

Università degli Studi di Cagliari

---

Facoltà di Scienze MM. FF. NN.

Corso di Laurea in Fisica

**Ricerca di pulsar in sistemi binari:  
il problema della conferma  
dei candidati**

Tesi di laurea triennale di:  
Matteo Bachetti

Relatore:  
prof. Nicolò D'Amico  
Co-relatore:  
dott. Andrea Possenti

---

Anno Accademico 2002/2003



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>i</b>
<b>1 Cenni introduttivi</b>	<b>1</b>
1.1 Parametri osservativi . . . . .	1
1.2 La formazione delle pulsar . . . . .	4
1.3 Le millisecond pulsars . . . . .	6
<b>2 L'utilità astrofisica delle millisecond pulsar binarie</b>	<b>10</b>
2.1 La procedura di timing e le sue potenzialità . . . . .	10
2.2 Applicazioni della procedura del timing alle pulsar al millisecondo	14
<b>3 I metodi di ricerca</b>	<b>22</b>
3.1 Le fasi della ricerca . . . . .	22
3.2 La ricerca di pulsar in sistemi binari . . . . .	26
3.2.1 Ricerca coerente . . . . .	27
3.2.2 Ricerca incoerente . . . . .	30
<b>4 Binary_confirm e il caso di PSR J1801-2130</b>	<b>32</b>
4.1 Il problema della conferma dei candidati . . . . .	32
4.2 Struttura di binary_confirm . . . . .	33
4.3 Il lavoro svolto . . . . .	36
4.3.1 Utilizzo di binary_confirm nel caso di PSR J1801-2130	40
<b>Conclusioni</b>	<b>42</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>43</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>44</b>

# Introduzione

Il primo rilevamento di una pulsar avvenne nel 1967. La dottoranda Jocelyn Bell stava studiando con il suo relatore Anthony Hewish il “flickering” dei segnali provenienti dai quasar, quando si imbattè in una sorta di rumore che si ripeteva ogni 23 ore e 56 minuti, un giorno siderale esatto. Quest’ultimo particolare faceva capire che esso proveniva dall’esterno del sistema solare. Analizzando questo rumore ci si accorse che esso era in realtà un segnale pulsato avente un periodo costante di 1.337 s. L’esistenza di un segnale così preciso li portò in un primo momento ad ipotizzare la presenza di un messaggio alieno. Tuttavia, poco tempo dopo scoprirono un altro segnale analogo in un’altro punto del cielo. Essi annunciarono la scoperta di questi misteriosi oggetti che un corrispondente scientifico del *Daily Telegraph* chiamò *Pulsars*[1].

Oggi conosciamo circa 1500 pulsar ed il fenomeno è stato spiegato ormai in molti suoi aspetti: le pulsar sono stelle di neutroni che, dotate di un campo magnetico estremamente elevato, emettono radiazione elettromagnetica nelle onde radio all’interno di un cono il cui asse è l’asse magnetico. Se l’asse è inclinato rispetto all’asse di rotazione, la stella si comporta come un faro. Il loro segnale ha un periodo stabile, in alcuni casi, quanto i nostri migliori orologi atomici, e la loro struttura interna presenta caratteristiche “estreme” come ad esempio una densità maggiore di quella atomica, avendo una massa di una volta e mezzo la massa del Sole concentrata in una sfera di raggio di 10 Km.

In questo lavoro parlerò delle problematiche connesse con la ricerca delle

pulsar, ed in particolare di pulsar con periodi inferiori a circa 20 ms, dette *millisecond pulsar*. L'interesse per esse va al di là dello studio degli oggetti in sè: le millisecond pulsar rappresentano un campo di prova eccezionale per teorie appartenenti a diverse branche della fisica, dalla cosmologia alla fisica subnucleare. È dunque necessario trovare un gran numero di questi oggetti per poterli studiare a fondo. Sfortunatamente, captare il segnale di una pulsar non è facile e richiede un dispendio notevole di strumenti di calcolo. Gli impulsi arrivano ai nostri radiotelescopi estremamente disturbati e dispersi dal mezzo interstellare, oltre che shiftati in frequenza dall'effetto Doppler, e per poterli risolvere, a parte in rari casi, è necessaria una serie di operazioni sul segnale di cui parlerò in seguito.

Nel primo capitolo darò qualche cenno preliminare sul processo di formazione delle pulsar e delle millisecond pulsar, e sui meccanismi di emissione del segnale; nel secondo parlerò dell'interesse astrofisico per le millisecond pulsar, in particolar modo quelle facenti parte di sistemi binari stretti, assieme ad una breve descrizione delle procedure di *timing* che rappresentano la base della ricerca in questo campo; nel terzo, parlerò della procedura standard di ricerca di pulsar.

Questa procedura di ricerca richiede strumenti di calcolo molto potenti. La necessità di tali strumenti ha portato alla costruzione, presso l'Osservatorio Astronomico di Cagliari, di un cluster di 40 CPU. Il sistema operativo installato è Red Hat Linux 9.0: i compilatori fortran per Linux sono diversi da quelli per le workstation Unix su cui il codice di *search* era precedentemente installato, ed è stato dunque necessario adattare il codice alla sintassi del nuovo compilatore. Questo è in sostanza il lavoro che io ho svolto durante il tirocinio presso l'Osservatorio Astronomico di Cagliari: "tradurre" il programma secondo la sintassi richiesta da vari compilatori per Linux, e confrontare i risultati non solo con quelli ottenuti sulla workstation Alpha, ma anche tra quelli ottenuti

dai diversi compilatori per Linux.

Nel quarto capitolo parlerò brevemente del lavoro svolto e delle principali caratteristiche di `binary_confirm`. Inoltre spiegherò in cosa consiste il problema della conferma dei candidati ed illustrerò un risultato emblematico dell'importanza di un codice di conferma.

# Capitolo 1

## Cenni introduttivi

### 1.1 Parametri osservativi

Le pulsar, osservate per la prima volta da Jocelyn Bell ed Antony Hewish [2] nel 1967, sono delle sorgenti di segnali radio pulsati, il cui periodo di ripetizione è prevedibile in genere con straordinaria precisione. Oggi conosciamo circa 1500 pulsar, le quali presentano periodi che vanno da 1,5 ms a circa 10 secondi, e sono caratterizzati da una elevata stabilità: di alcune di esse si conosce il periodo con un'incertezza frazionaria di  $10^{-15}$ , paragonabile con l'accuratezza dei nostri migliori orologi atomici.

Un parametro caratteristico, e di grande importanza per la costruzione di un modello coerente su questi oggetti, è rappresentato dalla derivata temporale del periodo, o  $\dot{P}$ . Il grafico in figura 1.1 rappresenta un campionario di circa 750 pulsar con relativi valori di  $P$  e  $\dot{P}$ : come si può notare, un valore tipico di  $\dot{P}$  è  $10^{-13} \div 10^{-17}$ ; se assumiamo che  $\dot{P}$  sia costante e che il periodo iniziale fosse molto più breve di quello attuale, otteniamo come *età caratteristica*  $P/2\dot{P} \approx 10^7$  anni.

Un'altra evidenza osservativa è il fatto che solo una piccola parte della popolazione di pulsar (4%) fa parte di un sistema binario, mentre tra le stelle

normali la percentuale è di circa il 50%. Inoltre, spesso le pulsar si muovono con velocità peculiari molto alte, generalmente superiori di un ordine di grandezza rispetto alle velocità delle altre stelle. Un'analisi dettagliata rivela uno spettro di velocità tra 0 e 1000 km/s [3], mentre per le stelle della sequenza principale i valori tipici sono tra 10 e 50 km/s. Nel caso delle pulsar appartenenti a sistemi binari, le velocità tendono ad essere intermedie, intorno a 100 km/s.

Il fatto che le velocità peculiari siano maggiori per le pulsar rispetto alle altre stelle, spiega almeno in parte la distribuzione delle pulsar all'interno della galassia: per le pulsar più vecchie, infatti, l'altezza tipica rispetto al piano galattico è pari a circa 500 pc, circa 10 volte maggiore rispetto a quella delle stelle comuni [4].

Già poco dopo la scoperta della prima pulsar venne elaborato il modello accettato ancora oggi secondo cui esse sono le stelle di neutroni previste ( poco dopo la scoperta del neutrone da parte di Chadwick nel 1932) nel 1932 da Landau e nel 1934 da Baade e Zwicky. Tali stelle hanno dimensioni tali da poter ruotare con velocità angolari elevatissime ( $10^4$  rad/s) senza disgregarsi. Nel caso in cui esse siano dotate di un campo magnetico sufficientemente elevato, come vedremo in seguito, durante la rotazione esse emettono un segnale radio lungo con i cui assi usualmente sono inclinati rispetto all'asse di rotazione: le stelle di neutroni si comportano come dei fari.

Secondo il modello, le pulsar devono avere un campo magnetico estremamente forte, nell'ordine di ( $10^8 \div 10^{13}$ ) G: per fare un confronto, il campo magnetico del Sole è di 2 G. Se assumiamo che il rallentamento delle pulsar osservato sia dovuto solo all'emissione di radiazione di dipolo magnetico, possiamo uguagliare la derivata dell'energia cinetica rotazionale  $dE_k/dt$  all'energia dissipata per unità di tempo da un dipolo magnetico ideale in rotazione



$dE_{HD}/dt$ , ottenendo

$$-\frac{16\pi^4 B^2 R^6 \sin^2 \theta}{6c^3 P^4} = \frac{dE_{HD}}{dt} \equiv \frac{dE_k}{dt} = -\frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3} \quad (1.1)$$

da cui si ricava la stima del campo magnetico superficiale

$$B \sin \theta = \frac{1}{2\pi R^3} \sqrt{6c^3 I P \dot{P}} \simeq 3.2 \cdot 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ Gauss} \quad (1.2)$$

dove  $I$  ( $\approx 10^{45}$  g·cm<sup>2</sup>) è il momento d'inerzia della pulsar,  $\theta$  l'angolo tra asse magnetico e asse di rotazione,  $R$  ( $\approx 10$  km) il raggio della stella di neutroni. Questa relazione ci dice che, a parità di periodo, pulsar aventi valori inferiori di  $\dot{P}$  avranno presumibilmente anche un'intensità minore del campo magnetico. È il caso delle pulsar con periodo più piccolo nel diagramma  $P - \dot{P}$  in figura 1.1.

