Mundos peligrosamente sincronizados

Tabaré Gallardo
www.fisica.edu.uy/~gallardo

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

Seminarios de Física, Setiembre 2019

Meteoritos

Meteorito de San Carlos, 2015

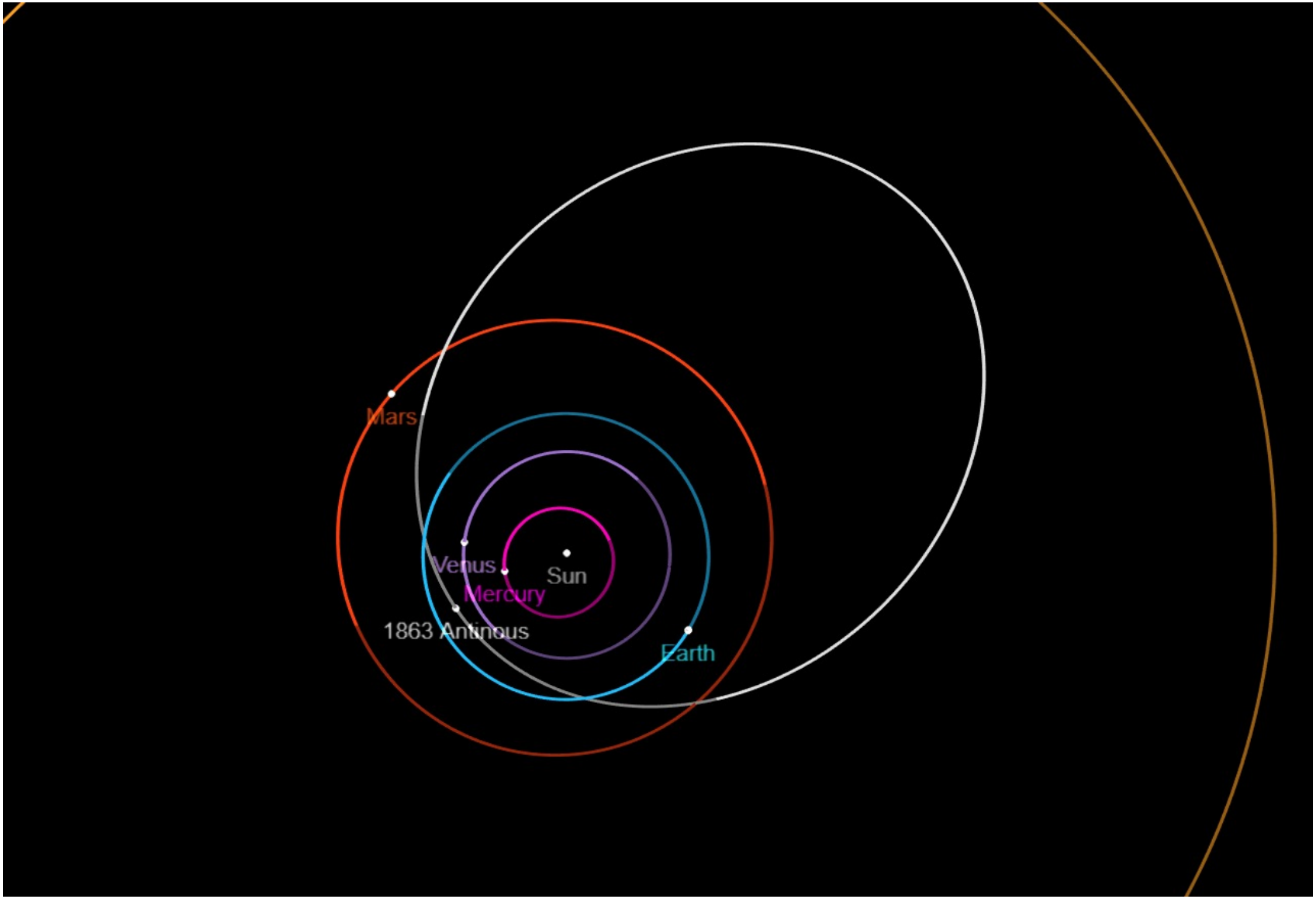
¿Cómo llegan hasta la Tierra?

Tierra
1 ua

Marte
1.52 ua

asteroides
2 - 3.4 ua

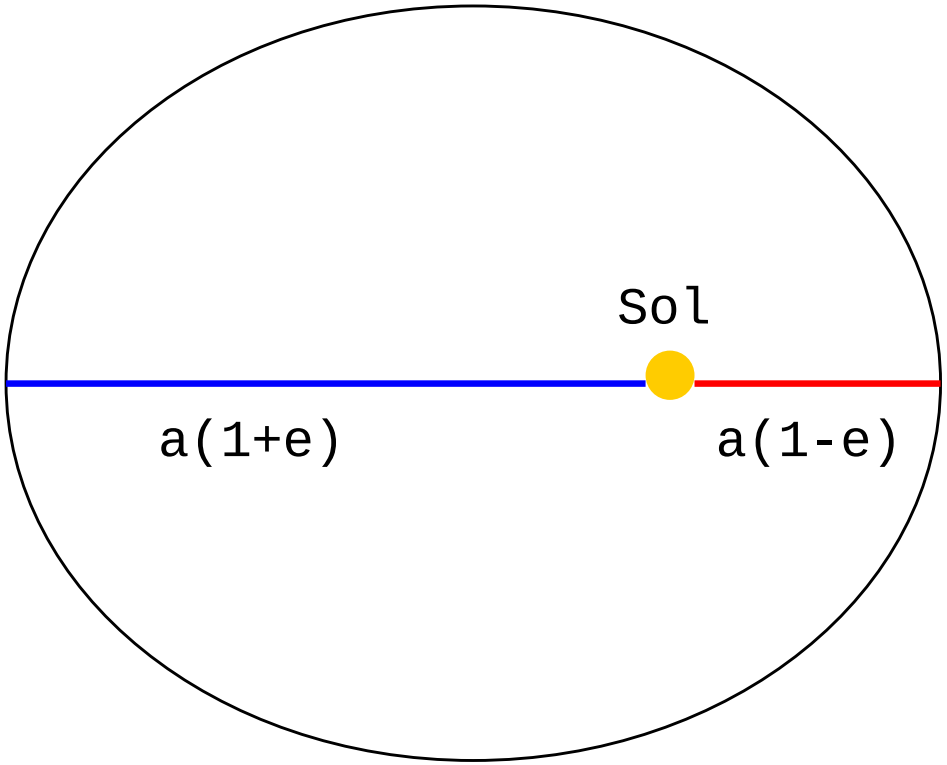
Orbitas



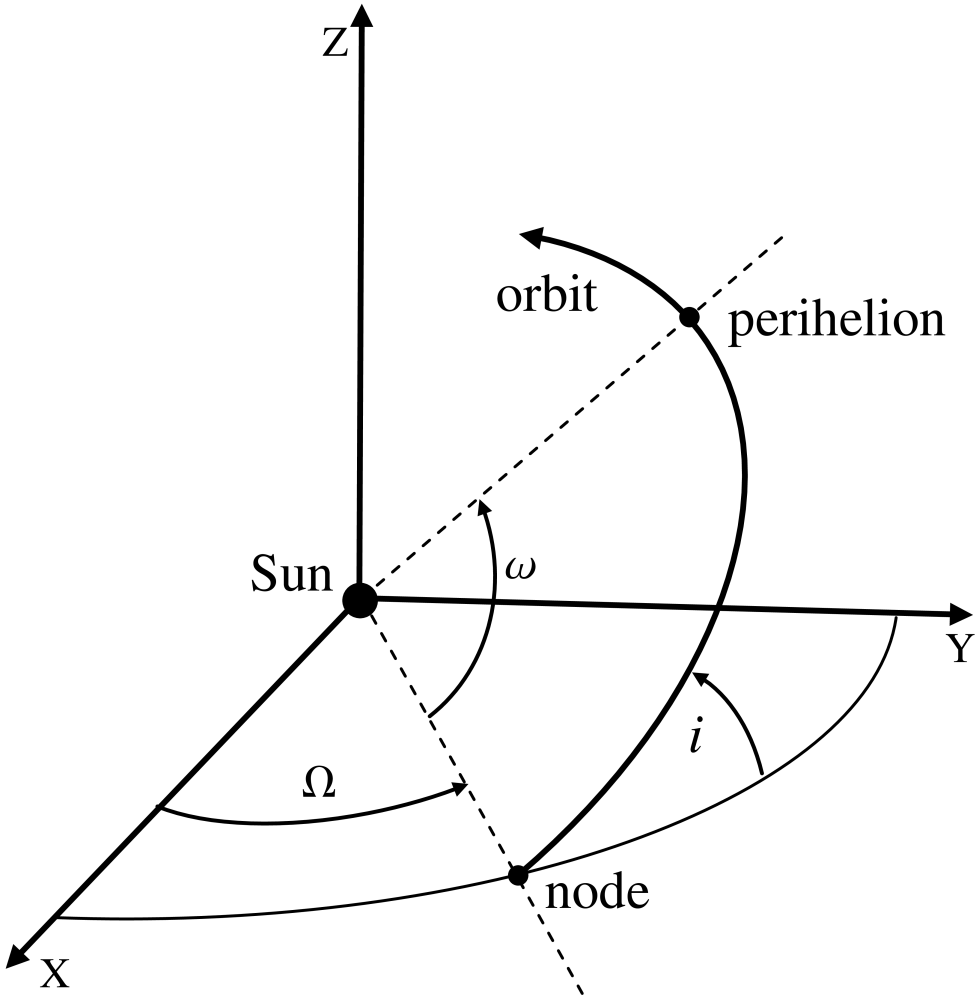
Elementos orbitales: tamaño y forma

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

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

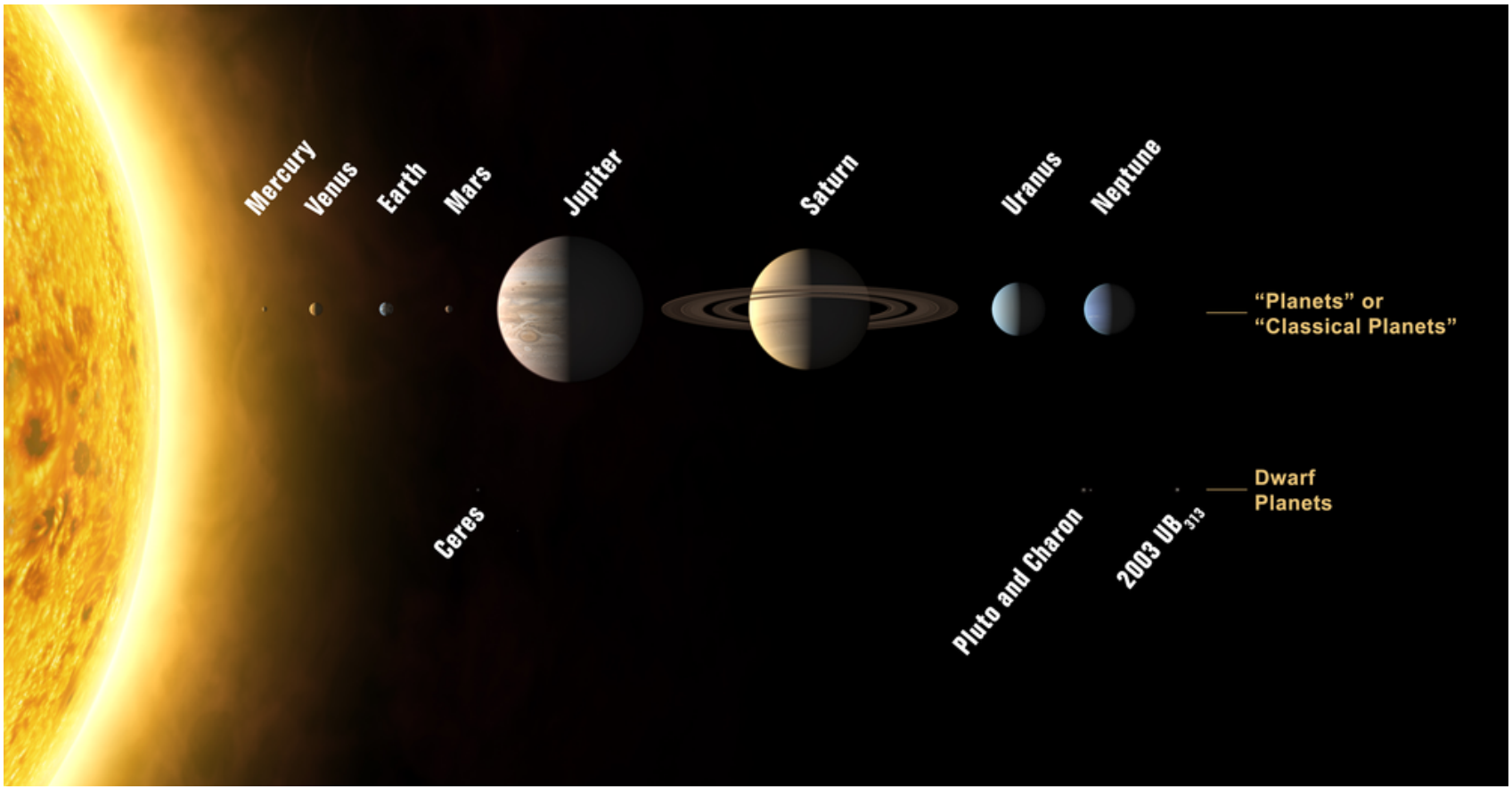


Orientación del plano orbital



Gravedad en el Sistema Solar

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



Newton: solo la intervención divina nos asegura la estabilidad orbital.

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.

