

El misterio de los meteoritos metálicos

Tabaré Gallardo

Departamento de Astronomía
Instituto de Física, Facultad de Ciencias (UdelaR)



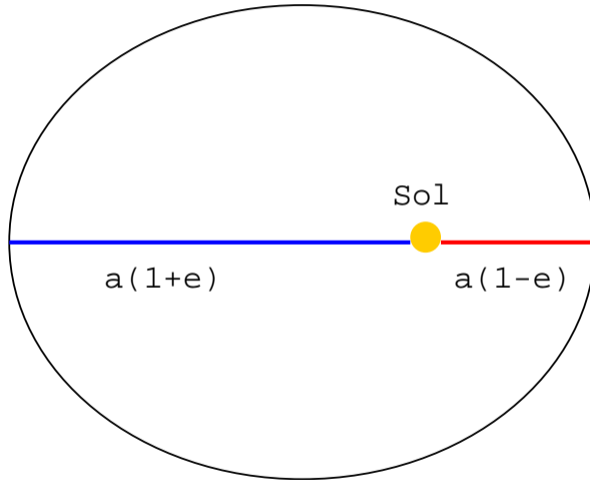
Seminarios de Física, 11 de Setiembre 2023.



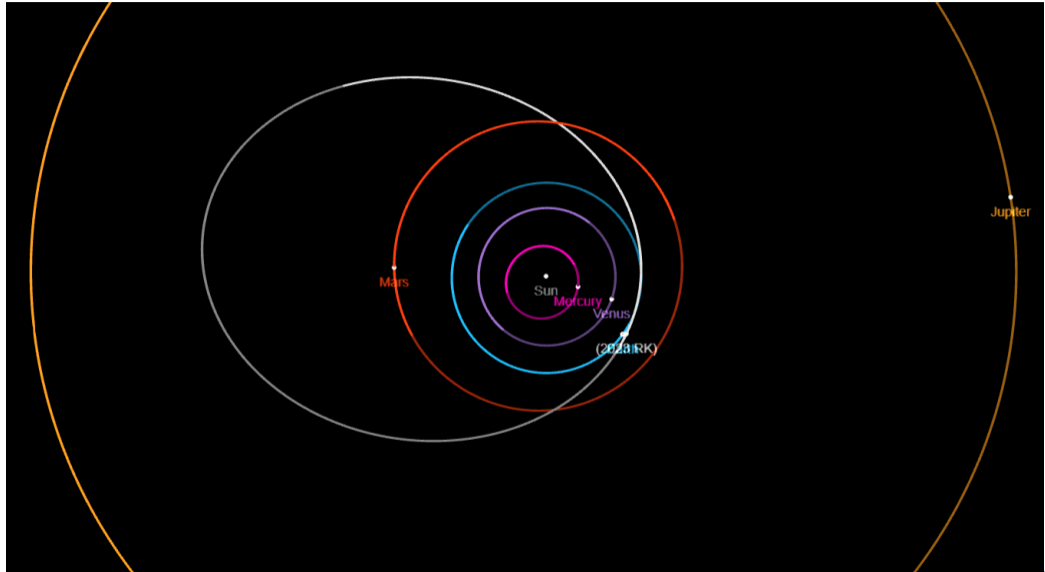
meteorito de San Carlos, 19/9/2015

¿Cómo llegan hasta la Tierra?





