

Patrizia  
Caraveo

# L'anno dei pulsar

*Nella classifica delle 10 maggiori scoperte scientifiche del 2009, Science ha messo al secondo posto i risultati sui pulsar ottenuti dalla missione Fermi. In questo articolo vediamo di che risultati si tratta e perché sono così importanti*

## L'AUTORE

Patrizia Caraveo, è dirigente di ricerca presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) a Milano. In trent'anni di carriera ha collaborato a diverse missioni spaziali internazionali dedicate all'astrofisica delle alte energie. Attualmente è coinvolta nella missione europea Integral, nella missione della NASA Swift, nella missione italiana Agile e nella missione NASA Fermi, tutte in orbita e pienamente operative. In anni di sforzi volti all'identificazione della sorgente Geminga ha messo a punto una strategia multilunghezze d'onda per l'identificazione delle sorgenti gamma galattiche. Per questi risultati, nel luglio 2009 ha ricevuto il Premio Nazionale Presidente della Repubblica.

**P**er chi, come me, ha dedicato tutta la carriera allo studio dell'emissione di alta energia dei pulsar, il 2009 è stato un anno straordinario. Oltre a registrare un aumento vertiginoso del numero di pulsar rivelati nel dominio gamma, abbiamo assistito alla nascita di nuove sottofamiglie, prima i pulsar gamma senza emissione radio, poi un numero sempre più grande di pulsar velocissimi, una vera sorpresa.

Ma andiamo con ordine, cominciando da un po' di storia.

I primi pulsar gamma sono stati scoperti dalla missione NASA SAS-2 nel 1972, pochi anni dopo la scoperta dei pulsar in radio. Prima è stata la volta del pulsar della Nebulosa Granchio, già visto da esperimenti in pallone, poi è stato rivelato quello nella costellazione delle Vele (o *Vela*, in latino). Queste sono anche due delle stelle di neutroni più brillanti in radio, e tra le prime a essere scoperte dai radioastronomi tra il 1968 e il 1969. Sono due stelle di neutroni relativamente giovani, ancora situate all'interno dei resti delle supernovae che le hanno prodotte. Il pulsar della Nebulosa Granchio ha circa 1000 anni ha avuto origine da una supernova storica, vista esplodere da astronomi cinesi nel 1054. Il pulsar campeggia all'interno di un *plerione*, cioè un resto di supernova pieno di radiazione che ai primi osservatori ha ricordato la forma di un granchio. Il pulsar è uno dei più energetici che si conoscano, ruota intorno al suo asse ogni 33 millisecondi (ms) e il suo periodo aumenta impercettibilmente. Per quanto piccolo, questo rallentamento rappresenta una significativa perdita di energia rotazionale che può essere trasformata in radiazione. Il pulsar delle Vele è più maturo, ha 10.000 anni e il resto della sua supernova ha già assunto la caratteristica forma a bolla. La stella di neutroni ruota in 89 ms, e il suo rallentamento è ancora più impercettibile di quello del pulsar del Granchio. Ha a disposizione una quantità di energia minore, ma è circa 10 volte più vicina ed è quindi una

sorgente più brillante. In effetti, è la sorgente gamma più brillante del cielo.

Successivamente le mappe di SAS-2 rivelarono una terza sorgente non lontana dal Granchio e un po' più brillante. La situazione venne confermata da COS-B, il primo satellite dell'Agenzia Spaziale Europea, attivo dal 1975 al 1982: le tre sorgenti di SAS-2 divennero due dozzine ma le magnifiche tre rimasero le più brillanti. Visto che le altre due sorgenti erano pulsar, sarebbe stato naturale pensare che anche la terza lo fosse. Peccato che nella zona di pulsar non ce ne fossero proprio, parola del radiotelescopio di Arecibo. Ci abbiamo impiegato 20 anni buoni a capire di che sorgente si trattasse. Prima di tutto le è stato dato un nome (distinguere gli oggetti celesti con delle sigle è assai deprimente...). E la sorgente enigmatica è diventata Geminga: GEMIN perché è nella costellazione dei Gemelli e GA perché è una sorgente gamma. Letta alla tedesca fa "Gheminga" – o, magari, "Gh'è minga", che acquista un significato ben preciso, almeno per dei lombardi un po' esasperati dal fatto di non riuscire a risolvere il mistero...

La caccia a Geminga ci ha insegnato moltissimo: abbiamo capito che l'astronomia gamma non può risolvere da sola tutti i suoi problemi. È bene collaborare con altre lunghezze d'onda: raggi X, ottico, radio. Abbiamo cominciato a capire il comportamento di Geminga grazie all'astronomia X quando abbiamo trovato la controparte X della sorgente gamma e ci siamo accorti che sembrava proprio una stella di neutroni. Alla fine i raggi X hanno anche permesso di "vedere" la pulsazione, che a quel punto (era il 1992) è stata rivelata anche in gamma. Morale: la prima impressione è quella che conta. Geminga è proprio una stella di neutroni di mezza età, non molto energetica, assolutamente normale. La sua unica peculiarità è la vicinanza: 500 anni luce, praticamente dietro l'angolo; per questo è così brillante in gamma.

