
PULSAR

Scoperta:

1967, la studentessa Jocelyn Bell, dell'Università di Cambridge, durante le sue osservazioni per il dottorato di ricerca attraverso l'uso del grande radiotelescopio (due ettari) osserva sui nastri di registrazione delle tracce di scintillazione riferite sempre allo stesso punto del cielo e alla medesima ora siderale. Aumentando la sensibilità delle rilevazioni (cioè aumentando la velocità di scorrimento della carta) si accorse che il picco precedentemente osservato era in realtà la somma di diversi impulsi a intervalli regolari di 1,33s.

Con l'aiuto del suo professore, Antony Hewish, non fu difficile risalire alla dimensione dell'oggetto in questione (che per il breve periodo non poteva che avere dimensioni paragonabili a quelle della Terra) e ad una sua approssimativa distanza (200 anni luce, circa).

Dopo lo storico articolo dei due, apparso sulla rivista Nature nel febbraio '68, cominciarono a moltiplicarsi le osservazioni e le conoscenze di questi corpi. Le pulsar oggi conosciute sono 705 (delle quali 5 extragalattiche), spesso osservate in sistemi binari (in 45 casi); particolarmente importante a tal proposito è la scoperta di sistemi binari costituiti da due stelle di neutroni, con probabile emissione di onde gravitazionali, compiuta da Russel Hulse e Joe Taylor nel 1993.

Nascita di una pulsar

Quando in una stella di massa superiore a 1,5 masse solari viene meno la pressione di radiazione in grado di mantenerla nello stadio di gigante rossa, in seguito alla emissione dal nucleo di una grande quantità di neutrini (particelle di massa nulla e spin 0.5, che non interagiscono con la materia) e alla conseguente perdita di energia termica, si assiste ad una repentina contrazione che causa aumento di calore e innesco di violente reazioni nucleari che possono far aumentare la luminosità della stella anche di 300 milioni di volte quella solare. Ciò che resta di questa conflagrazione che riempie lo spazio circostante di elementi più pesanti del ferro, dando origine alle stelle di Popolazione II, è una stella di neutroni (ammesso che la massa iniziale fosse inferiore a 3.2 masse solari, limite oltre il quale si sarebbe formato un buco nero, mentre se la massa iniziale fosse stata inferiore a 1.4 masse solari si sarebbe formata una nana bianca).

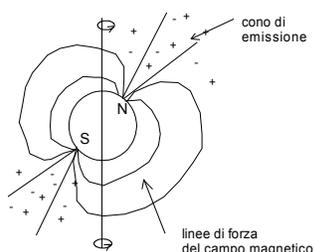
Una stella di neutroni è un corpo in cui l'immane pressione esercitata dalla forza di gravità a vinto via via il legame elettrico che manteneva la struttura atomica e poi la repulsione che separava protoni e neutroni, fondendoli in un fluido neutronico ad altissima densità. Per questo motivo la stella di neutroni è un corpo estremamente denso (100 milioni di tonnellate per centimetro cubo) e piccolo (qualche decina di chilometri).

Per la legge della conservazione del momento angolare in un sistema ($L = I \omega$) dal momento che diminuisce il raggio del corpo e la massa resta pressoché invariata (?) è la velocità rotazionale ad aumentare a dismisura, arrivando a punte di parecchie centinaia di chilometri al secondo. E tuttavia l'enorme forza centrifuga agente soprattutto all'equatore della stella (v^2/R) viene completamente annullata dall'enorme gravità superficiale (alcune centinaia di migliaia di volte maggiore di quella terrestre), col risultato che la stella di neutroni appare perfettamente sferica, se si escludono alcuni "rilievi" dell'altezza di pochi centimetri. Non sorprende quindi il fatto che già a partire da masse poco più che doppie, a parità di raggio, si abbia la formazione di buchi neri.

Il rapidissimo moto di rotazione produce anche un intensissimo campo magnetico, che dopo aver indotto un campo elettrico sulla superficie della stella in grado di strappare e accelerare particelle cariche fino a velocità prossime a c , devia sciami di elettroni e positroni verso i due poli, con emissione di radiazione di sincrotrone (cioè di radiazione prodotta da elettroni relativistici), sotto forma di onde radio.

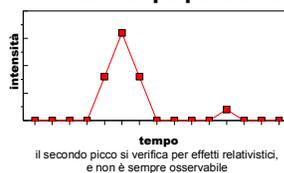
E' proprio grazie al fatto che l'asse di rotazione della stella e quello del campo magnetico non coincidono che è possibile che questo fascio di onde non sia puntato sempre in un punto, ma attraversi via via diverse regioni del cielo, a seconda della distanza tra i due tipi di poli.

Ora, è chiaro che questa emissione è osservabile dal nostro pianeta solo nel caso in cui uno dei due coni uscenti dai poli intersechi la linea di vista della Terra, ed è un evento che si stima possibile nell'1% dei casi.



