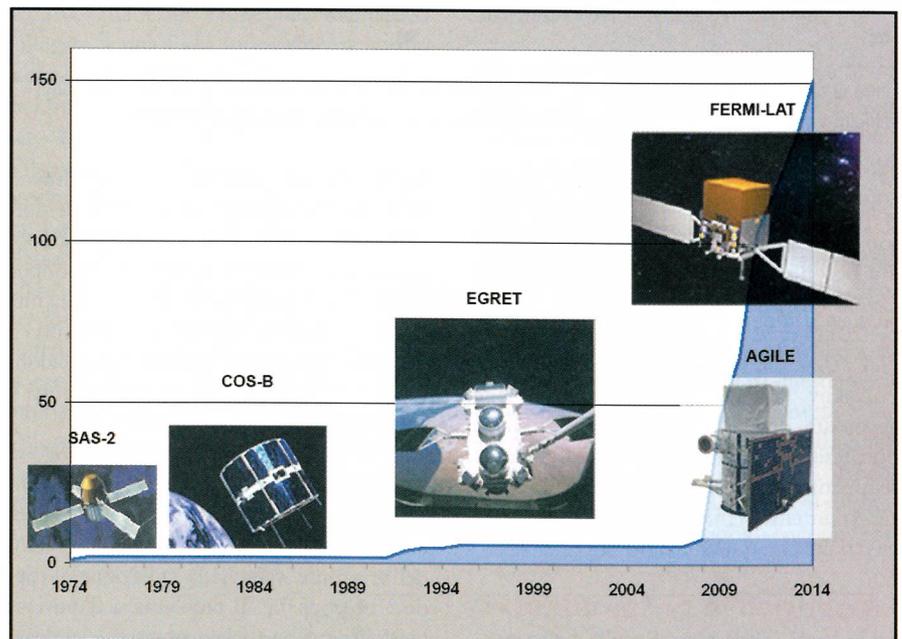


# I PULSAR DI FERMI

La missione Fermi  
si è rivelata una  
straordinaria macchina  
per studiare  
l'emissione gamma  
dalle stelle di neutroni



L'andamento (e per molti anni la costanza) del numero dei pulsar gamma in funzione del tempo dalla prima rivelazione nel 1974 ad oggi. L'impennata degli ultimi anni è andata ben al di là delle più rosee aspettative.



**Patrizia Caraveo**

È Direttore dell'Istituto di Astrofisica Spaziale dell'INAF a Milano. Si occupa da sempre di astrofisica X e gamma e per i contributi dati alla comprensione dell'emissione di alta energia delle stelle di neutroni, nel 2009 è stata insignita del Premio Nazionale Presidente della Repubblica.

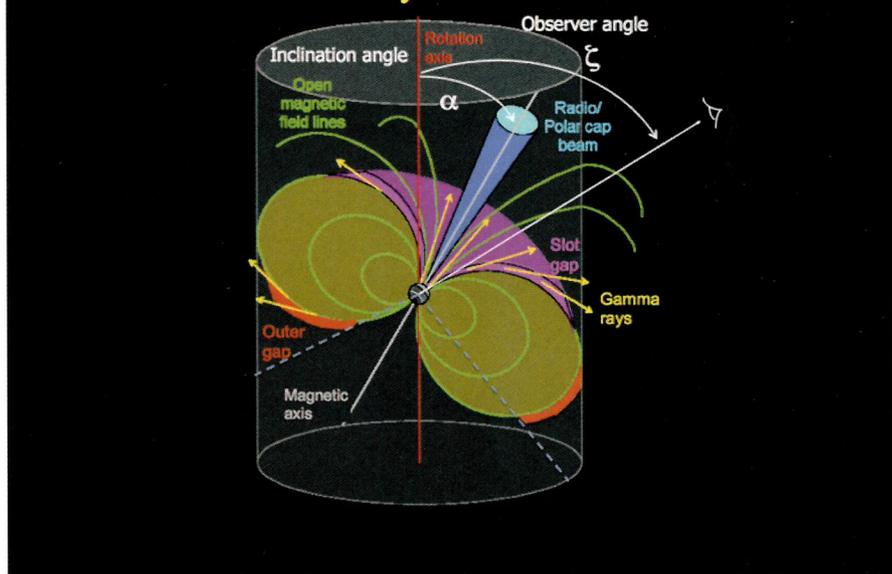
**S**e pensiamo che, prima del lancio del satellite Fermi, due mani bastavano per contare tutti i pulsar gamma noti, capiamo immediatamente che la crescita di questi ultimi cinque anni è stata sorprendente: l'ultimo censimento ne conta ben 151.

