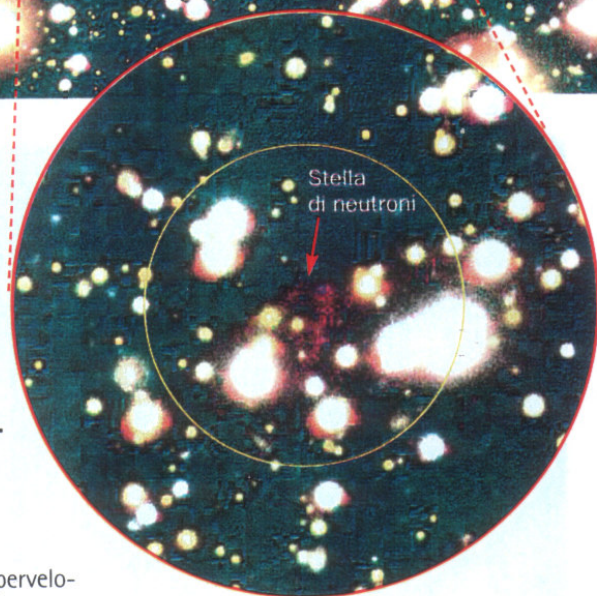


# Le pulsar **OGGI**

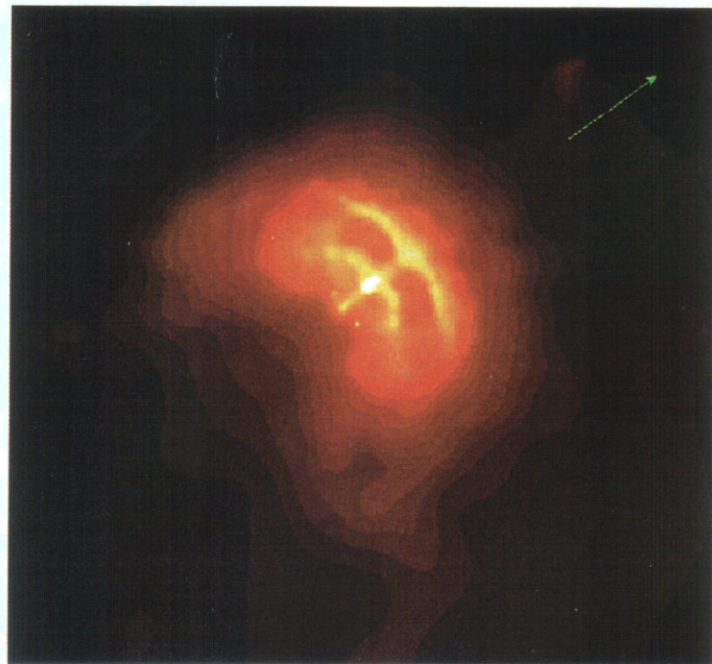
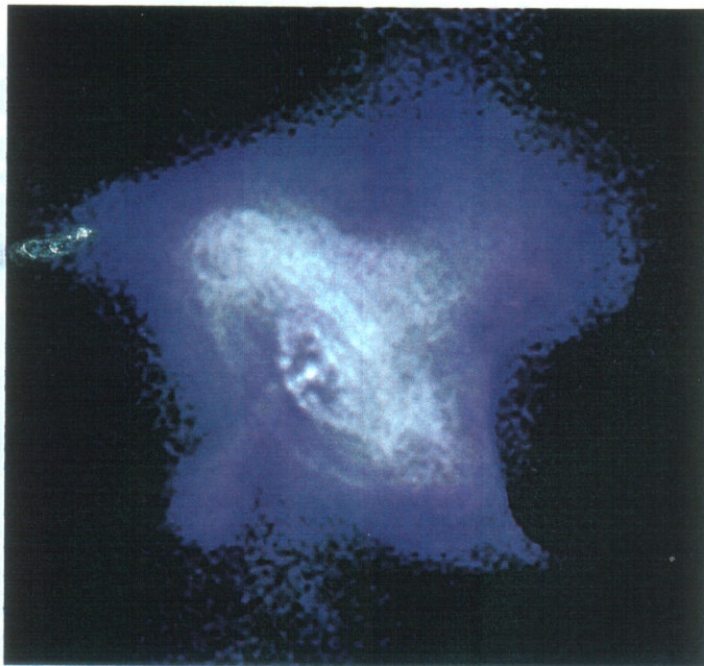
Oggi conosciamo più di 1400 pulsar e il numero continua a salire, mano a mano che le ricerche vengono ulteriormente affinate e i radiotelescopi equipaggiati con sistemi più potenti e computer più veloci.

Si tratta, per la grande maggioranza, di pulsar isolate, con periodi che vanno da 1,557 ms (per la prima pulsar ultrarapida, che è rimasta anche la più veloce) fino a 8 s, oppure di pulsar in sistemi binari con altre pulsar, con stelle normali, con stelle in evaporazione. Per la precisione, le pulsar binarie sono circa una sessantina, quelle superveloci 80, mentre le pulsar trovate negli ammassi globulari si aggirano sulla cinquantina. Ovviamente non stiamo parlando di

classi separate: la metà delle pulsar superveloci sono in sistemi binari e la grande maggioranza delle pulsar negli ammassi globulari sono superveloci. Si stima che il campione finora rivelato costituisca meno dell'1% della popolazione totale delle pulsar attive nella nostra Galassia, le quali ci sfuggono vuoi perché troppo lontane (quindi troppo deboli) vuoi perché la loro emissione non è diretta verso di noi. La distribuzione galattica delle pulsar note mo-



