

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Departamento de Astronomia

Mapeamento Mineralógico do Asteróide 9 Metis

Aluno: Igor Mainenti Leal Lopes

Orientadora: Thais Mothé Diniz – ON/MCT

Projeto de Final de Curso para a Obtenção do
Título de Astrônomo

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais por sofrerem comigo a cada momento difícil pelo qual passei, me dando todo o apoio necessário para que eu conseguisse vencer cada obstáculo e por comemorarem a cada vitória minha.

À Dra. Thais Mothé Diniz e à Dra. Daniela Lazzaro pela constante orientação e devidas chamadas de atenção, sem elas não teria concluído este projeto no tempo devido.

Em especial, à Lara, não só me ajudar à revisar esse trabalho do início ao fim varias vezes, mas principalmente por todo carinho e apoio que precisei durante períodos de grandes dificuldades.

À Teresinha Rodrigues, por sentar do meu lado em frente ao computador numa noite de domingo e revisar parágrafo por parágrafo do meu projeto, sem contar outras pequenas ajudas.

Aos meus irmãos, Vitor e Alexandre, por todo suporte durante toda minha graduação, desde livros didáticos que eu aproveitei até as caronas para faculdade.

À minha querida irmã Juju, por ser uma grande amiga e uma grande companheira de shows.

À todos os meus amigos do Valongo, pois sem eles o curso de graduação teria sido menos divertido.

Às professoras Encarnação e Sueli, por todo apoio e incentivos durante o curso.

À Rosa, por toda ajuda nas questões burocráticas do Valongo.

Ao René, Jorge, Álvaro e Fernando, por ajudar a compreender um pouco melhor o IRAF e a linguagem C.

À minha tia Marisa, por ter me abrigado em sua casa por longos sete anos, me dando condições de cursar astronomia.

Aos meus amigos Rafael, André, Will, Taty, Andressa, Camila e Thais, por todos os bons momentos que passamos juntos.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Estudos sobre o asteróide 9 Metis	
2.1 - Características gerais.....	3
2.2 - Polarimetria.....	4
2.2.1 - Dependência do grau de polarização com o ângulo de fase.....	4
2.2.2 - Curva de polarização e curva de luz.....	7
2.3 - Espectro-fotometria e espectroscopia.....	12
2.3.1 - Espectro rotacional.....	14
Capítulo 3 - Observações de 9 Metis	
3.1 - Observações.....	17
3.2 - Redução.....	18
3.3 - Ângulo de aspecto.....	19
3.4 - Espectro Rotacional.....	21
3.5 - Análise.....	25
Capítulo 4 - Discussão	28
Referências	30

Resumo

A composição superficial do asteroide 9 Metis tem sido bastante estudada nos últimos anos. Isto se deve ao fato dele ser um asteroide relativamente grande (cerca de 190km de diâmetro) e apresentar características bem particulares. Classificado como do tipo S (asteroides ricos em silicatos) por Tholen (1989) seu espectro rotacional, na região do visível, apresentou variações significativas (Mothé-Diniz *et al.* 2000). Nakayama *et al.* (2000) através de observações fotométricas e polarimétricas identificaram possíveis variações de albedo na superfície de 9 Metis. Como as diversas observações de 9 Metis foram feitas em épocas distintas torna-se necessário um estudo mais aprofundado das características superficiais globais deste asteroide.

Este projeto tem como objetivo caracterizar as diferentes regiões da superfície de 9 Metis através da análise de seu espectro rotacional obtido em outubro de 2000. Adicionalmente, foi realizado um estudo dos resultados existentes na literatura com a finalidade de compará-los com os resultados aqui obtidos. Como resultado deste estudo, não foi detectada nenhuma variação significativa no espectro rotacional deste.

Abstract

The surface composition of the asteroid 9 Metis has been extensively studied in the last years. This due to the fact of it is a relatively large asteroid (about 190 km of diameter) and presents singular characteristics. Classified as an S-type by Tholen (1989), its rotational spectra, in visible wavelengths, presented significant variations (Mothé-Diniz et al. 2000). Nakayama et al. (2000) identified possible albedo variations in the surface of 9 Metis through photometric and polarimetric data. As each of the observations of 9 Metis were done at distinct times, a deeper study of global superficial characteristics of this asteroid is interesting.

The main goal of this project is to characterize different regions of 9 Metis by analyzing its rotational spectra obtained in October, 2000. For sake of comparison, a brief review of the literature is also presented. As a result of this study, no significant spectroscopic variation was found within the precision of the data.

Capítulo 1

Introdução

Após a descoberta do primeiro asteróide (Ceres) por Piazzi em 1801, os astrônomos dedicaram grandes esforços ao estudo deste objeto por acreditarem tratar-se do planeta previsto pela regra conhecida como de Titius-Bode. Entretanto, quando foi percebido que este era apenas mais um entre uma miríade de objetos de tamanho relativamente pequeno o interesse cessou. Somente nos últimos 30 anos é que se voltou a estudar de forma sistemática os asteróides, principalmente devido à descoberta de que esses objetos podem fornecer indícios importantes sobre a origem e a evolução do Sistema Solar. Nos últimos anos passou-se a conhecer cada vez mais as propriedades físicas de um número significativo de asteróides graças a diversos programas de observação e mapeamento.

Uma das formas de estudar a origem e evolução dos asteróides é analisar a sua composição superficial. Para tanto, compara-se o espectro de reflexão destes objetos com os de meteoritos e minerais obtidos em laboratório, tendo-se indicações qualitativas da presença de diversos minerais. A determinação da composição superficial também fornece indícios sobre os processos de aquecimento ocorridos durante a formação do Sistema Solar, visto que, ao contrário do que aconteceu com os planetas, boa parte dos asteróides não sofreu um aquecimento forte o suficiente para alterar as características dos minerais encontrados neles. Pode-se dizer então que os asteróides estão entre os corpos mais primitivos do Sistema Solar e para um melhor entendimento desses processos de aquecimento e da evolução das composições no Sistema Solar, é necessário ter um amplo conhecimento sobre a mineralogia dos asteróides.

A composição superficial do asteróide 9 Metis tem sido bastante estudada nos últimos anos, por ser ele relativamente grande (cerca de 190 km de diâmetro) e apresentar características bem particulares. Inicialmente, Tholen (1989) classificou 9 Metis como um asteróide rico em silicatos. Em estudos posteriores, foi classificado como um asteróide rico em olivina (Gaffey 1993, Kelley e Gaffey 2000). O asteróide também foi estudado dentro do extenso mapeamento de composições conhecido como S3OS2 - Small Solar Objects

Spectroscopic Survey (Lazzaro *et al.* 2004). O principal resultado deste estudo foi de que o espectro de 9 Metis apresenta variações significativas (Mothé-Diniz *et al.* 2000) a medida que o asteroide gira sobre seu eixo.

Lagerros *et al.* (1999) mostraram, através do estudo de dados de observações polarimétricas, que 9 Metis tem um índice de refletividade baixo e uma alta rugosidade superficial. Posteriormente, Nakayama *et al.* (2000), através de observações fotométricas e polarimétricas, identificaram possíveis variações de albedo na superfície, as quais estariam localizadas próximas do seu equador.

O asteroide 9 Metis apresenta, portanto, propriedades superficiais ainda não bem conhecidas donde torna-se necessário um estudo mais aprofundado. O presente trabalho tem como objetivo caracterizar as diferentes regiões da superfície de 9 Metis. Para tanto, foram utilizadas observações de espectroscopia no visível realizadas dentro do S3OS2 (Lazzaro *et al.* 2004) e que cobrem todo um período rotacional do asteroide. Foram também analisados outros resultados encontrados na literatura na tentativa de relacioná-los entre si e obter então uma visão mais ampla das características superficiais deste asteroide. No capítulo 2 será feita uma breve discussão sobre os diversos estudos da literatura sobre o asteroide 9 Metis. Em seguida, o capítulo 3 descreve as novas observações assim como sua redução e análise. Por fim, no capítulo 4 é apresentada uma pequena discussão sobre os diversos resultados.

Capítulo 2

Estudos sobre o asteróide 9 Metis

2.1 - Características gerais

9 Metis foi descoberto por Graham em abril de 1848, no observatório particular de MrCooper, situado em Markree Castle na Irlanda. Sua órbita tem um semi-eixo maior de aproximadamente 2.28 AU, excentricidade 0.12, baixa inclinação. Seu período rotacional é de 5.079 h. Além disso, foi considerado o maior membro da família Maria, de acordo com Williams (1989, 1992); no entanto, numa análise mais recente não foi mais associado a essa família (Mothé-Diniz *et al.* 2005).

Mitchell *et al.* (1995), através de observações de radar, estimaram uma forma aproximada de um elipsóide de dimensões $215 \times 170 \times 135$ km. Isto confirma os resultados apresentados por Kristensen (1984), o qual mostrou através de ocultação estelar, que os dados poderiam ajustar uma elipse com dimensões 210×170 km. Recentemente, Storrs *et al.* (2005) foram capazes de visualizar o disco deste asteróide através da deconvolução de imagens obtidas pelo telescópio espacial Hubble (HST). Eles ajustaram uma elipse de dimensões $222 \times 182 \pm 12$ km para o asteróide e mostraram que seu albedo é de 0.108.

Wang *et al.* (1981) reportaram a possibilidade de 9 Metis ter um satélite. Isto foi determinado, através do alongamento da imagem do asteróide obtida em observações fotométricas feitas em 1979. Segundo os autores esse satélite teria um semi-eixo maior de aproximadamente 1100 km, um período orbital de 4.61 dias e que a massa do sistema Metis-satélite teria aproximadamente 2.50×10^{-12} massa solar (ou 4.97×10^{21} g). Nenhum trabalho posterior detectou a existência de tal satélite, embora a procura por este tenha sido realizada (Storrs *et al.* 1999).

2.2 - Polarimetria

A polarização da luz refletida por uma superfície sólida é função do espalhamento geométrico, do índice de reflexão da superfície (indiretamente, do albedo e composição) e da textura da superfície. Astronomicamente, a polarização da luz pode ser medida com alta precisão, e pode trazer informações que outras técnicas não conseguem. Como notado por Zellner (1977), a polarimetria fornece parâmetros que são capazes de separar tipos de asteróides que são quase indistinguíveis espectroscopicamente. Além disso, a mais importante aplicação da polarimetria para asteróides é no estudo da textura de sua superfície, fornecendo indícios sobre a composição e a microestrutura de superfícies rugosas. Adicionalmente, a polarimetria é uma das poucas técnicas que nos permite determinar o albedo e o diâmetro de asteróides, sendo também a de maior sensibilidade para detecção de variações do albedo superficial.

