

La prima pulsar doppia

È lunga la lista delle "cose mai viste prima" che si stanno osservando in questo sistema binario di pulsar del tutto eccezionale, scoperto da astronomi italiani: dagli effetti relativistici, alle reciproche eclissi, la Natura non poteva inventare un oggetto più stimolante per gli astrofisici.

Andrea Possenti

Due pulsar contemporaneamente attive, ossia di cui riceviamo distintamente i due segnali radio pulsati, nello stesso sistema binario! Che si eclissano vicendevolmente, essendo poste su un piano orbitale che vediamo quasi perfettamente di taglio! E, come se non bastasse, che fanno parte del sistema binario più "relativistico" fra quelli conosciuti, ossia quello in cui le leggi della Relatività Generale di Einstein possono essere studiate più a fondo! Un oggetto celeste come questo, fino a un paio di mesi fa poteva giusto popolare i sogni degli astronomi più immaginifici. Invece è realtà: le due pulsar si chiamano PSR J0737-3039A e PSR J0737-3039B.

La scoperta della prima pulsar doppia nella storia dell'astronomia porta in larga misura il marchio italiano: quello del gruppo diretto da Nichi D'Amico, professore ordinario presso l'Università di Cagliari e direttore del locale Osservatorio Astronomico, di cui fanno parte lo scrivente, ricercatore a Cagliari, e la giovanissima Marta Burgay. Il lavoro di ricerca è la (grandiosa!) conclusione della tesi di dottorato che Marta ha iniziato con D'Amico a Bologna tre anni fa. Marta infatti figura sia come primo autore dell'articolo sulla rivista *Nature* che ha riportato la scoperta della PSR J0737-3039A (di cui *Le Stelle* ha dato notizia nel numero dello scorso gennaio), sia come secondo autore dell'articolo apparso sulla rivista *Science* che annuncia la scoperta della PSR J0737-3039B. Il gruppo italiano è inserito da diversi anni in una collaborazione internazionale di cui fanno parte scienziati inglesi, australiani e americani e ha contribuito negli ultimi anni allo sviluppo di sofisticate apparecchiature installate presso il radiotelescopio australiano di 64 m di Parkes. Questa collaborazione sta letteralmente rivoluzionando il campo dello studio delle pulsar, grazie alla scoperta di centinaia di nuovi oggetti.

Ancora una volta la scoperta di una radiopulsar - anzi di due! - si candida dunque per stabilire un punto di svolta in astrofisica, con particolare riguardo agli studi sull'evoluzione dei sistemi binari, sulla fisica degli oggetti compatti e sulle Teorie della Gravità.

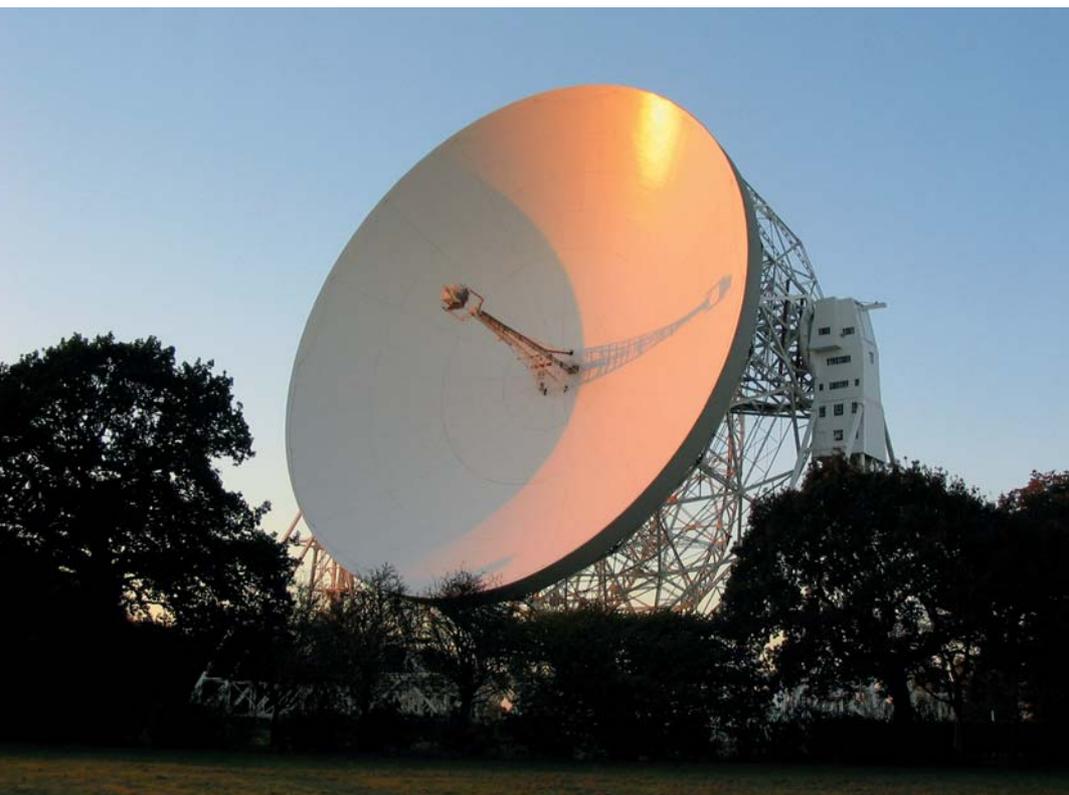
Tre famiglie di pulsar, anzi quattro

Tre momenti topici avevano sinora segnato la storia dell'astrofisica delle pulsar: nel 1967, la scoperta a Cambridge della prima pulsar (oggi nota come PSR B1919+21, ma annunciata nel 1968 da Antony Hewish e Jocelyn Bell col nome di CP1919) fu decisiva per confermare l'esistenza delle stelle di neutroni. Si tratta di oggetti altamente esotici, con una massa simile a quella del Sole compattata entro una sfera di dimensioni paragonabili alla tangenziale di Milano o al grande raccordo anulare di Roma. In tali condizioni, la materia assume densità corrispondenti a quelle del nucleo degli

L'enorme antenna parabolica di 64 m di diametro di Parkes (Australia), poggia su una costruzione cilindrica di tre piani, all'interno della quale è installata la strumentazione hardware e software predisposta dal "Gruppo Pulsar Italiano", che ha avuto un ruolo centrale nella scoperta del sistema PSR J0737-3039A+B.

L'AUTORE

Andrea Possenti, dopo la laurea in Fisica a Milano, si è trasferito a Bologna per il dottorato di Ricerca in Astronomia ed è divenuto membro della collaborazione che, utilizzando il radiotelescopio di Parkes, negli ultimi cinque anni ha più che raddoppiato il numero delle radiopulsar conosciute. Ricercatore presso l'INAF-Osservatorio Astronomico di Cagliari, si occupa di stelle di neutroni. Attivo nella divulgazione, ha tenuto oltre 200 conferenze e pubblicato due testi: *Eclissi* (Mursia, 1999) e *Comete - Diario di viaggio* (Mimesis, 2002). Ha l'hobby della pallacanestro, seguita per molti anni anche come cronista radiotelevisivo.



Nell'autunno 2003 le due pulsar sono state a lungo studiate anche dal Telescopio Lovell di 76 m di Jodrell Bank. Gli astronomi dell'Università di Manchester, che gestiscono Jodrell Bank, fanno parte della collaborazione internazionale che ha condotto le ricerche a Parkes (Australia), scoprendo un gran numero di nuove pulsar. Entro qualche anno, anche il gruppo italiano disporrà di un proprio potente radiotelescopio che è ora in fase di costruzione in Sardegna. (cortesia A. Holloway)

B1913+16, fornì ai fisici il primo attendibile banco di prova per paragonare le predizioni di numerose teorie moderne della gravità. Questa analisi fu principalmente condotta da Joseph Taylor e Russell Hulse (scopritori dell'oggetto ad Arecibo) con sostanziali contributi teorici di Thibault Damour. Ne risultò che la Relatività Generale postulata da Albert Einstein nei primi decenni del secolo scorso rimane a tutt'oggi la migliore rappresentazione disponibile delle interazioni di tipo gravitazionale. Infine, nel 1982 si registrò la terza scoperta-clou: Don Backer e collaboratori identificarono la prima pulsar a millisecondo, la PSR B1937+21, ruotante alla sbalorditiva velocità di 645 rotazioni al secondo. Da lì nacquero due nuovi campi di ricerca. Da un lato si aprirono nuove prospettive per la fisica nucleare: solo certe leggi regolanti le interazioni fra particelle nucleari (principalmente protoni e neutroni) permettono infatti a una stella di neutroni di ruotare tanto velocemente quanto la PSR B1931+21. Molte leggi che erano state proposte nei decenni precedenti vennero così automaticamente scartate e un florilegio di nuove teorie sulle interazioni nucleari apparve dopo di allora. L'altra branca dell'astrofisica che ebbe straordinario impulso da quella scoperta è quella che studia i fenomeni fisici connessi con il trasferimento di massa fra le stelle appartenenti a un sistema binario. Se una delle due è una stella di neutroni, quest'ultima ricopre sempre il ruolo di stella "mangiatrice" di materia, mentre la stella compagna (ammesso che non sia a sua volta una stella di neutroni) in certe fasi della sua evoluzione può fungere da stella donatrice di materia. La materia che si travasa sulla stella di neutroni produce un effetto analogo a quello della caduta dell'acqua di una cascata sulle pale di una turbina: tende cioè ad aumentare il regime di rotazione della stella di neutroni. Questo processo, battezzato *recycling* in inglese (la cui traduzione letterale italiana sarebbe "riciclo", ma è molto meglio dire "riaccelerazione"), permette di lanciare una stella di neutroni a velocità rotazionali dell'ordine delle centinaia di giri al secondo ed è stato appunto invocato la prima volta per rendere conto della formazione della PSR B1931+21. Lo studio dei dettagli di tale meccanismo si è poi trasferito in bande dello spettro elettromagnetico lontanissime da quella delle onde radio. Durante la sua caduta verso la superficie della stella di neutroni, la materia trasferita - che si trova allo stato di plasma, cioè materia gassosa carica elettricamente - libera infatti una gran quantità di radiazione d'alta energia, rivelabile dai satelliti dedicati all'osservazione del cielo nella banda dei raggi X.