*Non tutte le stelle di neutroni ci appaiono come pulsar. In queste immagini, riprese dal Very Large Telescope dell'ESO, si vede la regione del cielo in cui si trova la stella di neutroni denominata RX J1856.5-3754, scoperta con osservazioni in raggi X e poi individuata anche in ottico, e indicata dalla freccia nell'ingrandimento. La stella si muove con una velocità di circa 100 km/s e produce un'onda d'urto nel mezzo interstellare che attraversa, visibile come una nebulosità ad arco nel cerchio dell'immagine ingrandita.*

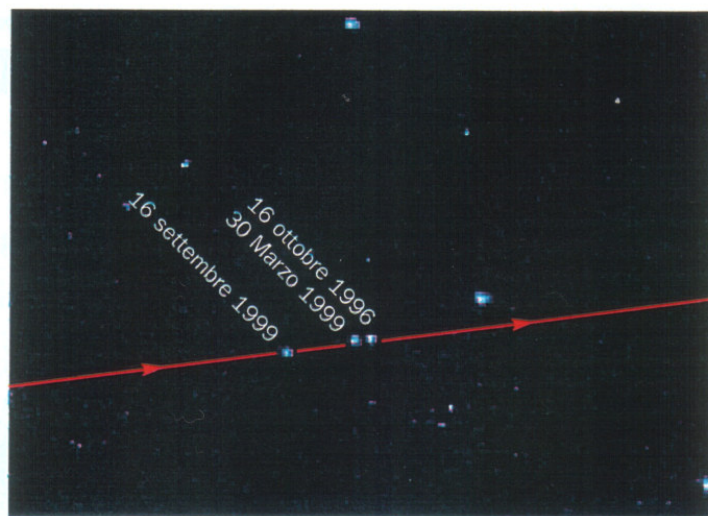
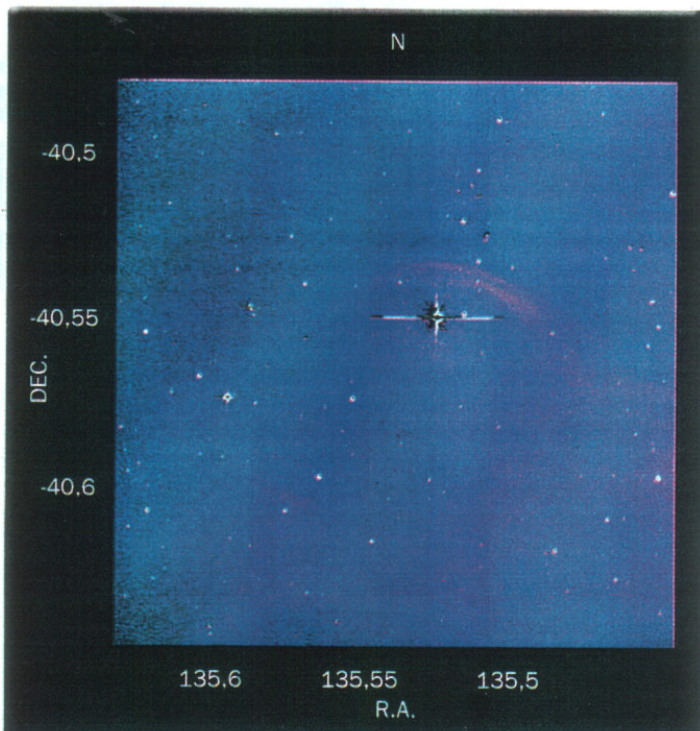


stra che la loro altezza rispetto al piano della Galassia è di circa 500 pc, molto maggiore di quella delle stelle massicce dalle quali hanno avuto origine e dei resti di supernova. La ragione di questa particolare distribuzione va ricercata nell'elevata velocità di traslazione della quale sono dotate le stelle di neutroni. Piccole asimmetrie nell'esplosione della supernova sono sufficienti per conferire alla stella velocità di qualche centinaio e fino a un migliaio di km/s. Questo permette alle pulsar di coprire grandi distanze mentre sono ancora attive nelle onde

radio e, in media, di allontanarsi in modo significativo sia dal punto dove è avvenuta l'esplosione della supernova, sia dal piano galattico. Il moto proprio è un parametro molto importante nella fenomenologia delle pulsar. Recentemente è stato notato che sia nel caso della pulsar nella Nebulosa Granchio che per la pulsar delle Vele sembra esserci un buon allineamento tra la direzione dei moti propri delle pulsar e i getti che si vedono emergere nei raggi X, comunemente associati con gli assi di rotazione dei due oggetti. Questo porterebbe a pensa-

*Immagini X ottenute dal satellite Chandra delle regioni immediatamente circostanti la pulsar delle Vele, a destra, e quella del Granchio, a sinistra. In tutti e due i casi la pulsar appare circondata da anelli lungo il cui asse viene emesso un getto, che risulta allineato con l'asse di rotazione delle pulsar stesse e con la direzione del loro moto proprio.*

re che il meccanismo responsabile delle alte velocità delle pulsar non sia casuale, ma agisca di preferenza lungo l'asse di rotazione della stella di neutroni.