Quando a luz não polarizada é refletida pela superfície rugosa de um asteróide, ela torna-se parcialmente polarizada. A polarização produzida é normalmente linear com a parte da polarização circular desprezível. O estudo da polarização da luz de um asteróide é feito usando como base a direção normal ao plano que contém o Sol, o asteróide e o observador (plano de reflexão) e a direção paralela ao plano. O plano de reflexão contém o ângulo Sol-asteróide-observador, conhecido como ângulo de fase solar α . Se a luz polarizada refletida pelo asteróide tem intensidade I_{\perp} e I_{\parallel} na direção normal e paralela ao plano de reflexão, então o grau de polarização da luz será definido como $P = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$, normalmente expresso em porcentagem.

2.2.1 - Dependência do grau de polarização com o ângulo de fase solar

Um gráfico do grau de polarização P em função do ângulo de fase solar α fornece uma curva que caracteriza a superfície refletora. Na figura 2.1 é mostrada a dependência de P

com α para o asteroide 9 Metis dada no trabalho de Nakayama *et al.* (2000). Esta representa uma curva típica de uma superfície rugosa e define parâmetros capazes de fornecer um diagnóstico sobre a textura da superfície e suas propriedades ópticas. A dependência de P com α tem sido amplamente estudada, tanto a partir de amostras de laboratório quanto por observações telescópicas de corpos sem atmosferas no Sistema Solar, incluindo a Lua, planetas e seus satélites, e asteroides. Lyot (1929) foi o primeiro a usar tais curvas para discernir a natureza e a textura da superfície lunar. No trabalho de Dollfus e Geake (1977) o método foi calibrado usando amostras de rochas lunares provenientes das missões Apollo, e então foi aplicado ao estudo de outras superfícies planetárias.

Resultados do estudo da polarização em função do ângulo de fase α têm revelado a existência de significantes diferenças nas curvas de polarização (P) em função do ângulo de fase (α) entre os asteroides de tipo taxonômico diferentes, como é mostrado em Godet-Devel *et al.* (1995).

Na figura 2.1 é mostrada a curva do grau de polarização em função do ângulo de fase solar obtida por Nakayama *et al.* (2000). Os círculos pretos são as medidas feitas por esses autores em dezembro de 1997. Os outros pontos são medidas feitas por outros autores e utilizadas por Nakayama *et al.* (2000) para compor a curva representada pela linha cheia. Ela pode ser expressa por:

$$P(\alpha) = a (\sin\alpha)^b \sin((\alpha - \alpha_0)/2) (\cos(\alpha/2))^c,$$

onde $a = 0.68$, $b = 1.13$, $c = 32$ e $\alpha_0 = 21.5^\circ$, que é geralmente chamado de ângulo de inversão (o ângulo de fase quando o grau de polarização é igual a zero). A partir desses resultados foram deduzidos os parâmetros numéricos que descrevem a curva $P \times \alpha$ para 9 Metis. Os parâmetros são os seguintes:

- o valor mínimo do grau de polarização, $P_{\min} = -0.84\%$;
- o ângulo de fase em P_{\min} , $\alpha_{\min} = 10.0^\circ$;
- a inclinação polarimétrica é a inclinação da curva $P \times \alpha$, quando esta inverte de sinal, ou seja, com grau de polarização igual a zero, $h = 0.11\%/grau$;
- e o ângulo de inversão, fornecido acima.

Os valores desses parâmetros apresentam-se com uma pequena discrepância em relação a trabalhos anteriores (ver Zellner e Gradie 1976). A causa disso talvez seja a diferença do ângulo de aspecto do asteróide entre as observações.

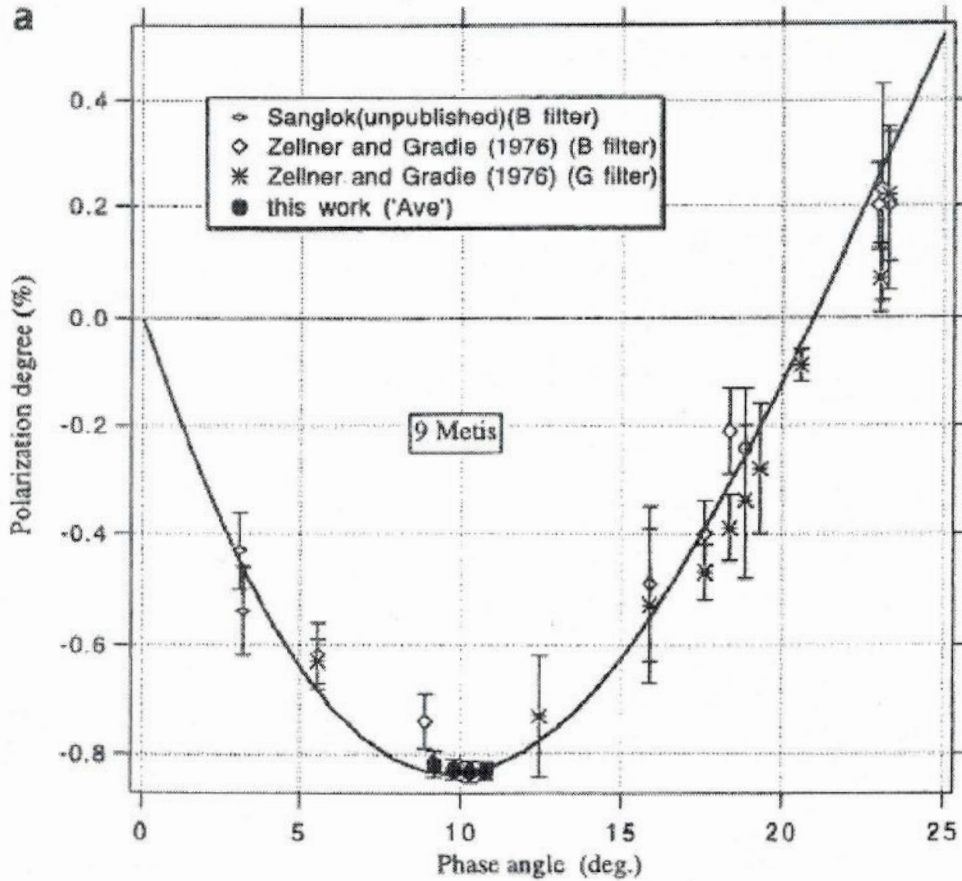


Figura 2.1 Dependência do grau de polarização P com ângulo de fase α para o asteróide 9 Metis. Gráfico obtido de Nakayama *et al.* (2000). Os círculos pretos representam os dados obtidos por esses autores. Esses pontos foram obtidos a partir da média das medidas de polarimetria para cada um dos quatro dias de observação. Os demais pontos foram obtidos anteriormente por outros autores.

Os parâmetros P_{\min} e h fornecem o albedo do asteróide a partir das relações apresentadas no trabalho de Lupishko e Mohamed (1996):

$$\log (A_{p_{\min}}) = -1.22 \log |P_{\min}| - 0.92, \text{ e}$$

$$\log (A_h) = -0.98 \log (h) - 1.73,$$

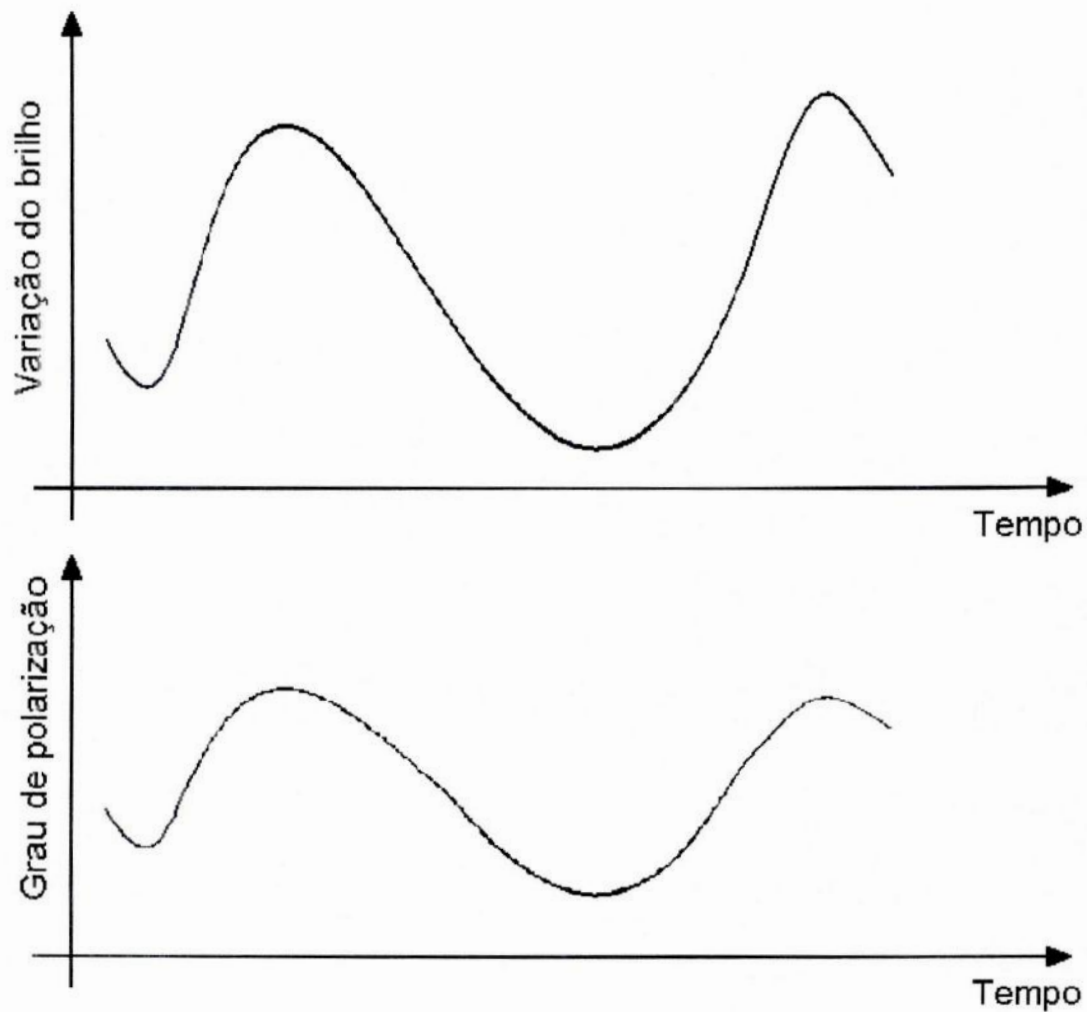
onde P_{\min} e h são dados em unidades de % e %/grau, respectivamente, e $A_{p_{\min}}$ e A_h são, respectivamente, o albedo cálculo do a partir do P_{\min} e h .

