



Observatório  
Nacional

TESE DE DOUTORADO

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITAS  
PRÓXIMAS DA TERRA PARA O ESTUDO DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS

PLÍCIDA ARCOVERDE

RIO DE JANEIRO

2022



Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações  
Observatório Nacional  
Programa de Pós-Graduação

Tese de Doutorado

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITAS  
PRÓXIMAS DA TERRA PARA O ESTUDO DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS

por

Plícida Arcoverde

Tese submetida ao Corpo Docente do  
Programa de Pós-graduação em Astronomia  
do Observatório Nacional, como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Grau  
de Doutor em Astronomia.

Orientador: Dra. Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Junho de 2022

A837

Arcoverde, Plícida

Determinação e análise de curvas de fase de objetos em órbitas próximas da Terra para o estudo de suas propriedades físicas [Rio de Janeiro] 2022.

xxii, 133 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Tese (doutorado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2022.

1. Objetos próximos da Terra. 2. Curvas de Fase. 3. caracterização física de NEOs. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM  
ÓRBITAS PRÓXIMAS DA TERRA PARA O ESTUDO DE SUAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS”

PLÍCIDA ARCOVERDE

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

---

Dra. Daniela Lazzaro – Observatório Nacional  
(Orientador)

---

Dr. Fernando Virgílio Roig – Observatório Nacional

---

Dr. Javier Licandro – IAC - Espanha

---

Dr. Gonzalo Tancredi – UDELAR - Uruguai

---

Dr. Ricardo Gil-Hutton – CASLEO - Argentina

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

29 DE JUNHO DE 2022



*À minha avó, Maria do Carmo,  
por seu legado de força e  
resistência, que tanto me inspira  
para seguir rompendo barreiras.*





"Ela [a educação crítica] afirma que os homens são seres capazes de se superar, que vão adiante e olham o futuro..."

- Paulo Freire.



# Agradecimentos

Com o fim desse doutorado tenho mais um ciclo que se encerra. Uma conquista pessoal almejada desde os tempos de graduação, que vejo agora se concretizar. Embora pareça ser um percurso longo, é inevitável o sentimento de "não vai dar tempo!". E chegar até aqui, é fruto de muito trabalho, estudo, dedicação, incontáveis noites de sono trocadas por noites de observação, mas felizmente, tive ao meu lado pessoas que me deram o apoio que eu necessitava. Além de ser um período intenso, de prazos e autocobranças, vivi como todo brasileiro o delicado período pandêmico e político de nosso país. Então, a todos que foram suporte e apoio, gostaria de agradecer:

- À minha querida orientadora, Dra. Daniela Lazzaro, pela paciência, tantas vezes exigida, e pelo grande suporte e incentivo. Estar sob sua orientação por todos esses anos contribuiu muito para meu crescimento pessoal e acadêmico. Os ensinamentos adquiridos ao longo desse tempo, foram de fundamental importância na minha vida.
- Ao amigo e muitas vezes co-orientador, Eduardo Rondón, por todos os ensinamentos passados sobre IRAF e redução de dados, e pela paciência com as recorrentes dúvidas que surgiam. Sem você esse percurso teria sido bem mais difícil.
- À minha mãe, Márcia, por todo seu cuidado e carinho, que mesmo nos momentos de distância sempre se fez presente, me passando confiança e força. À meu pai, Romero, pelo apoio e por me ensinar quando criança a beleza do céu noturno, despertando em mim um interesse pela astronomia que me trouxe até aqui. O carinho de vocês me dá forças sempre que preciso.
- À meu irmão, Romerito, por sempre cuidar tão bem da caçula da família. Longe ou perto, sei que posso sempre contar contigo. À minha cunhada e amiga, Paula, por seu carinho e suporte. Vocês me inspiram.
- À meu cãopanheiro Bira, que é uma fonte inesgotável de amor e carinho. Por todas as vezes que me animou e me consolou, e das vezes que me deu trabalho também (que foram muitas!). Você foi uma das melhores coisas que o RJ me deu.
- À equipe do projeto IMPACTON, por toda iniciativa e esforços para manter nossa pesquisa em andamento. À equipe de observadores: Eduardo, Marçal, Filipe, Wesley Mesquita, Wesley Pereira, Jonatan e Tatiane, pela árdua tarefa das noites de

observações. Nosso trabalho em equipe foi de grande importância para este trabalho e para a vida. E ao grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional: a todos os professores e alunos, pela oportunidade de participar de um grupo que muito contribuiu para minha formação profissional e pessoal.

- À equipe de colaboração do INAF, Itália. Em especial à Simone Ieva, por todo o ensinamento de estratégia observacional e pela oportunidade de trabalharmos juntos.
- À meus amigos conterrâneos, parcerias de conquistas, momentos de confraternização e de tantos debates políticos e filosóficos. Separados pela distância RJ-PE, ou no distanciamento social que passamos, vocês sempre se fizeram presentes. Saber que sempre quando volto para PE tenho vocês para me receber, aquece meu coração. Que sigamos compartilhando a vida: Marlon, Beto, Ester, Camila, Janssen, Rafael e Willams.
- Aos amigos que me acolheram na cidade maravilhosa e trago pra vida: Isabella, Uendert, Rebeca, Pedro, Ana, Larrisa, Leo, Bijani, Carreira, Bruno, Flora, Vanderlei, André, Matias, Mercedes, Mário e Bitá. Seja na correria do dia a dia, na copinha compartilhando conhecimento de Astronomia, Geofísica e política, ou nos momentos de descontração na Feira, no nosso querido Picnic e nos carnavais de rua do RJ, a amizade de vocês foi fundamental. Em especial à família que escolhi e sempre estive comigo nos almoços de domingo, feriados, cuidando de Bira e quando mais senti saudade de casa: David, Simony e Nicolás, obrigada por sempre serem acolhimento, independente da distância.
- Ao Observatório Nacional, por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que financiou este trabalho.

A todos não mencionados diretamente, mas que foram importantes nessa etapa e na minha vida, obrigada.

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITAS  
PRÓXIMAS DA TERRA PARA O ESTUDO DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS

**RESUMO**

A observação de objetos próximos da Terra (NEOs) nos permite estudar as características físicas dos corpos de menor tamanho do nosso Sistema Solar, bem como impor restrições à sua origem e evolução. Dentre as diversas propriedades físicas de um pequeno corpo, a forma como sua superfície reflete a luz de acordo com o ângulo de iluminação, a chamada curva de fase fotométrica, é de suma importância. Define-se por curva de fase o ajuste das magnitudes reduzidas de um asteroide medidas em diversos ângulos de fase solar que nos fornecem os parâmetros  $H$ ,  $G_1$  e  $G_2$  da curva. Juntos, esses parâmetros podem fornecer informações sobre tamanho, propriedades de composição, textura e rugosidade. Neste trabalho vamos apresentar os resultados obtidos do estudo da curva de fase de 31 NEO através de observações com o Observatório Astronômico de Sertão de Itaparica (Brasil), com alguns NEOs também observados no Osservatorio di Campo Imperatore (Itália). Como resultados mostraremos métodos de tratamento dos dados para obter parâmetros da curva mais precisos, assim como aplicações de técnicas de caracterização das curvas de fase obtidas para inferir indicativos composicionais de NEOs. Também realizamos um estudo comparativo entre NEOs e populações de asteroides do Cinturão Principal, encontrando evidências da influência do diâmetro desses objetos na distribuição do espaço de fase  $G_1$  vs  $G_2$ .



Plícida Arcoverde

DETERMINATION AND ANALYSIS OF PHASE CURVES OF OBJECTS IN  
NEAR-EARTH ORBITS FOR THE STUDY OF THEIR PHYSICAL PROPERTIES

**ABSTRACT**

The observation of near-Earth objects (NEOs) allows us to study the physical characteristics of the smallest bodies in our Solar System, as well as to impose restrictions on their origin and evolution. Among the various physical properties of a small body, the way its surface reflects light according to the angle of illumination, the so-called photometric phase curve, is of paramount importance. A phase curve is defined as the adjustment of the reduced magnitudes of an asteroid measured at different solar phase angles that provide us with the  $H$ ,  $G_1$  e  $G_2$  parameters of the curve. Together these parameters can provide information about size, compositional properties, texture and roughness. In this work we will present the results obtained from the study of the phase curve of 31 NEO through observations with the Observatório Astronômico de Sertão de Itaparica (Brasil), with some NEOs also observed in the Osservatorio di Campo Imperatore (Italy). As result, we will show data processing methods to obtain more accurate curve parameters, as well as applications of techniques for characterizing the phase curves obtained to infer compositional indicatives of NEOs. We also carried out a comparative study between NEOs and Main Belt asteroid populations, finding evidence of the influence of the diameter of these objects on the distribution of the  $G_1$  vs  $G_2$  phase space.





# Lista de Figuras

1.1	<i>Representação orbital dos subgrupos da população de NEAs: Amor, Apollo, Aten e Atiras. Fonte: 2019 Let's Talk Science.</i>	2
2.1	<i>Geometria de observação do asteroide, à esquerda: <math>\alpha</math> o ângulo de fase, <math>\theta</math> o ângulo de de aspecto, <math>\Delta</math> a distância do asteroide até a Terra e <math>r</math> distância do asteroide até o Sol; à direita: variação do ângulo de fase solar, sendo em <math>\alpha = 0^\circ</math> o brilho máximo do objeto.</i>	6
2.2	<i>Imagem feita pela OSIRIS-REx spacecraft da superfície do asteroide (101955) Bennu em 21 de Março de 2019. Fonte: NASA/Goddard/University of Arizona.</i>	7
2.3	<i>Representação da seção transversal da superfície de um corpo sem atmosfera. Os pequenos pontos representam a poeira na superfície. Figura retirada do trabalho de Lumme and Bowell (1981a).</i>	7
2.4	<i>Representação da propagação de ondas eletromagnéticas em momentos reversos dando origem ao COB. Figura retirada do material de Espectroscopia Óptica do IFSC - USP.</i>	8
2.5	<i>Curva de fase do asteroide (20) Massalia retirada do trabalho de Gehrels (1956).</i>	9
2.6	<i>Curva de fase do NEO (144411) 2004 EW9 ajustadas com o modelo de três parâmetros linear (curva tracejada), e não linear (curva sólida). Na figura (a) estão apenas dados obtidos das observações com o telescópio Pan-STARRS 1; na figura (b) estão todos os dados disponíveis no Minor Planet Center. Em ambas figuras, os ajustes foram realizados usando apenas dados do Pan-STARRS 1, sendo a figura (b) a propagação dos ajustes para <math>\alpha</math> acima de <math>100^\circ</math>. Figura retirada de Penttilä et al. (2016).</i>	13
3.1	<i>Sítio do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI. Foto: Chico Rasta.</i>	16
3.2	<i>Sítio do Osservatorio di Campo Imperatore - CI. Foto: Media Inaf.</i>	16
3.3	<i>Ilustração da rotação de um corpo alongado e a curva de luz obtida em função do tempo.</i>	20

3.4	<i>Variação da amplitude da curva de luz de um corpo oblato observado em diferentes ângulos de aspecto <math>\theta</math>.</i> . . . . .	21
3.5	<i>Curva de fase do NEO (366683) 2002 WP. Os fits em preto e vermelho, são os ajustes antes e após a correção pelos efeitos rotacionais, respectivamente. Figura retirada de Rondón et al. (2019)</i> . . . . .	22
3.6	<i>Curva de luz composta do NEO (366683) 2002 WP. Figura retirada de Rondón et al. (2019)</i> . . . . .	22
4.1	<i>Interface do calculador fotométrico online desenvolvido por Penttilä et al. (2016). No exemplo são usados dados do asteroide (44) Nysa.</i> . . . . .	27
4.2	<i>Valores de <math>G_1</math> de <math>G_2</math> para os 93 objetos de Shevchenko et al. (2016). As letram indicam os tipos taxonômicos. Figura retirada do trabalho de Shevchenko et al. (2016).</i> . . . . .	27
4.3	<i>Gráfico retirado do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000) em que mostra a relação da amplitude do OE versus o logaritmo do albedo para diferentes classes taxonômicas.</i> . . . . .	28
4.4	<i>Gráfico retirado do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000) em que mostra a relação da da contribuição do COB versus o logaritmo do albedo para diferentes classes taxonômicas.</i> . . . . .	29
4.5	<i>Espaço de fase <math>G_1 - G_2</math>. Os NEOs estão representados em pontos coloridos seguido de sua designação. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022).</i>	32
4.6	<i>Amplitude do OE vs albedo. Os NEOs estão representados em pontos coloridos seguido de sua designação. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022) com nossos dados sobrepostos ao gráfico obtido de Belskaya and Shevchenko (2000).</i> . . . . .	33
4.7	<i>Relação da da contribuição do COB versus o logaritmo do albedo. Os NEOs estão representados em pontos coloridos seguido de sua designação. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022) com nossos dados sobrepostos ao gráfico obtido de Belskaya and Shevchenko (2000).</i> . . . . .	34
4.8	<i>Curvas de fase dos 15 NEOs obtidas a partir de observações em CI (dados em vermelho) e no OASI (dados em amarelo). As curvas vermelhas representam o ajuste do modelo <math>H-G_1-G_2</math> e o envelope de incerteza para o modelo, enquanto a linha pontilhada preta mostra o ajuste linear. Notar que as primeiras 9 curvas não apresentam OE, ou muito pequeno, enquanto as demais apresentam um OE de moderado a alto. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022).</i> . . . . .	36
5.1	<i>Objetos do MB e distribuídos de acordo com o semieixo maior (<math>a</math>) versus o seno da inclinação (<math>\sin i</math>), mostrando as principais RMM e a ressonância secular <math>\nu_6</math>. Figura retirada do trabalho de (Zain et al., 2020).</i> . . . . .	38

5.2	<i>Histograma bidimensional dos parâmetros de inclinação <math>G_1</math> e <math>G_2</math> das diferentes classes taxonômicas para a amostra de 93 MB dada em Shevchenko et al. (2016). As posições de nossos 6 NEOs são indicadas pelos grandes símbolos brancos. Figura retirada de Rondón et al. (2019).</i>	39
5.3	<i>Curvas de fase determinadas para os 13 NEOs. As curvas vermelhas representam o ajuste do modelo <math>H-G_1-G_2</math> e o envelope de incerteza para o modelo. Figuras retiradas de Arcoverde et al. (submetido).</i>	41
5.4	<i>Curvas de luz e período rotacional dos três NEOs 174050, 2011 YQ10 e 2019 CT4, respectivamente. Figuras retiradas de Arcoverde et al. (submetido).</i>	42
5.5	<i>Distribuição dos parâmetros do seno da inclinação por semieixo maior. A distribuição utiliza os elementos próprios de inclinação e semieixo maior dos MB.</i>	42
5.6	<i>Distribuição no espaço de fase <math>G_1-G_2</math> para um conjunto de objetos do MB fornecidos em Shevchenko et al. (2016), figura inferior, e para os mesmos objetos com dados obtidos a partir do catálogo AAMS, figura superior. <math>N</math> é o número de objetos, as diferentes classes taxonômicas são indicadas na figura e os ajustes lineares são representados por uma linha preta.</i>	44
5.7	<i>Figura inferior: distribuição no espaço de fase <math>G_1-G_2</math> para o conjunto de objetos do MB utilizados em Shevchenko et al. (2016). Figuras superiores: distribuição para os mesmos objetos com dados obtidos do ATLAS no filtro cyan e orange, à esquerda e direita, respectivamente. <math>N</math> é o número de objetos, as diferentes classes taxonômicas são indicadas na figura e os ajustes lineares são representados pela linha preta. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	45
5.8	<i><math>G_1, G_2</math>-distribuições para três faixas de albedo: albedo baixo, albedo médio e albedo alto, compreendendo 21.865 objetos, do catálogo de curvas de fase de asteroides da fotometria de banda dupla ATLAS, observada em cyan (ajuste azul) e orange (ajuste vermelho). As distribuições são representadas por estimadores de densidade de kernel gaussianos 2 D (KDE) ajustados aos pares <math>G_1, G_2</math>. A linha preta corresponde ao ajuste linear da amostra com valor de inclinação mostrado, e a linha tracejada corresponde ao ajuste linear com os 93 MB do trabalho Shevchenko et al. (2016). <math>N</math> é o número de asteróides em cada intervalo de albedo. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	46
5.9	<i>Distribuição similar à figura 5.8 com os objeto de albedo baixo separados por diâmetro. A amostra conta com 7.683 objetos. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	47

5.10	<i>Distribuição similar à figura 5.8 com os objeto de albedo médio separados por diâmetro. A amostra conta com 9.893 objetos. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	48
5.11	<i>Distribuição <math>G_1, G_2</math> para as três faixas de diâmetro: <math>D &lt; 10</math> km, <math>10\text{km} &lt; D &lt; 50</math> km, e <math>D &lt; 50</math> km. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	48
5.12	<i>Distribuição similar à figura 5.8 com os objeto de albedo alto separados por diâmetro. A amostra conta com 4.289 objetos. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	49
5.13	<i>Distribuição por 2 D Gaussian Kernel Density Estimators (KDE) ajustados aos pares <math>G_1, G_2</math> similar à figura 5.8, com três faixas de albedo para MB com <math>D &lt; 10</math> km. Símbolos representam dados de cada trabalho, círculos, losangos, pentágono e triângulos são do presente trabalho, de Rondón et al. (2019), de Rondón et al. (2022) e Ieva et al. (2022), respectivamente. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	50
5.14	<i>Similar a figura 5.13 para todos NEOs com albedo determinado (figuras superiores) e para todas os 105 NEOs de nossa amostra (figura inferior). Os albedos são especificados na caixa inferior direita, enquanto a linha preta indica os ajustes lineares aos dados MB e a linha tracejada indica os ajustes lineares ao NEO. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	51
5.15	<i>Histograma da magnitude absoluta de MB com <math>D &lt; 10\text{km}</math> (figura superior) e nossa amostra de NEOs (figura inferior). Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).</i>	52
B.1	<i>(4055) Magellan.</i>	79
B.2	<i>(18109) 2000 NG11.</i>	80
B.3	<i>(65717) 1993 BX3.</i>	80
B.4	<i>(99799) 2002 LJ3.</i>	81
B.5	<i>(174050) 2002 CC19.</i>	81
B.6	<i>(40267) 1999 GJ4.</i>	82
B.7	<i>(417581) 2006 VA3.</i>	82
B.8	<i>(464797) 2004 FZ1.</i>	83
B.9	<i>(480004) 2014 KD91.</i>	83
B.10	<i>2011 YQ10.</i>	84
B.11	<i>2016 RP33.</i>	84
B.12	<i>2017 AC5.</i>	85
B.13	<i>2019 CT4.</i>	85

# Lista de Tabelas

1.1	<i>Subgrupos de NEO, sua definição e número de objetos conhecidos até a data de 12/05/2022, onde <math>a</math> é o semi-eixo maior, <math>Q</math> a distância afélica e <math>q</math> a distância periélica.</i>	2
3.1	<i>Para cada NEO observado é dado o nome, o subgrupo, o período de observação, o intervalo do ângulo de fase solar, o albedo, o período de rotação e a amplitude da curva de luz usada para correção.</i>	18
3.2	<i>Para cada MB observado é dado o nome, o período de observação, o intervalo do ângulo de fase solar e o albedo quando disponível.</i>	19
4.1	<i>Para cada NEO é fornecido a magnitude absoluta <math>H_R</math>, o coeficiente <math>b</math>, albedo, <math>G_1</math>, <math>G_2</math>, OE e COB. O coeficiente <math>b</math> é a inclinação linear da curva calculada para <math>\alpha &gt; 5^\circ</math>.</i>	31
4.2	<i>Taxonomia derivada para cada NEO de acordo com a técnica utilizada. Na segunda coluna é dada a classificação dada na literatura, seguida das obtidas pelas técnicas de forma da curva, espaço de fase <math>G_1</math>-<math>G_2</math>, amplitude do OE, contribuição do COB, respectivamente. Na ultima coluna é apresentada a classificação mais provável atribuída a cada objeto.</i>	35
5.1	<i>Parâmetros determinados para 13 NEOs observados no OASI e CI. Na parte superior da tabela são dados os parâmetros da curva de fase onde as colunas indicam o nome do asteroide, a magnitude absoluta (<math>H_{R0}</math>), e os parâmetros de inclinação (<math>G_1</math> e <math>G_2</math>). Na parte inferior são dados o nome do asteroide as cores V - R, a data e o ângulo de fase em que a cor foi adquirida, e o diâmetro determinado (<math>D</math>).</i>	43
5.2	<i>Parâmetros determinados para os 4 MB observados no OASI. Na parte superior são dados os parâmetros da curva de fase onde as colunas indicam o nome do asteroide, a magnitude absoluta no filtro R (<math>H_{R0}</math>) e V (<math>H_{V0}</math>) do sistema Johnson-Cousins, e os parâmetros de inclinação (<math>G_1</math> e <math>G_2</math>).</i>	44

A.1	Circunstâncias observacionais e magnitudes derivadas das curvas de fase e demais objetos de nossa amostra. Para cada asteróide é dado: o nome, a data, o filtro, a magnitude calibrada (mag) e o ângulo de fase solar ( $\alpha$ ). . .	65
A.1	Continued. . . . .	66
A.1	Continued. . . . .	67
A.1	Continued. . . . .	68
A.1	Continued. . . . .	69
A.1	Continued. . . . .	70
A.1	Continued. . . . .	71
A.1	Continued. . . . .	72
A.1	Continued. . . . .	73
A.1	Continued. . . . .	74
A.1	Continued. . . . .	75
A.2	Estes são os parâmetros H- $G_1$ - $G_2$ das curvas de fase dos 32 NEOs usados em nossa análise. . . . .	75
A.2	Continued. . . . .	76
A.2	Continued. . . . .	77

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução e Motivação</b>	<b>1</b>
<b>2 Curvas de fase: definições e métodos</b>	<b>5</b>
2.1 Efeito de Oposição . . . . .	6
2.1.1 <i>Shadowing-hidding mechanism (SH)</i> . . . . .	7
2.1.2 <i>Coherent-backscattering Mechanism (COB)</i> . . . . .	8
2.2 Curva de fase fotométrica . . . . .	9
2.3 Modelo H- $G_1$ - $G_2$ não linear . . . . .	10
<b>3 Observações astronômicas e metodologia</b>	<b>15</b>
3.1 Aquisição dos dados . . . . .	15
3.2 Amostra . . . . .	16
3.2.1 Determinação da curva de fase . . . . .	19
<b>4 Caracterização de curvas de fase</b>	<b>25</b>
4.1 Técnicas de caracterização . . . . .	25
4.1.1 Forma da curva de fase . . . . .	25
4.1.2 Espaço de fase $G_1 - G_2$ . . . . .	26
4.1.3 Amplitude do OE e contribuição do COB . . . . .	28
4.2 Aplicação de técnicas de caracterização aos NEOs . . . . .	30
4.3 Discussão . . . . .	33
<b>5 Comparação das propriedades físicas de NEOs e MB</b>	<b>37</b>
5.1 Metodologia e resultados . . . . .	38
5.1.1 Correlação $G_1 - G_2$ para MB . . . . .	46
5.1.2 NEOs vs MB . . . . .	50
5.2 Discussão . . . . .	53
<b>6 Conclusões</b>	<b>55</b>

Referências Bibliográficas	57
A Condições observacionais e parâmetros de curvas de fase determinados	65
B Curvas de fase dos NEOs	79
C Artigos publicados e submetidos originários do trabalho aqui apresentado	87



# Capítulo 1

## Introdução e Motivação

Para melhor compreender a formação e evolução do nosso Sistema Solar, é preciso uma boa determinação das características físicas dos pequenos corpos que o compõem. Os pequenos corpos estão divididos em diversas populações, tais como os asteroides, os Centauros, os objetos transnetunianos (ou TNO) e os cometas. Os principais reservatórios de pequenos corpos se localizam nas regiões mais internas do Sistema Solar, no Cinturão Principal de Asteroides (ou MB, do inglês *Main Belt Asteroids*), localizado entre as órbitas de Marte e Júpiter, ou nas mais externas, além da órbita de Netuno. Porém, mecanismos de transporte podem fazer com que corpos sejam transportados tanto para dentro quanto para fora do Sistema Solar, alterando sua localização.

Em 13 de Agosto de 1898, Gustav Witt, em Berlim, e Auguste Charlois, em Nice, descobriram simultaneamente (433) Eros, o primeiro objeto em órbita próximo da Terra. Este objeto, o primeiro de uma grande população denominada de NEO, do inglês *Near Earth Object*, é o segundo maior em tamanho, depois de (1036) Ganymed. Apesar da descoberta, a busca e estudos mais direcionado de NEOs se deu apenas no início da década de 80, e como consequência da iniciativa, foi possível observar o impacto do cometa Shoemaker-Levy 9 com Júpiter em julho de 1994 que expôs de forma clara o risco dos NEOs para a Terra. Atualmente são conhecidos mais de 28.000 NEOs, com uma taxa de descoberta anual de 3.000 objetos desde 2020, em sua maioria menores do que 1 km.

Define-se por NEOs, aqueles corpos com periélio menor ou igual a 1,3 UA, que tanto podem ser asteroides como cometas dormentes ou extintos. Dinamicamente essa população é dividida em 4 subgrupos - Aten, Apollo, Amor e Atira - com órbitas próximas ou cruzadoras da órbita da Terra, a depender de suas características orbitais, como semieixo maior ( $a$ ), distância ao periélio ( $q$ ), e distância ao afélio ( $Q$ ) (Binzel et al., 2015; Shoemaker et al., 1979). A figura 1.1 mostra a órbita típica dos quatro principais subgrupos dos NEOs.

Os objetos do subgrupo Amor, são os que possuem órbita externa a da Terra, enquanto os subgrupos Apollo e Atens interceptam a órbita da Terra Shoemaker et al. (1979). Os objetos que possuem órbita interna à órbita da Terra, foram inicialmente denominados de

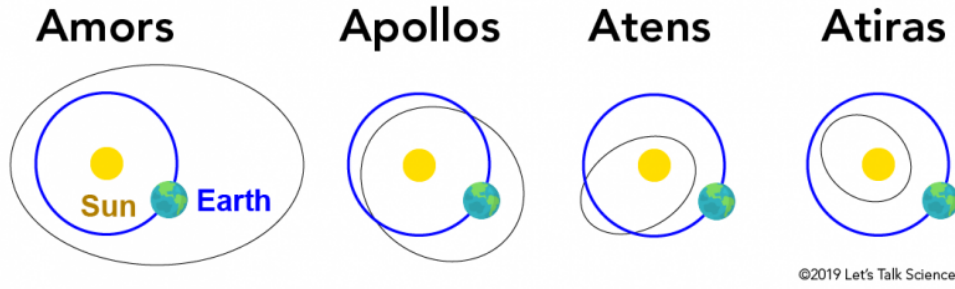


Figura 1.1: Representação orbital dos subgrupos da população de NEAs: Amor, Apollo, Aten e Atiras. Fonte: 2019 Let's Talk Science.

Apoheles por Tholen (1998) e posteriormente de *Inner-Earth Objects* (IEOs) por Michel et al. (2000). Atualmente, esses objetos são divididos em três população por Greenstreet et al. (2012): os Atiras, com órbita interior à da Terra, os Vatiras, com uma órbita totalmente interior à de Vênus, e os Vulcanoids, com órbita interior à de Mercúrio. Um outro importante subgrupo é o dos PHA, do inglês *Potentially Hazardous Asteroids*, definido por aqueles objetos que possuem uma distância mínima de interseção com a Terra, ou MOID (do inglês *Minimum Orbit Intersection Distance*), menor ou igual a 0,05 UA e uma magnitude absoluta (H) menor ou igual a 22,0. Na tabela 1.1 é dada a definição dinâmica de cada subgrupo, assim como o número de objetos conhecidos até a data de 12/05/2022.

Tabela 1.1: Subgrupos de NEO, sua definição e número de objetos conhecidos até a data de 12/05/2022, onde  $a$  é o semi-eixo maior,  $Q$  a distância afélica e  $q$  a distância periélica.

Subgrupo de NEAs	Definição	$N^\circ$ de objetos conhecidos
Atiras	$a < 1UA$ e $0,718 < Q < 0,983UA$	54
Atens	$a < 1UA$ e $Q > 0,983UA$	2.232
Apollos	$a > 1UA$ e $q \leq 1,017UA$	14.772
Amors	$a > 1UA$ e $1,017 < q \leq 1,3UA$	11.886
Vatiras	$a < 1UA$ e $0,307 < Q < 0,718UA$	1
Vulcanoid	$a < 1UA$ e $Q < 0,307UA$	-
Total		28.941
PHAs	$MOID \leq 0,05UA$ e $H \leq 22$	2.279

O estudo de NEOs se torna particularmente interessante por serem considerados uma

população transiente, originária principalmente das regiões mais internas do MB, e com permanência na região de cerca de  $10^7$  anos antes de sofrerem uma colisão com um planeta terrestre ou serem ejetados para os confins do Sistema Solar (Bottke et al., 2002; Morbidelli et al., 2002). O estudo destes objetos permite estabelecer relações com outras populações de pequenos corpos, podendo fornecer informações importantes sobre a evolução dinâmica e composicional do nosso Sistema Solar. Vale lembrar, que os NEOs moldaram a história biológica e geológica do nosso planeta devido aos inúmeros impactos ao longo de milhões de anos.

Em contrapartida, por serem objetos que se aproximam bastante da Terra, isso nos permite obter mais facilmente informações sobre as propriedades físicas dos menores objetos, quando comparados com a população de MB. Com isso, a caracterização física de NEOs nos possibilita uma melhor compreensão não apenas dos mecanismos de transporte que abastecem essa população, mas também sobre a população de menores corpos do Sistema Solar.

A determinação de propriedades físicas importantes, tais como período de rotação, tamanho e composição superficial, pode ser obtida a partir do estudo fotométrico desses corpos. Dentro desse contexto, o projeto Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional (IMPACTON), é dedicado ao seguimento e a caracterização física de corpos menores do Sistema Solar com ênfase em NEOs (Lazzaro, 2010; Rondón et al., 2020), inserindo o Brasil em campanhas de observação e projetos de colaboração internacionais.

