

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 21/09/2024.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ÁREA DE FÍSICA APLICADA

Dinâmica de Pequenos Satélites de Saturno e Aplicações ao Sistema
Atlas-Prometheus-Pandora

Demétrio Tadeu Ceccatto

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
RIO CLARO
2024**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

DEMÉTRIO TADEU CECCATTO

**DINÂMICA DE PEQUENOS SATÉLITES DE SATURNO E
APLICAÇÕES AO SISTEMA ATLAS-PROMETHEUS-
PANDORA**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física

Orientador: Prof. Dr. Nelson Callegari Jr.

Rio Claro – SP

2024

C387d	Ceccatto, Demétrio Tadeu Dinâmica de Pequenos Satélites de Saturno e Aplicações ao Sistema Atlas-Prometheus-Pandora / Demétrio Tadeu Ceccatto. — Rio Claro, 2024 131 f. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Nelson Callegari Jr. 1. Mecânica Celeste. 2. Problema de N corpos. 3. Saturno. 4. Luas de Saturno. 5. Sistemas Dinâmicos. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

DEMÉTRIO TADEU CECCATTO

DINÂMICA DE PEQUENOS SATÉLITES DE SATURNO E
APLICAÇÕES AO SISTEMA ATLAS-PROMETHEUS-PANDORA

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do campus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Física

Comissão Examinadora

Prof. Dr. NELSON CALLEGARI JR.
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. RICARDO PAUPITZ BARBOSA DOS SANTOS
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. RAFAEL SFAIR DE OLIVEIRA
FEG/UNESP/Guaratinguetá (SP)

Prof. Dr. CARLOS TABARE GALLARDO CASTRO
Universidad de la Republica/Montevideo - Uruguai

Prof. Dr. BRUNO EDUARDO MORGADO
UFRJ/Rio de Janeiro (RJ)

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP), 21 de março de 2024

A todos que possam vir a se interessar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente devo agradecer aos meus pais, Sueli e Tadeu, que concederam a oportunidade exclusiva de estudar. Em seguida, agradeço a todos os professores que passaram por minha vida, ensinando diversas áreas do conhecimento, principalmente as ciências exatas e, em especial, a minha professora do primário, Dona Norma, que me ensinou a ler, escrever e as quatro operações fundamentais.

Devo agradecer ao meu Amigo e Orientador Prof. Dr. Nelson Callegari Jr. que acreditou e não duvidou da realização desse trabalho. Também devo agradecer ao Prof. Dr. Adrián Rodríguez, que me ensinou a utilizar o pacote MERCURY necessário para a realização desse trabalho e contribuiu com diversas sugestões e dicas.

Um agradecimento especial deve ser feito aos professores que aceitaram a tarefa de participar avaliando esse trabalho: Paupitz, Tabaré, Rafael e Bruno.

Sabemos que sem a ajuda de outras pessoas, geralmente torna-se difícil atingir um objetivo, assim agradeço os colegas de Universidades, embora afastados pela distância, Gabriel Guimarães e Karyna Gimenez, que me ajudaram com contribuições valiosas para esse trabalho.

Trabalhar e estudar não é fácil, assim devo agradecer ao Colégio Nazareno pela paciência e a Escola Januário, principalmente a Érica que esteve ao meu lado enquanto escrevia as palavras presentes na maior parte desse trabalho e a Cris que me incentivou a cada dia para não desistir apesar das dificuldades enfrentadas na escola.

Uma vez que estamos utilizando ferramentas computacionais, a manutenção e garantia do funcionamento das máquinas do DEMAC foi necessária e vital, assim agradeço aos técnicos Orlando e Jorge.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

— Qual foi a sua maior descoberta? — perguntou a toupeira.

— Que basta ser do jeito que eu sou — respondeu o menino.

O Menino, a Toupeira, a Raposa e o Cavalo, de Charlie Mackesy.

Resumo

Neste trabalho, realizamos uma análise detalhada da órbita atual de Atlas sob diferentes cenários, identificando perturbações seculares e ressonantes devido a Prometheus e Pandora, e também devido ao achatamento de Saturno. Mapeamos o domínio das ressonâncias 54:53 Prometheus-Atlas e 70:67 Pandora-Atlas no espaço de fase considerando um conjunto denso de condições iniciais para o semieixo maior e excentricidade para vários clones de Atlas. A análise combinada dos mapeamentos das ressonâncias 54:53 Prometheus-Atlas e 70:67 Pandora-Atlas revelou a sobreposição de ambos os domínios ressonantes no espaço de fase. Identificamos uma razão física para o movimento caótico do Atlas detectado anteriormente ($\sim 0,1 \text{ ano}^{-1}$). Finalmente, investigamos a dinâmica orbital de Atlas considerando Prometheus em uma configuração de seu passado ditada pelas forças de maré em Saturno, revelando que Atlas-Prometheus poderia ter sido um sistema coorbital em $1,8 \times 10^8$ anos.

Palavras-chave: Ressonância de movimentos médios, Atlas, Prometheus, Pandora, sistemas caóticos.

Abstract

In this work, we performed a detailed analysis of the current orbit of Atlas under different scenarios identifying secular, resonant perturbations due to Prometheus and Pandora, and also due to Saturn's oblateness. We mapped the domain of the 54:53 Prometheus-Atlas and 70:67 Pandora-Atlas resonances in the phase space considering a dense set of initial conditions of semi-major axis and eccentricity for several clones of Atlas. The combined analysis of the mappings of the 54:53 Prometheus-Atlas and 70:67 Pandora-Atlas resonances revealed the *overlap* of both resonant domains in phase space. We have therefore identified a physical reason for the chaotic motion of Atlas previously detected ($\sim 0.1 \text{ year}^{-1}$). Finally, we investigate the orbital dynamics of Atlas considering Prometheus in a past configuration dictated by tidal forces in Saturn, which reveals that Atlas-Prometheus could be a co-orbital system at 1.8×10^8 years.