Già alla metà degli anni '80 del secolo scorso, i ricercatori avevano dunque individuato almeno un oggetto appartenente a ciascuna delle tre famiglie di pulsar conosciute fino a due mesi fa: ovvero le pulsar isolate (primo esemplare la PSR B1919+21), le pulsar binarie (primo esempio la PSR B1913+16) e le pulsar a millisecondo (di cui la PSR B1937+21 è il capostipite). Nel frattempo, il

atomi e risulta essere composta principalmente da neutroni (dove il nome di queste stelle peculiari). Lev Davidovic Landau ne aveva previsto teoricamente l'esistenza nei primi anni '30 e contemporaneamente Fritz Zwicky suggerì che potessero formarsi durante le esplosioni di supernova che segnano la fine di stelle massicce almeno 5-8 volte più del Sole. Franco Pacini nel 1967 propose che le ipotetiche stelle di neutroni dovevano emettere onde radio solo in direzioni privilegiate, il che, accoppiato con la loro rotazione, doveva dare origine a un effetto-faro, producendo un segnale di tipo pulsato per l'osservatore terrestre. La scoperta della PSR B1919+21 solidificò queste idee e permise le prime misure del regime rotazionale e del campo magnetico delle pulsar, aprendo di fatto una nuova branca dell'astrofisica.

Successivamente, nel 1974, la scoperta della prima pulsar ospitata in un sistema binario, la PSR

numero di pulsar note è però continuato a crescere: erano già tre quando *Nature* (febbraio 1968) pubblicò la scoperta della CP1919, erano salite a parecchie decine quando venne annunciata la prima pulsar binaria ed erano alcune centinaia al momento della scoperta della prima pulsar a millisecondo. Da allora il loro numero è letteralmente esploso, in particolare grazie alle *survey* condotte nel corso degli ultimi cinque anni presso il radiotelescopio di Parkes, situato nel Nuovo Galles del Sud, a circa 400 km da Sydney e dalla costa. Si tratta del più fruttifero esperimento di ricerca di pulsar mai condotto e il “Gruppo Pulsar Italiano”, oggi di stanza a Cagliari, ne è stato uno dei protagonisti principali. Gli italiani hanno costruito *hardware* permanentemente installato presso il radiotelescopio di Parkes, hanno scritto *software* per l’analisi dei dati oggi utilizzato universalmente, si sono dotati di potenti strumenti di calcolo multiprocessore (prima a Bologna e ora a Cagliari) con cui hanno elaborato circa un terzo della enorme mole di dati raccolti (10 TeraByte) e hanno infine fornito un sostanziale contributo osservativo: Nichi D’Amico, Marta Burgay e lo scrivente hanno trascorso più di un anno ciascuno presso il radiotelescopio di Parkes negli ultimi cinque anni. Unendo questo impegno a quelli dei *partner* australiani, inglesi e americani ne è risultata la scoperta di oltre 750 nuove pulsar in 5 anni: praticamente il campione complessivo di oggetti disponibili è stato raddoppiato, assommando oggi a circa 1600 oggetti.

Nello zoo delle nuove scoperte ve ne sono alcune di rilevante interesse scientifico: pulsar con un campo magnetico così elevato che i teorici hanno dovuto rivedere le leggi che regolano l’emissione radio da questi oggetti; pulsar orbitanti attorno a stelle molto massicce; pulsar a millisecondo colte appena dopo la loro gestazione*¹; pulsar a millisecondo “sparate” ai bordi dall’ammasso stellare a cui

*¹ È questa una delle maggiori scoperte della *survey* negli ammassi globulari effettuata quasi in toto dal Gruppo Pulsar Italiano, pubblicata su *ApJ*, 561, L89 e L93; 2001.

*² Anche in questo caso il contributo italiano è stato centrale, vedi ad esempio *ApJ*, 570, L85 e L89; 2002.



Il carattere straordinario del sistema PSR J0737-3039A+B sta anche nella circostanza che le due stelle sono sopravvissute a ben due episodi cataclismici: il sistema binario non si è disgregato a seguito dell’esplosione di supernova e anzi, dopo la formazione della stella di neutroni A, la compagna l’ha alimentata della sua massa, riaccelerandone la rotazione. In un tempo successivo, anche la componente B è esplosa, e ancora le due stelle sono rimaste gravitazionalmente legate. Testimonianze drammatiche dell’estrema violenza delle esplosioni stellari sono i molti resti di supernova che osserviamo sparsi nella Via Lattea, come la Crescent Nebula, nella costellazione del Cigno, qui ripresa da Enzo Santin con un telescopio Ritchey-Chretien da 250 mm f/8, CCD SBIG ST8E con ruota CFW8 e filtro H-alfa da 13 nanometri per la luminosità (LRGB: 140m, 40m, 40m e 60m).

PSR J0737-3039

	componente A	componente B
Dati posizionali		
ascensione retta	7h 37m 51,247s	
declinazione	-30° 39' 40",74	
distanza (anni luce)	circa 2000	
Dati orbitali		
periodo orbitale	2h 27m 14,5s	
eccentricità	0,087779	
inclinazione orbitale	circa 87°	
Dati fisici		
periodo di rotazione (ms)	22,69937855616	2773,4607474
tasso di rallentamento (s/s)	$1,75 \cdot 10^{-18}$	$0,88 \cdot 10^{-15}$
età di frenamento (milioni di anni)	210	50
campo magnetico superficiale (gauss)	$6,3 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{12}$
massa (Sole = 1)	1,337	1,250

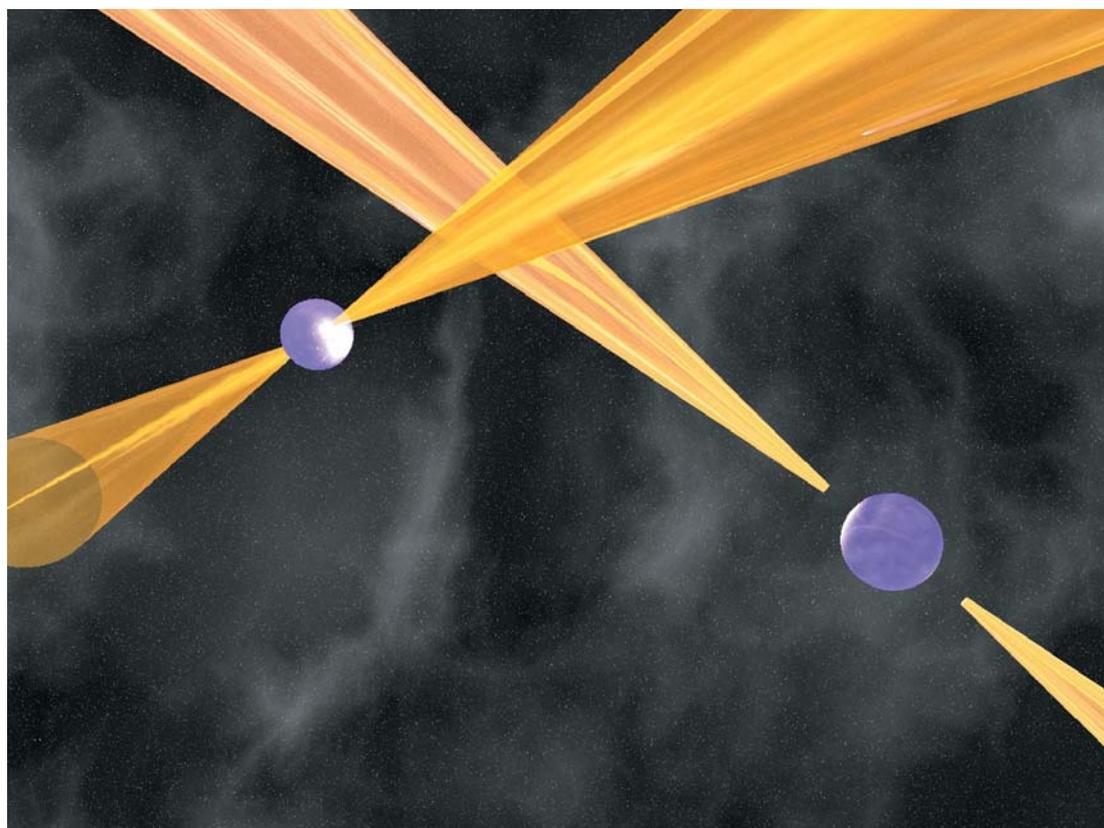
appartengono da incontri stretti con altre stelle*2, nonché una ridda di pulsar giovani, nate cioè meno di 100 mila anni fa, attorno ad alcune delle quali è stato possibile scorgere il gas eiettato dalla esplosione di supernova che le ha generate.