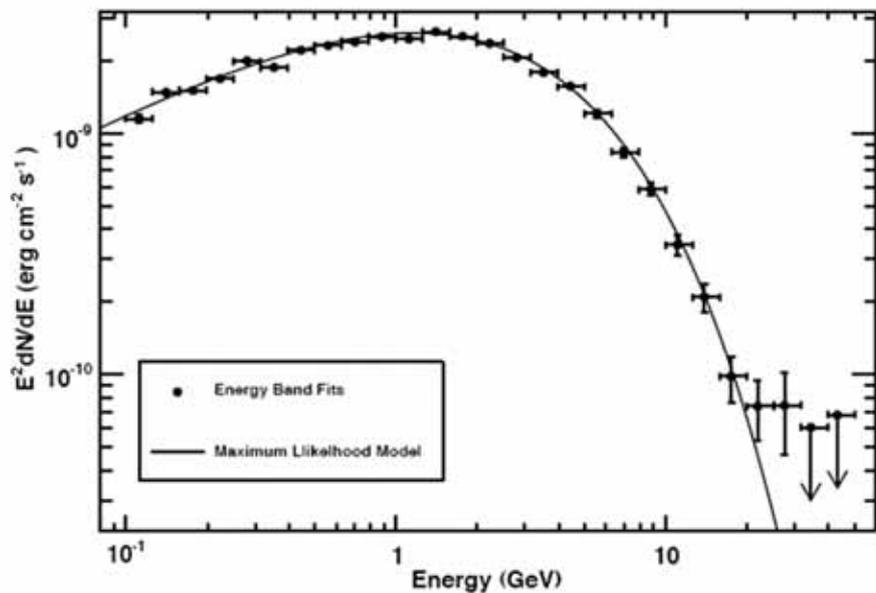
Ma inseguendo Geminga arriviamo agli anni

'90, quando il cielo gamma è pattugliato dalla missione *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO), con il telescopio gamma EGRET, molto più sensibile di COS-B. Le due dozzine di sorgenti di COS-B diventano così 270, ma il numero dei pulsar non ha lo stesso incremento: il totale si ferma a 5 (6 con Geminga e 7 con PSRB1509-58, un pulsar radio che viene visto solo dallo strumento Comptel, sensibile a raggi gamma di bassa energia). Conclusasi la missione EGRET alla fine degli anni '90, si apre un lungo iato durante il quale si cerca di estrarre tutto il possibile dai dati di EGRET. Il problema fondamentale è cercare di capire che cosa siano le sorgenti non identificate, che costituiscono la grande maggioranza del catalogo EGRET. Si organizzano campagne di osservazione in radio

e in X. I radioastronomi trovano dei pulsar promettenti, e anche gli astronomi X rivelano potenziali controparti. Purtroppo non è facile andare a cercare pulsar scoperti, e misurati oggi, in dati gamma vecchi di anni. Per vedere la pulsazione in gamma occorre ripiegare in fase i tempi di arrivo dei pochi fotoni gamma disponibili sfruttando informazioni superprecise sulla posizione e sui parametri temporali del pulsar. Visto che tutti i pulsar presentano qualche irregolarità, qualche singhiozzo che altera, anche di pochissimo, il periodo di rotazione, applicare i parametri misurati oggi estrapolandoli a due, tre, dieci anni fa è un'operazione senza speranza.

Per andare avanti ci vuole una nuova missione, anzi due. Nell'aprile 2007 viene lanciata AGILE, una piccola missione dell'Agenzia Spaziale Italiana, e nel giugno 2008 è il turno della missione NASA Glast, che, una volta in orbita, diventerà Fermi, in onore del grande fisico italiano. Scoprire altri pulsar è uno degli obiettivi primari delle due missioni, ed entrambe organizzano programmi di monitoraggio in radio per disporre di dati contemporanei da utilizzare per il ripiegamento in fase. È stata preparata una lista di qualche centinaio di pulsar selezionati e messi in ordine di priorità sulla base del valore della loro perdita di energia rotazionale divisa per il quadrato della distanza, un parametro che stima l'energia del segnale del pulsar visto da un osservatore terrestre.

### Spettro Vela Pulsar 100 Mev- 100 GeV



Ovviamente si tratta di una approssimazione: nessun pulsar può utilizzare tutta la sua riserva di energia per produrre raggi gamma, tuttavia il parametro fornisce una stima ragionevole della probabilità di misurare il flusso gamma da un determinato oggetto. Tutti i grandi radiotelescopi del mondo collaborano.