Keywords: Mean motion resonance, Atlas, Prometheus, Pandora, chaotic systems.

Sumário

1 Introdução	13
1.1 Aspectos gerais	13
1.2 Os pequenos satélites de Saturno: Aegaeon, Anthe e Methone	14
1.3 Atlas, Prometheus e Pandora	16
1.4 Objetivos da Tese.....	18
 2 Métodos De Investigação E Ferramentas Computacionais	 20
2.1 Equações de movimento e simulações numéricas	20
2.2 O Espectro Individual de Potências	23
2.4 A análise espectral para Atlas	31
2.5 Mapa dinâmico	35
 3 Dinâmica Secular	 37
3.1 Introdução	37
3.2 Perturbações seculares	37
3.3 A Teoria Secular para Atlas	41
3.3.1 O subsistema Atlas-Prometheus	41
3.3.2 O subsistema Pandora-Atlas	42
3.4 Efeitos de J_2 em ω e Ω de Atlas e Prometheus.....	45
3.5 A variação secular para a excentricidade e inclinação de Atlas	47
 4 Ressonâncias No Sistema De Pequenos Satélites Interiores De Saturno	 50
4.1 Introdução	50
4.2 Ressonância de movimentos médios	50
4.3 Visão geral das estruturas do Sistema de Saturno	52
4.4 Os pequenos satélites naturais em ressonância com Mimas: Aegaeon, Methone e Anthe	53
4.4.1 Aegaeon	55
4.4.2 Methone	57
4.4.3 Anthe.....	62
4.5 Atlas	65
4.5.1 A ressonância 54:53 de movimentos médios com Prometheus.....	66

5 Resultados Específicos Para Atlas	70
5.1 Introdução	70
5.2 O mapeamento para a ressonância 54:53 de movimentos médios entre Atlas-Prometheus	70
5.2.1 A região C: local para a ressonância de corrotação.....	71
5.2.2 A região L: local para a ressonância de Lindblad	74
5.3 Outras ressonâncias na vizinhança da órbita de Atlas	76
5.4 Mapeamento com baixa excentricidade de Prometheus	79
5.5 A ressonância 70:67 de movimentos médios com Pandora.....	81
5.6 A influência de Pandora na dinâmica de Atlas	85
5.7 Difusão Caótica.....	87
5.7.1 Ferramentas utilizadas	88
5.7.2 Metodologia.....	89
5.7.3 Atlas Prometheus	89
5.7.4 Atlas Pandora.....	90
5.7.5 Atlas Prometheus e Pandora	91
6 O Passado Dinâmico De Atlas	94
6.1 A dissipação em Prometheus e sua migração: o passado da dinâmica orbital de Atlas .	94
6.1.1 A dissipação em Saturno	94
6.1.2 A dissipação no núcleo de Saturno	95
6.1.3 A dissipação no envelope de gás de Saturno	96
6.1.4 A dissipação de maré em Prometheus	96
6.1.5 A variação temporal para os parâmetros orbitais	97
6.2 A dinâmica de Atlas na evolução por maré de Prometheus.....	97
6.2.1 O caso coorbital	99
6.2.2 As vizinhanças próximas à órbita atual de Prometheus.....	102
7 Conclusões Finais.....	105
Referências Bibliográficas	108
Apêndice A	114
A.1 As ressonâncias orbitais entre os satélites naturais de Saturno.....	114

A.2 Titan-Hyperion.....	114
A.3 Enceladus-Dione	115
A.4 Mimas-Tethys	115
Apêndice B	117
B.1 A Perturbação Secular Para Dois Corpos.....	117
B.2 Perturbações Seculares Generalizadas	122
B.3 O Achatamento Planetário	125
Apêndice C	128
C.1 O modelo CoraLin.....	128
Apêndice D	130
D.1 A influência da massa de Pandora na dinâmica orbital de Atlas	130

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos gerais

No início da década de 1980, as sondas espaciais *Voyager 1* e *2* realizaram observações e medições no disco planetário, anéis e principalmente nos principais satélites conhecidos até aquela ocasião do planeta Saturno. Os resultados contribuíram para um detalhamento e redivisão de seu anel em subanéis e a descoberta de novos pequenos satélites de formato irregular internos à órbita de Mimas, entre eles Atlas, Prometheus e Pandora. O sucesso das missões *Voyager* abriu caminho para uma nova visita, com a finalidade de investigar as suas propriedades físicas e químicas, porém, a missão *Cassini-Huygens* acabou por revelar um ambiente com complexas leis físicas nas quais estes satélites orbitam (Thomas *et al.* 2013).

Atlas, Prometheus e Pandora, foram observados com mais detalhes a partir de meados de 2004 pela missão *Cassini-Huygens*. As imagens produzidas pela sonda *Cassini* ajudaram na compreensão de seu comportamento dinâmico devido ao ambiente a que estão inseridos. As imagens produzidas foram capazes de revelar detalhes da estrutura morfológica destes satélites, refinar as medidas das dimensões superficiais e estimar outras propriedades físicas (Thomas *et al.* 2013). Como exemplo, os satélites Pan, Daphnis e Atlas estão próximos ao anel A e Prometheus e Pandora estão localizados nas bordas interna e externa do anel F, respectivamente; por outro lado, coorbitando após o anel F, encontramos os grandes satélites Janus e Epimetheus e o par Helene-Polideuces que possuem suas órbitas coorbitais com Dione.