Através dessas relações Nakayama *et al.* (2000) calcularam os valores de albedo $A_{p_{\min}} = 0.15$ e $A_h = 0.16$, para o asteróide 9 Metis.

2.2.2 - Curva de polarização e curva de luz

A curva de polarização de um asteróide representa a variação do grau de polarização em função do tempo, enquanto a curva de luz é a variação da sua luminosidade em função do tempo. A curva de luz é capaz de fornecer as propriedades rotacionais, como o período de rotação e a direção do eixo de rotação. Juntamente com a curva de polarização torna-se uma ferramenta, capaz de indicar variação de albedo na superfície do asteróide e fornecer informações sobre sua forma.

A luminosidade de um asteróide pode variar em função do tempo devido ao seu formato não simétrico ou à variação do albedo em sua superfície. Para um caso hipotético de um asteróide que possui uma forma aproximadamente esférica e tem sua luminosidade variando somente devido a variações de albedo, é possível observar uma correlação direta entre a curva de luz e a curva de polarização do asteróide, onde os mínimos e máximos dessas curvas ocorrem nas mesmas fases rotacionais. Esse comportamento foi reportado para o caso de 4 Vesta no trabalho de Dollfus e Zellner (1979), e em Dollfus *et al.* (1989), sugerindo que este asteróide tem uma forma aproximadamente simétrica e que possui manchas de albedo, e está exemplificado na figura 2.2. No caso onde nenhuma relação entre a curva de luz e de polarização é observada, pode-se afirmar que o asteróide não possui variações de albedo.



Na figura 2.2 representação do caso onde os máximos e mínimos das curvas de luz e de polarização se coincidem, onde a curva de cima é a curva de luz e a de baixo é a de polarização.

As figuras 2.3a e 2.3b mostram, respectivamente, a curva de luz e de polarização para o asteróide 9 Metis dadas em Nakayama *et al.* (2000), ambos em função da fase rotacional. Como é mostrado nas figuras, os dados cobrem um período rotacional completo de 5.079 horas.

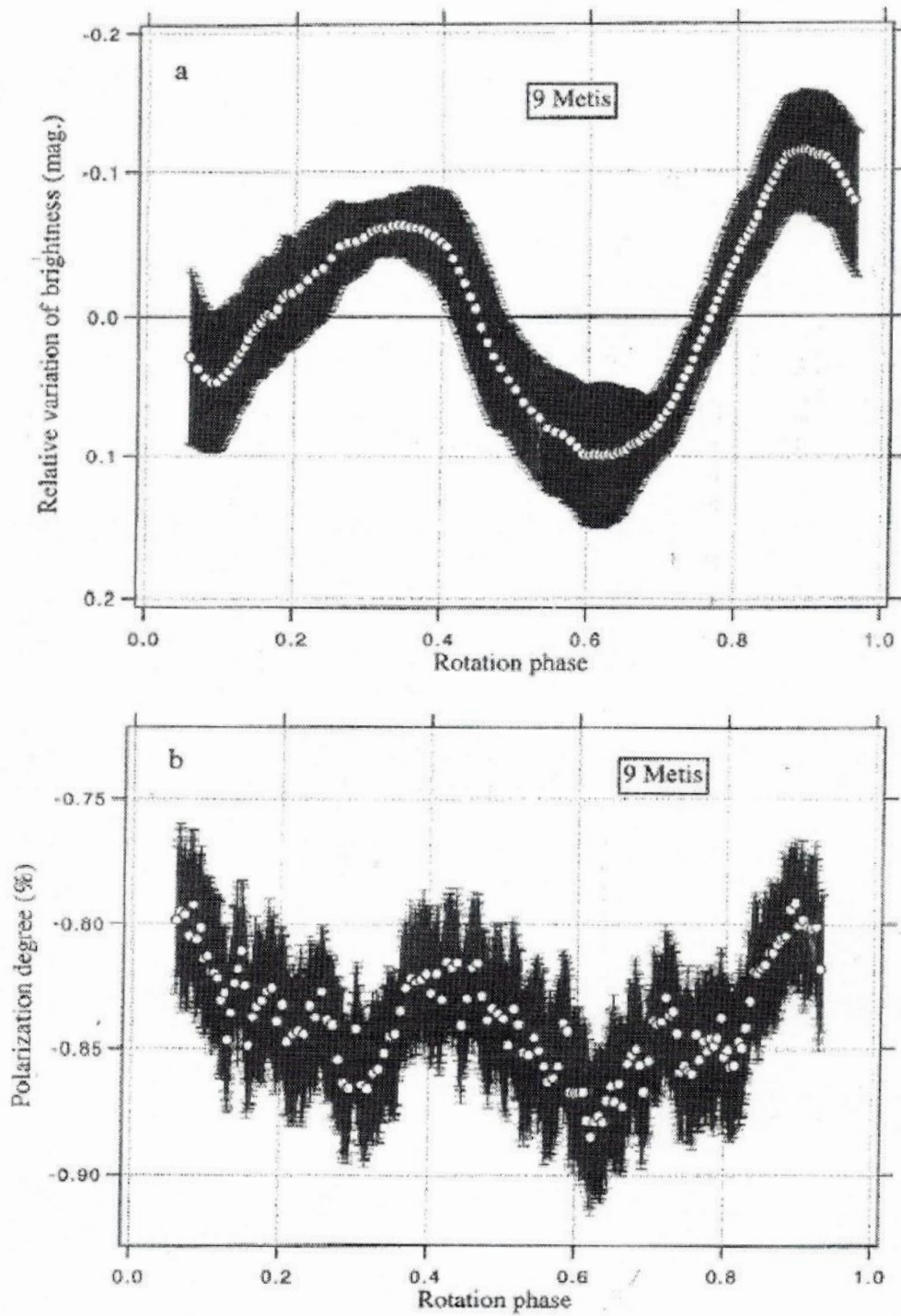


Figura 2.3 (a) A curva de luz para 9 Metis. (b) A curva de polarização para 9 Metis. Esses gráficos foram obtidos de Nakayama *et al.* (2000). Em ambos os gráficos os círculos brancos são as medidas e a parte escura é o erro associado à medida.

No caso de 9 Metis a correlação não é perfeita, mas o mínimo de polarização ocorre em uma fase rotacional próxima ao mínimo da curva de luz. Isto sugere que 9 Metis possui manchas de albedo (regiões onde o albedo apresenta-se diferente das outras regiões do asteróide). Para estudar esse assunto, Nakayama *et al.* (2000) modelou Metis como um asteróide de forma elipsoidal com as dimensões estimadas por Mitchell *et al.* (1995) ($215 \times 170 \times 135$ km). Os eixos x, y e z foram definidos, respectivamente, como a direção do eixo maior, do eixo médio e do eixo menor do elipsóide. Foram definidos ainda dois ângulos (θ e ϕ) para localizar um ponto na superfície do asteróide. O plano xy tem $\theta = 0$, enquanto o plano xz tem $\phi = 0$.

Vários modelos foram feitos por Nakayama *et al.* (2000) para simular a variação de albedo do asteróide, começando com apenas uma mancha em sua superfície. Fazendo simulações de curva de luz e curva de polarização para esses modelos, foi eliminada a possibilidade de 9 Metis possuir apenas uma mancha. Os testes para modelos com duas manchas de albedo geraram uma melhor solução cujo resultado é apresentado na tabela 2.1, e a simulação da curva de luz e da curva de polarização é apresentada, respectivamente, nas figuras 2.4a e 2.4b.

Tabela 2.1 - Modelo da distribuição de albedo para com duas áreas com albedo diferentes do restante da superfície, onde o albedo para o restante do asteróide é de 0.14. Obtidos de Nakayama *et al.* (2000).

	Mancha 1	Mancha 2
Ângulo ϕ ($^{\circ}$)	190 _ 240	30 _ 80
Ângulo θ ($^{\circ}$)	- 40 _ 40	- 45 _ 5
Albedo	0.24	0.28

Pelo modelo de Nakayama *et al.* (2000) a existência de uma distribuição não homogênea do albedo na superfície desse asteróide é essencial para descrever os dados fotométricos e polarimétricos. No entanto, apesar deste modelo se ajustar bem às observações, é importante salientar que esta não é a única solução possível para a distribuição do albedo na superfície de 9 Metis.