Evolución dinámica

Caminos posibles para estudiar **la evolución dinámica**:

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

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

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Teoría Secular de Lagrange-Laplace

100 años después de la Ley de Gravitación Universal

Euler

Laplace

Lagrange

Los a planetarios son constantes
e, i presentan pequeñas oscilaciones

$$\Downarrow$$

el sistema planetario es estable

Métodos numéricos

Un **integrador numérico** incluye:

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

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Algoritmos de integración orbital

Un algoritmo 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:

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

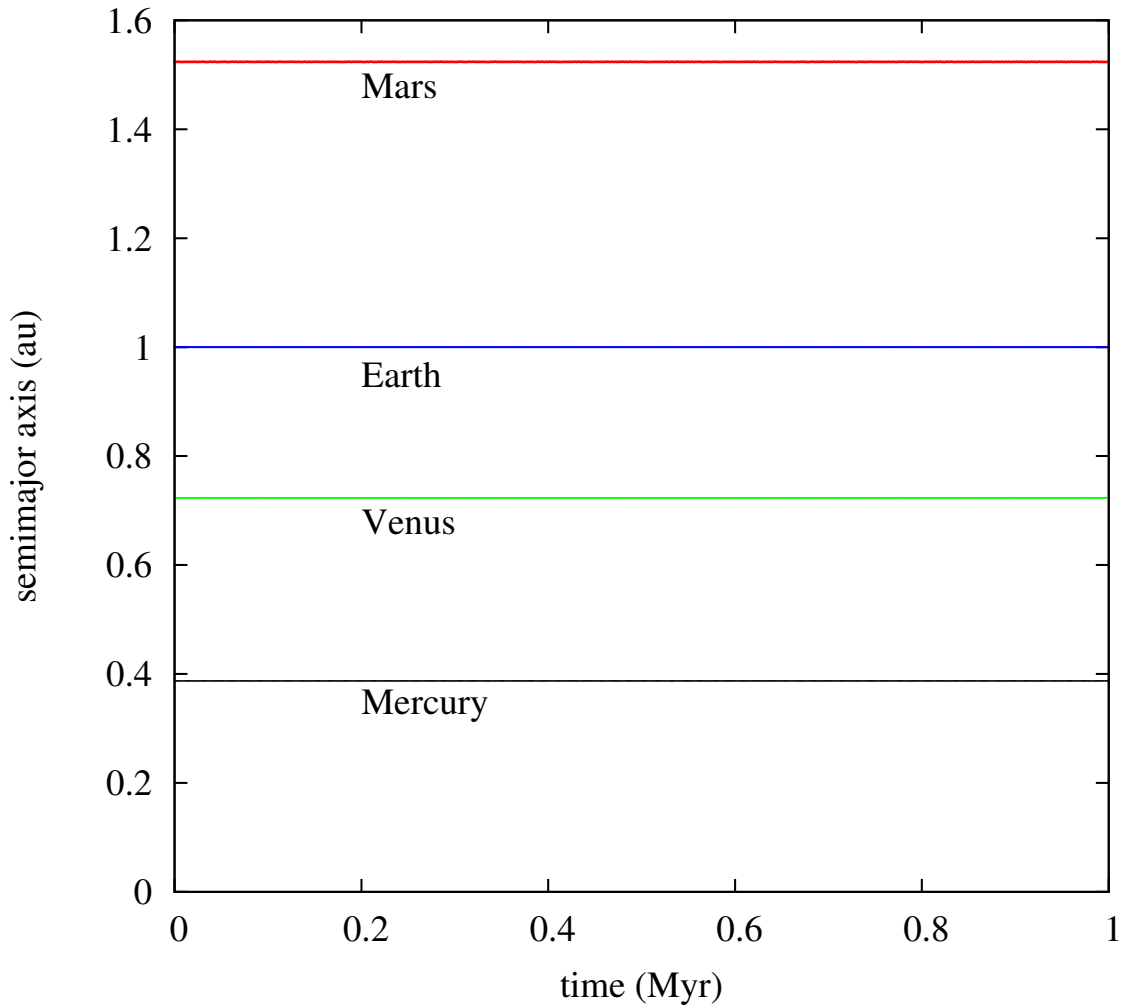
siendo

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

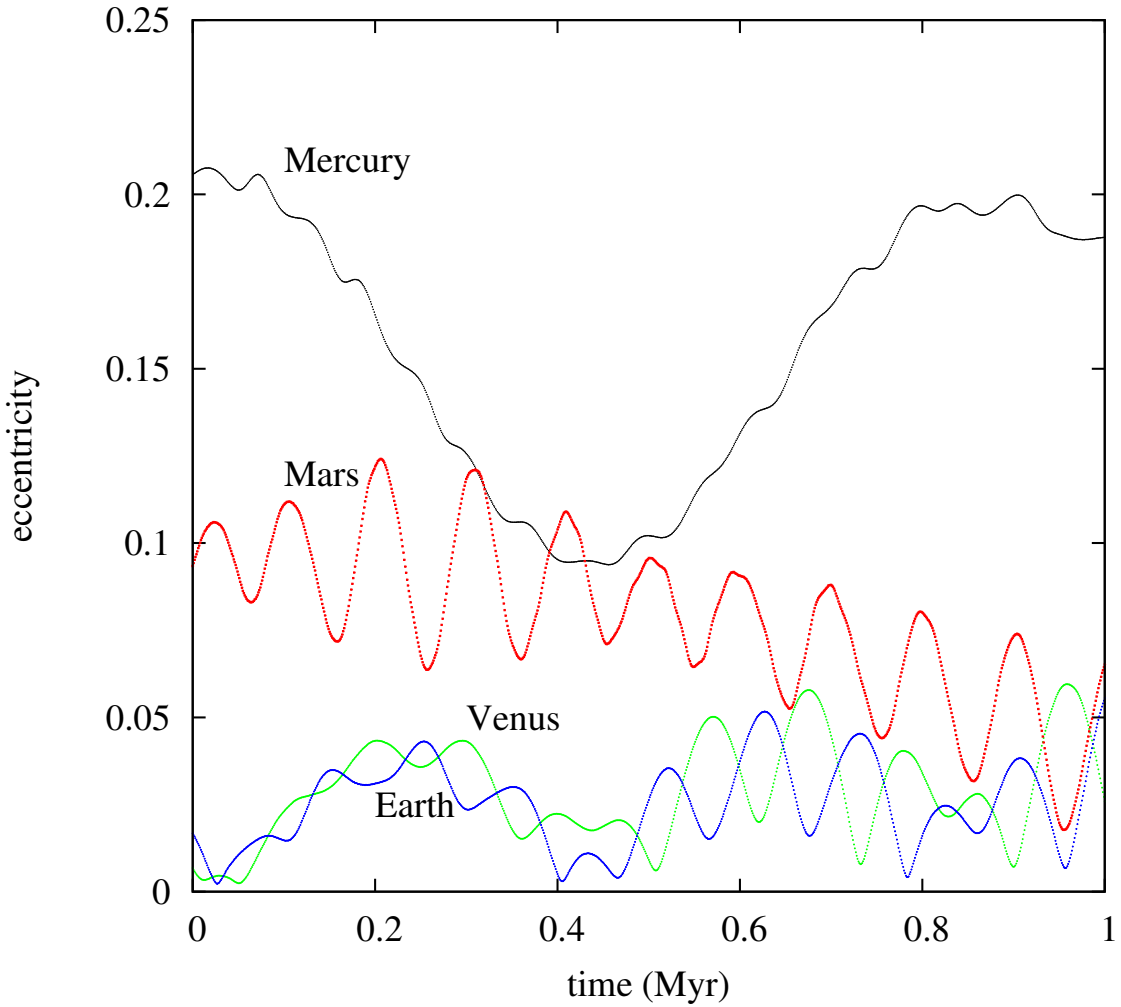
- $\vec{\alpha}_{Sol}$ genera ecuaciones con solución conocida
- sólo es necesario integrar numéricamente $\vec{\alpha}_{pla}$
- el paso de integración Δt puede ser ~ 1000 veces mayor

Sistema Solar: semiejes

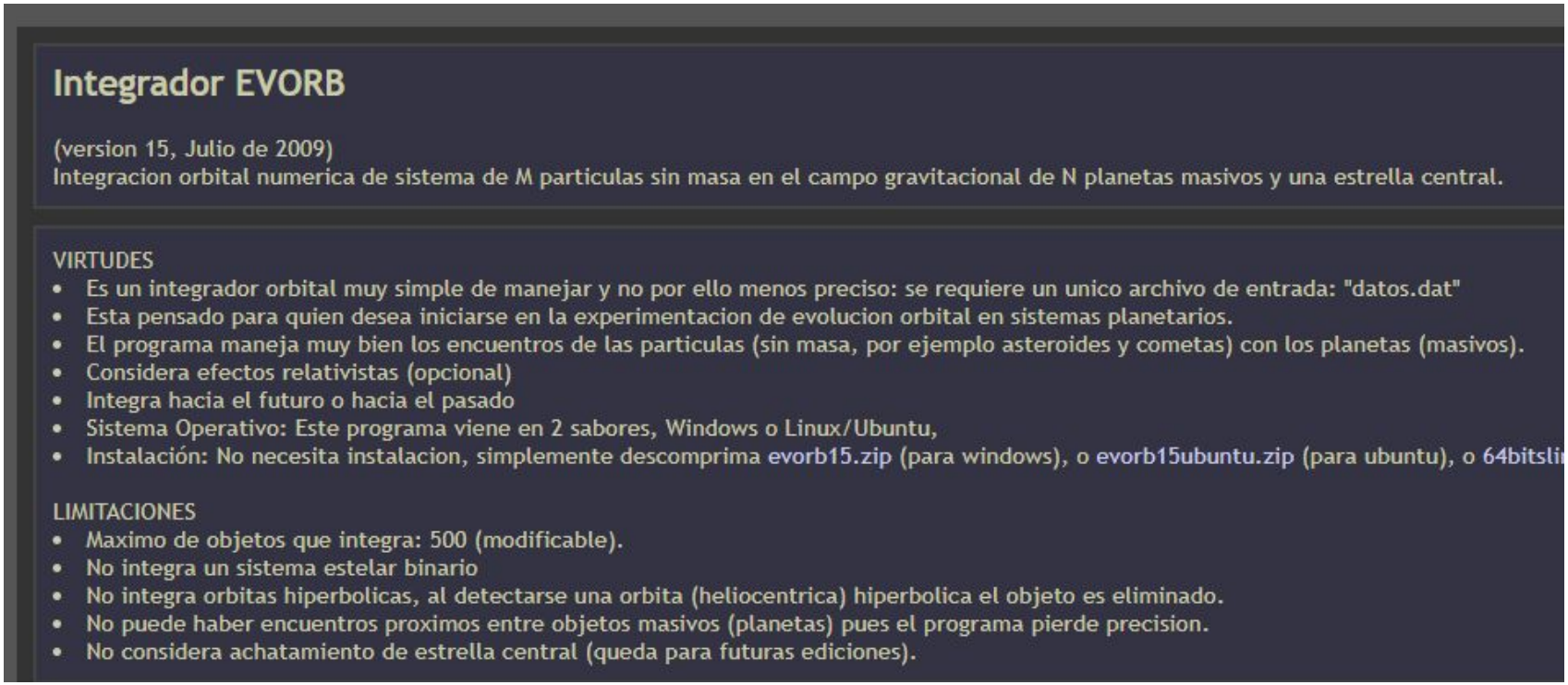
Solución numérica de las ecuaciones exactas de movimiento:



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 64bitsli

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

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Integradores orbitales: SOLEVORB

sites.google.com/site/solevorb

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Integradores orbitales: ORBE

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

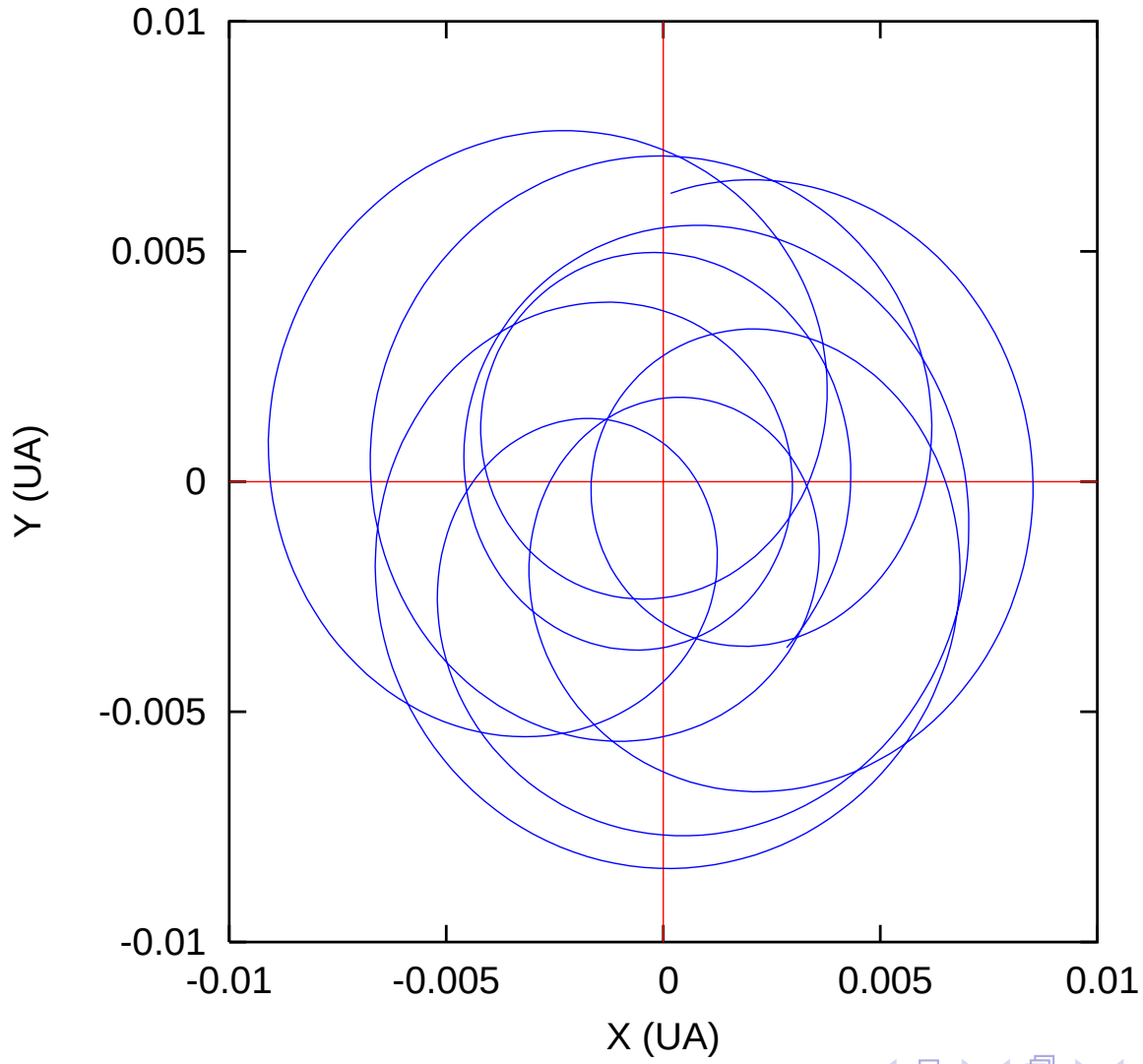
FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Planetas gigantes por 5 millones de años

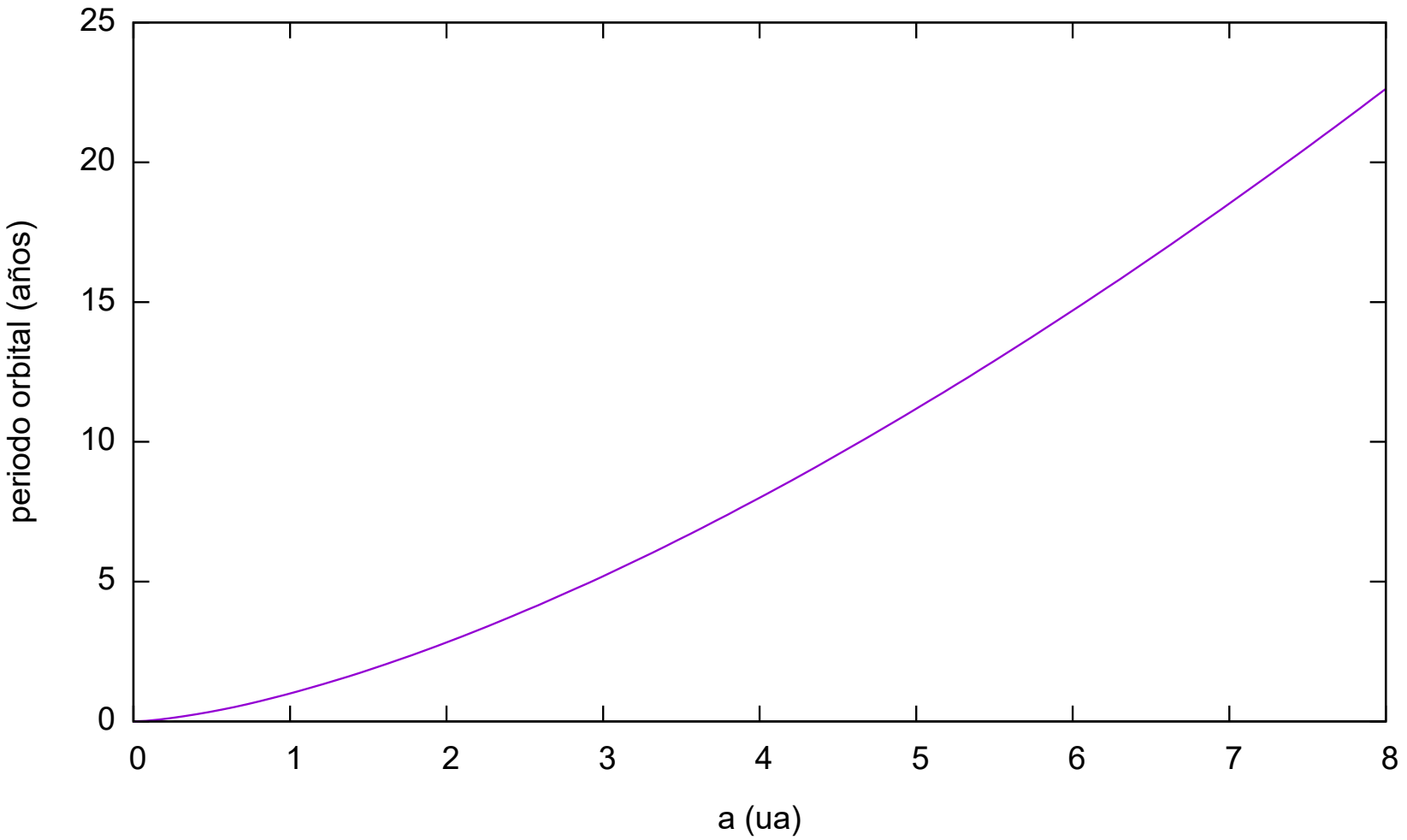
Jupiter, Saturno, Urano y Neptuno por 5 millones de años

Movimiento del Sol

Movimiento del Sol en 100 años respecto al baricentro del sistema, que delata nuestra existencia...

