

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 24/08/2026



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

Andreza Martin Silva

## **Dinâmica ao redor de Psyche**

Guaratinguetá/Brasil

2025

Andreza Martin Silva

## **Dinâmica ao redor de Psyche**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Conselho da Pós Graduação em Física e Astronomia da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Mestre em Física e Astronomia.

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Programa de Pós Graduação em Física e Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Sfair

Guaratinguetá/Brasil

2025

S586d Silva, Andreza Martin  
Dinâmica ao redor de Psyche / Andreza Martin Silva -  
Guaratinguetá, 2025.  
60 f : il.  
Bibliografia: f. 57-60

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter  
Coorientador: Prof. Dr. Rafael Sfair

1. Asteróides. 2. Planetas. 3. Astronomia.  
4. Sistema solar. 5. Estabilidade. I. Título.

CDU 523.44

Luciana Máximo  
Bibliotecária/CRB-8 3595

**ANDREZA MARTIN SILVA**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRA EM FÍSICA”

PROGRAMA: FÍSICA E ASTRONOMIA  
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto**

Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Documento assinado digitalmente

**OTHON CABO WINTER**

Data: 07/03/2025 16:47:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. OTHON CABO WINTER**  
Orientador - UNESP



Documento assinado digitalmente

**ROSANA APARECIDA NOGUEIRA DE ARAUJO**

Data: 07/03/2025 16:21:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. ROSANA APARECIDA NOGUEIRA DE ARAUJO**  
UNESP



Documento assinado digitalmente

**PRYSILLA MARIA PIRES DOS SANTOS**

Data: 07/03/2025 18:18:19-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. PRYSILLA MARIA PIRES DOS SANTOS**  
UERJ

**FEVEREIRO de 2025**

Dedico este trabalho à minha irmã Angelica.

## **DADOS CURRICULARES**

**ANDREZA MARTIN SILVA**

**NASCIMENTO** 20/05/1999 - São Paulo - SP

**FILIAÇÃO** Carlos Henrique Xavier da Silva  
Delma Martin

**2019 - 2024** Bacharelado em Física  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

**2023 - 2025** Mestrado em Física e Astronomia  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família, em especial aos meus pais pelo apoio emocional e financeiro, e por sempre acreditarem no meu potencial.

A todos os meus amigos e colegas de pesquisa que contribuíram com sugestões, discussões e apoio ao longo deste processo, proporcionando momentos valiosos tanto dentro quanto fora da academia.

Ao meu orientador Othon Winter e ao meu coorientador Rafael Sfair, pelo valioso suporte, orientações e constante paciência.

Por fim, agradeço à universidade, que me proporcionou os recursos e o ambiente necessários para desenvolver este trabalho.

Este trabalho contou com o apoio da(s) seguinte(s) entidade(s):

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

*"Nothing in the world belongs to me, but my love, mine, all mine."*

Mitski

# Resumo

O asteroide Psyche tem recebido atenção significativa na literatura científica por ser um dos maiores corpos do cinturão principal de asteroides, com um diâmetro estimado de cerca de 222 km. Classificado como um asteroide do tipo M, especula-se que ele possa ser o núcleo exposto de um protoplaneta, composto predominantemente de ferro-níquel. Inicialmente, acreditava-se que a densidade de Psyche fosse alta, alcançando valores de até  $7.6 \text{ g/cm}^3$ , sugerindo uma composição quase inteiramente metálica. No entanto, estudos mais recentes indicam uma densidade menor, entre  $3.4 \text{ g/cm}^3$ - $4.1 \text{ g/cm}^3$ , revelando a possibilidade de uma mistura de metal com silicatos. Este trabalho explora as dinâmicas ao redor de Psyche considerando os limites inferior e superior dessa faixa de densidade. Para cada cenário, calculamos o potencial gravitacional usando o método de massas concentradas (mascons). Este método simplifica a forma irregular do asteroide ao representá-lo por um conjunto de massas pontuais, mantendo a mesma massa total. Embora não seja o método mais preciso disponível, sua vantagem está na eficiência em termos de tempo de simulação. A partir dos potenciais calculados, identificamos as posições dos pontos de equilíbrio ao redor de Psyche e analisamos sua estabilidade. A estabilidade linear é um fator que influencia diretamente o tempo de permanência de partículas em torno dos pontos de equilíbrio. Para entender esse efeito, simulamos órbitas ao redor de Psyche e analisamos o número de partículas que sobrevivem, colidem com o asteroide ou escapam do sistema, bem como o tempo que elas permanecem em órbita. Essas simulações foram conduzidas tanto sem considerar a pressão de radiação quanto com ela. Na simulação que inclui a pressão de radiação, atribuímos diferentes raios às partículas para determinar o ponto em que elas são varridas da vizinhança do asteroide devido à pressão de radiação. Calculamos também qual seria o raio de uma partícula equivalente à razão área-massa da sonda Psyche, com a finalidade de analisarmos a influência da pressão de radiação sobre a espaçonave. Esses dados são particularmente importantes para missões que planejam explorar o asteroide, como a Missão Psyche da NASA, lançada em 2023. Esta missão é pioneira ao investigar um objeto metálico no espaço, com o objetivo de esclarecer as incertezas sobre a composição e a origem de Psyche, um asteroide que pode oferecer esclarecimentos únicos sobre a formação dos planetas no Sistema Solar.