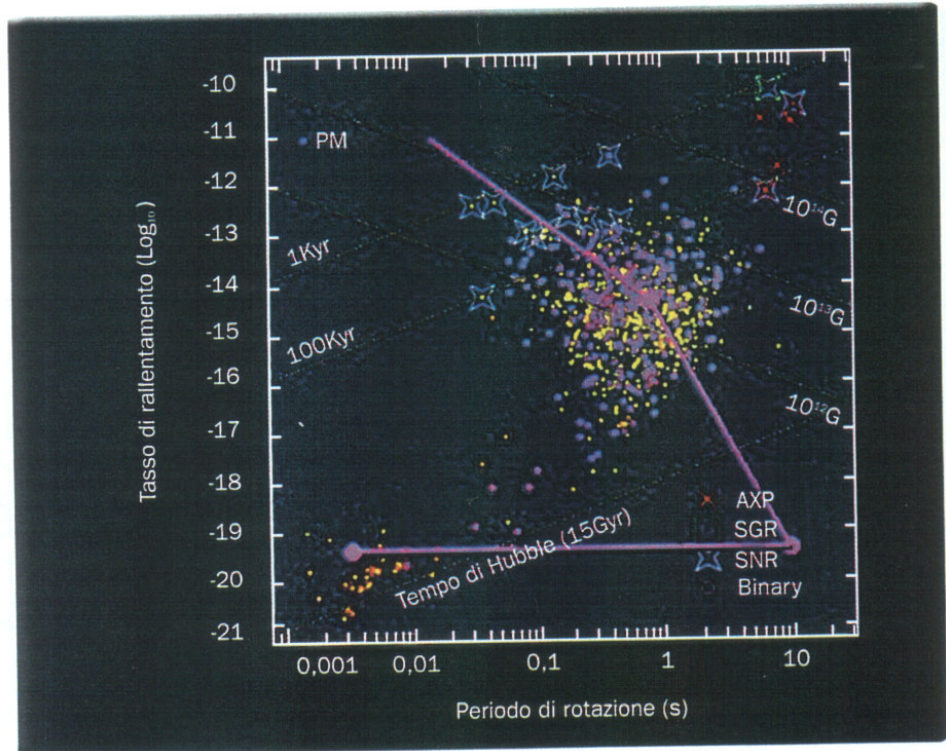
*Queste immagini illustrano il veloce moto proprio delle stelle di neutroni. Quella sopra mostra il moto proprio dedotto da osservazioni del Telescopio Spaziale Hubble di RX J185635-3754, una stella di neutroni isolata che si trova circa 200 anni luce di distanza, nella costellazione della Corona Australe. La seconda, a lato, è stata ottenuta dal telescopio danese di 1,5 m di La Silla, ed è centrata sulla stella HD77581, compagna della pulsar X chiamata Vela XI (invisibile in questa immagine ottica); si vede chiaramente l'onda d'urto dalla tipica forma ad arco parabolico sopra la stella, prodotta dal suo veloce moto attraverso il mezzo interstellare.*

In questo grafico sono riportati, in ascissa, il logaritmo del valore del periodo di rotazione in secondi, e in ordinata sempre il logaritmo del rallentamento in sec/sec; delle pulsar note; le linee trasversali indicano i valori del campo magnetico e dell'età delle pulsar; la linea viola ne indica il percorso evolutivo. Come spiegato nel testo l'evoluzione delle pulsar le porta dalla zona più in alto, dove si trovano le pulsar giovani, verso la macchia centrale, mentre in basso a sinistra si trovano le pulsar superveloci, riciclate nei sistemi binari.

Un buon modo di avere un colpo d'occhio collettivo sulla famiglia delle pulsar radio è fornito dal grafico di pag.25 che mette in ascisse il periodo di rotazione e in ordinata il tasso di rallentamento. È così possibile isolare le varie componenti della grande famiglia. Vista la relazione che lega il campo magnetico al periodo e al tasso di rallentamento, è possibile inserire in questo grafico le linee di campo magnetico costante o di età costante. In basso a sinistra troviamo le pulsar velocissime, caratterizzate da periodi di pochi millesimi di secondo e da rallentamenti molto contenuti. Si pensa che provengano evolutivamente dalla "macchia" che rappresenta le pulsar classiche, per accelerazione all'interno di un sistema binario seguendo il percorso denotato come *spin-up*. Il cerchietto o l'ellisse intorno ai punti denotano le pulsar in sistemi binari con orbita circolare o ellittica.

Le pulsar più in alto sono caratterizzate da periodi molto corti e da grandi rallentamenti: sono le più giovani ed energetiche. La "macchia" centrale rappresenta la grande maggioranza delle pulsar, con periodi intorno alla frazione di secondo. Le stelle di neutroni nascono in alto a sinistra, con periodi piccoli e intensi campi magnetici; poi, rallentando, si muovono orizzontalmente verso periodi più lunghi. Un affievolimento del campo magnetico, previsto da diverse teorie, fa muovere le pulsar verso il basso, perché causa una diminuzione del tasso di rallentamento.

Si pensa che le pulsar siano in grado di produrre emissione radio fino a quando il rallentamento (il decadimento del campo magnetico) non le porti ad attraversare la "linea della morte". Questo avviene per pulsar con età di decine o centinaia di milioni di anni. Non si conoscono pulsar classiche più vecchie di questo limite. Non dimentichiamo, però, che le pulsar superveloci sono, in questo schema, molto più vecchie ma sono state "ringiovanite" dal processo di accrescimento di materia all'interno di un sistema binario. Pulsar già al di là della "linea della morte" possono quindi tornare visibili seguendo la linea di accelerazione e finire la loro esistenza in basso a sinistra nella classe delle pulsar superveloci.