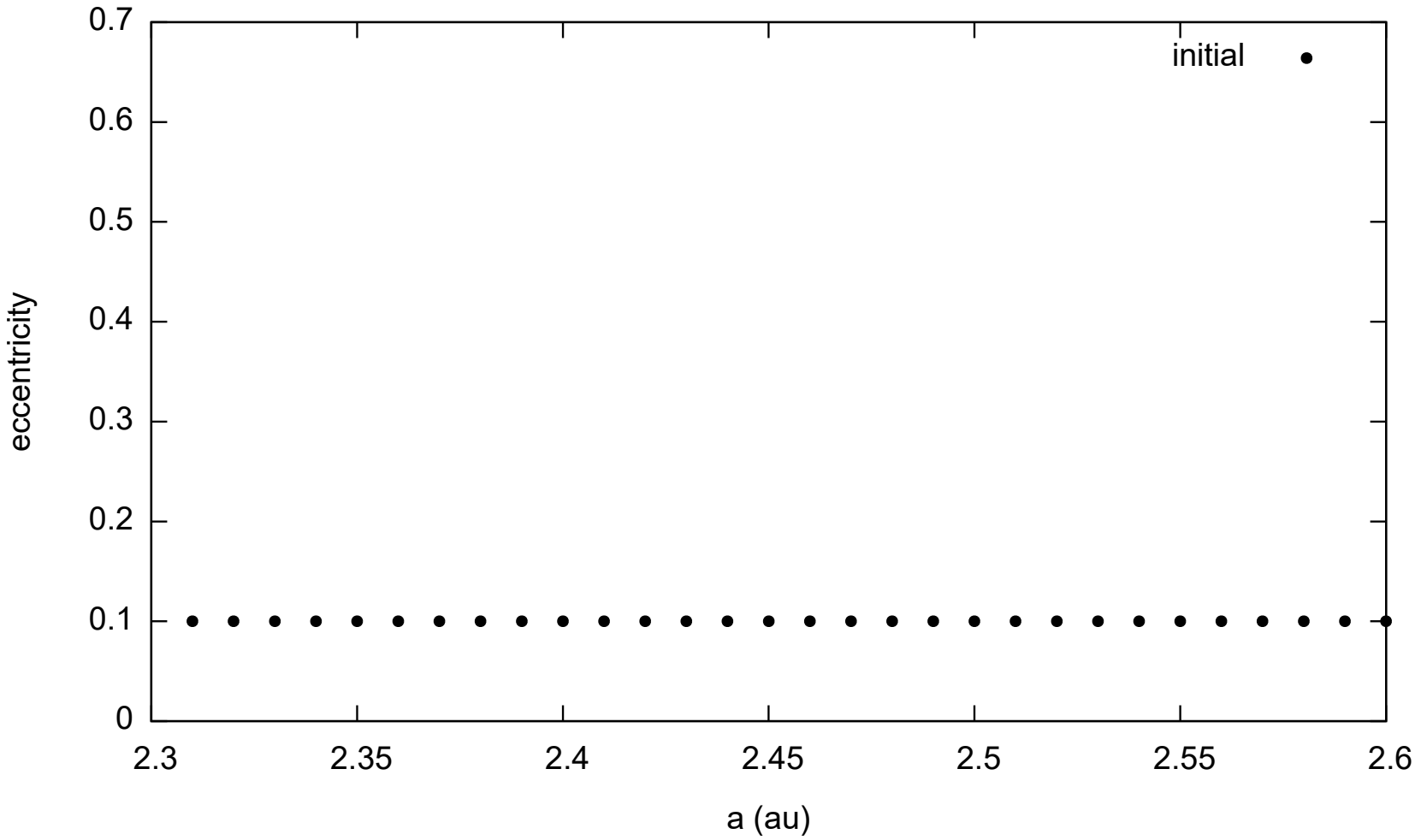


Periodos orbitales, $P(a)$



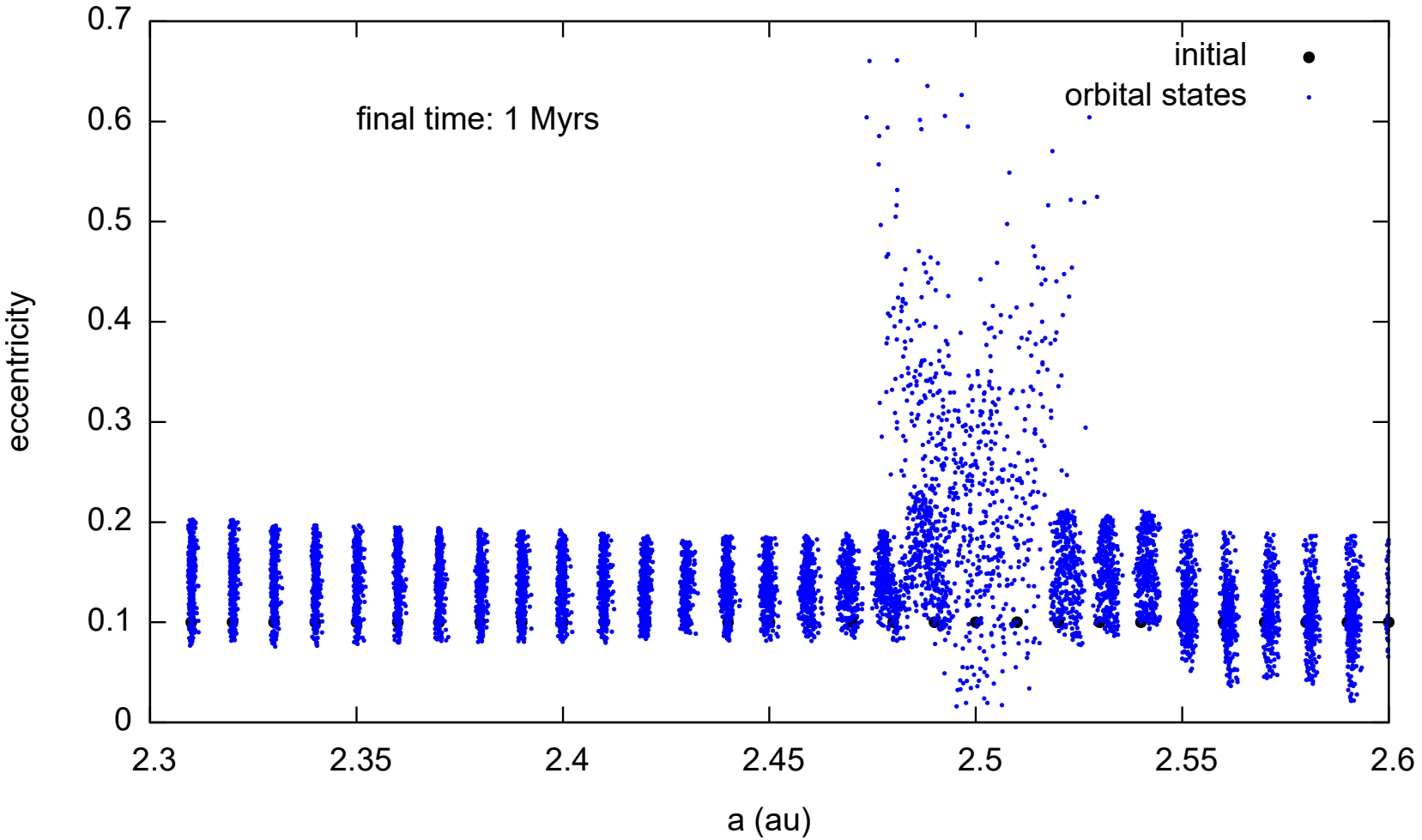
Resonancia orbital

Experimento numérico: integramos partículas de prueba



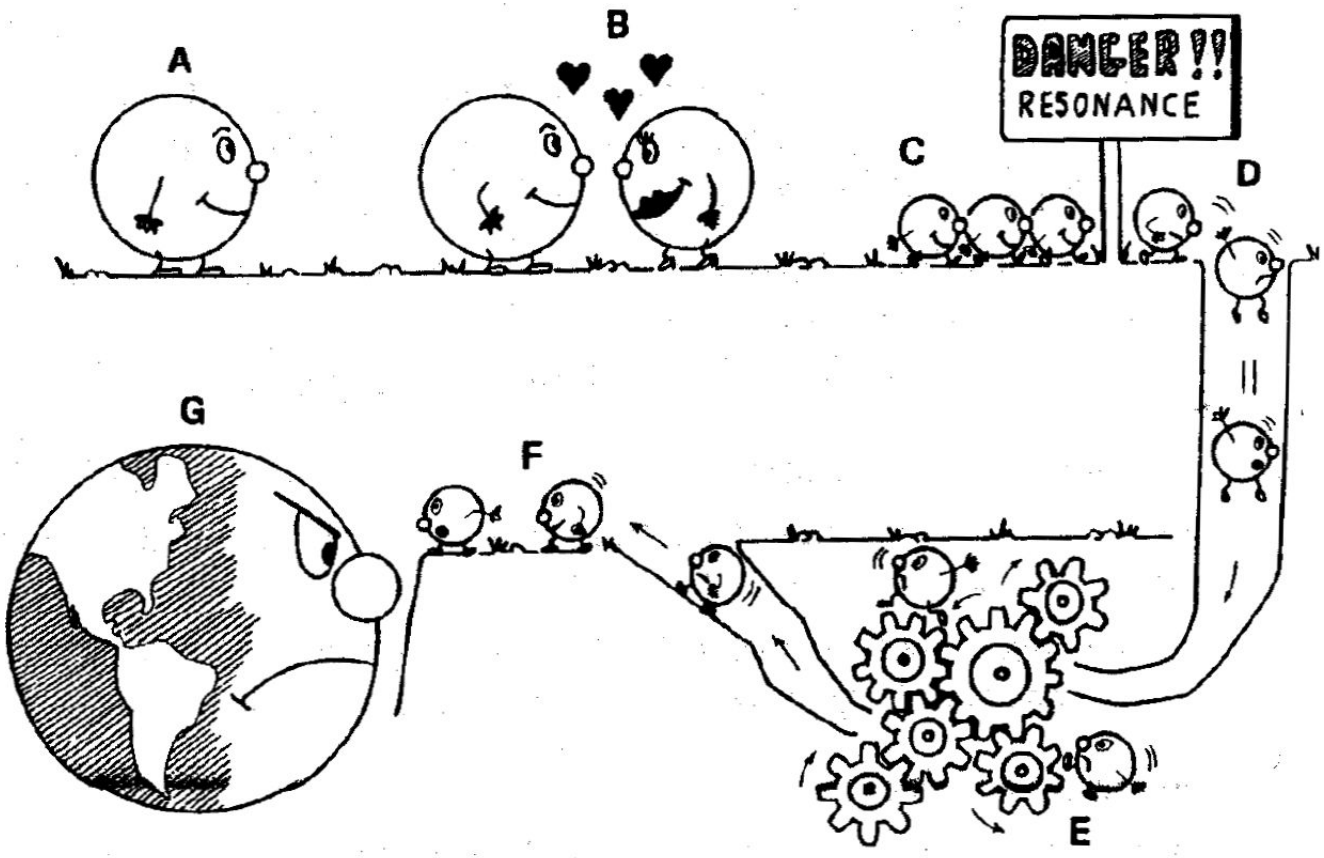
Resonancia orbital 3:1

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



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

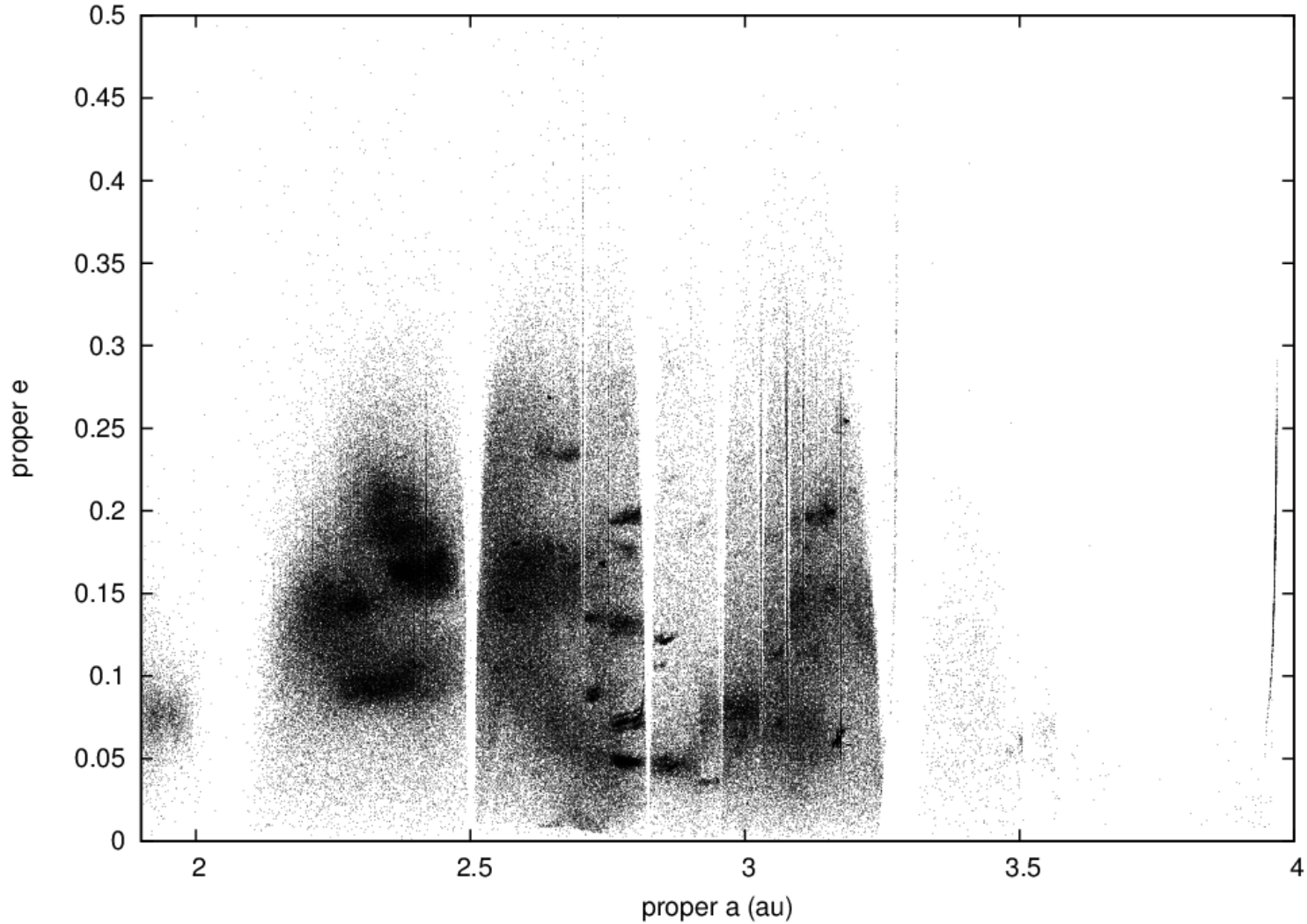
Rutas dinámicas de los meteoritos



Comic original de Zappala.

