

# Dinámica de Sistemas Planetarios

Tabaré Gallardo

Departamento de Astronomía, Instituto de Física, Facultad de Ciencias  
Universidad de la República, Uruguay



París, Mayo 1968

Seminarios de Física, Mayo 2018





Vicino, Cernuschi, Sans y Codina.

- FHyC: cátedra de Astronomía desde 1950
- 1973 - 1985: dark ages
- 1986: Sistema Solar, cometas, asteroides, formación planetaria
- presente: Ciencias Planetarias
- publicaciones: NASA-ADS ([adsabs.harvard.edu](http://adsabs.harvard.edu))



Prof. Fernández's 1980 paper *On the Existence of a Comet Belt Beyond Neptune* **inspired the search for and discovery of the Kuiper Belt**. In the same year he published another seminal paper showing that **Oort cloud comets should come from the Neptune-Uranus region**. His third seminal contribution **introduced the fundamental concept behind the present formation models involving migrations of the planets in the early solar system**.

Júpiter desde la sonda Juno.



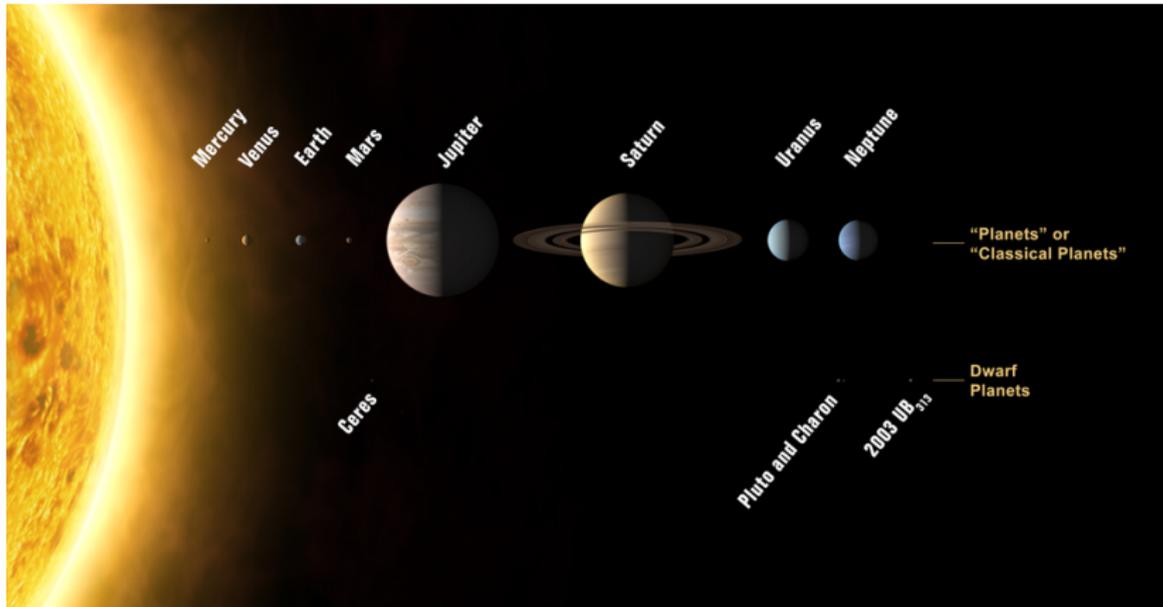
- Dinámica de planetas, satélites, cuerpos menores...
- Procesos físicos en superficies
- Atmósferas, superficies, interiores
- Formación y evolución
- Astrobiología

- **gravedad:** Newtoniana y relativista debidas al Sol, planetas, satélites, asteroides...
- **radiación solar:**
  - presión de radiación ( $\mu m$ )
  - frenado Poynting-Robertson ( $cm$ )
  - efecto Yarkovsky ( $m - km$ )
  - sublimación de gases ( $km$ )
- **interacción con el medio:** viento solar y frenado gaseoso
- **campos magnéticos:** fuerzas de Lorentz
- colisiones

$$\text{Fuerza total} = \text{Sol} + \text{perturbaciones}$$

# Gravedad en el Sistema Solar

Los planetas se perturban entre sí y a los cuerpos menores.

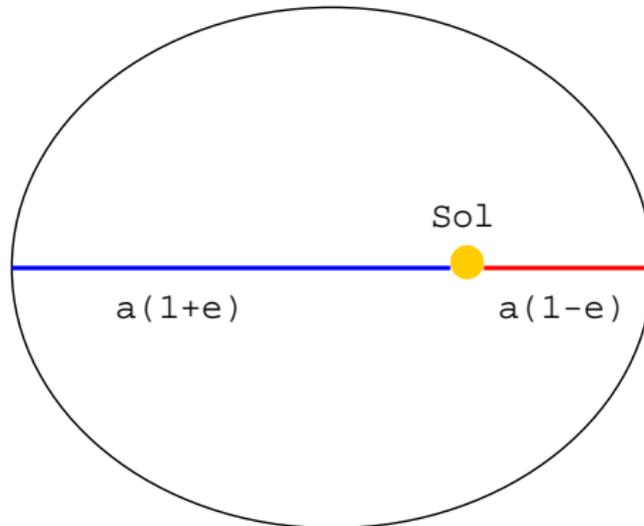


Newton: la intervención divina estaría evitando el desequilibrio orbital.

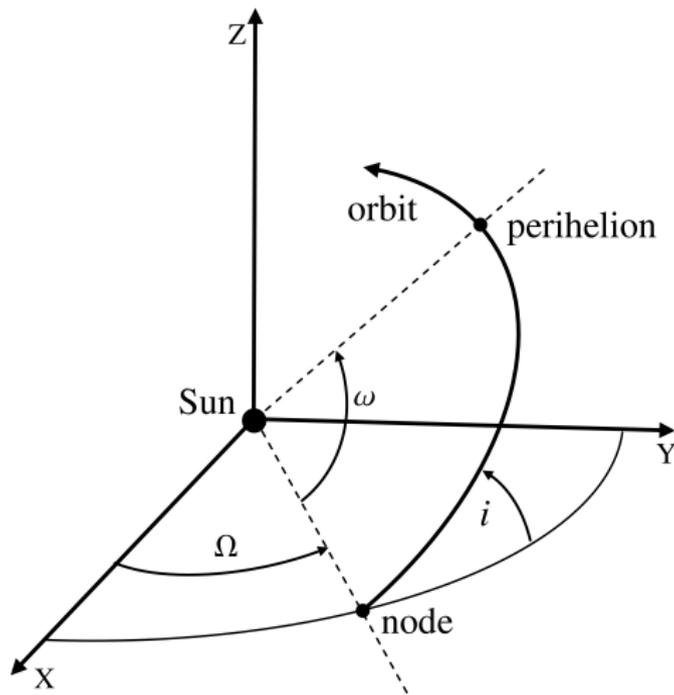
$$\vec{r}(t), \dot{\vec{r}}(t) \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$$

afelio:  $Q = a(1 + e)$

perihelio:  $q = a(1 - e)$



# Elementos orbitales: orientación



Ecuación de movimiento:

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{GM_{\odot}}{r^2}\hat{r} + \nabla R$$

Solución:

$$\vec{r}(t)$$

$$\vec{r}(t), \dot{\vec{r}}(t) \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$$

- Si  $\nabla R = 0 \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$  son constantes.
- Si  $\nabla R \neq 0 \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$  varían con el tiempo.

Caminos posibles para estudiar **la dinámica**:

- **Resolución numérica** de las ecuaciones exactas.
- Estudio de un **modelo analítico** aproximado.

