

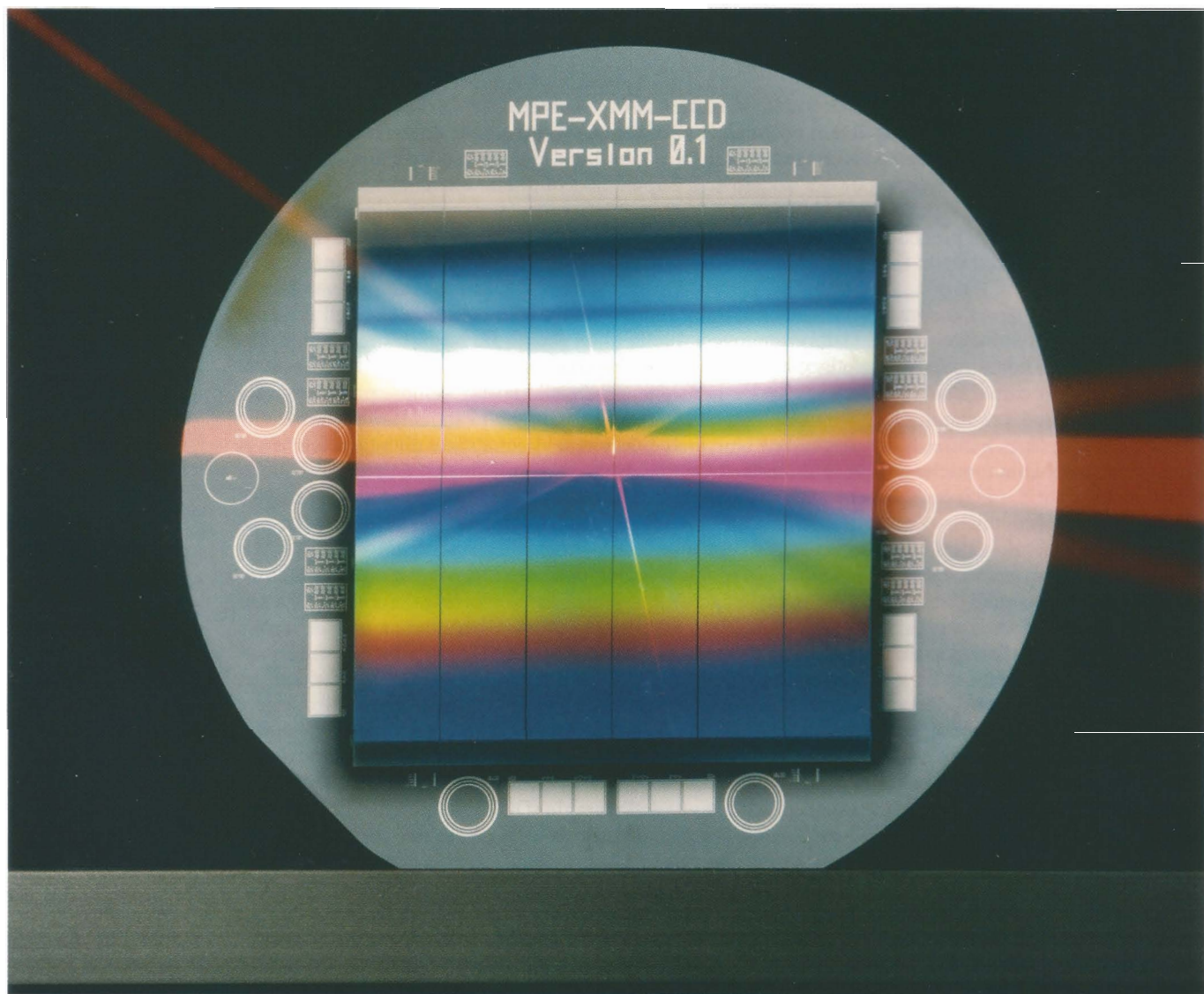
# Geminga a spicchi

*Il satellite europeo XMM-Newton ha una grande area sensibile e raccoglie moltissimi fotoni, tanto che è possibile analizzare il comportamento della più stravagante pulsar che si conosca sezionandola idealmente in dieci "spicchi". Ecco così emergere una misteriosa "macchia calda".*

*Il rivelatore pn a bordo del satellite XMM-Newton è un CCD composto da dodici chip. Usandoli tutti può operare come una camera per immagini; selezionandone uno solo si sacrifica l'informazione spaziale a favore di quella temporale.*

**Patrizia Caraveo**

**Q**ualche anno fa, John Maddox, storico direttore della rivista *Nature*, scrisse un libro dall'emblematico titolo: *What remains to be discovered?*. Già, cosa resta da scoprire? È un interrogativo che gli scienziati si pongono spesso. Ci sono sempre momenti nei quali bisogna scegliere la direzione in cui orientare le ricerche nella speranza di avere risultati più belli e interessanti.





