

Escenarios de formación del planeta enano 2003 EL61 (Haumea)

**Adriano Campo Bagatin^{1,2}, Paula G. Benavidez^{1,2,3}, Jose Luis Ortiz⁴,
Rene Duffard⁴, Audrey Thirouin⁴**

¹Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal,

²Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y la Tecnología. (Universidad de Alicante)

³South-West Research Institute, Boulder (CO, U.S.A.). ⁴Instituto de Astrofísica de Andalucía.

En 2005 se descubrieron dos satélites (Hi'iaka y Namaka) en órbita alrededor del planeta enano 2003 EL61 (Haumea). Un grupo de algunas decenas de TNOs tiene además elementos orbitales similares a los de Haumea. Estas circunstancias han alentado especulaciones acerca de los mecanismos para la formación de este sistema de cuerpos.

Hemos analizado las probabilidades para cada uno de los escenarios de formación propuestos, basándonos en el paquete de simulación numérica de la evolución colisional ALICANDEP (Asteroid-Like Collisional ANd Dynamical Evolution Package'). Este programa ha conseguido reproducir recientemente la mayor parte de los observables para la región de los objetos trans-neptunianos (Campo Bagatin & Benavidez, en esta R.C.), en el ámbito del denominado modelo de Niza (Gomez et al., 2005; Levison et al., 2008). Calculamos las probabilidades para los distintos eventos colisionales propuestos en la bibliografía, a lo largo de las distintas épocas dinámicas descritas por el modelo de Niza, y comprobamos consiguientemente la verosimilitud de los mecanismos propuestos.

Además, proponemos nuevos escenarios alternativos de formación para el sistema de Haumea, basándonos sobre eventos con elevadas probabilidades y sobre otras consideraciones físicas. Estos escenarios se comprueban a parte, por medio de simulaciones numéricas de colisiones (Thirouin et al., en esta R.C.).

Haumea es un planeta enano que rota rápidamente alrededor de su propio eje (Rabinowitz et al., 2006; Thirouin et al. 2010), posee, por lo menos, dos satélites y sus elementos orbitales están relacionados a un grupo de TNOs.

Una colisión catastrófica ocurrida a elevada velocidad relativa ha sido propuesta para la formación de la "familia", de la alta velocidad angular de Haumea y para la existencia de los satélites (Brown et al. 2007; Schlichting and Sari, 2009). La probabilidad de una colisión de ese tipo es muy pequeña y la dispersión de velocidades de los miembros de la supuesta familia es incompatible con una colisión catastrófica. Además, las colisiones catastróficas tienden a disminuir la velocidad angular del cuerpo (Kadono et al. 2009; Takeda and Ohtsuki, 2009), requiriendo una rotación primordial aún mayor que la observada.

Otro mecanismo de formación ha sido propuesto por Leinhardt et al. (2010), en el que dos cuerpos de masas similares, del tamaño de unos 1300 km, tendrían colisión rasante, reproduciendo así las principales características del sistema de Haumea. La probabilidad para este tipo de colisión es también muy baja, sobretodo si se pretende preservar la "familia", lo cual implicaría que el suceso habría ocurrido en el periodo sucesivo a la inestabilidad dinámica correspondiente a la época del Late Heavy Bombardment.

Por estos motivos, proponemos mecanismos alternativos para la formación del sistema de Haumea, a partir de colisiones con probabilidades elevadas, y los comprobamos por medio de simulaciones numéricas por medio del programa de N-cuerpos PKDGRAV (Richardson, 1994). Las simulaciones intentan reproducir los observables físicos de Haumea y de sus satélites, al mismo tiempo que la existencia de la "familia" de cuerpos cuyos elementos orbitales están relacionados con Haumea.

- Haumea.

- Masa: $(3.966-4.046) \times 10^{21}$ kg (Ragozzine and Brown, 2009)
- Periodo rotación (T): 3.92 h (Rabinowitz et al., 2006)
- Elementos orbitales: $a=43.132$ A.U., $e=0.195$, $i=28.22^\circ$ (Classical Disk)

- Satélite Hi'iaka. (Ragozzine and Brown, 2009)

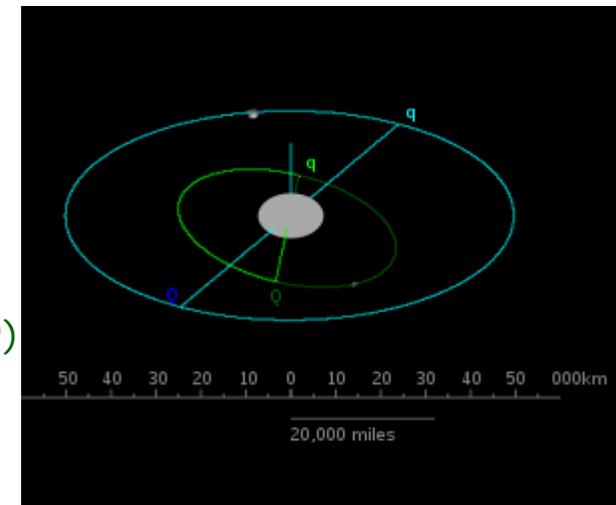
- Masa: $(1.68-1.90) \times 10^{19}$ kg
- Semi-eje mayor orbital: 49680-50080 km
- Periodo orbital: 49.38-49.54 d

- Satélite Namaka. (Ragozzine and Brown, 2009)

- Masa: $(0.3-3.3) \times 10^{18}$ kg
- Semi-eje mayor: 25570-25750 km
- Periodo orbital: 18.27-18.28 d

- Cuerpos relacionados espectroscopica y dinámicamente. ("La familia") (Ragozzine and Brown, 2007)

- 1996 TO66; 2003 UZ113; 2002 TX300; 2005 RR43; 2003 OP32; ...