La Mecánica Celeste se desarrolló cuando la primera opción era inconcebible.

# Teoría Secular de Lagrange-Laplace

100 años después de la Ley de Gravitación Universal



Euler



Laplace



Lagrange

Los  $a$  son constantes  
 $e, i$  presentan pequeñas oscilaciones



**el Sistema Solar es estable**

Un **integrador numérico** incluye:

- **MODELO** físico: Ley de Gravitación Universal + perturbaciones
- plasmado en un sistema de **ECUACIONES** diferenciales para cada cuerpo
- resueltas mediante un **ALGORITMO** optimizado

Un ejemplo muy crudo sería:

$$\vec{r}_{i+1} = \vec{r}_i + \vec{v}_i \cdot \Delta t$$

$$\vec{v}_{i+1} = \vec{v}_i + \vec{\alpha}_i \cdot \Delta t$$

pero en dinámica orbital:

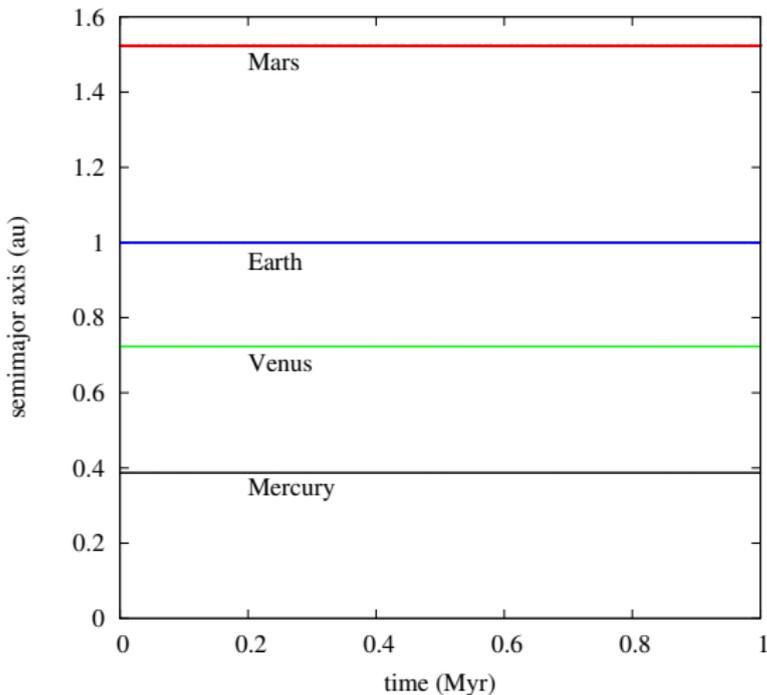
$$\vec{\alpha} = \vec{\alpha}_{Sol} + \vec{\alpha}_p$$

siendo

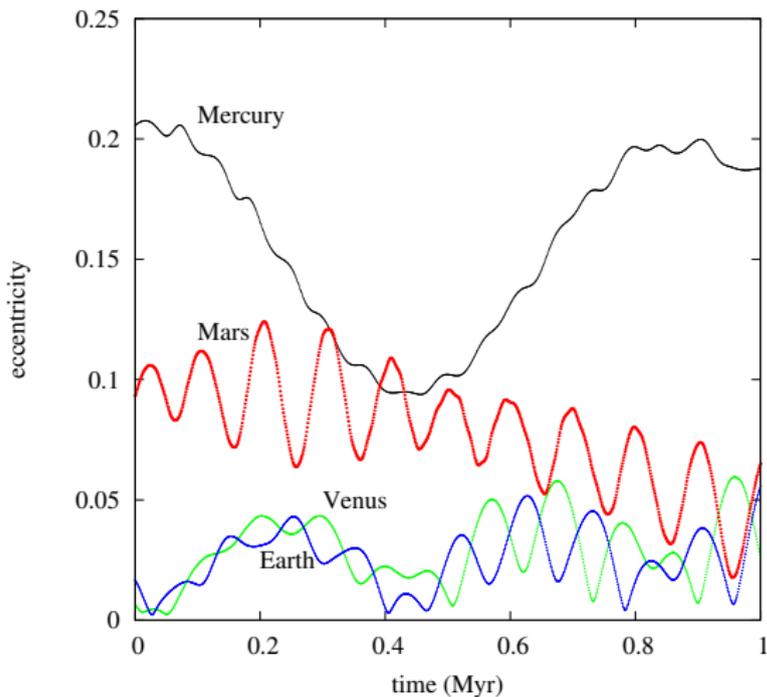
$$\vec{\alpha}_p \sim \vec{\alpha}_{Sol}/1000$$

- $\vec{\alpha}_{Sol}$  genera ecuaciones con solución conocida
- sólo es necesario integrar numéricamente  $\vec{\alpha}_p$
- el paso de integración  $\Delta t$  puede ser  $\sim 1000$  veces mayor

Solución numérica de las ecuaciones exactas de movimiento:



# Sistema Solar: excentricidades



# Integradores orbitales: EVORB

## Integrador EVORB

(version 15, Julio de 2009)

Integracion orbital numerica de sistema de  $M$  particulas sin masa en el campo gravitacional de  $N$  planetas masivos y una estrella central.

### VIRTUDES

- Es un integrador orbital muy simple de manejar y no por ello menos preciso: se requiere un unico archivo de entrada: "datos.dat"
- Esta pensado para quien desea iniciarse en la experimentacion de evolucion orbital en sistemas planetarios.
- El programa maneja muy bien los encuentros de las particulas (sin masa, por ejemplo asteroides y cometas) con los planetas (masivos).
- Considera efectos relativistas (opcional)
- Integra hacia el futuro o hacia el pasado
- Sistema Operativo: Este programa viene en 2 sabores, Windows o Linux/Ubuntu,
- Instalación: No necesita instalacion, simplemente descomprima evorb15.zip (para windows), o evorb15ubuntu.zip (para ubuntu), o 64bitslin

### LIMITACIONES

- Maximo de objetos que integra: 500 (modificable).
- No integra un sistema estelar binario
- No integra orbitas hiperbolicas, al detectarse una orbita (heliocentrica) hiperbolica el objeto es eliminado.
- No puede haber encuentros proximos entre objetos masivos (planetas) pues el programa pierde precision.
- No considera achatamiento de estrella central (queda para futuras ediciones).

[www.fisica.edu.uy/~gallardo/evorb.html](http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/evorb.html)



FACULTAD DE  
CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DEL URUGUAY

## solevorb

### SOLEVORB

- Programa SOLEVORB
- Detalles de funcionamiento
- Análisis de resultados
- Proyecto Halley
- Recursos
- Descarga
- Presentación de SOLEVORB en APFU 2012

#### Proyectos sugeridos

- Proyecto Halley
- Proyecto PHA
- Sistema Planetario
- La barrera de Júpiter
- Extrasolares
- Origen de meteoritos
- Encuentro con Apophis
- Cometa Lovejoy
- Para estudiantes de FCien

## Programa SOLEVORB

Evolución Orbital en el Sistema Solar  
[Tabaré Gallardo](#) ([Facultad de Ciencias](#), [UdelaR](#), [PEDECIBA](#))

Nuestro Sistema Solar está compuesto por el Sol, 8 planetas, algunos "planeta-enanos" y una gran cantidad de "cuerpos menores" (asteroides, cometas, centauros, transneptunianos). Todos describen una órbita en torno del Sol, la cual está descrita por 6 elementos orbitales: a, e, i, longitud del nodo, argumento del perihelio y anomalía media en cierto instante. Los cuerpos mas masivos (planetas) se perturban mutuamente y a los demas generando variaciones en esos elementos orbitales. ¿Alguna vez se preguntó Ud. cómo será la evolución en el tiempo de la órbita de la Tierra? ¿o del cometa Halley? ¿o del planeta-enano Sedna? ¿o del asteroide Apophis, que algún día terminará impactando a la Tierra?