Oggetti tutti interessanti quelli citati, ma niente di radicalmente nuovo, come è viceversa la scoperta del sistema binario costituito dalle PSR J0737-3039A e PSR J0737-3039B. Lo dimostrano la prontezza e la rilevanza con cui le due maggiori riviste scientifiche mondiali, prima *Nature* (4 dicembre 2003) e poi *Science* (1°8 gennaio 2004 in versione elettronica, fine gennaio in formato stampa), hanno accolto gli articoli riportanti le due scoperte. Lo dimostrano le immediate reazioni del mondo scientifico. Ad Aspen (Colorado) era stato da tempo programmato per metà gennaio un congresso di cinque giorni sulle radiopulsar. In quattro e quattr'otto il programma è stato rivo-

luzionato, dedicando alla PSR J0737-3039A+B (mi sia concesso il conio di questa denominazione, sebbene quella ufficiale sia PSR J0737-3039A e PSR J0737-3039B) tre seminari consecutivi e un intero pomeriggio di libera discussione. I seminari sono stati distribuiti fra le componenti nazionali della collaborazione che ha condotto alla scoperta, con Marta Burgay che ha avuto l'onore dell'apertura, seguita da Michael Kramer (in rappresentanza dell'Osservatorio di Jodrell Bank, in Inghilterra) e da Dick Manchester (in rappresentanza dell'ATNF, l'organismo australiano gestore del radiotelescopio di Parkes). L'impatto della notizia è ben fotografato anche dall'ininterrotto flusso di pubblicazioni e di proposte di nuove osservazioni - a tutte le lunghezze d'onda, anche a quelle a cui non ci sono a priori speranze di osservare alcunché - che si è innescato in tutto il mondo subito dopo gli annunci delle scoperte.

Infine una nota curiosa sulle aggettivazioni, del tutto inusuali in ambito scientifico, contenute nelle valutazioni date alla scoperta da parte dei sei arbitri (*referee*) che le riviste *Nature* e *Science* hanno

Strano sistema quello della PSR J0737-3039A+B. Per entrambe le componenti l'anno (una rivoluzione completa) dura solo 2,4 delle nostre ore. Nel corso di ciascuna rivoluzione, la componente A compie quasi 390 mila rotazioni su se stessa (un anno brevissimo, eppure di 390 mila giorni!); la componente B, che è una pulsar "normale", non "a millisecondo" come la sua compagna, ne compie solo 3200. (cortesia Michael Kramer)



consultato per valutare l'opportunità di pubblicare sollecitamente queste notizie. Si tratta di arbitri anonimi, ma usualmente prescelti fra le personalità di maggior spicco dell'astrofisica mondiale. In lingua originale i vocaboli più usati sono stati: *"stunning, spectacular, long awaited, the most exciting, fascinating, fantastic, outstanding and unique discovery"*, che non stiamo a tradurre perché potrebbe suonare maldestramente autocelebrativo, mentre l'intenzione è solo quella di svelare ai lettori de *Le Stelle* un piccolo curioso retroscena.

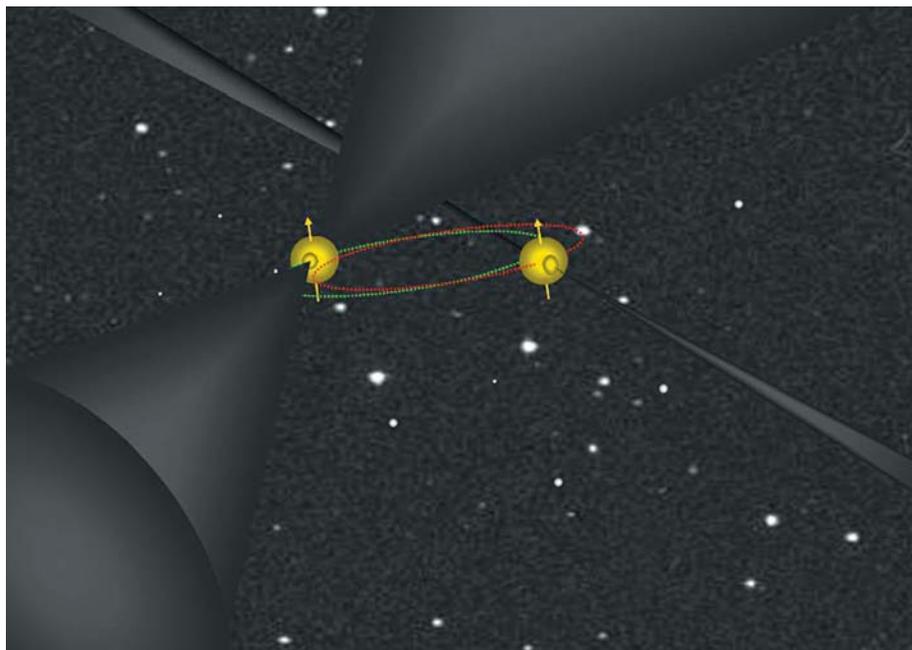
Come nascono le pulsar gemelle

Perché dunque tutta questa eccitazione? Una prima ragione, quella che maggiormente soddisfa i teorici dell'evoluzione stellare, è che questo sistema offre la verifica osservativa diretta che esistono davvero sistemi binari costituiti da due stelle di neutroni e che periodi orbitali, eccentricità e massa delle componenti sono in linea con le previsioni teoriche.

Facciamo un passo indietro, ipotizzando che l'unica pulsar nota nel sistema binario fosse PSR J0737-3039A. Come anticipato nella nota apparsa su questa rivista a gennaio [v. *Le Stelle* n. 14, pag. 12], la PSR J0737-3039A pulsa con un ritmo di ripetizione del segnale di 22,7 millisecondi e appartiene dunque alla classe delle pulsar a millisecondo, la gran parte delle quali sono ospitate in sistemi binari. La PSR J0737-3039A impiega circa 2 ore e mezza per percorrere un'orbita ellittica il cui semiasse maggiore è pari a circa 420 mila km. Siccome osserviamo la PSR J0737-3039A come radiopulsar, sappiamo che si tratta di una stella di neutroni e possiamo allora stimare che la sua massa non si discosterà di molto dai valori canonici, già misurati nelle stelle di neutroni ospitate in sistemi binari simili, ossia fra 1,3 e 1,5 volte la massa del Sole. Assunta questa ipotesi, le leggi di Keplero predicano che la massa della stella compagna deve essere maggiore di almeno 1,2 volte la massa del Sole. Già questa considerazione permette di concludere che la compagna della PSR J0737-3039A non può essere una stella normale, ossia una stella che, a mo' del Sole, sta bruciando idrogeno nel suo nucleo. Una stella siffatta avrebbe infatti un raggio dell'ordine di circa 850 mila km e la sua superficie deborderebbe le dimensioni dell'orbita stessa. Esistono pulsar con compagne così ingombranti, ma la loro presenza si nota subito nei segnali radio della pulsar stessa, che vengono distorti, ritardati o in qualche caso cancellati per ampi tratti dell'orbita. Le pulsazioni radio dalla PSR J0737-3039A giungono invece pulite e regolari lungo tutta l'orbita (con un'intrigante eccezione di cui parleremo più avanti).

Anche dall'osservazione dei segnali radio della sola PSR J0737-3039A si può dunque concludere che l'altra componente della coppia non è una stella simile al Sole. Che possibilità restano? Stelle giganti, ancora più estese delle stelle normali, devono essere escluse a maggior ragione. Rimangono pertanto due opzioni: o una nana bianca oppure un'altra stella di neutroni.

A questo punto entrano in campo gli studi teorici di evoluzione stellare, che predicano come la formazione di una doppia stella di neutroni sia l'esito di un lungo processo che inizia con un sistema binario composto da due stelle normali entrambe molto più massicce del Sole. La stella di massa più elevata è destinata a evolvere più rapidamente e conclude la sua vita con un'esplosione di supernova che lascia come relitto una stella di neutroni. In moltissimi casi, l'esplosione determina la distruzione del sistema binario, con la stella di neutroni e la stella compagna che vengono proiettate ad alta velocità in direzioni opposte. In pochi casi fortunati, il sistema può sopravvivere assumendo un'elevata eccentricità, frutto dell'impulso impartito dall'esplosione. Qualche tempo dopo, l'evoluzione porta la stella inizialmente meno massiccia ad espandersi a sua volta e ciò, in condizioni opportune, può innescare il trasferimento di massa verso la stella di neutroni. Il travaso di massa è un processo molto complicato che ha luogo in più fasi, il cui esito netto è da un lato di riaccelerare la stella di neutroni fino a regimi di rotazione di decine di giri al secondo, mentre nel contempo il sistema orbitale si circolarizza e si restringe,



Rappresentazione artistica del sistema binario PSR J0737-3039A+B: si tratta del primo caso scoperto di un sistema in cui vengono rilevati i segnali radio pulsati di entrambe le componenti.

La geometria dei coni d'emissione delle due pulsar è tale per cui i due fasci radio si incrociano per l'osservatore terrestre. Ciò promette di rivelare molti dettagli che ancora non conosciamo sulla forma dei coni e anche sulle caratteristiche della magnetosfera delle pulsar, grazie al fatto che alla congiunzione il fascio della componente A passa attraverso la magnetosfera di B. (cortesia John Rowe)

raggiungendo periodi orbitali dell'ordine di qualche ora. Il travaso di massa verso la stella di neutroni contribuisce anche a ridurre il suo campo magnetico superficiale di circa un centinaio di volte rispetto a quello che la stella di neutroni possedeva al momento della sua formazione (tipicamente circa 1000 miliardi di volte più intenso del campo magnetico terrestre). Alla fine si resta con una binaria composta da una pulsar a millisecondo e da una stella di elio, che è il nucleo della stella inizialmente meno massiccia.

Non è finita, poiché, presto o tardi, in dipendenza della sua massa, anche la stella di elio (che ha massa dell'ordine di 3-10 masse solari) deve esplodere come supernova. Di nuovo, si danno due possibilità: che nella esplosione il sistema binario venga disgregato o che sopravviva. Solo in quest'ultimo caso si forma finalmente un sistema binario di due stelle di neutroni. La seconda esplosione di supernova lascia una firma chiarissima, sotto forma di un'elevata eccentricità del sistema binario. Pulsar a millisecondo in orbita circolare (cioè di eccentricità trascurabile) sono invece l'esito di un processo che comprende una sola esplosione di supernova e quindi la compagna di tali pulsar non è in generale una stella di neutroni.