Quale satellite troverà il primo nuovo pulsar? In un certo senso, vincono entrambi. AGILE identifica l'emissione gamma del pulsar radio PSR J2021+3651, una sorgente EGRET non identificata nella regione del Cigno (v. *Le Stelle*, n. 68, p. 14), mentre il LAT (*Large Area Telescope*) a bordo di Fermi, poche settimane dopo il lancio, scopre PSR J0007+7303 nel resto di supernova CTA-1, il suo primo pulsar solamente gamma, senza nessuna emissione radio (v. *Le Stelle*, n. 68, p. 15). Questa è la vera rivoluzione: Fermi è capace di rivelare la pulsazione delle sorgenti anche senza avere nessun input dalla radioastronomia. È un salto reso possibile dalle dimensioni e dalle prestazioni dello strumento, unite a un software particolarmente azzeccato. CTA-1 era una delle sorgenti non identificate di EGRET: vuoi vedere che sono tutte dei pulsar radio-quieti? Era quello che avevamo proposto anni fa sulle ali dell'entusiasmo per l'identificazione di Geminga.

Dopo i primi mesi di attività, LAT compila un primissimo catalogo di sorgenti brillanti (v. *Le Stelle*, n. 73, pp. 50-55) che vengono passate al setaccio alla ricerca di pulsazioni. Ben 15 nuovi

*Spettro del pulsar delle Vele.*

pulsar gamma vengono così scoperti, portando il totale dei pulsar gamma scoperti da LAT a 16. In 13 casi si tratta di sorgenti EGRET non identificate. Geminga ci aveva indicato la strada giusta!

Di pari passo continua la ricerca di pulsar radio. Tutti i pulsar giovani ed energetici scoperti negli *error box* di EGRET si rivelano degli emettitori gamma. Ma le sorprese non sono finite: qualcuno nota che una sorgente ad alta latitudine galattica coincide con un cosiddetto “pulsar millisecondo”, un pulsar superveloce che ruota centinaia di volte al secondo. I pulsar di questo tipo non erano stati considerati sorgenti promettenti per l’ottima ragione che sono oggetti vecchi, ringiovaniti e riaccelerati da scambi di materia con una stella compagna in un sistema binario, ma con campi magnetici 10.000 volte inferiori a quelli dei pulsar classici e con disponibilità energetiche abbastanza limitate.

Vista la coincidenza spaziale si decide di tentare il ripiegamento in fase e, sorpresa, il segnale è forte e chiaro. Parte così la ricerca sistematica dei pulsar velocissimi, che vengono trovati in numero sorprendentemente elevato (v. *Le Stelle*, n. 83, pp. 20-21).

Analizzando 6 mesi di dati, il totale dei pulsar visti dal LAT di Fermi arriva così a 46, divisi in tre gruppi:

- pulsar millisecondo: 8;
- pulsar radio-quieti: 17 (16 scoperti da LAT + Geminga);
- pulsar radio classici: 21 (16 scoperti da LAT e i 5 già noti).

È il momento di fare il punto della situazione e, dopo avere studiato il comportamento individuale, di analizzare le proprietà collettive per cercare di capire se i pulsar classici si comportano in modo diverso da quelli senza emissione radio o da quelli velocissimi.

L’astronomia gamma ci permette di misurare le curve di luce degli oggetti, e per i pulsar radio è possibile confrontare le curve gamma con quelle radio, alla ricerca di eventuali somiglianze e differenze (*la figura grande a pp. 50-51 fornisce numerosi esempi di curve di luce*).

Diciamo subito che la regola è la differenza. Sono pochissimi i casi dove si nota una somiglianza, e il pulsar del Granchio è decisamente l’esempio migliore (v. *figura qui sotto*).

Grazie alla qualità dei dati disponibili è possibile sovrapporre con grande accuratezza il profilo radio con quello gamma: si nota così che i picchi sono leggermente sfasati, una prova che i fotoni radio e gamma vengono prodotti in zone diverse della magnetosfera dei pulsar. Tornando alle proprietà generali della popolazione, le curve di luce hanno aspetti molto differenziati: anche se non mancano le curve a un solo picco, è più comune trovarne con due picchi, separati da poco meno di mezza fase. Due picchi, come due sono i poli magnetici delle stelle di neutroni, il che ci fornisce un indizio. Inoltre i picchi possono essere molto stretti, come nel caso dei pulsar del Granchio e delle Vele, oppure decisamente allargati e strutturati. I pulsar millisecondo hanno curve di luce radio molto più complicate, che a volte appaiono in antifase con le curve di luce gamma.