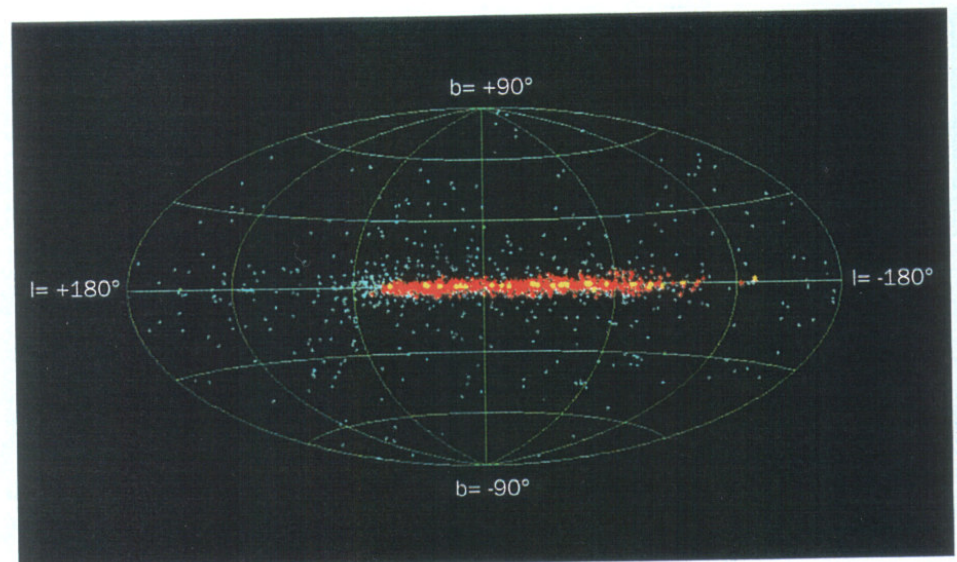
## Pulsar e resti di supernova

Alle ricerche proseguirono, si scandagliarono in profondità i resti di supernova più significativi senza trovare l'ombra di una pulsar. Nemmeno i resti di supernova storici, come quelli delle supernovae di Tycho e di Keplero, rivelarono la presenza di resti compatti dell'esplosione della stella pro-

genitrice. Venivano trovate dozzine di pulsar un po' ovunque nel cielo, ma non all'interno dei resti di supernova dove avrebbero dovuto essere. L'emissione a faro poteva spiegare un certo numero di "assenze", come effetto di selezione imputabile all'orientazione sfavorevole del cono di emissione. Ciononostante, la mancanza di al-

genitrice. Venivano trovate dozzine di pulsar un po' ovunque nel cielo, ma non all'interno dei resti di supernova dove avrebbero dovuto essere. L'emissione a faro poteva spiegare un certo numero di "assenze", come effetto di selezione imputabile all'orientazione sfavorevole del cono di emissione. Ciononostante, la mancanza di al-

*Distribuzione delle pulsar in coordinate galattiche. In rosso sono indicate le pulsar recentemente scoperte da una survey del radiotelescopio di Parkes, in Australia, in giallo quelle più giovani mentre i punti azzurri indicano invece tutte le pulsar note che, come si vede, si trovano anche lontano dal piano galattico, a causa dell'alta velocità di traslazione di cui sono dotate.*



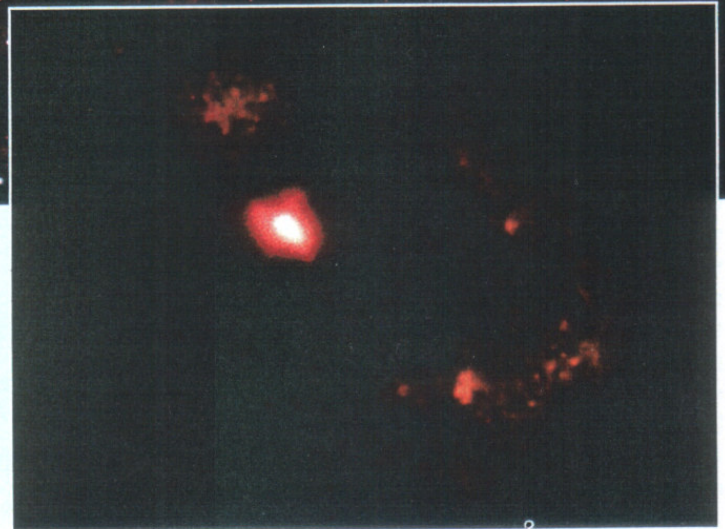
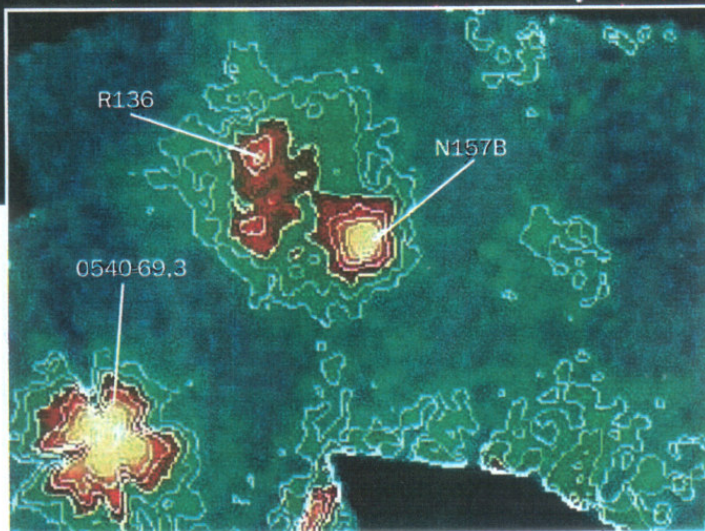
tre associazioni diventava imbarazzante. Una boccata di ossigeno venne dall'astronomia X grazie alla quale, nel 1983, vennero scoperte due pulsar giovani complete di un bel resto di supernova. Si tratta della PSR 1509-58, subito rivelata anche nelle onde radio, caratterizzata da un periodo di 150 ms, e della PSR 0540-69, una pulsar con periodo di 50 ms nella Grande

Nube di Magellano, eccezionalmente simile a quella della Nebulosa Granchio. Tale pulsar è stata studiata per anni solo in ottico e nei raggi X, ed è stata rivelata come sorgente radio pulsante solo dieci anni dopo. Sempre i raggi X rivelarono infine la presenza di una pulsar veloce (circa 39 ms) nel resto di supernova CTB80, il che porta il totale delle associazioni tra pul-

sar e resti di supernovae a cinque: obiettivamente un numero esiguo.