Avendo la possibilità di osservare Geminga, la prima tra le stelle di neutroni radioquiete che Nanni Bignami e io andiamo studiando ormai da un quarto di secolo, noi non abbiamo dubbi di questo tipo perché questa stravagante sorgente non ci ha mai tradito. Ogni volta che l'abbiamo puntata ha saputo riservarci qualche sorpresa. Quando l'abbiamo osservata l'ultima volta ci aveva stupiti presentandosi con uno spettacolare "strascico" di radiazione perfettamente allineato con la direzione del suo moto in cielo [v. *Le Stelle* n. 11, pag. 41], qualcosa che ricordava la scia di schiuma che una nave si lascia alle spalle. Superato lo stupore per una fenomenologia che non era mai stata vista prima, lo strascico era stato interpretato come radiazione di sincrotrone emessa da elettroni di alta energia che si liberano dai campi elettrici e magnetici della stella, dopo essere stati da questi accelerati, e che si incanalano nel solco scavato dal moto della stella dentro il mezzo interstellare.

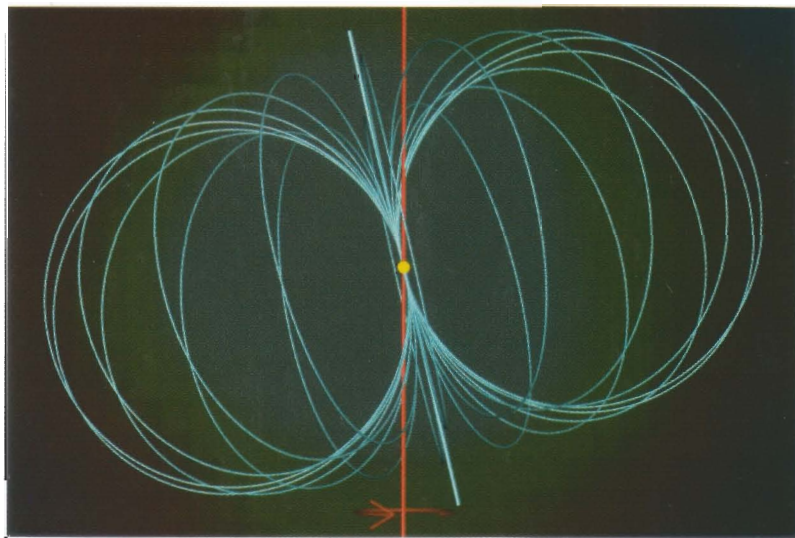
Durante l'osservazione da parte del satellite europeo XMM-Newton del 4 aprile 2002 erano tre i rivelatori dello strumento EPIC che raccoglievano dati dalla sorgente. Da un lato le due camere fotografiche (i rivelatori MOS), impegnate nell'ottenere immagini, dall'altro il rivelatore pn, utilizzato per registrare il tempo di arrivo e l'energia dei singoli fotoni. Il rivelatore pn è un CCD di nuova concezione ed è il più sensibile dei tre rivelatori al fuoco dei tre telescopi di EPIC per il fatto che è l'unico a ricevere per intero il fascio dei fotoni X focalizzati dagli specchi a incidenza radente. Gli altri due rivelatori devono invece dividere i fotoni con un quarto strumento, lo spettrografo RGS per raggi X che, purtroppo, risulta utile solo quando il telescopio è puntato su sorgenti molto brillanti.

Il rivelatore pn può essere utilizzato in diversi modi operativi: può fornire immagini (il modo operativo standard), utilizzando tutti e 12 i sensori che lo compongono, oppure si può scegliere di sacrificare l'informazione spaziale a favore di quella temporale. Per estrarre l'informazione sui tempi di arrivo dei fotoni bisogna sfruttare intensivamente un solo sensore dei 12, leggendo in continuazione una piccola finestra, centrata sulla sorgente che si vuole studiare. Questo modo operativo viene normalmente utilizzato per lo studio delle sorgenti rapidamente variabili, come sono le pulsar.

Per Geminga, il rivelatore pn ha raccolto la bellezza di 53 mila fotoni X, ossia circa il doppio di quanto era stato possibile accumulare nei precedenti vent'anni, attraverso i satelliti Einstein, ROSAT e ASCA. L'abbondanza di fotoni e l'intervallo di energia coperto da EPIC offrono possibilità assolutamente nuove per lo studio di Geminga come sorgente pulsante.