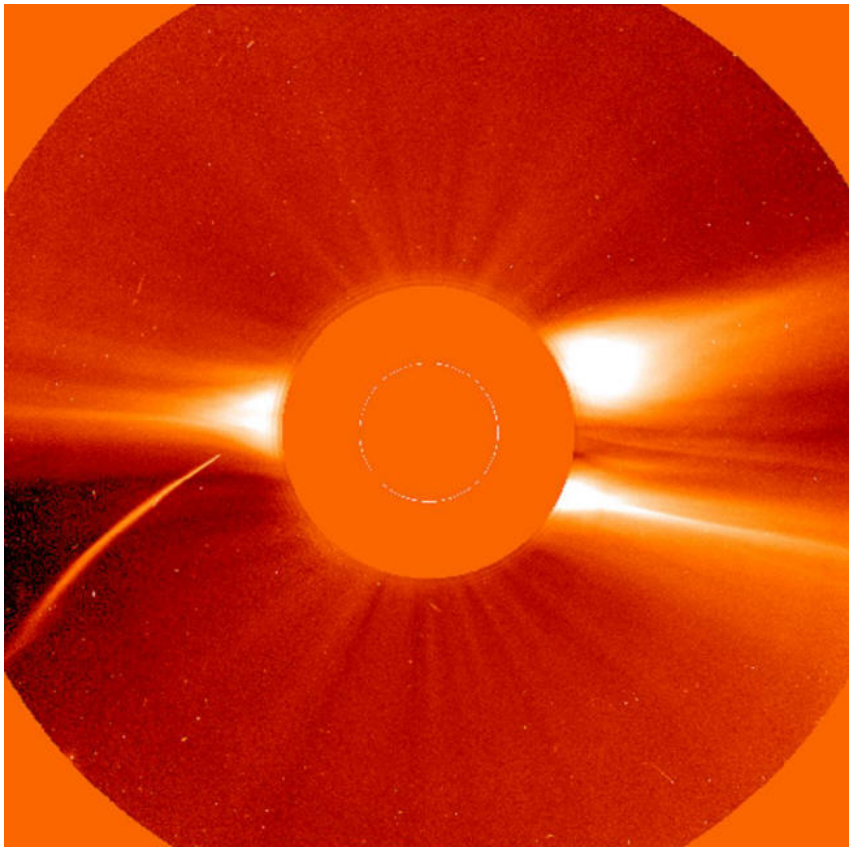
(a, e) de 350.000 asteroides

Resonancias y familias colisionales



Resonante y colisión con Sol

Objetos sungrazers: cuando $e \longrightarrow 1$



- Evolución de asteroide en resonancia 3:1

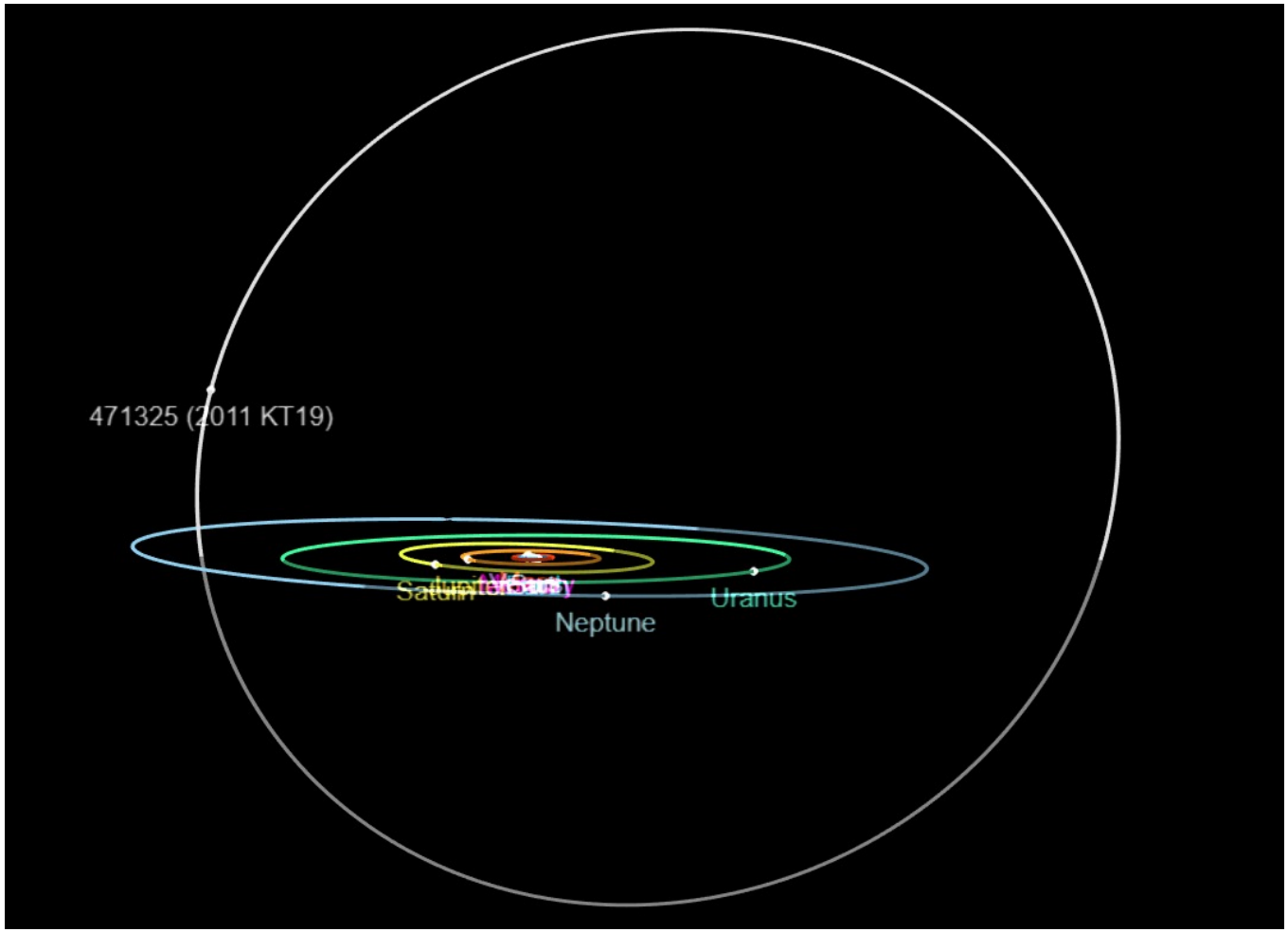
Hildas (3:2) y Troyanos (1:1)

Ejemplos de resonantes estables:

- Hildas y Troyanos
- Troyanos y misión Lucy

Resonante polar

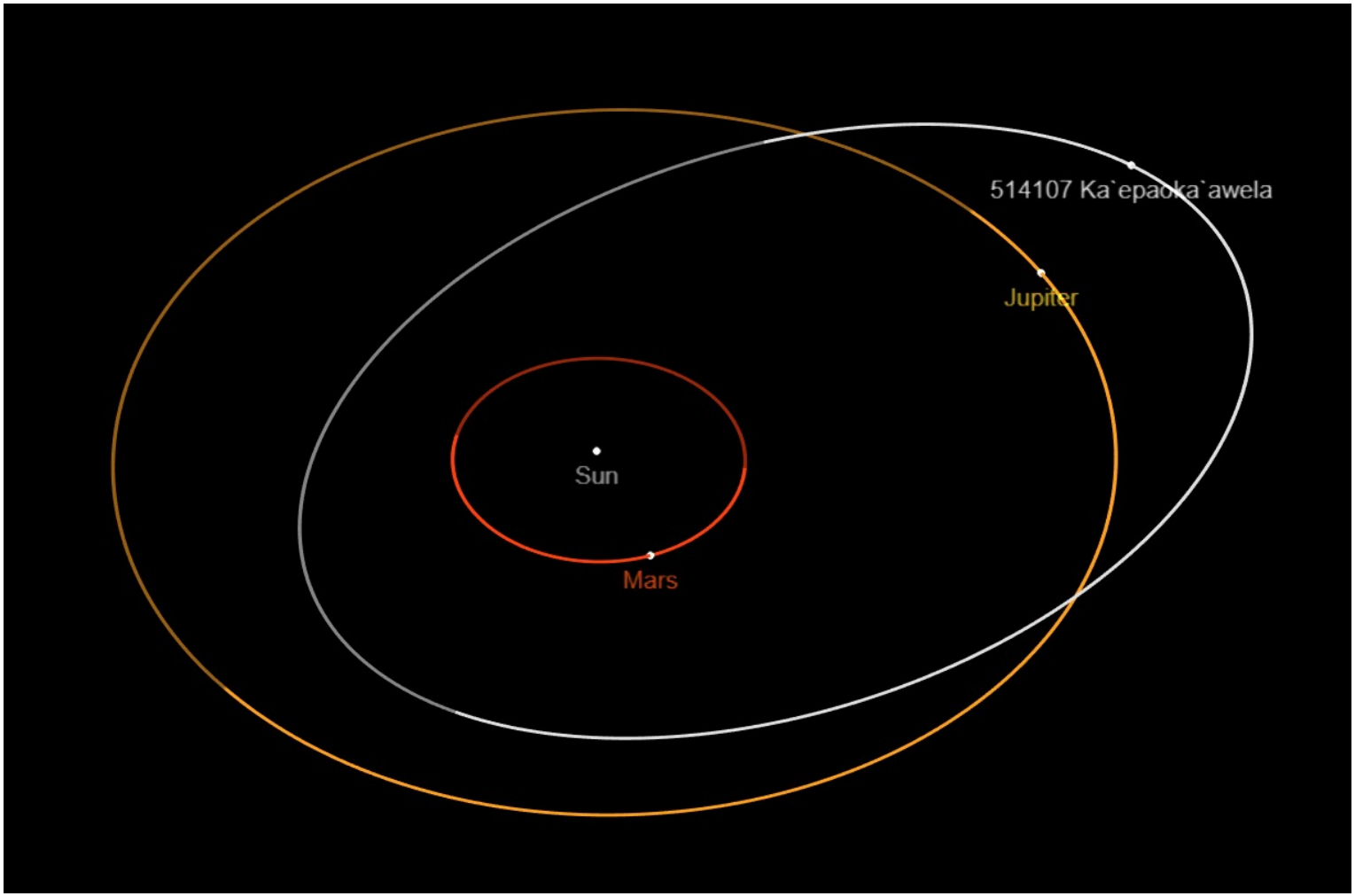
Resonancia 7:9 con Neptuno en órbita de $i = 110°$



(animacion aqui)

Coorbital retrogrado

Resonancia 1:1 con Júpiter en órbita de $i = 163°$



(animacion aqui)

Coorbital quasi satélite

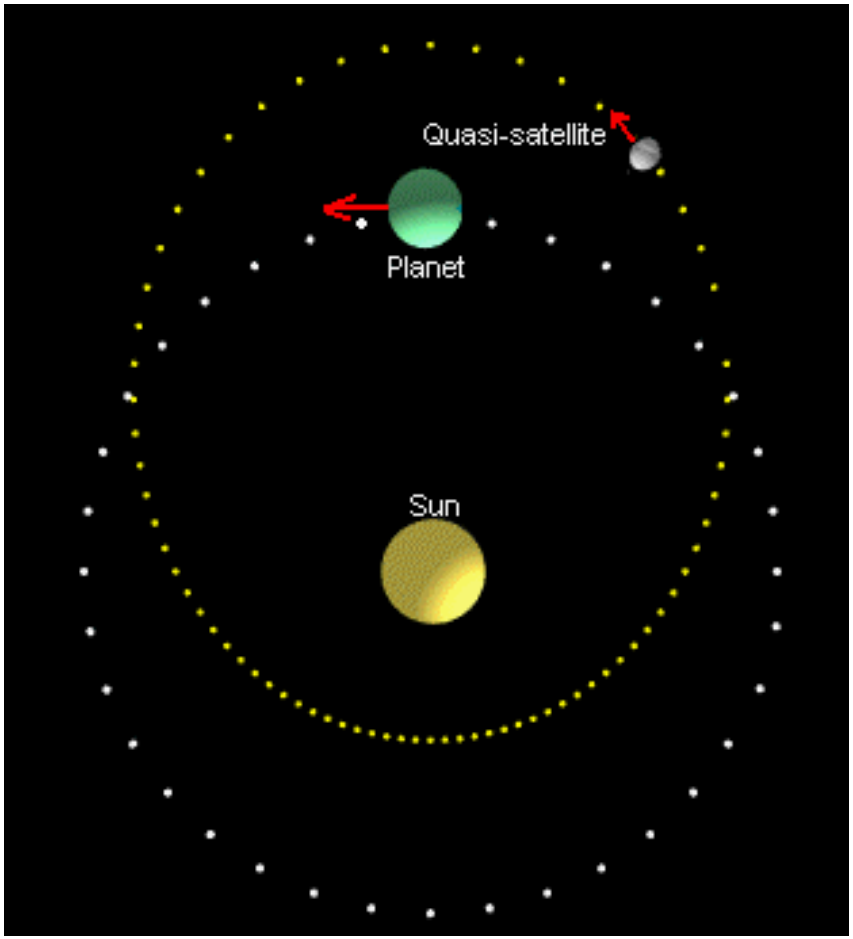
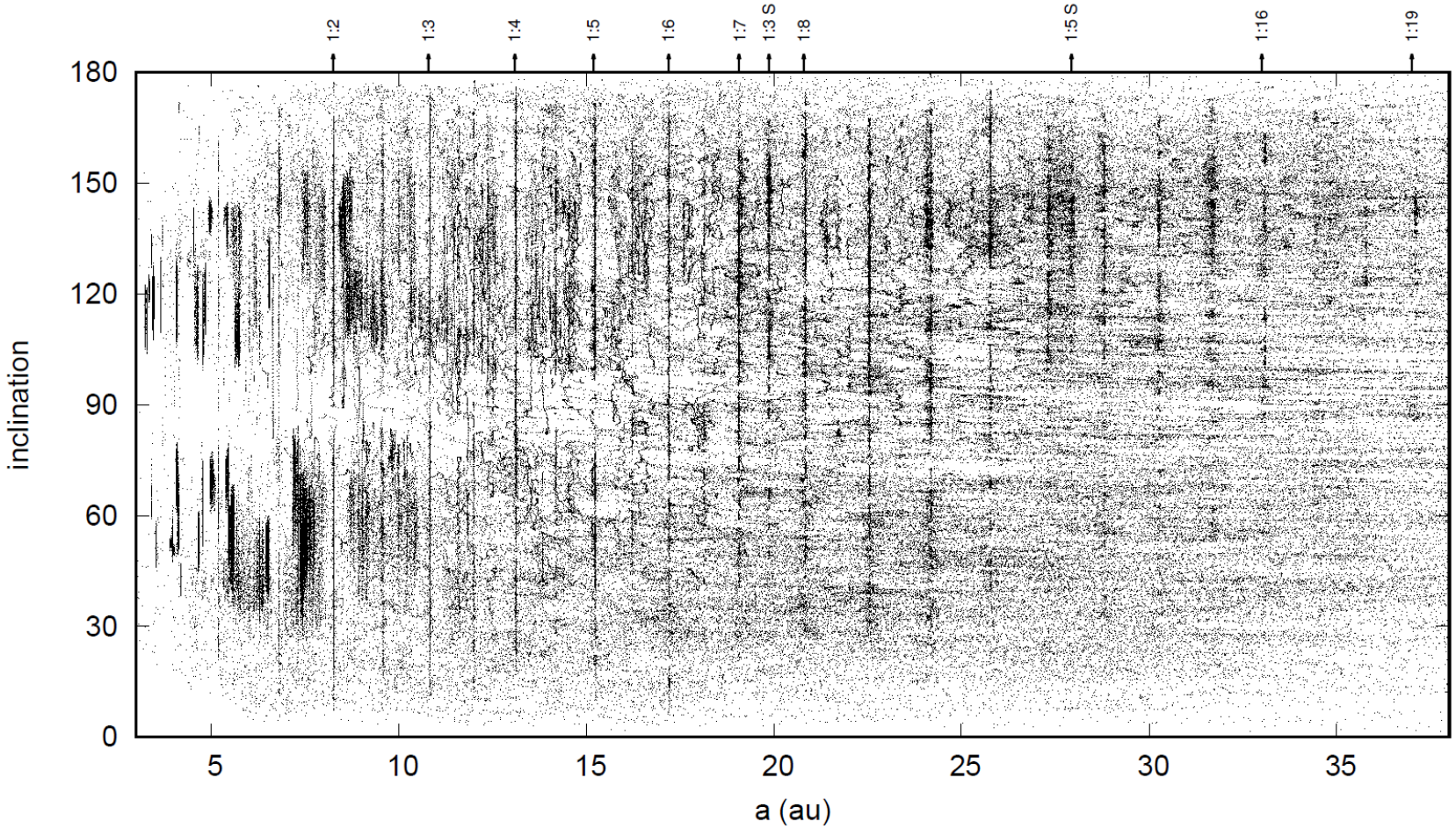


