

DUE STELLE DI NEUTRONI SONO MEGLIO DI UNA

LE PULSAR BINARIE SONO UN OTTIMO BANCO DI PROVA
PER LA RELATIVITÀ GENERALE

Nel 1974 erano già state scoperte un centinaio di pulsar: benché non si fosse ancora interamente capita la fisica dei processi di emissione di queste “trottole cosmiche”, si era sicuri che si trattasse di stelle di neutroni isolate, rapidamente rotanti.

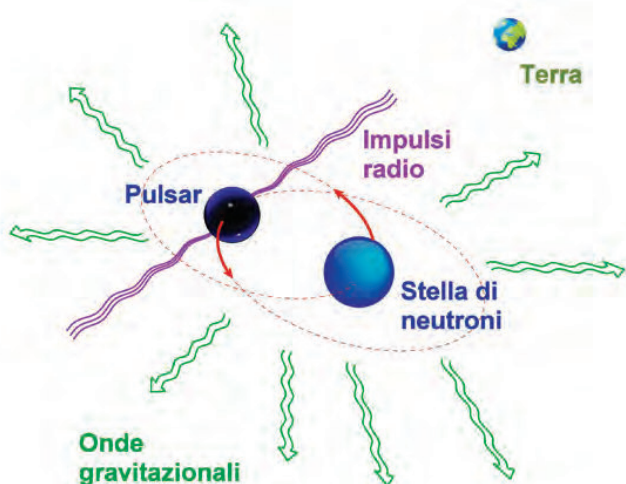
Nessuno dubitava di ciò, dato che la presenza di una stella compagna avrebbe introdotto delle variazioni periodiche facilmente rivelabili nel segnale pulsato, che i radioastronomi sono in grado di misurare con precisione inferiore ai 100 microsecondi. Per esempio, se il Sole fosse una stella di neutroni pulsante, un radioastronomo da una stella lontana sarebbe in grado di rivelare la presenza di tutti i suoi pianeti.

LA PRIMA PULSAR BINARIA

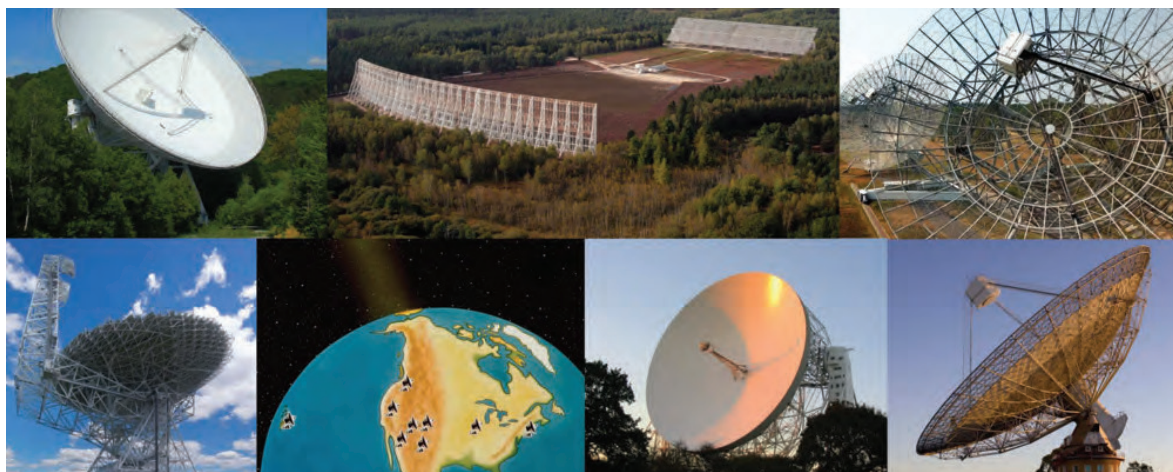
Negli anni 70, tutti i grandi radiotelescopi del mondo scandagliavano il cielo alla ricerca di nuove pulsar e il grande (e

sensibilissimo) radiotelescopio di Arecibo era all'epoca lo strumento più ambito per queste ricerche. La prima pulsar binaria fu scoperta nel 1974 da Russell Hulse, un dottorando all'Università di Cornell, l'istituzione che in quegli anni era responsabile della gestione del

telescopio. All'epoca, le pulsar al millisecondo erano una delle ultime novità della ricerca astronomica e Hulse aveva avuto dal suo relatore Joe Taylor il compito di utilizzare la grande sensibilità di Arecibo per rivelarne di nuove. Così trovò la pulsar identificata



» A sinistra: lo schema del sistema di Hulse e Taylor con emissione di onde gravitazionali. In questa pagina un'immagine di fantasia di una pulsar nello spazio profondo.