Asteroides: órbitas



- **destrucción de asteroide** progenitor por impacto de proyectil
- material interior inicialmente protegido **queda expuesto a los rayos cósmicos**
- evolución orbital: **rutas dinámicas** que excitan las órbitas
- ingreso a la atmósfera terrestre: quemado superficial e **impacto** en la superficie
- descubrimiento
- en el laboratorio: mayor o menor efecto por la exposición a los rayos cósmicos ⇒ **tiempo de permanencia en el espacio** desde la destrucción del progenitor

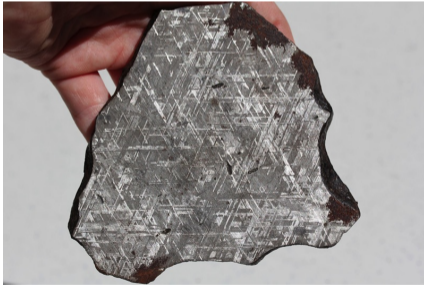
Rayos cósmicos

- núcleos atómicos viajando a velocidades próximas a la de la luz
- originados en remotas regiones del universo
- acelerados por campos magnéticos
- penetran hasta algunos metros en las rocas expuestas
- frenados en la atmósfera terrestre



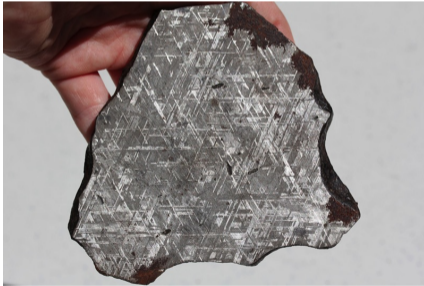
El problema

- meteoritos metálicos presentan exposiciones a los rayos cósmicos de hasta **miles** de millones de años
- meteoritos rocosos presentan exposiciones de hasta **decenas** de millones de años
- ⇒ los metálicos **permanecen mas tiempo** en el espacio



El problema

- la aceleración gravitacional generada por el Sol y planetas **es independiente de las propiedades** de los cuerpos sobre los que actúan (recordar la pluma y el martillo)
- ¿por qué los metálicos tendrían una dinámica diferente a los rocosos?



¿Cómo estudiar el movimiento de los meteoritos?

- **Modelo físico:** efecto gravedad entre los cuerpos del sistema solar

$$m_i \ddot{\mathbf{R}}_i = G \sum_{j=1}^n \frac{m_i m_j}{r_{ij}^3} \mathbf{r}_{ij} \quad (j \neq i, \quad i = 1, 2, \dots, n)$$

- **Sistema de ecuaciones** de movimiento para todos los cuerpos
- **Resolución** de las ecuaciones: no es posible en forma analítica

Integrador : integra (resuelve) las ecuaciones.

Un **integrador numérico** incluye:

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

Cacho de código...

Force 2.0 - [evorb16.for]

File Edit Search View Run Options Tools Window Help



```
2048      PPLAX=0.D0
2049      PPLAY=0.D0
2050      PPLAZ=0.D0
2051 C-----
2052      DO 2400 K=1,NPLA      !
2053      IF (I.EQ.K) GOTO 2400      !      no se autoperturba
2054 C-----
2055      DX1=XPLA (I, 1) -XPLA (K, 1)
2056      DX2=XPLA (I, 2) -XPLA (K, 2)
2057      DX3=XPLA (I, 3) -XPLA (K, 3)
2058      RRP2=DX1*DX1+DX2*DX2+DX3*DX3
2059      RRP3=RRP2**1.5D0
2060      FXP = -DX1/RRP3
2061      FYP = -DX2/RRP3
2062      FZP = -DX3/RRP3
2063      PPLAX=PPLAX+MPLA (K) * (FINX (K) +FXP)
2064      PPLAY=PPLAY+MPLA (K) * (FINY (K) +FYP)
2065      PPLAZ=PPLAZ+MPLA (K) * (FINZ (K) +FZP)
2066      2400      CONTINUE
2067
```



- algoritmos **chequeados/corregidos** a lo largo de los años y por diferentes equipos
- permiten explorar **evolución de órbitas**: planetas, cuerpos menores o naves interplanetarias
- hasta **miles de millones de años** hacia el futuro y el pasado
- probabilidad de **colisión** con planetas y Sol
- probabilidad de **eyección** del Sistema Solar
- predicción de **encuentros próximos** entre cuerpos menores y la Tierra o cualquier planeta

solevorb

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

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, l, 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.