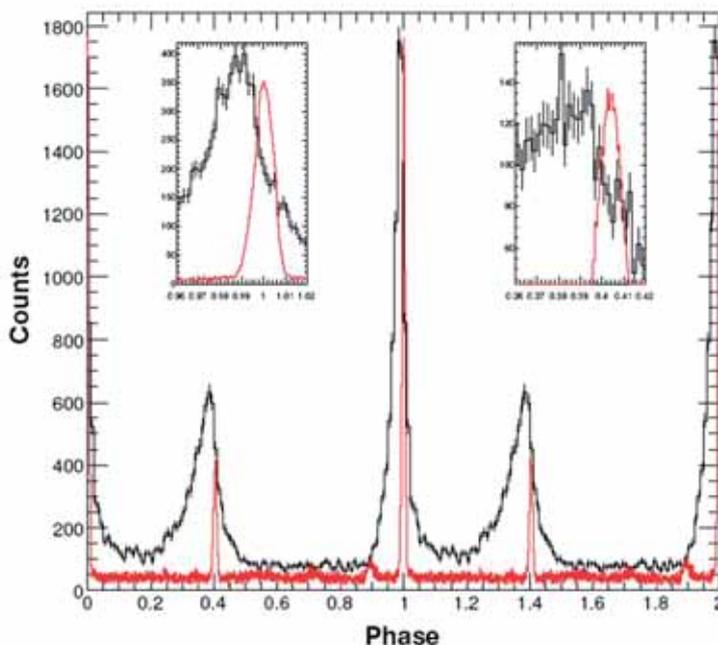
Un’altra informazione importantissima che si può estrarre dai fotoni gamma è la loro distribuzione in funzione dell’energia: in altre parole, lo spettro delle sorgenti.

Secondo il saggio principio che quanti più fotoni abbiamo, tanto meglio è, il primo oggetto a ricevere attenzione è stato il pulsar delle Vele, la sorgente più brillante del cielo.

Prima del lancio di Fermi, i dati di EGRET dimostravano che l’emissione di alta energia non continuava in modo indefinito, ma aveva un taglio. La forma spettrale risultava spezzata, e il problema era descrivere accuratamente il taglio perché dalla sua nettezza dipendeva la spiegazione fisica del meccanismo di produzione dei fotoni. Un taglio netto avrebbe indicato una provenienza da regioni più interne delle stelle di neutroni, mentre un taglio più graduale avrebbe indicato la provenienza da una regione più esterna.

Lo spettro del pulsar delle Vele (v. *figura p. 47*) è inequivocabile nella sua chiarezza: il taglio

Curva di luce del pulsar del Granchio. Per chiarezza vengono mostrate due rotazioni: in nero la curva di luce gamma, in rosso quelle radio. I due riquadri in alto mostrano uno zoom dei due picchi.



c'è ma non è netto, quindi le zone di produzione dei fotoni gamma sono situate nelle parti esterne delle stelle di neutroni, vicino al cilindro di luce, un immaginario cilindro tangente alla magnetosfera nel punto dove la velocità di corotazione della magnetosfera trascinata a seguire il moto vorticoso della stella diventa uguale alla velocità della luce.

La distanza del cilindro di luce non è la stessa per tutti i pulsar, bensì dipende dal periodo di rotazione: oggetti veloci hanno il cilindro di luce più vicino alla superficie della stella di neutroni, oggetti più lenti l'hanno più lontano.

Per caratterizzare lo spettro di un pulsar si usano l'indice dello spettro di potenza, che descrive la prima parte dello spettro, e poi il valore dell'energia alla quale bisogna fare piegare lo spettro, la cosiddetta "energia di *cut-off*".

Fotoni permettendo, è possibile vedere come questi parametri variano nel corso della curva di luce, sempre per cercare di capire qualcosa di più sulla fisica della sorgente.

Considerando sempre il pulsar delle Vele, mentre l'indice spettrale non cambia moltissimo durante la rotazione del pulsar, il valore dell'energia di *cut-off* varia in modo significativo. Sono tutte informazioni utilissime per l'interpretazione teorica di queste sorgenti.

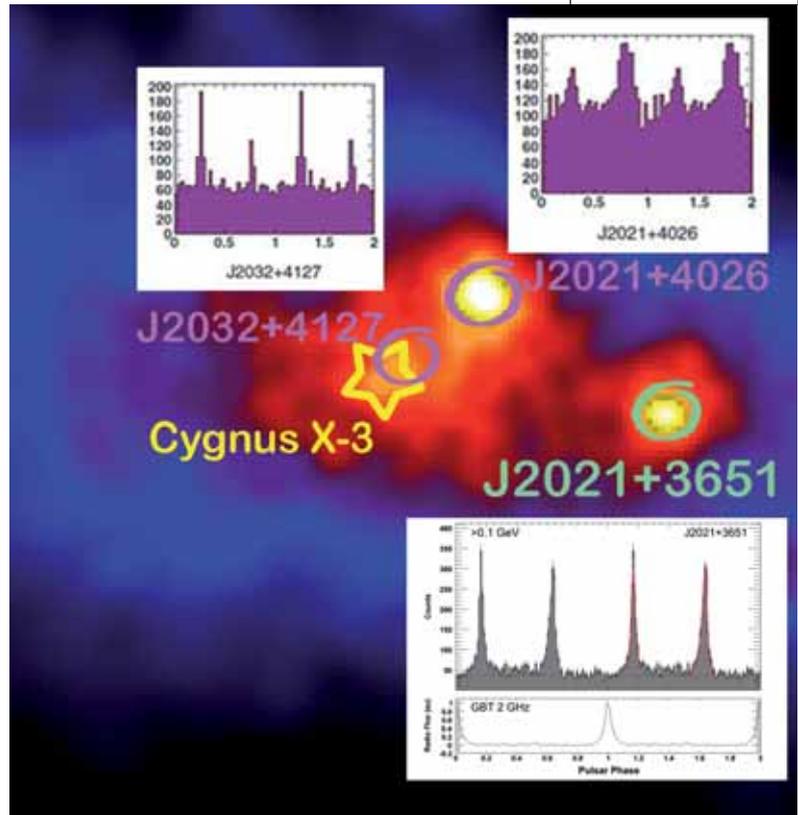
Osservando le curve di luce, è interessante cercare di capire se la totalità dell'emissione sia pulsata oppure se la componente pulsata sia sovrapposta a un livello continuo.