Os recentes descobertos, Aegaeon, Methone e Anthe, com seus curiosos arcos de partículas foram observados pela sonda *Cassini*.

Tabela 1.1. Propriedades físicas dos satélites de Saturno, Thomas e Helfenstein (2020)

Satélite	a (km)	b (km)	c (km)	Raio médio (km)
Aegaeon ^(a)	0,7±0,05	0,25±0,06	0,2±0,08	0,33±0,06
Anthe ^(a)	-	-	-	0,5
Atlas ^(a)	20,4±0,1	17,7±0,2	9,3±0,3	14,9±0,2
Methone ^(a)	1,94±0,02	1,29±0,04	1,21±0,02	1,45±0,03
Mimas ^(c)	207,8±0,5	196,7±0,5	190,6±0,3	198,2±0,4
Pandora ^(a)	51,5±0,3	39,5±0,3	31,5±0,2	40,0±0,3
Prometheus ^(a)	68,5±0,8	40,5±1,4	28,1±0,4	42,8±0,7

1.2 Os pequenos satélites de Saturno: Aegaeon, Anthe e Methone

Aegaeon, Anthe e Methone são três pequenos satélites de formatos irregulares com raios médios aproximados de 0,33 km, 0,5 km e 1,45 km, respectivamente, que foram descobertos pelas imagens da *Cassini* (Spitale *et al.* 2006, Cooper *et al.* 2008, Hedman *et al.* 2009). Aegaeon está inserido no anel G e Anthe e Methone estão além das órbitas de Janus e Epimetheus, orbitando entre Mimas e Enceladus, aproximadamente na borda interna do anel E. As dimensões físicas para Anthe não foram estimadas devido ao seu pequeno tamanho (Tabela 1.1 e Fig. 1.2) e incertezas sobre as propriedades físicas e químicas deste pequeno pedaço de rocha ainda prevalecem (Thomas e Helfenstein 2020).

El Moutamid *et al.* (2014) estudaram analiticamente a órbita de Aegaeon, Anthe e Methone com seu modelo CoraLin e Callegari e Yokoyama (2020) e, a partir desse estudo, apresentaram uma abordagem numérica da dinâmica orbital de Anthe.

Aegaeon, Anthe e Methone experimentam significativas perturbações de longo período provocadas por Mimas (Munõz-Gutiérrez e Guiliatti Winter 2017, Callegari e Yokoyama 2020, Callegari, Rodríguez e Ceccatto 2021, Callegari e Rodríguez 2023).

Aegaeon está em ressonância 7:6 de movimentos médios com Mimas (Hedman *et al.* 2010). Anthe possui órbita em ressonância 11:10 de movimentos médios com Mimas (Callegari e Yokoyama 2020). Methone está na ressonância 15:14 de movimentos médios com Mimas (Callegari, Rodríguez e Ceccatto 2021).

A ressonância é uma perturbação que contribuiu com variações periódicas no semieixo maior dos corpos e que será discutida no Capítulo 4. Há outras perturbações de longo período, como a variação secular na excentricidade e inclinação que serão discutidas no Capítulo 3.

No caso do satélite Methone, Callegari *et al.* (2021) realizaram uma análise detalhada das frequências fundamentais do sistema que permitiu determinar com precisão a atual configuração dinâmica para o par Methone-Mimas. Determinaram numericamente o centro da ressonância e mostraram como os componentes forçados na excentricidade e inclinação são responsáveis pelas oscilações simultâneas de 4 ângulos críticos relatados na literatura (veja a Tabela 2 de Callegari, Rodríguez e Ceccatto 2021).

Na Fig. 1.5, nota-se o satélite Mimas, descoberto no século XIX pelo astrônomo inglês Willian Herschel. Este satélite, com raio médio de 198 km, possui forte influência em seu meio, perturbando a órbita de vários satélites.

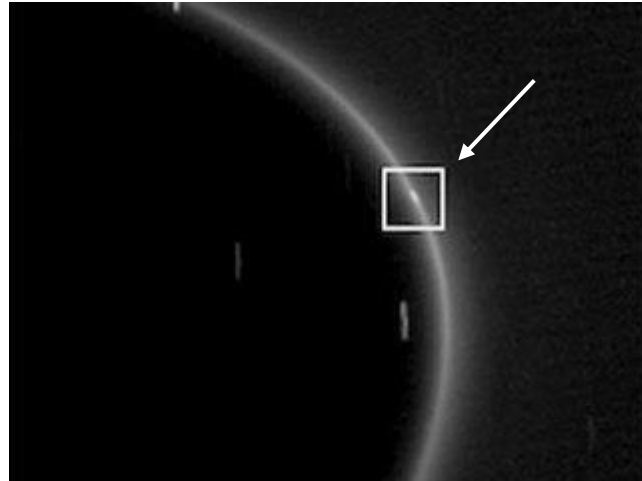


Figura 1.1: O pequeno satélite Aegaeon juntamente com o Anel G. Crédito da imagem: NASA/JPL/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.