El siguiente archivo contiene la presentacion realizada en el Encuentro de Profesores de Física, setiembre de 2012, Mercedes:

para fines experimentales y educativos

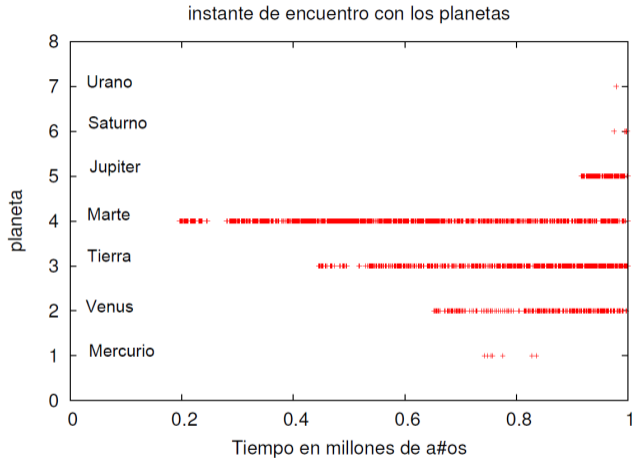
- **PREPARACIÓN del experimento:** archivo de datos de entrada `solevorb.ent`
- **EJECUCIÓN:** `solevorb.exe`
- **ANÁLISIS de resultados:** a través de los archivos generados que muestran la evolución de todos los cuerpos cada intervalos regulares

20 meteoroides ficticios con $a \sim 2.08$ ua , $e \sim 0.1$, $i \sim 5^\circ$

```
solevorb.ent *
***MODELO DE SISTEMA PLANETARIO: 1 (MVTMSUN) o 2 (JSUN)
1
***TIEMPO MAXIMO DE LA SIMULACION EN AÑOS:
1000000.0
***INTERVALO DE SALIDA DE DATOS EN AÑOS:
1000.0
***NUMERO DE CUERPOS MENORES A INTEGRAR:
20
***JD FECHA JULIANA DE LA EPOCA DE LOS ELEMENTOS ORBITALES:
0.0
***ELEMENTOS ORBITALES: N a e i nodo argper anomedia
10 2.08205013 0.10088621 5.006427 3.923790 314.051140 10
11 2.08291934 0.10126168 5.009626 3.885964 313.966879 11
12 2.07996204 0.09998518 5.010652 3.873850 314.484644 12
13 2.07787249 0.09907853 5.033679 3.603931 314.345786 13
14 2.07975851 0.09989866 4.983354 4.198791 313.298259 14
15 2.07879941 0.09948046 5.025260 3.702178 314.436685 15
16 2.08279382 0.10121018 4.987397 4.150316 314.333648 16
17 2.07869461 0.09943518 5.001859 3.977919 313.850908 17
18 2.08008606 0.10003761 4.998783 4.014460 313.811791 18
19 2.08213052 0.10092435 4.989783 4.121771 314.401260 19
20 2.07676947 0.09860002 5.031122 3.633712 314.406856 20
21 2.08183951 0.10079530 5.014678 3.826389 314.240845 21
22 2.07856252 0.09937859 5.000770 3.990853 313.724617 22
23 2.07935865 0.09972563 5.002929 3.965226 313.525119 23
24 2.08182398 0.10078897 5.004127 3.951033 313.862204 24
25 2.07967029 0.09985771 5.005288 3.937273 314.240256 25
26 2.08271269 0.10117232 5.002084 3.975254 313.939236 26
27 2.07666078 0.09856274 5.003765 3.955320 313.147332 27
28 2.07733965 0.09884767 5.028817 3.660605 314.193524 28
29 2.07819965 0.09922046 5.010175 3.879481 314.224243 29
```

corremos el programa y luego...

