



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU
ASTROFÍSICA GRAVITACIONAL E FÍSICA ESPACIAL

**Luas Geladas de Saturno Titã e Encélado: Descobertas Obtidas
pela Sonda Espacial Cassini-Huygens**

FERNANDO HENRIQUE MARTINS DA SILVA

BRASÍLIA – DF

2021



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU
ASTROFÍSICA GRAVITACIONAL E FÍSICA ESPACIAL

**Luas Geladas de Saturno Titã e Encélado: Descobertas Obtidas
pela Sonda Espacial Cassini-Huygens**

FERNANDO HENRIQUE MARTINS DA SILVA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação Lato Sensu da Universidade de Brasília no curso de Astrofísica Gravitacional e Física Espacial (AGFE), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Física.

Orientador:
Prof. Dr. José Leonardo Ferreira

BRASÍLIA – DF

2021



Luas Geladas de Saturno Titã e Encélado: Descobertas Obtidas pela Sonda Espacial Cassini-Huygens

Por: Fernando Henrique Martins da Silva

Comissão avaliadora composta por:

José Leonardo Ferreira	IF-UnB	Orientador
Rodrigo Andrés Miranda Cerda	UnB-Gama	Examinador
Thyrso Villela Neto	INPE/CGEE	Examinador

BRASÍLIA – DF

2021

“Não somos melhores do que o Universo, somos parte dele. ”

Neil deGrasse Tyson

Agradecimentos

Agradeço ao meu professor orientador J. Leonardo por ter aceitado participar deste projeto incrível que foi escrever sobre Saturno e suas luas geladas. Suas contribuições certamente ajudaram a enriquecer este manuscrito e foram de grande importância para meu engajamento na área da física espacial. Ele me concedeu a liberdade de conduzir este trabalho de conclusão de curso de acordo com minhas expectativas. Se hoje o texto está finalizado, foi graças ao seu esforço e dedicação na condução deste TCC. Obrigado por me acolher com braços abertos. Este, com certeza, será o início de uma colaboração bastante frutífera. Aliás, já está sendo. Foi um prazer trabalhar ao seu lado!

Agradeço aos professores Thyrso e Rodrigo por terem aceitado compor a banca avaliadora da minha apresentação de TCC. A conclusão deste curso só foi possível graças às suas excelentes aulas. Muito obrigado!

Agradeço também à minha companheira Ana Paula (Pobre), por compartilhar de vários momentos de angústias e incertezas, principalmente por me motivar e incentivar a prosseguir até o fim desta jornada. Não foi nada fácil concluir esta especialização em Astrofísica Gravitacional e Física Espacial. Certamente, este o curso teria um maior índice de evasão se não fosse ela por me mostrar que batalhas difíceis nos proporcionam vitórias gloriosas. Por vários momentos pensei em desistir. Mas, suas palavras me mostraram o caminho da paciência e finalmente pude encontrar a luz que me guiou para seguir em frente e finalizar mais este projeto. Meu muitíssimo obrigado por existir e por estar sempre ao meu lado!

Agradeço aos meus pais Adelson e Ivonete, ao meu irmão Neil e ao meu filho Henrique por serem o combustível que me faz querer ir sempre mais longe. Sem eles em minha vida, eu não teria trilhado este caminho e, parafraseando Newton, se pude ir mais longe foi porque fui impulsionado por gigantes. Vocês são meus gigantes, obrigado por tudo que me proporcionaram. Agradeço também aos meus familiares que de uma maneira ou de outra se fizeram presentes neste projeto e na minha vida.

Meus pequenos bebês Bolinha, Lolo e Jojola. Agradeço com carinho especial por serem essas coisinhas mais fofinhas em minha vida. Pelos momentos de lazer, de descontração e também pelos momentos (nada alegres) em que me acordaram às 5h da manhã. Vocês são fofos e merecem destaque, pois também fizeram parte dessa história.

Deixo meu obrigado aos professores do curso, pois entendo o quanto se dedicaram para fazer este curso acontecer. Somos parte do início de algo que tem toda a potencial de crescer ainda mais e alcançar amantes de astronomia e astrofísica. Em especial, gostaria de agradecer à professora Vanessa por também não ter me deixado desistir! Obrigado por me ouvir em um momento de desabafo e por me proporcionar um pouco de resiliência. Agradeço também por ter me deixado fazer parte deste projeto tão bonito que é esta pós-graduação AGFE. Quero agradecer também ao professor Clóvis por, finalmente me fazer entender relatividade geral e cálculo tensorial. A anos eu venho tentando entender este conteúdo e graças às suas aulas eu finalmente arrisco dizer que aprendi.

Agradeço aos colegas de curso e do grupo do zap que permaneceram até o fim dessa jornada. Gilson, J. Ricardo, Luiz, Marcus, Petrus, Sidney, Taric e Thiago. Em especial, agradeço ao Sidney por ter me ajudado bastante no momento de adquirir meu primeiro telescópio. Sua parceria e dedicação serão lembradas para sempre. Tamo junto demais!

Finalmente, gostaria de dedicar este trabalho aos colegas de curso que ficaram ao longo do caminho e não puderam concluir esta pós-graduação. Infelizmente nem tudo são flores. Entendo perfeitamente os motivos que os levaram a desistir. Não foi demérito deles! Esse curso não foi fácil, insisto em repetir. Eu mesmo teria ficado pelo caminho. Contudo, reconheço que sou bastante privilegiado por ter tido forças para continuar a seguir até o fim. Não importa onde estejam, espero que tenham encontrado caminhos menos difíceis e tortuosos para trilhar.

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar os principais feitos da missão Cassini-Huygens enviada para investigar Saturno, seus anéis e suas luas dando ênfase aos resultados obtidos sobre as luas Titã e Encélado a partir de uma revisão bibliográfica. A estrutura deste manuscrito será dividida em quatro tópicos principais: a missão, a viagem, a sonda e resultados obtidos sobre as luas Titã e Encélado. A viagem que a sonda realizou durou 20 anos (1997-2017). A sonda Huygens foi enviada para Titã em 2005, quando colheu bastante informação sobre a superfície desta lua, enquanto a sonda Cassini foi atirada em direção a Saturno penetrando sua atmosfera. Vários experimentos compunham as sondas Cassini-Huygens tais como espectrômetro de plasma, analisador de poeira cósmica, espectrômetro no infravermelho, espectrômetro de massa; sistema de imagens, instrumento de captura em imagem da magnetosfera, magnetrômetro, radar, observadores de ondas de rádio e plasma, gerador de radioisótopos térmicos, espectrógrafo de ultravioleta e espectrômetro de mapeamento no visível e no infravermelho. Por fim, será verificado de que forma se comporta o ambiente espacial em torno de Saturno, em especial, como se acopla a magnetosfera deste planeta com suas principais luas e serão investigados fenômenos atmosféricos como as auroras observadas nos polos deste planeta Joviano.

Palavras-chave: Sonda Cassini-Huygens, Saturno, Titã, Encélado.

Abstract

The aim of this work is to present the main feats of the Cassini-Huygens mission sent to investigate Saturn, its rings, and its moons, emphasizing the results obtained on the moons Titan and Enceladus from a literature review. The structure of this manuscript will be divided into four main topics: the mission, the trip, the probe, results obtained on the moons Titan and Enceladus. The trip that the probe made lasted 20 years (1997-2017). The Huygens spacecraft was sent to Titan in 2005, when it collected a lot of information about the surface of this moon, while the Cassini spacecraft was hurled towards Saturn and penetrated its atmosphere. Several experiments made up the Cassini-Huygens probe such as plasma spectrometer, cosmic dust analyzer, infrared spectrometer, mass spectrometer; imaging system, magnetosphere imaging instrument, magnetometer, radar, radio and plasma wave observers, thermal radioisotope generator, ultraviolet spectrograph, and visible and infrared mapping spectrometer. Finally, it will be verified how the space environment around Saturn behaves, in particular, how the magnetosphere of this planet is coupled with its main moons, and atmospheric phenomena such as the auroras observed at the poles of this Jovian planet will be investigated.

Keywords: Cassini-Huygens probe, Saturn, Titan, Enceladus.

Lista de Siglas

- ACP – Sigla do inglês *Aerosol Collector and Pyrolyser*
- ASI – Sigla do italiano *Agenzia Spaziale Italiana*
- CAPS – Sigla do inglês *Cassini Plasma Spectrometer*
- CDA – Sigla do inglês *Cosmic Dust Analyzer*
- CHEMS – Sigla do inglês *Charge-Energy-Mass Spectrometer*
- CIRS – Sigla do inglês *Composite Infrared Spectrometer*
- DISR – Sigla do inglês *Descent Imager/Spectral Radiometer*
- DWE – Sigla do inglês *Doppler Wind Experiment*
- ESA – Sigla do inglês *European Space Agency*
- GCMS – Sigla do inglês *Gas Chromatograph Mass Spectrometer*
- GSFC – Sigla do inglês *Goddard Space Flight Center*
- GWS – Sigla do inglês *Great White Spots*
- HASI – Sigla do inglês *Huygens Atmospheric Structure Instrument*
- HST – Sigla do inglês *Hubble Space Telescope*
- INCA – Sigla do inglês *Ion and Neutral Camera*
- INMS – Sigla do inglês *Ion and Neutral Mass Spectrometer*
- ISO – Sigla do inglês *Infrared Space Observatory*
- ISS – Sigla do inglês *Imaging Science Subsystem*
- IUE – Sigla do inglês *International Ultraviolet Explorer*
- JPL – Sigla do inglês *Jet Propulsion Laboratory*
- LEMMS – Sigla do inglês *Low-Energy Magnetospheric Measurement System*
- MAG – Sigla do inglês *Magnetometer*
- MIMI – Sigla do inglês *Magnetospheric Imaging Instrument*
- NASA – Sigla do inglês *National Aeronautics and Space Administration*
- PSE – Sigla do inglês *Probe Support Equipment*
- RPWS – Sigla do inglês *Radio and Plasma Wave Science*
- RSS – Sigla do inglês *Radio Science Subsystem*
- SED – Sigla do inglês *Saturn Electrostatic Discharges*
- SKR – Sigla do inglês *Saturn Kilometric Radiation*
- SOI – Sigla do inglês *Saturn Orbit Insertion*
- SSP – Sigla do inglês *Surface-Science Package*
- UVIS – Sigla do inglês *Ultraviolet Imaging Spectrograph*
- VIMS – Sigla do inglês *Visible and Infrared Mapping Spectrometer*

Índice

Agradecimentos	5
Resumo	7
Abstract	8
Lista de Siglas	9
Introdução	12
Capítulo 1 – Saturno e suas Luas Geladas: Antes de Cassini	18
1.1 – Saturno	18
1.2 – Titã: A Maior Lua de Saturno	22
1.3 – Lua Exterior Gelada: Encélado	24
Capítulo 2 – A Missão Cassini	27
2.1 – Principais Objetivos Científicos da Missão Cassini	27
2.2 – Linha do Tempo	28
2.3 – Grand Finale	31
Capítulo 3 – A Sonda Cassini-Huygens	34
3.1 – A Espaçonave Cassini	36
3.1.1 – Sensoriamento Remoto no Óptico	36
3.1.2 – Sensoriamento Remoto no Rádio	38
3.1.3 – Instrumentos de Campo e de Partículas	40
3.2 – Sonda Espacial Huygens	43
Capítulo 4 – As Descobertas da Missão Cassini-Huygens	46
4.1 – Saturno	46
4.2 – Titã Após Cassini	62
4.3 – Encélado Pós-Cassini	69
Considerações Finais	76
Referências	82

Introdução

Quando se observa o planeta Saturno (Figura I.1) e algumas de suas luas através de um telescópio, não se imagina que este sistema seja dinâmico e apresente alguma atividade. Contudo, ao se fazer uma reflexão sobre o próprio movimento da Lua em torno da Terra, pode-se especular sobre alguma atividade no sistema de Saturno e, assim, se questionar quais mecanismos que poderiam ocorrer neste mundo tão distante de nós. Embora Saturno esteja a aproximadamente a uma distância de 9 UA (cerca de 1277 milhões de km) da Terra, essa escala de distância nada se compara à vastidão do Universo e explorar este sistema começa a se tornar um sonho possível. Este planeta peculiar é bastante interessante pelo fato de possuir anéis e luas tão grandes que se não estivessem próximas de Saturno, seriam elas mesmas outros planetas do Sistema Solar. Os anéis e algumas das maiores luas deste planeta são visíveis quando observados por um telescópio newtoniano comum mesmo a distâncias imensas, mas isso não é suficiente. Queremos chegar mais perto!

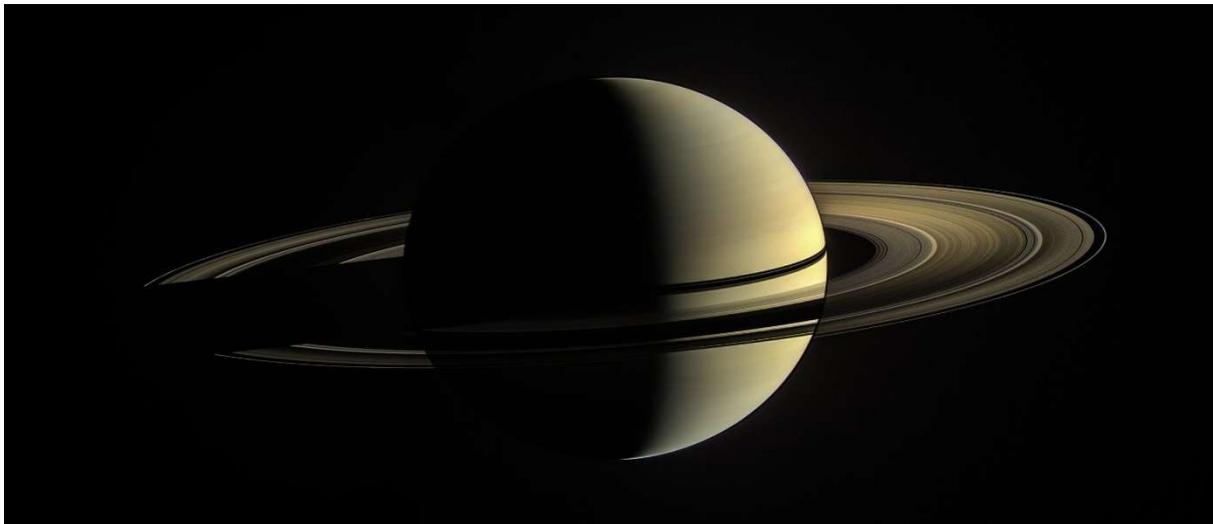


Figura I.1 – Planeta seis. Esta é uma imagem obtida pelo instrumento ISS da Cassini no visível quando a espaçonave estava localizada a uma distância de 2,3 milhões de quilômetros de distância do planeta. Do lado esquerdo da imagem, a sombra do planeta oculta parte dos seus anéis. Fonte: NASA/JPL PIA12567

O sistema de Saturno pode ser considerado um “mini” Sistema Solar [Johnson, 2009]. Neste sistema, o próprio planeta faz o papel do Sol com sua intensa gravidade e campo magnético interagindo com seus anéis e seus satélites que, por sua vez, performartizam os

planetas do Sistema Solar. Este arranjo não só expõe as complexas interações envolvidas na formação do Sistema Solar mas também mostra a riqueza fenomenológica de nosso Sistema Solar atual.

A história da formação dos planetas se confunde com a da formação da própria estrela que estes orbitam. No início da formação do Sistema Solar, o Sol coletava finas partículas de poeira e as agregavam no disco de acreção (Figura I.2) aumentando gradativamente com o passar dos milhares de anos, até que finalmente, as pequenas concentrações de matéria alcançaram dimensões suficientes para causar atrações gravitacionais para se atraírem mutuamente. Isto levou a mais colisões e a mais acreção de matéria, que resultou na formação de planetas de dimensões de luas em menos de um milhão de anos.

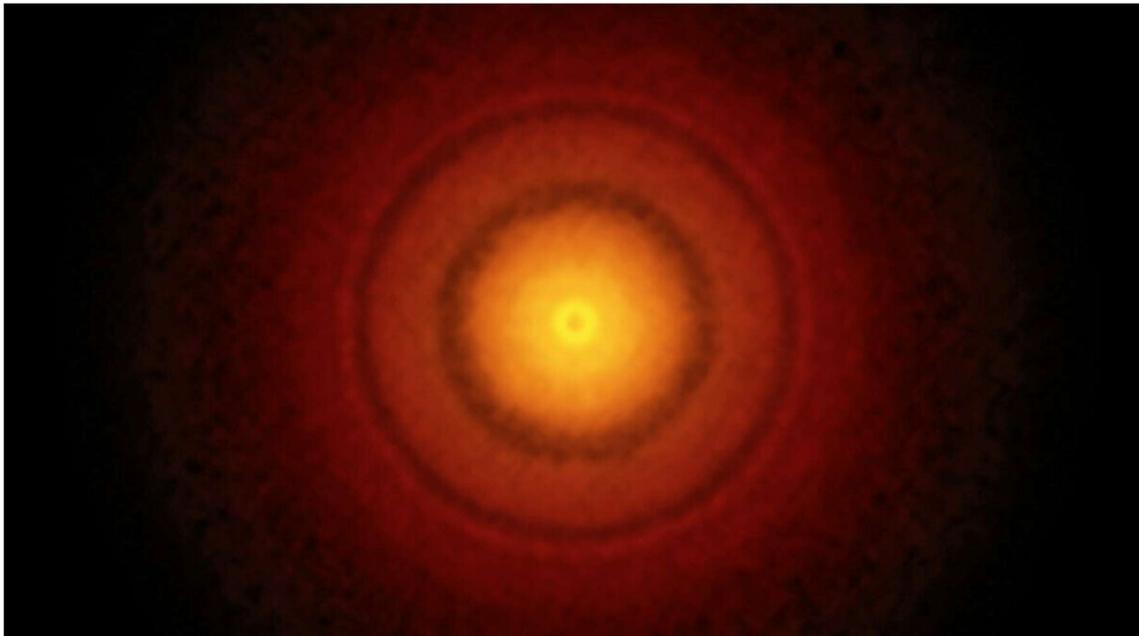


Figura I.2 – Essa é uma imagem de um disco protoplanetário em torno de uma estrela do tipo Sol chamada TW Hydrae que foi capturada pelo rádio-telescópio ALMA. Fonte: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

A região mais interna e mais quente do disco deu origem a formação de planetas rochosos devido ao fato de que a água e outras substâncias voláteis não conseguiriam se condensar, enquanto que a região mais externa e fria possibilitou a formação dos planetas gasosos, onde a água e outros gases eram dominantes e a baixa interação gravitacional com o interior do disco de acreção, possibilitou que os protoplanetas gasosos agregassem mais matéria que os protoplanetas rochosos. Aqueles, por sua vez, cresceram o suficiente para atrair

hidrogênio e hélio crescendo rápido e se formando na condição de planeta em menos de 3 milhões de anos, sendo considerados os planetas mais velhos do Sistema Solar¹.

Sendo Saturno um planeta gasoso, ele compartilha algumas propriedades que Júpiter também possui tais como o intenso campo magnético [Hubbard *et al.* 2009] em torno do planeta que é resultado do movimento de íons de hidrogênio localizados em seu interior, tempestades violentas varrem as superfícies de ambos os planetas bem como a presença de diversas luas, algumas delas inclusive com características planetárias que despertam bastante interesse na comunidade científica.

Outro ponto em comum entre os dois planetas é que, devido à intensa força gravitacional, no início da formação do Sistema Solar, eles lançaram cometas e asteroides por todo sistema e provavelmente alguns deles devem ter colidido com a Terra, preenchendo o planeta com água já que os cometas são constituídos de gelo e poeira. Hoje em dia, Saturno e os planetas gasosos desempenham papel fundamental para a proteção da Terra contra eventuais colisões com cometas e asteroides, pois, esses planetas atraem para si esses corpos e os mantêm aprisionados no cinturão de asteroides que se localiza na região entre os planetas Marte e Júpiter. É importante também mencionar que vários destes cometas são capturados por estes grandes planetas e se tornam cometas periódicos realizando orbitas elípticas de grande excentricidade, como é o caso do cometa de Halley.

O papel de proteção contra impactos de cometas e asteroides que os planetas gasosos proporcionam ao planeta Terra não é apenas um mero fato. Esta característica tornou possível o surgimento e a manutenção da vida aqui na Terra. Há aproximadamente 66 milhões de anos atrás o planeta sofreu um enorme impacto com um asteroide que provocou mudanças climáticas que levaram a extinção de 3/4 da vida no planeta incluindo a dos dinossauros. Se atualmente a região de localização do planeta Terra no Sistema Solar é um local calmo e tranquilo para que tenha tido tempo suficiente para proporcionar o surgimento de vida e vida inteligente, com certeza isso ocorreu devido à presença dos gigantes gasosos, dentre eles Saturno.

Além disso, ambos os planetas foram formados logo após a formação do sol e provavelmente em uma região mais próxima da estrela do que a ocupada por eles atualmente [Johnson, 2009]. Hoje em dia, conhecemos mais de 4000 exoplanetas (planetas que orbitam outras estrelas) e a maioria dos exoplanetas descobertos são parecidos com Júpiter e Saturno e

¹ Informação obtida de <https://www.planetary.org/articles/solar-system-history-101> Acessado: 03/12/2021.

estão localizados próximos as suas respectivas estrelas o que reforça o fato de que os gigantes gasosos do Sistema Solar tenham migrado durante a fase de formação do Sistema Solar. De fato, foi descoberto recentemente o exoplaneta J1407b que possui anéis 200 vezes maiores que os de Saturno e carinhosamente ganhou o apelido de Super-Saturno, da mesma maneira como quando se descobrem exoplanetas do tipo Super-Júpiter ou Júpiter quentes localizados próximos às suas estrelas [Johnson, 2009]. Portanto, conhecer Saturno e a origem e evolução dos planetas gasosos é essencial para a compreensão da evolução não apenas do Sistema Solar, mas também é importante para entendermos mais sobre a dinâmica planetária em geral.

Saturno impressiona pelo fato de apresentar anéis visíveis, algo que os outros planetas gasosos do nosso Sistema Solar não compartilham. Entretanto, todos os gigantes gasosos apresentam anéis difusos que somente podem ser detectados com instrumentos sensíveis em comprimentos de onda no infravermelho e no ultravioleta. Os anéis de Saturno foram provavelmente formados quando uma lua grande se aproximou muito de Saturno ao ponto deste planeta destroça-las em pedaços devido à intensa interação gravitacional com o planeta.

Tanto Saturno quanto Júpiter estão localizados em regiões do Sistema Solar além da zona habitável, que é definida como sendo a região na qual a temperatura permite que a água seja encontrada em seu estado líquido. Desta forma, suas luas são lugares extremamente gelados. Outra característica dos satélites naturais é o fato de que eles não possuem atmosfera, assim como a nossa Lua. Entretanto, o que se descobriu com as sondas espaciais Voyager é que a maior lua de Saturno, Titã, possui uma intensa atmosfera composta por hidrocarbonetos e esconde sua superfície contendo rochas congeladas e imensos lagos de metano, o que configura algo extremamente incomum para um satélite natural. Além disso, descobriu-se que a lua Encélado possui uma superfície relativamente nova pelo fato de apresentar poucas crateras de impacto o que despertou ainda mais a curiosidade dos cientistas que se questionaram se ocorre algum mecanismo geológico de renovação da superfície. Há algo acontecendo lá e queremos descobrir o que é!

Devido aos avanços tecnológicos de física e de engenharia, a humanidade se tornou capaz de construir espaçonaves e viajar pelos confins do Sistema Solar e equipadas com experimentos e detectores que nos possibilitou obter um vislumbre daquilo que podemos chamar de “quintal de casa”. Cassini-Huygens (Figura I.3) é um exemplo das mais fantásticas obras de tecnologia já produzidas por cientistas e engenheiros. As informações obtidas pelos dados e imagens desta sonda revolucionou nosso conhecimento sobre Saturno e suas luas

geladas. Desta maneira, o objetivo deste trabalho é explorar os principais resultados científicos obtidos pela missão Cassini-Huygens, primeira espaçonave a orbitar o sistema de Saturno.

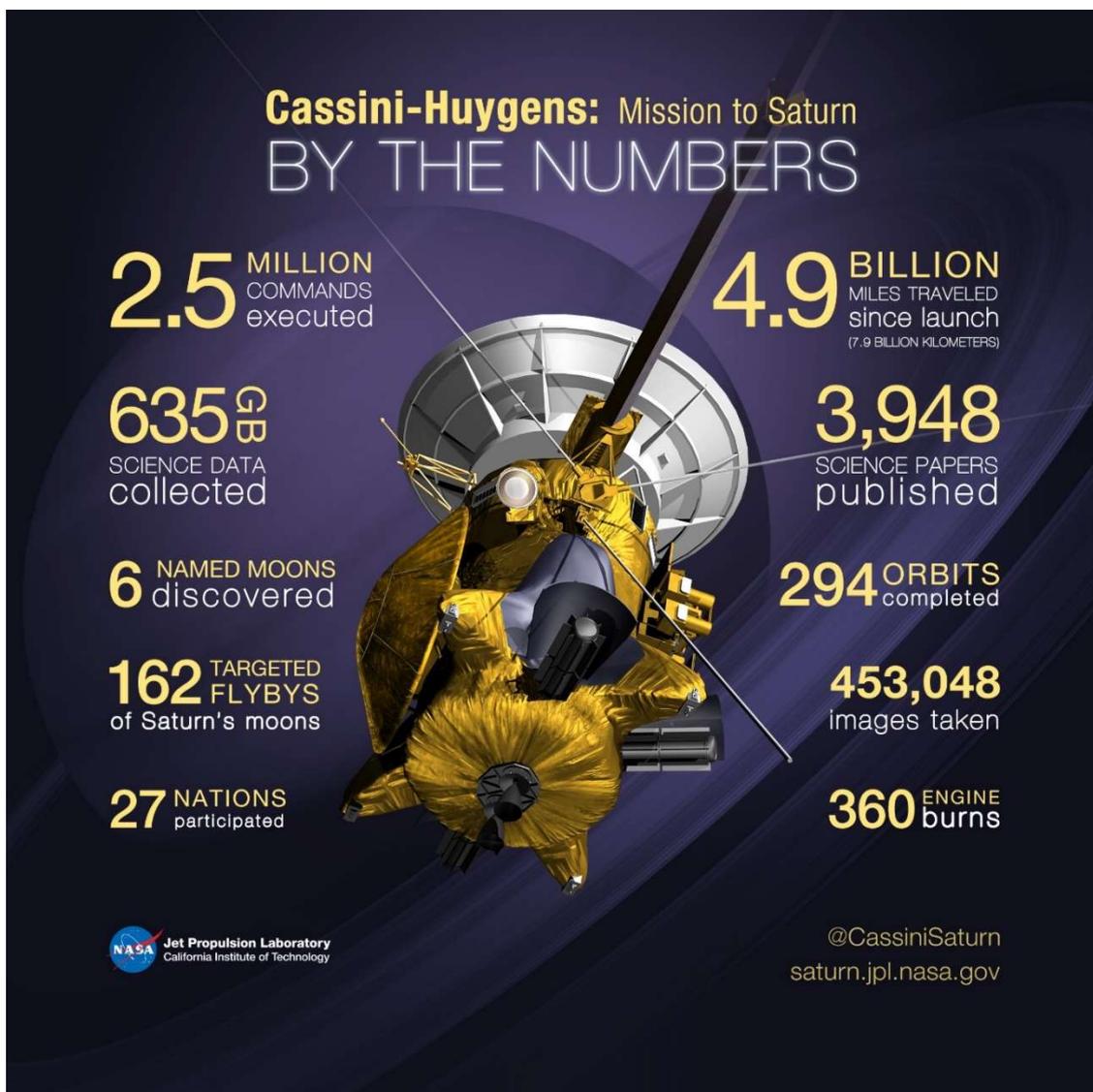


Figura I.3 – Cassini-Huygens em números. Nesta figura, o resultado de 20 anos de pesquisa é sintetizado em números. Foram 2,5 milhões de comandos executados, 635 GB de dados científicos coletados, 6 luas descobertas, 162 sobrevoos nas luas de Saturno, 27 países envolvidos, 7,9 milhões de quilômetros viajados, 3.948 artigos científicos publicados (e contando), 294 orbitas completas em torno de Saturno, 453.048 imagens obtidas e 360 queimas de combustível. Fonte: NASA/JPL

Deste modo, este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo realizar uma pesquisa bibliográfica sobre as principais descobertas obtidas pela espaçonave Cassini durante sua muito bem sucedida missão ao longo de 20 anos de operação investigando o sistema de Saturno. O volume de dados e informações colhidos durante a missão é extremamente grande e sua longa

discussão foge do escopo deste trabalho. Portanto, serão abordados alguns fenômenos atmosféricos e de física de plasma que ocorrem em Saturno e em seu ambiente interplanetário, incluindo seus anéis. Serão também investigadas emissões de rádio a partir do plasma nas auroras polares que ocorrem em Saturno, bem como o acoplamento eletromagnético que existe entre o planeta, seus anéis e suas luas. Saturno possui 82 satélites naturais, inclusive algumas dessas luas foram descobertas durante a missão Cassini. Daremos atenção às luas Titã e Encélado. Titã possui uma atmosfera muito espessa e a sonda europeia Huygens foi desenvolvida para pousar neste ambiente e obter informações geológicas e atmosféricas durante o procedimento de descida. Encélado surpreendeu os pesquisadores devido ao fato de apresentar bastante atividade geológica e interagir fortemente com os anéis de Saturno bem como com a magnetosfera deste planeta, além de possivelmente possuir um imenso oceano de água líquida debaixo de sua superfície gelada.