Apesar da grande quantidade de objetos conhecidos, apenas cerca de 10% dessa população possuem propriedades físicas determinadas (Galache et al., 2015). Assim, inserido no projeto IMPACTON, o presente trabalho busca contribuir com informações de propriedades físicas de pequenos corpos a partir da determinação de curvas de fase fotométricas, que estuda a variação do brilho do objeto de acordo com a iluminação, ou o ângulo de fase solar. Define-se por o ângulo de fase o ângulo Sol-asteroide-observador o qual representa a geometria de visada em função da iluminação solar. A determinação de curvas de fase nos fornece parâmetros como a magnitude absoluta,  $H$ , que está relacionada ao brilho intrínseco do objeto, e parâmetros de inclinação da curva,  $G_1 - G_2$ , que se relacionam com propriedades físicas do corpo. Juntos esses parâmetros podem fornecer informações sobre o albedo do corpo e sobre o tamanho dos grãos na superfície (ver próximo capítulo para mais detalhes).

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é dada a fundamentação teórica. No capítulo 3 a descrição das observações e redução de dados, bem como a metodologia usada para derivar os parâmetros da curva de fase. Por fim, nos capítulos 4 e 5, são apresentados os dados fotométricos e os resultados obtidos. No último capítulo, apresentamos as conclusões gerais deste trabalho.



## Capítulo 2

# Curvas de fase: definições e métodos

Estima-se que um dos pioneiros no estudo da fotometria foi o astrônomo grego Hiparco de Nicea por volta de 150 A.C. o qual, a olho nu, classificou as estrelas de acordo com seu brilho aparente, usando uma escala de 1 a 6, do mais ao menos brilhante. Por definição, a magnitude vista por um observador na Terra é dada como magnitude aparente, enquanto o brilho intrínseco do objeto é dado pela magnitude absoluta. Para os pequenos corpos do Sistema Solar que não possuem luz própria, sendo visíveis apenas quando refletem a luz solar, se faz necessário obter a magnitude reduzida para conhecermos sua magnitude absoluta.

Define-se como magnitude reduzida a magnitude visual que um observador registraria considerando o asteroide localizado a uma distância de 1 UA tanto da Terra e quanto do Sol. Portanto, a magnitude absoluta de um pequeno corpo é, por definição, a magnitude reduzida num ângulo de fase solar zero obtida a partir da curva de fase do corpo.

Define-se por curva de fase de um corpo sem atmosfera, a variação do brilho em função do ângulo de fase solar. Para melhor compreender esse conceito é importante conhecer a geometria de observação. O ângulo de fase solar é o ângulo entre a radiação solar incidente num corpo e aquela refletida para um observador na Terra. À medida que esse ângulo aumenta, a superfície iluminada tem menor área, logo o brilho do objeto tende a diminuir. Em contrapartida, em ângulos de fase abaixo de  $\sim 8^\circ$ , ocorre um aumento não linear do brilho do objeto, sendo a ângulo de fase de  $0^\circ$  o máximo de iluminação da superfície do corpo e o pico de reflexão da luz solar, o que chamamos de oposição.

A figura 2.1, à esquerda, mostra a geometria de observação para um observador na Terra, onde  $\alpha$  é o ângulo de fase solar,  $\Delta$  a distância da Terra até o asteroide,  $r$  a distância do asteroide até o Sol, e  $\theta$  o ângulo de aspecto entre a direção de polo e a linha de visada; à direita, está a variação do ângulo de fase solar, e à medida que o ângulo de fase diminui o brilho do objeto tende a aumentar, sendo em  $\alpha = 0^\circ$  o brilho máximo do objeto.

No que segue, primeiramente vamos descrever alguns parâmetros e conceitos básicos, relevantes para entender a curva de fase e os parâmetros derivados desta, em seguida vamos falar do ajuste aqui utilizado.

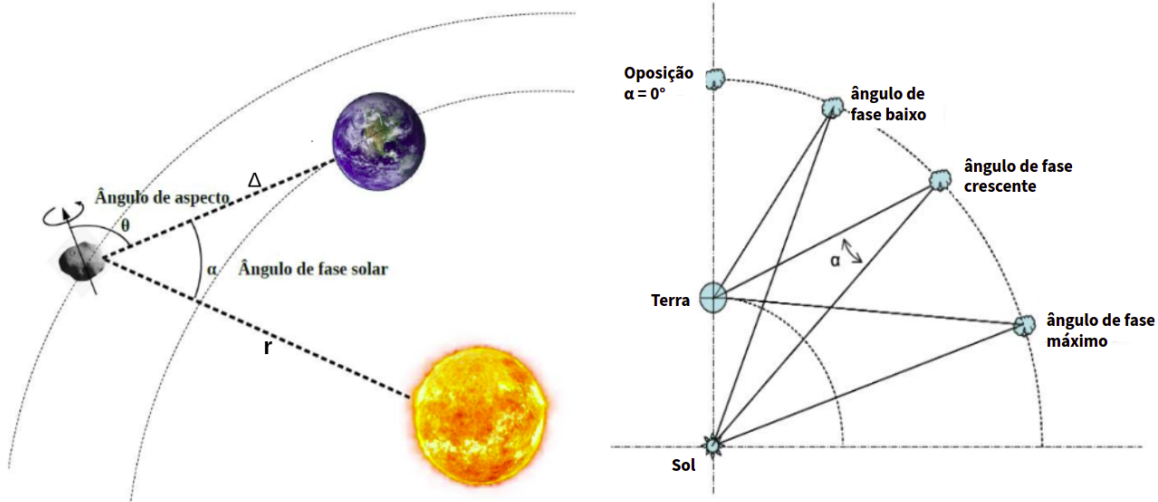


Figura 2.1: Geometria de observação do asteroide, à esquerda:  $\alpha$  o ângulo de fase,  $\theta$  o ângulo de de aspecto,  $\Delta$  a distância do asteroide até a Terra e  $r$  distância do asteroide até o Sol; à direita: variação do ângulo de fase solar, sendo em  $\alpha = 0^\circ$  o brilho máximo do objeto.

## 2.1 Efeito de Oposição

Um fenômeno comum a corpos sem atmosfera do Sistema Solar é o efeito de oposição (do inglês *Opposition Effect* - OE), em que ocorre um aumento acentuado do brilho do objeto para ângulos de fase entre  $8^\circ$  e  $0^\circ$ . O primeiro a observar esse fenômeno foi Seeliger em 1887 a partir de observações dos anéis de saturno. A observação do fenômeno em asteroides foi inicialmente observado no trabalho de Gehrels (1956), e considerado ser um comportamento comum entre os diferentes tipos de asteroides (Gehrels and Taylor, 1977; Gehrels and Tedesco, 1979). Contudo, nas décadas seguintes, notou-se que o comportamento do OE mudava dependendo da composição superficilal, ou taxonomia, do objeto, sendo os Tipo-E os que apresentavam OE mais acentuado (Harris et al., 1989).

Esse aumento abrupto do brilho na região do OE ocorre devido a forma como as partículas presente na sua superfície refletem a radiação solar. Corpos sem atmosfera apresentam em sua superfície pequenas partículas chamadas de regolitos. Esses regolitos possuem diferentes tamanhos e formas, podendo variar de micrômetros a centímetros, e cujas propriedades ópticas, estão relacionadas com sua composição. A figura 2.2 mostra uma imagem feita do asteroide (101955) Bennu, onde podemos ver a distribuição desse material em sua superfície.

Desde a descoberta desse fenômeno muitos autores tentaram explicar quantitativamente o que causava o OE. Seeliger foi o primeiro a propor que o OE poderia ser causado pela baixa influência do mecanismo de sombras mútuas das partículas, ou *shadowing-hidding mechanism*. Posteriormente, Veverka (1971) mostrou que a porosidade e rugosi-



Figura 2.2: Imagem feita pela OSIRIS-REx spacecraft da superfície do asteroide (101955) Bennu em 21 de Março de 2019. Fonte: NASA/Goddard/University of Arizona.

dade também contribuíam para o fenômeno. Portanto, a partir de descobertas teóricas e experimentais, Shkuratov (1985) sugere que o retroespalhamento coerente, ou *coherent-backscattering*, é o mecanismo determinante para a formação do OE. Para melhor compreender esses fenômenos, iremos abordá-los separadamente nas próximas seções.

### 2.1.1 *Shadowing-hidding mechanism (SH)*

O SH ocorre quando o tamanho dos grãos é maior do que o comprimento de onda da radiação incidente e pode ser um sombreamento causado devido a rugosidade ou a estrutura geométrica interna do regolito (Muinonen et al., 2002).

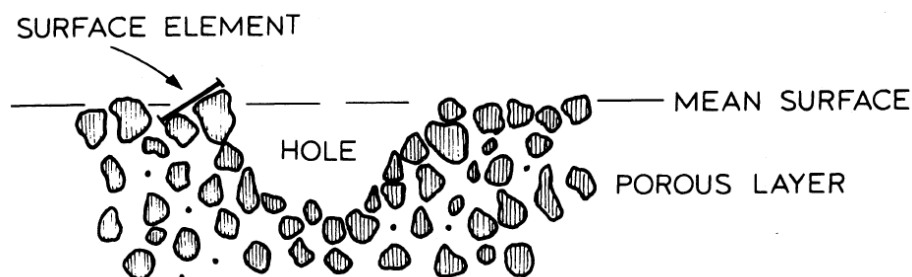


Figura 2.3: Representação da seção transversal da superfície de um corpo sem atmosfera. Os pequenos pontos representam a poeira na superfície. Figura retirada do trabalho de Lumme and Bowell (1981a).

A figura 2.3 representa uma seção transversal da superfície de uma asteroide. Dependendo da topografia e da rugosidade do corpo, o raio incidente sobre uma determinada partícula pode retornar ao longo do caminho de incidência ou pode ser bloqueado por outras partículas (Hapke, 1981; Irvine, 1966; Morozhenko and Vidmachenko, 2013; Shkuratov et al., 1999). Esse fenômeno tem influência dominante no espalhamento da luz para  $\alpha > 5^\circ$  (Belskaya and Shevchenko, 2000).

### 2.1.2 Coherent-backscattering Mechanism (COB)

O COB surge da propagação de radiação eletromagnética coerente num meio túrbio, onde temos uma grande quantidade de partículas aleatoriamente dispersas, no caso dos asteroides essas partículas são os regolitos.

A figura 2.4 representa como ocorre o COB. Os vetores A e B descrevem a propagação de duas ondas que percorrem o mesmo trajeto porém em direções contrárias, ou seja, com momentos reversos, sofrendo o mesmo número de espalhamento. Quando o ângulo entre as ondas eletromagnéticas é  $\theta = 0$ , ocorre uma interferência construtiva e teremos o retroespalhamento, gerando o dobro da intensidade como resultado.

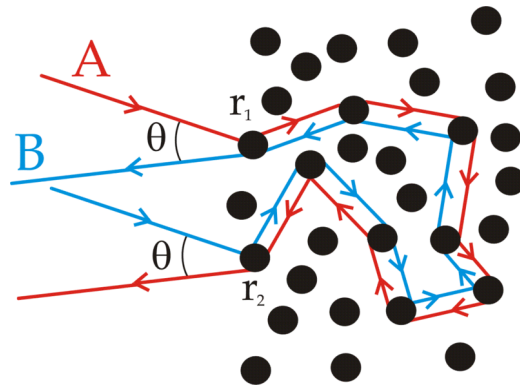


Figura 2.4: Representação da propagação de ondas eletromagnéticas em momentos reversos dando origem ao COB. Figura retirada do material de Espectroscopia Óptica do IFSC - USP.

Para que o COB ocorra, é preciso que os grãos de regolitos sejam da ordem ou menor do que o comprimento de onda da radiação, sendo transparentes de tal forma que um espalhamento múltiplo seja possível. Shkuratov (1985) foi o primeiro a propor a relevância do COB no fenômeno do OE, posteriormente muitos outros autores confirmaram a importante contribuição do COB para a formação do OE (Belskaya and Shevchenko, 2000; Hapke et al., 1993; Mishchenko, 1992; Mishchenko et al., 2009; Mishchenko and Dlugach, 1992; Muinonen et al., 2012)



## 2.2 Curva de fase fotométrica

A curva de fase pode ser definida como o estudo do espalhamento da luz de um corpo de acordo com a variação do ângulo de fase solar. A primeira curva de fase de um asteroide determinada foi do asteroide (20) Massalia, no trabalho de Gehrels (1956), como mostra a figura 2.5. Como podemos ver na figura, a curva de fase apresenta um comportamento linear para ângulos acima de  $\sim 10^\circ$ , e um comportamento não linear abaixo disso.

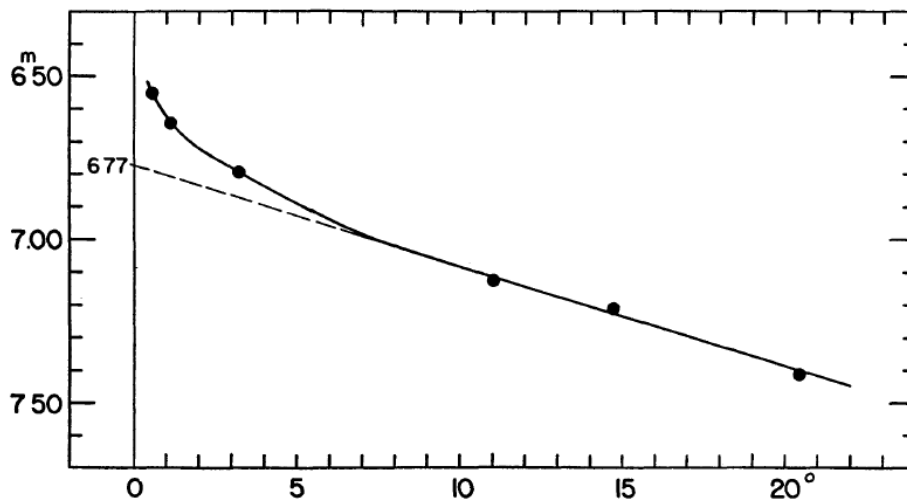


Figura 2.5: Curva de fase do asteroide (20) Massalia retirada do trabalho de Gehrels (1956).

Essa variação de comportamento da curva de fase se dá principalmente pela geometria de observação, em que para ângulos acima de  $10^\circ$  temos a dominância do SH causando o comportamento linear observado, entre outros fatores como a topografia, textura e rugosidade do corpo, que serão de grande influência na região do OE. Portanto, para desenvolver modelos fotométricos mais precisos, é importante considerar o material que compõe a superfície do corpo e suas propriedades composicionais. Nesse sentido, os modelos fotométricos são desenvolvidos com o objetivo de recuperar as propriedades físicas da superfície de corpos sem atmosfera (Muinonen et al., 2002).

Um modelo fotométrico que descreva a curva de fase, atua como um grupo de componentes matemáticos que descrevem parâmetros físicos relacionados às propriedades físicas do material. Em resumo, o modelo precisa considerar o albedo, a reflectância do material e ter um bom desempenho na descrição dos mecanismos SH e COB, obtendo um bom ajuste na região do OE.

De acordo com Hapke (2012), a reflectância é definida como a razão da radiância espalhada pela incidente, ou fluxo. Esse parâmetro define como a luz é espalhada por uma superfície. Já o albedo é definido como a razão entre o brilho integral de um corpo em ângulo de fase zero e o brilho de uma superfície lambertiana de mesmo tamanho a à

mesma distância, mas iluminada e observada perpendicularmente.

Nesse sentido, grandes avanços de modelos fotométricos atuais foram obtidos a partir de imagens de alta resolução de asteroides, obtidas a partir de missões de sobrevoos e encontros próximos, que possibilitaram um melhor entendimento de como a superfície desses corpos refletem a radiação solar (Li et al., 2015).

Ao longo do tempo, vários modelos fotométricos foram propostos para descrever a curva de fase fotométrica como: Hapke (Hapke, 1981, 1984, 1986, 2002, 2008, 2012), Shkuratov (Shkuratov et al., 2011; Shkuratov et al., 1999) e Akimov (Akimov, 1975, 1979; Akimov et al., 1988). Porém, devido a dificuldade de se ter uma curva de fase com boa cobertura e dados de boa qualidade, por conta da precisão limitada das observações fotométricas, curvas com dois ou três parâmetros são mais usadas para ajustar as curvas de fase.

Em 1985 a *International Astronomical Union* (IAU), adotou o sistema H-G desenvolvido por Bowell et al. (1989) como o modelo padrão para curvas de fase. Entretanto, ao longo do tempo o modelo foi apresentando limitações na precisão da magnitude absoluta para objetos de alto e baixo albedo, além de ser um modelo que descreve uma boa curva para coberturas até  $30^\circ$  em ângulo de fase. Atualmente (desde 2012) os modelos aceitos pela IAU para ajustar a curva de fase, são os de três, H- $G_1$ - $G_2$ , e dois parâmetros, H- $G_{12}$ , desenvolvidos por Muinonen et al. (2010). Esses modelos apresentam uma melhora no comportamento de COB nas curvas de objetos de baixo e alto albedo.

O modelo desenvolvido por Muinonen et al. (2010), descrito como modelo linear sem restrições, funciona muito bem para dados de alta qualidade. No entanto, se a curva apresenta pouca cobertura do ângulo de fase, ou se os dados forem de baixa precisão, o ajuste não apresenta bons resultados, nesse caso Muinonen et al. (2010) indica usar o ajuste de dois parâmetros H- $G_{12}$ , embora nem sempre o resultado seja satisfatório. Diante dessa problemática, Penttilä et al. (2016) aprimora o ajuste de dois e três parâmetros desenvolvido por Muinonen et al. (2010), fornecendo uma boa previsão dos parâmetros da curva de fase até para dados com baixa precisão. No que segue, abordaremos com mais detalhes os modelos de dois e três parâmetros não lineares desenvolvidos por Penttilä et al. (2016).

### 2.3 Modelo H- $G_1$ - $G_2$ não linear

Os parâmetros da curva de fase determinados a partir dos modelos aceitos pela IAU, são a magnitude absoluta (H), que é definida como o brilho intrínseco do objeto e está relacionado com o tamanho, e o parâmetro de inclinação da curva ( $G_1 - G_2$ ), que tem relação com as propriedades superficiais do objeto. Juntos esses parâmetros fornecem informações a respeito das partículas de regolito, da rugosidade da superfície, porosidade e textura do objeto (Hapke, 1981, 1984, 1986; Helfenstein and Veverka, 1989; Lumme and

Bowell, 1981b).

Para se obter uma boa curva de fase é necessário um conjunto de magnitudes, obtidas de preferência em noites fotométricas, e abrangendo ângulos de fase no intervalo de 0° até  $\cong 30^\circ$ , para se ter uma boa cobertura tanto do OE e quanto da parte linear da curva. Ao definir um ajuste com dois parâmetros de inclinação ( $G_1 - G_2$ ) Muinonen et al. (2010) conseguem descrever com mais precisão o comportamento na região do OE, além de desenvolver um modelo válido para uma maior cobertura de ângulo de fase, com um bom desempenho até ângulos próximos de 150°. Tendo em vista que os NEOs podem ter variação do ângulo de fase superior a 100°, o uso do ajuste de três parâmetros possibilita uma boa determinação da curva de fase desses objetos.

Resumindo o modelo H-G<sub>1</sub>-G<sub>2</sub> linear, ou método dos mínimos quadrados lineares, desenvolvido por Muinonen et al. (2010), temos a aproximação em que os parâmetros da curva podem ser expressos por:

$$H(\alpha) = H_0 - 2.5 \log_{10}[(G_1 \Phi_1(\alpha) + G_2 \Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2) \Phi_3(\alpha))], \quad (2.1)$$

onde a magnitude H e os parâmetros  $G_1$  e  $G_2$  são dados pelas equações:

$$H = -2.5 \log_{10}(a_1 + a_2 + a_3),$$

$$G_1 = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3},$$

$$G_2 = \frac{a_2}{a_1 + a_2 + a_3}. \quad (2.2)$$

Aqui os coeficientes  $a_1, a_2$  e  $a_3$  são estimados a partir das observações usando o método dos mínimos quadrados lineares. O método H-G<sub>1</sub>-G<sub>2</sub> segue as relações não lineares da equação 2.2, e tem as funções base  $\Phi_1, \Phi_2$  e  $\Phi_3$  dadas por:

$$\Phi_1(\alpha) = 1 - \frac{6\alpha}{\pi}$$

$$\Phi_2(\alpha) = 1 - \frac{9\alpha}{5\pi},$$

$$\Phi_3(\alpha) = \exp(-4\pi \tan^{\frac{2}{3}} \frac{1}{2} \alpha), \quad (2.3)$$

sendo a função de base  $\Phi_3$  usada para introduzir o aprimoramento de COB na função de fase.

Para os dados serem modelados pela equação 2.1 são necessárias 3 variáveis ( $\alpha_i, H_{\alpha_i}, \sigma_i$ ), onde  $\alpha$  é o ângulo de fase,  $H_\alpha$  a magnitude reduzida para cada ângulo de fase, e  $\sigma$  é

o erro associado. Portanto, para um bom desempenho do ajuste linear, é necessário uma quantidade de dados de 5 a 10 observações, e um  $\sigma \lesssim 0.05\text{mag}$ , o que muitas vezes não é possível.

Visando uma adaptação do ajuste para que boas predições fossem possíveis, inclusive para dados com erros ( $\sigma$ ) bastante significativos, Penttilä et al. (2016) utilizam um algoritmo de otimização para derivar o método dos mínimos quadrados restrito, ou modelo H- $G_1$ - $G_2$  não linear. Para isso, uma função alvo é utilizada implementando as restrições do modelo padrão H- $G_1$ - $G_2$ , porém, se os valores dos parâmetros não atenderem às restrições, um fator de penalidade adicional é implementado. A função alvo utilizada é dada por:

$$g(H, G_1, G_2) = \sum_{i=1}^n \frac{(V(\alpha_i; H, G_1, G_2) - V_i)^2}{\sigma_i^2}, \quad (2.4)$$

onde  $(\alpha_i, V_{\alpha_i}, \sigma_i)$  são os  $i$ -ésimos ângulo de fase, magnitude observada, e erro dos dados, com  $V_{\alpha} = H_{\alpha}$ .

Outra mudança necessária é na estimativa do erro já que no modelo H- $G_1$ - $G_2$  original é assumido que os parâmetros lineares seriam normalmente distribuídos. Entretanto, para o ajuste não linear é necessário utilizar o método de *bootstrapping*. Esse é um método que estima a distribuição de amostragem que coleta várias amostras com reposição de uma amostra aleatória única. Essas amostras repetidas são chamadas reamostras, onde cada reamostra é do mesmo tamanho da amostra original.

Na prática, serão feitas novas amostras *bootstrapping* e seus resíduos do fit a partir do modelo ajustado, onde as amostras de *bootstrapping* têm o mesmo tamanho que os dados originais.

Penttilä et al. (2016) também sugerem a modelagem para o modelo H- $G_{12}$  não linear de forma semelhante ao modelo de três parâmetros, reescrevendo a equação 2.4 como:

$$g^*(H, G_{12}^*) = g(H, 0.84293649G_{12}^*, 0.53513350 - 0.53513350G_{12}^*), \quad (2.5)$$

onde as constantes da equação são dadas por um método de mínimos quadrados totais (*total least squares* - TSL), ajustados aos parâmetros  $G_1$  e  $G_2$ .

Aqui não vamos nos ater mais detalhadamente ao modelo de dois parâmetros, já que neste trabalho o modelo utilizado será apenas o ajuste H- $G_1$ - $G_2$  não linear.

Dessa forma, como exemplo da diferença entre os ajustes H- $G_1$ - $G_2$  linear e não linear, temos a figura 2.6, em que é mostrada a curva de fase do NEO (144411) 2004 EW9. A linha tracejada representa o ajuste linear, enquanto que a linha sólida representa o ajuste não linear.

Para testar o desempenho dos ajustes, Penttilä et al. (2016) escolhe ajustar o modelo de três parâmetros aos dados adquiridos com observações do telescópio Pan-STARRS 1 (figura 2.6a), com um total de 30 observações num intervalo de ângulo de fase de  $1,45^\circ$

até  $42,8^\circ$ . Na figura 2.6b, foram acrescentados dados de 1.379 observações disponíveis no *Minor Planet Center* (MPC), para compor a curva de fase do mesmo objeto (figura 2.6b), com uma cobertura de  $0,25^\circ$  até  $125,7^\circ$  de ângulo de fase, mas os ajustes continuam sendo modelados aos dados das observações do Pan-STARRS 1.

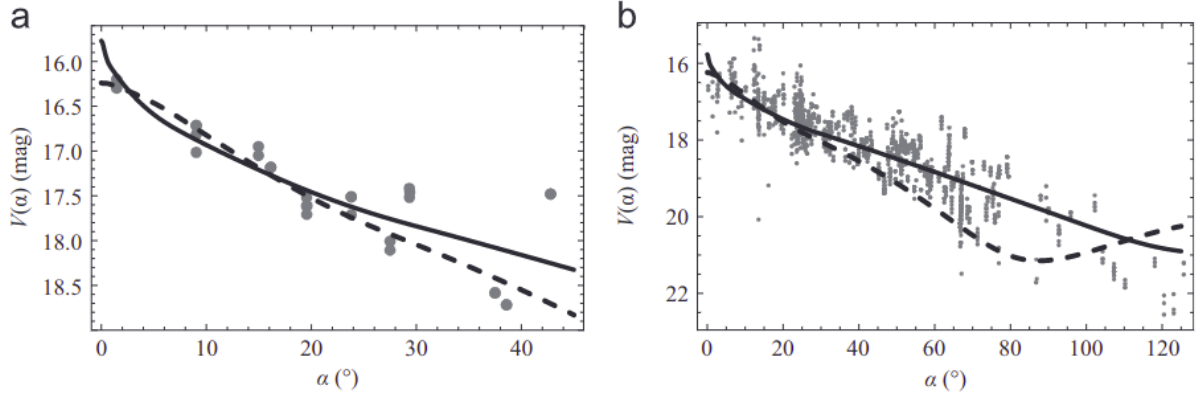


Figura 2.6: Curva de fase do NEO (144411) 2004 EW9 ajustadas com o modelo de três parâmetros linear (curva tracejada), e não linear (curva sólida). Na figura (a) estão apenas dados obtidos das observações com o telescópio Pan-STARRS 1; na figura (b) estão todos os dados disponíveis no Minor Planet Center. Em ambas figuras, os ajustes foram realizados usando apenas dados do Pan-STARRS 1, sendo a figura (b) a propagação dos ajustes para  $\alpha$  acima de  $100^\circ$ . Figura retirada de Penttilä et al. (2016).

A curva de fase da figura 2.6a, tem uma boa cobertura, mas seus dados apresentam uma dispersão significativa, chegando a uma diferença de magnitude de 0,69 mag num intervalo de 1,84. Para dados com dispersão significativa, Muinonen et al. (2010) aconselha não utilizar o ajuste  $H-G_1-G_2$  linear e dar prioridade ao modelo  $H-G_{12}$  para estes casos. No exemplo da figura 2.6 podemos ver que de fato ao ajustar o modelo  $H-G_1-G_2$  linear aos dados temos os valores dos parâmetros dados por:  $H = 16,24$ ,  $G_1 = 1,6471$  e  $G_2 = -0,5759$ , acabam violando a relação  $0 \leq G_1, G_2, 1 - G_1 - G_2 \leq 1$ . Já o ajuste não linear apresenta bom resultado, com valores dos parâmetros da curva dados por:  $H = 15,77$ ,  $G_1 = 0,4438$  e  $G_2 = 0$ .

Quanto a figura 2.6b, com os dados agora alcançando ângulos acima de  $100^\circ$ , vemos que o ajuste linear apresenta magnitudes decrescentes à medida que o ângulo de fase aumenta, chegando a apresentar uma mudança no sentido da curva a ângulos próximo de  $85^\circ$ . Já a curva de fase com o ajuste não linear apresenta ser bem razoável. Com isso, vemos que o ajuste linear além de violar a relação dos parâmetros de inclinação, claramente não apresenta um bom desempenho para a extrapolação para ângulos superiores a  $100^\circ$ , enquanto o ajuste não linear continua tendo um bom desempenho.

Aqui vemos a importância de utilizar o ajuste correto para a obtenção da curva de fase, principalmente para os NEOs, que devido a sua proximidade com a Terra, possibilitam grandes coberturas de ângulo de fase e podem apresentar variações de magnitude como

flutuações dos pontos que compõem a curva.

Após uma melhor abordagem sobre os conceitos e o modelo utilizado para a obtenção da curva de fase, iremos abordar a seguir a metodologia utilizada para este trabalho.

# Capítulo 3

## Observações astronômicas e metodologia

Os dados adquiridos para derivar as curvas de fase apresentadas neste trabalho foram obtidos, em maioria, no Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). Alguns NEOs também foram observados no *Osservatorio di Campo Imperatore* (CI, Itália), como parte de um trabalho de colaboração entre os projetos IMPACTON e NEOShield-2.

No presente capítulo abordaremos a instrumentação utilizada, assim como a escolha da amostra e os processos seguidos para redução e determinação dos parâmetros da curva de fase.

### 3.1 Aquisição dos dados

A maior parte dos dados foram obtidos a partir do OASI, como parte do projeto IMPACTON, usando o telescópio de 1 m e duas câmeras CCD com diferentes matrizes de pixels, uma de 1024x1024 e outra de 2048x2048. O telescópio também conta com uma roda de filtros dupla que permite a utilização tanto dos filtros U-B-V-R-I do sistema Johnson-Cousins quanto u-g-r-i-z, do sistema do Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (detalhes sobre a instrumentação disponível no OASI são dados em Rondón et al. (2020)). Na obtenção de nossos dados, o filtro R-Cousins foi usado em todas as observações que ocorreram entre setembro de 2016 e março de 2021. Apenas para alguns objetos conseguimos também realizar observações no filtro V-Cousins. A figura 3.1 mostra sítio do OASI que está localizado no município de Itacuruba no estado de Pernambuco (Brasil).