Gli astrofisici degli anni '90 per aumentare le possibilità di successo hanno utilizzato la tecnica delle ricerche *ad hoc*. Sono stati selezionati resti di supernova particolarmente interessanti e si sono fatte ricerche di pulsar sia all'interno che nelle immediate vicinanze. Oppu-

*La pulsar PSR 0540-69 è associata a un resto di supernova che si trova nella Grande Nube di Magellano, nei pressi della Nebulosa Tarantola al cui centro si trova il giovane ammasso di stelle R136. L'immagine in ottico mostra la nebulosa, ripresa dal Very Large Telescope dell'ESO, mentre l'altra (in basso a sinistra), ripresa nei raggi X, evidenzia la presenza nei pressi di R136 dei resti di supernova N157B e SNR 0540-69,3, al cui interno si trova la pulsar. L'emissione in X della pulsar è visibile come una macchia luminosa nell'immagine qui sotto, ottenuta dal satellite Chandra.*



re si sono studiate in dettaglio regioni intorno a pulsar un po' speciali, alla ricerca di eventuali strutture anomale eventualmente sfuggite a ricerche precedenti. I successi non sono mancati e tra il 1990 e il 1993 si sono registrate sette nuove associazioni. Siamo così arrivati a quota dodici e possiamo cominciare a fare qualche considerazione di carattere generale.

Prima di tutto, è da notare la grande varietà dell'aspetto dei resti di supernova. Si passa dai resti "pieni" come quello del Granchio e del suo gemello nella Grande Nube di Magellano, a gusci quasi perfetti giù giù fino a una vasta scelta di gusci parziali. Le dimensioni angolari dei gusci variano in funzione della loro età. Poiché l'onda d'urto si espande nel mezzo interstellare, resti di età simile avranno dimensioni reali paragonabili, ma le loro dimensioni apparenti saranno diverse per via della distanza: a parità di età, resti vicini appariranno più grandi di resti lontani. Consideriamo per esempio la Nebulosa Granchio a 2 kpc da noi e il suo gemello nella Grande Nube di Magellano a circa 50 kpc. Il fattore 25 di differenza nella distanza si traduce in un analogo fattore nelle dimensioni angolari degli oggetti: ai 6' della Nebulosa Granchio corrispondono una decina di secondi d'arco nella Grande Nube di Magellano.

Un'altra considerazione è legata alle caratteristiche delle pulsar associate ai resti di supernova. È opinione corrente che si tratti di pulsar giovani. In effetti, la giovinezza è il fattore chiave per l'esistenza del resto visto che, dopo qualche decina di migliaia di anni, il guscio non è più riconoscibile come tale perché si è troppo diluito e spezzettato nel mezzo interstellare. Dal momento che l'età della grande maggioranza delle pulsar note è di qualche milione di anni, è evidente che stiamo selezionando i "neonati" della famiglia. A questo punto è lecito chiedersi quante siano numericamente le pulsar neonate e quante siano associate a un resto di supernova. Scopriamo così che quasi tutte le pulsar giovani (sono una dozzina) lo sono.

## Pulsar silenziose

**F**in qui quello che sappiamo sulle stelle di neutroni che rivolgono i loro coni di emissione verso di noi. Ovviamente, la nostra probabilità di vedere l'emissione

dipende dalle dimensioni del fascio di emissione: fascio grande, probabilità grande, fascio piccolo, probabilità piccola. L'evidenza accumulata dai radioastronomi dimostra che

il cono dell'emissione del faro deve essere piccolo; ne consegue che le stelle di neutroni visibili sono solo una piccola frazione del totale. Un migliaio di pulsar radio sono presenti nei nostri cataloghi contro milioni di stelle di neutroni che rivolgono il loro cono di emissione verso altri punti dell'Universo, restando per noi totalmente invisibili.

Questa era l'idea corrente fino a quando l'egemonia radio è stata posta in dubbio dalla misteriosa sorgente gamma Geminga (vedi riquadro a pag. 28) che, pur comportandosi come una pulsar nei raggi gamma e X, non mostrava alcuna emissione nelle onde radio. Era dunque possibile sperare di scoprire stelle di neutroni anche dove i radiotelescopi non riuscivano a vedere niente? Negli ultimi anni si sono moltiplicati gli esempi di sorgenti simili a Geminga, sorgenti di raggi X ma senza emissione radio. Si pensa siano stelle di neutroni perché nessun altro oggetto celeste sarebbe in grado di produrre radiazione in modo così bizzarro.

È strano chiamare pulsar oggetti che non pulsano, ma non bisogna formalizzarsi. Per evitare confusioni, potremmo catalogarli come "pulsar silenziose". Non solo, guardando i risultati delle osservazioni dei satelliti per astronomia X come il ROSAT e, più di recente, il "Chandra" scopriamo che ci sono ormai diversi esempi di resti di supernova con una sorgente X al loro interno, dando ragione, alla fine, a coloro che pensavano che l'astronomia X forniva un ottimo metodo per scoprire pulsar che non dirigono il loro faro verso di noi.

