

# Pulsar doppia: l'apoteosi della Relatività

di Andrea Simoncelli

18

Le conoscenze di fisica stellare sono, ormai, abbastanza consolidate. È noto che le stelle con una massa di circa 5-10 masse solari, esaurito il loro combustibile nucleare, terminano la loro vita espellendo gli strati più esterni nello spazio, originando una gigantesca esplosione detta supernova, che lascia come residuo una stella di neutroni, un oggetto compatto con una massa pari a circa una volta e mezza quella solare, concentrata però in un raggio di soli 10-20 km. Una stella di neutroni rappresenta quello che resta quando una stella di grossa massa collassa su sé stessa; la forza di gravità prevale su quella elettronica che tiene separati gli atomi gli uni dagli altri e li comprime al punto tale che gli elettroni si trovano così vicini ai protoni da fondersi con essi originando neutroni. A

questo punto la stella, costituita da soli neutroni, ha una densità di circa un miliardo di tonnellate per centimetro cubo, un valore paragonabile a quello dei nuclei degli atomi. Per il principio di conservazione del momento angolare, lo stesso che consente ad un pattinatore di



**Scoperta nel 2003, la PSR J0737-3039, meglio conosciuta come pulsar doppia, sta permettendo agli astrofisici di ottenere straordinarie conferme della teoria della Relatività Generale di Einstein. Vediamo lo stato dell'arte della ricerca su questo affascinante oggetto celeste.**

accelerare la sua piroetta avvicinando le braccia al corpo, la stella collassata, avendo ridotto il proprio raggio, possiede un periodo di rotazione velocissimo. Le stelle di

sate, e solo in seguito furono rilevate anche nell'ottico, nei raggi X e gamma. L'emissione periodica viene ben spiegata da quello che gli astronomi chiamano "effetto faro". Essi ritengono che l'emissione, confinata entro un piccolo cono, sia originata come **radiazione di sincrotrone**, dovuta agli elettroni proiettati via dall'astro lungo le direzioni dei poli magnetici. Se le direzioni degli assi di rotazione e magnetico sono tali per cui, nel corso della rotazione, il fascio conico punta nella direzione della Terra, un osservatore viene investito periodicamente, per una breve frazione del periodo, da un flusso di radiazione, che subito dopo si attenua fino a sparire. In tal modo si genera un segnale periodico, proprio come quello emesso da un faro e osservato da una nave in mare. Dalla scoperta della prima pulsar, avvenuta nel 1967, gli astrofisici ne hanno rivelate oltre un migliaio, la maggior parte delle quali sono localizzate nella nostra galassia, e solo alcune in altre galassie.

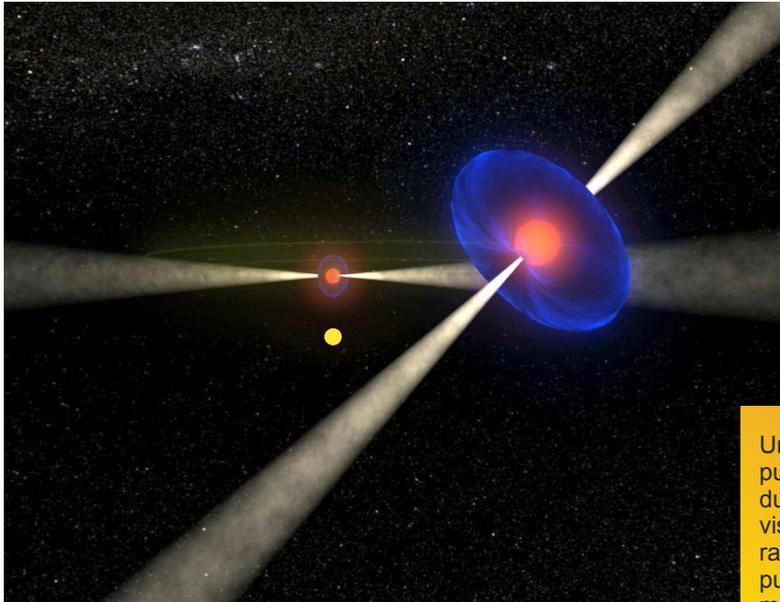
Di pulsar ve ne sono di molto veloci (un

neutroni in rapida rotazione e dotate di un intenso campo magnetico sono denominate pulsar (acronimo di *pulsating radio sources*, ovvero radiosorgenti pulsanti). Le pulsar vennero inizialmente scoperte proprio come sorgenti di onde radio pul-