Diante deste cenário, este trabalho de conclusão de curso foi dividido em quatro capítulos. O capítulo um abordará as informações obtidas antes da missão Cassini-Huygens sobre Saturno e suas luas gélidas Titã e Encélado desde observações realizadas em solo utilizando telescópios até observações espaciais a partir de satélites astrofísicos destes corpos celestes. O capítulo dois apresentará detalhes sobre a missão Cassini tais como principais objetivos iniciais e apresentará uma breve linha do tempo com momentos que marcaram a missão. Em seguida, o encerramento da missão chamado de *Grand Finale* é mostrado em linhas gerais. O capítulo três aborda detalhes técnicos sobre o orbitador Cassini e a sonda Huygens e apresenta os instrumentos científicos que eles carregaram para obter informações apuradas sobre as magnetosferas, composição das atmosferas, imagens dentre outros. Por fim, o capítulo quatro apresentará as conquistas obtidas pela missão sobre Saturno, Titã e Encélado. Será mostrado que apesar dessas luas serem geladas, existe bastante atividade que se esconde de nós devido à enorme distância que separa este sistema do nosso planeta Terra.

Capítulo 1 – Saturno e suas Luas Geladas: Antes de Cassini

O objetivo deste capítulo é estabelecer um ponto de partida para o leitor que não esteja familiarizado com a história de exploração do sistema de Saturno antes de Cassini para que se compreenda a importância e o alcance de suas conquistas. As conquistas científicas que precederam a missão Cassini-Huygens foram obtidas após anos de investigações coletadas por várias fontes, como observações realizadas aqui na Terra e que posteriormente foram aprimoradas após décadas de dados obtidos por satélites astrofísicos em torno da Terra como o Explorador Ultravioleta Internacional (IUE), o Satélite Espacial Hubble (HST) e Observatório Espacial Infravermelho (ISO). Além disso, o sistema de Saturno foi visitado por dois anos, durante a chamada “Era Dourada”, pelas espaçonaves de exploração Pioneer e Voyagers 1 e 2 [Orton 2009, Meltzer, 2015].

Por sistema de Saturno entende-se que se trata do próprio planeta, seus anéis e suas luas. Os dados obtidos por esses instrumentos possibilitaram o início de estudos sobre o ambiente eletromagnético de Saturno, seu sistema de anéis e sobre a história e morfologia de seus satélites.

O volume de dados coletados por essas fontes possibilitou os cientistas melhorar o entendimento sobre a formação e evolução do sistema de Saturno, incluindo seus anéis e satélites [Dougherty, 2009],

Deste modo, neste capítulo serão descritas algumas das principais descobertas sobre Saturno e suas luas geladas antes da missão Cassini-Huygens obtidos pelos dados reunidos a partir de observações terrestres e de sondas espaciais e que motivaram a idealização de uma missão exploratória do sistema saturnino.

1.1 – Saturno

Saturno é um planeta gasoso cuja atmosfera é composta mais de 99,9% de hidrogênio (H_2), hélio (He) e metano (CH_4) [Orton 2009, Chown 2014]. Suas abundâncias relativas têm implicações diretas em modelos de formação, evolução e interior de Saturno e, portanto, constitui uma área de bastante interesse visto que um conhecimento profundo sobre esses tópicos pode fornecer pistas valiosas para a compreensão da formação do Sistema Solar. Nesta

sessão, será apresentada uma breve revisão cronológica da detecção dos elementos que compõem a atmosfera de Saturno.

As primeiras inferências sobre a composição deste planeta Joviano, remontam a Vestso Slipher [1905] que encontrou linhas de absorção nos espectros fotográficos de vários planetas, incluindo Saturno. Algumas décadas mais tarde, essas linhas de absorção foram identificadas como pertencentes às moléculas de metano e amônia (NH_3) [Wildt 1932]. Curiosamente, hidrogênio e hélio moleculares, que são os elementos mais abundantes deste planeta, só foram detectados posteriormente às detecções de metano e amônia. As linhas de absorção do H_2 molecular só foram detectadas diretamente em 1962 [Spinrad 1962] e o hélio molecular somente foi observado na faixa do infravermelho distante pelo experimento IRIS da espaçonave Voyager-1 em 1980 [Hanel *et al.* 1980]. Vale ressaltar que o experimento IRIS possibilitou a detecção de produtos fotoquímicos do metano tais como o etano (C_2H_6) e acetileno (C_2H_2) e também permitiu realizar uma distribuição espacial da variedade de moléculas detectadas.

Com o advento dos radiotelescópios e dos interferômetros na década de 70, foi possível realizar medidas da distribuição vertical e longitudinal de amônia e de outros compostos e dados obtidos pelo Observatório Espacial Infravermelho (ISO) e mais tarde pelo Explorador Ultravioleta Internacional (IUE) e pelo Satélite Espacial Hubble (HST) se detectou água (H_2O) na atmosfera profunda.

A circulação do ar na atmosfera da Terra é diferenciada mas acompanha os círculos correspondentes às latitudes que definem as zonas polares subtropicais e tropicais. Aspectos de maior complexidade aparecem quando as forças de Coriolis (resultantes da rotação do planeta) e as frentes de massas de ar frias difundem das zonas polares para as zonas subtropicais e tropicais no equador, causando tempestades e furacões. Entretanto, em Saturno, cuja velocidade de rotação é maior que a da Terra (com período de rotação em torno de 10h42min), aparecem fenômenos meteorológicos mais complexos como é o caso da tempestade em forma hexagonal existente em suas regiões polares. Em 1981, a espaçonave Voyager 2 durante seu sobrevoo por Saturno foi capaz de detectar uma estrutura de nuvens em forma de hexágono [Godfrey 1988] no polo deste planeta a aproximadamente 76°N de latitude planetocêntrica, Figura 1.1. Medidas do vento revelaram que o hexágono coincide com um intenso jato com velocidade de aproximadamente 100 m/s. Algumas décadas mais tarde o hexágono pôde ser observado por detecção em solo terrestre e pelo satélite espacial Hubble [Caldwell *et al* 1993, Sánchez-Lavega *et al* 1993].

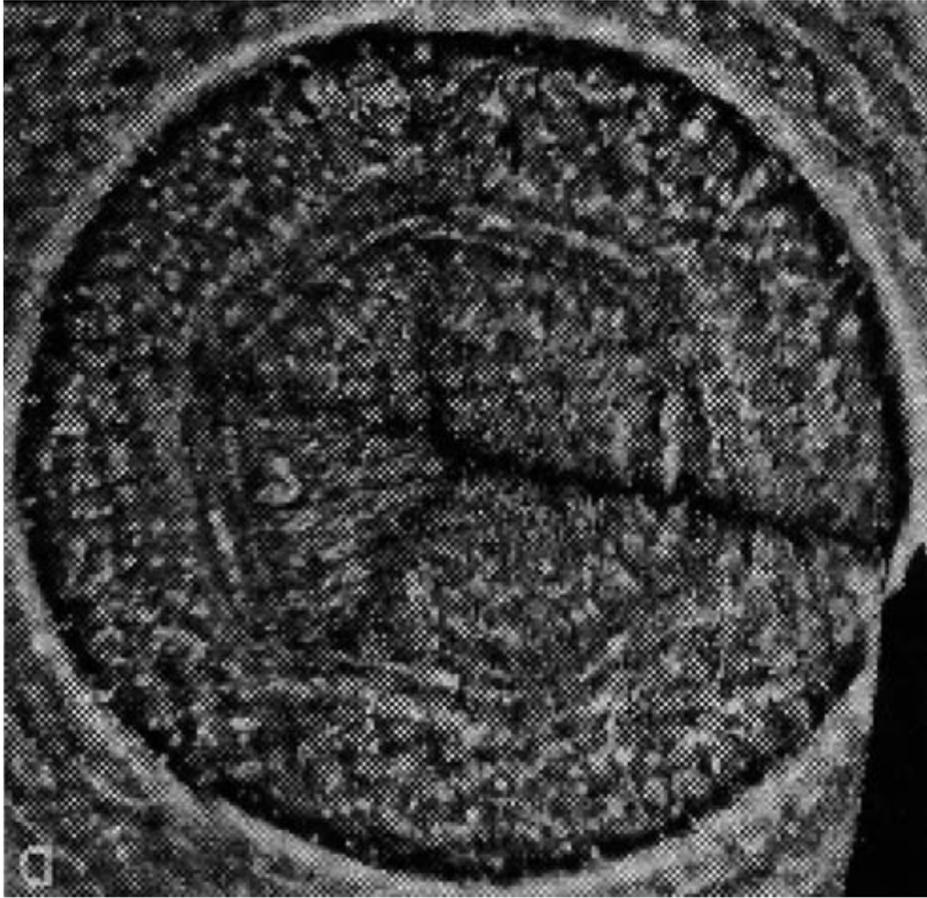


Figura 1.1 – Estrutura hexagonal no polo norte de Saturno. Imagem obtida pela sonda Voyager 2. Figura de [Godfrey 1988].

Auroras polares não são um fenômeno exclusivo que ocorre na Terra, mas também acontece em alguns planetas como, por exemplo, Júpiter e Saturno. Até o encontro da Cassini com Saturno em 2004, algumas imagens foram obtidas no ultravioleta (Figura 1.2) pelo satélite Hubble e algumas observações espectrais no infravermelho já tinham sido realizadas. Além disso, observações de auroras polares em Saturno já haviam sido obtidas pelas espaçonaves Pioneer 11 e Voyager 1 e 2 [Kurth *et al.* 2009]. Os espectros adquiridos pelo espectrômetro VoyagerUV (UVS) mostrou que as auroras ocorriam em ambos os polos perto de 80° e sem emissão aparente na calota polar [Sandel e Broadfoot 1981].

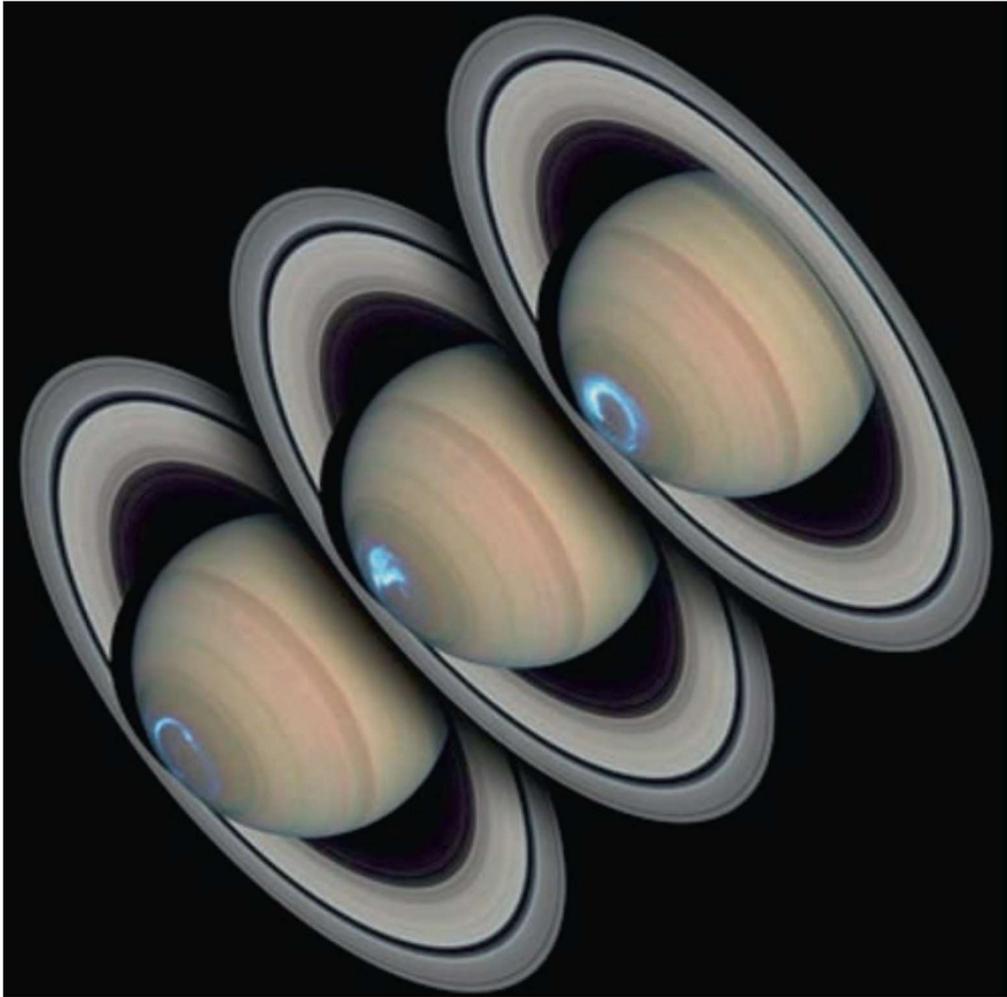


Figura 1.2 – Imagens da emissão no ultravioleta da aurora polar de Saturno obtida pelo satélite Hubble. Fonte: NASA/Hubble108480

A magnetosfera de Saturno, Figura 1.3, é a região do espaço em torno do planeta no qual partículas carregadas são mais influenciadas pelo campo magnético de Saturno do que pelo campo magnético interplanetário. Quando a sonda Pioneer 11 passou pelo planeta em setembro de 1979, seus instrumentos foram capazes de medir um campo magnético muito intenso, aproximadamente 500 vezes superior ao campo magnético terrestre e que estava praticamente alinhando com o eixo de rotação de Saturno. Esse fato é bastante curioso, uma vez que os campos magnéticos da Terra e de Júpiter estão levemente inclinados em relação aos seus respectivos eixos de rotação [Spilker, 1997].

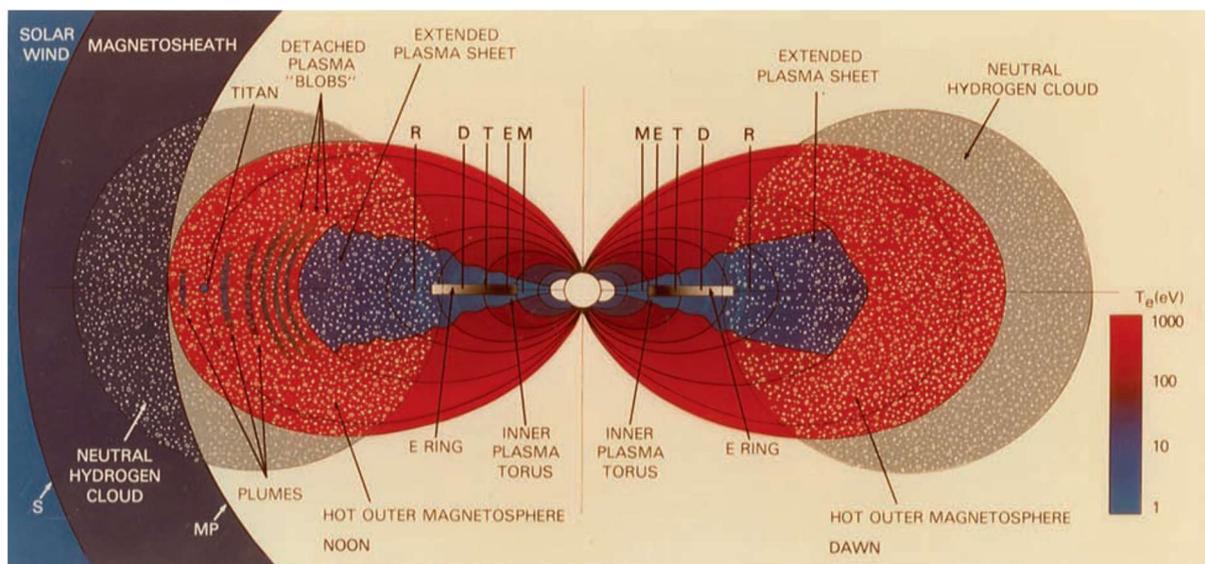


Figura 1.3– Ilustração artística da Magnetosfera de Saturno após as missões Voyager. Fonte Sitter *et al.* 1983.

Ao sobrevoar próximo ao planeta anelado, a sonda Voyager detectou emissões de ondas de rádio na faixa dos comprimentos de onda quilométricos e cuja frequência estava na faixa compreendida entre 100 e 400 kHz. Essas emissões ficaram conhecidas como radiação quilométrica de Saturno (SKR). A SKR, assim como as auroras, é influenciada pelo vento solar e, análises preliminares durante períodos de 161 e 164 dias mostraram que as emissões ocorriam em períodos de 25 dias coincidindo com o período de rotação solar [Desch 1982]. Como será visto na seção 4.1, a correlação entre as emissões SKR, as auroras, a magnetosfera saturnina e o vento solar foi objeto de intensa investigação da missão Cassini.

Até a chegada da Cassini ao sistema de Saturno, acreditava-se que sua magnetosfera se estendia até 20 R_S . Na seção 4.1, será mostrado que esta estimativa estava errada o que impacta diretamente no comportamento de sua maior Lua, Titã, que em seu trânsito orbital fica temporariamente desprotegido pela magnetosfera do planeta e, então, veremos quais são os resultados desta interação que é apenas uma das várias que ocorrem no acoplamento da magnetosfera com os anéis e seus satélites.

1.2 – Titã: A Maior Lua de Saturno

Titã é a maior lua de Saturno e quando comparamos o seu tamanho ao tamanho dos planetas telúricos, é fácil notar que as dimensões desta lua se equiparam ao tamanho de

Mercúrio o que nos leva a concluir que se este satélite não estivesse orbitando Saturno, certamente ele seria considerado um planeta [Meltzer, 2015]. Além disso, esta é a única lua do Sistema Solar com uma atmosfera espessa, o que é muito incomum para uma lua apresentar uma atmosfera devido ao seu tamanho e sua baixa gravidade [Coustenis *et al.* 2009, Lopes, 2021]. Além disso, se Titã tivesse tido um passado um pouco mais quente, provavelmente este satélite seria semelhante ao planeta Terra.

Para direcionarmos a atenção para essa lua de Saturno, os cientistas se basearam em anos de investigações a partir de instrumentos em Terra e telescópios espaciais. As descobertas que decorreram nos levaram ao entendimento de que Titã é um objeto do tipo planeta o que desperta bastante a curiosidade sobre os componentes de sua atmosfera, sua geologia, sua origem e evolução.

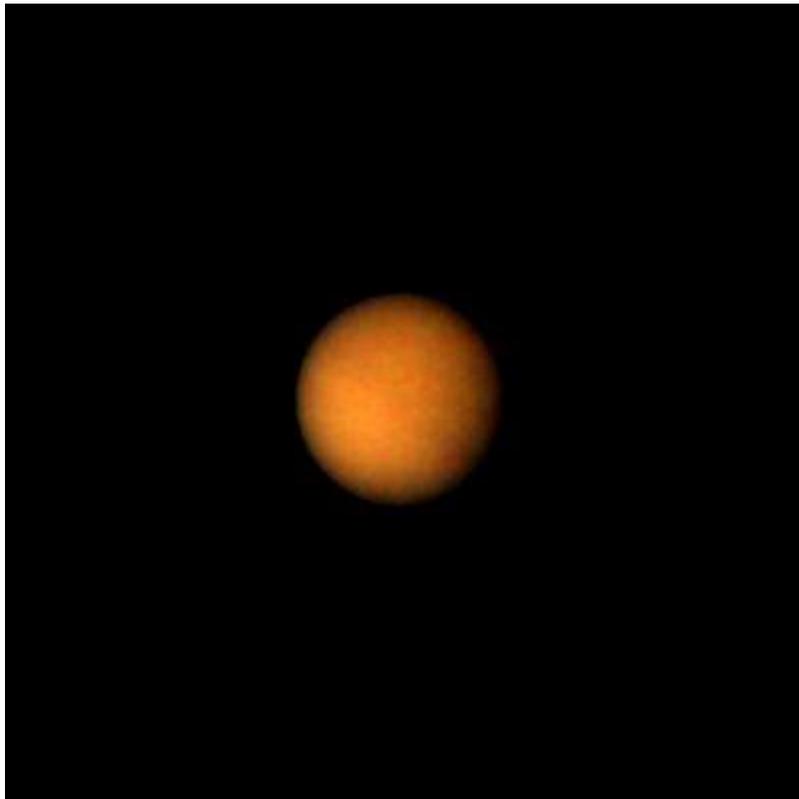


Figura 1.4– Imagem de Titã obtida pela sonda Voyager 1 no início dos anos 80. Fonte: NASA/JPL PIA00733

Quando as sondas Voyagers sobrevoaram o sistema de Saturno no início dos anos 80, os dados obtidos já revelavam que esta lua possui uma atmosfera muito espessa que esconde sua superfície (Figura 1.4). A cor alaranjada desta lua é devido ao fato de que sua superfície é

composta principalmente por hidrocarbonetos produzidos por fotoquímica [Coustenis *et al.* 2009]. Dos corpos do Sistema Solar, Titã é o astro celeste que possui a segunda atmosfera mais densa, ficando atrás apenas de Vênus. Outras características de Titã que foram obtidas nos sobrevoados das *Voyagers* são pressão na superfície de 1,5 bars, ventos na superfície e temperatura da superfície em torno de 95 K. A essa temperatura a água não pode existir em sua forma líquida podendo apenas ser encontrado em forma de gelo. Entretanto, o metano (CH₄) que na terra é um gás, em Titã ele pode ser encontrado nos três estados da matéria sendo inclusive possível dele ser encontrado em seu ponto tríplice.

Antes da missão Cassini, já se sabia que a atmosfera densa de Titã seria um empecilho para investigação de sua superfície por diversos instrumentos que operassem na faixa do visível ou do infravermelho. Entretanto, ondas de rádio podem penetrar atmosferas espessas e revelar o que se esconde por debaixo de suas nuvens. Assim, instrumentos que operem utilizando ondas de rádio seriam essenciais. Esse foi um dos motivos que Cassini foi equipado com o equipamento de mapeamento RADAR como será discutido na seção 3.1.

1.3 – Lua Exterior Gelada: Encélado

Encélado foi descoberta por William Herschel em 1789 e não recebeu um nome até mais de meio século depois [Dougherty, 2018] e, apesar de não ser uma das maiores luas de Saturno, desempenha um papel importante no acoplamento espacial com o planeta e seus anéis.



Figura 1.5– Concepção artística de algumas das luas de Saturno. Todos os corpos estão em escala, com exceção de Pan, Atlas, Telesto, Calypso e Helene que tiveram seus tamanhos exagerados por um fator de 5 para aparecer nesta imagem. Fonte: NASA/JPL

Encélado vem sendo observada desde o final do século XVIII. O resultado de tais observações culminou na descoberta em 2005 de vapores de água, poeira e material orgânico em forma de pluma que emana de rachaduras localizadas em sua superfície no polo sul deste satélite. Ela é a sexta maior lua de Saturno, apresentando um diâmetro típico de cerca de 500 km [Roatsch, 2009, Matson *et al.* 2009] sendo descoberta em 1789 por William Herschel [Herschel, 1790]. Sua descoberta foi difícil pelo fato de que tanto Saturno quanto seus anéis refletiam bastante luminosidade o que tornava a detecção de luas pequenas uma tarefa bastante árdua, principalmente utilizando pequenos telescópios. Um fato curioso é que após sua descoberta, Encélado somente foi nomeado pelo filho de William Herschel, John Herschel, 60 anos após ser descoberto. Este nome faz referência a um gigante da mitologia grega, já que Saturno é o líder dos titãs e na mitologia é conhecido como Cronos [Dougherty, 2018].

Nas observações terrestres obtidas desta lua nos anos que se seguiram mostrou que seu brilho aumentava de 0,3 magnitudes [Slipher, 1914, Franz e Millis 1975]. Esta era uma dica de atividade em torno desta lua que precisaria ser investigada.

Observações de Saturno no começo do século XX mostraram que a presença de um anel externo enfraquecido. Era o início da descoberta do anel E. Já em 1980, observações do anel E de Saturno usando a *wide field/planetary camera* do satélite espacial Hubble revelaram que este Anel externo tinha um máximo próximo à órbita de Encélado e uma cauda que se estende por até 8 raios de Saturno (R_s) e que esta região de máximo era relativamente difusa sugerindo que este anel pudesse estar associado a Encélado e provavelmente que havia ejeção de material por esta lua [Baum 1981, 1984].

Em 1993, pesquisadores [Shemanski, 1993] descobriram emissão da banda neutra da hidroxila nas vizinhanças do anel E, presumidamente derivada da água. Tal descoberta levou os cientistas a especular uma fonte de gás molecular e poeira. Além disso, a variação da densidade de OH em relação à distância a Saturno requer um pico na fonte de H₂O próximo à órbita de Encélado [Richardson 1998, Jurac 2001].

O primeiro indicativo de possível atividade em Encélado foi obtido pelas observações das sondas Voyager 1 e 2. Medidas de fotometria mostraram que o aumento em torno de 15% do albedo da superfície já brilhante de Encélado (Figura 1.6) era devido à atividade crio vulcânica [Buratti, 1988]. A superfície suave e refletiva de Encélado é dominada por gelo de água que de certa forma é depositado renovando-a [Vesbicer, 2007].

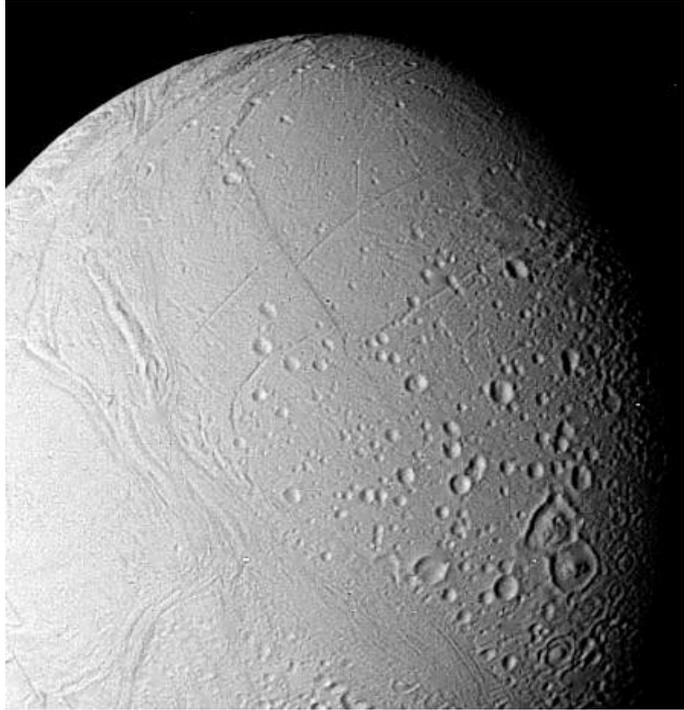


Figura 1.6– Imagem da superfície de Encélado obtida pela sonda espacial Voyager 2 a 112.000 km do Satélite. Nesta figura o polo norte está direcionado para baixo. Moderadas áreas de crateras sugerem que sua superfície seja jovem e constantemente renovada por algum processo que ocorre nesta lua. Fonte NASA/JPL PIA01950.

Ao longo dos anos seguintes, pouco se descobriu e se entendeu sobre esta lua até a chegada da era das sondas Voyagers 1 e 2 no início dos anos 80 [Dougherty, 2018]. Apenas no ano de 1981, a sonda Voyager 2 em seu sobrevoo obteve detalhes sobre sua superfície revelando relativamente poucas crateras e algumas áreas suaves assim como uma extensa rachadura linear. A superfície suave e refletiva de Encélado é dominada por gelo de água que de certa forma é depositado renovando-a [Vesbicer, 2007].

No capítulo a seguir serão apresentados os principais objetivos da missão Cassini e o que motivou os pesquisadores a investir neste projeto ambicioso.

Capítulo 2 – A Missão Cassini

A missão Cassini-Huygens é o resultado dos mais ávidos esforços já realizados em quesito exploração planetária. A agência espacial americana NASA em conjunto com a agência espacial europeia ESA e a agência espacial italiana ASI construíram uma espaçonave robótica sofisticada equipada com diversos instrumentos para ser enviada à órbita de Saturno e estudar este planeta, seu complexo sistema de anéis e suas luas com detalhes até então inconcebíveis. A espaçonave Cassini carregou uma sonda chamada Huygens que foi projetada e construída pela agência espacial europeia. Esta sonda tinha o objetivo de ser enviada para a superfície de Titã, a maior lua de Saturno, para conseguir coletar maiores informações sobre esta lua gelada.

Neste capítulo, serão apresentados os principais objetivos desta missão em face dos conhecimentos pré-adquiridos e apresentados no capítulo anterior. Em seguida, com fins de ilustração, será apresentada uma linha do tempo da trajetória percorrida pela espaçonave Cassini até a sua chegada ao planeta Saturno. Finalmente, será apresentado o desfecho que a nave teve após 294 órbitas completas no sistema saturnino.

2.1 – Principais Objetivos Científicos da Missão Cassini

A espaçonave Cassini tinha como principal objetivo investigar Saturno, seus anéis, sua lua Titã, as luas geladas e a magnetosfera de Saturno. Mais especificamente, a equipe de pesquisadores tinha o intuito de estudar as propriedades das nuvens de Saturno, sua composição atmosférica, seus ventos, temperatura, estrutura interna, rotação, sua ionosfera, a origem e evolução do planeta anelado [Matson *et al.* 2002].

Sobre os anéis de Saturno o que se desejou foi observar sua estrutura, composição, processos dinâmicos, relação entre os satélites e os anéis, poeira e ambiente de micrometeoróide.

Em relação a suas luas, o foco estava voltado para Titã, já que a sonda Huygens foi projetada com este intuito. Desta forma, o objetivo era estudar a abundância dos constituintes atmosféricos, distribuição de traços de gases e aerossóis, ventos, temperatura da lua, composição, estado da superfície e sua atmosfera externa. Já sobre as luas geladas o que os pesquisadores desejavam era determinar suas características e histórias geológicas, os

mecanismos de modificação de superfície, composição da superfície, estrutura interna e suas interações com a magnetosfera de Saturno.

Finalmente, sobre a magnetosfera saturnina, os pesquisadores tinham como objetivo estudar a sua estrutura, suas correntes elétricas, composição, fontes, sumidouros de partículas dentro dele, dinâmica, interação com o vento solar, satélites, anéis e a interação de Titã com o vento solar e com a magnetosfera de Saturno.