Fin qui la teoria, elaborata fin dal 1973 da Ed van den Heuvel e DeLoore e successivamente raffinata da vari autori, applicata per descrivere la formazione della PSR B1913+16 e di altri quattro sistemi binari simili scoperti negli anni '70 e '80. Sulla base della sola teoria è stato pure argomentato - nel quadro della pubblicazione su *Nature* della scoperta della PSR J0737-3039A - che la compagna doveva essere una stella di neutroni: l'orbita è infatti lunga dall'essere circolare, con un'eccentricità di circa il 9%.

Ma un'inferenza è cosa ben diversa da un'osservazione diretta! Con la scoperta della PSR J0737-3039B per la prima volta il cerchio delle deduzioni dei teorici si chiude e abbiamo l'oppor-



tunità di testare le previsioni con le osservazioni. L'accordo sembra davvero soddisfacente, almeno per le due predizioni fondamentali del processo evolutivo sopra descritto, che sono:

1) la componente B non avrebbe potuto essere una pulsar "riaccelerata" (mancandole la compagna "donatrice"); e infatti il suo periodo di rotazione (circa 2,7s) risulta 100 volte più lungo di quello della compagna;

2) non avendo subito il fenomeno di travaso di materia sulla propria superficie (ciò che determina, come detto, la rapida diminuzione di intensità del campo magnetico di una stella di neutroni), il campo magnetico della componente B doveva essere significativamente più intenso di quello della PSR J0737-3039A: e infatti risulta pari a $1,6 \times 10^{12}$ gauss, circa 250 volte maggiore dell'altro.

In definitiva, la componente B doveva essere una pulsar del tutto tipica, con caratteristiche non diverse da quelle della maggioranza di questi oggetti. In particolare, la sua età, stimata dal ritmo di rallentamento del regime rotazionale, doveva cadere nel tipico intervallo (10-100 milioni di anni) delle età delle pulsar normali: e infatti risulta di 50 milioni di anni.

Ovviamente, non tutti i dettagli collimano. Ad esempio, contrariamente a quanto atteso, le età "di frenamento" delle due pulsar non sono uguali. È ben noto che le pulsar vanno progressivamente rallentando la rotazione, frenate dal loro stesso campo magnetico. Ipotizzando che la velocità rotazionale al momento della formazione sia elevatissima (diciamo ai valori limite consentiti dalla fisica), conoscendo la velocità attuale e il tasso di rallentamento (che possono essere agevolmente misurati), si può calcolare quanto tempo sia trascorso dalla loro nascita. Le età di frenamento delle due componenti dovrebbero essere molto simili per il fatto che i "freni" magnetici hanno iniziato ad agire sulle due pulsar contemporaneamente, e indipendentemente, dal momento in cui la componente B è esplosa (prima dell'esplosione, la componente A non solo non rallentava, ma anzi accelerava la sua rotazione alimentandosi della materia della compagna). Con una certa sorpresa, applicando le formule canoniche, risulta invece che l'età di frenamento della PSR J0737-3039A è circa 4 volte più lunga dell'altra: un'incongruenza spiegabile con il fatto, ben noto, che le stime delle età delle pulsar a millisecondo sono da prendere sempre con molta cautela.

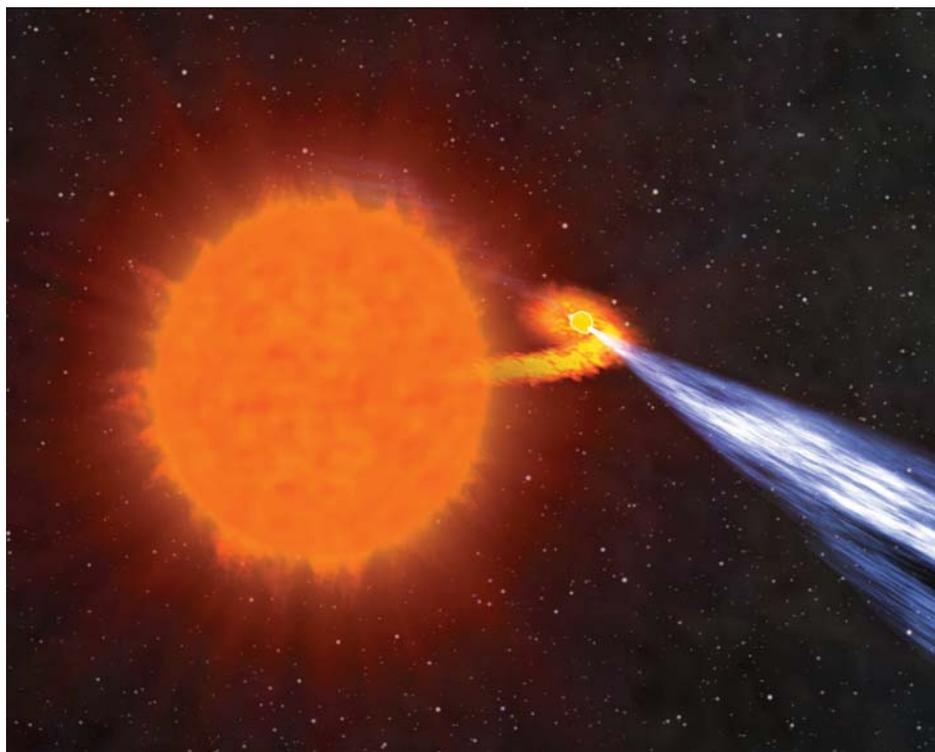
Anzi, rovesciando il ragionamento, potremmo utilizzare la conoscenza (abbastanza credibile) dell'età della componente B per risalire al valore iniziale della velocità che la componente A possedeva al termine della fase di riaccelerazione. Tale indagine non è mai stata in precedenza possibile per alcuna pulsar a millisecondo.

Fare le pulci alla Relatività Generale

All'annuncio della scoperta della PSR J0737-3039A+B hanno sicuramente fatto un balzo sulla sedia i "relativisti", gli scienziati che studiano e verificano la Relatività Generale.

Nella maggior parte dei sistemi binari, il moto delle due componenti può essere descritto con buona accuratezza utilizzando le leggi della gravità sviluppate sin dal XVII secolo da Isaac Newton. Esse predicono che il moto delle due stelle deve compiersi in un medesimo piano, che le traiettorie percorse hanno la forma di ellissi e che la velocità orbitale cresce tanto più le due stelle sono una vicina all'altra: essa risulta dunque massima quando il sistema è al periastro, il punto in cui i due corpi raggiungono la minima distanza reciproca. In questo quadro, un sistema binario contenente una radiopulsar è completamente descritto da sei parametri, che sono detti *parametri kepleriani*: il periodo orbitale - che

Ci fu una fase, nell'evoluzione del sistema, prima dell'esplosione che produsse la PSR J0737-3039B, in cui la stella progenitrice, una gigante espansa, perdeva materia nei confronti della PSR J0737-3039A, già formata in precedenza. Il trasferimento di materia riaccelerò la rotazione della componente A a valori elevatissimi (attualmente compie 44 rotazioni al secondo). (cortesia John Rowe)



Gli eremiti di Parkes

Marta Burgay

Suona la sveglia quando è ancora buio. Sono le tre e mezza, tra mezz'ora devo essere al telescopio per dare il cambio a Fernando. E il Sole non sorgerà prima di un altro paio d'ore. L'alba qui a Parkes è sempre spettacolare, i colori sono incredibili e l'atmosfera assolutamente irreali. È la prospettiva di veder sorgere il Sole o il pensiero della faccia che mi farebbe Fernando se arrivassi tardi a convincermi a sgusciare fuori dal letto? Mi vesto, o meglio, mi bardo, con tutti gli strati d'abiti che mi sono portata dall'altro emisfero.

È giugno, quasi inverno qui in Australia: durante il giorno il clima è più che invidiabile, ma alle 4h del mattino la temperatura si avvicina pericolosamente allo zero. Esco con passo felpato - e non so bene perché, visto che nel raggio di chilometri non c'è nessuno - infilo il casco e inforco la bici. Il percorso è breve e la strada scorre tra due file di pini dritta come un fuso. La flebile lucetta della bici mi preserva a stento da incidenti: finire in qualche fosso o magari investire qualche canguro. Le dita già si stanno congelando.

Arrivata alla torre del radiotelescopio, una costruzione circolare su tre piani sovrastata dall'enorme antenna parabolica di 64 m, smonto dalla bici, inserisco il codice per l'apertura delle porte fuori orario e salgo nella sala di controllo. Fernando sta ascoltando una delle sue cassette brasiere strappa-core. Non so chi dei due abbia l'aria più sbattuta. Io, temo. Ci salutiamo, mi faccio aggiornare sulle ultime osservazioni e su eventuali intoppi ed ecco: la mia giornata al radiotelescopio di Parkes, New South Wales, Australia, è cominciata.

Non c'è moltissimo da fare, di norma, per stare dietro alle osservazioni; ormai è quasi tutto automatizzato. Basta sapere cosa osservare, quando e con che strumento, dirlo ai computer e pigiare il tasto *Observe*. Di tanto in tanto c'è da trotolare su per le scale per cambiare il nastro su cui vengono registrati i dati o per connettere qualche cavo, se si deve cambiare ricevitore. Ci sono poi le situazioni straordinarie, quando qualcosa va storto. Se per esempio fuori c'è una tempesta e il vento supera i 60 km all'ora il radiotelescopio si riporta automaticamente in posizione verticale (si "parcheggia") e chi è di turno deve uscire e andare a disporre manualmente i blocchi alla base degli ingranaggi che governano il movimento dell'intera struttura per evitare che il vento la distorca o la danneggi.

