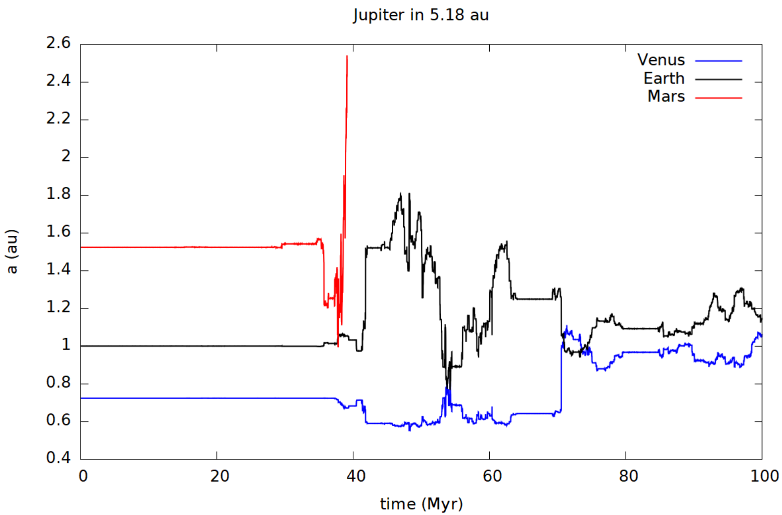
Dinámica Secular y Resonante en Sistemas Planetarios
o
Las Resonancias después de las Resonancias

Proyecto CSIC I+D
https://sites.google.com/view/udelarsistemasplanetarios/

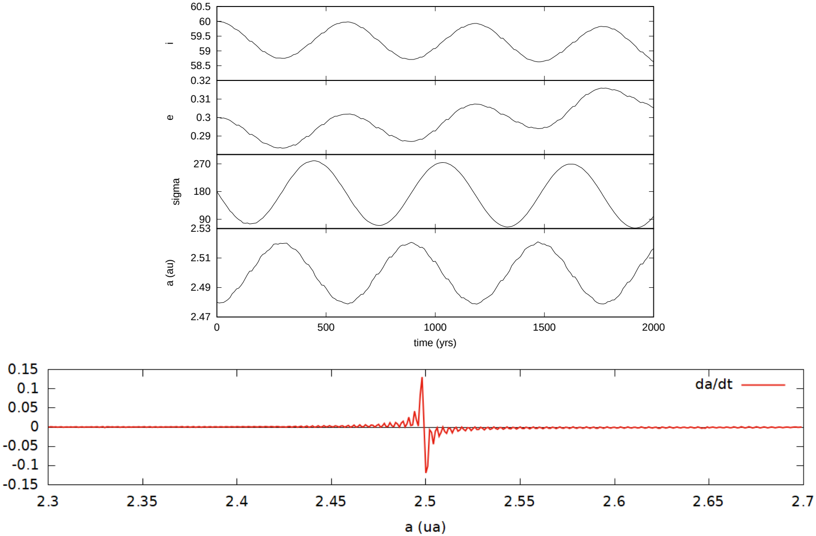
Tabare Gallardo, Facultad de Ciencias, UdelaR, Uruguay

10 de Mayo de 2023

Dinámica SECULAR + caótica



Dinámica RESONANTE



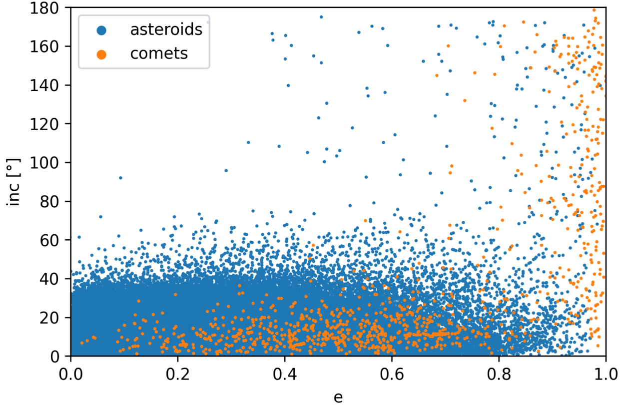
Población objetivo

- dinámica de encuentros: caotica ✗
- dinámica secular: regular, semiejes constantes ✓
- dinámica resonante: todo oscila y evoluciona en grandes escalas de tiempo ✓

