

## Estudo da Dinâmica de Hippocamp: Futuro Cenário Ressonante 13:11.

Victor Hugo Mota,<sup>1</sup> Tadashi Yokoyama,<sup>2</sup> Marcos Tadeu dos Santos,<sup>3</sup> João Pedro Fagionato Agostinho<sup>4</sup>

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP Rio Claro.

Hippocamp, anteriormente conhecido como S/2004 N 1, é uma lua muito pequena de Netuno, a menor entre as atuais que orbitam o planeta. Similar a outros satélites de Netuno, a origem de Hippocamp parece ser muito complicada: acredita-se que essa lua seja o resultado do material re-acrecido proveniente da grande colisão sofrida por Proteus.

Evidências dessa colisão são baseadas na grande cratera Pharos vista na superfície de Proteus. Certamente, essa grande colisão ejetou quantidade mais do que suficiente de detritos que se aglutinaram formando Hippocamp. Atualmente, os semi-eixos maiores de Hippocamp e Proteus são, respectivamente: 105283 km e 117647 km, de modo que essa clara proximidade Hippocamp-Proteus é considerada uma consequência do mecanismo de formação de Hippocamp. Note que a relação entre esses semi-eixos maiores é muito próxima à ressonância 13:11. Devido ao efeito das marés, Proteus está se afastando de Netuno, enquanto Hippocamp, quase não será afetado já que sua massa é insignificante. Portanto, este sistema está envolvido em uma evolução convergente em direção à ressonância 13:11.

Exemplos de ressonâncias que reúnem pequenas luas foram encontrados pela primeira vez em Saturno, onde o par de objetos já está capturado em uma ressonância de primeira ordem específica. Neste trabalho, usaremos o sistema Hippocamp-Proteus, considerando a futura ressonância de segunda ordem 13:11. Confirmamos que indícios desta suposta ressonância será encontrada em cerca de 18 milhões de anos. Ambas as excentricidades do par envolvido são muito pequenas: 1.e-5 (Hippocamp) e 4.7e-4 (Proteus). Portanto, considerando os dados de [1], nossas simulações mostram que a captura permanente pode não ocorrer. Utilizamos a formulação descrita por [2] e [3] para simular a migração de Proteus para o exterior do sistema de satélites de Netuno.

Nossas simulações foram realizadas utilizando o integrador numérico RADAU15, e as equações principais que regem nossa simulação foram as mesmas descritas por [4], onde:

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}}_i = & -\frac{G(m_0 + m_i)}{r_i^3} \vec{r}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n Gm_j \left( \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_j^3} \right) \\ & + G(m_0 + m_i) \nabla_i U_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n Gm_j \nabla_j U_j \end{aligned} \quad (1)$$

Testamos diversas combinações de argumentos ressonantes de segunda ordem usando diferentes velocidades de evolução de maré. Alguns dos argumentos podem mostrar librações temporárias, no entanto, nenhum deles aparenta resultar em captura permanente, sendo que o máximo tempo em libração se limitou a apenas aproximadamente 1 milhão de anos.

<sup>1</sup>victor.mota@unesp.br

<sup>2</sup>tadashi.yokoyama@unesp.br

<sup>3</sup>mt.santos@unesp.br

<sup>4</sup>j.agostinho@unesp.br

A Figura 1 mostra a dinâmica de Hippocamp quando é temporariamente capturado pela ressonância 13:11 com Proteus, além da libração do ângulo ressonante  $\phi$ .

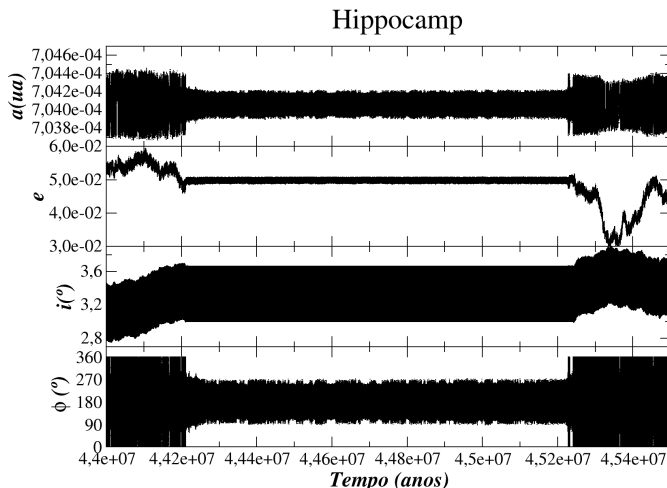


Figura 1: Alguns dos elementos orbitais de Hippocamp, como: semi-eixo maior (u.a.), excentricidade, e inclinação (graus), além do ângulo ressonante  $\phi$  (graus). Fonte: Figura de autoria própria.

O ângulo  $\phi$  da figura 1 é dado por:

$$\phi = 13\lambda_p - 11\lambda_h - 2\varpi_h. \quad (2)$$

Onde  $\lambda_p$ ,  $\lambda_h$ ,  $\varpi_h$  representam respectivamente a longitude média de Proteus, longitude média e a longitude do pericentro de Hippocamp.

Algumas das diversas simulações realizadas resultam em interessantes escapes de Hippocamp, com indícios de grande instabilidade por volta de 70 milhões de anos. Este fato é esperado devido à contínua migração de Proteus em direção a Tritão, que implicará no colapso do sistema.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

- [1] Marina Brozović et al. “Orbits and resonances of the regular moons of Neptune”. Em: **Icarus** 338 (2020), p. 113462. ISSN: 0019-1035. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.113462.
- [2] Francois Mignard. “The evolution of the lunar orbit revisited. I”. Em: **Moon and Planets** 20 (1979), pp. 301–315. DOI: 10.1007/BF00907581.
- [3] Adrián Rodríguez Colucci e Sylvio Ferraz-Mello. “Evolução orbital de planetas quentes atribuída ao efeito de maré”. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2010.
- [4] Valéry Lainey, Luc Duriez e Alain Vienne. “New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter-I. Numerical integration of elaborated equations of motion”. Em: **Astronomy & Astrophysics** 420.3 (2004), pp. 1171–1183. DOI: 10.1051/0004-6361:20034565.