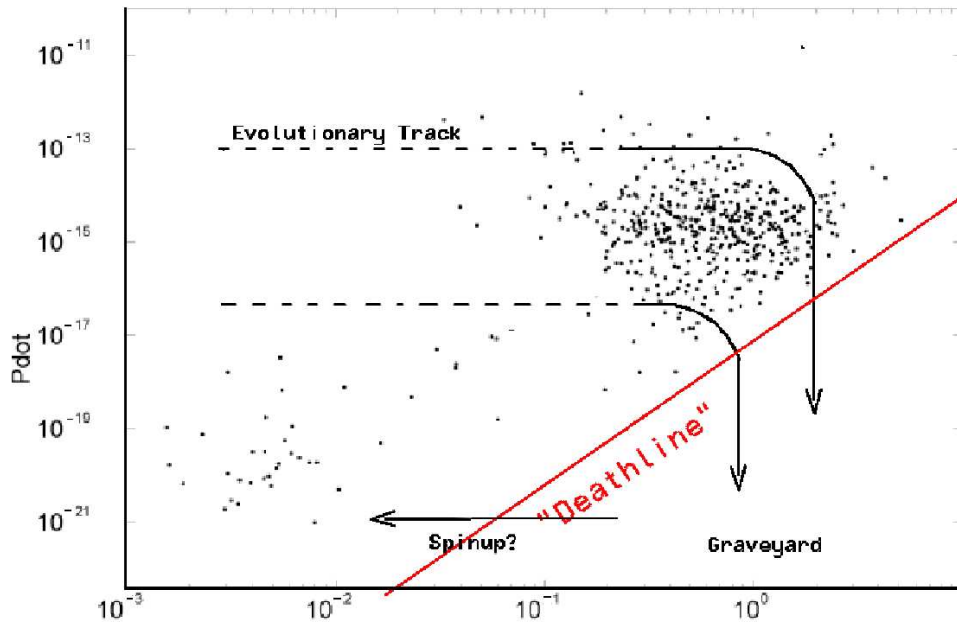


Figura 1.1: confronto tra il periodo e la sua derivata per un campione di circa 750 pulsar; si noti come le pulsar con periodo di rotazione più veloce presentano in generale anche una derivata minore del periodo.

Il meccanismo di emissione delle onde radio da parte di una pulsar è forse l'aspetto su cui ci sono meno certezze. Il campo magnetico estremamente elevato ruota alla velocità di rotazione della stella. Vicino ai poli magnetici della stella è quindi indotto un campo elettrico (dovuto alle forti variazioni di  $B$  causate dalla rotazione dei poli) capace di accelerare le particelle cariche, in particolar modo gli elettroni, a velocità relativistiche. Sappiamo che in tali condizioni le particelle cariche convertono parte dell'energia cinetica in radiazione emettendo un raggio  $\gamma$ . Se l'energia è sufficiente, il raggio  $\gamma$  è capace di dar luogo alla produzione di una coppia elettrone-positrone, che prima di annichilarsi vengono a loro volta accelerati dal campo magnetico emettendo altri raggi  $\gamma$ , dando luogo ad una sorta di cascata. Muovendosi lungo le linee del campo magnetico, le particelle così prodotte emettono radiazione di curvatura nella direzione del loro moto: l'effetto complessivo è l'emissione di radiazione all'interno di un cono il cui asse è l'asse magnetico della stella.

Non vengono osservate delle pulsar con campi magnetici bassi ed al contempo periodi elevati. Questo fatto può essere spiegato attraverso una semplice considerazione: perché ci sia emissione è necessario che il campo elettrico che accelera le particelle sia sufficiente a produrre un gran numero di coppie elettrone-positrone. Questo vuol dire che l'effetto combinato di velocità angolare ed intensità del campo magnetico deve indurre un campo elettrico superiore ad un certo valore di soglia. Se i valori non sono sufficienti, la pulsar si spegne, e nel grafico  $P\dot{P}$  si trova nel cosiddetto *graveyard* (*cimitero*), sotto la *death line* (fig. 1.1).

## 1.2 La formazione delle pulsar

I processi che possono condurre alla formazione della pulsar sono sostanzialmente due :

Ricerca di Pulsar in sistemi binari: il problema della conferma dei candidati

- **esplosioni di supernova di tipo II:** in questi processi una stella avente una massa superiore a  $8M_{\odot}$  alla fine della sua evoluzione esplose lasciando come resti una nube di gas e polveri e una stella di neutroni che, per la conservazione del momento angolare, può avere un periodo di rotazione tra 20 e 100 ms, e per la conservazione del flusso magnetico può avere un campo magnetico superficiale di  $(10^{12} \div 10^{14})$  G; valori tanto elevati di campo magnetico e velocità di rotazione sono sufficienti per dar luogo all'emissione radio sopra descritta, originando una pulsar.
- **Accretion Induced Collapse:** in questo processo, la massa di una nana bianca viene portata a valori superiori al limite di Chandrasekar da fenomeni di accrescimento di materia da parte di una compagna in un sistema binario. Superato tale limite, la nana bianca si contrae fino a diventare una stella di neutroni, e nella contrazione il suo periodo di rotazione aumenta notevolmente (usando la conservazione del momento angolare e valori tipici di massa e periodo, si ottiene un aumento di circa 250000 volte) e lo stesso vale per il campo magnetico superficiale. Sotto le condizioni dette sopra, la stella di neutroni può diventare una pulsar.

Le evidenze osservative ci portano a ipotizzare che il fenomeno preponderante sia il primo. Innanzitutto, il 95% delle pulsar sono oggetti isolati, mentre circa la metà delle stelle comuni appartengono a sistemi multipli; il che ci fa pensare che se esse hanno fatto parte di sistemi binari, essi sono stati distrutti da un'esplosione di supernova. Ciò è confermato dalle alte velocità peculiari di cui abbiamo parlato precedentemente: se un evento di supernova è asimmetrico (come non è difficile che accada in un sistema binario in cui la forma della stella gigante può essere alterata dall'attrazione gravitazionale della compagna), la neonata stella di neutroni riceve una spinta che l'accelera a velocità molto alte, anche 1000 km/s. Inoltre, se effettivamente l'AIC producesse una

fetta rilevante delle pulsar, dovremmo vedere dei sistemi binari composti da pulsar giovani assieme a stelle vecchie, ad esempio nane bianche. Tali sistemi non sono mai stati osservati.

### 1.3 Le millisecond pulsars

Nel grafico in figura 1.1 si può evidenziare la presenza di due popolazioni distinte di pulsar: una rappresenta la maggioranza delle pulsar, con valori di  $P$  sopra i 50 ms e di  $\dot{P}$  nell'intervallo  $10^{-13} \div 10^{-17}$ . La seconda popolazione è rappresentata nel grafico in basso a sinistra: le caratteristiche peculiari sono periodi di rotazione estremamente brevi, inferiori a 20 ms, e valori di  $\dot{P}$  inferiori a  $10^{-17}$ : dall'equazione 1.2 ci aspettiamo perciò che esse abbiano valori del campo magnetico relativamente bassi, nell'ordine di  $10^9$  G; esse presentano un'età caratteristica nell'ordine dei  $10^8 \div 10^9$  y, sono quindi degli oggetti molto vecchi. Questi oggetti vengono chiamati *millisecond pulsar*<sup>1</sup>. Secondo il modello esposto nel §1.2 un'esplosione di supernova non potrebbe dar luogo alla formazione di una millisecond pulsar. Bisogna perciò individuare un processo capace di spiegare l'esistenza di questi oggetti singolari.

Dallo studio del problema dei tre corpi semplificato (due corpi, nel sistema di riferimento del centro di massa, con il terzo corpo di dimensioni trascurabili) sappiamo che le superfici equipotenziali intorno ad un sistema binario descrivono un lobo, detto *Lobo di Roche*, il cui punto di contatto è detto *punto lagrangiano*, e corrisponde al punto lungo la congiungente dei due corpi in cui l'attrazione gravitazionale su un punto materiale da parte delle due stelle è uguale in modulo e direzione ma opposto in verso. Quando in un sistema

---

<sup>1</sup>Convenzionalmente si indica col termine millisecond pulsar una pulsar con periodo di rotazione inferiore ai 20 ms; il discorso che segue si applica tuttavia anche a pulsar più lente ma che presentano le stesse caratteristiche di  $\dot{P}$  (e quindi di età e campo magnetico) delle millisecond pulsar.

binario una delle due stelle si evolve in una gigante, essa riempie prima tutto il suo lobo di Roche, dopodiché inizia a “travasare” materia all’interno del lobo di Roche della compagna. Questa materia non può cadere direttamente sulla compagna, per via del momento angolare del sistema che la costringe ad orbitare attorno ad essa. Si forma così un *disco di accrescimento*. Nel disco si creano forze di attrito viscoso che “frenano” il materiale e lo fanno rallentare: di conseguenza, il materiale si avvicina spiraleggiando alla stella fino a cadere sulla sua superficie. Se la stella intorno alla quale si forma il disco di accrescimento è dotata di un forte campo magnetico, il meccanismo è leggermente diverso. Si definisce **raggio di Alfvén**  $r_A$  la distanza dalla stella alla quale si equivalgono la densità di energia magnetica  $u_m = B^2/8\pi$  e la densità di energia cinetica  $u_K = \frac{1}{2}\rho v^2$ . Si può dimostrare che

$$r_A = \left( \frac{B_s^4 R^{12}}{2GM\dot{M}^2} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (1.3)$$

dove  $B_s$  è il campo magnetico alla superficie della pulsar,  $\dot{M}$  è il tasso di accrescimento di massa,  $R$  è il raggio della pulsar. Sostituendo i valori tipici  $B_s = 10^{12}$  G,  $R = 10$  km,  $M = 1.4M_\odot$ ,  $\dot{M} = 10^{17}$  g/s, otteniamo che  $r_A = 3.09 \times 10^8$  cm.

Il materiale del disco di accrescimento, una volta raggiunto il raggio di Alfvén, viene convogliato verso i poli magnetici della NS. Durante questo processo vengono emessi una gran quantità di raggi X, ed è provato che alcune delle più forti sorgenti di raggi X conosciute sono sistemi binari in cui la stella attorno alla quale si forma il disco è una stella di neutroni, spesso visibile come pulsar X. In queste sorgenti si può vedere che il periodo della stella di neutroni in generale diminuisce col passare del tempo.

Le procedure di timing su cui mi soffermerò in seguito ci dicono che circa l’80% delle millisecond pulsars appartiene a sistemi binari. Questo fatto rende

Ricerca di Pulsar in sistemi binari: il problema della conferma dei candidati

plausibile pensare che le millisecond pulsar si siano formate proprio attraverso un fenomeno di accrescimento. La recente scoperta di 5 sorgenti binarie in accrescimento la cui stella neutroni ruota con periodo di pochi millisecondi[5] rappresenta un'ulteriore conferma della validità di tale ipotesi. Raccogliendo le informazioni finora discusse, possiamo tracciare il seguente quadro della formazione di una millisecond pulsar:

- i. una NS si forma in un sistema binario attraverso un'esplosione di supernova. La massa espulsa dal sistema durante la supernova non è tale da distruggerlo, ed i valori di periodo e campo magnetico della NS sono tali da accenderla eventualmente come pulsar;
- ii. la NS si evolve; per i fenomeni sopra descritti il suo periodo aumenta, e la dissipazione di energia rotazionale prosegue finché la NS non supera la "linea della morte" occupando una posizione nel *graveyard* della figura 1.1;
- iii. a. la compagna si evolve in una gigante: se la sua massa non è sufficiente per dar luogo ad una supernova, l'evoluzione è abbastanza lenta da permettere che enormi quantità di materiale si riversino nel lobo di Roche della NS, dando luogo al processo di spinup. Una volta formatasi la pulsar può in certi casi evaporare la compagna: in questi casi del sistema rimane solo una pulsar isolata. Altrimenti, il sistema finale è composto da una pulsar ed una nana bianca;
- b. se la compagna evolve esplodendo come supernova e diventa anch'essa una NS, il sistema difficilmente rimane legato: questo ci viene confermato dal fatto che i sistemi binari composti da due stelle di neutroni sono estremamente rari. Ne sono stati individuati finora solo sei, ed in nessun caso composti da due pulsar.