Población objetivo: toda órbita excéntrica y/o inclinada de evolución continua

Preguntas que busca responder el Proyecto

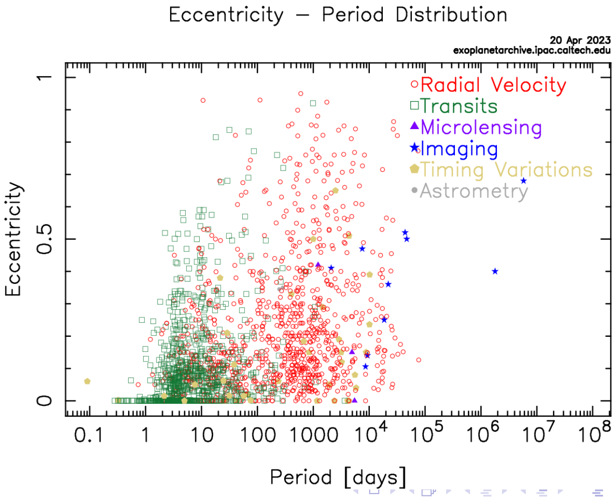
cuerpos menores ($0 < a < 100$ ua)



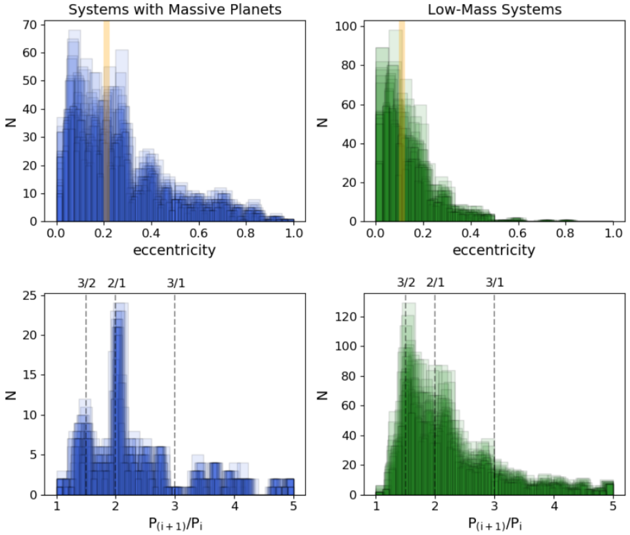
- ¿Cómo es la dinámica secular y resonante de **cuerpos menores excéntricos y/o inclinados** en el Sistema Solar?

- ¿Cómo es la dinámica secular y resonante de **sistemas planetarios excéntricos**?

exoplanetas



Preguntas que busca responder el Proyecto



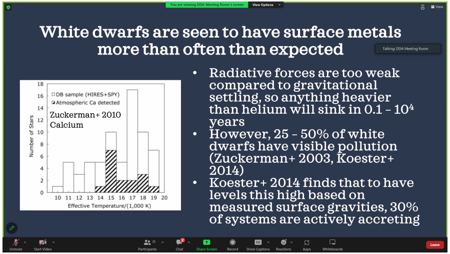
Beaugé and Ferraz-Mello, tbp

- ¿Por qué existen ciertas **resonancias preferidas** en los sistemas planetarios?

Post-main-sequence planetary system evolution

Dimitri Veras

Department of Physics, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK



- ¿Cómo es la dinámica secular y resonante de **cuerpos menores** en sistemas planetarios excéntricos?

Excitación de sistemas planetarios en la etapa post secuencia principal.

