



Proyectos – Física Computacional IV

Astrofísica con mención en ciencia de datos

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

Ayudante: Nicolás Campos Augusto – 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 ideal¹.

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 Lorentz².

Se estudiarán distintos regímenes dinámicos, incluyendo precipitación polar, atrapamiento magnético y formación de trayectorias tipo espiral asociadas a los cinturones de Van Allen³.

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,
- μ_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.

¹Un dipolo magnético es una aproximación válida del campo terrestre lejos de la superficie, ampliamente utilizada en física espacial y magnetosférica.

²La fuerza de Lorentz describe la interacción entre partículas cargadas y campos electromagnéticos.

³Los 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}_{IMF} , y estudie el campo total:

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

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

6. **Discusión numérica**

Evalúe 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
2. https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz
3. https://es.wikipedia.org/wiki/Cinturones_de_Van_Allen