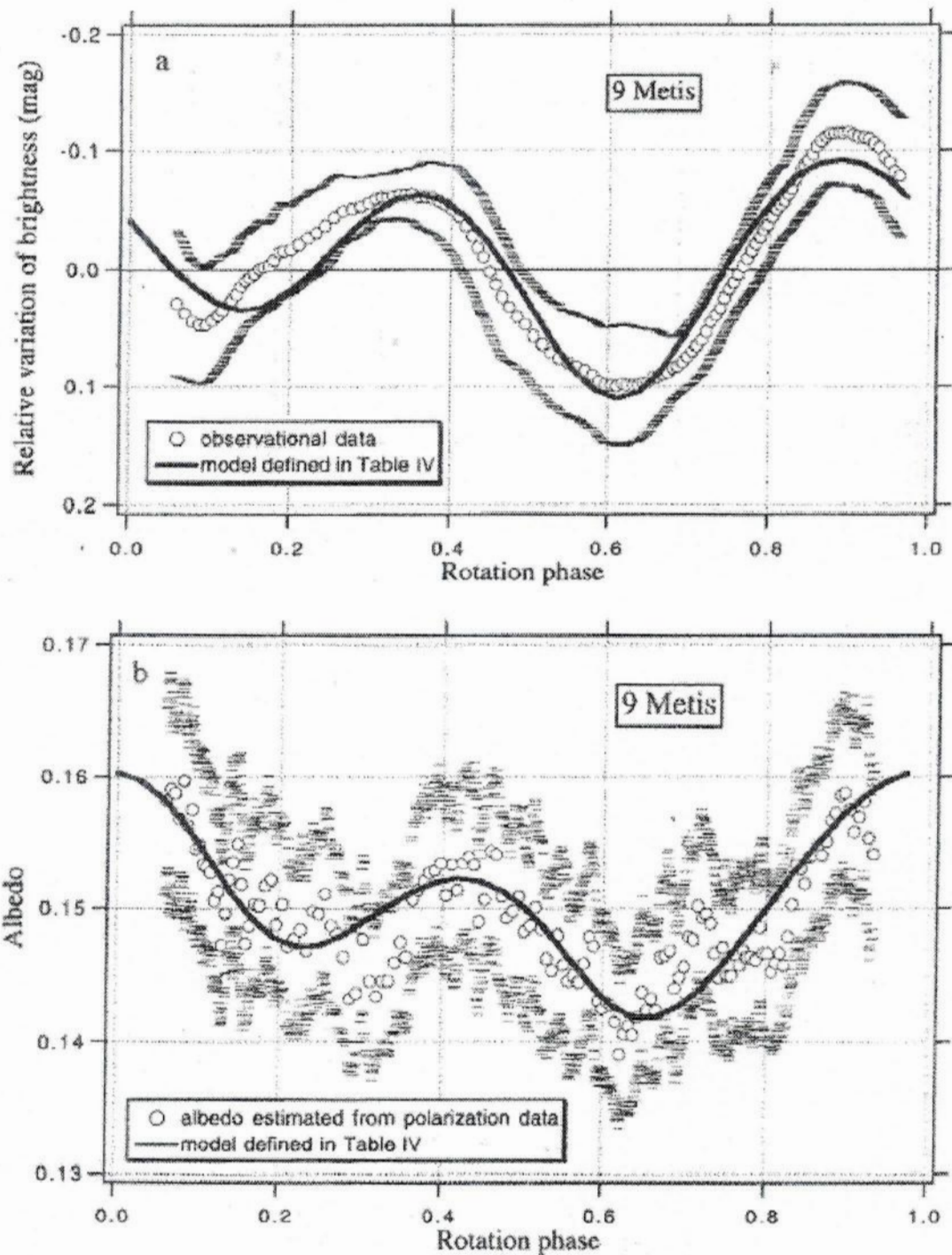


Figura 2.4 (a) - Curva de luz para 9 Metis. Figura 2.5 (b) - Curva de polarização para 9 Metis. Esses gráficos foram reproduzidos de Nakayama *et al.* (2000). Em ambos os gráficos os círculos brancos são as medidas e os traços acima de abaixo das medidas é o erro associado à medida. A linha contínua é a simulação do modelo descrito na tabela 2.1.

2.3 - Espectro-fotometria e espectroscopia

Tholen (1989) classificou os espectros dos asteróides entre tipos distintos, onde os principais são S, C, X e M. Os asteróides tipo S tem como característica principal a presença de uma banda de absorção em torno de 1- μ m. Esse tipo de asteróide possui uma superfície rica em silicatos, por esse motivo 9 Metis foi associado a esse grupo. O espectro de 9 Metis foi estudado por diversos autores e foi associado ao grupo dos S (Chapman e Gaffey 1979, Zellner *et al.* 1985, Bell *et al.* 1988, Sawyer 1991).

Posteriormente, Gaffey *et al.* (1993) dividiram os astróides tipo S em sete subclasses - S(I) a S(VII) - de acordo com sua abundância superficial de olivina, onde S(I) é o mais rico e S(VII) é a subclasse que menos possui esse mineral. Nesse estudo, 9 Metis não foi associado a nenhum dos grupos. Por seu espectro de reflexão apresentar um perfil de absorção da banda de 1- μ m diferente dos demais asteróides tipo S e um deslocamento do centro dessa banda para maiores comprimentos de onda, foi classificado como S(U). Essa forma espectral incomum fez esses autores levantarem dúvidas sobre a qualidade dos dados, ou propor que uma componente de clinopiroxênio cálcico no material superficial poderia ser capaz de gerar um espectro deste tipo. Infelizmente, esse espectro foi o resultado de apenas uma única observação de 9 Metis e as características devido a absorção da atmosfera foram pobremente corrigidas (Kelley e Gaffey 2000).

Kelley e Gaffey (2000) estudaram 9 Metis através de novas medidas de espectroscopia, quando notaram que esse espectro apresentou uma banda em 1- μ m (BI) bem definida, mas não foi detectado nenhuma banda em 2- μ m (BII). Esse novo espectro estava coerente com espectros publicados anteriormente (Sawyer 1991, Chapman e Gaffey 1979 e Zellner *et al.* 1985), com exceção do espectro obtido no 52-channel survey (Bell *et al.* 1988). A banda moderada, mas bem definida em 1- μ m, sugere absorção devido à olivina. A falta da banda de 2- μ m indica uma superfície pobre em piroxênio. Kelley e Gaffey (2000), utilizando o estudo das subclasses propostas por Gaffey *et al.* (1993), concluíram que 9 Metis é do tipo S(I). Foi proposto também que este asteróide possui uma superfície composta por 30 a 40%

de olivina rica em Fe e 60 a 70% da liga metálica FeNi e aparenta ser um núcleo aproximadamente intacto preservando pelo menos uma parte do manto do corpo progenitor.

A Figura 2.5 mostra os espectros de reflexão do asteroide 9 Metis obtidos por Kelley e Gaffey (2000) e Gaffey *et al.* (1999). Foi verificada grande diferença entre eles, no que diz respeito a banda de 1- μm , na região entre 1.3 e 1.5 μm , e na existência de uma banda fraca em torno de 1.8 e 1.9 μm .

Kelley e Gaffey (2000) apresentaram ainda um estudo associando geneticamente 9 Metis e 113 Amalthea, mostrando que esses encontram-se muito próximos no espaço de parâmetros (gráfico do centro de BI em função da razão entre áreas BII/BI). Na tabela 2.2 são apresentados os parâmetros usados por esses autores nesta análise. Adicionalmente, Kelley e Gaffey (2000) consideraram o fato desses dois asteroides estarem na mesma família dinâmica (Williams 1992) como mais um indício da ligação genética entre eles.

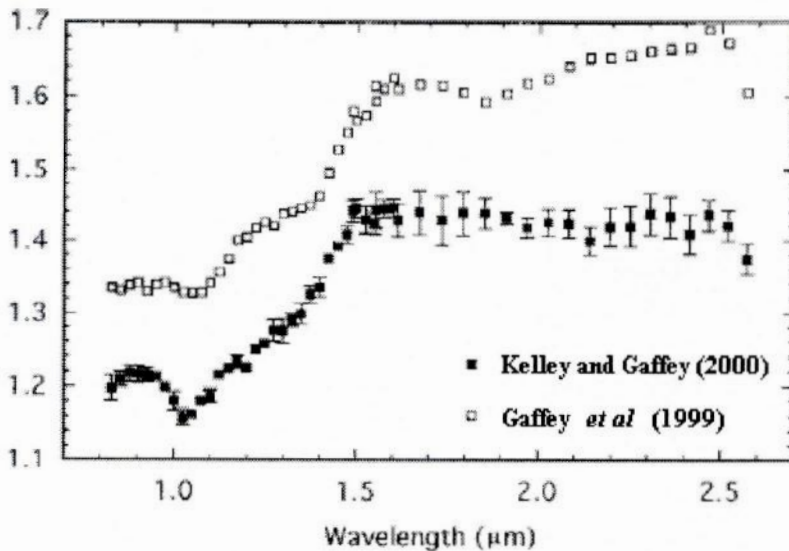


Figura 2.5 Espectros de reflexão do asteroide 9 Metis obtidos por Kelley e Gaffey (2000) e Gaffey *et al.* (1999).

Tabela 2.2 Apresenta os parâmetros área de BII/BI, centro de BI, profundidade de BI e inclinação de BI para 9 Metis e 113 Amalthea. (Gaffey *et al.* 1993; Gaffey 1999 e Kelley e Gaffey 2000).

Asteróide	Área de BII/BI	Centro de BI	Profundidade de BI	Inclinação da BI
Dados baseados no 52-channel survey (Gaffey <i>et al.</i> 1993)				
9 Metis	0.430 ± 0.100	1.085 ± 0.010	0.060 ± 0.010	0.380 ± 0.020
113 Amalthea	0.000 ± 0.100	1.050 ± 0.010	0.210 ± 0.020	0.400 ± 0.080
Kelley e Gaffey (2000) e Gaffey (1999)				
9 Metis	0.157 ± 0.100	1.062 ± 0.001	0.087 ± 0.007	0.321 ± 0.006
113 Amalthea	0.204 ± 0.010	1.055 ± 0.005	0.255 ± 0.005	0.198 ± 0.006

2.3.1 - Espectro rotacional

O estudo do espectro rotacional visa a detecção de variações espectrais de um asteróide em função de sua fase rotacional. No caso de não se ter fotometria simultânea à espectroscopia considera-se um determinado espectro como obtido na fase zero. Do valor da hora da observação dos espectros seguintes é subtraído o valor da hora da fase zero, obtendo dessa forma a diferença de tempo Δt entre as duas observações. Dividindo o Δt pelo período de rotação do asteróide e subtraindo a parte inteira, temos a fase rotacional daquela observação.

Para se fazer um estudo do espectro rotacional de um asteróide, são obtidos espectros de reflexão para diferentes fases rotacionais, e cada espectro é associado à sua respectiva fase rotacional. Para que o estudo seja completo é necessário que os espectros cubram todas as fases rotacionais, desde 0 até 1.

Em Mothé-Diniz *et al.* (2000) foi estudada a presença de variações composicionais em de 9 Metis através da análise de seu espectro rotacional. Na figura 2.6 são apresentados os espectros obtidos entre os dias 14 e 17 de junho de 1999, que foram utilizados nessa análise. Todos os espectros foram comparados ao ajuste de um espectro. O ruído desse

espectro de comparação prejudica a análise da variação espectral, por isso o espectro escolhido foi o de menor ruído.

Na figura 2.6 os espectros estão separados pelos dias de observação. Cada espectro é comparado a uma linha contínua, que é a curva que melhor ajusta o espectro de comparação com fase rotacional 0.06. A cobertura observacional se estende da fase rotacional 0 até a 0.92.