Para os dados adquiridos em CI, como parte do projeto NEOShield-2 (do inglês *Science and Technology for Near-Earth Object Impact Prevention*) (Ieva et al., 2016), as observações foram realizadas usando o Telescópio Schmidt de 0,9m equipado com um CCD 4096x4096 cobrindo um campo de visão de 1,15x1,15 graus quadrados e uma escala de 1"/pixel. O filtro *r Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) foi utilizado em todas as observações



Figura 3.1: *Sítio do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI. Foto: Chico Rasta.*

obtidas entre maio de 2016 e junho de 2017. A figura 3.2 mostra o sítio do observatório CI, localizado na província de L'Aquila, na região de Abruzzo (Itália).



Figura 3.2: *Sítio do Osservatorio di Campo Imperatore - CI. Foto: Media Inaf.*

## 3.2 Amostra

Os objetos a serem observados foram selecionados seguindo alguns critérios técnicos e científicos. Como critérios técnicos entende-se que o objeto seja visível a partir do OASI por uma ou mais missões observacionais, para se ter uma boa cobertura em ângulo de fase, de preferência com um  $\alpha$  variando entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$ , obedecendo os limites observacionais e com magnitude visual menor do que 18,5.

Já como critérios científicos, foram priorizados alvos que não possuíam propriedades físicas determinadas na literatura de forma a se poder realizar uma caracterização fotométrica completa. Para os objetos inseridos na colaboração IMPACTON-NEOShield-2, os alvos deveriam estar na lista de alvos prioritários do projeto NEOShield-2.

Assim, foram observados 34 NEOs, sendo 21 do subgrupo Amor, 12 do subgrupo Apollo e 1 do subgrupo Aten. Dentre os objetos do subgrupo Apollo, 3 também são classificados como PHA. A maioria de nossos NEOs tiveram uma boa cobertura de ângulo de fase, cobrindo tanto a parte linear, quanto a região do OE. Alguns objetos tiveram cobertura em apenas uma parte da curva de fase, como o 2017 DC38, que teve apenas a



região do OE coberta ( $1.1^\circ$  até  $9.7^\circ$ ), e o (96189) Pygmalion que teve apenas dados na parte linear da curva ( $37.8^\circ - 41.3^\circ$ ). Como os NEOs se aproximam bastante da Terra, é possível adquirir dados em grandes ângulos de fase, como no caso dos NEOs (99799) 2002 LJ3 e (417581) 2006 VA3, que tiveram a maior cobertura de ângulo de fase da nossa amostra, com  $\alpha > 60^\circ$ . Na tabela 3.1, estão listados todos objetos observados e para cada um é dado o nome, o subgrupo, o período de observação, o observatório onde foram obtidos os dados, o intervalo de fase solar e, sempre que disponível, também o albedo do NEOWISE (Mainzer et al., 2011). Também é fornecido o período rotacional e amplitude para aqueles que foram possíveis realizar as correções dos efeitos rotacionais (iremos abordar esse ponto com mais detalhes na seção 3.2.1).

Nossa amostra também conta com 8 MB observados, listados na tabela 3.2 seguidos do período observado, intervalo de ângulo de fase em cada filtro (V e R do sistema Johnson-Cousin), e albedo, sempre que disponível. Esses objetos foram observados com o objetivo de realizar um estudo comparativo entre NEOs e populações específicas de MB, os quais se encontram próximo a região de ressonância de movimento médio com Júpiter 3:1. No capítulo 5 faremos uma melhor abordagem dessa população. Como podemos ver, para determinar a curva de fase de um MB é necessário muito mais tempo, cerca de 3 a 4 meses, quando comparado com os NEOs, em que muitas vezes obtemos uma boa curva de fase em apenas um mês de observação. Outro fator importante, é que devido aos dados serem tomados de forma espaçada, isso dificulta a correção pelos efeitos rotacionais nas curvas de fase.

É importante ressaltar que nem todos objetos aqui listados tiveram dados suficientes para uma boa determinação da curva de fase. Condições meteorológicas acabaram prejudicando a obtenção dos dados, apresentando grandes erros no ajuste  $H-G_1-G_2$ , seja por grandes incertezas nas magnitudes que compõe a curva, quanto à pouca cobertura em ângulo de fase. No Apêndice A, são dadas as circunstâncias observacionais e os parâmetros das curvas de fase derivadas neste trabalho.

Para obter a magnitude reduzida em diferentes ângulos de fase solar, e assim obter a curva de fase, observamos nosso alvo e uma estrela padrão Landolt três ou quatro vezes durante a noite. A cada vez, quatro ou mais imagens foram obtidas e as magnitudes médias resultantes foram então calculadas para reduzir o erro instrumental. Todo o procedimento foi repetido em noites diferentes ao longo de um ou mais meses para mapear diferentes ângulos de fase solar do objeto. A redução dos dados foi realizada com o software *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF), corrigindo a imagem científica por *bias*, *dark* e *flat frames*. Através dessas imagens corrigidas utilizamos a técnica de fotometria de abertura para determinar as magnitudes observadas do objeto, posteriormente aplicamos a técnica de fotometria absoluta para determinar as magnitudes reduzidas. As técnicas aqui utilizadas podem ser vistas com mais detalhes na dissertação de mestrado de Arcoverde, 2018, onde detalhamos o passo a passo de cada processo.

Tabela 3.1: Para cada NEO observado é dado o nome, o subgrupo, o período de observação, o intervalo do ângulo de fase solar, o albedo, o período de rotação e a amplitude da curva de luz usada para correção.

Asteroid	Subgrupo	Período de observação	Observatório	$\alpha$ (°) mín - máx	Albedo $p_v$	Período (h)	A (mag)
(4055) Magellan	Amor	02/2017 - 03/2017	CI	3,0 - 13,7	0,330	7,52 <sup>1</sup>	0,38
(16816) 1997 UF9	Apollo	10/2016 - 12/2016	CI/OASI	1,0 - 25,5	-	-	-
(18109) 2000 NG11	Amor	02/2018 - 10/2018	OASI	3,4 - 34,8	-	4,252 <sup>2</sup>	0,84
(36236) 1999 VV	Apollo	11/2016 - 12/2016	OASI	7,6 - 13,0	-	6,191 <sup>3</sup>	0,132
(65717) 1993 BX3	Apollo (PHA)	02/2021 - 03/2021	OASI	7,9 - 34,7	0,15 <sup>4</sup>	20,331 <sup>5</sup>	0,83
(96189) Pygmalion	Amor	05/2018 - 05/2018	OASI	37,8 - 41,3	0,041	4,945 <sup>2</sup>	0,36
(99799) 2002 LJ3	Amor	08/2018 - 12/2018	OASI	8,6 - 62,3	0,43 <sup>6,7</sup>	2,64 <sup>2</sup>	0,23
(138846) 2000 VJ61	Apollo	11/2016 - 12/2016	OASI	17,9 - 21,7	0,156 <sup>8</sup>	2,822 <sup>9</sup>	0,30
(159608) 2002 AC2	Amor	12/2016 - 01/2017	CI	2,9 - 17,2	0,290 <sup>10</sup>	-	-
(174050) 2002 CC19	Amor	02/2021 - 02/2021	OASI	6,2 - 35,4	-	3,514 <sup>11</sup>	0,09
(175189) 2005 EC224	Amor	03/2017 - 04/2017	CI/OASI	0,7 - 29,3	0,204 <sup>12</sup>	-	-
(326683) 2002 WP	Amor	12/2016 - 01/2017	CI/OASI	3,8 - 39,0	0,315	6,261 <sup>9</sup>	1,33
(333889) 1998 SV4	Aten	09/2015 - 09/2015	OASI	4,0 - 25,5	0,110	-	-
(370307) 2002 RH52	Apollo	03/2017 - 03/2017	CI	3,9 - 17,7	0,391 <sup>12</sup>	4,219 <sup>1</sup>	0,36
(370702) 2004 NC9	Amor	02/2017 - 03/2017	CI	3,0 - 30,3	0,113 <sup>8</sup>	7,526 <sup>13</sup>	0,52
(40267) 1999 GJ4	Apollo	02/2017 - 03/2017	CI/OASI	3,7 - 25,6	0,453	4,958 <sup>1</sup>	1,00
(417581) 2006 VA3	Apollo	02/2021 - 02/2021	OASI	11,3 - 81	0,145 <sup>1</sup>	5,481 <sup>2</sup>	0,40
(464797) 2004 FZ1	Apollo	08/2016 - 08/2016	OASI	8,7 - 18,9	0,103 <sup>8</sup>	45,4 <sup>14</sup>	0,39
(480004) 2014 KD91	Amor	09/2016 - 10/2016	OASI	14,8 - 26,6	0,125 <sup>8</sup>	2,835 <sup>2</sup>	0,17
(480824) 1999 JO6	Amor	12/2016 - 01/2017	CI	2,4 - 15,7	-	-	-
(484506) 2008 ER7	Apollo (PHA)	02/2017 - 03/2017	CI/OASI	2,4 - 20,1	-	-	-
(489337) 2006 UM	Amor	11/2016 - 11/2016	OASI	15,1 - 23,9	-	5,344 <sup>9</sup>	1,191
2001 UG18	Amor	11/2016 - 12/2016	CI	2,5 - 19,1	-	-	-
2005 TF	Amor	10/2016 - 12/2016	CI/OASI	4,4 - 32,4	-	2,712 <sup>9</sup>	0,166
2011 YQ10	Amor	10/2021 - 12/2021	OASI	5,7 - 48,3	-	4,824 <sup>11</sup>	0,144
2014 AD17	Amor	12/2016 - 01/2017	CI/OASI	4,7 - 17,8	0,125 <sup>8</sup>	8,486 <sup>1</sup>	0,22
2016 WJ1	Apollo	11/2016 - 12/2016	OASI	5,5 - 27,5	-	2,944 <sup>9</sup>	0,116
2016 WU3	Amor	12/2016 - 12/2016	CI	5,7 - 22,9	-	-	-
2016 RP33	Amor	09/2016 - 09/2016	OASI	7,6 - 18,3	-	4,682 <sup>14</sup>	0,22
2017 AC5	Amor	02/2017 - 03/2017	CI/OASI	5,4 - 18,8	-	5,922 <sup>1</sup>	0,81
2017 CR32	Amor	03/2017 - 03/2017	CI/OASI	0,8 - 19,1	-	14,91 <sup>1</sup>	0,43
2017 DC38	Amor	03/2017 - 03/2017	CI	1,1 - 9,7	-	-	-
2017 YE5	Apollo (PHA)	07/2018 - 08/2018	OASI	9,1 - 11,3	0,03 <sup>15</sup>	-	-
2019 CT4	Apollo	03/2019 - 03/2019	OASI	6,75 - 26,6	-	5,291 <sup>11</sup>	0,82

References; (1) Warner (2017a), (2) Monteiro et al. (2022) (em preparação), (3) Warner (2017c), (4) Lin et al. (2018), (5) Warner and Stephens (2021), (6) Mueller et al. (2011), (7) Trilling et al. (2010), (8) Masiero et al. (2020b), (9) Rondón et al. (2019), (10) Masiero et al. (2021), (11) Arcoverde et al. (2022) (submetido), (12) Masiero et al. (2020a), (13) Monteiro et al. (2018), (14) Warner (2017b), (15) Monteiro et al. (2021).

Para os dados obtidos em CI, como os dados foram obtidos com o filtro  $r$  SDSS foi necessário transformar as magnitudes reduzidas para o filtro R-Cousins. Para isso, utilizamos a equação de transformação entre as magnitudes SDSS e UBVRC<sub>ic</sub> dada por

Tabela 3.2: Para cada MB observado é dado o nome, o período de observação, o intervalo do ângulo de fase solar e o albedo quando disponível.

Asteroid	Período de observação	$\alpha$ (Filtro R) mín - máx	$\alpha$ (Filtro V) mín - máx	Albedo $p_v$
(7135) 1993 VO	06/2020 - 08/2020	4,9 - 19,7	10,4 - 19,7	0,3945
(12147) Bramante	08/2019 - 11/2019	7,2 - 18,2	7,2 - 18,2	0,1262
(19394) 1998 DA34	08/2019 - 09/2019	3,7 - 9,6	3,7 - 9,6	0,5
(22322) Bodensee	10/2019 - 12/2019	14,6 - 22,3	14,6 - 22,3	0,267
(23122) Lorgat	12/2019 - 02/2020	5,6 - 23,7	5,6 - 23,7	0,330
(23354) 9547 P-L	08/2019 - 11/2019	2,9 - 30,7	2,9 - 30,7	0,356
(28393) 1999 RB12	08/2020 - 08/2020	4,4 - 8,6	4,4 - 8,6	0,0635
(45444) 2000 AD180	12/2019 - 02/2020	5,7 - 15,3	5,8 - 15,3	0,3507

Lupton (2005)<sup>1</sup>, dada pela equação (3.1), com os valores de cor  $V - R$  retirados de Pravec et al. (2012):

$$r - R = (0.267 \pm 0.005) * (V - R) + (0.088 \pm 0.003), \quad (3.1)$$

onde para objetos que não possuem a classe taxonômica determinada, usamos a média  $V - R$  dos grandes complexos S, C e X.

Uma vez obtidas as magnitudes reduzidas passamos então à determinação da curva de fase no modelo  $H-G_1-G_2$ , como descrito a seguir.

### 3.2.1 Determinação da curva de fase

Como já mencionado na seção 2.3, o ajuste aqui utilizado é o modelo de três parâmetros  $H-G_1-G_2$  não linear (Muinonen et al., 2010; Penttilä et al., 2016).

Antes de ajustar o modelo aos nossos dados é importante lembrar que a curva de fase solar é altamente afetada pela forma do objeto, especialmente se este for alongado.

Outra importante propriedade determinada a partir da variação do brilho do objeto é a curva de luz. A curva de luz é definida como a variação do brilho ao longo do tempo. Essa determinação se dá pela variação do brilho à medida que o corpo rotaciona em torno do seu próprio eixo, logo para corpos que não possuem luz própria, essa determinação depende basicamente da geometria de observação (ver figura 2.1), e da forma do corpo.

A figura 3.3 ilustra a rotação em torno do próprio eixo para um objeto de forma alongada. À medida que esse corpo rotaciona temos um pico de brilho quando o objeto mostra sua maior face, e um mínimo de brilho quando sua menor face é mostrada. Assim, a rotação completa de um objeto apresenta dois mínimos e dois máximos em sua curva de luz. Já para objetos de forma esférica, não se observará variação no seu brilho.

A diferença entre o brilho mínimo e o brilho máximo é definida como amplitude da

<sup>1</sup><http://www.sdss3.org/dr8/algorithm/sdssUBVRITransform.php>

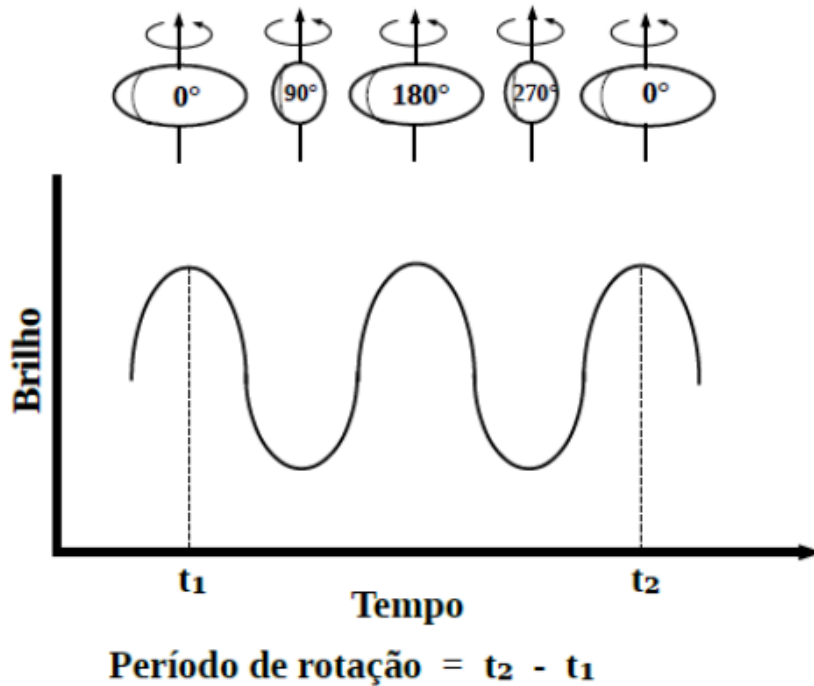


Figura 3.3: Ilustração da rotação de um corpo alongado e a curva de luz obtida em função do tempo.

curva de luz, e a amplitude varia de acordo com o ângulo de aspecto. A figura 3.4 mostra a variação da curva de luz para diferentes ângulos de aspecto, chegando a amplitude máxima em  $\theta = 90^\circ$ . A partir da determinação da curva de luz de um asteroide é possível determinar seu período rotacional, a direção do polo de rotação e até mesmo sua forma.

Ao determinar a curva de fase de um objeto é importante considerar efeitos rotacionais, pois corpos alongados podem ter grandes amplitudes gerando diferenças significativas entre o valor da magnitude determinada no mínimo ou no máximo. Essas flutuações causadas na curva de fase tem grande influência nos erros dos valores do ajuste. Por não serem diretamente relacionadas às propriedades superficiais do corpo, é possível minimizar essas contribuições na curva de fase tendo o conhecimento da amplitude da curva de luz e do período rotacional do corpo.

Para corrigir esse efeito, é necessário determinar a curva de luz do asteroide, de preferência no mesmo momento em que os dados da curva de fase são obtidos, ou em datas próximas a ela, evitando usar dados obtidos com intervalos acima de um mês entre si (Buchheim, 2010; Rondón et al., 2019). Curvas de luz tomadas em diferentes ângulos de aspectos podem ter diferentes amplitudes, podendo levar a flutuações que, novamente, irão impactar nos erros. Assim, para corrigir nossas curvas de fase usamos a amplitude da curva de luz rotacional seguindo a metodologia inicialmente aplicada em Rondón et al. (2019), usando as equações (3.2) e (3.3):

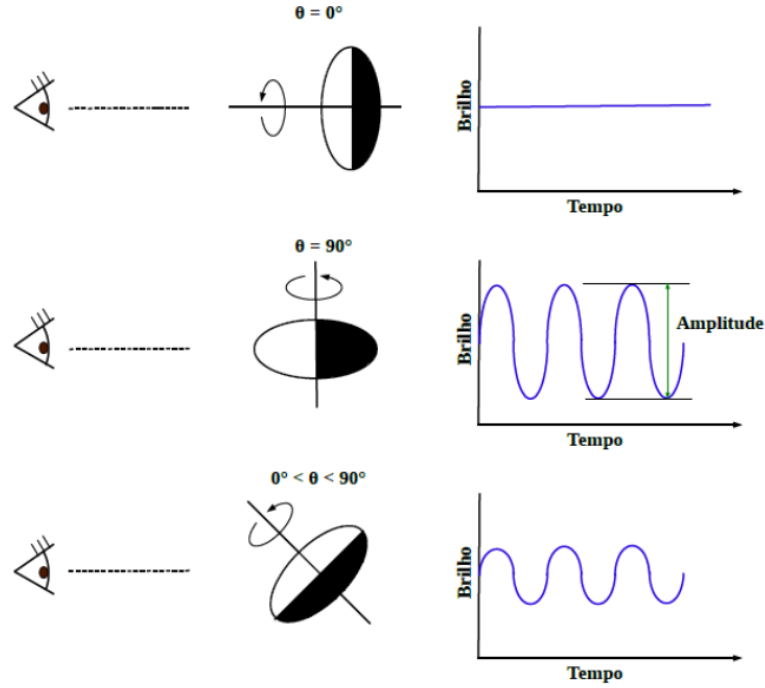


Figura 3.4: *Variação da amplitude da curva de luz de um corpo oblato observado em diferentes ângulos de aspecto  $\theta$ .*

$$V'(\phi) = AV(\phi + \phi_0) \quad (3.2)$$

$$H'_c(\alpha) = H(\alpha) - \Delta V'(\phi) \quad (3.3)$$

onde  $A$  é a razão de amplitude das curvas de luz rotacionais e  $\phi_0$  é a mudança de fase. Como resultado, obtemos uma correção nominal  $V'(\phi)$  que será aplicada às magnitudes reduzidas ( $H(\alpha)$ ) nos dando as magnitudes corrigidas ( $H'_c(\alpha)$ ), minimizando a dispersão da curva. É importante notar que, em alguns casos, usamos dados do banco de dados do MPC (<https://alcddef.org/>) quando estes foram obtidos na mesma data ou em datas próximas de nossas observações.

A figura 3.5 mostra a curva de fase do NEO (366683) 2002 WP antes da correção (fit em preto), e após a correção pelos efeitos rotacionais (fite em vermelho). Como podemos ver na figura 3.6, devido a grande amplitude da curva de luz,  $A = 1.33$  mag, a curva de fase apresenta grandes flutuações nos pontos. Após a correção, temos um ajuste mais preciso e um baixo erro na magnitude absoluta obtida.

Após a determinação da curva de fase e uma vez conhecida a magnitude absoluta, a cor V - R e o albedo visível, é possível determinar o diâmetro do objeto usando a equação (3.4) (Harris and Lagerros, 2002; Rondón et al., 2019; Tedesco et al., 1992):

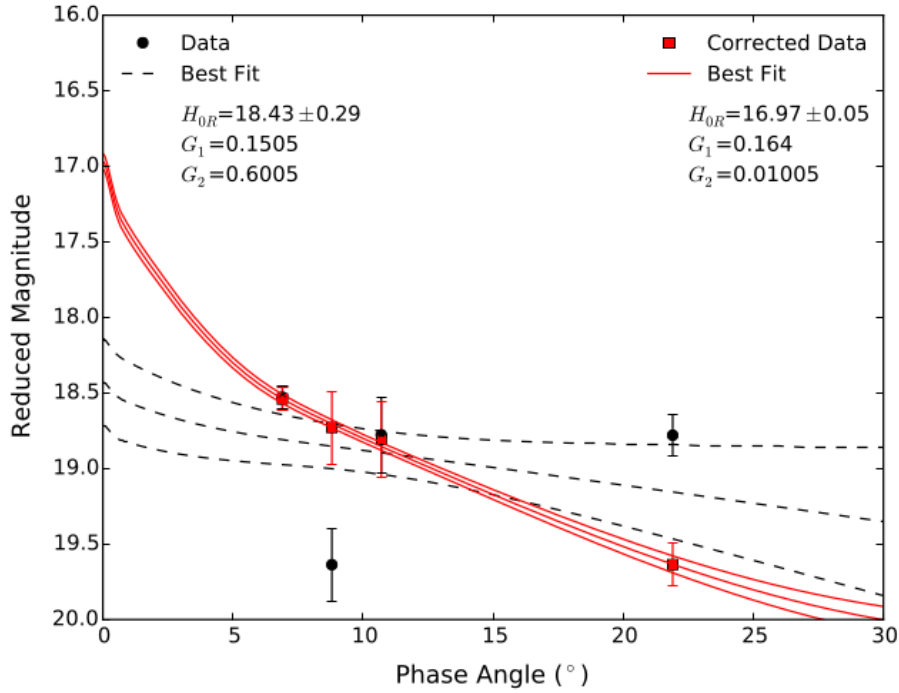


Figura 3.5: Curva de fase do NEO (366683) 2002 WP. Os fits em preto e vermelho, são os ajustes antes e após a correção pelos efeitos rotacionais, respectivamente. Figura retirada de Rondón et al. (2019)

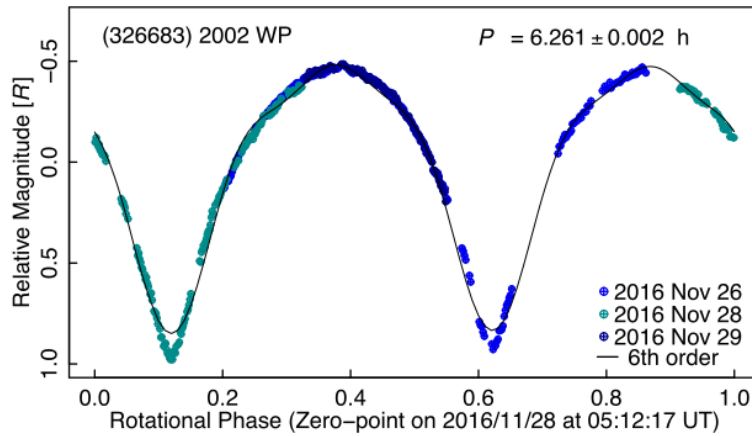


Figura 3.6: Curva de luz composta do NEO (366683) 2002 WP. Figura retirada de Rondón et al. (2019)

$$D = \frac{1340 * 10^{-1/5(H_{0R}+V-R)}}{\sqrt{p_v}} \quad (3.4)$$

Para todos os objetos de nossa amostra que tiveram período rotacional determinado no mesmo período de nossas observações, realizamos as correções por efeitos rotacionais. Também determinamos o diâmetro usando valores de albedo visual da literatura para

os NEOs que derivamos a cor V - R a partir das magnitudes reduzidas obtidas, pois a magnitude absoluta obtida por nós é determinada no filtro R-Cousins ( $H_{0R}$ ).





# Capítulo 4

## Caracterização de curvas de fase

### 4.1 Técnicas de caracterização

Como já mencionado, o OE nos fornece informações importantes sobre as características físicas de corpos sem atmosfera, tais como composição, textura e rugosidade, e é justamente o comportamento da curva nessa região que define a forma da curva de fase.

Para derivar características físicas a partir da curva de fase de um objeto sem atmosfera, diferentes técnicas podem ser usadas, entre as quais se encontram: a forma da curva de fase, o espaço de fase dos parâmetros de inclinação  $G_1 - G_2$  e a amplitude do OE com a contribuição do COB.

Com o objetivo de derivar propriedades físicas de NEOs a partir de suas curvas de fase, em particular sua classificação taxonômica, iremos fazer uma breve introdução das diferentes técnicas de caracterização e posteriormente, como resultados, mostrar a aplicação dessas técnicas às 15 curvas de fase publicadas no trabalho Ieva et al. (2022).

#### 4.1.1 Forma da curva de fase

Ao analisarmos a forma da curva de fase, comparamos o comportamento da curva na região do OE com a parte linear, sendo que para um OE pequeno a curva é mais plana enquanto para um OE mais acentuado, a curva é mais inclinada. O comportamento plano da curva sugere uma dominância do efeito de SH, enquanto o comportamento acentuado sugere uma importante contribuição do COB nessa região (Hapke et al., 1993; Shkuratov et al., 1994).

Assim, a partir da forma da curva de fase em torno da região do OE, podemos estabelecer um indicativo taxonômico para o corpo, onde curvas mais planas sugerem uma composição mais primitiva, Tipo-C/-D, e curvas com forte OE corpos mais aquecidos/diferenciados, Tipo-S/-M/-E, (Penttilä et al., 2016; Warner et al., 2009).

Mais recentemente, como visto da seção 2.3, Penttilä et al. (2016) desenvolveu um algoritmo de mínimos quadrados não linear restrito, ou modelo H- $G_1$ - $G_2$  não linear, e

o disponibilizou a partir de uma ferramenta online juntamente com o modelo  $H-G_1-G_2$  original. O calculador online de curvas de fase fotométrica, ou *Online Calculator for Photometric phase-curve*<sup>1</sup> (OCP), além de estimar os parâmetros  $H$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ , pode atribuir uma classe taxonômica a partir da curva de fase do objeto.

Para realizar o indicativo taxonômico Penttilä et al. (2016) utiliza dados dos 93 objetos determinados por Shevchenko et al. (2016) como base. Em seu trabalho, Shevchenko et al. (2016) estima uma média dos parâmetros de inclinação para seis tipos taxonômicos, Tipo-E, -S, -M, -C, -P e -D, e usando essa média para cada classe o OCP consegue diferenciar 5 delas. Para as classes do Tipo-S e -M, entretanto, os valores de  $G_1$  e  $G_2$  são similares (ver Shevchenko et al. (2016), tabela 4) impossibilitando sua identificação. Para indicar o ajuste que mais se adequa aos dados fornecidos, o OCP utiliza o valor do critério de informação bayesiano (do inglês *Bayesian Information Criterion* - BIC). Dessa forma, a taxonomia indicada será a do ajuste que possuir o menor valor de BIC.

A figura 4.1 mostra a interface do OCP para dados do asteroide (44) Nysa como exemplo. Na figura é escolhido o modelo  $H-G_1-G_2$  não linear e como dados de entrada (à esquerda) são dados os valores de ângulo de fase, magnitude e erro. Como retorno são mostrados os valores dos parâmetros da curva de fase ajustados ao modelo de três e dois parâmetros, assim como também os tipos taxonômicos, sendo o ajuste de menor BIC o indicativo taxonômico dado pelo calculador. Também é dada a curva de fase com o ajuste obtido (linha azul) e os dados de entrada (pontos verdes).

#### 4.1.2 Espaço de fase $G_1 - G_2$

O parâmetro de inclinação da curva de fase vem sendo usado como indicativo taxonômico e de albedo desde os trabalhos de Harris and Young (1989) e Lagerkvist and Magnusson (1990), ainda com o antigo modelo  $H-G$  desenvolvido por Bowell et al. (1989). Posteriormente, a partir de uma amostra de 125 objetos, Wisniewski et al. (1997) relacionaram valores médios de  $G$  de acordo com a classe taxonômica e o albedo. Mais tarde, essa mesma técnica foi usada por Warner et al. (2009), que utilizou uma amostra ainda maior de objetos, que além de dividir por classe taxonômica também foi separada em faixas de albedo: muito baixo, baixo intermediário, e alto.

A partir do uso do novo modelo  $H-G_1-G_2$ , se fez necessário novos dados de curvas de fase para realizar a correlação dos parâmetros  $G_1$  e  $G_2$  com a composição superficial. Shevchenko et al. (2016) utiliza dados de 93 asteroides com taxonomia, albedo e curvas de fase bem determinados, e mostra que os parâmetros de inclinação da curva podem ser usados para discriminar entre diferentes tipos taxonômicos a partir da análise do espaço de fase  $G_1$  vs  $G_2$ . Nessa análise, os objetos ocupam regiões específicas do espaço de fase de acordo com sua taxonomia (ver figura 4.2). Assim, de acordo com Shevchenko et al.