■ **Brown et al. (2007)**

- ❑ Colisión entre 2 cuerpos: $D_1 \sim 1500$ km and $D_2 \sim 1000$ km.
- ❑ $V_{rel} = 3$ km/s
- ❑ Un único evento forma 2 satélites y la "familia".

❑ Probabilidades colisionales:

a) Formación en el disco interno, antes de la fase LHB: < 1.2
(+ la familia habría tenido que emigrar *entera* al disco clásico durante la fase LHB ...)

b) Formación en el disco clásico, antes de la fase LHB : $< 10^{-4}$.
Sobreviviría la familia al LHB?

Supervivencia durante la fase LHB $\sim 1/100 \rightarrow$

Familia inicial 100 x masa $\rightarrow \sim 2$ masas de Haumea!!

\rightarrow Impacto entre cuerpos mayores \rightarrow Probabilidades todavía inferiores.

c) Formación en el disco clásico después de la fase LHB $< 0.2 \times 10^{-3}$.

❑ Problema añadido:

Velocidades de dispersión de los miembros de la familia ~ 140 m/s,
incompatibles con las vel. de fuga de Haumea (> 550 m/s)

■ Leinhardt et al. (2009)

- ❑ Colisión tipo “graze and merge”: dos cuerpos $D \sim 1300$ km colisionan con un alto parámetro de impacto (0.6-0.65) y vuelven a reaccumularse parcialmente .
- ❑ $V_{rel} = 0.8-0.9$ km/s.
- ❑ Un único evento forma 2 satélites y la “familia”.

❑ Probabilidades colisionales antes de la fase LHB:

Formación en el disco clásico antes: **Probable**. Podrían haber ocurrido algunos events de ese tipo (1-3).

Supervivencia de la familia ?

- Supervivencia durante la fase LHB $\sim 1/100$
- Familia inicial 100 x masa actual → ~ 2 masas de Haumea!!
- **Se requiere un tipo de impacto diferente**, ya que “graze and merge” no podría producir ese resultado.

- ❑ Probabilidad colisional después de la fase LHB $< 0.6 \times 10^{-4}$.

❑ Problema añadido:

Velocidades de dispersión de los miembros de la familia ~ 140 m/s, incompatibles con las vel. de fuga de Haumea (> 550 m/s)

- Schlichting and Sari (2009)

- Colisión "à-la Brown" (a vel. rel. ~ 0.5 km/s) forma un satélite de 530 km.
- El satélite se fragmenta después de la fase LHB y se forma la "familia".

- Probabilidades colisionales:

- a) Formación en el disco interno, antes de la fase LHB: $< 5\%$
(+ la familia habría tenido que emigrar entera al disco clásico durante la fase LHB ...)
- b) Formación en el disco clásico, antes de la fase LHB: $< 10^{-3}$.

Supervivencia del satélite a las colisiones
durante la fase LHB: **2-10 %**

Probabilidades colisionales de fragmentar el satélite
después de la fase LHB: **10-80%**.

- Problemas adicionales:

- 1) Colisiones con pérdida de masa tienden a reducir el spin (Takeda et al., 2009)
- 2) Colisiones que forman satélites no forman primarios con formas alargadas. (Canup, 2006)

1) n colisiones sub-catastróficas, cada una con energía E/n , equivalen a un único evento de fragmentación con energía E (Housen, 2009).

→ Formación de un cuerpo reacumulado: el “proto-Haumea”.

- Prob. De que haya “grupos de eventos” que fragmentan (sin pérdida de masa eyectada) un cuerpo adecuado (en la fase pre-LHB): **10-24 %**

($N(d)dN \sim D^{-5}dD$ → Los pequeños proyectiles son muchísimo más numerosos que los grandes)

- Prob. of fragmentar el manto → cuerpo diferenciado con un núcleo + manto fragmentado: **1**

(~miles de grupos de tales eventos. Fase pre-LHB)

2) Formación de un proto-satélite

a) **Colisión sobre el "proto-Haumea"** por parte de un pequeño proyectil ($<0.05 M_H$): se forma un satélite (con poca pérdida de masa) + se mantiene un spin alto.

Prob.: **3 - 32%** (depending on rel.vel.)

b) **Fisión del "proto-Haumea"** inducida por un aumento de momento angular aportado por una colisión de un pequeño cuerpo ($0.02-0.05 M_H$).

Se forma el proto-satélite.

~1 evento posible in la fase post-LHB.

3) Formación de Hi'iaka, Namaka y la "familia".

a) **Fragmentación del proto-satélite.** Prob. colisión: ~1%

b) **Fisión del proto-satélite** tras el proceso de fisión 2b o inducida por el mismo proceso, sobre el proto-satélite.

■ Conclusiones

- ❑ Escenarios de **fragmentación catastrófica directa** para la formación del sistema de Haumea tienen serios **problemas**.
- ❑ Proponemos un escenario hasta 100 veces más probable:
 - 1) **Colisiones sub-catastrófica múltiples** (Housen, 2009) **para formar un proto-Haumea** (reacumulado o diferenciado).
 - 2) **Formación de un proto-satélite** (*ver Thirouin et al.*).
 - a) **Colisión con baja ratio de masa proyectil/blanco** ($\sim 1/20$) **sobre el proto-Haumea**.
 - b) **Fisión** inducida por **transferencia neta de momento angular por medio de una colisión** de un cuerpo de masa $1/50$ del proto-Haumea en rápida rotación ($T \sim 4$ h).
 - 3) **Fragmentación o fisión del proto-satélite**, creando el sistema de satélites (Hi'iaka y Namaka) y la "familia".