Nella curva di luce del pulsar del Granchio, per esempio, notiamo che i conteggi non vanno a zero nelle regioni lontane dai picchi (v. figura p. 48). È l'emissione di alta energia del plerione che circonda il pulsar. Visto che questa emissione continua anche a valori di energia molto più alti, dove essa viene rivelata con strumenti Čerenkov a terra, possiamo vedere come i dati del LAT si raccordano con quelli dei telescopi a terra.

Lo spettro della Nebulosa Granchio non ha niente a che fare con quello del pulsar: mostra un largo picco dovuto all'effetto Compton inverso tra le particelle accelerate dal pulsar e i fotoni circostanti; in mancanza di meglio si può anche usare la radiazione a 3 K del fondo dell'Universo.

Sono diversi i pulsar che hanno un sottofondo continuo, ma il comportamento di quello del Granchio non è comune a tutti. Il pulsar della Vela ha una piccola nebulosità gamma con una forma spettrale diversissima da quella del pulsar del Granchio.

Geminga ha un piccolo sottofondo che però



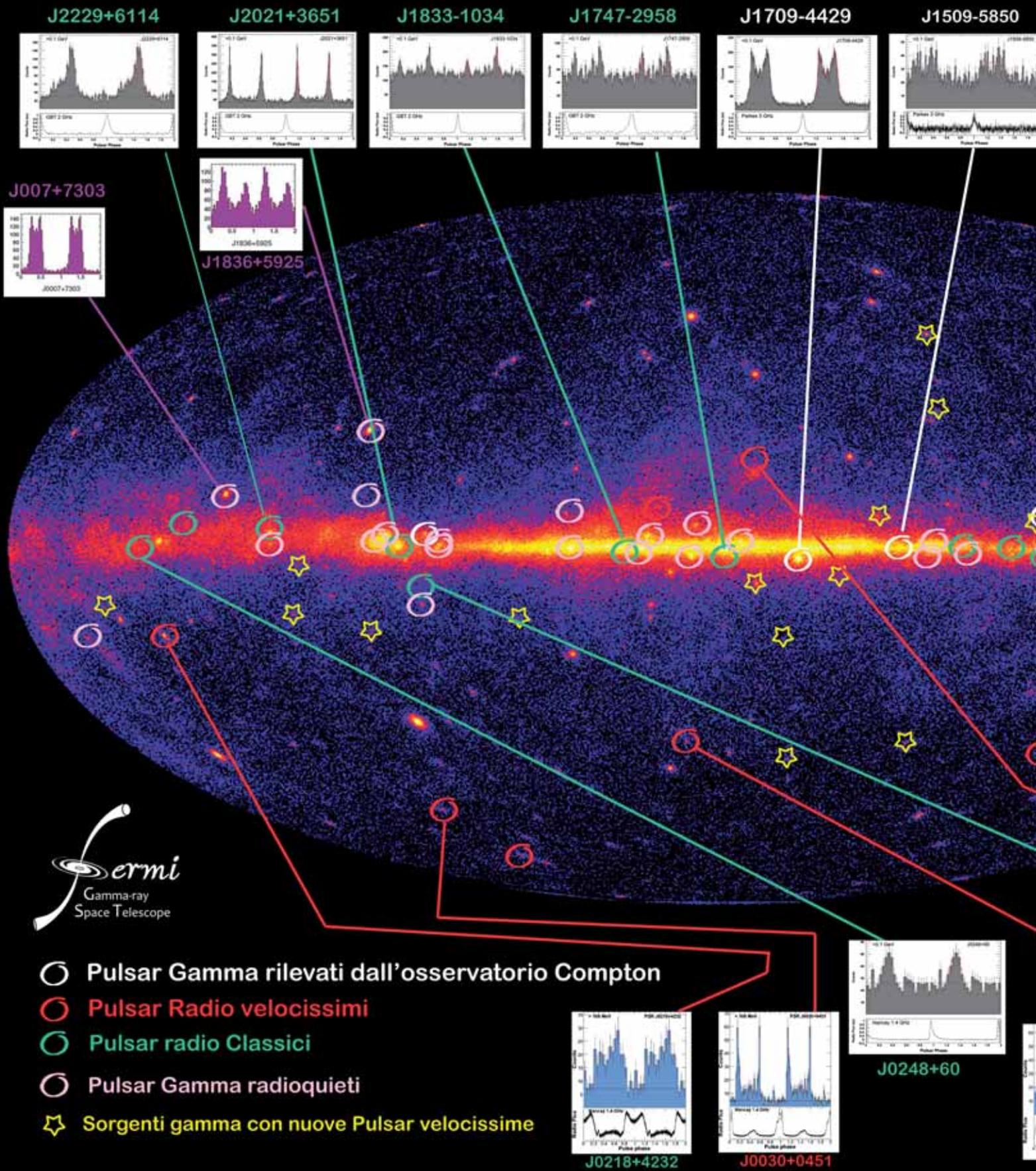
appare simile alla radiazione pulsata; forse sta tentando di dirci che è capace di emettere anche in continuo. Non sempre è facile stimare l'entità di questo contributo. Molti dei pulsar giovani, infatti, sono situati nella Galassia e la loro emissione si somma con quella di altre sorgenti, oltre che con l'emissione diffusa dal disco della Via Lattea. L'esempio della regione del Cigno mostra chiaramente questo sovrappollamento di sorgenti (vedi figura in alto).