<sup>1</sup><http://h152.it.helsinki.fi/HG1G2/>

### Online calculator for $H, G_1, G_2$ photometric system

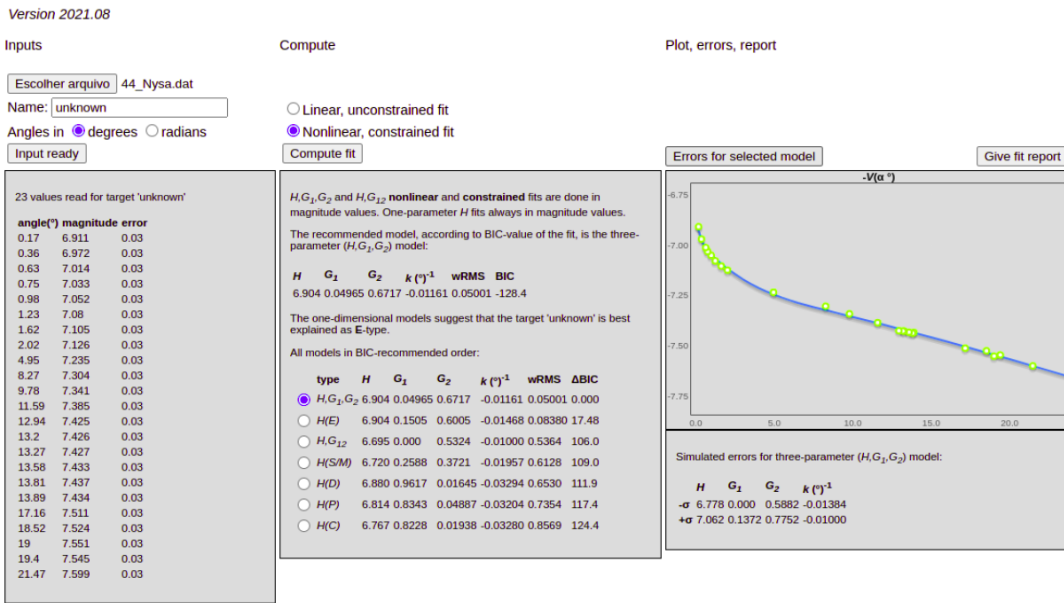


Figura 4.1: Interface do calculador fotométrico online desenvolvido por Penttilä et al. (2016). No exemplo são usados dados do asteroide (44) Nysa.

(2016), a partir da posição do objeto no espaço de fase é possível inferir a taxonomia do objeto.

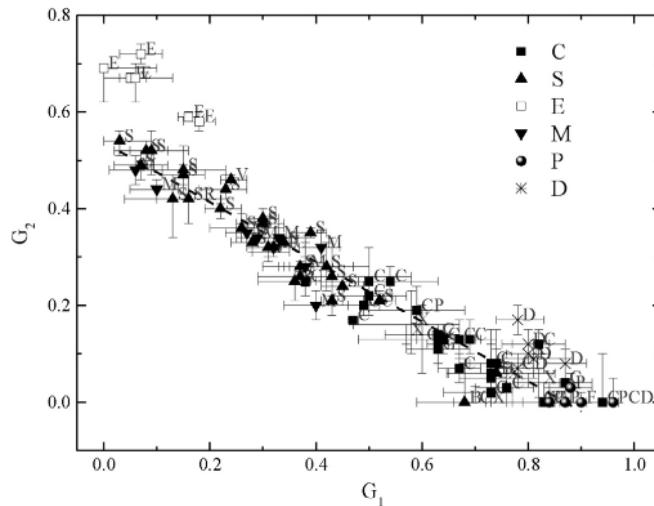


Figura 4.2: Valores de  $G_1$  de  $G_2$  para os 93 objetos de Shevchenko et al. (2016). As letras indicam os tipos taxonômicos. Figura retirada do trabalho de Shevchenko et al. (2016).

No próximo capítulo será feita uma abordagem mais detalhada da distribuição de asteroides no espaço de fase  $G_1$  vs  $G_2$ .

### 4.1.3 Amplitude do OE e contribuição do COB

Outro método para inferir a classe taxonômica é analisando a amplitude do OE, já que esta varia de acordo com o albedo do objeto. Uma baixa amplitude indica objetos de baixo albedo e uma grande amplitude objetos com albedo entre moderado e alto (Belskaya and Shevchenko, 2000). A amplitude do efeito de oposição pode ser definida como o aumento relativo de magnitude em um ângulo de fase de  $0,3^\circ$  ( $M_{(\alpha=0,3^\circ)}$ ) em comparação com a extrapolação da parte linear da curva ( $M_{Linear}$ ), dada pela equação 4.1:

$$A_{OE} = M_{(\alpha=0,3^\circ)} - M_{Linear}. \quad (4.1)$$

A faixa em ângulo de fase em que surge o OE varia de acordo com os autores:  $\alpha < 7^\circ$ , Muinonen et al. (2010),  $\alpha = 6^\circ$ , Carbognani et al. (2019),  $\alpha = 5^\circ$  Belskaya and Shevchenko (2000).

Dessa forma, utilizando dados de curvas de fase de 33 objetos com albedo e taxonomia bem determinados, Belskaya and Shevchenko (2000) mostram que é possível estimar a taxonomia a partir da análise da amplitude do OE versus o logaritmo do albedo, como mostrado na figura 4.3. Na figura vemos que regiões diferentes do gráfico são ocupadas de acordo com o tipo taxonômico dos objetos.

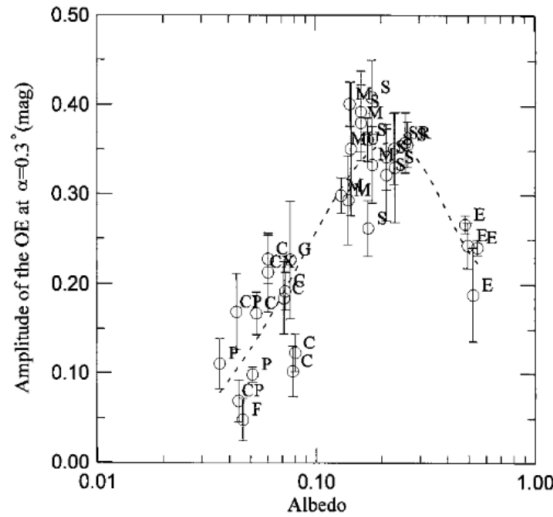


Figura 4.3: Gráfico retirado do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000) em que mostra a relação da amplitude do OE versus o logaritmo do albedo para diferentes classes taxonômicas.

Para os objetos que não possuem albedo determinado é possível realizar a estimativa a partir da anticorrelação linear entre o logaritmo do albedo e o coeficiente linear da curva de fase (b), dado pela equação (4.2) definida a partir das funções de Shevchenko (1996, 1997):

$$b = 0,013(\pm 0,002) - 0,024(\pm 0,002)\lg(p_V). \quad (4.2)$$

Por fim, além da análise da amplitude do OE, também é possível inferir a taxonomia a partir da contribuição do COB para  $\alpha < 5^\circ$ . A partir da análise da contribuição do COB versus o logaritmo do albedo, é possível ver que a contribuição dada em porcentagem (%) varia de acordo com o tipo taxonômico. Isso pode ser visto na figura 4.4 retirada do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000), com dados de 33 curvas de fase de asteroides. A contribuição do COB pode ser definida como a razão entre o aumento relativo na magnitude e um aumento absoluto em magnitude em um ângulo de fase de  $5^\circ$  até  $0,3^\circ$ . O aumento relativo na magnitude pode ser dado como uma extrapolação da parte linear da curva de fase até ângulos próximo de  $0^\circ$ .

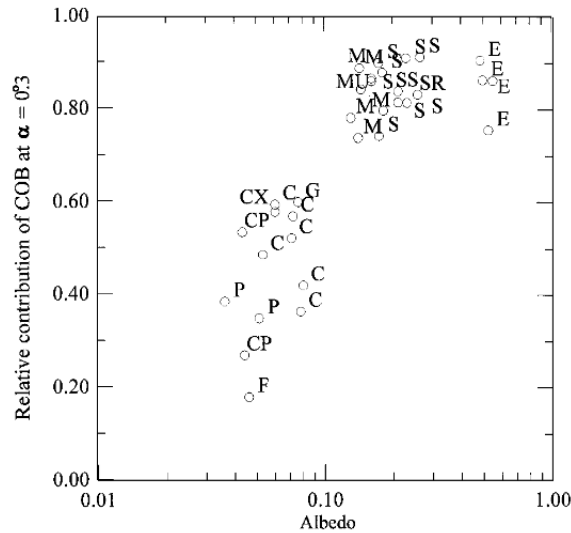


Figura 4.4: Gráfico retirado do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000) em que mostra a relação da contribuição do COB versus o logaritmo do albedo para diferentes classes taxonômicas.

De acordo com Hapke et al. (1993), a medida que o albedo aumenta há menos contribuição do SH, enquanto que a contribuição do COB segue aumentando. Em Belskaya and Shevchenko (2000), temos que a contribuição relativa do efeito de COB para as curvas de fase é estimada em cerca de  $\leq 60\%$  para objetos de albedo baixo, já para objetos com albedo moderado ou alto, é estimada em cerca de  $\geq 80\%$ .

Assim, conhecendo as diferentes técnicas de análise de curva de fase, é possível aplicá-las e inferir indicativos de composição superficial, como a classificação taxonômica.

## 4.2 Aplicação de técnicas de caracterização aos NEOs

Como resultado de um trabalho dedicado à obtenção e caracterização de curvas de fase de NEOs dentro dos objetivos dos projetos NEOShield-2 e IMPACTON, apresentamos a seguir a caracterização de curvas de fase para 15 NEOs observados entre 2015 e 2017 em CI e no OASI. Dos NEOs apresentados nesse trabalho 7 possuem taxonomia definida (159608, 326683, 333889, 370307, 2005 TF, 2014 AD17 e 2017 CR32) e apenas 3 deles possuem albedo determinado (159608, 326683, 333889). Assim, utilizando as técnicas de caracterização de curvas de fase, estabelecemos um indicativo taxonômico para todos os NEOs.

As curvas de fase aqui obtidas seguem a metodologia descrita no capítulo 3 e estão mostradas na figura 4.8. Na tabela 4.1, estão listados os parâmetros obtidos das curvas de fase, e o albedo, assim como os parâmetros derivados das técnicas aplicadas para a caracterização das curvas. Para os objetos que não possuem albedo previamente determinado, derivamos o albedo utilizando a equação (4.2).

Para analisar a forma de nossas curvas de fase, foi feita a extrapolação da parte linear, representada por um ajuste linear em tracejado (ver figura 4.8), calculado para ângulos de fase  $> 5^\circ$ , de acordo com Belskaya and Shevchenko (2000). Para cada curva foi calculado a inclinação do ajuste linear ( $b$ ), mostrado na tabela 4.1. Dessa forma, vemos que 9 NEOs apresentam uma curva mais plana (175189, 333889, 370702, 480824, 484506, 2001UG18, 2016WU3, 2017CR32 e 2017DC38), comparado com a extrapolação da parte linear. Já os demais NEOs (16816, 159608, 326683, 370307, 2005TF e 2014AD17), apresentam um aumento alto/moderado na região do OE.

Para inferir uma classe taxonômica a partir da forma da curva de fase, utilizamos o calculador fotométrico online desenvolvido por Penttilä et al. (2016), atribuindo uma classe taxonomica preliminar com base no menor valor do BIC. Ressaltamos que para obter nossas curvas de fase utilizamos o ajuste não linear, como descrito na seção 2.3. De acordo com essa classificação, vemos que curvas com formas mais planas, ou baixo OE, indicam tipos taxonômicos mais primitivos, como Tipo-C ou -D. Já as curvas que apresentam um aumento moderado ou alto na região do OE, recebem uma classificação taxonômica de corpos com albedo moderado ou alto, como Tipo-M, -S ou -E.

Ao utilizar a abordagem da distribuição dos NEOs no espaço de fase  $G_1 - G_2$ , repetimos o gráfico com os 93 objetos do trabalho de Shevchenko et al. (2016) incluindo os nossos NEOs, como mostra a figura 4.5. Aqui seria esperado que a correlação dos parâmetros  $G_1$  vs  $G_2$  apresentasse resultados semelhantes aos da abordagem anterior, devido à grande semelhança entre elas, porém isso não ocorreu e para alguns NEOs a indicação taxonômica é mais incerta.

Classificamos como do Tipo-S os objetos 2014AD17 e 2001UG18. Os NEOs 326683 e 370307 também foram classificados como Tipo-S, devido à proximidades destes objetos

Tabela 4.1: Para cada NEO é fornecido a magnitude absoluta  $H_R$ , o coeficiente  $b$ , albedo,  $G_1$ ,  $G_2$ , OE e COB. O coeficiente  $b$  é a inclinação linear da curva calculada para  $\alpha > 5^\circ$ .

NEO	OE	COB	b	albedo
16816 1997UF9	$0.779 \pm 0.028$	$0.996 \pm 0.072$	$0.026 \pm 0.009$	0.292
159608 2002AC2	$0.465 \pm 0.044$	$0.721 \pm 0.068$	$0.038 \pm 0.008$	0.2
175189 2005EC224	$0.156 \pm 0.031$	$0.481 \pm 0.095$	$0.035 \pm 0.004$	0.117
326683 2002WP	$0.328 \pm 0.038$	$0.845 \pm 0.098$	$0.020 \pm 0.002$	0.315
333889 1998SV4	$0.142 \pm 0.030$	$0.454 \pm 0.091$	$0.037 \pm 0.004$	0.11
370307 2002RH52	$0.347 \pm 0.045$	$0.803 \pm 0.104$	$0.024 \pm 0.005$	0.363
370702 2004NC9	$0.064 \pm 0.014$	$0.400 \pm 0.087$	$0.038 \pm 0.003$	0.091
480824 1999JO6	$0.034 \pm 0.025$	$0.104 \pm 0.076$	$0.057 \pm 0.005$	0.015
484506 2008ER7	$0.024 \pm 0.015$	$0.176 \pm 0.112$	$0.038 \pm 0.006$	0.091
2001UG18	$0.194 \pm 0.072$	$0.619 \pm 0.229$	$0.031 \pm 0.002$	0.184
2005TF	$1.146 \pm 0.276$	$1.166 \pm 0.542$	$0.033 \pm 0.004$	0.154
2014AD17	$0.305 \pm 0.083$	$0.690 \pm 0.188$	$0.028 \pm 0.007$	0.239
2016WU3	$0.068 \pm 0.025$	$0.219 \pm 0.047$	$0.049 \pm 0.003$	0.031
2017CR32	$0.010 \pm 0.018$	$0.058 \pm 0.104$	$0.039 \pm 0.007$	0.079
2017DC38	$0.016 \pm 0.055$	$0.047 \pm 0.163$	$0.060 \pm 0.005$	0.012

NEO	$H_R$	$G_1$	$G_{1err}$	$G_2$	$G_{2err}$
16816 1997 UF9	$15.39 \pm 0.026$	0.0	-0.0	0.3322	-0.2336
			+0.0849		+0.6034
159608 2002 AC2	$15.79 \pm 0.29$	0.1234	-0.1271	0.2317	-0.1773
			+0.1583		+0.4871
175189 2005 EC224	$18.11 \pm 0.024$	0.5895	-0.6118	0.1814	-0.0295
			+0.1741		+0.7124
326683 2002 WP	$18.05 \pm 0.048$	0.0	-0.0	0.6025	-0.0709
			+0.5503		+0.1939
333889 1998 SV4	$17.69 \pm 0.079$	0.7062	-0.2324	0.1075	-0.0264
			+0.1227		+0.4447
370307 2002 RH52	$16.41 \pm 0.226$	0.0	-0.0	0.5726	-0.0359
			+0.2763		+0.4111
370702 2004 NC9	$17.05 \pm 0.101$	0.8187	-0.8128	0.1813	-0.0381
			+0.1872		+0.8084
480824 1999 JO6	$16.37 \pm 0.13$	0.8072	-0.2139	0.0	-0.0494
			+0.0		+0.3808
484506 2008 ER7	$20.0 \pm 0.057$	0.629	-0.6264	0.371	-0.0693
			+0.3611		+0.5748
2001 UG18	$20.56 \pm 0.009$	0.4619	-0.3297	0.3302	-0.0594
			+0.3148		+0.4306
2005 TF	$18.84 \pm 0.529$	0.06187	-0.1111	0.1475	-0.0851
			+0.1366		+0.7147
2014 AD17	$19.67 \pm 0.188$	0.2481	-0.0	0.3532	-0.0658
			+0.2576		+0.3348
2016 WU3	$20.06 \pm 0.051$	0.8228	-0.0838	0.01938	-0.0665
			+0.0803		+0.5153
2017 CR32	$22.33 \pm 0.031$	0.8571	-0.5498	0.133	-0.0589
			+0.3161		+0.5839
2017 DC38	$24.22 \pm 0.08$	0.8017	-0.4329	0.0	-0.0273
			+0.0		+0.62

no espaço de fase, apesar de estarem na região entre os Tipo-S e -E. Com uma curva mais plana, temos os NEOs 175189, 333889, 480824, 2016WU3 e 2017DC38, classificados como Tipo-C, enquanto os objetos 370702 e 2017CR32 devem pertencer à classe do Tipo-D. Vale

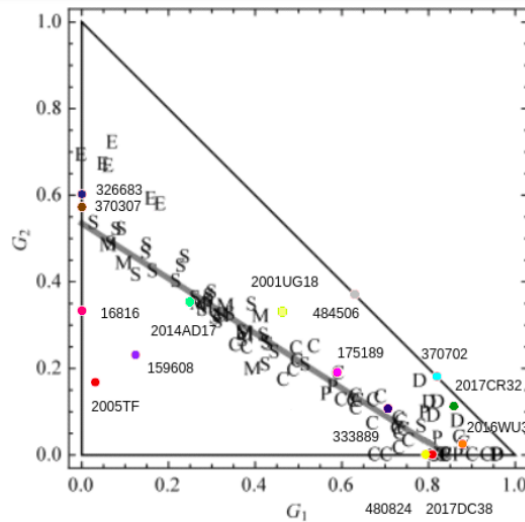


Figura 4.5: Espaço de fase  $G_1 - G_2$ . Os NEOs estão representados em pontos coloridos seguido de sua designação. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022).

ressaltar que com esta técnica é possível classificar apenas os objetos que se encontram ao longo da correlação, logo, para os outros quatro objetos, 16816, 159608, 2005TF e 484506, não foi possível definir uma classe por se encontrarem fora da correlação.

Utilizando outra técnica de caracterização, a figura 4.6 mostra a análise das amplitudes do OE. Para realizar essa análise, sobrepomos nossos dados ao gráfico obtido de Belskaya and Shevchenko (2000). De acordo com o gráfico, podemos classificar 1596608, 326683 e 2014 AD17 como Tipo-S, em concordância com resultados anteriores. Já o objeto 2001 UG18 se localiza numa região intermediária entre os Tipo-S e -D. Logo, analisando seu albedo e amplitude do OE, esse objeto indica ter silicato em sua composição, sendo mais provável um Tipo-S. Para o NEO 370307, apesar da proximidade com os objetos do complexo S, este NEO pode ser melhor classificado como do Tipo-E devido ao seu alto albedo.

Como visto na figura 4.6, a maioria dos objetos parece ter uma composição mais primitiva, que de acordo com o albedo podemos dividir entre do Tipo-C e -D. Como Tipo-C classificamos os NEOs 480824, 2016WU3 e 2017DC38, enquanto 175189, 333889, 370702, 484506 e 2017CR32, apesar de indicarem uma composição carbonácea, característica do complexo C, possuem albedo ligeiramente mais alto podendo ser classificados como do Tipo-D. Não foi possível derivar uma taxonomia com esse método para os objetos 16816 e 2005 TF, por possuírem grandes amplitudes do OE, 0,779 e 1,146, respectivamente. A grande amplitude no caso do objeto 2005 TF, pode ocorrer devido a grande dispersão do pontos na curva de fase. No caso do NEO 16816, apesar de uma boa cobertura na região do OE, seria necessária uma caracterização mais completa para melhor entender sua possível composição superficial.

Como ultima análise, foi estudado o albedo versus a contribuição relativa do COB.



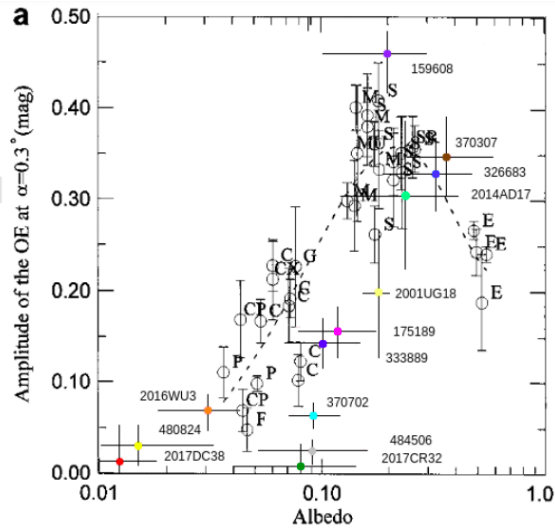


Figura 4.6: *Amplitude do OE vs albedo. Os NEOs estão representados em pontos coloridos seguido de sua designação. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022) com nossos dados sobrepostos ao gráfico obtido de Belskaya and Shevchenko (2000).*

O resultado pode ser visto na figura 4.7, onde novamente sobreposamos os dados obtidos para os nossos NEOs à figura do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000). Estimando a contribuição do COB encontramos quatro NEOs com menos do que 20% de COB. Esses NEOs apresentam resultados não identificados no trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000), que possui apenas um objeto Tipo-F com valor próximo. Sendo o Tipo-F incorporado ao complexo C nas taxonomias mais recentes, classificamos 480824, 484506, 2017CR32 e 2017DC38 como Tipo-C, assim como 2016 WU3, que apresenta 22% de COB. Com uma contribuição entre 40-50%, estão 175189, 333889 e 370702, sendo melhor classificados como do Tipo-D de acordo com a taxonomia de DeMeo et al. (2009).

Com uma contribuição entre 60-80% de COB, 159608, 2001UG18 e 2014AD17 são classificados como do Tipo-S ou -M, por serem mais compatíveis com objetos de albedo moderado ou alto, assim como 16816 e 326683, apesar destes terem uma contribuição do COB acima de 80%. Mais uma vez, correspondendo ao esperado, 370307 possui um albedo alto e uma contribuição de 80%, correspondendo ao Tipo-S ou -E.

### 4.3 Discussão

Na tabela 4.2 para cada objeto são apresentados os resultados sobre a classe taxonômica inferida aplicando as diversas técnicas de análise dos parâmetros do ajuste da curva de fase. Na segunda coluna é dada a classificação do SMASS<sup>2</sup>, disponibilizada na literatura obtida a partir de espectroscopia no visível e infravermelho próximo no âmbito do projeto MITHNEOS (*MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey*), enquanto

<sup>2</sup><http://smass.mit.edu/catalog.php>

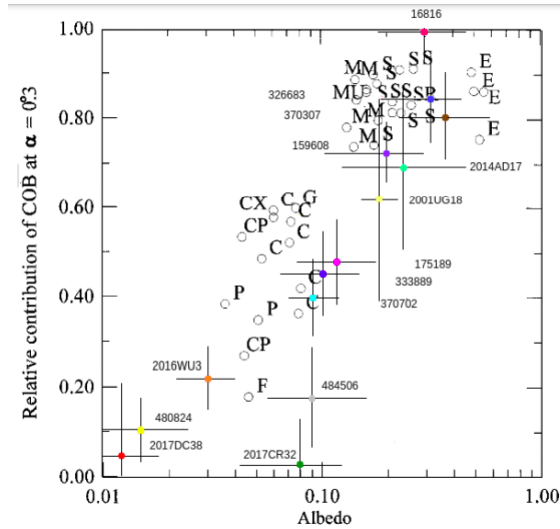


Figura 4.7: Relação da da contribuição do COB versus o logaritmo do albedo. Os NEOs estão representados em pontos coloridos seguido de sua designação. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022) com nossos dados sobrepostos ao gráfico obtido de Belskaya and Shevchenko (2000).

nas demais colunas a classe obtida a partir da forma da curva de fase, do espaço de fase  $G_1$ - $G_2$ , do OE, e da contribuição do COB, respectivamente. Na última coluna é dada a classificação mais provável para cada objeto, determinada considerando apenas os resultados obtidos por cada técnica aqui utilizada. Vale notar que para os 15 NEOs cuja curva de fase foi obtida a partir de nossas observação, foi possível derivar uma classificação taxonômica utilizando diversas técnicas de análise de parâmetros e apresentando uma boa concordância com os resultados das observações espectroscópicas, nos casos em que estas estavam disponíveis.

Os NEOs classificados como mais primitivos, Tipos-C e -D, podem ser divididos em dois grupos, os que possuem uma curva de fase mais plana - 480824, 484506, 2016WU3, 2017CR32 e 2017DC38 - e os que apresentam uma pequena amplitude do OE - 175189, 333889 e 370702. O primeiro grupo possui classificação Tipo-C, enquanto os do segundo grupo, apesar de estarem de acordo com características do complexo C, possuem albedos mais baixos. A esses objetos uma classificação Tipo-D parece ser mais adequada.

Classificados como do Tipo-S temos os NEOs 16816, 159608, 326683 e 2014AD17, de acordo com a taxonomia derivada nas técnicas utilizadas, o alto albedo e um significativo OE. Para o 2005 TF não foi possível derivar uma classificação embora foi classificado como Tipo-S por Rondón et al. (2019) a partir de seu espectrofotométrico. Para o 2001 UG18 uma taxonomia Tipo-S ou -M parece ser mais adequada, por apresentar resultados semelhantes a esses tipos taxonômicos e um alto albedo estimado.

Como o único objeto classificado como Tipo-E de nossa amostra, temos o 370307. De acordo com a amplitude significativa na região do OE, um comportamento semelhante à

Tabela 4.2: *Taxonomia derivada para cada NEO de acordo com a técnica utilizada. Na segunda coluna é dada a classificação dada na literatura, seguida das obtidas pelas técnicas de forma da curva, espaço de fase  $G_1$ - $G_2$ , amplitude do OE, contribuição do COB, respectivamente. Na última coluna é apresentada a classificação mais provável atribuída a cada objeto.*

NEO	espectro	forma da curva	$G_1$ - $G_2$	OE	COB	Taxonomia final
16816 1997UF9	-	S/M	S	-	S	S
159608 2002AC2	S	S/M	S	S	S/M	S
175189 2005EC224	-	D	C/P	C/D	D	D
326683 2002WP	S	S/M	S	S	S	S
333889 1998SV4	D	D	C	C/D	D	D
370307 2002RH52	E	E	S	S/E	S/E	S/E
370702 2004NC9	-	C	D	C/D	D	D
480824 1999JO6	-	C	C	C	C	C
484506 2008ER7	-	C	C	C/D	C	C
2001UG18	-	S/M	S/M	S	S/M	S/M
2005TF	S	S/M	S	-	-	S
2014AD17	S	S/M	S	S	S	S
2016WU3	-	C	C	C	C	C
2017CR32	C	C	D	C/D	C	C
2017DC38	-	C	C	C	C	C

do Tipo-E em algumas das técnicas utilizadas e seu alto albedo.

Os resultados aqui encontrados mostram a importância de trabalhos em colaboração para obter uma boa determinação de curvas de fase de NEOs. Tendo em vista a pouca quantidade de objetos que possuem propriedades físicas determinadas, realizar uma boa caracterização de propriedades relacionadas a composição é fundamental para essa população.

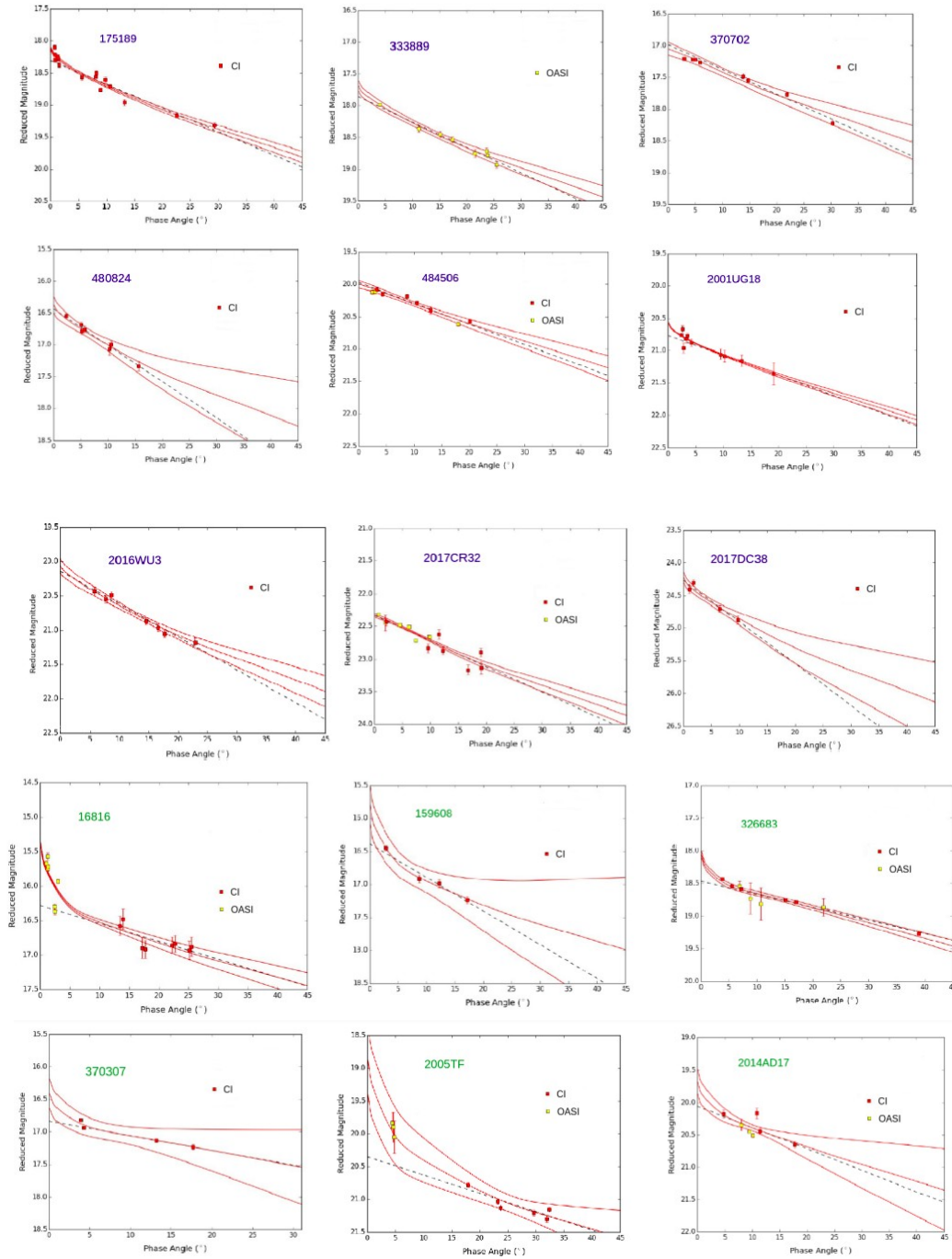


Figura 4.8: Curvas de fase dos 15 NEOs obtidas a partir de observações em CI (dados em vermelho) e no OASI (dados em amarelo). As curvas vermelhas representam o ajuste do modelo  $H-G_1-G_2$  e o envelope de incerteza para o modelo, enquanto a linha pontilhada preta mostra o ajuste linear. Notar que as primeiras 9 curvas não apresentam OE, ou muito pequeno, enquanto as demais apresentam um OE de moderado a alto. Figura retirada do trabalho de Ieva et al. (2022).