2.2 – Linha do Tempo

Em outubro de 1997, o foguete *Titan IVB-Centaur* decolou de Cabo Canaveral, na Flórida – EUA, carregando o orbitador Cassini e a sonda espacial Huygens em direção a Saturno em uma jornada que duraria sete anos até alcançar a órbita deste planeta. No ano seguinte, a espaçonave realizou seu primeiro sobrevoo por Vênus para se beneficiar do efeito de estilingue gravitacional para ser impulsionada para órbita de Saturno. Desta maneira, Cassini realizou dois sobrevoos por Vênus, o segundo em junho de 1999 e também seria impulsionada ao realizar um sobrevoo entre a Terra e a Lua [Matson *et al.* 2002].

No ano de 2000, a espaçonave atravessou o cinturão de asteroides e se tornou a sétima espaçonave terrestre a realizar o feito² Antes disso, as espaçonaves Pioneer 10 e 11, Voyagers 1 e 2, Ulysses e Galileu já haviam alcançado tal façanha. Embora esta região contenha uma alta concentração de asteroides, várias espaçonaves conseguiram atravessá-la sem grandes percalços. Mais tarde no mesmo ano, Cassini se juntaria a sonda Galileu por estarem ao mesmo tempo em órbita de Júpiter.

Em julho de 2004, a espaçonave Cassini, carregando a sonda Huygens se torna a primeira nave a orbitar Saturno. Em dezembro deste ano, a sonda Huygens controlada pela agência espacial europeia se desacopla da espaçonave Cassini e começa uma jornada solitária de três semanas rumo a Titã. Em janeiro de 2005, após uma descida que durou duas horas e 27 minutos, a sonda Huygens se tornou a primeira espaçonave a pousar no Sistema Solar externo

² <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/the-journey/timeline/#through-the-asteroid-belt> . Acessado em 14/07/2021

e entrou para o livro dos records como sendo a espaçonave que pousou a maior distância da Terra³.

Após quatro anos em órbita de Saturno, Cassini completa sua missão primária e os pesquisadores da NASA decidem por estender a missão Cassini até o ano de 2017 devido a quantidade de informações obtidas durante sua jornada e aproveitar ao máximo o combustível que ainda lhe restava e que lhe permitiria realizar diversos sobrevoos por Saturno e suas luas. Além disso, como o período orbital de Saturno é aproximadamente de 30 anos, esta extensão da missão Cassini permitiu observar mudanças sazonais no sistema de Saturno.

A Figura 2.1 mostra um diagrama da trajetória da espaçonave desde seu lançamento até o momento em que ela entra na órbita de Saturno.

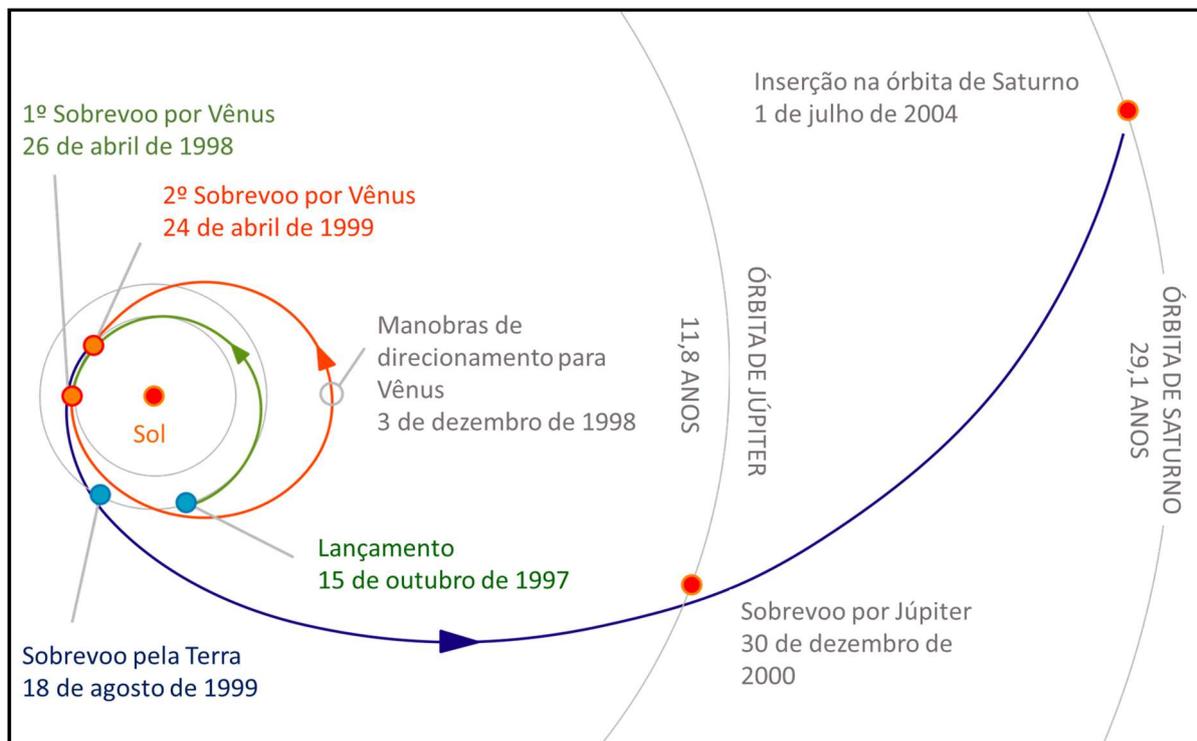


Figura 2.1 – Esquema da trajetória efetuada pela nave Cassini desde seu lançamento em 1997 até sua inserção na órbita de Saturno em 2004. A figura ainda mostra os dois sobrevoos (primeiro sobrevoo em verde e segundo em laranja) por Vênus para obter impulso gravitacional seguidos pelos sobrevoos pela Terra e Júpiter (trajetória em azul). As curvas em cinza mostram as órbitas de Júpiter (11,8 anos) e de Saturno (29,1 anos) em torno do Sol. A figura não está em escala. Fonte: Adaptada de NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech.

³ <https://www.guinnessworldrecords.com.br/world-records/81137-most-remote-planetary-landing>. Acessado em 14/07/2021.

A missão passou por duas extensões, uma durante o equinócio e outra no solstício já que havia combustível suficiente para propulsionar a nave durante suas expedições e sobrevoos pelos anéis e satélites de Saturno (Figura 2.2). Durante o equinócio, os cientistas puderam observar as características do sistema saturnino quando ambos hemisférios sul e norte fossem iluminados de maneira igualitária quando os anéis estivessem alinhados com o plano da órbita do planeta em torno do Sol.

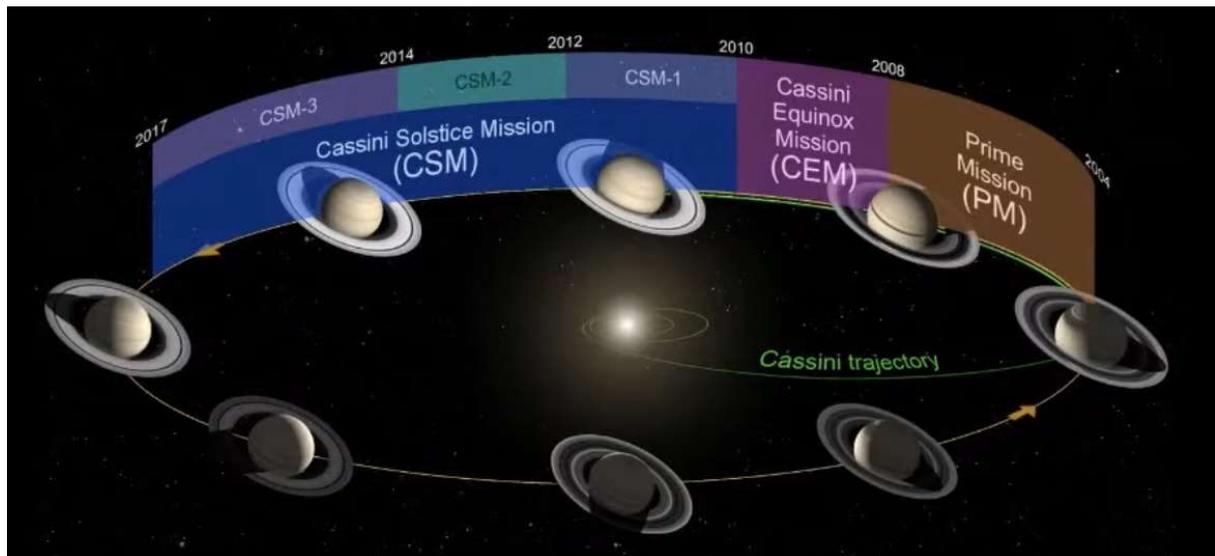


Figura 2.2 – Extensões da missão Cassini durante o equinócio e durante o solstício. Fonte: NASA/JPL – Caltech.

A espaçonave Cassini carregou uma sonda chamada Huygens para o sistema Saturno. A sonda, que foi construída pela ESA, realizou uma entrada inédita na atmosfera de uma de suas luas, utilizando um conjunto de paraquedas para diminuir a velocidade de descida e, assim, realizar uma aterrissagem suave na superfície da maior lua de Saturno, Titã, em janeiro de 2005. Este foi o pouso mais distante no Sistema Solar realizado por uma sonda robótica. A Huygens retornou imagens espetaculares e outros resultados científicos durante uma descida de duas horas e meia através da nebulosa atmosfera de Titã, antes de descansar em meio a pedras arredondadas de gelo em uma planície que fora anteriormente banhada com hidrocarbonetos em estado líquido.

O fim da missão Cassini-Huygens foi emblemático e um tanto quanto inevitavelmente trágico. A nave foi ajustada para penetrar a espessa atmosfera de Saturno. Tal evento foi apelidado pela equipe de responsáveis pela missão de *Grand Finale*. A Figura 2.3 mostra uma concepção artística da inserção da nave na atmosfera de Saturno.



Figura 2.3 – Concepção artística da nave Cassini efetuando manobras para o chamado Grand Finale para ser lançada em direção à atmosfera superior de Saturno em 2017. Fonte: NASA/JPL – Caltech.

2.3 – Grand Finale

A nave Cassini terminou sua jornada após duas décadas no espaço explorando Saturno, seus anéis e suas luas geladas. Sem mais combustível para propulsionar sua notável missão, os operadores da NASA decidiram atirar a nave em direção a Saturno para que suas luas fossem preservadas e permanecessem intocadas para explorações futuras, em particular a lua oceânica Encélado que é recoberta de gelo e Titã que possui uma química pré-biótica notavelmente intrigante aos olhos dos pesquisadores. A Figura 2.4 mostra uma ilustração da rota de colisão com Saturno. Perdeu-se o contato com Cassini instantes após sua entrada na atmosfera do planeta gasoso.

Por que sepultar a espaçonave Cassini em Saturno? A resposta dessa pergunta reside no fato de que a nave não passou por processos de esterilização como aconteceu com a sonda Huygens que pousou em Titã. Deste modo, ainda seria possível que Cassini tivesse transportado microorganismos da Terra para o sistema de Saturno. Os cientistas não podiam arriscar em deixar a nave viajando pelo sistema uma vez que a NASA tivesse perdido total controle sobre sua órbita. Assim, para não correr o risco que micróbios que tivessem embarcado de carona a bordo da Cassini contaminassem alguma lua de Saturno, como por exemplo Titã e Encélado, os cientistas não tinham outra alternativa a não ser lança-la em direção a densa superfície do planeta anelado e destruir a espaçonave.

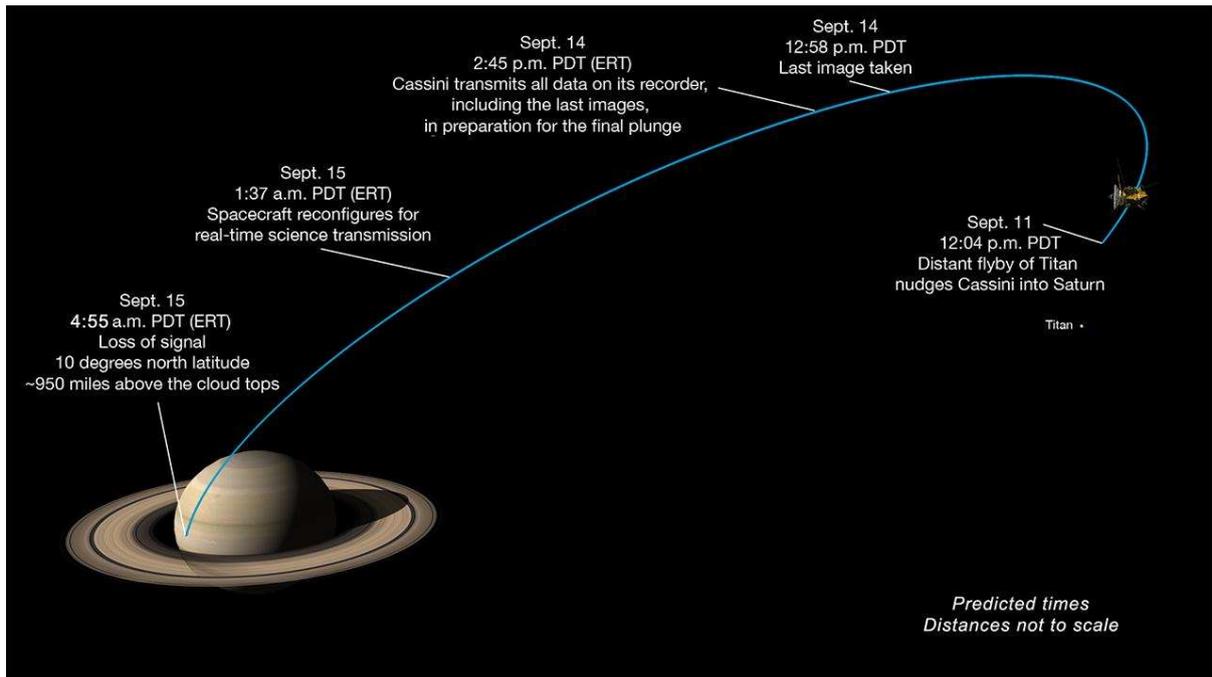


Figura 2.4 - Trajetória prevista do *Grand Finale*. Os tempos foram estimados e as distâncias não estão em escala. No dia 15 de setembro de 2017, a nave realizou sua última aproximação do planeta Joviano se desintegrando em sua atmosfera quando a equipe de controle perdeu o contato. Fonte: NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech.

Em 2010, com o objetivo de esgotar o combustível propelente da nave Cassini, os pesquisadores da NASA optaram por uma extensão da missão que durou mais sete anos. Esta extensão proporcionou diversos sobrevoos lunares enquanto se observava mudanças sazonais em Saturno e Titã. Desta forma, ao fim deste período de extensão da missão Cassini, a nave foi colocada em rota de impacto com Saturno, que perdurou por cinco meses efetuando uma série de 22 manobras entre o planeta e seus anéis.

Esta fase final da missão foi chamada de *Grand Finale* e proporcionou imagens impressionantes de Saturno e de seus anéis, mais perto que qualquer outro instrumento criado pela humanidade tenha chegado. A Figura 2.5 mostra uma imagem do hemisfério norte de Saturno obtida pela *wide-angle camera* da Cassini em 13 de setembro de 2017. Esta imagem compõe um conjunto de últimas imagens enviadas pela nave para Terra antes de colidir com o planeta Joviano.

No dia 15 de setembro de 2017, durante sua última aproximação de Saturno, Cassini mergulhou em direção à atmosfera turbulenta deste planeta gasoso enviando todos os dados científicos coletados pelos instrumentos a bordo enquanto seus propulsores esgotavam as

últimas gotas de combustível para manter a antena da nave apontada para Terra. Logo em seguida, Cassini se desintegra e queima como um meteoro e desta forma chega ao fim uma missão que se perdurou por vinte anos. Entretanto, apesar de a espaçonave ter desaparecido, a quantidade de informações e dados obtidos durante seus diversos sobrevoos desta nave estão sendo analisados até o momento e ainda rendem novas descobertas.

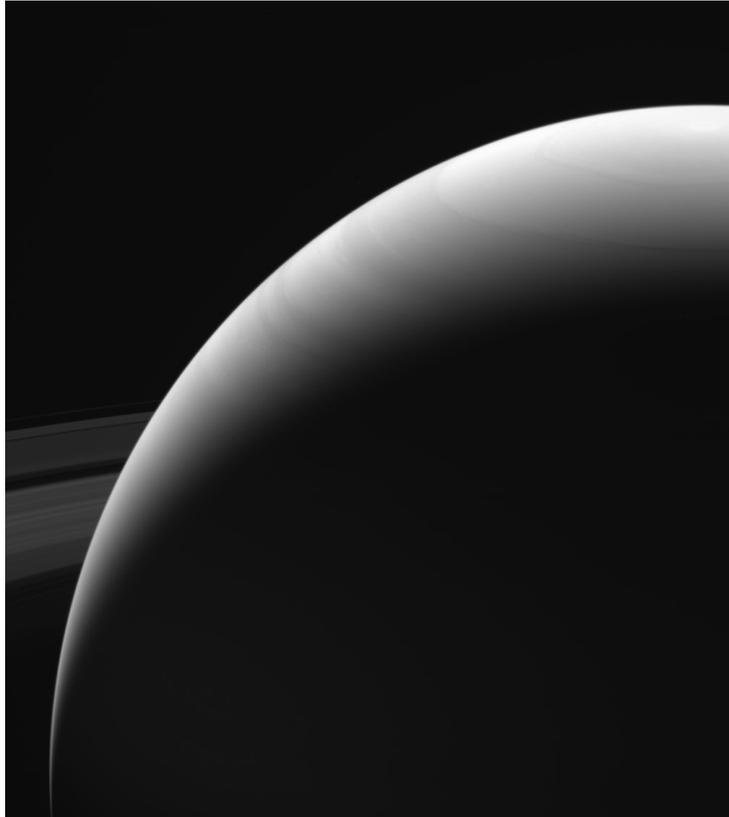


Figura 2.5 - Imagem em vermelho visível do hemisfério norte de Saturno obtida pela *wide-angle camera* a bordo da nave Cassini em 13 de setembro de 2017 a uma distância de 1,1 milhão de quilômetros do planeta. Fonte: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute. Mapa Cassini: PIA21892

Até seus últimos dias a missão de exploração de Cassini foi emocionante. Sua turnê foi estendida duas vezes após sua missão principal de quatro anos devido à quantidade de informações coletadas e ao anseio por novas descobertas a partir dos dados coletados. Dentre as diversas descobertas podemos citar o oceano global com atividade hidrotérmica em Encélado e os mares de metano líquido em Titã.

Capítulo 3 – A Sonda Cassini-Huygens

Após o sucesso alcançado pelas espaçonaves Voyagers, Cassini-Huygens foi uma das missões mais arrojadas já lançadas ao espaço devido à quantidade de equipamentos e experimentos que esta nave levou a bordo sem contar com a difícil missão de realizar os diversos sobrevoados ao planeta anelado e suas luas. Equipada com uma variedade de instrumentos e câmeras com as melhores resoluções até então disponíveis, a espaçonave obteve imagens riquíssimas sob diversas condições. Daí o caráter inédito desta missão! Vale notar que impacto semelhante ao obtido pela missão Cassini-Huygens pode ser alcançado pela espaçonave Juno que foi lançada em 2011 do Cabo Canaveral em direção ao sistema jupiteriano e está atualmente orbitando.

A espaçonave, Figura 3.1, era composta pelo orbitador Cassini equipado com 12 instrumentos e a sonda europeia Huygens com seis instrumentos totalizando 27 experimentos científicos que basicamente revolucionaram a compreensão do sistema saturnino. A comunicação entre a espaçonave e o centro comando e operações localizado no Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) da Caltech se deu por intermédio de uma antena de alto ganho e duas antenas de baixo ganho. A fonte de energia que alimentou toda a espaçonave (desde os instrumentos de medida, computadores, transmissores de rádio até os propulsores) era obtida a partir de três geradores termoelétricos de radioisótopos.

Dependendo de como os instrumentos científicos operam, eles podem ser classificados como dispositivos de sensoriamento remoto ou dispositivos de detecção direta. Seguindo essa linha de raciocínio, podemos comparar a maneira como esses dispositivos operam com os cinco sentidos humanos. Por exemplo, os olhos e ouvidos humanos funcionam como sensoriamento remoto, pois obtêm informações de objetos distantes sem estar em contato direto com eles. Já os sentidos de tato e paladar são dispositivos de detecção direta. Por outro lado, o seu nariz pode detectar o cheiro de objetos que estejam distantes. Entretanto, as moléculas que transportam o “perfume” devem viajar até o seu nariz e fazer contato direto.

Os dispositivos que viajaram a bordo da Cassini são classificados em sensoriamento remoto no visível, infravermelho, ultravioleta, radar de abertura sintética, sensores de campos magnéticos e instrumentos sensores de plasmas e de partículas ionizadas e neutras. Graças a esses equipamentos, a Cassini pôde obter informações em comprimentos de onda além daqueles sensibilizados pelo olho humano e pôde perceber campos magnéticos e partículas de

poeira minúsculas que passariam despercebidas a sensibilidade humanas. Nesse sentido, os instrumentos possibilitaram que a Cassini pudesse “ver” e “sentir” além dos limites impostos à capacidade humana e, assim, obter informações completas e detalhadas do sistema saturnino.



Figura 3.1 – Foto da espaçonave Cassini-Huygens durante a fase de teste térmico e de vibração. Na parte debaixo da figura, nota-se o tamanho da nave em comparação com as pessoas. Fonte: NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech.

Os instrumentos de sensoriamento remoto da espaçonave Cassini incluíam câmeras, espectrômetros, radar, rádio e instrumentos de detecção óptica e de micro-ondas. Já os instrumentos de campo e de partículas estavam voltados para coleta de dados *in situ*, tais como composição de partículas de poeira, massa, intensidade do plasma interplanetário e realizaram medidas de campos magnéticos, de cargas elétricas e densidade de partículas atômicas.

Ao longo das próximas seções serão apresentados os experimentos e equipamentos que embarcaram no orbitador Cassini e na sonda Huygens da ESA em direção ao sistema de Saturno.

3.1 – A Espaçonave Cassini

Nesta seção, serão apresentados os equipamentos científicos que estavam a bordo da espaçonave Cassini divididos nas categorias de sensoriamento óptico, sensoriamento remoto no rádio e instrumentos de campo e de partículas explicando como funcionam e como que foram utilizados.

3.1.1 – Sensoriamento Remoto no Óptico

Os instrumentos de sensoriamento remoto no óptico investigaram o sistema saturnino em algumas faixas do espectro eletromagnético. São eles: Espectrômetro Infravermelho Composto (CIRS), Subsistema de Ciência de Imagem (ISS), Espectrógrafo de Imagem Ultravioleta (UVIS) e Espectrômetro de Mapeamento Visível e Infravermelho (VIMS).

O CIRS, Figura 3.2, foi projetado para capturar a radiação eletromagnética na faixa de comprimentos de onda no infravermelho [Flasar *et al.* 2004]. Ele divide a luz em vários comprimentos de onda e mede a intensidade com a qual os detectores são sensibilizados para, assim, medir a temperatura dos objetos e investigar sua composição. Ao se estudar as temperaturas, bem como a composição do sistema de Saturno, os cientistas são capazes de aprender como as estações do ano saturnino afeta sua atmosfera e seus anéis.

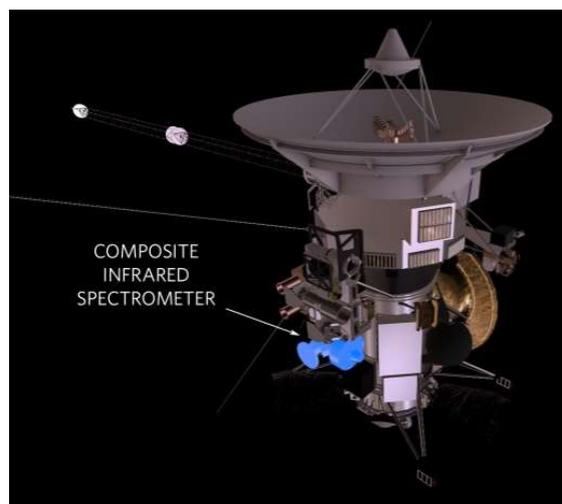


Figura 3.2 – Concepção artística do CIRS instalado na nave Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

Neste sentido, o CIRS funciona como um poderoso termômetro remoto ao determinar a temperatura e a composição química dos objetos, já que as moléculas emitem radiação

eletromagnética em comprimentos de onda específicos, deixando para trás um espectro que funciona como se fossem uma “impressão digital” daquele elemento.

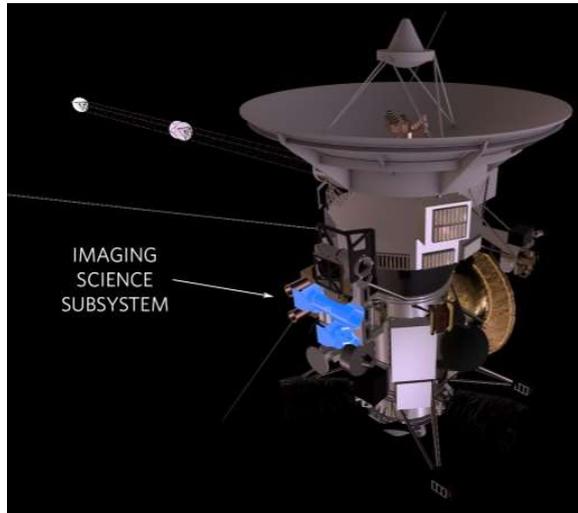


Figura 3.3 – Concepção artística do ISS instalado na nave Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

Uma câmera digital de grande angular e uma de ângulo estreito compunham o Imaging Science Subsystem ISS, Figura 3.3, [Porco *et al.* 2004]. Essas câmeras eram um pouco diferentes das câmeras convencionais, pois detectavam também alguns comprimentos de onda no infravermelho e na faixa do ultravioleta, além do fato de que em 1990 as câmeras tinham menos que 1 megapixel enquanto que atualmente as câmeras digitais têm detectores de vários megapixels. A partir de um sistema de rodas, cada câmera era

equipada com filtros específicos para selecionar os comprimentos de onda a serem apresentados em cada imagem de acordo com o interesse. As câmeras foram incluídas na espaçonave com propósito científico. Entretanto, os cientistas ganharam um bônus ao possibilitar que víssemos as belezas exóticas de Saturno de forma mais limpa e perto como jamais havíamos visto antes.

O UVIS, Figura 3.4, foi um espectrógrafo que trabalhou na faixa de comprimentos de onda do ultravioleta [Esposito *et al.* 2000]. Os gases que compõem a atmosfera e o próprio planeta Saturno emitem radiação eletromagnética nesta faixa. Eles são invisíveis ao olho humano, mas se tornam observáveis no ultravioleta. Assim como o espectrômetro CIRS, o UVIS divide a radiação ultravioleta em vários comprimentos de onda e, assim, pode-se determinar a composição dos gases constituintes do objeto de interesse.

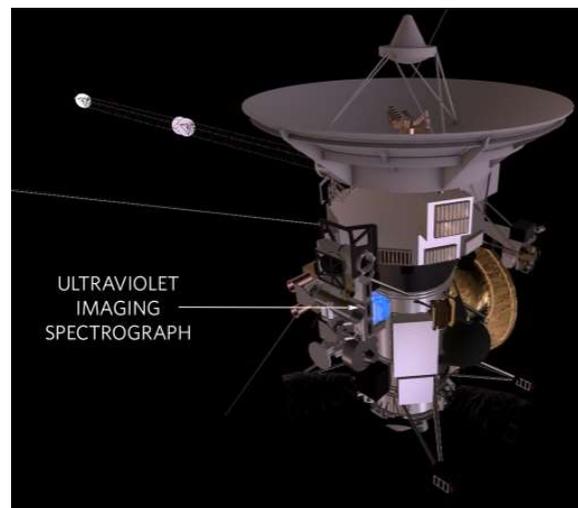


Figura 3.4 – Concepção artística da localização do UVIS na nave Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

Esse instrumento foi utilizado principalmente para investigar a atmosfera de Saturno, seus anéis, além de característica de suas luas. Um detalhe peculiar deste instrumento, é o fato de o

mesmo poder fazer medidas na parte noturna do planeta e investigar como a luz proveniente do Sol se modifica ao atravessar a atmosfera de Saturno, uma vez que a luz que atravessa o gás é modificada.

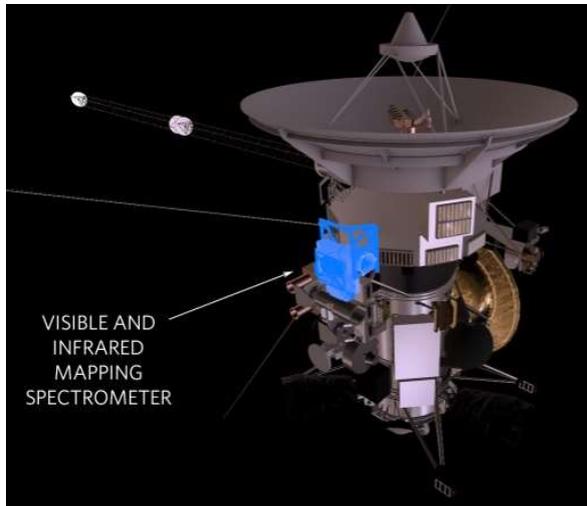


Figura 3,5 – Concepção artística da localização do VIMS na nave Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

Finalmente o VIMS, Figura 3.5, como todo espectrômetro, consiste em separar a radiação eletromagnética em vários comprimentos de onda para determinação da composição dos elementos constituintes de um objeto que se queira investigar. O diferencial do VIMS é a possibilidade de se obter imagens a partir dos dados coletados, semelhante a uma câmera de fotografia. Duas câmeras foram utilizadas no VIMS, uma câmera que operava no visível e outra no infravermelho [Brown *et al.* 2004].