**Palavras-chave:** (16) Psyche. Asteroide. Geopotencial. Pontos de equilíbrio. Estabilidade. Pressão de radiação.

# Abstract

The asteroid Psyche has garnered significant attention in the scientific literature for being one of the largest bodies in the main asteroid belt, with an estimated diameter of about 222 km. Classified as an M-type asteroid, it is speculated to be the exposed core of a protoplanet, primarily composed of iron-nickel. Initially, its density was thought to be high, reaching values of up to  $7.6 \text{ g/cm}^3$ , suggesting an almost entirely metallic composition. However, more recent studies suggest a lower density, ranging between  $3.4 \text{ g/cm}^3$ - $4.1 \text{ g/cm}^3$ , indicating the possibility of a mixture of metal and silicates. To address this uncertainty, this study explores the dynamics around Psyche, considering both the lower and upper limits of this density range. For each scenario, we calculate the gravitational potential using the mascons method. This method simplifies the irregular shape of the asteroid by representing it with a set of point masses, maintaining the same total mass. While not the most precise method available, it is efficient in terms of simulation time. From the calculated potentials, we identify the equilibrium points around Psyche and analyze their stability. Linear stability is a key factor that directly influences the duration particles remain around the equilibrium points. To understand this effect, we simulate orbits around Psyche and assess the number of particles that survive, collide with the asteroid, or escape from the system, as well as their time in orbit. These simulations were conducted both with and without considering radiation pressure. In the simulations that include radiation pressure, we assigned different sizes to the particles to determine the threshold at which they are swept away from the vicinity of the asteroid. We also calculated the radius of a particle equivalent to the area-to-mass ratio of the Psyche spacecraft, in order to analyze the influence of radiation pressure on the spacecraft. This data is particularly valuable for missions aiming to explore the asteroid, such as NASA's Psyche Mission, launched in 2023. This mission is pioneering in its exploration of a metallic object in space, aiming to clarify uncertainties surrounding the composition and origin of Psyche, an asteroid that could provide unique insights into planetary formation in the Solar System.

**Keywords:**(16) Psyche. Asteroid. Geopotential. Equilibrium points. Stability. Radiation pressure

# Lista de Figuras

Figura 1 – Órbitas que a espaçonave Psyche realizará ao redor do asteroide (16) Psyche. . . . .	18
Figura 2 – Asteroide Itokawa pelo modelo de poliedros e mascons . . . . .	21
Figura 3 – Classificação de pontos de equilíbrio não-degenerados e não-ressonantes. O eixo vertical indica o eixo imaginário e o eixo horizontal indica o eixo real. Fonte: Jiang (2015). . . . .	29
Figura 4 – Altitude geométrica de Psyche. Fonte: Moura et al. (2020). . . . .	31
Figura 5 – Curvas de velocidade zero vistas dos planos $xoy$ , $xoz$ e $yoz$ respectivamente, usando a densidade nominal. Fonte: Moura et al. (2020). . . . .	32
Figura 6 – Disco de partículas ao redor de Psyche . . . . .	33
Figura 7 – Visualização do modelo construído por Shepard et al. (2021) e suas projeções nos planos $xoy$ , $xoz$ e $yoz$ . . . . .	36
Figura 8 – A forma geral de Psyche vista do polo sul. Fonte: Shepard et al. (2021)	37
Figura 9 – Modelo da forma do asteroide Psyche. À esquerda produzido por Shepard et al. (2017) e à direita produzido por Shepard et al. (2021). . . . .	37
Figura 10 – Pontos de equilíbrio ao redor de Psyche variando com a densidade do asteroide. Cada cor na barra de cores à direita indica uma densidade diferente. . . . .	38
Figura 11 – Disco de partículas ao redor de Psyche em suas posições no tempo inicial. Em azul, partículas que colidiram; em verde as que escaparam do sistema; em preto partículas sobreviventes; os triângulos em vermelho indicam a localização dos pontos de equilíbrio. (a) A densidade de Psyche é de $\rho = 3.4 \text{ g/cm}^3$ , (b) A densidade de Psyche é de $\rho = 4.1 \text{ g/cm}^3$ . . . . .	41
Figura 12 – Tempo de vida das partículas que escaparam ou colidiram para o caso $\rho = 3.4 \text{ g/cm}^3$ . A barra de cores indica o tempo de vida (em dias) das partículas posicionadas no plano $xoy$ que colidiram e escaparam do sistema. Os triângulos em verde são os pontos de equilíbrio. (a) Barra de cores limitada a 400 dias. (b) Barra de cores limitada a 200 dias. (c) Barra de cores limitada a 300 dias. (d) Barra de cores limitada a 1 dia. . . . .	43
Figura 13 – Tempo de vida das partículas que escaparam ou colidiram para o caso $\rho = 4.1 \text{ g/cm}^3$ . A barra de cores indica o tempo de vida (em dias) das partículas posicionadas no plano $xoy$ que colidiram e escaparam do sistema. Os triângulos em verde são os pontos de equilíbrio. . . . .	44