## Capítulo 5

# Comparação das propriedades físicas de NEOs e MB

Como visto anteriormente, os NEOs possuem a característica de serem uma população transiente, cuja proveniência ainda não está completamente estabelecida. Estudos dinâmicos mostram que regiões mais internas do MB devem ser as principais fontes de NEOs (Binzel et al., 2015), embora não podemos desconsiderar a contribuição relativa de regiões mais distantes do Sistema Solar (Binzel, 2019; DeMeo and Binzel, 2008; Levison and Duncan, 1997). O transporte de objetos do MB se dá através de colisões e de mecanismos de transporte como interações dinâmicas e efeitos térmicos, que acabam levando esses objetos para algumas ressonância e daí para as regiões dos NEOs (Gladman et al., 1997; Morbidelli and Nesvorný, 1999; Vokrouhlický et al., 2015). As principais ressonâncias no MB são as de movimento médio com Júpiter (RMM), e as ressonâncias seculares, juntas essas ressonâncias moldam dinamicamente o MB sendo os principais mecanismos de ejeção de corpos dessa região.

As RMM surgem quando o período orbital do corpo perturbado, neste caso o asteroide, é comensurável com o período orbital do corpo perturbador, neste caso Júpiter. Este tipo de ressonância causa um aumento na excentricidade do corpo perturbado. As principais RMM são as 3:1, 5:2, 7:3 e 2:1 localizadas aproximadamente em 2,5, 2,8, 2,9 e 3,2 UA, respectivamente. Essas ressonâncias também são conhecidas como falhas de Kirkwood e são tradicionalmente utilizadas para separar o Cinturão Principal em Interno, Intermediário e Externo. Já uma ressonância secular ocorre quando a variação da longitude do periélio de duas órbitas se encontra em uma relação de comensurabilidade ou síncrona. Este tipo de ressonância causa uma variação na excentricidade e na inclinação do corpo perturbado, sendo a ressonância secular com Saturno ( $\nu_6$ ) a mais atuante na região interna do MB. A figura 5.1 mostra os objetos e as principais ressonâncias que moldam o MB de acordo com parâmetros de elementos orbitais como o semieixo maior vs o seno da inclinação.

De acordo com trabalhos teóricos (Bottke et al., 2002; Morbidelli et al., 2002) as ressonâncias RMM 3:1 com Júpiter e a ressonância secular  $\nu_6$ , são as mais significativas

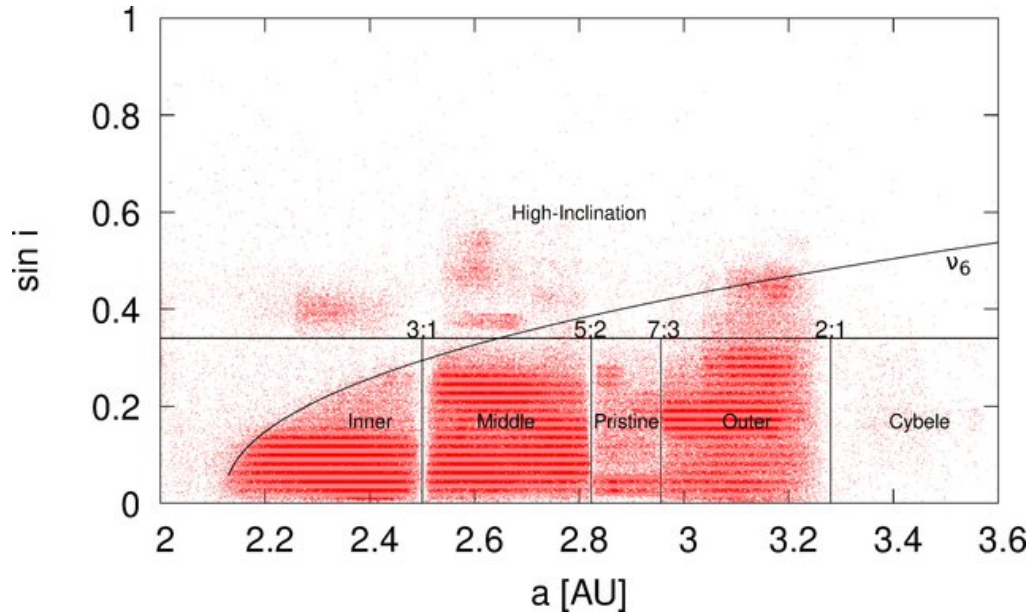


Figura 5.1: *Objetos do MB e distribuídos de acordo com o semieixo maior ( $a$ ) versus o seno da inclinação ( $\sin i$ ), mostrando as principais RMM e a ressonância secular  $\nu_6$ . Figura retirada do trabalho de (Zain et al., 2020).*

para o transporte de objetos até a região de NEOs.

Outra forma de verificar essa contribuição de objetos do MB para as regiões de NEOs é a partir da comparação de propriedades físicas desses objetos. Alguns autores realizaram estudos comparativos entre a distribuição taxonômica de NEOs e dos objetos do MB confirmando a contribuição significativa destes últimos, principalmente os das regiões mais internas, para a população de NEOs (ver, por exemplo, Carry et al. 2016; Binzel et al. 2019; Popescu et al. 2019).

Dentro desse contexto, com o objetivo de obter um melhor conhecimento da população dos NEO a partir da determinação de algumas de suas propriedades físicas, determinamos curvas de fase de diversos NEOs para realizar um estudo comparativo entre os parâmetros da curva de fase desses objetos e populações de asteroides do MB.

No que segue, abordaremos as bases de dados utilizadas, a metodologia seguida e os resultados encontrados a partir de nossas análises.

## 5.1 Metodologia e resultados

Como vimos no capítulo anterior, os parâmetros de inclinação  $G_1$  e  $G_2$ , podem ajudar a obter indicações sobre algumas propriedades físicas tais como albedo alto/baixo e provável classe taxonômica. Nesse sentido, em Rondón et al. (2019), utilizamos os dados de 93 MB com taxonomia e albedo bem determinados, retirados do trabalho de Shevchenko et al. (2016), e analisamos como os parâmetros derivados para 6 NEOs se encaixavam nas

regiões preferenciais do tipo taxonômico definidas nesse trabalho a partir da distribuição no espaço de fase  $G_1 \times G_2$  (ver figura 5.2). Esse mesmo tipo de análise também foi realizada em Ieva et al. (2022) para os 15 NEOs cujas curvas de fase foram determinadas (ver capítulo 4).

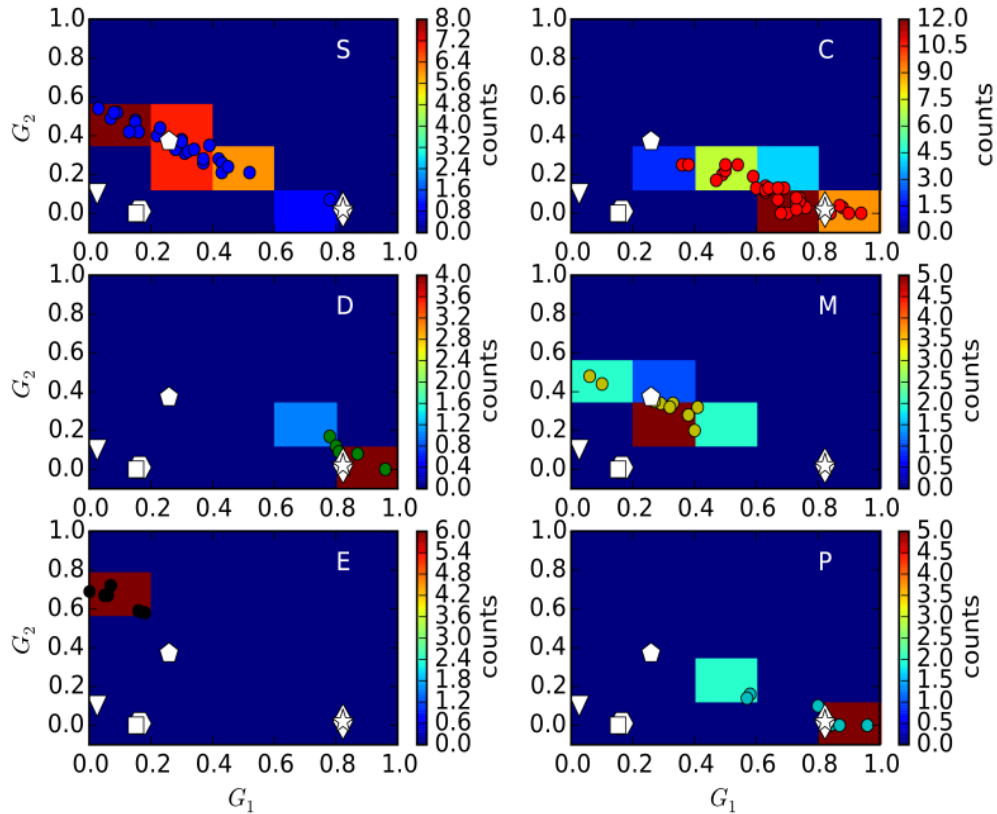


Figura 5.2: *Histograma bidimensional dos parâmetros de inclinação  $G_1$  e  $G_2$  das diferentes classes taxonômicas para a amostra de 93 MB dada em Shevchenko et al. (2016). As posições de nossos 6 NEOs são indicadas pelos grandes símbolos brancos. Figura retirada de Rondón et al. (2019).*

Para compor uma maior base de dados de NEOs, utilizamos as curvas de fase de mais 13 NEOs a partir de dados obtidos no OASI e, para uns poucos, em CI. Somadas às curvas já determinadas nos trabalhos de Rondón et al. (2019, 2022) e Ieva et al. (2022), obtemos assim uma base de dados de magnitude absoluta e parâmetros de inclinação para 32 NEOs determinados com a mesma metodologia. A lista completa dos parâmetros das curvas de fase está contida na tabela A.2.

Para os 13 NEOs aqui determinados, 8 pertencem ao grupo Amor - 4055, 18109, 99799, 174050, 480004, 2011 YQ10, 2016 RP33, 2017 AC5 - e 5 ao grupo Apollo - 40267, 65717, 417581, 464797 e 2019 CT4. O objeto 65717 também é classificado como PHA. Entre estes NEOs, três tiveram sua curva de luz rotacional determinada - 174050, 2011 YQ10 e 2019 CT4 - e para quatro foi possível realizar observações no filtro R e V do sistema Johnson-Cousin - 65717, 174050, 417581 e 2011 YQ10 - determinando assim seu índice de

cor.

As curvas de fase aqui determinadas seguem a metodologia descrita no capítulo 3 e para todos foi possível realizar correções por efeitos rotacionais. As curvas de fase determinadas estão apresentadas na figura 5.3, enquanto as curvas de luz são dadas na figura 5.4. Embora a curva de fase obtida no filtro V para esses objetos não seja utilizada em nossa análise, são dadas no Apêndice B. Para os 4 objetos com dados no filtro V foi possível derivar as cores V - R e assim determinar os diâmetros a partir da equação 3.4 para aqueles que têm albedo determinado. Na tabela 5.1 estão mostradas as magnitudes absolutas derivadas, os parâmetros de inclinação, bem como a cor V - R, com a respectiva data e ângulo de fase em que foi adquirido, e o diâmetro determinado. As curvas de fase obtidas também estão mostradas com mais detalhes no Apêndice B.

Uma vez montada nossa base de dados de NEOs, precisamos de um grande banco de dados para a população MB para termos resultados mais robustos. Portanto, com o objetivo de aumentar nossa amostra comparativa de MB, decidimos escolher populações específicas do MB visando determinar curvas de fase e derivar seus parâmetros.

Numa primeira abordagem, escolhemos para compor nossa amostra objetos localizados na ressonância 3:1 de movimento médio com Júpiter, em particular, no intervalo de semieixo maior entre 2,49 e 2,51 au. Assim, obtivemos uma amostra de 159 objetos, representados em cinza na figura 5.5. Entretanto apenas da ordem de 13% estariam observáveis a partir do OASI no período de 2019 a 2021 e 8 foram de fato observados. Na figura em vermelho são os objetos observados e em azul aqueles que poderiam ser observados.

Dos 8 objetos observados conseguimos obter a curva de fase para apenas 4 sendo que seus parâmetros são dados na tabela 5.2. Nem todos objetos tiveram uma boa quantidade e qualidade de dados, inviabilizando uma boa determinação dos parâmetros. Isso foi consequência da aquisição espaçada dos dados pela necessidade do seguimento do objeto por um longo intervalo de tempo, entre 3 e 5 meses. Assim, devido a má qualidade dos dados, decidimos mudar nossa abordagem e utilizar catálogos da literatura com parâmetros de curvas de fase determinados para objetos do MB. Os dados que compõem as quatro curvas determinadas, assim como os dados dos demais MB que não conseguimos determinar a curva de fase, estão dados na tabela A.1.

O primeiro catálogo a ser utilizado foi o *Asteroid Absolute Magnitude and Slope* (AAMS), desenvolvido por Muinonen et al. (2010) e Oszkiewicz et al. (2011). Este catálogo contém mais de 46.000 objetos do MB com parâmetros de curvas de fase determinados nos modelos H-G, H- $G_{12}$  e H- $G_1-G_2$ . Inicialmente tentamos reproduzir os resultados do trabalho de Shevchenko et al. (2016) referentes ao espaço de fase  $G_1 - G_2$ , usando os mesmos objetos, porém encontramos grandes diferenças entre os parâmetros determinados, além do catálogo não possuir dados para todos os 93 objetos. A figura 5.6 mostra a



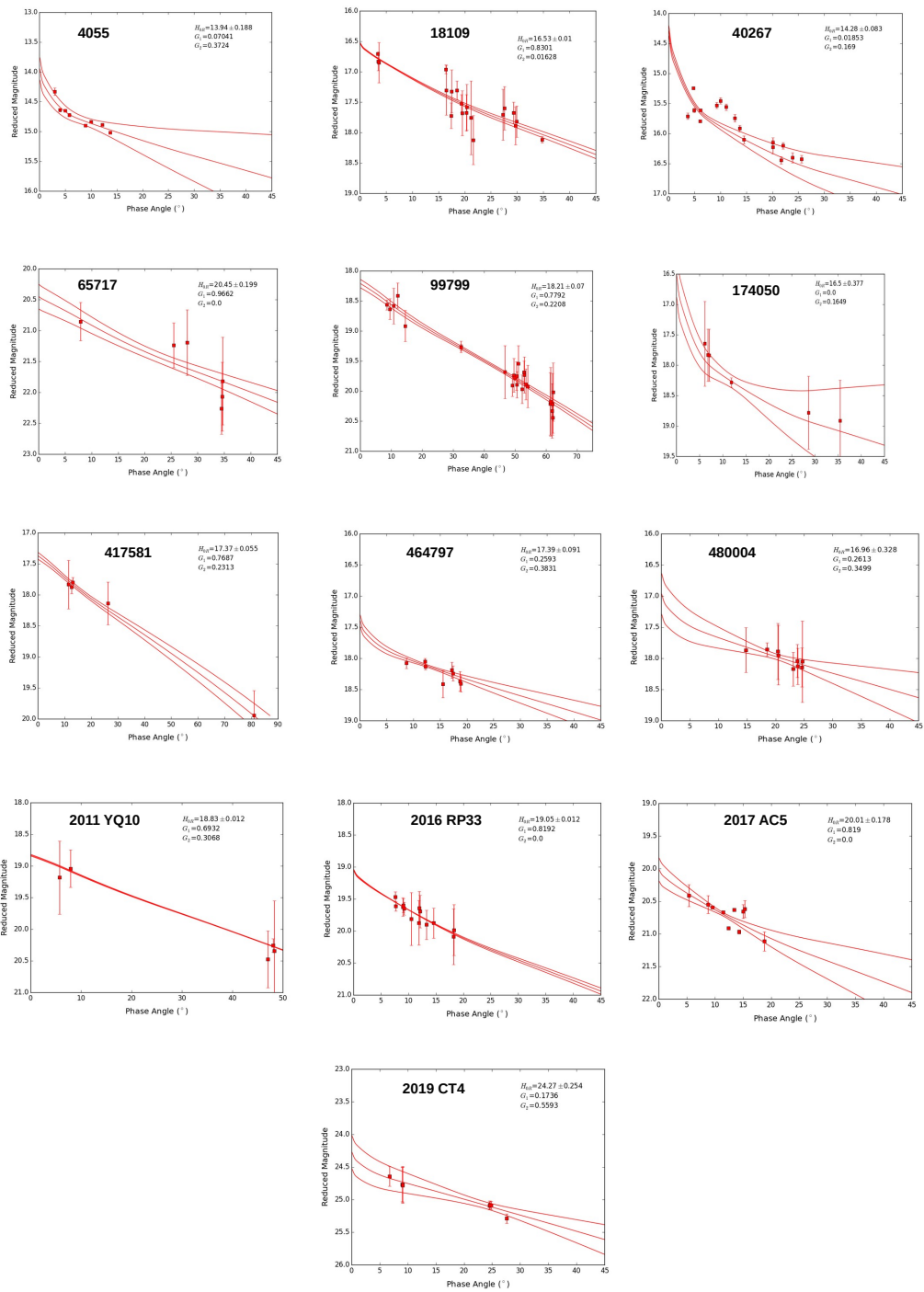


Figura 5.3: Curvas de fase determinadas para os 13 NEOs. As curvas vermelhas representam o ajuste do modelo  $H-G_1-G_2$  e o envelope de incerteza para o modelo. Figuras retiradas de Arcoverde et al. (submetido).

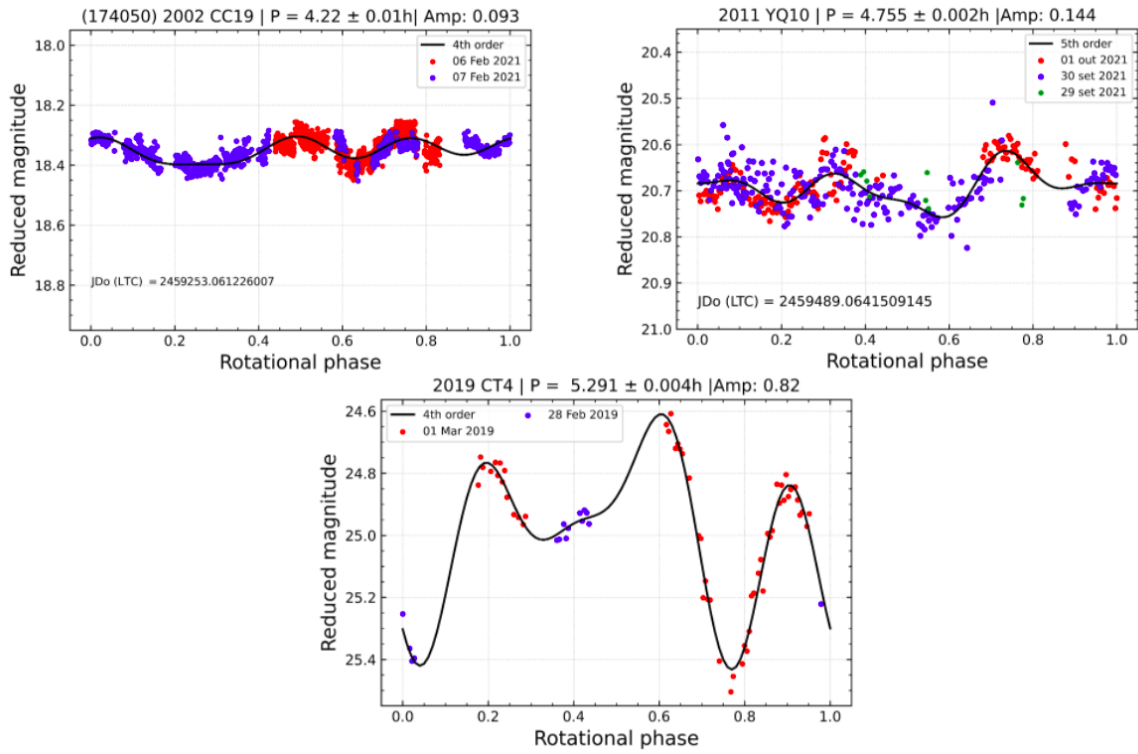


Figura 5.4: Curvas de luz e período rotacional dos três NEOs 174050, 2011 YQ10 e 2019 CT4, respectivamente. Figuras retiradas de Arcoverde et al. (submetido).

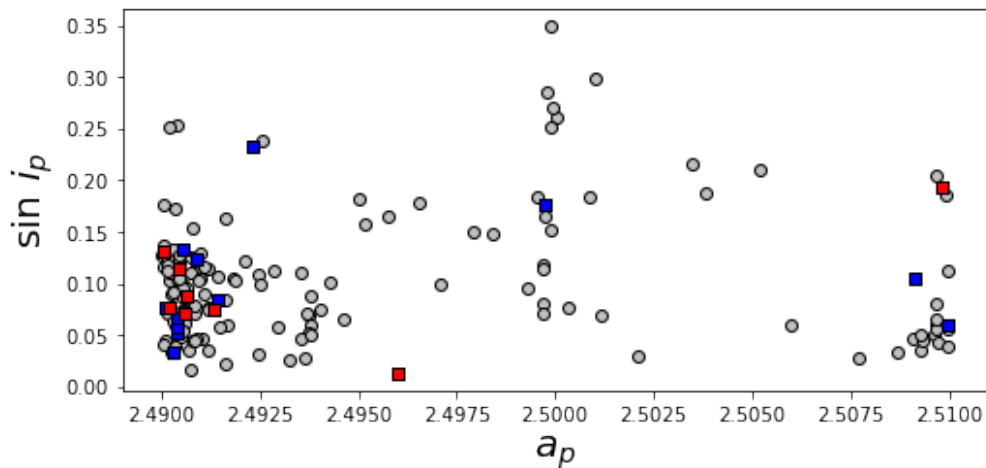


Figura 5.5: Distribuição dos parâmetros do seno da inclinação por semieixo maior. A distribuição utiliza os elementos próprios de inclinação e semieixo maior dos MB.

distribuição no espaço de fase  $G_1 - G_2$  para os mesmos objetos, com dados do catálogo AAMS (figura superior) e com dados do trabalho de Shevchenko et al. (2016) (figura inferior), e as diferentes classes taxonômicas especificadas na caixa ao lado. Essa diferença na distribuição e no ajuste linear entre os dados da AAMS e os objetos de Shevchenko et al. (2016), pode ser devido aos grandes erros dos dados no catálogo, bem como ao fato de não

Tabela 5.1: *Parâmetros determinados para 13 NEOs observados no OASI e CI. Na parte superior da tabela são dados os parâmetros da curva de fase onde as colunas indicam o nome do asteroide, a magnitude absoluta ( $H_{R0}$ ), e os parâmetros de inclinação ( $G_1$  e  $G_2$ ). Na parte inferior são dados o nome do asteroide as cores V - R, a data e o ângulo de fase em que a cor foi adquirida, e o diâmetro determinado ( $D$ ).*

Asteroide	$H_{R0}$	$G_1$	$G_{1err}$	$G_2$	$G_{2err}$
(4055) Magellan	13.94 $\pm$ 0.188	0.07041	-0.0722 +0.0929	0.3724	-0.335 +0.5273
(18109) 2000 NG11	16.53 $\pm$ 0.01	0.8301	-0.2413 +0.048	0.01628	-0.0 +0.4196
(40267) 1999 GJ4	14.28 $\pm$ 0.083	0.0185	-0.0077 +0.1734	0.169	-0.0009 +0.788
(65717) 1993 BX3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	-0.3761 +0.0207	0.2208	-0.0 +0.4091
(99799) 2002 LJ3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	-0.1462 +0.0182	0.2208	-0.2539 +0.1456
(174050) 2002 CC19	16.5 $\pm$ 0.377	0.0	-0.0 +0.0836	0.1649	-0.0658 +0.0864
(417581) 2006 VA3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	-0.2397 +0.2298	0.2208	-0.0273 +0.2346
(464797) 2004 FZ1	17.39 $\pm$ 0.091	0.2593	-0.0693 +0.3836	0.3831	-0.0405 +0.2917
(480004) 2014 KD91	16.96 $\pm$ 0.425	0.2613	-0.007 +0.0534	0.3499	-0.0056 +0.136
2011 YQ10	18.85 $\pm$ 0.123	0.5894	-0.2069 +0.2388	0.4106	-0.0093 +0.2049
2016 RP33	19.05 $\pm$ 0.012	0.8192	-0.0099 +0.0	0.0	-0.0502 +0.1755
2017 AC5	20.13 $\pm$ 0.326	0.8417	-0.057 +0.0	0.07513	-0.0471 +0.9755
2019 CT4	24.13 $\pm$ 0.273	0.2741	-0.1497 +0.4338	0.388	-0.0848 +0.264
Asteroid	V - R	date	$\alpha$ (°)		
(65717) 1993 BX3	0.484	2021/03/13	7.9		
(174050) 2002 CC19	0.231	2021/02/11	35.4		
(417581) 2006 VA3	0.435	2021/02/11	26.3		
2011 YQ10	0.496	2021/10/05	47.7		

ser especificado em quais filtros as magnitudes foram determinadas. Quando tentamos filtrar a amostra usando apenas objetos com erros menores ( $H_{err} < 0,1$ ), o conjunto de dados acaba sendo muito pequeno para ser utilizado.

Outro catálogo recente de curvas de fase de asteroides é o catálogo de fotometria de banda dupla com dados do ATLAS<sup>1</sup> (Mahlke et al., 2021). Este catálogo contém cerca de 94.777 curvas de fase de asteroides a partir de fotometria de banda dupla adquirida pelo *Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System* (ATLAS, Tonry et al. (2018)), com magnitudes observadas em dois filtros: uma banda entre 420 e 650nm chamada *cyan* e uma banda entre 560 e 820nm chamada *orange*. Mahlke et al. (2021) usando dados do

<sup>1</sup><https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=VII/288>

Tabela 5.2: Parâmetros determinados para os 4 MB observados no OASI. Na parte superior são dados os parâmetros da curva de fase onde as colunas indicam o nome do asteroide, a magnitude absoluta no filtro R ( $H_{R0}$ ) e V ( $H_{V0}$ ) do sistema Johnson-Cousins, e os parâmetros de inclinação ( $G_1$  e  $G_2$ )

Asteroide	$H_{R0}$	$H_{V0}$	$G_1$	$G_{1err}$	$G_2$	$G_{2err}$
(7135) 1993 VO	$13,91 \pm 0,43$	-	0,8161	-0,026 +0,0026	0,0	-0,0166 +0,1854
(12147) Bramante	$13,12 \pm 0,015$	$13,67 \pm 0,719$	0,166	-0,0069 +0,0	0,0	-0,0656 +0,2748
(23354) 9547 P-L	$14,03 \pm 0,928$	$14,87 \pm 0,441$	0,0	-0,1505 +0,5159	0,173	0,0305 +0,3995
(45444) 2000 AD180	$13,37 \pm 0,96$	-	0,0	-0,0 +0,2367	0,2805	-0,0 +0,3778

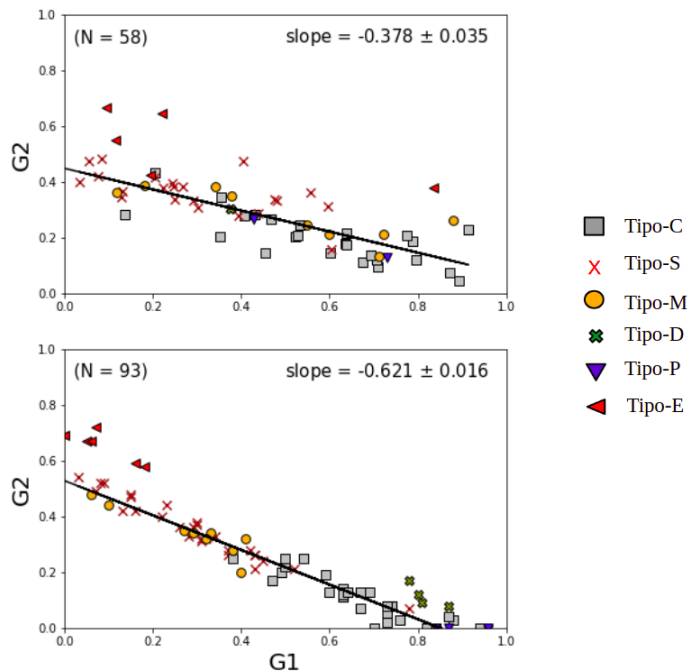


Figura 5.6: Distribuição no espaço de fase  $G_1$  - $G_2$  para um conjunto de objetos do MB fornecidos em Shevchenko et al. (2016), figura inferior, e para os mesmos objetos com dados obtidos a partir do catálogo AAMS, figura superior.  $N$  é o número de objetos, as diferentes classes taxonômicas são indicadas na figura e os ajustes lineares são representados por uma linha preta.

ATLAS, fornece parâmetros de curva de fase nos modelos H- $G_{12}$  e H- $G_1$ - $G_2$ , para objetos do MB e NEOs. Aqui, utilizamos apenas dados obtidos no modelo H- $G_1$ - $G_2$ , por ser o mesmo modelo utilizado em nosso trabalho. Outros parâmetros fornecidos no catálogo são a cobertura do ângulo de fase e o desvio padrão do ajuste.

Como primeiro passo procuramos os 93 objetos de Shevchenko et al. (2016) nas curvas de fase fotométrica de banda dupla do ATLAS e encontramos 28 objetos com curvas

determinadas na banda *cyan* e 34 na banda *orange*. A figura 5.7 mostra a correlação entre  $G_1$  e  $G_2$  para os objetos com dados do ATLAS (figuras superiores) e de Shevchenko et al. (2016) (figura inferior), para comparação. As diferentes cores dos pontos representam as distintas classes taxonômicas enquanto a linha preta representa o ajuste linear, que foi calculado sem considerar os objetos do tipo D e E, assim como em Shevchenko et al. (2016). O painel inferior mostra claramente a separação dos objetos Tipo-S e M na região superior esquerda do ajuste e os Tipo-C e P na região inferior direita. No caso dos dados das observações do ATLAS, os dados aparecem mais dispersos, provavelmente devido ao menor número de objetos, mas, geralmente, reproduzem bem os resultados de Shevchenko et al. (2016).

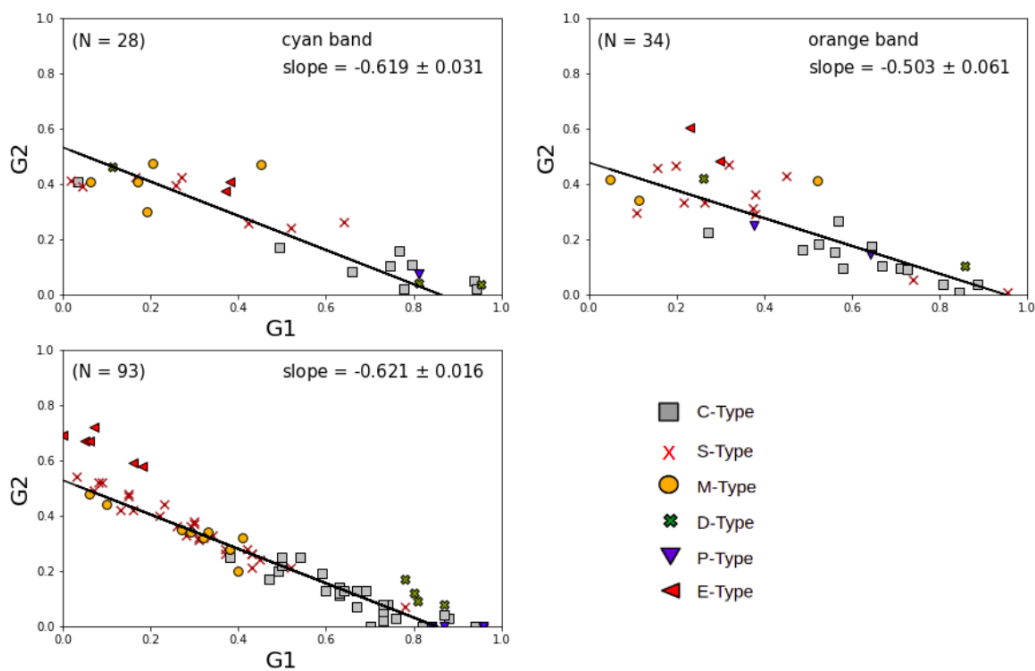


Figura 5.7: *Figura inferior: distribuição no espaço de fase  $G_1$  - $G_2$  para o conjunto de objetos do MB utilizados em Shevchenko et al. (2016). Figuras superiores: distribuição para os mesmos objetos com dados obtidos do ATLAS no filtro cyan e orange, à esquerda e direita, respectivamente.  $N$  é o número de objetos, as diferentes classes taxonômicas são indicadas na figura e os ajustes lineares são representados pela linha preta. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).*

Importante ressaltar que Mahlke et al. (2021) encontra evidências da dependência dos parâmetros de curva de fase no comprimento de onda. Analisando os filtros *cyan* e *orange* utilizados pelo ATLAS Survey, e os filtros V e R do sistema Johnson-Cousin, verificamos que a banda do filtro V, entre 470 e 700 nm, é semelhante à do filtro *cyan*, enquanto o filtro R, entre 550 e 900 nm, é semelhante à banda *orange*. Isso pode explicar a semelhança da inclinação do ajuste linear dos dados obtidos na banda *cyan* e por Shevchenko et al. (2016), com valores de -0,619 e -0,621.

Portanto, considerando que o catálogo de fotometria de banda dupla com dados do ATLAS reproduz bem a distribuição no espaço de fase para os mesmos objetos do trabalho de Shevchenko et al. (2016), ao mesmo tempo que apresenta erros do ajuste pouco significativos, com uma boa cobertura de ângulo de fase no geral, utilizaremos esse catálogo para seguir com nosso estudo.

### 5.1.1 Correlação $G_1 - G_2$ para MB

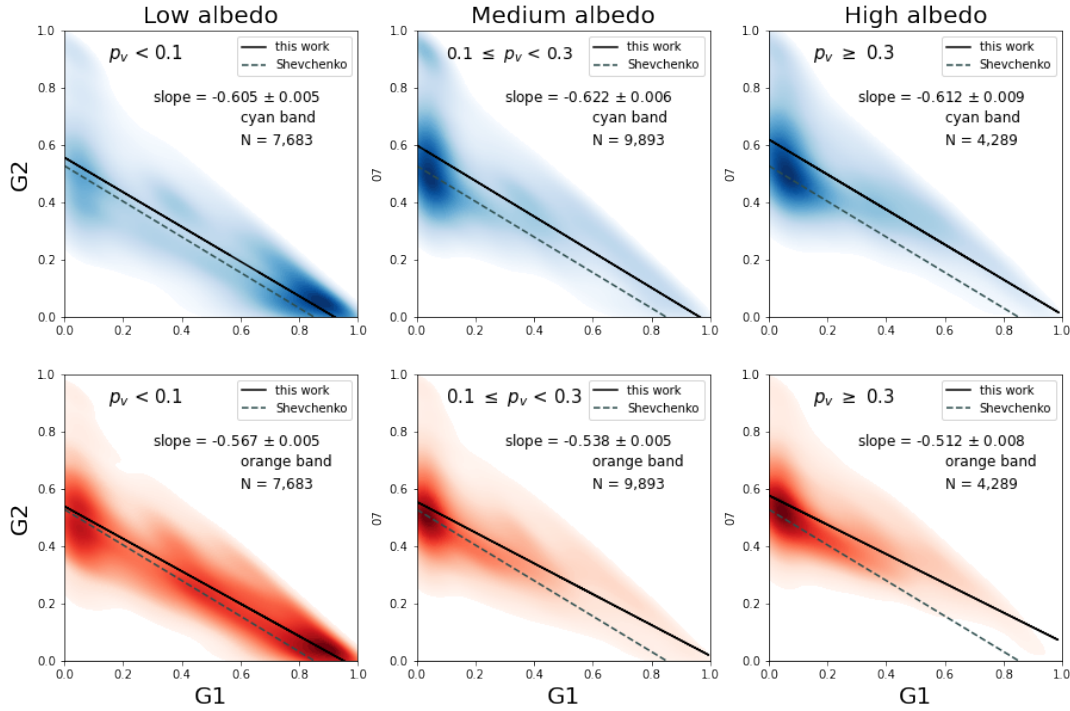


Figura 5.8:  $G_1, G_2$ -distribuições para três faixas de albedo: albedo baixo, albedo médio e albedo alto, compreendendo 21.865 objetos, do catálogo de curvas de fase de asteroides da fotometria de banda dupla ATLAS, observada em cyan (ajuste azul) e orange (ajuste vermelho). As distribuições são representadas por estimadores de densidade de kernel gaussianos 2 D (KDE) ajustados aos pares  $G_1, G_2$ . A linha preta corresponde ao ajuste linear da amostra com valor de inclinação mostrado, e a linha tracejada corresponde ao ajuste linear com os 93 MB do trabalho Shevchenko et al. (2016).  $N$  é o número de asteroides em cada intervalo de albedo. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).

Antes de iniciar a análise com os objetos do MB, foi necessário realizar uma filtragem nos dados. Como a distribuição no espaço de fase  $G_1 - G_2$  está relacionada ao comprimento de onda, conforme mostrado por Mahlke et al. (2021), como segundo passo, usamos curvas de fase do catálogo que possuem dados em ambas as bandas *cyan* e *orange*.

Desses objetos, utilizamos apenas aqueles com albedo determinado pelo NEOWISE (Mainzer et al., 2011), obtendo uma amostra de 21.865 de objetos MB, e dividimos em três faixas de albedo: albedo baixo, albedo médio e albedo alto. Esses intervalos foram

definidos como baixo  $p_v < 0,1$ , médio  $0,1 \leq p_v < 0,3$  e alto  $p_v \geq 0,3$ . Na figura 5.8, ajustamos nossos 21.865 objetos utilizando estimadores de densidade de kernel gaussianos 2 D (KDE) (Waskom et al., 2020), do pacote *seaborn* do python, ajustados aos pares  $G_1, G_2$ . Assim, temos as distribuições  $G_1, G_2$  para as três faixas de albedo e para os parâmetros de curvas de fase de asteroides com dados do catálogo da fotometria de banda dupla ATLAS, obtidas em *cyan* (ajuste azul) e *orange* (ajuste vermelho).

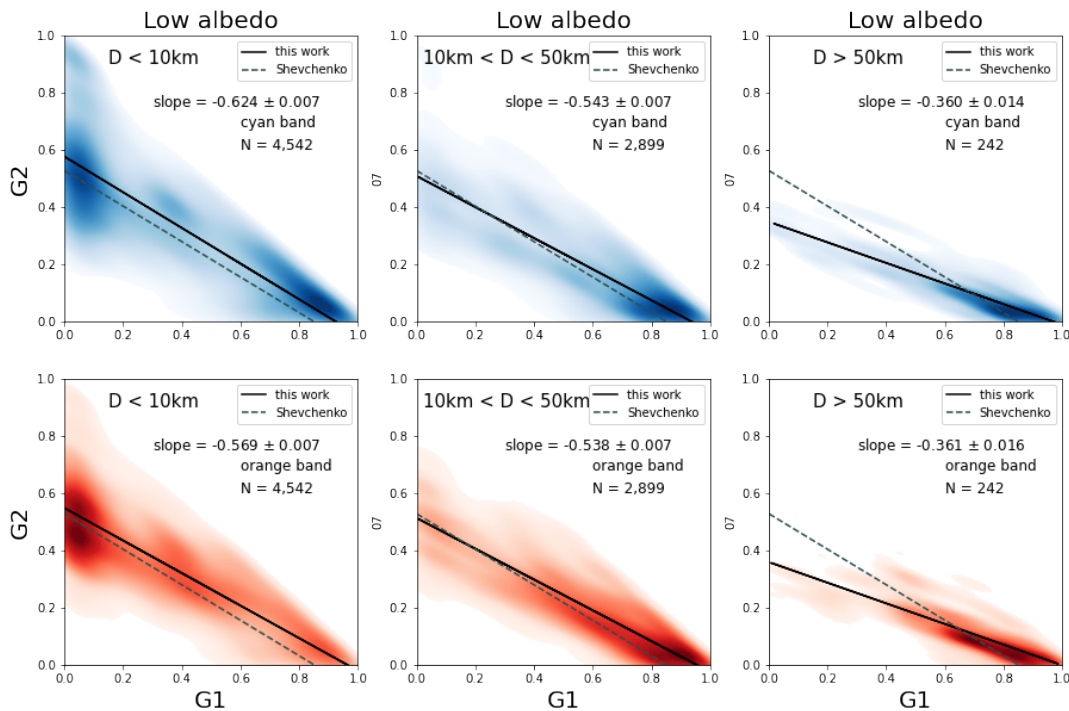


Figura 5.9: Distribuição similar à figura 5.8 com os objetos de albedo baixo separados por diâmetro. A amostra conta com 7.683 objetos. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).

Na Fig. 5.8, para comparar os dados do catálogo com os dados dos 93 MB de Shevchenko et al. (2016), realizamos um ajuste linear em que a linha preta corresponde ao ajuste linear da amostra e a linha tracejada ao ajuste linear de Shevchenko et al. (2016). Analisando os agrupamentos de objetos no espaço de fase, estes são semelhantes em ambas as bandas, e apenas na faixa de baixo albedo e no filtro *orange* observamos um segundo agrupamento com menor densidade. Já para os objetos de baixo albedo observamos que existe um agrupamento no canto inferior direito, enquanto no médio e alto albedo este se encontra no canto superior esquerdo, isso mostra claramente uma dependência dos parâmetros  $G_1$  e  $G_2$  com o albedo. Por fim, observamos uma dependência da inclinação do ajuste linear com os filtros, onde a inclinação está em torno de  $-0,6$  na banda *cyan* e em torno de  $-0,5$  na banda *orange*.

Como visto no capítulo anterior, a dependência dos parâmetros de inclinação com propriedades físicas como albedo e taxonomia, vem sendo bastante abordada (Ieva et al.,

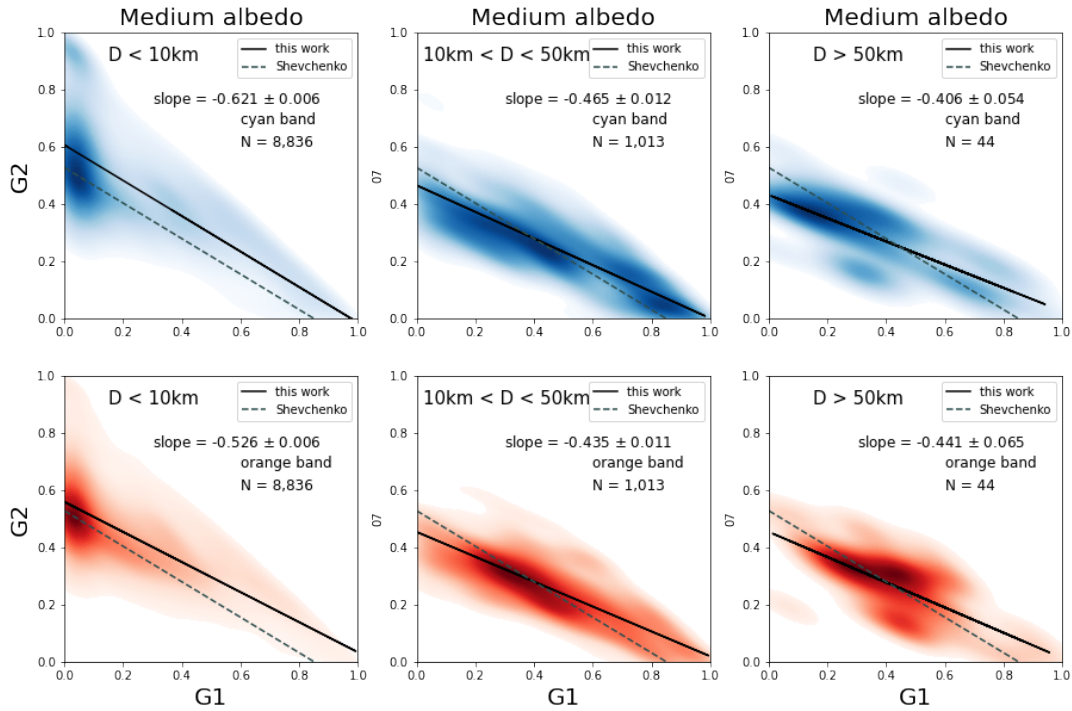


Figura 5.10: Distribuição similar à figura 5.8 com os objeto de albedo médio separados por diâmetro. A amostra conta com 9.893 objetos. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).

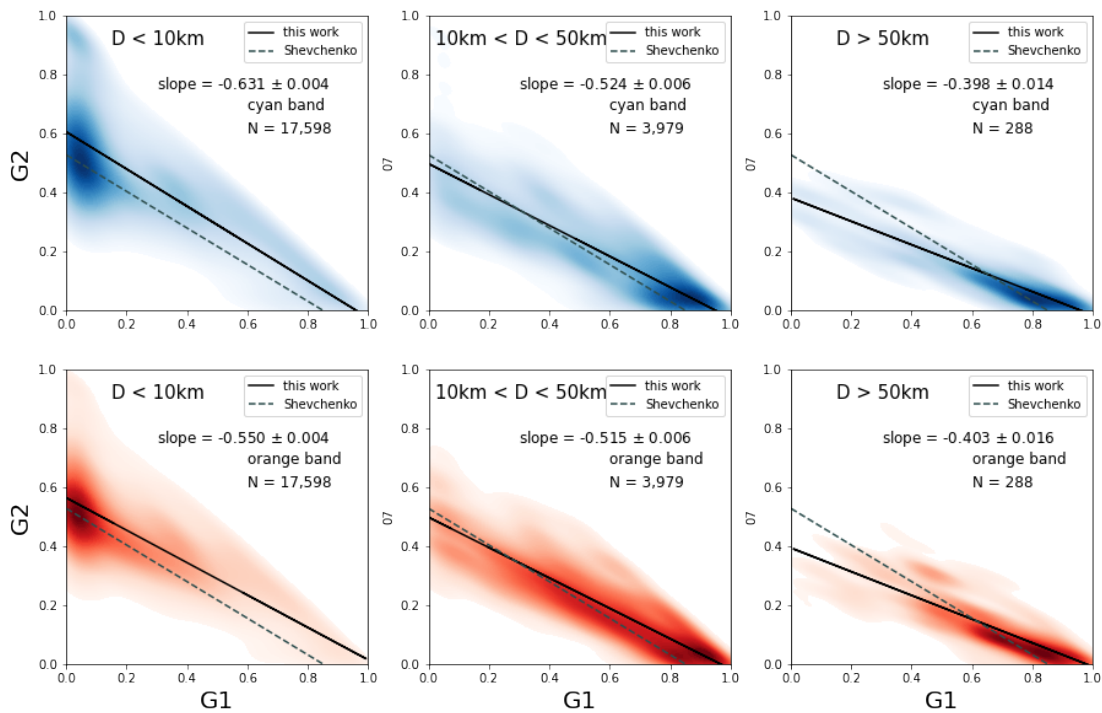


Figura 5.11: Distribuição  $G_1, G_2$  para as três faixas de diâmetro:  $D < 10\text{ km}$ ,  $10\text{km} < D < 50\text{ km}$ , e  $D > 50\text{ km}$ . Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).



2022; Penttilä et al., 2016; Rondón et al., 2019; Shevchenko et al., 2016), porém, uma questão que nos colocamos é se o tamanho do objeto também tem alguma influência na correlação. Isso surgiu quando no trabalho de Rondón et al. (2019), notamos que os nossos NEOs não seguiam a correlação de Shevchenko et al. (2016) e sugerimos que isso poderia ser devido à grande diferença em tamanho entre os objetos.

Portanto, para analisar a dependência com o diâmetro, usamos o KDE 2 D ajustado ao parâmetro  $G_1 - G_2$  para 3 faixas de diâmetro:  $D < 10$  km,  $10 \text{ km} < D < 50$  km e  $D > 50$  km. Este é mostrado na figura 5.11, onde as linhas pretas e tracejadas seguem o mesmo esquema da figura 5.8. Para  $D < 10$  km observamos que o agrupamento está no canto superior esquerdo, enquanto para  $D > 10$  km está no canto inferior direito, o que mostra claramente uma dependência dos parâmetros  $G_1$ ,  $G_2$  com o tamanho. Portanto, apesar de concentrações similares em ambas as bandas, observamos uma dependência da inclinação do ajuste linear com o filtro e, também, com o tamanho.

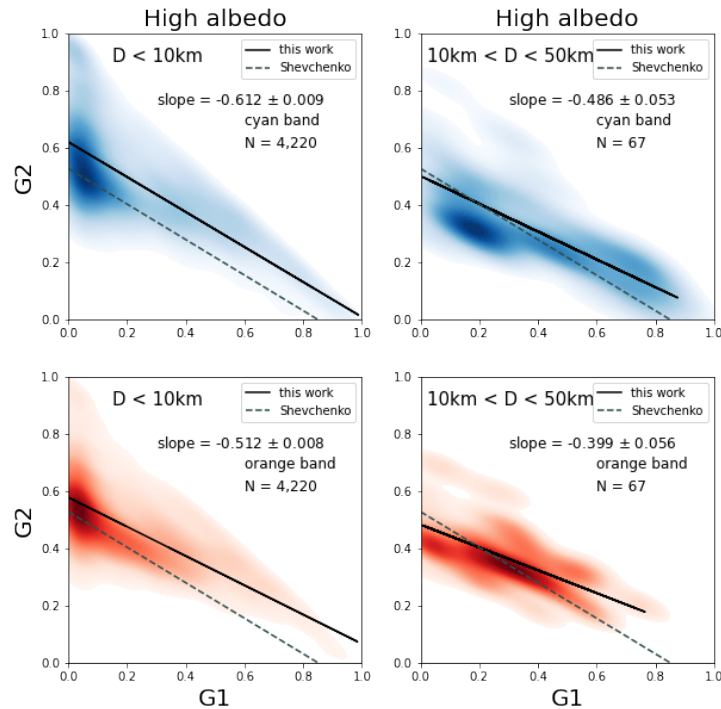


Figura 5.12: Distribuição similar à figura 5.8 com os objetos de albedo alto separados por diâmetro. A amostra conta com 4.289 objetos. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).

Repetindo o KDE 2 D para os parâmetros  $G_1 - G_2$  para as 3 faixas de diâmetro e cada faixa de albedo, obtivemos como resultado uma forte dependência com o tamanho dos objetos, no espaço de fase  $G_1$  e  $G_2$ . Os ajustes são mostrados nas figuras 5.9, 5.10 e 5.12 para o albedo baixo, médio e alto, respectivamente.

Analisando as figuras, vemos que as concentrações de objetos variam com o tamanho destes, independentemente do filtro utilizado. Para os objetos maiores, com  $D > 10$  km,

o comportamento é bem semelhante ao encontrado por Shevchenko et al. (2016), com concentrações específicas para os objetos de albedo baixo, na região inferior direita, albedo médio, na parte central, e albedo alto, na parte superior esquerda. Já para os objetos menores, com  $D < 10$  km, independentemente do albedo, a maior concentração se encontra sempre na região superior esquerda.

Analisando também a inclinação dos ajustes lineares, vemos que à medida que o tamanho do diâmetro do asteroide aumenta a inclinação diminui. Se focarmos na variação da inclinação na banda *cyan*, por exemplo, temos que para os pequenos objetos de baixo albedo a inclinação é em torno de  $-0,64$ , mas diminui à medida que os tamanhos aumentam, até  $-0,36$  para objetos com  $D > 50$  km. O mesmo ocorre, em menor grau, para objetos de albedo médio e alto, variando de  $-0,62$  a  $-0,41$  e de  $-0,61$  a  $-0,48$ , respectivamente.

Dessa forma, vemos que além da dependência com a composição superficial, a posição dos objetos no espaço de fase  $G_1$  e  $G_2$  pode variar de acordo com o tamanho, dificultando desta forma obter uma indicação do albedo a partir deste método.

### 5.1.2 NEOs vs MB

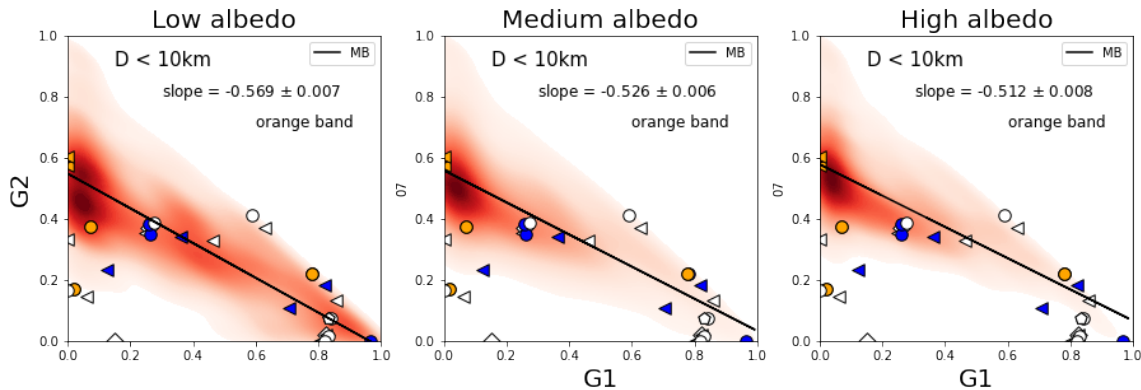


Figura 5.13: Distribuição por 2 *D* Gaussian Kernel Density Estimators (KDE) ajustados aos pares  $G_1, G_2$  similar à figura 5.8, com três faixas de albedo para MB com  $D < 10$  km. Símbolos representam dados de cada trabalho, círculos, losangos, pentágono e triângulos são do presente trabalho, de Rondón et al. (2019), de Rondón et al. (2022) e Ieva et al. (2022), respectivamente. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).

Após realizar a análise apenas com os objetos do MB, passamos a estudar como os dados de NEOs de nossa base de dados de NEOs se comportam. Tendo em vista que nossos objetos possuem  $D < 10$  km, e nossas curvas foram obtidas com o filtro R do sistema Johnson-Cousins, visto anteriormente ser mais semelhante à banda *orange* do ATLAS, iremos comparar nossos dados com os da população de MB para este tamanho e banda e para as três faixas de albedo. A figura 5.13 mostra a distribuição  $G_1, G_2$  de MB junto com os dados de nossos 32 NEOs. Os símbolos coloridos indicam objetos obtidos nos diferentes

trabalhos, sendo círculos para as curvas determinadas neste trabalho, diamantes para os dados de Rondón et al. (2019), pentágono para os dados de Rondón et al. (2022), e triângulos para os dados de Ieva et al. (2022). As cores laranja e azul indicam objetos com albedo alto e médio, respectivamente, enquanto que os símbolos brancos indicam objetos que não possuem albedo determinado. A linha preta corresponde ao ajuste linear da amostra de MB, conforme indicado nas figuras 5.9, 5.10 e 5.12.

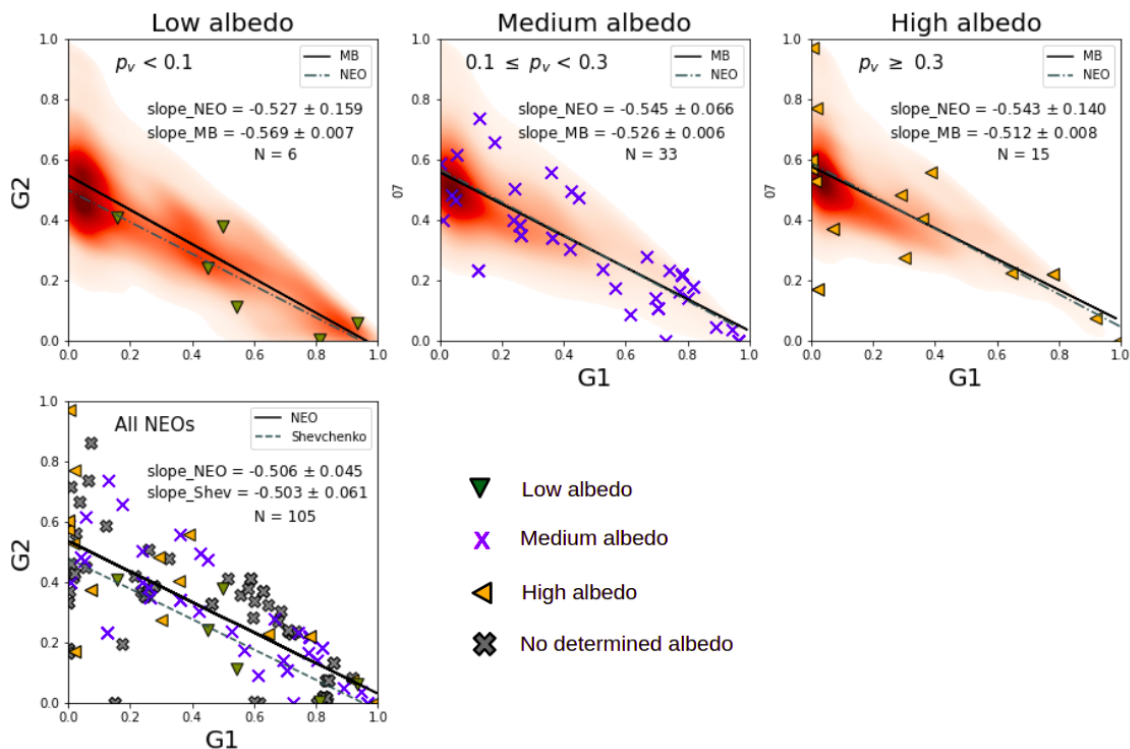


Figura 5.14: Similar a figura 5.13 para todos NEOs com albedo determinado (figuras superiores) e para todas as 105 NEOs de nossa amostra (figura inferior). Os albedos são especificados na caixa inferior direita, enquanto a linha preta indica os ajustes lineares aos dados MB e a linha tracejada indica os ajustes lineares ao NEO. Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).

Analisando a figura 5.13, vemos que grande parte de nossos NEOs seguem a correlação esperada no espaço de fase, com apenas 6 objetos localizados fora dessa correlação. A esse comportamento inesperado, atribuímos os grandes erros das curvas de fase, seja pela falta de correção para efeitos rotacionais, como no caso de 16816, 40267 e 159608, ou os grandes erros nas magnitudes, como no caso de 174050, 489337 e 2005 TF. Como vimos no capítulo 3, minimizar os efeitos rotacionais nas curvas de fase nos permite obter parâmetros muito mais precisos, e uma boa cobertura da curva também é fator fundamental. Como exemplo temos o 326683, em que uma primeira curva de fase foi obtida em Rondón et al. (2019) e o objeto se localizou fora da região de correlação (veja a figura 5.2), mas após uma melhor cobertura do ângulo de fase, obtido em Ieva et al. (2022), o mesmo objeto segue

a tendência linear esperada.