Il radiotelescopio di Parkes si trova nel Nuovo Galles del Sud, in Australia, a circa 400 km da Sydney. Si tratta di un paraboloide di 64 m di diametro e viene utilizzato sia da un gruppo di ricerca italiano sia dai partner internazionali. [ATNF/CSIRO]

impulso ogni pochi millesimi di secondo), ma anche di "molto lente" (un impulso ogni 5-10 s), alcune sono isolate e altre appartengono a sistemi binari.

Realizzato dal National Radio Astronomy Observatory (NRAO), il GBT è situato nel West Virginia (USA), in una zona denominata *Quiet Zone*, nella quale le interfe-



renze radio, che risulterebbero dannose per il paraboloide, sono mini-

mizzate. Per aver contribuito alla scoperta della pulsar doppia, la giovane ricercatrice Burgay, insieme ai membri del gruppo internazionale PULSE (da *Pulsar Science*

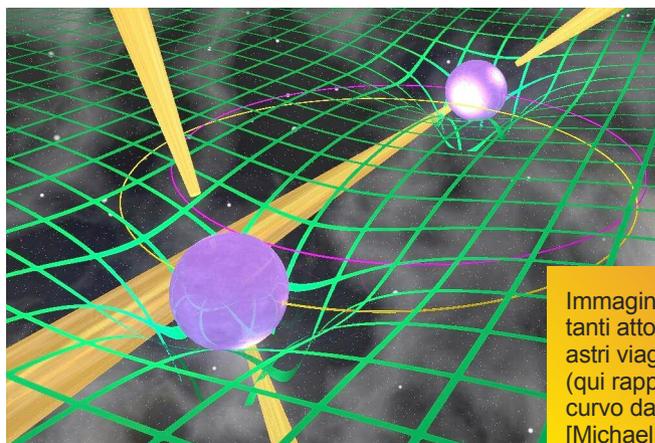
Una rappresentazione grafica del sistema della pulsar doppia, l'unico sistema binario formato da due pulsar in orbita una attorno all'altra, entrambe visibili dai radiotelescopi grazie al fascio di onde radio che emettono con estrema regolarità. La pulsar A è rappresentata come un pallino giallo, mentre la pulsar B è identificata dal pallino rosso circondato da un'ampia struttura bluastra, a forma di ciambella, che rappresenta la sua magnetosfera. [Rene Breton, McGill University]

20

Nel 2003, un team internazionale di astrofisici, tra i quali Marta Burgay, Nichi D'Amico e Andrea Possenti, del Gruppo Pulsar dell'INAF-Osservatorio di Cagliari, firmarono la scoperta, riportata sulla rivista internazionale *Nature* (M. Burgay et al., **426**, 531; 2003), dell'oggetto PSR J0737-3039, meglio conosciuto come la "pulsar doppia", poiché è l'unico sistema noto formato da due pulsar. In realtà, all'inizio i ricercatori stessi presentarono la scoperta come un sistema doppio degenero formato da una stella di neutroni pulsante e da un compagno silente, ma dopo qualche mese si resero conto che si trattava in realtà di due pulsar, presentando la scoperta alla comunità scientifica con un secondo articolo apparso sulla rivista *Science* (A.G. Lyne et al., **303**, 1153L; 2004). La scoperta del primo sistema formato da due pulsar in mutua rivoluzione è stata possibile grazie alle osservazioni effettuate col radiotelescopio australiano (di 64 m) di Parkes, e in seguito confermate con il Green Bank Telescope (di 100 m) uno dei più grandi radiotelescopi al mondo.