Come si investiga la fisica di una stella di neutroni (uno degli oggetti più puntiformi che si possano immaginare)? Quello che conta è lo spettro della radiazione emessa. Ogni processo fisico mette infatti la propria inconfondibile firma nel modo specifico in cui si distribuiscono, in funzione dell'energia, i fotoni che esso produce. Un processo termico, nel quale il corpo emette in virtù del fatto di essere più o meno caldo, produrrà la caratteristica *curva di corpo nero*, la cui forma è ben nota: è la classica curva di Planck, che presenta un picco in corrispondenza di una frequenza che dipende dalla temperatura del corpo emittente; letta tale frequenza, i fisici possono conoscere la temperatura della sorgente; la luminosità complessiva, che è proporzionale alla quarta potenza della temperatura, si può calcolare se si conosce l'estensione dell'area emittente. Invece, un processo non-termico, come quello che si sviluppa quando particelle cariche si muovono con velocità relativistiche in un forte campo magnetico, darà origine a una curva altrettanto caratteristica, uno *spettro a legge di potenza*, così chiamato perché l'intensità del flusso a una data energia è proporzionale all'energia stessa elevata a una certa potenza; poiché il numero dei fotoni emessi diminuisce al crescere dell'energia, l'esponente della legge di potenza è sempre negativo. Anche in questo caso, dalla forma della curva

Il disegno mette a confronto le dimensioni della magnetosfera di Geminga con quelle della stella, che è il minuscolo pallino giallo al centro. L'asse magnetico (azzurro) e quello di rotazione (rosso), come si vede, non sono allineati, benché di poco. (P. Caraveo)



## L'AUTRICE

**Patrizia Caraveo** si è laureata in Fisica all'Università di Milano nel 1977. Dopo un periodo all'estero, è approdata all'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica del CNR di Milano, presso il quale lavora tuttora. Ha collaborato a diverse missioni spaziali dedicate all'astrofisica delle alte energie: COS-B, Granat, Compton-GRO. Attualmente è coinvolta nelle missioni Integral (ESA), Swift (NASA), Agile (ASI) e GLAST (NASA). Il suo campo di interesse sono le stelle di neutroni. Ha usato l'astronomia X e ottica per risolvere l'enigma della sorgente Geminga, svelando l'esistenza delle pulsar senza emissione radio.



## Geminga story

*Trent'anni fa la scoperta di una delle più luminose sorgenti gamma del cielo. Luminosa e misteriosa.*

Quando, nel 1973, il satellite SAS-2 completò l'osservazione dell'intero disco galattico nei raggi gamma, ci si accorse, in mezzo all'emissione diffusa del disco, della presenza di tre intense sorgenti localizzate: la prima venne subito identificata con la pulsar della Nebulosa Granchio, la seconda con la pulsar del resto di supernova nella costellazione delle Vele, la terza, posta dalle parti dell'anticentro galattico, denominata *gamma*195+5, non sembrava correlata con alcuna controparte in altre bande spettrali. In particolare, a differenza delle altre due sorgenti, non mostrava alcuna emissione nelle onde radio. Per oltre vent'anni questo della *gamma* 195+5 restò un caso parecchio intrigante: una delle sorgenti gamma più luminose del cielo restava non identificata. Nel 1975, fu Nanni Bignami, allora del CNR di Milano, a battezzarla Geminga con un felice gioco di parole nel quale l'assenza di una controparte per questa sorgente dei Gemelli (Gemini) veniva enunciata con l'espressione "Gh'è minga" del dialetto meneghino, ossia: "Non c'è". Più prosaicamente, Geminga era anche l'acronimo di *Gemini gamma source*.