Se ciò avviene, il fenomeno osservato è una serie di rapide pulsazioni nella banda

Curva di radiazione in caso di assi non perpendicolari



radio, con periodi tipicamente di qualche decimo di secondo (il più corto finora conosciuto è di 0,033s). La forma risultante nella curva intensità-tempo è quella di una linea piatta intervallata da picchi molto ripidi, ad intervalli uguali al periodo (naturalmente se si eccettua il caso in cui gli assi del campo magnetico e di rotazione siano perpendicolari, e che il fascio di elettroni sia puntato in direzione della Terra: in tale circostanza si avranno due picchi uguali ad intervalli di metà periodo).

In alcuni casi, cioè in presenza di inclinazioni degli assi molto favorevoli, si può assistere anche alla comparsa di un picco secondario di minore intensità, ad un intervallo di tempo pari a metà periodo; in questo particolare caso però non si tratta di un fascio di luce che punta direttamente in direzione dell'osservatore, ma che verso questo viene deviato dall'intensissimo campo gravitazionale della stella di neutroni. Questo fenomeno previsto dalla Relatività Generale è ad esempio osservabile nella pulsar in M1 (PSR 0531+21).

Ovviamente i tempi misurati, per poter essere confrontati, devono essere riferiti ad uno stesso punto dello spazio, in questo caso il baricentro del Sistema Solare; da questo deriva la grande necessità di conoscere con la massima precisione possibile le due posizioni, quella del baricentro e quella della pulsar, dal momento che già errori di 0,1" provocano oscillazioni di 0,25 millesimi di secondo, facilmente rilevabili.

Dati ricavabili dal periodo di una pulsar

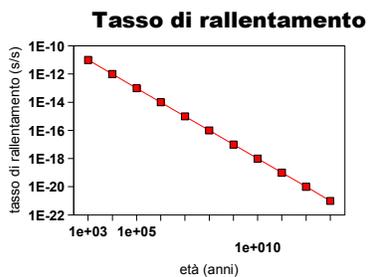
L'emissione di onde radio avviene a spese dell'energia rotazionale, in quanto l'intenso campo magnetico che deflette gli elettroni e li indirizza in direzione dei poli ha un effetto frenante. In particolare, maggiore è l'energia emessa da una pulsar, maggiore risulta il suo tasso

di rallentamento, cioè la quantità di cui aumenta annualmente il suo periodo. Questo allungamento è comunque veramente contenuto: da 10^{-12} a 10^{-21} secondi l'anno.

E' però sufficiente a farci calcolare con buona approssimazione l'età della pulsar in questione, usando la semplice formula:

$$\text{età} = P/2\dot{P}$$

Questa formula ha potuto facilmente essere verificata nel caso di stelle di neutroni di formazione recente, quali sono quelle nate in seguito all'esplosione di supernove in questi ultimi secoli, eventi spesso registrati con molta precisione dagli astronomi antichi. E' questo il caso ad esempio della pulsar 0531+21, nella Nebulosa del Granchio (osservato in Cina nel 1054).

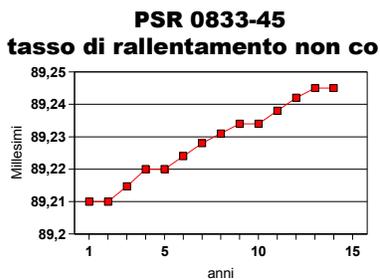


Tuttavia in alcuni casi si assiste ad una variazione non regolare del periodo: il tasso di rallentamento cioè non resta costante, ma per qualche tempo si annulla, facendo sì che il periodo resti uguale..

Ciò deve significare quindi che si è verificato un aumento del moto angolare del sistema, che ha compensato la sua naturale dissipazione dovuta all'emissione in sincrotrone.

Molto probabilmente ciò è la conseguenza di scosse di assestamento dovute ad attriti dinamici negli strati più esterni (il fenomeno comunque non deve essere molto frequente, essendo stato osservato solo in 19 casi).

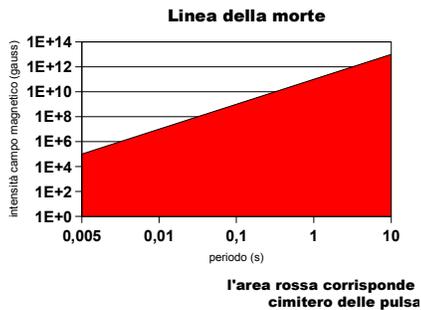
Esiste un'altra importante eccezione al rapporto tasso di rallentamento-età, a riprova della complessità del fenomeno in questione. Si è detto che il tasso di rallentamento \dot{P} è indice dell'età di una pulsar, in quanto le stelle di più recente formazione emettono una più grande



