

ABREUÇON ATANASIO ALVES

Implantação do planeta anão ceres no cinturão principal

Guaratinguetá

2021

Abreuçon Atanasio Alves

Implantação do planeta anão ceres no cinturão principal

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador (a): Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto

Coorientador (a): Prof. Dr. Rafael Ribeiro de Sousa

Guaratinguetá

2021

A474i	Alves, Abreuçon Atanasio Implantação do planeta anão Ceres no cinturão principal / Abreuçon Atanasio Alves – Guaratinguetá, 2021. 60 f : il. Bibliografia: f. 51-60 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto Coorientador: Prof. Dr. Rafael Ribeiro de Sousa 1. Asteróides. 2. Sistema solar. 3. Planetas. I. Título. CDU 523.44(043)
-------	--

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ABREUÇON ATANASIO ALVES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM FÍSICA"

PROGRAMA: FÍSICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. ERNESTO VIEIRA NETO

Orientador / UNESP/FEG

participou por videoconferência

PROF. DR. OTHON CABO WINTER

UNESP/FEG

participou por videoconferência

PROF. DR. FERNANDO VIRGILIO ROIG

Observatório Nacional

participou por videoconferência

Julho de 2021

DADOS CURRICULARES

ABREUÇON ATANASIO ALVES

NASCIMENTO 05/09/1976 – Jussara / BA

FILIAÇÃO Adelio Atanasio Alves
Edelita Ferreira Alves

2018/2021 Mestrado em Física
FEG – UNESP

2006/2017 Bacharelado em Física
UEFS – BA

Dedico este trabalho aos profissionais de saúde que lutam/lutaram bravamente contra a Pandemia da Covid-19, aplicando seus conhecimentos técnico-científicos em prol do bem estar físico, mental e social da população.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Ernesto Vieira Neto e Rafael Ribeiro de Sousa, que me orientaram na pesquisa, com valiosas sugestões e abrangente conhecimento científico.

Agradeço a todos os professores do Mestrado em Física da FEG, pelo interesse e desempenho em prol do ensino e pesquisa, visando o crescimento acadêmico da instituição.

Agradeço aos colegas de classe pela convivência acadêmica.

Agradeço aos meus pais e toda minha família pelo apoio incondicional. Agradeço a Adriana pelo amor e paciência.

Agradeço ao Eterno, que ilumina minha mente, trazendo conhecimento e persistência na luta.

“A verdade é filha do tempo e não da autoridade, mas a dúvida é o começo da sabedoria.”

Galileu Galilei

RESUMO

Ceres é um planeta anão que orbita o Sol no Cinturão de Asteroides. A presença de água em grande quantidade, amônia, alguns sais e propriedades únicas comparadas com outros asteroides do Cinturão Principal sugere que Ceres não foi formado *in situ*. Um provável cenário é que ele foi formado na região externa do Sistema Solar e implantado na órbita atual durante a evolução e formação dinâmica do Sistema Solar. Neste trabalho, nós utilizamos simulações numéricas do Sistema Solar externo primordial para investigar possíveis mecanismos dinâmicos responsáveis por colocar planetesimais do tamanho de Ceres no Cinturão de Asteroides. Inicialmente simulamos o esculpimento dinâmico do disco de planetesimais primordial, durante a formação de Urano e Netuno proveniente de colisões gigantescas entre embriões planetários durante a fase em que o Sistema Solar era envolvido por um disco de gás. Em seguida, nós calculamos a fração de planetesimais do tipo Ceres que foram capturados na região interna do Sistema Solar ($a < 5$ au). Nós distribuímos espacialmente o disco de planetesimais primordial em três principais partes, levando em conta a sobrevivência dos elementos voláteis na superfície destes objetos devido a irradiação. Na região de semieixo maior entre 10 e 20 au, os planetesimais contêm água, ácido sulfúrico e gás carbônico em suas superfícies. Em regiões com semieixo maior entre 20 e 30 au, os planetesimais também possuem em suas superfícies ácido cianídrico e álcool metílico. E a última região, entre 30 e 50 au, os planetesimais também possuem amônia. Nós observamos que durante o processo de esculpimento dinâmico do disco de planetesimais primordial, uma rápida mistura entre planetesimais com diferentes elementos voláteis em sua superfície é criada, colocando alguns planetesimais com amônia nas regiões mais internas entre 10 e 30 au. Nós também encontramos duas populações de planetesimais implantadas no Cinturão de Asteroides: a primeira população possui órbitas temporariamente estáveis (em sua grande maioria presas em ressonâncias de movimento médio com Júpiter) e outra população de planetesimais que desviam radialmente em relação a região dos planetas terrestres. Nós mostramos que a população de planetesimais do tamanho de Ceres nas órbitas temporariamente estáveis pode alcançar órbitas estáveis por quatro diferentes mecanismos: captura em ressonância de movimento médio com Júpiter, encontros próximos com os embriões planetários, arrasto gasoso e processo de difusão caótica. Estes mecanismos produzem uma população estável de planetesimais com 40% de probabilidade de ter um semieixo maior entre 2.5 e 3 au, 30% de probabilidade de ter uma excentricidade menor que 0,2 e por volta de 75% de probabilidade de ter uma inclinação orbital menor que 10 graus. Nossos resultados indicam que planetesimais do tamanho de Ceres podem ser implantados na região do Cinturão de Asteroides em órbitas muito próximas da órbita atual de Ceres.

PALAVRAS-CHAVE: Cinturão de Asteroides. Evolução Dinâmica. Crescimento de Urano e Netuno. Ressonância de Movimento Médio. Arrasto Gasoso..

ABSTRACT

Ceres is a dwarf planet that orbits the Sun in the Asteroid Belt. The presence of large amounts of water, ammonia, some salts and unique properties compared to other asteroids in the Main Belt suggests that Ceres was not formed in situ. A probable scenario is that it was formed in the outer region of the Solar System and implanted in the current orbit during the evolution and dynamic formation of the Solar System. In this work, we use numerical simulations of the primordial external Solar System to investigate possible dynamic mechanisms responsible for placing Ceres-sized planetesimals in the middle of the Asteroid Belt. We initially simulated the dynamic sculpting of the primordial planetesimal disc, during the formation of Uranus and Neptune from giant collisions between planetary embryos during the phase when the Solar System was surrounded by a gas disk. Then, we calculate the fraction of Ceres-type planetesimals that were captured in the inner region of the Solar System ($a < 5$ au). We specially distribute the primordial planetesimal disk in three main parts, taking into account the survival of volatile elements on the surface of these objects due to irradiation. In the region of a semimajor axis between 10 and 20 au, the planetesimals contain water, sulfuric acid and carbon dioxide on their surfaces. In regions with a semimajor axis between 20 and 30 au, planetesimals also have on their surfaces hydrocyanic acid and methyl alcohol. And the last region, between 30 and 50 au, planetesimals also have ammonia. We observed that during the process of dynamic sculpting of the primordial planetesimal disc, a rapid mixture between planetesimals with different volatile elements on its surface is created, placing some planetesimals with ammonia in the innermost regions between 10 and 30 au. We also found two populations of planetesimals implanted in the Asteroid Belt: the first population has temporarily stable orbits (radialmente da região do planeta terrestre) and another population of planetesimals that deviate radially from the terrestrial planet region. We show that the population of Ceres-sized planetesimals in temporarily stable orbits can reach stable orbits by four different mechanisms: capture in medium motion resonance with Jupiter, protoplanetary scattering, gaseous drag and chaotic diffusion process. These mechanisms produce a stable population of planetesimals with 40% probability of having a semimajor axis than 2,5 and 3 au, 30% probability of having an eccentricity less than 0,2 and around 75% probability of having an inclination orbital less than 10 degrees. Our results indicate that planetesimals the size of Ceres can be implanted in the region of the Asteroid Belt in orbits very closed to the current orbit of Ceres.

KEYWORDS: Asteroid Belt. Dynamic Evolution. Growth of Uranus and Neptune. Medium Motion Resonance. Gaseous Drag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Giuseppe Piazzi, o descobridor do planeta anão Ceres (1801).....	26
Figura 2: Imagem mostrando grande diferença nos tamanhos de asteroides pertencentes ao Cinturão Principal de Asteroides: Vesta, Eros e Ceres.....	29
Figura 3: Ponto branco em um cratera de Ceres, observado pelo Telescópio Hubble e, posteriormente também observado pela sonda Dawn (2015).....	30
Figura 4: Imagem obtida pela sonda Dawn, mostrando diversas manchas no planeta anão Ceres. Imagens de alta resolução mostraram um número muito alto de crateras e especulação sobre a presença de água foi cogitado nessa análise.....	35
Figura 5: O processo de formação de Urano e Netuno. Podemos verificar através do gráfico que durante 1,2 M de anos que os planetas apresentaram instabilidade dinâmica intensa até o momento em que os planetas gigantes de gelo são formados e o sistema é mantido estável por cadeias de ressonância.....	46
Figura 6: Os Painéis de (a) a (d) são instantâneos da excentricidade em função do semieixo maior. O sistema apresenta Júpiter, Saturno e uma coleção de embriões planetários. As MMR 3:1, 5:2 e 2:1 com Júpiter são apresentados por linhas verticais. Observe que alguns protoplanetas estão atingindo semieixo menores que 5~au e são chamados de protoplanetas invasores. A curva cinza representa uma linha do pericentro do protoplaneta invasor. O Pannel (e) representa uma evolução completa dos pericentros deste corpos. Pontos pretos correspondem aos planetas e os pontos em roxo correspondem aos embriões planetários.....	50
Figura 7: Distribuição inicial de planetesimais com 1000 km de tamanho em nossas simulações. Os planetesimais são representados por esferas pretas, vermelhas e azuis. As cores verdes são as espécies moleculares que sobrevivem na superfície dos planetesimais....	52
Figura 8: Os Painéis (a) - (f) mostram o gráfico de excentricidade pelo semieixo maior retratando a evolução dinâmica dos planetesimais sobre as posições sintetizadas dos planetas e embriões planetários da Figura 6. Cada planetesimal tem a massa de Ceres. As MMR 3:1, 5:2 e 2:1 com Júpiter são representadas por linhas verticais.....	55
Figura 9: Os Painéis (a) - (f) mostram o gráfico de inclinação pelo semieixo maior retratando a evolução dinâmica dos planetesimais sobre as posições sintetizadas dos planetas e embriões planetários da Figura 6. Cada planetesimal tem a massa de Ceres). As MMR 3:1, 5:2 e 2:1 com Júpiter estão representadas por linhas verticais.....	56

Figura 10: Diagrama do cenário para implantar planetesimais do tamanho de Ceres na região interna do Sistema Solar. Os pontos rosas representam os clones planetesimais e estes se encontram numa faixa entre 2,5 e 3~au. Por sua vez, os dois pontos pretos maiores representam Júpiter e Saturno, respectivamente. A estrela preta que coincide com uma das linhas verticais (MMR 5:2) representa a posição de Ceres. Os três embriões planetários são representados pelos pontos amarelos. Os Painéis (c) - (e) mostram semieixo maior, excentricidade e inclinação em função do número de planetesimais (N), sendo N menor do que qualquer um desses elementos keplerianos. Planetesimais estão em órbitas com 40\% de probabilidade de ter um semieixo maior entre 2,5 e 3~au. A probabilidade de ter uma excentricidade menor que 0,2 alcança 30\% e cerca de 75\% de probabilidade de ter uma órbita de inclinação menor que 10 graus. Através do Paine (d), podemos observar que as excentricidades podem chegar muito próximo de 1 (valor máximo) e pelo Paine (e) podemos verificar que as inclinações alcançam 30 graus aproximadamente.....59

Figura 11: O semieixo maior em função do tempo de cem planetesimais que foram implantados na região interna ($a < 5$ ~au) do disco planetesimal externo durante a evolução dinâmica de Izidoro et al. (2015a). As linhas cinzas representam a posição das ressonâncias de movimento médio com Júpiter, sendo as MMR 3:1, 5:2 e 2:1.....60

Figura 12: Os Painéis 12a e 12b mostram o semieixo maior e a evolução do pericentro de um planetesimal que foi implantado na região interna do Sistema Solar e preso temporariamente em ressonâncias de movimento médio com Júpiter. A linha azul corresponde ao planeta Júpiter. É notória a estabilidade orbital por pelo menos 1,4 milhões de anos. A linha vermelha corresponde ao planeta Saturno e mantém semelhante estabilidade orbital pelo mesmo período. A linha rosa corresponde aos embriões planetários e estes apresentam intensa oscilação. A linha cinza corresponde aos planetesimais. Podemos observar que as ressonâncias são notáveis a partir de 360 000 anos.....61

Figura 13: Diagrama do cenário para implantar planetesimais do tamanho de Ceres na região interna do Sistema Solar. No Paine (a) verificamos a condição inicial (mistura radial). De acordo com esse Paine temos os planetas Júpiter e Saturno (cor cinza), planetesimais pretos, azuis e vermelhos na faixa entre 10 e 50 au, principalmente e, protoplanetas (pontos roxos). No Paine (b) é mostrado o esquema de captura em MMR, representadas pelas linhas verticais (3). Júpiter e Saturno permanecem em suas posições originais. Ocorre deslocamento de planetesimais como também de protoplanetas, agora denominados de protoplanetas invasores, alcançando a região de implantação de Ceres (região do Cinturão de Asteroides). No Paine (c) é mostrado a fase caótica. O número de candidatos a Ceres aumenta e também observamos

os clones de candidatos a Ceres. No Paineis (a), (b) e (c) mostramos a evolução do semieixo maior, excentricidade e inclinação de Júpiter (linha vermelha), Saturno (linha azul), protoplanetas (linhas roxas), o planetesimal original implantado (linha preta), planetesimais clones (linhas rosa e verde). Linha verde representa um planetesimal clone que alcança uma órbita muito próxima para a órbita atual de Ceres (ponto estrela negra).....63

Figura 14: Paineis (a), (b) e (c) mostram a evolução do semieixo maior, excentricidade e inclinação de Júpiter (linha vermelha), Saturno (linha azul), protoplanetas (linhas roxas), o planetesimal original implantado (linha preta), planetesimais clones (linhas rosa e verde). Linha verde representa um planetesimal clone que alcança uma órbita muito próxima para a órbita atual de Ceres (ponto estrela negra).....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: A Tabela mostra valores de massa para Ceres comparadas a massa solar e em quilogramas, usando o método da perturbação obtida por três autores diferentes e, além disso, mostra os erros associados as medidas. É também calculado a média dessas massas e a média dos respectivos erros associados.....	31
Tabela 2: A Tabela mostra valores de densidade para Ceres, alguns asteroides e satélites. Observe que Ceres tem densidade semelhante aos satélites galileanos Ganímedes e Calisto (luas de Júpiter). Vesta e Palas apresentam maior densidade que Ceres.....	32
Tabela 3: Elementos orbitais de Ceres.....	38
Tabela 4: Principais características físicas do planeta anão Ceres e seus respectivos valores..	39
Tabela 5: Número de planetesimais implantados e a fração correspondente para cada região..	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
AU	Astronomic Unit (Unidade Astronômica)
UAI	União Astronômica Internacional
NASA	National Aeronautics and Space Administration
IUE	International Ultraviolet Explorer
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MMR	Medium Motion Resonance
GDF	Gas Dynamic Friction
KBOs	Kuiper Belt Object

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂ Dióxido de Carbono

H₂O Água

H₂S Ácido Sulfúrico

HCN Ácido cianídrico

CH₃OH Metanol

NH₃ Metano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.2	METODOLOGIA.....	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2	O PLANETA ANÃO CERES.....	18
2.1	CERES: ASTEROIDE OU PLANETA?.....	18
2.1.1	A busca por Ceres.....	20
2.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS E ESPECÍFICAS.....	22
2.2.1	Superfície.....	28
2.2.2	Atmosfera de Ceres.....	31
2.2.3	Elementos orbitais.....	32
2.3	ORIGEM E EVOLUÇÃO.....	34
2.4	TEORIA DE FORMAÇÃO DE CERES DURANTE O MODELO DE NICE.....	36
3	MÉTODOS.....	38
3.1	CENÁRIO DO MODELO DE IZIDORO ET AL. DE 2015.....	39
3.2	INTERPOLAÇÃO NUMÉRICA.....	41
3.3	PROPRIEDADES DO DISCO DE GÁS PROTOPLANETÁRIO.....	42
3.4	EFEITOS DO DISCO DE GÁS NOS PLANETESIMAS.....	43
3.5	INVASORES DO SISTEMA SOLAR INTERNO.....	44
3.6	DISTRIBUIÇÃO DE PLANETESIMAS.....	46
3.7	IMPLANTAÇÃO DE CERES.....	48
4	RESULTADOS.....	49
4.1	EVOLUÇÃO DOS PLANETESIMAS.....	49
4.2	CENÁRIO PARA IMPLANTAÇÃO DE CERES.....	57
5	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a observação e análise do Sistema Solar trouxe uma grandiosa contribuição para o progresso da ciência e humanidade. As primeiras ideias sobre o Universo e as observações dos movimentos aparentes do Sol, Lua e estrelas surgem ainda no período pré-histórico. Conhecer e entender o mundo em que vivemos é fundamental para qualquer sociedade que esteja evoluindo.

As populações de pequenos corpos no Sistema Solar fornecem uma maneira de entender os eventos que aconteceram no início do Sistema Solar. O cinturão principal de asteroides é a população de objetos melhor caracterizada pela qual nós podemos testar as teorias de evolução e formação do Sistema Solar.

Em sintonia com esses avanços, a introdução de técnicas computacionais na astronomia contribuiu para a descoberta de novos objetos celestes e também para um maior conhecimento da dinâmica destes objetos. A corrida espacial alavancou o nosso entendimento sobre o Sistema Solar e diversos modelos e técnicas foram validados ao longo das últimas décadas da era espacial. O homem sempre foi instigado a saber como se formou nosso sistema planetário e outros sistemas ao redor de outras estrelas. Algumas missões ao Cinturão de Asteroides se empenharam em concretizar ou dar respostas satisfatórias, usando vasto conhecimento que temos de física, química, biologia e áreas correlatas. Especificamente neste trabalho, estudaremos o processo de implantação do planeta anão Ceres no cinturão principal de asteroides.

A origem de Ceres não está completamente esclarecida e, embora esteja lado a lado com uma diversidade de asteroides, a sua composição é diferente da maioria deles.