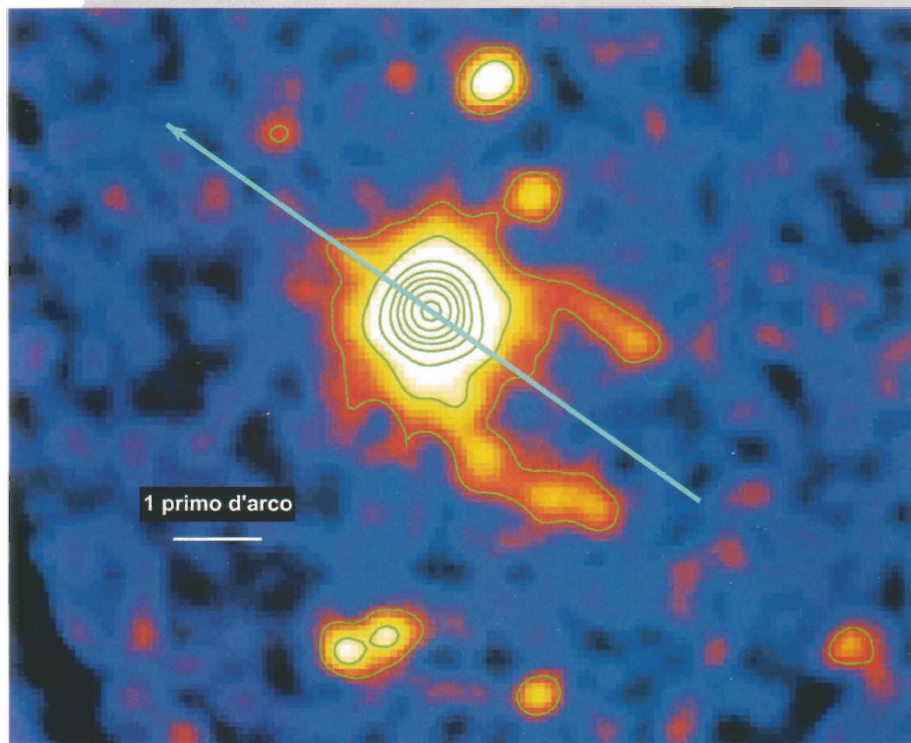
Le ricerche nelle onde radio e nei raggi X non diedero risultati. Bisognò attendere il lancio del satellite europeo COS-B nell'agosto del 1975 perché fosse possibile determinare con maggiore precisione la posizione della sorgente, sempre nei raggi gamma, ora circoscritta entro un cerchio d'errore di poco meno di mezzo grado. La ricerca delle controparti radio e X riprese con vigore, ma ancora senza risultato. Fu solo nel 1983 che il satellite Einstein riuscì nell'impresa di scovare una sorgente puntiforme di raggi X all'interno del cerchio d'errore di Geminga e di prenderne uno spettro, che, mostrando uno scarissimo livello di assorbimento da parte del mezzo interstellare, suggeriva che la sorgente doveva essere piuttosto vicina: forse addirittura meno di 300 anni luce. La persistente mancanza di una controparte ottica faceva sospettare che si fosse in presenza di una stella di neutroni, benché risultasse strano il silenzio nelle onde radio.

Nel 1984, Patrizia Caraveo otteneva con il telescopio CFHT alle Hawaii un'immagine ottica più profonda delle lastre del Palomar Observatory Sky Survey nella quale compariva una debolissima sorgente che pareva dotata di un notevole moto proprio. Era la tanto attesa controparte ottica? Pareva di sì, ma l'illusione durò pochi anni. La vera controparte venne scovata dal gruppo milanese nel 1988 al telescopio di 3,6 m dell'ESO: una stella al limite della visibilità dei telescopi del tempo, caratterizzata da un'inusuale colorazione verdastra.

Nel 1992 il satellite tedesco ROSAT, puntando Geminga scoprì che l'emissione X era pulsata con periodo di 0,237s, tipico di una stella di neutroni relativamente giovane. Il periodo venne subito confermato anche nei raggi gamma dallo strumento EGRET del satellite Compton-GRO. Il gruppo di Bignami e Caraveo da questi dati pervenne a una stima del tasso di allungamento del periodo, dell'intensità del campo magnetico, dell'età (340 mila anni); in seguito, con misure dal suolo e dallo spazio si fissò in 0",17/anno il moto proprio e in 512 anni luce la distanza.

Ormai Geminga era pienamente caratterizzata: si trattava di una stella di neutroni isolata, prototipo delle pulsar radio-quiete, in rapido moto in un mezzo interstellare di bassa densità. Questo è il risultato dell'ultima sorpresa in ordine di tempo che Geminga ha riservato ai due ricercatori milanesi. Nel 2003, osservazioni effettuate con il satellite europeo XMM-Newton hanno infatti messo in luce la presenza di due deboli "code" di radiazione che la stella si lascia alle spalle mentre attraversa l'ambiente galattico e interagisce con esso. Le code sono create dagli elettroni che la magnetosfera della stella di neutroni accelera e disperde nello spazio. (CL)

*Le particelle cariche incanalate verso l'esterno dal campo magnetico di Geminga rilasciano uno "strascico" di radiazione che segna il moto della stella dentro il mezzo interstellare. La ripresa, effettuata nel 2003, è dello strumento EPIC, a bordo del satellite XMM-Newton dell'ESA.*





i fisici estraggono informazioni importanti, come l'energia delle particelle emittenti e l'intensità dei campi magnetici in cui sono immerse.

In una stella di neutroni, tutto è reso più complicato dalla geometria del sistema. Una stella di neutroni pulsa perché l'asse del suo campo magnetico dipolare è disallineato rispetto all'asse di rotazione. Non si tratta di una situazione di per sé anomala: neppure l'asse del campo magnetico della Terra coincide esattamente con l'asse di rotazione e la cosa non ci stupisce più di tanto.