quantità di radiazione (anche in molte altre lunghezze d'onda) e di conseguenza subiscono un maggiore effetto frenante. Tuttavia sono state osservate pulsar caratterizzate da un basso tasso di rallentamento e da un debole campo magnetico (segni inequivocabili di una formazione molto antica) eppure dal periodo caratteristico di poche millesimi di secondo (e perciò vengono chiamate **pulsar millisecondo**). La scoperta che la maggior parte delle millisecondo osservate faccia parte di sistemi binari (nel 67%, ma forse altri ancora non sono rilevabili come tali

semplicemente per selezione osservativa), induce a pensare che sia l'interazione gravitazionale a fornire alla vecchia pulsar l'energia rotazionale in grado di farla arrivare a periodi così incredibilmente bassi. Se entrambe le stelle del sistema hanno una massa sufficientemente elevata è possibile che entrambe attraversino le fasi di gigante, supernova e stella di neutroni, allo stesso modo che se fossero state isolate (ed è questo un caso molto favorevole per rivelare l'esistenza di onde gravitazionali attraverso metodi indiretti, misurando il tasso di decadimento dell'orbita del sistema, in seguito alla perdita di energia rotazionale). Se invece le due stelle hanno masse più contenute (più basse del limite di Chandrasekhar) si può verificare che una giunga allo stato di nana bianca mentre l'altra è ancora a quello di gigante rossa. In tal caso è possibile che la nana riesca a soffiare via l'involucro esterno della seconda, accrescendosi, e giungendo così allo stato di stella di neutroni. Passando per un'esplosione o no? Il punto è ancora parecchio controverso: l'opinione più diffusa è comunque che in questo caso si osservi

una supernova di tipo Ia (mentre il tipo IIa riguarda collassi spontanei). Ovviamente il collasso provoca l'aumento della velocità di rotazione, ma se il "travaso" di materia dura abbastanza a lungo la pulsar arriva ad avere un periodo brevissimo, di qualche millesimo di secondo, appunto.



Il meccanismo dell'accrescimento indotto può anche far "risuscitare" una pulsar spenta: accade sempre in sistemi binari, con stelle di massa molto diversa. Può succedere infatti che mentre una delle due si trovi nello stato di pulsar ormai spenta, la seconda diventi una gigante,

riversando sull'altra parte del suo involucro esterno (basterebbe anche una quantità di $10^{-8} M_{\odot}$ all'anno) e accelerandola di nuovo fino a centinaia di giri al secondo. Tuttavia non sempre, in questo caso, arriva ad essere una millisecondo.

Un altro importante parametro ricavabile dal periodo e dal tasso di rallentamento è il campo magnetico, attraverso la formula:

$$\text{intensità C. Magnetico} = K \cdot (P \cdot \dot{P})^{-2}$$

Tutte le pulsar si formerebbero con valori abbastanza simili del campo, per poi decadere in misura esponenziale in tempi dell'ordine del milione di anni. E' quindi possibile realizzare un grafico che illustri i possibili valori riscontrabili riguardo all'intensità del campo: se consideriamo la funzione che grosso modo incorre tra periodo ed intensità, possiamo facilmente osservare come al di sotto della linea di una certa pendenza non si possa rilevare alcuna emissione radio (beninteso, nel caso in cui il cono sia orientato nella giusta direzione). E' questa la zona del cosiddetto "cimitero delle pulsar", e la linea di demarcazione delle due zone è chiamata "linea della morte".

Ogni pulsar nasce tendenzialmente con una campo elevato e un periodo molto breve, collocandosi quindi nella parte in alto a sinistra del grafico. Col passare dei millenni poi la stella cambia di posizione seguendo una linea parallela a quella delle ascisse se il campo resta grosso modo costante, oppure obliquamente verso destra se diminuisce con l'età. In ogni caso la pulsar è destinata ad oltrepassare la linea della morte e a spegnersi, se non interviene alcun tipo di "ringiovanimento". D'altro canto, è anche possibile che una pulsar "morta" torni ad oltrepassare la linea di demarcazione nell'altro senso "risuscitando". nel caso in cui intervenga la spinta di una eventuale compagna (cioè nel caso di sistemi binari).

Un altro dei parametri ricavabili dalla misurazione del periodo della pulsar (uno dei più importanti) è la distanza, attraverso un metodo inventato dallo stesso Hewish. Ciò che si osserva registrando l'impulso della pulsar a lunghezze d'onda via via crescenti è una costante sfasatura, in quanto i tempi d'arrivo di un dato segnale appaiono separati da un certo ritardo. Tale effetto è dovuto alla dispersione del segnale nel mezzo interstellare, e dipende di volta in volta dalle due frequenze considerate e dalla densità degli elettroni presenti lungo la linea di vista (viene chiamata *densità colonnare*). Dal momento che le frequenze di osservazione sono regolabili, è semplice misurare il ritardo dei due impulsi e da questo risalire alla densità colonnare e da questa alla distanza; ovviamente questa misurazione sarà tanto più precisa quanto lo sarà quella della distribuzione degli elettroni nel mezzo interstellare.

