



Verso la **SPIEGAZIONE**

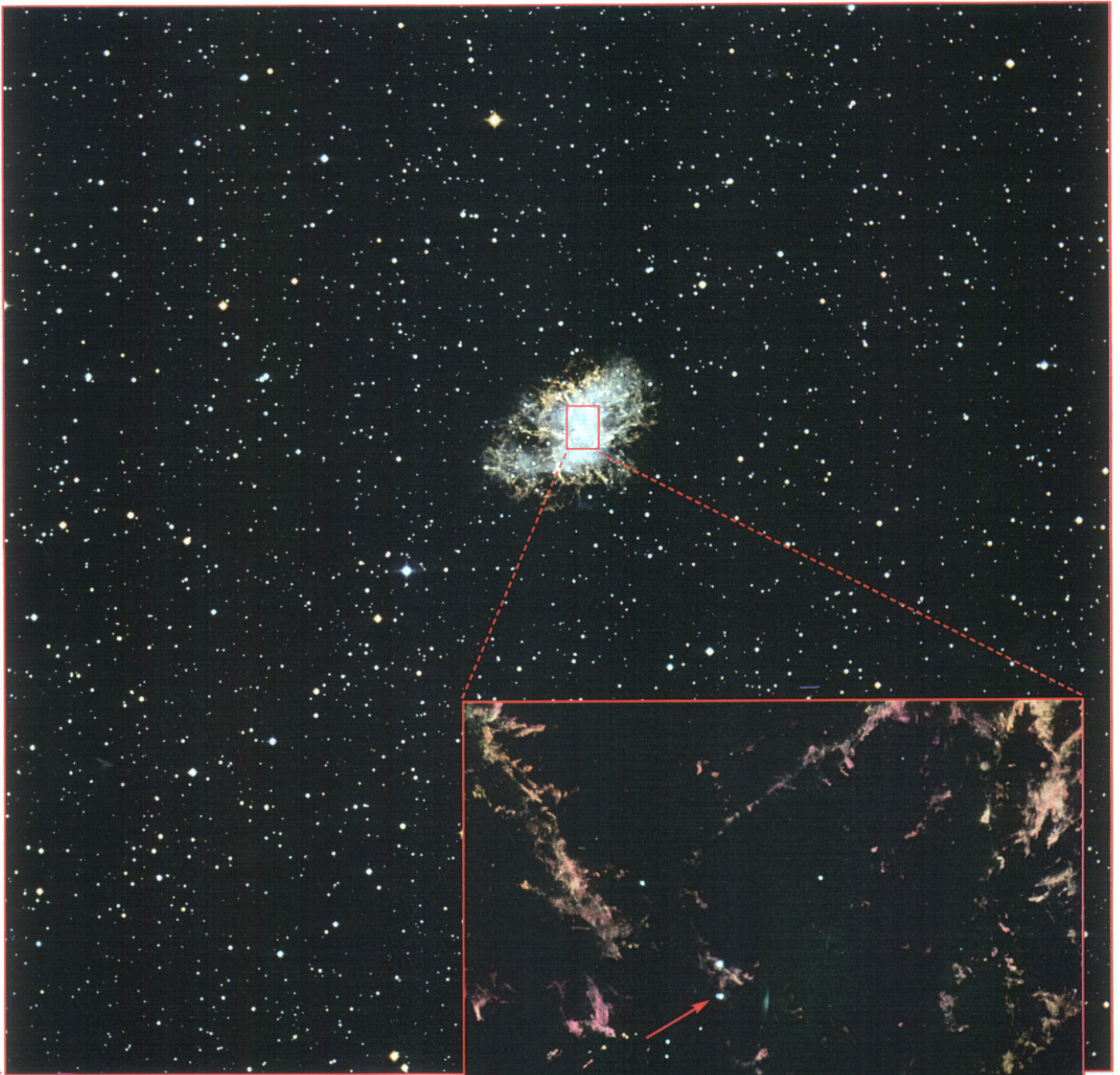
Quando si scopre una nuova classe di sorgenti si cerca di organizzarle in qualche tipo di schema. Gli astrofisici avevano ora due oggetti chiaramente molto più veloci di tutti gli altri quanto a rotazione su se stessi, i soli che si trovavano all'interno di resti di supernova.

Cosa poteva accomunare questi oggetti, evidentemente molto simili, ma con periodi di rotazione così diversi? La risposta venne da una nuova osservazione della pulsar del Granchio che mostrò che il periodo di rotazione stava cambiando e risultava leggermente più lungo, come se l'oggetto stesse rallentando. Si tratta di un effetto minuscolo: la pulsar (catalogata con la sigla PSR seguita dalle sue coordinate celesti, in questo caso: PSR 0531+21) perde circa un milionesimo della sua velocità di rotazione ogni giorno. Un effetto piccolo ma sufficiente per legare le due pulsar veloci, che sono giovani e ancora immerse nel resto della supernova dalla quale erano nate, alle pulsar lente, il cui periodo più lungo è il risultato di milioni di anni di continuo rallentamento durante i quali, tra l'altro, il resto gassoso della

supernova di origine aveva avuto il tempo per diluirsi nel mezzo interstellare fino a sparire completamente.