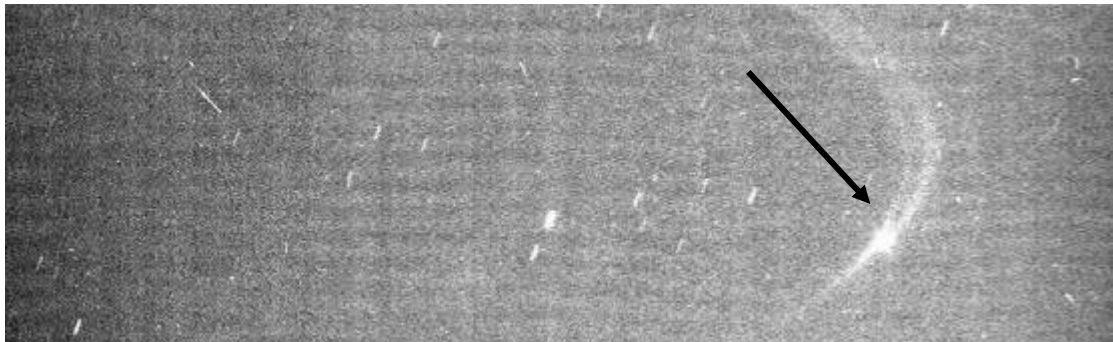


Figura 1.2: As imagens da Cassini revelam a existência de um arco fraco de material orbitando com o pequeno satélite, Anthe (seta). Crédito da imagem: NASA/JPL/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.



Figura 1.3: Methone Crédito da imagem: NASA/JPL/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.

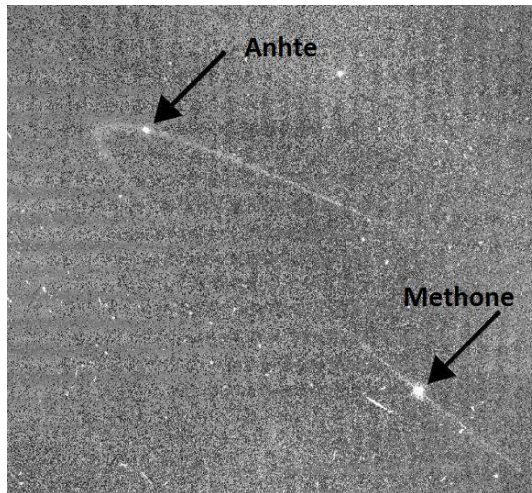


Figura 1.4: Os Satélites Anthe e Methone com seus respectivos arcos. Imagem obtida pela Cassini em 29/10/2007. Crédito da imagem: NASA/JPL/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.

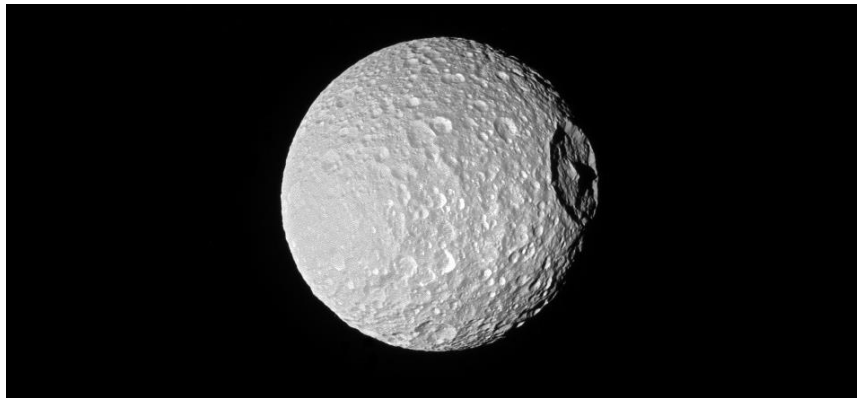


Figura 1.5: Mimas, descoberto pelo astrônomo inglês William Herschel em 17/07/1789, responsável por perturbar as órbitas de Anthe, Methone e Atlas. Imagem obtida pela Cassini em 22/10/2016. Crédito da imagem: NASA/JPL/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.

1.3 Atlas, Prometheus e Pandora

Atlas é um satélite que está próximo à borda externa do Anel A em um ambiente com dinâmica complexa, envolvendo várias ressonâncias de movimentos médios (Renner *et al.* 2016).

O resultado dessas observações revelou que Atlas apresentava um comportamento dinâmico muito complexo, levantando a hipótese de que Atlas estaria em uma ressonância coorbital com algum outro satélite próximo (Cooper *et al.* 2015).

Prometheus e Pandora (Fig. 1.7 e Fig. 1.8, respectivamente) estão próximos à borda interna e externa do anel F, respectivamente. Analisando em conjunto os dados obtidos pelas sondas *Voyager*, pelo Telescópio Espacial *Hubble* e pela sonda *Cassini* Spitale *et al.* (2006) é

possível sugerir que a órbita de Atlas é fortemente perturbada por uma ressonância 54:53 com Prometheus e, em menor intensidade, pela ressonância 70:67 com Pandora.

Os resultados de Cooper *et al.* (2015) se concentram na dinâmica da sua órbita atual, a qual é caótica, segundo os autores. Renner *et al.* (2016) foram além, realizando um estudo mais amplo da dinâmica do satélite baseado em modelos analíticos (El Moutamid *et al.* 2014).

As imagens obtidas pela *Cassini* foram capazes de revelar detalhes da estrutura morfológica de sua superfície (Thomas *et al.* 2013), mostrando a presença de uma suave cordilheira equatorial com elevada altitude, terrenos com grandes elevações verticais nas altas latitudes ao norte e ao sul (Fig. 1.6). Essa configuração geológica sugere que Atlas possui ou possuiu, um interior geologicamente ativo (Thomas *et al.* 2013). As imagens obtidas em 2004 também foram capazes de revelar um fino anel temporário de material ao redor de Atlas.