Figura de Wiegert & Innanen.

(animación aquí)

Resonantes retrógrados

Estados orbitales de partículas evolucionando mas allá de Júpiter.

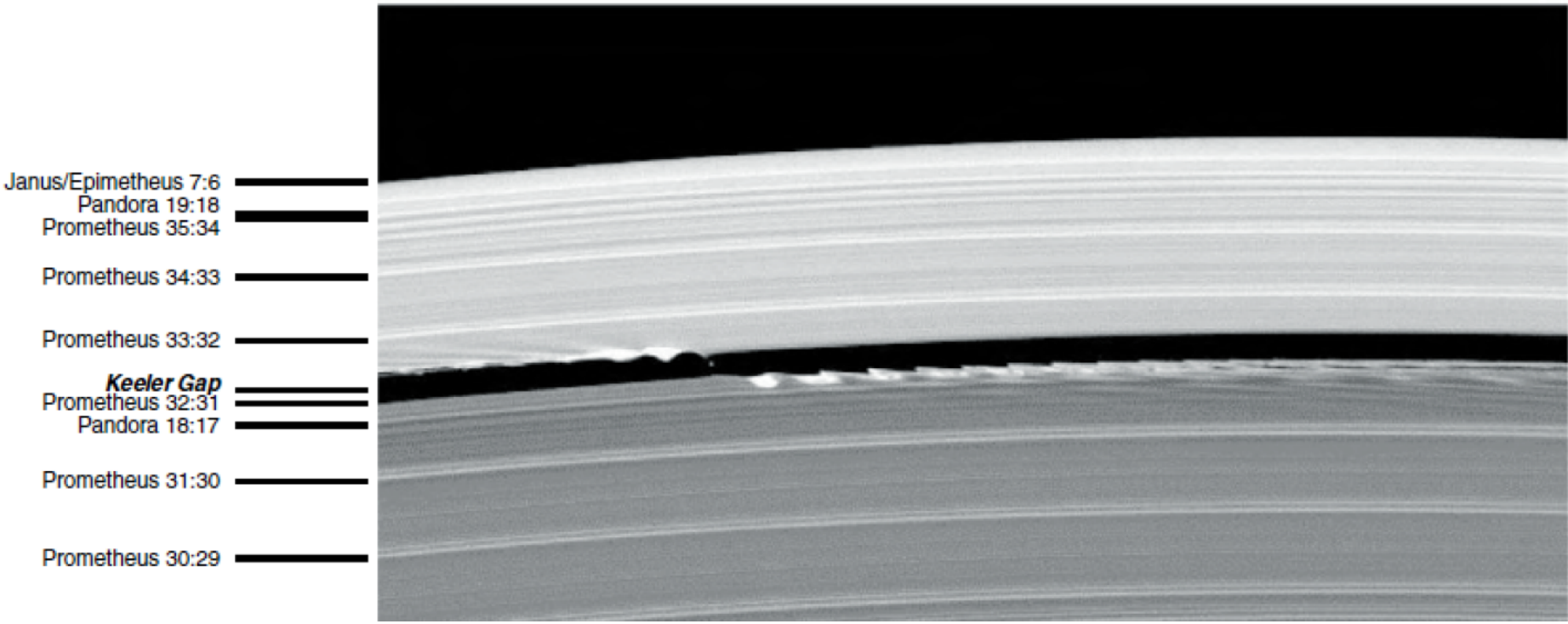


No sólo asteroides

- satélites de Júpiter
- satélites de Saturno
- anillos de Saturno
- satélites de Urano
- asteroides con Júpiter, Marte, Tierra, Venus...
- objetos trans Neptunianos con Neptuno
- Pluton - Neptuno
- cometas - Júpiter
- satélites de Plutón: Styx, Nix, and Hydra
- ...

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Resonancias en anillos

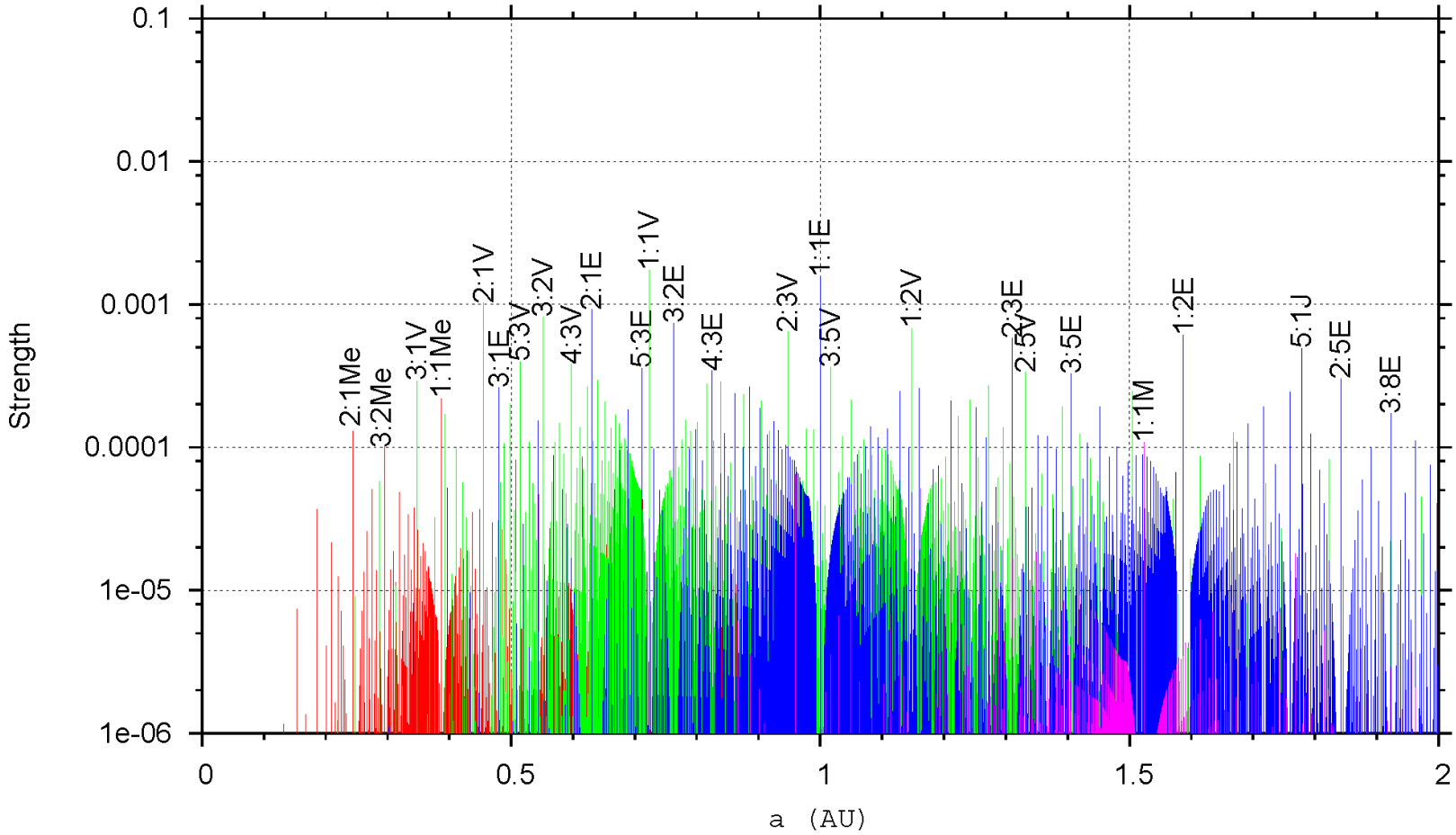


Nuestro trabajo

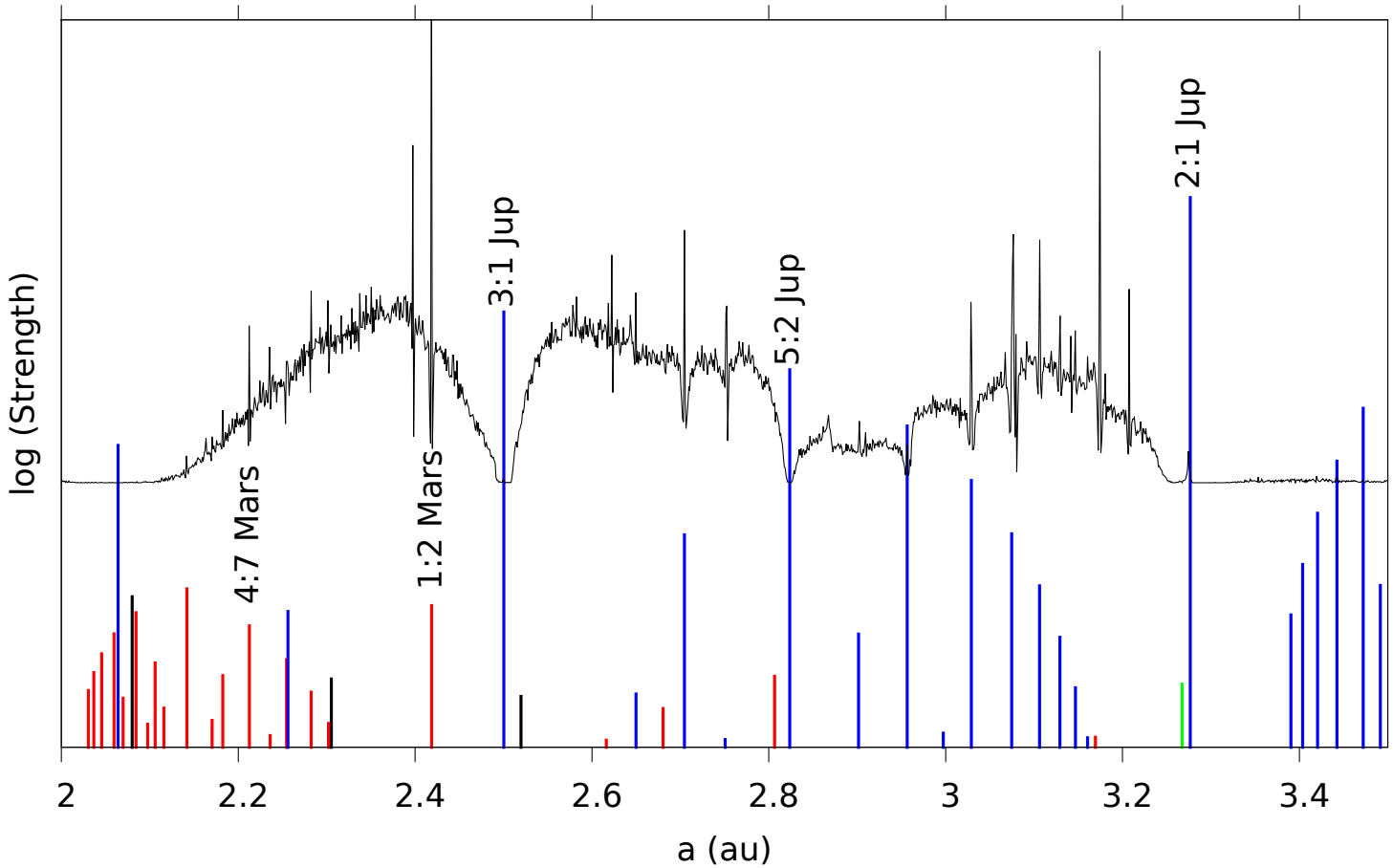
- ¿Cuales son las resonancias mas fuertes?
- ¿Cómo depende la fuerza de las resonancias con (e, i)?
- ¿Cómo depende el ancho en uas de las resonancias con (e, i)?
- ¿Cómo es la evolución orbital dentro de las resonancias?
- Origen de objetos en resonancias retrogradas

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Atlas de resonancias de 0 a 2 ua

