

## Scheda esperienza

### **Analisi dell'emissione di raggi gamma da pulsar**

In questa esperienza di analisi dati impareremo ad studiare l'emissione periodica di raggi gamma proveniente da pulsar nella nostra Galassia. Per questa analisi, utilizzeremo i dati raccolti dal Large Area Telescope (LAT) a bordo della missione *Fermi*.

Per l'esperienza sarà necessario utilizzare i seguenti strumenti

- Python (Pandas, Astropy)
- Software di analisi dati Fermi (fermitools)

#### **1 - Scaricare i dati relativi alla pulsar**

In questa parte dell'esperienza scaricheremo, attraverso il sito web del Fermi Science Support Center (<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>) i dati relativi alla pulsar di interesse.

Potete scegliere una fra le pulsar riportate nella Tabella 1, in fondo a questa scheda.

- Scaricare i dati LAT
  - Andare sul portale dati LAT del Fssc (<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/>) e selezionare LAT Data Server
  - Inserire le coordinate della pulsar nel formato RA, DEC
  - Inserire l'intervallo di energie 100-500000 MeV, e un raggio di selezione di 4 gradi, di poco superiore alle dimensioni della PSF a 100 MeV.
  - Per quanto riguarda l'intervallo di tempo, selezionare l'intervallo proposto nella Tabella 1.
  - Ricordarsi di selezionare la casella per i dati FT2 (spacecraft data)
  - Cliccare su Start Search e aspettare che i file siano pronti per essere scaricati. Si aprirà una pagina con un tempo stimato per la ricerca e la preparazione dei file, ad es. 6 secondi.
  - Dopo aver aspettato quell'intervallo di tempo, cliccare sul link indicato nella pagina, e sarete diretti alla pagina dei risultati. In fondo alla pagina sono indicati gli URL per scaricare i files.
  - In JupyterLab, aprite un nuovo terminale e scaricate i dati con l'applicazione wget, copiandoli poi nella cartella *data* del pacchetto exp-pulsar. In fondo alla pagina trovate l'esatto comando wget da copiare nel terminale per scaricare i dati.
  - I dati FT1 (eventi) sono contenuti nei file FITS che terminano per PH00 (e PH01 ecc nel caso ci siano più file), mentre quelli FT2 terminano in SC00 ecc.
  - Non dimenticate di aggiungere questi file al vostro repository Github

#### **2 - Selezione e costruzione della count map**

- Una volta scaricati i file FT1 e FT2 è importante applicare una ulteriore selezione con gtselect e gtmktime.

- Per accedere a questi tool, così come *gtbary* e gli altri Fermi tools, bisogna aprire un Terminale Linux e attivare l'ambiente Python relativo, utilizzando il comando *photon-env-py3* (è possibile usare il tasto TAB per autocompletare il comando).
- Selezionare con *gtselect* e *gtmktime* un raggio di 3 gradi (all'incirca la PSF a 100 MeV) e un'energia minima di 100 MeV. Questo passaggio è necessario per selezionare correttamente con *gtselect* la classe di fotoni (evclass=128, cioè SOURCE), e tipo (evtype=3, cioè FRONT+BACK). Il valore dello zenith angle può essere impostato a 90 gradi, in modo da ridurre il contributo dei fotoni di albedo terrestre.  
Nel caso vi siano più di un file FT1, potete selezionarli con *gtselect* copiando i nomi dei file in un file di testo, ad es. listfile.txt, e lanciare *gtselect* mettendo @listfile.txt come input.
- **NOTA:** E' importante selezionare i fotoni in un intervallo più piccolo rispetto a quello coperto dal file FT2. Ad esempio, utilizzando *gtselect* e *gtmktime*, selezionare i fotoni con tempi di arrivo compresi fra 1000 secondi dopo l'inizio del file FT2 e 1000 prima della fine del file FT2. Per vedere l'intervallo dei tempi coperti dal file FT1, esplorare il file con *astropy* e leggere la colonna TIMES nell'estensione EVENTS. I tempi sono riportati in MET.
- Applicare la selezione sui tempi con *gtmktime* in accordo con l'orbita del satellite.
- Nel selezionare i file con *gtselect* e *gtmktime*, scegliete per il file FT1 filtrato dei nomi sensati, come ad esempio PSRJ2229\_3deg\_100mev.fits
- Utilizzando il Jupyter Notebook, realizzare una mappa dei fotoni di energia  $E > 300$  MeV con *Astropy* (potete utilizzare il tutorial sui file FITS per vedere come), e verificare che la sorgente puntiforme è consistente con la posizione suggerita per la ricerca.
- Ripetere l'operazione, selezionando però i fotoni 1 GeV. Come cambia la mappa dei conteggi? Come mai?
- Aggiungete sempre i file filtrati al repository