In situazioni standard, invece, a tenere occupato - e sveglio - l'osservatore di turno è il *Watch Dog*, il Cane da Guardia. Così si chiama il sistema studiato per la sicurezza dell'astronomo solitario che, nel bel mezzo del nulla, potrebbe avere un incidente o un malore e non essere in grado di chiamare soccorsi, o, più semplicemente, potrebbe addormentarsi. L'aggeggio funziona più o meno così: ogni 15 minuti un *timer* aziona una sirena che deve essere spenta premendo un pulsante. Così di quarto d'ora in quarto d'ora, per tutte le 8 o 12 ore del turno di osservazione. Se per qualche malaugurata evenienza l'astronomo di guardia non potesse pigiare il bottone, la sirena continuerebbe a suonare sempre più forte. Allo scadere del ventesimo minuto, se il contatore non è ancora stato azzerato, un assordante squillo avvertirà l'astronomo nella foresteria, il quale correrà ad aiutare (o a svegliare) il collega. Dovessero passare ulteriori 10 minuti, scatterebbe l'allarme generale, sul modello Salva-la-Nonna, e i telefoni di tutti gli addetti al radiotelescopio squillerebbero impazziti. Per quel che ne so, l'unica volta che si arrivò all'allarme estremo fu colpa di un sonno decisamente pesante di un astronomo, impermeabile al caos.

Comunque, a parte la sirena del *Watch Dog* che puntualmente mi fa saltare sulla sedia, la mattina procede liscia. Per cinque o sei ore sono completamente sola, isolata dal resto del mondo (se si eccettua il solito Fernando che dorme nella foresteria, un chilometro più in là). C'è un sacco di tempo per lavorare, scrivere articoli, archiviare dati, preparare osservazioni, ma c'è anche un sacco di tempo per fermarsi a riflettere, per lasciare che la mente vaghi per i fatti suoi, seguendo pensieri alla rinfusa.

All'alba butto un occhio dalla finestra e qualche volta, in barba al *Watch Dog* che mi vorrebbe perennemente inchiodata alla sedia e al computer, faccio una volata fuori a godermi lo spettacolo e a scattare qualche fotografia.

La giornata procede più o meno uguale, tra una musicchetta brasiere e una telefonata per qualcuno che di solito non c'è. Verso le tredici rispunta Fernando e io inforco la bici e mi fiondo in foresteria. La fame mi divora e io divoro quel che passa il convento. E poi guai ad arrivare in ritardo per il pranzo! Jeanette, la nostra imponente cuoca, deve tassativamente aver finito di rassettare la cucina per le due, altrimenti si perde l'inizio della sua telenovela. Jeanette ha fatto una comparsata nel film *The Dish*, in cui si narra il ruolo fondamentale del radiotelescopio di Parkes nella missione dell'Apollo 11. Già, perché è proprio grazie a questa antenna che le immagini dell'atterrag-



L'antenna del radiotelescopio di Parkes e, appena sulla destra, nel prato, la sagoma di un coniglio selvatico, che accompagna dall'esterno le solitarie osservazioni della nostra autrice.



gio di Armstrong e Aldrin arrivarono in TV, passando per Parkes, Canberra e Houston!

Insomma, la *fiction* a Parkes è importante. Più della gastronomia. Se infatti a pranzo possiamo contare su Jeanette, per cena ce la dobbiamo cavare da soli, cacciando nel forno a microonde terribili piatti cucinati ore prima, sempre affogati in una salsa marrone, detta *gravy*, presi dalla dispensa su cui campeggia la scritta "Grande Frigo". Attorno al Grande Frigo e al suo prezioso contenuto ruota la vita sociale della foresteria, una bella casa di mattoni, su un solo piano, con pavimenti in legno, due ali adibite a dormitorio, sala da pranzo, sala TV/biblioteca e sala riunioni (con tanto di video telefono... che però non funziona).

Il cuore di Parkes è però la sala controllo. È qui che passo il pomeriggio: ora siamo in due o tre e si chiacchiera un po'. Alle volte, botta di vita, arriva un gruppo di turisti, a cui tentiamo di spiegare che cosa ci facciamo lì e che cosa sono queste pulsar che stiamo osservando. Altre volte ci si può concedere una capatina fuori, magari al *Visitor Centre*, a vedere per l'ennesima volta il filmato didattico sul radiotelescopio di Parkes: è divertente riconoscere in un documentario la gente con cui lavori! Di solito però riservo la mia "ora d'aria" alla "caccia" al canguro (Fernando più prosaicamente al *footing*, che qui chiamano *fitting*, o qualcosa del genere).

Attorno al radiotelescopio si estende un ampio terreno recintato, in parte adibito a una qualche coltura che non sono ancora riuscita a identificare, in parte al pascolo di pecore e in parte a nulla, apparentemente, se non alla mia attività di *kangaroo-watching* e, saltuariamente, al golf (il gioco) di Stacy, astronomo locale che porta con disinvoltto snobismo un nome femminile.

Al tramonto, se si è molto pazienti, silenziosi, fortunati e se si conoscono i posti giusti, si possono vedere famigliole di canguri o di *wallabie*, marsupiali anch'essi, ma un po' più piccini e scuri dei canguri. Il quadro della fauna locale si completa aggiungendo miriadi di uccelletti di ogni forma e colore che fanno un baccano d'inferno, insetti vari, ragni più o meno pericolosi e *brown* e *black snake*, serpenti pericolosissimi che io, grazie al cielo, non ho ancora incrociato. L'aria condizionata viene costantemente mantenuta a basse temperature proprio perché gli *snake* non amano il freddo e in questo modo vengono tenuti lontani dai nostri letti, dal Grande Frigo, dalla sala di controllo e da tutto il resto.

Le sessioni osservative, di norma, durano due o tre settimane e per tutto questo periodo resto quasi completamente isolata dal mondo: il paese più vicino è Parkes, 9500 anime, a 25 km dal radiotelescopio (e io non ho la patente di guida). Per la civiltà, quella con l'inquinamento e i *fast food*, quella coi cinema e i teatri, bisogna arrivare fino a Sydney, a un'ora e mezza di volo, su un aereo da 20-30 posti che, come fosse un bus, fa scalo in posti dai nomi improbabili (Dubbo, Bathurst...).

Alla fine, dopo tre settimane di vita da eremita, non è male prendere un volo intercontinentale da Sydney e tornare alla vecchia Europa. Qualche scalo esotico (Singapore, Kuala Lumpur, Bangkok) a interrompere le ventidue ore di volo ed eccomi a casa. Mi mancano i canguri, mi mancano le albe meravigliose. Però ritrovo il mio gatto, il ragù alla bolognese e otto ore di sonno filate.



Jeanette, la cuoca di Parkes, comparsa anche nel film The Dish, che narra il ruolo fondamentale avuto dal radiotelescopio australiano in supporto alla missione Apollo 11.

A sinistra, la sala di controllo, a destra, la centralina del controllo manuale del puntamento dell'antenna parabolica di 64 metri di diametro.

L'AUTORE

Marta Burgay è nata nel 1976 a Torino, ma vive ad Aosta. Laureatasi con lode in Astronomia a Bologna, nel marzo del 2001 vince il concorso di dottorato presso il Dipartimento di Astronomia di Bologna (tesi sulla Parkes High Latitude Pulsar Survey) e nell'ottobre 2003 vince un posto da ricercatrice presso l'Osservatorio astronomico di Cagliari.

Nel disegno sono stati tradotti graficamente alcuni dei vincoli sulle masse delle due pulsar ricavabili dalle teorie classiche o relativistiche della gravitazione. Per esempio, l'area colorata in giallo segnala i valori che possono essere esclusi sulla base di considerazioni di meccanica classica. Le misure sull'avanzamento del periastro, quelle sul parametro post-kepleriano s e quelle sul rapporto tra i semiasse orbitali sono i vincoli più stringenti. Tali vincoli (inserto ingrandito) concordano nel circoscrivere una piccola area (colorata in azzurro) dentro la quale dovrebbero collocarsi le masse più probabili delle due componenti, che sono rispettivamente 1,337 e 1,250.

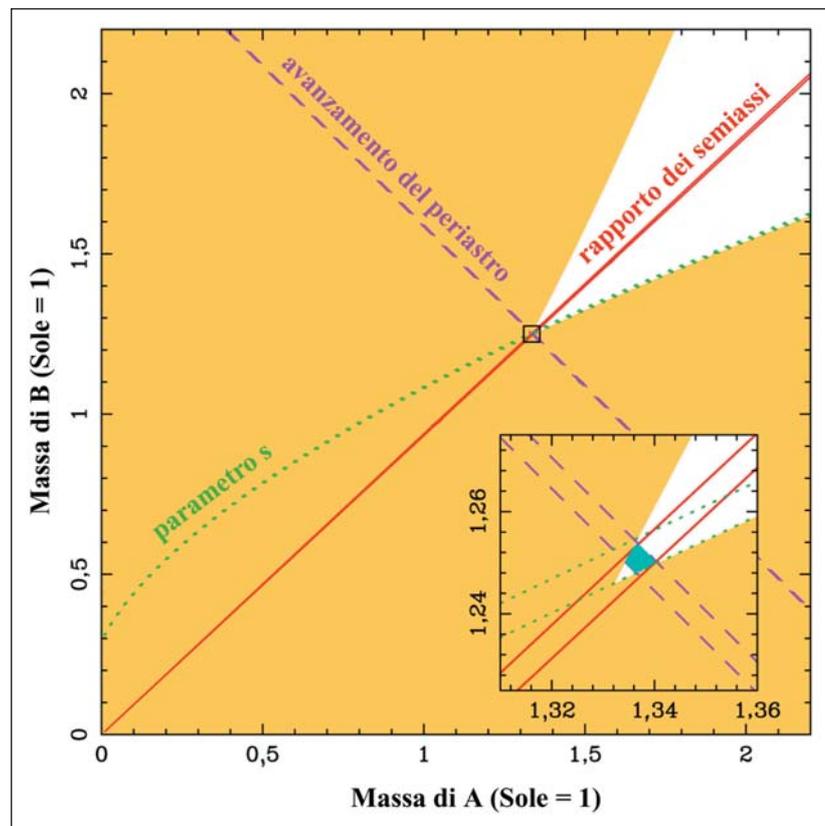
ci dice ogni quanto tempo la pulsar completa un'orbita; il *semiasse maggiore* della traiettoria ellittica della pulsar - che ci fornisce la dimensione dell'orbita; l'*eccentricità* - che ci dice quanto l'orbita si discosta da una circonferenza; il *tempo del passaggio al periastro* - che ci informa a quale istante la pulsar si trova alla minima distanza dalla compagna (basta aggiungere a questo tempo di riferimento un numero intero di periodi orbitali per ricavare tutti gli altri momenti in cui i due corpi sono alla minima distanza); l'*angolo di longitudine* del periastro - che ci dice la posizione in cielo del periastro rispetto a un opportuno sistema di riferimento; l'*angolo di inclinazione orbitale* - che ci dice quanto è inclinato il piano orbitale dei due corpi rispetto alla linea di vista (convenzionalmente un angolo di 90° significa che vediamo l'orbita perfettamente di taglio, mentre un angolo di 0° implica osservare il sistema esattamente di fronte). Esiste un settimo parametro kepleriano utile a descrivere la posizione complessiva dell'orbita in cielo, ma non ne parliamo perché non ha rilevanza fisica.