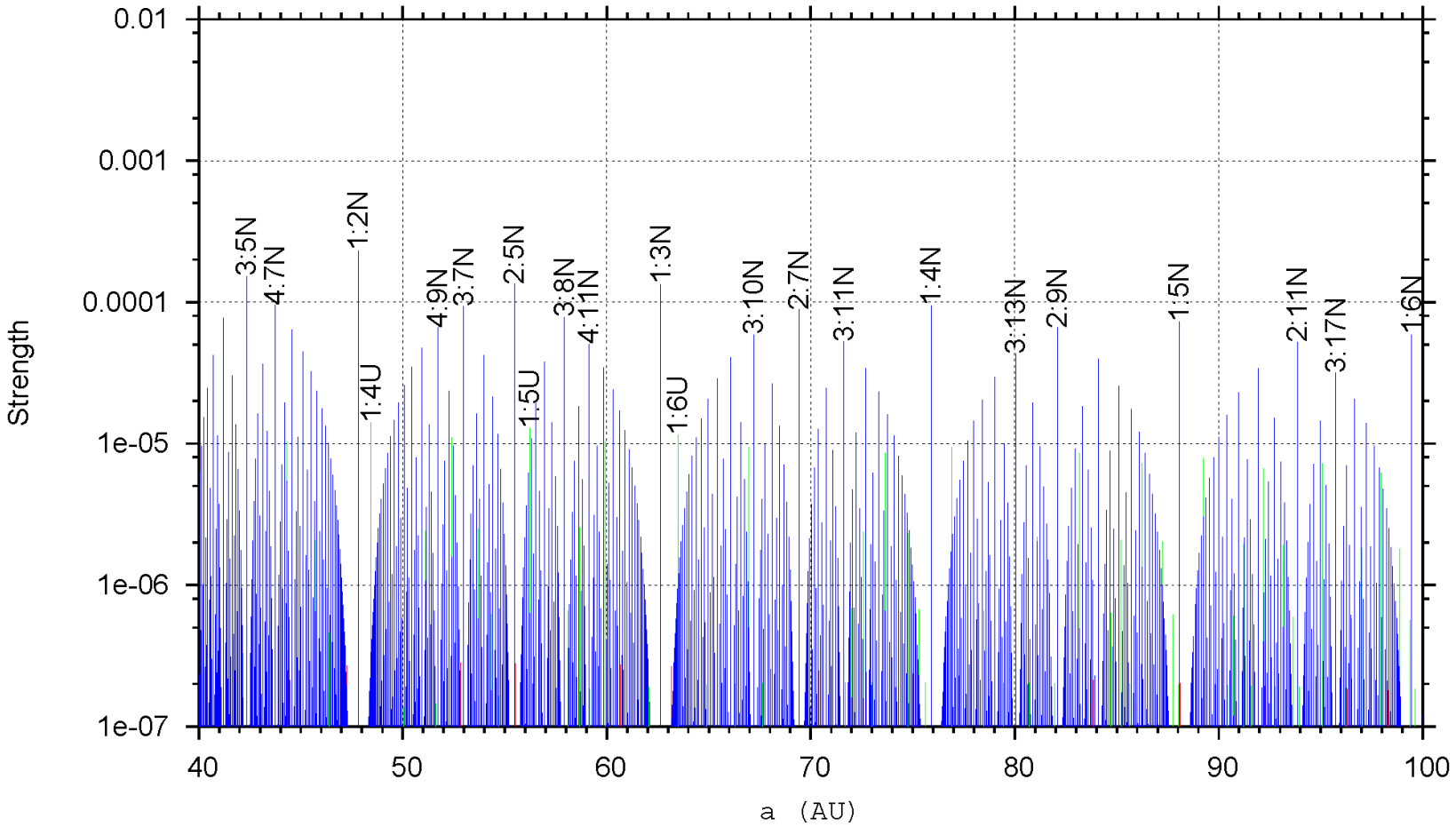


Densidad de asteroides y resonancias



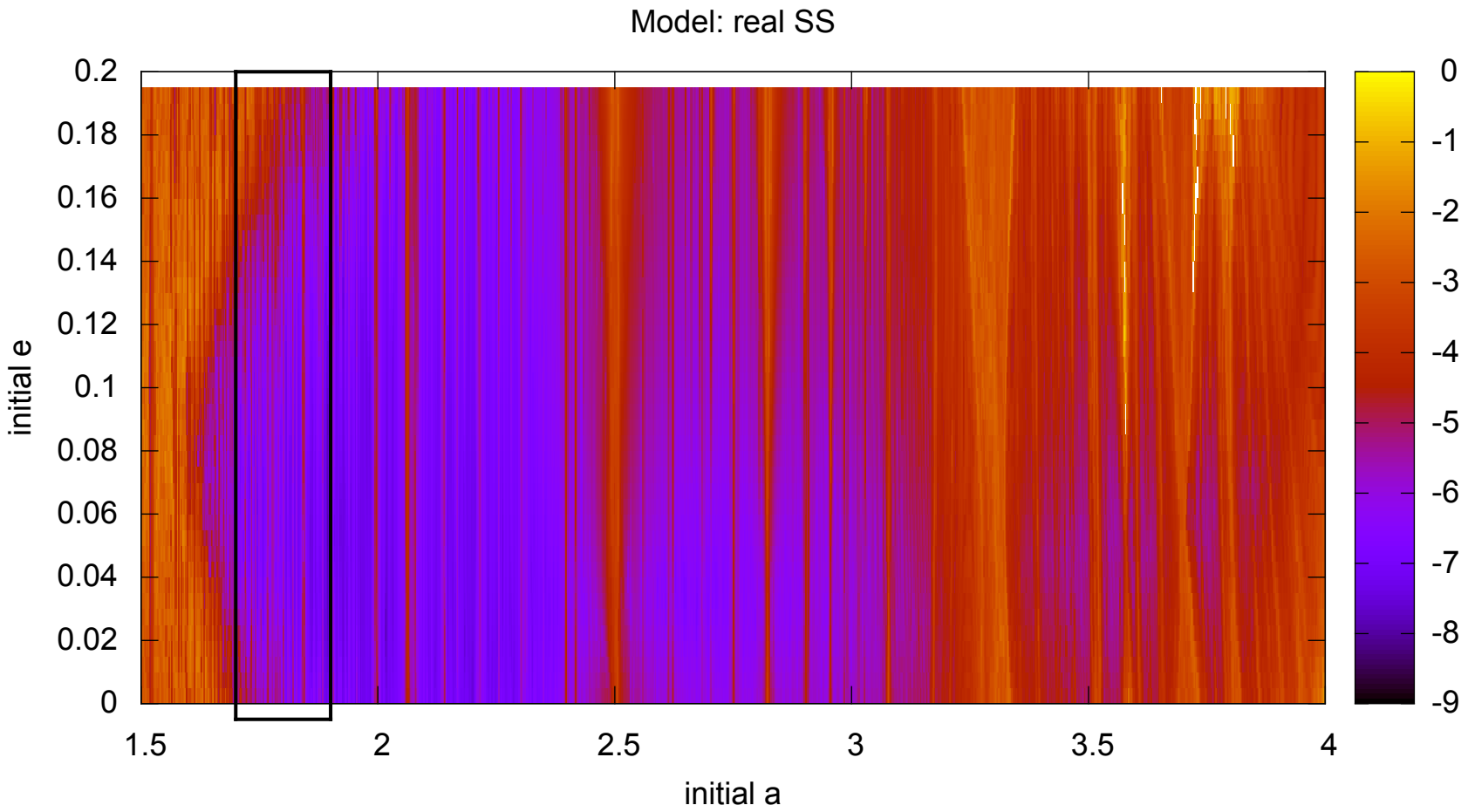
La distribución de asteroides está *esculpida* por las resonancias.

Atlas en la región trans-Neptuniana

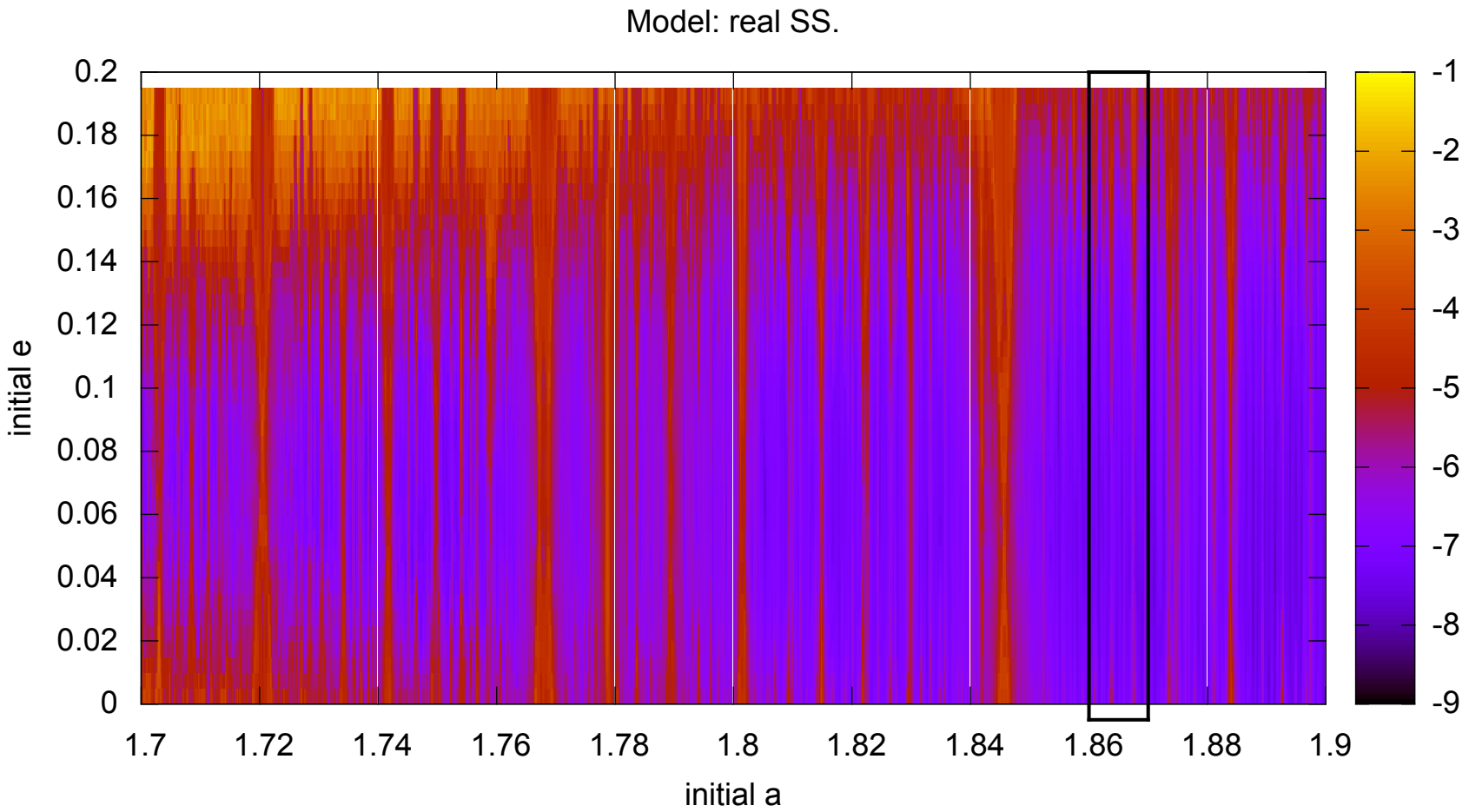


Mapas dinámicos

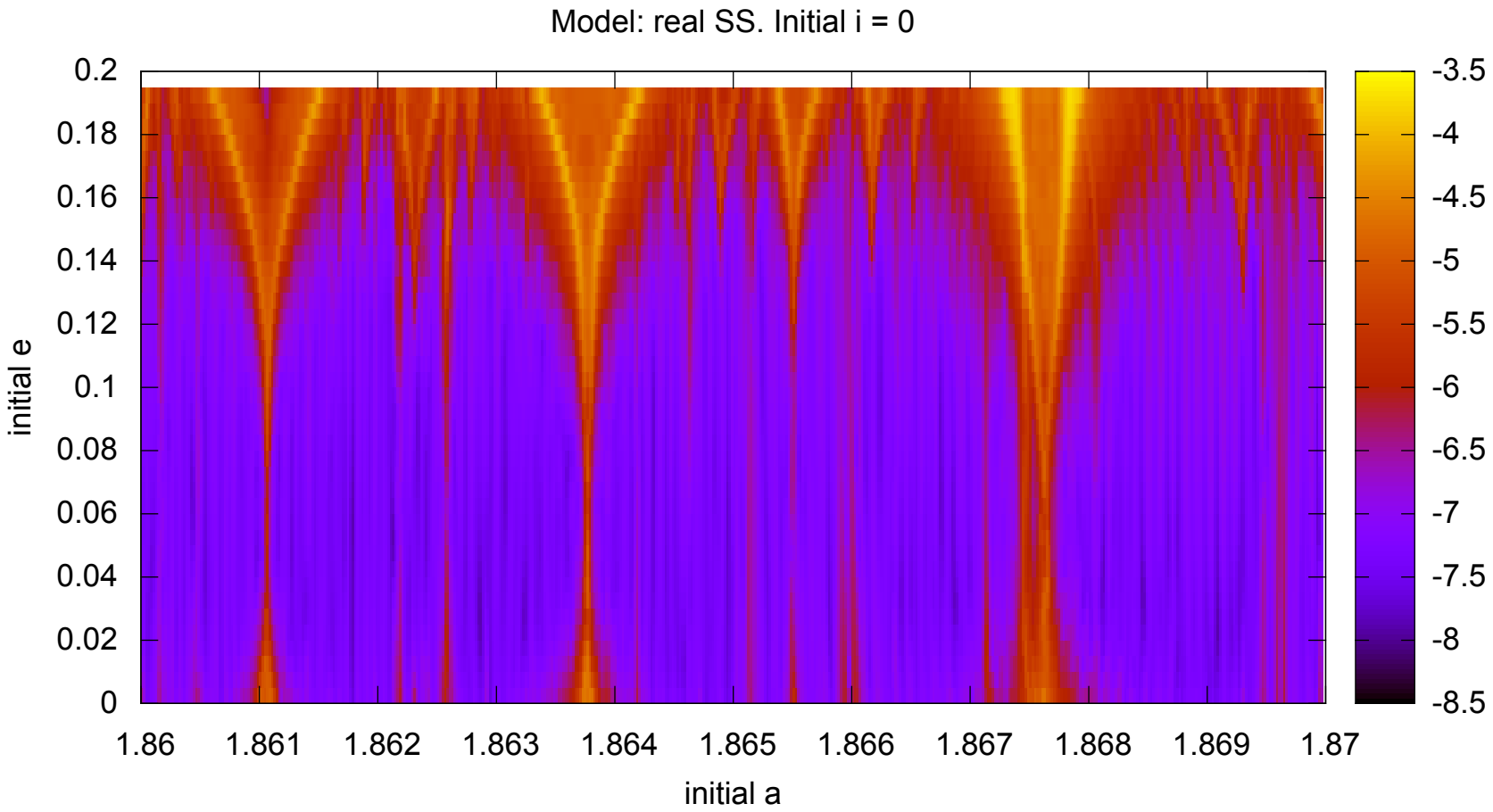
Integramos miles de partículas test y representamos Δa



Zoom 1


Model: real SS.
initial e
0.2
0.18
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
initial a
1.7
1.72
1.74
1.76
1.78
1.8
1.82
1.84
1.86
1.88
1.9
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9

Zoom 2


Model: real SS. Initial i = 0
initial e
0.2
0.18
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
1.86
1.861
1.862
1.863
1.864
1.865
1.866
1.867
1.868
1.869
1.87
initial a
-3.5
-4
-4.5
-5
-5.5
-6
-6.5
-7
-7.5
-8
-8.5

Planetas en resonancia

quasi resonancia Uranus - Neptune:

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

quasi resonancia Saturn - Uranus:

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

quasi resonancia: Jupiter - Saturn

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

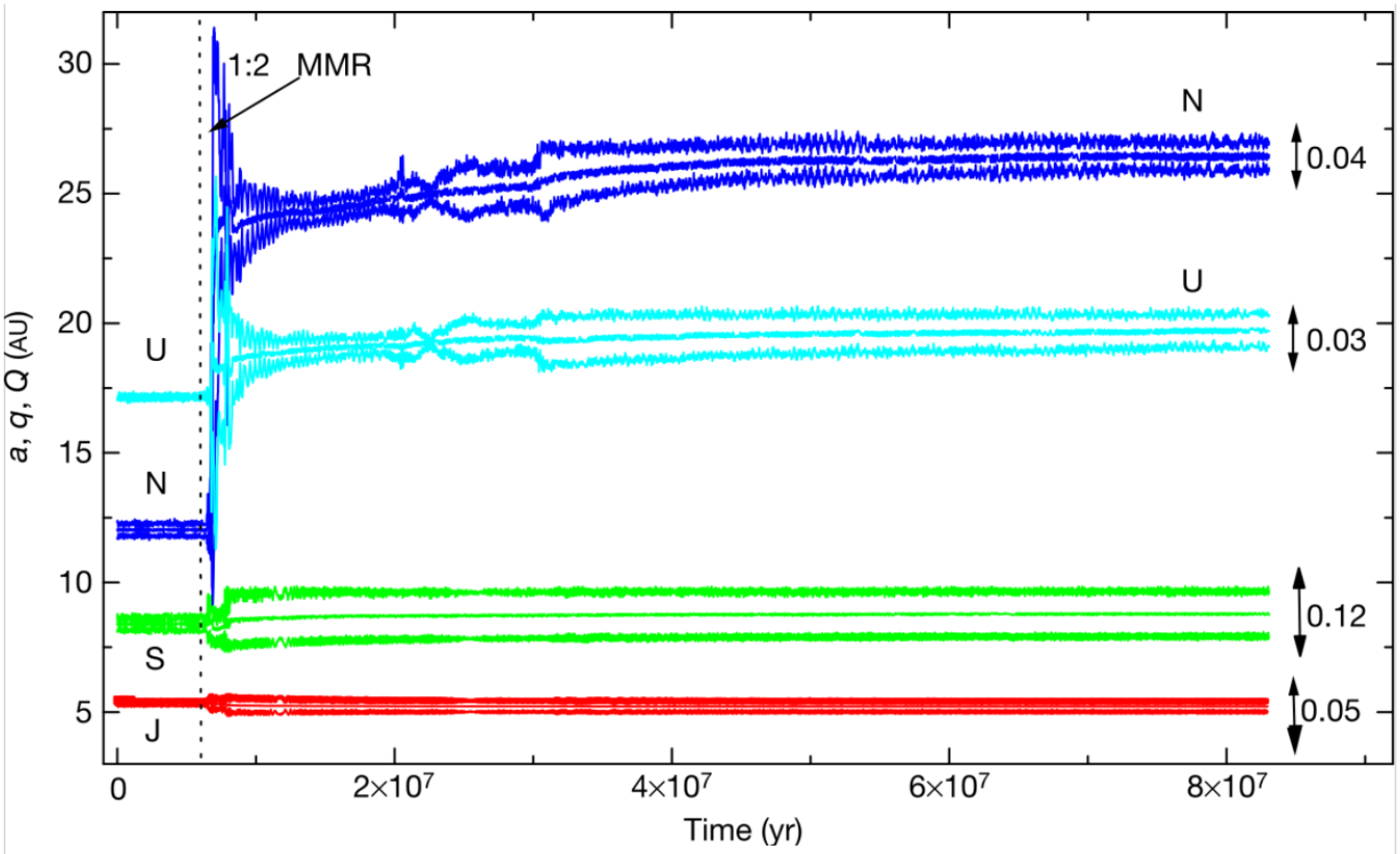
quasi resonancia: Venus - Tierra

$$3n_{Venus} \sim 5n_{Tierra}$$

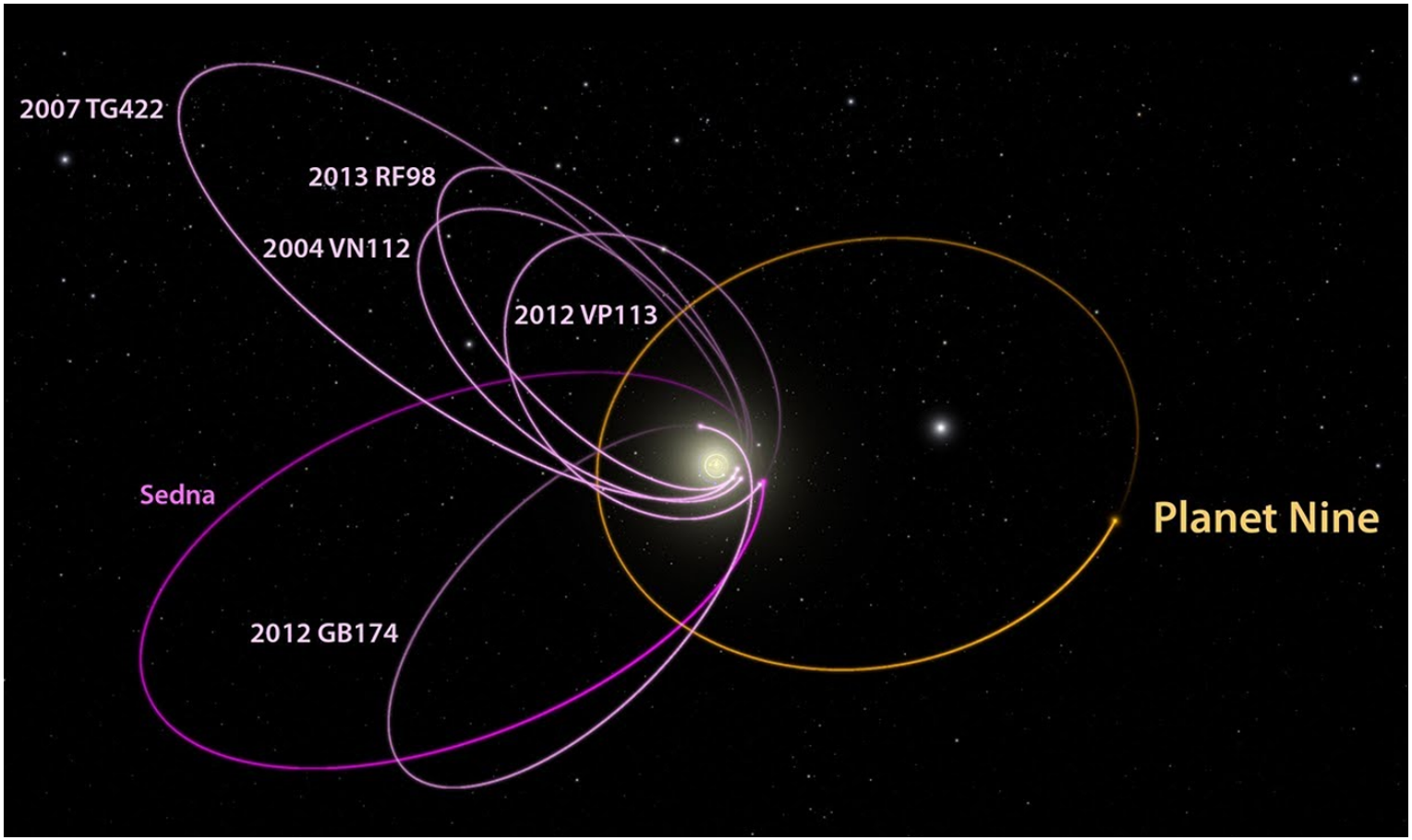
Por qué están próximos de resonancias?
$\mapsto$ **migración orbital** (Fernandez & Ip, 1984) y captura

Modelo de Niza

- Cruce de la resonancia 2:1 por migracion planetaria

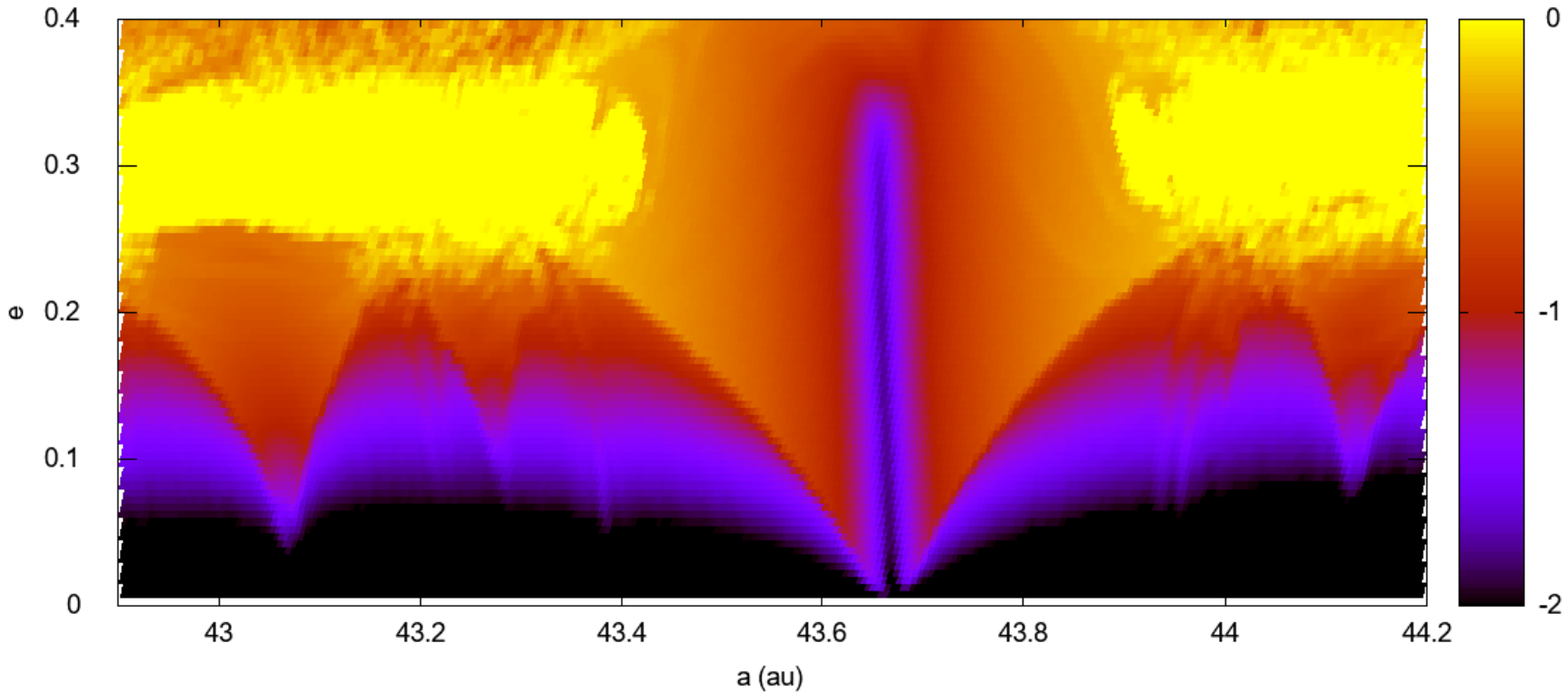


Planeta 9?