*in Europe*), ottenne nel gennaio 2006 il prestigioso Premio Descartes 2005, il massimo riconoscimento europeo per la ricerca scientifica. La pulsar doppia è situata nella costellazione australe della Poppa, ad una distanza di circa 1800 anni luce da noi. La prima delle due pulsar scoperte nel sistema, detta pulsar A, possiede un periodo di rotazione di 23 millisecondi, mentre l'altra, denominata pulsar B, ha un periodo sensibilmente più lungo, pari a 2,7 s; la distanza tra le due pulsar è di circa 850000 km ed esse orbitano una attorno all'altra in 2,4 h. Sin dalla scoperta, la comunità scientifica internazionale si è mostrata molto interessata all'oggetto, e ne è testimonianza il fatto che il primo articolo è stato in assoluto il più citato della letteratura scientifica nel 2004. Il grande interesse degli astrofisici può essere spiegato facilmente: nelle condizioni estreme presenti nel sistema doppio, gli effetti previsti dalla teoria della

Relatività Generale di Albert Einstein diventano molto marcati e si possono vedere in pochi anni. Quando si vuole predire il moto di due stelle appartenenti a un sistema doppio è solitamente sufficiente ricorrere alle leggi classiche della gravità sviluppate da Isaac Newton. Tali leggi però si dimostrano inadeguate quando le stelle in esame sono corpi esotici, come le stelle di neutroni, che hanno raggi dell'ordine delle decine di km e densità simili a quelle di un nucleo atomico. In questi casi è necessario ricorrere alla Relatività Generale, che certamente ha una formulazione matematica ben più complessa rispetto alla teoria classica e che solo in pochi casi, tra i quali quello rappresentato da due stelle di neutroni in un sistema binario, presenta equazioni del moto risolvibili. Considerate le ridotte dimensioni delle stelle, gli astronomi sono in grado di modellizzare il sistema binario con alta precisione come una coppia di corpi puntiformi.



Le due stelle, inoltre, sono abbastanza vicine (la distanza è circa due volte quella che separa la Terra dalla Luna), le velocità orbitali sono alte (maggiori di 300 km/s, ovvero 1/1000 della velocità della luce) e l'azione dei campi gravitazionali è molto intensa.

La combinazione di tutti questi fattori fa sì che gli effetti relativistici, oltre a essere facilmente calcolabili, diventano anche particolarmente intensi e quindi più facili da misurare.

Grazie all'estrema regolarità del loro periodo di pulsazione, le pulsar possono essere considerate dei veri e propri orologi cosmici e la scoperta della pulsar doppia ha permesso agli scienziati di disporre di un eccezionale laboratorio cosmico che permette di effettuare misure su diversi parametri previsti dalla Relatività Generale, grazie ai migliori ricevitori esistenti. In effetti, per diversi anni, i più grandi radiotelescopi del mondo, quali quello di Parkes, di Lovell (nel Regno Unito) e il Green Bank Telescope, hanno tenuto le loro parabole orientate verso il sistema PSR J0737-3039.

Ad ogni "battito" delle due pulsar, è stato possibile restringere sempre di più il margine d'errore che permette di stabilire se le variazioni di orbita e periodo seguano o meno la teoria di Einstein anche in presenza di un campo gravitazionale straordinariamente intenso.

Con queste osservazioni, i ricercatori hanno potuto misurare alcuni parametri chiamati "post-kepleriani" relativi alla pulsar doppia, ovvero:

- l'avanzamento del periastro;
- il redshift gravitazionale;
- il "ritardo temporale di Shapiro";
- il decadimento dell'orbita.

Immagine di fantasia delle due pulsar orbitanti attorno al comune centro di massa. Gli astri viaggiano attraverso lo spazio-tempo (qui rappresentato dalla griglia verde) reso curvo dalle loro stesse masse.

[Michael Kramer, Jodrell Bank Observatory]

L'avanzamento del periastro rappresenta il progressivo spostamento del punto di minore distanza fra le orbite ellittiche delle due pulsar; questo valore è stato misurato dopo soli sei giorni di osservazioni, grazie all'entità del fenomeno: nel caso di Mercurio, l'avanzamento del periastro corrisponde a 43 secondi d'arco al secolo, mentre nel caso della pulsar doppia risulta di circa 17 gradi all'anno!

