

Dinámica de Sistemas Planetarios y Cuerpos Menores

Tabaré Gallardo

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

Reunión Internacional de Astronomía, UNAC
Noviembre 2021



Vicino, Cernuschi, Sans y Codina.

- FHyC: cátedra de Astronomía desde 1950
- 1973 - 1985: dark ages
- 1986: Sistema Solar, cometas, asteroides, formación planetaria
- Hoy: Ciencias Planetarias, Astronomia Galactica, Astrofisica Estelar



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.



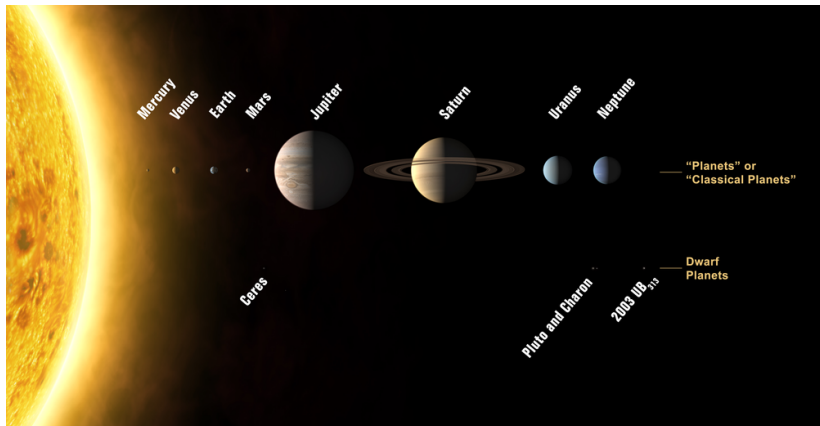
- Dinámica de planetas, satélites, cuerpos menores...
- Procesos físicos en superficies
- Atmósferas, superficies, interiores
- Formación y evolución, discos
- Astrobiología

- **gravedad:** Newtoniana y relativista debidas al Sol, planetas, satélites, asteroides...
- **radiación solar:**
 - presión de radiación (μm)
 - 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.



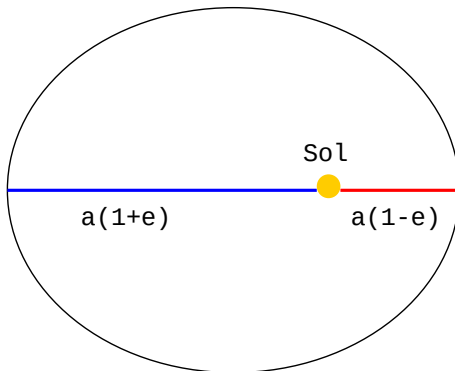
Newton: la intervención divina estaría evitando el desequilibrio orbital.

Elementos orbitales: forma

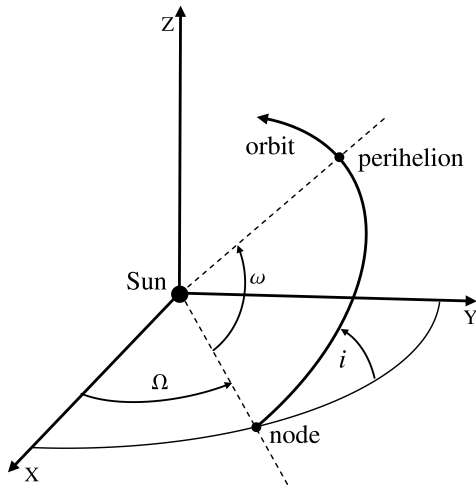
$$\vec{r}(t), \dot{\vec{r}}(t) \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$$

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

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



Elementos orbitales: orientación



Ecuación de movimiento:

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

Solución:

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

- Si $\vec{P} = 0 \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$ son constantes.
- Si $\vec{P} \neq 0 \longrightarrow (a, e, i, \omega, \Omega, T)$ 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

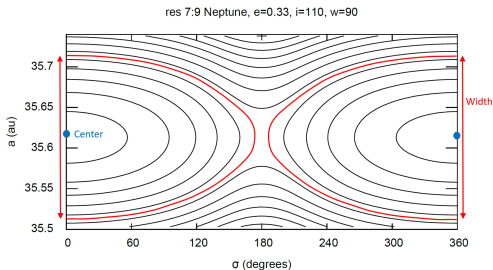
Los a son constantes
 e, i presentan pequeñas oscilaciones



el Sistema Solar es estable

Métodos analíticos y semi-analíticos

- Hamiltoniano del problema
- sistema de referencia
- variables
- eliminación de variables por teoría de perturbaciones
- eliminación de variables por media numérica
- análisis del Hamiltoniano final