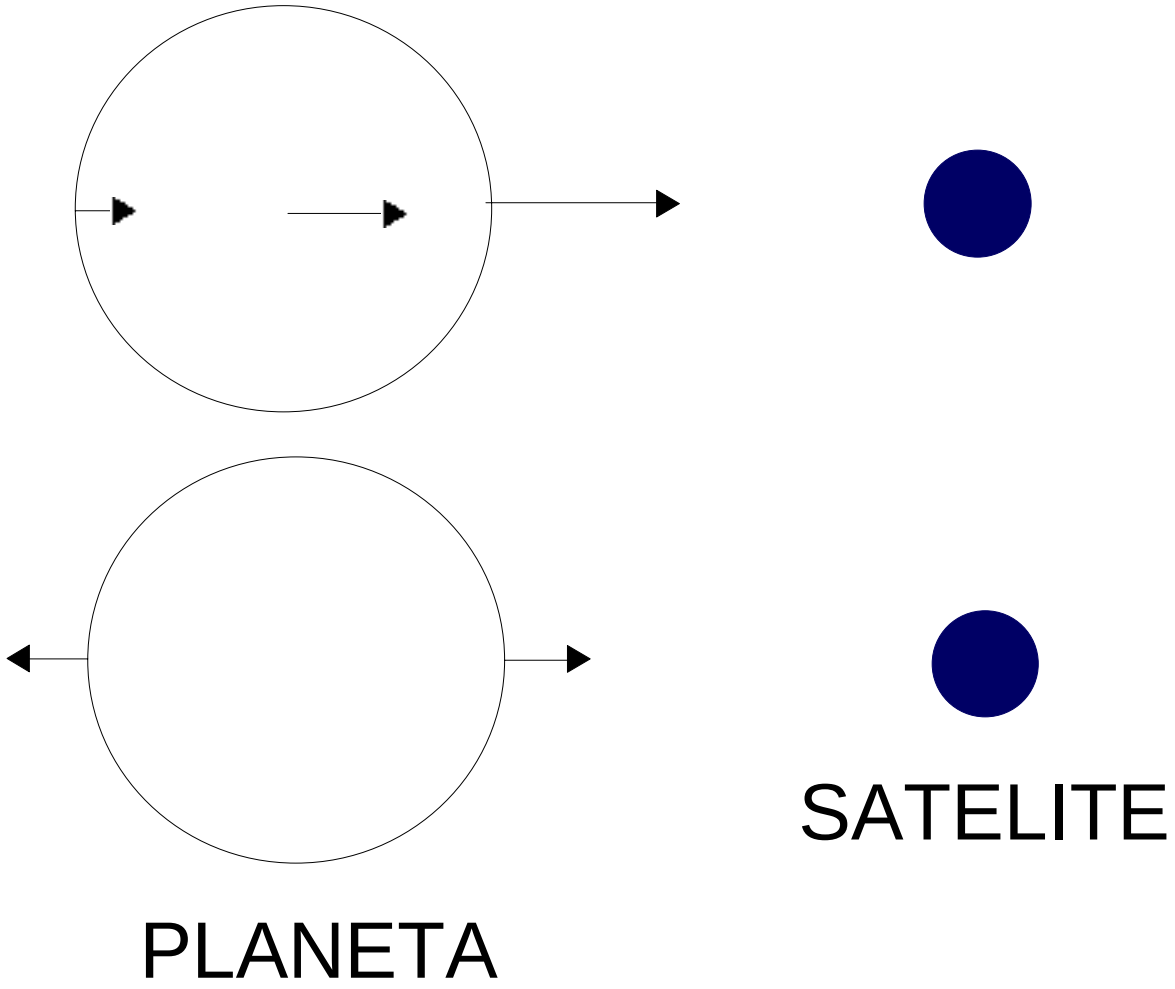

2007 TG422
2013 RF98
2004 VN112
2012 VP113
Sedna
2012 GB174
Planet Nine

Resonancias mas allá de Neptuno

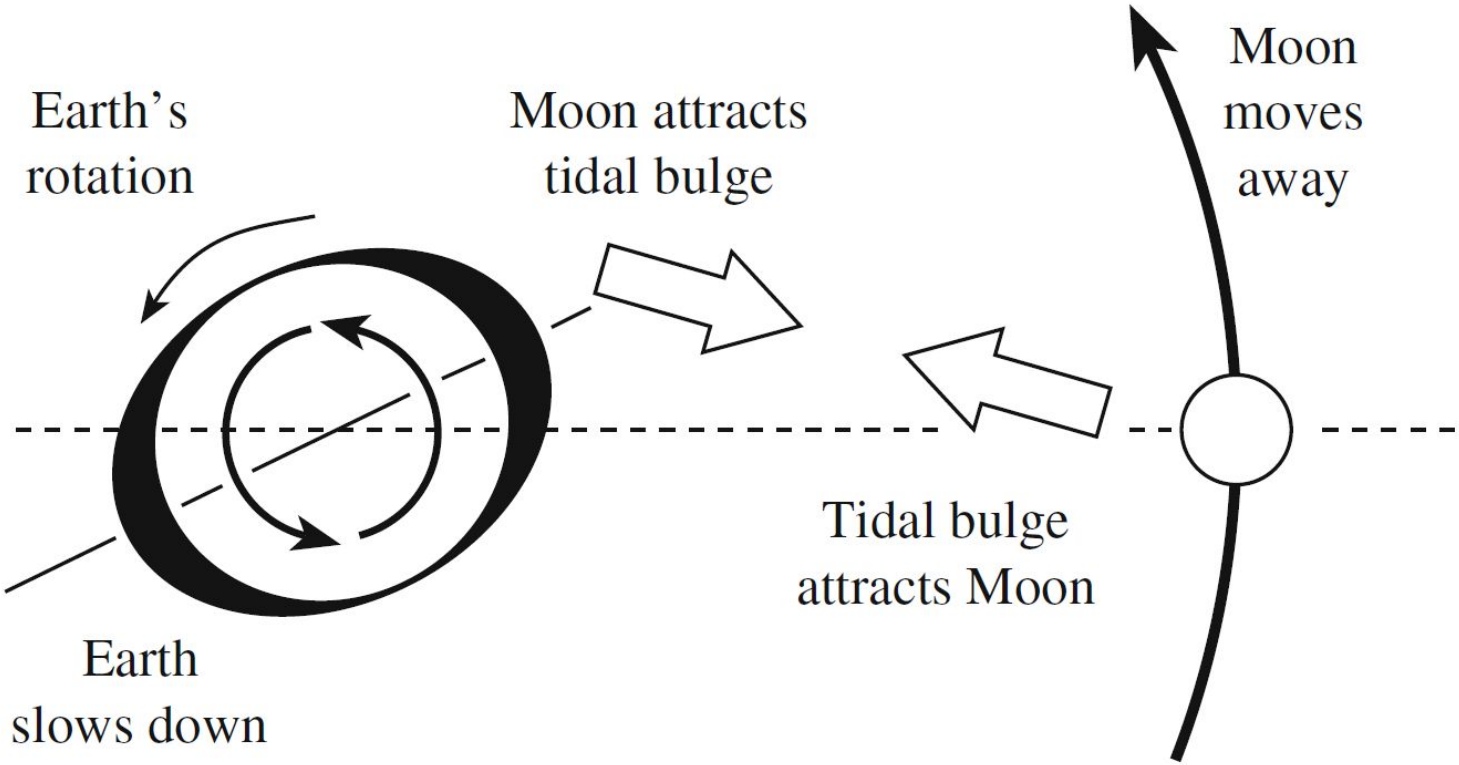
mapa dinámico



Mareas



Transferencia de momento angular



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

Mareas: resonancia spin-órbita

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

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

Resumen

Tipos de resonancias:

- Resonancias de movimientos orbitales (periodos)
- Resonancias seculares (Ω, ω)
- Resonancias spin-órbita

Captura en resonancia:

- Migración: variación de a
- Excitación: crecimiento de e
- Mareas + transferencia de momento angular

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Algunas referencias

- *Efectos dinámicos de las resonancias orbitales en el Sistema Solar*. Gallardo 2016, BAAA 58.
- *Resonances in the asteroid and trans-Neptunian belts: a brief review.* Gallardo 2018, PSS.
- *Notas de Ciencias Planetarias*. Gallardo 2019.
- Integradores básicos: SOLEVORB, ORBE.

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

Gracias

(y cuidado con las conmensurabilidades)

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

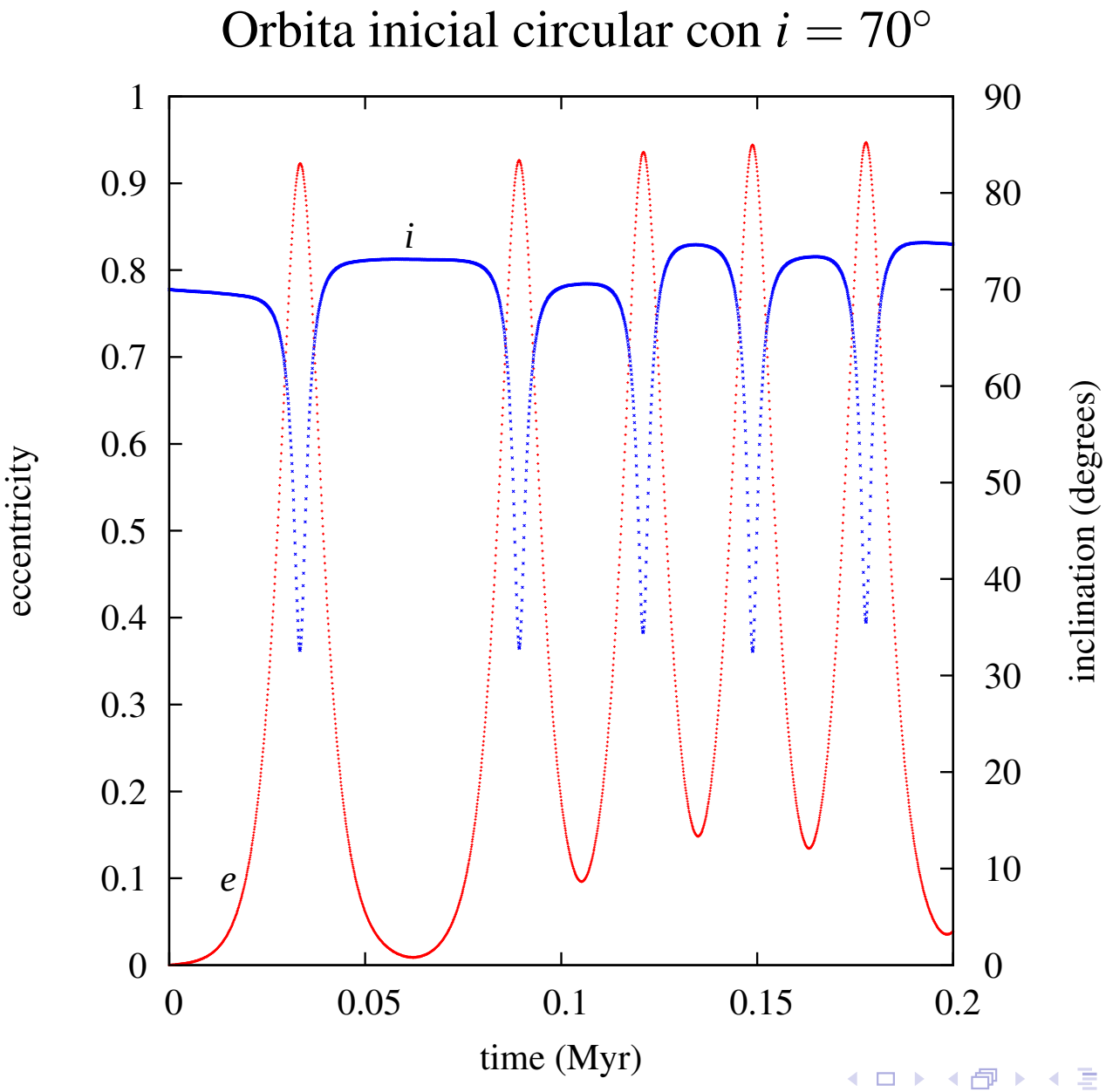
Fuerzas en el Sistema Solar

- **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

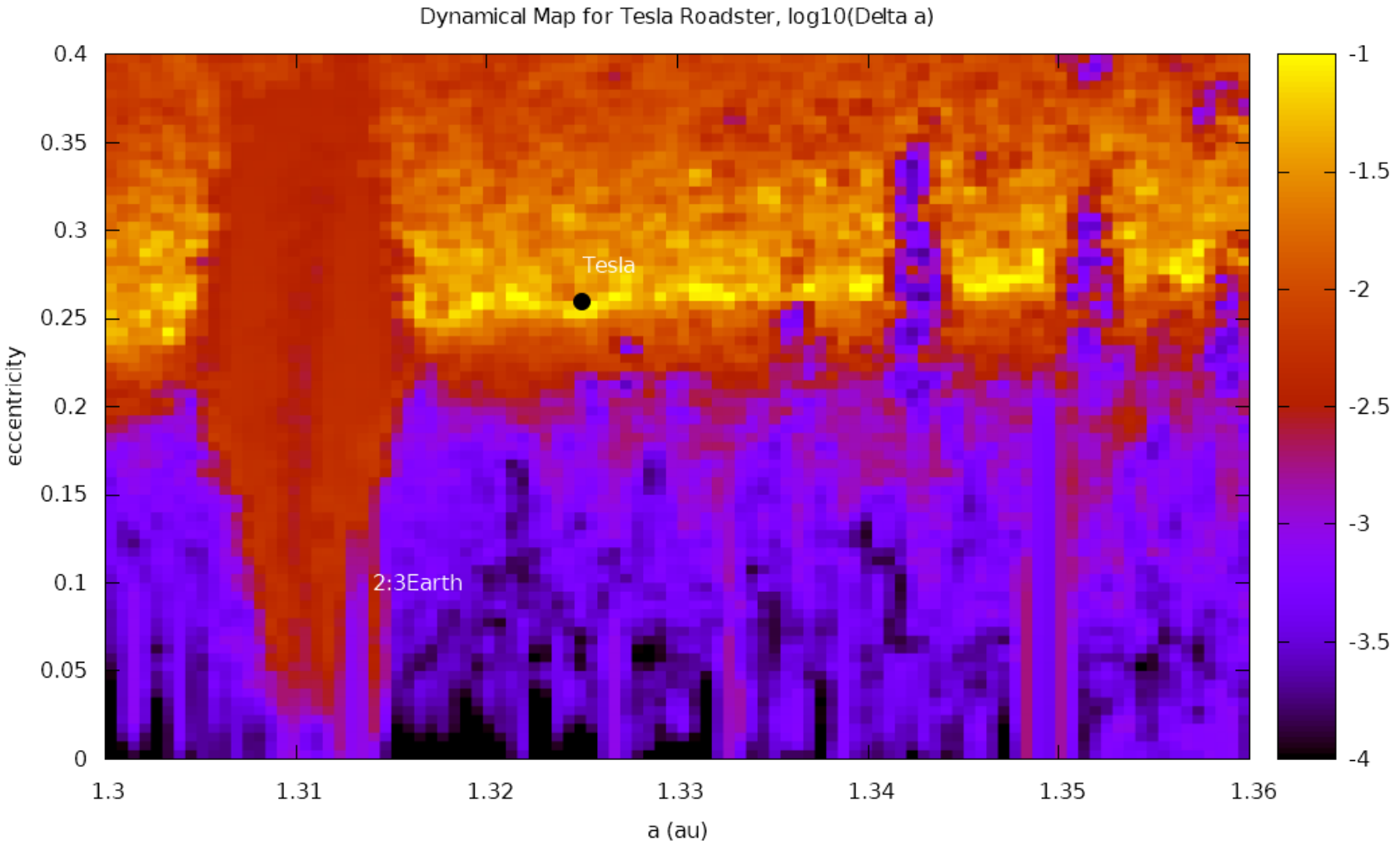
Fuerza total = Sol + perturbaciones

FACULTAD DE CIENCIAS
UDELAR | fcien.edu.uy

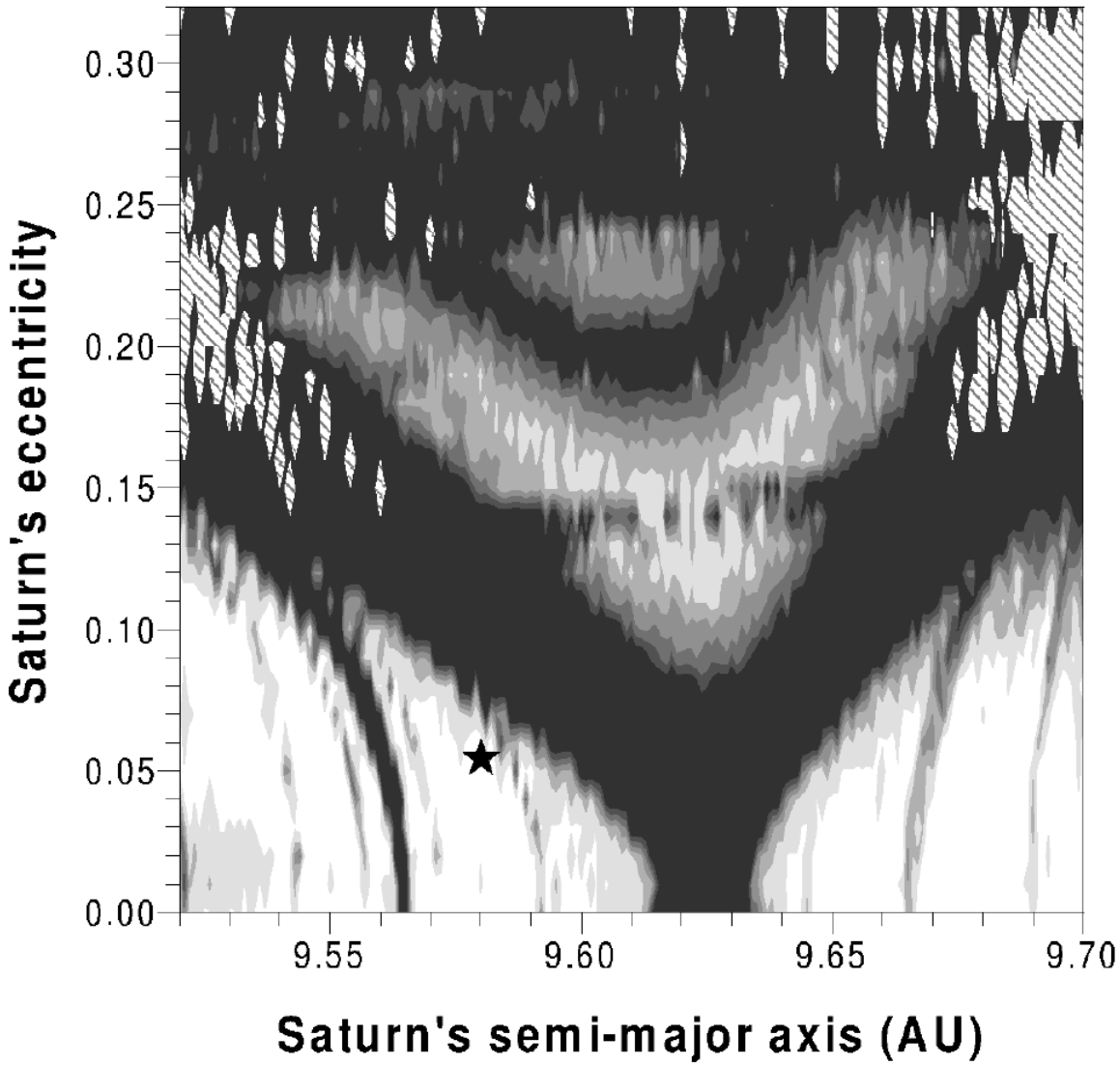
Mecanismo Kozai-Lidov



Mapa dinámico para el auto de Elon



Planetas próximos a inestabilidades



Michtchenko y Ferraz-Mello 2001