Bisogna notare che si era giunti a queste conclusioni senza aver mai visto una pulsar: i radiotelescopi ci permettevano solo di ascoltare la loro emissione periodica. Come si può fare astronomia senza "vedere" gli oggetti che si studiano? Sfruttando l'informazione temporale (vedi riquadro a pag. 9) è possibile ottenere moltissime informazioni, ma nulla eguaglia la possibilità di vedere per via diretta senza bisogno di computer che ricevano, puliscano, elaborino i segnali ricevuti da un radiotelescopio. Finalmente nel marzo del 1969 gli astrofisici ebbero anche le prime immagini sulle quali appoggiare la loro immaginazione. Si sapeva che all'interno della Nebulo-

sa Granchio c'era una stellina bluastra di magnitudine circa 16 che non era stato possibile classificare sulla base dello spettro. Se la luce emessa da questa stella fosse risultata pulsata con lo stesso periodo radio avremmo dovuto vederla accendersi e spegnersi 30 volte al secondo (in effetti 60, perché la curva di luce radio ha due picchi). Occorreva allora equipaggiare il telescopio con un filtro rotante costruito in modo da avere un solo spicchio trasparente. Facendo ruotare il filtro esattamente alla stessa frequenza della pulsar, si sarebbe selezionata sempre la stessa parte di curva di luce e la sorgente sarebbe risultata variabile a seconda della fase selezionata. Se, d'altro canto, la sorgente fosse stata una stella normale, ossia non pulsante, avrebbe fatto registrare lo stesso flusso indipendentemente



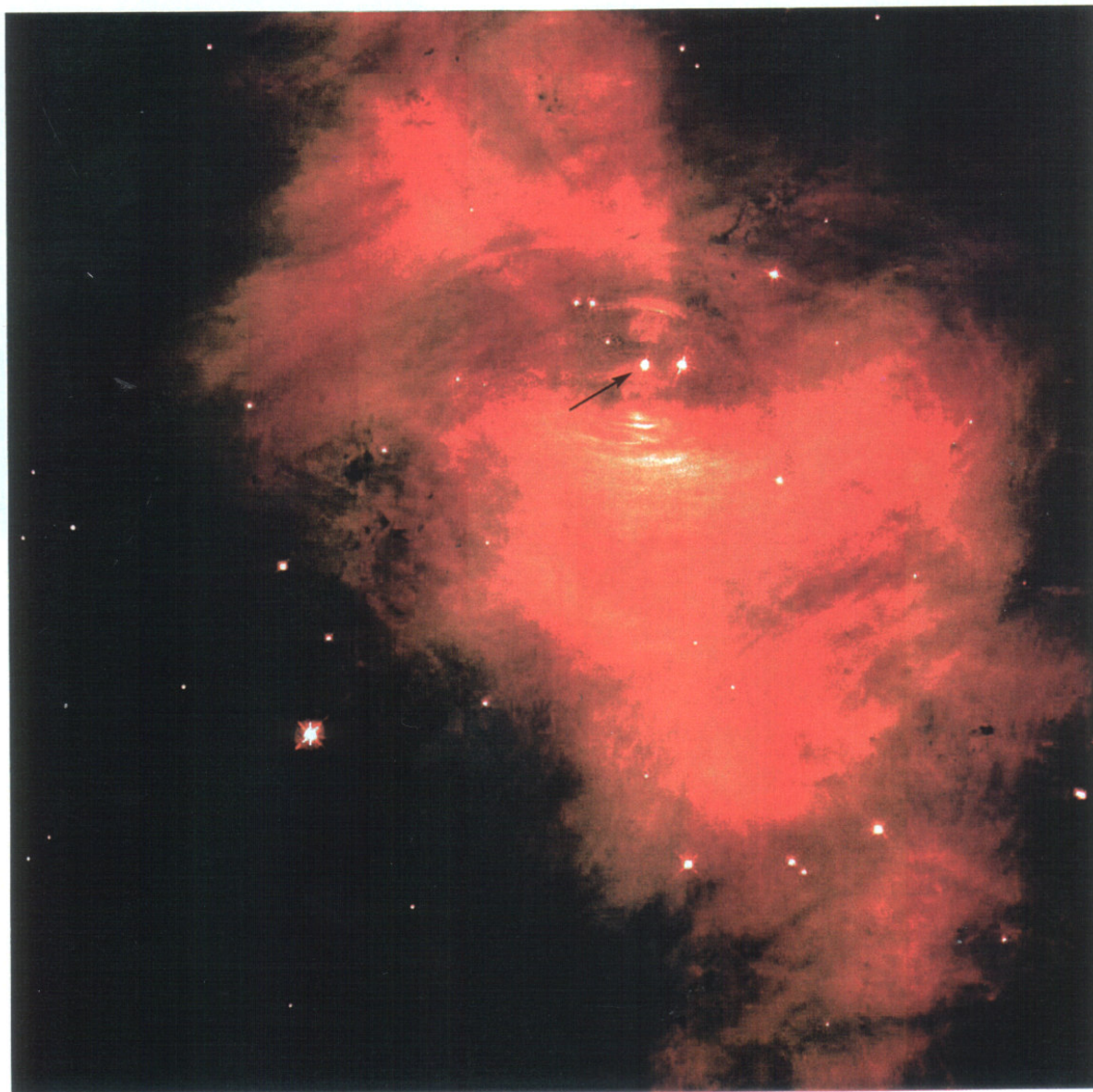
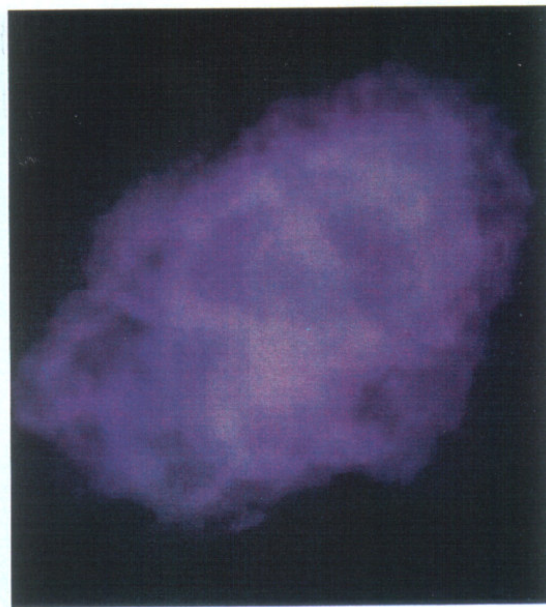
Un contributo fondamentale al chiarimento della natura delle pulsar venne dalla scoperta di una sorgente di questo tipo nella Nebulosa Granchio, nella costellazione del Toro. La Nebulosa è stata prodotta dall'esplosione di una supernova osservata nel 1054 ed è il primo oggetto non stellare indicato nel catalogo di Messier (M1), osservabile anche con strumenti amatoriali nella posizione indicata nella foto della pagina a fronte. La sua forma irregolare e la struttura filamentosa sono individuabili chiaramente solo con pose fotografiche, come nell'immagine sopra. Solo strumenti professionali sono in grado di rivelare la controparte ottica della pulsar, indicata dalla freccia nell'immagine a lato, recentemente ottenuta dal Telescopio Spaziale Hubble.