Una volta scoperta una pulsar in un sistema binario, effettuando osservazioni ripetute del suo segnale pulsato lungo un opportuno intervallo di tempo (un procedimento noto come timing della radiopulsar), è possibile determinare (con elevata accuratezza) cinque dei citati sei parametri kepleriani. Nel caso della PSR J0737-3039A, i numeri sono i seguenti: periodo orbitale 2h 27m 14,53504s; semiasse maggiore 424.480 km; eccentricità 0,087779; tempo del periastro 19 agosto 2003 alle 00h 17m 21,888s (TU); longitudine del periastro $73^\circ,805$. Tutte le cifre presentate sono statisticamente significative: per esempio, conosciamo il semiasse maggiore con la precisione di 1 km, il tempo del passaggio al periastro con la precisione di 1 millesimo di secondo, il periodo orbitale con una precisione di un centomillesimo di secondo, ecc. Tutto ciò osservando una sola pulsar. Dalle leggi di Newton, sappiamo del resto che la stella compagna deve muoversi con identico periodo orbitale, uguale eccentricità, stesso tempo di passaggio al periastro. Gli unici due parametri che la distinguono sono la longitudine del periastro (che è facile capire essere mezzo giro maggiore rispetto all'altro corpo, quindi nel nostro caso $73^\circ,805 + 180^\circ = 253^\circ,805$) e il semiasse maggiore dell'orbita, che può assumere a priori qualunque valore (dipende dalle rispettive masse).

Simili strabilianti precisioni di misura si possono ottenere poiché moltissime pulsar sono a tutti gli effetti dei "metronomi cosmici", ossia la frequenza di ripetizione dei segnali da esse irradiati appare straordinariamente stabile e quindi predicibile con grande accuratezza. Se fanno parte di un sistema binario, svolgono il ruolo di "cronometri" naturali atti a misurare il sistema stesso. La cosa diviene particolarmente interessante quando la pulsar è accompagnata da un'altra stella di neutroni che le

orbita vicino. In simile situazione, le velocità orbitali dei due corpi sono elevate (oltre 300 km/s nel caso della PSR J0737-3039A+B; per paragone la Terra orbita attorno al Sole a una velocità che è solo di 30 km/s) e l'azione dei rispettivi campi gravitazionali è molto intensa. La combinazione di questi tre fattori (accuratezza delle misure, elevata velocità orbitale, forti campi gravitazionali) fa sì che l'applicazione delle leggi newtoniane conduca a risultati che non spiegano completamente le osservazioni ed è necessario ricorrere a teorie più sofisticate dell'interazione gravitazionale fra corpi celesti.

Fra queste teorie, quella più nota è la Relatività Generale. Altre teorie concorrenti sono però state proposte in seguito. Tutte hanno una formulazione matematica assai complessa e permettono di ottenere soluzioni semplici delle rispettive equazioni soltanto in rarissimi casi. Inoltre, le predizioni che esse compiono differiscono usualmente assai poco e le piccole differenze possono essere mascherate da fenomeni secondari. Per discriminare fra le varie teorie è quindi essenziale focalizzare le osservazioni su sistemi molto semplici e privi di effetti collaterali. Fra di essi, una binaria stretta di due stelle di neutroni risulta un caso privilegiato: viste le ridottissime dimensioni di queste stelle, tale



binaria si può infatti modellizzare con grande precisione come un sistema di due masse puntiformi interagenti, uno dei pochi casi per il quale è possibile ottenere soluzioni approssimate delle equazioni descrittive il moto orbitale.

Queste soluzioni chiamano in causa una serie ulteriore di parametri orbitali, denominati *parametri post-kepleriani*. Il nome stesso indica che descrivono le correzioni da apportare alle previsioni puramente basate sulle leggi di Keplero. L'utilità fondamentale del formalismo dei parametri post-kepleriani, sviluppato da Thibault Damour, risiede nel fatto che ognuno di essi dipende solo dalla massa delle due stelle del sistema binario, da alcuni dei parametri kepleriani e dalla specifica Teoria della Gravitazione che viene utilizzata. Immaginiamo allora di scegliere una particolare Teoria della Gravitazione che chiameremo "Teoria alfa". I parametri kepleriani sono ben noti. Supponiamo di essere capaci di misurare tre parametri post-kepleriani. A questo punto abbiamo a disposizione tre equazioni (una per ogni parametro post-kepleriano) con due sole incognite, che sono le masse delle due stelle. Risolvendo le prime due equazioni si determinano le due masse e a quel punto, inserendo i valori nella terza equazione, questa deve risultare automaticamente verificata. Se non lo è, la "Teoria alfa" risulta falsificata e possiamo tranquillamente passare ad esaminare una "Teoria beta" della gravità.

La potenza del metodo descritto è evidente ed è stata applicata alla PSR B1913+16 (valendo ad Hulse e Taylor il premio Nobel per la Fisica nel 1993) e alla PSR B1534+12, che per ciò sono state battezzate *pulsar relativistiche*. D'altro canto, l'entità delle correzioni relativistiche del moto orbitale rispetto alle leggi di Keplero è tanto più grande quanto più piccolo è il periodo orbitale: dato che il nostro sistema binario ha un periodo orbitale fra tre e cinque volte più breve di quello della PSR B1913+16 e della PSR B1534+12, ciò implica il manifestarsi di effetti post-kepleriani tra 8 e 20 volte più grandi, ossia più facilmente misurabili.

Già a pochi giorni dalla scoperta (nell'estate scorsa) è stato possibile misurare uno dei parametri post-kepleriani, noto come *avanzamento relativistico del periastro*, ciò che richiede alcuni mesi nel caso della PSR B1913+16. Il fenomeno è ben noto anche nel sistema Solare, ed è stato osservato sull'orbita di Mercurio in misura di 43 secondi d'arco al secolo: nel caso della PSR J0737-3039A+B esso si manifesta al ritmo di quasi 17° all'anno! Questo parametro dipende dalla somma delle masse dei due corpi e quindi la sua misura ha permesso di ricavare questa grandezza, che risulta pari a 2,588 masse solari. Dopo altri soli cinque mesi di osservazione un secondo parametro post-kepleriano è stato misurato con elevata precisione, il cosiddetto *Shapiro delay*. Esso è legato al fatto che, sotto certe condizioni geometriche, la traiettoria delle onde radio prodotte dalla PSR J0737-3039A viene fortemente deformata dal campo gravitazionale della PSR J0737-3039B. La traiettoria si allunga, e gli impulsi arrivano alla Terra con un certo ritardo, fenomenologicamente rappresentato da due grandezze, i parametri post-kepleriani r e s , entrambe già osservate (la seconda con precisione molto più elevata). Una volta misurato s , disponiamo di una seconda equazione per determinare le masse, oltre a quella legata all'avanzamento del periastro; combinando le due equazioni, si possono ricavare separatamente le masse delle due stelle di neutroni, ottenendo 1,337 masse solari per la PSR J0737-3039A e 1,250 masse solari per la compagna. Dalla conoscenza delle due masse, si deduce anche il sesto parametro kepleriano, vale a dire l'inclinazione orbitale del sistema: la PSR J0737-3039A+B si muove su un piano che è visto quasi perfettamente di taglio, con una inclinazione di $87^\circ,5!$

Ancora un ulteriore mese di osservazioni e si è misurato anche il parametro post-kepleriano "*Gamma*" che è legato agli effetti del campo gravitazionale della PSR J0737-3039A+B sul segnale emesso dalla PSR J0737-3039A. Si tratta di un fenomeno noto anche col nome di *redshift gravitazionale* o *dilatazione dei tempi* e può essere euristicamente compreso come un effetto della relatività speciale, che insegna come il tempo scandito da un orologio in moto ad alta velocità sembri scorrere più lentamente rispetto al tempo di un orologio fermo rispetto a chi osserva. Quando le due stelle di neutroni sono più vicine fra loro, cioè al periastro, esse si muovono più velocemente rispetto ad altre fasi orbitali. Visto da un osservatore seduto sulla PSR J0737-3039A, il ritmo di emissione dei segnali non cambia rispetto ad altre fasi orbitali; esaminato però da un osservatore lontano, il ritmo di emissione rallenta quando le due stelle sono più vicine una all'altra. Nel caso della PSR J0737-3039A, i tempi di arrivo del segnale pulsato ritardano fino a 380 milionesimi di secondo rispetto a quanto succedrebbe se il fenomeno non avesse luogo.