Un **integrador numérico** incluye:

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

Un ejemplo muy crudo sería:

$$\begin{aligned}\vec{r}_{i+1} &= \vec{r}_i + \vec{v}_i \cdot \Delta t \\ \vec{v}_{i+1} &= \vec{v}_i + \vec{\alpha}_i \cdot \Delta t\end{aligned}$$

pero en dinámica orbital:

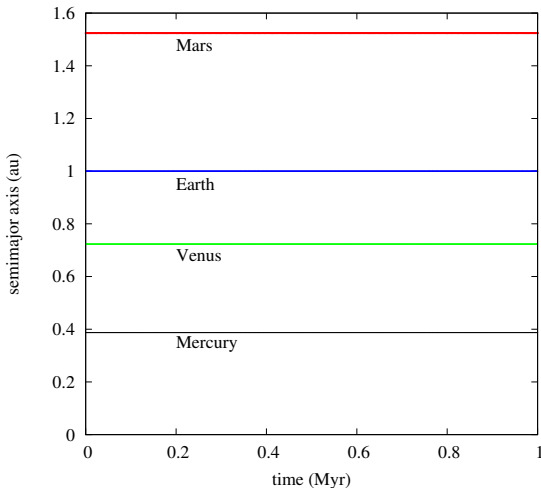
$$\vec{\alpha} = \vec{\alpha}_{Sol} + \vec{\alpha}_p$$

siendo

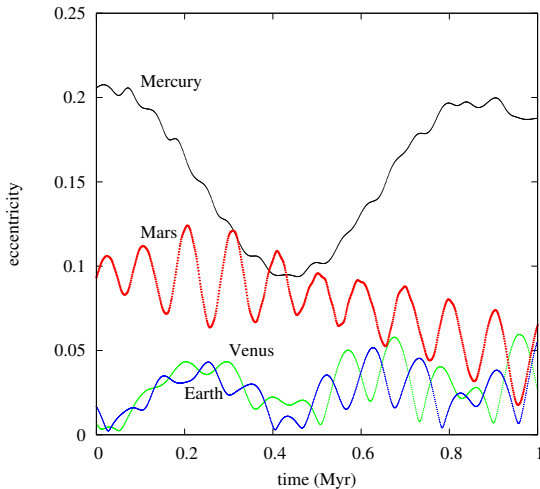
$$\vec{\alpha}_p \sim \vec{\alpha}_{Sol}/1000$$

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

Solución numérica de las ecuaciones exactas de movimiento:



Sistema Solar: excentricidades



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.

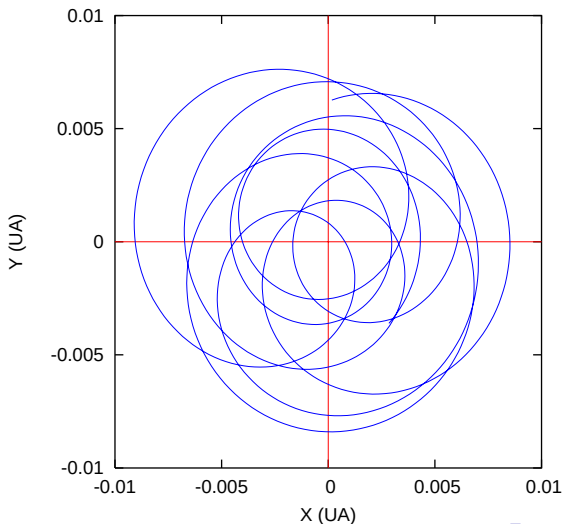
RESTRICTIONS

- 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`

Movimiento del Sol

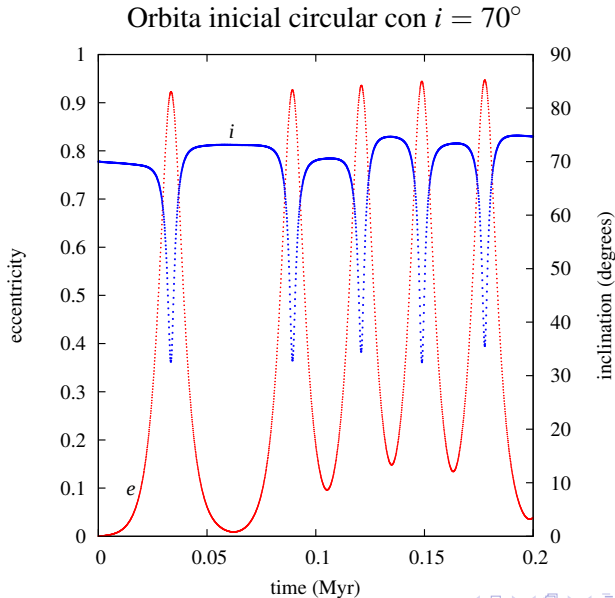
Movimiento del Sol en 100 años respecto al baricentro del sistema, que delata la existencia de planetas.