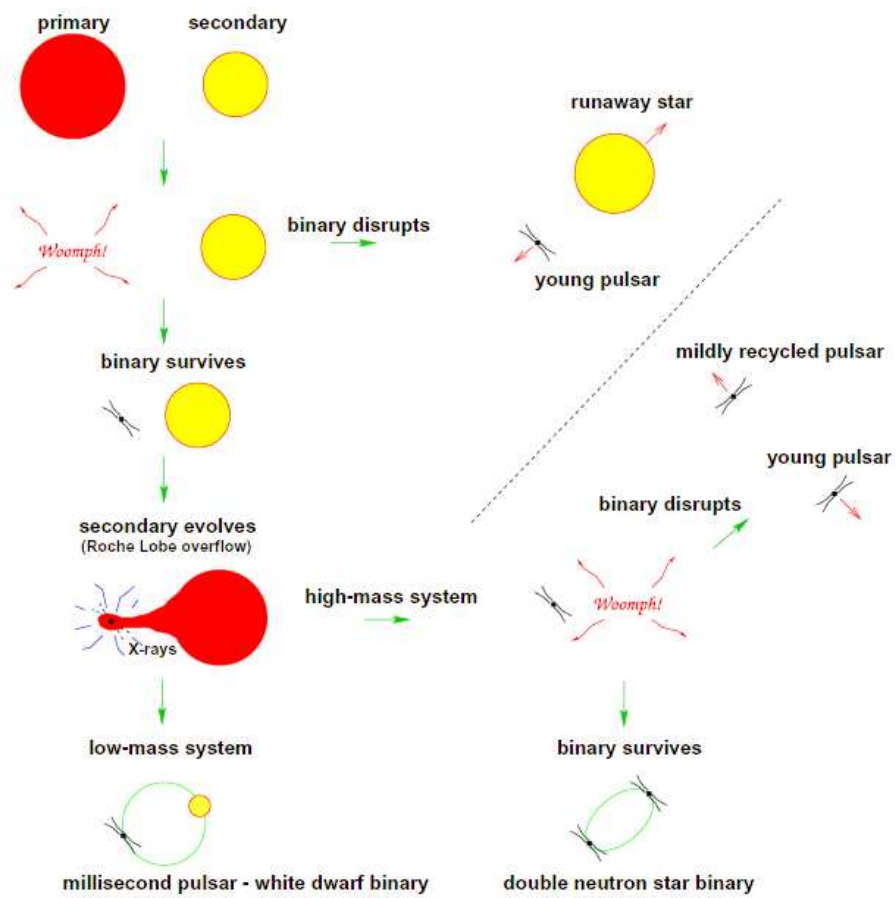


Figura 1.2: Schema dello scenario di evoluzione delle pulsar e dei sistemi binari descritto dal modello

## Capitolo 2

# L'utilità astrofisica delle millisecond pulsar binarie

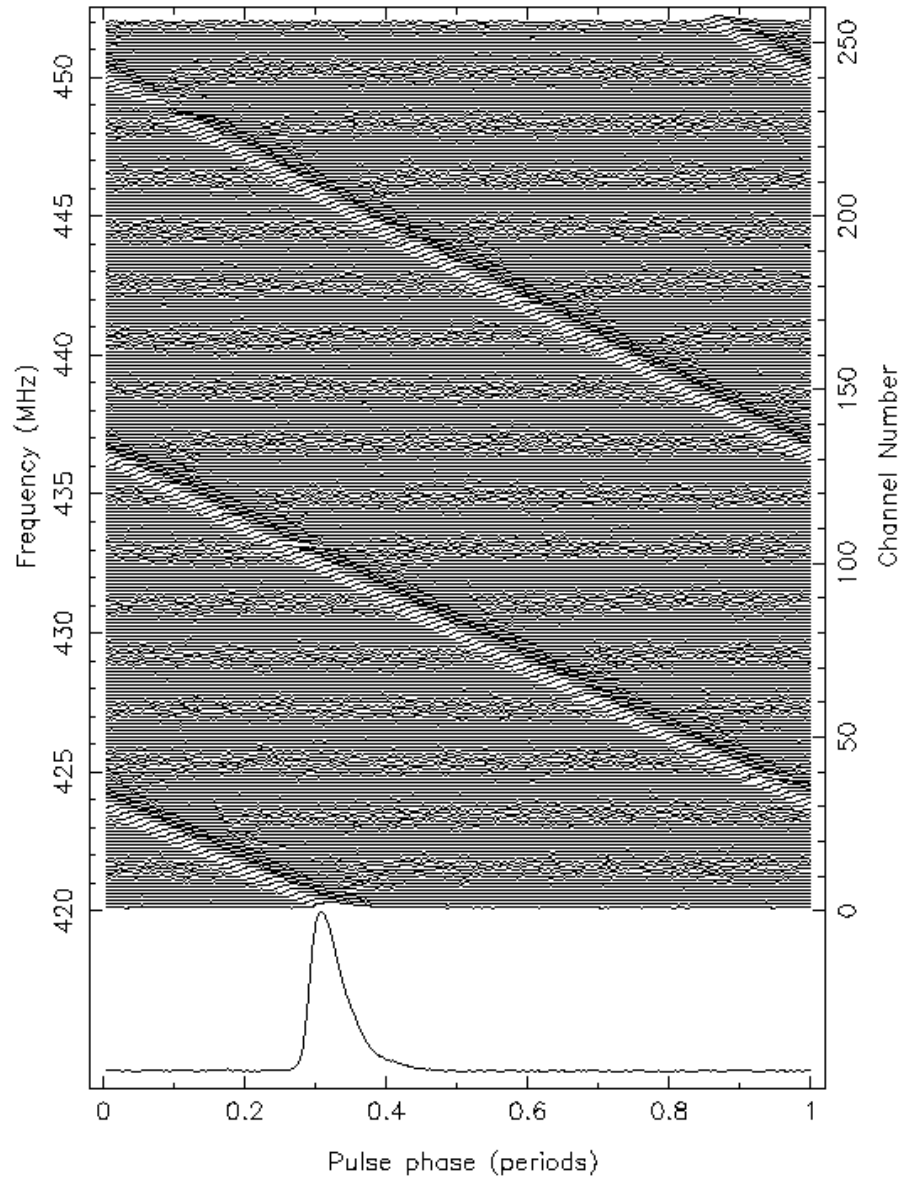
Le millisecond pulsar binarie sono oggetti di enorme interesse astrofisico. Le loro caratteristiche peculiari permettono infatti la verifica di una serie di predizioni teoriche in svariati campi della fisica, dalla cosmologia fino alla fisica nucleare. Al fine di compiere queste verifiche, abbiamo bisogno di misurare con precisione i tempi di arrivo degli impulsi, per poter valutare sia i valori di periodo, velocità peculiare, ecc. della pulsar, sia gli eventuali parametri orbitali.

Nei paragrafi seguenti parlerò della tecnica del timing che, attraverso la misurazione dell'arrivo degli impulsi, permette di compiere le misure di cui abbiamo bisogno. Inoltre, citerò alcuni degli argomenti di ricerca per cui le millisecond pulsar binarie rappresentano un ottimo campo di prova.

### 2.1 La procedura di timing e le sue potenzialità

L'osservazione del segnale di una pulsar è, in genere, non banale. Il segnale che riceviamo è raramente sopra il livello di rumore, perciò abbiamo bisogno





*Figura 2.1: Effetto alle diverse frequenze sul segnale da parte della dispersione. In basso è riportato il profilo che appare dalla serie temporale dedispersa: se non si praticasse la dedispersione, nella serie temporale l'impulso non sarebbe risolto.*

di praticare una procedura di *folding*, nella quale vengono sommati un certo numero di impulsi per avere una forma d'onda (detta profilo integrato) ben definita sopra il livello di rumore. Oltre al problema della piccola ampiezza del segnale, esiste un altro fattore importante di cui bisogna tenere conto per produrre un buon profilo integrato: la **dispersione**: in generale, l'indice di rifrazione di un mezzo è funzione della frequenza; per questo motivo, le componenti in frequenza di un segnale che viaggia nel mezzo interstellare si muovono con velocità diversa, e arrivano a noi con una certa differenza di fase reciproca. Se chiamiamo *Misura di Dispersione (DM)* l'integrale lungo la linea che collega noi alla stella della densità di elettroni liberi<sup>1</sup> avremo che la differenza dei tempi di arrivo di un dato impulso a due frequenze separate da  $\Delta\nu$  è dato da

$$\Delta t \approx 8,3 \cdot 10^3 \frac{\Delta\nu_{MHz}}{\nu_{MHz}^3} DMsec, \quad (2.1)$$

dove  $\nu_{MHz}$  è la frequenza media fra le due (espressa in MHz) e  $\Delta\nu_{MHz}$  la differenza tra le due, sempre in MHz.

Se noi vogliamo osservare una pulsar, abbiamo bisogno di utilizzare una banda di frequenze larga in modo da avere un rapporto segnale-rumore soddisfacente; per poter compiere un'osservazione, abbiamo quindi bisogno di ovviare a queste differenze nei tempi di arrivo degli impulsi, attraverso la procedura di *dedispersione*. Essa consiste nella suddivisione della banda totale  $\Delta\nu$  in canali di frequenza  $\delta\nu \ll \Delta\nu$  e nell'applicazione ai diversi canali di una differenza di fase opportuna, che permette di sommare in fase l'impulso alle varie frequenze e di aumentare così il rapporto segnale/rumore.

Una volta eseguite correttamente tutte le operazioni di dedispersione e

---

<sup>1</sup>Se chiamiamo  $d$  la distanza tra noi e la stella,

$$DM = \int_0^d n_e dl$$

folding del segnale, quello che otteniamo è un profilo integrato, che può essere considerato come un'impronta digitale della pulsar. Nonostante infatti i singoli impulsi varino notevolmente tra loro, il profilo integrato ha una forma oltremodo regolare e stabile.

Una volta prodotto il profilo integrato di una data osservazione, si può determinare il cosiddetto Time Of Arrival (o TOA) dell'impulso in esso contenuto, espresso come somma del tempo di inizio dell'osservazione e del tempo corrispondente alla differenza di fase tra la fase "zero" del profilo integrato e la fase a cui si staglia l'impulso. L'unità di misura utilizzata è l'MJD, o giorno giuliano modificato, che corrisponde ad un conteggio dei giorni che parte dal mezzogiorno del 17 Novembre 1858.

Quando una pulsar viene individuata per la prima volta, viene inserita in un database a cui attingono i radiotelescopi di tutto il mondo. Essi eseguono una serie di determinazioni dei TOA a cui viene poi applicato il "modello di timing". Esso tiene conto di tutti gli effetti che in linea di principio possono influenzare i tempi di arrivo del segnale pulsato della sorgente:

- **dispersione**;
- **moto** della sorgente rispetto all'osservatore, che può essere originato sia dalla velocità peculiare dell'oggetto, sia da moti orbitali della Terra e dell'oggetto;
- **posizione** dell'oggetto.