Ceres como um pequeno corpo do Sistema Solar é possivelmente um objeto que manteve praticamente intacta sua formação no disco de gás e poeira. Planetas e pequenos corpos evoluíram dinâmica e fisicamente antes e depois da fase de gás por processos como a interação com o gás, colisões e captura gravitacional (SOUSA, Rafael R. 2019).

O primeiro passo para entender porque a origem de Ceres não é local é observar que os asteroides vizinhos a Ceres apresentam uma composição diferente em relação ao planeta anão. Ceres é um objeto do cinturão principal de asteroides mas que contém uma camada de gelo na sua superfície com a presença de compostos derivados da amônia. Os asteroides, por outro

lado, não apresentam minerais compatíveis com água, mas apresentam silicatos e carbonáceos, por exemplo. Esse fato leva alguns astrônomos a indicar que ele foi formado em uma região capaz de reter gelo, a região trans-Netuniana é uma dessas possibilidades e, de alguma forma ele foi trazido intacto para o cinturão de asteroides, conforme afirmam Vokrouhlický, Bottke e Nesvorný (2016).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a origem e a evolução do planeta anão Ceres, investigando a possibilidade da captura de Ceres proveniente da região transneptuniana e usando os mais recentes modelos de formação do Sistema Solar. Especificamente, nós estudamos se Ceres poderia ter sido capturado do disco de planetesimais transneptuniana, durante a formação de Urano e Netuno, para a sua região atual dentro do Cinturão Principal de Asteroides. A motivação deste estudo é entender os mecanismos dinâmicos pela implantação de Ceres no Cinturão Principal de Asteroides.

1.2 METODOLOGIA

A formação do Sistema Solar envolve uma série de estudos metodológicos, sejam por meios observacionais, onde se coleta enorme quantidade de dados, ou por meios analíticos usando princípios físicos e matemáticos. Ainda existem metodologias associadas ao processamento e entendimento dos resultados puramente numéricos da dinâmica dos membros do Sistema Solar.

Os estágios da evolução do Sistema Solar são muito complexos para serem tratados todos juntos. Como por exemplo, os estágios que envolvem processos de altas temperaturas, fortes campos magnéticos, sistemas fortemente perturbados e instáveis. Para melhor

compreender o todo, portanto, usualmente dividimos em etapas isoladas e tentamos relacioná-las de forma conveniente.

Neste trabalho, nós estamos estudando uma etapa particular do nosso Sistema Solar. Nesta etapa, ocorre a formação de Urano e Netuno, um dos últimos processos de formação planetária na fase final de gás do Sistema Solar primordial. Portanto, esta abordagem recai no início da formação do Sistema Solar, nos seus primeiros milhões de anos.

A nossa metodologia é puramente numérica e vamos realizar uma série de simulações numéricas do Sistema Solar primordial que contém Júpiter e Saturno, totalmente formados, Urano e Netuno, em processo de formação como o de super-Terras, o disco de planetesimais e o gás protoplanetário. Para realizar as simulações numéricas deste trabalho, nós utilizamos o pacote de integração REBOUND com uma adaptação do código desenvolvida por Ribeiro et al. (2020). O REBOUND é um pacote de integradores e aplicativos que pode integrar o movimento de partículas sob a influência da gravidade. Estrelas, planetas, luas, anéis ou partículas de poeira, dentre outros, podem ser tratados como partículas. O fato do REBOUND ser muito flexível e poder ser personalizado para resolver com precisão e eficiência os problemas em astronomia/astrofísica justifica nossa escolha (REIN, Hanno 2020). Em suma, nossas simulações buscam solucionar o problema usando a integração do problema de N corpos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho for organizado conforme a descrição abaixo:

- No Capítulo 2, nós discutimos aspectos históricos e físicos do planeta anão Ceres.
- No Capítulo 3, nós apresentamos os métodos baseados em simulações numéricas para N corpos
- No Capítulo 4, nós apresentamos nossos resultados.
- No Capítulo 5, nós apresentamos as considerações finais, baseadas nos procedimentos e análise dos resultados do trabalho.

2 O PLANETA ANÃO CERES

Ceres é um planeta anão localizado no cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter, sendo o maior dos objetos no cinturão. Ceres compreende 1/3 do total de massa do Cinturão de asteroides, mas tem uma densidade baixa, $2,077 \text{ g/cm}^3$. Ceres tem baixo albedo e uma reflectância espectral similar aos carbonáceos condritos (MCCORD, T. B; SOTIN, C. 2005). Ceres orbita o Sol no cinturão principal, com um semieixo maior de 2,767 au, uma excentricidade de 0,097 e uma inclinação de aproximadamente 9,73 graus. A posição de Ceres no cinturão principal coincide com o centro de distribuição de asteroides tipo C, mas Ceres não é um asteroide tipo C (BELL et al., 1988). Ceres é um asteroide similar ao tipo G, que apresenta uma abundância de condritos e que são todos hidratados, enquanto que os asteroides tipo C mostram características de hidratação somente em 60% deles (BRITT et al., 1992). Quando Ceres encontra-se em oposição e próximo ao periélio ele pode atingir uma magnitude aparente máxima de +6,7 e, sob condições excepcionais de observação, pode ser observado sem o uso de equipamentos (MENZEL, D.; PASACHOFF, J. 1983). Normalmente ele é invisível a olho nu. O interesse em sua observação data de dois séculos atrás, conforme veremos posteriormente. Com a evolução significativa das técnicas de observação e a construção de sondas espaciais capazes de realizar viagens interplanetárias, tivemos riquíssimas informações sobre o então planeta anão Ceres.

2.1 CERES: ASTEROIDE OU PLANETA?

Desde sua descoberta em 1801 por Giuseppe Piazzi, Ceres recebeu diversas classificações, sendo inicialmente considerado planeta e posteriormente asteroide. Piazzi originalmente sugeriu o nome Cerere Ferdinanda para o objeto descoberto, em homenagem à deusa Ceres (deusa romana da agricultura, Cerere em italiano) e ao rei Fernando I das Duas Sicílias (HOSKIN, M. 1993; FORBES, E. 1971). “Ferdinanda”, entretanto, não foi aceito por outras nações e deixou de ser usado.

A categorização de Ceres mudou mais de uma vez e foi motivo de desentendimentos. Johann Elert Bode acreditava que Ceres era o “planeta faltante”, que ele havia proposto existir entre Marte e Júpiter, a 2,8 au do Sol (HOSKIN, M. 1993). Ceres recebeu um símbolo de planeta e permaneceu listado como planeta em livros de astronomia e tabelas por mais de meio século (assim também como 2 Pallas, 3 Juno e 4 Vesta) (HOSKIN, M. et al (1993) . Enquanto outros objetos eram descobertos nas vizinhanças de Ceres, percebeu-se que ele representava o primeiro de uma nova classe de objetos (HOSKIN, M. 1993). Em 1802, com a descoberta de Pallas, William Herschel criou o termo asteroide (parecido com estrela) para designar esta classe de corpos escrevendo que “eles lembram tanto pequenas estrelas que dificilmente são distinguidos destas, mesmo com excelentes telescópios” (HERSCHEL, W. 1802). Como foi o primeiro desta nova classe a ser descoberto, Ceres recebeu a designação de 1 Ceres sob o sistema moderno de numeração de corpos menores. Na década de 1860, a existência de diferenças fundamentais entre asteroides, como Ceres e os planetas propriamente ditos, foi largamente aceita, embora uma definição precisa do termo planeta ainda não tinha sido criada (JOHNSTON, K.; LARSEN, D. 2000).

Ceres foi descoberto no início do século XIX, porém muitos astrônomos já haviam notado de alguma forma sua presença. Johann Elert Bode, em 1772, sugeriu que um planeta desconhecido poderia existir entre as órbitas de Marte e Júpiter. Pouco menos de 2 séculos antes, em 1596 Kepler já havia percebido uma lacuna entre os dois planetas (HOSKIN, M., 1993). Bode baseou sua ideia na lei de Titius-Bode, uma hipótese que Johann Daniel Titius propôs em 1766, observando que havia um padrão regular nos semieixos maiores dos planetas conhecidos na época, exceto por um lacuna existente entre Marte e Júpiter, a 2,8 au, que poderia ser preenchida pela existência de um planeta (HOSKIN, M. 1993; HOGG, 1948). Com a descoberta de Urano por William Herschel em 1781, próximo à distância predita pela lei de Titius-Bode, a crença nela aumentou, e em 1880, um grupo chefiado por Franz Xaver von Zach, editor do periódico *Monatliche Correspondenz*, enviou convocações para 24 astrônomos experientes, pedindo para que unissem seus esforços e iniciaram uma busca metódica pelo planeta (HOSKIN, M. 1993; HOGG, H. 1948). Apesar do grupo não ter descoberto Ceres, eles posteriormente encontraram vários grandes asteroides (HOGG, 1948).

Em 2006 o debate sobre Plutão e a definição de planeta fez com que Ceres pudesse ser considerado novamente um planeta. A primeira proposta da União Astronômica Internacional para a definição de planeta afirmava que um planeta “é um corpo celeste que (a) tenha massa

suficiente de forma que sua própria gravidade supere as forças de corpo rígido de forma que tenha uma forma em equilíbrio hidrostático (esférica) e (b) está em órbita de uma estrela e não é outra estrela ou um satélite de um planeta” (EKERS, R. 2018). Se esta resolução tivesse entrado em vigor, Ceres seria o quinto planeta a partir do Sol (WRITERS, S. 2006). Essa definição não foi aceita, e em 24 de agosto de 2006 uma definição modificada foi adotada, tendo o requisito adicional de que um planeta deveria “dominar sua própria órbita”. Nesta definição, Ceres não é um planeta pois não domina sua órbita compartilhando-a com milhares de outros asteroides no cinturão de asteroides e constituindo apenas um terço da massa do cinturão. Corpos que se enquadram na primeira proposição mas não na segunda, como Ceres, foram então classificados como planetas anões. Ceres agora é classificado como um planeta anão e ele está em um equilíbrio hidrostático rotacional e apresenta diferenciação.

A decisão da União Astronômica Internacional (UAI) em 2006 que classificou Ceres como um planeta anão, porém não apontou se ele é ou não um asteroide. De fato a UAI não possui uma definição formal de asteroide, utilizando com maior frequência o termo planeta menor até 2006, e preferindo os termos corpo menor do Sistema Solar ou planeta anão após 2006 (LANG, K. 2011).

2.1.1 A busca por Ceres

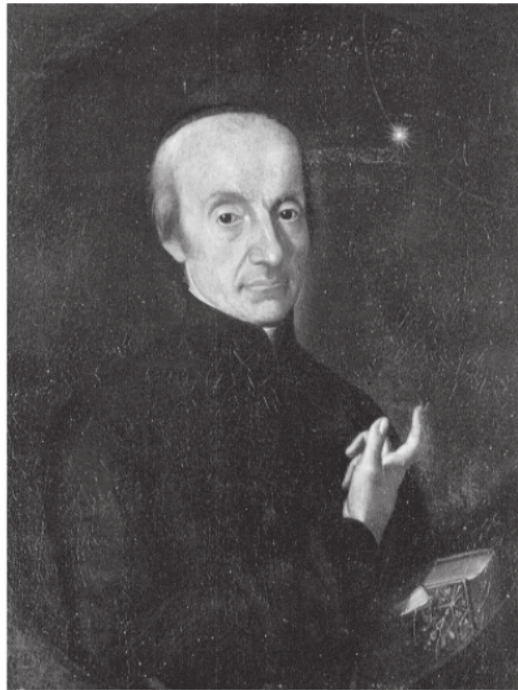
Giuseppe Piazzi (1746-1826), mostrado na Figura 1, observou o que parecia ser uma nova estrela de oitava magnitude na constelação de Touro, porém checando suas observações na noite do dia seguinte percebeu que ele havia encontrado um valor ligeiramente diferente para a distância angular em relação à uma estrela vizinha, o que o fez duvidar da precisão de sua observação anterior (FORBES, E. 1971).

Para observar Ceres, Giuseppe Piazzi utilizou o Círculo de Palermo de Jesse Ramsden (1730-1800), o maior dos fabricantes de instrumentos do século XVIII, conforme consta em Serio et al. (2002).

Piazzi observou Ceres por um total de 24 vezes, a última em 11 de fevereiro de 1801, quando uma doença o impediu de continuar as observações. Ele anunciou sua descoberta em

24 de janeiro de 1801 em cartas para somente dois de seus colegas astrônomos, seu compatriota Barnaba Oriani de Milão e Bode de Berlim (CUNNINGHAM, C. 2001). Ele relatou esse objeto como sendo um cometa. Porém, depois ele afirmou: “uma vez que seu movimento é lento e praticamente uniforme, me ocorreu várias vezes que isto poderia ser algo melhor que um cometa” (HOSKIN, M. 1993). Em abril, Piazzi enviou suas observações completas para Oriani, Bode e Jérôme Lalande em Paris. A informação foi publicada na edição de setembro de 1801 do *Monatliche Correspondenz* (FORBES, E. 1971).

Figura 1: Giuseppe Piazzi, o descobridor do planeta anão Ceres (1801)



Fonte: Serio (2002).

Embora o conhecimento das massas e densidades aparentes dos asteroides seja crítico na avaliação de sua composição, determinar essas quantidades é uma tarefa difícil (HILTON, J. 2002). Após 200 anos de observações, massas foram determinadas para apenas 24 asteroides. Nos próximos anos, haverá um grande aumento no número de determinação de massa de asteroides e na determinação da densidade devido a novos métodos e técnicas de observação. Ainda segundo Hilton (2002), a dificuldade em determinar as massas de asteroides reside no seu pequeno tamanho. Mesmo o maior asteroide do cinturão principal, 1 Ceres, estimado em 30-40% da massa do cinturão principal, é apenas 1% da massa da Lua.

Os primeiros observadores eram capazes de calcular o tamanho de Ceres com precisão de cerca de uma ordem de magnitude. Em 1802 Herschel subestimou seu diâmetro como sendo somente de 260 km, enquanto que em 1811 Johann Hieronymus Schröter superestimou seu diâmetro como sendo 2 613 km, ou seja, quase 10 vezes maior (HILTON, J. 2002). Hughes (1994) afirmou que pode ser difícil fazer medições e essas dificuldades levam a erros aleatórios e sistemáticos. A busca para medir os diâmetros dos asteroides apresenta um exemplo astronômico perfeito desse problema.

Pickering, Searle e Upton (1879) realizaram um procedimento fotométrico semelhante para obter as medidas dos asteroides. Eles, no entanto, consideraram o fato dos asteroides estarem bastante próximos de Marte no sistema solar, e assumiram que eles tinham o mesmo albedo que o planeta. O método mais direto de medir o diâmetro dos asteroides é pelo uso de ocultações estelares. Ocorre da seguinte maneira: cada asteroide lança uma sombra à luz de uma estrela que ele esteja ocultando. Se essa sombra cruzar a Terra, várias observações da ocultação da estrela em questão podem levar a um delineamento da forma da seção transversal do asteroide perpendicular à linha de visão da estrela oculta, (veja mais detalhes em Hughes (1994)).

Portanto, desde sua descoberta em 1801, várias medições do tamanho de Ceres foram realizadas, sendo que algumas foram feitas através de ocultações estelares. De acordo com Millis et al. (1987), a primeira ocultação estelar por Ceres foi observada em 1984 e determinou seu tamanho com precisão de alguns quilômetros em uma época em que as incertezas eram, normalmente, dez vezes maiores. Devido ao brilho aparente de Ceres ser alto, comparado à maioria dos asteroides, estrelas capazes de causar uma queda de magnitude detectável quando ocultadas são limitadas às mais brilhantes.

2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS E ESPECÍFICAS

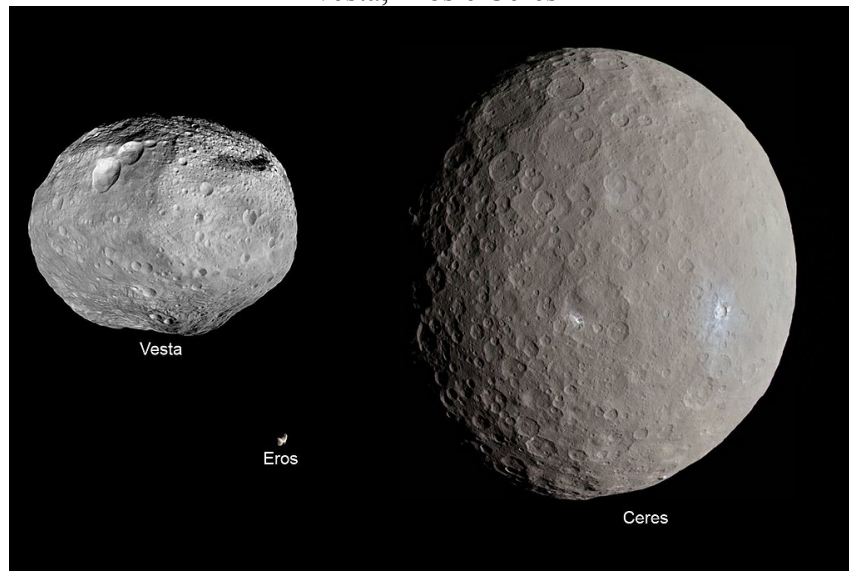
O principal interesse científico representado por Ceres é que ele fornece um excelente laboratório para entender como os planetesimais são formados cedo na história do sistema solar, e o papel dos voláteis na evolução e formação planetária (CARRY et al., 2008). Um cenário possível de formação de Ceres é que ele poderia ter sido formado *in situ*. Ele poderia

ter sido formado em um ambiente “úmido” pela acreção de planetesimais rochosos, originalmente presentes na região da nebulosa planetária inicial onde fica hoje o cinturão principal, e por planetesimais gelados que migraram para a região, vindo de regiões mais externas, cujos gelos foram preservados (CARRY et al., 2008). O gelo de Ceres contrasta com a quantidade muito pequena de água dos meteoritos carbonáceos, onde incluiu o estudo do papel das rochas, a porosidade interna, material orgânico e a temperatura (veja por exemplo Zolotov (2014)). Sua natureza gelada poderia ser consistente com a evolução temporal da linha de neve nebular através da zona asteroidal. Conforme Zolotov (2014), planetesimais gelados de mais longe também poderiam contribuir para composição de Ceres, mas após a formação de Júpiter, a eficiência de acreção seria baixa devido às velocidades de impacto mais altas.

Ceres é constituído possivelmente por um núcleo rochoso circundado por um manto de gelo. Sua superfície, conforme observado inicialmente pelo Telescópio Espacial Hubble, apresenta regiões mais escuras, além de locais com brilho proeminente, de natureza na época desconhecida. Possui uma tênue atmosfera formada sobretudo por vapor de água que sublima e deixa a superfície (YEAGER, A. 2014).