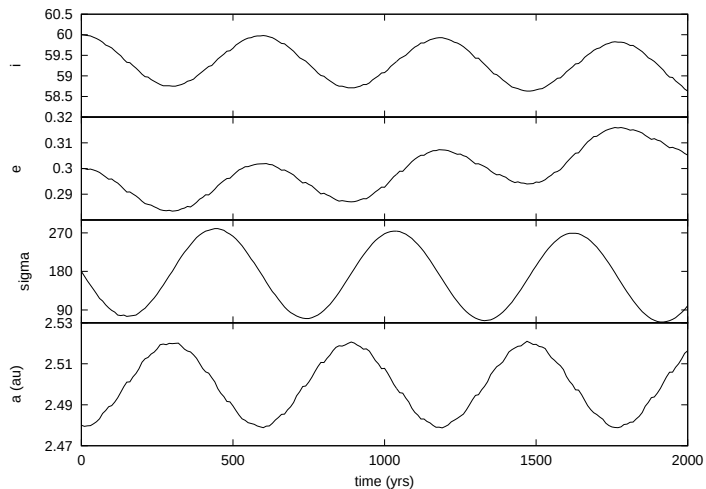
Tipos de evolución orbital

- **Secular**: nuestro sistema planetario, $a = \text{constantes}$, (e, i) oscilan con frecuencias definidas.
- **Resonante**: cuando un cuerpo tiene una frecuencia conmensurable con alguna del sistema, (a, e, i) con pequeñas oscilaciones.
 - **Secular dentro de la resonancia**: grandes oscilaciones en (e, i)
- **Caótico**: (a, e, i) varían erráticamente.