Al tirare delle somme, dopo solo sette mesi di raccolta di dati, già 4 parametri post-kepleriani della PSR J0737-3039A sono stati misurati, uno in più di quelli misurati nel caso della PSR B1913+16 dopo trent'anni di osservazioni. Quattro parametri post-kepleriani sono stati osservati anche nella PSR B1523+12, ma hanno richiesto una quindicina di anni di *timing*. Quattro parametri significa la possibilità di testare - anzi testare doppiamente - le Teorie della Gravitazione. Finora l'incertezza sulla misura del terzo e del quarto parametro è ancora relativamente grande, ma entro breve tempo si

ridurrà tanto da poter verificare la Teoria della Relatività Generale di Einstein con una precisione migliore dello 0,2%, che è l'attuale limite imposto dagli studi trentennali sulla PSR B1913+16.

Attenzione: tutte le misure descritte finora si sono basate solo sull'osservazione della PSR J0737-3039A. La successiva scoperta della PSR J0737-3039B permette di andare ben oltre! Come prima cosa, poche ore di raccolta dati sono state sufficienti a determinare l'unico parametro kepleriano sconosciuto della PSR J0737-3039B, ovvero il semiasse maggiore della sua orbita, che risulta pari a 453.900 km (qui l'incertezza per ora è di 100 km). Thibault Damour ha dimostrato nel 1992 che in ogni teoria della gravità il rapporto R fra i semiasse maggiori delle orbite di due stelle di neutroni in un sistema binario deve essere il reciproco del rapporto fra le masse delle due stelle (il teorema ha una formulazione un po' più complicata, ma noi sorvoliamo sui dettagli). Sembra la scoperta dell'acqua calda, perché ogni studente di liceo sa che quella è una conseguenza immediata della teoria classica newtoniana; tuttavia, l'aver esteso il risultato a qualunque teoria (non solo alla Relatività Generale, ma anche alle nostre ipotetiche Teorie "alfa", "beta", ecc...) permette di usare la misura di R come una diagnostica importantissima delle teorie stesse. La scoperta della PSR J0737-3039A+B ci concede oggi di fare test per la prima volta in assoluto. Ogni Teoria della Gravitazione deve predire masse per le due stelle di questo sistema il cui rapporto (entro gli errori di misura, piccolissimi) sia $M_B/M_A = 424.480/453.900 = 0,93518$. Come mostrato nell'articolo apparso su *Science*, la Relatività Generale di Einstein soddisfa appieno il nuovo requisito.

Le prospettive future sono entusiasmanti: misure dello stato di polarizzazione degli impulsi delle due pulsar permetteranno di mettere in evidenza, in poco tempo e con grande precisione, la precessione dell'asse di rotazione dei due corpi, un altro effetto puramente relativistico finora misurato con difficoltà nel solo caso della PSR B1913+16. Per la prima volta si potranno compiere misure di *timing* combinando le osservazioni di entrambe le pulsar o misure dei tempi di arrivo dei segnali di una rispetto ai segnali dell'altra. Nuovi parametri post-kepleriani, mai misurati in altri sistemi, diventeranno quindi osservabili.

L'aspetto forse più eccitante riguarderà lo studio delle variazioni dell'asse di rotazione della PSR J0737-3039A rispetto al piano orbitale: dall'osservazione di questo fenomeno si potrebbe infatti ottenere una misura diretta del momento di inerzia della stella di neutroni. Il momento d'inerzia è una

grandezza meccanica legata alla massa della stella (che conosciamo con grande precisione), ma anche, indirettamente, alle leggi che descrivono il comportamento della materia nucleare. In questo settore della fisica regna tuttora una grande incertezza: ci sono almeno venti teorie alternative, ognuna delle quali predice un diverso momento di inerzia per una stella di neutroni con una massa come quella della PSR J0737-3039A. Misurare con precisione il momento di inerzia di questa stella significherebbe dunque selezionare qual è la teoria migliore. Sarebbe l'ennesimo fantastico caso in cui uno studio astrofisico permette di approfondire la conoscenza del mondo microfisico, ovvero di comprendere quali forze regolano l'interno dei nuclei atomici.



Nuove speranze per i cacciatori di onde gravitazionali

Il più famoso dei test della Relatività compiuto sulla PSR B1913+16 è quello relativo al ritmo con cui l'orbita della pulsar si restringe a seguito dell'emissione di onde gravitazionali. Tale processo di restringimento dell'orbita condurrà le due stelle di neutroni a fondersi fra circa 300 milioni di anni, in un evento contrassegnato da un'emissione esplosiva di onde gravitazionali. Tale radiazione è anch'essa una conseguenza della Relatività Generale, ma non è mai stata osservata per via diretta. Essa si dovrebbe manifestare come una debolissima deformazione ondosa dello spazio-tempo e da molti anni è in corso un formidabile sforzo scientifico e tecnologico teso alla costruzione di apparecchiature capaci di pescare il segnale in mezzo alla miriade di disturbi dovuti alle attività umane e all'apparecchiatura stessa. In tale difficile quadro osservativo, la fusione finale di due stelle di neutroni (detta *coalescenza*) rappresenta il fenomeno cosmico più promettente ai fini della rivelazione di queste onde da parte degli strumenti oggi disponibili, fra cui l'italiano VIRGO.

Sotto questo profilo, la PSR J0737-3039A+B si staglia ancora una volta come una scoperta basilare, foriera di grandi e rinnovate speranze. La ragione risiede nel suo breve periodo orbitale, che implica come il tempo di vita restante fino alla fusione del sistema sia di soli 85 milioni di anni. Se sommiamo a questo tempo l'età del sistema (50 milioni di anni dalla sua formazione, dopo la seconda esplosione di supernova), otteniamo che la PSR J0737-3039A+B vivrà complessivamente 135 milioni di anni, meno della metà della durata stimata della PSR B1913+16. Riproponiamo il ragionamento già succintamente presentato sul numero di gennaio della rivista. La probabilità di osservare un oggetto celeste è direttamente proporzionale alla durata della sua vita. Più la vita è lunga e maggiori sono le *chance* di osservarlo. Da questa considerazione discende che osservare oggetti simili alla PSR B1913+16 è doppiamente probabile che osservare oggetti simili alla PSR J0737-3039A+B. Nella realtà però noi osserviamo un esemplare per ciascuna delle due categorie. Per rendere conto di questo fatto dobbiamo allora pensare che esistano due volte più oggetti della classe della PSR J0737-3039A+B rispetto agli altri. Ecco allora che la semplice scoperta della PSR J0737-3039 implica il possibile raddoppio nel numero stimato di binarie costituite da due stelle di neutroni nella nostra Galassia.

Analogamente, sulla base del fatto che la PSR J0737-3039A+B è molto più vicina alla Terra (circa 1500-2000 anni luce) delle altre pulsar simili osservate e nel contempo è molto più difficile da scoprire (sia per quanto si è detto sul tempo di vita, sia per questioni tecniche relative alla ricerca di pulsar), si ottiene che la scoperta della PSR J0737-3039A+B implica di per sé che il numero di coppie di stelle di neutroni nella Via Lattea potrebbe essere più elevato di un fattore 6-8, rispetto a quanto stimato in precedenza. Se il numero di oggetti potenzialmente in grado di fondersi è più grande, anche la frequenza dei loro eventi di fusione deve essere maggiore di quanto stimato in precedenza. Grazie alla scoperta della PSR J0737-3039A+B, i ricercatori impegnati nella costruzione di rivelatori per onde gravitazionali possono sperare di osservare un evento fra due o tre anni, invece che dover attendere forse fino alla fine della loro carriera accademica.

La scoperta del sistema PSR J0737-3039A+B autorizza a pensare, sulla base di considerazioni statistiche, che il numero di sistemi binari di pulsar presenti nella Via Lattea sia maggiore di un fattore 6-8 rispetto a quanto si ritenesse in passato. Ciò aumenta di un medesimo fattore la possibile frequenza di eventi di fusione, che sono potenzialmente osservabili dai rivelatori di onde gravitazionali. Nella foto aerea, l'Osservatorio europeo per onde gravitazionali VIRGO, a Cascina, vicino a Pisa. Nella foto a fianco, la predisposizione di un test ottico in uno dei bracci dell'interferometro: il passaggio di un'onda gravitazionale modifica la distanza tra masse libere di una quantità pari un centomillesimo delle dimensioni di un atomo (!), rilevabile grazie alla figura di interferenza prodotta da un laser e da un sistema di specchi. (VIRGO)



Le pulsar non smettono mai di sorprendere

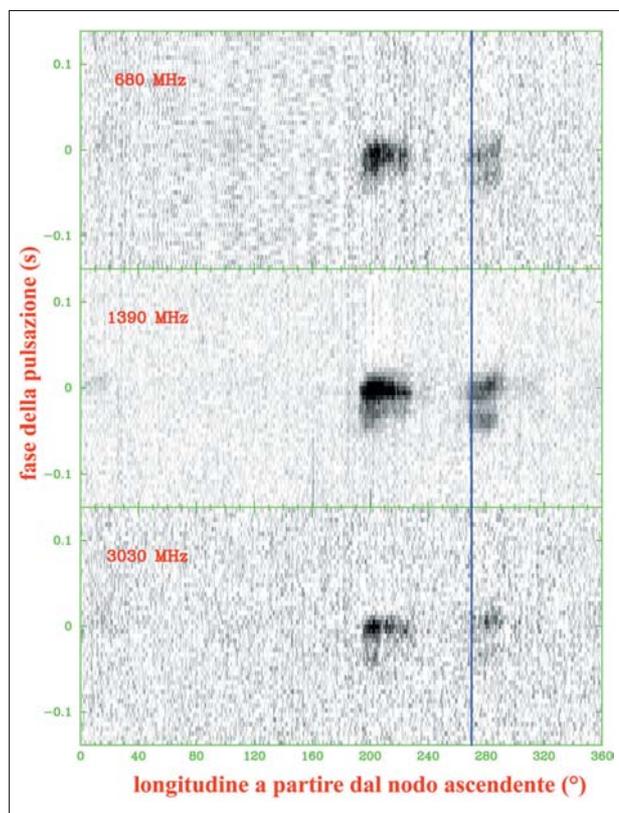
Ricercata per quasi trent'anni, una pulsar doppia (osservata in entrambe le componenti) è finalmente stata scoperta. Abbiamo descritto come ciò apra nuovi orizzonti osservativi mentre costituisce una bellissima conferma a tante teorie. Ma la PSR J0737-3039A+B non si sottrae alla regola che accompagna molte delle scoperte più importanti: essa crea più problemi astrofisici di quanti ne risolve.