te dalla fase osservata. L'esperimento ebbe successo e le immagini che documentano l'accensione e lo spegnimento della pulsar nella Nebulosa Granchio fecero il giro del mondo. Era la prima identificazione ottica di una pulsar radio e, per circa dieci anni, sarebbe stata l'unica. L'identificazione ottica della pulsar delle Vele, 500 volte più debole, avrebbe dovuto aspettare fino al 1977.

Ma torniamo al 1968, quando cominciarono a essere misurati i rallentamenti del periodo di altre pulsar, meno vistosi (cioè ancora più piccoli) di quello del Granchio, ma comunque significativi e tali da far convergere l'interpretazione teorica delle pulsar sul modello della stella di neutroni rapidamente rotante, dotata di un forte campo magnetico. Tuttavia, se ritorniamo all'esempio della sfera con la macchia bianca, è immediato rendersi conto

che se la macchia fosse sull'asse di rotazione non vedremmo alcuna pulsazione: saremmo nella condizione di "sempre acceso" oppure di "sempre spento". Per poter registrare le pulsazioni occorre che la macchia non coincida con l'asse di rotazione.

Nel modello a "stella di neutroni rotante", responsabile dell'emissione radio non è una macchia ma un cono di emissione, corrispondente ai poli magnetici della stella di neutroni: evidentemente l'asse di rotazione della stella non coincide con l'asse magnetico e ciò non può meravigliare più di tanto, visto che anche sulla nostra Terra l'asse di rotazione non coincide con l'asse magnetico. Questo è in sostanza il celebre modello del rotatore obliquo elaborato nel 1969 da J. Ostriker e J. Gunn su un'idea proposta indipendentemente anche da Pacini nell'estate del 1968. Il modello è anco-



Sopra, la Nebulosa Granchio osservata a lunghezze d'onda radio evidenzia l'emissione di sincrotrone prodotta dagli elettroni di alta energia accelerati dal campo magnetico della pulsar, che non è direttamente visibile in questa immagine.

Le osservazioni del Telescopio Spaziale Hubble hanno rivelato molti particolari dell'ambiente immediatamente circostante la pulsar del Granchio, come si vede nell'immagine in falsi colori, dove la posizione della stella di neutroni è indicata dalla freccia.

La dimensione tempo

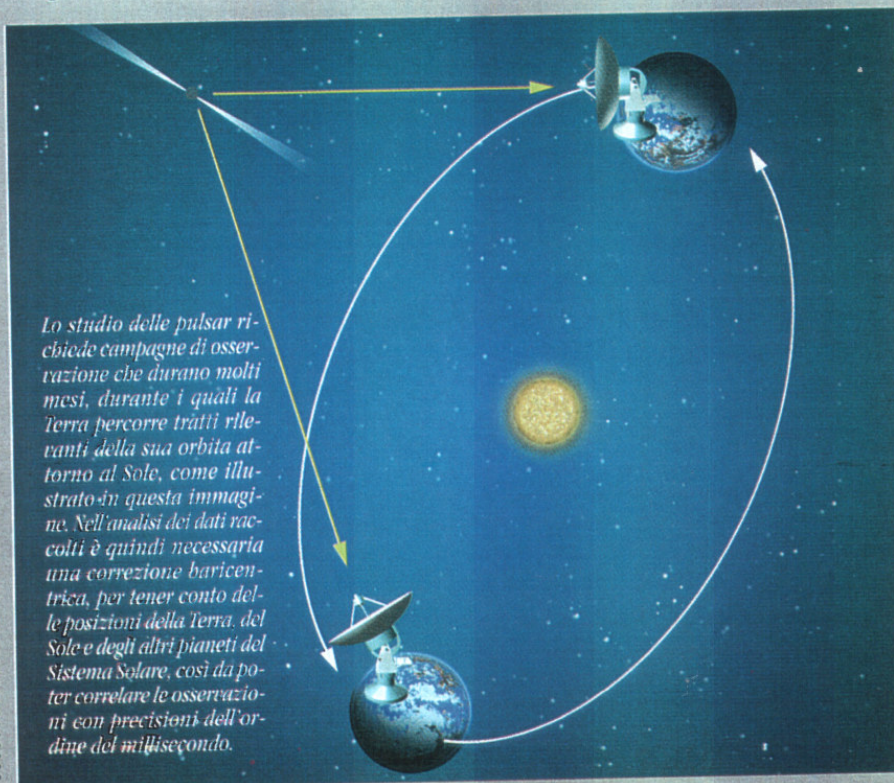
Ogni fotone arriva a noi caratterizzato da 4 parametri fondamentali: la direzione d'arrivo, l'energia, lo stato di polarizzazione e il tempo. Nel caso dell'astronomia ottica siamo abituati a pensare che i fotoni arrivino da una certa stella (direzione d'arrivo) che ha un certo colore (energia del fotone). Siamo molto meno abituati al fatto che i fotoni abbiano anche un'etichetta temporale. Tuttavia, non abbiamo nessuna difficoltà a riconoscere che esistono oggetti variabili; oggetti, cioè, che non emettono sempre lo stesso numero di fotoni nello stesso intervallo di tempo. Lo studio delle variabilità temporali è un capitolo difficile perché si basa sull'uso di algoritmi matematici all'apparenza astrusi e di non immediata comprensione. Gli sforzi richiesti sono, però, compensati dalla potenza straordinaria di questo mezzo di indagine astronomica. La nostra conoscenza delle pulsar radio si basa quasi esclusivamente sull'analisi dei tempi d'arrivo dei segnali radio regolarissimi che riceviamo. La forma degli impulsi porta fino a noi l'informazione sulla magnetosfera della stella di neutroni, in particolar modo l'inclinazione tra l'asse magnetico e quello di rotazione. La regolarità del fenomeno è tale che è possibile tracciare i "sussulti" della crosta della stella di neutroni, che causano improvvisi cambiamenti del periodo, e indagare la struttura interna di questi oggetti affascinanti.