Secular: mecanismo Kozai-Lidov

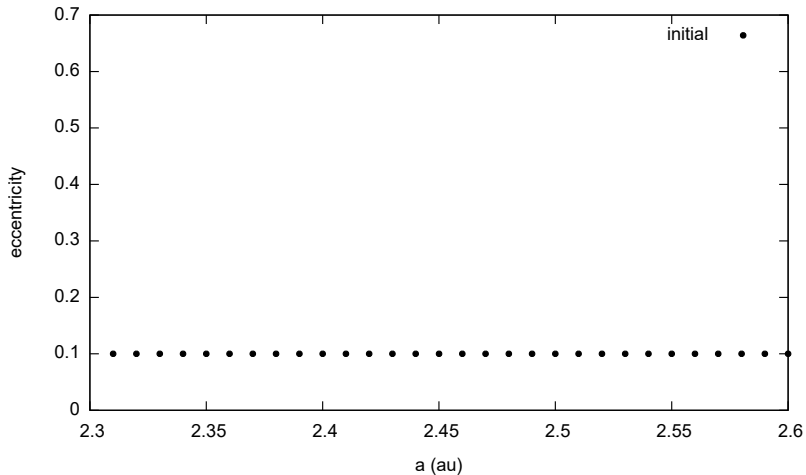


Movimiento resonante: libraciones



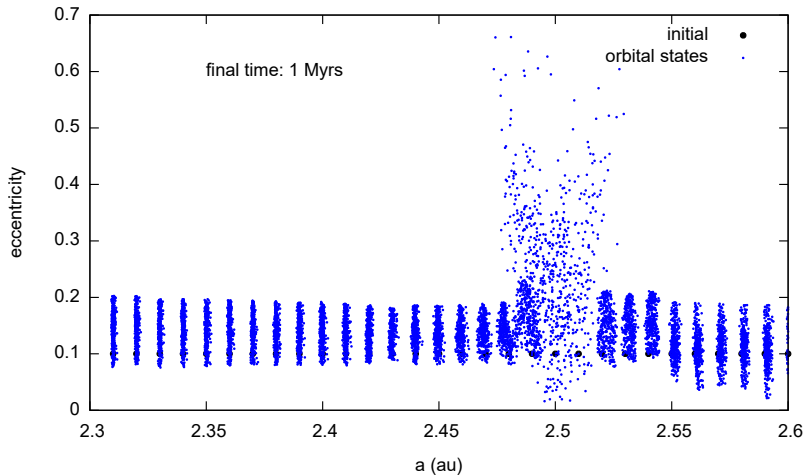
Gallardo 2019

Experimento numérico: integramos partículas de prueba



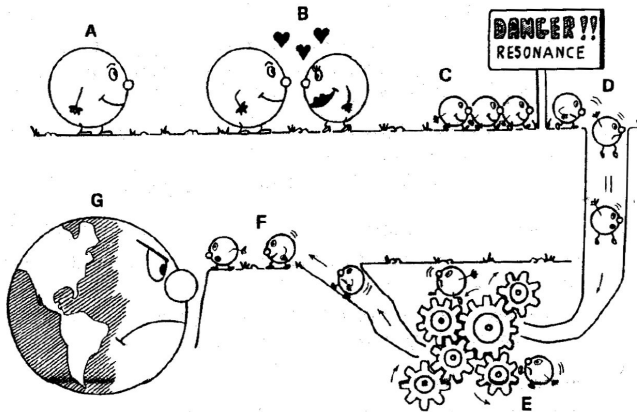
Resonancia orbital 3:1

$$P_{par} = P_{Jup}/3$$



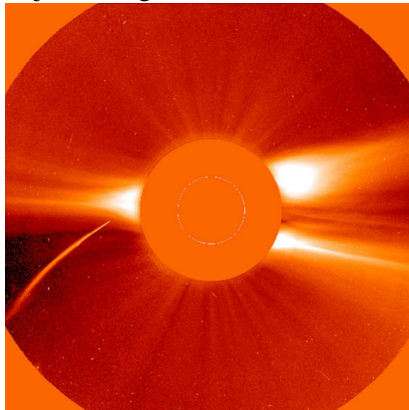
gran inestabilidad en $a \simeq 2,5$ ua

Rutas dinámicas de los meteoritos



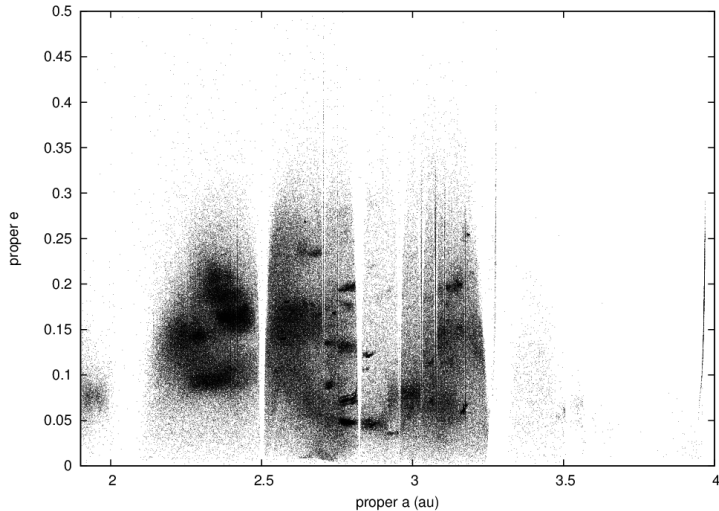
Comic original de Zappala.

Objetos sungrazers: cuando $e \rightarrow 1$



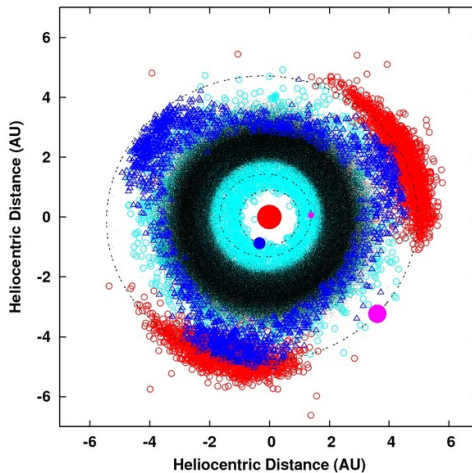
- Evolución de asteroide en resonancia 3:1

Resonancias y familias colisionales

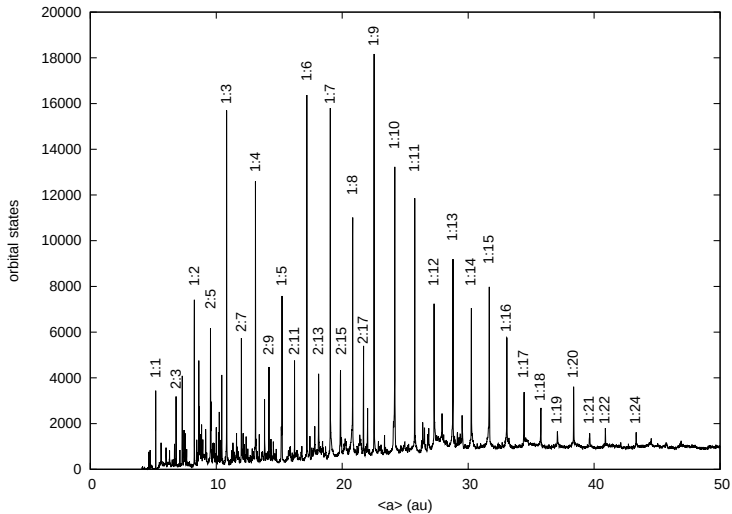


Hildas (3:2) y Troyanos (1:1)

Resonancias estables.