Analizamos el archivo `encuentr.sal`

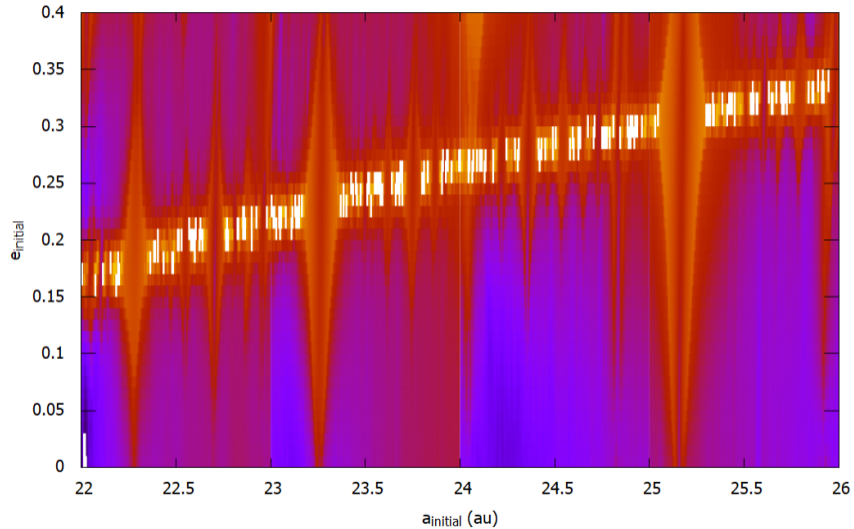


al cabo de 400 mil años hay encuentros con la Tierra



- Resonancias: son **rutas dinámicas** que en “poco” tiempo llevan asteroides desde el cinturón de asteroides a la Tierra

Resonancias





- Resonancias: son **rutas dinámicas** que en "*poco*" tiempo llevan asteroides desde el cinturón de asteroides a la Tierra

pero...

- si la aceleración gravitacional es independiente de la masa **¿por qué los metálicos demoran mas?**

?

- los resultados de los integradores numéricos son confiables
- \Rightarrow **el modelo físico adoptado fue demasiado simple**
- ¿qué otro ingrediente puede estar afectando la física del problema?

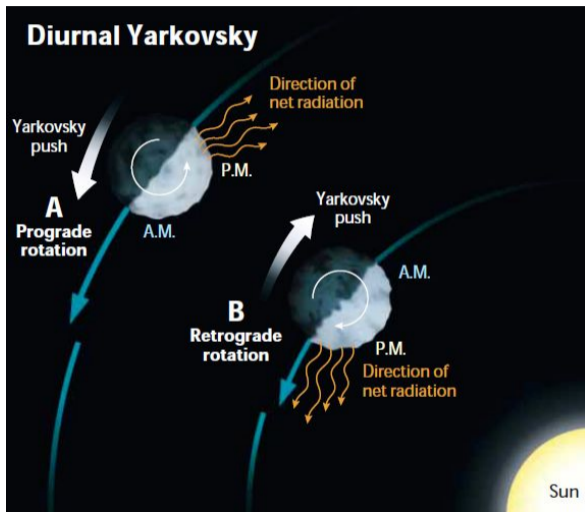
¡Efecto Yarkovsky!



Ivan Osipovich Yarkovsky (1844 – 1902)

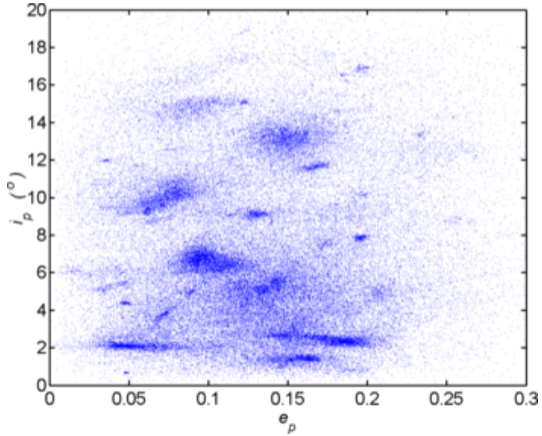
- Ingeniero civil ruso.
- época de la gran crisis de la física
- *"Teoría cinética de la gravitación universal en relación con la formación de los elementos químicos"* (1888).
- Modelo: compresión del éter por los planetas, arrastre del éter por rotación, calentamiento por el Sol, expansión del éter y empuje del planeta.
- Con los ojos de hoy: una teoría disparatada

