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 Descubrimiento de Neptuno mediante Optimización de Perturbaciones Orbitales

El objetivo de este trabajo es reproducir, mediante simulaciones computacionales, el razonamiento físico que condujo al descubrimiento del planeta Neptuno, a partir de las desviaciones observadas en la órbita de Urano respecto a las predicciones del modelo newtoniano de dos cuerpos (Sol–Urano).

El sistema será modelado como un problema gravitacional de **N-cuerpos**, considerando el Sol, Urano y un planeta perturbador hipotético. Se utilizará la aproximación de órbita circular para el planeta desconocido, lo que permite fijar su velocidad inicial y reducir el número de parámetros a optimizar. A partir de datos orbitales sintéticos o históricos, se evaluará si las anomalías en la órbita de Urano pueden explicarse mediante la introducción de un planeta perturbador con parámetros físicos plausibles.

Se hará énfasis en la *optimización de parámetros* para automatizar la búsqueda de la masa y posición inicial del planeta perturbador que minimicen la discrepancia entre las trayectorias simuladas y los datos de referencia, evitando el método de prueba y error manual.

Análisis Principales:

1. **Modelo gravitacional de N-cuerpos**

   Considere un sistema compuesto por el Sol, Urano y un planeta perturbador hipotético. Las ecuaciones de movimiento para cada cuerpo están dadas por la ley de gravitación universal:

   $$\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2} = -G\sum_{j\neq i} m_j \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3},$$

   donde $\vec{r}_i$ y m_i representan la posición y masa del cuerpo i, respectivamente. Resuelva este sistema de ecuaciones acopladas utilizando el algoritmo de Verlet.

2. **Datos orbitales de referencia**

   Se dispondrá de los datos orbitales de Urano en ausencia de perturbaciones externas, obtenidos mediante un modelo de dos cuerpos (Sol–Urano) o datos históricos. Estos datos servirán como referencia para cuantificar las desviaciones inducidas por el planeta perturbador.

3. **Planeta perturbador**

   Se introduce un tercer cuerpo (planeta perturbador) y se asume órbita circular para simplificar el problema. Esto permite *fijar la velocidad inicial* del planeta según su semieje mayor a_p:

   $$v_0 = \sqrt{\frac{GM_\odot}{a_p}}.$$

   Los parámetros a optimizar serán entonces:

   - Masa del planeta perturbador M_p,
   - Posición inicial angular ϕ_0 (fase orbital).

   Esta simplificación reduce el espacio de búsqueda y hace el problema más didáctico.

4. **Función de error**

   Para cuantificar la discrepancia entre la órbita simulada de Urano ($\vec{r}_{\rm sim}(t_i)$) y los datos de referencia ($\vec{r}_{\rm ref}(t_i)$), se define la función de error a minimizar:

   $$E(M_p, \phi_0) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \|\vec{r}_{\rm sim}(t_i; M_p, \phi_0) - \vec{r}_{\rm ref}(t_i)\|^2}.$$

5. **Optimización de parámetros**

   Se emplearán métodos de optimización automática para encontrar los valores de M_p y ϕ_0 que minimicen $E(M_p, \phi_0)$. Ejemplos de algoritmos apropiados en Python incluyen:

- `scipy.optimize.minimize` (métodos como Nelder-Mead),
- `scipy.optimize.differential_evolution` para búsqueda global.

Este enfoque evita la exploración manual por grilla y permite una estimación reproducible de los parámetros del planeta perturbador.

6. **Visualización**

   Se recomienda generar gráficos para:

   - Comparar la órbita de Urano con y sin la influencia del planeta perturbador.
   - Mostrar la trayectoria del planeta perturbador.
   - Visualizar el comportamiento de la función de error en función de los parámetros optimizados.