### 3 - Baricentering dei fotoni

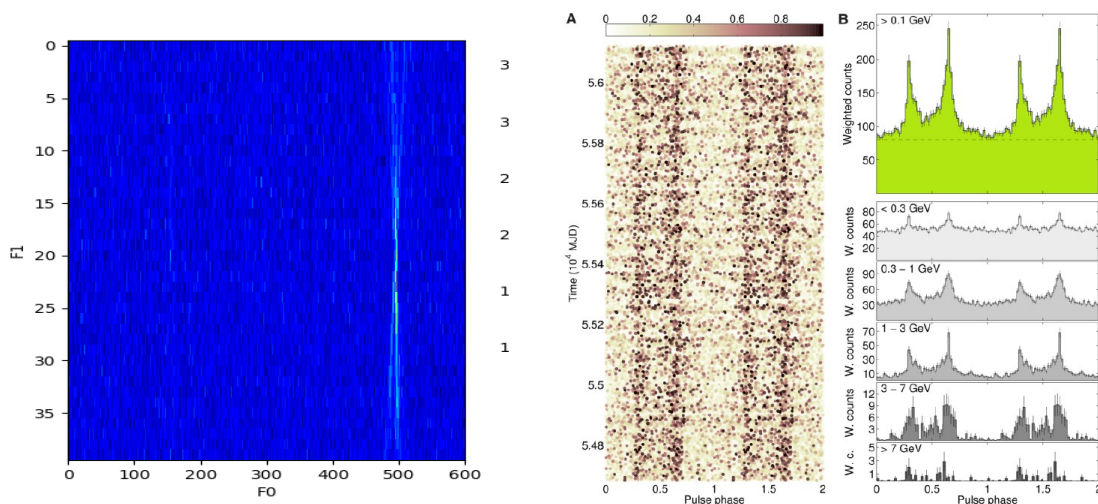
- Sempre da terminale, è ora il momento di applicare le correzioni baricentriche al file FT1.
- Per fare questa operazione si utilizza da terminale il tool *gtbary*. Inserire le coordinate riportate in Tabella, che sono state utilizzate per selezionare i fotoni. E' utile scegliere di salvare il file con i tempi di arrivo baricentrati in un nuovo file, ad es. PSRJ2229\_3deg\_100mev\_bary.fits

### 4 – Ricerca di periodicità

- Una volta baricentrati i fotoni, si può fare una scansione per evidenziare la periodicità e trovare la frequenza e la derivata della frequenza. Questa operazione può essere effettuata utilizzando un Jupyter Notebook, dopo aver letto i tempi baricentrati dal file in uscita da *gtbary*.
- Effettuare una scansione bidimensionale sulla frequenza ( $f_0$ ) e derivata della frequenza ( $f_1$ ) per trovare con precisione i parametri rotazionali. Per ogni coppia ( $f_0, f_1$ ) di test, calcolare la fase rotazionale per ciascun fotone, utilizzando come epoca  $t_0$  il tempo centrale di ciascun intervallo temporale. E' importante che il tempo  $t_0$  sia espresso in MET, in modo da poter avere le corrette dimensioni nel termine  $(t-t_0)$ .
- Nel calcolare le fasi, ricordarsi che le fasi negative possono essere riportate all'intervallo [0.0-1.0] semplicemente aggiungendo 1.0.
- Una volta calcolate le fasi, è possibile usare un test di periodicità, ad esempio lo Z2n test (Buccheri et al. 1983). Utilizzare come frequenza centrale quella suggerita in tabella, ed effettuare una scansione considerando un  $df_0 = 1/T$ , e  $df_1 = 2/T^2$ , dove T è la durata di ciascun intervallo (cioè in questo caso 90 giorni). E' possibile anche utilizzare un intervallo più fine, ad esempio  $df_0 = 0.3/T$ , e  $df_1 = 0.6/T^2$ . Il numero di tentativi dipende dalla pulsar,

ma indicativamente si può provare 1000 tentativi su  $f_0$  e 50 su  $f_1$  (naturalmente occorre fare delle prove per capire il numero di tentativi ottimale). Come valori centrali di  $f_0$ ,  $f_1$  potete utilizzare quelli proposti in tabella. In Figura 1 a sinistra è riportato un esempio di uno scan di periodicità, dove è visibile il massimo in colore rosso.