La sorpresa più clamorosa è costituita dalle fortissime variazioni di luminosità radio della PSR J0737-3039B. Come si vede meglio nella figura, le sue pulsazioni sono percepibili al meglio quando essa percorre due archi della sua traiettoria ellittica, ognuno ampio circa 30° , collocati nella sezione di orbita più vicina alla Terra. Nelle altre porzioni di orbita il segnale è rivelabile solo a un'intensità molto ridotta, il che, in molti casi, costringe a sommare insieme le osservazioni di più orbite per ottenere un'identificazione sicura delle pulsazioni. Le fasi orbitali di elevata o di scarsa visibilità non sembrano variare con la frequenza radio di osservazione, almeno nell'intervallo di radiofrequenze utilizzato finora, da 680 MHz a 6,6 GHz. Varia invece il profilo dell'impulso, sia da frequenza a frequenza (ma questo è un fatto comune nelle radiopulsar), sia fra le varie fasi di visibilità: nella prima fase di alta visibilità il profilo presenta un picco principale e uno secondario; nella seconda fase di alta visibilità il profilo mostra due picchi di quasi identica intensità, mentre nelle fasi di bassa visibilità il profilo è a picco singolo.

Niente di simile si era mai veduto in precedenza in alcuna radiopulsar, ma, esaminando la problematica a posteriori, un comportamento anomalo del segnale poteva essere predetto per il caso di un'eventuale pulsar doppia. Vediamo sulla base di quali considerazioni. Comportandosi come una piccola calamita costretta a ruotare vorticosamente, una stella di neutroni irraggia energia e il conto per l'energia emessa viene pagato dall'energia di rotazione della stella, che dunque rallenta. Solo una piccolissima frazione (di solito un centomillesimo, o anche meno) dell'energia irraggiata va ad alimentare il segnale radio pulsato. Il resto viene dissipato in varie forme, secondo una legge di distribuzione che è tutt'oggi ignota: parte dell'energia viene trasportata via sotto forma di particelle accelerate a velocità prossime a quelle della luce (elettroni, positroni, protoni o ioni più pesanti); un'altra parte viene emessa sotto forma di fotoni di elevatissima frequenza, come raggi gamma e raggi X; un'ulteriore componente è emessa come radiazione elettromagnetica alla frequenza di rotazione della stella.

Fra le due pulsar del sistema doppio, la PSR J0737-3039A emette energia a un tasso 3600 volte superiore a quello della PSR J0737-3039B. La sua potenza energetica è pari a circa una volta e mezza la

potenza del Sole, ma mentre la maggior parte dell'energia del Sole è rilasciata a lunghezze d'onda ottiche, la grande maggioranza della potenza emessa dalla PSR J0737-3039A è in forma di radiazioni ionizzanti e altamente penetranti! Questo ci dice che stazionare a una distanza dalla PSR J0737-3039A pari alla distanza Terra-Sole avrebbe effetti devastanti su ogni essere umano. Figurarsi cosa succederebbe trovandosi ad una distanza 167 volte inferiore, ossia alla distanza media che separa la PSR J0737-3039B dalla PSR J0737-3039A (900 mila km): il bombardamento energetico ad opera della PSR J0737-3039A non può non influire sulla compagna e in particolare sui delicati meccanismi che presiedono alla generazione del suo segnale radio pulsato. Ma cosa determina la variabilità lungo l'orbita? Per rispondere, bisogna chiamare in causa la geometria del sistema e assumere che il flusso energetico dalla PSR J0737-3039A non sia omnidirezionale, ma venga rila-



La componente B della coppia di pulsar fa sentire il suo segnale solo in certe fasi dell'orbita: in altre il segnale è molto debole o manca del tutto. Le fasi di "accensione" sono le stesse a tutte le radiofrequenze e corrispondono a due archi dell'orbita, ampi ciascuno una trentina di gradi, collocati nella sezione di orbita più vicina alla Terra, appena prima e dopo la congiunzione (linea blu verticale) delle due componenti. Nelle fasi orbitali di elevata o di scarsa visibilità cambia il profilo dell'impulso (lo si vede "leggendo" il grafico lungo la verticale, per circa 2 decimi di secondo centrati attorno al tempo dell'impulso): nella prima fase il profilo presenta un picco principale e uno secondario; nella seconda mostra due picchi di quasi identica intensità, mentre nelle fasi di bassa visibilità il profilo è a picco singolo. Si pensa che la causa di ciò vada ricercata nell'interazione dei fasci d'emissione radio delle due componenti.

sciato preferenzialmente lungo direzioni privilegiate. Una scelta semplice (ma non universalmente accettata) è quella di supporre che la maggior parte dell'energia venga incanalata lungo lo stesso cono da cui si origina l'emissione radio. In questo caso, è evidente che la PSR J0737-3039A esercita la massima influenza sulla PSR J0737-3039B quando il suo cono di emissione colpisce in pieno il cono di emissione della PSR J0737-3039B, il che, a seconda dell'inclinazione dei coni stessi rispetto al piano orbitale, avviene solo a certe fasi orbitali.

L'esistenza di una fortissima interazione fra le due pulsar è supportata anche dall'osservazione di un intenso segnale radio continuo che si sovrappone a quello pulsato: alla frequenza di 1400 MHz, la potenza pulsata è solo la metà della potenza emessa dal sistema nel continuo. Anche questo è qualcosa di assolutamente inedito: nelle fasi lontane dall'impulso, le pulsar usualmente non emettono alcun segnale radio rivelabile a Terra. Una spiegazione del fenomeno invoca il passaggio di particelle cariche in moto a velocità relativistica (quelle accelerate dalla PSR J0737-3039A) all'interno della magnetosfera della PSR J0737-3039B, ossia della regione di plasma che circonda la PSR J0737-3039B e che ruota solidalmente con la pulsar. Il moto di particelle cariche veloci all'interno di un campo magnetico è il più comune meccanismo di emissione radio da oggetti cosmici (è denominato *emissione di sincrotrone*) e potrebbe spiegare l'emissione continua anche dalla pulsar doppia.

Appena si tenta di entrare nei dettagli e di costruire modelli predittivi dei flussi osservati e delle loro fasi di alta e bassa visibilità, il quadro si complica enormemente. Comunque, la grande speranza è che questa ricca fenomenologia possa essere utilizzata per ricavare informazioni geometriche e fisiche la cui determinazione non è mai stata possibile in altre pulsar. Ad esempio, la quota in cui si trovano le regioni radioemittenti, la forma dei coni di emissione e la loro orientazione, la composizione del flusso energetico emesso dalle due pulsar e così via.

La lista delle cose "mai viste prima" è già lunga, ma non ancora completa. Esaminando attentamente l'emissione dalla PSR J0737-3039A si è scoperto che essa subisce un'eclisse! Brevissima, dell'ordine di 18-20 secondi, in corrispondenza alla fase orbitale - detta *congiunzione* - in cui le due pulsar sono allineate con la linea di vista e, in particolare, quando la PSR J0737-3039B si trova fra la PSR J0737-3039A e la Terra. Si conosce solo una decina di sistemi binari in cui il segnale di una radiopulsar è temporaneamente eclissato: in tutti quei casi, il fenomeno è imputabile all'assorbimento delle onde radio ad opera del gas rilasciato dalla compagna della pulsar, sia essa una nana bianca, una stella di Sequenza Principale, o una subgigante. Ma se la compagna è una stella di neutroni questa spiegazione non regge, perché la gravità alla superficie della stella è così grande che nessuna molecola di gas -

ammesso che ne esistano alla superficie - potrebbe allontanarsi più di qualche centimetro dalla superficie stessa. L'inclinazione del sistema è molto spinta (circa 87° come detto), ma non abbastanza per giustificare che l'eclisse sia dovuta al corpo solido della PSR J0737-3039B. Avendo un raggio di soli 10-20 km, il disco della PSR J0737-3039B non può intercettare le onde radio emesse dalla PSR J0737-3039A lungo il loro cammino verso la Terra, né il suo intenso campo gravitazionale può defletterle abbastanza da produrre una eclissi completa del segnale. La durata dell'eclisse ci dice che la regione che la determina si deve estendere per circa 15-20 mila km. L'ovvio candidato è la magnetosfera della PSR J0737-3039B, la cui dimensione caratteristica dovrebbe essere 2-3 volte più grande. Se questa supposizione verrà confermata dalle osservazioni più accurate già in corso, potremo usare l'emissione radio della PSR J0737-3039A come una sonda nei confronti della magnetosfera della compagna e disporremo di un laboratorio unico per studiare uno degli ambienti fisici più ostici e insondabili del Cosmo. Sotto qualunque lato la si guardi, la PSR J0737-3039A+B è un regalo fattoci dalla Natura per aiutarci a comprendere meglio le leggi del suo funzionamento. Per gli astrofisici un terreno di studio che li terrà occupati per molti decenni a venire. ■

Le orbite delle due pulsar. Sono segnati in giallo i due archi nei quali riusciamo a ricevere il segnale emesso dalla componente B: il cerchio rosa dà un'idea delle dimensioni della sua magnetosfera. Nel disegno in basso, con le orbite viste di lato, si apprezza come, alla congiunzione, il segnale radio proveniente dalla componente A debba filtrare attraverso la magnetosfera della B per giungere all'osservatore terrestre.