Figura 14 – Em azul, partículas que colidiram; em verde as que escaparam do sistema; em preto partículas sobreviventes; os triângulos em vermelho indicam a localização dos pontos de equilíbrio. Densidade de Psyche e das partículas de $3.4 \text{ g/cm}^3$ . Cada figura indica um raio diferente das partículas. . . . .	46
Figura 15 – Em azul, partículas que colidiram; em verde as que escaparam do sistema; em preto partículas sobreviventes; os triângulos em vermelho indicam a localização dos pontos de equilíbrio. Densidade de Psyche e das partículas de $4.1 \text{ g/cm}^3$ . Cada figura indica um raio diferente das partículas. . . . .	47
Figura 16 – Movimento orbital no plano de uma partícula de raio $10^4 \mu\text{m}$ , sob pressão de radiação, até o momento que escapa do sistema. . . . .	49
Figura 17 – Movimento orbital no plano de uma partícula de raio $10 \mu\text{m}$ , sob pressão de radiação, até o momento que colide com o corpo central. . . . .	50
Figura 18 – Espaçonave Psyche . . . . .	55

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de massa, diâmetro efetivo ( $D_{eff}$ ) e densidade ( $\rho$ ) obtidos por diferentes autores. Os símbolos *, $\circ$ e $\#$ são referentes aos trabalhos de Carry (2012), Hanuš et al. (2013) e Viikinkoski et al. (2018), respectivamente. . . . .	17
Tabela 2 – Coordenadas (em $km$ ) dos pontos de equilíbrio $E_1$ , $E_2$ , $E_3$ e $E_4$ para as três densidades exploradas. Fonte: Moura et al. (2020). . . . .	32
Tabela 3 – Autovalores ( $\lambda_n \times 10^{-3}$ ) dos pontos de equilíbrio no potencial de Psyche, considerando a densidade nominal e os valores extremos de densidade. Fonte: Moura et al. (2020). . . . .	34
Tabela 4 – Localização dos Pontos de Equilíbrio ao redor de Psyche considerando a menor e maior densidade. . . . .	39
Tabela 5 – Autovalores ( $\lambda_n \times 10^{-3}$ ) dos pontos de equilíbrio $E_1$ , $E_2$ , $E_3$ , e $E_4$ para diferentes densidades $\rho$ ( $g/cm^3$ ). . . . .	39
Tabela 6 – Massa de Psyche para menor e maior densidade. . . . .	40
Tabela 7 – Histograma mostrando o número de partículas que colidem ou escapam do sistema, pelo tempo de simulação, em até 400 dias, 10 dias e 1 dia. A primeira coluna é para o caso de densidade de Psyche $\rho = 3.4g/cm^3$ e a segunda coluna para $\rho = 4.1g/cm^3$ . . . . .	42
Tabela 8 – Porcentagem de partículas que sobreviveram, colidiram ou escaparam nos cenários sem pressão de radiação e com pressão de radiação . . . .	48
Tabela 9 – Gráficos de tempo de vida das partículas com $\rho = 3.4g/cm^3$ que colidem ou escapam do sistema. . . . .	51
Tabela 10 – Gráficos de tempo de vida das partículas com $\rho = 4.1g/cm^3$ que colidem ou escapam do sistema. . . . .	52

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Formação de Psyche	15
1.2	Missão Psyche	16
<b>2</b>	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1	Método de Poliedros	19
2.2	Método de Mascons	20
<b>3</b>	<b>PSYCHE</b>	<b>22</b>
3.1	O problema da densidade	22
3.2	Análise teórica	23
3.2.1	Geopotencial	24
3.2.2	Equação do movimento	24
3.2.3	Pontos de equilíbrio	25
3.2.4	Estabilidade	25
3.2.5	Pressão de radiação solar	29
3.3	Moura et al. (2020)	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>35</b>
4.1	Novo modelo	35
4.2	Pontos de equilíbrio e estabilidade	37
4.3	Simulações numéricas	39
4.3.1	Simulações numéricas: pressão de radiação	45
4.4	Missão Psyche: Razão área-massa	54
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>ETAPAS FUTURAS</b>	<b>57</b>
	Referências	58

# 1 Introdução

Os pequenos corpos do sistema solar são os restos do material que se juntou para formar os planetas há cerca de 4,6 bilhões de anos. Eles são importantes porque nos dão pistas sobre as condições que existiam na nuvem de gás e poeira onde o sistema solar se formou. Diferentemente dos planetas terrestres, que mudaram com o tempo e perderam parte das evidências de sua composição original devido a processos como erosão e tectônica, os pequenos corpos permaneceram mais primitivos. Isso acontece porque seu pequeno tamanho limitou a quantidade de calor que se formou a partir de materiais radioativos em seu interior, fazendo com que eles não aquecessem tanto. Assim, o desenvolvimento deles foi mais influenciado por forças externas, como colisões e bombardeios de partículas de alta energia ao longo de bilhões de anos (Bottke Jr et al., 2002).