Per un assegnato set di parametri, il modello predice i tempi di arrivo del segnale pulsato. Dall'andamento delle differenze, dette *residui*, tra tempi predetti e tempi d'arrivo osservati, è possibile correggere i parametri del modello secondo una procedura iterativa di *best fit*; ad esempio:

- se sottostimiamo il **periodo** l'andamento dei residui sarà **lineare cres-**

**cente**. Analogamente, se sottostimiamo  $\dot{P}$ , l'andamento dei residui sarà **parabolico crescente**.

- Un errore nella determinazione delle **coordinate** (ascensione retta e declinazione) porta ad un andamento **sinusoidale** dei residui, con periodo annuale. Questa particolarità ci è assai utile per determinare la posizione della pulsar con elevatissima precisione, ovviando alla scarsissima sensibilità angolare dei radiotelescopi;
- L'errore nella determinazione del **moto proprio** della pulsar porta ad un andamento **sinusoidale** di **ampiezza crescente** con periodo annuale.

## 2.2 Applicazioni della procedura del timing alle pulsar al millisecondo

Le millisecond pulsar binarie sono al centro di ricerche in diversi campi. Lo stato di aggregazione della materia, i moti di rotazione e rivoluzione velocissimi, la straordinaria precisione con cui tali moti possono essere studiati le rendono campi di prova importanti di teorie relativistiche e particellari. In particolare, la scoperta di eventuali sistemi composti da due pulsar (finora, nei sistemi binari di NS scoperti, uno solo dei due oggetti è una pulsar) o da una pulsar ed un buco nero potrebbero essere fonte di molte conferme o smentite alla Relatività Generale e alle teorie concorrenti.

### Struttura dello spazio-tempo

Secondo la Relatività Generale, la presenza di una massa deforma lo spazio-tempo, e dà luogo perciò a fenomeni inspiegabili in una concezione "classica" della fisica. Una applicazione riguarda i moti orbitali dei sistemi binari, con la predizione di moti di precessione del periastro; un fenomeno simile si è

osservato nel sistema solare nel caso di Mercurio dopo che Einstein completò la sua teoria della Relatività Generale. In quel caso, la precessione del pianeta prevista dalle leggi newtoniane forniva una stima inferiore di  $43''$  d'arco ogni secolo rispetto al dato osservativo di  $574''$ . L'avanzamento della longitudine del periastro viene indicato con  $\dot{\omega}$  ed è uno dei cosiddetti *parametri post-kepleriani* dell'orbita:

- $\dot{\omega}$ ;
- $\dot{P}_b$ , il decadimento del periodo orbitale dovuto all'emissione di onde gravitazionali;
- $\gamma$ , l'effetto Doppler trasverso o redshift gravitazionale;
- $r$  ed  $s$ , che sono i due parametri (*range* e *shape* risp.) che caratterizzano il ritardo di Shapiro, causato dall'azione sui segnali da parte del campo gravitazionale.

Le quantità  $\dot{\omega}$  e  $\gamma$  possono essere misurate, e la loro combinazione ci fornisce una stima molto precisa della massa dei due oggetti del sistema binario. Conosciute le masse, si può prevedere l'andamento degli altri tre parametri post-kepleriani: questa è la base della verifica della validità della Relatività Generale e delle teorie concorrenti. Nel 1993 Hulse[6] e Taylor[7] hanno ricevuto il premio Nobel per i loro studi che hanno portato alla conferma della validità delle previsioni della Relatività Generale sul  $\dot{P}_b$  della pulsar nel sistema binario B1913+16, con un'incertezza relativa dello 0.4% (vedi fig.2.2). Questo decadimento del periodo orbitale, secondo la GR è dato dall'emissione di onde gravitazionali, e rappresenta quindi una conferma indiretta della loro esistenza.

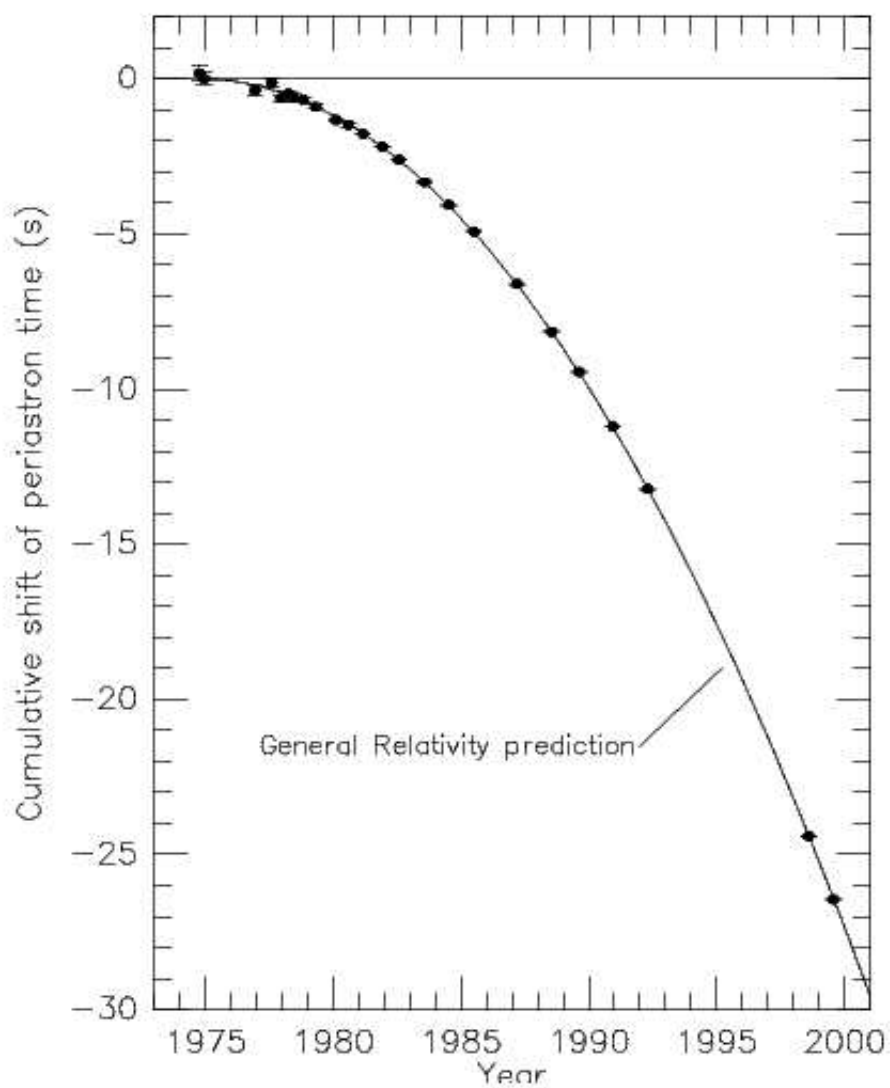


Figura 2.2: Confronto tra predizione teorica della Relatività Generale (linea continua) e dati osservativi per quanto riguarda il decadimento del periodo orbitale (mostrato attraverso l'anticipo nel passaggio al periastro) nel caso di B1913+16[4]

## La ricerca di onde gravitazionali

Dell'esistenza delle onde gravitazionali non si hanno conferme dirette, ma solo osservazioni indirette come quella sopra descritta nel caso della pulsar B1913+16. Sono però in studio dei metodi diretti di rivelazione di onde gravitazionali, alcuni dei quali fanno parte di esperimenti compiuti sul Pianeta, altri invece riguardano l'osservazione astronomica.

Le millisecond pulsar possono essere considerate degli orologi incredibilmente precisi, su cui valutare eventuali effetti di onde gravitazionali. Al passaggio di una tale onda, dovremmo essere in grado di evidenziare una variazione nei tempi di arrivo dei segnali di una pulsar. Potrebbe essere un'importante conferma dell'esistenza di una radiazione gravitazionale di fondo (GWB), originata all'epoca del Big Bang. In questo caso, tutti gli oggetti celesti dovrebbero essere soggetti a questa radiazione di fondo: perciò quello che attualmente si sta cercando è la presenza, nell'andamento dei residui di un certo numero di pulsar, un andamento comune che potrebbe essere dovuto proprio alla presenza di tali onde. Finora non si è riusciti a trovare un tale andamento, ma ampliando il numero (e la distribuzione spaziale) delle millisecond pulsar sotto osservazione, sarà possibile aumentare la sensibilità fino a renderla adeguata ad una misura.

## Le submillisecond pulsar

Al fine di poter descrivere i complessi meccanismi che regolano la formazione e l'equilibrio delle stelle di neutroni, sono state studiate diverse equazioni di stato. Esse hanno il compito di descrivere le manifestazioni macroscopiche delle interazioni delle particelle che compongono la stella, in funzione delle variabili termodinamiche, composizione, pressione, densità ed eventualmente della temperatura. Queste equazioni pongono dei limiti nei valori assunti dai

parametri delle stelle, ad esempio la massa, il periodo di rotazione, ecc., e perciò la scoperta di eventuali oggetti che superano tali limiti può escludere la validità di alcune equazioni. In particolare, esistono due classi di equazioni di stato per la materia neutronica ultradensa: le equazioni *stiff*, che prevedono un valore minimo per il raggio di una stella di neutroni intorno ai 16 km, e le equazioni *soft*, che prevedono un valore intorno ai 9 km. Questi limiti pongono ovviamente una limitazione ai possibili valori assunti dal periodo di rotazione di una NS: se ad esempio si trovassero pulsar con periodi inferiori a 0.8 ms, le equazioni *stiff*, finora ritenute plausibili, verrebbero dimostrate inadeguate. Inoltre recenti studi[8] indicano che l'individuazione di pulsar con periodi di rotazione inferiori a 0.5 ms confermerebbe l'esistenza di stelle composte non più da materia ordinaria ma bensì da un insieme di quark, tra cui anche quark *Strange*, più pesanti di *Up* e *Down* (che compongono la materia ordinaria).

### Lo studio degli ammassi globulari

Circa la metà delle millisecond pulsar conosciute sono localizzate in ammassi globulari. L'alta densità stellare caratteristica di tali ammassi, unita al fatto che generalmente sono oggetti molto vecchi<sup>2</sup>, rappresenta una condizione ideale per la formazione di sistemi binari (nei quali abbiamo visto che può avvenire il processo di spinup che porta alla formazione di millisecond pulsar), attraverso diversi fenomeni di cui i più importanti sono:

- la **cattura mareale**, in cui una stella viene catturata dal campo gravitazionale di una stella di neutroni ed inizia ad orbitare intorno ad essa;
- lo **scambio**, in cui una stella di neutroni viene catturata da un sistema

---

<sup>2</sup>Questo fatto risulta palese sia dalla composizione povera di metalli, tipica delle stelle più vecchie, la cosiddetta popolazione II, ed inoltre dall'analisi del diagramma colore-magnitudine nel quale sono assenti le stelle massive nella sequenza principale ed invece sono numerose le stelle giganti, segno di uno stadio avanzato dell'evoluzione di questi sistemi [1]



binario di stelle comuni, con la conseguente formazione di un sistema triplo da cui viene espulso l'oggetto più leggero.

Inoltre, è alta la probabilità anche del processo inverso, in cui l'interazione gravitazionale con altri oggetti slega il sistema binario. I sistemi che hanno maggiori possibilità di sopravvivere sono quelli più legati, per noi più interessanti. Ed effettivamente ciò che si osserva è che i sistemi binari situati negli ammassi globulari densi hanno periodi orbitali molto corti e orbite molto strette.