I 151 pulsar gamma di Fermi non sono tutti uguali: oltre a rivelare pulsar già noti attraverso la loro emissione radio (generalmente si tratta di quelli giovani ed energetici più vicini a noi), Fermi scopre nuovi pulsar. In effetti, più della metà dei pulsar Fermi non erano noti prima del lancio della missione. Una quarantina sono stelle di neutroni che hanno

un comportamento simile a Geminga e sono pulsar senza emissione radio, molto probabilmente perché la configurazione geometrica risultante dalla combinazione tra l'asse di rotazione e l'asse magnetico della stella di neutroni, visti sotto l'angolazione dovuta dalla nostra posizione rispetto alla stella, permette di intercettare il fascio di radiazione gamma ma non quello radio.

È chiaro ormai da qualche tempo che i due tipi di radiazione hanno origine in zone diverse della magnetosfera di una stella di neutroni. L'emissione radio è quasi certamente prodotta in uno stretto cono al di sopra dei poli magnetici della stella,

## Gamma-ray emission sites



La regione di origine dell'emissione radio (in blu) e quella, molto più estesa (che quindi copre una maggiore area di cielo) dell'emissione gamma (in viola e rosso, a seconda del modello che si utilizza).

mentre l'emissione gamma viene prodotta lontano dalla stella vicino al cilindro di luce, una superficie immaginaria che segna la fine della magnetosfera corotante di un pulsar perché alla distanza del cilindro di luce la velocità di rotazione è, appunto, la velocità della luce.

È immediatamente chiaro dalla figura qui sopra che la rivelazione di emissione sia radio sia gamma da un pulsar richiede combinazioni di angoli molto favorevoli. Molto più normale dovrebbe essere la rivelazione solo di emissione gamma; sarebbe quindi ragionevole aspettarsi molti più pulsar simili a Geminga rispetto a quelli che hanno anche emissione radio. Il fatto che Fermi riveli un numero pressoché identico di pulsar con e senza emissione radio è dovuto a difficoltà osservative che alterano la realtà astronomica. I pulsar radio quieti (o piuttosto quelli che rivolgono altrove il loro cono di emissione radio) devono essere visti pulsare direttamente nei dati Fermi. Per ottenere una rivelazione occorrono fotoni e potenza di calcolo. Rivelare la pulsazione di sorgenti deboli è difficile e questo limita la completezza della nostra ricerca di pulsar solo gamma.

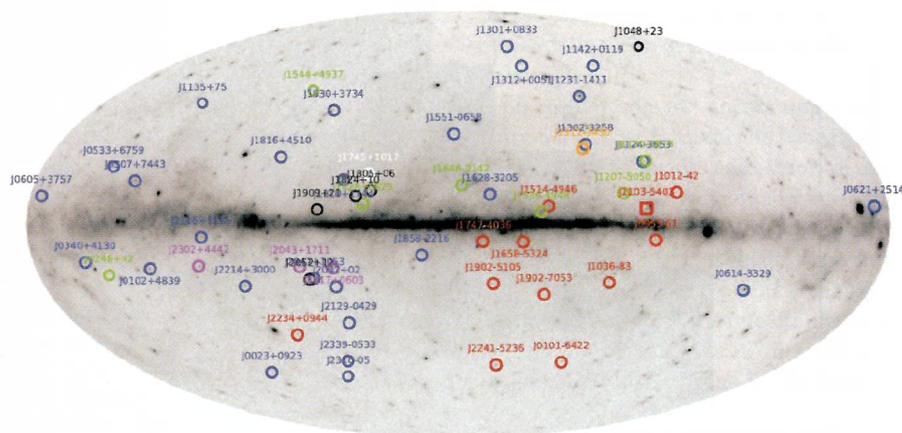
Ma poi ci sono oltre sessanta pulsar ve-

