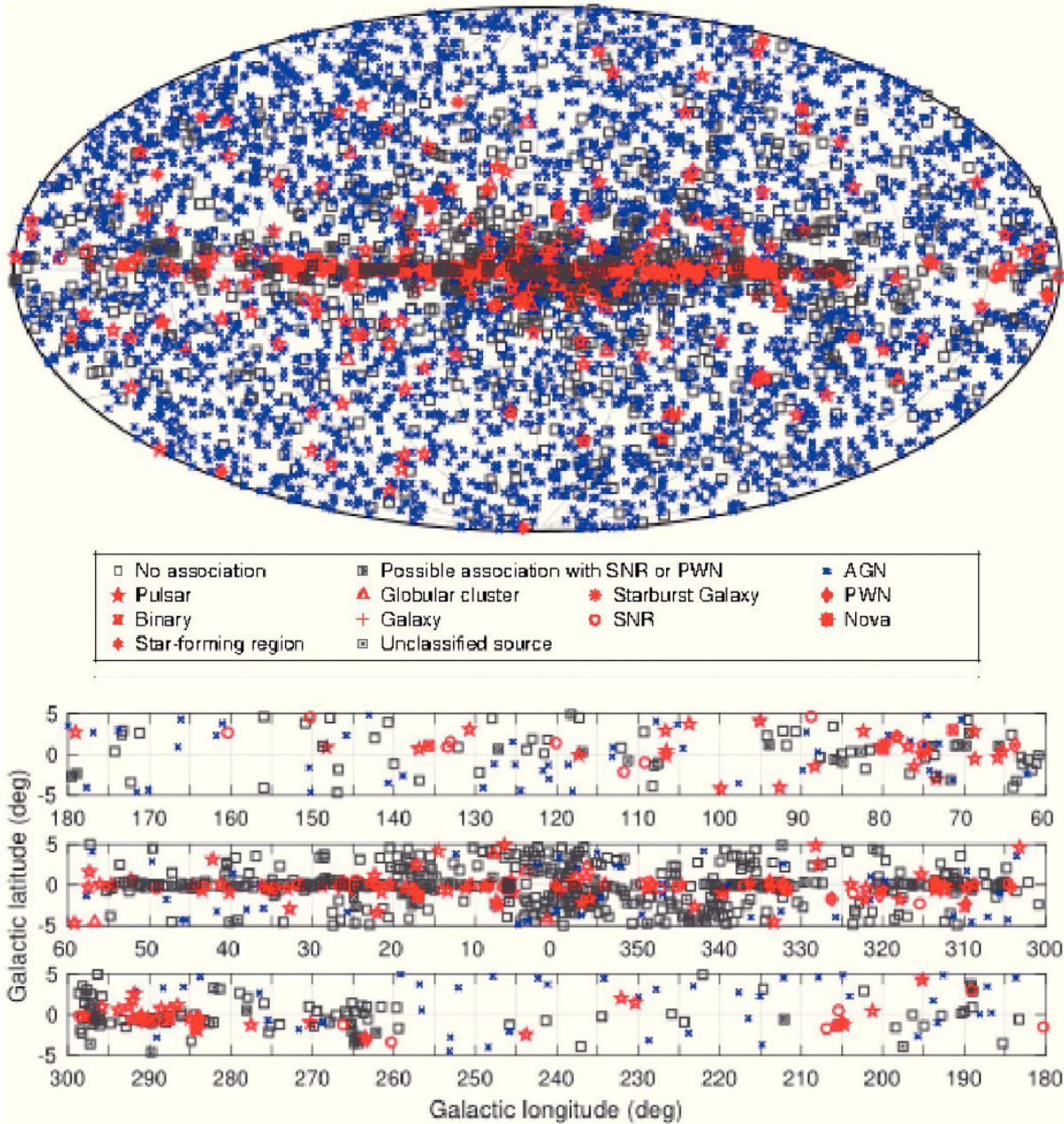
In questo modo è possibile identificare i nuclei galattici attivi, noti per la loro violenta variabilità, oppure le novae che si accendono in gamma poco dopo il massimo in ottico. Un'altra forma di variabilità su tempi scala molto più brevi è rappresentata dalle pulsazioni delle stelle di neutroni. In questo caso, il flusso gamma della sorgente è stabile ma è andando a fare un'analisi ad hoc, che si chiama *ripiegamento in fase*, che si vede se la sorgente pulsa. Fermi si è rivelato un vero campione nella caccia all'emissione gamma delle stelle di neutroni, il cui numero continua a salire e presto toccherà quota 250. Un risultato inaspettato che premia il grande lavoro fatto in collaborazione con i radioastronomi, ma anche gli sforzi nel calcolo creativo che sono stati sviluppati per aumentare la potenza di calcolo necessaria per scovare segnali sempre più deboli.