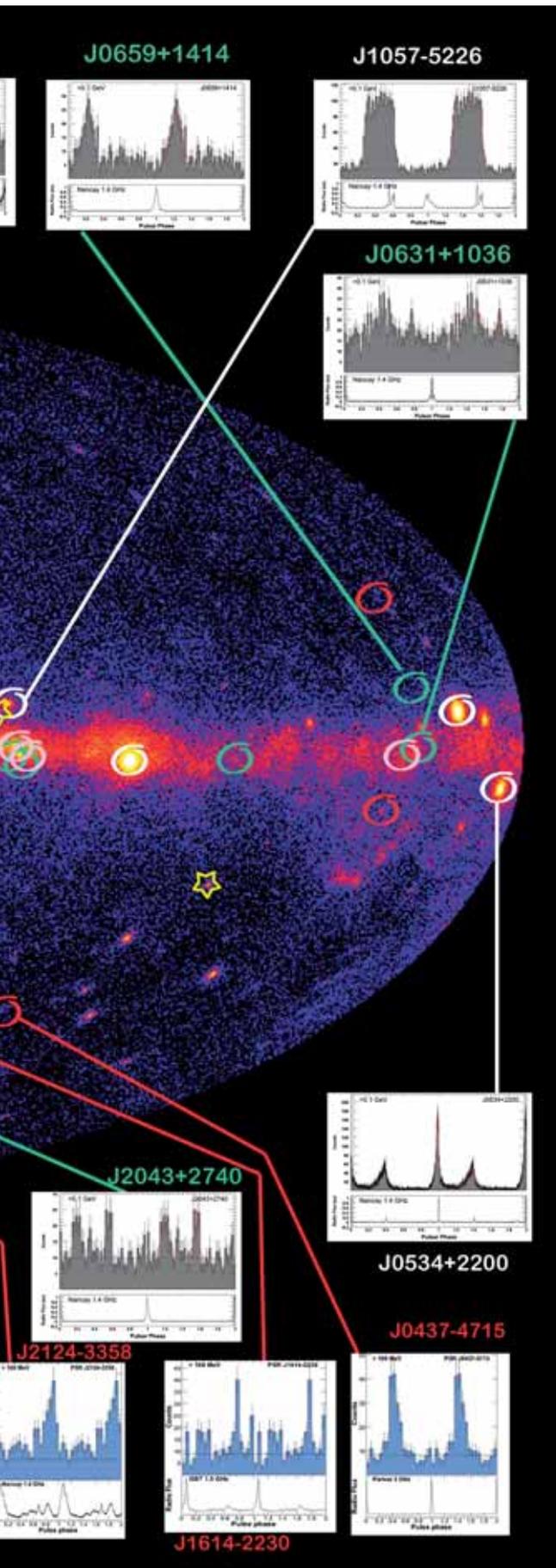
Gli oggetti che meglio si prestano a questa ricerca sono quelli un po' fuori dal piano della Galassia, ben isolati, come la sorgente 1836-5925 (v. figura grande a pp. 50-51).

Qui vediamo un contributo non pulsato molto importante. Di che cosa si tratterà? Di una nebulosità che non riusciamo a risolvere o di un comportamento diverso di un pulsar gamma? Cerchiamo di passare a una visione globale iniziando dal posizionamento dei pulsar LAT nei classici diagrammi periodo-rallentamento che vengono utilizzati dai radioastronomi per studiare la popolazione nella sua globalità.