locissimi che rappresentano uno dei risultati più inaspettati della missione Fermi. Chi pensava che le stelle di neutroni capaci di produrre fotoni di alta energia fossero solo quelle relativamente giovani ed energetiche è stato prima sorpreso e, dopo, letteralmente travolto dal diluvio di pulsar velocissimi (*millisecond pulsar*, in breve MSP) che hanno richiesto anche un riaggiustamento della teoria alla base della spiegazione dell'emissione gamma

delle stelle di neutroni. Mentre prima si ipotizzava che la variabile fondamentale fosse il valore del campo magnetico alla superficie della stella di neutroni, adesso siamo convinti che il valore di riferimento debba invece essere il valore del campo magnetico al cilindro di luce. Mentre i pulsar giovani hanno un campo magnetico superficiale diecimila volte più intenso dei MSP, i valori diventano comparabili alla fine della magnetosfera, dove si pensa vengano prodotti i raggi gamma che osserviamo.

La crescita rapidissima del numero di MSP è stata notevolmente aiutata da un altro risultato assolutamente inatteso: la scoperta (in radio) di dozzine di nuovi pulsar velocissimi all'interno delle regioni di incertezza (gli *error box*) di altrettante sorgenti gamma non identificate.

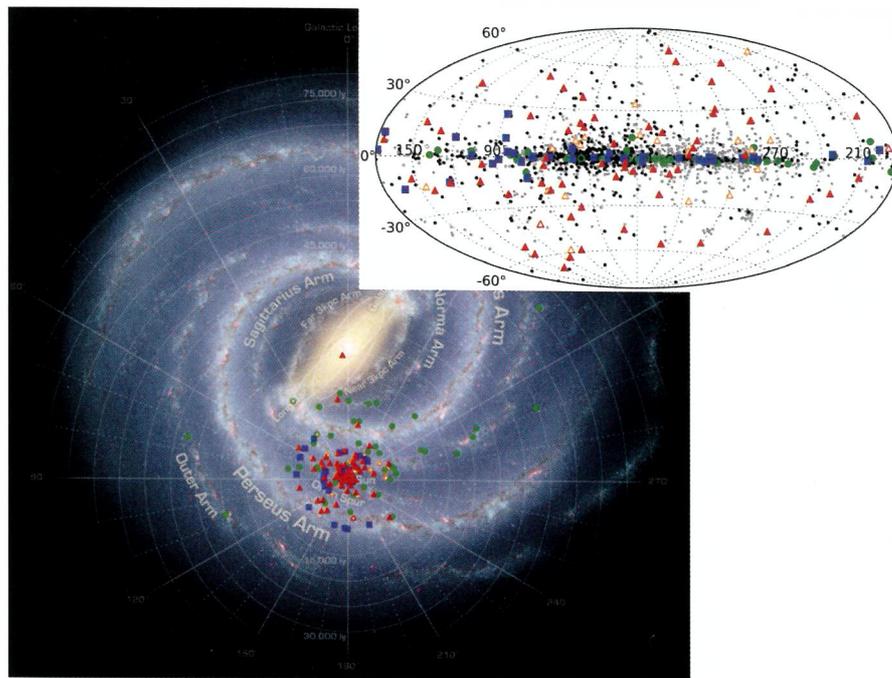
Guardando l'immagine in basso colpisce il fatto che tutti i nuovi MSP siano stati trovati lontani dal piano della nostra Galassia (la striscia scura che taglia a metà la figura). Mentre la mancanza di oggetti sul piano della galassia è in parte dovuta ad una scelta osservativa, dettata dal desiderio di evitare zone molto affollate del piano galattico, la distribuzione dei MSP su tutto il cielo ci dice semplicemente che stiamo vedendo oggetti relativamente vicini che ci appaiono disposti su una sfera, piuttosto che concentrati nella struttura a disco della Via Lattea. Non è certo un caso che i pulsar giovani (con o senza emissione radio), mediamente