SOLEVORB es un sencillo (y sin embargo muy preciso) programa que le permitirá explorar la evolución orbital hacia el pasado y hacia el futuro de los cuerpos del Sistema Solar en escalas desde miles de años hasta miles de millones de años. Es una variante sencilla del [EVORB](#), de Brunini y Gallardo. Fue diseñado pensando en estudiantes con afinidad científica interesados en realizar un proyecto de iniciación a la investigación.

Este no es un programa de efemérides para determinar las coordenadas de un determinado objeto sino un programa de análisis de origen y evolución dinámica de los objetos. Las efemérides se calculan en intervalos de días, meses o años, en cambio la evolución dinámica ocurre en miles de años y más.

sites.google.com/site/solevorb

## ORBE orbital integrator

Version 2, August 2016.

Numerical integration of an arbitrary planetary system composed by a central star and up to 100 planets and minor bodies.  
For educational purposes only.

### CHARACTERISTICS

- Designed to be used in the classroom to explore the long term orbital dynamics of planetary systems and minor bodies.
- Very simple usage. One plain text file with the initial conditions and one plain text output file with the results of the simulation.
- Integrates forward or backward in time.
- [Code available in Fortran](#). Compilations for Windows and Linux.
- Installation: does not need installation. Just download ORBE for [windows](#) or [linux](#), decompress and put the files in a folder.

### RESTRICTIONS

- Maximum number of objects = 100. Can be changed manipulating the code.
- Not precise for objects that are experiencing close encounters.

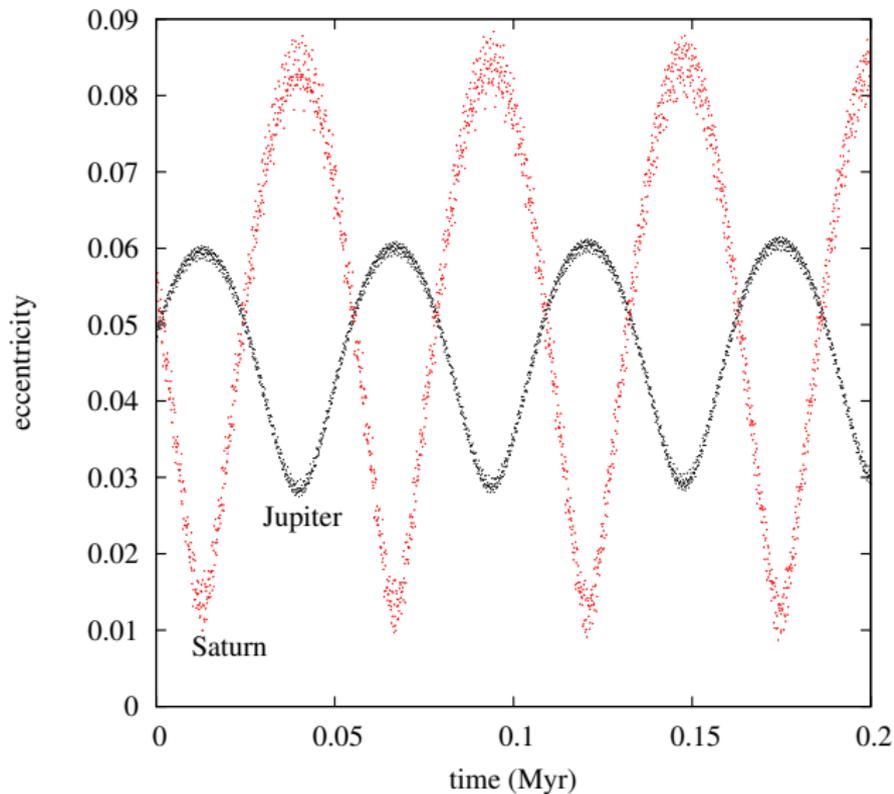
`www.astronomia.edu.uy/orbe`

# J-S-U-N por 5 millones de años

# Experimentos numéricos

Alterando un poco la órbita de Urano:

# Sistema Solar: acople entre Júpiter y Saturno



# Conservación del momento angular $\vec{L}_{JS}$

Momento angular orbital  $\vec{L}$ :

$$\vec{L} \simeq m\sqrt{a(1-e^2)}(0, 0, 1)$$

Momento angular del sistema Júpiter-Saturno

$$\Rightarrow L_{JS} \simeq m_J\sqrt{a_J(1-e_J^2)} + m_S\sqrt{a_S(1-e_S^2)} \simeq \text{constante}$$

$$\Rightarrow \Delta e_S \propto -\Delta e_J$$

# ... y si ponemos a Saturno retrógrado...

Experimento:

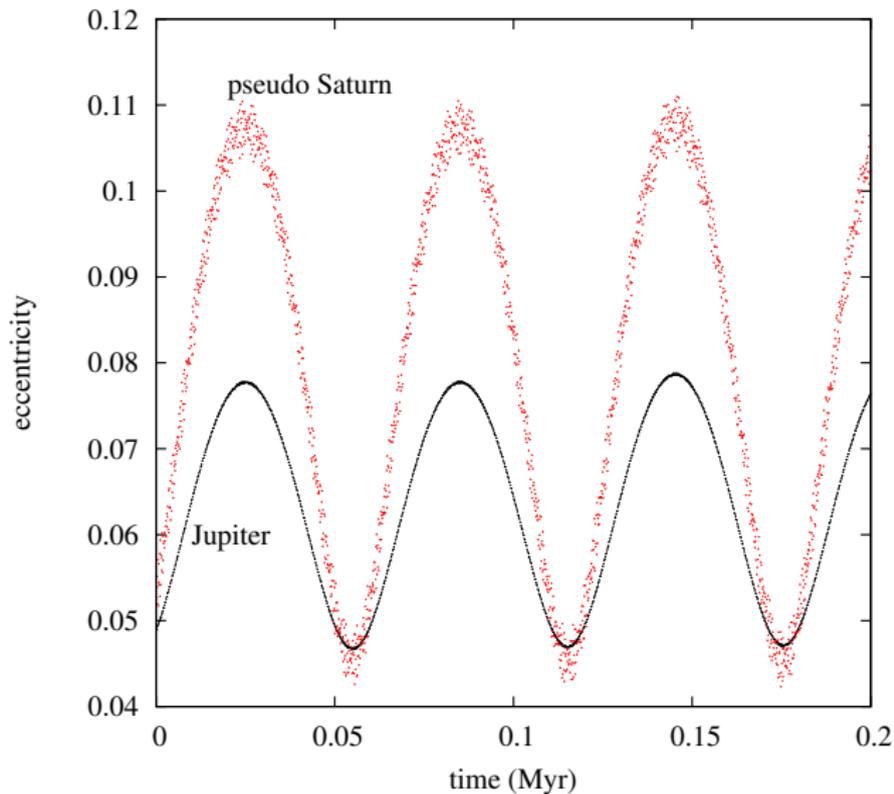
si  $i_S \simeq 180^\circ$  entonces

$$\vec{L}_S \simeq m\sqrt{a(1-e^2)}(0, 0, -1)$$

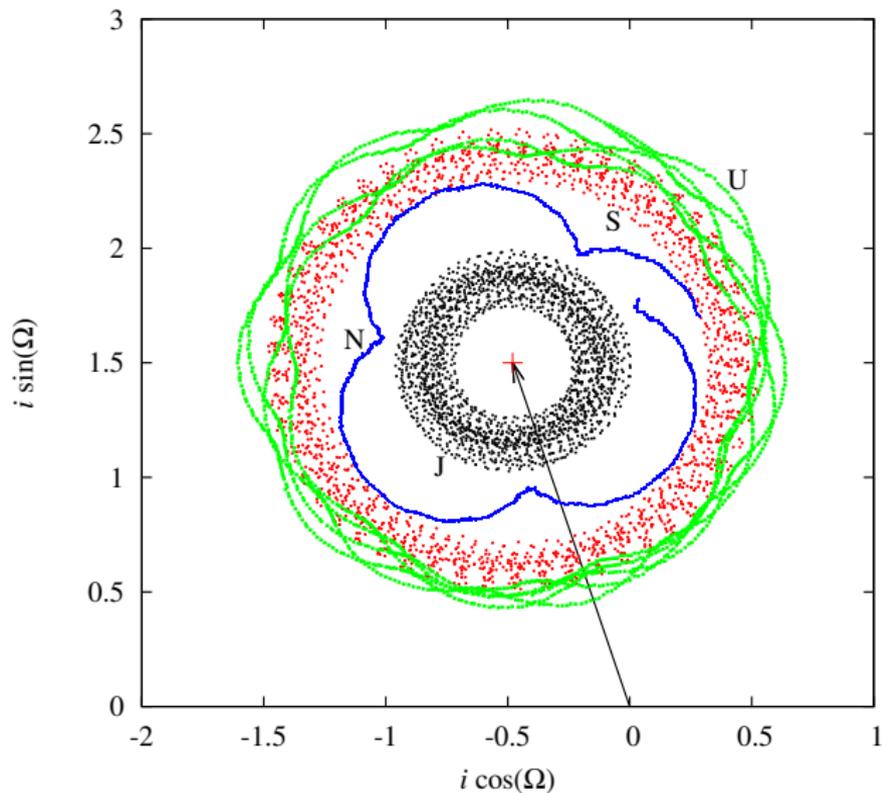
$$\Rightarrow L_{JS} \simeq m_J\sqrt{a_J(1-e_J^2)} - m_S\sqrt{a_S(1-e_S^2)} \simeq \text{constante}$$

$$\Rightarrow \Delta e_S \propto +\Delta e_J$$

# Resultado numérico con Saturno retrógrado

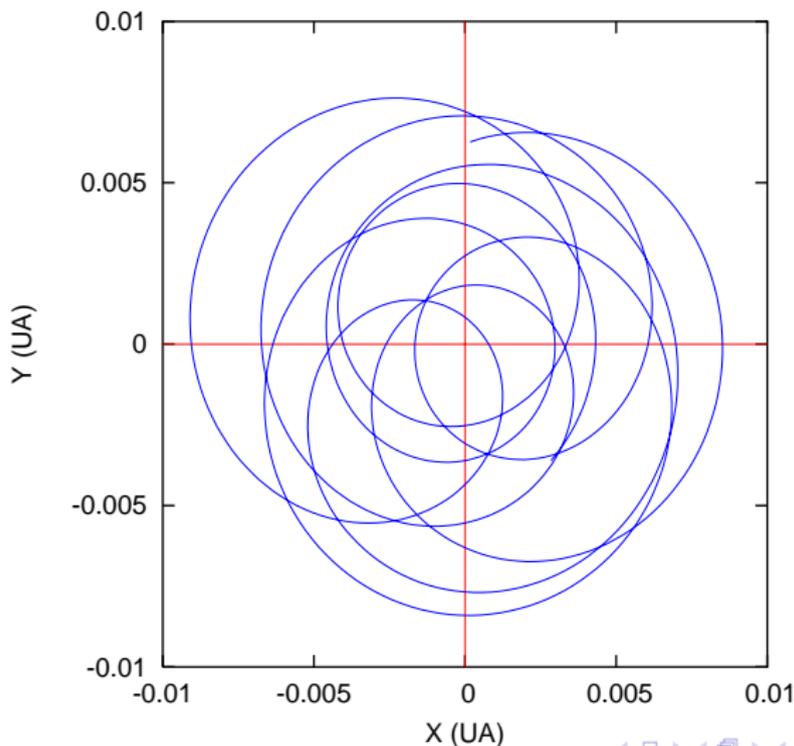


# Momento angular del sistema



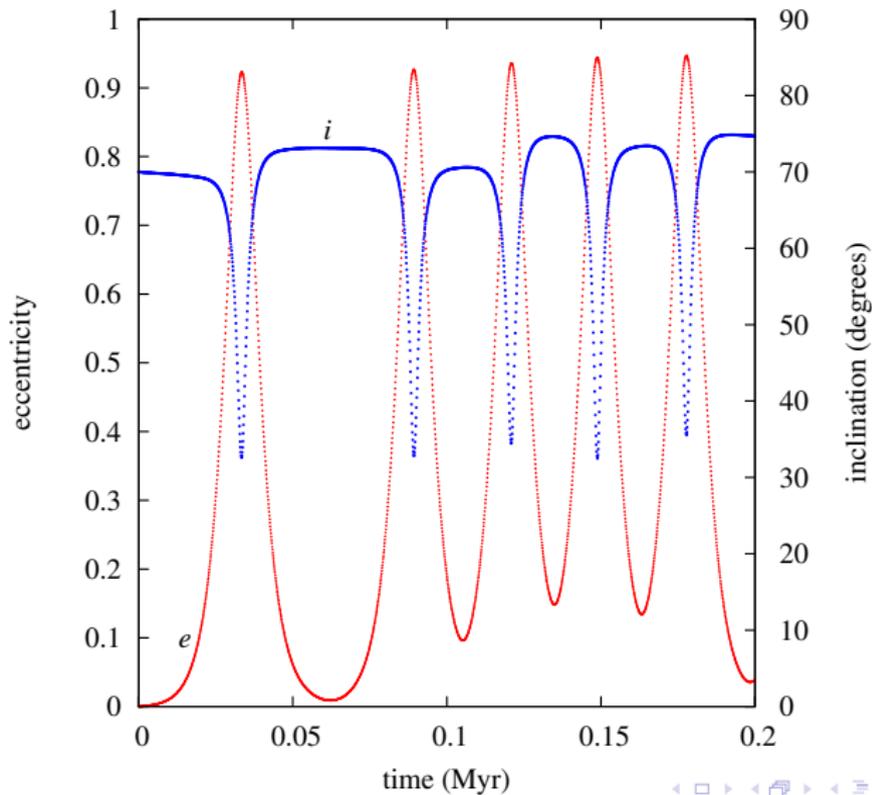
# Movimiento del Sol

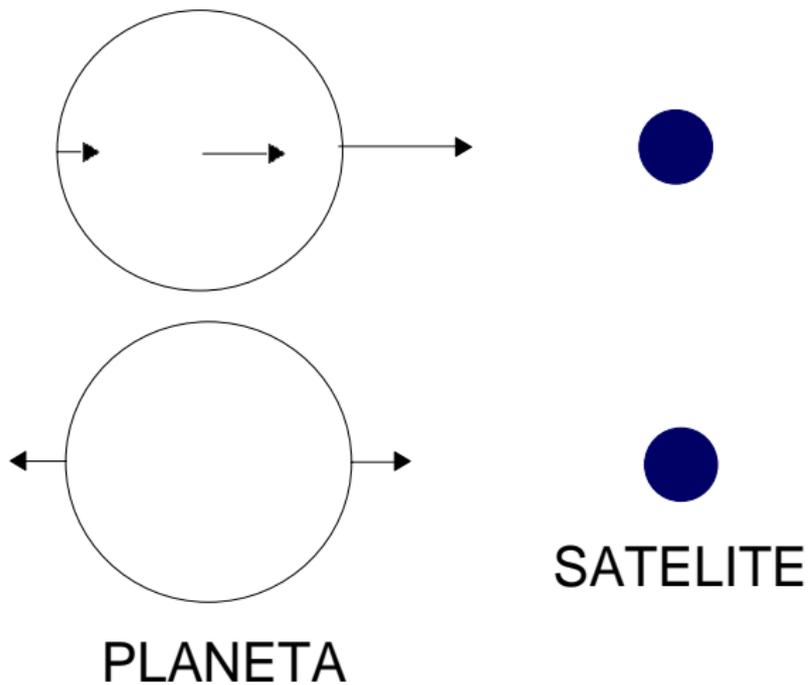
Movimiento del Sol en 100 años respecto al baricentro del sistema, que delata la existencia de planetas.



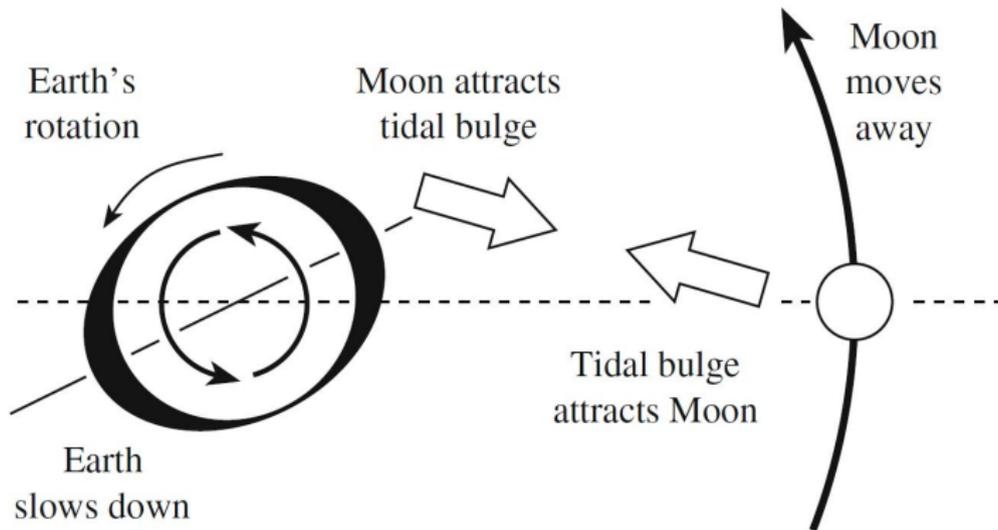
Los perihelios oscilan mutuamente.

Orbita inicial circular con  $i = 70^\circ$





# Transferencia de momento angular



La Tierra frena su rotación y la Luna se aleja.  
La Luna se frenó hace miles de millones de años.

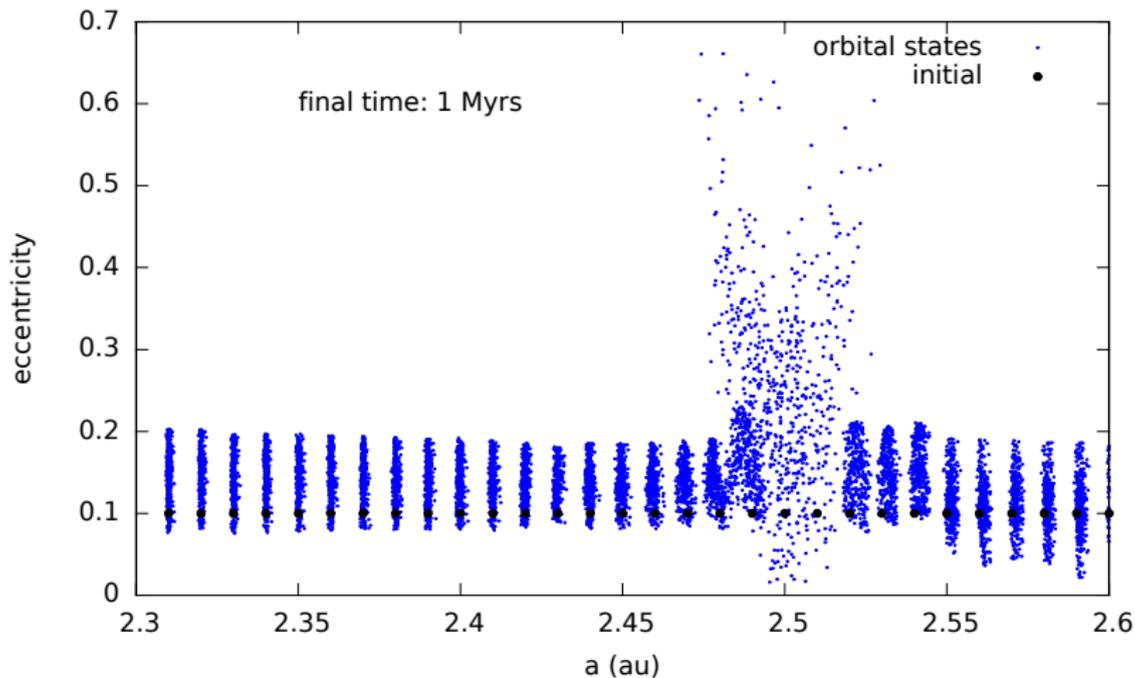
# Mareas: resonancia spin-órbita

- Rotación sincrónica de satélites principales
- Mercurio: día = 2 años
- Hot Júpiteres sincrónicos

Son configuraciones de equilibrio generadas por transferencia de momento angular debido a mareas.