La struttura degli ammassi globulari è tale che le stelle più massive, tra cui ovviamente le stelle di neutroni, siano posizionate vicino al centro dell'ammasso. Questo fenomeno, detto della *segregazione di massa*, è dovuto al fatto che in un ammasso in equilibrio tutte le popolazioni stellari devono avere la stessa energia cinetica media, e perciò le stelle più massive devono avere una velocità media inferiore, rimanendo così più vicine al centro dell'ammasso, dove la densità stellare è più alta e la probabilità della formazione di un sistema binario è più elevata.

All'interno di un ammasso globulare può avvenire un altro meccanismo detto *core collapse* nel quale il nucleo si contrae, per via della perdita di stelle dall'ammasso. In questo processo di contrazione le stelle del nucleo non collassano ma bensì formano dei sistemi binari molto stretti: incontrando tali sistemi, un terzo oggetto non si lega ma acquista energia cinetica a spese dell'energia gravitazionale del sistema. Tale aumento di energia cinetica delle stelle libere limita la contrazione dell'ammasso evitando il collasso. Il risultato di questa contrazione è la comparsa di un nucleo centrale molto denso e compatto, che favorisce l'occorrenza di interazioni tra NS e sistemi binari.

Tutti i meccanismi finora descritti rendono gli ammassi globulari estremamente interessanti, oltre che come oggetti in sè, anche per quanto riguarda la ricerca di pulsar binarie molto strette, su cui compiere gli studi descritti nel

§2.2, oltre ad oggetti più “esotici” come sistemi binari composti da una pulsar e un buco nero (*magic Pulsars*), submillisecond pulsar e così via.

Inoltre le millisecond pulsar scoperte possono essere utilizzate per studiare le caratteristiche dell’ammasso stesso. Spesso, durante l’osservazione di pulsar appartenenti ad ammassi globulari, si trovano risultati inaspettati come ad esempio valori negativi di  $\dot{P}$ . Questi dati si possono spiegare pensando non che il periodo delle pulsar diminuisca, ma che semplicemente noi lo osserviamo diminuire per effetto dell’accelerazione della pulsar nel campo gravitazionale dell’ammasso. Ipotizzando (fondatamente) che la velocità trasversale della pulsar possa essere trascurata avremo, in generale,

$$\frac{\dot{P}_{obs}}{P_{obs}} = \frac{\dot{P}_{intr}}{P_{intr}} + \frac{a_l}{c} \quad (2.2)$$

da cui

$$\left| \frac{\dot{P}_{obs}}{P_{obs}} \right| c < |a_l| \quad (2.3)$$

L’accelerazione lungo la linea di vista può essere messa in relazione con la distanza proiettata della pulsar dal centro dell’ammasso  $R_{\perp}$ , la massa  $M_{int}$  contenuta nella sfera avente come raggio la distanza tra la pulsar e il centro dell’ammasso e l’angolo  $\theta$  tra la direzione dell’accelerazione della pulsar ed il piano del cielo:

$$a_l = -G \frac{M_{int}}{R_{\perp}^2} \cos^2 \theta \sin \theta \quad (2.4)$$

da cui, utilizzando una stima approssimata di  $M_{int}$ , si ottiene una stima della **densità centrale** dell’ammasso[9]:

$$\rho(0) = \left| \frac{a_l R_{\perp}}{4\pi k^2 G \sin 2\theta} \right| > \left| \frac{a_l R_{\perp}}{4\pi k^2 G} \right| = \left| \frac{9c R_{\perp} \dot{P}_{obs}}{4\pi k^2 G r_c^2 P_{obs}} \right| \quad (2.5)$$

dove  $r_c$  è il raggio del *core* dell’ammasso. Conoscere la densità centrale dell’ammasso ci dà importanti informazioni sulla profondità della sua buca di

potenziale.

Da discorsi analoghi di può ottenere una stima del **rapporto massa/luminosità** dell'ammasso, il cui confronto con la stima della massa che possiamo ottenere dal numero di stelle che osserviamo nella banda ottica ci può dare un'idea sulla presenza di oggetti non visibili, come NS o Buchi Neri. Espri-  
mendo  $R_{\perp}$  come  $\theta_{\perp}D$ , dove  $D$  è la distanza della pulsar dal baricentro del sistema solare, e  $\theta_{\perp}$  la distanza angolare apparente della pulsar dal centro dell'ammasso, ed introducendo la brillantezza superficiale<sup>3</sup> media nella banda V all'interno della linea di vista sottesa da  $\theta_{\perp}$ ,  $\Sigma_{V,\theta_{\perp}}$ , si ottiene[10]:

$$\left| \frac{\dot{P}_{obs}}{P_{obs}}(\theta_{\perp}) \right| c < 5.1 \times 10^{-18} \frac{\mathcal{M}}{\mathcal{L}_V} \left[ \frac{\Sigma_{V,\theta_{\perp}}}{10^4 L_{V,\odot}} \right] \quad (2.6)$$

Un'ultima informazione importante riguarda la presenza di plasma ionizzato negli ammassi; la misura di dispersione (v. §2.1) dei segnali provenienti da pulsar situate in ammassi globulari dipende linearmente dalla loro distanza da noi: questo fa pensare che la dispersione dovuta al mezzo interstellare diventi trascurabile rispetto a quella dovuta al plasma presente nell'ammasso, la cui densità si può stimare come rapporto tra la varianza delle misure di dispersione e la varianza delle distanze delle pulsar (è necessario che se ne osservino almeno 3-4, perché le stime abbiano valenza statistica) osservate in un dato ammasso.

---

<sup>3</sup>Si definisce *brillantezza superficiale* di un oggetto celeste la magnitudine visuale media di un'area pari ad un secondo d'arco quadrato

# Capitolo 3

## I metodi di ricerca

### 3.1 Le fasi della ricerca

La ricerca delle pulsar non può essere eseguita in tempo reale, ma richiede un lungo lavoro di analisi dei dati registrati dai radiotelescopi. La procedura standard attua le seguenti operazioni (schematizzate in figura 3.1):

- **registrazione dei segnali**
- **dedispersione**
- **Fast Fourier Transform**
- **folding**
- **sorting**

Nei paragrafi seguenti darò una breve descrizione di questi passaggi, ed inoltre delle problematiche legate al moto orbitale degli oggetti osservati.

#### **La registrazione dei segnali**

I radiotelescopi eseguono periodicamente delle *survey* nelle quali registrano i segnali radio provenienti da una selezionata regione del cielo. Il segnale radio

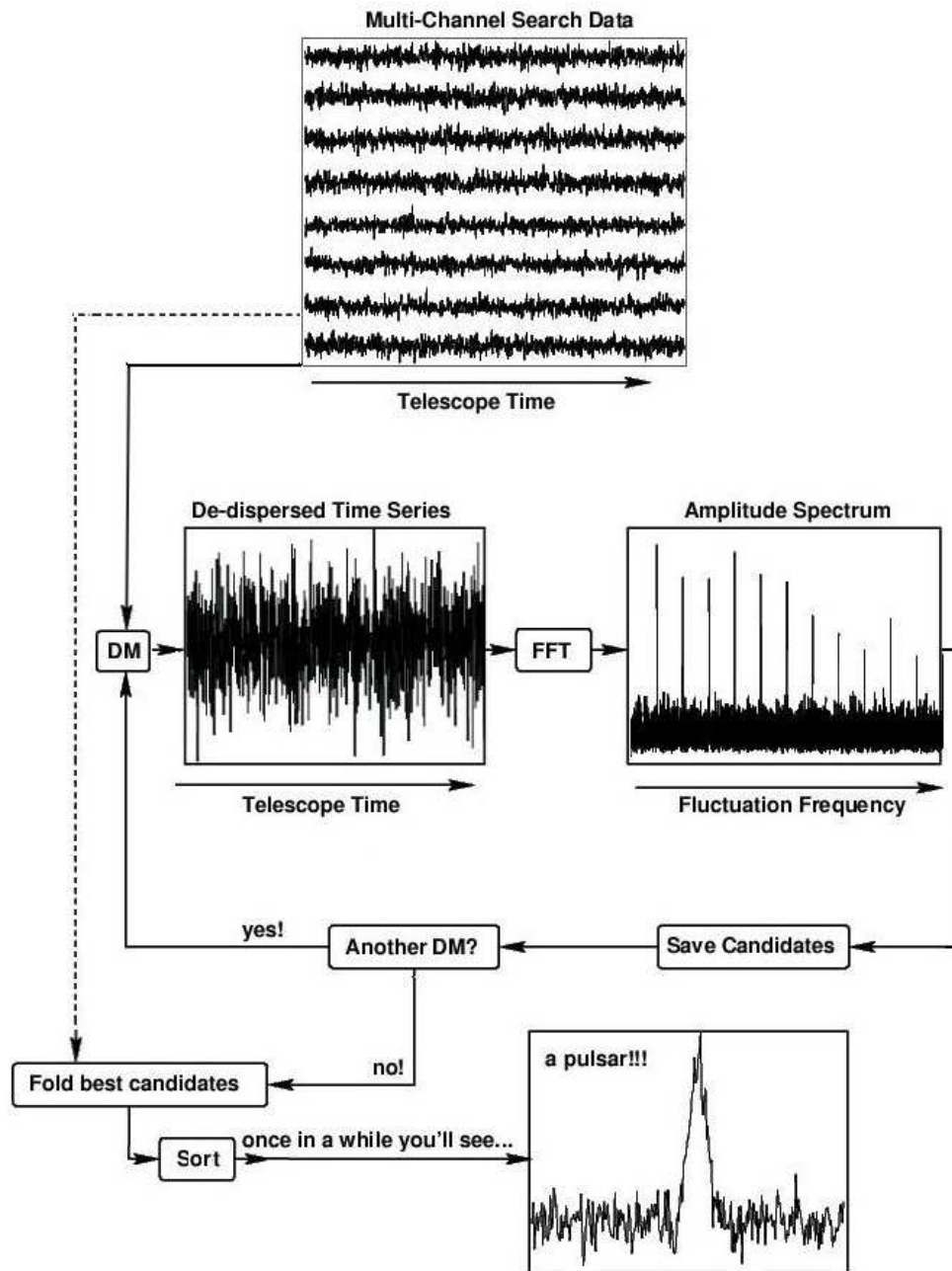


Figura 3.1: schema dei passaggi di cui è composta una procedura di search. Fonte: (14)

captato da un radiotelescopio viene campionato secondo intervalli di tempo regolari, su un certo numero di canali ognuno dei quali corrisponde ad un determinato intervallo di frequenze. La registrazione avviene in formato binario su nastri magnetici, i cui dati vengono salvati su disco rigido al momento di effettuare l'analisi.