A maior parte dos asteroides fica localizada entre a órbitas de Marte e Júpiter, porém muitas vezes, devido a perturbações de outros corpos do sistema solar, alguns destes asteroides acabam se deslocando para órbitas próximas da Terra, estes são chamados de *Near Earth Asteroids* (NEAs). Dentre eles há ainda os potencialmente perigosos (PHAs). Por conta disso, agências espaciais também têm como prioridade o monitoramento e o controle de asteroides para proteger a Terra. O estudo dos NEAs ultrapassa o interesse científico, constituindo-se como uma importante questão de segurança planetária. Por isso, esses objetos precisam ser constantemente catalogados, acompanhados e investigados.

Os asteroides são classificados a partir da análise das propriedades de superfície, como espectros de refletância ou albedo, a partir disso é possível fazer inferências sobre a composição (Carry, 2012). Há três principais grupos para os asteroides <sup>1</sup>:

- Os tipos C (condritos) consistem em argila e rochas silicatadas, apresentando uma aparência escura. Esses asteroides estão entre os objetos mais antigos do sistema solar e são os mais comuns.
- Os tipos S são compostos por materiais silicatados e níquel-ferro.
- Os tipos M são metálicos compostos majoritariamente por níquel-ferro, além disso, refletem bastante a luz solar e por isso possuem alto valor de albedo.

## 1.1 Formação de Psyche

Psyche é considerado um dos maiores asteroides metálicos já observados. Seu diâmetro médio é de 222 km e seu período de rotação é de 4.195 h (Shepard et al., 2021).

<sup>1</sup> Disponível em: <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/>.

Ele está localizado no cinturão principal de asteroides, entre as órbitas de Marte e Júpiter, sua órbita tem uma baixa excentricidade e inclinação, de 0.134 e 3.097 °, respectivamente, além de um semieixo maior de 2.922 ua <sup>2</sup>. Comumente chamado de (16) Psyche, por ter sido o décimo sexto asteroide a ser observado na história da astronomia, Psyche foi descoberto em 1852 na cidade de Nápoles, pelo astrônomo italiano Annibale de Gasparis e pertence à classe M de asteroides, pois possui uma composição predominante de Ferro e Níquel (Fe-Ni). Este asteroide pode ser composto de material não-fundido, mas acredita-se que é um núcleo exposto de um planeta primitivo que não evoluiu. Alinhado a isso, na primeira observação deste asteroide (Ostro et al., 1985) foi observado um alto albedo comparado aos outros asteroides naquela região, indicando uma superfície metálica. Porém, recentes observações, detectaram outros componentes na superfície de Psyche, como silicato e minerais hidratados (Shepard et al., 2021), trazendo uma nova e mais complexa visão a este asteroide.

Atualmente na literatura temos três hipóteses para a formação de Psyche. A primeira é a citada anteriormente, que Psyche é um núcleo remanescente de um planetesimal, formado por ferro-níquel (Asphaug et al., 2006). A segunda é que o asteroide é apenas um acúmulo de rocha e metal, derivado de diversos impactos (Viikinkoski et al., 2018). A terceira e última é que Psyche é um corpo de ferro ou uma mistura de ferro-silicato, com erupções de ferro metálico através de um processo conhecido como ferrovulcanismo. Johnson et al. (2020) propôs que Psyche é uma mistura de um núcleo de ferro e uma camada fina de manto composto por silicato e que sofreu o processo de ferrovulcanismo, em que o ferro foi ejetado para a camada de manto e uma parte pode ter chegado à superfície, esses locais seriam onde a camada de manto e da crosta são mais finas. A mais antiga hipótese elaborada para a formação de Psyche foi de um grande impacto que arrancou a crosta e o manto de um protoplaneta, deixando exposto o núcleo de metal. Contudo, esse modelo de formação possui inconsistências, já que um evento dessa magnitude produziria dezenas de famílias de fragmentos que não foram detectadas (Bell et al., 1989; Davis et al., 1999). Davis et al. (1999) supõe que, após os primeiros impactos em Psyche, além de restar um núcleo intacto, tenha-se formado na superfície uma mistura de metal e silicato.

Em resumo, a Tabela 1 apresenta três diferentes e relevantes estimativas de densidade obtidas por distintos autores, a partir de valores específicos de massa e diâmetro efetivo.