Gli astronomi hanno misurato anche il redshift gravitazionale, ovvero la dilatazione della lunghezza d'onda degli impulsi; si tratta di un effetto previsto dalla Relatività Ristretta, che predice come il tempo segnato da un orologio in moto ad alta velocità appaia scorrere più lentamente rispetto a quello segnato da un

dell'orbita, ovvero la progressiva diminuzione della distanza tra le due pulsar, dovuta all'emissione di onde gravitazionali. Il restringimento dell'orbita misurato nei mesi successivi alla scoperta è pari a circa 2,5 m/anno, un valore in linea con quanto previsto dalla Relatività Generale. Grazie alle equazioni di Einstein è possibile pre-



Da sinistra, il dott. Andrea Possenti, il prof. Nichi D'Amico e la dott.ssa Marta Burgay del gruppo Pulsar di Cagliari. [INAF]

22

orologio in quiete rispetto all'osservatore. Al periastro, le due pulsar si muovono più rapidamente che non in altri punti dell'orbita; un ipotetico osservatore solidale su una delle pulsar-orologio, vedrebbe sempre lo stesso ritmo di emissione dei segnali. Un osservatore lontano, invece, osserverebbe il ritmo di emissione rallentato quando le due stelle sono più vicine. Un altro parametro che è stato misurato è il "ritardo temporale di Shapiro" causato dalla deformazione dello spazio-tempo nei dintorni delle pulsar. Quando una delle due pulsar si trova lungo la linea di vista che congiunge il nostro pianeta con l'altra pulsar, la traiettoria delle onde radio prodotte da quest'ultima viene fortemente deflessa dal campo gravitazionale della compagna interposta. In pratica, la traiettoria si allunga e gli impulsi giungono a Terra con un certo ritardo, detto appunto "di Shapiro" in omaggio allo scienziato Irwin Shapiro, che lo propose nel 1964. Infine, è stato misurato il decadimento

vedere che le due pulsar arriveranno, tra circa 85 milioni di anni, a contatto e si fonderanno in un buco nero. In un evento così catastrofico si avrà l'emissione di onde gravitazionali estremamente ener-

getiche e del tipo rivelabile dai principali rivelatori attuali: l'italiano VIRGO, lo statunitense LIGO e l'europeo GEO. I ricercatori hanno effettuato in tal modo quattro differenti test alla teoria della Relatività Generale: senza ombra di dubbio sia Einstein sia la sua teoria ne sono usciti vittoriosi. Gli scienziati però, non ancora del tutto soddisfatti, hanno continuato a osservare la pulsar doppia e ad analizzare i dati, convinti di poter ottenere ulteriori scoperte sensazionali. Ciascuna pulsar emette fasci di onde radio che sono registrati dai radiotelescopi presenti sul nostro pianeta. Grazie al fortunato allineamento del piano orbitale del sistema con la nostra linea di vista, a ogni orbita si osserva un'eclisse causata dal passaggio della pulsar A dietro alla pulsar B; il fenomeno si deve alla magnetosfera della pulsar B, una regione nella quale una nube di plasma è intrappolata dal campo magnetico della pulsar stessa. L'eclisse permette di determinare l'orientamento della pulsar B, in quanto i cambiamenti nella geometria del

Il Green Bank Telescope è stato a lungo utilizzato dai radioastronomi cagliaritari per raccogliere preziosi dati sulla pulsar doppia. Questo radiotelescopio è il secondo più grande al mondo dopo quello di Arecibo. [NRAO]

sistema cambiano il modo in cui la radiazione emessa dall'altra pulsar giunge a un osservatore terrestre durante l'eclisse. Grazie all'analisi della scomparsa dell'impulso della pulsar A, i ricercatori hanno misurato la precessione geodetica, meglio nota come il "moto a trottola relativistico", della pulsar B. Anche le leggi che descrivono questo moto sono una conseguenza della Relatività Generale; recentemente era stato osservato nei giroscopi, speciali "trottole" poste in orbita attorno alla Terra. Nell'estate del 2008, un gruppo internazionale di astrofisici, tra i quali i già citati radioastronomi del Gruppo Pulsar, lo ha notato nella pulsar doppia, dove l'effetto è circa 2800 volte più ampio di quello misurato vicino al nostro pianeta. Il lavoro rappresenta la prima conferma sperimentale che la precessione geodetica si manifesta esattamente al ritmo previsto dalla Relatività Generale anche nelle vicinanze di oggetti celesti