La sensibilità del radiotelescopio, definita come densità di flusso minima rilevabile dall'antenna, è definita da[9]:

$$S_{min} \simeq \frac{S/N \cdot T_{sys}}{G\sqrt{n\Delta\nu\tau}} \left( \frac{W}{P-W} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

dove  $S/N$  è il rapporto segnale-rumore minimo accettabile,  $T_{sys}$  è la temperatura di rumore del sistema,  $G$  è il guadagno dell'antenna in K/Jy,  $n$  il numero di polarizzazioni,  $\tau$  il tempo di integrazione in secondi,  $W$  la larghezza del segnale osservato, che dipenderà da tutti gli effetti di deterioramento del segnale dovuti al mezzo interstellare, come lo scattering ( $\Delta t_{scatt}$ ) e la dispersione ( $\Delta t_{DM}$ ), descritti più avanti, dal tempo di campionamento  $t_{samp}$  e dalla larghezza intrinseca del segnale  $W_{int}$  secondo la relazione

$$W^2 = W_{int}^2 + t_{samp}^2 + \Delta t_{DM}^2 + \Delta t_{scatt}^2 \quad (3.2)$$

### La dedispersione

A parte in rari casi nei quali la misura di dispersione è nota (ad esempio, quando puntiamo l'antenna verso un ammasso globulare la cui distanza è conosciuta) il valore va cercato per tentativi. Si applica a questo punto la procedura descritta nel §2.1, applicando una differenza di fase opportuna (relativa a diversi valori di DM) alle serie temporali dei diversi canali di frequenza. Dopo aver applicato lo sfasamento, le serie temporali relative ai vari canali vengono sommate per produrre un'unica serie temporale; il procedimento viene applicato

per diversi valori di prova del DM.

### L'analisi di Fourier

Ogni serie temporale dedispersa viene sottoposta ad un'analisi di Fourier per determinare l'esistenza di periodicità. In sostanza, si opera una trasformata veloce di Fourier (**FFT**) per individuare le componenti di Fourier nella serie esaminata. Qualora un impulso "reale" dovuto ad una pulsar sia presente, la sua forma non è sinusoidale, perciò avremo la comparsa di una serie di armoniche, la cui ampiezza sarà tanto maggiore quanto minore è il *duty cycle*, cioè la percentuale del periodo di rotazione nella quale è presente l'impulso. Per questo motivo si esegue una procedura di *folding armonico*: in pratica si sommano alla frequenza principale i contributi dovuti alle armoniche di secondo, quarto, ecc. ordine. In questo modo è possibile individuare meglio la presenza di alcune frequenze che potrebbero essere corrispondenti alla frequenza di rotazione di una pulsar. Viene alla fine compilato un elenco di frequenze candidate, corrispondente ai picchi negli spettri di Fourier relativi ai vari stadi del folding armonico.

### Il folding

A questo punto, entra in gioco la procedura di folding che, in base alle informazioni date dall'analisi di Fourier, ripiega il segnale dedisperso (contenuto nella serie temporale relativa ad un certo DM) a tutti i valori del periodo candidati  $P_{cand}^{DM}$  relativi a quel DM. Secondo la statistica di Poisson, durante questa operazione il livello di rumore cresce proporzionalmente alla radice quadrata dell'ampiezza del numero di ripiegamenti (cioè del numero di cicli di periodo  $P_{cand}^{DM}$  nella serie temporale originale), mentre un eventuale segnale reale cresce linearmente.

## Il sorting

In uscita dal folding, otteniamo, per ogni valore di DM e  $P_{cand}^{DM}$ , due file contenenti rispettivamente un output grafico ed un file formattato contenente le informazioni salienti quali rapporto segnale-rumore, DM, periodo. L'ultima procedura legge i file formattati e li ordina (da qui *sorting*) in base al rapporto segnale/rumore. I file più interessanti saranno presumibilmente quelli con il più alto rapporto segnale/rumore: essi vengono visionati uno per uno.

## 3.2 La ricerca di pulsar in sistemi binari

La procedura fino ad ora descritta riguarda la ricerca di pulsar solitarie, il cui moto proprio può causare al più l'osservazione di un periodo diverso da quello reale per via dell'effetto Doppler, ma in ogni caso il periodo è costante nei tempi di integrazione usati<sup>1</sup>. La ricerca di pulsar in sistemi binari, ed in particolar modo nei sistemi binari stretti, è complicata dal fatto che spesso il periodo orbitale è estremamente corto, ed il periodo di rotazione osservato può variare considerevolmente, a causa dell'effetto Doppler, all'interno dei tempi di integrazione, causando un allargamento dell'impulso integrato (ottenuto "ripiegando" i dati a periodo costante) che si ripercuote negativamente sul rapporto segnale/rumore, facendo così uscire il "candidato" dalla lista finale dei candidati sottoposti ad ispezione visuale (v. fig. 3.2). Avendo spesso bisogno di osservazione con tempi di integrazione elevati (ad esempio, quando stiamo eseguendo una ricerca in un ammasso globulare lontano), l'allargamento dell'impulso può in realtà esser tale da cancellare completamente la natura impulsiva del segnale.

Al fine di ovviare a questi problemi sono stati sviluppati svariati metodi di

---

<sup>1</sup>Nel caso degli ammassi globulari, l'influenza del moto delle pulsar solitarie nel campo gravitazionale dell'ammasso si ripercuote sui parametri osservati, come il  $\dot{P}$ , ma le variazioni sono abbastanza lente da non compromettere la misura



ricerca del segnale “accelerato” dal moto orbitale, classificabili in due categorie principali: ricerca **coerente**, che preserva le informazioni sulla fase del segnale, e ricerca **incoerente**, che non le preserva.

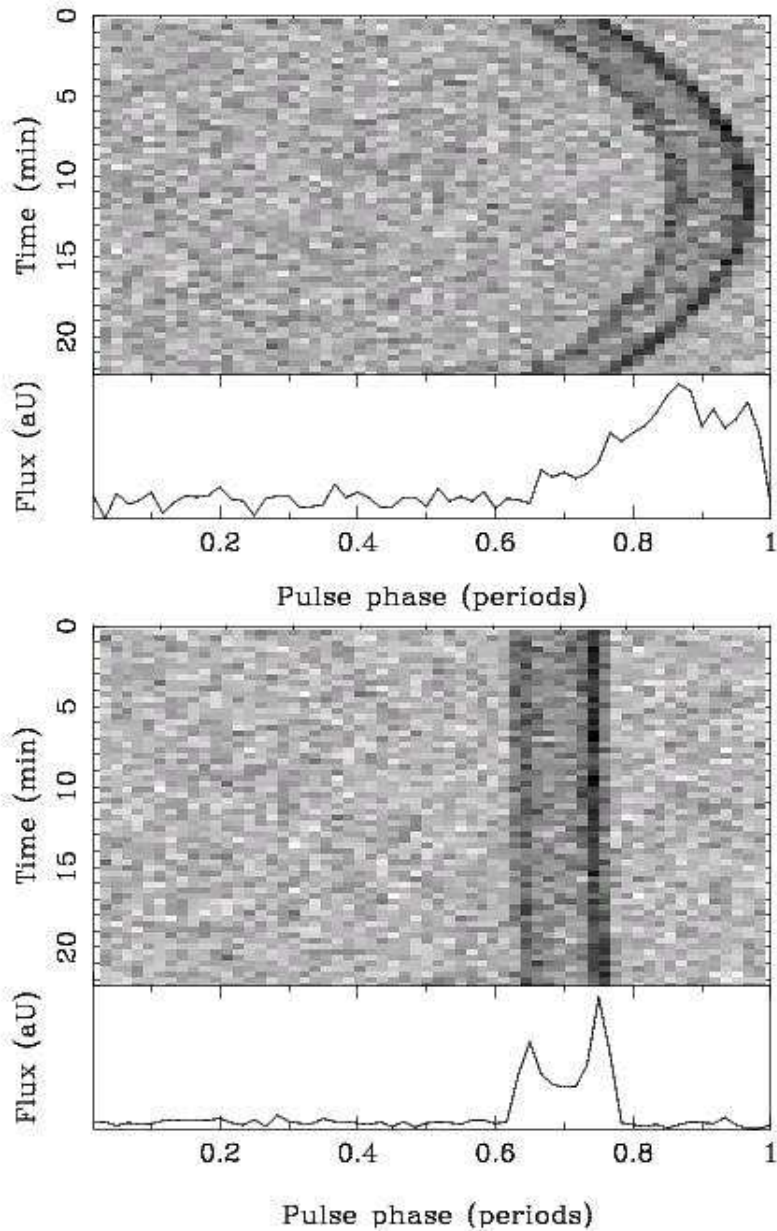
### 3.2.1 Ricerca coerente

Attraverso questo procedimento, sotto opportune ipotesi, è possibile trasformare la serie temporale di una pulsar binaria nella serie temporale corrispondente ad una pulsar singola. L'ipotesi principale su cui si basa questo metodo è che nei tempi di integrazione l'accelerazione orbitale sia costante. Posta questa condizione, si applica alla serie temporale una “deformazione” della scala dei tempi, attraverso un ricampionamento del segnale, che fa sì che il periodo dell'impulso appaia costante, per poter praticare i procedimenti fin qui descritti.

Il periodo osservato della pulsar  $P(t)$  può essere espresso in funzione del periodo nel sistema di riferimento della pulsar  $P_0$  secondo la formula:

$$P(t) = P_0 \cdot \left[ 1 + \frac{v(t)}{c} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

Durante il ricampionamento del segnale dovremo fare in modo che il nostro tempo scorra approssimativamente come il tempo nel sistema di riferimento della pulsar, in modo che il numero di campionamenti in un periodo sia costante: il nuovo intervallo di campionamento  $t_{new}$  si ottiene dalla 3.3, con l'assunzione che l'accelerazione orbitale sia costante (non sappiamo qual'è la velocità lungo la linea di vista della pulsar, dobbiamo ipotizzare che  $v = at$ , con  $a$  da determinarsi per prove successive), in modo che l'intervallo di tempo del campionamento originale  $t_{samp}$  sia uguale a quello nel sistema di riferimento



*Figura 3.2: Osservazione della pulsar B1913+16 da parte del radiotelescopio di Arecibo: il grafico in alto mostra l'effetto del moto orbitale sulla fase del segnale (la scala è normalizzata in modo da ipotizzare periodo costante) e quindi sul profilo integrato (sotto); il grafico in basso rappresenta invece il segnale ripulito dagli effetti orbitali, ed il relativo profilo integrato.*

della pulsar  $t_0$  a metà del tempo di integrazione  $T$ , ottenendo

$$t_{new} = \frac{t_{samp}}{1 + aT/2c} \quad (3.4)$$

Quando stiamo effettuando una ricerca di pulsar, non sappiamo quale sia il valore dell'accelerazione orbitale, perciò dobbiamo effettuare dei tentativi con valori di prova. Ciò porta a dei problemi di risorse di calcolo in quanto si tratta di analizzare diversi gigabyte di dati, con diversi cicli corrispondenti ai diversi valori di accelerazione, ognuno dei quali dev'essere processato per diversi valori di DM. Questo procedimento richiederebbe tempi nell'ordine di un mese (per una sola osservazione) anche per un cluster di 24 CPU di medio livello[11]. Inoltre, l'assunzione che l'accelerazione sia costante nel tempo di integrazione può non essere corretta: ad esempio, nel caso in cui si cercano sistemi binari lontani, in cui il segnale della pulsar è probabilmente debole e richiede tempi di integrazione lunghi, l'accelerazione può variare notevolmente; lo stesso vale nei casi in cui il sistema binario è molto stretto (e quindi più interessante). Ciò richiede delle modifiche alla procedura che permettano di ovviare a questi problemi.