Nella figura a p. 52 in alto i puntini neri rappresentano i pulsar radio (i più giovani ed energetici in alto a sinistra, i più vecchi nella nuvola che scende verso destra), mentre i pulsar millisecondo (con periodi cortissimi, ma con rallentamenti un milione di volte più pic-

La sorgente Cygnus X-3.





coli di quelli dei pulsar classici, segno di campi magnetici molto più deboli) sono in basso a sinistra.

I pulsar radio sono evidenziati in verde, quelli scoperti in gamma in blu e quelli millisecondo in rosso.

È chiaro che i pulsar con emissione gamma sono tra i più energetici della famiglia. Non mancano però quelli di energia medio-bassa; in questo caso si tratta di sorgenti che devono essere molto vicine, come Geminga.

Per calcolare la luminosità gamma dei pulsar sono necessari due dati: la distanza e il fattore di copertura geometrica (cioè la frazione di una sfera che viene illuminata dal fascio di emissione gamma). Mentre la misura della distanza si basa su tutte le possibili tecniche astronomiche (parallasse per i pulsar più vicini, misura della dispersione del segnale radio – dovuta agli elettroni liberi sul percorso della radiazione – per quelli che hanno segnale radio e valutazioni dell’assorbimento interstellare per quelli che hanno emissione X), la valutazione del fattore geometrico è fatta sulla base dei modelli teorici. Eravamo abituati a considerare un cono di emissione di circa 1 steradiante (cioè  $\frac{1}{4} \pi$  della sfera: parlando di angoli solidi, infatti, una sfera è  $4 \pi$  steradiani), ma ora i modelli più accreditati suggeriscono di considerare coni di emissione molto più grandi, tanto grandi da comprendere quasi la totalità della sfera: dunque, per semplicità, possiamo assumere un fattore pari a 1.

Ben consapevoli dei nostri limiti in materia di conoscenza della distanza e dei fattori geometrici, possiamo studiare come la luminosità gamma dipenda dalla perdita di energia rotazionale del pulsar (un parametro assoluto che dipende solo dal periodo e dal rallentamento). Purtroppo non esiste un modo semplice e unico di mettere in relazione le due grandezze. In altre parole, l’efficienza nella trasformazione dell’energia rotazionale in emissione gamma non è la stessa per le diverse sottofamiglie delle stelle di neutroni.

Dovremo quindi affinare le nostre analisi per capire meglio la situazione.

Se osserviamo il grafico del valore del campo magnetico al cilindro di luce in funzione dell’età dei pulsar (v. figura p. 52 in basso), vediamo subito che tutti i pulsar con emissione gamma hanno un valore superiore a una certa soglia.

Da notare che anche i pulsar millisecondo sono ben piazzati, a riprova del fatto che, pur partendo da un campo molto più basso alla superficie, hanno il cilindro di luce molto più

*Nella pagina a fronte: immagine del cielo gamma (proiezione in coordinate galattiche) costruita utilizzando un anno di dati del LAT. Le posizioni di una settantina di stelle di neutroni sono evidenziate con un codice di colore che aiuta a riconoscere le diverse classi.*

*Le posizioni di una parte dei pulsar sono collegate alle rispettive curve di luce gamma e radio (nel caso di pulsar con emissione radio).*