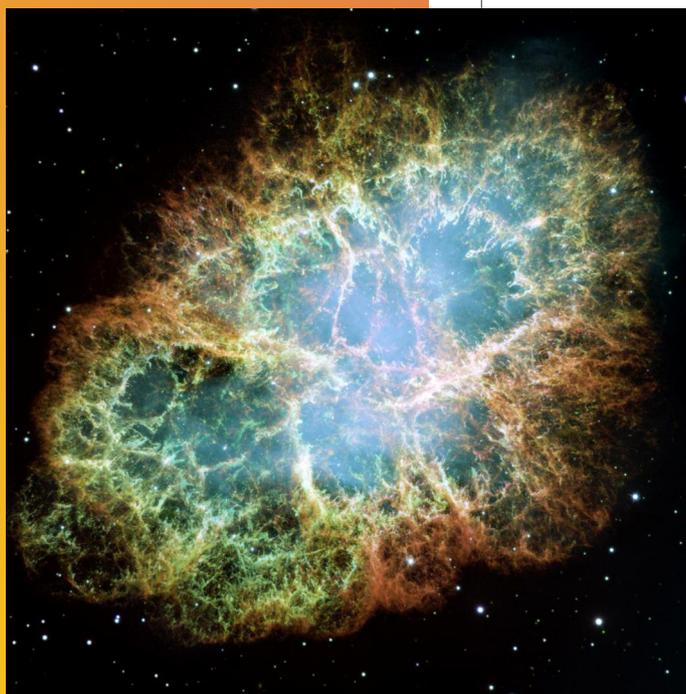
23

## La scoperta delle pulsar

La prima pulsar fu scoperta da Jocelyn Bell Burnell, dottoranda presso l'Università di Cambridge, e dal suo supervisore di tesi Anthony Hewish nel 1967, durante un esperimento sulla scintillazione prodotta dal mezzo interplanetario sulle radiosorgenti extragalattiche. Questo oggetto mostrava impulsi regolari con un periodo di circa 1,377 s e una durata di qualche centesimo di secondo. A causa dell'estrema regolarità del segnale, all'inizio fu ipotizzato che il segnale rappresentasse il tentativo di comunicazione di una civiltà aliena e l'oggetto fu chiamato LGM1 (Little Green Men 1). Ben presto, però, Hewish e la Bell abbandonarono l'ipotesi del segnale artificiale perché registrarono altri segnali simili in zone diverse del cielo e perché non trovarono un'evidenza di un moto orbitale dell'oggetto emittente, che invece ci si aspetterebbe se si fosse trattato di un messaggio inviato da un pianeta extraterrestre che orbita attorno alla sua stella.

La scoperta mise in subbuglio la comunità scientifica, che si divise fra quanti credevano potesse trattarsi di un nuovo fenomeno legato alle nane bianche e chi pensava che l'origine delle pulsar fosse da ricercare nelle stelle di neutroni, la cui esistenza era stata prevista su basi teoriche fin dal 1932, ma non era mai stata confermata con le osservazioni. L'evidenza definitiva che le pulsar sono proprio stelle di neutroni si ebbe con la scoperta della pulsar nella Nebulosa Granchio (M1), un residuo di supernova che Franco Pacini aveva teorizzato potesse essere alimentato dalla presenza di una stella di neutroni dotata di un intenso campo magnetico e in rapida rotazione. Inoltre, il breve periodo di ripetizione (33 millesimi di secondo) della pulsar di M1 escludeva che potesse trattarsi di una nana bianca: a tali regimi rotazionali, infatti, l'astro sarebbe distrutto dalla forza centrifuga che verrebbe a prevalere su quella di gravità. L'annuncio della scoperta della prima pulsar, da allora denominata con la sigla PSR 1919+21, fu dato da Hewish nel febbraio 1968 in un articolo apparso su *Nature*, in cui venivano descritte le caratteristiche fisiche della pulsar. La scoperta di questi astri fu così importante che valse a Hewish e al radioastronomo Martin Ryle (che mise a punto il radiotelescopio utilizzato per identificarli) il premio Nobel per la Fisica nel 1974. Jocelyn Bell non fu né insignita del premio (ricevette invece, insieme ad Hewish, la medaglia Michelson nel 1973) né citata durante il discorso di assegnazione, cosa che suscitò molte polemiche all'interno della comunità scientifica.