### **Il metodo di Ransom[12]**

Questo metodo si basa sul fatto che il moto orbitale modula il periodo ricevuto del segnale. Se noi analizziamo lo spettro di potenza del segnale ricevuto, esso presenterà due frequenze limite, corrispondenti al massimo e minimo valore assunto dalla frequenza di rotazione della pulsar, alle quali corrisponde la massima potenza. Si può dimostrare che la modulazione della fase del segnale dovuta a questo fenomeno è pari a

$$\Phi_{orb} = 2\pi x_{orb} f_{spin} = \frac{2\pi x_{orb}}{P_{spin}}$$

dove  $x_{orb}$  è il semiasse maggiore non proiettato del sistema binario. A partire dallo studio di questa modulazione di fase, possiamo risalire ai parametri kepleriani dell'orbita.

Il problema di questo metodo risiede nella necessità, nel caso in cui il segnale sia troppo debole, di eseguire un gran numero di trasformate di Fourier, il che comporta un aumento dei tempi di calcolo notevole. Inoltre esso è efficiente solo se il tempo di integrazione è pari almeno a 1.5 volte il periodo orbitale[9].

### 3.2.2 Ricerca incoerente

#### Stack Search

Se noi suddividiamo la serie temporale in un certo numero di parti, ed eseguiamo su ognuna di esse una trasformata di Fourier, siamo in grado di eseguire una ricerca di frequenze candidate poco influenzata dall'effetto Doppler. Dopodiché si sommano in maniera incoerente (cioè, senza tener conto della fase del segnale) i picchi dello spettro di potenza.

Questo metodo è assai utile nei casi in cui si utilizzino osservazioni lunghe, nelle quali i tempi di calcolo con gli altri metodi sarebbero proibitivi. Il problema fondamentale è che la somma incoerente, unita agli effetti se pur minimi dell'effetto Doppler, porta alla perdita di sensibilità del metodo.

#### Smoothing spettrale

Questo metodo si basa sull'applicazione di una convoluzione sullo spettro di potenza con una funzione di filtro, allo scopo di esaltare eventuali frequenze candidate. Il filtro viene applicato su vari punti dello spettro di potenza: esso esalta eventuali picchi smussati dall'effetto Doppler, mentre tende ad attenuare il segnale se viene centrato su un frequenza sulla quale c'è solo rumore.

Si ottiene la massima ampiezza del segnale quando il filtro è centrato sulla frequenza di rotazione della pulsar.

Con questo metodo, si riesce ad ottenere una lista di frequenza candidate eseguendo solo una singola FFT su ogni serie temporale dedispersa, con un netto risparmio di risorse computazionali rispetto al metodo tradizionale, il quale prevede una FFT per ogni valore di prova dell'accelerazione orbitale.

# Capitolo 4

## Binary\_confirm e il caso di PSR

### J1801-2130

Una parte importante della procedura di *search* riguarda la conferma dei segnali “candidati”. Un esempio di codice che esegue questo passaggio è rappresentato da `binary_confirm`, installato sul nuovo cluster Mangusta, costituito da 40 CPU, dell’Osservatorio Astronomico di Cagliari. Durante il tirocinio ho lavorato alla fase di *porting* di `binary_confirm` dalla sua precedente versione, scritta in fortran 77, installata sulla workstation Alpha FFT7, alla nuova versione in fortran 90 installata su Mangusta.

#### 4.1 Il problema della conferma dei candidati

La procedura di *search*, come abbiamo visto, richiede un grosso dispendio di mezzi computazionali. Quando si esegue una *survey* spesso non è conveniente processare direttamente il segnale in modo completo “alla cieca”. Si tende invece ad eseguire una ricerca meno approfondita, ma più snella dal punto di vista dei mezzi di calcolo impiegati, che individui dei “candidati”, ovvero dei segnali che potrebbero nascondere gli impulsi di una pulsar, magari alterati

dal moto orbitale. Di questi candidati si ha una stima del DM e del periodo, che vengono registrati per controlli successivi più accurati.

Immaginiamo di aver trovato, attraverso una qualunque delle procedure di *search* sopra esposte, una millisecond pulsar facente parte di un sistema binario, o un oggetto che potrebbe esserlo. In generale, la prima volta che viene osservata una pulsar in un sistema binario, non si sa niente sulla sua fase orbitale; di conseguenza non sappiamo quanto il valore del periodo osservato possa essere influenzato dall'effetto Doppler orbitale. Nel caso in cui si osservi invece un segnale che potrebbe provenire da una pulsar, abbiamo bisogno di eseguire delle procedura di conferma che possano eventualmente evidenziare in maniera inequivocabile la presenza di una pulsar.

Per poter eseguire misurazioni successive senza dover rimettere in moto delle lunghe procedure di calcolo, serve lo studio di un metodo per eseguire la ricerca di oggetti già precedentemente individuati, sfruttando la possibilità di “guadagnare” risorse computazionali attraverso la stima iniziale di alcuni parametri che evita di dover eseguire troppi tentativi a vuoto. Come stime iniziali dei parametri vengono utilizzati i valori delle precedenti osservazioni.

## 4.2 Struttura di `binary_confirm`

Il codice è composto da circa 30 tra programmi e subroutine, la cui esecuzione in sequenza è ordinata da uno script. Questi programmi e sottoprogrammi leggono l'header dei file da analizzare, confrontano con eventuali dati esistenti, eseguono le procedure di dedispersione, accelerazione, folding, e forniscono come output grafico una schermata di PGPlot nella quale sono contenute le informazioni salienti delle migliori candidate, le quali vengono scelte per ogni intervallo di periodi di prova in base al rapporto segnale-rumore.

I dati ricevuti dai singoli canali dei radiotelescopi (ognuno dei quali copre

un certo intervallo di frequenze) vengono registrati su un nastro magnetico. Per iniziare l'analisi, i dati vengono salvati su disco in formato binario leggibile dal sistema operativo in uso attraverso il comando `sc_td` [13].

#### `vlsa-dedisp`

Il programma `create_tab` crea una tabella di valori di prova di DM. Attraverso i programmi `getSname`, `getParams` e `getDMstepbinconf` vengono estrapolati dal file le informazioni di partenza per eseguire la dedispersione, tra cui l'esistenza di una tabella di valori di prova di DM (verifica del funzionamento di `create_tab`), nome della sorgente e parametri osservativi. Dopodiché `vlsa-dedisp` esegue la dedispersione e per ognuno di questi valori di DM crea un file di dati non formattati dedispersi. Il programma richiama diverse subroutine, le quali eseguono i diversi passaggi tra cui la lettura dell'header, e la dedispersione.

#### `vlsa-seg-one-fold`

Questa è la parte del codice che esegue il folding. Esso analizza i dati dedispersi, ed attraverso le informazioni date dall'analisi di Fourier esegue la ricerca del periodo tra i vari candidati. La ricerca viene eseguita su intervalli di periodo all'interno dei quali, tra tutti i valori di prova, vengono scelti quelli per cui il rapporto segnale/rumore è più alto. L'output è su due file per ogni valore scelto: uno con l'estensione `.per`, che fornisce alcune informazioni principali quali rapporto segnale/rumore, epoca dell'osservazione, periodo osservato, periodo baricentrico, misura di dispersione; l'altro con l'estensione `.phi`, che fornisce le informazioni necessarie per l'output grafico su `PGPlot`, che viene eseguito dal programma `vlsa_plot_phi`.



## L'output finale

Lo script analizza i file `.per`, li ordina in base al rapporto segnale/rumore, dopodiché apre con PGPlot il file `.phi` corrispondente al `.per` con il maggior rapporto segnale/rumore. In tale file sono riassunti i risultati salienti della ricerca:

- informazioni varie riguardanti il file (nastro, numero del file, blocco di partenza, data in formato anglosassone `yymmdd`, ora UTC);
- tempo siderale locale dell'osservazione; ascensione retta e declinazione riportate all'equinozio del 2000;
- nome della sorgente, frequenza superiore in MHz, numero di canali  $\times$  ampiezza di banda di ogni canale, tempo di campionamento;
- numero di campionamenti, epoca centrale dell'osservazione in MJD, numero di sottointegrazioni, miglior stima del DM;
- miglior rapporto segnale/rumore, periodo osservato e baricentrico (ovvero, riferito al baricentro del Sistema Solare), accelerazione lungo la linea di vista, eventuale variazione di quest'ultima nel tempo di integrazione;
- quattro grafici in cui sono mostrati:
  - a. andamento della fase del segnale dedisperso (con il miglior valore di DM) ipotizzando accelerazione nulla (la scala della fase è normalizzata in modo da poter considerare costante il periodo);
  - b. fase del segnale dedisperso dopo l'applicazione del parametro di accelerazione;
  - c. miglior stima del profilo integrato, ottenuta attraverso i migliori valori di accelerazione e DM;

- d. andamento del rapporto segnale/rumore in base ai valori di prova utilizzati per il parametro di accelerazione ed il periodo di rotazione.

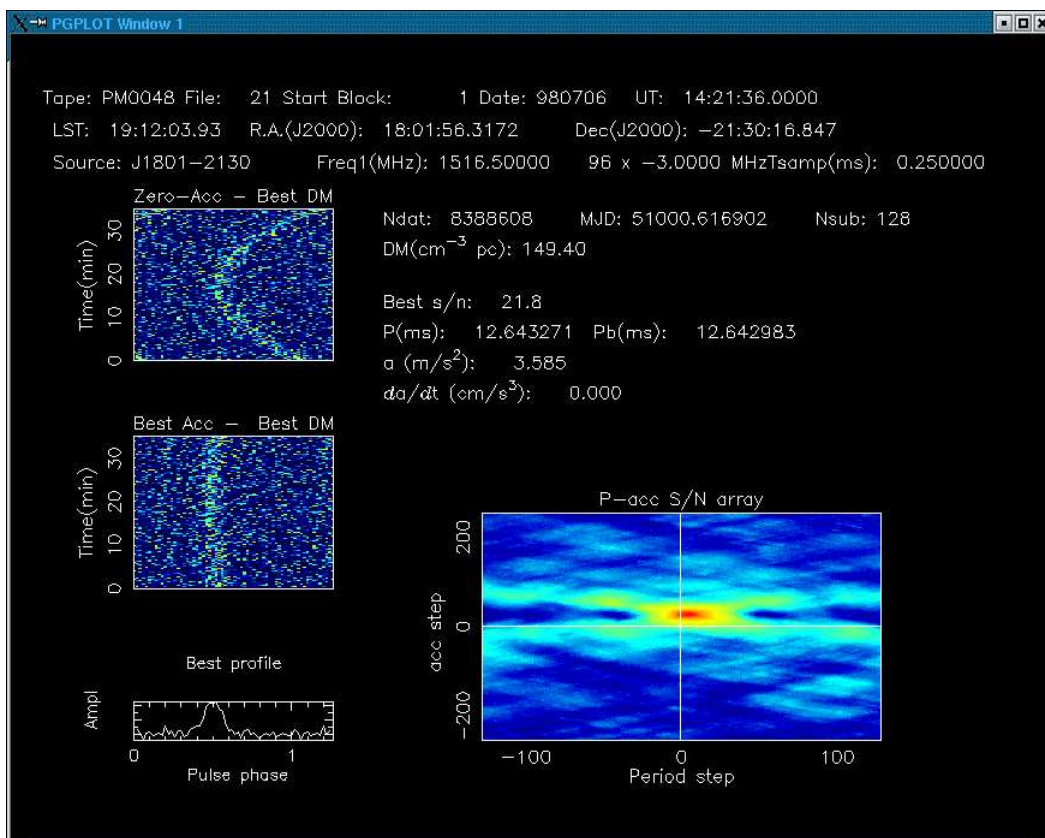


Figura 4.1: Output grafico finale di `binary_confirm` nel caso della pulsar J1801-2130

### 4.3 Il lavoro svolto

L'obiettivo principale del mio lavoro, in partenza, era far accettare il primo blocco di `binary_confirm`, ovvero il programma di dedispersione `vlsa-dedisp`, dal compilatore `g77` installato su una delle macchine stand-alone dell'osservatorio, Castello, su cui è installato un sistema operativo Linux Debian (Mangusta era ancora in costruzione, e dunque non avevo la possibilità di lavorare diretta-

mente sul cluster). Dopodiché dovevo confrontare le prestazioni ed i risultati degli eseguibili creati da g77 con quelle degli eseguibili creati su FFT7 dal compilatore f90<sup>1</sup>. Il lavoro non è stato lunghissimo, e dopo relativamente poco tempo ho potuto verificare che i risultati ottenuti dai programmi, cioè i file dedispersi, erano identici.