Quando non si trova nessuna pistola fumante, le sorgenti non possono essere identificate con certezza, ma vanno piuttosto associate con classi di oggetti celesti sulla base delle caratteristiche misurate in gamma, a iniziare dalla forma spettrale, cioè da come il flusso gamma si "spalma" in funzione dell'energia.

Oltre alla posizione, ad ogni sorgente è associato il valore del flusso



◀ La riduzione dell'errore di posizionamento nei quattro cataloghi di Fermi.



▲ Le sorgenti del quarto catalogo rilasciato da Fermi. In basso uno zoom del piano galattico.

calcolato in 7 intervalli di energia in modo da permettere di avere subito un'idea della forma spettrale, uno degli indizi che viene utilizzato per capire la natura delle sorgenti dal momento che ogni classe di sorgenti ha una sua forma spettrale. Un altro parametro che viene valutato è la variabilità temporale del flusso gamma delle sorgenti. Si costruiscono curve di luce su base annuale o mensile e si calcola la probabilità che si tratti di una sorgente costante oppure variabile. Circa $\frac{1}{4}$ delle sorgenti del quar-

to catalogo sono etichettate come variabili. Come abbiamo detto, si tratta di un'informazione preziosa per l'identificazione, ma può rivelarsi utile anche nel caso di sorgenti che non abbiano controparti variabili. A differenza di Fermi, che opera in modo *scanning* e copre continuamente tutto il cielo, i telescopi ottici e quelli radio devono puntare una determinata sorgente e spesso capita che manchino i dati. Tuttavia, trovare una sorgente variabile ben al di fuori del piano della nostra Galassia è una

buona indicazione che si tratti di un nucleo galattico attivo e può essere corroborata dall'informazione sulla forma spettrale. A volte nella regione di incertezza di una sorgente gamma può capitare di trovare sia un pulsar sia un nucleo galattico attivo. Quale sarà la sorgente dell'emissione? È un problema che si cerca di risolvere con l'aiuto della statistica andando a calcolare la probabilità che sia un tipo di sorgente o un altro proprio sulla base dello spettro e della variabilità.

Dopo avere costruito la lista delle sorgenti associate, rimangono le sorgenti per le quali non è stata trovata nessuna associazione plausibile: sono le sorgenti non identificate che si attestano intorno al 30% del totale. Le sorgenti identificate con certezza sulla base della variabilità, della periodicità o dell'estensione angolare sono 355 (239 delle quali sono pulsar), oltre 3130 sorgenti sono associate con galassie attive di vario tipo mentre 1323 sorgenti non hanno controparti plausibili ad altre lunghezze d'onda.

Le sorgenti del quarto catalogo sono talmente tante che è difficile trovare un modo per evidenziare la loro posizione e la loro natura in una visione globale del cielo. Nella mappa celeste in coordinate galattiche delle sorgenti gamma si nota subito come i simboli rossi (che rappresentano le sorgenti galattiche, dove le stelle di neutroni – che sono la popolazione dominante – sono affiancate dai resti di supernova, dalle novae, dagli ammassi globulari) siano in parte molto raggruppati intorno al piano della Galassia, in parte sparsi un po' dovunque su tutto il cielo. Nel caso dei pulsar, si tratta di due diverse popolazioni: quelli concentrati lungo il piano della Galassia sono quelli più giovani e più energetici, quelli più sparsi sono quelli più vecchi che sono intrinsecamente meno energetici e quindi più vicini e ci sembrano distribuiti uni-

formemente per un effetto geometrico dal momento che si trovano in una sfera di dimensione abbastanza modeste.

I simboli blu sono le galassie attive di vario genere, uniformemente sparse nel cielo, mentre i quadratini neri si riferiscono alle sorgenti non identificate.

Guardando la parte sotto della figura (che rappresenta lo zoom del piano galattico) si nota chiaramente come i quadratini neri si addensino intorno al piano galattico dove la brillante radiazione diffusa della nostra Galassia rende più difficile posizionare con accuratezza le sorgenti. Non ci sorprende che la forma spettrale di queste sorgenti si avvicini a quella delle stelle di neutroni, che sono le dominatrici delle sorgenti galattiche viste da Fermi.