» I sette radiotelescopi usati per l'osservazione della doppia pulsar PSR J0737-3039. In senso orario a partire dall'alto a sinistra: Effelsberg (Germania), Nançay (Nrt, Francia), Westerbork Synthesis (Wsrst, Paesi Bassi), Parkes (Australia), Jodrell Bank (UK), Very Long Baseline Array (Vlba, Usa), Green Bank (Gbt, Usa).

dalla sigla PSR B1913+16, distante 21mila anni luce, che gli diede del filo da torcere. A volte il segnale c'era, altre volte no, oppure si presentava con caratteristiche un po' diverse, come se la stella di neutroni che lo produceva si muovesse intorno a un altro oggetto celeste. Sospettando di avere scoperto la prima pulsar in un sistema binario, lo studente si precipitò a informare il suo professore usando un fortunoso (e scadente) ponte radio. Joe Taylor salì sul primo aereo per Arecibo, perché quel poco che aveva capito dalla disturbata conversazione lo aveva convinto che ci poteva essere qualcosa di molto interessante.

Studiando la variazione del periodo della pulsar, venne tracciata la curva della velocità radiale, la cui forma non sinusoidale denunciava che la stella di neutroni si muoveva su un'orbita eccentrica con un periodo di 7 ore e tre quarti e dimensioni

minori di quelle del nostro Sole, con una velocità che raggiungeva l'1 per mille della velocità della luce. Fissando la massa della pulsar al valore canonico di 1,4 masse solari, si ricavò che la massa della stella compagna poteva variare tra 1 e 2 masse solari, in funzione dell'inclinazione dell'orbita del sistema. Date le dimensioni ridottissime dell'orbita, la compagna non poteva essere una stella normale: era sicuramente un'altra stella di neutroni, il cui fascio di emissione non era però diretto verso la Terra, visto che si registrava una sola pulsazione.

LA SCOPERTA (INDIRETTA) DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

Dopo le prime osservazioni della pulsar binaria, si comprese che un'orbita del genere doveva mostrare in modo macroscopico alcune

conseguenze della relatività speciale e generale. In effetti, sette anni di osservazioni continue fornirono il valore dell'avanzamento del periastro, la misura precisa della massa delle due componenti e la prima prova (indiretta) dell'esistenza delle onde gravitazionali, attraverso la misura del decadimento dell'orbita. Mentre per Mercurio l'avanzamento del periastro è di 43 secondi d'arco al secolo, per PSR1913+16, appartenente a un sistema molto più compatto e massivo, l'avanzamento è di ben 4,2 gradi all'anno. Questa misura è molto importante poiché fornisce una misura della massa totale del sistema binario, che risulta essere pari a 2,8 masse solari, suddivise tra le due componenti di 1,43 e 1,40 masse solari rispettivamente. La relatività generale prevede che un sistema di questo tipo emetta energia sotto forme di onde gravitazionali.

La perdita di energia viene compensata con un rimpicciolimento dell'orbita, con conseguente diminuzione del periodo. Avendo a disposizione tutti i parametri orbitali e le masse delle componenti del sistema binario, si è potuto confrontare il valore previsto con quello misurato, e confermare quindi che il sistema perde energia attraverso onde gravitazionali.