Ceres é possivelmente um planetesimal remanescente do período de formação e evolução do Sistema Solar. Atualmente aparenta ser geologicamente inerte. Conforme observamos na Figura 2, Ceres tem uma forma bem distinta de Vesta, além claro, de ser maior. Além disso, notamos a brutal diferença de diâmetro entre Ceres e Eros. Mais tarde trataremos de sua composição físico-química.

Figura 2: Imagem mostrando grande diferença nos tamanhos de asteroides pertencentes ao Cinturão Principal de Asteroides: Vesta, Eros e Ceres



Fonte: NASA/JPL (2015).

Lançada pela NASA em 2007, a sonda Dawn, fez uma passagem por Vesta e entrou em órbita ao redor de Ceres em 6 de março de 2015 (LANDAU, E.; BROWN, D. 2015). Conforme a Dawn se aproximou de Ceres, a partir de janeiro de 2015, foram tiradas fotografias de alta resolução, nunca obtidas anteriormente, revelando uma superfície coberta de crateras. Um ponto brilhante, visto anteriormente em imagens do Telescópio Espacial Hubble, foi observado como duas formações distintas de alto albedo no interior de uma cratera, consistentes com material reflexivo, contendo gelo ou sais. Especulações iniciais, indicavam que esses pontos teriam origem crio-vulcânica, mas isso foi considerado improvável posteriormente (ATKINSON, N. 2020). Através da Figura 3, podemos visualizar um ponto branco, sugerindo ser gelo.

Figura 3: Ponto branco em um cratera de Ceres, observado pelo Telescópio Hubble e, posteriormente também observado pela sonda Dawn (2015)



Fonte: Atkinson (2020).

A massa de Ceres foi determinada repetidamente com resultados cada vez melhores, utilizando mais de um método. O método tradicional é a medição das perturbações da massa de Ceres nas órbitas de outros objetos, quanto mais tempo as perturbações orbitais são observadas, mais precisa se torna as determinações de massa (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Observando as perturbações gravitacionais nas órbitas de 25 asteroides diferentes, Michalak (2000) determinou a massa de Ceres em $4,70 \pm 0,04 \times 10^{-10}$ massas solares. Então, sua massa foi determinada a partir da análise da influência que exerce sobre os asteroides menores, havendo pequenas diferenças de resultados entre diversos trabalhos (KOVAČEVIĆ A.; KUZMANOSKI, M. 2007). A média dos três resultados mais precisos é de $9,4 \times 10^{20}$ kg, conforme podemos observar na Tabela 1 (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Com esta massa, Ceres possui cerca de um terço da massa total estimada do cinturão, que é de $3 \pm 0,2 \times 10^{21}$ kg, e que corresponde a 4% da massa da Lua. Sua massa é suficiente para lhe dar uma forma quase esférica em equilíbrio hidrostático. Sua densidade de aproximadamente $2,08 \text{ g/cm}^3$ sugere que seja formado principalmente por água (25%) e silicatos, além de uma pequena

fração de outros compostos. Conforme podemos observar na Tabela 1 (adaptada(o) de McCord e Sotin (2005)), é importante salientar que existem outros valores para massa de Ceres usando o método da perturbação.

Tabela 1: A Tabela mostra valores de massa para Ceres comparadas a massa solar e em quilogramas, usando o método da perturbação obtida por três autores diferentes e, além disso, mostra os erros associados as medidas. É também calculado a média dessas massas e a média dos respectivos erros associados

Referência	Método (perturbação)	M.solar, kg	Massa, kg
Viateau and Rapaport [1998]	9 asteroides	4,759E-10	9,47E+20
Michalak [2000]	25 asteroides	4,700E-10	9,35E+20
Standish [2001]	Marte	4,762E-10	9,47E+20
Média		4,740E-10	9,43E+20

Fonte: Adaptado de McCord e Sotin (2005).

Antes da missão Dawn houve três métodos diferentes de medição do tamanho e da forma de Ceres: ocultação de uma estrela por Ceres visto da Terra, imagem direta da câmera do telescópio orbital Hubble e imagem ótica adaptativa com telescópios terrestres (MCCORD, T. ; SOTIN, C. 2005).

Através de várias medidas de ocultação estelar se determinou que Ceres é um esferoide oblato com um raio equatorial de $479,6 \pm 2,4$ km e raio polar de $453,4 \pm 4,5$ km. Por outro lado, as imagens de Ceres obtidas pelo telescópio espacial Hubble foram analisadas anos depois, conforme consta em McCord e Sotin (2005). Os valores obtidos do semieixo maior e semieixo menor foram $484,8 \pm 5,1$ km e $466,4 \pm 5,9$ km, respectivamente. Drummond e Christou (2008) usaram um sistema de imagem ótica adaptativa em um telescópio terrestre de 1,5 m para obter imagens de Ceres. Então, um modelo de elipsoide triaxial para Ceres foi derivado de 17 imagens. Tomando a média desses raios, seguindo dois possíveis modelos teremos raios de 508 ± 5 km e $472,5 \pm 6,5$ km, por exemplo.

A densidade pode ser calculada usando os valores de massa da Tabela 1 e os respectivos valores do volume obtidos com os possíveis raios de Ceres.

Dos vários modelos de elipsoides da forma de Ceres, uma série de raios efetivos

$$r_{eff} = \sqrt{r_1 \times r_2} \quad (1)$$

podem ser calculados, onde r_1 é o semieixo maior do elipsoide e r_2 é o semieixo menor. Finalmente, podemos obter a densidade para alguns asteroides e satélites, incluindo o planeta anão Ceres, conforme a Tabela 2. Portanto, a densidade aparente resultante é massa/volume = $9,43 \times 10^{23} \text{g} / 4,49 \times 10^{23} \text{cm}^3 = 2,08 \text{ g/cm}^3$, onde foram usados os valores obtidos por Drummond e Christou (2008).

Tabela 2: A Tabela mostra valores de densidade para Ceres, alguns asteroides e satélites. Observe que Ceres tem densidade semelhante aos satélites galileanos Ganímedes e Calisto (luas de Júpiter). Vesta e Palas apresentam maior densidade que Ceres

Objeto	Densidade g/cm ³
Vesta	3,44
Lua	3,34
Europa	2,97
Palas	2,71
Ceres	2,08
Ganímedes	1,94
Titã	1,88
Calisto	1,86

Fonte: Adaptado de McCord e Sotin (2005)).

O asteroide Vesta também pertence ao Cinturão de Asteroides e é mais denso que Ceres. Vesta é altamente evoluído termicamente (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Apresenta baixa irregularidade em sua forma, apresenta um número maior de crateras quando comparado a Ceres. Além disso, sua forma apresenta variação no tamanho, idade e características do alvo, i.e, é relevante o elemento que colidiu com o asteroide (OSINSKI, G.; PIERAZZO, E. 2012).

2.2.1 Superfície

A composição superficial de Ceres é similar à dos asteroides do tipo C, de acordo com a classificação espectral de asteroides (RIVKIN, A.; VOLQUARSEN, E.; CLARK, B. 2006). No entanto existem algumas diferenças. As características predominantes de Ceres observadas no infravermelho são típicas de materiais hidratados, o que indica a presença de quantidades significativas de água em seu interior. Outros possíveis constituintes incluem materiais argilosos ricos em ferro (cronstedtita) e minerais de carbonato (dolomita e siderita), que são comuns em meteoritos condritos carbonáceos (RIVKIN, A.; VOLQUARSEN, E.; CLARK, B. 2006). A presença de carbonatos e minerais argilosos no espectro são geralmente ausentes em outros asteroides do tipo C (RIVKIN, A.; VOLQUARSEN, E.; CLARK, B. 2006). Por vezes, Ceres é classificado como um asteroide do tipo G, principalmente pelo fato de apresentar uma forte absorção no espectro ultravioleta, o que não acontece nos asteroides do tipo C (PARKER et al., 2002). Nas fotos de alta resolução, com 35 metros por pixel, Kupalo, uma das crateras mais jovens em Ceres, exibe um material brilhante exposto na borda, o que poderia ser sais, e a sua superfície plana provavelmente formada a partir de material derretido por impacto e detritos. A superfície de Ceres é relativamente quente. A temperatura máxima quando o Sol está a pino no planeta anão foi estimada em 235 K (cerca de -38°C), baseada em medições de 5 de maio de 1991.

Fanale e Salvail (1989) calcularam uma temperatura próxima à subsuperfície, em função da latitude, variando de aproximadamente 180 K, no equador, para valores próximos de 130 K, nos polos. Isso assumindo um albedo de 0,09, órbita circular e obliquidade zero do polo de spin. Essas hipóteses foram necessárias para apoiar os cálculos e determinar a estabilidade do gelo de água abaixo da superfície.

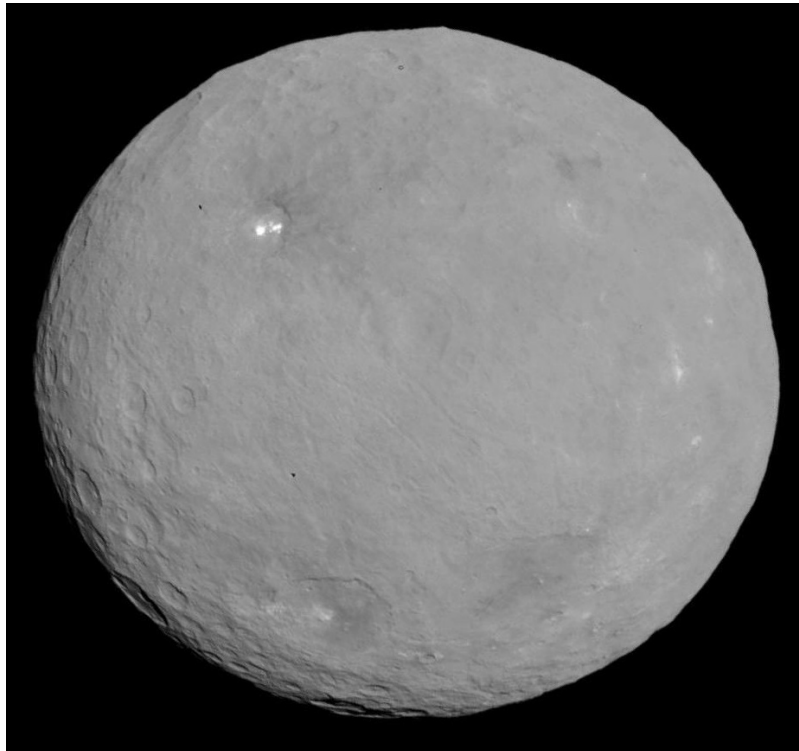
Antes da missão Dawn, poucas características superficiais de Ceres haviam sido detectadas. Imagens em alta resolução do Telescópio Espacial Hubble tomadas em ultravioleta em 1995 mostraram uma mancha escura em sua superfície, que foi apelidada “Piazz” em honra ao descobridor do planeta anão (PARKER et al., 2002). Inicialmente pensou-se ser uma cratera. Posteriormente, imagens no infravermelho próximo tiradas do Observatório Keck, usando óptica adaptativa e ao longo de uma rotação completa, mostraram várias feições claras e escuras se movendo conforme sua rotação. Duas manchas escuras

possuem formato circular, presumindo serem crateras, uma delas com uma região central esbranquiçada e a outra identificada como a mancha de “Piazzì” (LI et al., 2006). Observações mais recentes com o Hubble, ao longo de uma rotação completa e feitas entre 2003 e 2004, mostraram onze formações superficiais distintas, cuja natureza é desconhecida (LI et al., 2006). A principal mancha observada em Ceres serviu de honraria ao descobridor do planeta anão (Giuseppe Piazzì), porém o descobridor da mancha não sabia de fato explicá-la. Conforme afirma William Herschel (PARKER et al., 2002):

Embora nossa análise não possa determinar a natureza dessa característica, isto é, se é uma cratera, um ponto de albedo ou qualquer outra coisa, acreditamos que sua existência seja suficientemente estabelecida (para ser definitivo, precisamos de imagens de alta resolução com amostragem de tempo adequada para ver o movimento das características da superfície). Com isso em mente, propomos o nome “Piazzì” para essa característica, em homenagem ao descobridor de Ceres.

Uma mancha brilhante e proeminente, oficialmente chamada “característica número 5”, foi detectada em Ceres dentro de uma cratera de largura de 80 quilômetros, primeiramente avistada como uma área com um ligeiro aumento de reflexividade, que representa um albedo 9% maior do que a superfície circundante (MCKINNON, W. 2015a). Até o começo de 2015, não havia confirmação de sua natureza, mas uma hipótese era que mancha branca brilhante seria um corpo de água congelada no fundo de uma cratera, refletindo a luz do Sol, como podemos ver na Figura 4.

Figura 4: Imagem obtida pela sonda Dawn, mostrando diversas manchas no planeta anão Ceres. Imagens de alta resolução mostraram um número muito alto de crateras e especulação sobre a presença de água foi cogitado nessa análise



Fonte – Mckinnon (2015a).

A sonda Dawn, em janeiro de 2015, tirou as imagens de mais alta resolução do planeta anão, com muito mais definição do que a imagem da mancha fotografada pelo Hubble. Junto com a mancha branca enigmática, estas últimas imagens revelaram mais manchas escuras que poderiam ser crateras (MCKINNON, W. 2015b).

No final de janeiro de 2015, Marc Rayman, o engenheiro-chefe e diretor da missão Dawn disse: “No momento, nenhuma das características específicas podem ser resolvidas, incluindo o ponto branco. Nós não sabemos o que a mancha branca é, mas certamente é intrigante” (COFIELD, C. 2015). Em março, Andreas Nathues, o principal pesquisador de enquadramento da câmera da sonda Dawn, disse que a mancha brilhante tem características espectrais consistentes com gelo, sugerindo que a mancha pode ser vapor de água acima da borda da cratera e no espaço (HAND, E. 2015). Em 9 de maio a Dawn começou a fazer

manobras para órbitas mais baixas e melhorar a visão, fornecendo observações de alta resolução (LANDAU, E. 2015). E em 16 de maio, quando a nave orbitava a 7.200 km sobre o planeta anão, a sonda tirou fotos, parte de uma sequência de imagens gravadas para fins de navegação, que levou os cientistas da missão a concluírem que o brilho intenso das manchas era devido a reflexão da luz solar por um material altamente reflexivo na superfície, possivelmente gelo (KING, B. 2015). A presença de compostos orgânicos, bem como a abundância de gelo de água, pode ser de especial interesse para a astrobiologia. Alguns fatores, como a energia solar recebida por Ceres, a troca de material entre as camadas inferiores e a superfície e a grande quantidade de corpos menores do Sistema Solar exterior, que eventualmente colidem com Ceres, podem favorecer a existência de vida no planeta anão (A'HEARN, M.; FELDMAN, P. 1992).

2.2.2 Atmosfera de Ceres

Há evidências circunstanciais consideráveis que Ceres tenha uma significativa quantidade de água livre no seu interior (A'HEARN, M.; FELDMAN, P. 1992). Há também uma evidência espectral clara sugerindo uma ligação entre os meteoritos condritos carbonáceos e asteroides “tipo C” (A'HEARN, M. et al (1992)).

A água envolvida no processo pode ter sido liberada no interior de asteroides por aquecimento radiogênico, mas cálculos térmicos sugeriram que o aquecimento externo pode ter sido mais eficaz (FANALE, F.; SALVAIL, J. 1989). Embora a água possa originalmente estar contida em minerais hidratados formados antes da acumulação dos asteroides, Jones (1988) sugeriu recentemente que os asteroides do tipo C possam ter sido formados a partir de uma mistura desequilibrada de minerais secos à alta temperatura, materiais orgânicos e água gelada. Ceres tem a massa relativamente pequena e isso favorece uma fração das moléculas de água emergentes do interior que será perdido por fuga térmica.

Há indícios de que Ceres possua uma tênue atmosfera e contenha uma fina camada de gelo (similar a geada) sobre a superfície (A'HEARN, M.; FELDMAN, P. 1992). Gelo superficial é instável a distâncias menores que 5 au do Sol, por isso espera-se que ele passe por sublimação quando exposto à radiação solar. O gelo pode migrar das camadas inferiores

de Ceres para a superfície, mas escapa para o espaço muito rapidamente. Por causa disso, é difícil detectar a vaporização da água. Água escapando das regiões polares de Ceres foi possivelmente observada no início da década de 1990, mas não foi confirmada. Talvez seja possível detectar água escapando nos arredores de uma cratera de impacto recente ou em rachaduras na subsuperfície de Ceres. Observações em ultravioleta feitas pelo satélite International Ultraviolet Explorer (IUE) detectaram quantidades significativas do íon hidróxido perto do polo norte do planeta anão, esse íon é um produto da dissociação do vapor de água pela radiação ultravioleta solar (A'HEARN, M.; FELDMAN, P. 1992).

No início de 2014, utilizando dados do Observatório Espacial Herschel, descobriu-se que existem várias fontes localizadas de vapor de água em latitudes médias (cada uma com diâmetro não superior a 60 km), cada uma liberando cerca de 1026 moléculas (ou aproximadamente 3 kg) de água por segundo. Possíveis mecanismos para a liberação de vapor são a sublimação de uma superfície exposta de gelo com 0,6 km², ou erupções vulcânicas resultantes do calor interno gerado por decaimento radioativo. Espera-se que a taxa de sublimação superficial diminua conforme Ceres se afasta do Sol em sua órbita excêntrica, enquanto emissões internas não sejam afetadas pela posição orbital. Os dados limitados são mais consistentes com sublimação do tipo cometária. A sonda Dawn chegou a Ceres em 2015, enquanto o planeta anão se aproximou de seu afélio, o que pode ter diminuído sua capacidade de observar o fenômeno.

2.2.3 Elementos orbitais

Ceres segue uma órbita ao redor do Sol, entre Marte e Júpiter, no cinturão de asteroides, com período orbital de 4,6 anos terrestres (MOURA, T. 2014). Sua órbita é moderadamente inclinada ($i = 10,6^\circ$, em comparação a 7° de Mercúrio e 17° de Plutão) e moderadamente excêntrica ($e = 0,08$, comparável a de $0,09$ de Marte) (MOURA, T. 2014). O período de rotação de Ceres tem duração de 9 horas e 4 minutos (WILLIAMS, D. 2004). As últimas observações determinaram também que o polo norte de Ceres aponta na direção de ascensão reta 291° e declinação 59° , na constelação de Draco. Isto significa que a inclinação axial de Ceres é muito pequena (THOMAS et al., 2005; LI et al., 2006).

A Tabela 3 apresenta de forma bastante simples as características orbitais de Ceres:

Tabela 3: Elementos orbitais de Ceres

Elemento orbital	Valor do elemento
Semieixo maior	2,7663 au
Periélio	2,5468 au
Afélio	2,9858 au
Excentricidade	0,07934
Período orbital	1680,5 d (4,599 a)
Inclinação	10,58°
Argumento do periélio	72,825°
Longitude do nodo ascendente	80,399°

Fonte: Adaptado do Wikipedia (2021).

A Tabela 4 mostra as principais características físicas de Ceres e seus respectivos valores estimados, obtidas por técnicas usadas na Astronomia, principalmente pela observação da sonda espacial Dawn em 2015.

No passado, acreditava-se que Ceres era membro de uma família de asteroides. Os asteroides dessa família possuem elementos orbitais similares, o que poderia indicar uma origem comum através de uma colisão de asteroides em algum momento no passado. Mais tarde, entretanto, descobriu-se que Ceres possui propriedades espectrais diferentes dos membros dessa família, que passou a ser chamada família Gefion, nomeada a partir de seu membro de menor número, 1272 Gefion (CELLINO et al., 2002). Ceres parece ser meramente um intruso nesta família, coincidentemente tendo elementos orbitais similares, mas não uma origem comum (KELLEY, M.; GAFFEY, M. 1996).

Ceres está muito próximo de uma ressonância orbital 1:1 com Pallas (seus períodos orbitais diferem em 0,3%) (KOVAČEVIĆ, A. 2012). Entretanto, uma ressonância verdadeira entre os dois seria improvável. Devido às suas massas reduzidas e às grandes distâncias entre si, tais relações gravitacionais entre asteroides são muito raras (CHRISTOU, A. 2000).

Tabela 4: Principais características físicas do planeta anão Ceres e seus respectivos valores

Característica física	Valor obtido por técnica astronômica
Diâmetro equatorial	$974,6 \pm 3,6$ km
Área da superfície	1 800 000 km ²
Massa	$9,5 \times 10^{20}$ kg
Densidade média	2,08 g/cm ³
Gravidade equatorial	0,028 G
Período de rotação	0,3781 d
Velocidade de escape	0,51 km/s
Albedo	0,113
Magnitude aparente	6,7 a 9,32
Magnitude absoluta	$3,36 \pm 0,02$
Temperatura	média: -106 °C máxima: -34 °C

Fonte: Adaptado do Wikipedia (2021).

2.3 ORIGEM E EVOLUÇÃO

Os trabalhos de McKinnon (2008) e McKinnon (2012) afirmaram haver uma possibilidade intrigante para a formação e evolução de Ceres. Nesses trabalhos eles dizem que Ceres deveria ser um planetesimal capturado do disco primordial originalmente na região externa do Sistema Solar, baseado no modelo de Nice. O modelo de Nice evoca uma instabilidade dinâmica entre os planetas gigantes que foi desencadeada por interações com o disco de planetesimais primordial externo (TSIGANIS, K. et al (2005)). Para McKinnon (2008) e McKinnon (2012) Ceres foi dinamicamente espalhado internamente durante a reorganização do sistema solar externo, durante a fase de instabilidade, e implantado no cinturão de asteroides primordial e circularizado devido à fricção dinâmica. Ainda no trabalho de Levison et al. (2009) suas simulações mostraram que muitos planetesimais trans-netunianos devem ter sido espalhados para a parte mais interna do Sistema Solar e capturados

nas regiões dos troianos e dos Hildas, assim como em órbitas bem próximas do Sol à 2,68 au. Para reforçar essa informação, uma recente descoberta de amônia na superfície de Ceres se mostra como uma grande evidência química de que o planeta anão foi formado na região do Sistema Solar externo. A presença deste material poderia explicar que Ceres foi formado bem além da linha de gelo onde a amônia é prontamente disponível (VOKROUHLICKÝ, D.; BOTTKE, W.; NESVORNÝ, D. 2016). Eles também acreditam na possibilidade de materiais terem migrado do Sistema Solar externo e acretado em Ceres. Portanto, a formação de Ceres não seria totalmente local, se contarmos com a possibilidade de que ele recebeu material de regiões externas. Modelos recentes de formação de planetas mostram que Ceres pode ser um planetesimal ejetado da zona dos planetas gigantes, tendo ocorrido um processo dinâmico no início da história do Sistema Solar (WALSH K. et al (2011)). Ou seja, de acordo com esse modelo a formação do planeta anão teria ocorrido bem mais próximo de sua atual posição, diferente do modelo já discutido que avalia a possibilidade de Ceres ter vindo do cinturão de Kuiper.

Ceres é provavelmente um protoplaneta remanescente, que se formou há 4,57 bilhões de anos no cinturão de Kuiper, sofreu migração posteriormente e foi capturado no cinturão Principal (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Apesar da maioria dos protoplanetas do interior do Sistema Solar terem se fundido com outros planetas para formarem os planetas telúricos ou terem sido ejetados do Sistema Solar por Júpiter, (PETIT, J.; MORBIDELLI, A.; CHAMBERS, J. 2001) acredita-se que Ceres havia sobrevivido relativamente intacto (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Vesta, outro possível protoplaneta remanescente, possui menos da metade do tamanho de Ceres, e perdeu aproximadamente 1% de sua massa por conta de um grande impacto após solidificar-se (THOMAS et al., 1997). Ceres e outros grandes asteroides, se tivessem se formado próximo às suas posições atuais, teriam resistido a uma fase caótica do Sistema Solar, em que os planetesimais colidiram entre si ou eram ejetados para longe do Sol, durante a migração planetária (RUSSELL, C.; RAYMOND, C. 2012).

A evolução geológica de Ceres foi dependente das fontes de calor disponíveis durante e após sua formação: fricção por acreção de planetesimais, e decaimento de vários radioisótopos. Estas fontes podem ter sido suficientes para permitir a diferenciação em um núcleo rochoso e um manto de gelo logo após sua formação (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Este processo pode ter causado renovação da superfície por vulcanismo e atividade

tectônica, apagando características geológicas mais antigas (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). Devido ao seu tamanho reduzido, Ceres teria se resfriado rapidamente após sua formação, fazendo com que o processo de renovação da superfície cessasse. Qualquer gelo em sua superfície teria gradualmente sublimado, deixando vários minerais hidratados como argilas e carbonatos (RIVKIN, A.; VOLQUARSEN, E.; CLARK, B. 2006).

Atualmente Ceres aparenta ser um corpo geologicamente inativo, com superfície esculpida somente por crateras de impacto (LI et al., 2006). A presença de quantidades significativas de gelo de água em sua composição (THOMAS et al., 2005) levanta a possibilidade de que Ceres teve ou tem uma camada de água líquida em seu interior (MCCORD T.; SOTIN, C. 2005). Esta camada hipotética é frequentemente chamada de “oceano” (RIVKIN, A.; VOLQUARSEN, E.; CLARK, B. 2006). Se tal camada de água líquida existir, estaria localizada entre o núcleo de rocha e o manto de gelo, similar ao oceano que pode existir em Europa (lua de Júpiter) (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005). A existência deste oceano é mais provável se solutos (como sais), amônia, ácido sulfúrico ou outros compostos anticongelantes estiverem presentes (MCCORD, T.; SOTIN, C. 2005).

2.4 TEORIA DE FORMAÇÃO DE CERES DURANTE O MODELO DE NICE

Vokrouhlický, Bottke e Nesvorný (2016) estudaram a captura de planetesimal trans-Netuniano no cinturão principal de asteroide usando as mais recentes versões do modelo de Nice (NESVORNÝ D.; MORBIDELLI, A 2012). Assumindo que foram uma vez cinco planetas no Sistema Solar externo em configuração estável: Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e um corpo como Netuno e um disco primordial contendo milhões de corpos de massa de Plutão, eles investigaram como as interações entre o quinto planeta gigante, Júpiter e o disco de planetesimais ajudou a capturar o disco de planetesimais ambos para o cinturão de asteroides e o movimento de ressonâncias médias de primeira ordem com Júpiter.

No trabalho de Vokrouhlický, Bottke e Nesvorný (2016) eles calcularam que o disco primordial, que fica além de Netuno entre 23 e 30 au, poderia ter tido entre 3.600 e 14.000 objetos do tamanho de Ceres. Eles usaram a probabilidade de implantação no disco de

planetesimais pertencente ao cinturão principal externo e região Cybele, que é de $3,9 \times 10^{-6}$ por simulação de disco de planetesimais, e calcularam que a probabilidade de implantação de Ceres estaria entre 1 e 6 por cento. Ceres, contudo, está localizado a 2,77 au, o que diminui a probabilidade de captura pelo disco planetesimal para 3×10^{-7} , tal que a probabilidade de implantação de Ceres fica entre 0,1 a 0,4 por cento. Eles alegam contudo que este valor é baixo o suficiente e não é a favor para uma explicação para a origem de Ceres.

A captura de planetesimais da região de Júpiter e Saturno e regiões mais distantes também foram estudadas por Raymond e Izidoro (2017), porém desta vez durante a fase de disco gasoso. Eles investigaram como a rápida acreção de gás dos núcleos planetários gigantes desestabilizaram as órbitas próximas dos planetesimais. Como uma consequência dos efeitos combinados da desestabilização da órbita, espalhamento gravitacional, arrasto aerodinâmico de gás e o crescimento de Júpiter e Saturno, houve a implantação de asteroides tipo C no cinturão. Eles encontraram duas populações do tipo C, uma presa em órbitas estáveis e outra espalhada na direção do Sol. Os objetos tipos C implantados nesse modelo têm uma preferência para o cinturão principal externo com uma largura 5 au (que vai de 4 a 9 au). Raymond e Izidoro (2017) observaram que a distribuição de planetesimais de diâmetro igual a 1.000 km implantados tem um pico em sua distribuição por volta de 2,7 au. Então, eles alegaram que Ceres foi implantado durante o crescimento de Júpiter e Saturno. Contudo, este processo não pode explicar completamente os asteroides tipo C, principalmente por que nesse modelo as órbitas dos asteroides não alcançam as excentricidades observadas e nem a distribuição de inclinações (RAYMOND, S.; NESVORNY, D. 2020).

3 MÉTODOS

Nós estudamos a implantação de planetesimais do tamanho de Ceres após a formação completa de Júpiter e Saturno e durante o crescimento de Urano e Netuno. Para fazer isto, nós usamos um modelo confiável de crescimento e evolução das órbitas dos planetas gigantes de gelo. Aqui, nós usamos o cenário de Izidoro 2015, explorado nos trabalhos Izidoro et al. (2015b) e Izidoro et al. (2015a). O cenário proposto por Izidoro tenta explicar a formação de Júpiter e Saturno em duas etapas, além da formação de um sistema formado por protoplanetas de tamanho de 5 massas da Terra (veja mais detalhes na Seção 3.1. Complementando, Izidoro et al. (2015b) explica como a migração, colisões e ressonância de movimento médio contribuíram para a formação dos planetas com massas comparáveis a Netuno e Urano (veja Seção 3.1).

O nosso objetivo é estudar a possibilidade de que Ceres tenha sido um “refugiado” do cinturão de Kuiper primordial. Para este processo usamos uma simulação da evolução dinâmica da formação bem sucedida dos planetas gigantes de gelo produzida por Izidoro et al. (2015a). Nós estudamos como a evolução planetária de Izidoro et al. (2015a) afetaria o disco primordial de planetesimais. Para isso, nós geramos um disco planetesimal do tamanho de Ceres e colocamos na evolução produzida por Izidoro et al. (2015a). Nós esperamos que as perturbações e o espalhamento dos planetas no disco primordial de planetesimais irão fazer com que alguns planetesimais cruzem a região do cinturão de Asteroides. Nós então calculamos a fração de planetesimais do tamanho de Ceres que ficaram localizados em órbitas com um semieixo maior abaixo de 5 au e estudamos os mecanismos para implantar esses objetos para órbita atual de Ceres.

A implantação de objetos na região do cinturão de Asteroides, vindos do disco de planetesimais transneptuniano, pode ocorrer devido a efeitos dissipativos do disco de gás (RIBEIRO et al., 2020) e o número de implantados depende da distribuição inicial de tamanhos dos planetesimais e do número inicial de planetesimais. Nós estamos interessados em capturar um objeto com o tamanho aproximado de Ceres (946 km de diâmetro). Para isto, nós realizamos simulações com um número substancial de planetesimais (20 mil planetesimais), colocados inicialmente após a órbita de Saturno e com diâmetro de 1.000 km. Esse número de planetesimais pode criar uma amostragem estatística para o estudo de captura

desses objetos no cinturão Principal de Asteroides. Em todas as simulações haviam os planetas gigantes, múltiplos embriões planetários que formaram 3 gigantes de gelo, o disco de planetesimais, os nossos proto-Ceres, e o disco de gás. A menos dos planetesimais, os demais objetos foram sintetizados da simulação usada no cenário de Izidoro et al. (2015a). Os planetesimais iniciaram suas órbitas com excentricidades de 0,01 e inclinações de 0,01 graus, e o valor do semieixo variaram de 10 a 45 unidades astronômicas.

Nossa metodologia é puramente numérica, portanto, usamos uma versão do código REBOUND (REIN H., et al (2012)) para realizar simulações de N-corpos dos planetesimais interagindo com o Sol, Júpiter, Saturno e embriões planetários, através de interpolação, ou seja, esses objetos não foram integrados, mas somente usados suas posições. Também usamos o gás do disco protoplanetário. Em nossas simulações, os planetesimais são considerados partículas de teste não interagentes.

3.1 CENÁRIO DO MODELO DE IZIDORO ET AL. DE 2015

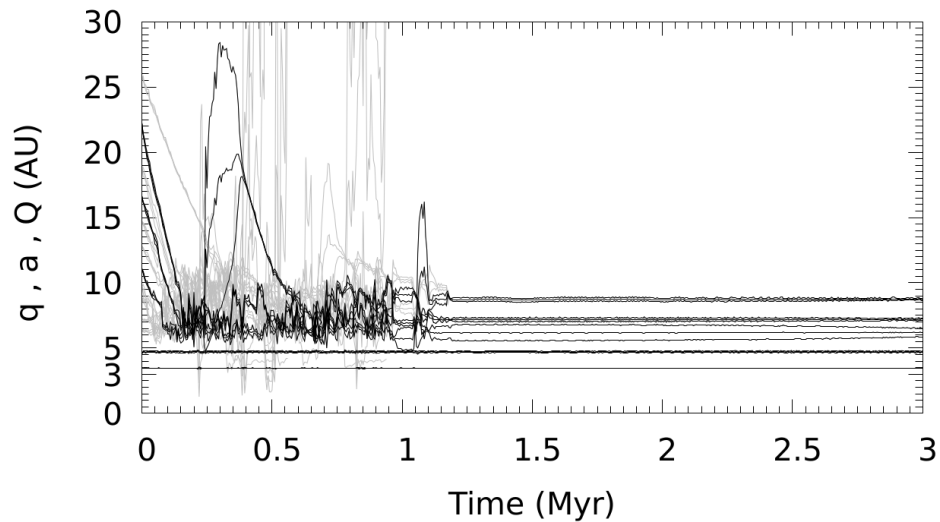
Nós usamos o cenário de Izidoro 2015, explorado nos trabalhos Izidoro et al. (2015a) e Izidoro et al. (2015b). Exploramos principalmente a segunda parte do trabalho referenciada em Izidoro et al. (2015a). No cenário de Izidoro et al. (2015a) foi proposto que os gigantes de gelo foram formados em duas etapas, enquanto Júpiter e Saturno sofreram uma rápida acreção de gás para se tornarem os gigantes gasosos. Na primeira etapa ocorreu a acreção de “pebbles” quando foi produzido um sistema de protoplanetas com até 5 massas da Terra, chamados muitas vezes de super-Terras (MAYOR et al., 2011; BATALHA et al., 2013). Esses protoplanetas migraram em direção ao Sol no regime Tipo I, devido aos torques de maré do disco de gás (WARD, W., et al (1986)) enquanto acretavam planetesimais e o restante do gás. Não está claro se Júpiter e Saturno neste ponto poderiam ter migrado para dentro, para fora, ou terem ficado em órbitas aproximadamente estacionárias (MASSET, F., et al (2011)). Estima-se que a migração dos gigantes de gás foi certamente menor do que a dos protoplanetas quando é usada as viscosidades típicas do disco protoplanetário. Crida e Morbidelli (2007) argumentam que a presença simultânea de Júpiter e Saturno produzem

efeitos que podem desacelerar, parar ou mesmo reverter a migração ressonante desses dois planetas, dependendo da razão de aspecto do disco.

Os protoplanetas, quando se utilizam dos modelos propostos, geralmente não podem migrar além das órbitas de Júpiter e Saturno. Isso significa que os gigantes gasosos agem como uma barreira para a migração desses protoplanetas (IZIDORO et al., 2015a). Uma das razões disso é que os protoplanetas ficaram presos em ressonâncias de movimento médio com Saturno, e por um processo sucessivo, eles formaram cadeias de ressonâncias de movimento médio um com os outros. Com a migração de mais protoplanetas para dentro, a cadeia ressonante se estabiliza, deixando as colisões com os planetas gigantes para uma outra fase de migração. Izidoro et al. (2015b) mostraram que este processo tipicamente produz 2-3 gigantes de gelo com massas comparáveis às de Urano e Netuno.

Neste trabalho vamos considerar a melhor simulação de Izidoro et al. (2015a) que começa com um sistema que contém Júpiter, a 3,5 au, Saturno, a 4,58 au, e uma coleção de 11 protoplanetas distribuídos com um semieixo maior na faixa de 6 a 26 au. As massas dos protoplanetas tinham entre 3 a 9 massas da Terra. Todos os corpos começaram em órbitas circulares. Os embriões planetários migraram para dentro por causa da presença do gás e ficaram presos na cadeia de ressonância de movimento médio criada devido aos planetas gigantes. As perturbações gravitacionais entre os embriões planetários e planetesimais eventualmente quebram as cadeias de ressonância e o sistema se torna dinamicamente instável. Os embriões planetários começam a ser espalhados devido a encontros mútuos ou com planetas gigantes. Essa simulação reproduz as massas reais de Urano e Netuno, com cerca de 15 massas da Terra. Esse processo é mostrado na Figura 5.

Figura 5: O processo de formação de Urano e Netuno. Podemos verificar através do gráfico que durante 1,2 M de anos que os planetas apresentaram instabilidade dinâmica intensa até o momento em que os planetas gigantes de gelo são formados e o sistema é mantido estável por cadeias de ressonância



Fonte : Sousa (2019).

3.2 INTERPOLAÇÃO NUMÉRICA

A partir dos dados que geraram a evolução planetária mostrada na Figura 5, nós interpolamos os elementos orbitais de todos os corpos massivos (Júpiter, Saturno e os embriões planetários que formam os gigantes de gelo), usando funções “splines”. Nós, então, usamos estas posições sintéticas para comporem as posições nas forças perturbadoras dos corpos massivos durante a evolução dos planetesimais. A realização da interpolação foi feita pela versão do REBOUND adaptada por Ribeiro et al. (2020). O código de Ribeiro et al. (2020) permite escalar a evolução das órbitas de Saturno e dos protoplanetas em relação ao semieixo maior de Júpiter e adaptar a evolução da Figura 5 para uma órbita de Júpiter de 3,5 au para 5 au.

A vantagem de usar a interpolação da evolução de Izidoro et al. (2015a) é que podemos estudar a implantação de planetesimais na região do cinturão de Asteroides removendo os

efeitos estatísticos de diferentes evoluções planetárias. Através deste procedimento é esperado que cada simulação implemente exatamente a mesma evolução dos planetas e embriões planetários. Nós também incluímos os efeitos de um disco gasoso protoplanetário nos planetesimais (arrasto de gás e fricção dinâmica) a partir do código produzido por Ribeiro et al. (2020). A seguir vamos descrever as propriedades do gás e os efeitos de arrasto que são aplicados aos planetesimais.

3.3 PROPRIEDADES DO DISCO DE GÁS PROTOPLANETÁRIO

O código de Ribeiro et al. (2020) já é adotado para ler as propriedades do disco de gás protoplanetário que é consistente com o modelo de Izidoro et al. (2015b). Nós não fizemos alteração nas propriedades do gás para manter essa consistência. Aqui, nós fazemos uma sucinta descrição do disco de gás protoplanetário. Nós usamos a densidade de superfície $\Sigma(r, t)$, que explica as lacunas abertas no gás por Júpiter e Saturno em um disco, bem como o esgotamento parcial do disco interno. Este perfil foi calculado através de simulação hidrodinâmica, iniciado com um disco de densidade superficial $\Sigma(r) = 1.000 \text{ g/cm}^2 \text{ (UA/r)}$ e assumindo um decaimento de gás exponencial uniforme ao longo do tempo incluindo o termo $\exp(-t/\tau_{\text{gas}})$.

A razão de aspecto do disco é dado por:

$$h = \frac{H(r)}{r} 0,033^{0,25} \quad (2)$$

onde $H(r)$ é a pressão de escala de altura de raio r . Então, a densidade do gás tem uma z -distribuição dada por

$$\rho(r, z, t) = \frac{\Sigma(r, t)}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2H^2}\right) \quad (3)$$

Nas simulações hidrodinâmicas, a tensão viscosa do disco foi modelada usando prescrição de Shakura (SHAKURA, N.; SUNYAEV, R. 1973). A viscosidade do disco é dado por:

$$\nu = \alpha c_s H \quad (4)$$

onde, c_s é a velocidade do som e o valor de α é 0,002 nas simulações de Izidoro et al. (2015a).

As velocidades sub-keplerianas do gás no plano médio foi também lido das simulações hidrodinâmicas e inclui o efeito de pressão gradiente, consistente com o perfil do $\Sigma(r)$ e $H(r)$ relatado acima.

3.4 EFEITOS DO DISCO DE GÁS NOS PLANETESIMAIIS

O código de Ribeiro et al. (2020) também já possui módulos específicos para calcular os efeitos do gás nos planetesimais. Neste código, nós podemos ler as propriedades do disco de gás dadas acima e calcular a força de arrasto de gás aerodinâmico e o arrasto de fricção dinâmica. Vamos descrever estes dois efeitos produzidos pelo disco de gás brevemente aqui.

A força de arrasto de gás aerodinâmico em uma partícula se movendo no disco de gás ambiente é expresso em função da forma, tamanho e velocidade da partícula e densidade do gás. No caso particular de corpo esférico com raio R , a força de arrasto está em uma direção oposta à velocidade da partícula sendo expressa por:

$$\vec{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \pi R^2 \rho_g v_{rel} \vec{v}_{rel} \quad (5)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto no gás, ρ_g é a densidade do gás e v_{rel} é o vetor velocidade da partícula relativa ao gás. O coeficiente de arrasto para um objeto esférico é uma função do número de Reynolds (Re), que é uma medida da turbulência do gás no rastro de um planetesimal, o número de Mack (M) e o número Knudsen (K). Para calcular o coeficiente de arrasto nós usamos a aproximação de Brasser onde eles estimaram os valores de M , K e R e como função do tamanho e velocidade do planetesimal (BRASSER, R.; DUNCAN, M.; LEVISON, H. 2007).

Grishin e Perets (2015) mostraram que para planetesimais dentro da faixa de massa de 10^{21} a 10^{25} g há uma outra interação planetesimal-gás. Esta força é conhecida como GDF¹ e considera a mesma aproximação de Grishin e Perets (2015). Ela se caracteriza como uma perda de momento linear e energia cinética de corpos movendo-se através de interações gravitacionais com a matéria circundante no espaço (no nosso caso, o gás). A Fricção Dinâmica do Gás é muito importante para nossas investigações no processo de implantação

¹ Gas Dynamic Friction, em português significa Fricção Dinâmica do Gás

de Ceres. A razão é que o tamanho de Ceres é aproximadamente 1.000 km em diâmetro, que é o tamanho onde a Fricção Dinâmica do Gás é realmente efetiva para esses casos. A Fricção Dinâmica do Gás é dada por:

$$\vec{F}_{GDF} = -\frac{4\pi G^2 m^2 \rho_g}{v} \vec{v}_{rel} I(M), \quad (6)$$

onde $I(M)$ é um fator adimensional dependente do número de Mack e ele é dado por:

Se $M < 1$, então

$$I(M) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+M}{1-M} \right) - M \quad (7)$$

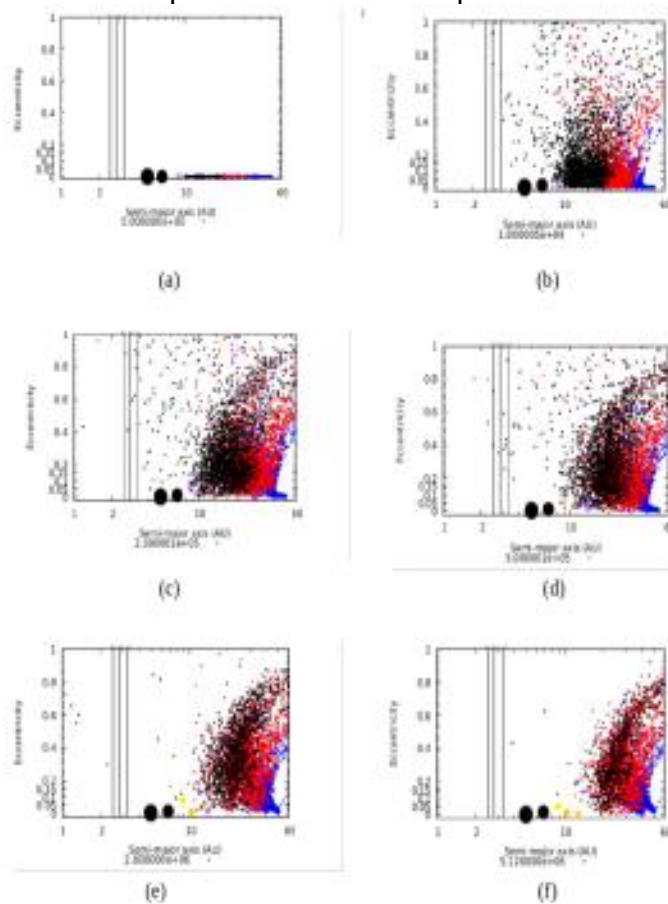
Se $M > 1$, então:

$$I(M) = \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{1}{M^2} \right) + \ln \left(\frac{v_{rel} t}{R} \right) \quad (8)$$

3.5 INVASORES DO SISTEMA SOLAR INTERNO

Note que na evolução de formação de Urano e Netuno que nós estamos usando de Izidoro et al. (2015a) (Figura 5), no intervalo de 0 a 1 M ano, existem alguns protoplanetas que invadem o Sistema Solar interno. Nos painéis da Figura 6, nós apresentamos alguns retratos da evolução da Figura 5, mas escalada para Júpiter em 5 au. Nos painéis (a)-(d) são mostrados diagramas do semieixo maior e excentricidade do Sistema Solar inicialmente (painel (a)) com Júpiter em 5 au, Saturno em 6,55 au, e uma coleção de 11 protoplanetas distribuídos com semieixo maior em uma faixa de 8 a 40 au. Os protoplanetas possuem massas iniciais entre 3 a 9 massas da Terra.

Figura 6: Os Painéis de (a) a (d) são instantâneos da excentricidade em função do semieixo maior. O sistema apresenta Júpiter, Saturno e uma coleção de embriões planetários. As MMR 3:1, 5:2 e 2:1 com Júpiter são apresentados por linhas verticais. Observe que alguns protoplanetas estão atingindo semieixo menores que 5~au e são chamados de protoplanetas invasores. A curva cinza representa uma linha do pericentro do protoplaneta invasor. O Painel (e) representa uma evolução completa dos pericentros deste corpos. Pontos pretos correspondem aos planetas e os pontos em roxo correspondem aos embriões planetários



Fonte: Produzido pelos autores.

Em especial, nos Painéis 6b e 6c, nós mostramos dois retratos em que os protoplanetas que invadem o Sistema Solar interno (círculos em rosa) estão presentes. Estes painéis representam o retrato em dois instantes de tempo de $3,7 \times 10^5$ e $1,4 \times 10^6$ anos, respectivamente. Estes instantes de tempo marcam a passagem do primeiro e do último protoplaneta que invade o Sistema Solar interior.

Os protoplanetas invasores poderiam afetar o processo da captura de planetesimais na região interna do Sistema Solar caso estes para ali se dirigissem. As linhas do pericentro dos protoplanetas invasores (curva cinza nos Painéis 6b e 6c) cruza ressonâncias de movimento médio com Júpiter podendo remover ou colocar objetos que estão próximos a estas ressonâncias de movimento médio (sendo três ressonâncias de movimento médio (MMR). Estas ressonâncias são apresentadas por linhas pretas verticais e elas são MMR 3:1, MMR 5:2, e MMR 2:1). No Painel 6d, nós mostramos que a simulação reproduz as massas reais de Urano e Netuno (cerca de 15 massas da Terra). Conforme podemos observar no Painel 6e, os 3 remanescentes colidiram entre si e se mantiveram estáveis em pelo menos no intervalo de 2 a 3 M anos.

A evolução do pericentro dos planetas e protoplanetas é mostrada no Painel 6e. Note que mais uma vez os protoplanetas que começaram na região externa do Sistema Solar invadem a região interna do Sistema Solar, chegando a ter pericentros entre 1,3 e 3 au por curtos períodos de tempo. Os protoplanetas invasores podem oferecer uma chance de espalhar planetesimais através de encontros próximos que eventualmente são capturados ou que estão no cinturão principal de asteroides.

3.6 DISTRIBUIÇÃO DE PLANETESIMAIS

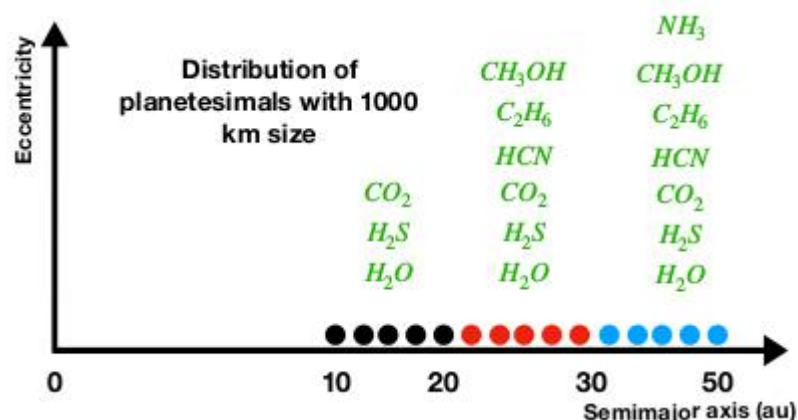
Nós adotamos um disco de planetesimais, todos com 1.000 km de diâmetro. Os planetesimais foram distribuídos depois das órbitas dos planetas gigantes. Nós dividimos a região ocupada pelos planetesimais em três diferentes reservatórios. Essas três regiões foram escolhidas por se ajustarem a modelos químicos que propõem abundâncias de substâncias em certas localidades e que poderia explicar as cores superficiais dos objetos observáveis do cinturão de Kuiper (BROWN, T. 2001).

O cinturão de Kuiper (KBOs) é formado por objetos que estão em órbitas além de Netuno. Os KBOs apresentam variação de cores cuja razão ainda não é compreendida. De acordo com Brown, Schaller e Fraser (2011), as principais restrições de observação fornecem pistas importantes para a compreensão das superfícies desses objetos. Eles sugeriram que as recentes composições superficiais dos planetesimais podem ser definidas por fortes

gradientes na composição da superfície acoplada com radiação ultravioleta. Este processo é chamado de evaporação volátil e poderia explicar as cores da superfície que estão hoje nos objetos do cinturão de Kuiper. Se os objetos tão grandes como Ceres tem suas cores definidas por evaporação volátil após sua formação, eles podem reter H_2O , CO_2 e H_2S na maior parte de sua superfície. Na região entre 30 a 50 au os objetos com 1.000 km de diâmetro podem também ter NH_3 em suas superfícies.

Inspirada na Figura 1 de Brown, Schaller e Fraser (2011), a Figura 7 mostra a distribuição inicial dos planetesimais (representados por esferas pretas, vermelhas e azuis) no diagrama do semieixo maior e excentricidade. Os planetesimais estão inicialmente dentro das três regiões. A região preta de 10 a 20 au, a região vermelha entre 20 a 30 au e a região azul de 30 a 50 au. As cores verdes indicam as espécies moleculares que sobreviveram na superfície de objetos com o tamanho de Ceres. Como dissemos antes, Ceres tem amônia em sua superfície, o que poderia indicar que ele foi formado na região azul. Embora, as regiões pretas e vermelhas sejam importantes em nosso modelo no caso de uma possível mistura dos planetesimais durante as interações com os planetas gigantes, protoplanetas e o disco de gás.

Figura 7: Distribuição inicial de planetesimais com 1000 km de tamanho em nossas simulações. Os planetesimais são representados por esferas pretas, vermelhas e azuis. As cores verdes são as espécies moleculares que sobrevivem na superfície dos planetesimais



Fonte: Produzido pelos autores.

A simulação contou com 20.000 partículas, sendo distribuídas da seguinte forma: 5.000 planetesimais para a região preta, 5.000 planetesimais para a região vermelha e 10.000 para a região azul. As excentricidades e inclinações iniciais do disco de planetesimais foram

inicializadas com o valor 10^{-3} . Os ângulos de argumentos de pericentro e longitude do nodo ascendente foram inicializados com valores aleatórios entre 0 e 360 graus.

3.7 IMPLANTAÇÃO DE CERES

Para fazer as estatísticas do processo de implantação de Ceres no cinturão principal, nós modificamos o código de Ribeiro et al. (2020) para escrever uma saída contendo informações dos planetesimais que cruzam o Sistema Solar interno. Nós monitoramos o semieixo maior, a , de cada planetesimal. Se $a < 5$ au, então gravamos os elementos orbitais e o tempo em um arquivo diferente para cada planetesimal em cada passo de tempo.

Nós primeiro calculamos a fração de planetesimais de cada região (veja Seção 3.3) que foram implantados na região interna do Sistema Solar. Por conveniência, agora estes planetesimais são chamados de candidatos a Ceres.

Nós investigamos o mecanismo responsável por inserir estes planetesimais em órbitas estáveis próxima a órbita atual de Ceres. A forte influência gravitacional dos planetas gigantes e dos protoplanetas invasores tornam a região interior do Sistema Solar muito caótica. As órbitas dos candidatos a Ceres podem sofrer mudanças exponenciais, bastando uma mudança infinitesimal no vetor de estado. Portanto, é necessário criar mecanismos muito precisos para lidar com essa situação.

Nós estudamos a dinâmica dos candidatos a Ceres e clonamos em até 500 vezes os que apresentam uma maior estabilidade (presos em MMR com Júpiter, por exemplo). A clonagem foi realizada somente uma vez para cada candidato. Os clones se diferenciam pela velocidade original de cada corpo que sofre uma pequena mudança fracionada em 10^{-6} . Brasser e Morbidelli (2013) usaram um método similar de clonagem em sua pesquisa. As parametrizações descritas acima são usadas para fazer uma análise estatística do processo de captura de Ceres, mostrando os mecanismos responsáveis para implantar um planetesimal de 1.000 km de diâmetro em uma órbita estável próxima de Ceres durante a fase de gás do disco.