A seguir, serão apresentados os instrumentos de sensoriamento remoto que operavam na faixa dos microondas e que viajaram a bordo da espaçonave Cassini.

3.1.2 – Sensoriamento Remoto no Rádio

Ondas de rádio são invisíveis aos olhos humanos, entretanto, elas podem ser utilizadas para mapear atmosferas, determinar a massa das luas e, devido ao fato delas serem transparentes à atmosfera, elas revelam a superfície oculta das luas de Saturno. O radar de abertura sintética foi utilizado pela primeira vez em missões espaciais nas sondas Magalhães em Venus no ano de 1990 . Os instrumentos que foram utilizados com essas especificidades foram o Radar e o Subsistema de Ciência de Rádio (RSS).

O Radar, Figura 3.6, da Cassini explorou bem esta propriedade das ondas de rádio, já que elas podem penetrar atmosferas densas e turvas e ricochetear quando incidem sobre superfícies duras. Ao enviar de rádio às superfícies, é possível detectar diferenças no tempo de chegada do sinal, da mesma maneira como funciona um sonar de navios e submarinos. Desta

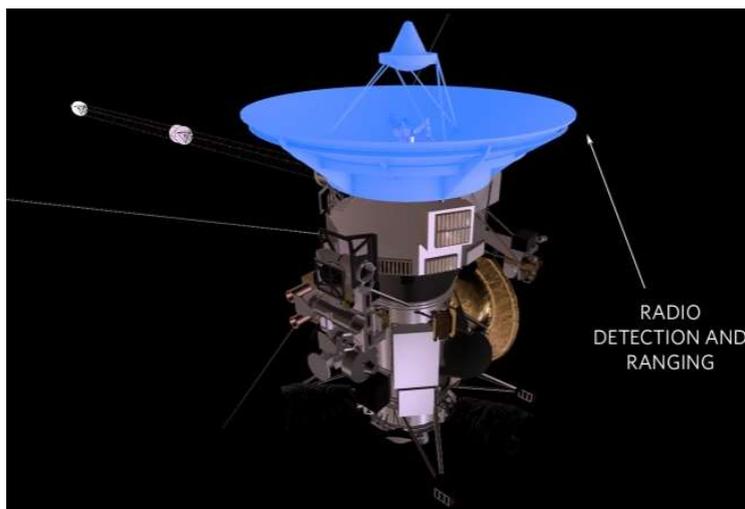


Figura 3.6 – Concepção artística da localização do Radar na nave Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

maneira, os cientistas puderam criar imagens das paisagens que estavam refletindo as ondas. Como visto na seção 1.2, os cientistas entendiam que a espessa atmosfera de Titã escondia sua superfície e que o uso de ondas de rádio seria uma boa estratégia para obter mais informações sobre essa superfície [Elachi *et al.* 1999].

Outro instrumento a bordo da Cassini que utilizou ondas de rádio foi o RSS. Utilizando a antena de alto ganho da espaçonave, este dispositivo enviou sinais de rádio da Cassini para a Terra. O sinal de rádio interagiu com a atmosfera de Saturno, seus anéis e suas luas até chegar a Terra o que possibilitou os cientistas aprender sobre os campos gravitacionais, estrutura atmosférica, composição, estrutura de anéis e tamanhos de partículas além de propriedades de superfície.

Esperar era algo que os pesquisadores que estudaram o sistema Saturno usando os instrumentos da Cassini estavam acostumados. A antena da espaçonave deve estar direcionada para a Terra para que possa enviar os dados coletados e muitas vezes uma face diferente está voltada para a Terra devido a algum outro dispositivo que esteja observando algo específico. Contudo, os dados coletados pelo RSS eram transmitidos em tempo real. Assim que os dados eram coletados pelo instrumento, já eram enviados para a Terra [Kliore *et al.* 2002].

Na próxima seção, serão apresentados os instrumentos de campo e de partículas que compunham o orbitador Cassini.

3.1.3 – Instrumentos de Campo e de Partículas

Com dispositivos de campo e de partículas, a Cassini pôde estudar a poeira, o plasma interplanetário e os campos magnéticos ao redor de Saturno. Apesar do fato de que os dados coletados não produziam imagens, as informações obtidas foram de suma importância para a compreensão do ambiente espacial em torno do planeta anelado. Os experimentos de detecção *in situ* eram o Espectrômetro de Plasma Cassini (CAPS), o Analisador de Poeira Cósmica (CDA), o Espectrômetro de Massa de Íon e de Massa de Neutra (INMS), o Magnetômetro (MAG), o Instrumento de Imagem Magnetosférica (MIMI) e Ciência de Onda de Rádio e Onda de Plasma (RPWS).

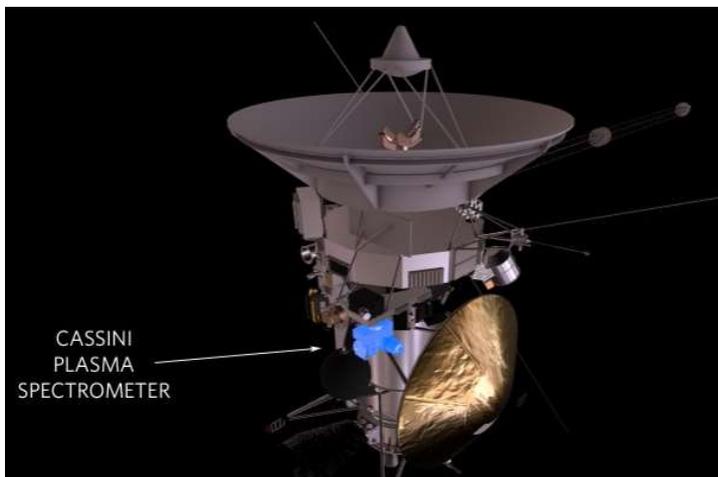


Figura 3.7 – Concepção artística da localização do CAPS a bordo da Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

O espectrômetro CAPS, Figura 3.7, era um instrumento construído para detectar partículas que se aproximavam de seu espectrômetro e atravessavam seus sensores: o sensor de elétrons, o espectrômetro de massa de íons e o sensor de feixe de íons capazes de medir a energia dessas partículas e a direção que elas estavam viajando. Uma das maiores vantagens de se ter uma espaçonave orbitando um

planeta distante é o fato de que ela pode fazer sobrevoos em diferentes regiões do planeta, como seu equador e seus polos. Desta maneira, o CAPS pôde coletar amostras de partículas provenientes de várias regiões do planeta o que possibilitou obter uma maior compreensão sobre os íons e elétrons do plasma interplanetário bem como sua composição, densidade, fluxo, velocidade e temperatura dos íons e elétrons na magnetosfera de Saturno [Young *et al.* 2004].

Partículas microscópicas e de tamanho nanométrico puderam ser detectadas graças ao CDA. Tais partículas eram detectadas e permitiam o CDA determinar a carga, a velocidade, o tamanho da partícula e a direção em que estavam viajando. Ao se chocarem com os detectores do instrumento, as partículas eram quebradas em pedaços menores o que permitia determinar a sua composição. Partículas de poeira ocorrem em todo sistema de Saturno, principalmente

provenientes dos seus anéis, de suas luas e das nuvens de material em erupção em Encélado. A necessidade em se ter um Analisador de Poeira Cósmica a bordo da Cassini nos ajuda a compreender como elas são produzidas e como interagem com os anéis, as luas e a magnetosfera de Saturno [Srama *et al.* 2002].

O espectrômetro INMS foi projetado para determinar a composição química (em elementos e isótopos) dos componentes gasosos e voláteis das partículas neutras e dos íons de baixa energia na atmosfera e ionosfera de Titã, na magnetosfera de Saturno e no ambiente em torno dos anéis [Waite *et al.* 2004].

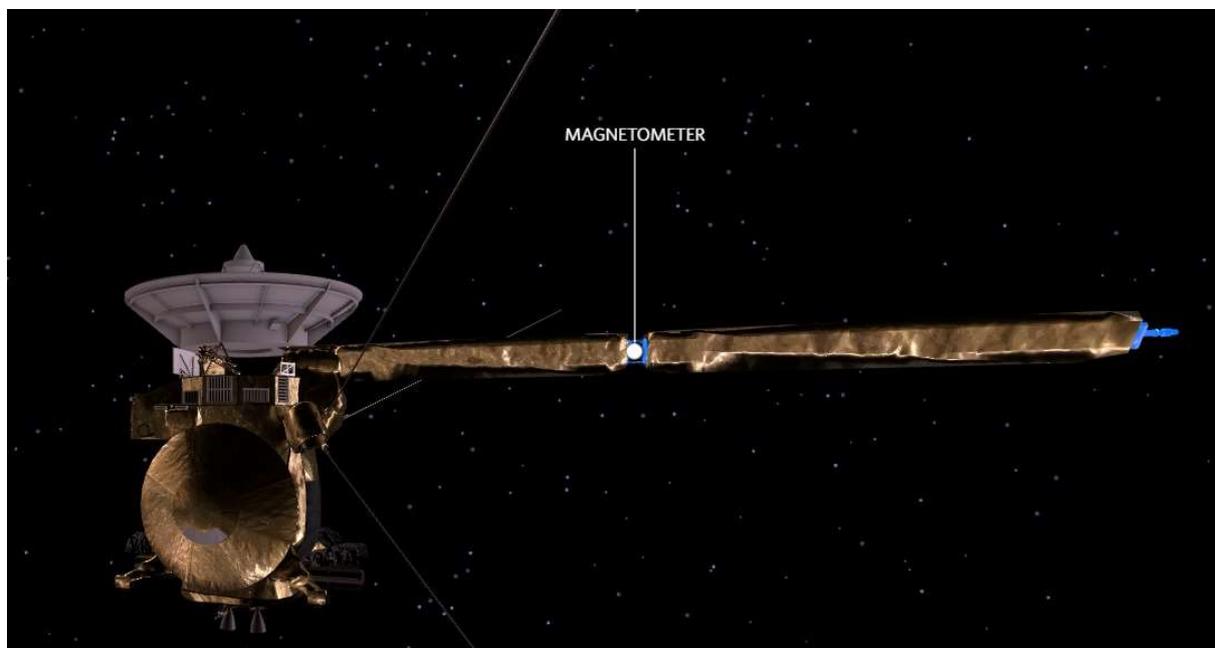


Figura 3.8 – Concepção artística da localização do MAG a bordo da Cassini e do “MAG boom”. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

O Magnetômetro da Cassini, Figura 3.8, pode ser definido como uma bússola altamente sensível e muito precisa capaz de registrar a direção e a força dos campos magnéticos no ambiente ao redor da espaçonave. A partir dos dados coletados, os cientistas foram capazes de produzir modelos em 3D da magnetosfera de Saturno e qual sua configuração e interação com os seus anéis e suas luas geladas, bem como as interações entre a magnetosfera, a poeira e o plasma interplanetário. Para se estudar um campo magnético planetário em detalhe, você deve estar inserido dentro deste campo e, pode-se dizer que realizar este tipo de medida *in situ* é uma das grandes conquistas obtidas pela sonda Cassini. Contudo, a própria espaçonave produz um campo magnético enquanto funciona e, devido ao fato de que o MAG ser extremamente

sensível, foi instalado em um braço não metálico de 11 m de comprimento chamado “MAG boom⁴” para levar os sensores do MAG para o mais longe possível da espaçonave [Dougherty *et al.* 2002].

O MIMI da Cassini tinha três sensores que juntos detectaram gás neutro e partículas carregadas e neutras no plasma interplanetário de Saturno ajudando, assim, a entender como a magnetosfera deste planeta interagia com sua atmosfera, seus anéis, suas luas e com as partículas provenientes do vento solar. A magnetosfera de Saturno age como um escudo assim com a magnetosfera terrestre e o MIMI foi enviado para estudar a estrutura que a magnetosfera saturnina apresenta. Os três sensores que compunham o MIMI são o Sistema de Medição Magnetosférica de Baixa Energia (MIMI LEMMS), o Espectrômetro de Carga-Energia-Massa (MIMI CHEMS) e as Câmeras Ion e Neutra (MIMI INCA). O LEMMS era responsável por medir as partículas carregadas, as velocidades e a direção de onde elas proviam enquanto que o CHEMS media as cargas e a composição das partículas que colidiam com os detectores. Já o INCA era uma espécie de câmera escura de orifício capaz de criar imagens de átomos de alta velocidade ao invés de produzi-las utilizando luz [Krimigis *et al.* 2002].

Finalmente, o último dispositivo de detecção *in situ* a bordo de Cassini era o RPWS, Figura 3.9, capaz de detectar ondas de rádio e ondas de plasma através de seus sensores e antenas. Este dispositivo foi capaz de estudar a intensidade das ondas em uma ampla faixa de frequência, a densidade e a temperatura do plasma da magnetosfera de Saturno enquanto efetuava seus diversos sobrevoos pelo planeta. A sensibilidade deste instrumento era tão

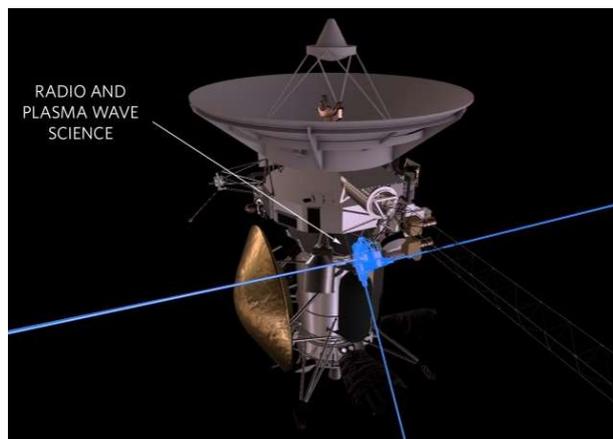


Figura 3.9 – Concepção artística da localização do RPWS a bordo da Cassini. Fonte NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech

espetacular que a Cassini pôde até “escutar” a poeira atingindo a espaçonave e os relâmpagos que se formavam na atmosfera turbulenta do planeta gasoso. Além disso, o RPWS pôde “observar” auroras polares semelhantes às auroras boreais e austrais que ocorrem aqui na Terra.

⁴ Pode ser traduzido literalmente do inglês como sendo explosão magnética.

Na próxima seção, exploraremos os instrumentos que viajaram a bordo da sonda europeia Huygens cuja principal missão era investigar a superfície da maior lua de Saturno, Titã.

3.2 – Sonda Espacial Huygens

A sonda espacial Huygens, Figura 3.10, foi projetada e construída pela Agência Espacial Europeia com o propósito de obter mais informações sobre a lua gelada Titã e configurou como sendo a primeira sonda a pousar em ambiente extraterrestre mais longe da Terra, entrando para o livro dos recordes. Huygens era composta de duas partes [Lebreton e Matson 2002].

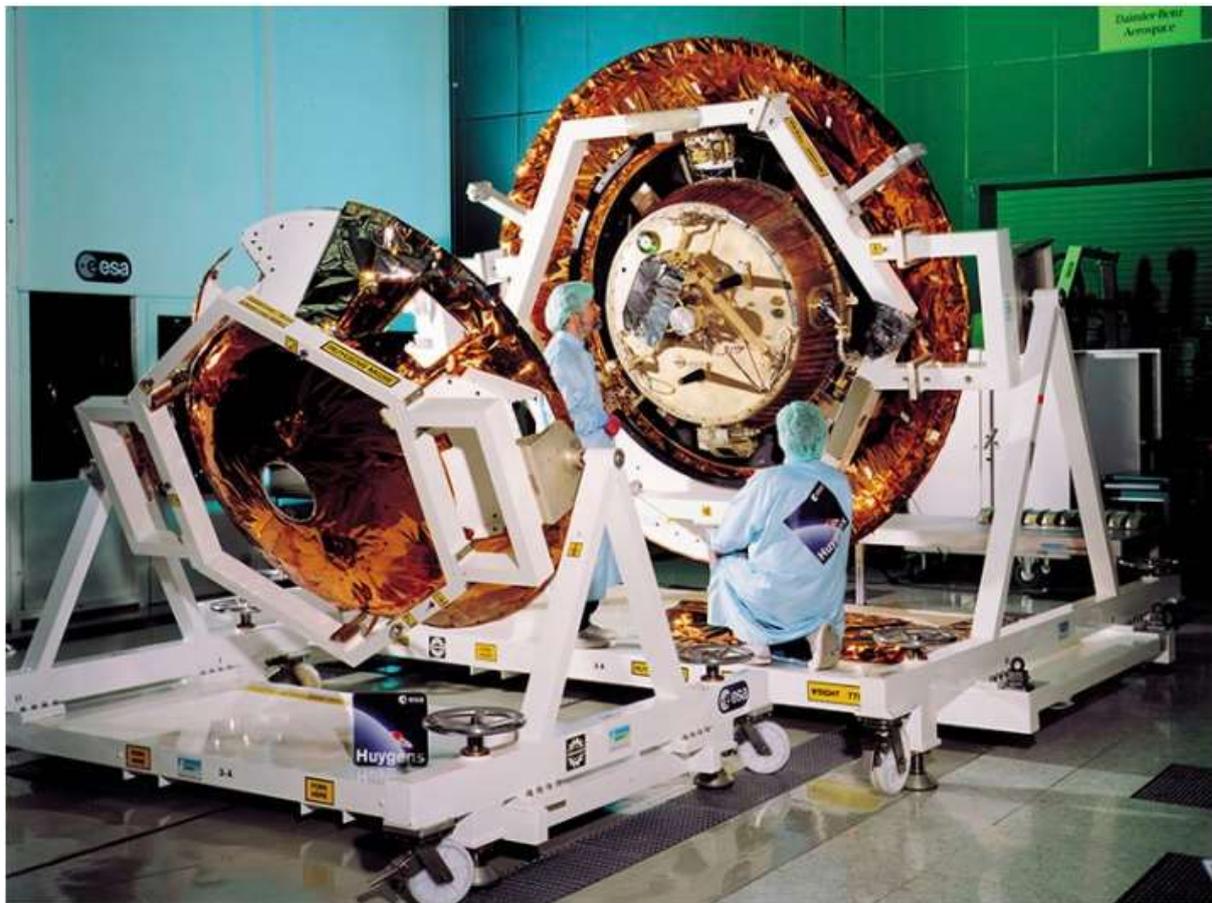


Figura 3.10 – Imagem da sonda Huygens e do módulo de descida que embarcaram de carona com o orbitador Cassini. Fonte ESA.

A primeira parte que compunha a sonda da ESA integrava o Módulo de Montagem de Entrada que transportou o equipamento necessário para controlar a sonda após a separação do orbitador Cassini e o escudo térmico que protegeu a estrutura da sonda e atuou como freio e o Módulo de Descida. A segunda parte era o Módulo de Descida que continha os dispositivos científicos e três paraquedas diferentes que foram lançados em sequência para controlar a descida de Huygens enquanto atravessava a densa atmosfera de Titã. Além disso, a sonda permaneceu acoplada com o Equipamento de Suporte de Sonda (PSE) que continha os aparatos para rastrear a sonda, recuperar os dados coletados por ela e enviar para Cassini que, por sua vez, repassa essas informações para o centro de controle da NASA [Clausen *et al.* 2002].

A carga útil da sonda estava equipada com seis dispositivos científicos capazes de realizar funcionalidades diferentes a medida em que a sonda realizava sua descida pela atmosfera densa e turva de Titã [Matson *et al.* 2002]. São eles: Instrumento de Estrutura Atmosférica Huygens (HASI), Experiência de Vento Doppler (DWE), Produtor de Imagem de Descida/Radiômetro Espectral (DISR), Espectrômetro de Massa para Cromatografia Gasosa (GCMS), Coletor de Aerossol e Pirolisador (ACP) e Pacote de Ciência de Superfície (SSP).

O HASI era um instrumento capaz de medir as propriedades físicas e elétricas da atmosfera de Titã através de um conjunto de sensores tais como acelerômetros, sensores de temperatura e pressão. As propriedades aerodinâmicas da sonda foram investigadas antes de seu embarcar no orbitador Cassini e, assim, durante a descida através da atmosfera de Titã, o HASI pôde determinar a densidade dessa atmosfera bem como rajadas de ventos que ocorriam neste satélite. Como este instrumento estava equipado com um analisador de ondas eletromagnéticas, os cientistas puderam medir a condutividade das partículas carregadas presentes na atmosfera de Titã assim como a condutividade e permissividade do material da superfície desta lua, uma vez que a sonda tivesse pousado em segurança [Fulchignoni *et al.* 2000].

Com o DWE, a principal intenção dos cientistas era investigar a velocidade do vento durante a descida da sonda através da espessa atmosfera de Titã utilizando, para isso, o efeito Doppler. Experimento semelhante foi realizado em Júpiter utilizando a sonda Galileo [Bird *et al.* 2001]. Este instrumento também foi capaz de obter as coordenadas do ponto de queda da sonda em posição e altitude, bem como obter informações sobre os movimentos zonais que a atmosfera de Titã apresenta.

Utilizando vários sensores e campos de visão, o DISR fez imagens e observações espectrais da atmosfera e da superfície de Titã. Dois imageadores (um operando no visível e outro no infravermelho) capturaram imagens da superfície de Titã durante os últimos estágios de descida da sonda e, devido ao fato de a sonda descer girando, foi possível construir um mosaico de imagens do local de onde a sonda aterrissou. Um imageador lateral foi utilizado para se obter uma visão do horizonte das imediações do local de pouso da sonda Huygens. Foram utilizando, também, sensores solares para medir a intensidade de luz provenientes do espalhamento de aerossóis espalhados pela atmosfera de Titã. Isso possibilitou obter informações sobre o tamanho e densidade numérica das partículas suspensas [Tomasko *et al.* 1999].

O GCMS era um analisador capaz de identificar e medir produtos químicos presentes na atmosfera de Titã [Niemann *et al.* 2002]. Ele continha um espectrômetro de massa e um cromatógrafo de gás. Conforme a sonda descia através da atmosfera, coletores de amostra eram preenchidos com material para estudo além de investigar os produtos da reação de pirólise que ocorria no ACP. Já o ACP, como mencionado, tinha o objetivo de atrair partículas de aerossol da atmosfera de Titã e aquece-las por meio da reação de pirólise para decompor os materiais complexos e, em seguida, vaporizar os produtos voláteis [Israel *et al.* 2002].

Por fim, o SSP [Zarnecki *et al.* 2002] estava equipado com sensores cujo objetivo era determinar as propriedades físicas do ponto de impacto da sonda. O SSP foi projeto para determinar se a superfície de pouso era sólida ou líquida, determinou a distância até a superfície conforme a sonda seguia em seu movimento descendente e, medindo a velocidade do som pôde-se obter informações sobre a composição atmosférica bem como sua temperatura. Um acelerômetro acoplado ao instrumento mediu a taxa de desaceleração da sonda durante a queda e um sensor de inclinação foi capaz de indicar a altitude da sonda após o pouso.

No capítulo a seguir serão apresentados as principais descobertas obtidas pela missão Cassini para melhor compreensão de Saturno, seus anéis e suas principais luas geladas Titã e Encélado.

Capítulo 4 – As Descobertas da Missão Cassini-Huygens

Saturno é um planeta gasoso de um sistema complexo que possui 82 satélites naturais e um conjunto de anéis visíveis e difusos. Este sistema não é complexo apenas devido ao número de luas que orbitam o planeta, mas também devido ao fato de haver bastante interação entre o planeta, seus anéis e suas luas. Suas luas geladas, Titã e Encélado, apresentam muita interação com a magnetosfera deste planeta. A primeira em virtude ao seu tamanho e proximidade ao planeta e a segunda por causa da sua constante manutenção dos anéis a partir de emissão de partículas neutras e carregadas provenientes de gêiseres localizados em seu polo sul. Portanto, o sistema saturnino é complexo por ser dinâmico e os detalhes das interações que ocorrem entre o planeta, seus anéis e suas luas serão apresentados neste capítulo.

Inicialmente, serão apresentadas as descobertas de Cassini em relação à Saturno, com ênfase em sua magnetosfera e sua interação com o planeta, seus anéis e suas luas no ambiente interplanetário. Em seguida, apresentaremos algumas das maiores descobertas sobre as luas geladas Titã e Encélado.

4.1 – Saturno

Aqueles que já tiveram a oportunidade de olhar para o céu noturno através de um telescópio, já perceberam que é mais fácil focalizar o equipamento em Júpiter do que em Saturno. Isso se dá pelo fato de que Saturno estar localizado a aproximadamente 9,5 unidades astronômicas do Sol [Gombosi *et al.* 2009] o que é quase duas vezes a distância entre o Sol e Júpiter. Outro fato curioso é o fato de Saturno apresentar anéis. Outros planetas exteriores também apresentam anéis, mas estes são tênues e imperceptíveis a olho nu, o que torna Saturno um tanto quanto peculiar. Tais observações despertam a curiosidade em saber o que ocorre neste planeta. Quais características de Saturno são encobertas por causa de sua distância da Terra?

Observações deste planeta obtidas por instrumentos localizados na Terra e em sua órbita junto com alguns sobrevoos de espaçonaves foram insuficientes para revelar os mistérios escondidos de Saturno. Entretanto, com a Cassini os cientistas foram capazes de estudar características peculiares que só poderiam ser obtidas estando presente lá, no sistema saturnino,

como por exemplo como a composição e a temperatura da alta atmosfera de Saturno é alterada à medida que as estações mudavam. Outra vantagem de se ter um orbitador no sistema de Saturno era a possibilidade de observar de perto as tempestades que ocorrem na atmosfera do planeta, bem como realizar medidas *in situ* de sua magnetosfera e também detectar ondas de rádio e de plasma provenientes do planeta que não podem ser detectadas da Terra. Finalmente, Cassini nos revelou detalhes jamais alcançados sobre os anéis de Saturno, que tanto encantam quando observados por nós daqui da Terra.

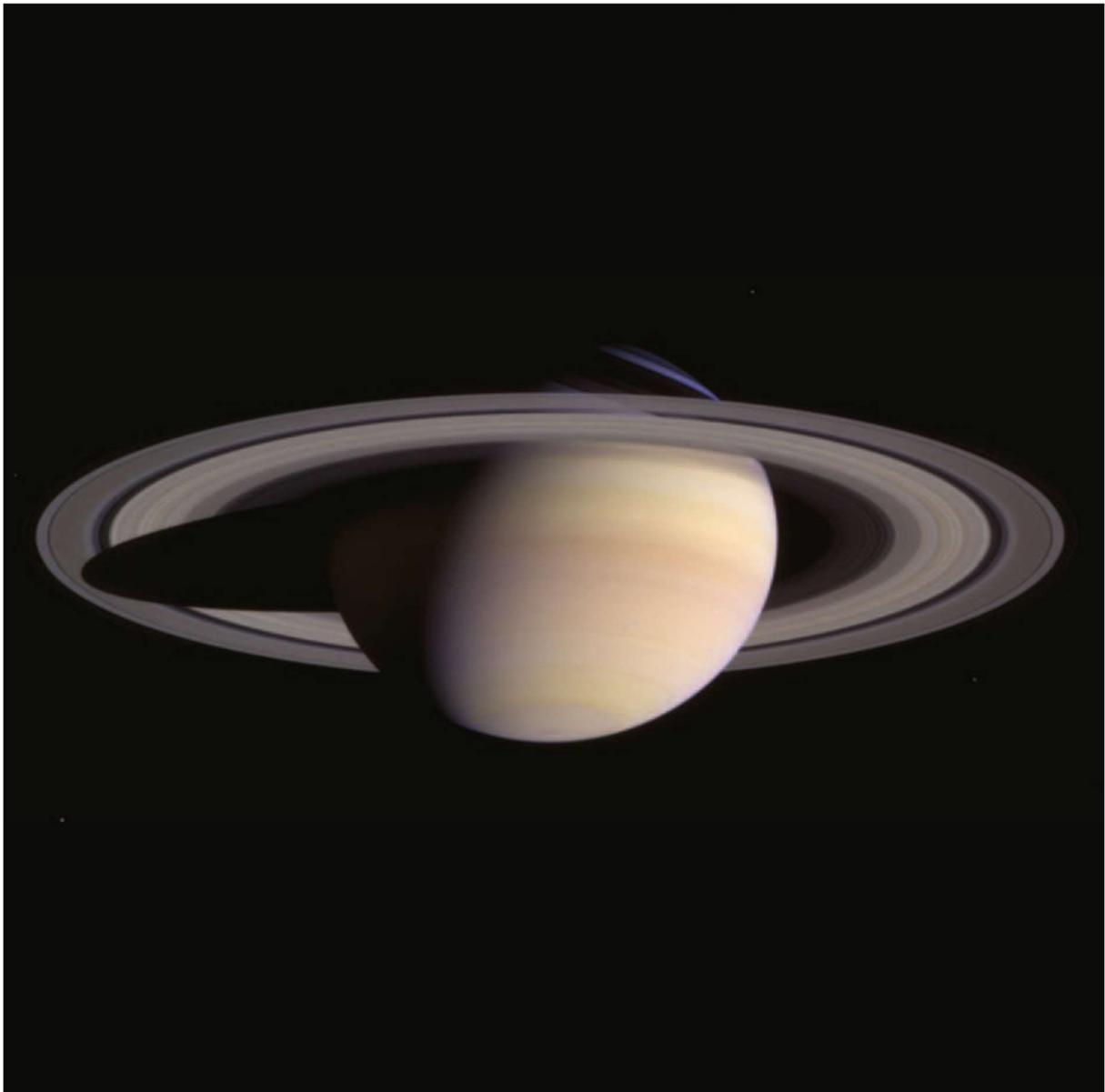


Figura 4.1 – A imagem de Saturno e seus anéis obtida a partir da composição de três exposições no vermelho, no verde e no azul, tiradas quando a espaçonave Cassini estava a 47,7 milhões de km de distância do planeta.