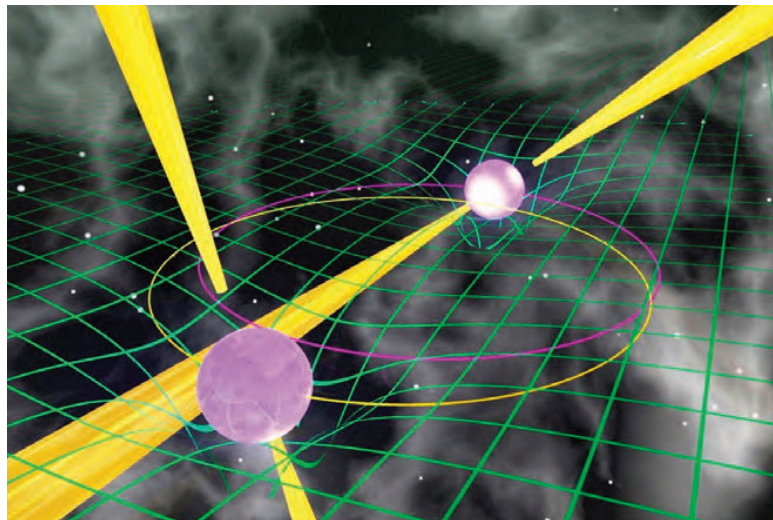
Un risultato bellissimo che, oltre a portare Russel Hulse e Joseph Taylor a Stoccolma per ricevere il Nobel per la Fisica nel 1993, fornì la prima conferma (indiretta ma robustissima) dell'esistenza delle onde gravitazionali e convinse le agenzie finanziatrici a investire negli interferometri.

Il cammino è stato lungo, ci sono voluti oltre 40 anni prima di rivelare il segnale diretto del passaggio di un'onda gravitazionale (nel 2015, grazie agli interferometri Ligo negli Usa), ma, nel frattempo, i radioastronomi hanno continuato a cercare stelle di neutroni in sistemi binari.

A CACCIA DI ALTRE BINARIE

Nel 2003 la collega Marta Burgay scoprì il primo (e finora unico) esempio di sistema binario formato da due stelle di neutroni entrambi pulsanti, note come PSR J0737-3029 A e B, distanti 1600 anni luce nella costellazione della Poppa.

La componente A è una pulsar velocissima che ruota 44 volte al secondo (periodo di 22,7 millisecondi), mentre la B è una pulsar classica, con un periodo di 2,77 secondi. Il periodo orbitale è di 147 minuti, meno di due ore e mezza. Si pensa che le pulsar velocissime siano riaccelerate



» Una rappresentazione artistica della pulsar binaria PSR J0737-3029 A e B.

grazie all'accrescimento di materia ceduta dalla stella compagna, con il conseguente aumento del momento angolare (vedi l'articolo sugli esopianeti su *Cosmo* n. 26, ndr). Allora è probabile che, nel sistema formato da stelle decisamente più massive del nostro Sole, sia esplosa per prima la supernova che ha generato la prima versione di A. Solo dopo milioni di anni di anonimato, sarebbe avvenuta la sua accelerazione, grazie al contributo della materia sottratta alla stella progenitrice di B.

Poi è avvenuta l'esplosione della stella B, che ha lasciato una stella di neutroni più normale a formare un sistema binario di due stelle di neutroni in un'orbita lievemente eccentrica, percorsa in 2,45 ore. Non è chiaro come sia esplosa la stella progenitrice di B, perché una supernova dovrebbe lasciare qualche "ricordo", come un notevole moto proprio del sistema binario, che

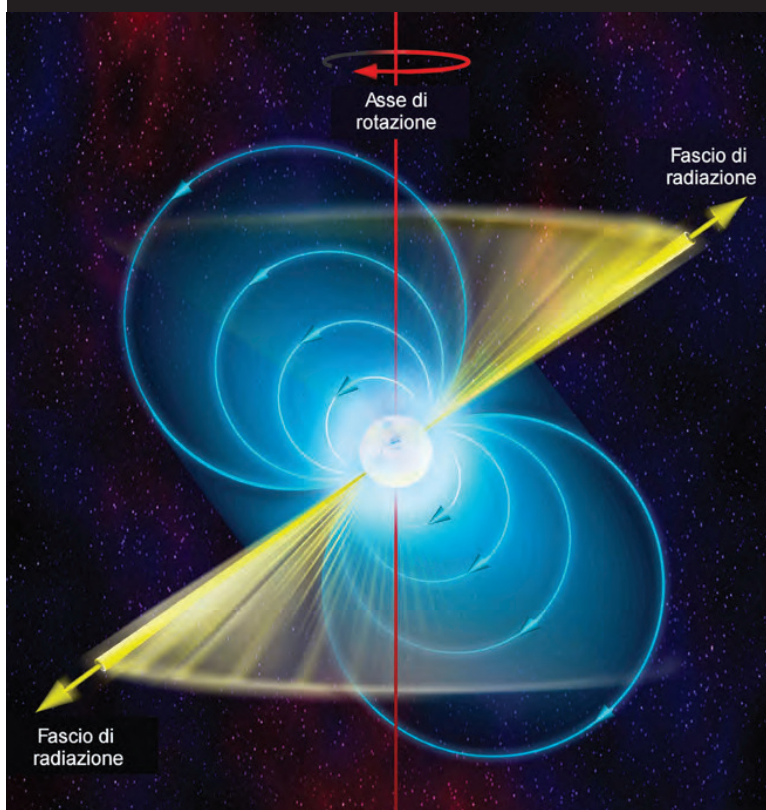
invece non risulta presente.