## 1.2 Missão Psyche

Com o objetivo de desvendar os mistérios a respeito da formação de Psyche e sua composição, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) projetou a missão

<sup>2</sup> Disponível em: [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/).

	Massa (kg)	$D_{eff}$ (km)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Carry (2012)	$2.72 \pm 0.75 \times 10^{19}$	$248.45 \pm 17.13$	$3.38 \pm 1.16$
Shepard et al. (2017)	$2.72 \pm 0.75 \times 10^{19}$ (*)	190 (○)	7.6
Ferrais et al. (2020)	$2.41 \pm 0.32 \times 10^{19}$ (‡)	$222 \pm 4$	$4.2 \pm 0.60$

Tabela 1 – Valores de massa, diâmetro efetivo ( $D_{eff}$ ) e densidade ( $\rho$ ) obtidos por diferentes autores. Os símbolos \*, ○ e ‡ são referentes aos trabalhos de [Carry \(2012\)](#), [Hanuš et al. \(2013\)](#) e [Viikinkoski et al. \(2018\)](#), respectivamente.

Psyche que foi selecionada como a décima quarta no programa *Discovery* da NASA. A princípio, planejada para ser lançada em julho de 2022, só foi lançada em 13 de outubro de 2023 ([Elkins-Tanton et al., 2017](#)). Os objetivos desta missão são resumidos em cinco principais pontos ([Dibb et al., 2024](#)):

- Determinar se Psyche é um núcleo exposto ou se é material primordial não derretido;
- Determinar as idades relativas das regiões da superfície de Psyche;
- Determinar se pequenos corpos metálicos incorporam os mesmos elementos leves na fase metálica assim como se é esperado que ocorra no núcleo da Terra em altas pressões;
- Determinar se Psyche foi formado em condições mais oxidantes ou mais redutoras do que o núcleo da Terra;
- Caracterizar a morfologia de Psyche.

A espaçonave é composta por cinco principais instrumentos responsáveis por coletar os dados para atingir os objetivos da missão: dois imageadores multiespectrais redundantes, que fornecem informações sobre a geologia da superfície, composição e topografia; um espectrômetro de raios gama e nêutrons (GRNS) que determina a composição elementar; magnetômetros que caracterizam o campo magnético e um radiociência que mapeará o campo gravitacional de Psyche usando o sistema de telecomunicação em banda X ([Elkins-Tanton et al., 2017](#)).

Em agosto de 2029, Psyche iniciará sua fase de órbita ao redor do asteroide por um período de 26 meses. A espaçonave começaria orbitando o asteroide em uma série de órbitas circulares com altitudes variadas. As órbitas podem ser visualizadas na figura 1 e são identificadas por letras de acordo com a altitude esperada:

- Órbita A: 709 km;
- Órbita B: 303 km, para atender objetivos do imageador;
- Órbita C: 190 km, para atender objetivos do Magnetômetro e da ciência da gravidade;

- Órbita D: 75 km, para atender objetivos do GRNS.

No entanto, devido às restrições de iluminação solar após a data de lançamento ser prorrogada, a espaçonave passará pelas quatro altitudes orbitais em cinco fases: Órbita A, a primeira fase da Órbita B (denominada Órbita B1), Órbita D, Órbita C e a segunda fase da Órbita B (denominada Órbita B2).