Os espectros apresentaram variações significativas nas fases rotacionais 0.38, 0.60 e 0.76, enquanto variações extremas foram observadas nas fases 0.62 e 0.84, ambos na mesma noite de observação (17-18 de junho). Apesar de variações significativas serem detectadas durante a maioria das noites, as variações dessas duas fases rotacionais parecem ser grandes demais, principalmente se forem comparadas a variações de fases próximas obtidas em noites diferentes. Tanto a fase anterior quanto a posterior à fase 0.84, respectivamente, as fases 0.77 e 0.92, não apresentam variação. Enquanto no caso da fase 0.62, os espectros anteriores e posterior (0.60 e 0.72) apresentam uma variação oposta à variação apresentada pela fase 0.62, especialmente a fase 0.60, que está muito próxima da 0.62. No artigo é sugerida a possibilidade de ter acontecido algum problema observacional, como más condições climáticas ou problemas instrumentais. De qualquer forma, 9 Metis apresentou variações espectrais significativas, fazendo-se necessário um estudo mais detalhado deste objeto.

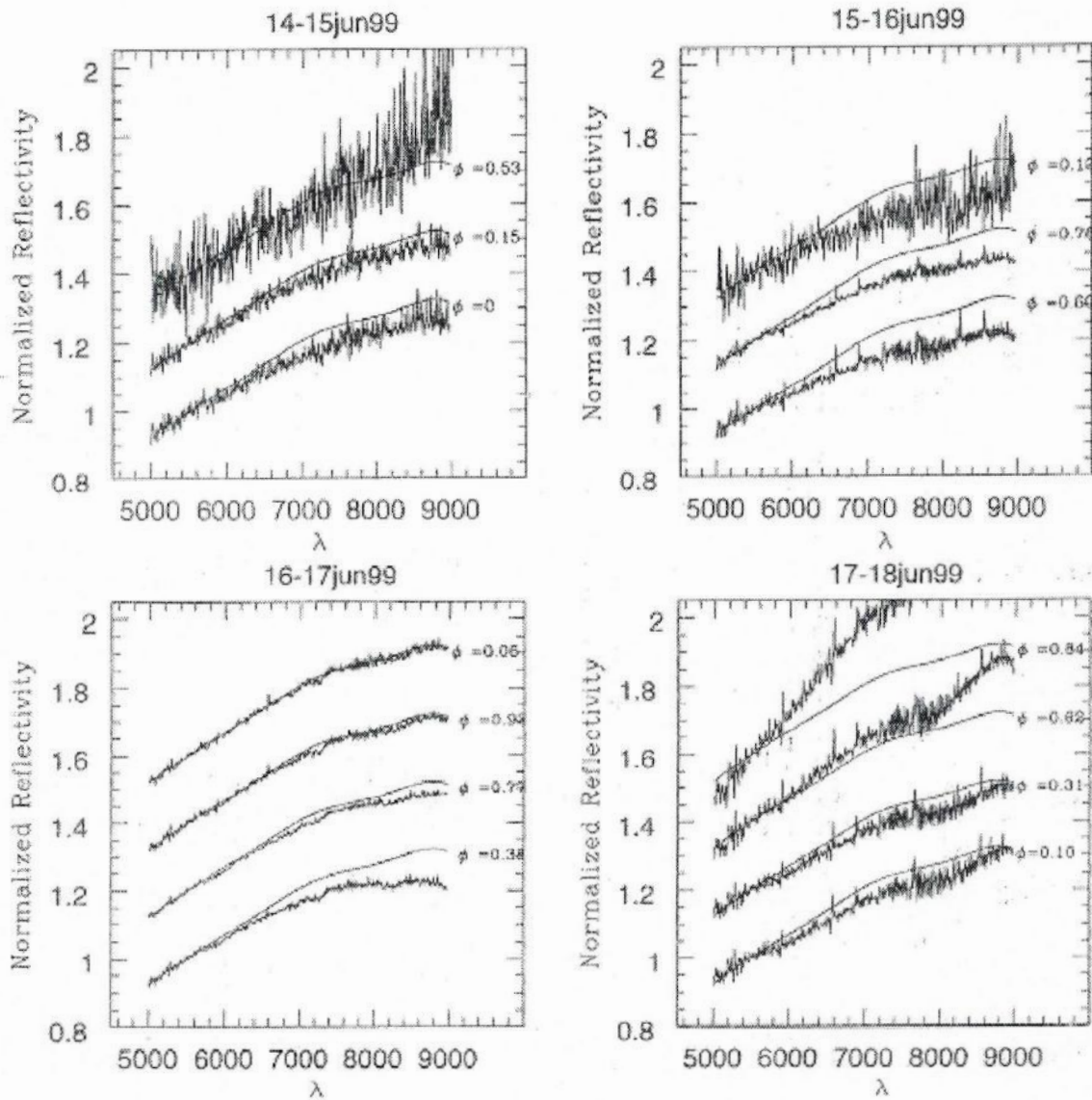


Figura 2.6 Espectros de 9 Metis para cada noite de observação comparada com o ajuste polinomial do espectro da fase rotacional 0.06.

Os trabalhos discutidos nesse capítulo sintetizam os principais resultados obtidos no estudo do asteroide 9 Metis, sem que tenha sido esgotada a necessidade de ampliar o conhecimento das suas características superficiais. No capítulo seguinte serão discutidas as observações espectroscópicas dentro da campanha S3OS2 (Small Solar Objects Spectroscopic Survey), relativa ao 9 Metis (Lazzaro *et al.* 2004), que vem acrescentando importantes resultados ao conhecimento deste asteroide.

Capítulo 3

Observações de 9 Metis

3.1 - Observações

A espectroscopia faz uso exclusivamente de detectores CCD, por apresentar as seguintes características: uma larga cobertura espectral (que varre de aproximadamente 3000 a 10000 Å), a linearidade da sensibilidade do dispositivo e a sua grande área (geralmente entre 2048 a 4096 pixels ou ainda maiores). Essas características tornam o processo de redução de dados extremamente mais simples.

Duas medidas comumente obtidas a partir de espectros astronômicos são: o fluxo do contínuo em função do comprimento de onda, e a forma e a intensidade das linhas espectrais. No estudo dos asteróides a primeira medida é a única utilizada, pois os espectros dos asteróides não apresentam linhas espectrais. Logo, a mineralogia dos asteróides é estudada a partir das bandas de absorção que fornecem fortes indícios da mineralogia dos asteróides.

Para o estudo do asteróide 9 Metis foram feitas observações espectroscópicas (Lazzaro *et al.* 2004) dentro da campanha S3OS2 (Small Solar Objects Spectroscopic Survey). A missão de observação foi realizada entre os dias 02 e 07 de outubro de 2000. Foram obtidos 30 espectros de reflexão, utilizando o telescópio de 1.52m do European Southern Observatory (La Silla, Chile) equipado com o espectrógrafo Boller & Chivens com um CCD de 2048 × 2048 pixels, cada um medindo 15 × 15 μm. A grade de dispersão usada foi de 225 g/mm com uma dispersão de 330 Å/mm, essa configuração permitiu cobrir a região espectral utilizável de 4900 a 9500 Å. A fenda era de 5 segundos de arco orientada na direção Leste-Oeste. Essa direção da fenda foi escolhida para evitar perda de luz devido ao movimento diferencial do asteróide em relação ao acompanhamento do telescópio. Vale observar também que apesar da dispersão por efeito atmosférico ocorrer na direção Norte-

Sul, esse efeito não foi significativo nestas observações, pois foram obtidas em distâncias zenitais muito pequenas (em torno de 25°).

3.2 - Redução

Os dados foram reduzidos utilizando os pacotes básicos de redução de dados de espectroscopia do IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). Os passos iniciais para a redução foram a subtração do bias e a correção dos efeitos de variação de sensibilidade dos pixels usando imagens de flat-field.

O passo seguinte foi extrair o espectro da imagem de CCD e formar um gráfico da contagem de fótons em função da posição do pixel. Geralmente, o espectro encontra-se ligeiramente inclinado na imagem de CCD e tem uma largura de alguns pixels. Para corrigir esses problemas, determina-se a linha (na direção de dispersão) de máxima intensidade da imagem e faz-se uma soma das linhas adjacentes.

Como os asteróides são fontes puntiformes, o produto final desejado é um espectro de uma dimensão, representado pelo fluxo em função do comprimento de onda. Para a conversão da escala em pixels para comprimento de onda, foram utilizadas as linhas de emissão do espectro de uma lâmpada de calibração He-Ar.

Os efeitos da extinção atmosférica foram corrigidos através da curva de extinção média do sítio de observação. Como está sendo estudado o espectro da luz solar refletida no asteróide (espectro de reflexão), este apresenta influência do espectro solar. A correção dessa influência é realizada dividindo os espectros do asteróide pelo espectro de uma análoga solar. A análoga utilizada foi HD1835. Finalmente, todos os espectros foram normalizados à unidade em 5500 \AA , por convenção.

Após a redução foi realizada uma média dos espectros que apresentavam instantes de observação próximos. Essa média foi realizada com o intuito de diminuir o ruído de cada espectro. Como produto final, foram obtidos 15 espectros com fases rotacionais distintas.

3.3 - Ângulo de aspecto

Neste trabalho são apresentados dados do asteroide 9 Metis obtidos a partir de observações feitas em épocas diferentes. A fim de relacionar os resultados de cada uma dessas observações, é importante conhecer o ângulo de aspecto do asteroide. Isto porque este ângulo indica a região do asteroide que pode ser observada em uma determinada configuração Terra-Sol-asteroide. Ele é definido como o ângulo entre a linha de visada do observador e o eixo de rotação do asteroide, que depende da inclinação do plano da órbita do asteroide em relação ao da Terra e da inclinação do eixo de rotação do asteroide.

A representação gráfica de uma configuração Terra-Sol-asteroide é mostrada na figura 3.1, onde o ângulo de aspecto é representado pelo Θ . É apresentado a seguir o cálculo do ângulo de aspecto relativo aos trabalhos de maior interesse para o estudo das características superficiais de 9 Metis.

