

Proyectos – Física Computacional IV

Astrofísica con mención en ciencia de datos

Profesor: Omar Fernández Olguín – omar.fernandez.o@usach.cl

Ayudante: Nicolás Campos Agusto – nicolas.campos.a@usach.cl

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Santiago de Chile

14 de enero de 2026

Simulación del Frenado Rotacional de un Púlsar

Un **púlsar**¹ es un laboratorio astrofísico natural para estudiar procesos de pérdida de energía rotacional y evolución dinámica a largo plazo.

El objetivo de este proyecto es modelar numéricamente la **desaceleración rotacional (spin-down)** de un púlsar en presencia de su entorno de plasma magnetosférico, utilizando formulaciones efectivas para capturar la pérdida de momento angular.

Se utilizará como caso de estudio el **Púlsar del Cangrejo (PSR B0531+21)**, uno de los púlsares mejor caracterizados observacionalmente.

Análisis Principal:

1. Modelo físico general

El púlsar se modela como una estrella de neutrones rodeada por una **magnetosfera**² compuesta por **plasma**³.

El sistema se caracteriza por:

- momento de inercia I ,
- radio estelar R ,
- campo magnético dipolar superficial B ,
- frecuencia angular de rotación $\Omega(t)$,
- interacción con el viento de púlsar.

La evolución rotacional se modela mediante un balance efectivo de momento angular:

$$\frac{d\Omega}{dt} = -K\Omega^3 - \gamma\Omega,$$

donde K representa el efecto del frenado magnetodipolar y γ describe la pérdida de momento angular debida al plasma circundante.

2. Índice de frenado

Se define el índice de frenado como:

$$n = \frac{\Omega\ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2},$$

que cuantifica el mecanismo dominante de pérdida de energía rotacional. En este modelo, la presencia de plasma reduce n a valores menores que 3, en acuerdo con observaciones.

3. Parámetros reales: Púlsar del Cangrejo

Valores observacionales:

$$\begin{aligned} P &\approx 0.0335 \text{ s}, \\ \Omega_0 &\approx 187.5 \text{ rad s}^{-1}, \\ \dot{\Omega}_0 &\approx -2.37 \times 10^{-9} \text{ rad s}^{-2}, \\ n_{\text{obs}} &\approx 2.51. \end{aligned}$$

Parámetros estructurales típicos:

$$R = 12 \text{ km}, \quad I = 10^{38} \text{ kg m}^2, \quad B = 3.8 \times 10^{12} \text{ G}.$$

4. Resolución numérica y análisis

Resuelva la ecuación diferencial efectiva mediante **RK4** y **RK45**. Compare estabilidad, precisión y el valor numérico del índice de frenado.

¹Un púlsar es una estrella de neutrones altamente magnetizada y en rápida rotación, que emite radiación electromagnética de forma periódica debido a la desalineación entre su eje de rotación y su eje magnético.

²La magnetosfera es la región del espacio dominada por el campo magnético del púlsar, donde el movimiento de partículas cargadas está fuertemente acoplado a la rotación de la estrella.

³El plasma es un gas ionizado formado por partículas cargadas libres, cuya dinámica está gobernada por campos electromagnéticos.

Referencias:

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar>
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Crab_Pulsar
3. <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat>