

## Introdução

A hipótese atualmente mais aceita da origem da Lua, é a de ela ter se formado a partir de restos gerados por uma grande colisão entre a proto-Terra e um proto-planeta de tamanho similar a Marte, conhecido como Theia (Hartmann e Davis, 1975) (Fig. 1). Simulações mostraram que, se este impacto aconteceu nos últimos estágios de formação da Terra, pode-se reproduzir a falta de ferro na Lua, as massas da Terra e Lua, e o momento angular atual do sistema Terra-Lua (Canup e Asphaug, 2001) (Fig. 1). Para tal, a colisão deve ter ocorrido de modo peculiar. O ângulo entre os vetores velocidades da Terra e de Theia deve ser pequeno, e as magnitudes destes vetores devem ser similares. Assim sendo, foi proposto que os corpos estariam compartilhando a mesma órbita, isto é, a Terra e Theia seriam coorbitais, de modo que a velocidade de impacto seria baixa e o impacto sutil (Belbruno e Gott, 2005) (Fig. 2).

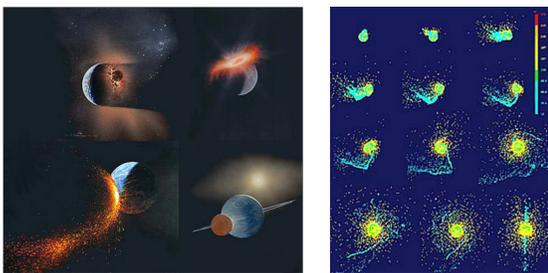


Figura 1: (À esquerda) Pinturas da colisão entre Theia e a Terra (Hartmann 1975). (À direita) Simulações realizadas por Canup e Asphaug em 2001.

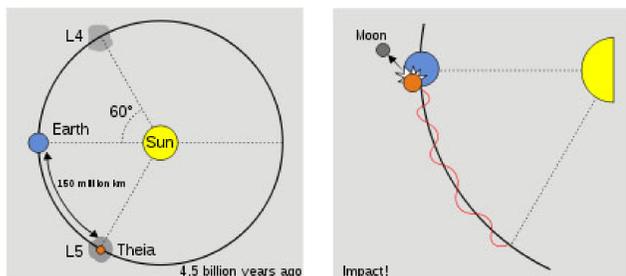


Figura 2: (À esquerda) Configuração inicial do sistema proposto por Belbruno e Gott em 2005. (À direita) Theia entra em uma órbita ferradura e colide com a Terra formando assim a Lua.

## 1 Metodologia e Objetivos

No presente trabalho estudamos a possibilidade de formação de um corpo com massa similar à de Marte e que seja coorbital com a Terra.

Nosso trabalho basicamente se resume a um problema padrão de formação planetária transplantado para um ponto lagrangiano, mas já em um estado intermediário onde a nebulosa foi dissipada. O sistema dinâmico considerado é formado pelo Sol, pela Terra e de uma nuvem de planetesimais na região coorbital à Terra (Fig. 3). A nuvem de planetesimais sempre foi inicialmente distribuída aleatoriamente (anomalia média e semi-eixo maior) em um setor em torno dos pontos lagrangianos  $L_4$  ou  $L_5$ . O setor é delimitado por um arco de  $80^\circ$ , centrado no ponto lagrangiano, e com raio orbital dentro dos limites da maior órbita do tipo ferradura simétrica prevista pela teoria (Dermott e Murray, 1981a), que é dada por:

$$r_{ferr} = \frac{1}{2} \mu_2^{\frac{1}{2}} a_2 \quad (1)$$

onde  $\mu_2$  é a massa relativa da proto-Terra e  $a_2$  é o seu semi-eixo maior.

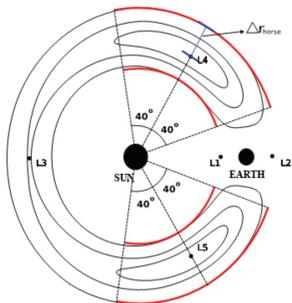


Figura 3: Localização dos setores onde os planetesimais são inicialmente distribuídos.

Como o objetivo de nosso trabalho é a formação de coorbitais, então consideramos que os planetesimais são ejetados quando estão exteriormente e interiormente à maior órbita de ferradura, após a região caótica chamada de *GAP*, que segundo Winsom (1980) é dada por:

$$r_{gap} = 2.1 \mu_2^{\frac{1}{3}} a_2 \quad (2)$$

O integrador usado nas simulações foi o pacote MERCURY (Chambers, 1999). Consideramos que em qualquer colisão o corpo menos massivo deixa de existir e a sua massa é acrescida ao corpo de maior massa.