# Resonancia orbital

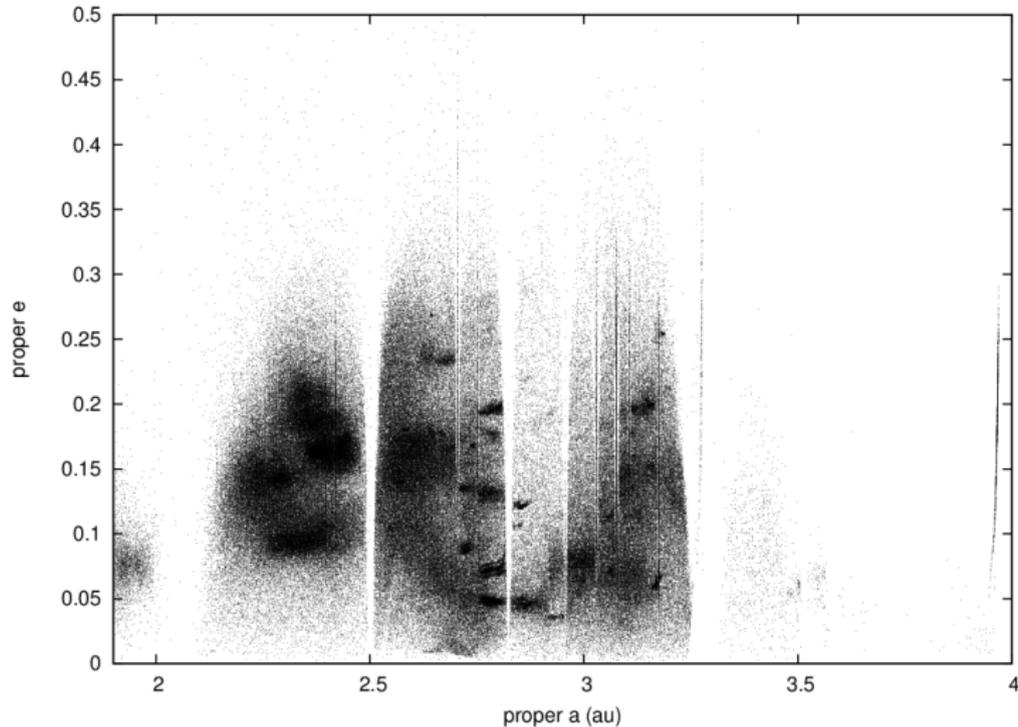
$$P_{aster} = P_{Jupiter}/3$$



gran inestabilidad en  $a \simeq 2,5$  ua

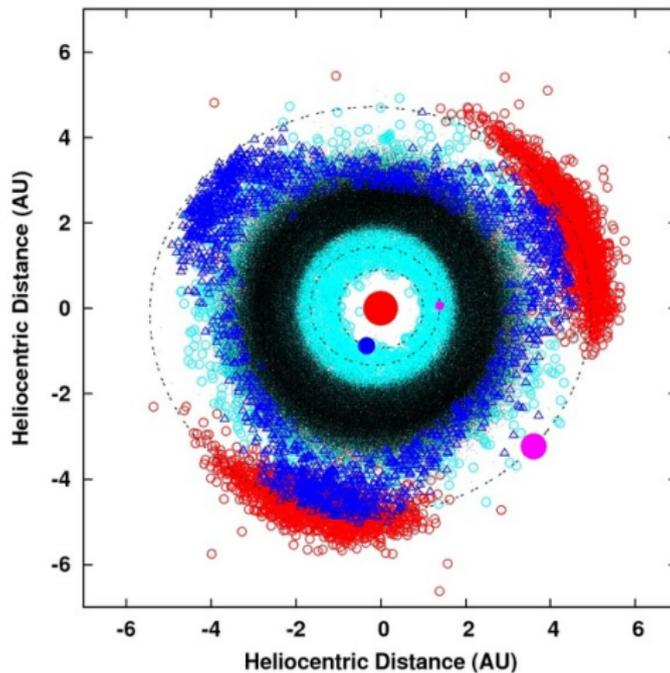


## Resonancias y familias colisionales



# Hildas (3:2) y Troyanos (1:1)

Resonancias estables.



# Caos en el problema de tres cuerpos

Un siglo después de Lagrange-Laplace (modelo determinista)  
Poincaré descubre el caos (predicción imposible).

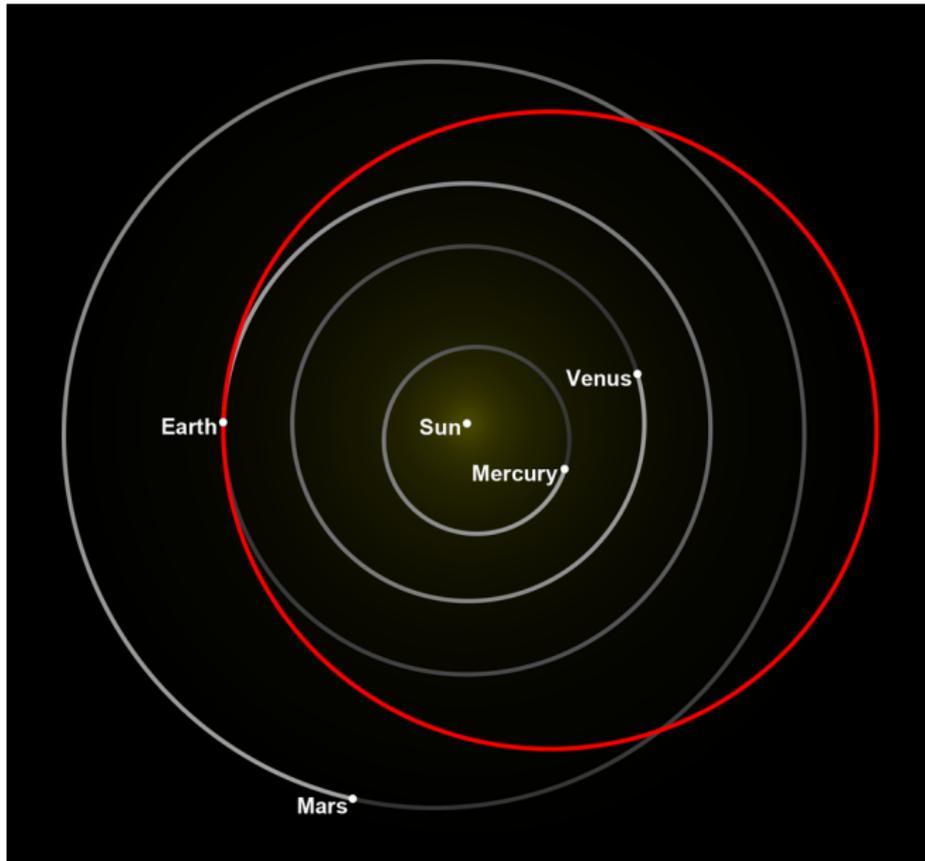


No existen soluciones analíticas.

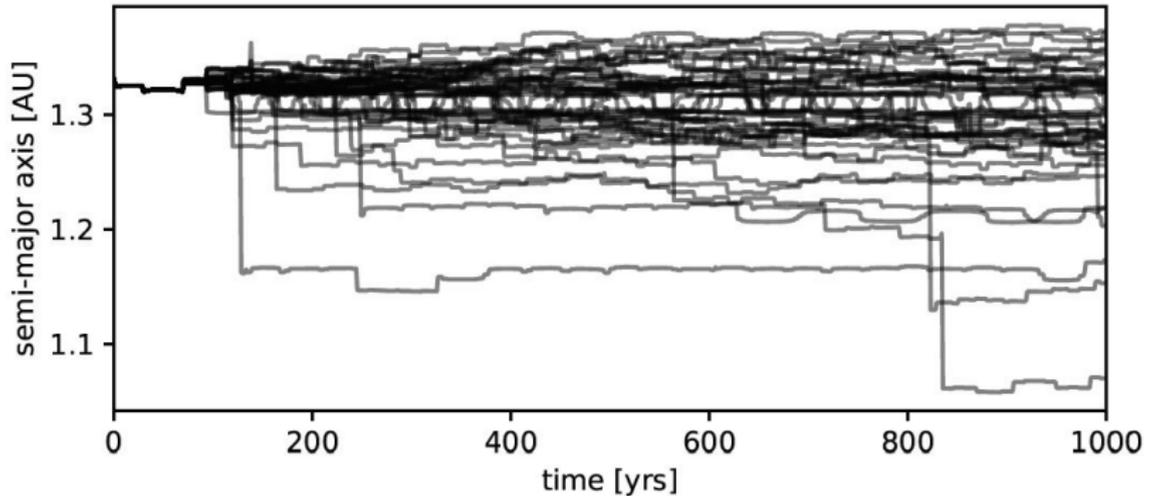
# El auto Tesla Roadster, un ejemplo extremo