Ma non è tutto: i tempi d'arrivo dei segnali pulsati ci permettono di dire con certezza se la stella di neutroni è isolata oppure se appartiene a un sistema binario, vuoi con un'altra stella di neutroni, vuoi con una stella normale, vuoi con oggetti più piccoli di tipo planetario. Per fissare le idee, pensiamo che se il nostro Sole fosse una pulsar, un ipotetico osservatore sarebbe in grado di rivelare la presenza di tutti i pianeti semplicemente studiando le perturbazioni indotte dal loro moto negli impulsi inviati dalla stella. La Terra, infatti, muovendosi intorno al Sole con la sua ben nota orbita ellittica, causa uno spostamento del centro del Sole di 450 km, ossia, in termini temporali, di 1,5 ms, un effetto facilmente misurabile. D'altro canto, essere in grado di misurare il periodo e la velocità orbitale di uno solo dei componenti di un sistema planetario permette di calcolare immediatamente la massa della stella. Ciò non è più possibile quando si lavora con sistemi binari formati da stelle di massa non molto diversa: in questo caso, occorrerà avere informazioni sul moto di entrambe per poter "risolvere" totalmente i parametri del sistema. È grazie a questa straordinaria sensibilità alle piccolissime perturbazioni che gli astrofisici sono stati in grado di studiare le stelle di neutroni, capire come emettono, come si comportano all'interno di un sistema binario e infine risalire alla loro massa.

Cosa significa, in pratica, dal punto di vista os-

servativo? È necessario seguire l'evoluzione dei segnali radio provenienti da un determinato oggetto per intervalli di tempo di giorni, mesi, anni. Ovviamente le osservazioni non sono continue: ogni pulsar riceve, al più, qualche minuto di attenzione ogni giorno o ogni settimana. Occorre quindi concatenare treni di impulsi ricevuti in date diverse, quando la Terra, sulla quale ha sede il radiotelescopio, occupa posizioni diverse nel Sistema Solare. Perché preoccuparsi del moto della Terra? La velocità della Terra nella sua orbita è di circa 30 km/s, che si trasforma in uno spostamento (per effetto Doppler) della frequenza di una parte su 10.000 (il rapporto tra la velocità della Terra e la velocità della luce) per una qualsivoglia pulsar che si trovi vicino al piano dell'eclittica. Ancora più critica è la distanza tra la Terra e il centro di massa del Sistema Solare, che può arrivare a 8 minuti (500 s), che è il tempo necessario alla luce per percorrere la distanza tra la Terra e il Sole. In altre parole, osservando lo stesso oggetto a mesi di distanza si inserisce un ritardo (o un anticipo) di alcuni minuti sul tempo d'arrivo di segnali che durano frazioni di secondo! È chiaro che per poter concatenare correttamente i segnali ricevuti, questo effetto deve essere rimosso prima di iniziare qualsiasi analisi temporale. L'operazione si chiama correzione baricentrica, poiché i tempi di arrivo dei fotoni vengono modificati per diventare i valori che lo strumento avrebbe registrato se si fosse trovato nel baricentro del

Sistema Solare. Non è sufficiente correggere per il moto della Terra intorno al Sole. La correzione deve essere calcolata per il momento esatto in cui ha avuto luogo l'osservazione, tenendo conto della posizione reciproca di tutti i corpi del Sistema Solare. Una volta calcolata questa correzione, tutte le variazioni riscontrate nei dati in esame sono da attribuire interamente agli oggetti celesti. Qualora i dati vengano raccolti da un satellite in orbita intorno alla Terra, bisognerà tener conto anche della velocità e dell'accelerazione del satellite nella direzione di una determinata sorgente. Le sensibilità della correzione baricentrica alla posizione della sorgente è tale che gli astronomi possono ricavare la posizione precisa di una pulsar utilizzando algoritmi che seguono i treni di impulsi su lunghi periodi di tempo. Posizioni della pulsar approssimate (o sbagliate) non consentono di descrivere in modo soddisfacente gli impulsi ricevuti su lunghi periodi di tempo. Bisogna allora procedere per passi successivi, cambiando la posizione per tentativi fino a raggiungere una buona descrizione dei dati. Anche i moti propri delle pulsar possono essere misurati in questo modo perché il progressivo impercettibile spostamento della sorgente induce periodicità spurie legate al moto orbitale della Terra intorno al Sole. Quando i radioastronomi si rendono conto che una pulsar sembra avere spostamenti Doppler con periodi di multipli o sottomultipli dell'anno solare, sanno che la sorgente si muove nel cielo.