HISTOGRAMA de estados orbitales (de integraciones numéricas)



Fernandez et al., 2016

Efectos gravitacionales en anillos

Janus/Epimetheus 7:6 ————
Pandora 19:18 ————
Prometheus 35:34 ————

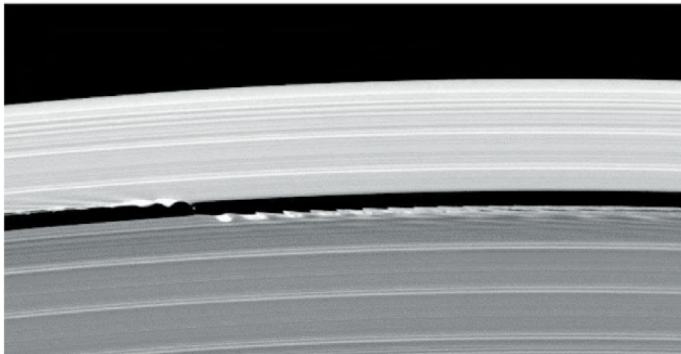
Prometheus 34:33 ————

Prometheus 33:32 ————

Keeler Gap ————
Prometheus 32:31 ————
Pandora 18:17 ————

Prometheus 31:30 ————

Prometheus 30:29 ————



Caos en el problema de tres cuerpos

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

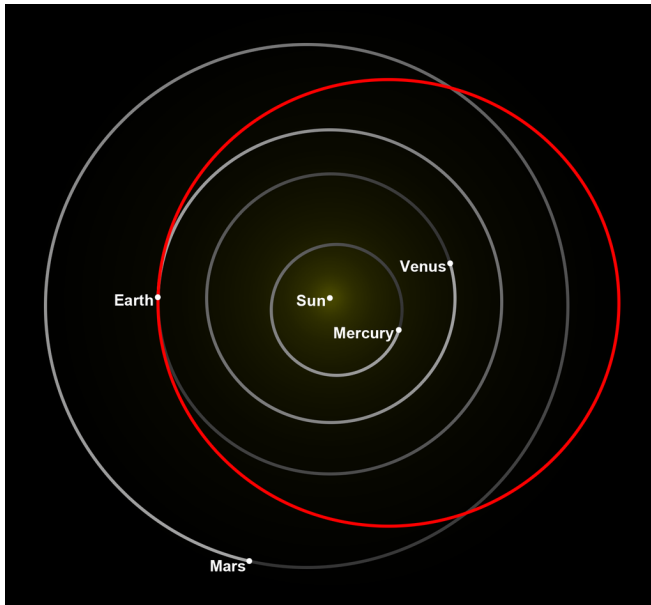


No existen soluciones analíticas.