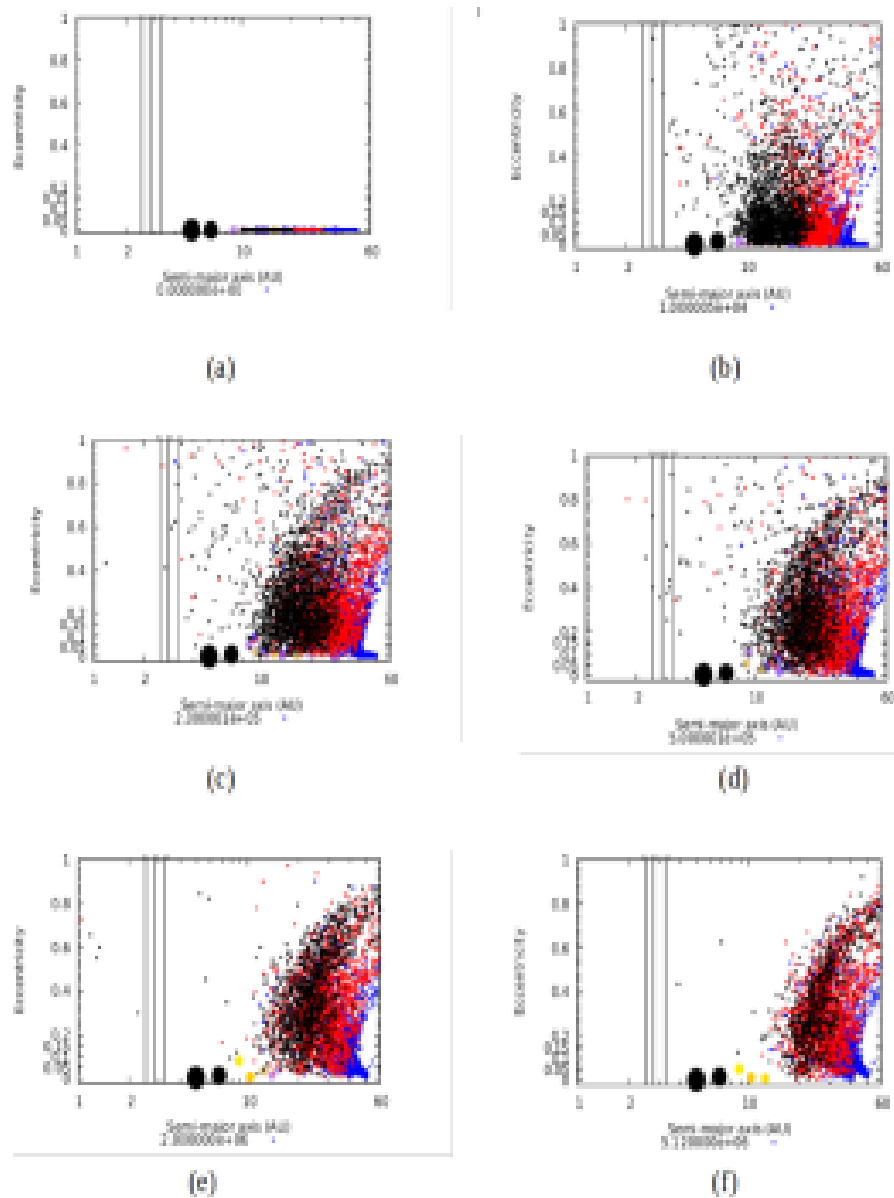
4 RESULTADOS

4.1 EVOLUÇÃO DOS PLANETESIMAIS

Nesta seção exibimos os nossos resultados da evolução dinâmica dos planetesimais sintetizando as posições dos planetas e embriões planetários, mostrada na Figura 6. A evolução dos planetesimais pode ser vista na Figura 8, para a excentricidade pelo semieixo maior, e na Figura 9, para a inclinação pelo semieixo maior. Os planetesimais foram inicializados nas regiões preta, vermelha e azul, como explicado no Capítulo 3. Os efeitos do espalhamento do disco de planetesimais que ocorre devido aos planetas e protoplanetas e o efeito devido ao gás é bem detalhado em Ribeiro et al. (2020). Durante a evolução dinâmica, os planetesimais são espalhados por encontros próximos com os embriões planetários, Júpiter e Saturno. Os planetesimais que colidiram com os protoplanetas são eliminados da simulação. Nas nossas simulações, nós notamos que uma grande fração de planetesimais permanece na região externa do Sistema Solar. Somente uma parte dos planetesimais é espalhada para mais próximo do Sol e alcança a região interna do Sistema Solar com semieixo maior menor que 5 au.

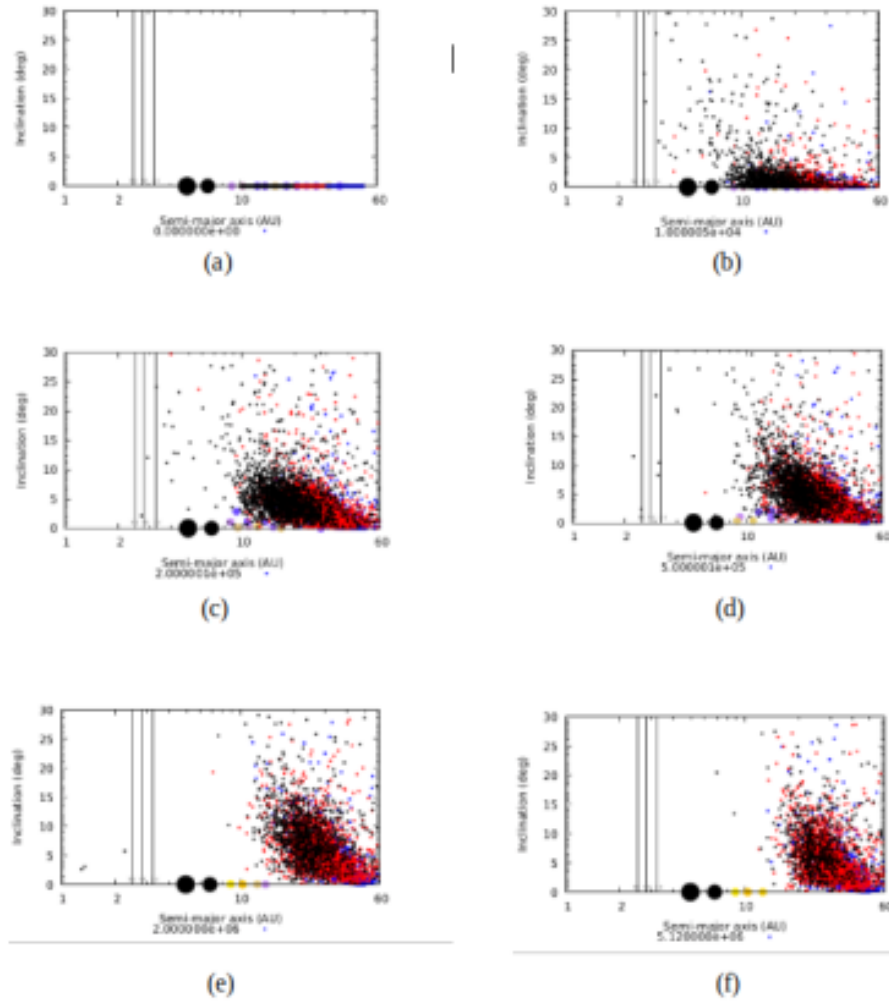
Planetesimais são frequentemente excitados por órbitas excêntricas que podem cruzar o Cinturão de Asteroides. Alguns dos planetesimais tem o semieixo maior dentro da região do Cinturão de Asteroides mas eles não permanecem em órbitas estáveis por toda a simulação. Portanto, todos os planetesimais que obtivemos na região do Cinturão de Asteroides são temporariamente capturados, o que significa que eles não estão em órbitas estáveis (veja na Seção 4.2 os mecanismos para iniciar em órbitas estáveis). Excentricidades moderadas e baixas são atingidas quando os planetesimais sofrem um forte efeito do gás. O desvio radial dos planetesimais que é causado pela fricção dinâmica do gás é mais rápido quando os planetesimais estão em alta excentricidade (GRISHIN, E.; PERETS, H. 2015). Consequentemente, muitos dos planetesimais implantados na região interna do Sistema Solar são perdidos, sendo desviados em direção ao Sol.

Figura 8: Os Painéis (a) - (f) mostram o gráfico de excentricidade pelo semieixo maior retratando a evolução dinâmica dos planetesimais sobre as posições sintetizadas dos planetas e embriões planetários da Figura 6. Cada planetesimal tem a massa de Ceres. As MMR 3:1, 5:2 e 2:1 com Júpiter são representadas por linhas verticais



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 9: Os Painéis (a) - (f) mostram o gráfico de inclinação pelo semieixo maior retratando a evolução dinâmica dos planetesimais sobre as posições sintetizadas dos planetas e embriões planetários da Figura 6. Cada planetesimal tem a massa de Ceres). As MMR 3:1, 5:2 e 2:1 com Júpiter estão representadas por linhas verticais



Fonte: Produzido pelos autores.

Um outro efeito interessante é mostrado no Paineil 8b. O processo de espalhamento do disco de planetesimais produz uma mistura entre planetesimais que inicialmente estavam nas regiões preta, vermelha e azul. Esta mistura acontece bem rapidamente, e portanto alguns planetesimais da região azul podem entrar na região preta e se comportar como um planetesimal da região preta.

O maior número de planetesimais que foram capturados temporariamente na região com $a < 5$ au foram aqueles planetesimais que iniciaram na região preta. Por outro lado, os planetesimais que começaram mais distante no disco, na região azul estão em menor número

na região com $a < 5$ au, como pode ser visto na Tabela 5. O número de planetesimais pretos que foram capturados em $a < 5$ au é de 587, e isso representa uma fração de 0,1174 do total de planetesimais pretos, ou seja, aproximadamente 12% ou ainda aproximadamente 2,9% do total geral de partículas (20 mil). O número de planetesimais da região vermelha, implantados no interior do Sistema Solar, é de 213 planetesimais e representa uma fração de 0,0426 ou aproximadamente 4,3% de planetesimais vermelhos, que representa 1,1% do total geral de partículas. O número de planetesimais que vieram da região azul é muito menor do que os outros casos, foram 28 planetesimais, o que representa somente uma fração de $2,8 \times 10^{-3}$ do total dos 10 mil planetesimais azuis, o que corresponde a 0,28% do total dessas partículas ou 0,14% do total geral de partículas. Então, planetesimais inicialmente na região preta tem uma eficiência bem melhor de implantação temporária do que se eles forem localizados na região vermelha ou azul. Ainda de acordo com a Tabela 5, a fração do total de planetesimais implantados corresponde (incluindo partículas pretas, vermelhas e azuis) a $4,14 \times 10^{-2}$, o que representa aproximadamente 4% das 20 mil partículas de nossa simulação.

Tabela 5: Número de planetesimais implantados e a fração correspondente para cada região

Região inicial	N planetesimais implantados	Fração do total planetesimais
Região preta	587	$1,11 \times 10^{-5}$
Região vermelha	213	$4,26 \times 10^{-2}$
Região azul	28	$2,8 \times 10^{-3}$
Total	828	$4,14 \times 10^{-2}$

Fonte: produzido pelos autores.

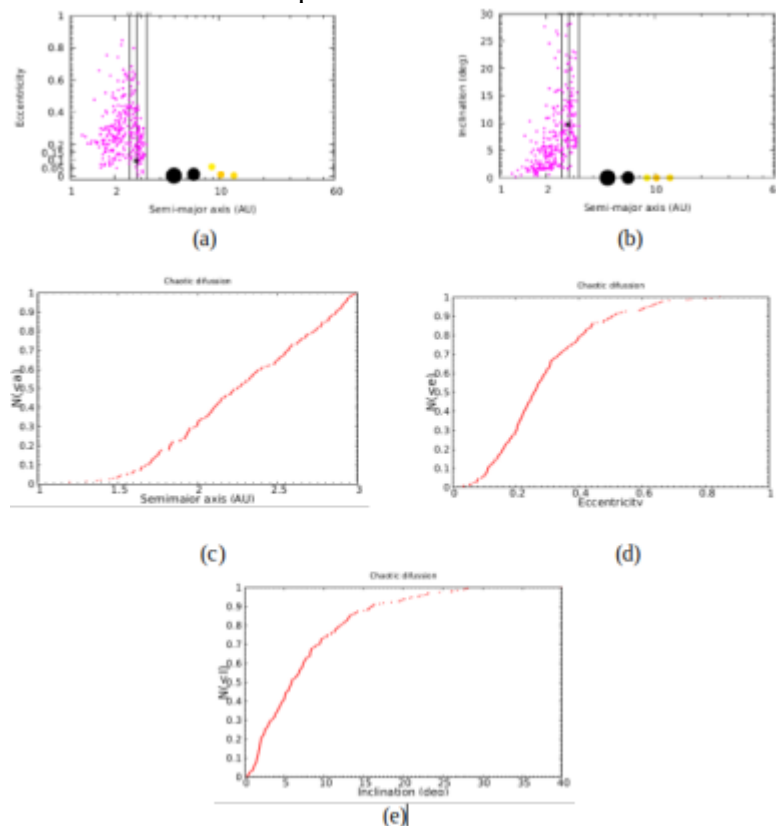
A concentração de órbitas de planetesimais quando eles alcançam pela primeira vez a região entre 2 e 3,5 au têm órbitas com excentricidades moderadas e altas ($0,2 < e < 1,0$) e inclinações moderadas e baixas ($1 < I < 30$ graus).

A distribuição cumulativa normalizada do semieixo, excentricidade e inclinação dos clones planetesimais no final de nossas simulações são mostrados em Painéis (c), (d) e (e) na Figura 10. Observe que os planetesimais estão em órbitas com 40 por cento de probabilidade de ter um semieixo maior entre 2,5 e 3 au, 30 por cento de probabilidade de ter uma

excentricidade menor que 0,2 e cerca de 75 por cento de probabilidade de ter uma órbita de inclinação menor que 10 graus. Nossos resultados indicam que os planetesimais do tamanho de Ceres podem ser implantados na região do Cinturão de Asteroides em uma órbita muito próxima a atual órbita de Ceres. Temos, portanto, uma probabilidade de 12 por cento para um semieixo maior entre 2,5 e 3 au com excentricidade menor que 0,2. Podemos também ter uma probabilidade de 30 por cento para semieixo maior entre 2,5 e 3 au com inclinação menor que 10 graus. E, finalmente, podemos obter uma probabilidade de 22,5 por cento para excentricidade menor que 0,2 com inclinação menor que 10 graus.

As Figuras 10 (a) e (b) mostram a excentricidade, inclinação e semieixo maior dos planetas gigantes e os clones planetesimais (pontos rosas) ao fim da fase do disco de gás.

Figura 10: Diagrama do cenário para implantar planetesimais do tamanho de Ceres na região interna do Sistema Solar. Os pontos rosas representam os clones planetesimais e estes se encontram numa faixa entre 2,5 e 3~au. Por sua vez, os dois pontos pretos maiores representam Júpiter e Saturno, respectivamente. A estrela preta que coincide com uma das linhas verticais (MMR 5:2) representa a posição de Ceres. Os três embriões planetários são representados pelos pontos amarelos. Os Painéis (c) - (e) mostram semieixo maior, excentricidade e inclinação em função do número de planetesimais (N), sendo N menor do que qualquer um desses elementos keplerianos. Planetesimais estão em órbitas com 40\% de probabilidade de ter um semieixo maior entre 2,5 e 3~au. A probabilidade de ter uma excentricidade menor que 0,2 alcança 30\% e cerca de 75\% de probabilidade de ter uma órbita de inclinação menor que 10 graus. Através do Painel (d), podemos observar que as excentricidades podem chegar muito próximo de 1 (valor máximo) e pelo Painel (e) podemos verificar que as inclinações alcançam 30 graus aproximadamente



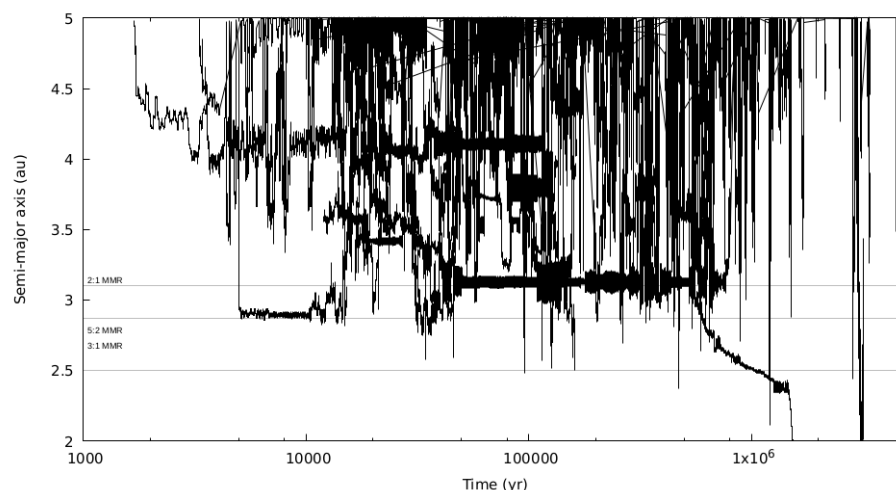
Fonte: Produzido pelos autores.

Note que planetesimais são implantados ao longo do Cinturão de Asteroides mas preferencialmente no meio do Cinturão de Asteroides. Alguns planetesimais podem alcançar órbitas próximas à atual órbita de Ceres. Nós não encontramos qualquer correlação entre as inclinações e excentricidades dos planetesimais pretos com a estabilidade dos planetesimais nas regiões entre 2 e 3,5 au. Isto é um resultado provável da difusão caótica devido à intensa força gravitacional de Júpiter.

O tempo máximo gasto na região do Cinturão de Asteroides do Sistema Solar por um planetesimal azul em nossas simulações foi de apenas 140.000 anos (estamos nos referindo aos planetesimais clones). É notório que o tempo de simulação é bastante reduzido para esse caso específico.

A evolução do semieixo maior de uma centena de planetesimais que passaram na região interna do Sistema Solar é apresentada na Figura 11. Como nós discutimos antes, nenhum dos planetesimais estão em uma órbita estável até 5 milhões de anos como resultado da forte perturbação orbital dos planetas gigantes, protoplanetas invasores e os efeitos do gás. Contudo, note que alguns planetesimais (principalmente os planetesimais pretos) estão localizados em ressonâncias de movimento médio com Júpiter e gastam tempo dentro dessas ressonâncias na órbita regular.