Variación orbital por Yarko diurno



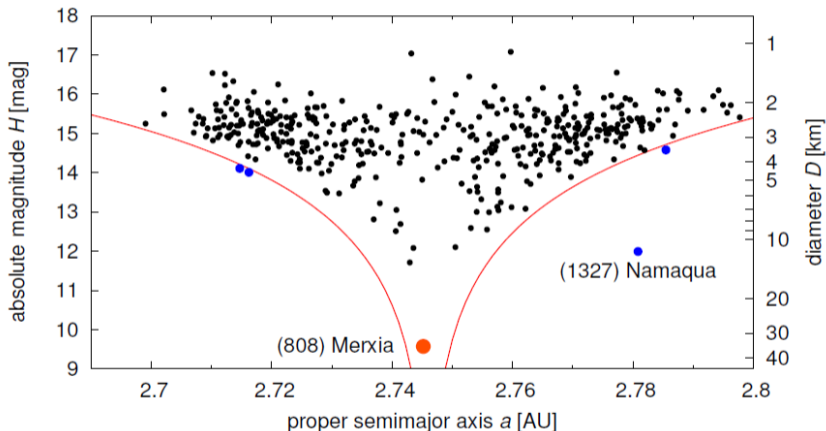
Primera detección: satélite LAGEOS (Rubincam 1987), la perturbación es de 10^{-11} .

Familias de asteroides: producto de colisiones



Difusión de familias por Yarko

datos obtenidos por observación:



Los mas pequeños se dispersan mas que los grandes: se *mueven* mas rápido.

$$a_Y \propto \frac{T^3}{R\rho} \Delta T$$

- rocosos: ρ bajas, ΔT altas (baja conductividad) \Rightarrow gran a_Y
- metálicos: ρ altas, ΔT bajas (alta conductividad) \Rightarrow poca a_Y

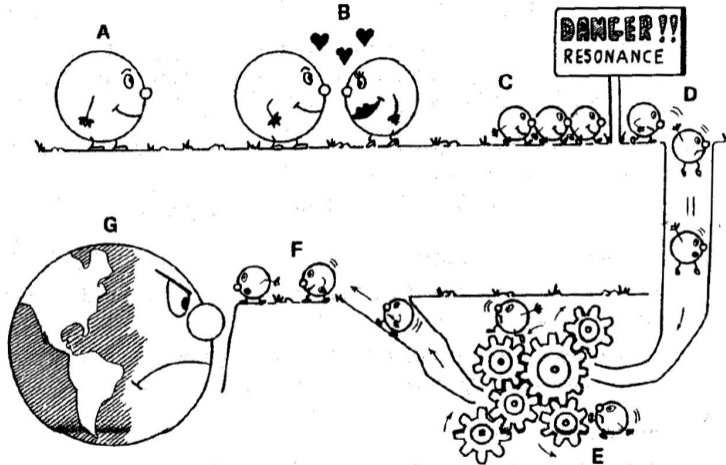
\Rightarrow efecto para los rocosos es mucho mayor

\Rightarrow los rocosos se desplazan mas rápido

\Rightarrow llegan mas rápido a las rutas dinámicas (resonancias)