Ovviamente, ogni stella di neutroni è un caso a sé e l'angolo tra asse magnetico e asse di rotazione può assumere un valore qualunque tra i due estremi di  $0^\circ$  (quando si parla di un "rotatore allineato") e  $90^\circ$  ("rotatore obliquo"). Come se non bastasse, bisogna tenere conto anche della nostra posizione rispetto alla stella, quindi dell'angolo che la linea di vista fa con gli assi di rotazione e magnetico. La combinazione di questi angoli e la distribuzione delle regioni emittenti, vuoi sulla superficie della stella, vuoi nella sua magnetosfera, sono responsabili della forma della curva di luce che osserviamo da ogni stella di neutroni.

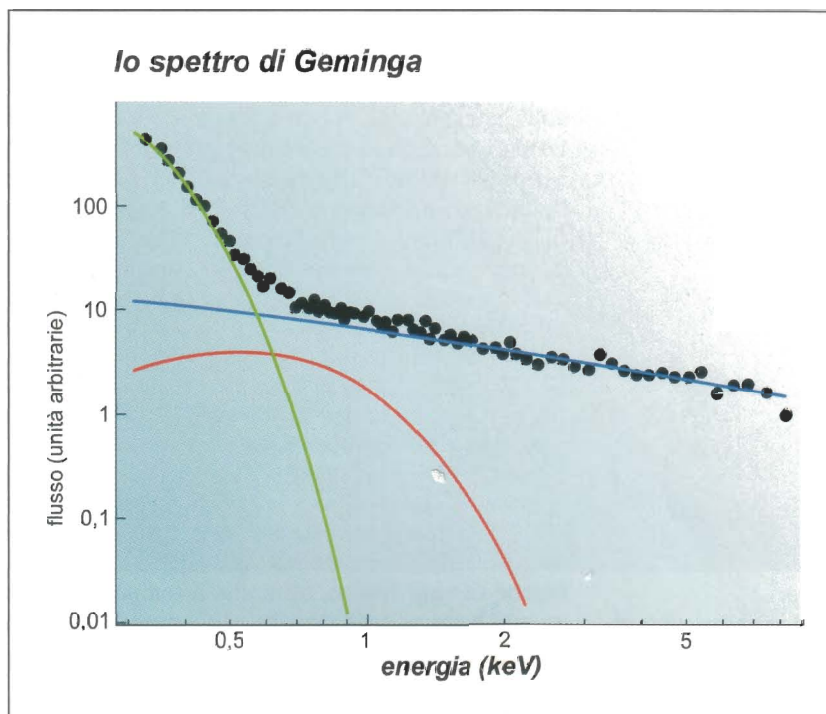
Un problema con molte incognite, dunque, reso ancora più difficile dal fatto che la rotazione della stella può portare in primo piano, oppure nascondere, regioni diverse in momenti diversi, in modo tale che la miscela di processi termici e non-termici cambia in continuazione, in funzione della rotazione della stella, quella che gli astronomi chiamano la fase\*<sup>1</sup>.

Fino ad ora, solo la pulsar presente nel celebre resto di supernova che è detto Nebulosa Granchio (M1) aveva fatto registrare abbastanza fotoni da permettere l'analisi del comportamento in funzione della fase. Per tutte le altre pulsar, il numero dei fotoni raccolti era troppo esiguo affinché si potesse effettuare un adeguato studio statistico e, nel concreto, bisognava accontentarsi di costruire gli spettri medi, dai quali cercare di ottenere qualche indicazione sui meccanismi responsabili dell'emissione. Così facendo si era giunti a dividere le stelle di neutroni in due gruppi: le stelle giovani, che mostrano solo emissione di natura non-termica, e le stelle di mezza età, dove è presente sia l'emissione termica sia quella non-termica.

Il satellite XMM-Newton, grazie ai suoi grandi specchi, e quindi alla maggiore efficienza di raccolta dei fotoni X, ha cambiato completamente il panorama osservativo. E Geminga ne è la prova più lampante.

**T**orniamo alla nostra sorgente e cominciamo a costruire un modello che sappia riprodurre lo spettro, cioè la distribuzione di tutti i fotoni che sono stati rivelati in funzione della loro energia. Lavori precedenti ci suggeriscono di tentare di descriverlo come il risultato della somma di due contributi: un corpo nero più di una legge di potenza. Il corpo nero, che interessa quasi tutta la superficie della stella, dovrebbe rappresentare l'emissione termica della superficie a una temperatura di circa mezzo milione di gradi, mentre la legge di potenza dovrebbe essere riconducibile alle particelle cariche che vengono accelerate dai campi elettrici indotti dalla rapida rotazione della stella magnetizzata.