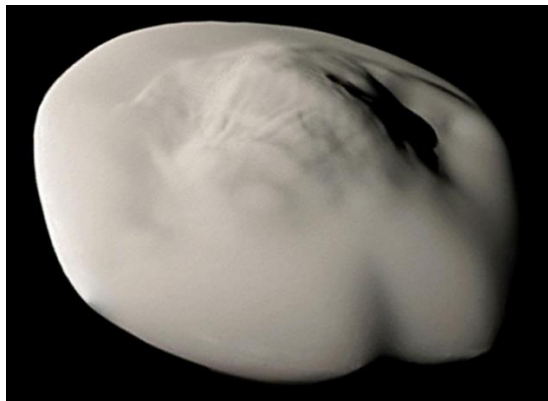


Figura 1.6: Atlas visto pela Cassini em 12/04/2017 em sua máxima aproximação. Acima, detalhes da cordilheira equatorial, altas elevações ao norte e sul. Crédito da imagem: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.



Figura 1.7: A equipe científica da Voyager 1 descobriu Prometheus em outubro de 1980. A espaçonave *Cassini* da NASA observou detalhes na superfície marcada por crateras de Prometheus (86 quilômetros de diâmetro) durante um sobrevoo moderadamente próximo em 6 de dezembro de 2015. Podemos ver ao fundo a borda externa do Anel F. Crédito de imagem: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.

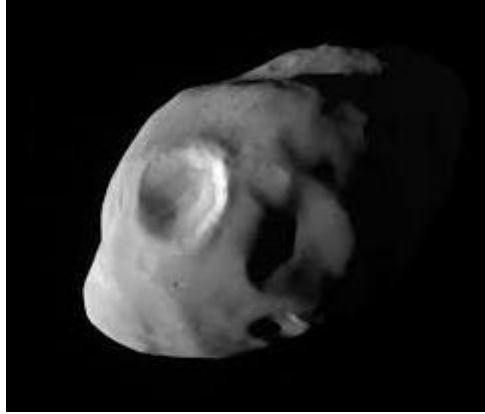


Figura 1.8: O satélite pastor do anel F de Saturno, Pandora, originalmente denominada de S/1980 S26. Crédito da imagem: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute, acesso em 12 de junho de 2022.

Podemos ver na Fig. 1.9 uma representação esquemática do sistema de Saturno na época 01/01/2000, a qual foi considerada como ponto de partida para o nosso estudo.

Capítulo 7

Conclusões finais

Para o sistema de Saturno, os pequenos satélites sofrem com perturbações seculares e ressonantes provocadas pelos satélites maiores que afetam as variáveis de seus semieixos maiores, suas excentricidades e inclinações orbital, respectivamente. No caso das perturbações ressonantes, o conhecimento da dinâmica orbital para um pequeno satélite é fundamental. Inicialmente reproduzimos resultados previamente obtidos para Aegaeon, Methone e Anthe o que contribuiu para o melhor entendimento desses fenômenos servindo como base para aplicá-los ao satélite Atlas.

Primeiramente, vimos que a excentricidade orbital de Atlas é perturbada por Prometheus com período ~ 3 mil dias e por Pandora com período ~ 1 mil dias. Ambas perturbações contribuem com pequenas amplitudes e o mesmo efeito ocorre com a inclinação orbital. Diferente do observado em Methone e Anthe, cujas excentricidades contém o termo forçado devido à perturbação secular com Mimas, a excentricidade de Atlas não contém o termo forçado devido às perturbações de Prometheus e Pandora.

O mapeamento do espaço de fase, para a ressonância 54:53 de movimentos médios com Prometheus revelou que Atlas se encontra na borda as separatrizes com a ressonância de corrotação e que essa localização é responsável pelo comportamento dos argumentos geométricos ϕ_1 e ϕ_2 , visto em Cooper *et al.* (2015) e Renner *et al.* (2016). Seguindo o mesmo raciocínio, realizamos o mapeamento para a ressonância 70:67 de movimentos médios com Pandora revelando que Atlas também possui sua localização orbital fora dessa ressonância, além de apresentar pequenos valores para o número espectral N . Os domínios para as ressonâncias 54:53 e 70:67, no espaço das frequências possuem larguras aproximadas de 4 km e 2 km, respectivamente, resultando em uma probabilidade de captura muito pequena.

O comportamento temporal para os quatro argumentos geométricos ψ 's da ressonância 70:67 é irregular isso ocorre devido a posição orbital de Atlas que está à esquerda do multiplete Ψ_1 e adicionalmente observamos que quando simulamos o comportamento desses argumentos geométricos, sem a presença de Prometheus, passamos a ter uma nova variação temporal, seguindo uma circulação para os quatro argumentos. Esse comportamento sugere que Prometheus contribui com perturbações na ressonância 70:67 de movimentos médios entre Pandora-Atlas.

Mapeando a ressonância 54:53, conseguimos identificar as regiões em que temos o domínio das ressonâncias de corrotação e Lindbald. A região de corrotação está limitada para valores de excentricidade orbital entre $0.003 < e_0 < 0.006$ e ocupa uma faixa bem estreita no espaço de fase ~ 4 km, dentro do intervalo para o semieixo maior $138321 \text{ km} < a_0 < 138325 \text{ km}$. Para as partículas com órbitas internas a essa região, o seu argumento geométrico $\phi_1 = 54\lambda_{pro} - 53\lambda - \varpi_{pro}$ apresenta a oscilação ao redor de 180° . Fisicamente isso significa que a conjunção entre o par Prometheus-Atlas oscila ao redor de uma linha que passa pelo apocentro de Prometheus.