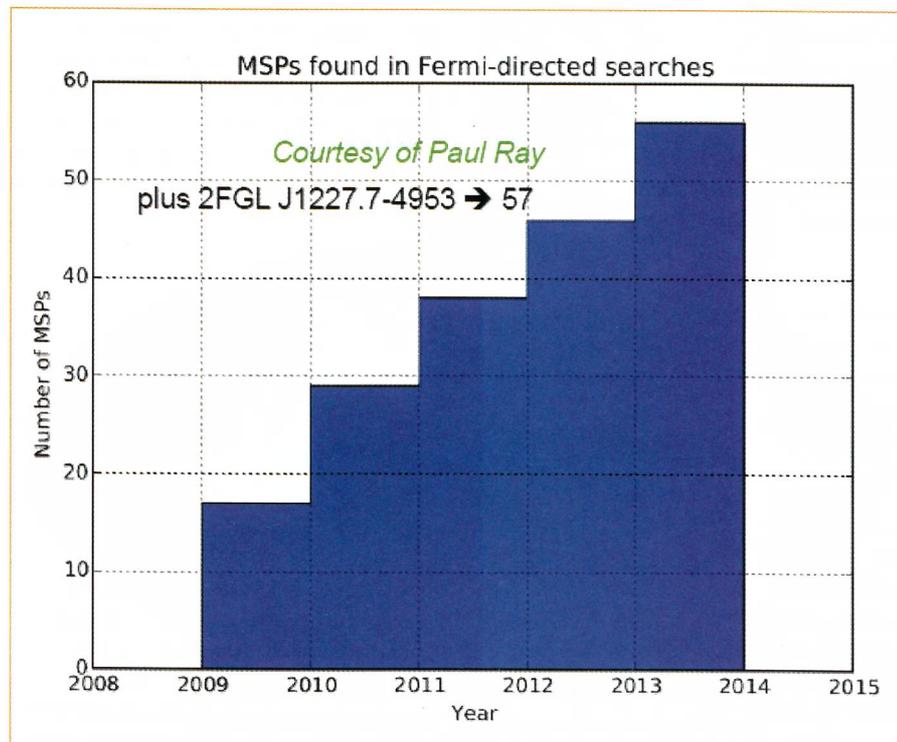
Una visione in bianco e nero del cielo gamma al quale sono stati sovrapposti i 57 nuovi MSP scoperti durante l'esplorazione radio delle sorgenti Fermi non identificate. I diversi colori si riferiscono a diversi radiotelescopi che hanno contribuito alla ricerca.

più distanti, siano concentrati nel piano della Galassia, mentre i MSP sembrano evitarlo. Nella figura qui a fianco, mentre i simboli blu e verdi sono chiaramente correlati con il piano della Galassia, i rossi sono più sparsi. I triangoli rossi vuoti rappresentano i MSP trovati nelle sorgenti Fermi per i quali non è stata ancora rivelata la pulsazione in gamma. Nella maggior parte dei casi è solo una questione di tempo.

È difficile tenere aggiornati i grafici perché il tasso di crescita nelle rivelazioni di nuovi MSP in corrispondenza di sorgenti Fermi non identificate non accenna a ridursi, come salta immediatamente all'occhio guardando la figura qui sotto che riporta il conteggio cumulativo dei MSP trovati. È difficile dire se questo risultato sia più importante per l'astronomia gamma (che riesce così ad identificare molte sorgenti prima misteriose) o per gli astronomi che operano nel radio, che hanno visto lievitare il numero di MSP di campo, cioè quelli trovati al di fuori degli ammassi globulari. Morale, i pulsar velocissimi, sui quali nessuno avrebbe scommesso fino a 5 anni fa, sono ora la classe più numerosa all'interno della famiglia dei pulsar gamma. È anche