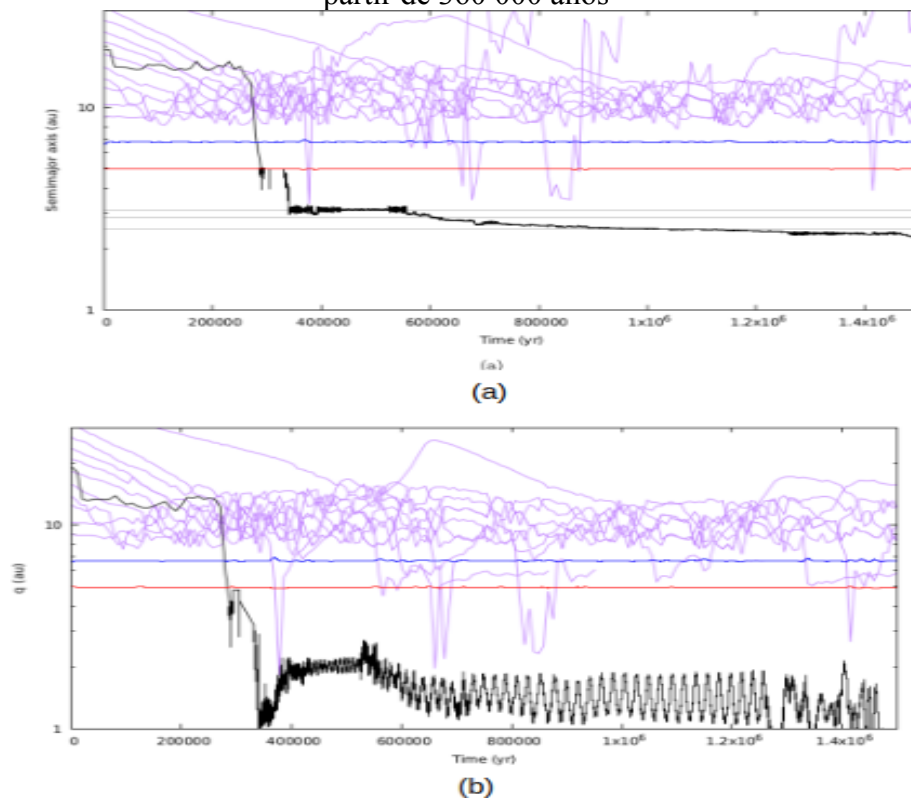
Figura 11: O semieixo maior em função do tempo de cem planetesimais que foram implantados na região interna ($a < 5$ au) do disco planetesimal externo durante a evolução dinâmica de Izidoro et al. (2015a). As linhas cinzas representam a posição das ressonâncias de movimento médio com Júpiter, sendo as MMR 3:1, 5:2 e 2:1



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 12 mostra um exemplo de um planetesimal que é implantado na MMR 2:1 e fica por uma centena de milhares de anos em uma órbita controlada pela ressonância de movimento médio. A presença de protoplaneta invasor e a força de fricção dinâmica do gás sobre o planetesimal podem promover a sua remoção da ressonância de movimento médio. O planetesimal deriva radialmente para dentro do Sol.

Figura 12: Os Painéis 12a e 12b mostram o semieixo maior e a evolução do pericentro de um planetesimal que foi implantado na região interna do Sistema Solar e preso temporariamente em ressonâncias de movimento médio com Júpiter. A linha azul corresponde ao planeta Júpiter. É notória a estabilidade orbital por pelo menos 1,4 milhões de anos. A linha vermelha corresponde ao planeta Saturno e mantém semelhante estabilidade orbital pelo mesmo período. A linha rosa corresponde aos embriões planetários e estes apresentam intensa oscilação. A linha cinza corresponde aos planetesimais. Podemos observar que as ressonâncias são notáveis a partir de 360 000 anos



Fonte: Produzido pelos autores.

4.2 CENÁRIO PARA IMPLANTAÇÃO DE CERES

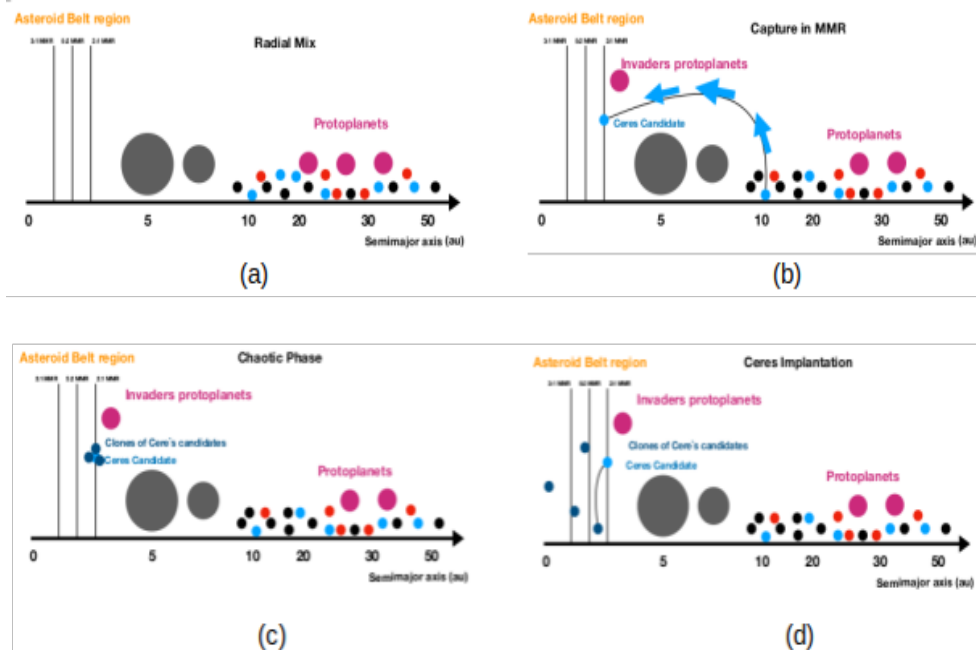
Efetivamente, a partir das integrações principais realizadas anteriormente não encontramos nenhum planetesimal que ficou estável na região do Cinturão de Asteroides. O que nós podemos afirmar é que a probabilidade de capturar um planetesimal nessa região $1/5000$ é menor que da região preta, por exemplo. A partir de agora, nós vamos nos concentrar nos planetesimais iniciados na região preta porque eles são os que se mostraram mais eficientes em serem capturados de forma temporária e nesta seção vamos discutir como alguns mecanismos podem fazer com que estes objetos capturados possam ser colocados em órbitas estáveis na região do Cinturão de Asteroides. Para explorar estes mecanismos, primeiro nós apresentamos um cenário mais geral para a implantação de Ceres, que é totalmente baseado na nossa interpretação dos resultados já apresentados na Seção 4.1.

Na Figura 13 apresentamos um diagrama do nosso cenário. O cenário começa com uma rápida mistura radial na posição dos planetesimais dentro do disco planetesimal externo (Figura 13 (a)). A mistura radial é causada por um rápido processo de espalhamento dos planetesimais (Figura 8 (b)). A mistura radial faz com que alguns planetesimais azuis (planetesimais que começaram na região azul) sejam colocados dentro da região preta. Como mostramos na Seção 4.1, os planetesimais pretos (planetesimais que começaram na região preta) tem uma eficiência melhor ($\approx 12\%$ do total do número de planetesimais) para serem implantados na região interna do Sistema Solar. Então, a fase de mistura radial pode aumentar as chances de um planetesimal parecido como Ceres (com amônia em sua superfície) se tornar um objeto implantado na região do Cinturão de Asteroides.

Nossas simulações mostraram que os objetos implantados na região do Cinturão de Asteroides tem excentricidades muito altas ou moderadas. O efeito combinado de três mecanismos podem abaixar as excentricidades dos planetesimais com semieixo maior dentro da região do Cinturão de Asteroides em nossas simulações: ressonâncias de movimento médio com Júpiter e ressonância de Kozai, encontro próximo com embrião planetário e os efeitos do gás. Um planetesimal que sofre um encontro próximo pode ser colocado em uma forte ressonância de movimento médio com Júpiter e a troca de momento angular pode diminuir a excentricidade do planetesimal. A ressonância Kozai com ressonâncias de

movimento médio também oferece uma chance de reduzir as altas excentricidades dos planetesimais, tornando-as baixas (RAYMOND, S.; NESVORNY, D. 2020).

Figura 13: Diagrama do cenário para implantar planetesimais do tamanho de Ceres na região interna do Sistema Solar. No Paine (a) verificamos a condição inicial (mistura radial). De acordo com esse Paine temos os planetas Júpiter e Saturno (cor cinza), planetesimais pretos, azuis e vermelhos na faixa entre 10 e 50 au, principalmente e, protoplanetas (pontos roxos). No Paine (b) é mostrado o esquema de captura em MMR, representadas pelas linhas verticais (3). Júpiter e Saturno permanecem em suas posições originais. Ocorre deslocamento de planetesimais como também de protoplanetas, agora denominados de protoplanetas invasores, alcançando a região de implantação de Ceres (região do Cinturão de Asteroides). No Paine (c) é mostrado a fase caótica. O número de candidatos a Ceres aumenta e também observamos os clones de candidatos a Ceres. No Paine (d) verificamos que os planetesimais alcançam regiões mais internas no Sistema Solar. Clones de candidatos a Ceres são mais frequentes que os candidatos comuns



Fonte: Produzido pelos autores.

Quando planetesimais são espalhados de forma aleatória, a excentricidade destes objetos podem aumentar ou diminuir. Se a excentricidade diminuir, os planetesimais poderão ficar presos em órbitas mais estáveis. O último mecanismo é o arrasto gasoso que depende da força do gás. A força do gás, por sua vez, fica dependente de uma função da densidade do

disco gasoso e tamanho dos planetesimais. O arrasto aerodinâmico não é tão efetivo para planetesimais do tamanho de Ceres, no entanto, o arrasto de fricção dinâmica é sim importante. O arrasto de fricção dinâmica pode amortecer as excentricidades e inclinações em escalas diferentes do arrasto aerodinâmico. Além disso, o arrasto de fricção dinâmica é mais efetivo para contribuir com o desvio radial dos planetesimais em direção ao Sol, como uma importante fonte de remoção desses objetos.

Como nós mostramos nas Figuras 11 e 12, alguns planetesimais estão localizados em ressonâncias de movimento médio com Júpiter e ficam ali presos, sendo chamados de candidatos a Ceres. Assim, um dos prováveis mecanismos para diminuir as excentricidades dos planetesimais implantados do tamanho de Ceres são as ressonâncias de movimento médio com Júpiter, as quais ajudam a estabilizar as suas órbitas diante do efeito do gás. Além disso, as ressonâncias de movimento médio podem evitar que os planetesimais sejam dirigidos para o Sol. A implantação de planetesimais na ressonância de movimento médio com Júpiter pode ser observada na Figura 13 (b).

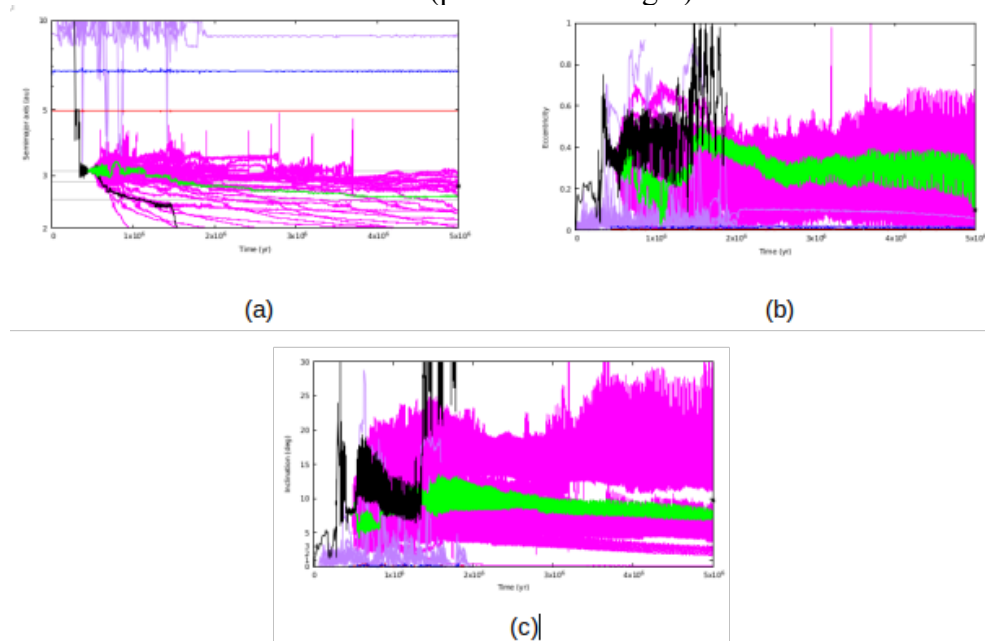
A forte interação gravitacional de Júpiter e a influência dos protoplanetas invasores podem criar um forte efeito de caos na região do Cinturão de Asteroides. Consequentemente, a variação infinitesimal na posição e velocidade dos candidatos a Ceres pode produzir diferentes evoluções dinâmicas. Então, a terceira fase do nosso cenário é chamada fase caótica (Figura 13 (c)). O efeito do caos pode com uma certa probabilidade colocar um candidato a Ceres em uma órbita suficiente próxima a órbita atual de Ceres (Figura 13 (d)).

Para mostrar que podemos ter objetos estáveis implantados no Cinturão de Asteroides, a partir dos objetos que foram capturados em órbitas temporárias, nós realizamos novos conjuntos de simulações, gerando clones de um dos candidatos a Ceres. Nós escolhemos apenas um dos candidatos que apresentou uma órbita estável devido a captura em ressonância de movimento médio com Júpiter. A evolução do semieixo maior do candidato escolhido como objeto “pai” para a geração dos clones já foi mostrado na Figura 12 (a) e (b). Note que este objeto é um dos mais estáveis e ele é capturado em ressonância de movimento médio com Júpiter (MMR 3:1). Nós clonamos este objeto em 500 vezes, no momento em que ele estava capturado em ressonância de movimento médio com Júpiter, dando uma pequena mudança na velocidade original para os novos corpos (fracionadamente alterada por 10^{-6}).

A Figura 14 mostra a evolução de semieixo maior, excentricidade e inclinação de Júpiter, Saturno (linhas vermelha e azul, respectivamente), os protoplanetas (linhas roxas),

candidato a Ceres (objeto “pai”) (linhas pretas), e 50 clones de candidatos a Ceres (linhas rosas). Note que as pequenas mudanças nas condições iniciais dos clones gera evoluções diferentes daquelas observadas pelo objeto “pai”. Algumas das partículas clones são estáveis até o final da integração. Com a linha em verde, nós destacamos um dos planetesimais que ao final da simulação atingiu uma órbita bem próxima a órbita de Ceres (ponto estrela negra na Figura 14).

Figura 14: Painéis (a), (b) e (c) mostram a evolução do semieixo maior, excentricidade e inclinação de Júpiter (linha vermelha), Saturno (linha azul), protoplanetas (linhas roxas), o planetesimal original implantado (linha preta), planetesimais clones (linhas rosa e verde). Linha verde representa um planetesimal clone que alcança uma órbita muito próxima para a órbita atual de Ceres (ponto estrela negra)



Fonte: Produzido pelos autores.

5 CONCLUSÃO

Fizemos uma revisão bibliográfica da literatura científica, trazendo as principais contribuições dos pesquisadores desde especulações, busca, descoberta e classificação de Ceres. Destacamos a importância das observações do telescópio Hubble e da missão Dawn, que trouxe impactantes contribuições para o estudo de Ceres e Vesta.

Nossa proposta foi construir um modelo que estude a possibilidade de implantação de um planetesimal do disco de planetesimais primordial externo no Cinturão Principal de Asteroides, considerando que as propriedades químicas de Ceres indicam que ele foi um planetesimal formado na região externa do Sistema Solar. Partimos das melhores simulações de Izidoro et al. (2015a) do crescimento dos gigantes de gelo durante a fase de disco gasoso. Em seguida, calculamos a fração de planetesimais do tamanho de Ceres que são colocados em órbitas com $a < 5$ au em diferentes localizações iniciais no disco planetesimal externo. Essas diferentes localizações iniciais são restringidas por modelos químicos que poderiam explicar as cores da superfície dos objetos observáveis do Cinturão de Kuiper (BROWN, M.; SCHALLER, E.; FRASER, W. 2011).

Em seguida, apresentamos os resultados que traz a descrição de cada cenário onde Ceres poderia ser implantado e também propomos um cenário geral. Como dissemos antes, modelamos a evolução dinâmica inicial do Sistema Solar externo para investigar os mecanismos para colocar planetesimais do tamanho de Ceres do disco planetesimal externo no meio do Cinturão de Asteroides e muito perto da órbita atual de Ceres. Nas simulações realizadas, nós mostramos que alguns objetos de 1.000 km são colocados momentaneamente dentro da região do Cinturão de Kuiper. Mas eles não permanecem durante os 5 milhões de anos na região. Os mecanismos que estudamos não são capazes de manter estes objetos em órbitas estáveis durante todo o tempo de formação de Urano e Netuno. Eles caem no Sol após passarem pelo Cinturão de Asteroides e, portanto, a fixação de todo e qualquer candidato a Ceres não se concretiza.

Em seguida, apresentamos os resultados que traz a descrição de cada cenário onde Ceres poderia ser implantado e também propomos um cenário geral. Como dissemos antes, modelamos a evolução dinâmica inicial do Sistema Solar externo para investigar os mecanismos para colocar planetesimais do tamanho de Ceres do disco planetesimal externo

no meio do Cinturão de Asteroides e muito perto da órbita atual de Ceres. Nas simulações realizadas, nós mostramos que alguns objetos de 1.000 km são colocados momentaneamente dentro da região do Cinturão de Kuiper. Mas eles não permanecem durante os 5 milhões de anos na região. Os mecanismos que estudamos não são capazes de manter estes objetos em órbitas estáveis durante todo o tempo de formação de Urano e Netuno. Eles caem no Sol após passarem pelo Cinturão de Asteroides e, portanto, a fixação de todo e qualquer candidato a Ceres não se concretiza.

As frações de planetesimais do tamanho de Ceres na região do Cinturão de Asteroides que foram implantados de forma temporária para cada um dos três reservatórios são: $1,11 \times 10^{-1}$ do total de planetesimais são candidatos a Ceres quando foram colocados inicialmente na região preta (definida por $10 < a < 20$ au; que contém H_2O , H_2S , e CO_2 em suas superfícies), $4,26 \times 10^{-2}$ do total de planetesimais são candidatos a Ceres se eles estiverem inicialmente localizados na região vermelha (definida por $20 < a < 30$ au; que contém também CH_3OH e HCN em suas superfícies) e eles foram inicialmente localizados na região azul (definida pelo semieixo maior de 30 a 50 au e contém também a amônia). Nós observamos que durante o processo de esculpimento dinâmico uma mistura de três reservatórios é criado e colocando alguns planetesimais da região azul dentro da região vermelha e preta. Este fato produz uma probabilidade correlacionada nos processos de implantação dentro de um $a < 5$ au. Encontramos duas populações implantadas no Cinturão de Asteroides: aqueles presos em órbitas temporariamente estáveis na região do Cinturão de Asteroides e outros espalhados pelo cinturão em direção à região do planeta terrestre. Nós mostramos que esta população temporária de planetesimais do tamanho de Ceres podem alcançar órbitas estáveis por quatro mecanismos diferentes: implantação em ressonâncias de movimento médio, espalhamento de protoplanetas, arrasto gasoso e processo de difusão caótica. O mais efetivo em nosso cenário foi a implantação em ressonância de movimento médio com Júpiter, seguido por arrasto gasoso e processo de difusão caótica.