Una straordinaria immagine della Nebulosa Granchio (M1) ottenuta con il VLT. È il residuo della supernova del 1054, registrata dagli astronomi cinesi e arabi dell'epoca. Al centro della nebulosa si trova la pulsar PSR B0531+21 scoperta nel 1968: fu la prima osservazione di un'associazione tra pulsar e residuo di supernova, una scoperta importante per l'interpretazione delle pulsar come stelle di neutroni. [ESO]



La dott.ssa Marta Burgay durante una visita al radiotelescopio di Arecibo, Puerto Rico. La giovane ricercatrice ha vinto diversi premi, tra i quali il Premio Tacchini 2005 per la tesi di dottorato e nel 2006 la prima edizione del premio internazionale "Young Scientists Prize in Astrophysics" per il suo contributo alla scoperta della pulsar doppia.



dotati di grande massa: le due pulsar hanno, infatti, una massa totale di circa 900000 volte quella della Terra. Anche in questo caso una grande vittoria dello scienziato tedesco.

La scoperta è apparsa sulla rivista *Science* (R.P. Breton et al., **321**, 5885, 104; 2008) e si basa su quattro anni di osservazioni condotte utilizzando il GBT.

Secondo la fisica newtoniana, l'inclinazione dell'asse di rotazione di una stella che orbita attorno a una compagna dovrebbe rimanere immutata rispetto alle stelle di sfondo. Per poter spiegare il moto osservato bisogna invece considerare che lo spazio-tempo non è piatto, bensì reso curvo dalla massa dei corpi celesti. In questo modo, l'asse di rotazione della pulsar B, mentre è in rotazione attorno alla pulsar A, subisce un lieve e ciclico cambiamento d'inclinazione, con un periodo di circa 70 anni. La conseguenza è un'oscillazione "a trottola" simile al movimento che coinvolge l'asse di rotazione del nostro pianeta e che descrive un moto conico con un periodo di quasi 26000 anni; fra le conseguenze ci sono lo spostamento del Polo Nord Celeste e la precessione degli equinozi.

Nel caso della pulsar doppia però, la causa è completamente differente: mentre per la Terra la fisica di Newton è sufficiente per spiegare il fenomeno, per la pulsar doppia è necessario considerare la curvatura dello spazio-tempo.

La PSR J0737-3039 continua ad attirare l'attenzione della comunità scientifica e a

far sognare gli astrofisici. Nel giro di pochi anni, infatti, ha permesso di ottenere ottimi risultati, superiori a quelli di qualsiasi altra pulsar nota (compresa la PSR 1913+16, che nel 1993 permise a R.A. Hulse e a J.H. Taylor di vincere il premio Nobel per la fisica – si veda *l'Astrofilo* **4** 19), e le aspettative per i prossimi anni sono alte. Quella più grande è che l'osservazione prolungata di questo sistema binario permetta di comprendere il comportamento della materia nelle stelle di neutroni. Gli scienziati, infatti, non dispongono di nessun laboratorio terrestre in grado di riprodurre condizioni di densità così estreme. La pulsar doppia potrebbe quindi in futuro riservarci ancora delle piacevoli sorprese e prestigiosi riconoscimenti per i radioastronomi italiani, attivissimi nello studio di questo affascinante oggetto cosmico.

*L'autore ringrazia Marta Burgay per la disponibilità dimostrata durante la stesura dell'articolo.*

**Andrea Simoncelli, nato a Ortona nel 1978, abita a Vasto. Nel 2002 ha conseguito la laurea in astronomia presso l'Università degli Studi di Bologna, occupandosi della controparte ottica e infrarossa del GRB020405. In seguito ha trascorso un periodo di ricerca presso l'Osservatorio Astronomico di Brera-Merate. Nel 2007 ha ottenuto l'abilitazione all'insegnamento presso l'Università di Modena. Attualmente insegna scienze matematiche nella scuola secondaria di primo grado e si occupa di divulgazione scientifica.**