Distribuzione nella Galassia

Proprio in seguito a questo metodo di stima della distanza è stato possibile collocare le 705 pulsar osservate sulla volta celeste. E' risultato che 700 di queste fanno parte della Via Lattea, mentre le restanti 5 sono localizzate nella Grande Nube di Magellano.



La maggior parte delle prime appartiene al piano galattico, ma è pur sempre presente una cospicua minoranza facente parte dell'alone. Ciò è spiegabile se si tiene conto che le forti esplosioni che le hanno generate possono averle accelerate per effetto di rinculo fino alla velocità di qualche centinaio km/s, fatto che sembra anche essere in accordo con le osservazioni, che solo in pochi casi dimostrano l'esistenza di resti di supernovae nelle vicinanze delle pulsar: tranne che nel caso delle più recenti, tutte hanno avuto il tempo di allontanarsi.

Altro fatto interessante è che le riciclate si dispongono tutte nell'alone galattico, fatto spiegabile per due ragioni: perchè è in questa zona che si possono trovare le stelle più vecchie, e perchè negli ammassi globulari (dei quali fanno parte) è molto facile che avvengano episodi di accrezione tra stelle vicine.

Pulsar ad altre lunghezze d'onda

Le pulsar più giovani emettono, oltre che radiazione di sincrotrone, anche radiazione termica, data dall'altissima temperatura della neonata stella di neutroni: questa emissione è teoricamente osservabile nell'ottico e nelle lunghezze d'onda dei raggi X e γ , ma in rapido affievolimento, dato che in poche centinaia di anni è destinata a scomparire.

In particolare, fino ad ora la banda X si è dimostrata la più favorevole (19 identificazioni).

Per giungere ad un'identificazione certa occorre essere in presenza ad una periodicità comune, anche se la forma della curva di luce può essere notevolmente diversa; altrimenti ci si può solo basare su di una coincidenza delle posizioni, ma non può questo essere un criterio affidabile in quanto l'incertezza della posizione nel caso di sorgenti γ è di qualche frazione di grado, e scende a qualche secondo d'arco per le sorgenti X, mentre nell'ottico la situazione è più favorevole, essendo l'incertezza dell'ordine dei decimi di secondo d'arco. Tuttavia questo beneficio viene compensato dal fatto che l'emissione nell'ottico risulta all'incirca mille volte inferiore a quella X.

Perchè studiare le pulsar?

La scoperta di sorgenti compatte di onde radio ha fatto sicuramente compiere un notevole balzo in avanti alle conoscenze cosmologiche del nostro secolo: innanzitutto, ha fornito l'evidenza dell'esistenza di una classe di stelle collassate a tal punto da aver vinto la repulsione esistente tra protoni ed elettroni (maggiore in un rapporto di 10^{39} :1 rispetto alla forza di gravità). Ma questo ha fornito indirettamente anche la conferma della possibilità

dell'esistenza di buchi neri, e cioè di oggetti collassati e sottoposti ad una compressione non molto lontana da quella di una stella di neutroni.

Noi oggi possiamo servirci di una pulsar come campione precisissimo dello scorrere del tempo: nel caso delle millisecondo, ad esempio, è possibile ottenere una precisione di 10^{-17} secondi.

Questa incredibile precisione (ottenibile naturalmente in condizioni molto favorevoli) ci offre la grande opportunità di sottoporre a verifica diverse previsioni forniteci da alcune teorie cosmologiche.

Per esempio, la presunta lentissima variazione della costante gravitazionale G . Infatti una variazione anche minima di questa quantità altererebbe il momento d'inerzia di una stella di neutroni e quindi per il principio di conservazione del momento angolare, la velocità di rotazione deve cambiare. Tale variazione andrebbe a sommarsi al naturale rallentamento e rappresenterebbe perciò un limite superiore all'effetto di variazione di G : infatti si ha che $\Delta T = \Delta G \cdot G$.

Inoltre è possibile fornire un limite superiore alla densità di energia del presunto fondo cosmico di onde gravitazionali che appunto contribuirebbe a tali irregolarità. Si è trovato che questa densità non supera quella del fondo cosmico di microonde (3° K); tale densità costituisce appena la decimillesima parte della densità critica W . La sensibilità di questo metodo cresce in proporzione alla quarta potenza della lunghezza del tempo nel quale si è rilevato il valore della microfluttuazione ($\text{Sensib.} = k \Delta t^4$); si prevede quindi che entro pochi anni si possa giungere ad abbassare il limite fino ad un centomillesimo di W .

Franco Vazza