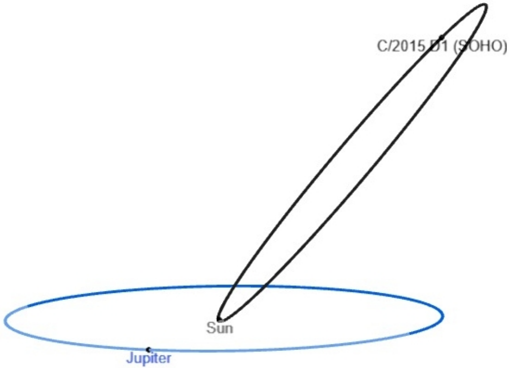
¿Por qué la obsesión con lo excéntrico?

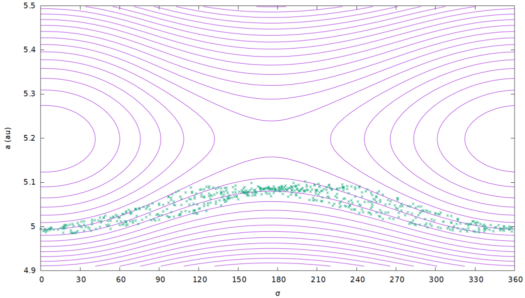
- porque las teorías planas y de baja e están excelentemente desarrolladas
- porque no existían **modelos** generales para resonancias
- ahora existen y son nuestros (Gallardo 2020 y GBG21)
- necesitan ser chequeados
- oportunidad para ser aplicado a todos los objetos que no fueron estudiados: cometas, sungrazers, Planeta 9, coorbitales excéntricos, extrasolares...

MODELO: expresión H, cálculo R, sistema de referencia y variables, solución.

Ejemplo bizarro

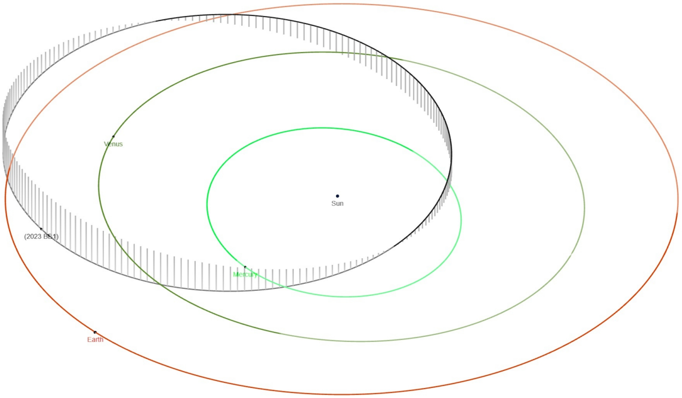
C/2015 D1 en quasi-resonancia 1:1 con Jupiter





Hamiltoniano 1:1 (modelo G20), e integración numérica exacta del objeto.