El auto Tesla Roadster, un ejemplo extremo

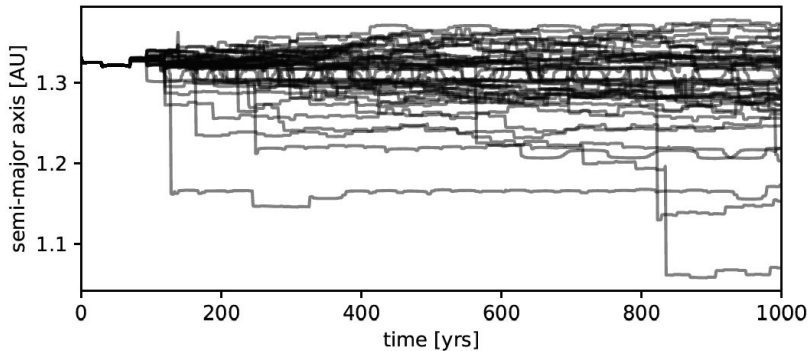


Orbita: un auto condenado a chocar



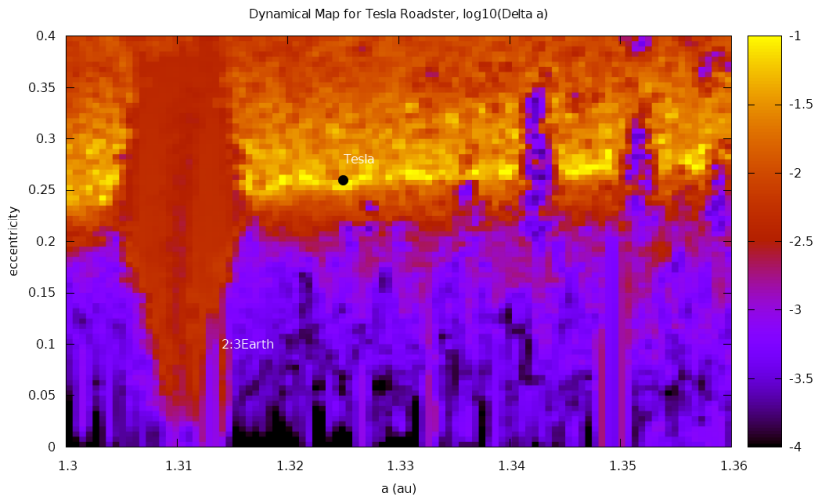
Memoria dinámica del Tesla Roadster

evolución de 48 clones



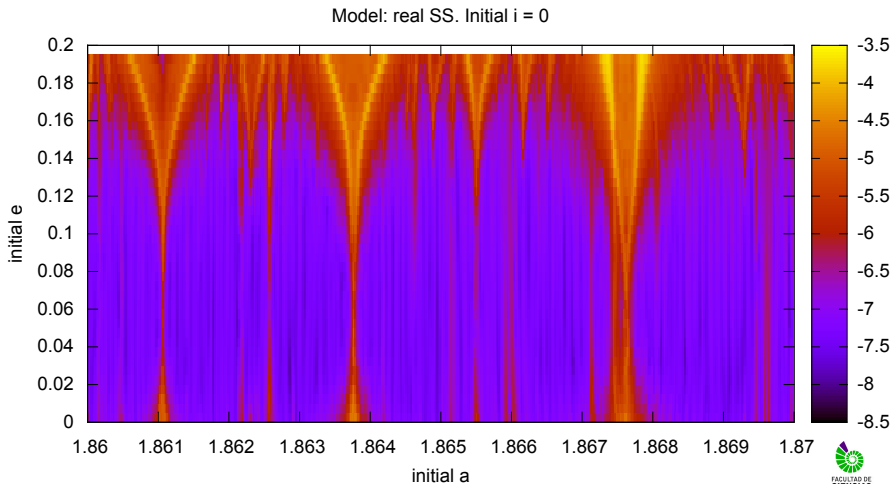
Rein et al. 2018

Mapa dinámico para el auto de Elon

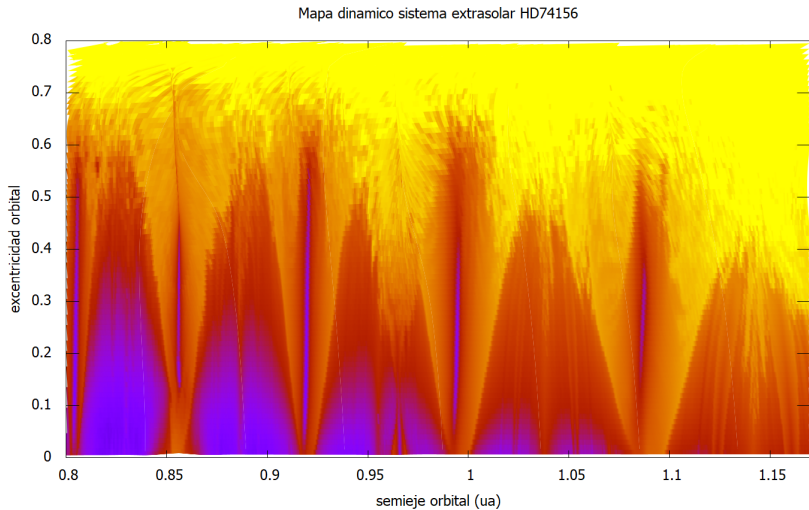


Mapa dinámico entre Marte y Júpiter

Estructura resonante:



Sistema HD 74156



1846: descubrimiento de Neptuno

quasi resonance Uranus - Neptune:

$$n_{Uranus} \sim 2n_{Neptune}$$

quasi resonance Saturn - Uranus:

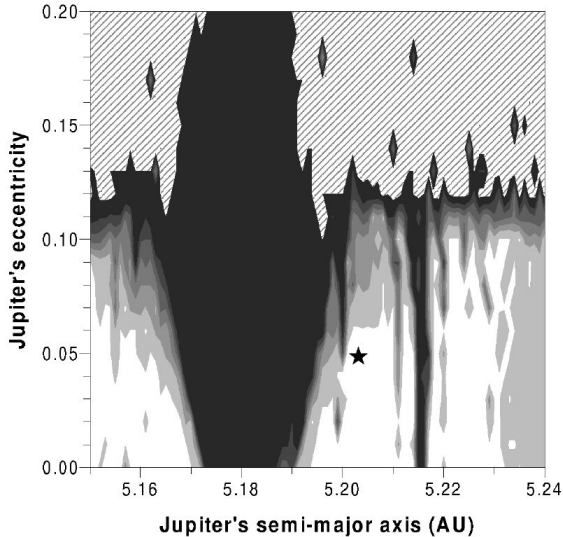
$$n_{Saturn} \sim 3n_{Uranus}$$

quasi resonance: Jupiter - Saturn

$$2n_{Jupiter} \sim 5n_{Saturn}$$

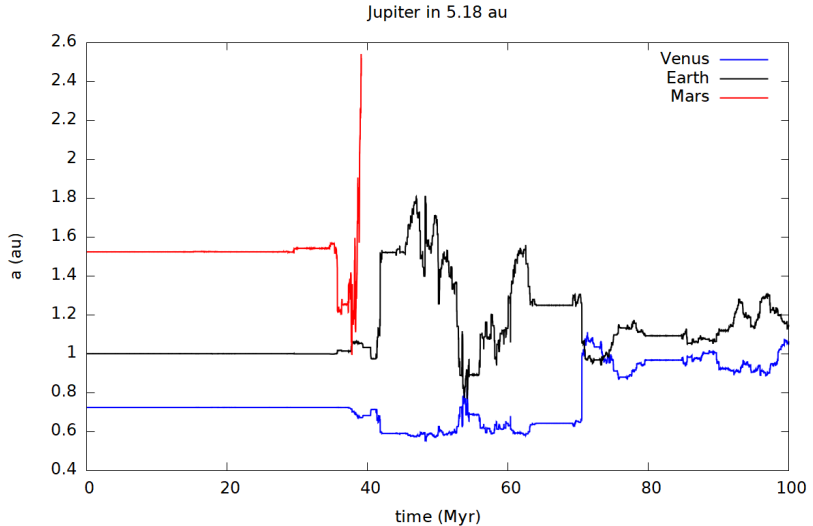
Why the planets are so close to resonances?
→ **planetary migration**

2:5 resonance near Jupiter



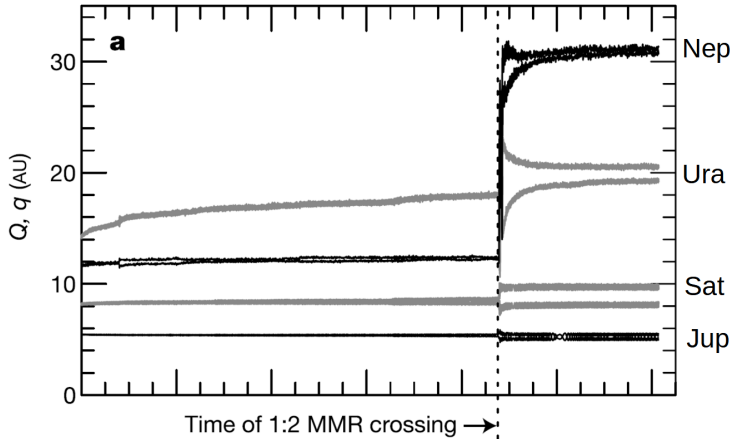
Michtchenko and Ferraz-Mello, 2001.

Experiment: Jupiter shifted 0.02 au (res 2:5)



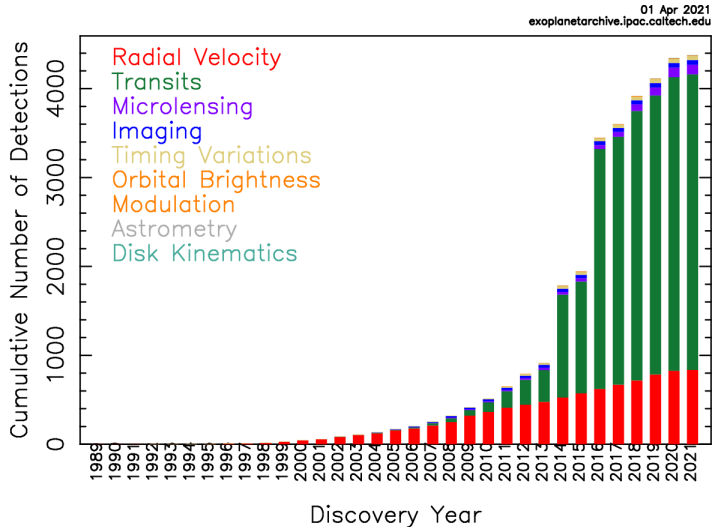
don't do this at home ...