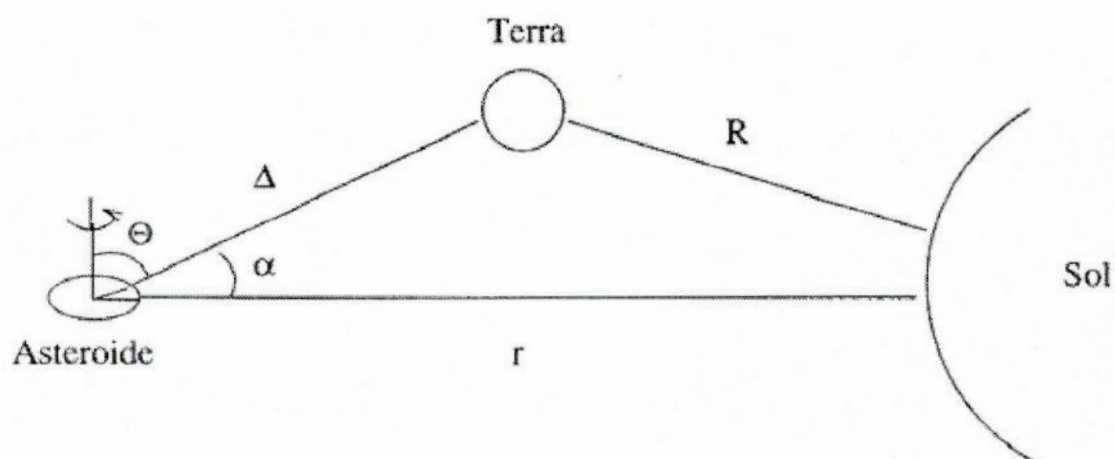


Figura 3.1 Representação gráfica de uma configuração Terra-Sol-asteroide, onde R é a distância Terra-Sol, r é a distância Sol-asteroide, Δ é a distância asteroide-Terra, α é o ângulo de fase e Θ é o ângulo de aspecto.

Para o cálculo do ângulo de aspecto para as diferentes épocas de observação foram utilizados o sistema de coordenadas eclípticas e relações de trigonometria esférica. A configuração Terra-asteróide-pólo do asteróide é apresentada na figura 3.2, onde A é a posição do asteróide, P é o pólo do asteróide, λ_A é a longitude celeste do asteróide, λ_P é a longitude celeste do pólo (para 9 Metis, $\lambda_P = 185^\circ$, De Angelis 1995), $\Delta\lambda$ é a diferença entre λ_A e λ_P , ϕ_A é a latitude celeste do asteróide, ϕ_P é a latitude celeste do pólo do asteróide (para 9 Metis, $\phi_P = 31^\circ$, De Angelis 1995) e Θ é o ângulo de aspecto do asteróide. Na tabela 3.1 são apresentados os valores de λ_A , ϕ_A , e Θ para as observações feitas por Nakayma *et al.* (2000), Mothé-Diniz *et al.* (2000) e para as observações tratadas nesse trabalho, assim como as datas de observação.

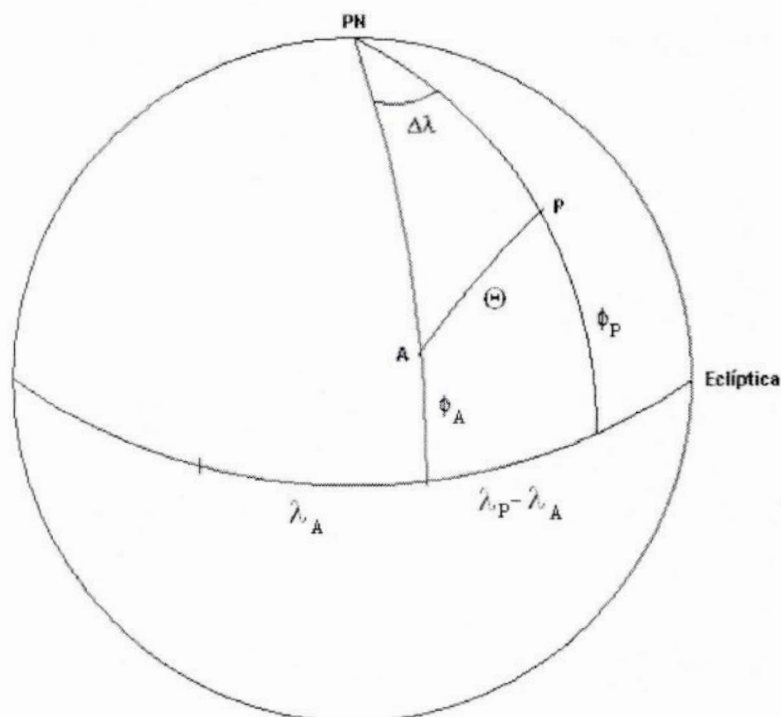


Figura 3.2 Configuração Terra-asteróide-pólo do asteróide em sistema de coordenadas eclípticas. No centro do sistema de coordenada está a Terra, o ponto A é o asteróide e o ponto P é o pólo do eixo de rotação do asteróide. E PN é o pólo norte celeste.

O valor do ângulo de aspecto foi calculado a partir da seguinte equação

$$\cos \Theta = \text{sen} \phi_A \times \text{sen} \phi_p + \cos \phi_A \times \cos \phi_p \times \cos \Delta \lambda ;$$

que foi deduzida das equações de trigonometria esférica.

Tabela 3.1 Valores de λ_A , ϕ_A , e Θ para as observações feitas por Nakayama *et al.* (2000), Mothé-Diniz *et al.* (2000) e para as observações tratadas nesse trabalho, assim como as datas de observação.

	Nakayama et al. (2000)	Mothé-Diniz et al. (2000)	Observações tratadas nesse trabalho
Data das observações	Dezembro de 1997	Junho da 1999	Outubro de 2000
λ_A (°)	50.18	200.78	304.15
ϕ_A (°)	-1.57	3.43	-7.08
Θ (°)	128	31	119

Os valores do ângulo de aspecto calculado nessa secção serão utilizados posterior no Capítulo 4, onde será realizada uma discussão envolvendo os resultados dos diferentes trabalhos.

3.4 - Espectro Rotacional

Um asteróide apresenta diferentes regiões de sua superfície à medida que rotaciona em torno de seu próprio eixo. Isso nos permite obter informações do grau de homogeneidade de sua superfície. Na figura 3.3 mostra uma representação de um objeto com uma superfície não homogênea, visto por um observador em duas diferentes fases rotacionais. O estudo do espectro rotacional tem como objetivo determinar a existência dessas variações e fazer um mapeamento da mineralogia do asteróide.

Um estudo do espectro rotacional semelhante ao descrito no artigo de Mothé-Diniz *et al.* (2000) foi realizado para as observações de outubro de 2000. Para se fazer o estudo do espectro rotacional de 9 Metis foram utilizados 15 espectros de reflexão obtidos em diferentes fases rotacionais, num período de 6 dias.

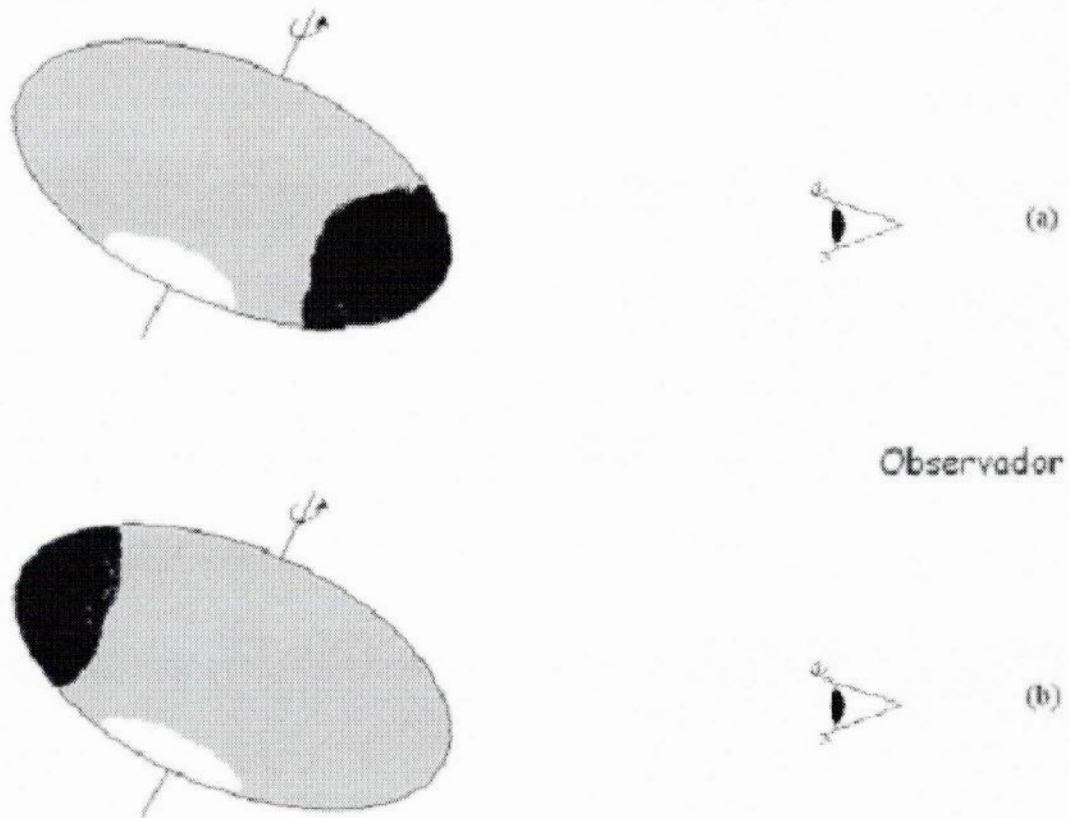


Figura 3.3 Representação de um asteroide com pelo menos três tipos distintos de materiais em sua superfície observado em duas fases rotacionais diferentes. Na figura (a) o espectro do asteroide está sendo influenciado principalmente pelo tipo de material representado pela cor preta. Na figura (b) o espectro passa a ser influenciado pelo material representado pela cor cinza claro, enquanto que para esse ângulo de aspecto o material representado pela cor branca não será observado em nenhuma fase rotacional.

Eliminando as variações provenientes de efeitos atmosféricos (como variação da massa de ar ou alterações nas características da atmosfera superior, e de problemas instrumentais) as possibilidades geradas pela análise dos espectros de reflexão de um asteroide em diferentes fases rotacionais são:

1. Se o espectro rotacional não apresentar variações significativas, temos:
 - o asteroide possui uma superfície homogênea, sem variações significativas em sua mineralogia superficial;
 - o pólo do asteroide estava voltado para o observador no momento das observações, ou seja, estas apresentavam a região ao redor do pólo. Ou ainda, a inclinação do asteroide em relação ao observador era tal que uma possível região de material distinto não pôde ser observada em nenhuma fase rotacional, como mostrado na figura 3.3. O material representado pela cor branca que se encontra no pólo sul do asteroide não é visto pelo observador.