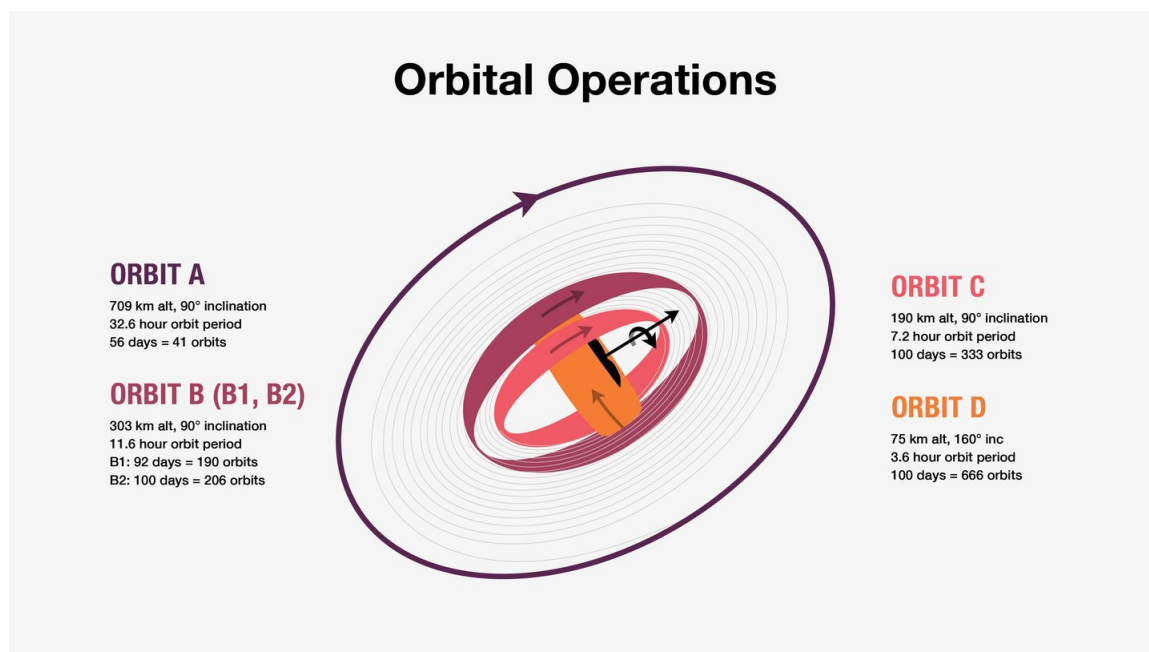


Figura 1 – Órbitas que a espaçonave Psyche realizará ao redor do asteroide (16) Psyche. Fonte: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia26102-psyche-orbital-operations/>.

Neste trabalho, iniciamos discutindo a metodologia utilizada para modelar o formato de Psyche (capítulo 2), detalhando os dois principais métodos empregados: o método de poliedros e o método de mascons, além de descrever os potenciais gravitacionais associados a cada um desses formatos. Em seguida, na seção 3, exploramos as incertezas relativas à densidade de Psyche, incluindo os valores mais recentes encontrados na literatura. Adicionalmente, realizamos uma análise teórica dos conceitos fundamentais para este estudo, como geopotencial, pontos de equilíbrio, estabilidade e pressão de radiação solar. Por fim, discutimos o trabalho que inspirou este estudo, desenvolvido por Moura et al. (2020).

Na seção 4, começamos apresentando o novo modelo de Psyche proposto por Shepard et al. (2021), e, em seguida, expomos nossos resultados relacionados aos pontos de equilíbrio e suas estabilidades. Também apresentamos as simulações numéricas realizadas para integrar órbitas de partículas ao redor de Psyche, com ou sem a pressão de radiação solar. Por último, discutimos a razão área-massa da sonda Psyche. Em todo o trabalho foi utilizado ponto em vez de vírgula para separar a parte decimal de um número.

## 5 Considerações Finais

Utilizando um modelo atualizado e mais preciso desenvolvido por [Shepard et al. \(2021\)](#), obtivemos resultados que contribuem significativamente para a compreensão da dinâmica ao redor do asteroide Psyche. Os cálculos dos pontos de equilíbrio indicaram que variações na densidade do asteroide afetam sensivelmente a localização e a estabilidade desses pontos, demonstrando que a densidade desempenha um papel fundamental na definição das regiões dinâmicas ao redor de Psyche. Como nenhum ponto de equilíbrio é linearmente estável, isso resulta na ausência de regiões estáveis nas proximidades, onde partículas poderiam permanecer confinadas. A inexistência dessas regiões de estabilidade pode ser benéfica para a sonda Psyche, pois minimiza a presença de partículas que poderiam dificultar a transição da sonda entre diferentes órbitas.

As simulações numéricas sem a influência da pressão de radiação confirmaram que, com o aumento da densidade do asteroide, também há um aumento no número de partículas que colidem com o corpo central ( $\approx 3\%$ ) e um aumento nas partículas que escapam do sistema (de quase  $4\%$ ), além de uma redução de aproximadamente  $7\%$  no número de partículas que permanecem em órbita ao redor do asteroide.

O estudo revelou que, sob a influência da pressão de radiação, aproximadamente  $50\%$  das partículas com raios entre  $10^2\mu\text{m}$  e  $10^4\mu\text{m}$  sobrevivem no sistema. Quando analisamos as partículas de  $10\mu\text{m}$  de raio, aproximadamente  $99\%$  delas não conseguem permanecer na vizinhança de Psyche por quatro anos, independentemente da densidade considerada ( $3.4\text{ g/cm}^3$  ou  $4.1\text{ g/cm}^3$ ). Por outro lado, quase metade das partículas com raios de  $10^2\mu\text{m}$  ou maiores conseguem sobreviver nesse ambiente por até quatro anos, podendo representar um sério obstáculo para a passagem da sonda ao atravessar essa região, especialmente durante a transição para a órbita D.

Por fim, nossos resultados indicam que a espaçonave Psyche tem razão área-massa equivalente à de uma partícula de raio da ordem de  $10^3\mu\text{m}$ , e para este raio há alteração na dinâmica das partículas devido a pressão de radiação, ou seja, a sonda sofrerá influência devido a esta força. Além disso, sem a ação de força externa, ela poderá colidir com o asteroide em até 30 dias.