Fernández-Ip migration:

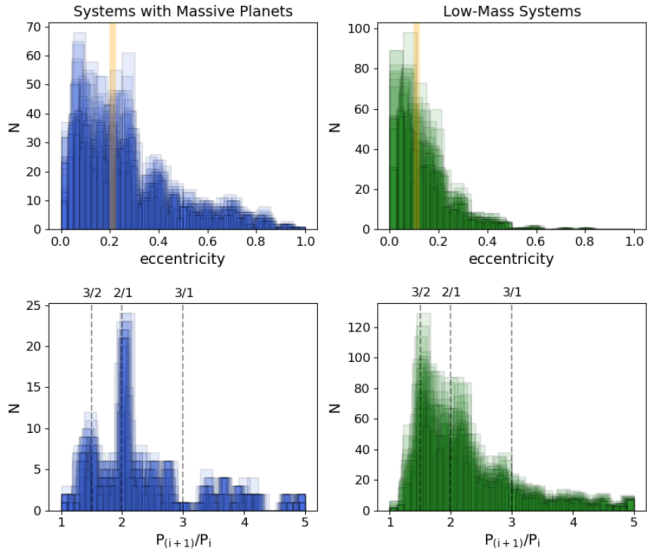


Gomes et al. 2005

Cumulative Detections Per Year



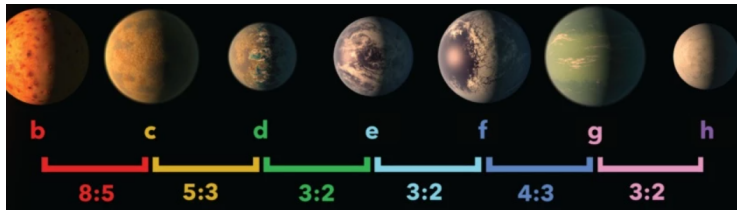
Extrasolar systems: resonances



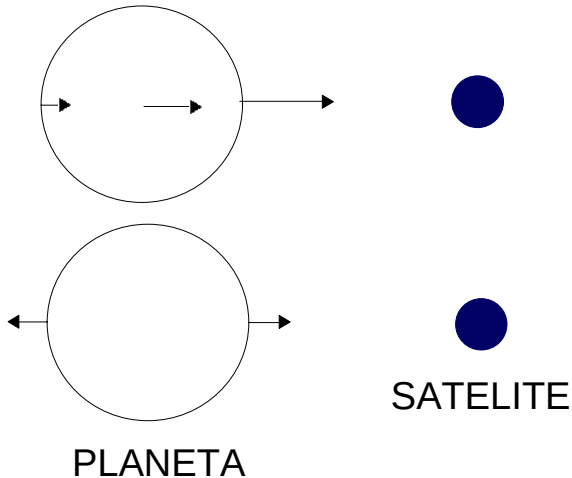
Beaugé and Ferraz-Mello, 2021

RESONANT CHAINS

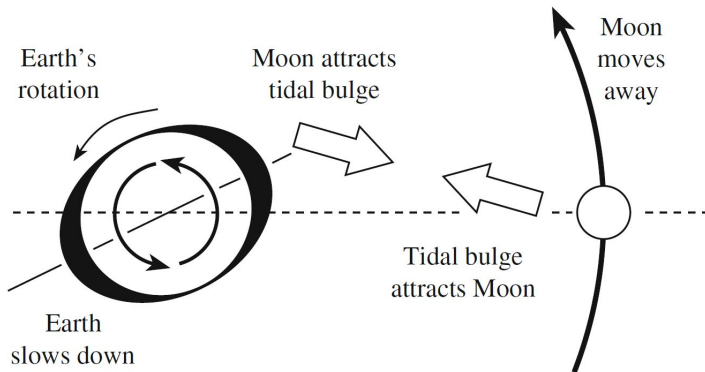
TRAPPIST-1 system



it is not an effect of chance



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.

- Carrera de grado en Astronomía o Física (Facultad de Ciencias, UdelaR)
- Programa de posgrado: PEDECIBA
- Becas (escasas!): ANII
- Orientadores: UdelaR
(<http://www.astronomia.edu.uy/depto/posg.html>)

¡Gracias!

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