Embora os anéis de Saturno, Figura 4.1, sejam os responsáveis por atribuir fama ao planeta, o próprio planeta em si é fonte inesgotável de investigação. Sabe-se que a maior composição do planeta é de gás de hidrogênio e hélio e seu volume chega a alcançar 700 vezes o volume da Terra o que faz jus ao nome de gigante gasoso atribuído ao planeta. Acredita-se que o núcleo de Saturno apresente [Hubbard *et al.* 2009] entre 15-20 M_E (massa da Terra) e o restante do planeta seja constituído por gases e traços de outros elementos.

A atmosfera de Saturno apresenta bastante atividade assim como a atmosfera terrestre. Entretanto, o polo norte de Saturno possui a corrente de jato mais famosa e visível do planeta e que em nada se compara às correntes de jato que ocorrem aqui na Terra, Figura 4.2. Se trata do então chamado hexágono.

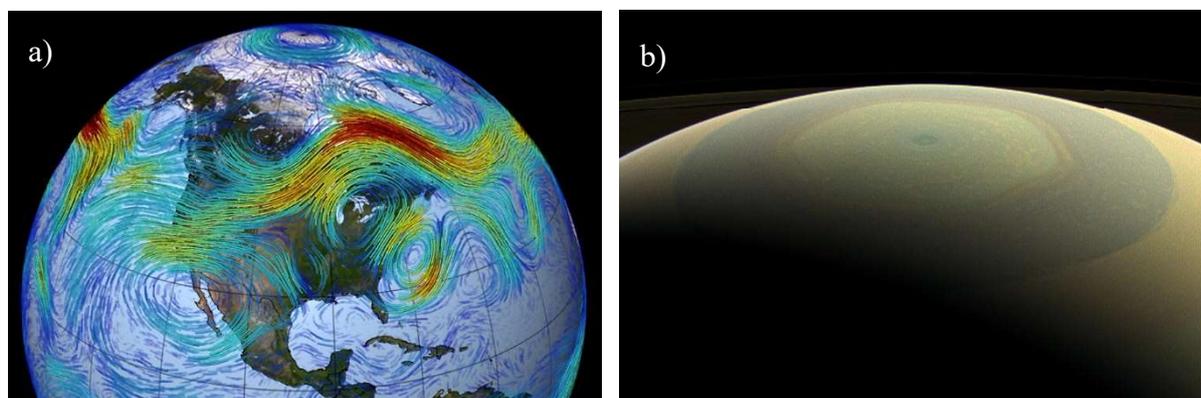


Figura 4.2 – a) Mapeamento das correntes de jato no hemisfério norte do planeta Terra e b) Imagem no visível da corrente de jato no polo norte de Saturno chamado de Hexágono. Fontes: NASA e JPL PIA17175.

A partir de 1996, a latitude do hexágono permaneceu sobre as sombras até que em 2009 os instrumentos CIRS e VIMS da Cassini puderam detectar esta estrutura peculiar de Saturno. Neste ano, emissões térmicas foram detectadas por ambos instrumentos mencionados. Mapas de temperatura da troposfera superior do planeta revelaram que o hexágono é mais quente na banda a $79^\circ N$ e frio na banda a $76^\circ N$ sugerindo que o hexágono fosse um jato de corrente exceto pelo seu formato [Fletcher, *et al.* 2008]. Termografias obtidas pelo VIMS em $5 \mu m$ revelam que, neste comprimento de onda, o hexágono é claramente visível, o que sugere que ele seja formado por nuvens de partículas grandes [Baines *et al.* 2009a]. Na Figura 4.3 é possível localizar centenas de nuvens discretas que povoam a parte interior do hexágono. Além disso, é possível observar que o hexágono é compreendido de várias nuvens aninhadas em forma de

hexágonos que dão a forma de toda a estrutura. Ao centro, em vermelho escuro é possível localizar o olho do furacão.

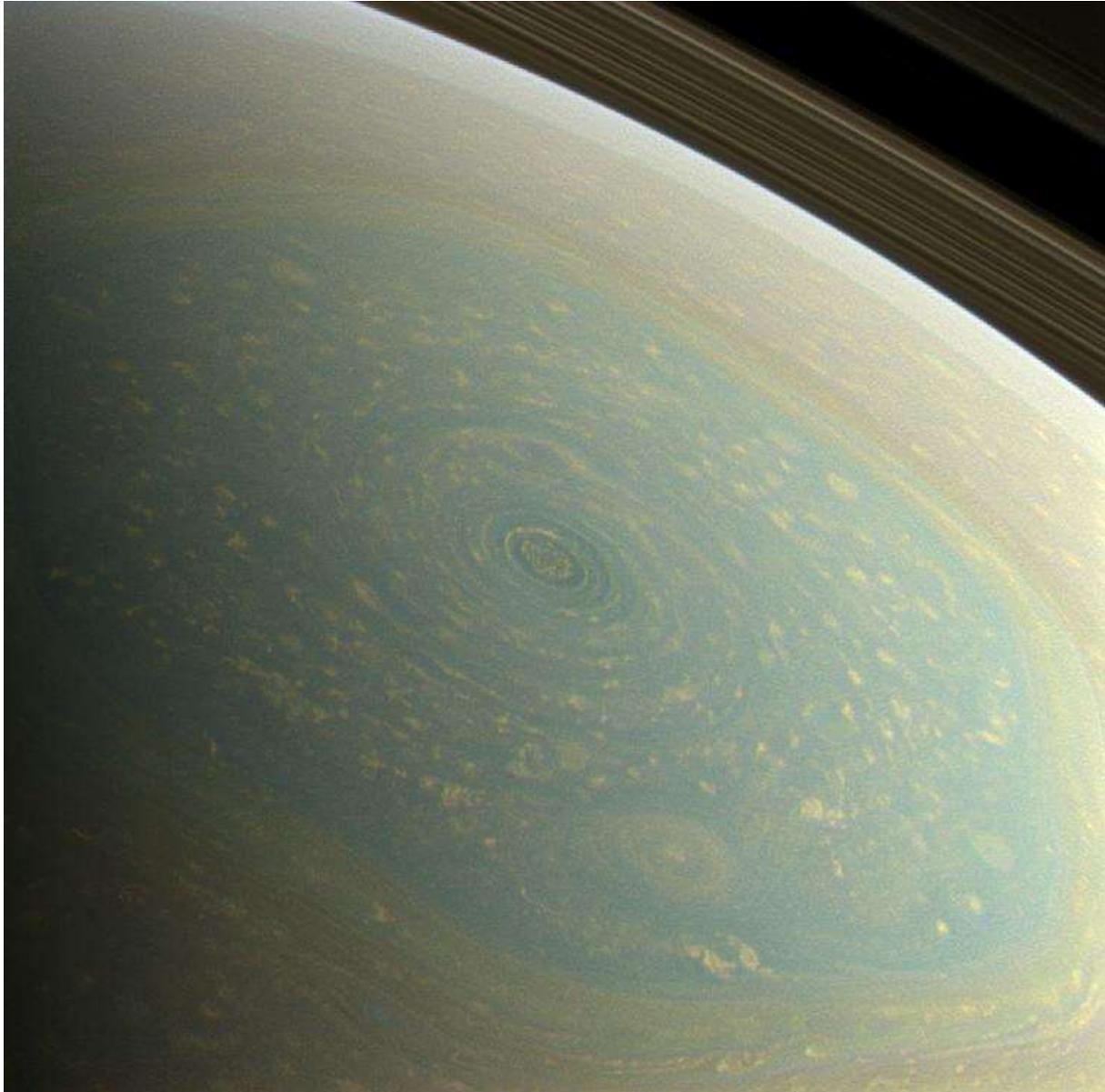


Figura 4.3 – Imagem em cores reais das tempestades que ocorrem no polo norte de Saturno. Ao centro está o olho do furacão e centenas de tempestades menores dentro do hexágono. Na parte de baixo a direita é possível localizar a formação de uma tempestade em tons esverdeados. Na parte de cima a direita é possível ver os anéis. Fontes: NASA/JPL PIA14946.

Detecções realizadas pelo instrumento VIMS em 2006 e 2008 mostram que o hexágono está estacionário em relação ao sistema de referência da Voyager [Baines *et al.* 2009a] e que as nuvens de tempestade que se localizam dentro do hexágono se deslocam com velocidades típicas da ordem de 125 m/s enquanto que os fluxos exteriores apresentam velocidades da

ordem de 30 m/s. Desde sua detecção pela Voyager 2 até a data das medidas realizadas pelo VIMS mostram que o hexágono aparentemente mudou muito pouco [Baines *et al.* 2009b].

Saturno tem a peculiaridade de apresentar enormes tempestades que são chamadas de grandes manchas brancas (GWS). Na Figura 4.4 é possível ver uma GSW circulando o planeta e encontrando com seu próprio rastro durante o equinócio do planeta quando os dois hemisférios estavam igualmente iluminados pelo Sol e os anéis se encontravam na posição *edge-on*. A imagem em cores reais foi obtida pelo ISS da Cassini em 2011 que observou a formação da mancha durante um período de 12 semanas entre a formação da tempestade e seu encontro com o rastro deixado por ela. É possível perceber na imagem que algumas nuvens se deslocaram para o sul e se juntaram com uma corrente que se move para o leste. Esta é uma das maiores e mais intensas tempestades que observadas pelas espaçonaves Voyager e Cassini em Saturno e ela ainda está ativa hoje em dia [Del Genio *et al.* 2009].

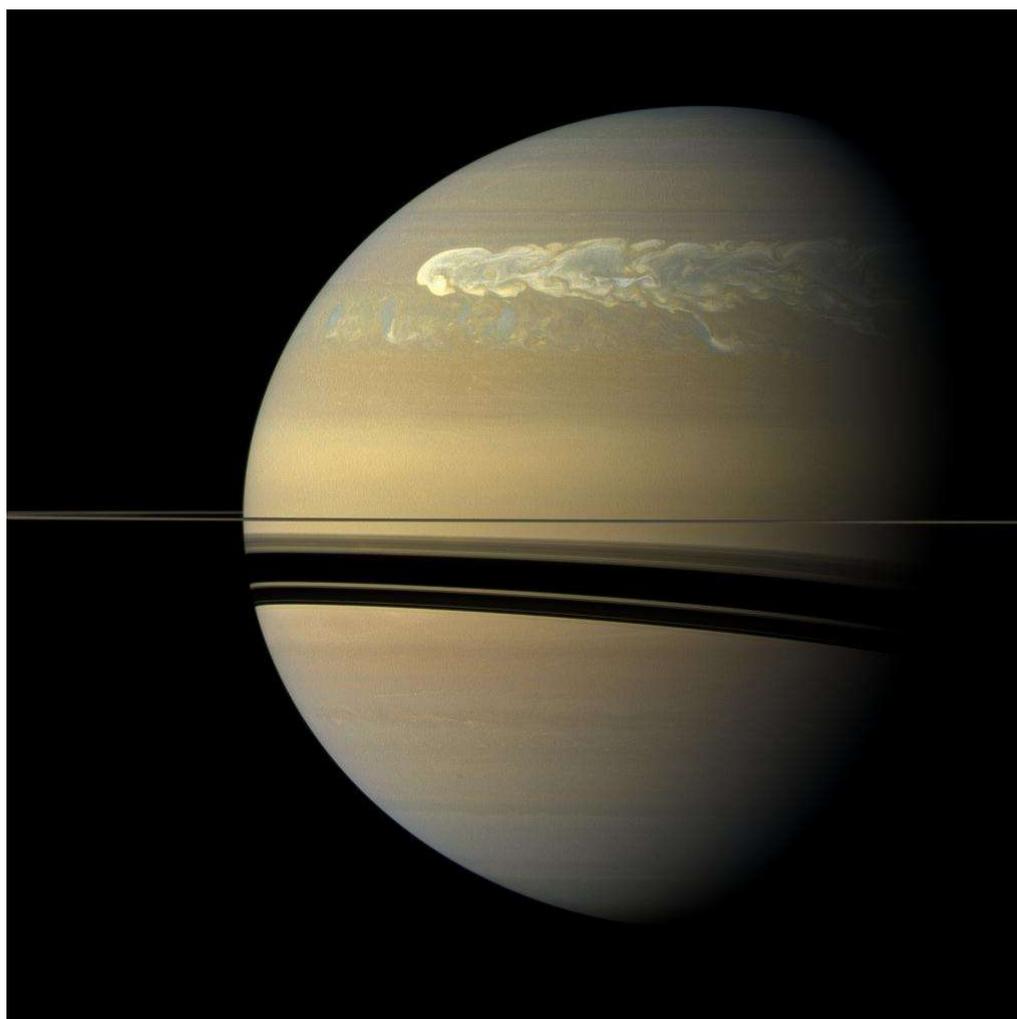


Figura 4.4 – Imagem em cores reais de uma GSW obtida pelo ISS da Cassini em 2011. Fonte NASA/JPL PIA12826

Vale notar que as tempestades que ocorrem no planeta não são exclusividade do polo norte. Fenômenos atmosféricos também ocorrem no hemisfério sul de Saturno como na Figura 4.5 onde é possível ver padrões de tempestades circulares em torno de altas latitudes do polo sul de Saturno [Del Genio *et al.* 2009].

Quando o assunto é tempestade, logo vem à mente imagens de relâmpagos e descargas elétricas. Foram detectadas descargas elétricas que ocorriam dentro das tempestades observadas em Saturno (chamadas de Descargas Eletrostáticas de Saturno – SED) associadas a explosões de emissão de rádio de alta frequência. Existe consenso na comunidade científica de que as SED ocorrem devido à existência de relâmpagos. Entretanto, apesar de todas tentativas, flashes de relâmpagos visíveis não foram observados em Saturno como foram em Júpiter [Dyudina *et al.* 2007]. Isto acontece provavelmente pelo fato de que as tempestades que ocorrem em Saturno são originadas em níveis mais profundos da atmosfera de Saturno do que em Júpiter e, desta maneira, sofrem extinção pelas camadas de nuvens superiores e são então obscurecidos à medida que avançam atmosfera acima.

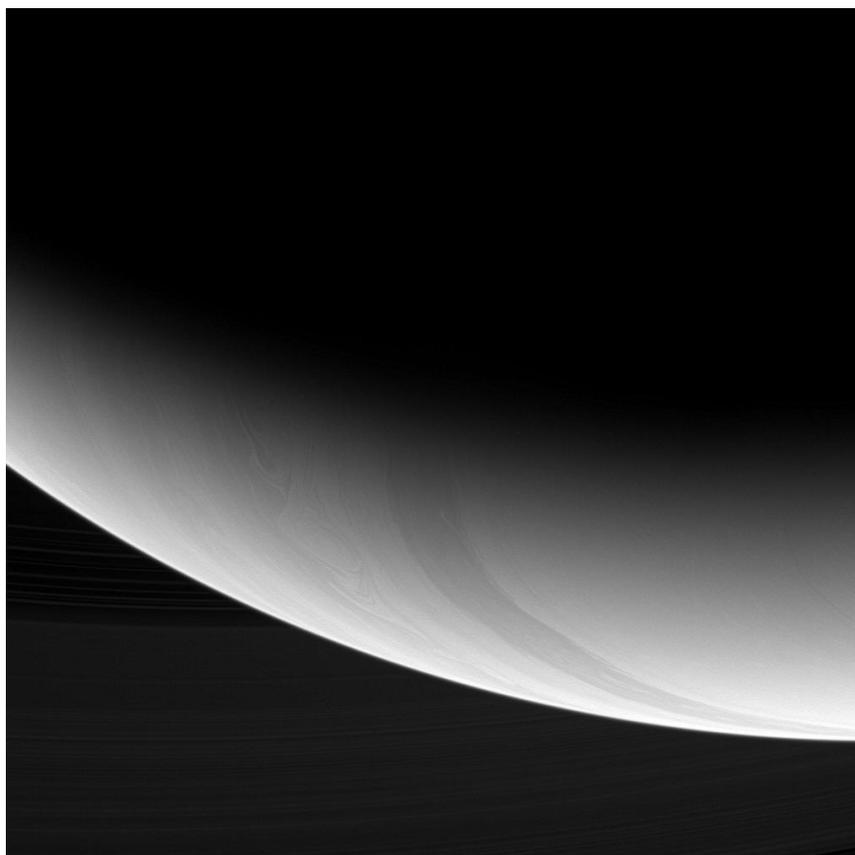


Figura 4.4 – Imagem obtida pelo ISS da Cassini em 2009 utilizando um filtro sensível a comprimentos de onda no infravermelho próximo que mostram padrões de tempestades circulares em torno de altas latitudes do polo sul de Saturno. Fonte NASA/JPL PIA10591

Outro fenômeno atmosférico que ocorre tanto na Terra quanto em Saturno é a emissão de auroras polares. Este fenômeno que ocorre na alta atmosfera pôde ser investigado pelos instrumentos UVIS, VIMS e ISS que integraram a sonda Cassini e que foram sensíveis a emissões desde o ultravioleta até comprimentos de onda no rádio [Esposito *et al.* 2004 e Kurth *et al.* 2009]. Embora não estejam diretamente relacionadas a emissões de auroras, ondas de rádio quilométricas a partir de distribuição de partículas nas linhas de campo das auroras podem ser utilizadas como indicadores de atividade de auroras e, portanto, podem ser detectadas utilizando o equipamento RPWS da Cassini [Gurnett *et al.* 2004].

As primeiras imagens no ultravioleta obtidas por Cassini foram investigadas por Esposito *et al.* (2005) que descobriram que os espectros das auroras saturninas são semelhantes às que ocorrem em Júpiter e ocorrem devido à excitação de hidrogênio molecular e de hidrogênio atômico a partir de impactos eletrônicos. A Figura 4.5 mostra duas imagens em cores falsas de auroras polares obtidas pelo UVIS da Cassini. Em azul são as emissões de aurora de gás de hidrogênio excitado por bombardeamento de elétrons e em laranja temos a luz solar refletida pelo planeta. As duas imagens foram obtidas com uma diferença de uma hora e mostram a resposta da aurora em relação ao aumento de pressão do vento solar incidente sobre Saturno, onde é possível notar mudanças no brilho da aurora oval e em seu interior.

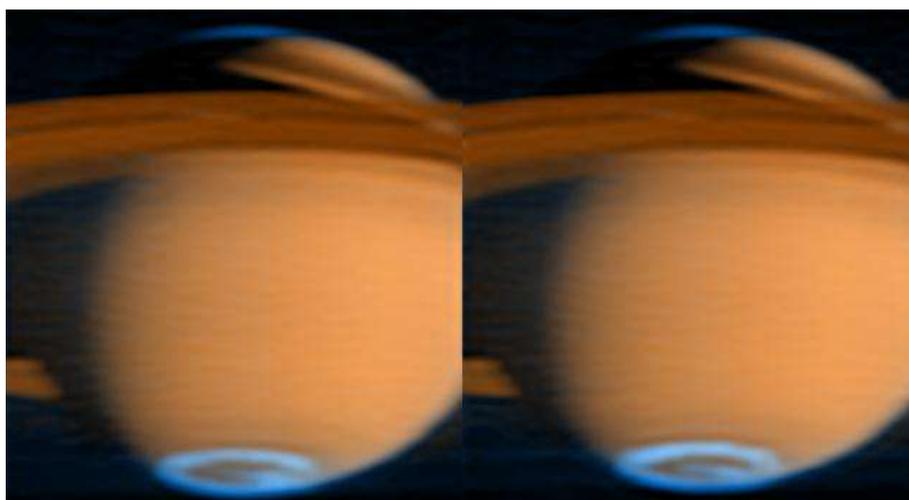


Figura 4.5 – Imagens em cores falsas de emissões de aurora de gás hidrogênio por bombardeamento de elétrons. Em azul são observadas as emissões em ambos os polos e em laranja temos o reflexo da luz solar sobre o planeta. Fonte NASA/JPL PIA06436

Vale notar que o processo de formação de auroras é igual tanto na Terra quanto em Saturno. Variações no ambiente interplanetário que contém plasma aprisiona elétrons e outras partículas carregadas ao redor das linhas de campo magnético nas camadas atmosféricas mais externas. Esses elétrons aprisionados, por sua vez, colidem com átomos e moléculas os excitando para estados de maior energia. Em seguida, o excesso de energia é liberado na forma de radiação de cores que dependem dos átomos e moléculas excitados [Hultqvist 2007]. Aqui na Terra, as excitações ocorrem em átomos de oxigênio e nitrogênio que são elementos abundantes em nossa atmosfera. Já em Saturno, as emissões são decorrentes de excitações de hidrogênio molecular e atômico presentes na alta atmosfera do planeta.

Imagens das auroras que ocorrem em Saturno também foram obtidas através do VIMS da Cassini utilizando emissão no infravermelho [Stallard *et al.* 2008] do íon H_3^+ . A Figura 4.6 mostra uma imagem em cores falsas de uma aurora formada a aproximadamente 100 km do topo das nuvens no polo sul do planeta.

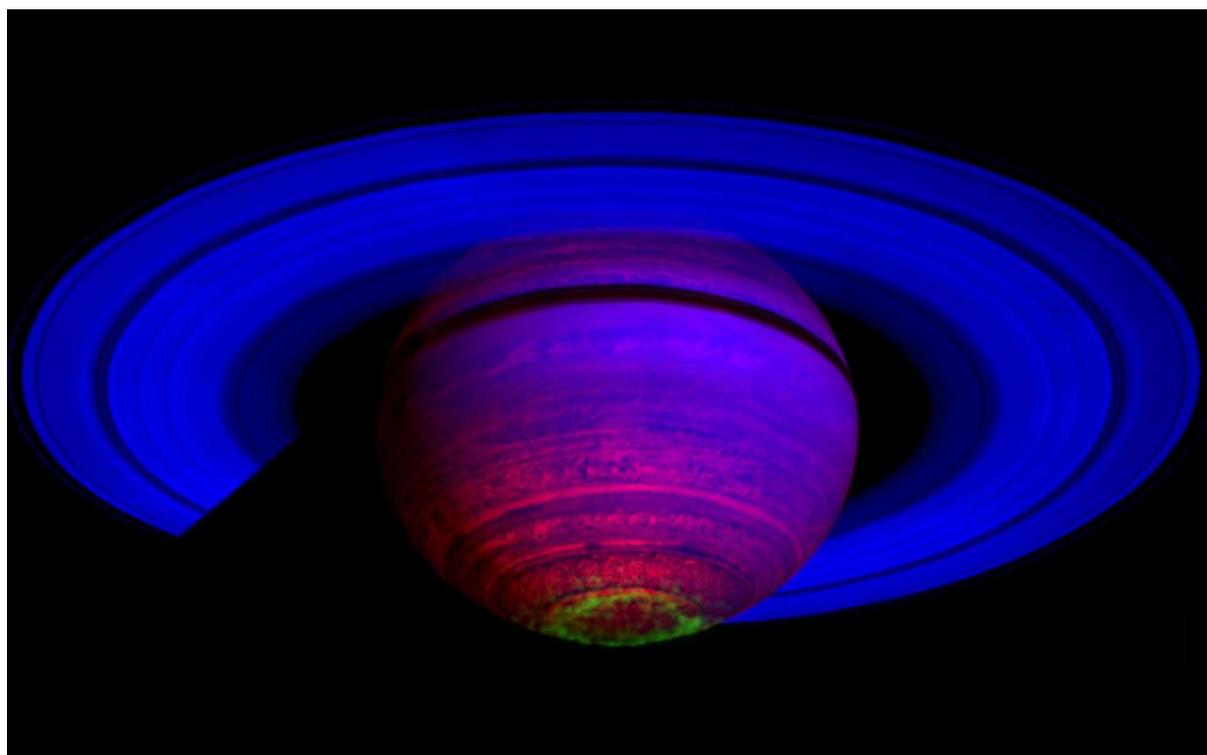


Figura 4.6 – Imagens em cores falsas de emissões de aurora no polo sul de Saturno obtida pelo VIMS da Cassini em 2009. Fonte NASA/JPL PIA13402

Enquanto que na Terra as auroras possuem uma coloração esverdeada na base e aparentam ser mais vermelhas no topo, as auroras polares em Saturno se apresentam vermelhas

na base e roxas no topo, como observado na Figura 4.7. A diferença decorre devido à emissão de diferentes formas do hidrogênio presente na alta atmosfera de Saturno, enquanto que na Terra há abundância de nitrogênio e oxigênio.



Figura 4.7 – Imagens em cores reais de emissões de aurora em Saturno obtida pelo instrumento ISS da Cassini em 2009. Fonte NASA/JPL PIA17668

Em se tratando da magnetosfera do planeta anelado, o volume de dados e informações obtido por Cassini é quase inesgotável e seu detalhamento foge do escopo deste trabalho de conclusão de curso. Entretanto, pode-se destacar alguns dos principais resultados obtidos.

As missões Pioneer e Voyagers realizaram algumas medidas da magnetosfera de Saturno quando sobrevoaram este planeta [Spilker 1997, Meltzer 2015]. Contudo, foi somente após a missão Cassini que se pôde obter uma compreensão mais profunda e mais prolongada das várias seções da magnetosfera e das populações de partículas que povoam o meio interplanetário em torno do planeta anelado. Através da Cassini, foram investigadas as propriedades da magnetosfera tais como correntes elétricas, emissões de rádio, ondas de plasma e interações com os anéis e satélites do planeta. A Figura 4.8 mostra a estrutura e a configuração de Saturno, após as descobertas de Cassini. Claramente, esta ilustração é bem mais rica e detalhada daquela obtida após as missões Voyager (Figura 1.3).

Os processos dinâmicos que ocorrem na magnetosfera de um planeta são extremamente complexos como se pode perceber na Figura 4.8, como por exemplo, o surgimento de correntes de anel. Quando o plasma magnetizado se movimenta, como é o caso do plasma interplanetário em torno de Saturno, este processo é capaz de produzir corrente elétrica. A corrente de anel equatorial que existe na magnetosfera de Saturno apresenta um fluxo de aproximadamente 10 milhões de ampères que circulam a quase 600.000 quilômetros acima do planeta [Meltzer 2015].

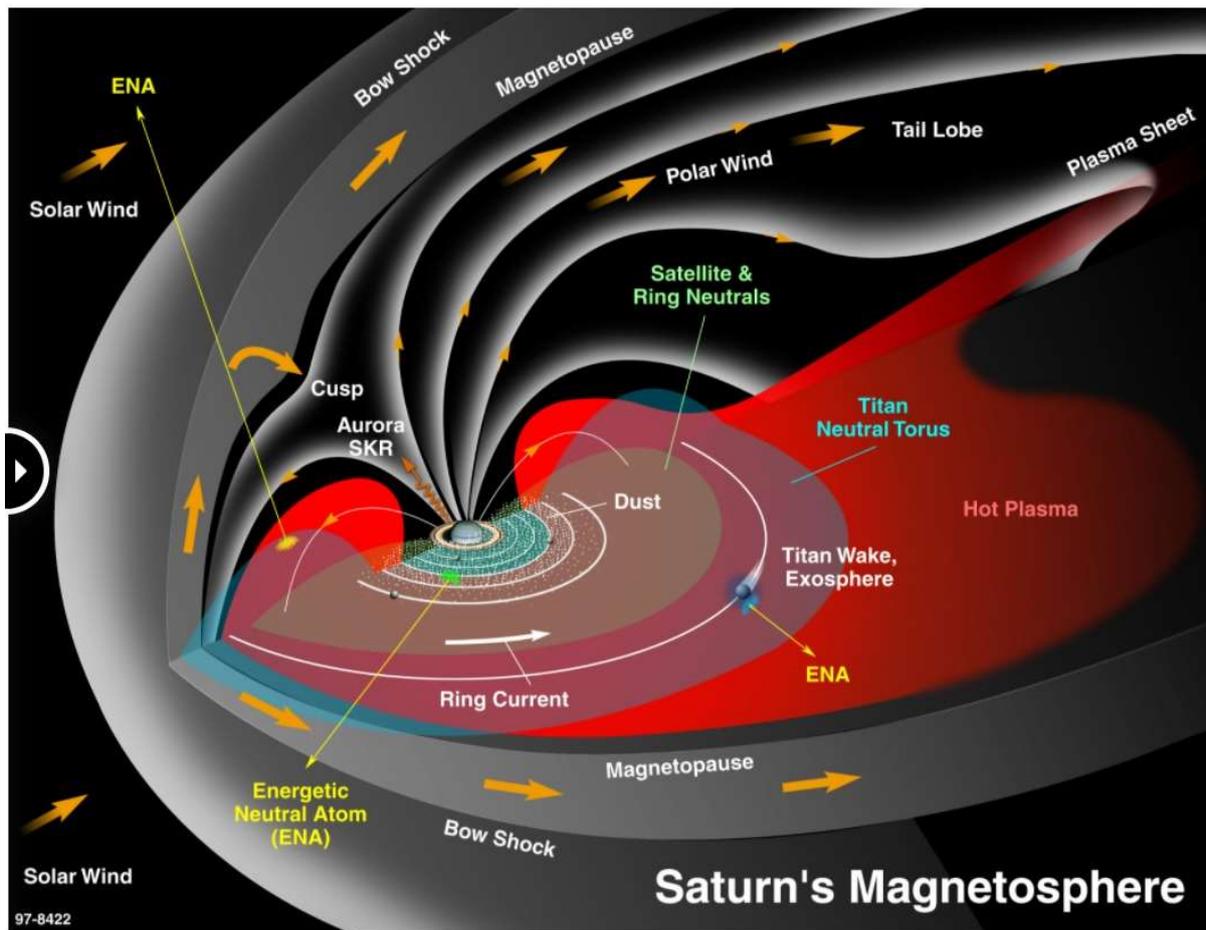


Figura 4.8 – Algumas descobertas sobre a estrutura e configuração da magnetosfera de Saturno. Fonte: Equipe MIMI/NASA-JPL.