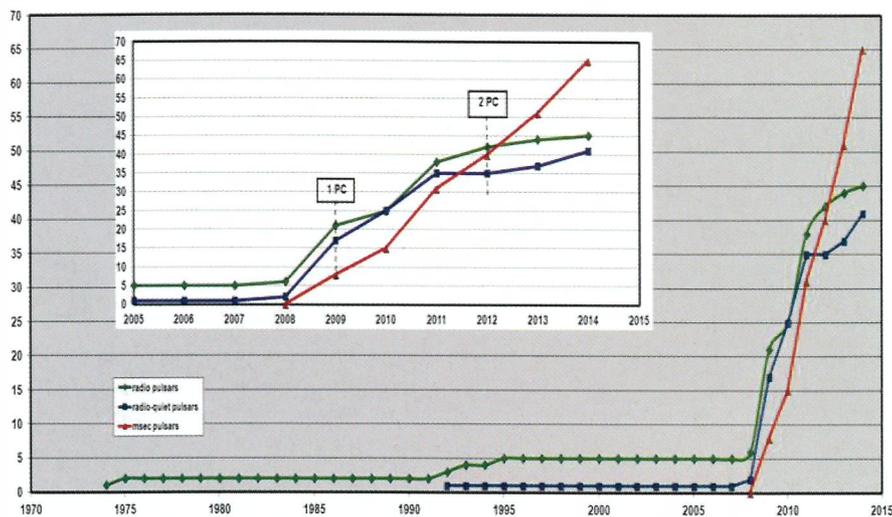
Visione generale della distribuzione dei pulsar gamma nella nostra Galassia. In rosso i MSP, in verde i pulsar con emissione radio, in blu quelli rivelati solo in gamma. *In alto a sinistra*, una rappresentazione della nostra Galassia vista dall'alto con tutti i pulsar gamma proiettati sul piano ci fa apprezzare la diversa distanza delle diverse classi di stelle di neutroni: più vicini i MSP, più lontani gli altri. *In alto a destra*, l'immagine del cielo in coordinate galattiche dove vediamo la diversa collocazione delle classi di stelle di neutroni rispetto al piano della Via Lattea. In questo caso non possiamo apprezzare la distanza degli oggetti ma piuttosto la loro distribuzione nel cielo.



I millisecond pulsar (MSP) trovati da Fermi.

interessante vedere come sono cresciuti nel tempo i numeri relativi dei pulsar gamma.

Esaminando con un po' di attenzione i nuovi MSP, selezionati sulla base delle loro caratteristiche gamma, piuttosto che radio, si fanno delle scoperte interessanti. Si comincia col notare che si tratta di oggetti in media più veloci rispetto alla classe dei MSP. Poiché periodo più breve significa più energia disponibile, grazie alle osservazioni gamma selezioniamo i membri più energetici della famiglia. Ma le sorprese non sono finite. Tra i MSP rivelati in gamma si nota una notevole abbondanza di oggetti che gli astrofisici hanno soprannominato usando nomi di insetti dalla nomenclatura preoccupante: parliamo delle "vedove nere" (v. "le Stelle" n. 73, p. 15) e dei *redbacks*, piacevoli ragnetti della stessa famiglia ma con la schiena rossa particolarmente abbondanti in Australia. Si tratta di nomignoli dati a sistemi binari dove la radiazione di alta energia emessa dalla stella di neutroni scalda



Crescita in funzione del tempo delle rivelazioni di pulsar gamma. Sono gli stessi dati usati per la figura con cui abbiamo aperto questo articolo ma questa volta gli oggetti sono divisi nelle tre classi ormai codificate: pulsar giovani con emissione radio (in verde), pulsar giovani senza emissione radio (tipo Geminga, in blu) e pulsar velocissimi (MSP in rosso).

Nello zoom si evidenzia la crescita straordinaria alla quale abbiamo assistito in questi ultimi anni con tratteggiata la situazione descritta nel primo e nel secondo catalogo dei pulsar Fermi.

Mentre nel secondo catalogo dei pulsar Fermi, che contiene 117 oggetti, le tre famiglie avevano uguale peso, adesso la crescita dei pulsar velocissimi sembra inarrestabile grazie soprattutto ai nuovi MSP trovati in coincidenza delle sorgenti gamma non identificate. Sono oltre 50 e una buona parte sono già stati visti pulsare anche in gamma.

la superficie della piccola stella compagna e la fa evaporare.