2. Se o espectro rotacional apresentar variações significativas, temos:
 - o asteroide apresenta uma superfície não homogênea, com variações significativas em sua mineralogia superficial;
 - o asteroide sofre de modo não uniforme os efeitos de algum tipo de “intemperismo espacial” (bombardeamento dos corpos sem atmosfera por micrometeoróides e partículas do vento solar).

Na figura 3.4 são apresentados os espectros obtidos nas noites de 02 a 07 de outubro de 2000, separados por dia de observação. Cada espectro está sendo comparado ao ajuste polinomial do espectro da fase rotacional 0.36. Como no artigo de Mothé-Diniz *et al.* (2000), o espectro da fase rotacional 0.36 foi usado como comparação por apresentar o menor ruído. Nesses dias de observação 9 Metis apresentou um ângulo de aspecto de aproximadamente 119° . A cobertura observacional se estende da fase rotacional 0 até a 0.88. Isso nos fornece informações de uma grande região da superfície do asteroide. Os espectros tratados nesse trabalho não parecem apresentar variações significativas. O estudo realizado é apresentado a seguir.

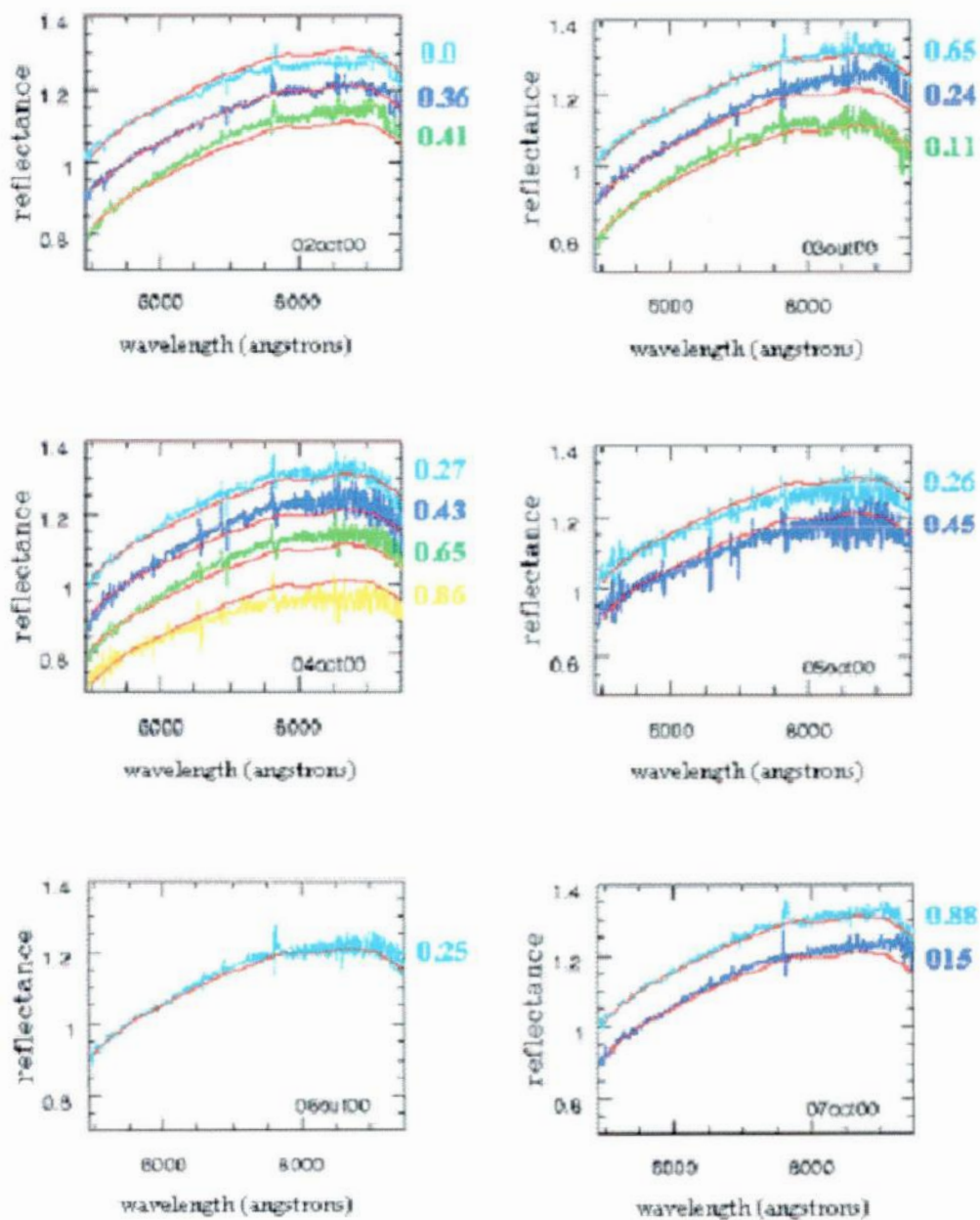


Figura 3.4 Espectros obtidos do dia 02 a 07 de outubro de 2000. As fases rotacionais estão escritas acima dos gráficos com as mesmas cores de cada espectro. A linha vermelha é o ajuste polinomial do espectro de comparação com fase rotacional 0.36

3.5 - Análise

A comparação dos espectros com o ajuste polinomial de uma determinada fase rotacional não fornece uma precisão satisfatória para se determinar variações do espectro de um asteroide. Nesse tópico será descrita uma forma mais precisa para se verificar a existência de variações confiáveis no espectro do asteroide 9 Metis. Essa análise foi utilizada por Mothé-Diniz *et al.* (2000) em sua análise do espectro rotacional de 9 Metis. Ela tem como objetivo a determinação de variações significativas do espectro e consiste na comparação da variação de cada espectro com o ruído associado a este.

Todos os passos descritos aqui para um espectro foram realizados para todas as fases rotacionais. O espectro da fase rotacional 0.36 foi utilizado como comparação. Ajustando-se uma curva polinomial para todos os espectros e fazendo a subtração entre os dois ajustes foi obtida a variação entre os dois espectros. Tanto o espectro analisado quanto o espectro de comparação foram divididos em 8 partes iguais ao longo da abscissa (comprimento de onda λ). Para cada uma dessas partes, de ambos os espectros, foi calculado o comprimento de onda médio λ_m e foi realizado o cálculo do desvio padrão associado ao λ_m do intervalo considerado definido por:

$$\sigma(\lambda_m) = \frac{\sum_{\lambda} |y_{\lambda} - \xi_{\lambda}|}{N};$$

onde y_{λ} é o valor da intensidade no comprimento de onda λ do espectro, ξ_{λ} é o valor da intensidade no mesmo comprimento de onda λ do ajuste polinomial e N é o número de pontos na parte do espectro para a qual está sendo calculado o desvio padrão $\sigma(\lambda_m)$, que representa o erro associado a medida do espectro. Na análise desses espectros o valor de N utilizado foi 131.

Como essa análise envolve uma comparação o espectro analisado e o de comparação, os valores de $\sigma(\lambda_m)$ desses espectros foram somados com a finalidade de estimar o erro máximo associado à diferença entre esses espectros. Ao resultado dessa soma foi dado o nome de $\gamma(\lambda_m)$. Resumidamente, o cálculo realizado foi:

$$\gamma(\lambda_m) = \sigma_o(\lambda_m) + \sigma_A(\lambda_m);$$

onde $\sigma_o(\lambda_m)$ e $\sigma_A(\lambda_m)$ são os desvios padrão do espectro de comparação e do espectro analisado, respectivamente, sendo ambos calculados para a mesma parte do espectro. O $\gamma(\lambda_m)$ é um parâmetro que indica o ruído dos dois espectros. Como estamos interessados apenas em variações significativas estipularemos que uma variação significativa é aquela que ultrapassa o valor de 2γ .

Finalmente, plotando os valores de 2γ , -2γ (as variações podem tornar o espectro mais ou menos avermelhado) e a diferença entre os dois espectros em função do comprimento de onda foi obtido o gráfico apresentado na figura 3.5. Nele é mostrada a análise dos quatro espectros que apresentaram as maiores variações. No alto de cada gráfico está identificado o espectro analisado (a noite em que foi obtido; o algarismo romano indicando qual o espectro da noite e sua fase rotacional entre parênteses). A curva em azul acima e abaixo do zero é o gráfico do 2γ e do -2γ em função de λ , e a curva verde é a diferença entre os ajustes polinomiais dos espectros. As variações serão consideradas significativas se a curva verde ultrapassar o limite representado por uma das duas curvas azuis.

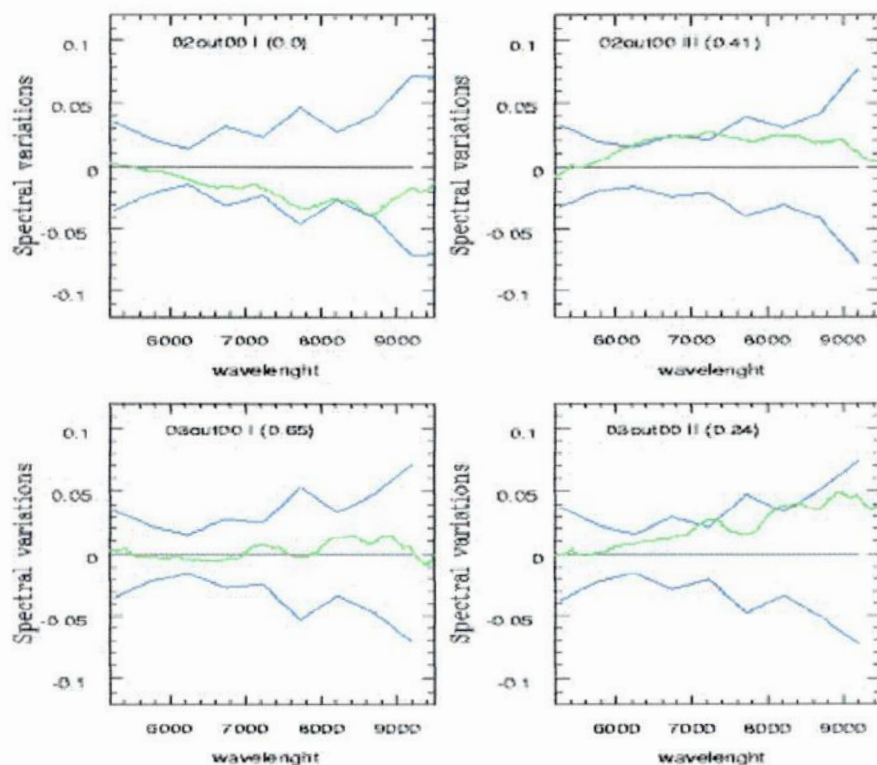


Figura 3.5 O gráfico mostra a análise dos espectros das fases rotacionais que apresentaram as maiores variações. A curva em azul acima e abaixo do zero é o gráfico do 2γ e do -2γ em função de λ , que representam os limites máximos de variação de um espectro para que a variação espectral não seja considerada significativa. A curva verde é a diferença entre os ajustes polinomiais dos espectros.