Durante la visita del prof. Andrew Faulkner dell'Università di Manchester, è stato installato `vlsa-dedisp` e la restante parte di `binary_confirm` su Mangusta. Di conseguenza, il lavoro con cui sono partito era giunto al termine. Però, rimaneva il dubbio se g77 fosse effettivamente una scelta appropriata. Di conseguenza, una volta che è stato installato l'Intel Fortran Compiler su Mangusta, sono passato alla riscrittura di `binary_confirm` per adattarlo alle esigenze di questo compilatore. Al contrario di f90, che compila

Postazione	FFT7	Mangusta	
Compilatore	f90	gcc-g77	IFC
Formato file	.f	.f	.f90
Formato binario	big endian	little endian	little endian

Tabella 4.1: Tavola delle principali caratteristiche delle varie versioni dei programmi

senza difficoltà file scritti con la sintassi del fortran 77 ma con alcune funzioni intrinseche più recenti, IFC non ha questo grado di compatibilità. La presenza in `binary_confirm` di alcune funzioni intrinseche del fortran 90 ha reso necessario trasformare tutto il codice con la sintassi del fortran 90. Questa trasformazione riguarda sia l'estensione dei file (anziché `.f`, `.f90`), sia la dichiarazione delle variabili, i commenti ed i caratteri di continuazione delle righe di comando. Una volta eseguita la “trasformazione”, unita ad alcune

<sup>1</sup>L'uso del compilatore f90 per programmi scritti in fortran 77 è pienamente giustificato dalla caratteristica del compilatore di essere compatibile con tutte le versioni precedenti di fortran

	IFC	G77
	Tempo (secondi)	Tempo (secondi)
create_tab	9,52	8,89
vlsa_dedisp	10,07	25,73
Vlsa-seg-one-fold		
1	69,19	75,18
2	69,19	75,17
3	69,19	75,20
4	69,19	75,22
5	69,18	75,18
6	69,18	75,23
7	69,18	75,20
8	69,19	75,17
9	69,18	75,19
10	69,18	75,19
11	69,17	75,18
12	69,17	75,21
13	69,16	75,16
14	69,18	75,17
18	69,19	75,17
19	69,18	75,33
20	69,27	75,19
21	69,19	75,21
22	69,27	75,20
23	69,23	75,26
24	69,20	75,19
25	68,95	75,20
26	69,18	75,16
27	69,18	75,28
28	69,18	75,21
29	69,18	75,17
30	69,19	75,17
31	69,18	75,18
32	69,17	75,30
33	69,18	75,18
34	69,19	75,23
35	69,25	75,19
36	69,19	75,20
37	69,18	75,19

38	69,22	75,17
39	69,18	75,21
40	69,19	75,23
41	69,20	75,20
42	69,19	75,20
43	69,18	75,16
44	69,19	75,22
45	69,18	75,19
46	69,18	75,22
47	69,19	75,20
48	69,18	75,18
49	69,19	75,19
50	69,18	75,21
51	69,17	75,21
52	69,19	75,20
53	69,18	75,18
54	69,18	75,19
55	69,17	75,16
56	69,18	75,19
57	69,23	75,20
58	69,22	75,20
59	69,18	75,17
60	69,18	75,21
61	69,18	75,21
62	69,16	75,18
63	69,17	75,20
64	69,19	75,17
65	69,17	75,19
66	69,18	75,19
	Tempo medio (secondi)	Tempo medio(secondi)
	69,18	75,20

Tabella 4.2: confronto fra i tempi impiegati dalle versioni di `binary_confirm` installate su Mangusta per eseguire le procedure

variazioni nelle flags di compilazione e l'aggiornamento di alcune librerie, IFC ha compilato correttamente i programmi.

L'ultima fase del lavoro è consistita nel confronto tra le prestazioni degli eseguibili. Questo confronto riguarda sia i risultati veri e propri, cioè l'individuazione degli stessi valori di tutti i parametri, sia un cronometrando dei tempi impiegati per avere i risultati. Il tempo impiegato dalla versione IFC è decisamente inferiore rispetto alla versione g77: in particolare, la dedispersione viene praticata in meno della metà del tempo, mentre nel folding IFC impiega il 10% di tempo in meno. La percentuale di CPU utilizzata, invece è praticamente identica (circa il 99%), il che fa pensare che gli eseguibili creati da IFC sfruttino meglio le risorse del processore, caratteristica essenziale nel momento in cui si vogliono eseguire calcoli molto lunghi con un cluster di 40 CPU come Mangusta.

### 4.3.1 Utilizzo di `binary_confirm` nel caso di PSR J1801-2130

Uno dei file analizzati durante il lavoro riguardava J1801-2130, una millisecond pulsar in un sistema binario con un'altra NS. L'osservazione di questo oggetto è assai complicata per via dell'alto valore di accelerazione orbitale. In un caso come questo, l'utilizzo di `binary_confirm` si è rivelato indispensabile. In figura 4.2 è riportato l'output grafico di `PGPlot` corrispondente al file con il miglior rapporto segnale/rumore. Si può notare come, nel grafico in alto a sinistra, il segnale non accelerato presenta, nei cicli di folding successivi, una differenza di fase tale che l'impulso integrato sarebbe tanto "appiattito" da non essere riconoscibile come impulso. L'applicazione del parametro di accelerazione "allinea" la fase dell'impulso nelle diverse sottointegrazioni (come si può vedere nell'immagine nel grafico a sinistra al centro) permettendo di

---

tracciare un impulso abbastanza ben definito (in basso a sinistra). Nel grafico grande si nota l'intervallo di valori di periodo e accelerazione per cui si sono ottenuti rapporti segnale/rumore più alti.

# Conclusioni

In questo lavoro ho cercato di illustrare meglio possibile le problematiche connesse con la ricerca delle pulsar, ed in particolare delle millisecond pulsar. Tra queste problematiche spicca il fatto di dover verificare osservazioni dubbie o incomplete, in pratica la conferma dei candidati. Il codice su cui ho lavorato si è dimostrato essenziale in questo senso e permette di ottenere dei risultati davvero degni di nota, come nel caso di J1801-2130

Un passo successivo dovrebbe essere, a mio parere, il porting su Mangusta del resto del codice, ed in seguito la “pulitura” del codice da tutte le tracce (subroutine in disuso, operazioni “commentate” ecc.) lasciate dalle varie persone che ci hanno lavorato; contemporaneamente, sarebbe opportuna la scrittura (anche all’interno dei programmi stessi, sotto forma di commenti) di una guida alle varie parti del codice in modo tale da facilitare il lavoro agli sviluppatori delle prossime versioni del codice.



# Bibliografia

- [1] Dale A. Ostlie Bradley W. Carrol. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Addison-Wesley, 1996.
- [2] Hewish et al. Observations of a rapidly pulsating radio source.
- [3] D. R. Lorimer A. G. Lyne. *Nature*, (369), 1994.
- [4] Duncan R. Lorimer. Binary and millisecond pulsars at the new millennium. *Living Reviews in Relativity*, 4(5), giugno 2001.
- [5] van der Klis M. Wijnands, R. *Nature*, (394):344, 1998.
- [6] Russel A. Hulse. The discovery of the binary pulsar. *Nobel Lectures*, 1993.
- [7] Joseph H. Taylor. Binary pulsars and relativistic gravity. *Nobel Lectures*, 1993.
- [8] Xiaoping et al. An astronomical evidence of existence of quark matter and the prediction for submillisecond pulsars.
- [9] Antonella Laterza. Tesi di laurea, rassegna dei principali metodi di ricerca di pulsars in sistemi binari: sviluppo di una ambiente per l'ottimizzazione dei codici, 2002.
- [10] E.S. Phinney.
- [11] van Straten W. Brailes M. Edwards, R. T. A search for sub-millisecond pulsars. *astro-ph/0106353*, 2001.
- [12] S. C. Ransom. Fast search techniques for high energy pulsars. *astro-ph/0112006*.
- [13] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/software/index.html>.

# Ringraziamenti

In primo luogo, vorrei ringraziare prof. Nicolò D'Amico e dott. Andrea Posenti per avermi dato la possibilità di lavorare a questa tesi, e soprattutto per avermi seguito durante le varie fasi del lavoro con  $3 \text{ kpc}^3$  di pazienza.

Ringrazio anche tutto il personale dell'Osservatorio: tutti mi hanno aiutato durante il lavoro con grande competenza ma soprattutto disponibilità. Ringrazio Antonella, Rosita, Alessandro, Andrea T. e P., Claudio, Carlo, Matteo, Pino, Gabriele, Antonio, Renata ecc. per avermi fatto sentire davvero a casa.

Ringrazio tutti i miei familiari, vicini e lontani. Ringrazio i miei genitori che mi hanno sempre sostenuto con amore, in ogni momento, anche quando non sono stato un mostro di ordine in casa (cioè, da circa 22 anni a questa parte...), e per tutto l'aiuto datomi ogni volta che ne avevo bisogno. Irene perché oltre ad essere la mia sorella preferita è anche di una dolcezza inaudita (quando non si rifiuta di fare i compiti!). I nonni Antonio e Ines, Emilio (ti ricorderò sempre) e Gina perché mi sono sempre stati vicini insegnandomi un'infinità di cose e dandomi grandi esempi di vita. Tutti gli zii e le zie per i tanti consigli, in tutti i campi, ognuno secondo la sua esperienza, ognuno con il suo particolare genio.

Ringrazio tutti i miei amici per l'incoraggiamento in tutti questi anni: anche quando ero convinto di non poter raggiungere certi risultati, loro erano convinti del contrario, e col loro sostegno li ho raggiunti. Ringrazio i Gen e gli Scout che mi hanno fatto crescere in un ambiente estremamente salutare, chi in un modo e chi in un altro. Ringrazio la mia maestra, e tutti quei professori che, a tutti i livelli, in qualche modo hanno contribuito alla mia formazione non solo scolastica, anche quando le loro materie non mi erano congeniali. Tutti quei compagni di scuola e di università che hanno saputo essere più che compagni e colleghi.

Ringrazio Maurizio e Corrado per la grande pazienza e per avermi dato una grande possibilità che non ho saputo sfruttare.

*Last but not least*, ringrazio Marta. Per questi due anni e passa pieni di gioia, per i manicaretti, per il tuo sorriso, per l'amore che hai riversato su di me in ogni momento. Anche quando rompi. Ti amo.