Para valores de excentricidade iniciais $e_0 > 0.01$ e com semieixo maior inicial $a_0 > 13827 \text{ km}$ inicia-se o domínio da ressonância de Lindbald. Para as partículas interiores a essa região, o argumento geométrico $\phi_2 = 54\lambda_{pro} - 53\lambda - \varpi$ apresenta a sua oscilação ao redor 0.

Nosso mapeamento revelou que ambas as ressonâncias estão separadas por cerca de 2 km e estão relacionadas com os valores para a excentricidade da partícula Atlas, assim como observado por Callegari e Yokoyama (2020).

Expandindo o intervalo para o mapeamento dado por Ceccatto *et al.* (2022), identificamos duas ressonâncias de 1ª ordem, 53:52 à esquerda e a 55:54 à direita da órbita atual de Atlas e, para cada uma dessas novas regiões, identificamos condições iniciais (a_0, e_0) para clones de Atlas onde há a oscilação dos argumentos relacionados com essas outras ressonâncias.

Uma condição proposta por Renner *et al.* (2016) para que ocorra a libração do argumento geométrico ϕ_1 seria de que a excentricidade orbital de Prometheus fosse próxima a zero. A fim de ilustrar esse fato, nosso mapeamento para um clone de Prometheus com excentricidade orbital próximas a zero revelou o aumento na região de corrotação e o estreitamento para a região de Lindbald e para valores de excentricidade próximos aos atuais a região de corrotação é preenchida com as separatrizes dessa ressonância.

A análise combinada entre os IPS para as ressonâncias 54:53 e 70:67 revelou a sobreposição de ambas ressonâncias e, essa sobreposição contribui para o movimento irregular de Atlas observado em Spitale *et al.* (2006). Entretanto, esta sobreposição não altera substancialmente a estabilidade da região na qual Atlas se encontra, mantendo a órbita confinada na região das separatrizes entre as ressonâncias em regiões de baixa excentricidade. A descoberta de que a órbita de Atlas é fracamente caótica (ou caótica confinada) está de acordo com Pereira *et al.* (2024), no qual os autores estimaram, com o uso dos expoentes de Lyapunov,

que apesar da órbita de Atlas ser caótica, ela não apresenta grandes variações radiais, podendo ser considerada estável.

O estudo do passado dinâmico de Atlas revelou que durante a migração de Prometheus pelo efeito de maré, Atlas e Prometheus compartilharam a dinâmica coorbital em seu passado. A análise desse mapeamento revelou condições nas quais teríamos o movimento ferradura ou girino. Continuando nosso estudo na vizinhança orbital de Atlas, identificamos as ressonâncias de 1ª, 2ª e 3ª ordem, que foram cruzadas no passado, sendo as de 1ª ordem as mais fortes, com larguras aproximadas de 5 km. As estruturas ressonantes para o sistema Prometheus-Atlas possuem a forma de “relógio de areia”, sendo o centro ocupado pelo domínio da ressonância de corrotação e a parte superior pela a ressonância de Lindblad. Porém, a probabilidade captura para essas ressonâncias de 1ª ordem são pequenas, da ordem de 10^{-6} .

Os resultados originais apresentados neste trabalho estão no manuscrito Ceccatto *et al.* 2024, submetido para publicação no periódico Planetary and Space Science.

Referências Bibliográficas

BROUWER, D. and CLEMENCE, G.M. **Methods of Celestial Mechanics** (Academic Press, New York) (1961).

CALLEGARI, N., YOKOYAMA, T. Dynamics of Two Satellites in the 2:1 Mean-Motion Resonance: application to the case of Enceladus and Dione. **Celest. Mech. Dyn. Astr.** 98, 5-30 (2007).

CALLEGARI, N., YOKOYAMA, T. Dynamics of Enceladus and Dione inside the 2/1 Mean-Motion Resonance under tidal dissipation. **Celest. Mech. Dyn. Astr.**, 102, 273-296 (2008).

CALLEGARI, N., YOKOYAMA, T. Numerical exploration of resonant dynamics in the system of Saturnian inner Satellites. **Planetary and Space Science** 58, 1906-1921 (2010a).

CALLEGARI, N., YOKOYAMA, T. Long-term dynamics of Methone, Anthe and Pallene. Icy Bodies of the Solar System, **Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium**, 263, 161-166 (2010b).

CALLEGARI, N., YOKOYAMA, T. Dynamics of the 11:10 Corotation and Lindblad Resonances with Mimas, and Application to Anthe, **Icarus**, 348, 113820 (2020).

CALLEGARI, N., RODRÍGUEZ, A., CECCATTO, D. T. The current orbit of Methone (S/2004 S 1). **Celest. Mech. Dyn. Astr.** 133, 49pp. (2021).

CALLEGARI, N., RODRÍGUEZ, A. The orbit of Aegaeon and the 7:6 Mimas-Aegaeon resonance. **Celest. Mech. Dyn. Astr.** 135, 21 (2023).

CECCATTO, D. T., CALLEGARI, N., RODRÍGUEZ, A. The current orbit of Atlas (S XV). **Proceedings of International Astronomical Union, IAU Symposium**, 364, 120-127 (2022).

CECCATTO, D. T., CALLEGARI, N., GUIMARÃES G., GIMENEZ K. Resonant Dynamic of Atlas (S XV), submetido no Planetary and Space Science. (2024)

CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astron. Society** 304, 793-799 (1999).