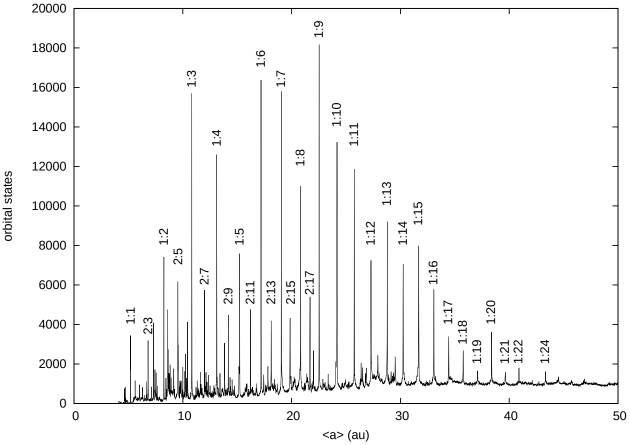
2023 BB1 en resonancia 1:1 con Venus



animacion

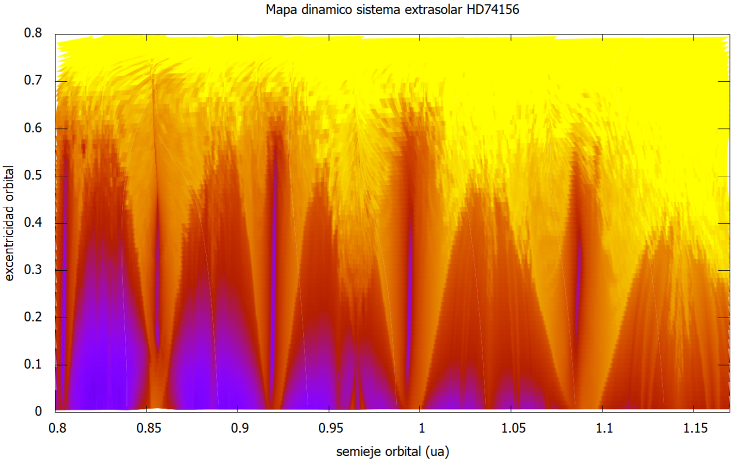
©Nicolas

Histograma de estados orbitales medios de cometas:



Fernandez et al., 2016

Mapa dinámico para HD 74156

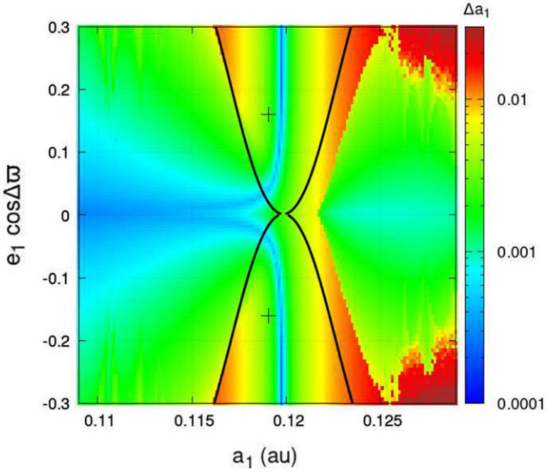


Modelos válidos para alta excentricidad ($e > 0.6$)

	ASTEROIDAL	PLANETARIO
Secular	ZLK circular y excéntrico espacial	ZLK espacial (Naoz, De Elia) y caso plano aplicado a extrasolares (Beauge)
Resonante	G20 (Schubart, Ferraz-Mello, Moons)	GBG21
Secular resonante	caso plano (invariantes adiabaticos, Pons) o planeta circular (Saillenfest)	caso plano con amplitud de libracion 0 (Pons, Beust)

Desafío de modelos espaciales: muchas variables $(\sigma, e, i, \varpi, \Omega)$

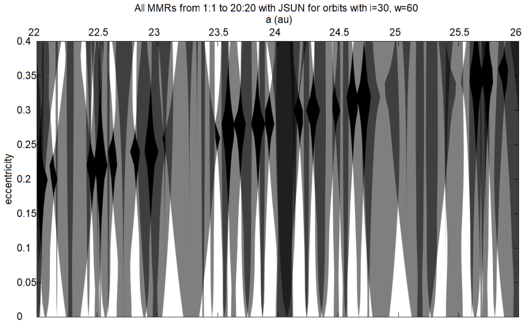
Limitaciones de nuestro modelo resonante

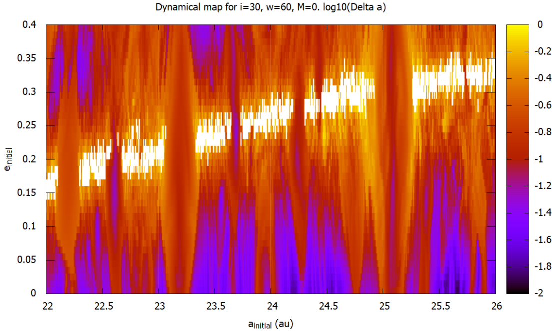


Giuppone et al. 2022

TOI-216
El modelo falla en las resonancias 2:1 y 3:2 cuando $e \sim 0$ en caso plano (ley de estructura)

Orbitas de $i = 30$ entre Urano y Neptuno:





Cronograma

	MES																							
ACTIVIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
resonancias planetarias																								
dinamica secular planetaria																								
dinamica secular asteroidal																								
resonancias asteroidales																								
secular/resonante planetaria																								
secular/resonante asteroidal																								
compra de equipos																								
participacion en RRLAA-UAI																								
participacion en TallerCP																								
participacion en CBDO																								
participacion en SUF																								
participacion en SUA																								
AÑO	2023									2024												2025		
MES	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3

- Sueldos: 2 Ayudantes de 18 meses, 1.031.000 pesos
- Equipos: 110.000 pesos

Integrantes

- Responsable: T. Gallardo
- Ayudantes: J. Pons (planetas) y XX o XY (cuerpos menores)
- Colaboradores: N. Pan (tesis resonancias), E. Viera (tesis Planeta9), A. Rodriguez,
- Potenciales colaboradores: sacrificados estudiantes
- Antecedentes: V. Romero (pasantia), J. Pons (Tesis), V. Abraham (In. Inv.), L. Badano (T. Esp.)...

Dinámica RESONANTE

ASTEROIDAL:

- teorías analíticas especificas para bajas e, i (libros de texto)
- teorías analíticas especificas para i arbitraria y e acotada (Morais, Lei)
- **teoría semi-analitica general Gallardo (2020)** valida para todo (???)

PLANETARIA:

- teorías analíticas especificas para caso plano y bajas e (Batygin, Morbidelli)
- teorías analíticas especificas para caso plano y arbitraria e (desarrollo de Beauge)
- **teoría semi-analitica general GBG (2021)** valida para todo (???)

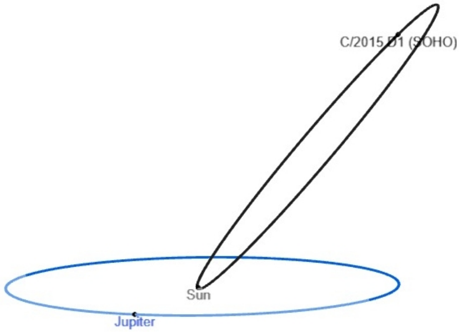
Semi-analitica: formalismo Hamiltoniano pero la función perturbadora (R) es numérica.

ver https://sites.google.com/view/mmresonances/home/literature

- teorías analíticas para bajas e, i (Murray y Dermott)
- teorías semianaliticas para partículas arbitrarias con planetas circulares y coplanares (ZLK)
- teorías semianaliticas para caso plano (Beauge et al.)

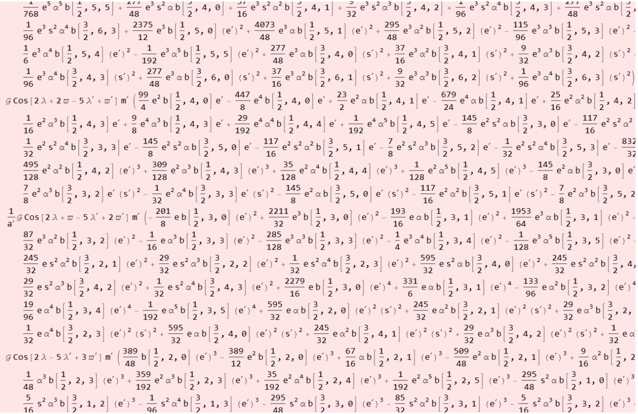
$\Rightarrow$ **teoría semianalitica general** (en desarrollo desde Gauss)

IDEA:



Modelo: elipses materiales que se perturban y deforman.
Ver Notas de Din. Orb. Sec. y Res.