Dados obtidos pelo equipamento MIMI da Cassini revelam que o formato da corrente se assemelha ao da aba de um chapéu e apresenta uma espessura de aproximadamente $1,5 R_s$ durante o dia e $\sim 0,5 R_s$ durante a noite. O instrumento MIMI foi essencial para que os cientistas pudessem “visualizar” o plasma interplanetário e os cinturões magnéticos presentes em Saturno

a partir de dados coletados *in situ*, até então jamais obtidos, além de proporcionar uma investigação da magnetosfera de dentro do sistema de Saturno.

A corrente de anel é um fenômeno que ocorre tanto na Terra e em Saturno quando o plasma interplanetário fica aprisionado nas linhas de campo magnético dos planetas. Acredita-se que as correntes são originárias a partir do material proveniente dos anéis deste planeta bem como dos gases emitidos pelos gêiseres de sua lua gelada Encélado, evidenciando um acoplamento que existe entre esses objetos (vide seção 4.3).

Outro fenômeno que também está diretamente relacionado com o campo magnético é a ocorrência de radiação quilométrica de Saturno (SKR) [Desch 1982]. Essas emissões podem estar relacionadas com a interação do vento solar que interage com o campo magnético nos polos de Saturno e que também provocam a ocorrência das auroras boreais [ESA, Gurnett *et al.* 2004]. Essa correlação foi investigada utilizando o equipamento RPWS a bordo da Cassini em conjunto com os dados obtidos pelo satélite espacial Hubble. As observações revelaram que as SKR ocorriam ao mesmo tempo que as auroras.

Além da SKR, ondas de plasma também são fenômenos que envolvem um conjunto de partículas carregadas interagindo com oscilações de campos elétricos e magnéticos. A sonda Cassini obteve os primeiros indícios de ocorrência de ondas de plasma quando se aproximava do planeta em março de 2004 quando detectou uma explosão de plasma de elétrons a aproximadamente 825 R_S . Isso só foi possível, devido ao fato de que o fluxo de elétrons se alinhou com o vento solar e a frente de choque do campo magnético de Saturno [Gurnett 2005]. A frente de choque é uma região de interface onde a velocidade do vento solar sofre um decréscimo abrupto devido ao encontro com a magnetosfera do planeta. Cassini pôde “ouvir” a passagem através da frente de choque utilizando o instrumento RPWS, bem como detectou vários tipos de ondas de plasma dentro e fora da magnetosfera do planeta, sendo a mais intensa detectada a aproximadamente 10 R_S .

Através dos dados coletados pela Cassini, os cientistas verificaram que o sistema de Saturno está interconectado o que significa que seus anéis, satélites e magnetosfera trocam material e influenciam as características e comportamento de uns aos outros. Como visto na seção 1.1, durante os sobrevoos da Voyager, acreditava-se que a magnetopausa se estendia até 20 R_S . Com a chegada de Cassini, os dados coletados [Achilleos *et al.* 2008] sugeriam que sua influência estava compreendida na faixa de 22 até 27 R_S .

Esse fato despertou a curiosidade dos cientistas já que a lua Titã, que possui uma densa atmosfera, atravessa a região de influência do campo magnético de Saturno, o que levou a pergunta: qual seria o resultado da interferência da magnetosfera de Saturno na ionosfera e na atmosfera neutra de Titã durante seu trânsito? A resposta é a produção de uma magnetosfera induzida na lua [Hartle 1985, Ledvina 2004]. O fenômeno de magnetosfera induzida não é exclusivo desta lua e também ocorre em outros corpos do Sistema Solar tais como Vênus, Marte e cometas. O que é interessante é o fato de que a sonda Cassini pôde verificar a ocorrência desta magnetosfera induzida no sistema de Saturno.

Antes de Cassini, as missões Pioneer e Voyager já haviam verificado a ocorrência de interação da magnetosfera de Saturno com suas luas a partir de troca de partículas [Van Allen 1980, Stone 1981, Kaiser 1980]. A Cassini corroborou essas observações e ainda mostrou que a magnetosfera interage com a lua gelada Encélado a partir da emissão de partículas de poeira gelada provenientes do fenômeno de criovulcanismo que ocorrer no interior desta lua, como será melhor detalhado na seção 4.3.

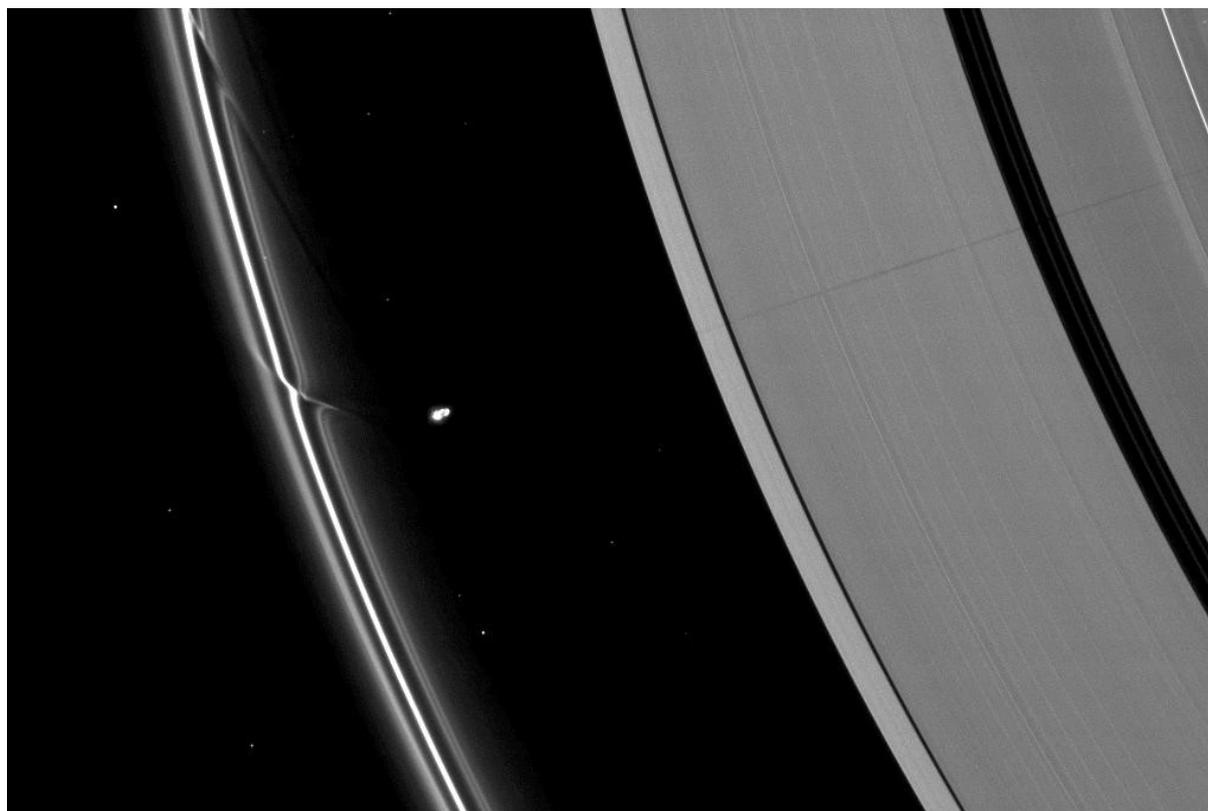


Figura 4.9 – Efeitos da passagem da lua Prometeus de Saturno pelo anel F. À direita da figura é possível ver a faixa que compreende o anel A e a divisão de Cassini. A lua Prometeus tem forma de batata e sua gravidade atrai partículas que compõem o anel F. Fonte: Equipe NASA/JPL PIA12537.

Finalmente, trataremos agora do majestoso sistema de anéis de Saturno. Com a chegada de Cassini ao sistema de Saturno, ampliamos nossa compreensão sobre a composição, dinâmica, origem e evolução dos anéis, obtivemos maior entendimento sobre os anéis difusos e interação dos anéis com a magnetosfera de Saturno e seus satélites como mostrado na Figura 4.9 onde é possível ver a interação do satélite Prometeus [Meltzer 2015], que tem formato de uma batata, com o anel F. Enquanto Prometeus “rouba” partículas dos anéis, a lua Encélado fornece partículas proveniente de seus gêiseres [Dougherty, 2018], como será discutido na seção 4.3 do presente capítulo. A discussão sobre os anéis de Saturno é extensa e foge do escopo deste trabalho. Daremos foco aos pontos chave das conquistas obtidas pela espaçonave Cassini sobre o sistema de anéis.

Os anéis de Saturno são divididos em dois grupos que exibem propriedades diferentes: o grupo dos anéis principais que compreendem os anéis A, B e C e o grupo dos anéis difusos com os anéis D, E, G e o anel Phoebe descoberto por Cassini [Vesbicer 2009]. O anel F, que se localiza entre os anéis A e G, exibe características dos dois grupos, Figura 4.10.

As partículas que formam os anéis de Saturno possuem uma larga distribuição em tamanho desde pequenos grãos de poeira até largas montanhas [Colwell *et al.*, 2009]. Através de Cassini, se descobriu bastante interação entre os anéis e os satélites de Saturno, como o que ocorre em Encélado que provém a maior parte do material do anel E a partir de jatos de água que emanam desta lua.



Figura 4.10 – Concepção artística dos anéis de Saturno em interação com algumas de suas luas. Note a interação de Prometeus e Pandora com o anel F e a localização de Encélado na região mais densa do difuso anel E. Fonte: NASA/JPL PIA03550

As hipóteses de formação dos anéis levam em consideração o conceito de limite de Roche. Esse limite é definido como sendo a menor distância que um satélite pode se aproximar do centro de um planeta e mantê-lo íntegro devido à ação de sua própria força gravitacional [Kepler, 2017 e Carrol, 2017]. Após esse limite, o satélite se despedaça por ação de forças de maré. Para Saturno, o limite de Roche é de 147.000 km. Todos os anéis da Figura 4.10 estão compreendidos dentro deste limite. A título de curiosidade, o limite de Roche da Terra é de 18.500 km. Se a nossa Lua se aproximasse de uma distância inferior a essa, ela seria destruída por ação de forças de maré e a Terra seria dotada de anéis assim como Saturno. Algumas teorias de formação dos anéis de Saturno supõem que o planeta tenha sido bombardeado por meteoroides e que alguns satélites do planeta se aproximaram demais de Saturno ao ponto de passar o limite de Roche durante o período de formação do sistema saturnino. Embora essa teoria seja amplamente aceita, ela não explica a ocorrência de alguns anéis difusos fora do limite de Roche. Além disso, a história de formação dos anéis não é a mesma para todos os anéis. O que se descobriu com Cassini foi que o anel B é formado por material muito massivo, mais até do que foi estimado pela sonda Voyager o que sugere uma origem mais primordial enquanto que os anéis C, D e A foram formados posteriormente por migração de cometas e satélites para dentro do limite de Roche [Meltzer, 2015]. Em aproximadamente 300 milhões de anos os anéis de Saturno desaparecerão, pois, o material que os compõe está sendo gradualmente depositado sobre o planeta e, assim como outros planetas gasosos do Sistema Solar, Saturno restará apenas com os anéis difusos.

Os anéis difusos estão associados às pequenas luas de Saturno como Janus, Epimetheus, Pallene, Methone e Anthe. Alguns fenômenos bastante interessantes ocorrem nos anéis difusos. São processos de plasma de poeira em que grãos de poeira se comportam como detritos de colisão. Como por exemplo, no anel difuso G, as partículas de poeira são influenciadas pela radiação solar e são esculpidas estruturas periódicas, bem como ocorre com o anel D. Desta forma, os anéis difusos foram um excelente laboratório para investigar os fenômenos relacionados com a poeira de plasma.

Vale notar que fenômenos de poeira de plasma também ocorrem no anel B nos assim chamados *spokes*, que são marcas aproximadamente radiais e intermitentes que são produzidas por pequenas partículas de poeira carregadas que se encontram elevadas do corpo do anel devido à repulsão eletrostática [Horányi *et al.* 2009]. A necessidade de explicar como e porque que os *spokes* ocorriam levaram o surgimento do campo de pesquisa chamado plasma de poeira, outra descoberta da missão Cassini-Huygens. Uma ideia da formação dos *spokes* é a

formação de avalanches induzidas por impactos entre pequenas partículas de poeira de plasma [Tagger *et al.* 1991, Yaroshenko *et al.* 2008, Hamilton 2006].

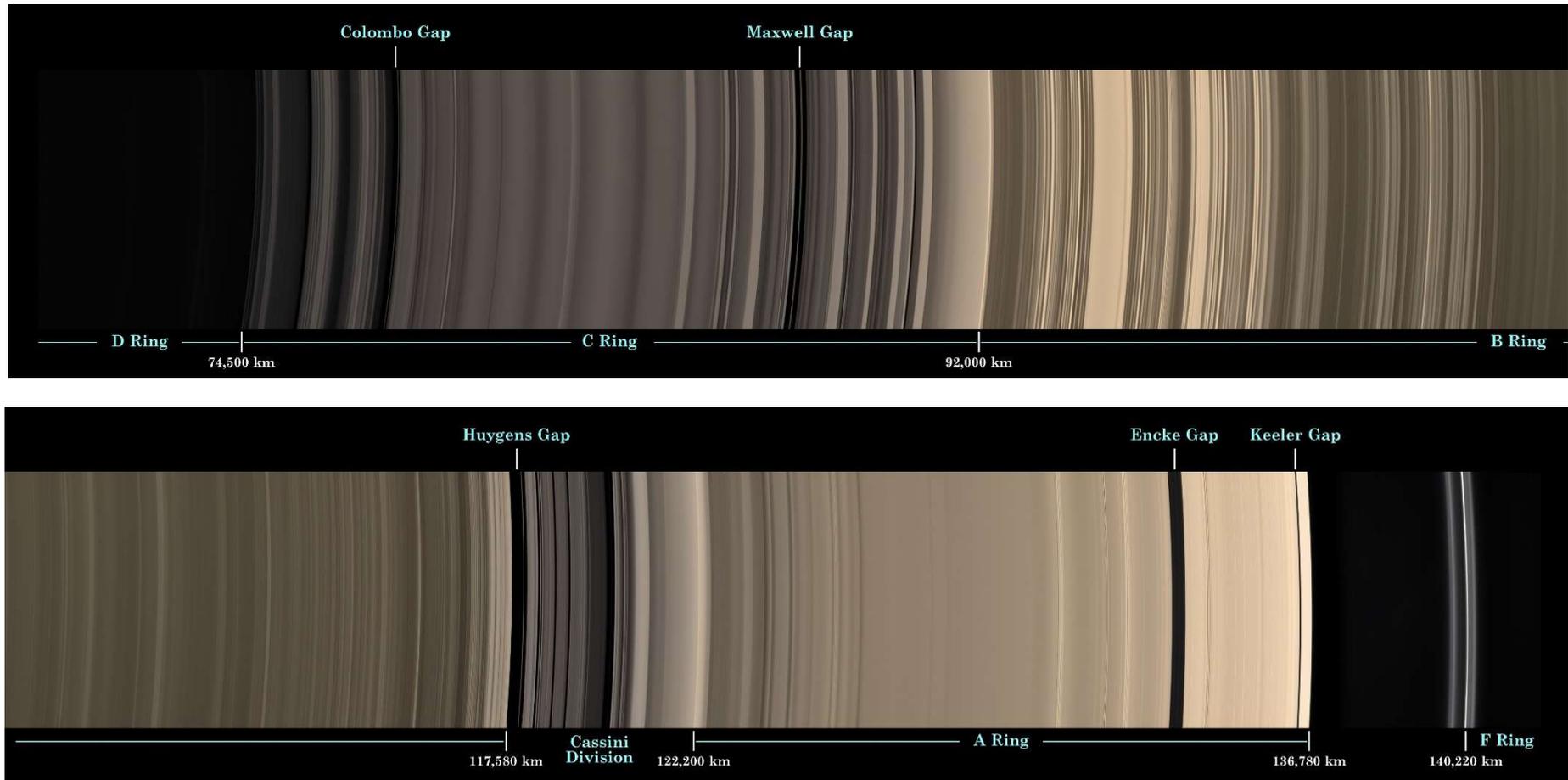


Figura 4.11 – Mosaico colorido dos anéis de Saturno (da esquerda para direita D, C, B, A e F) obtidos pelo equipamento ISS da Cassini em 2007. Os *gaps* são separações pequenas dentro dos anéis enquanto que as divisões são separações largas entre os anéis. As distâncias são medidas em relação ao centro do planeta. Fonte: NASA/JPL.

A seguir, apresentaremos as descobertas obtidas pela sonda Cassini-Huygens sobre a maior lua do sistema de Saturno: Titã.

4.2 – Titã Após Cassini

Como visto na seção 1.2, a maior lua de Saturno, Titã, apresenta uma atmosfera espessa o que dificultava sua investigação a partir de instrumentos localizados na Terra. Entretanto, com a Cassini e seus instrumentos foi possível obter informações inimagináveis a partir de um orbitador no sistema de Saturno, mais perto do que qualquer outro instrumento construído pelo homem. Imagine poder investigar esta lua por uma sonda localizada no próprio satélite. Tal feito foi realizado pela sonda europeia Huygens e neste capítulo será discutido os principais resultados obtidos por essa missão audaciosa.

Esse foi um dos aspectos mais interessantes da missão Cassini: o fato de que sua sonda Huygens seria lançada em direção a Titã para obter dados enquanto estivesse mergulhando dentro de sua atmosfera densa para revelar sua superfície e toda física escondida por debaixo de suas nuvens de hidrocarbonetos, Figura 4.12.

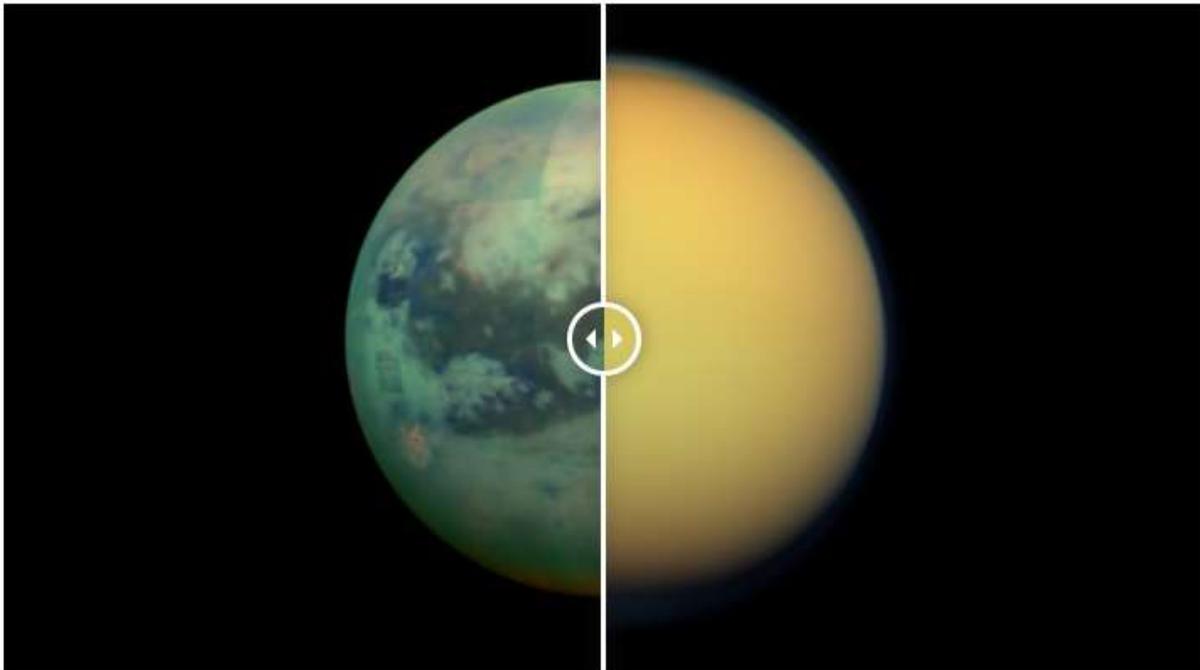


Figura 4.12 – Imagem de Titã obtida pelo instrumento VIMS da Cassini revelando sua superfície sobreposta à imagem da lua obtida pelo instrumento ISS. Fonte: NASA/JPL.

Antes da chegada de Cassini, tudo que se conhecia sobre Titã era seu tamanho e que sua atmosfera densa era rica em nitrogênio. Os dados obtidos pela missão Cassini-Huygens revelaram que Titã possui mares e lagos de metano e etano líquidos que são reabastecidos por chuvas que precipitam de nuvens de hidrocarbonetos. Além disso, a missão revelou que abaixo da superfície de Titã existe um oceano líquido que contém água e amônia, que são indicativos de que possivelmente há vida neste satélite. Algo meramente especulativo, mas que desperta a curiosidade dos cientistas planetários.

Durante a descida da sonda Huygens pela densa atmosfera de Titã, o instrumento DISR foi importante para determinar as propriedades de espalhamento e absorção da névoa de Titã como função da altitude para que esses dados pudessem ser utilizados para modelagem dos sinais utilizados pelos equipamentos VIMS e ISS de Cassini para obter a maior quantidade de dados sobre a superfície deste satélite como a Figura 4.13, que mostra detalhes geológicos de Titã bem como é possível ver rios e afluentes. Entretanto, devido às baixas temperaturas da lua, esses rios não são constituídos de água, mas sim de hidrocarbonetos [Lorenz, 2008].

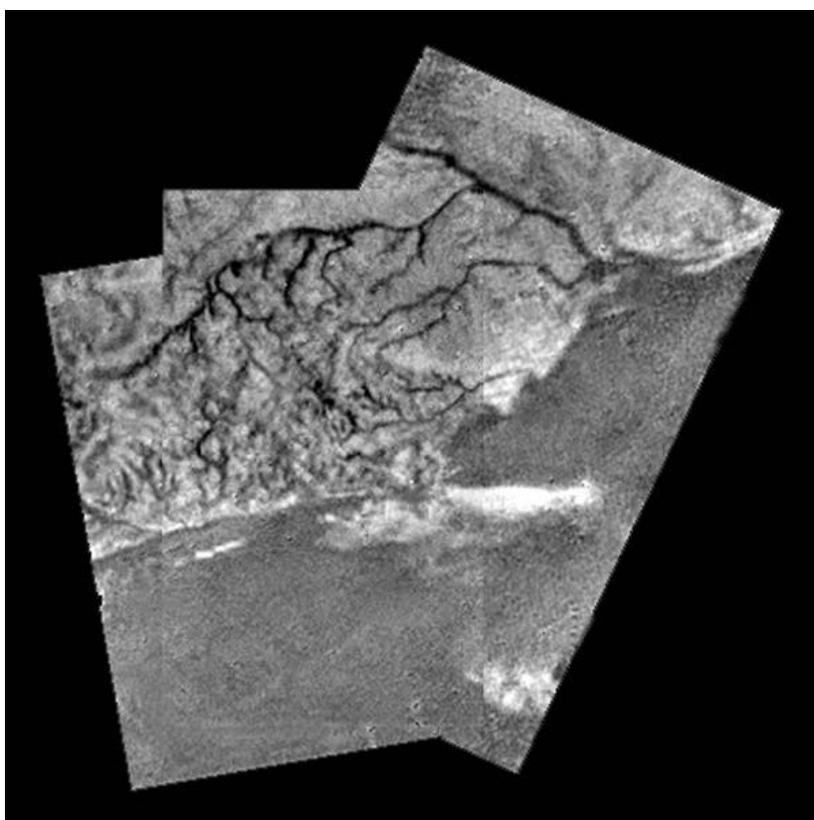


Figura 4.13 – Mosaico de canal de rio e área de cume da superfície de Titã obtidos pela sonda europeia Huygens. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA07236

A descida da sonda Huygens foi uma surpresa devido ao fato de que os cientistas não sabiam ao certo onde a sonda iria pousar, se a aterrissagem ocorreria sobre um terreno rochoso ou se ocorreria dentro de um líquido. Por sorte, a sonda aterrissou em terreno rochoso em janeiro de 2005 e, assim, foi possível obter a primeira imagem colorida da superfície de Titã, Figura 4.14. É possível notar que algumas rochas de gelo localizadas em primeiro plano nesta figura apresentam formato levemente arredondado e se assemelham com seixos presentes aqui na Terra, indicando provavelmente que o local de aterrissagem foi no passado um rio de hidrocarbonetos [Lorenz, 2008].

Durante a descida, a sonda europeia coletou dados da atmosfera densa e espessa de Titã para melhor compreensão de sua atmosfera bem como fez imagens de sua superfície. Além de “sobreviver” à aterrissagem, a sonda continuou a enviar dados para Cassini após algumas horas até que a energia de suas baterias fosse esgotada.

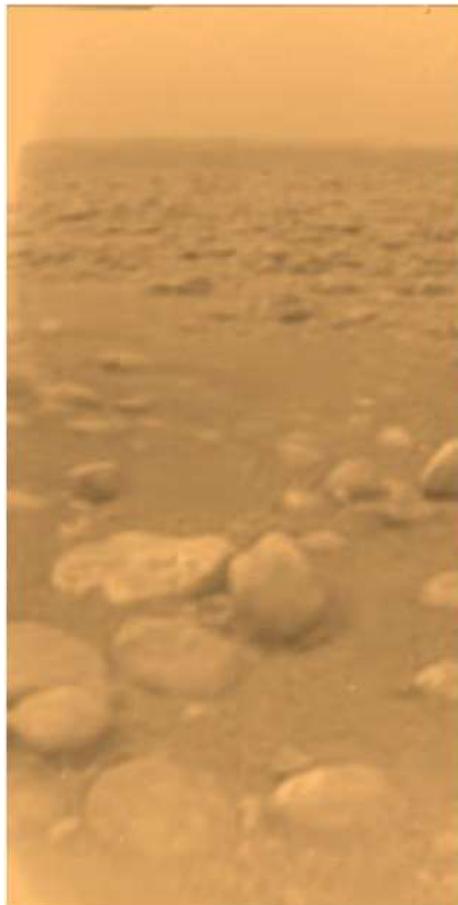


Figura 4.14 – Primeira fotografia colorida da superfície de Titã. Note a presença de rochas em formato levemente arredondado como seixos. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA07232

Enquanto a sonda Huygens mergulhava a atmosfera de Titã, a nave Cassini realizava sobrevoos sobre a lua e outros corpos do sistema de Saturno. Em um de seus sobrevoos o instrumento VIMS obteve a imagem da Figura 4.15. Essa imagem mostra a reflexão da luz solar na faixa do infravermelho que incidiu em um lago de hidrocarboneto de Titã confirmando, assim, que haviam lagos de metano e etano líquidos no hemisfério norte desta lua gelada [Lorenz, 2008]. A concentração de lagos e oceanos de hidrocarbonetos é maior no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Vale notar que atmosfera densa e espessa de Titã absorve e espalha a maior parte dos comprimentos de onda da luz, incluindo o espectro visível. Entretanto, uma pequena parcela desta radiação pôde escapar das nuvens o que permitiu a obtenção desta imagem [Jaumann *et al.* 2009].

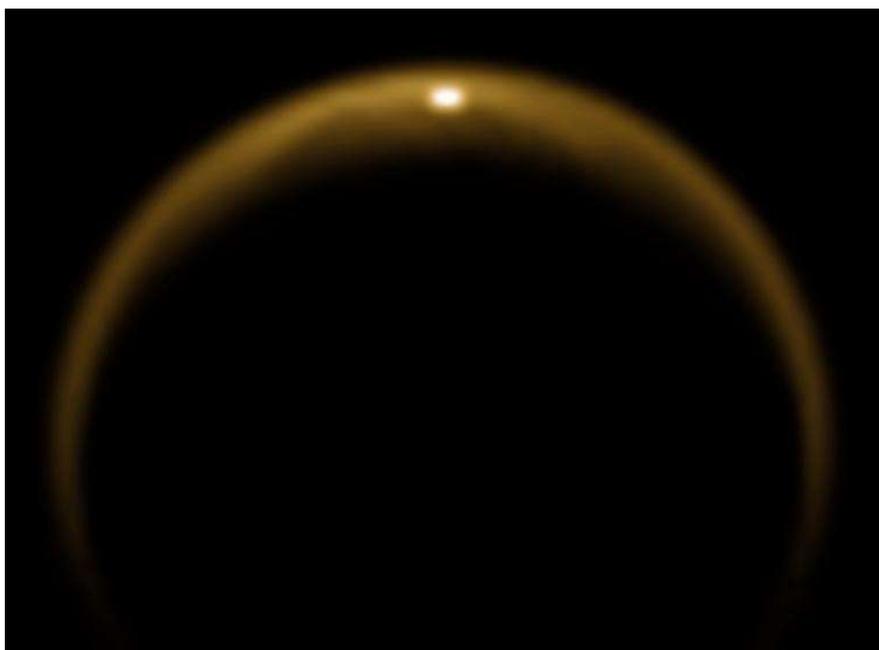


Figura 4.15 – Reflexo da luz solar incidente na superfície de um lago de hidrocarboneto localizado no hemisfério norte de Titã. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA12481

Outra constatação de que Titã possui lagos e oceanos de material líquido foi obtido a partir dos dados obtidos pelo instrumento RADAR da Cassini. A Figura 4.16 mostra uma imagem em cores falsas de lagos de hidrocarbonetos. Essa foi uma das primeiras imagens divulgadas pela NASA sobre o que a sonda Cassini “viu” ao efetuar sobrevoos próximos a maior lua de Saturno. Nesta imagem, é possível ver lagos de diversos tamanhos distribuídos pelo terreno de Titã localizado a aproximadamente 80° do hemisfério norte.