No final de nossas simulações, nós produzimos uma população estável de planetesimais do tamanho de Ceres em órbitas com 40 por cento de probabilidade para ter um semieixo maior entre 2,5 e 3 au, 30 por cento de probabilidade de ter uma excentricidade menor que 0,2 e aproximadamente 75 por cento de probabilidade de ter uma inclinação orbital menor que 10 graus. Tomando essas probabilidades, tivemos 12 por cento para semieixo maior nesta faixa com excentricidade menor que 0,2. Obtemos uma probabilidade de 30 por cento para

semieixo maior com inclinação menor que 10 graus. E obtemos uma probabilidade de 22,5 de ter excentricidade com a inclinação menor que 10 graus. Nossos resultados indicam que os planetesimais do tamanho de Ceres podem ser implantados na região do Cinturão de Asteroides em uma órbita muito próxima a atual órbita de Ceres.

REFERÊNCIAS

- A'HEARN, Michael F.; FELDMAN, Paul D. **Water vaporization on Ceres**. *Icarus*, v. 98, n. 1, p. 54-60, 1992, doi: 10.1016/0019-1035(92)90206-M.
- ATKINSON, N. **Bright spots on Ceres likely ice, not cryovolcanoes**. 2020. Disponível em: <https://www.universetoday.com/119235/bright-spots-on-ceres-likely-ice-not-cryovolcanoes/>. Acesso em: 05 fev.2020.
- BATALHA, Natalie M. et al. **Planetary candidates observed by Kepler. III. Analysis of the first 16 months of data**. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 204, n. 2, p. 24, 2013, doi: 10.1088/0067-0049/204/2/24.
- BELL, J. F. et al. **The 52-color asteroid survey: final results and interpretation**. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. 1988.
- BRASSER, R.; DUNCAN, M. J.; LEVISON, H. F. **Embedded star clusters and the formation of the Oort cloud: II. The effect of the primordial solar nebula**. *Icarus*, v. 191, n. 2, p. 413-433, 2007, doi: 10.1016/j.icarus.2007.05.003.
- BRASSER, R.; MORBIDELLI, A. **Oort cloud and scattered disc formation during a late dynamical instability in the Solar System**. *Icarus*, v. 225, n. 1, p. 40-49, 2013, doi: 10.1016/j.icarus.2013.03.012.
- BRITT, Daniel T. et al. **Comparison of asteroid and meteorite spectra: classification by principal component analysis**. *Icarus*, v. 99, n. 1, p. 153-166, 1992, doi: 10.1016/0019-1035(92)90179-B.
- BROWN, M. E.; SCHALLER, E. L.; FRASER, W. C. **A hypothesis for the color diversity of the Kuiper belt**. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 739, n. 2, p. L60, 2011, doi:10.1088/2041-8205/739/2/L60.
- BROWN, Michael E. **The inclination distribution of the Kuiper belt**. *The Astronomical Journal*, v. 121, n. 5, p. 2804, 2001.
- CARRY, Benoit et al. **Near-infrared mapping and physical properties of the dwarf-planet Ceres**. *Astronomy & Astrophysics*, v. 478, n. 1, p. 235-244, 2008, doi: 10.1051/0004-6361:20078166.
- CASTILLO-ROGEZ, J.; MCCORD, T. **Ceres: evolution and present state**. In: *European Planetary Science Congress 2007*. 2007. p. 858.
- CELLINO, A. et al. **Spectroscopic properties of asteroid families**. *Asteroids III*. Univ. of Arizona Press, Tucson, p. 633-643, 2002.
- CHRISTOU, A. A. **Co-orbital objects in the main asteroid belt**. *Astronomy and Astrophysics*, v. 356, p. L71-L74, 2000.
- COFIELD, C. **NASA finds mysterious bright spot on dwarf planet Ceres: what Is It?** 2015. Disponível em: <https://www.space.com/28336-mysterious-white-spot-on-ceres.html/>. Acesso em: 14 fev. 2020.
- CRIDA, A.; MORBIDELLI, A. **Cavity opening by a giant planet in a protoplanetary disc and effects on planetary migration**. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 377, n. 3, p. 1324-1336, 2007, doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.11704.x.
- CUNNINGHAM, C. J. **The first asteroid: Ceres, 1801-2001**. [S.l.]: Star Lab Press Surfside, 2001.
- DRUMMOND, Jack; CHRISTOU, Julian. **Triaxial ellipsoid dimensions and rotational poles of seven asteroids from Lick Observatory adaptive optics images, and of Ceres**. *Icarus*, v. 197, n. 2, p. 480-496, 2008, doi: 10.1016/j.icarus.2008.05.009.
- EKERS, Ron. **The Prague IAU General Assembly, Pluto and the IAU processes**. *Proceedings of the International Astronomical Union*, v. 13, n. S349, p. 51-57, 2018, doi: 10.1017/S1743921319000115.
- FANALE, Fraser P.; SALVAIL, James R. **The water regime of asteroid (1) Ceres**. *Icarus*, v. 82, n. 1, p. 97-110, 1989, doi: 10.1016/0019-1035(89)90026-2.
- FORBES, Eric G. **Gauss and the discovery of Ceres**. *Journal for the History of Astronomy*, v. 2, n. 3, p. 195-199,

1971, doi: 10.1177/002182867100200305.

GRISHIN, Evgeni; PERETS, Hagai B. **Application of gas dynamical friction for planetesimals. I. Evolution of single planetesimals.** The Astrophysical Journal, v. 811, n. 1, p. 54, 2015, doi: 10.1088/0004-637X/811/1/54.

HAND, E. **Scientists may have solved mystery of dwarf planet's enigmatic bright spot.** 2015. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/news/2015/03/scientists-may-have-solved-mystery-dwarf-planet-s-enigmatic-bright-spot>. Acesso em: 14 fev. 2020.

HERSCHEL, William. VIII. **Observations on the two lately discovered celestial bodies.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London, n. 92, p. 213-232, 1802, doi: 10.1098/rstl.1802.0010.

HILTON, James L. **Asteroid masses and densities.** Asteroids III, v. 1, p. 103-112, 2002.

HOSKIN, Michael. **Bode's law and the discovery of Ceres.** In: Physics of solar and stellar coronae: GS Vaiana Memorial Symposium. Springer, Dordrecht, 1993. p. 35-46, doi: 10.1007/978-94-011-1964-1_3.

HUGHES, D. W. **The historical unravelling of the diameters of the first four asteroids.** Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, v. 35, p. 331, 1994.

IZIDORO, André et al. **Accretion of Uranus and Neptune from inward-migrating planetary embryos blocked by Jupiter and Saturn.** Astronomy & Astrophysics, v. 582, p. A99, 2015, doi: 10.1051/0004-6361/201425525.

IZIDORO, André et al. **Gas giant planets as dynamical barriers to inward-migrating super-Earths.** The Astrophysical Journal Letters, v. 800, n. 2, p. L22, 2015, doi: 10.1088/2041-8205/800/2/L22.

JOHNSTON, K. J.; LARSEN, D. G. US Naval Observatory, Washington, DC 20392-5420. **Report for the period Jul 1998-Jun 1999.** In: Bulletin of the American Astronomical Society. 2000. p. 555-583.

JONES, Thomas David. **An infrared reflectance study of water in outer belt asteroids: clues to composition and origin.** 1988. Tese de Doutorado. The University of Arizona.

KELLEY, M. S.; GAFFEY, M. J. **A genetic study of the Ceres (Williams# 67) asteroid family.** In: AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts# 28. 1996. p. 10.09.

KING, B. **Ceres bright spots sharpen but questions remain.** 2015. Disponível em: <https://phys.org/news/2015-05-ceres-bright-sharpen.html>. Acesso em: 14 fev. 2020.

KOVAČEVIĆ, A.; KUZMANOSKI, M. **A new determination of the mass of (1) Ceres.** Earth, Moon, and Planets, v. 100, n. 1, p. 117-123, 2007, doi: 10.1007/s11038-006-9124-4.

KOVAČEVIĆ, Andjelka B. **Determination of the mass of Ceres based on the most gravitationally efficient close encounters.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 419, n. 3, p. 2725-2736, 2012, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19919.x.

LANDAU, E. **Ceres' bright spots come back into view.** 2015. Disponível em: <https://www.nasa.gov/jpl/dawn/ceres-bright-spots-come-back-into-view>. Acesso em: 14 fev. 2020.

LANDAU, E.; BROWN, D. **NASA Spacecraft becomes first to orbit a Dwarf planet.** 2015. Disponível em: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4503>. Acesso em: 15 fev. 2020.

LANG, Kenneth R. **The Cambridge guide to the solar system.** 2ª Ed. Cambridge University Press, 2011.

LEVISON, Harold F. et al. **Contamination of the asteroid belt by primordial trans-neptunian objects.** Nature, v. 460, n. 7253, p. 364-366, 2009, doi: 10.1038/nature08094.

LEVISON, Harold F.; KRETKE, Katherine A.; DUNCAN, Martin J. **Growing the gas-giant planets by the gradual accumulation of pebbles.** Nature, v. 524, n. 7565, p. 322-324, 2015, doi: 10.1038/nature14675.

LEVISON, Harold F. et al. **Late orbital instabilities in the outer planets induced by interaction with a self-gravitating planetesimal disk.** The Astronomical Journal, v. 142, n. 5, p. 152, 2011, doi:10.1088/0004-6256/142/5/152.

LI, Jian-Yang et al. **Photometric analysis of 1 Ceres and surface mapping from HST observations.** Icarus, v. 182, n. 1, p. 143-160, 2006, doi: 10.1016/j.icarus.2005.12.012.

- MASSET, F.; SNELGROVE, M. **Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 320, n. 4, p. L55-L59, 2001, doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04159.x.
- MAYOR, Michel et al. **The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV: occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets.** arXiv preprint arXiv:1109.2497, 2011.
- MCCORD, Thomas B.; SOTIN, Christophe. **Ceres: evolution and current state.** Journal of Geophysical Research: Planets, v. 110, n. E5, 2005, doi: 10.1029/2004JE002244.
- MCKINNON, M. Just **What Are those white spots on Ceres?** 2015. Disponível em: <https://gizmodo.com/just-what-are-those-white-spots-on-ceres-1684160250>. Acesso em: 15 de mar. 2020.
- MCKINNON, M. **This Is the greatest view of dwarf planet Ceres we have ever seen.** 2015. Disponível em: <https://gizmodo.com/the-is-the-greatest-view-of-ceres-we-have-ever-seen-1682228214>. Acesso em: 14 fev. 2020.
- MCKINNON, W. B. **Could Ceres be a refugee from the Kuiper belt?** Asteroids, Comets, Meteors 2008, v. 1405, p. 8389, 2008.
- MCKINNON, W. B. **Where did Ceres accrete?** Asteroids, Comets, Meteors 2012, v. 1667, p. 6475, 2012.
- MENZEL, Donald Howard; PASACHOFF, Jay M. **A field guide to stars and planets.** Boston, 1983.
- MICHALAK, G. **Determination of asteroid masses---I.(1) Ceres,(2) Pallas and (4) Vesta.** Astronomy and Astrophysics, v. 360, p. 363-374, 2000.
- MILLIS, R. L. et al. **The size, shape, density, and albedo of Ceres from its occultation of BD+ 8 471.** Icarus, v. 72, n. 3, p. 507-518, 1987, doi: 10.1016/0019-1035(87)90048-0.
- MORBIDELLI, Alessandro; CRIDA, Aurélien. **The dynamics of Jupiter and Saturn in the gaseous protoplanetary disk.** Icarus, v. 191, n. 1, p. 158-171, 2007, doi: 10.1016/j.icarus.2007.04.001.
- MOURA, Tamires dos Santos de. **Estudo preliminar do potencial de alguns asteroides.** Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.
- NASA/JPL. **The size comparison of the asteroids are Ceres, Vesta and Eros.** 2015. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Eros,_Vesta_and_Eros,_Vesta_and_Ceres_comparison.jpg. Acesso em 15. jan. 2020.
- NESVORNÝ, David; MORBIDELLI, Alessandro. **Statistical study of the early solar system's instability with four, five, and six giant planets.** The Astronomical Journal, v. 144, n. 4, p. 117, 2012, doi: 10.1088/0004-6256/144/4/117.
- OSINSKI, Gordon R.; PIERAZZO, Elisabetta. **Impact cratering: Processes and products.** John Wiley & Sons, 2012.
- PARKER, Joel Wm et al. **Analysis of the first disk-resolved images of Ceres from ultraviolet observations with the Hubble space telescope.** The Astronomical Journal, v. 123, n. 1, p. 549, 2002.
- PETIT, Jean-Marc; MORBIDELLI, Alessandro; CHAMBERS, John. **The primordial excitation and clearing of the asteroid belt.** Icarus, v. 153, n. 2, p. 338-347, 2001, doi: 10.1006/icar.2001.6702.
- PICKERING, Edward C.; SEARLE, Arthur; UPTON, Winslow. **Photometric observations.** Part I. Chapter I. Description of Instruments. Annals of Harvard College Observatory, v. 11, p. 1-8, 1879.
- PIERENS, Arnaud; NELSON, Richard P. **Constraints on resonant-trapping for two planets embedded in a protoplanetary disc.** Astronomy & Astrophysics, v. 482, n. 1, p. 333-340, 2008, doi: 10.1051/0004-6361/20079062.
- PIERENS, Arnaud; RAYMOND, Sean N. **Two phase, inward-then-outward migration of Jupiter and Saturn in the gaseous solar nebula.** Astronomy & Astrophysics, v. 533, p. A131, 2011, doi: 10.1051/0004-6361/201117451.
- PIERENS, Arnaud et al. **Outward migration of Jupiter and Saturn in 3: 2 or 2: 1 resonance in radiative disks: implications for the Grand Tack and Nice models.** The Astrophysical Journal Letters, v. 795, n. 1, p. L11, 2014, doi: 10.1088/2041-8205/795/1/L11.
- RAYMOND, Sean N.; IZIDORO, Andre. **The empty primordial asteroid belt.** Science advances, v. 3, n. 9, p. e1701138, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1701138.

RAYMOND, Sean N.; NESVORNY, David. **Origin and dynamical evolution of the asteroid belt**. arXiv preprint arXiv:2012.07932, 2020.

REIN, Hanno. **Rebound 3.12.2 documentation**. 2020. Disponível em: <https://rebound.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 04 de mar. 2020.

REIN H.; LIU, S. F. **Rebound: an open-source multi-purpose n-body code for collisional dynamics**. 2012. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012A%26A...537A.128R/abstract>. Acesso em: 15 de dez. 2020.

REIN, Hanno ; SPIEGEL, David S. **IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits**. 2015. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.446.1424R/abstract>. Acesso em: 15 de dez. 2020.

REIN, Hanno ; TAMAYO, Daniel . **WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom-Holman integrator for long-term gravitational simulations**. 2015. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.452..376R/abstract>. Acesso em: 15 de dez. 2020.

DE SOUSA RIBEIRO, Rafael et al. **Dynamical evidence for an early giant planet instability**. Icarus, v. 339, p. 113605, 2020.

RIVKIN, A. S.; VOLQUARSEN, E. L.; CLARK, B. E. **The surface composition of Ceres: discovery of carbonates and iron-rich clays**. Icarus, v. 185, n. 2, p. 563-567, 2006, doi: 10.1016/j.icarus.2006.08.022.

RUSSELL, Christopher; RAYMOND, Carol (Ed.). **The Dawn mission to minor planets 4 Vesta and 1 Ceres**. Springer Science & Business Media, 2012.

SAWYER HOGG, Helen. **Out of old books (the Titius-Bode law and the discovery of Ceres)**. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, v. 42, p. 241, 1948.

SERIO, Giorgia Foderà et al. **Giuseppe Piazzi and the discovery of Ceres**. University of Arizona Press, 2002.

SHAKURA, Ni I.; SUNYAEV, Rashid Alievich. **Black holes in binary systems**. Observational appearance. Astronomy and Astrophysics, v. 24, p. 337-355, 1973.

SOUSA, Rafael Ribeiro de. **A instabilidade na evolução dinâmica do sistema solar: considerações sobre o tempo de instabilidade e a formação dinâmica do cinturão de Kuiper**. 2019.

TANAKA, Hidekazu; TAKEUCHI, Taku; WARD, William R. **Three-dimensional interaction between a planet and an isothermal gaseous disk. I. Corotation and Lindblad torques and planet migration**. The Astrophysical Journal, v. 565, n. 2, p. 1257, 2002.

THOMAS, P. C. et al. **Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape**. Nature, v. 437, n. 7056, p. 224-226, 2005, doi: 10.1038/nature03938.

THOMAS, Peter C. et al. **Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble space telescope results**. Science, v. 277, n. 5331, p. 1492-1495, 1997, doi: 10.1126/science.277.5331.1492.

TSIGANIS, Kleomenis et al. **Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System**. Nature, v. 435, n. 7041, p. 459-461, 2005, doi:10.1038/nature03539.

VOKROUHLICKÝ, David; BOTTKÉ, William F.; NESVORNÝ, David. **Capture of trans-neptunian planetesimals in the main asteroid belt**. The Astronomical Journal, v. 152, n. 2, p. 39, 2016, doi:10.3847/0004-6256/152/2/39.

WALSH, Kevin J. et al. **A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration**. Nature, v. 475, n. 7355, p. 206-209, 2011, doi: 10.1038/nature10201.

WARD, William R. **Density waves in the solar nebula: differential Lindblad torque**. Icarus, v. 67, n. 1, p. 164-180, 1986, doi: 10.1016/0019-1035(86)90182-X.

WILLIAMS, David R. **Asteroid fact sheet**. NASA, nssdc. gsfc. nasa. gov/planetary/factsheet/asteroidfact. Html, 2004.

WRITERS, S. **The IAU draft definition of planets and Plutons**. 2006. Disponível em: https://www.spacedaily.com/reports/The_IAU_Draft_Definition_Of_Planets_And_Plutons_999.html. Acesso em: 14 fev. 2020.

YEAGER, Ashley. **Comet probe may shed light on Earth's past**. Science News for Students, 2014.

ZOLOTOV, Mikhail Yu. **Formation of brucite and cronstedtite-bearing mineral assemblages on Ceres**. Icarus, v. 228, p. 13-26, 2014, doi: 10.1016/j.icarus.2013.09.020.