\Rightarrow menos exposición a los rayos cósmicos

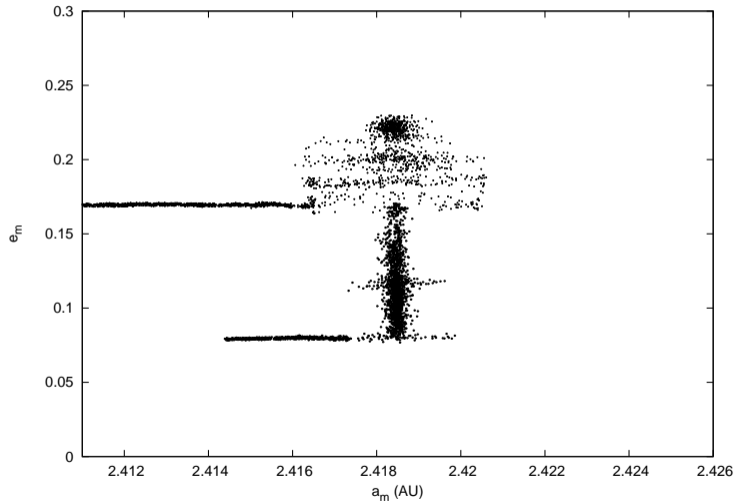
Efecto Yarko + resonancias



famoso cartoon de V. Zappala

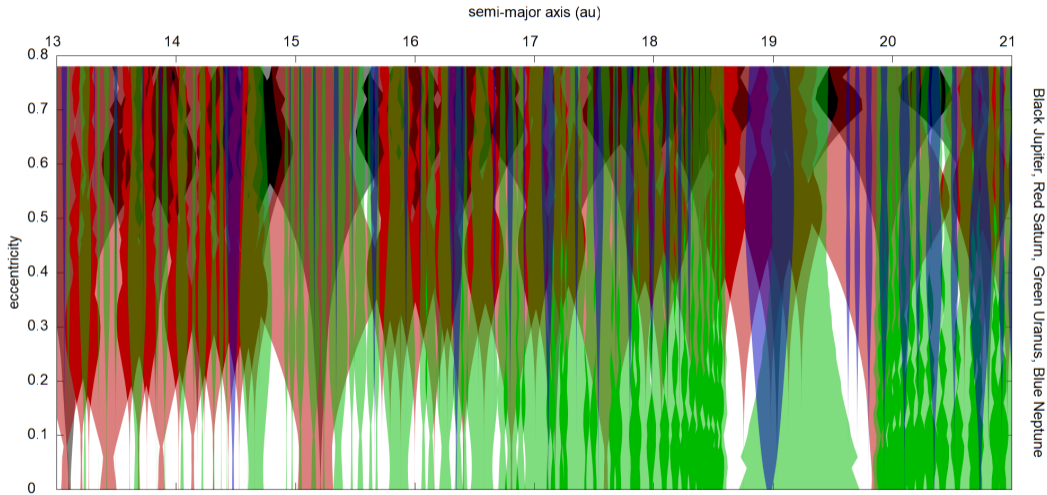
Efecto Yarko + resonancias

Evolución de 2 asteroides ficticios



- modelo muy simple que permite predecir la relevancia dinámica de cualquier resonancia (Gallardo, 2006, 2020)
- hallazgo de una población de asteroides atrapados en una resonancia con Marte (Gallardo, 2007)
- llevados a la resonancia por efecto Yarkovsky (Gallardo et al., 2011)

Resonancias



modelo Gallardo (2020)



- los meteoritos vienen de la región de los asteroides
- existen **rutas dinámicas** rápidas: resonancias
- esas rutas no discriminan por tipo de asteroide/meteorito
- los asteroides son empujados hacia las resonancias por el efecto Yarkovsky
- los pequeños y rocosos son **empujados** mas rapidamente
- es esperable que en las resonancias haya **superpoblación de objetos pequeños y rocosos** (?)



web del proyecto Dinámica Secular y Resonante en Sistemas Planetarios