Lo studio delle pulsar richiede campagne di osservazione che durano molti mesi, durante i quali la Terra percorre tratti rilevanti della sua orbita attorno al Sole, come illustrato in questa immagine. Nell'analisi dei dati raccolti è quindi necessaria una correzione baricentrica, per tener conto delle posizioni della Terra, del Sole e degli altri pianeti del Sistema Solare, così da poter correlare le osservazioni con precisioni dell'ordine del millisecondo.

ra oggi accettato perché fornisce un modo semplice di calcolare l'energetica, il campo magnetico e l'età delle pulsar a partire dalle due uniche osservabili: il periodo e il suo rallentamento.

I fortissimi campi magnetici ruotanti inducono campi elettrici che sono in grado di accelerare particelle cariche fino a energie molto elevate. Tali particelle, muovendosi in un campo magnetico, emetteranno radiazione di sincrotrone e l'emissione avverrà di preferenza in prossimità dei poli magnetici della pulsar, che diventeranno veri e propri fari cosmici. Poiché la pulsar emette solo nel cono, la nostra possibilità di rivelarla dipende dalla geometria della linea di vista Terra-oggetto rispetto all'orientazione dei coni. Se la linea di vista non intercetta nessuno dei due coni, noi non vedremo la pulsar, se ne intercetta uno solo vedremo una curva di luce a un solo picco, se li intercetta entrambi vedremo una curva di luce a due picchi. L'angolo (sconosciuto) tra l'asse di rotazione e l'asse magnetico determina la separazione tra i due picchi. Per inclinazioni di 90° la separazione di fase sarà

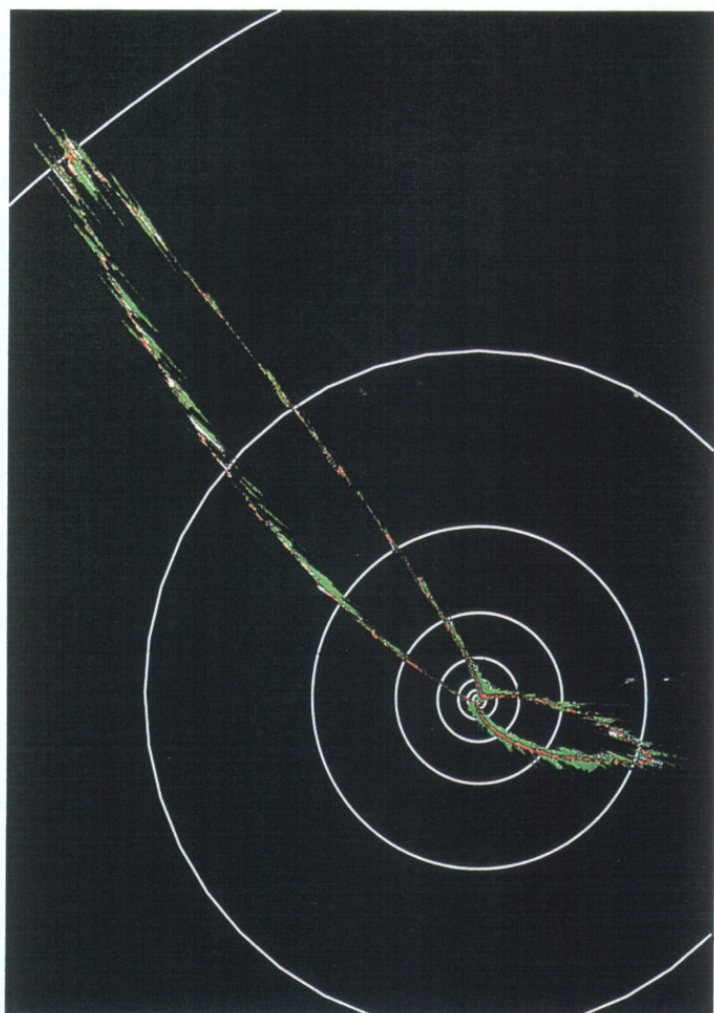
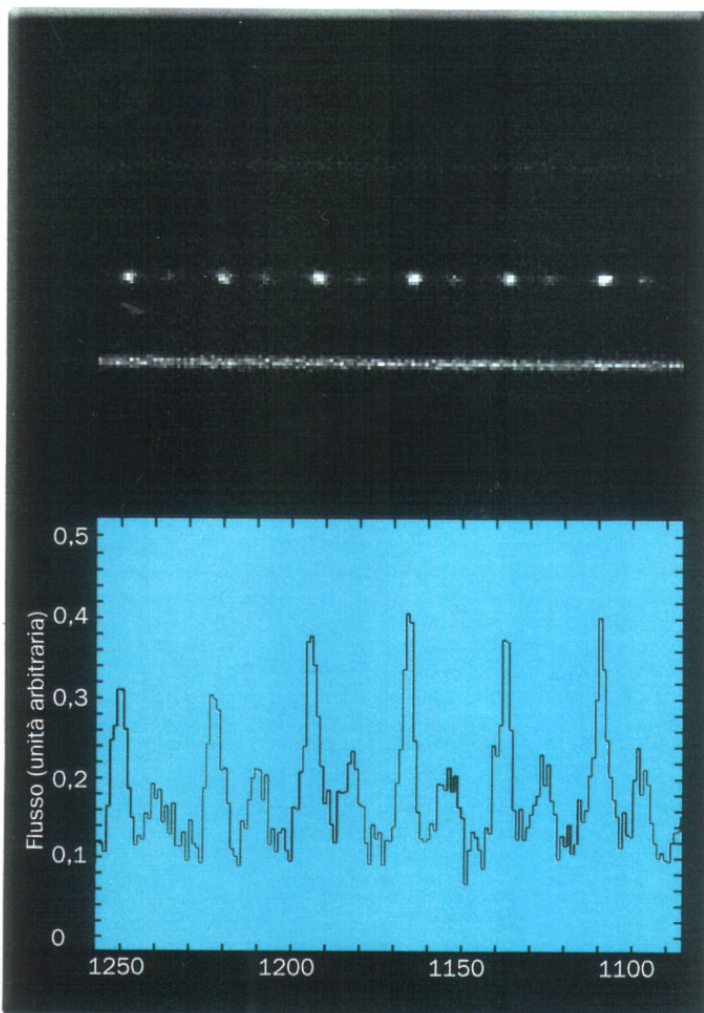
esattamente di 180° . Lo studio delle forme delle curve di luce di ciascuna pulsar è quindi un ausilio fondamentale per capire la geometria della magnetosfera.