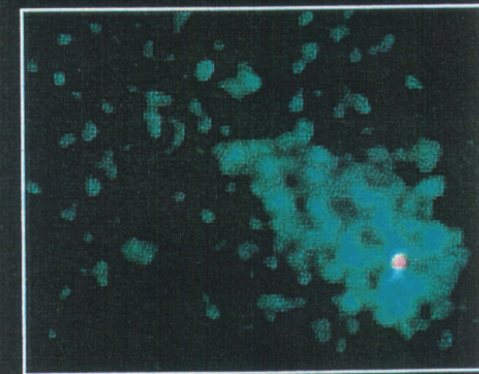
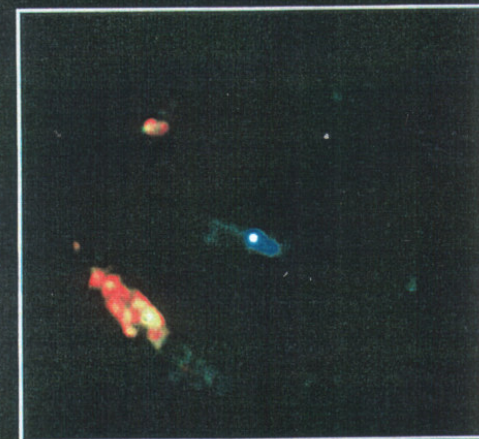
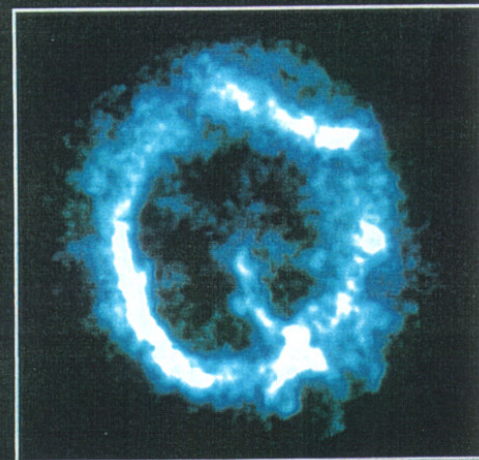
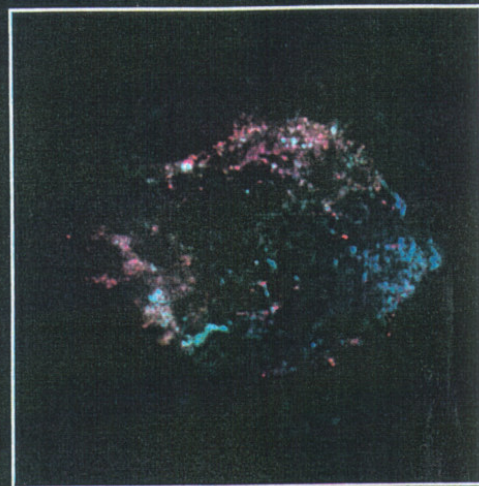
Benché la radioastronomia rimanga saldamente in prima linea nello studio delle stelle di neu-

*Immagine di alcuni resti di supernova che mostrano la grande varietà dell'aspetto di questi residui di esplosioni stellari. Il primo (dall'alto) è il resto di supernova Cas A, ripreso in raggi X dal satellite Chandra, al cui interno è stata individuata una sorgente puntiforme che si pensa essere o una pulsar o un buco nero.*

*Resto di supernova, dalla tipica forma a bolla, ripreso in X dal satellite Chandra: si trova nella Piccola Nube di Magellano ed è denominato E0102-72; anche qui non vi sono tracce di pulsar.*

*Anche il terzo resto di supernova, denominato G11.2-0.3, ha una tipica forma a bolla. In questa immagine X di Chandra si vede bene una possibile stella di neutroni che si trova proprio al centro, residuo di una esplosione stellare osservata dagli astronomi cinesi più di 2.000 anni orsono.*

*Nell'ultimo caso le osservazioni di Chandra hanno rivelato la presenza di una stella di neutroni (il punto più chiaro) nel resto di supernova IC 443, mostrando anche che la stella si sta muovendo a grande velocità.*



## Geminga

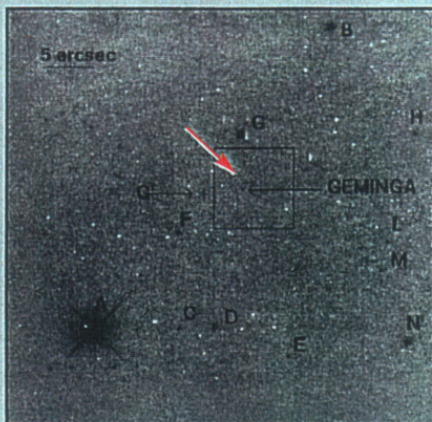
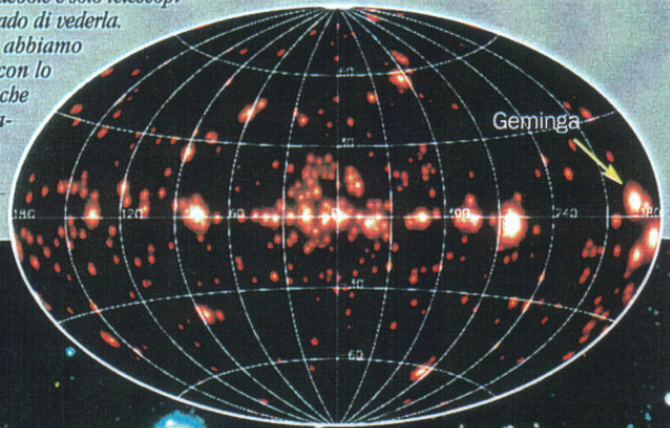
Scoperto nel 1972 dal satellite SAS-2 della NASA come una sorgente di raggi gamma di alta energia nella costellazione dei Gemelli (Gemini-gamma, contratto Geminga), l'oggetto di cui parliamo si dimostrò subito di difficile comprensione. I limiti fisici dell'astronomia gamma, infatti, ne impedivano un posizionamento nel cielo con una precisione sufficiente per l'identificazione in ottico. D'altra parte, la zona di incertezza della provenienza dei raggi gamma, la cosiddetta "scatola d'errore", conteneva oggetti non significativi alle altre lunghezze d'onda. Da qui il secondo (più vero) significato del nome, da leggere in dialetto milanese, con la "g" dura: *Gh'è minga*, "non c'è", "non esiste"...

