



## Proyectos – Física Computacional IV

### Astrofísica con mención en ciencia de datos

Profesor: Omar Fernández Olguín – [omar.fernandez.o@usach.cl](mailto:omar.fernandez.o@usach.cl)

Ayudante: Nicolás Campos Agusto – [nicolas.campos.a@usach.cl](mailto:nicolas.campos.a@usach.cl)

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

14 de enero de 2026

### Movimiento de partículas cargadas en el campo magnético terrestre

El objetivo de este proyecto es modelar y simular numéricamente el movimiento de partículas cargadas en el campo magnético de la Tierra, considerando al planeta como un dipolo magnético ideal<sup>1</sup>.

El trabajo se estructura en dos etapas principales: (i) el cálculo analítico y evaluación punto a punto del campo magnético terrestre, y (ii) la simulación de trayectorias de partículas cargadas bajo la acción de la fuerza de Lorentz<sup>2</sup>.

Se estudiarán distintos regímenes dinámicos, incluyendo precipitación polar, atrapamiento magnético y formación de trayectorias tipo espiral asociadas a los cinturones de Van Allen<sup>3</sup>.

Finalmente, se propone como extensión opcional la incorporación de un campo magnético interplanetario uniforme para estudiar la ruptura de simetría del campo terrestre y su relación con fenómenos como las auroras polares.

### Análisis Principales:

#### 1. Campo magnético terrestre

Modele el campo magnético de la Tierra como el campo generado por un dipolo magnético centrado en el origen, cuyo momento magnético está alineado con el eje  $z$ :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{M}}{r^3} \right]$$

donde:

- $\vec{B}$ : campo magnético (T),
- $\vec{r}$ : vector posición desde el centro de la Tierra,
- $r = |\vec{r}|$ ,
- $\vec{M}$ : momento dipolar magnético terrestre,
- $\mu_0$ : permeabilidad magnética del vacío.

Utilice valores realistas del momento dipolar terrestre y evalúe el campo magnético punto a punto sobre una grilla tridimensional.

#### 2. Ecuaciones de movimiento de partículas cargadas

El movimiento de una partícula cargada en un campo magnético está gobernado por la segunda ley de Newton:

$$m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = q \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r})$$

donde  $m$  y  $q$  corresponden a la masa y carga de la partícula, respectivamente.

Formule el problema como un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden y resuélvalo utilizando métodos numéricos explícitos como `RK4` o integradores adaptativos como `RK45` o `DOP853` del módulo `scipy.integrate`.

#### 3. Escenarios físicos a simular

Simule y analice al menos los siguientes escenarios:

- **Precipitación polar:** partículas con velocidad casi paralela a las líneas de campo que alcanzan regiones cercanas a los polos terrestres.
- **Atrapamiento magnético:** partículas con ángulos de pitch suficientemente grandes que rebotan debido al efecto espejo magnético.

<sup>1</sup>Un dipolo magnético es una aproximación válida del campo terrestre lejos de la superficie, ampliamente utilizada en física espacial y magnetoáfrica.

<sup>2</sup>La fuerza de Lorentz describe la interacción entre partículas cargadas y campos electromagnéticos.

<sup>3</sup>Los cinturones de Van Allen son regiones de partículas cargadas atrapadas por el campo magnético terrestre.

- **Trayectorias helicoidales:** movimiento combinado de giro ciclotrón y desplazamiento a lo largo de las líneas de campo.

Analice el rol del ángulo de pitch inicial y su relación con el cono de pérdida.

#### 4. Visualización y análisis

- Grafique las líneas de campo magnético terrestre.
- Superponga las trayectorias de las partículas cargadas.
- Visualice trayectorias en 2D y 3D.
- Analice la conservación de la energía.

#### 5. Extensión opcional: campo magnético combinado

Como desafío adicional, incorpore un campo magnético interplanetario uniforme  $\vec{B}_{\text{IMF}}$ , y estudie el campo total:

$$\boxed{\vec{B}_{\text{total}}(\vec{r}) = \vec{B}_{\text{dipolo}}(\vec{r}) + \vec{B}_{\text{IMF}}}$$

Visualice la pérdida de simetría del campo magnético terrestre y simule nuevamente la trayectoria de algunas partículas cargadas.

#### 6. Discusión numérica

Evalué la estabilidad de los integradores utilizados, comparando esquemas de paso fijo y adaptativo. Discuta las limitaciones físicas del modelo (ausencia de colisiones, relatividad, corrientes inducidas, etc.).

#### Referencias:

1. [https://es.wikipedia.org/wiki/Campo\\_magn%C3%A9tico\\_terrestre](https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico_terrestre)
2. [https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza\\_de\\_Lorentz](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz)
3. [https://es.wikipedia.org/wiki/Cinturones\\_de\\_Van\\_Allen](https://es.wikipedia.org/wiki/Cinturones_de_Van_Allen)