E il rallentamento? Bisogna riguardarlo come una sorta di "attrito magnetico" tra il campo dipolare della pulsar e il mezzo interstellare. Più veloce è la pulsar, maggiore è l'attrito e quindi maggiore è il rallentamento. Se la pulsar gira meno velocemente, la sua energia rotazionale risulta minore. Una pulsar che rallenta svuota progressivamente la sua riserva di energia: nel resto di supernova del Granchio, per esempio, il rallentamento della pulsar fornisce l'energia richiesta per sostenere l'emissione della nebulosa. Il rapporto tra il periodo e il rallentamento fornisce una stima dell'età delle pulsar. La pulsar del Granchio, per esempio, risulta avere 1200 anni: un'età che s'accorda bene con i 950 effettivi e lascia ben sperare nell'utilizzo generalizzato del rapporto tra periodo e rallentamento anche per le altre pulsar.

Dopo poco più di un anno dalla scoperta, le pulsar avevano già una loro spiegazione. Non

rimaneva che cercarne sempre di nuove. Nell'aprile del 1969 erano già 37, ma le ricerche continuavano, utilizzando radiotelescopi ottimizzati allo scopo, con computer programmati per cercare le pulsazioni facendo uso di algoritmi matematici piuttosto che del "colpo d'occhio" del ricercatore.

Impulsi ottici della pulsar del Granchio ripresi dal Very Large Telescope dell'ESO. Nella foto a sinistra, la tecnica di ripresa ha prodotto strisce luminose in corrispondenza di stelle di luminosità costante che si trovavano nel campo inquadrato, mentre i punti luminosi corrispondono ai picchi di emissione della pulsar. Si noti che oltre al picco principale è visibile un picco secondario, dovuto al particolare orientamento della stella di neutroni rispetto a noi, che causa il passaggio, nella nostra direzione di vista, dei due fasci luminosi della stella, ma con orientamenti diversi, per cui uno ci appare più brillante dell'altro. Una suggestiva visione dell'orientamento dei due fasci di emissione è data nel grafico, che riporta le intensità osservate dei due fasci (verde nell'ultravioletto e rosso nel visibile) in un diagramma circolare, in cui una rotazione di 360° corrisponde a un periodo della pulsar.