La sorgente venne osservata a lungo dai satelliti europei per astronomia gamma COS-B che restrinse notevolmente la scatola di errore, che però restava sempre grandissima per gli standard astronomici. Per sbloccare la situazione fu necessaria una osservazione X con il satellite Einstein. Con una serie di fortunate osservazioni si arrivò, nel 1981, alla scoperta di una nuova sorgente X all'interno della scatola di errore gamma permettendo di iniziare anche una ricerca della controparte ottica. Ricerca, tuttavia, che si presentò subito molto più complessa del previsto, proprio a causa, come si capirà anni dopo, della natura peculiare dell'oggetto. Candidati sempre più deboli vennero esaminati e scartati, man mano che si rivelano esser stelle "normali", e quindi certo non in grado di emettere, com'è il caso di Geminga, 1000 volte più energia nei raggi gamma che nei raggi X.

Si arrivò così, nel 1984, con un'osservazione del telescopio franco-canadese delle Hawaii, a concentrarsi sul più debole degli oggetti presenti nella scatola d'errore: venne chiamato G<sup>n</sup> e la sua magnitudine ottica equivale al flusso luminoso di una candela posta sulla Luna e vista dalla Terra. Per l'epoca era forse l'oggetto più debole mai osservato e studiato da Terra. Venne proposto come controparte poiché sembrava che i suoi colo-

*Nel cielo visto attraverso i raggi gamma di alta energia (qui vediamo un'immagine dove la componente diffusa della Galassia è stata rimossa per meglio evidenziare le sorgenti), Geminga (indicata con la freccia) è tra le sorgenti più brillanti, superata solo dalla pulsar delle Vele. Da notare più in basso a destra una sorgente di luminosità di poco inferiore: si tratta della pulsar del Granchio. Nell'immagine di fondo, la regione di Orione e dei Gemelli ripresa nei raggi X. Geminga è una debole sorgente come tante. In ottico, Geminga è una sorgente ancora più debole e solo telescopi molto potenti sono in grado di vederla.*

*Qui (sotto a sinistra) abbiamo un'immagine ottenuta con lo Hubble Space Telescope che riesce a malapena a rivelare la debolissima controparte ottica della brillantissima sorgente gamma.*



colori (cioè la sua magnitudine attraverso diversi filtri) fossero diversi da quelli di una stella normale. Il flusso in ottico risultava 1000 volte minore di quello in raggi X. Questo dato è molto importante: l'unico oggetto in grado di comportarsi in questo modo è una stella di neutroni.

Geminga, però, non ha emissione radio: se dunque è una stella di neutroni, non è una pulsar radio. Siamo forse davanti a una nuova fenomenologia delle stelle di neutroni? Difficile, per qualche anno, immaginare passi avanti significativi: dall'inizio degli anni '80 non c'erano più in orbita Osservatori X o gamma adatti a osservazioni sensibili di Geminga. La svolta decisiva avvenne nel 1992, con la presenza contemporanea in orbita di due nuovi Osservatori per astronomia delle alte energie: il ROSAT e il Gamma Ray Observatory (GRO). Una fortunata osservazione del primo fa vedere che l'emissione X è essa stessa "pulsata": cioè variabile nel tempo in modo continuo e ripetitivo: è la conferma che siamo davanti a una stella di neutroni ruotante su se stessa, in questo caso circa 4 volte al secondo. La stessa legge temporale viene trovata nei dati gamma del GRO, offrendo una brillante conferma della identificazione. Ma i dati gamma dicono molto di più: sfruttando la nostra conoscenza della fisica della stella di neutroni, danno il bilancio energetico globale dell'oggetto, e quindi danno un'idea della sua distanza, che risulta essere sorprendentemente

piccola, per gli standard astronomici, forse poche centinaia di anni luce.

E allora diventano importanti le immagini ottiche prese dal 1984 in avanti: se un oggetto è così vicino, è forse possibile osservarne lo spostamento angolare nel cielo rispetto ad altre stelle, da considerare "fisse" solo perché molto più lontane. Oltretutto, la velocità caratteristica di una stella di neutroni è ben nota, essendo dell'ordine del centinaio di km/s. Con un'osservazione nel novembre 1992 la stellina "G" mostra un significativo spostamento rispetto alle stelle di campo. La

caccia è finita: il dato sul moto proprio assicura che l'oggetto è la vera controparte ottica di Geminga.

Ci accontentiamo? Ovviamente no! Si vorrebbe poter misurare in modo diretto la distanza, con il Telescopio Spaziale Hubble. L'HST è capace di misurare lo spostamento parallattico della stellina, anche se la misura è difficile e si gioca sulle frazioni di pixel. Il valore che si ricava è 500 anni luce e Geminga diventa, di colpo, una delle pochissime stelle di neutroni per le quali sia stato possibile misurare con precisione la distanza.