Capítulo 4

Discussão

Neste trabalho foram apresentadas e discutidas algumas propriedades físicas do asteroide 9 Metis obtidas por técnicas e autores diversos. Algumas destas propriedades como, por exemplo, o tamanho e a forma do asteroide apresentam valores bem coerentes entre as diversas determinações (Mitchell *et al.* 1995, Kristensen 1984, Storrs *et al.* 2005). Isto nos permite concluir que estas são características bem conhecidas do asteroide. Entretanto, o mesmo não ocorre para outras propriedades físicas de 9 Metis, em particular, sua composição superficial.

Desde os primeiros trabalhos visando à classificação taxonômica do asteroide (Tholen 1989, Gaffey *et al.* 1993, Kelley e Gaffey, 2000), resultados diferentes têm sido obtidos das observações espectrofotométricas e espectroscópicas. Uma possível explicação para estes resultados é de que a superfície do asteroide 9 Metis apresente variações composicionais. As variações de composição poderiam ser originárias da fragmentação de um corpo diferenciado. Lembramos que um corpo diferenciado se caracteriza por apresentar uma estratificação de minerais distintos, ocorrida nos primórdios da formação do asteroide ou devido a algum processo de aquecimento posterior à sua formação. Uma colisão com outro objeto revelaria camadas e, portanto, minerais distintos. Esta hipótese foi analisada por Mothé-Diniz *et al.* (2000) através da observação espectroscópica da superfície do asteroide a medida de que este gira em torno de seu eixo. Um resultado bastante interessante foi de que foram detectadas variações significativas em algumas posições do asteroide.

Outra possibilidade é de que a superfície do asteroide apresente variações de estrutura, isto é, granulação, que se reflete no albedo observado. No trabalho de Nakayama *et al.* (2000) esta hipótese foi analisada mostrando que, de fato, duas manchas de albedo ajustariam as observações polarimétricas e fotométricas.

A proposta do presente trabalho foi então o de analisar um novo espectro rotacional de 9 Metis para confirmar, ou não, os resultados de Mothé-Diniz *et al.* (2000) e também

procurar ampliar as comparações entre os diversos estudos realizados sobre este asteroide. A análise do novo espectro rotacional, obtido a partir de observações realizadas em outubro de 2000, não indicou a existência de variações composicionais significativas, dentro da precisão dos dados.

Em seguida, procurou-se associar as manchas de albedo propostas por Nakayama *et al.* (2000) aos espectros obtidos por Mothé-Diniz *et al.* (2000) e aos novos espectros aqui analisados. Vale lembrar que um dado fundamental na análise comparativa de todas essas observações é o ângulo de aspecto já que, dependendo da posição do observador em relação ao eixo de rotação do asteroide, uma determinada face do asteroide pode ser visível ou não. Os ângulos de aspecto para as observações de Nakayama *et al.* (2000), de Mothé-Diniz *et al.* (2000) e as do presente trabalho são respectivamente: 128°, 31° e 119°.

Como os ângulos de aspecto das observações aqui apresentadas e das de Nakayama *et al.* (2000) são muito próximos, 128° e 119°, os dois trabalhos deveriam fornecer resultados análogos. Entretanto, como descrito acima, o novo espectro rotacional não apresentou variações significativas nas diversas fases. Portanto, ou a suposição da presença de manchas feita por Nakayama *et al.* (2000) está errada, ou então, as mesmas, apesar de apresentarem um albedo maior do que o restante da superfície, não causam variações detectáveis no espectro do asteroide. Esta última hipótese precisaria ser testada através de modelagem numérica como apresentada por Nakayama *et al.* (2000).

É importante também destacar que nem as observações aqui analisadas nem as de Nakayama *et al.* (2000) invalidam os resultados de Mothé-Diniz *et al.* (2000), já que estas observações foram obtidas em um ângulo de aspecto muito diferente, podendo ter observado características superficiais únicas.

Podemos concluir que o estudo do asteroide 9 Metis tem revelado características superficiais muito interessantes. Entretanto, ainda não foi possível realizar um mapeamento mineralógico caracterizando toda superfície desse asteroide. Para tanto, seria necessário realizar estudos do espectro rotacional na região do infravermelho, já que essa região apresenta bandas de absorção capazes de indicar a composição mineralógica dos asteroides. Além disso, para o estudo ser completo, seria necessária a obtenção do espectro rotacional para diferentes ângulos de aspectos. Por fim, novas observações são necessárias a fim de caracterizar de forma definitiva a superfície deste asteroide.

Referências

- Bell, J. F., P. D. Owensby, B. R. Hawke, M. J. Gaffey 1988. The 52-color asteroid survey: Final results and interpretation. *Lunar Planet. Sci.* **19**, 57-58.
- Chapman, C. R., M. J. Gaffey 1979. Reflectance spectra for 277 asteroids. Em *Asteroids* (T. Gehrels, Ed.), pp 655-687. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- De Angelis, G. 1995. Asteroid spin, pole and shape determinations. *Planet. Space Sci.* **43**, 649-682.
- Dollfus, A., J. E. Geake, 1977. Polarimetric and photometric studies of lunar samples. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* **285**, 397-402.
- Dollfus, A., B. Zellner 1979. Optical polarimetry of asteroids and laboratory samples. Em *Asteroids* (T. Gehrels, Eds.), pp. 170-183. Univ of Arizona Press, Tucson.
- Dollfus, A., M. Wolff, J. E. Geake, D. F. Lupishko, L. M. Dougherty 1989. Photopolarimetry of asteroids. Em *Asteroids II* (R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, Eds.), pp. 594-616. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- Gaffey, M. J., J. F. Bell, R. H. Brown, T. H. Burbine, J. L. Piatek, K. L. Reed, D. A. Chaky 1993. Mineralogical variations within the S-type asteroide class. *Icarus* **106**, 573-602.
- Gaffey, M. J. 1999. Asteroid 113 Amalthea: Nature, origin and meteorite affinities of an S(I) assemblage. *Icarus*, submitted.
- Goidet-Devel, B., J. B. Renard, A. C. Levasseur-Regourd 1995. Polarization of asteroids. Synthetic curves and characteristic parameters. *Planet. Space Sci.* **43**, 779-786.
- Kelley, S. M, J. M. Gaffey 2000. 9 Metis and 113 Amalthea: A genetic asteroid pair. *Icarus* **144**, 27-38.
- Kristensen, L. K. 1984. 9 Metis okkultationen den 19 februar 1984. *Astronomi Rumfart* 76-78.
- Lagerros, J. S. V., T. G. Müller, U. Klaas, A. Erikson, 1999. ISOPHOT Polarization measurements of the asteroids 6 Hebe and 9 Metis at 25 μm . *Icarus* **142**, 454-463.
- Lazzaro, D., C. A. Angeli, J. M. Carvano, T. Mothé-Diniz, R. Duffard, M. Florczak, 2004. S³OS²: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids. *Icarus* **172**, 179-220.

- Lupishko, D. F., R. A. Mohamed 1996. A new calibration of polarimetric albedo scale of asteroids. *Icarus* **119**, 209-213.
- Lyot, B., 1929. Annales de L'Observatoire de Paris, Meudon, 8 No. 1. [In English: NASA Technical Translation TT F-187, Washington DC (1964)].
- Mitchell, D. L., S. J. Ostro, K. D. Rosema, R. S. Hudson, D. B. Campbell, J. F. Chandler, and I. I. Shapiro 1995. Radar observations of asteroids 7 Iris, 9 Metis, 12 Victoria, 216 Kleopatra, and 654 Zelinda. *Icarus* **118**, 105-131.
- Mothé-Diniz, T., D. Lazzaro, J. M. Carvano, M. Florczak, 2000. Rotationally resolved spectra of some S-type asteroids. *Icarus* **148**, 494-507.
- Mothé-Diniz, T., F. Roig, J. M. Carvano, 2005. Reanalysis of asteroid families structure through visible spectroscopy. *Icarus* **174**, 54-80.
- Nakayama, H., Y. Fujii, M. Ishiguro, R. Nakamura, S. Yokogawa, F. Yoshida, T. Mukai, 2000. Observations of Polarization and Brightness Variations with the Rotation for Asteroids 9 Metis, 52 Europa, and 1036 Ganymed. *Icarus* **146**, 220-231.
- Sawyer, S. R. 1991. *A High Resolution CCD Spectroscopic Survey of Low Albedo Main Belt asteroids*. Ph.D. thesis, University of Texas, Austin.
- Storrs, A., B. Weiss, B. Zellner, W. Bursell, R. Sitchin, E. Wells, C. Kowal, D. Tholen 1999. Imaging Observations of Asteroids with Hubble space telescope. *Icarus* **137**, 260-268
- Storrs, A. D., C. Dunne, J.-M. Conan, L. Mugnier, B. P. Weiss, B. Zellner, 2005. A closer look at main belt asteroids I: WF/PC images. *Icarus* **173**, 409-416.
- Tholen, D. J. 1989. Asteroid taxonomic classifications. Em *Asteroids II* (R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, Eds.), pp. 113-150. Univ. Of Arizona Press, Tucson.
- Wang, S., Y. Wu, M. Bao, L. Deng, S. Wu, 1981. A possible satellite of 9 Metis. *Icarus* **46**, 285-287.
- Williams, J. G. 1989. Asteroid family identifications and proper elements. Em *Asteroids II* (R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, Eds.), pp. 1034-1072. Univ. Of Arizona Press, Tucson.
- Williams, J. G. 1992. Asteroid families-An initial search. *Icarus* **96**, 251-280.
- Zellner, B., J. Gradie 1976. Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids. *Astron. J.* **81**, 262-280.

Zellner, B. 1977. Optical polarimetry of particulate surfaces. Em *Optical Polarimetry, Instrumentation and Applications* (R. M. A. Azzam and D. L. Coffeen, Eds.) 112, 168-175.

Zellner, B., D. J. Tholen, E. F. Tedesco 1985. The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets. *Icarus* **61**, 355-416.