- Una ulteriore conferma che i valori di  $f_0, f_1$  sono quelli corretti è costruire uno scatter plot in cui si mette sull'asse X la fase e sulla Y il tempo. Ogni punto corrisponde a un fotone, e si dovrebbe poter vedere in corrispondenza dei picchi delle righe verticali e allineate (Figura 1 destra, riquadro A), che indicano che non ci sono variazioni di fase nel tempo dovute a errori nei valori di  $f_0$  e  $f_1$ .



F

Figura 1. Sinistra: Esempio di scansione in  $f_0$  e  $f_1$ . Sugli assi non sono indicati i valori di  $f_0$  e  $f_1$  bensì gli step dello scan. Destra: esempio di plot di istogramma, costruito per la pulsar PSR J1311-3430 (tratto da Pletsch et al 2012, Science)

## 5 - Caratterizzazione dei fasogrammi

- Costruire gli istogrammi delle fasi (fasogrammi) utilizzando la coppia  $f_0, f_1$  che ha dato il valore più alto di  $Z2n$ . E' possibile determinare la differenza di fase fra i picchi, e il rapporto fra l'altezza dei due picchi (in caso di due picchi nel fasogramma)? Il fasogramma assomiglia a quanto trovato nell'articolo di riferimento?
- Nel caso non fosse visibile in modo facile il fasogramma (ad esempio picchi che si trovano intorno alla fase 0), è possibile aggiungere nella formula della fase un offset fisso. In questo caso riportarlo nella relazione.
- Oltre al fasogramma per tutti i fotoni, costruire i fasogrammi selezionando un intervallo di basse energie (100 MeV – 1 GeV) e alte energie ( $E > 1$  GeV) in maniera analoga all'esempio di Figura 1 destra, riquadro B. E' possibile evidenziare un cambiamento nella struttura del fasogramma alle basse e alte energie?

## 6 - Caratterizzazione della pulsar

- Una volta determinato  $f_0$  e  $f_1$ , determinare le quantità caratteristiche,  $B$ , età caratteristica e luminosità rotazionale ( $dE_{rot}/dt$ ), utilizzando il modello di emissione di dipolo.
- Dove si colloca la pulsar nel diagramma P-Pdot? Per trovare  $P$  e  $Pdot$ , basta ricordare che  $P(t) = 1/f(t)$ , e procedere con le derivate.

- (opzionale) E' possibile costruire un diagramma P-Pdot di tutte le pulsar radio e inserire la pulsar studiata. Per farlo, potete utilizzare il catalogo ATNF (<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>), da cui è possibile selezionare le pulsar e salvare il risultato in un formato Ascii leggibile ad esempio con Pandas. In questo modo è quindi possibile costruire un diagramma P-Pdot delle pulsar radio, inserire le linee di ugual luminosità, campo magnetico ed età caratteristica, e collocare nel diagramma la pulsar studiata.

**Tabella 1: Pulsar a raggi gamma selezionate per l'esperienza**

Nome (PSR)	RA	DEC	f0_start (Hz)	f1_start (Hz/s)	T(MJD)
J0835-4510 (Vela)	08:35:20.603990	-45:10:34.82738	11.1903	-1.55907e-11	54770-54860
J2021+3651 (Dragonfly)	20:21:05.46	36:51:04.80	9.63935	-8.8892E-12	54730-54820
J0633+1746 (Geminga)	6:33:54.289	+17:46:14.38	4.2175	-1.95250e-13	54770-54860
J2229+6114	22:29:05.280000	61:14:09.30000	19.3639	-2.92006E-11	54744-54834
J0007+7303	00:07:00.581909	+73:03:06.96407	3.1658	-3.61323e-12	54922-55012
J0030+0451	00:30:27.430126	04:51:39.786584	205.53069	-4.298590E-16	55200-55290