## 6 Etapas futuras

Para os próximos passos, iremos rotacionar o disco de partículas ao redor do asteroide para entender como é a dinâmica das partículas considerando o espaço tridimensional, e não somente o plano. Além disso, passaremos a estudar a dinâmica na superfície do asteroide, como é o geopotencial na superfície, qual a aceleração que partículas na superfície deste corpo sofrem, qual a velocidade necessária para partículas se locomoverem de um ponto de menor para um ponto de maior geopotencial (*potential speed*), dado a forma irregular do corpo, como é o *slope* nesta superfície, e assim fazer uma análise de quais são as regiões propícias para a acumulação de material e quais são as propícias a ter deslizamento de material.

# Referências

- A. Amarante and O. Winter. Surface dynamics, equilibrium points and individual lobes of the kuiper belt object (486958) arrokoth. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496(4):4154–4173, 2020.
- A. Amarante, O. Winter, and R. Sfair. Stability and evolution of fallen particles around the surface of asteroid (101955) bennu. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(1):e2019JE006272, 2021.
- E. Asphaug, C. B. Agnor, and Q. Williams. Hit-and-run planetary collisions. *Nature*, 439(7073):155–160, 2006.
- J. Baer and S. R. Chesley. Simultaneous mass determination for gravitationally coupled asteroids. *The Astronomical Journal*, 154(2):76, 2017.
- J. F. Bell, D. R. Davis, W. K. Hartmann, and M. J. Gaffey. Asteroids: The big picture. *Scanning Electron Microsc Meet at*, pages 921–945, 1989.
- W. F. Bottke Jr, A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel. An overview of the asteroids: The asteroids iii perspective. *Asteroids III*, 1:3–15, 2002.
- J. A. Burns, P. L. Lamy, and S. Soter. Radiation forces on small particles in the solar system. *Icarus*, 40(1):1–48, 1979.
- B. Carry. Density of asteroids. *Planetary and Space Science*, 73(1):98–118, 2012.
- D. R. Davis, P. Farinella, and F. Marzari. The missing psyche family: Collisionally eroded or never formed? *Icarus*, 137(1):140–151, 1999.
- S. D. Dobb, E. Asphaug, J. F. Bell, R. P. Binzel, W. F. Bottke, S. Cambioni, J. M. Christoph, L. T. Elkins-Tanton, R. Jaumann, D. J. Lawrence, et al. A post-launch summary of the science of nasa’s psyche mission. *AGU Advances*, 5(2):e2023AV001077, 2024.
- R. Domingos, O. Winter, and T. Yokoyama. Stable satellites around extrasolar giant planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373(3):1227–1234, 2006.
- J. D. Drummond, W. J. Merline, B. Carry, A. Conrad, V. Reddy, P. Tamblyn, C. R. Chapman, B. L. Enke, I. De Pater, K. De Kleer, et al. The triaxial ellipsoid size, density, and rotational pole of asteroid (16) psyche from keck and gemini ao observations 2004–2015. *Icarus*, 305:174–185, 2018.

- J. Ādurech, M. Kaasalainen, D. Herald, D. Dunham, B. Timerson, J. Hanuš, E. Frappa, J. Talbot, T. Hayamizu, B. D. Warner, et al. Combining asteroid models derived by lightcurve inversion with asteroidal occultation silhouettes. *Icarus*, 214(2):652–670, 2011.
- L. Elkins-Tanton, E. Asphaug, J. Bell, D. Bercovici, B. Bills, R. Rinzel, W. Bottke, M. Brown, J. Goldsten, R. Jaumann, et al. Asteroid (16) psyche: Visiting a metal world. 2017.
- L. Elkins-Tanton, E. Asphaug, J. Bell III, H. Bercovici, B. Bills, R. Binzel, W. Bottke, S. Dobb, D. Lawrence, S. Marchi, et al. Observations, meteorites, and models: a preflight assessment of the composition and formation of (16) psyche. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(3):e2019JE006296, 2020.
- M. Ferrais, P. Vernazza, L. Jorda, N. Rambaux, J. Hanuš, B. Carry, F. Marchis, M. Marsset, M. Viikinkoski, M. Brož, et al. Asteroid (16) psyche’s primordial shape: A possible jacobi ellipsoid. *Astronomy & Astrophysics*, 638:L15, 2020.
- P. Geissler, J.-M. Petit, D. Durda, R. Greenberg, W. Bottke, M. Nolan, and J. Moore. Ejecta reaccretion on 243 ida. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts# 27*, volume 27, pages 06–06, 1995.
- J. Hanuš, F. Marchis, and J. Ādurech. Sizes of main-belt asteroids by combining shape models and keck adaptive optics observations. *Icarus*, 226(1):1045–1057, 2013.
- Y. Jiang. Equilibrium points and periodic orbits in the vicinity of asteroids with an application to 216 kleopatra. *Earth, Moon, and Planets*, 115(1):31–44, 2015.
- Y. Jiang, H. Baoyin, J. Li, and H. Li. Orbits and manifolds near the equilibrium points around a rotating asteroid. *Astrophysics and Space Science*, 349:83–106, 2014.
- B. C. Johnson, M. M. Sori, and A. J. Evans. Ferrovulcanism on metal worlds and the origin of pallasites. *Nature Astronomy*, 4(1):41–44, 2020.
- M. Kaasalainen, J. Torppa, and J. Piironen. Models of twenty asteroids from photometric data. *Icarus*, 159(2):369–395, 2002.
- F. Mignard. Effects of radiation forces on dust particles in planetary rings. In *IAU Colloq. 75: Planetary Rings*, pages 333–366, 1984.
- T. Moura, O. Winter, A. Amarante, R. Sfair, G. Borderes-Motta, and G. Valvano. Dynamical environment and surface characteristics of asteroid (16) psyche. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(3):3120–3136, 2020.
- C. D. Murray and S. F. Dermott. *Solar system dynamics*. Cambridge university press, 1999.