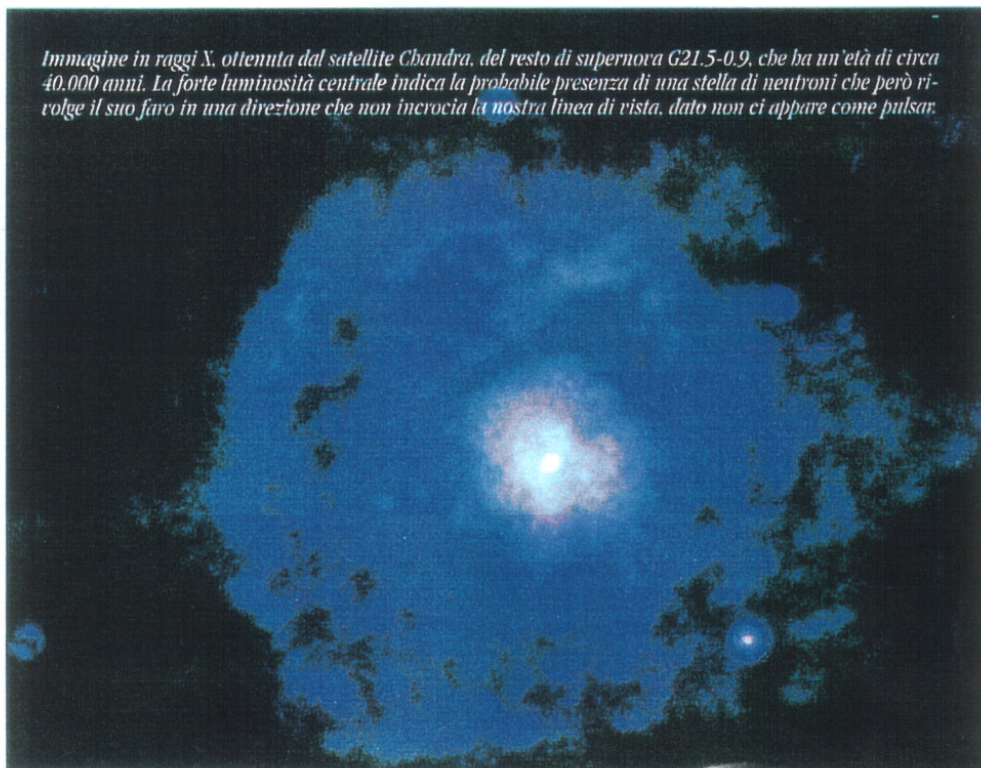


*Immagini ottiche del campo di Geminga dalle quali si capisce che la debole controparte ottica della sorgente X e gamma si muove. Le prime due immagini, sono ruotate ed elaborate per renderle confrontabili con la terza.*



*Il campo di RX J185635-3754, una stella di neutroni isolata nella costellazione della Corona Australe, scoperta nei raggi X nel 1992, qui ripresa dal Telescopio Spaziale Hubble. Se anche questa stella di neutroni ha un campo magnetico che genera un faro di radiazioni, questo faro non punta verso di noi, così che la stella non ci appare come pulsar.*

*Immagine in raggi X, ottenuta dal satellite Chandra, del resto di supernova G21.5-0.9, che ha un'età di circa 40.000 anni. La forte luminosità centrale indica la probabile presenza di una stella di neutroni che però rivolge il suo faro in una direzione che non incrocia la nostra linea di vista, dato non ci appare come pulsar.*



troni isolate, alcune decine di pulsar sono state rivelate a lunghezze d'onda X, ottica e gamma. Precisamente, due dozzine nei raggi X, una decina in ottico e mezza dozzina nei raggi gamma. L'insieme delle sorgenti X contiene gli altri due e gran parte delle pulsar visibili in ottico sono anche sorgenti gamma. Non è un caso che le pulsar rivelate anche in ottico, X e gamma siano sempre le più giovani e con maggiore energia a disposizione. Nel gruppo troviamo la pulsar del Granchio e la sua gemella nella Nube di Magellano, seguite dalla PSR 1509-57, una pulsar di appena 1500 anni di età; poi vengono la pulsar delle Vele, seguita da un gruppetto, denominato scherzosamente "i tre moschettieri" per sottolineare le molte analogie del loro comportamento. Si tratta di tre pulsar di mezza età, intorno a 500.000 anni, abbastanza vicine da essere visibili anche se non particolarmente energetiche, e comprendono la non più misteriosa Geminga, seguita dalla PSR 0656+14 e dalla PSR 1055-52.

La pulsar del Granchio è il prototipo delle pulsar giovani ed energetiche che emettono a tutte le lunghezze d'onda in virtù dello stesso meccanismo, basato sulla radiazione di sincrotrone di particelle cariche in moto in un campo magnetico. La pulsar delle Vele, con i suoi 10.000 anni di età, sta passando dalla giovinezza alla maturità. Ha molto meno energia e il suo comportamento è diverso nelle diverse lunghezze d'onda. A volte, come in ottico o in gamma, si comporta come una pulsar giovane mentre ad altre lunghezze d'onda, come nei raggi X, la sua emissione è riconducibile all'emissione termica della superficie, intorno al milione di gradi. I tre moschettieri rappresentano la maturità delle pulsar: l'energia disponibile è ancora minore e viene fatta confluire di preferenza nel canale gamma; in ottico sono sorgenti debolissime mentre in X brillano in virtù dell'alta temperatura (ricordo dell'esplosione della supernova che ha lasciato un nocciolo caldissimo che, da allora, è andato lentamente raffreddandosi).

Solo la pulsar del Granchio mostra la stessa curva di luce a tutte le lunghezze d'onda. Tutte le altre mostrano invece curve di luce diverse, vuoi perché le emissioni a diverse lunghezze d'onda vengono prodotte in zone diverse della magnetosfera delle pulsar (quindi i coni di emissione formano angoli diversi con l'osservatore), vuoi perché, come in quella delle Vele, subentrano altri meccanismi di emissione. Quella che rimane costante, ovviamente, è la periodicità, che è la firma di ogni pulsar.

*Curve di luce di alcune pulsar a diverse frequenze. Come si vede, per alcune di queste l'impulso è stato rivelato solo alle frequenze gamma o X, mentre spesso è assente in ottico.*