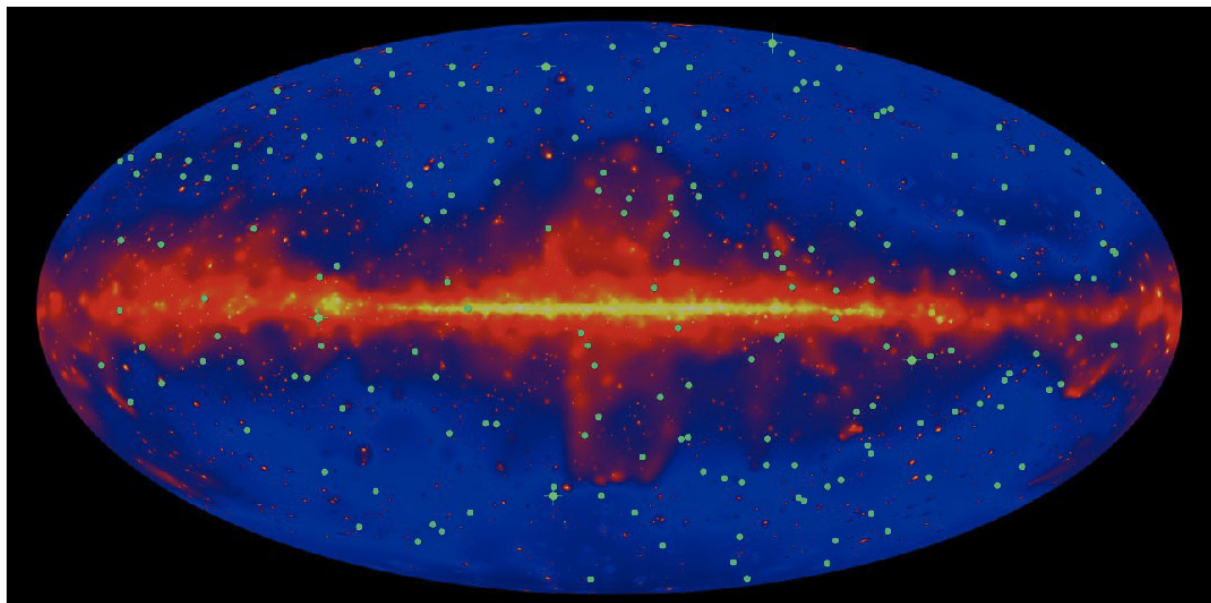
Quello che non troverete nel 4 FGL

Pur contenendo quasi ogni tipo di oggetto celeste, il 4FGL riporta solo le sorgenti che superano una certa soglia considerando l'intervallo temporale completo degli 8 anni. Sorgenti che sono state "accese" per periodi molto brevi non superano la soglia e non vengono considerate. Vanno a fare parte del catalogo delle sorgenti variabili o, nel caso dei brevissimi lampi di radiazione, del catalogo dei lampi gamma (GRB). Con il suo grande campo di vista, unito alla capa-

cià di localizzazione dei singoli fotoni gamma, il LAT è uno strumento ottimale per la rivelazione e lo studio dei lampi gamma. Tuttavia, nei primi anni della missione il numero dei GRB rivelati era inferiore alle aspettative perché i criteri stringenti utilizzati per la classificazione dei fotoni visti dal LAT penalizzavano la rivelazione di eventi brevi (a volte brevissimi) che producono solo una manciata di fotoni. È stato necessario sviluppare dei criteri ottimizzati per rivelare fotoni di bassa energia che vengono prodotti in gran numero nel corso dei lampi gamma. La nuova tecnica, che funziona benissimo anche per i *flares* solari, ha immediatamente fatto aumentare il numero dei lampi visti dal LAT.

Analizzando i dati dei primi 10 anni di attività della missione Fermi, sono stati rivelati 186 eventi che sono stati descritti nel secondo catalogo dei lampi gamma rivelati dallo strumento LAT.

186 lampi gamma sono una piccola frazione di quelli visti dal GBM ma sono lampi "pregiati" che, attraverso la produzione di fotoni gamma di alta energia, ci permettono di capire i meccanismi fisici alla base dell'emissione. Grazie ai lampi visti da LAT, si è aperto un nuovo spazio di scoperta per questi eventi estremi che adesso cominciano ad essere rivelati anche ad energia altissima dai telescopi a luce Čerenkov. ●



▲ Skymap dei lampi gamma rivelati da Fermi LAT (Media INAF).