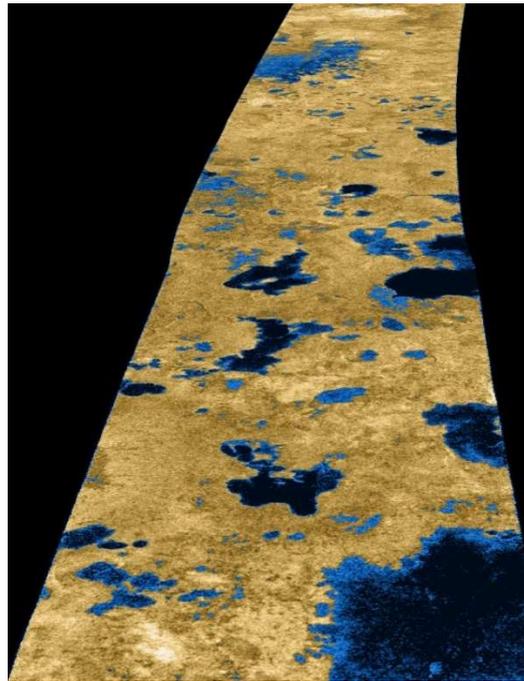


Figura 4.16 – Imagem em cores falsas da superfície do hemisfério norte de Titã onde é possível observar a presença de lagos de diversos tamanhos. A cor azul escura foi usada aqui para realçar a diferença entre o terreno sólido e os entornos dos lagos. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA09102

Outra imagem muito interessante obtida pelo equipamento RADAR está mostrada na Figura 4.17. Nela é possível ver caminhos fluviais que possivelmente foram percorridos por material líquido (metano e etano líquidos) a leste da encosta que foi nomeada de *Circus Maximus*.

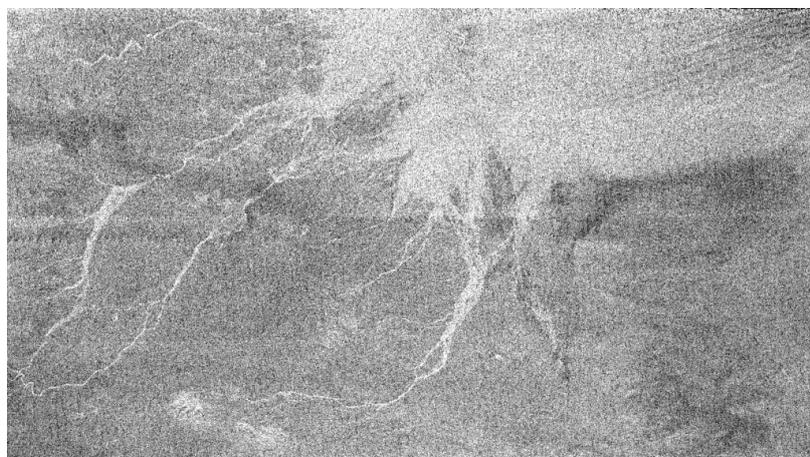


Figura 4.17 – Imagem de possíveis caminhos fluviais por onde passavam rios de hidrocarboneto em fase líquida obtida pelo equipamento RADAR da Cassini a leste da encosta conhecida como *Circus Maximus*. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA09102

Uma vez que se tornou possível “visualizar” a superfície de Titã a partir dos dados obtidos por vários instrumentos a bordo da Cassini e instalados na sonda Huygens, se constatou que Titã apresentava algumas poucas crateras o que mostra que sua superfície é recente e sofreu algum processo de renovação ao longo dos anos, o que é um forte indício de alta atividade geológica e uma superfície jovem. Portanto, as crateras de impacto foram apagadas devido a atividades tais como erosão, criovulcanismo e sedimentação de partículas de hidrocarbonetos em suspensão na atmosfera. A partir dos dados obtidos pelo instrumento RADAR da Cassini, foi possível realizar o mapeamento de algumas dessas crateras de impacto, e assim, estimar a idade da superfície desta lua em algo em torno de 200 milhões de anos a 1 bilhão de anos [Lopes, 2021]. Outra descoberta obtida pela sonda Cassini em relação à superfície de Titã foi a observação de dunas, de planícies, de montanhas e estruturas em formas de labirintos como constatado na Figura 4.18. Nesta imagem, que foi obtida a partir da composição de dados obtidos por vários instrumentos como RADAR, ISS e VIMS, é possível observar a localização de onde as estruturas geológicas se distribuem pela superfície de Titã.

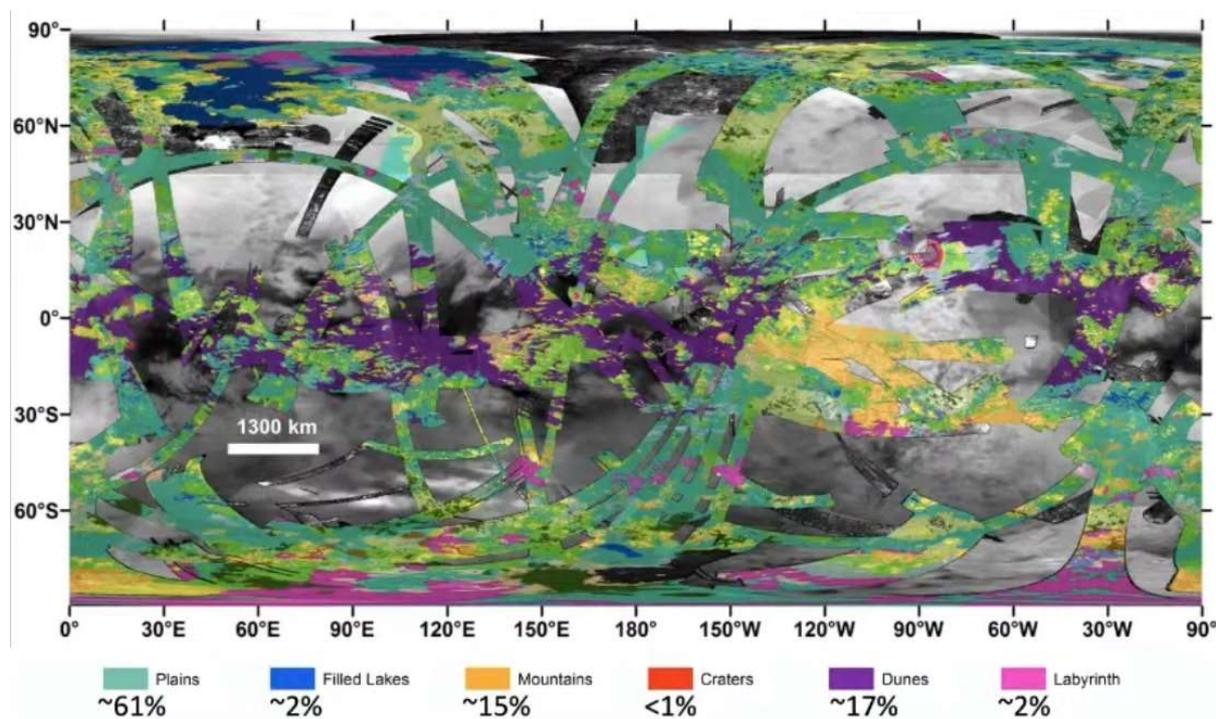


Figura 4.18 – Mosaico das imagens obtidas pelos instrumentos ISS, VIMS e RADAR da Cassini mostrando as regiões de concentração de estruturas geológicas da superfície de Titã. As tiras foram obtidas durante vários sobrevoos da nave Cassini pela lua. Fonte: NASA/JPL

Além disso, dados de anos de investigação de Titã obtidos pelo orbitador Cassini e pela sonda Huygens revelaram que o metano passa por ciclos semelhante ao ciclo da água na Terra. Existem nuvens de hidrocarbonetos que precipitam em chuvas, rios, lagos, canais fluviais e oceanos de hidrocarbonetos. A geologia desta lua apresenta estruturas de planícies e dunas, Figura 4.19. Há atividade atmosférica e ventos que sedimentam partículas de gelo e de poeira. Além de montanhas e crateras de criovulcanismo.

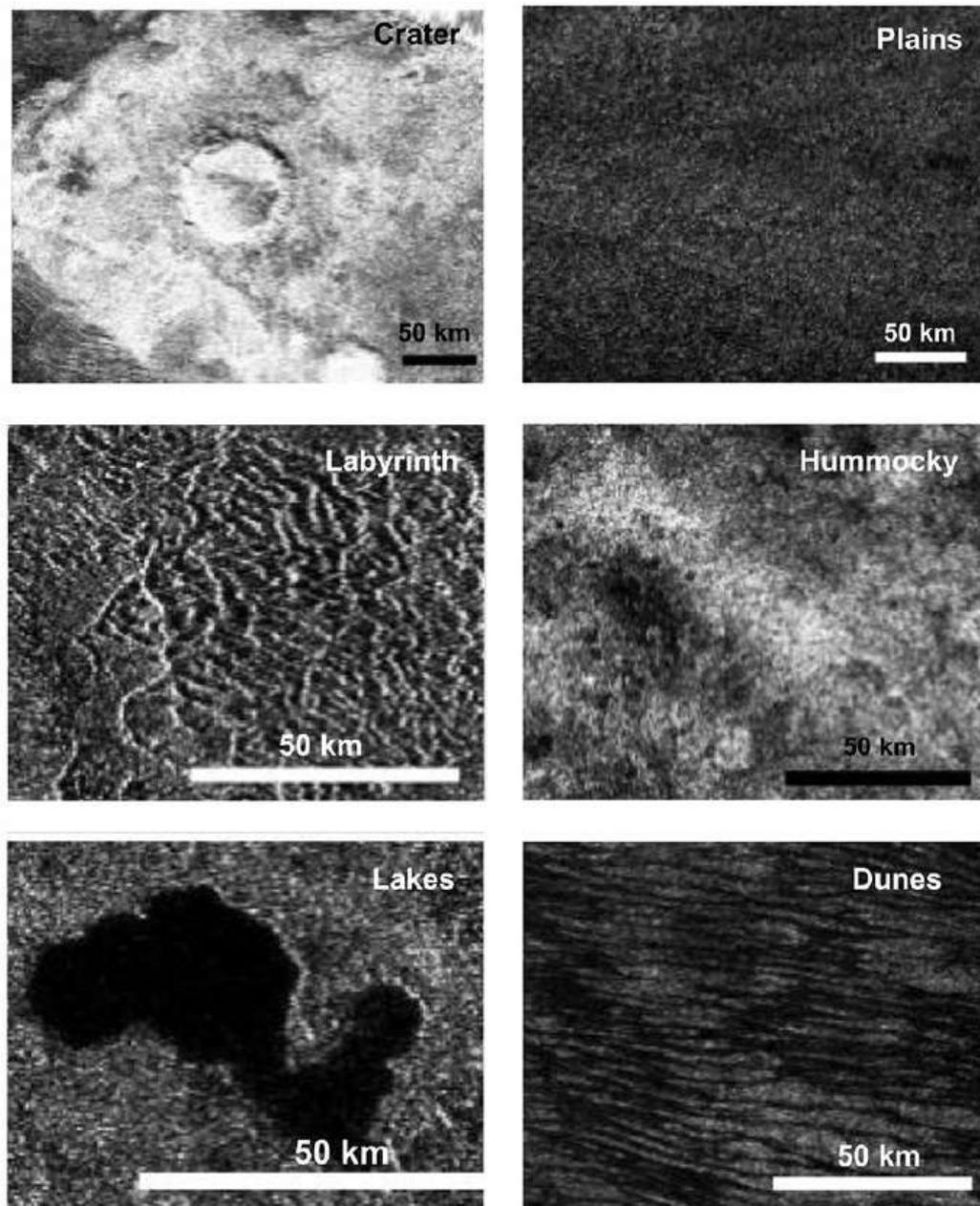


Figura 4.19 – Imagens de crateras, planícies, labirintos, hummocky, lagos e dunas localizados sobre a superfície de Titã, revelando que a lua apresenta muita atividade geológica. Fonte: Lopes *et al.* 2020.

Após a missão Cassini, há indícios de que Titã esconda um oceano líquido debaixo de sua superfície composto principalmente por água e amônia. Sabemos também que o satélite possui lagos e mares de hidrocarbonetos líquidos localizados próximo aos seus polos e que possui vastas regiões áridas ricas em dunas de hidrocarbonetos.

A seguir, as descobertas obtidas pela Cassini em relação ao satélite Encélado serão abordados na próxima sessão.

4.3 – Encélado Pós-Cassini

Decodificar os mistérios de Encélado foi uma das várias prioridades da missão Cassini que foi enviada a Saturno, que alcançou a órbita deste planeta em 2004. Rapidamente foi revelado que Encélado é um mundo ativo com jatos de gêiseres no seu polo sul [SCHENK, 2018]. As somas das descobertas obtidas formaram as correntes de pensamento sobre a origem de Encélado e permitiu a caracterização de sua superfície geoquímica e seu oceano localizado abaixo de sua superfície. Medidas químicas e de propriedades do bulk alimentaram modelos de estado da arte sobre seu interior e seu complexo efeito de maré-térmico que esta lua experimenta e permitiu construir cenários nos quais oceanos sob sua superfície tem bastante tempo de existência e provavelmente constitui ingredientes necessários para a formação de vida.

Alguns fatos curiosos surgem quando voltamos nossos olhos para Encélado. Cientistas planetários já acreditaram que esta lua seria muito pequena para apresentar atividade geológica até mesmo pelo fato de que seu calor interior deveria ter sido perdido para o frio do espaço a bilhões de anos atrás [Meltzer, 2015]. Como visto na seção 1.3, as sondas Voyagers possibilitaram a constatação de que a superfície de Encélado apresentava poucas crateras o que sugeria que o satélite experimentava algum tipo de renovação que ocorresse em sua superfície. Essas eram algumas pistas de que havia alguma atividade geológica acontecendo ali.

Com a chegada de Cassini ao sistema de Saturno, os cientistas puderam perceber que de fato Encélado era muito brilhante e quase todas as regiões de sua superfície apresentavam alto albedo sugerindo que a superfície do satélite fosse recoberta por uma camada de neve dando indícios de que esta lua fosse revestida de material fresco [Spencer *et al.* 2006]. Essa é uma característica de superfície jovem. Outro fator que corrobora esta evidência é o fato de que

a superfície de Encélado tem poucas crateras. Quanto mais crateras, mais velha é a superfície do corpo celeste.

Outras surpresas que intrigavam os cientistas foram os dados obtidos pelo instrumento CIRS da Cassini, Figura 4.20, que obteve o primeiro mapa térmico de Encélado. Após os primeiros sobrevoos de Cassini por Encélado, se especulou que o satélite apresentasse temperaturas baixas nos polos como o que ocorre aqui na Terra e em outros corpos celestes devido à incidência oblíqua dos raios solares. Entretanto, o que se observou foi que o polo sul deste satélite apresenta temperaturas mais altas o que sugere que ocorra algum mecanismo de aquecimento em seu interior [Meltzer, 2015].

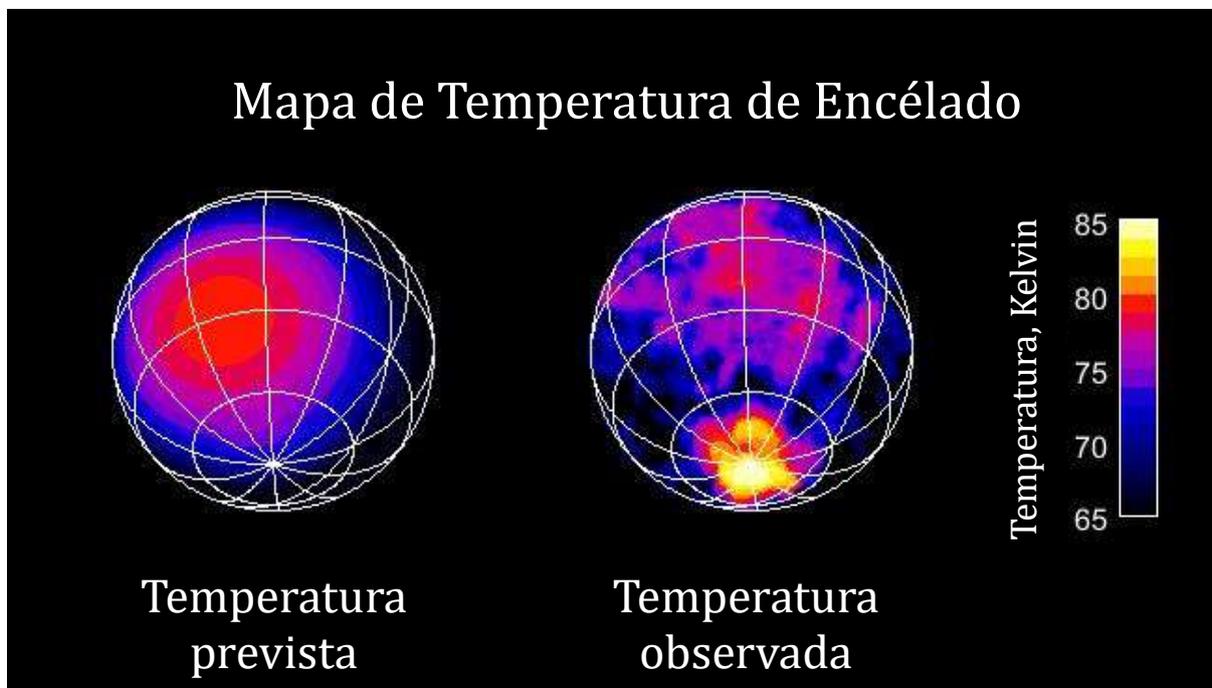


Figura 4.20 - Mapa de temperatura de Encélado obtido pelo CIRS da Cassini. O painel à esquerda mostra a temperatura prevista para o polo sul enquanto que o painel à direita mostra a temperatura observada. Imagem adaptada de: NASA/JPL/GSFC. PIA06432

Os sobrevoos de Cassini por Encélado diminuíram suas altitudes de 1000 km para 168 km acima da superfície desta lua. Nessas oportunidades, se verificou que havia a ejeção de material enceladeano que emanava do polo sul deste satélite que foram analisados pelo CDA da Cassini que por sua vez detectou grão de gelo [Postberg *et al.*, 2018]. Ao mesmo tempo, a equipe UVIS realizou a primeira detecção de atmosfera em Encélado quando o satélite atravessou em frente a estrela Gamma Orionis [Hansen *et al.* 2006]. Nesta ocasião, foi possível

verificar que a luz da estrela diminuiu e seu espectro se modificou ao atravessar a atmosfera da lua, indicando a presença de vapor d'água. Outras ocultações foram investigadas pelo UVIS tais como a da estrela Zeta Orionis, de Épsilon Orionis, e do Sol e todas detectaram de maneira inequívoca a presença de água.

O polo sul de Encélado brilha, aparentemente devido às fontes de calor localizadas nas Listras de Tigre que são fissuras paralelas manchadas com material orgânico de coloração azulada, Figura 4.21. É através dessas fissuras que vapor d'água, gelo e partículas de poeira são lançadas para fora do satélite [Porco *et al.*, 2014].

Encélado desempenha um papel importante na conexão com o anel E de Saturno e sua magnetosfera. O que é mais impressionante é o fato do anel E ser mais denso justamente na órbita de Encélado o que sugere que este satélite seja sua maior fonte de partículas, Figura 4.10. O equipamento CDA da Cassini observou que pequenos grãos de gelo provenientes de erupções do polo sul estavam reabastecendo o anel E, durante o sobrevoo a 168 km acima da superfície de Encélado o que possibilitou medir diretamente as partículas emanadas pelas Listras de Tigre. O que se constatou foi que as partículas mais lentas não eram capazes de vencer a atração gravitacional com a lua, mas as partículas velozes tinham energia suficiente para escapar e compor o anel E [Spahn *et al.*, 2006].

Durante o sobrevoo de maior aproximação da Cassini em direção a Encélado, os instrumentos CDA e INMS detectaram ao mesmo tempo um aumento abrupto na taxa de contagem de partículas juntamente com vapor d'água. Em sobrevoos anteriores, os instrumentos UVIS e MAG também detectaram a formação de uma pluma (Figura 4.21). Essas observações só podem ser compreendidas se gás e poeira estiverem sendo ejetadas para fora de Encélado, na região do polo sul do satélite [Spahn *et al.*, 2006]. Impactos com micrometeoroides também podem lançar ao espaço partículas de gás e poeira e suas velocidades são condizentes com as velocidades das partículas detectadas pelos instrumentos da Cassini que variam de alguns km/s até dezenas de km/s. Contudo, vale ressaltar que as partículas detectadas acima da região do polo sul apresentavam temperaturas relativamente altas imediatamente acima das fissuras conhecidas com Listras de Tigre, o que suporta a teoria de que ocorra o fenômeno de criovulcanismo no interior desta lua [Spahn *et al.*, 2006].

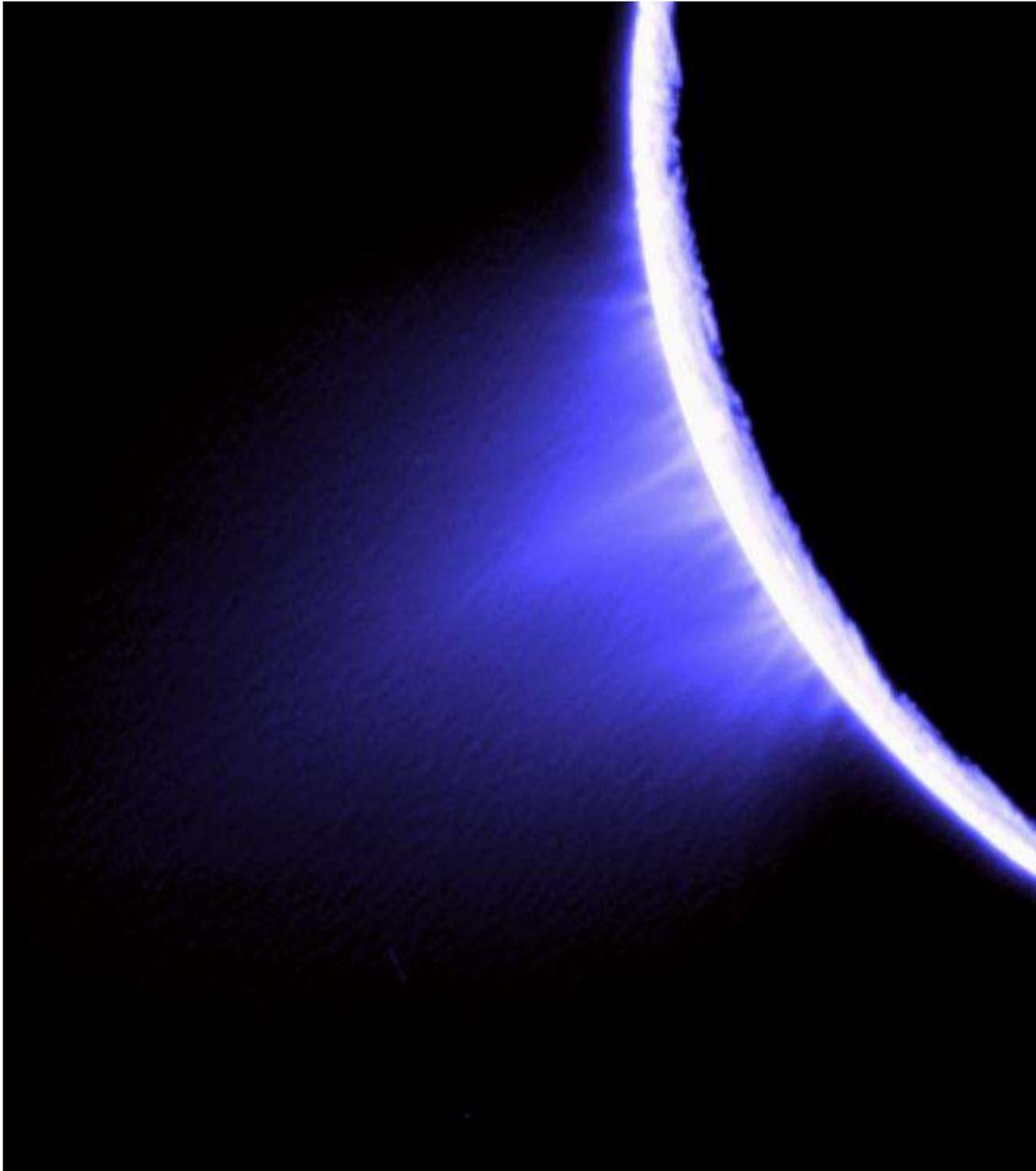


Figura 4.21 – Imagem em cores falsas dos jatos de vapor d'água localizados no polo sul de Encélado que jorram matéria para o espaço em forma de pluma. Fonte: NASA/JPL. PIA08386

O instrumento CDA da Cassini analisou a constituição das partículas que constituem o anel E e que são presumidamente provenientes de Encélado. O resultado foi surpreendente: se detectou sais de sódio [Postberg *et al.*, 2018]. A maneira mais provável de incorporação de sais nas moléculas de grão de gelo é a partir de minérios localizados no interior de Encélado e que foram depositados no fundo de camadas líquidas localizadas abaixo da superfície desta lua. Deste modo, os inferiram a existência de um enorme reservatório de água líquida, talvez até um oceano, por debaixo da superfície de Encélado [Brown 2009].

A suposição de que haja um oceano de água líquida abaixo da superfície de Encélado tem algumas implicações tais como um ambiente adequado para a evolução de elementos precursores que poderiam originar vida, uma vez que os instrumentos da Cassini detectaram compostos orgânicos nas plumas desta lua. Além disso, a energia térmica que emana do polo sul poderia ser um ingrediente a mais para gerar vida neste ambiente. O que ainda não se sabe é a forma deste reservatório de água. Se existem bolsões localizados de água ou se de fato existe um oceano que envolve parte ou todo satélite e que esteja em contato com um núcleo rochoso. Outra incógnita é o mecanismo de aquecimento que fornece energia térmica no polo sul. Alguns modelos de mecanismos de aquecimento foram propostos, dentre eles forças de maré entre a lua e Saturno e libração [Hemingway *et al.* 2018].

Outra descoberta fantástica de Cassini foi sobre o acoplamento entre Encélado e o anel A⁵. Vimos que esta lua é responsável por bastante material que compõe o anel E. Entretanto, Cassini descobriu que boa parte da massa de Encélado também se deposita na parte exterior do anel A localizado a mais de 100.000 km desta lua [Farrel, 2008]. O mecanismo de transporte de partículas de gelo por uma distância tão longa seria devido a ação de campos magnéticos que fornece o caminho para o acoplamento entre os dois corpos. As partículas de gelo quando são expelidas pelas Listras de Tigre podem eventualmente colidir com outros corpos e sofrer processos de ionização e eletrização ou até mesmo serem ionizadas pela luz solar formando assim um gás de plasma de partículas eletricamente carregadas prontas para serem carregadas pelos intensos campos magnéticos presentes no interior da magnetosfera de Saturno. As partículas que são aceleradas pelos campos magnéticos e podem atingir velocidades altíssimas ao ponto de se tornarem extremamente energéticas e são, então, absorvidas pelo anel A. Essa é uma forte evidência de que os anéis de Saturno funcionam como um escudo protetor do próprio planeta e do ambiente interplanetário uma vez que os anéis atuam mitigando a radiação ao redor do planeta ao absorver partículas de baixa e alta energia [Farrel *et al.* 2008]

O acoplamento de Encélado com os anéis alimenta o plasma de poeira no sistema de Saturno. Por esse motivo, vários laboratórios de plasma, principalmente nos EUA, conduzem experimentos com este tipo de plasma devido não só a sua importância para o sistema saturnino mas também para a formação dos sistemas planetários.

⁵ <https://www.universetoday.com/12710/enceladus-is-supplying-ice-to-saturns-a-ring/> . Acessado em: 15/11/2021.

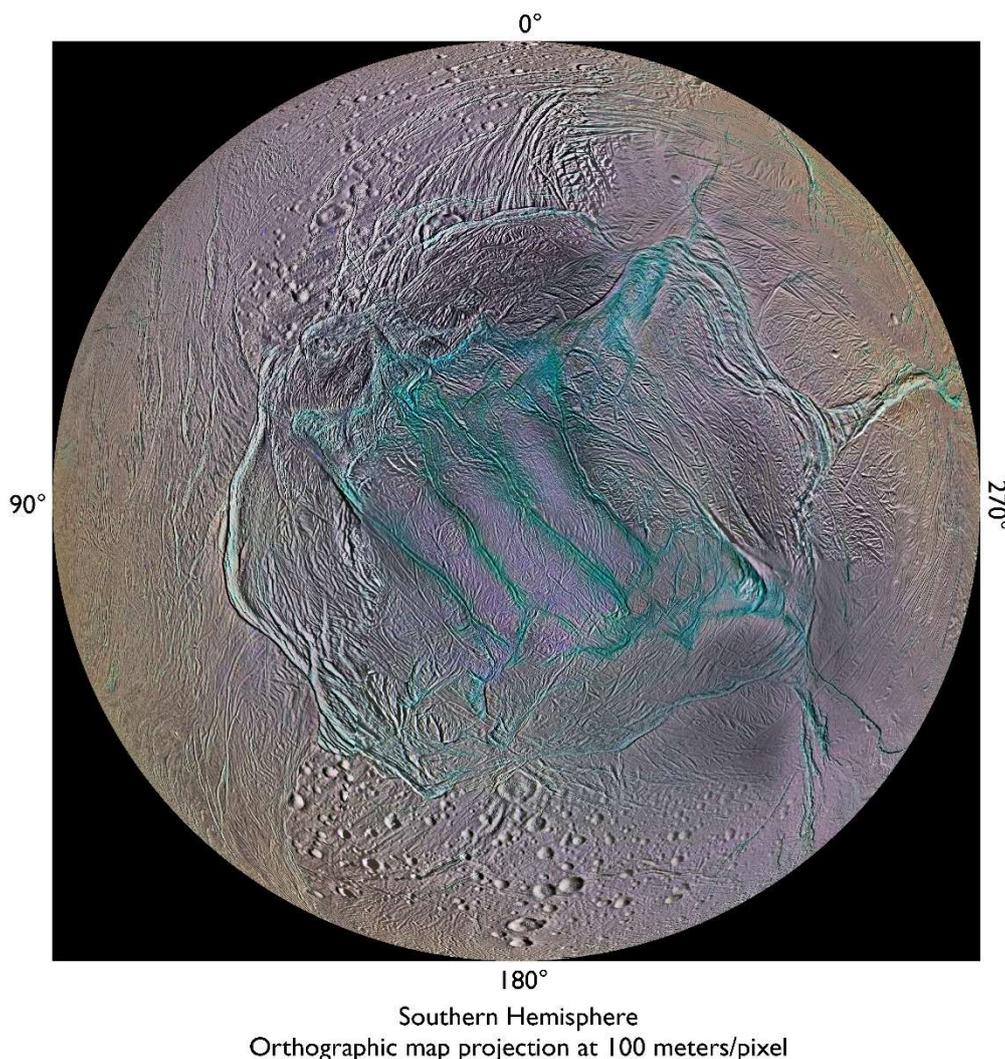


Figura 4.22 - Mapa do polo sul de Encélado obtido pela sonda Cassini onde é possível identificar a região mais ativa desta lua gelada conhecida como listras de tigre. Crédito da imagem: NASA/JPL/Caltech. PIA18435

As partículas expelidas pelos gêiseres de Encélado interagem com a magnetosfera de Saturno de uma forma bastante interessante. Antes de serem ejetadas, essas partículas podem adquirir carga elétrica através de vários mecanismos como atrito com outras partículas, fotoionização, colisão com elétrons, dentre outros. A pluma de Encélado é constituída tanto por partículas neutras como por íons e essas partículas influenciam a magnetosfera de Saturno em características tais como densidade de massa e padrões de fluxo [Kilveson *et al.* 2006]. As linhas de campo magnético se comportam como se estivessem congeladas no plasma. Quando a magnetosfera e seu plasma contorna Encélado, o que se observa é que as linhas de campo parecem desviar do corpo celeste provocando perturbações no ambiente magnético. Foram essas perturbações que foram detectadas pelo instrumento MAG da Cassini e que possibilitou

o mapeamento da pluma de vapor d'água e partículas de poeira que emanam desta pequena lua (Figura 4.23).