# Orbita: un auto condensado a chocar

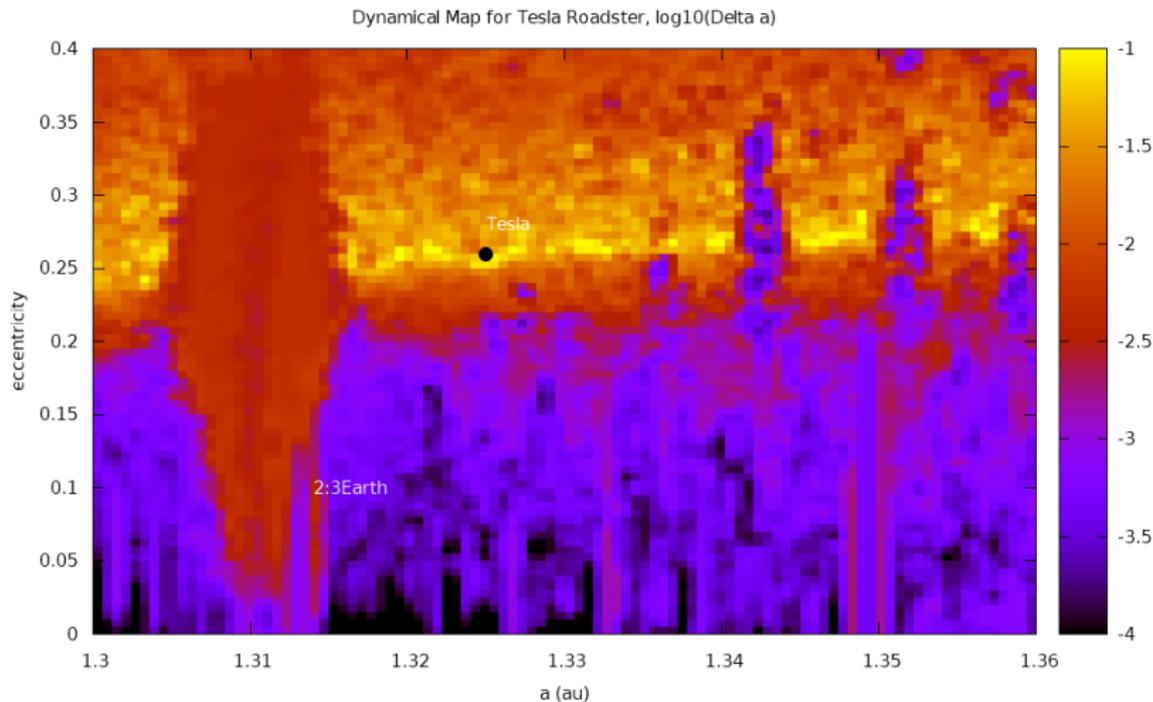


evolución de 48 clones



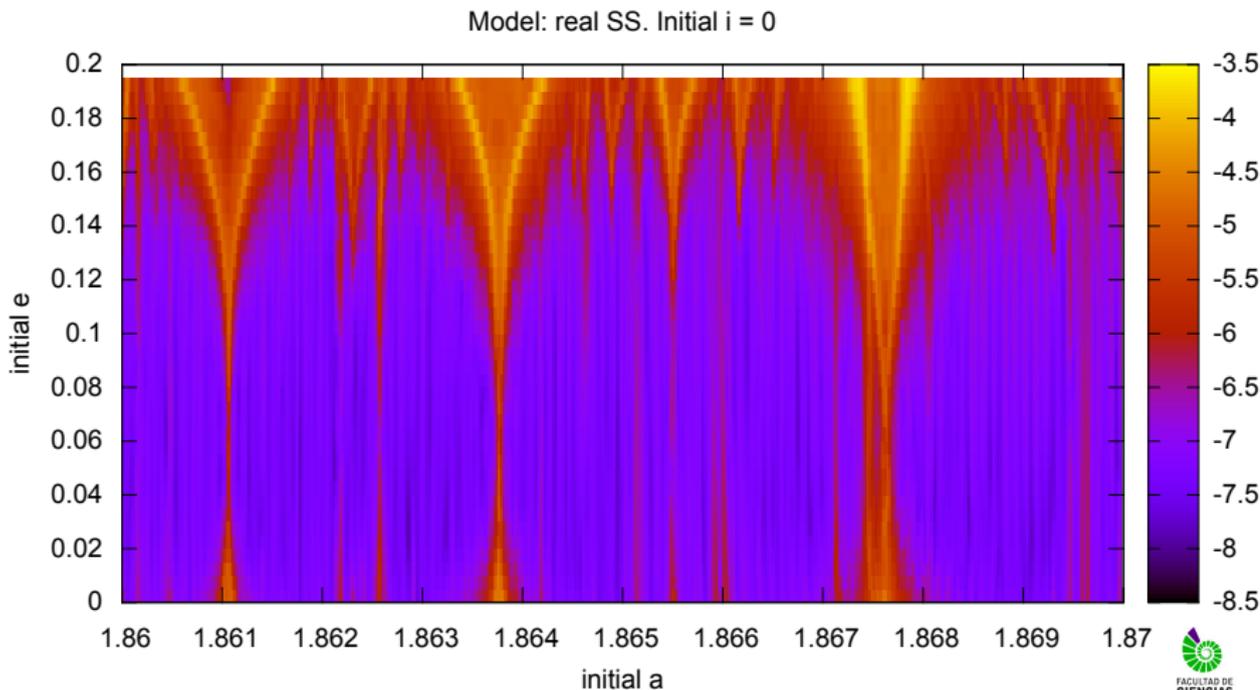
Rein et al. 2018

# Mapa dinámico para el auto de Elon

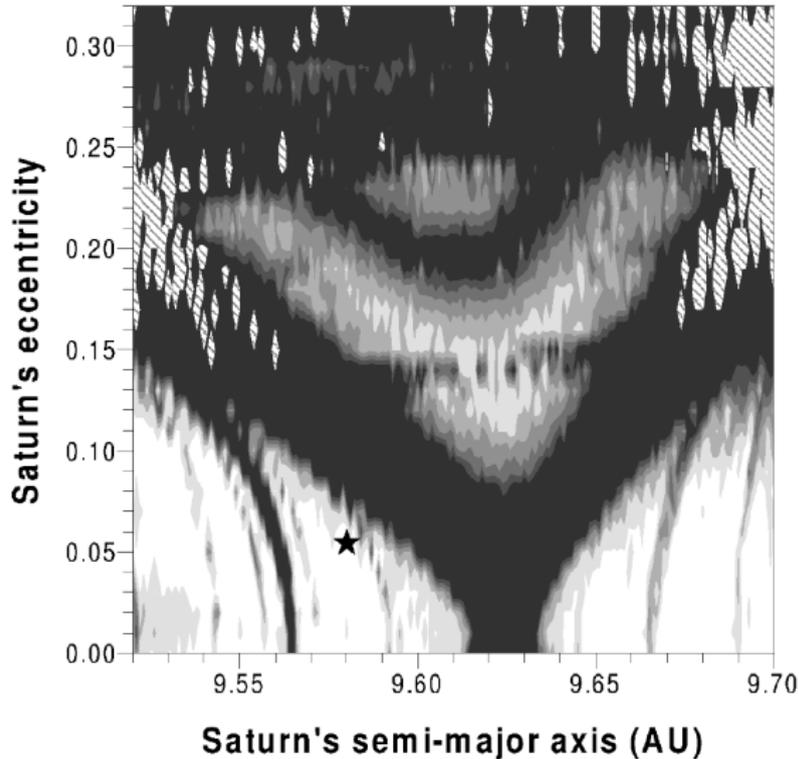


# Mapa dinámico entre Marte y Júpiter

Estructura resonante:

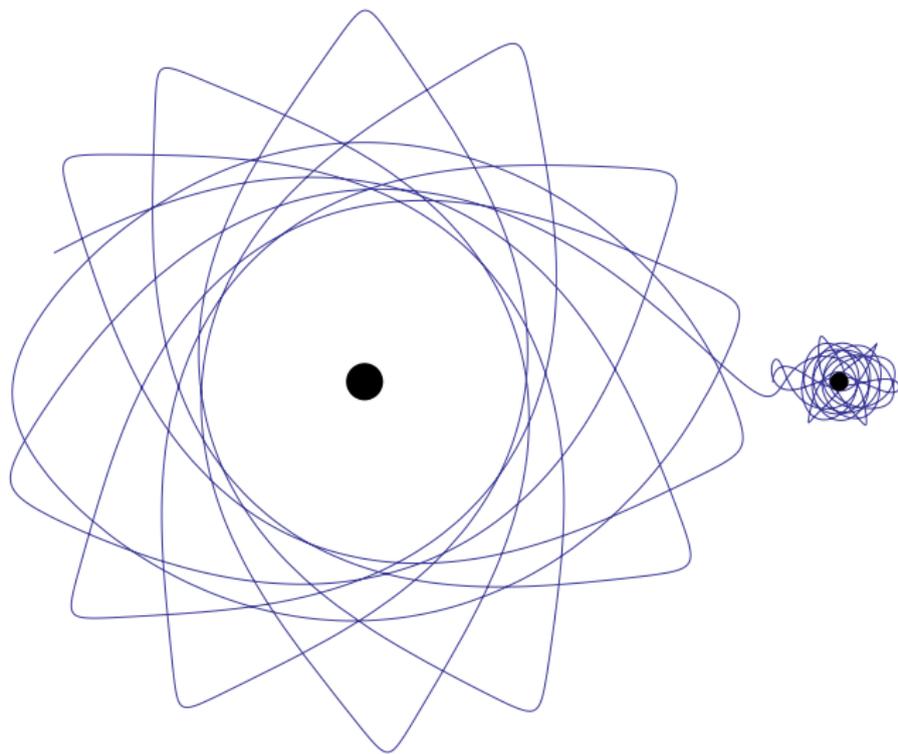


# Planetas próximos a inestabilidades



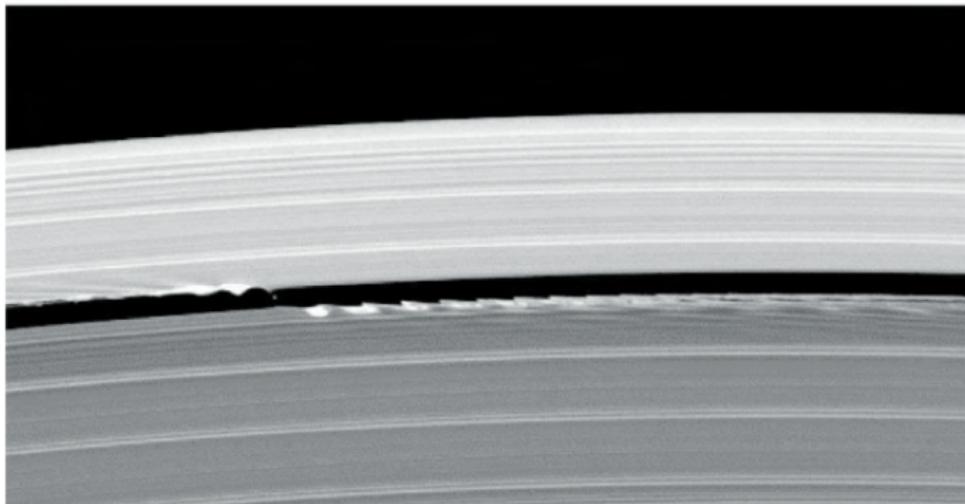
Michtchenko y Ferraz-Mello 2001

# Captura de satélites



# Efectos gravitacionales en anillos

Janus/Epimetheus 7:6 ————  
Pandora 19:18 ————  
Prometheus 35:34 ————  
  
Prometheus 34:33 ————  
  
Prometheus 33:32 ————  
  
**Keeler Gap**  
Prometheus 32:31 ————  
Pandora 18:17 ————  
  
Prometheus 31:30 ————  
  
Prometheus 30:29 ————





Rodaje de 2001: *Odisea del Espacio*

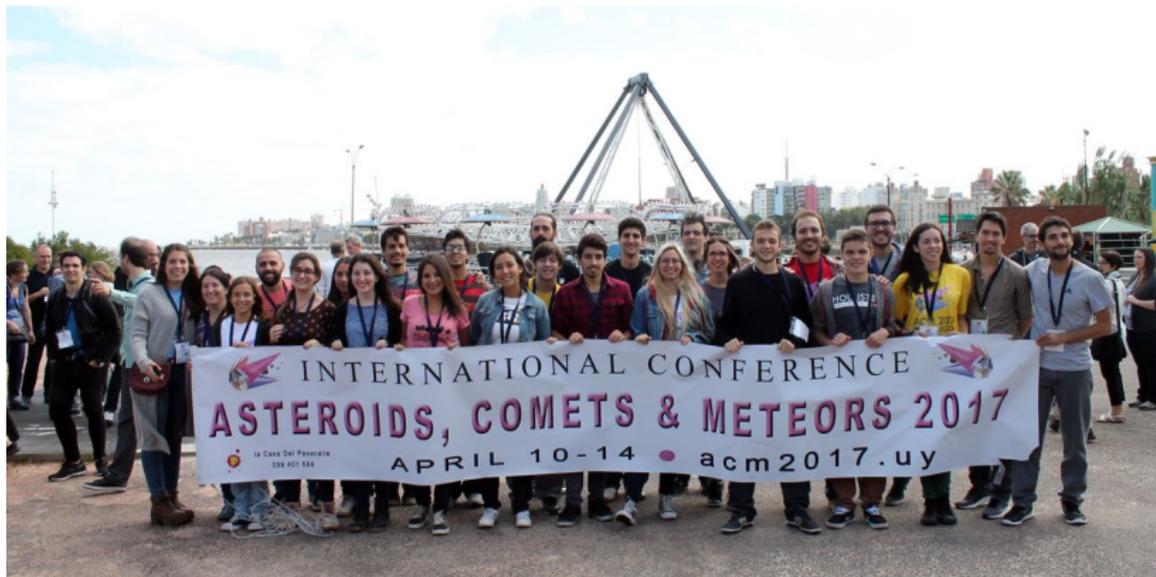
- Métodos analíticos y numéricos
- Evolución secular
- Efectos de mareas
- Resonancias
- Colisiones
- Caos
- Captura de satélites
- Anillos
- Migración orbital

- Libro: *Fundamental Planetary Science*, Lissauer y de Pater.
- Artículo: *Exploring the orbital evolution of planetary systems*, Gallardo 2017.
- Integradores: SOLEVORB, ORBE.
- Imágenes y videos: [photojournal.jpl.nasa.gov](http://photojournal.jpl.nasa.gov).
- Simulaciones en youtube aquí.

*Dudar de todo o creerlo todo son dos opciones igualmente cómodas, pues tanto una como otra nos eximen de reflexionar. **Henri Poincaré.***



# Merci!



Equipo de colaboradores del ACM2017.