In questi casi siamo davanti a un rapporto di coppia decisamente sfortunato per la stella compagna, che dapprima ha fornito materia (e momento angolare) alla stella di neutroni – che ha così potuto accelerare

moltissimo la sua rotazione – per poi venire vaporizzata dalla radiazione della stella collassata, ringiovanita a sue spese. Un rapporto di coppia non diverso da quello della femmina vedova nera che mangia il maschio dopo essersi accoppiata. La differenza tra “vedove nere” e *redbacks* sta nelle

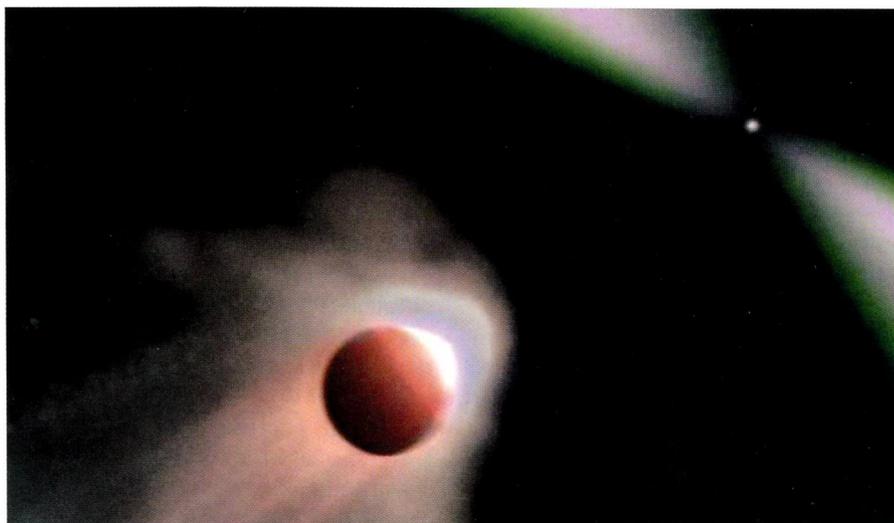


Immagine di fantasia dell'evaporazione di una stella causata dalla presenza di una stella di neutroni compagna.

dimensioni relative tra maschio e femmina, quindi tra la stella compagna e la stella collassata. Mentre nei sistemi vedove nere le compagne stellari sono molto piccole, meno di un decimo di massa solare, nei *redbacks* sono un pochino più grandi e arrivano fino a poco meno di mezza massa solare. La vedova nera da primato è stata scoperta nei dati Fermi grazie a una collaborazione tra gli studi in ottico, fatti dal gruppo di Roger Romani, e la potenza di calcolo del supercomputer dell'Albert Einstein Institute di Hannover, unita alla determinazione di Holger Pletsch e del suo *team*.

Dal momento che le vedove nere fanno evaporare la stella compagna, un sistema binario vedova nera deve essere una sorgente variabile nel visibile. Sulla base di questa considerazione, Roger Romani e il suo gruppo sono andati a cercare sorgenti variabili nelle regioni di incertezza associate alle sorgenti Fermi non identificate e hanno trovato una candidata molto interessante con un comportamento variabile che si ripeteva ogni 95 minuti.

Un periodo decisamente breve anche per una vedova nera. Grazie a questa informazione, il gruppo tedesco è riuscito a evidenziare la periodicità gamma di circa 2,5 millisecondi di J1311-3433, il primo pulsar velocissimo scoperto in gamma.

Un grandissimo successo che ha punto nel vivo i radioastronomi che sono poi riusciti a rivelare la pulsazione anche in radio. Abbiamo già raccontato questa storia (v. “*le Stelle*” n. 114, pp. 14-16) ma adesso la novità sta nella misura della massa della stella di neutroni in alcuni di questi sistemi.

È un risultato dovuto ancora una volta al gruppo di Roger Romani che ha misurato, in modo molto convincente, valori di oltre 2 masse solari. Mentre non è irragionevole che le stelle di neutroni riciclate pesino un po' di più di quelle normali (dopo tutto hanno acquisito materia dalla stella compagna), questi valori hanno implicazioni importanti sulle equazioni di stato delle stelle di neutroni puntando decisamente verso quelle più “rigide”.

È dunque un altro risultato inatteso del diluvio di pulsar velocissime viste da Fermi. E non sarà certo l'ultimo. ■