A massa relativa da proto-Terra considerada é de  $10^{-6}$  massas solares, e as massas relativas iniciais consideradas para os planetesimais variam de  $10^{-14}$  a  $10^{-8}$  massas solares para 1000 planetesimais e de  $10^{-12}$  a  $10^{-9}$  massas solares para 5000 planetesimais, todos distribuídos inicialmente em órbitas circulares e planas.

## 2 Resultados

### 2.1 Evolução do Sistema

Nas figuras 4, 5 e 6 temos a evolução de um sistema de 1000 planetesimais cada um com massa inicial de  $10^{-13}$ . A figura 4 mostra as fases iniciais do sistema, onde os planetesimais são distribuídos na região de ferradura. Em 5 temos um aumento relevante na massa de alguns planetesimais depois de 390000 anos, e conseqüentemente uma grande redução no número de corpos do sistema. E em 6 temos a fase final do sistema. A órbita final formada é do tipo ferradura e a maioria dos planetesimais do sistema ficam dentro desta região, o que é um fator muito importante.

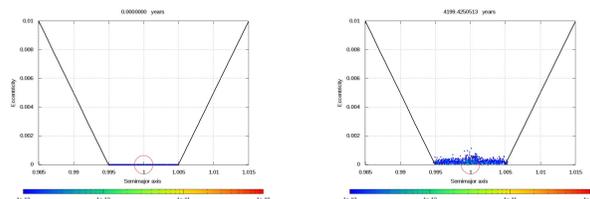


Figura 4: (À esquerda) Partículas distribuídas em torno de  $L_4$ . (À direita) Sistema evoluindo no tempo.

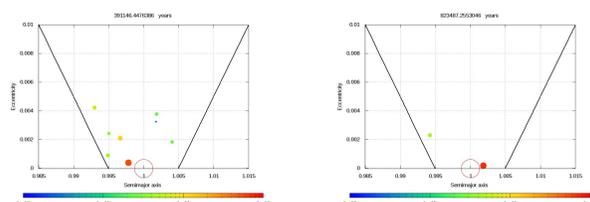


Figura 5: (À esquerda) Crescimento devido à acreção. (À direita) Sistema com dois planetesimais coorbitais formados, antes de um deles entrar na região de GAP e ser ejetado.

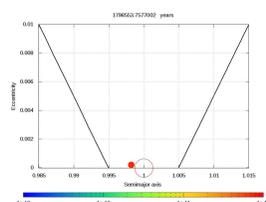


Figura 6: Fase final do sistema com um único planetesimal coorbital formado.

### 2.2 Colisões, Ejeções e Decaimento do número de planetesimais

Analisando a figura 7 vemos que conforme o sistema evolui os planetesimais ganham excentricidade, devido a perturbação gravitacional entre os corpos do sistema, e as órbitas desses planetesimais passam a se cruzar mais do que quando os planetesimais tinham órbitas circulares. Logo, ocorrem mais colisões e encontros próximos entre os planetesimais para um mesmo intervalo de tempo, por isso a diferença de comportamento na taxa de redução do número de planetesimais no início da evolução temporal e no restante da mesma.

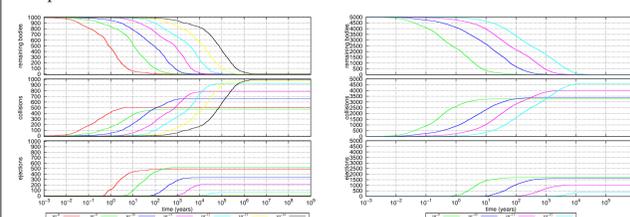


Figura 7: Colisões, Ejeções e Decaimento do número de planetesimais para sistemas inicialmente com 1000 e 5000 planetesimais.

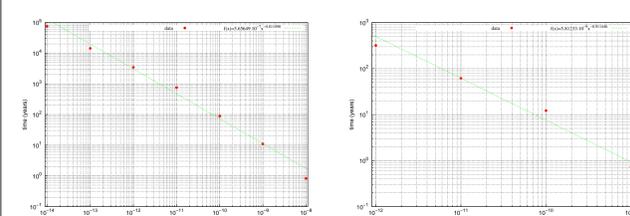


Figura 8: Ajustes de curvas lineares para sistemas inicialmente com 1000 e 5000 planetesimais.