Analítico versus semianalitico



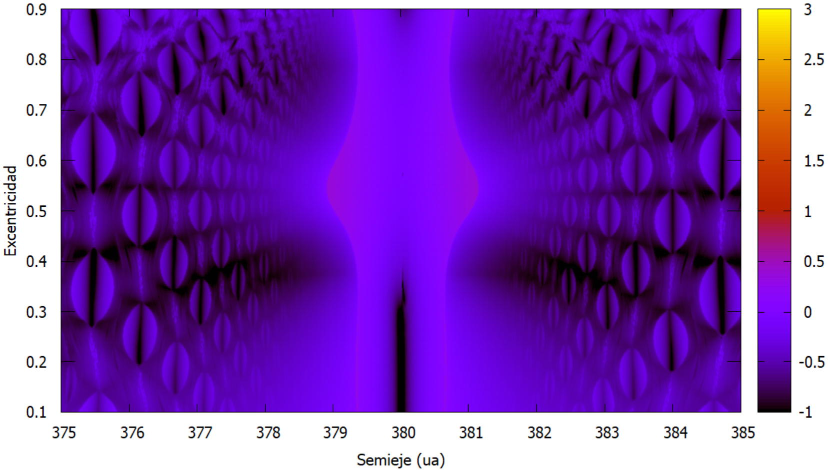
VS

Metodología

- modelo semianalitico **resonante**: chequear, mejorar, aplicar (Tesis N. Pan)
- modelo semianalitico **resonante secular**: Tesis J. Pons, llevar al caso espacial (ZLK resonante)
- modelo semianalitico **secular**: tosco modelo a mejorar, aplicar
  - PROBLEMA: muchos grados de libertad (Tesis E. Viera)

- achatamiento, relatividad, mareas, evolución estelar?
- mapas dinámicos
- mapas de caos
- integraciones (evorb, REBOUND)

Resonancias del Planeta 9



Tesis E. Viera, en preparación

Resonancia planetaria - caos - estabilidad

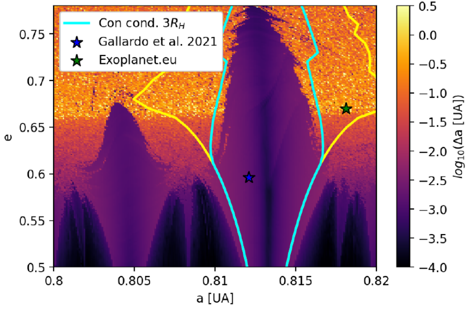


Fig. 7: Curvas teóricas de la resonancia 16:3 sobre el mapa dinámico. Notemos como los encuentros disminuyen la zona estable.

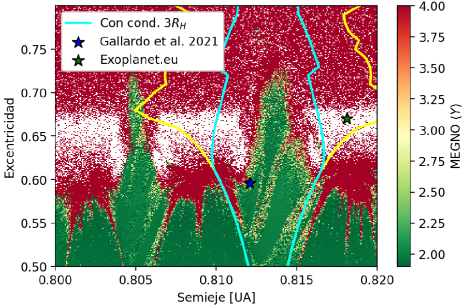


Fig. 8: Mapa de Caos construido con el indicador *MEGNO*. $\langle Y \rangle > 2$ implica evolución caótica.

poster N. Pan, 2022

Evolucion secular de resonancia planetaria

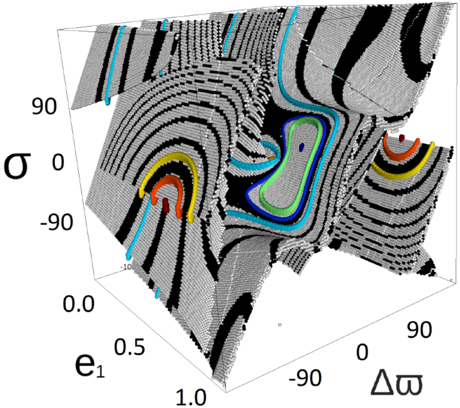


Figura 4.28: Superficie $\mathcal{H}_1$ en la MMR 3:1 comparada con 7 integraciones numéricas (en colores) de 10 kyrs de un sistema con $m_2/m_1 = 5$ y $\mathcal{AM}_{norm} = 0.8$.

Tesis J. Pons, 2022

muchas gracias

siga las novedades en
https://sites.google.com/view/udelarsistemasplanetarios/