Mentre i teorici si interrogano sulla genesi del sistema, la coppia di pulsar rimane comunque una combinazione perfetta per andare più a fondo nei test degli effetti relativistici, usando non uno ma due orologi superprecisi. La scoperta della prima pulsar doppia non aveva interessato solo i radioastronomi. Il nostro gruppo a Milano aveva cercato di capire se una delle due pulsar, o entrambe, producessero anche un'emissione X. La risposta è stata positiva, ma c'è voluta un'osservazione molto lunga da parte del telescopio orbitale *Xmm Newton* per raggi X, per riuscire a rivelare le pulsazioni della velocissima A e della più lenta B, che emette solo in una frazione dell'orbita, probabilmente perché colpita dal vento di particelle relativistiche prodotto dalla pulsar A. Per sfruttare al meglio le possibilità offerte da questa straordinaria combinazione di orologi cosmici,

TROTTOLE COSMICHE

> Il termine “pulsar” deriva da *pulsating star* (“stella pulsante”) e indica i corpi celesti in rapida rotazione, caratterizzati dall'emissione pulsata di onde radio. Le pulsar sono stelle di neutroni, risultanti dal collasso gravitazionale di stelle esplose come supernovae. La loro grande velocità di rotazione deriva dalle loro dimensioni limitate, in cui si è concentrato tutto il momento angolare della stella originaria.

L'emissione pulsata regolare è causata dall'inclinazione dell'asse di rotazione stellare rispetto all'asse del suo intenso campo magnetico (*figura*). Così, l'emissione dalle particelle accelerate dal campo magnetico rotante con la stella si verifica in una direzione privilegiata (“effetto faro”). Pertanto, se il fascio di radiazione non è diretto verso di noi, una stella di neutroni non si manifesta come pulsar. L'energia che occorre per effettuare l'emissione è fornita dall'energia di rotazione della stella: perciò il periodo di rotazione della pulsar diminuisce molto lentamente e con estrema regolarità, permettendo così di stimare la sua età.



il lavoro dei radioastronomi è stato lungo e accuratissimo. Per condurre la ricerca, hanno usato, a intervalli regolari, sette radiotelescopi per sedici anni. Il loro scopo era ottenere misure a diverse frequenze dello spettro radio, precisamente da 334 a 2520 megahertz, popolando una banca dati impressionante, che ha permesso di andare a fondo nella verifica delle previsioni della relatività generale.

EINSTEIN SOTTO ESAME

Utilizzando la pulsar binaria PSR J0737-3029 A e B, sono ben sette gli effetti relativistici che è stato possibile verificare; alcuni per la prima volta, mentre per altri sono stati migliorati i risultati ottenuti in precedenza. Per esempio, la misura della perdita di energia dovuta all'emissione di onde gravitazionali è stata misurata con una precisione 25 volte superiore a quanto fatto da Hulse e Taylor. Quanto alle novità, è stato possibile misurare come i fotoni radio emessi da una delle due pulsar si propagano all'interno del campo gravitazionale dell'altra. In questo si è visto come l'emissione, oltre a essere ritardata dalla curvatura dello spazio-tempo intorno alla compagna, sia deflessa di un angolo di 2,4 primi d'arco, risultante dall'effetto di trascinamento dovuto alla rotazione del campo gravitazionale, un fenomeno mai visto prima. Per finire, sono ammirata dalla straordinaria precisione nella determinazione della massa delle due stelle di neutroni, il cui valore è misurato con un errore di pochi millesimi di masse solari. Possiamo proprio affermare che due stelle di neutroni sono meglio di una. ∞