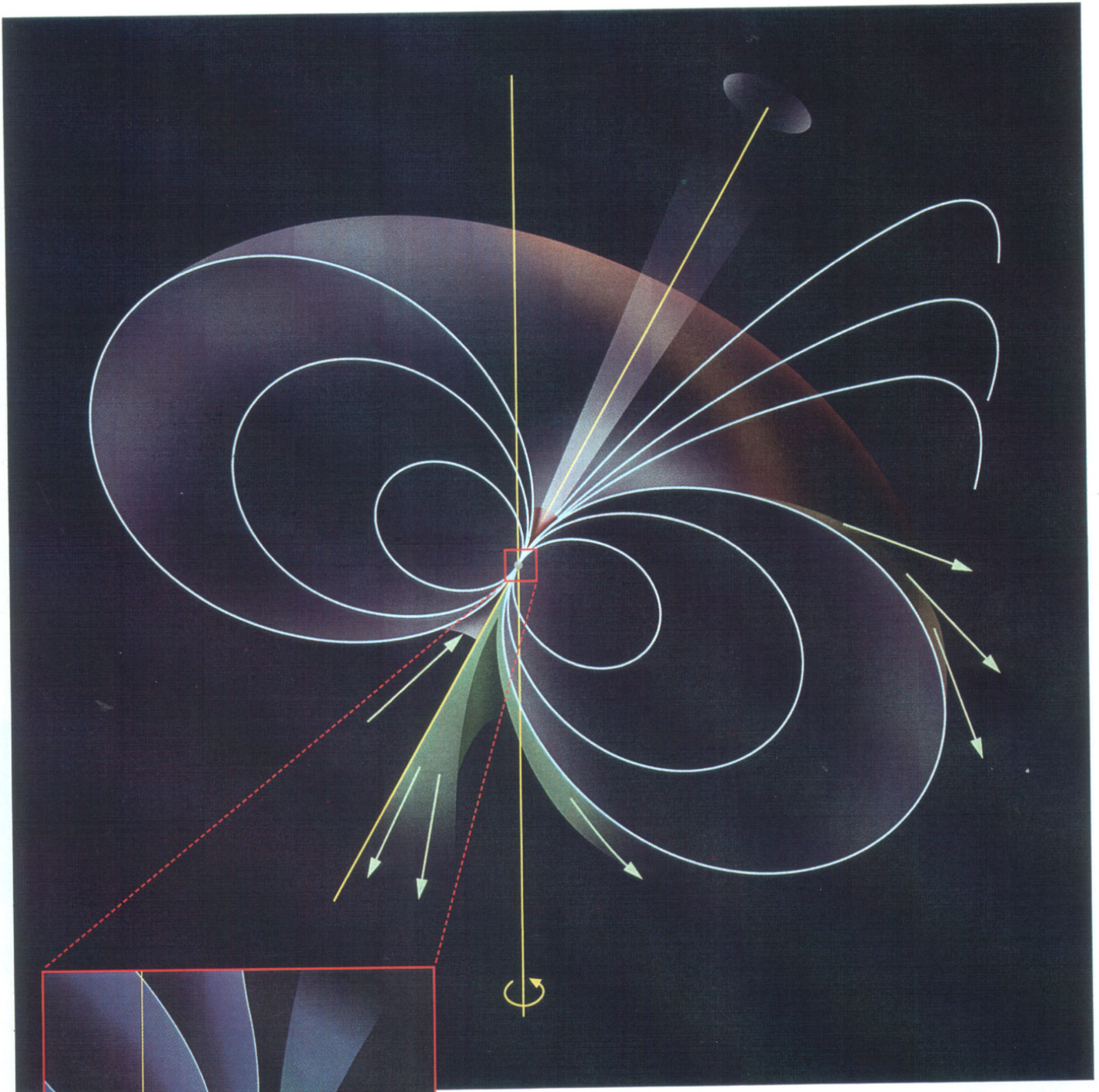


Illustrazione schematica del modello del rotatore obliquo, proposto da F. Pacini, J. Ostriker e J. Gunn nel 1968-69 per spiegare le pulsar. Una stella di neutroni rotante è circondata da un campo magnetico i cui poli sono disassati rispetto all'asse di rotazione. Le particelle intrappolate dal campo magnetico, soprattutto in vicinanza delle zone polari, come illustrato nel particolare a lato, emettono un'intensa radiazione di sincrotrone, che rimane confinata in un cono e che quindi possiamo osservare solo quando l'angolo di apertura di tale cono punta verso di noi in un qualsiasi momento della rotazione.

Vita e morte delle stelle

L'esplosione di una stella è, senza dubbio, uno degli eventi più violenti che si conoscano in natura. Nello spazio di poche frazioni di secondo una stella decine di volte più massiccia del nostro Sole esplose scagliando nello spazio buona parte della sua massa e liberando una spaventosa quantità di energia. Chiedete a qualsiasi astronomo quale sia il suo più vivo desiderio e scoprirete che un'esplosione di supernova nella nostra Galassia appagherebbe quasi tutta la categoria. L'ultimo a vedere il sogno avverato fu Johannes Kepler che, nel 1604 (pochi anni prima dell'invenzione del telescopio), poté osservare a occhio nudo una supernova. L'esplosione di una supernova non è però un evento così raro: gli astronomi sono convinti che nella Via Lattea (la nostra Galassia) esploda una supernova ogni 30-40 anni! Il vero problema sono le polveri presenti nel mezzo interstellare. Sebbene la loro densità sia ridicolmente piccola per gli standard terrestri, queste polveri pervadono tutta la Galassia e sono in grado di oscurare, e rendere praticamente invisibile, tutto ciò che succede a più di 5000-10.000 anni luce da noi. Non è quindi sorprendente che delle diverse dozzine di supernovae che sono esplose nella nostra Galassia nell'ultimo millennio solo 5 siano state vi-

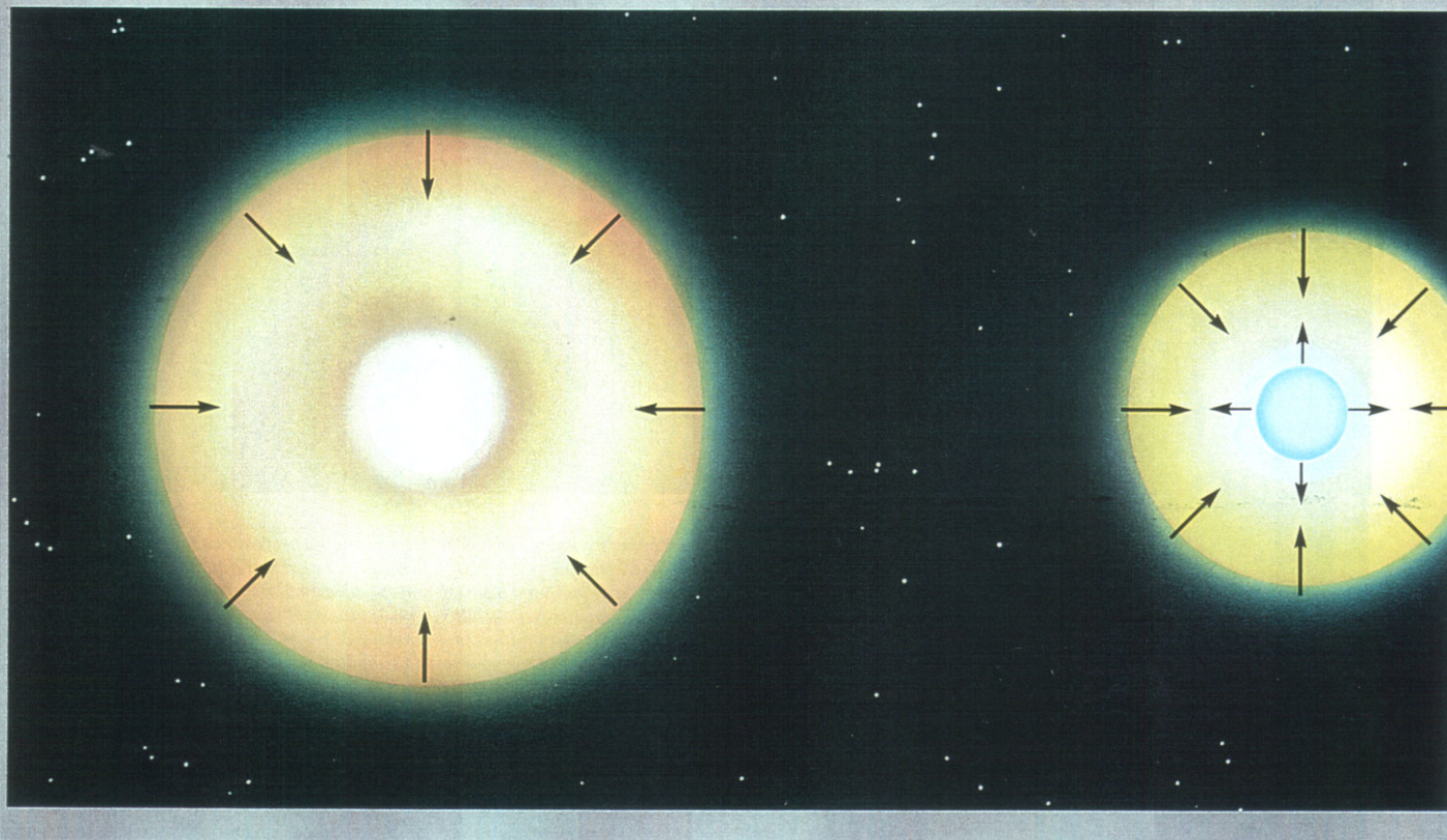
ste dal genere umano. La più brillante fu osservata nel 1006 dagli astronomi imperiali cinesi che hanno tramandato che di notte si poteva leggere alla sua luce. Piuttosto impressionante deve essere stata anche quella esplosa nel 1054, che ha dato origine alla Nebulosa Granchio. Due supernovae famosissime a meno di cinquant'anni di distanza, ma poi solo tre nei rimanenti 950 anni. Sono gli scherzi del caso.