A figura 8 mostra os ajustes de curvas lineares para sistemas com 1000 planetesimais  $T(m_i) = 5.67 \cdot 10^{-7} m_i^{-0.81}$  e para 5000 planetesimais  $T(m_i) = 5.81 \cdot 10^{-9} m_i^{-0.91}$ .

### 2.3 Análise da Amplitude de Libração, semi-eixo maior e excentricidade

Nas figuras 9 e 10 analisamos a amplitude de libração dos planetesimais para saber se esses são coorbitais ou não e qual o seu tipo de órbita final. Na figura 9 vemos que os planetesimais apresentam órbita final do tipo ferradura. Já na figura 10 o tipo de órbita final dos planetesimais são girino  $L_4$  e girino  $L_5$ . Todos têm órbitas com excentricidades próximas de zero e os seus semi-eixos maiores têm pequenas variações.

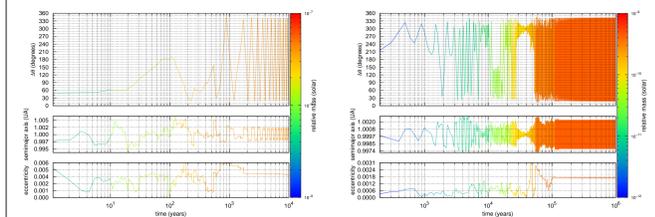


Figura 9: Sistemas com 1000 planetesimais. (À esquerda) Massa inicial de  $1.0E-9$  em torno de  $L_4$ . (À direita) Massa inicial de  $1.0E-12$  em torno de  $L_5$ .

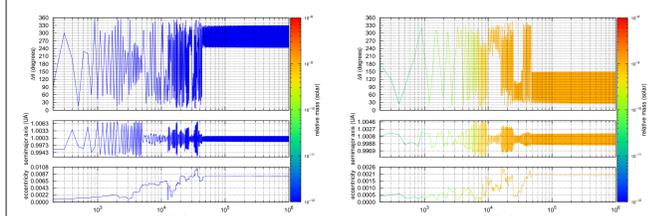


Figura 10: Sistema com 5000 planetesimais com massa inicial de  $1.0E-12$  em torno de  $L_5$ .

### 2.4 Resultados Gerais

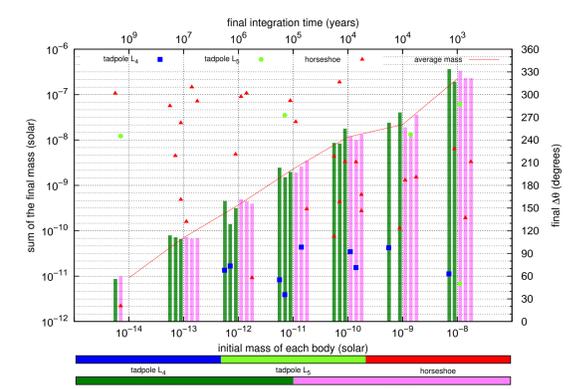


Figura 11: Resultados gerais das simulações para 1000 planetesimais.

Analisando a figura 11 vemos que a maior parte dos corpos finais formados apresentam órbitas do tipo ferradura, mas órbitas do tipo girino são também encontradas. O tempo final de integração tem uma forte ligação com a massa inicial de cada planetesimal e pela figura é maior quanto menor a massa inicial. A soma total de massa final dos corpos sobreviventes cresce de forma linear com a massa inicial de cada planetesimal. Vemos também que em quase todas as simulações houve a formação de apenas um único corpo.

## 3 Conclusões

Os presentes resultados das simulações numéricas deste trabalho mostraram ser improvável a formação coorbital de um corpo (Theia) com a massa similar a de Marte. Analisando novamente a figura 11 para 1000 planetesimais vemos que para isso ocorrer a quantidade inicial de massa na região coorbital deve ser 10 vezes a massa da proto-Terra, configurando assim uma condição inicial absurda. Ainda estamos fazendo outros testes visando identificar parâmetros que viabilizem tal formação. A análise é análoga para sistemas com 5000 planetesimais.

## Referências

- [1] Robin M. Canup, A. Erik, 2001. **Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation.** Nature, vol. 412, 708-712.
- [2] Belbruno E., Gott J. R., 2005. **Where did the Moon come from?** The Astronomical Journal, 129, 1724-1745.
- [3] MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F., 1999. **Solar System Dynamics**, Cambridge University Press, Cambridge.