Così facendo, ci accorgiamo però che il risultato non è del tutto soddisfacente; la situazione migliora quando, con felice intuizione, proviamo ad aggiungere una terza componente, anche questa di corpo nero, che attribuiamo ipoteticamente all'emissione termica di una parte limitata della superficie stellare, una regione che si trova ad avere una temperatura diversa dal resto. L'accordo è



Lo spettro di Geminga registrato dallo strumento EPIC. I dati osservati vengono ben riprodotti da un modello nel quale sono presenti due sorgenti termiche a temperature rispettivamente di 0,5 milioni di gradi (curva verde) e 2 milioni di gradi (curva rossa) e una sorgente non-termica, con uno spettro a legge di potenza, che diviene dominante a energie dei fotoni maggiori di 2 keV (curva blu). Se la distanza della sorgente è nota, come nel caso di Geminga (500 anni luce), allora, assunta per una sorgente termica una certa temperatura, è possibile risalire all'area occupata dalla più calda delle due sorgenti termiche.

\*<sup>1</sup> La fase viene espressa con un numero da 0 a 1 ed esprime la frazione del periodo. Per esempio, la fase 0,25 di un fenomeno periodico indica che si è a un quarto del periodo; 0,5 che si è giusto a metà periodo, ecc.

buono quando proviamo con una temperatura di circa 2 milioni di gradi, ma ci lasciano parecchio perplessi le dimensioni che dovrebbe avere questa regione: sembrerebbe infatti una macchia calda di poche decine di metri quadrati, veramente un'inezia sulla pur piccola superficie di una stella di neutroni!

È noto ormai da un decennio che Geminga pulsa con periodo di circa un quarto di secondo. I dati dello strumento EPIC possono sicuramente dirci molte cose sulla forma della curva di luce, anche se il pur potente telescopio dell'XMM-Newton raccoglie da Geminga solo un fotone ogni secondo circa. Per studiare il comportamento della sorgente nel corso di un periodo di 237 ms bisogna dunque ricorrere al ripiegamento in fase: si misura il tempo d'arrivo  $t$  di ciascun fotone, si fa la differenza tra questo e un generico tempo  $t_0$  di riferimento, per esempio l'inizio dell'osservazione, e si divide il risultato per il periodo di rotazione della stella (in altre parole si calcola quante rotazioni complete la stella ha compiuto dal tempo  $t_0$  a quello d'arrivo del nostro fotone). Supponiamo di ottenere 32.427,345. La parte intera rappresenta il numero di rotazioni compiute, la parte decimale ci dice in che preciso attimo del 32.428-esimo giro la stella si trovava nel momento in cui ha emesso il fotone. Diciamo allora che il fotone è stato emesso alla fase 0,345 di quella rotazione. Occorre fare questo calcolo per ciascuno dei 53 mila fotoni rivelati da EPIC per assegnare a ciascuno la precisa fase d'arrivo. A questo punto possiamo costruire un istogramma delle fasi di arrivo per ottenere la *curva di luce* della nostra sorgente, vale a dire la curva che esprime la variazione della luminosità della sorgente in funzione della fase.

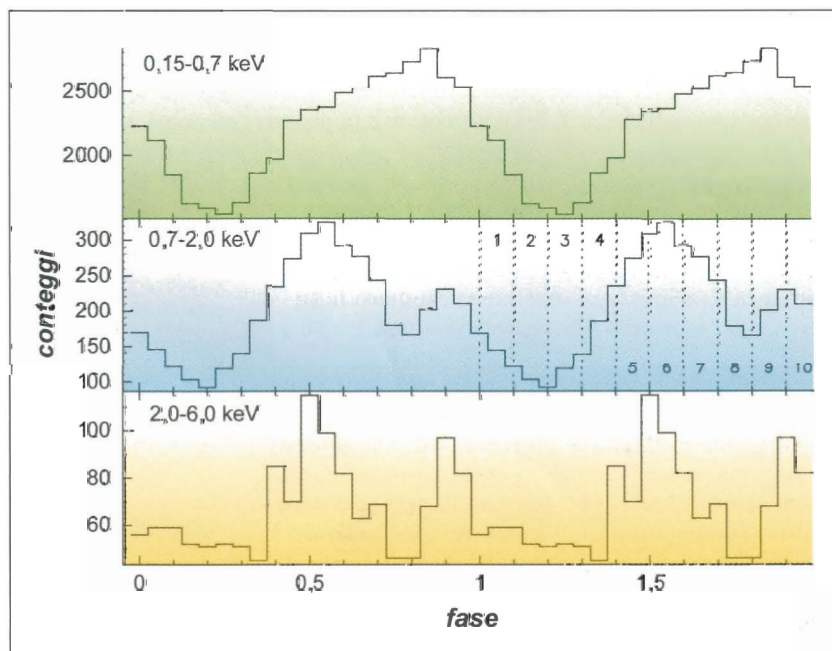
Poiché di ogni fotone, oltre che il tempo di arrivo, abbiamo anche l'informazione riguardante l'energia, possiamo sbizzarrirci a costruire le curve di luce considerando indifferentemente il contributo di tutti i fotoni, qualunque sia la loro energia, oppure selezionandoli in base all'energia per ricavare curve di luce più specifiche. Ci è sembrato naturale utilizzare l'informazione ricavata dallo spettro per costruire tre curve di luce focalizzate sulle tre diverse componenti che abbiamo individuato in precedenza: in tal modo, la prima curva seleziona solo i fotoni dovuti al corpo nero "tiepido" che sembra venire da buona parte della stella; la seconda seleziona l'intervallo di energia in cui emerge il picco d'emissione della piccola "macchia calda"; la terza, infine, riguarda solo la componente non-termica.