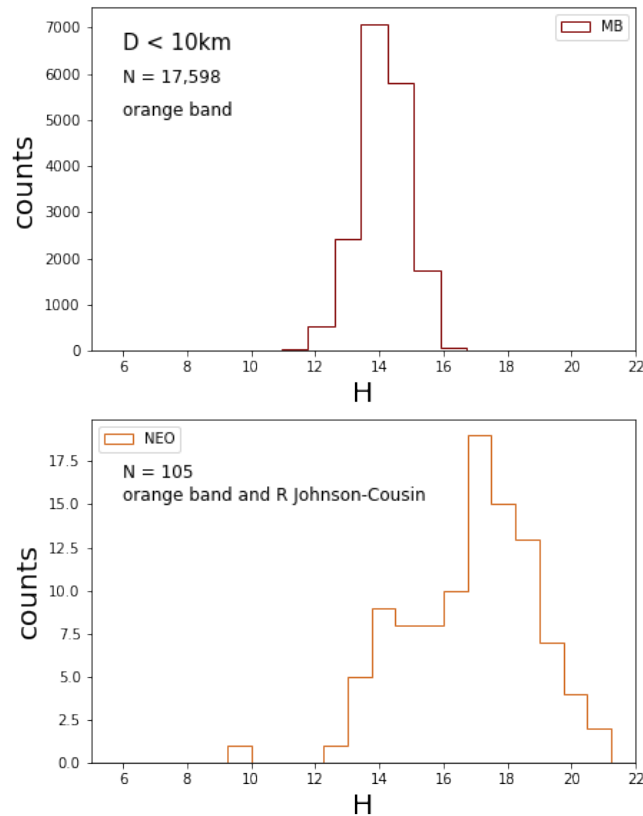


Figura 5.15: *Histograma da magnitude absoluta de MB com  $D < 10\text{km}$  (figura superior) e nossa amostra de NEOs (figura inferior). Figura retirada de Arcoverde et al. (submetido).*

Ao investigarmos o catálogo de curva fase obtido por Mahlke et al. (2021) com os dados do ATLAS, encontramos curvas de fase determinadas para 73 NEOs com parâmetros determinados na banda *orange*. Portanto, com o intuito de aumentar nossa amostra e obter mais evidências sobre a distribuição de NEOs no espaço  $G_1$ - $G_2$ , incluímos esses objetos em nossa análise, ficando assim com um total de 105 NEOs. Como os NEOs encontrados no catálogo também são objetos pequenos, utilizamos a nova amostra junto com os objetos do MB com  $D < 10\text{ km}$  no mapa de distribuição de densidade de  $G_1, G_2$  para três faixas de albedo, como mostra a figura 5.14. Na figura os diferentes símbolos representam as diferentes faixas de albedo, como especificado ao lado da figura inferior.

A partir da observação da distribuição dos NEOs no espaço de fase, vemos que os objetos não apresentam região preferencial de acordo com o albedo, apesar de observamos uma forte correlação linear entre os parâmetros  $G_1$  e  $G_2$ , com coeficiente de correlação de -0,742 e um ajuste linear de  $-0,506 \pm 0,045$  (figura 5.14 inferior). Ao compararmos os ajustes lineares entre os NEOs e MB com  $D < 10\text{ km}$ , vemos que são muito semelhantes, refletindo a semelhança das bandas R e *orange*, apesar da amostra de NEOs serem de objetos bem menores que os do MB, como mostra a distribuição de tamanho no histograma

da figura 5.15. Contudo, para os objetos menores não podemos usar essa correlação para inferir o albedo, pois a distribuição não mostra nenhuma região de preferência clara.

## 5.2 Discussão

Como principais resultados deste trabalho temos a determinação de 13 curvas de fase de NEOs com boa cobertura e boa qualidade dos dados, sendo 8 pertencentes ao grupo Amor, 5 ao grupo Apollo (um classificado como PHA). Vale ressaltar que todos os NEOs tiveram suas curvas de fase corrigidas de efeitos rotacionais, sendo aqui apresentadas as curvas para os NEOs 174050, 2011 YQ10 e 2019 CT4, e, no caso deste último, sendo a primeira estimativa para seu período rotacional.

Da análise da correlação dos parâmetros  $G_1$  e  $G_2$  com uma grande amostra de curvas de fase de asteroides do MB a partir do catálogo com dados de fotometria de banda dupla do ATLAS, adquirido por (Mahlke et al., 2021), vimos que a inclinação da reta que correlaciona os parâmetros de inclinação da curva de fase depende do filtro utilizado. Utilizando objetos do trabalho de Shevchenko et al. (2016) com dados do catálogo de Mahlke et al. (2021), temos que os ajustes lineares tem um comportamento diferente para cada banda utilizada, sendo o comportamento da banda *cyan* semelhante ao filtro V do sistema Johnson-Cousins e a banda *orange* semelhante ao filtro R do sistema Johnson-Cousins (ver figura 5.7). Também observamos que a distribuição do objetos no espaço de fase  $G_1$ - $G_2$ , além de ter correlação com o albedo, possui uma forte correlação com o tamanho, parâmetro desconsiderado até o momento nos trabalhos anteriores. Mostramos que objetos com  $D > 10$  km tem comportamento semelhante aos objetos do trabalho de Shevchenko et al. (2016), enquanto os MB menores, com  $D < 10$  km, apresentam apenas uma região preferencial independentemente do albedo.

Para os NEOs aqui analisados, vemos que o comportamento no espaço de fase é semelhante ao comportamento dos objetos do MB com diâmetro inferior a 10 km. Entretanto, os NEOs não apresentam regiões preferenciais no espaço de fase, impossibilitando inferir qualquer indicação sobre a composição superficial a partir da correlação  $G_1$  vs  $G_2$ . Claramente, mais observações são necessárias para entender os comportamentos aqui descritos.

Por fim, é relevante ressaltar a importância de um telescópio dedicado como o OASI, especialmente quando observações contínuas são de extrema importância. Outro importante fator são os esforços coordenados, que nos possibilita obter bons dados para a determinação de curvas de fase, ajudando a contribuir com a determinação de propriedades físicas de NEOs.



# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo de propriedades físicas de NEOs a partir da determinação de suas curvas de fase. Alguns objetos do MB também foram analisados, embora não tenhamos conseguido dados suficientes para obter boas curvas de fase, disponibilizamos aqui os dados adquiridos afim de contribuir para base de dados desses pequenos corpos. Aqui abordaremos os resultados mais gerais, as lições aprendidas e as perspectivas para a continuação deste trabalho.

Primeiramente, temos que os resultados aqui apresentados são frutos de missões observacionais realizadas pela equipe do projeto IMPACTON, a partir do OASI entre Agosto de 2016 e Março de 2021. Mais uma vez ressaltamos a relevância de um telescópio dedicado como OASI, uma vez que os resultados aqui obtidos são frutos de observações contínuas, as quais seriam impossíveis a partir de pedidos de observações em grandes telescópios. Também vimos a importância de trabalhos de colaboração, visto que observações complementares a partir de CI também foram de fundamental importância neste trabalho.

Como uma continuidade de um trabalho de obtenção de curvas de fase dentro do projeto IMPACTON, tivemos avanços significativos como melhoria de estratégia de observação e tratamento dos dados. Assim, dos 34 NEOs observados, obtivemos curvas de fase para 31 objetos. Como uma forma de melhorar os dados obtidos, desenvolvemos uma metodologia para minimizar os efeitos rotacionais nas curvas de fase. Assim, das 31 curvas de fase, tivemos 21 curvas corrigidas por efeitos rotacionais, nos dando dados mais precisos e minimizando erros do ajuste e das magnitudes absolutas obtidas. Mais uma vez, temos a importância dos esforços coordenados, visto que a maioria das curvas de luz utilizadas foram obtidas por nossa equipe com dados adquiridos no OASI.

Portanto, com dados mais precisos e boas coberturas de ângulo de fase, possibilitadas por nossa colaboração com o projeto NEOShield-2, foi possível derivar indicativos taxonômicos para 15 NEOs a partir das diferentes técnicas de caracterização de curvas de fase presente na literatura. Além de que, a partir dessa base de dados montada de curvas de fase de NEOs, realizamos um estudo comparativo entre a população de NEOs e MB, mos-

trando que o tamanho desses objetos exerce influência no espaço de fase dos parâmetros de inclinação da curva de fase, como descrito no capítulo 5. Portanto, além das análises mais gerais acima mencionadas, também foi possível derivar o diâmetro de alguns NEOs a partir de suas magnitudes absolutas e derivar períodos rotacionais, como mostramos no capítulo 5. Dessa forma, temos como principais resultados dois trabalhos publicados (Ieva et al., 2022; Rondón et al., 2019) e um submetido (Arcoverde et al. 2022).

Apesar dos problemas enfrentados por todos nos últimos anos, em particular devido à pandemia do coronavírus, além de fatores climáticos que interferem nas observações, os resultados aqui apresentados são de grande relevância para um melhor conhecimento da população de NEOs, em particular considerando o pequeno número de NEOs para os quais se conhece suas propriedades fotométricas. Isso evidencia como um telescópio dedicado pode ser de grande valia.

Note-se também, que nossos dados no modelo  $G_1-G_2$ , são os primeiros obtidos para esmagadora maioria dos objetos estudados, para ser precisos, para 27 dos 31 NEOs. Enquanto que para os objetos que não conseguimos obter uma boa cobertura, estas podem vir a ser complementadas assim que esses NEOs voltarem a serem observáveis do OASI.

Um último ponto a ser mencionado é a escassez de parâmetros de curvas de fase determinados para objetos da população de NEOs, principalmente com boa precisão. Isso se torna particularmente importante visto que a determinação de curvas de fase de NEOs nos permite estudar as características físicas dos corpos de menor tamanho do nosso Sistema Solar, contribuindo para a caracterização física dessa população cujo número de descoberta é tão elevado. O completo entendimento das características físicas desses objetos é crucial não apenas por essa população que tem origem em diversas regiões do MB, mas também por serem potenciais alvos de missões espaciais e, as vezes, potencialmente perigosos para a Terra devido a possibilidade de colisão.

Portanto, se faz necessário a continuidade de observações, aproveitando ao máximo a infraestrutura disponibilizada pelo projeto IMPACTON, para a determinação de propriedades físicas das amostras estudadas, tentando cada vez mais melhorar a estratégia de observação e as técnicas de redução utilizadas. Em particular, a determinação de curvas de fase em outros filtros, do sistema Johnson-Cousin e SDSS, possibilitando a determinação de mais parâmetros físicos como cores e o diâmetro para um maior número de objetos.



## Referências Bibliográficas

- Akimov, L. A. (1975). Influence of mesorelief on the brightness distribution over a planetary disk. *SOVAST*, 19:385.
- Akimov, L. A. (1979). On the Brightness Distributions Over the Lunar and Planetary Disks. *SOVAST*, 23:231–235.
- Akimov, L. A., Belkina, I. L., and Dyatel, N. P. (1988). Contrast of Photospheric Faculae across the Disk as a Function of Their Brightness. *SOVAST*, 32:660.
- Belskaya, I. N. and Shevchenko, V. G. (2000). Opposition Effect of Asteroids. *Icarus*, 147:94–105.
- Binzel, R. P. (2019). Small bodies looming large in planetary science. *Nature Astronomy*, 3:282–283.
- Binzel, R. P., DeMeo, F. E., Turtelboom, E. V., Bus, S. J., Tokunaga, A., Burbine, T. H., Lantz, C., Polishook, D., Carry, B., Morbidelli, A., Birlan, M., Vernazza, P., Burt, B. J., Moskovitz, N., Slivan, S. M., Thomas, C. A., Rivkin, A. S., Hicks, M. D., Dunn, T., Reddy, V., Sanchez, J. A., Granvik, M., and Kohout, T. (2019). Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). *ICARUS*, 324:41–76.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. In *Asteroids IV*, University of Arizona Press, Tucson, pages 243–256.
- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., and Metcalfe, T. S. (2002). Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, 156:399–433.
- Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., Lumme, K., Peltoniemi, J., and Harris, A. W. (1989). Application of photometric models to asteroids. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson, pages 524–556.

- Buchheim, R. K. (2010). Methods and Lessons Learned Determining the H-G Parameters of Asteroid Phase Curves. *Society for Astronomical Sciences Annual Symposium*, 29:101–115.
- Carbognani, A., Cellino, A., and Caminiti, S. (2019). New phase-magnitude curves for some main belt asteroids, fit of different photometric systems and calibration of the albedo - Photometry relation. *Planetary and Space Science*, 169:15–34.
- Carry, B., Solano, E., Eggl, S., and DeMeo, F. E. (2016). Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry. *ICARUS*, 268:340–354.
- DeMeo, F. and Binzel, R. P. (2008). Comets in the near-Earth object population. *ICARUS*, 194(2):436–449.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *ICARUS*, 202(1):160–180.
- Galache, J. L., Beeson, C. L., McLeod, K. K., and Elvis, M. (2015). The need for speed in Near-Earth Asteroid characterization. *Planetary and Space Science*, 111:155–166.
- Gehrels, T. (1956). Photometric Studies of Asteroids. V. The Light-Curve and Phase Function of 20 Massalia. *ApJ*, 123:331.
- Gehrels, T. and Taylor, R. C. (1977). Minor planets and related objects. XXII. Phase functions for (6) Hebe. *AJ*, 82:229–237.
- Gehrels, T. and Tedesco, E. F. (1979). Minor planets and related objects. XXVIII. Asteroid magnitudes and phase relations. *AJ*, 84:1079–1087.
- Gladman, B. J., Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappala, V., Michel, P., Cellino, A., Froeschle, C., Levison, H. F., Bailey, M., and Duncan, M. (1997). Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances. *Science*, 277:197–201.
- Greenstreet, S., Ngo, H., and Gladman, B. (2012). The orbital distribution of Near-Earth Objects inside Earth’s orbit. *ICARUS*, 217(1):355–366.
- Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *JGR*, 86:4571–4586.
- Hapke, B. (1984). Bidirectional reflectance spectroscopy. III - Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59:41–59.
- Hapke, B. (1986). Bidirectional reflectance spectroscopy. IV - The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 67:264–280.

- Hapke, B. (2002). Bidirectional Reflectance Spectroscopy. 5. The Coherent Backscatter Opposition Effect and Anisotropic Scattering. *ICARUS*, 157(2):523–534.
- Hapke, B. (2008). Bidirectional reflectance spectroscopy. 6. Effects of porosity. *ICARUS*, 195(2):918–926.
- Hapke, B. (2012). *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge university press.
- Hapke, B. W., Nelson, R. M., and Smythe, W. D. (1993). The Opposition Effect of the Moon: The Contribution of Coherent Backscatter. *Science*, 260(5107):509–511.
- Harris, A. W. and Lagerros, J. S. V. (2002). Asteroids in the Thermal Infrared. In *Asteroids III*, pages 205–218.
- Harris, A. W. and Young, J. W. (1989). Asteroid lightcurve observations from 1979-1981. *Icarus*, 81:314–364.
- Harris, A. W., Young, J. W., Contreiras, L., Dockweiler, T., Belkora, L., Salo, H., Harris, W. D., Bowell, E., Poutanen, M., Binzel, R. P., Tholen, D. J., and Wang, S. (1989). Phase relations of high albedo asteroids: The unusual opposition brightening of 44 Nysa and 64 Angelina. *ICARUS*, 81(2):365–374.
- Helfenstein, P. and Veverka, J. (1989). Physical characterization of asteroid surfaces from photometric analysis. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson, pages 557–593.
- Ieva, S., Arcoverde, P., Rondón, E., Giunta, A., Dotto, E., Lazzaro, D., Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Fanasca, C., Rodrigues, T., Monteiro, F., Medeiros, H., Silva-Cabrera, J. S., and Di Paola, A. (2022). A comprehensive study of the opposition effect on 15 NEOs. *MNRAS*.
- Ieva, S., Dotto, E., Lazzaro, D., Perna, D., Fulvio, D., and Fulchignoni, M. (2016). Spectral characterization of V-type asteroids - II. A statistical analysis. *MNRAS*, 455(3):2871–2888.
- Irvine, W. M. (1966). The Shadowing Effect in Diffuse Reflection. *JGR*, 71:2931.
- Lagerkvist, C.-I. and Magnusson, P. (1990). Analysis of asteroid lightcurves. II - Phase curves in a generalized HG-system. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 86:119–165.
- Lazzaro, D. (2010). Photometric and spectroscopic studies of small Solar System bodies and the IMPACTON project. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 53:315–324.

- Levison, H. F. and Duncan, M. J. (1997). From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets. *ICARUS*, 127(1):13–32.
- Li, J. Y., Helfenstein, P., Buratti, B., Takir, D., and Clark, B. E. (2015). Asteroid Photometry. In *Asteroids IV*, pages 129–150.
- Lin, C.-H., Ip, W.-H., Lin, Z.-Y., Cheng, Y.-C., Lin, H.-W., and Chang, C.-K. (2018). Photometric survey and taxonomic identifications of 92 near-Earth asteroids. *Planetary and Space Science*, 152:116–135.
- Lumme, K. and Bowell, E. (1981a). Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. I. Theory. *AJ*, 86:1694–1721.
- Lumme, K. and Bowell, E. (1981b). Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. II. Interpretation. *AJ*, 86:1705–1721.
- Mahlke, M., Carry, B., and Denneau, L. (2021). Asteroid phase curves from ATLAS dual-band photometry. *ICARUS*, 354:114094.
- Mainzer, A., Grav, T., Masiero, J., Hand, E., Bauer, J., Tholen, D., McMillan, R. S., Spahr, T., Cutri, R. M., Wright, E., Watkins, J., Mo, W., and Maleszewski, C. (2011). NEOWISE Studies of Spectrophotometrically Classified Asteroids: Preliminary Results. *ApJ*, 741(2):90.
- Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E., Pittichová, J., Sonnett, S., and Wright, E. L. (2020a). Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5. *PSJ*, 1(1):5.
- Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E., Pittichová, J., and Wright, E. L. (2021). Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years Six and Seven. *PSJ*, 2(4):162.
- Masiero, J. R., Smith, P., Teodoro, L. D., Mainzer, A. K., Cutri, R. M., Grav, T., and Wright, E. L. (2020b). Physical Properties of 299 NEOs Manually Recovered in Over Five Years of NEOWISE Survey Data. *PSJ*, 1(1):9.
- Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., and Tanga, P. (2000). NOTE: Estimated Abundance of Atens and Asteroids Evolving on Orbits between Earth and Sun. *Icarus*, 143:421–424.
- Mishchenko, M. I. (1992). The angular width of the coherent back-scatter opposition effect - an application to icy outer planet satellites. *Astrophysics and Space Science*, 194:327–333.

- Mishchenko, M. I., Dlugach, J. M., Liu, L., Rosenbush, V. K., Kiselev, N. N., and Shkuratov, Y. G. (2009). Direct Solutions of the Maxwell Equations Explain Opposition Phenomena Observed for High-Albedo Solar System Objects. *ApJL*, 705:L118–L122.
- Mishchenko, M. I. and Dlugach, Z. M. (1992). The amplitude of the opposition effect due to weak localization of photons in discrete disordered media. *Astrophysics and Space Science*, 189:151–154.
- Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Rondon, E., Souza, R., Rodrigues, T., and Lazzaro, D. (2018). Rotational Period Determination for 12 Near-Earth Asteroids. *Minor Planet Bulletin*, 45(3):221–224.
- Monteiro, F., Rondón, E., Lazzaro, D., Oey, J., Evangelista-Santana, M., Arcoverde, P., De Cicco, M., Silva-Cabrera, J. S., Rodrigues, T., and Santos, L. B. T. (2021). Physical characterization of equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5: a possible dormant Jupiter-family comet. *MNRAS*, 507(4):5403–5414.
- Morbidelli, A., Bottke, Jr., W. F., Froeschlé, C., and Michel, P. (2002). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, University of Arizona Press, Tucson, pages 409–422.
- Morbidelli, A. and Nesvorný, D. (1999). Numerous Weak Resonances Drive Asteroids toward Terrestrial Planets Orbits. *ICARUS*, 139(2):295–308.
- Morozhenko, A. V. and Vidmachenko, A. P. (2013). Shadow mechanism and the opposition effect of brightness of atmosphereless celestial bodies. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 29:228–236.
- Mueller, M., Delbo', M., Hora, J. L., Trilling, D. E., Bhattacharya, B., Bottke, W. F., Chesley, S., Emery, J. P., Fazio, G., Harris, A. W., Mainzer, A., Mommert, M., Penprase, B., Smith, H. A., Spahr, T. B., Stansberry, J. A., and Thomas, C. A. (2011). ExploreNEOs. III. Physical Characterization of 65 Potential Spacecraft Target Asteroids. *AJ*, 141(4):109.
- Muinsonen, K., Belskaya, I. N., Cellino, A., Delbò, M., Levasseur-Regourd, A.-C., Penttilä, A., and Tedesco, E. F. (2010). A three-parameter magnitude phase function for asteroids. *Icarus*, 209:542–555.
- Muinsonen, K., Mishchenko, M. I., Dlugach, J. M., Zubko, E., Penttilä, A., and Videen, G. (2012). Coherent Backscattering Verified Numerically for a Finite Volume of Spherical Particles. *ApJ*, 760:118.

- Muironen, K., Piironen, J., Shkuratov, Y. G., Ovcharenko, A., and Clark, B. E. (2002). Asteroid Photometric and Polarimetric Phase Effects. In *Asteroids III*, pages 123–138.
- Oszkiewicz, D. A., Muironen, K., Bowell, E., Trilling, D., Penttilä, A., Pieniluoma, T., Wasserman, L. H., and Enga, M. T. (2011). . *JQSRT*, 112:1919–1929.
- Penttilä, A., Shevchenko, V. G., Wilkman, O., and Muironen, K. (2016). H, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> photometric phase function extended to low-accuracy data. *Planetary and Space Science*, 123:117–125.
- Popescu, M., Vaduvescu, O., de León, J., Gherase, R. M., Licandro, J., Boacă, I. L., Ţonka, A. B., Ashley, R. P., Močnik, T., Morate, D., Predatu, M., De Prá, M., Fariña, C., Stoev, H., Díaz Alfaro, M., Ordonez-Etxeberria, I., López-Martínez, F., and Errmann, R. (2019). Near-Earth asteroids spectroscopic survey at Isaac Newton Telescope. *AAP*, 627:A124.
- Pravec, P., Harris, A. W., Kušnirák, P., Galád, A., and Hornoch, K. (2012). . *Icarus*, 221:365–387.
- Rondón, E., Arcoverde, P., Monteiro, F., Medeiros, H., Navas, G., Lazzaro, D., Carvano, J. M., and Rodrigues, T. (2019). Photometric characterization of NEOs: 3 Amor and 3 Apollo. *MNRAS*, 484(2):2499–2513.
- Rondón, E., Lazzaro, D., Carvano, J., Monteiro, F., Arcoverde, P., Evangelista, M., Michimani, J., Mesquita, W., and Rodrigues, T. (2022). A photometric study of members of the NEOs Atiras population. *ICARUS*, 372:114723.
- Rondón, E., Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J. M., Roig, F., Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Silva, J., Jasmim, F., Prá, M. D., Hasselmann, P., Ribeiro, A., Dávalos, J., and Souza, R. (2020). OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies—Some Results on NEO’s Physical Properties. *PASP*, 132(1012):065001.
- Shevchenko, V. G. (1996). Analysis of the Asteroid Phase Dependences of Brightness. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 27 of *Lunar and Planetary Science Conference*, page 1193.
- Shevchenko, V. G. (1997). Analysis of Asteroid Brightness-Phase Relations. *Solar System Research*, 31(3):219.
- Shevchenko, V. G., Belskaya, I. N., Muironen, K., Penttilä, A., Krugly, Y. N., Velichko, F. P., Chiorny, V. G., Slyusarev, I. G., Gaftonyuk, N. M., and Tereschenko, I. A. (2016). . *Planetary and Space Science*, 123:101–116.

- Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., Velikodsky, Y., Opanasenko, N., and Videen, G. (2011). Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planetary and Space Science*, 59(13):1326–1371.
- Shkuratov, Y. G. (1985). On the origin of the opposition effect and negative polarization for cosmic bodies with solid surfaces. *Astronomicheskij Tsirkulyar*, 1400:3–6.
- Shkuratov, Y. G., Kreslavsky, M., Ovcharenko, A., Stankevich, D., Zubko, E., Pieters, C., and Arnold, G. (1999). Opposition effect from clementine data and mechanisms of backscatter. *Icarus*, 141(1):132–155.
- Shkuratov, Y. G., Starukhina, L. V., Kreslavsky, M. A., Opanasenko, N. V., Stankevich, D. G., and Shevchenko, V. G. (1994). Principle of Undulatory Invariance in Photometry of Atmosphereless Celestial Bodies. *ICARUS*, 109(1):168–190.
- Shoemaker, E. M., Williams, J. G., Helin, E. F., and Wolfe, R. F. (1979). Earth-crossing asteroids: orbital classes, population, and fluctuation of population in late geologic time. Technical report.
- Tedesco, E. F., Veeder, G. J., Fowler, J. W., and Chillemi, J. R. (1992). The IRAS Minor Planet Survey. The IRAS Minor Planet Survey, Final Report by E.R. Tedesco, G.J. Veeder, J.W. Fowler, and J.R. Chillemi. Phillips Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, December 1992. PL-TR-92-2049.
- Tholen, D. J. (1998). Asteroid News Notes. *Minor Planet Bulletin*, 25:17.
- Tonry, J. L., Denneau, L., Heinze, A. N., Stalder, B., Smith, K. W., Smartt, S. J., Stubbs, C. W., Weiland, H. J., and Rest, A. (2018). ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System. *PASP*, 130(988):064505.
- Trilling, D. E., Mueller, M., Hora, J. L., Harris, A. W., Bhattacharya, B., Bottke, W. F., Chesley, S., Delbo, M., Emery, J. P., Fazio, G., Mainzer, A., Penprase, B., Smith, H. A., Spahr, T. B., Stansberry, J. A., and Thomas, C. A. (2010). ExploreNEOs. I. Description and First Results from the Warm Spitzer Near-Earth Object Survey. *AJ*, 140(3):770–784.
- Veeverka, J. (1971). Photopolarimetric Observations of the Minor Planet Flora. *ICARUS*, 15(3):454–458.
- Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., and Statler, T. S. (2015). The Yarkovsky and YORP Effects. In *Asteroids IV*, pages 509–531.
- Warner, B. D. (2017a). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 December thru 2017 April. *Minor Planet Bulletin*, 44(3):223–237.

- Warner, B. D. (2017b). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 July-September. *Minor Planet Bulletin*, 44(1):22–36.
- Warner, B. D. (2017c). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 October-December. *Minor Planet Bulletin*, 44(2):98–107.
- Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. (2009). The asteroid lightcurve database. *ICARUS*, 202(1):134–146.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2021). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2021 January - March. *Minor Planet Bulletin*, 48(3):294–302.
- Waskom, M., Gelbart, M., Botvinnik, O., Ostblom, J., Hobson, P., Lukauskas, S., Gempferline, D. C., Augspurger, T., Halchenko, Y., Warmenhoven, J., Cole, J. B., De Ruiter, J., Vanderplas, J., Hoyer, S., Pye, C., Miles, A., Swain, C., Meyer, K., Martin, M., Bachant, P., Quintero, E., Kunter, G., Villalba, S., Brian, Fitzgerald, C., Evans, C., Williams, M. L., O’Kane, D., Yarkoni, T., and Brunner, T. (2020). mwaskom/seaborn: v0.11.1 (December 2020). Zenodo.
- Wisniewski, W. Z., Michałowski, T. M., Harris, A. W., and McMillan, R. S. (1997). Photometric Observations of 125 Asteroids. *Icarus*, 126:395–449.
- Zain, P. S., de Elía, G. C., and Di Sisto, R. P. (2020). New multi-part collisional model of the main belt: the contribution to near-Earth asteroids. *AAP*, 639:A9.



# Apêndice A

## Condições observacionais e parâmetros de curvas de fase determinados

Tabela A.1: Circunstâncias observacionais e magnitudes derivadas das curvas de fase e demais objetos de nossa amostra. Para cada asteróide é dado: o nome, a data, o filtro, a magnitude calibrada (mag) e o ângulo de fase solar ( $\alpha$ ).