*Elaborazione grafica: R. Maccagnola.*

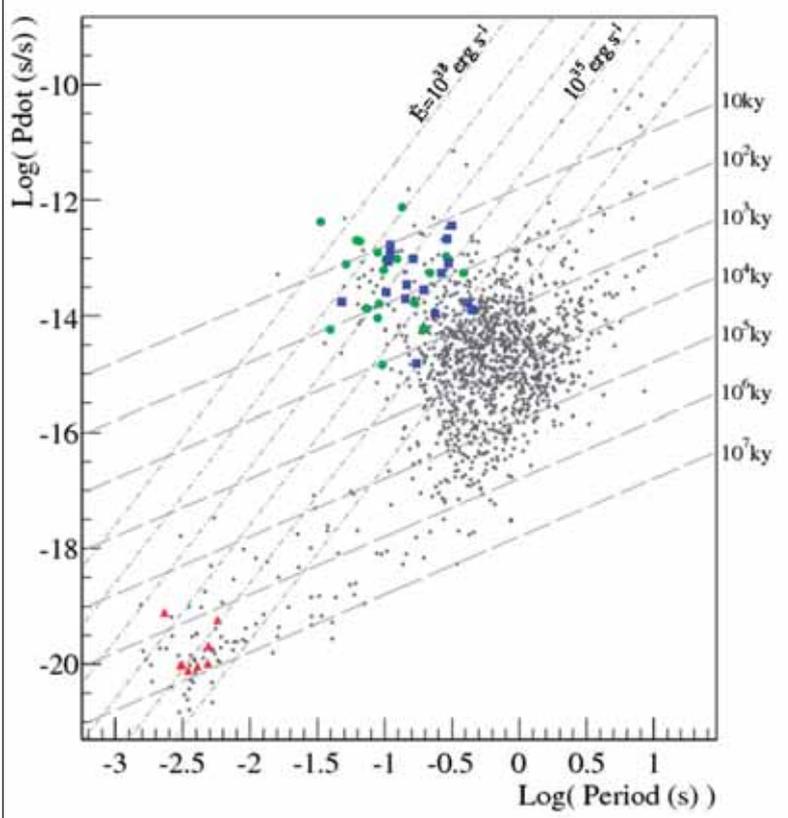
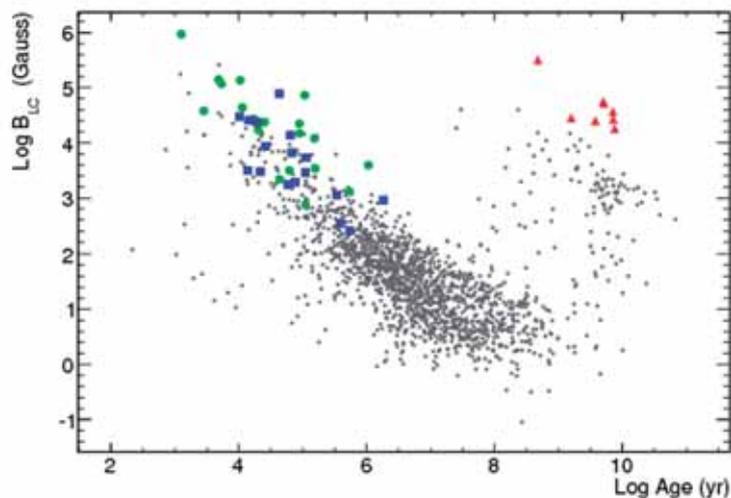


Grafico periodo-rallentamento.

vicino (il campo magnetico di un dipolo decresce come il cubo della distanza).

Tutto sommato, il risultato più importante del primo catalogo dei pulsar gamma visti da Fermi LAT è l'accreditamento dei modelli che ipotizzano la produzione dei fotoni gamma lontano dai pulsar, in zone prossime al cilindro di luce: così si spiegano gli spettri curvati ma non troppo, nonché la frazione tanto rilevante di pulsar

Campo magnetico cilindro luce - età.



solo gamma, dovuti ai grandi coni di emissione. Dopo il primo catalogo dei pulsar, le ricerche sono andate avanti facendo scoprire 8 nuovi pulsar gamma, portando il bottino dei pulsar solo gamma a ben 24 (25 con Geminga).

I radioastronomi, nel frattempo, non sono stati a guardare, anzi!

Da un lato hanno cominciato a osservare intensamente i pulsar gamma cercando di rivelare l'emissione radio, anche se molto debole: ci sono riusciti solo in 3 casi su 24, misurando i flussi radio più bassi mai misurati da un pulsar. Ben diverse soddisfazioni ha dato la copertura radio di sorgenti LAT senza identificazione.

Andando a frugare in un centinaio di sorgenti, per lo più fuori dal piano galattico, hanno iniziato a scoprire manciate di pulsar millisecondo. Adesso ne contano 18, e non siamo ancora alla fine della storia.

In pochi mesi hanno aumentato la popolazione dei pulsar millisecondo di campo (cioè non appartenenti ad ammassi globulari) di più del 20% con una facilità irrisoria rispetto a ricerche standard di pulsar velocissimi basate su campagne che richiedono molto tempo di osservazione e moltissimo tempo di calcolo. La mappa delle sorgenti LAT non identificate è per i radioastronomi una specie di mappa del tesoro. 5 dei 18 pulsar sono già stati visti pulsare anche con il LAT, e io credo che quando conosceremo precisamente i parametri radio di tutti i pulsar li vedremo tutti.

Ricapitoliamo: siamo partiti con 6 pulsar (5 radio e Geminga) e adesso ci avviamo verso quota 80 con 24 "Geminga like", una dozzina di pulsar millisecondo + 18 nuovi millisecondo radio e una trentina di pulsar radio.

A queste sorgenti vanno aggiunti 8 ammassi globulari (a cominciare da 47 Tuc, la prima associazione tra ammasso globulare e sorgente gamma), la cui emissione è molto probabilmente la somma di decine di pulsar millisecondo.

La famiglia dei pulsar gamma è quindi equamente divisa tra pulsar radio classici, pulsar millisecondo e pulsar che hanno solo emissione radio.

Ovviamente i radio classici e quelli senza emissione radio non devono per forza essere oggetti diversi: è possibile che sia solo uno scherzo della geometria. Se il cono di emissione gamma è molto più ampio di quello radio, è più facile vedere un pulsar come sorgente gamma che come sorgente radio. Ciò nonostante, grazie a più di 40 anni di ricerche e alla sensibilità dei radiotelescopi, possiamo affermare che i pulsar radio sono comunque molto più numerosi. ■