È facile intuire la gioia e l'entusiasmo della comunità astronomica mondiale quando il 24 febbraio 1987 venne scoperta una supernova nella Grande Nube di Magellano, una piccola galassia irregolare satellite della Via Lattea. La Grande Nube è molto vicina (solo 160.000 anni luce) e quindi l'esplosione poteva essere studiata e seguita in dettaglio. In particolare, per la prima volta nella storia, si poteva sapere con certezza quale stella fosse esplosa. Ma che cosa era successo a questa stella catalogata con la sigla Sk -69 202? Perché era avvenuta la catastrofica esplosione? La stella aveva semplicemente esaurito il suo combustibile nucleare e non aveva più potuto autosostenersi contro la sua stessa gravità grazie alle reazioni di fusione nucleare.

Dopo aver esaurito l'idrogeno, l'elio e i prodotti

intermedi, quando si arriva alla sintesi del ferro è la catastrofe, perché per sintetizzare il ferro occorre fornire energia. A questo punto, la stella non dispone più della pressione per frenare la caduta degli strati più esterni che, in pochi decimi di secondo, collassano. La densità al centro della stella aumenta di milioni di volte, ma non può aumentare all'infinito e, raggiunto un valore critico, la contrazione cessa istantaneamente. È come se la materia che sta precipitando si trovasse di fronte a un muro sul quale non può fare altro che rimbalzare per essere proiettata verso l'esterno, nello spazio. È questa l'esplosione della supernova. Dopo essere implosa la stella esplose e proietta nello spazio a grandissima velocità gran parte della sua massa che forma una di quelle strutture tondeggianti che gli astrofisici chiamano resto di supernova.

Il nocciolo della stella, sopravvissuto all'esplosione, diventa un oggetto celeste superdenso, ipotizzato da W. Baade e F. Zwicky nel 1934 e studiato in dettaglio da Chandrasekhar. La forza dell'implosione della stella è tale che i protoni e i neutroni si combinano formando neutroni che si dispongono in una specie di reticolo cristallino di 10 km di raggio che ha la stessa densità di un nucleo atomico.





La supernova più vicina osservata negli ultimi secoli è quella esplosa nella Grande Nube di Magellano nel 1987. Dopo oltre un decennio nel luogo dell'esplosione non è ancora stata osservata una stella di neutroni, mentre è apparsa una complessa struttura ad anelli, visibile nell'immagine grande a sinistra, ottenuta dal Telescopio Spaziale Hubble. Questi anelli sono prodotti dalle radiazioni e dalle onde d'urto prodotte dalla supernova, che stanno diffondendosi nel gas emesso dalla stella prima di esplodere. Alcuni dettagli dell'anello più interno e più luminoso sono visibili nell'immagine più piccola (sotto) al centro del quale però non compare nessuna traccia della stella di neutroni che avrebbe potuto formarsi dalla contrazione del nucleo della stella esplosa.



Una stella di neutroni contiene entro una sfera di 10 km una massa pari o poco superiore a quella del nostro Sole. Per di più, la stella genitrice le ha lasciato in "eredità" buona parte del suo campo magnetico e della sua energia rotazionale. Siamo così arrivati a un nocciolo di stella che ruota su se stesso decine o centinaia di volte in un secondo e ha un campo magnetico elevatissimo. Dalla morte di una stella massiccia è nata una pulsar. (Per il momento, nonostante gli sforzi prodigati nella ricerca, non è stato ancora possibile evidenziare la presenza di tale pulsar nel resto della supernova del 1987.)

L'esplosione conferisce alle stelle di neutroni un'altissima velocità, dell'ordine di diverse centinaia di km/s. Questo le pone tra gli oggetti più veloci della Galassia, in grado di spostarsi significativamente dal loro punto di nascita e migrare verso le alte latitudini galattiche, dove infatti vengono rivelate numerose pulsar radio. L'alta velocità fornisce la spiegazione anche della posizione eccentrica di numerose pulsar rispetto al resto di supernova nel quale hanno avuto origine.

Rappresentazione schematica dell'esplosione di una supernova e della formazione di una stella di neutroni, come spiegato nel testo.