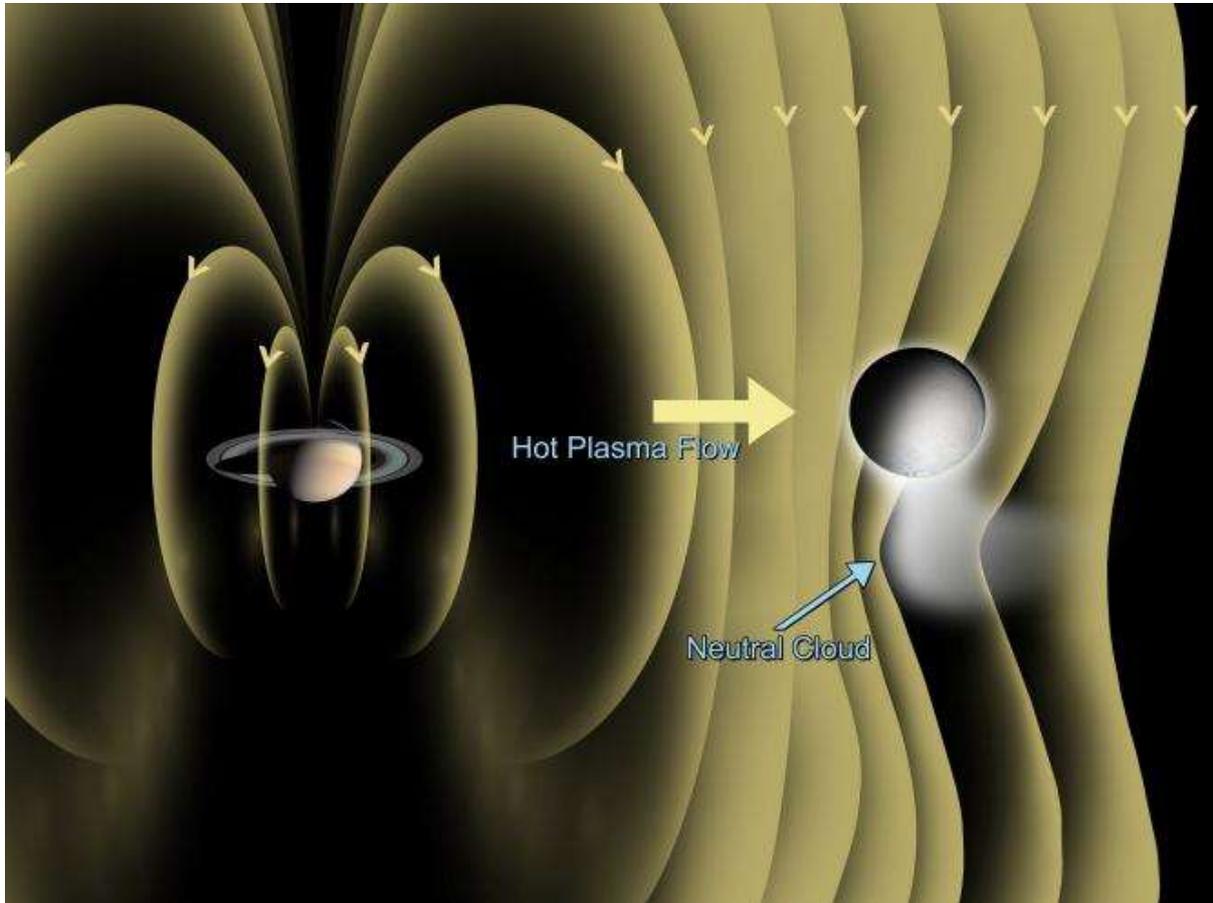


Figura 4.23 – Esquema da interação entre a magnetosfera de Saturno e Encélado. O plasma é perturbado pela presença da pluma proveniente do polo sul do satélite. Crédito da imagem: Dougherty *et al.* 2006.

Definitivamente, a missão Cassini-Huygens alterou fundamentalmente nossos conceitos sobre onde a vida pode ser encontrada em nosso Sistema Solar e além. Os oceanos de Encélado podem conter os ingredientes para vida microbiana e moléculas orgânicas. Os efeitos de maré, devido à presença de Saturno, mantêm oceanos líquidos por debaixo da superfície gelada dessa lua e permite que ela seja um abrigo para vida extraterrena. Isso abre a janela e possibilidades de se encontrar vida além do planeta Terra.

Considerações Finais

As medidas coletadas por Cassini revolucionaram nossa compreensão sobre o sistema de Saturno. Os gigantes gasosos podem ser considerados como sendo miniaturas do próprio Sistema Solar e Cassini mostrou isso ao desvendar alguns mistérios que perturbavam os cientistas. A própria missão Cassini é uma grande conquista por si só. Alcançar o sistema saturnino após quase 7 anos viajando pelo Sistema Solar, impulsionado pelos campos gravitacionais de alguns planetas e finalmente ingressando na órbita do “Senhor dos anéis” é um feito espetacular.

Ao chegar no sistema de Saturno e se tornar a primeira espaçonave a orbitar o planeta anelado, Cassini começou a realizar sobrevoos pelas luas geladas e deu início ao lançamento da sonda Huygens em direção a Titã. Após vários sobrevoos, a espaçonave conseguiu obter informações valiosas sobre a superfície da maior lua de Saturno, até então velada pela atmosfera espessa de nuvens de hidrocarboneto.

Os instrumentos RADAR e VIMS da nave Cassini foram essenciais na obtenção de mapas geológicos da superfície de Titã. Foram observados dunas, rios, lagos, oceanos, colinas, montanhas, crateras e planícies, revelando que a geologia de Titã apresenta muita semelhança com a geologia da Terra. Entretanto, uma diferença crucial: os rios, os lagos e os oceanos em Titã não poderiam ser formados por água líquida devido às baixas temperaturas do satélite. Outras substâncias fazem o papel da água em Titã: são os hidrocarbonetos metano e etano que podem ser encontrados nos três estados da matéria. Esses hidrocarbonetos sofrem transformações semelhantes às que ocorrem no ciclo da água aqui na Terra. Hidrocarbonetos compõem as nuvens da atmosfera de Titã, precipitam em forma líquida para preencher os rios, lagos e oceanos. Partículas de poeira e gelo de hidrocarbonetos em suspensão na atmosfera se depositam nas planícies de Titã proporcionando o surgimento de estruturas fantásticas na superfície deste satélite.

Em seus vários sobrevoos por Titã, os instrumentos de campo e de partículas de Cassini detectaram amônia e água. Essas partículas podem ter sido expelidas através de atividades de criovulcanismo e, assim, levantou-se a hipótese de que o satélite esconde um enorme oceano de água líquida por debaixo de sua superfície gelada. Forças de maré podem ser responsáveis por aquecer o interior de Titã e proporcionar os ingredientes necessários para haver água líquida no interior da lua.

A sonda europeia Huygens, ao penetrar na atmosfera de Titã e aterrissar com segurança na superfície desta lua, se tornou a primeira espaçonave a realizar este feito em ambiente alienígena. Durante a descida, a sonda coletou partículas e produziu imagens fantástica da superfície desta lua. Um feito impressionante!

Enquanto Huygens efetuava sua descida em Titã, Cassini realizava sobrevoos pelas outras luas de Saturno e, ao sobrevoar Encélado, as imagens obtidas pelos instrumentos de sensoriamento remoto ISS, CIRS e VIMS revelaram que este satélite tinha uma superfície com poucas crateras de impacto o que revelava ser um indicativo de atividade geológica nesta lua e seu polo Sul apresentava as maiores temperaturas registradas na lua. Além disso, os instrumentos de campo e de partícula foram capazes de detectar a presença de moléculas de água, amônia e metano que eram expelidas por enormes gêiseres localizadas no polo sul do satélite e de onde era possível ver uma enorme pluma. Essas pistas revelaram que a superfície desta lua também apresenta criovulcanismo e possivelmente esconde um enorme oceano de água líquida por debaixo de sua crosta. Onde tem água, pode haver vida!

O instrumento CDA da Cassini pôde caracterizar as partículas e rastreá-las até os anéis E e A de Saturno além de revelar que o campo magnético deste planeta era ligeiramente perturbado ao redor de Encélado revelando um acoplamento entre o planeta, seus anéis e suas luas, não somente Encélado, mas também aquelas cujas órbitas atravessam os anéis perturbando-os e provocando fenômenos de plasma tais como ondas de plasma que se propagavam pelos anéis.

Podemos levantar algumas características diferenças entre Titã em Encélado em relação às atividades geológicas que ocorrem ou ocorreram nessas luas. Primeiro que as atividades de criovulcanismo em Titã não ocorrem mais ao contrário do que acontece em Encélado. Nesta última lua, há material sendo ejetado por enormes fissuras chamadas Listras de Tigre.

Os sobrevoos de Cassini foram essenciais na investigação de fenômenos atmosféricos que ocorrem no gigante gasoso. As correntes de jatos de ventos produzidos no polo norte do planeta apresentam uma estrutura em forma de hexágono, o que é intrigante já que as correntes de jato que ocorrem aqui na Terra são linhas abertas. Tempestades chamadas de Grande Mancha Branca varrem o planeta em latitudes próximas ao plano equador do planeta.

Campos gravitacionais intensos são produzidos no planeta devido ao movimento de íons de hidrogênio localizados no interior do planeta. Desta forma, a magnetosfera do planeta serve como um escudo protetor contra as partículas carregadas provenientes de ventos solares.

Assim como ocorre na Terra, as partículas carregadas que compõem o vento solar podem ficar aprisionadas nas linhas de campo magnético e, por sua vez, podem migrar para os polos do planeta e interagir com os elementos que constituem sua superfície proporcionando emissões de radiação de auroras polares que foram detectadas pelos instrumentos ISS, VIMS e UVIS da Cassini.

Os instrumentos MIMI, MAG e RPWS da Cassini foram importantes na determinação da estrutura da magnetosfera de Saturno, detectando correntes de anel, interação das partículas dos anéis com a magnetosfera do planeta e interações entre os anéis e as luas do planeta. Com os instrumentos que viajaram a bordo de Cassini, foi possível investigar de perto os anéis de Saturno, a principal característica do planeta que tanto chama atenção.

Cassini foi sepultada em na superfície do “Senhor dos anéis” na manobra que ficou conhecida como *Grand Finale*. Ao contrário da sonda Huygens, a espaçonave não foi esterilizada e poderia ainda carregar microorganismos da Terra. Os cientistas não poderiam arriscar que essa nave aterrissasse em alguma lua do sistema de Saturno e a contaminasse com material orgânico vivo proveniente da Terra. Se por acaso fosse detectada vida nesta lua, não haveria como saber se ela seria originária da Terra ou se de fato era extraterrestre. Deste modo, após todo combustível da espaçonave ter sido esgotado, os cientistas decidiram encerrar a missão arremessando a nave em direção à superfície de Saturno para que a nave fosse totalmente destruída.

Assim, este trabalho de conclusão de curso foi capaz de apontar algumas das conquistas obtidas pela espaçonave Cassini durante sua missão que durou quase 20 anos. Artigos científicos ainda são produzidos com os dados coletados pelos seus equipamentos. As imagens obtidas ainda surpreendem tanto o público leigo quanto os pesquisadores.

O astrofísico da NASA Carl Sagan (2019) em seu livro *best seller* intitulado “Pálido Ponto Azul” disse:

(...)já não estamos confinados em um mundo único, somos capazes de alcançar outros mundos (...). Carl Sagan – “Pálido Ponto Azul”, pp. 33.

Quando Sagan escreveu essas linhas ele se referia as espaçonaves Voyagers que foram lançadas nos anos 80. Depois delas, muitas outras missões exploratórias foram enviadas ao

espaço para dar à civilização algum vislumbre do que chamamos de quintal de casa. Cassini foi um exemplo dessas missões.

Com ela, fomos capazes de descobrir novas luas orbitando Saturno, obtivemos imagens impressionantes do planeta, de seus anéis e de suas luas geladas. Fomos capazes de detectar campos gravitacionais de sua magnetosfera e observar de dentro suas propriedades. Observamos e investigamos tempestades e outros fenômenos atmosféricos na superfície de Saturno com precisões jamais alcançadas anteriormente inclusive visualizamos auroras ocorrendo nos polos do planeta.

Com seus instrumentos de campo e de partículas, Cassini foi capaz de realizar medidas *in situ* ao realizar sobrevoos por Saturno, seus anéis e suas luas. Desta maneira, foi possível determinar a composição dos anéis, da atmosfera de Titã, da pluma do polo sul de Encélado, inclusive um novo ramo de pesquisa foi desenvolvido: o assim chamado “plasma de poeira”.

Cassini nos possibilitou reviver de maneira nostálgica um dos últimos comandos realizados pela Voyager 1 a uma posição da órbita de Netuno: o comando era direcionar suas câmeras para o quadrante de localização da Terra e fazer uma última fotografia. Motivado por aquela imagem, Sagan escreveu:

(...) olhem de novo para o ponto. É ali. É a nossa casa. Somos nós. Nesse ponto, todos aqueles que amamos, que conhecemos, de quem já ouvimos falar, todos os seres humanos que já existiram, vivem ou viveram as suas vidas. Toda a nossa mistura de alegria e sofrimento, todas as inúmeras religiões, ideologias e doutrinas econômicas, todos os caçadores e saqueadores, heróis e covardes, criadores e destruidores de civilizações, reis e camponeses, jovens casais apaixonados, pais e mães, todas as crianças, todos os inventores e exploradores, professores de moral, políticos corruptos, “superastros”, “líderes supremos”, todos os santos e pecadores da história da nossa espécie, ali – num grão de poeira suspenso num raio de sol. Carl Sagan – “*Pálido Ponto Azul*”, pp. 23-24.

Assim com a Voyager 1, Cassini também fez uma fotografia da Terra a partir de um ponto da órbita de Saturno, (Figura C.1). Nessa imagem, é possível ver a Terra e a Lua (vide versão com melhor resolução no site da NASA) a uma distância de aproximadamente 1,4

bilhões de quilômetros da Terra. A Terra está localizada entre os anéis de Saturno e a face da Terra que está voltada para a espaçonave é a face que contém o Oceano Atlântico Sul.



Figura C.1 – Imagem da Terra feita pela espaçonave Cassini por entre os anéis gelados de Saturno. Nesta imagem também é possível ver a Lua. A foto foi retirada em abril de 2017 quando a espaçonave estava localizada a uma distância de 1,4 bilhões de quilômetros da Terra. A face da Terra que estava voltada para Cassini no momento da foto era o Oceano Atlântico Sul. Imagem adaptada de: NASA/JPL/GSFC. PIA21445

Não é difícil perceber o quanto somos pequenos nesta imagem. A astrofísica é de fato um exercício de humildade e nos ensina o quanto sabemos pouco sobre o Universo. Serão necessárias mais missões exploratórias para respondermos algumas perguntas e desvendarmos os mistérios que se escondem no Universo e, mesmo assim, elas ainda serão insuficientes. Com

Cassini, obtivemos algumas respostas e, ao mesmo tempo, novas perguntas foram abertas e é isso que nos motiva sempre ir além: o anseio por conhecer mais e ainda assim, ter mais a se descobrir.

Referências

- Achilleos N., *et al.*, Large-Scale Dynamics of Saturn's Magnetopause: Observations by Cassini, *Journal of Geophysical Research* 113, A11209, 2008.
- Baines K. H., *et al.*, Saturn's north polar cyclone and hexagon at depth revealed by Cassini/VIMS. *Planet. Space Sci.*, in press, 2009a.
- Baines K. H., *et al.*, The deep clouds of Saturn: Morphology, spatial distribution, and dynamical implications as revealed by Cassini/VIMS. *Icarus*, 2009b.
- Baum W. A. *et al.*, Saturn's E ring I. CCD observations of March 1980. *Icarus*, 47, 84-86, 1981.
- Baum W. A. *et al.*, Saturn's E ring. In *Planetary Rings* (A. Brahic, ed.), pp. 103-108. IAU Colloquium 75, Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, France, 1984.
- Bird M. K., *et al.*, The Huygens Doppler Wind Experiment: Titan Winds Derived from Probe Radio Frequency Measurements. In *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium* (C. T. Russel), Springer, 2001.
- Brown D., e Agle D. C., Salt Finding from NASA's Cassini Hints at Ocean within Saturn Moon, *NASA news*, 2009.
- Brown R. H., *et al.*, The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) Investigation. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2004.
- Buratti B. J., Enceladus: Implications of its unusual photometric properties. *Icarus*, 75, 113-116, 1988.
- Caldwell J., *et al.*, The drift of Saturn's north polar spot observed by the Hubble Space Telescope. *Science* 260, 326-329, 1993.
- Carrol B. W., e Ostlie D. A., *An Introduction to Modern Astrophysics*, Cambridge University Press, 2017.
- Chown M., *Sistema Solar: Uma exploração visual dos planetas, das luas e de outros corpos celestes que orbitam nosso Sol*, São Paulo, Blucher, 2014.
- Clausen K. C., *et al.*, The Huygens Probe System Design. In *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Colwell J. E., *et al.*, The Structure of Saturn's Rings. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Coustenis A., *et al.*, Earth-Based Perspective and Pre-Cassini-Huygens Knowledge of Titan. In: *Titan from Cassini Huygens*, Springer, 2009.

- Del Genio A. D., *et al.*, Saturn Atmospheric Structure and Dynamics. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Desch M. D., Evidence for Solar Wind Control of Saturn Radio Emission, *J. of Geo. Res.* 87, 4549–4554, 1982.
- Dougherty M. K., Esposito L. W., e Krimigis S. M., *Saturn from Cassini-Huygens*, Springer, 2009.
- Dougherty M. K., *et al.*, The Cassini Magnetic Field Investigation. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Dougherty M. K., Seidelmann B. J., e Spencer J. R., Enceladus as an Active World: History and Discovery. In *Enceladus and the Icy Moons of Saturn* (P. M. Schenk *et al.*, eds.), pp. 3-16. Univ. of Arizona, Tucson, 2018.
- Dyudina, U.A., *et al.*: Lightning storms on Saturn observed by Cassini ISS and RPWS during 2004–2006. *Icarus* 190, 545–555, 2007.
- Elachi C., *et al.*, Radar: The Cassini Titan Radar Mapper. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations* (C. T. Russel), Springer, 1999.
- ESA, Saturn's Magnetosphere.
- Esposito L. W., *et al.*, The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2000.
- Esposito L. W., *et al.*, The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. *Space Sci. Rev.* 115, 299–361, 2004.
- Farrell W., Enceladus is Supplying Ice to Saturn's A-Ring, *Universe Today*, 2008.
- Flasar F. M., *et al.*, Exploring the Saturn System in the Thermal Infrared: The Composite Infrared Spectrometer. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2004.
- Fletcher L. N., *et al.*, Temperature and composition of Saturn's polar hot spots and hexagon. *Science* 319, 79–81, 2008.
- Franz O. G. e Millis R. L., Photometry of Dione, Tethys, and Enceladus on the UBV system. *Icarus*, 24, 433-442, 1975.
- Fulchignoni M., *et al.*, The Characterisation of Titan's Atmospheric Physical Properties by the Huygens Atmospheric Structure Instrument (HASI). In *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium* (C. T. Russel), Springer, 2000.
- Godfrey D. A., A hexagonal feature around Saturn's north pole. *Icarus* 76, 335–356, 1988.
- Gombosi T. I., *et al.*, Saturn's Magnetospheric Configuration. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.

- Gurnett D. A. *et al.*, The Cassini Radio and Plasma Wave Science Investigation. *Space Sci. Rev.* 114, 395–463, 2004.
- Gurnett D. A., Radio and Plasma Wave Observations at Saturn from Cassini's Approach and First Orbit, *Science* 307, 1255–1259, 2005.
- Hamilton, D. P., The collisional cascade model for Saturn's ring spokes. *Bull. Am. Astron. Soc.* 38, 578, 2006.
- Hanel, R. A. and 12 co-authors Infrared observations of the Jovian system from Voyager 2. *Science* 206, 962–956 (1980).
- Hansen C. J., *et al.*, Enceladus' water vapor plume. *Science*, 311, 1423-1425, 2006.
- Hartle R. E., Interaction of Titan's Atmosphere with Saturn's Magnetosphere, *Advances in Space Research* 5, 321–332, 1985.
- Hemingway D., *et al.*, The Interior of Enceladus. In *Enceladus and the Icy Moons of Saturn* (P. M. Schenk *et al.*, eds.), pp. 129-162. Univ. of Arizona, Tucson, 2018.
- Herschel W., Account of the discovery of a sixth and seventh satellite of the planet Saturn; with remarks on the construction of its rings, its atmosphere, its rotation on an axis and its spheroidal figure. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 80, 1-20, 1790.
- Hubbard W. B., *et al.*, The Interior of Saturn. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Hubbard W. B., *et al.*, The Interior of Saturn. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Hultqvist B., The Aurora. In: Y. Kamide/A. Chian, *Handbook of the Solar-Terrestrial Investigations of Jupiter and Saturn Environment*. *J. Astron.* 67 (587) 333-354, 2007.
- Israel G., *et al.*, Huygens Probe Aerosol Collector Pyrolyser Experiment. *Space Science Reviews*, 104, 433-468, 2002.
- Jaumann R., *et al.*, Geology and Surface Processes on Titan. In: *Titan from Cassini Huygens*, Springer, 2009.
- Johnson, T. V. e Estrada P. R., Origin of the Saturn System. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Jurac S., *et al.*, Saturn's E ring and production of the neutral torus. *Icarus*, 149, 384-396, 2001.
- Kaiser M. L., *et al.*, Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn, *Science* 209, 1238, 1980.
- Kepler S. O., e Saraiva M. F. O., *Astronomia e Astrofísica*, 4ªed., São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.
- Kivelson M. G. *et al.*, Does Enceladus Govern Magnetospheric Dynamics at Saturn? *Science* 311, 1391–1392, 2006.

- Kliore A. J., *et al.*, Cassini Radio Science. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Krimigis S. M., *et al.*, Magnetosphere Imaging Instrument (MIMI) on the Cassini Mission to Saturn/Titan. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Kurth W. S., *et al.*, Auroral Processes. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Lebreton J.-P., e Matson D. L., The Huygens Probe: Science, Payload and Mission Overview. In *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Ledvina S. A., Titan's Induced Magnetosphere, *Advances in Space Research* 33, 2092–2102, 2004.
- Lopes R. M. C., *et al.*, A Global Geomorphologic Map of Saturn's Moon Titan, *Nat Astron.*, 4: 228–233, 2020.
- Lopes R. M. C., Palestra ministrada na semana nacional da física na Universidade de Brasília, 2021.
- Lorenz R., e Mitton J., *Titan Unveiled: Saturn's Mysterious Moon Explored*. Princeton University Press, 2008.
- M. Horányi *et al.*, Diffuse Rings. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Matson D. L., *et al.*, The Thermal Evolution and Internal Structure of Saturn's Mid-Sized Icy Satellites. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Matson D. L., Spilker L. J. e Lebreton J.-P., The Cassini Huygens Mission to the Saturnian System. In *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Meltzer M., *The Cassini-Huygens Visit to Saturn: An Historic Mission to the Ringed Planet*, Springer, 2015.
- Niemann H. B., *et al.*, The Gas Chromatograph Mass Spectrometer for The Huygens Probe. *Space Science Reviews*, 104, 553-591, 2002.
- Orton G. S., *et al.*, Review of Knowledge Prior to the Cassini-Huygens Mission and Concurrent Research. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), Springer, 2009.
- Porco C. C., *et al.*, Cassini Imaging Science: Instrument Characteristics and Anticipated Scientific Investigations at Saturn. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2004.

- Porco C., *et al.*, How the Geysers, Tidal Stresses, and Thermal Emission Across the South Polar Terrain of Enceladus are Related, *The Astronomical Journal*, 148, 45, 2014.
- Postberg F., *et al.*, Plume and Surface Composition of Enceladus. In *Enceladus and the Icy Moons of Saturn* (P. M. Schenk *et al.*, eds.), pp. 129-162. Univ. of Arizona, Tucson, 2018.
- Richardson J. D., *et al.*, OH in Saturn's magnetosphere: Observations and implications. *J. Geophys. Res.*, 103, 20245-20256, 1998.
- Roatsch T., *et al.*, Cartographic Mapping of the Icy Satellites Using ISS and VIMS Data. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), pp. 765, Springer, 2009.
- Sagan, C., *Pálido Ponto Azul: uma visão do futuro da humanidade no espaço*. 2ª ed., São Paulo: Companhia das Letras, 2019.
- Sánchez-Lavega A., *et al.* Ground-based observations of Saturn's north polar spot and hexagon. *Science* 260, 329–332, 1993.
- Sandel B. R., e Broadfoot A., Morphology of Saturn's Aurora. *Nature* 292, 679–682 (1981).
- Schenk P. M., *et al.*, *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*, Arizona LPI, 2018.
- Shemansky D. E., *et al.*, Detection of the hydroxyl radical in the Saturn magnetosphere. *Nature*, 363, 329-331, 1993.
- Sittler, E. C., Ogilvie K. W., e Scudder J. D., Survey of low energy plasma electrons in Saturn's magnetosphere: Voyagers 1 and 2. *J. Geophys. Res.* 88, 8847–8870, 1983.
- Slipher E. C., e Slipher V., Mimas and Enceladus turn always the same face to Saturn. *Lowell Observatory Bulletin No. 62, Vol II, 70-72*, 1914.
- Slipher, V. M. A photographic study of the spectrum of Saturn. *Astrophys. J.* 26, 59–62 (1905)
- Spahn F., *et al.*, Cassini Dust Measurements at Enceladus and Implications for the Origin of the E Ring, *Science* 311, 1416 – 1418, 2006.
- Spencer J. R., *et al.*, Cassini Encounters Enceladus: Background and the Discovery of a South Polar Hot Spot, *Science* 311, 1401 – 1405, 2006.
- Spilker L. J., *Passage to a Ringed World*, NASA SP-533, Washington D.C.: NASA, 1997.
- Spinrad H, Münch, G., e Trafton, L. M., Recent spectroscopic. In *Saturn from Cassini-Huygens* (M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds.), pp. 765, Springer, 2009.
- Srama R., *et al.*, The Cassini Cosmic Dust Analyzer. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2002.
- Stallard, T., Lystrup, M., Miller, S., Emission-line imaging of Saturn's H₃⁺ aurora. *Astrophys. J.* 675, L117, 2008.

- Stone E. C., *et al.*, Voyager 1 Encounter with the Saturnian System, *Science* 212, 159–163, 1981.
- Tagger, M., Henricksen, R. N., Pellat, R., On the nature of the spokes in Saturn's rings. *Icarus* 91, 297–314, 1991.
- Tomasko M. G., *et al.*, The Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR) Experiment on the Huygens Entry Probe of Titan. In *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium* (C. T. Russel), Springer, 1999.
- Van Allen J. A., *et al.*, The Energetic Charged Particle Absorption Signature of Mimas, *J. Geophys. Res.* 85(A11), 5709–5718, 1980.
- Verbiscer A. J., *et al.*, Enceladus: Cosmic Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus: Cosmic graffiti artistic caught in the act. *Science*, 315, 815-817.
- Verbiscer A. J., *et al.*, Saturn's Largest Ring, *Nature* 461, 1098–1100, 2009.
- Waite J. H., *et al.*, The Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS) Investigation. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2004.
- Wildt, R. The atmospheres of the giant planets. *Nature* 134, 418 (1932)
- Yaroshenko, V., Horányi, M., Morfill, G., The wave mechanism of spoke formation in Saturn's rings. In: *Multifacets of Dusty Plasmas, Fifth Int'l. Conf. Physics of Dusty Plasmas*. AIP Conf. Proc. 1041, 215–216, 2008.
- Young D. T., *et al.*, Cassini Plasma Spectrometer Investigation. In *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations* (C. T. Russel), Springer, 2004.
- Zarnecki J. C., *et al.*, Huygens' Surface Science Package. *Space Science Reviews*, 104, 593-611, 2002.