- COLWELL, J.E., NICHOLSON, P.D., TISCARENO, M.S., MURRAY, C.D., FRENCH, R.G., MAROUF, E.A. (2009). **The Structure of Saturn's Rings**. In: Dougherty, M.K., Esposito, L.W., Krimigis, S.M. (eds) *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer, Dordrecht.
- COOPER N. J.; RENNER S.; MURRAY C. D.; EVANS M. W. Saturn's inner satellites orbits, e the chaotic motion of Atlas from new Cassini imaging observations. **The Astronomical Journal** 149, 27-45, (2015).
- DANBY, J. M. A. **Fundamentals of celestial mechanics**. Willmann-Bell, Inc. (1988).
- EL MOUTAMID, M.; RENNER, S.; SICARDY, B. Coupling between corotation and Lindblad resonances in the elliptic planar three-body problem. **Celest. Mech. Dyn. Astr.**, 118, 235-252 (2014).
- EVERHART, E. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings. In: **IAU Colloquium** 83, 185-202 (1985).
- FERRAZ-MELLO, S. 2013, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 116, 109
- FERRAZ-MELLO, S. 2015, *A&A*, 579, A97
- FERRAZ-MELLO, S., RODRÍGUEZ, A., & HUSSMANN, H. 2008, *Celestial Mechanics and Dy- namical Astronomy*, 101, 171
- FERRAZ-MELLO, S. Estimation of periods from unequally spaced observations. **The Astronomical Journal**, 36, 619-624 (1981).
- FERRAZ-MELLO, S. First-order resonances in satellites orbits. In: S. Ferraz-Mello and W. Sessin (eds) **Resonances in the Motion of the Planets, Satellites and Asteroids**, IAG/USP, São Paulo, 37-52 (1985).
- FOLONIER, H. A., & FERRAZ-MELLO, S. 2017, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 129, 359
- FULLER, J., LUAN, J., & QUATAERT, E. 2016, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meet- ing Abstracts*, Vol. 48, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #48*, 401.01
- GALLARDO, T. Three-dimensional structure of mean motion resonances beyond Neptune. *Celest Mech Dyn Astr* 132, 9 (2020).

GIORGINI, J. D., YEOMANS, D. K., CHAMBERLIN, A. B., CHODAS, P. W., JACOBSON, R. A., KEESEY, M. S., LIESKE, J. H., OSTRO, S. J., STANDISH, E. M., WIMBERLY, R. N. JPL's On-Line Solar System Data Service. **American Astronomical Society**, DPS meeting #28, id.25.04; Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 28, p.1158 (1996).

GREENSPAN, H., BATCHELOR, C., & Iserles, U. 1968, The Theory of Rotating Fluids, Cambridge Monographs on Mechanics (Cambridge University Press). <https://books.google.com.br/books?id=2R47AAAAIAAJ>

<https://books.google.com.br/books?id=2R47AAAAIAAJ>

GIUPPONE, C. A., BEAUGÉ, C. MICHTCHENKO, T. A. S. FERRAZ-MELLO, Dynamics of two planets in coorbital motion, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 407, Issue 1, September 2010, Pages 390–398

GIUPPONE, C. A., RODRÍGUEZ, A. MICHTCHENKO, T. A., ALMEIDA, A. A. Past and present of the Circumbinary moons in the Pluto-Charon system. **Astronomy e Astrophysics**, 658, 18 pp. (2022).

GOLDREICH, P., RAPPAPORT, N. Origin of chaos in the Prometheus-Pandora system. **Icarus**, 166, 320-327 (2003).

GOLDREICH, P., RAPPAPORT, N. Chaotic motions of Prometheus and Pandora. **Icarus**, 166, 391-399 (2003).

GREENBERG, R. Apsidal Precession of Orbits about an Oblate Planet. **The Astronomical Journal** 86, 912-914 (1981).

HEDMAN, M. M., MURRAY, C. D., COOPER, N. J., TISCARENO, M. S., BEURLE, K., EVANS, M. W., BURNS, J. A. Three tenuous rings/arcs for three tiny moons. **Icarus** 199, 378-386 (2009).

HEDMAN, M. M., COOPER, N. J., MURRAY, C. D., BEURLE, K., EVANS, M. W., TISCARENO, M. S., BURNS, J. A. Aegaeon (Saturn LIII), a G-ring object. **Icarus** 207, 433-447 (2010).

JACOBSON, R. A., SPITALE, J., PORCO C. C., OWEN JR., W. M. The GM values of Mimas and Tethys and the libration of Methone. **The Astronomical Journal** 132, 711-713 (2006a).

JACOBSON, R. A., ANTREASIAN, P. G., BORDI, J. J., CRIDDLE, K. E., IONASESCU, R., JONES, J. B., MACKENZIE, R. A., MEEK, M. C., PARCHER, D., PELLETIER, F. J., OWEN