Non occorre avere un occhio particolarmente esercitato per rendersi conto che le tre curve sono molto diverse tra loro. Se è vero che il minimo sembra ricorrere nel medesimo intervallo di fase, i massimi si presentano a fasi diverse. Mentre la stella completa un giro (fase da 0 a 1) si nota che l'importanza relativa delle tre componenti varia sensibilmente. Non ci è restato allora che dividere la curva di luce in diverse parti e analizzare gli spettri singolarmente, in funzione delle varie fasi. È questa la novità assoluta del nostro lavoro.

L'abbondanza di fotoni ci ha permesso di suddividere la curva di luce in 10 parti di uguale durata. In altre parole, per ognuna delle circa 400 mila rotazioni compiute da Geminga mentre XMM la osser-

vava, selezioniamo solo il primo decimo della rotazione, il secondo decimo e così via. In pratica, è come se avessimo diviso la sfera di Geminga in "spicchi" di  $36^\circ$  ciascuno che ora possiamo confrontare tra loro. Gli spettri sono effettivamente diversi. Le variazioni

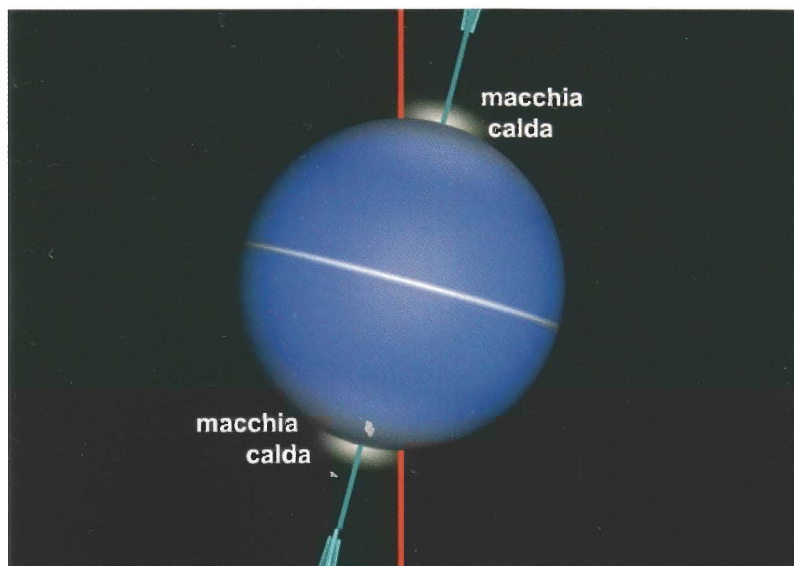
*La curva di luce di Geminga in tre distinte bande spettrali. Il grafico rappresenta due rotazioni complete della stella (la fase va infatti da 0 a 2) e viene riportata la suddivisione in dieci parti del periodo adottata dagli autori che, in un certo senso, corrisponde alla suddivisione in dieci "spicchi" della sfera stellare, utile per realizzare uno studio di dettaglio. La curva in alto seleziona il contributo del corpo nero a 0,5 milioni di gradi, ossia della quasi totalità della superficie della stella di neutroni (meno le regioni polari che sono più calde); quella intermedia riguarda soprattutto i fotoni della piccola "macchia calda" (la calotta polare); quella in basso rappresenta il contributo della componente non-termica. Si noti come il minimo della curva di luce ricorra sempre alla medesima fase nelle tre bande, mentre invece i massimi si presentino in fasi diverse.*





più marcate si registrano tra gli spettri della fase in cui si hanno i minimi nella curva di luce e quelli degli “spicchi” in cui si registrano i massimi; in particolare, si notano differenze di flusso di quasi un ordine di grandezza nell’intervallo spettrale fra 1 e 2 keV.