- S. J. Ostro, D. B. Campbell, and I. I. Shapiro. Mainbelt asteroids: Dual-polarization radar observations. *Science*, 229(4712):442–446, 1985.
- R. S. Park, R. A. Werner, and S. Bhaskaran. Estimating small-body gravity field from shape model and navigation data. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 33(1): 212–221, 2010.
- D. Scheeres. Dynamics about uniformly rotating triaxial ellipsoids: Applications to asteroids. *Icarus*, 110(2):225–238, 1994. ISSN 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1118>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103584711183>.
- D. Scheeres and F. Marzari. Spacecraft dynamics in the vicinity of a comet. *The Journal of the astronomical sciences*, 50:35–52, 2002.
- D. J. Scheeres, S. J. Ostro, R. Hudson, and R. A. Werner. Orbits close to asteroid 4769 castalia. *Icarus*, 121(1):67–87, 1996.
- D. J. Scheeres, S. G. Hesar, S. Tardivel, M. Hirabayashi, D. Farnocchia, J. W. McMahon, S. R. Chesley, O. Barnouin, R. P. Binzel, W. F. Bottke, et al. The geophysical environment of bennu. *Icarus*, 276:116–140, 2016.
- M. K. Shepard, B. E. Clark, M. C. Nolan, E. S. Howell, C. Magri, J. D. Giorgini, L. A. Benner, S. J. Ostro, A. W. Harris, B. Warner, et al. A radar survey of m-and x-class asteroids. *Icarus*, 195(1):184–205, 2008.
- M. K. Shepard, J. Richardson, P. A. Taylor, L. A. Rodriguez-Ford, A. Conrad, I. de Pater, M. Adamkovics, K. de Kleer, J. R. Males, K. M. Morzinski, et al. Radar observations and shape model of asteroid 16 psyche. *Icarus*, 281:388–403, 2017.
- M. K. Shepard, K. de Kleer, S. Cambioni, P. A. Taylor, A. K. Virkki, E. G. Rivera-Valentin, C. R. Sanchez-Vahamonde, L. F. Zambrano-Marin, C. Magri, D. Dunham, et al. Asteroid 16 psyche: Shape, features, and global map. *The Planetary Science Journal*, 2(4):125, 2021.
- L. Siltala and M. Granvik. Mass and density of asteroid (16) psyche. *The Astrophysical Journal Letters*, 909(1):L14, 2021.
- E. F. Tedesco, P. V. Noah, M. Noah, and S. D. Price. The supplemental iras minor planet survey. *The Astronomical Journal*, 123(2):1056, 2002.
- B. Timerson, J. Durech, H. Abramson, J. Brooks, D. Caton, D. Clark, S. Conard, B. Cooke, D. Dunham, J. Dunham, et al. Several well-observed asteroidal occultations in 2010. *Minor Planet Bulletin*, 38(4):200–204, 2011.

- M. Viikinkoski, P. Vernazza, J. Hanuš, H. Le Coroller, K. Tazhenova, B. Carry, M. Marsset, A. Drouard, F. Marchis, R. Fetick, et al. (16) psyche: A mesosiderite-like asteroid? *Astronomy & Astrophysics*, 619:L3, 2018.
- X. Wang, Y. Jiang, and S. Gong. Analysis of the potential field and equilibrium points of irregular-shaped minor celestial bodies. *Astrophysics and Space Science*, 353:105–121, 2014.
- R. A. Werner. The gravitational potential of a homogeneous polyhedron or don't cut corners. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 59:253–278, 1994.
- R. A. Werner and D. J. Scheeres. Exterior gravitation of a polyhedron derived and compared with harmonic and mascon gravitation representations of asteroid 4769 castalia. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 65:313–344, 1996.
- O. Winter, G. Valvano, T. Moura, G. Borderes-Motta, A. Amarante, and R. Sfair. Asteroid triple-system 2001 sn263: surface characteristics and dynamical environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(3):4437–4455, 2020.