- JR., W. M., ROTH, D. C., ROUNDHILL, I. M., STAUCH, J. R. The Gravity Field of the Saturnian System from satellite observations and spacecraft tracking data. **The Astronomical Journal** 132, 2520-2526 (2006b).
- JACOBSON, R. A., SPITALE, J., PORCO C. C., BEUELE, K., COOPER, N. J., EVANS, M. W., MURRAY, C. D. Revised orbits of Saturn's inner satellites. **The Astronomical Journal** 135, 261-263 (2008).
- LICHTENBERG A. J., LIEBERMAN M., Regular and Chaotic Dynamics. Springer, 1992, p. 714.
- LAINÉY, V., CASAUS, L. G., Fuller, J., et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 1053
- MARTÍ J. G., CINCOTTA P. M., BEAUGÉ C., Chaotic diffusion in the Gliese-876 planetary system, MNRAS, 2016, vol. 460, p. 1094.
- MICHTCHENKO, T. A., FERRAZ-MELLO, S. Modeling the 5:2 Mean-Motion Resonance in the Jupiter-Saturn Planetary System. **Icarus** 149, 357-374 (2001a).
- MICHTCHENKO, T. A., FERRAZ-MELLO, S. Resonant Structure of the outer solar system in the neighborhood of the planets. **The Astronomical Journal** 122, 474-481 (2001b).
- MICHTCHENKO T. A., NESVORNÝ D., Wavelet analysis of the asteroidal resonant motion, Astronomy and Astrophysics, 1996, vol. 313, p. 674.
- MILANI A., NOBILI A. M., An example of stable chaos in the Solar System, Nature, 1992, vol. 357, p. 569.
- MUNÕZ-GUTIÉRREZ, M. A.; GIULIATTI WINTER, S. Long-term evolution and stability of Saturnian small satellites: Aegaeon, Methone, Anthe and Pallene. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** 470, 3750-3764 (2017).
- MURRAY, C. D, DERMOTT, S. F. **Solar System Dynamics**, Cambridge University Press (1999).
- PEALE, S. J. Origin and Evolution of the Natural Satellites. **Annual Review of Astron. and Astrophys.** 37, 533-602 (1999).

PEREIRA L. S., MOURÃO D. C., WINTER O. C., Confined chaos and the chaotic angular motion of atlas, a Saturn's inner satellite, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (2024).

PORCO, C. C., BAKER, E., BARBARA, J., BEURLE, K., BRAHIC, A., BURNS, J. A., CHARNOZ, S., COOPER, N., DAWSON, D. D., DEL GENIO, A. D., DENK, T., DONES, L., DYUDINA, U., EVANS, M. W., GIESE, B., GRAZIER, K., HELFENSTEIN, P., INGERSOLL, A. P., JACOBSON, R. A., JOHNSON, T. V., MCEWEN, A., MURRAY, C. D., NEUKUM, G., OWEN, W. M., PERRY, J., ROATSCH, T., SPITALE, J., SQUYRES, S., THOMAS, P., TISCARENO, M., TURTLE, E., VASAVADA, A. R., VEVERKA, J., WAGNER, R., WEST, R.. Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites. **Science** 307 1226-1236 (2005).

PORCO, C. C. S/2004 S 1 and S/2004 S 2. **IAU Circ.** 8401 (2004 August 16) (2004).

PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T., B. P. FLANNERY. **Numerical Recipes in Fortran 77**. Cambridge University Press (1996).

RENNER, S., SICARDY, B. Use of the Geometric Elements in Numerical Simulations. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy** 94, 237-248 (2006).

RENNER S.; COOPER J, N.; EL MOUTMAID M.; SICARDY B.; VIENNE A.; MORRAY C. D.; SARLENFEST M. Origin of the chaotic motion of the Saturnian satellite Atlas. **The Astronomical Journal**, 151, 9pp. (2016).

REMUS, F., MATHIS, S., ZAHN, J. P., & LAINEY, V. 2012, A&A, 541, A165, doi: 10.1051/0004-6361/201118595

REMUS, F., MATHIS, S., ZAHN, J.-P., & LAINEY, V. 2014, in -, Vol. 293, Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets, ed. N. Haghighipour, 362–368, doi: 10.1017/S1743921313013161

REMUS, F., MATHIS, S., ZAHN, J. P., & LAINEY, V. 2015, AAP, 573, A23, doi: 10.1051/0004-6361/201424472

RODRÍGUEZ A., CORREA-OTTO J. A., MICHTCHENKO T. A. Primordial migration of coorbital satellites as a mechanism for the horseshoe orbit of Janus –Epimetheus, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 487, Issue 2, August 2019, Pages 1973–1979

RODRÍGUEZ, A., CALLEGARI, N. Dynamical stability in the vicinity of Saturnian small moons. The cases of Aegaeon, Methone, Anthe and Pallene. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** 506, 5093-5107 (2021).

ROSSIGNOLI N. L., Di SISTO R. P., ZANARDI M., DUGARO A. Cratering and age of the small Saturnian satellites, *A&A*, 627, A12, 2019.

SHOJI, D., & HUSSMANN, H. 2017, *AAP*, 599, L10

SIQUEIRA, P. B. Adaptação do integrador Rebound para o estudo de anéis planetários. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.

SPITALE, J. N., JACOBSON, R. A., PORCO, C. C., OWEN, JR, W. M. The Orbits of Saturn's Small Satellites Derived from Combined Historic and Cassini Imaging Observations. **The Astronomical Journal** 132, 792-810 (2006).

THOMAS, P.C., BURNS, J.A., HEDMAN, M., HELFENSTEIN, P., MORRISON, S., TISCARENO, M.S., VEVERKA, J. The inner small satellites of Saturn: a variety of worlds. **Icarus** 226, 999–1019 (2013).

THOMAS, P. C., HELFENSTEIN, P. The small inner satellites of Saturn: Shapes, structures and some implications. **Icarus** 344, 113355 (2020).

WITTE, M. G., & SAVONIJE, G. J. 1999, *A&A*, 350, 129. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9909073>

WITTE, M. G., & SAVONIJE, G. J. 2001, *A&A*, 366, 840.