È la prima volta che si vede un effetto simile nell’emissione di una stella di neutroni, ma ancora non è tutto. Il passo successivo è stato quello di provare a descrivere ciascuno spettro con il modello a tre componenti già utilizzato per il dato globale, due corpi neri più uno spettro a legge di potenza: è così che scopriamo che le variazioni degli spettri in funzione della fase dipendono in larga misura dal contributo piccolo, ma apprezzabile, della “macchia calda”. Nell’intervallo di fase corrispondente al minimo di emissione di Geminga, il piccolo corpo nero caldo non si vede per niente. Poi compare, aumenta di dimensioni fino a circa 120 m di diametro (ipotizzando che sia di forma circolare) per poi tornare a decrescere. Anche le altre componenti variano, ma la “macchia calda” è quella che dimostra la variabilità più marcata.



**A** cosa possiamo attribuire la “macchia calda” e perché varia in questo modo? Essa potrebbe essere dovuta al riscaldamento dei poli della stella di neutroni da parte delle cosiddette *correnti di ritorno* della magnetosfera. La rotazione degli elevatissimi campi magnetici delle pulsar inducono campi elettrici altrettanto elevati che possono accelerare le particelle cariche (tipicamente elettroni) ad altissime energie. La presenza dei campi magnetici fa sì che le particelle emettano radiazione, soprattutto nel dominio dei raggi gamma più energetici. Neppure i raggi gamma, però, attraversano indenni l’ambiente tipico delle immediate vicinanze di una stella di neutroni e infatti si materializzano in una coppia elettrone-positrone che, a loro volta, emetteranno raggi gamma di alta energia che di nuovo si materializzeranno, e così via. In tal modo, si vengono a produrre nubi di elettroni e di positroni che vengono incanalati dai campi elettrici e magnetici. Particelle di una certa carica vanno in una direzione, diciamo verso l’esterno, particelle di segno opposto vanno in senso contrario, quindi verso l’interno. Noi pensiamo che le particelle che si incanalano verso l’esterno siano responsabili dello “strascico” di radiazione di cui si diceva più sopra. Invece, quelle che vanno verso l’interno nient’altro possono fare che colpire la superficie della stella di neutroni dove depositeranno la loro energia, riscaldandola. Ecco come si forma, o si potrebbe formare, la “macchia calda” che vediamo apparire e scomparire. L’impatto, naturalmente, avviene negli immediati dintorni dei poli magnetici.

L’XMM-Newton da un lato ha scoperto lo “strascico” creato dalle particelle di alta energia incanalate verso l’esterno, dall’altro “vede” l’effetto delle particelle di segno opposto che, convogliate dal campo magnetico, colpiscono la stella e surriscaldano la regione polare. Ora è il momento di venire a patti con la geometria di Geminga. Quante sono le “macchie calde” che vediamo? Osserviamo un solo polo, oppure due?

Il raggio della calotta polare, calcolato dai teorici chiamando in causa la geometria delle linee del campo magnetico e la velocità di rotazione della stella, dovrebbe essere poco meno di 300 m nel caso di Geminga. Poiché la nostra macchia non supera mai i 60 m di raggio dobbiamo pensare che la vediamo parecchio di striscio, con un’inclinazione di un’ottantina di gradi. Se questa interpretazione fosse corretta, Geminga dovrebbe essere un rotatore quasi allineato e la nostra linea di vista dovrebbe essere quasi perpendicolare all’asse di rotazione. Ovviamente, nessuno è mai andato a misurare quanto sia effettivamente estesa la calotta polare di una stella di neutroni e quindi non possiamo giurare su questa interpretazione. Alternativamente, potremmo cercare di usare i nostri dati per misurare le vere dimensioni della calotta polare di una stella di neutroni, passando attraverso l’uso di una matematica non proprio semplice.

L’applicazione di questo tipo di analisi ad altre stelle di neutroni riserverà sicuramente altre sorprese. Siamo appena all’inizio di quello che potrebbe essere un nuovo capitolo nella fisica delle stelle di neutroni isolate e di sicuro, com’è nel suo stile, Geminga è riuscita a stupirci ancora una volta. ■

*Per una stella con le caratteristiche di Geminga si calcola che la calotta polare occupi una regione circolare con un raggio di circa 300 m. Tale calotta è molto più calda del resto della superficie, perché le particelle cariche che cadono su Geminga vengono incanalate dalle linee magnetiche verso i poli e vi impattano violentemente. Nel modello proposto dagli autori, la “macchia calda” che si forma ai poli potrebbe avere una temperatura di 2 milioni di gradi e verrebbe vista sempre in modo obliquo dall’osservatore terrestre. Da ciò deduciamo che stiamo guardando Geminga quasi perfettamente da sopra il suo equatore. (P. Caraveo)*