Asteróide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
(4055) Magellan	CI	12/03/2017	R	$14,333 \pm 0,063$	3,0
	CI	01/03/2017	R	$14,639 \pm 0,027$	4,0
	CI	27/02/2017	R	$14,649 \pm 0,027$	5,0
	CI	17/03/2017	R	$14,722 \pm 0,027$	5,8
	CI	20/02/2017	R	$14,899 \pm 0,027$	8,9
	CI	24/02/017/	R	$14,839 \pm 0,021$	10,0
	CI	28/03/2017	R	$14,889 \pm 0,021$	12,2
	CI	31/03/2017	R	$15,019 \pm 0,027$	13,7
(7135) 1993 VO	OASI	14/07/2020	R	$14,274 \pm 0,015$	4,9
	OASI	22/06/2020	R	$14,730 \pm 0,484$	10,4
	OASI	21/06/2020	R	$14,627 \pm 0,148$	10,7
	OASI	25/08/2020	R	$14,878 \pm 0,723$	19,7
	OASI	21/06/2020	V	$15,160 \pm 0,245$	10,7
	OASI	25/08/2020	V	$15,290 \pm 0,626$	19,7
(12147) Bramante	OASI	25/09/2019	R	$14,849 \pm 0,124$	7,2
	OASI	25/10/2019	R	$14,829 \pm 0,369$	8,3
	OASI	27/10/2019	R	$14,856 \pm 0,623$	9,2
	OASI	04/11/2019	R	$15,104 \pm 0,331$	12,8

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ (°)
	OASI	04/11/2019	R	$15,101 \pm 0,335$	12,9
	OASI	28/08/2019	R	$15,842 \pm 0,275$	18,2
	OASI	25/09/2019	V	$15,144 \pm 0,633$	7,2
	OASI	25/10/2019	V	$15,269 \pm 0,498$	8,3
	OASI	27/10/2019	V	$15,271 \pm 0,799$	9,2
	OASI	04/11/2019	V	$15,584 \pm 0,372$	12,9
	OASI	28/08/2019	V	$16,958 \pm 0,279$	18,2
(16816) 1997 UF9	OASI	28/10/2016	R	$15,67 \pm 0,03$	1,0
	OASI	29/10/2016	R	$15,57 \pm 0,05$	1,2
	OASI	27/10/2016	R	$15,75 \pm 0,03$	1,2
	OASI	27/10/2016	R	$15,72 \pm 0,03$	1,3
	OASI	25/10/2016	R	$16,3 \pm 0,04$	2,4
	OASI	25/10/2016	R	$16,37 \pm 0,05$	2,5
	OASI	24/10/2016	R	$15,93 \pm 0,03$	3,0
	CI	15/11/2016	R	$16,58 \pm 0,14$	13,4
	CI	16/11/2016	R	$16,48 \pm 0,15$	13,9
	CI	21/11/2016	R	$16,9 \pm 0,15$	17,2
	CI	22/11/2016	R	$16,92 \pm 0,13$	17,7
	CI	30/11/2016	R	$16,86 \pm 0,12$	22,2
	CI	01/12/2016	R	$16,84 \pm 0,12$	22,7
	CI	06/12/2016	R	$16,93 \pm 0,13$	25,1
	CI	07/12/2016	R	$16,88 \pm 0,14$	25,5
(18109) 2000 NG11	OASI	06/09/2018	R	$16,707 \pm 0,007$	3,4
	OASI	09/09/2018	R	$16,829 \pm 0,151$	3,5
	OASI	05/09/2018	R	$16,848 \pm 0,331$	3,6
	OASI	12/08/2018	R	$16,960 \pm 0,074$	16,4
	OASI	03/10/2018	R	$17,304 \pm 0,410$	16,5
	OASI	10/08/2018	R	$17,723 \pm 0,211$	17,4
	OASI	05/10/2018	R	$17,322 \pm 0,356$	17,5
	OASI	07/10/2018	R	$17,304 \pm 0,151$	18,5
	OASI	06/08/2018	R	$17,524 \pm 0,152$	19,4
	OASI	09/10/2018	R	$17,681 \pm 0,368$	19,5
	OASI	11/10/2018	R	$17,674 \pm 0,301$	20,3
	OASI	11/10/2018	R	$17,581 \pm 0,377$	20,4
	OASI	13/10/2018	R	$17,754 \pm 0,607$	21,2
	OASI	14/10/2018	R	$18,122 \pm 0,405$	21,6

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
	OASI	31/10/2018	R	$17,706 \pm 0,419$	27,3
	OASI	01/11/2018	R	$17,602 \pm 0,356$	27,6
	OASI	08/11/2018	R	$17,676 \pm 0,174$	29,3
	OASI	10/11/2018	R	$17,889 \pm 0,310$	29,7
	OASI	11/11/2018	R	$17,820 \pm 0,255$	29,9
	OASI	11/12/2018	R	$18,117 \pm 0,052$	34,8
(19394) 1998 DA34	OASI	28/08/2019	R	$14,385 \pm 0,241$	3,7
	OASI	25/9/2019	R	$14,901 \pm 0,182$	9,6
	OASI	28/08/2019	V	$14,749 \pm 0,256$	3,7
	OASI	25/9/2019	V	$14,956 \pm 0,938$	9,6
(22322) Bodensee	OASI	20/11/2019	R	$14,636 \pm 0,164$	14,6
	OASI	25/10/2019	R	$14,823 \pm 0,182$	22,3
	OASI	20/11/2019	R	$15,269 \pm 0,225$	14,6
	OASI	25/10/2019	R	$15,397 \pm 0,603$	22,3
(23122) Lorgat	OASI	20/12/2019	R	$14,464 \pm 0,025$	5,6
	OASI	22/01/2020	R	$15,109 \pm 0,068$	18,4
	OASI	23/01/2020	R	$15,208 \pm 0,056$	23,7
	OASI	20/12/2019	V	$15,046 \pm 0,258$	5,6
	OASI	21/12/2020	V	$15,068 \pm 0,206$	6,1
	OASI	23/01/2020	V	$15,430 \pm 0,105$	23,7
(23354) 9547 P-L	OASI	27/10/2019	R	$14,579 \pm 0,763$	2,9
	OASI	25/10/2019	R	$14,783 \pm 0,415$	3,1
	OASI	04/11/2019	R	$16,186 \pm 0,297$	5,7
	OASI	28/08/2019	R	$16,932 \pm 0,342$	27,2
	OASI	02/08/2019	R	$15,641 \pm 0,145$	30,7
	OASI	27/10/2019	V	$15,145 \pm 0,977$	2,9
	OASI	25/10/2019	V	$15,388 \pm 0,561$	3,1
	OASI	04/11/2019	V	$17,039 \pm 0,355$	5,7
	OASI	02/08/2019	V	$16,306 \pm 0,253$	30,7
(28393) 1999 RB12	OASI	16/08/2020	R	$14,128 \pm 0,054$	4,4
	OASI	18/08/2020	R	$14,533 \pm 0,234$	5,4
	OASI	20/08/2020	R	$13,817 \pm 1,263$	6,2
	OASI	20/08/2020	R	$14,411 \pm 0,953$	6,3
	OASI	22/08/2020	R	$14,550 \pm 0,733$	7,3
	OASI	24/08/2020	R	$15,109 \pm 0,109$	8,1
	OASI	25/08/2020	R	$14,380 \pm 0,202$	8,6

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ (°)
	OASI	16/08/2020	V	$13,991 \pm 0,117$	4,4
	OASI	22/08/2020	V	$15,011 \pm 0,937$	7,3
	OASI	24/08/2020	V	$14,636 \pm 0,459$	8,1
	OASI	25/08/2020	V	$14,760 \pm 0,373$	8,6
(36236) 1999 VV	OASI	26/11/2016	R	$16,212 \pm 0,020$	7,6
	OASI	30/11/2016	R	$16,243 \pm 0,451$	8,8
	OASI	03/12/2016	R	$16,356 \pm 0,327$	10,4
	OASI	04/12/2016	R	$16,390 \pm 0,311$	11,1
	OASI	05/12/2016	R	$16,536 \pm 0,097$	11,7
	OASI	07/12/2016	R	$16,575 \pm 0,331$	13,0
(40267) 1999 GJ4	CI	20/02/2017	R	$15,710 \pm 0,053$	3,7
	OASI	21/02/2017	R	$15,245 \pm 0,011$	4,8
	CI	21/02/2017	R	$15,613 \pm 0,035$	4,9
	OASI	22/02/2017	R	$15,792 \pm 0,007$	6,1
	OASI	22/02/2017	R	$15,611 \pm 0,006$	6,2
	OASI	25/02/2017	R	$15,532 \pm 0,051$	9,3
	CI	26/02/2017	R	$15,455 \pm 0,053$	10,0
	CI	27/02/2017	R	$15,559 \pm 0,053$	11,1
	CI	01/03/2017	R	$15,743 \pm 0,063$	12,8
	CI	02/03/2017	R	$15,913 \pm 0,053$	13,7
	CI	03/03/2017	R	$16,103 \pm 0,063$	14,5
	CI	11/03/2017	R	$16,223 \pm 0,112$	20,1
	CI	11/03/2017	R	$16,153 \pm 0,082$	20,1
	CI	14/03/2017	R	$16,443 \pm 0,063$	21,7
	CI	15/03/2017	R	$16,203 \pm 0,053$	22,1
	CI	19/03/2017	R	$16,403 \pm 0,082$	23,9
	CI	24/03/2017	R	$16,423 \pm 0,063$	25,6
(65717) 1993 BX3	OASI	13/03/2021	R	$20,854 \pm 0,309$	7,9
	OASI	11/02/2021	R	$21,235 \pm 0,362$	25,5
	OASI	09/02/2021	R	$21,195 \pm 0,533$	28,0
	OASI	04/02/2021	R	$22,260 \pm 0,414$	34,5
	OASI	04/02/2021	R	$22,068 \pm 0,559$	34,6
	OASI	04/02/2021	R	$21,816 \pm 0,712$	34,7
(96189) Pygmalion	OASI	20/05/2018	R	$17,886 \pm 0,349$	37,7
	OASI	20/05/2018	R	$17,940 \pm 0,350$	37,8
	OASI	17/05/2018	R	$17,893 \pm 0,098$	39,4

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
	OASI	16/05/2018	R	$17,868 \pm 0,125$	40,0
	OASI	14/05/2018	R	$17,873 \pm 0,126$	40,9
	OASI	13/05/2018	R	$17,865 \pm 0,158$	41,3
(99799) 2002 LJ3	OASI	06/09/2018	R	$18,565 \pm 0,086$	8,6
	OASI	09/09/2018	R	$18,636 \pm 0,173$	9,6
	OASI	05/09/2018	R	$18,584 \pm 0,298$	10,8
	OASI	12/08/2018	R	$18,410 \pm 0,211$	12,1
	OASI	03/10/2018	R	$18,917 \pm 0,260$	14,5
	OASI	10/08/2018	R	$19,261 \pm 0,095$	32,5
	OASI	05/10/2018	R	$19,272 \pm 0,052$	32,6
	OASI	07/10/2018	R	$19,684 \pm 0,441$	46,7
	OASI	06/08/2018	R	$19,904 \pm 0,182$	49,1
	OASI	09/10/2018	R	$19,739 \pm 0,281$	49,6
	OASI	11/10/2018	R	$19,779 \pm 0,034$	49,8
	OASI	11/10/2018	R	$19,752 \pm 0,238$	50,4
	OASI	13/10/2018	R	$19,896 \pm 0,219$	50,6
	OASI	14/10/2018	R	$19,541 \pm 0,296$	51,1
	OASI	31/10/2018	R	$19,968 \pm 0,237$	52,3
	OASI	01/11/2018	R	$19,690 \pm 0,193$	52,9
	OASI	08/11/2018	R	$19,731 \pm 0,299$	53,0
	OASI	10/11/2018	R	$19,889 \pm 0,256$	53,5
	OASI	11/11/2018	R	$19,923 \pm 0,354$	54,1
	OASI	11/12/2018	R	$20,211 \pm 0,519$	61,3
	OASI	01/11/2018	R	$20,178 \pm 0,571$	61,5
	OASI	08/11/2018	R	$20,329 \pm 0,454$	61,9
	OASI	10/11/2018	R	$20,221 \pm 0,513$	62,1
	OASI	11/11/2018	R	$20,443 \pm 0,260$	62,2
	OASI	11/12/2018	R	$20,017 \pm 0,486$	62,3
(159608) 2002 AC2	CI	01/01/2017	R	$16,45 \pm 0,04$	2,9
	CI	23/12/2016	R	$16,92 \pm 0,06$	8,7
	CI	18/12/2016	R	$16,99 \pm 0,07$	12,3
	CI	10/12/2016	R	$17,24 \pm 0,06$	17,2
(174050) 2002 CC19	OASI	04/02/2021	R	$17,644 \pm 0,697$	6,2
	OASI	04/02/2021	R	$17,834 \pm 0,427$	6,8
	OASI	04/02/2021	R	$17,835 \pm 0,428$	7,1
	OASI	05/02/2021	R	$18,284 \pm 0,076$	11,9

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
	OASI	09/02/2021	R	$18,780 \pm 0,600$	28,6
	OASI	11/02/2021	R	$18,913 \pm 0,671$	35,4
(175189) 2005 EC224	CI	17/03/2017	R	$18,1 \pm 0,03$	0,7
	CI	17/03/2017	R	$18,22 \pm 0,03$	0,8
	CI	17/03/2017	R	$18,3 \pm 0,03$	0,8
	CI	16/03/2017	R	$18,24 \pm 0,03$	1,3
	CI	16/03/2017	R	$18,28 \pm 0,03$	1,4
	CI	19/03/2017	R	$18,26 \pm 0,04$	1,4
	CI	19/03/2017	R	$18,38 \pm 0,03$	1,5
	CI	24/03/2017	R	$18,57 \pm 0,04$	5,6
	CI	27/03/2017	R	$18,56 \pm 0,03$	8,1
	CI	27/03/2017	R	$18,5 \pm 0,03$	8,2
	CI	28/03/2017	R	$18,76 \pm 0,03$	9
	CI	29/03/2017	R	$18,61 \pm 0,05$	9,8
	CI	30/03/2017	R	$18,71 \pm 0,03$	10,7
	CI	09/04/2017	R	$18,96 \pm 0,05$	13,3
	CI	13/04/2017	R	$19,17 \pm 0,03$	22,6
	CI	22/04/2017	R	$19,32 \pm 0,04$	29,3
(326683) 2002 WP	CI	06/12/2016	R	$18,41 \pm 0,02$	3,8
	CI	09/12/2016	R	$18,52 \pm 0,02$	5,6
	OASI	04/12/2016	R	$18,54 \pm 0,08$	6,9
	CI	10/12/2016	R	$18,56 \pm 0,03$	7,1
	OASI	03/12/2016	R	$18,73 \pm 0,24$	8,8
	OASI	02/12/2016	R	$18,81 \pm 0,25$	10,7
	CI	14/12/2016	R	$18,73 \pm 0,03$	15,1
	CI	15/12/2016	R	$18,77 \pm 0,03$	17,0
	OASI	26/11/2016	R	$18,86 \pm 0,14$	21,9
	CI	01/01/2017	R	$19,25 \pm 0,02$	39,0
(333889) 1998 SV4	OASI	19/09/2015	R	$17,99 \pm 0,02$	4,0
	OASI	16/09/2015	R	$18,36 \pm 0,05$	11,2
	OASI	14/09/2015	R	$18,45 \pm 0,05$	15,1
	OASI	13/09/2015	R	$18,54 \pm 0,05$	17,3
	OASI	11/09/2015	R	$18,75 \pm 0,07$	21,5
	OASI	10/09/2015	R	$18,71 \pm 0,05$	23,6
	OASI	10/09/2015	R	$18,78 \pm 0,04$	23,8
	OASI	09/09/2015	R	$18,93 \pm 0,05$	25,5

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ (°)
(370307) 2002 RH52	CI	27/03/2017	R	$16,82 \pm 0,02$	3,9
	CI	30/03/2017	R	$16,94 \pm 0,02$	4,3
	CI	16/03/2017	R	$17,13 \pm 0,03$	13,2
	CI	12/03/2017	R	$17,23 \pm 0,04$	17,7
(370702) 2004 NC9	CI	22/02/2017	R	$17,21 \pm 0,03$	3,0
	CI	20/02/2017	R	$17,22 \pm 0,03$	4,5
	CI	02/03/2017	R	$17,22 \pm 0,03$	5,0
	CI	03/03/2017	R	$17,27 \pm 0,03$	5,9
	CI	11/03/2017	R	$17,48 \pm 0,05$	13,8
	CI	12/03/2017	R	$17,55 \pm 0,04$	14,7
	CI	19/03/2017	R	$17,77 \pm 0,04$	21,9
	CI	28/03/2017	R	$18,22 \pm 0,04$	30,3
(417581) 2006 VA3	OASI	04/02/2021	R	$17,832 \pm 0,391$	11,4
	OASI	05/02/2021	R	$17,872 \pm 0,111$	12,7
	OASI	05/02/2021	R	$17,798 \pm 0,080$	13,0
	OASI	11/02/2021	R	$18,136 \pm 0,343$	26,3
	OASI	13/03/2021	R	$19,941 \pm 0,395$	81,0
(45444) 2000 AD180	OASI	21/01/2020	R	$14,380 \pm 0,039$	5,7
	OASI	20/01/2020	R	$14,594 \pm 0,061$	5,8
	OASI	18/01/2020	R	$14,466 \pm 0,034$	6,0
	OASI	21/12/2019	R	$15,083 \pm 0,060$	15,0
	OASI	20/12/2019	R	$14,733 \pm 0,036$	15,3
	OASI	20/01/2020	V	$15,197 \pm 0,028$	5,8
	OASI	18/01/2020	V	$15,053 \pm 0,051$	6,0
	OASI	21/12/2019	V	$17,037 \pm 0,060$	15,0
	OASI	20/12/2019	V	$15,100 \pm 0,249$	15,3
(464797) 2004 FZ1	OASI	27/08/2016	R	$18,078 \pm 0,084$	8,7
	OASI	29/08/2016	R	$18,049 \pm 0,051$	12,2
	OASI	229/08/016	R	$18,131 \pm 0,053$	12,3
	OASI	231/08/016	R	$18,413 \pm 0,218$	15,5
	OASI	01/09/2016	R	$18,190 \pm 0,126$	17,2
	OASI	01/09/2016	R	$18,242 \pm 0,121$	17,4
	OASI	02/09/2016	R	$18,369 \pm 0,157$	18,7
	OASI	02/09/2016	R	$18,408 \pm 0,131$	18,9
(480004) 2014 KD91	OASI	07/10/2016	R	$17,867 \pm 0,358$	14,8
	OASI	04/10/2016	R	$17,858 \pm 0,106$	18,5

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ (°)
	OASI	02/10/2016	R	$17,889 \pm 0,451$	20,4
	OASI	02/10/2016	R	$17,947 \pm 0,480$	20,5
	OASI	29/09/2016	R	$18,171 \pm 0,270$	23,1
	OASI	28/09/2016	R	$18,042 \pm 0,265$	23,8
	OASI	28/09/2016	R	$18,128 \pm 0,293$	23,9
	OASI	27/09/2016	R	$18,143 \pm 0,313$	24,6
	OASI	27/09/2016	R	$18,052 \pm 0,652$	24,7
(480824) 1999 JO6	CI	01/12/2016	R	$16,55 \pm 0,05$	2,4
	CI	06/12/2016	R	$16,69 \pm 0,05$	5,1
	CI	06/12/2016	R	$16,79 \pm 0,05$	5,2
	CI	07/12/2016	R	$16,76 \pm 0,06$	5,7
	CI	17/12/2016	R	$17,07 \pm 0,09$	10,3
	CI	18/12/2016	R	$17,0 \pm 0,07$	10,7
	CI	01/01/2017	R	$17,34 \pm 0,08$	15,7
(484506) 2008 ER7	OASI	04/03/2017	R	$20,12 \pm 0,03$	2,4
	OASI	03/03/2017	R	$20,11 \pm 0,03$	2,9
	CI	03/03/2017	R	$20,08 \pm 0,04$	3,2
	CI	02/03/2017	R	$20,15 \pm 0,03$	4,3
	CI	27/02/2017	R	$20,18 \pm 0,03$	8,7
	CI	26/02/2017	R	$20,29 \pm 0,04$	10,5
	CI	16/03/2017	R	$20,4 \pm 0,06$	12,9
	OASI	22/02/2017	R	$20,61 \pm 0,03$	17,9
	CI	21/02/2017	R	$20,57 \pm 0,04$	20,1
(489337) 2006 UM	OASI	24/11/2016	R	$18,615 \pm 0,720$	15,1
	OASI	27/11/2016	R	$18,824 \pm 0,147$	16,3
	OASI	30/11/2016	R	$19,632 \pm 0,388$	23,9
2001 UG18	CI	21/11/2016	R	$20,76 \pm 0,03$	2,5
	CI	21/11/2016	R	$20,66 \pm 0,05$	2,7
	CI	15/11/2016	R	$20,96 \pm 0,08$	2,8
	CI	22/11/2016	R	$20,82 \pm 0,07$	3,3
	CI	22/11/2016	R	$20,77 \pm 0,04$	3,5
	CI	23/11/2016	R	$20,88 \pm 0,06$	4,2
	CI	30/11/2016	R	$21,06 \pm 0,08$	9,5
	CI	01/12/2016	R	$21,09 \pm 0,09$	10,2
	CI	06/12/2016	R	$21,16 \pm 0,09$	13,3
	CI	17/12/2016	R	$21,36 \pm 0,17$	19,1



Tabela A.1: Continued.

<b>Asteroide</b>	<b>Observatório</b>	<b>Data</b>	<b>Filtro</b>	<b>mag</b>	<b><math>\alpha</math> (<math>^{\circ}</math>)</b>
2005 TF	OASI	23/10/2016	R	$19,83 \pm 0,15$	4,4
	OASI	26/10/2016	R	$19,89 \pm 0,23$	4,6
	OASI	27/10/2016	R	$20,34 \pm 0,24$	4,8
	CI	15/11/2016	R	$20,76 \pm 0,04$	17,9
	CI	21/11/2016	R	$21,02 \pm 0,04$	23,2
	CI	22/11/2016	R	$21,12 \pm 0,04$	23,7
	CI	30/11/2016	R	$21,19 \pm 0,04$	29,6
	CI	06/12/2016	R	$21,28 \pm 0,05$	31,9
	CI	10/12/2016	R	$21,14 \pm 0,04$	32,4
2011 YQ10	OASI	01/12/2021	R	$19,184 \pm 0,576$	5,7
	OASI	07/12/2021	R	$19,041 \pm 0,296$	7,9
	OASI	07/10/2021	R	$20,475 \pm 0,452$	47,0
	OASI	03/10/2021	R	$20,257 \pm 0,108$	48,1
	OASI	201/10/021	R	$20,342 \pm 0,790$	48,3
2014 AD17	CI	11/01/2017	R	$20,17 \pm 0,06$	4,7
	OASI	23/01/2017	R	$20,34 \pm 0,09$	8,0
	OASI	25/01/2017	R	$20,44 \pm 0,02$	9,4
	OASI	26/01/2017	R	$20,51 \pm 0,03$	10,1
	OASI	27/01/2017	R	$20,11 \pm 0,08$	10,8
	CI	01/01/2017	R	$20,44 \pm 0,05$	11,4
	CI	23/12/2016	R	$20,66 \pm 0,05$	17,8
2016 WJ1	OASI	27/11/2016	R	$21,498 \pm 0,164$	5,5
	OASI	29/11/2016	R	$21,579 \pm 0,190$	7,7
	OASI	02/12/2016	R	$21,820 \pm 0,226$	15,3
	OASI	04/12/2016	R	$21,761 \pm 0,294$	18,0
	OASI	05/12/2016	R	$21,999 \pm 0,104$	20,9
	OASI	07/12/2016	R	$22,241 \pm 0,358$	27,5
2016 WU3	CI	01/12/2016	R	$20,3 \pm 0,05$	5,0
	CI	07/12/2016	R	$20,43 \pm 0,06$	5,7
	CI	09/12/2016	R	$20,55 \pm 0,06$	7,7
	CI	10/12/2016	R	$20,49 \pm 0,05$	8,7
	CI	15/12/2016	R	$20,87 \pm 0,06$	14,5
	CI	17/12/2016	R	$20,97 \pm 0,05$	16,6
	CI	18/12/2016	R	$21,05 \pm 0,06$	17,7
	CI	23/12/2016	R	$21,18 \pm 0,06$	22,9
2016 RP33	OASI	24/09/2016	R	$19,468 \pm 0,083$	7,6

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ (°)
	OASI	24/09/2016	R	$19,613 \pm 0,077$	7,7
	OASI	25/09/2016	R	$19,627 \pm 0,143$	9,0
	OASI	25/09/2016	R	$19,602 \pm 0,109$	9,1
	OASI	25/09/2016	R	$19,648 \pm 0,100$	9,2
	OASI	26/09/2016	R	$19,811 \pm 0,411$	10,5
	OASI	27/09/2016	R	$19,872 \pm 0,346$	11,9
	OASI	27/09/2016	R	$19,642 \pm 0,258$	12,0
	OASI	27/09/2016	R	$19,696 \pm 0,254$	12,1
	OASI	28/09/2016	R	$19,903 \pm 0,228$	13,3
	OASI	29/09/2016	R	$19,877 \pm 0,233$	14,6
	OASI	02/10/2016	R	$20,090 \pm 0,436$	18,2
	OASI	02/10/2016	R	$19,985 \pm 0,397$	18,3
2017 AC5	CI	16/03/2017	R	$20,414 \pm 0,169$	5,4
	CI	02/03/2017	R	$20,549 \pm 0,139$	8,8
	OASI	21/03/2017	R	$20,591 \pm 0,015$	9,6
	OASI	23/03/2017	R	$20,670 \pm 0,017$	11,5
	OASI	24/03/2017	R	$20,915 \pm 0,019$	12,4
	OASI	25/03/2017	R	$20,630 \pm 0,019$	13,4
	OASI	26/03/2017	R	$20,969 \pm 0,030$	14,3
	CI	20/02/2017	R	$20,656 \pm 0,109$	15,0
	CI	27/03/2017	R	$20,619 \pm 0,129$	15,3
	CI	31/03/2017	R	$21,115 \pm 0,149$	18,8
2017 CR32	OASI	24/03/2017	R	$22,32 \pm 0,02$	0,8
	OASI	25/03/2017	R	$22,45 \pm 0,12$	1,9
	CI	24/03/2017	R	$22,44 \pm 0,06$	2,0
	OASI	26/03/2017	R	$22,48 \pm 0,02$	4,6
	OASI	22/03/2017	R	$22,51 \pm 0,02$	6,2
	OASI	27/03/2017	R	$22,72 \pm 0,02$	7,3
	CI	27/03/2017	R	$22,83 \pm 0,07$	9,6
	OASI	28/03/2017	R	$22,66 \pm 0,02$	9,7
	OASI	28/03/2017	R	$22,66 \pm 0,02$	9,9
	CI	19/03/2017	R	$22,72 \pm 0,08$	11,5
	CI	28/03/2017	R	$22,87 \pm 0,06$	12,2
	CI	17/03/2017	R	$23,08 \pm 0,08$	16,7
	CI	16/03/2017	R	$22,9 \pm 0,07$	19,0
	CI	31/03/2017	R	$23,13 \pm 0,1$	19,1

Tabela A.1: Continued.

Asteroide	Observatório	Data	Filtro	mag	$\alpha$ ( $^\circ$ )
2017 DC38	CI	28/03/2017	R	$24,4 \pm 0,06$	1,1
	CI	27/03/2017	R	$24,3 \pm 0,05$	1,8
	CI	30/03/2017	R	$24,7 \pm 0,05$	6,5
	CI	31/03/2017	R	$24,88 \pm 0,07$	9,7
2017 YE5	OASI	13/07/2018	R	$19,103 \pm 0,014$	9,1
	OASI	12/07/2018	R	$18,984 \pm 0,013$	10,2
	OASI	11/07/2018	R	$19,032 \pm 0,010$	11,3
	OASI	12/08/2018	R	$18,163 \pm 0,108$	16,6
2019 CT4	OASI	01/03/2019	R	$24,645 \pm 0,150$	6,75
	OASI	01/03/2019	R	$24,768 \pm 0,261$	9,0
	OASI	01/03/2019	R	$24,767 \pm 0,279$	9,1
	OASI	01/03/2019	R	$24,780 \pm 0,279$	9,2
	OASI	28/02/2019	R	$25,095 \pm 0,063$	24,5
	OASI	28/02/2019	R	$25,079 \pm 0,060$	24,6
	OASI	28/02/2019	R	$25,085 \pm 0,063$	24,8
	OASI	28/02/2019	R	$25,290 \pm 0,074$	27,6

Tabela A.2: Estes são os parâmetros  $H-G_1-G_2$  das curvas de fase dos 32 NEOs usados em nossa análise.

Asteroide	$H_{R0}$	$G_1$	$G_{1err}$	$G_2$	$G_{2err}$
(4055) Magellan	$13,94 \pm 0,188$	0,07041	-0,0722 +0,0929	0,3724	-0,335 +0,5273
(16816) 1997 UF9	$15,39 \pm 0,026$	0,0	-0,0 +0,0849	0,3322	-0,2336 +0,6034
(18109) 2000 NG11	$16,53 \pm 0,01$	0,8301	-0,2413 +0,048	0,01628	-0,0 +0,4196
(36236) 1999 VV	$115,77 \pm 0,03$	0,8228	-0,0093 +0,0535	0,01938	-0,0 +0,184
(65717) 1993 BX3	$18,21 \pm 0,07$	0,7792	-0,3761 +0,0207	0,2208	-0,0 +0,4091
(99799) 2002 LJ3	$18,21 \pm 0,07$	0,7792	-0,1462 +0,0182	0,2208	-0,2539 +0,1456
(159608) 2002 AC2	$15,79 \pm 0,29$	0,1234	-0,1271	0,2317	-0,1773

Tabela A.2: Continued.

Asteroide	$H_{R0}$	$G_1$	$G_{1err}$	$G_2$	$G_{2err}$
			+0,1583		+0,4871
(163693) Atira	15,7 $\pm$ 0,529	0,8238	-0,0268	0,0	-0,0188
			+0,0564		+0,1703
(174050) 2002 CC19	16,5 $\pm$ 0,377	0,0	-0,0	0,1649	-0,0658
			+0,0836		+0,0864
(175189) 2005 EC224	18,11 $\pm$ 0,024	0,5895	-0,6118	0,1814	-0,0295
			+0,1741		+0,7124
(326683) 2002 WP	18,05 $\pm$ 0,048	0,0	-0,0	0,6025	-0,0709
			+0,5503		+0,1939
(333889) 1998 SV4	17,69 $\pm$ 0,079	0,7062	-0,2324	0,1075	-0,0264
			+0,1227		+0,4447
(370307) 2002 RH52	16,41 $\pm$ 0,226	0,0	-0,0	0,5726	-0,0359
			+0,2763		+0,4111
(370702) 2004 NC9	17,05 $\pm$ 0,101	0,8187	-0,8128	0,1813	-0,0381
			+0,1872		+0,8084
(40267) 1999 GJ4	14,28 $\pm$ 0,0083	0,0185	-0,0077	0,169	-0,0009
			+0,1734		+0,788
(417581) 2006 VA3	18,21 $\pm$ 0,07	0,7792	-0,2397	0,2208	-0,0273
			+0,2298		+0,2346
(464797) 2004 FZ1	17,39 $\pm$ 0,091	0,2593	-0,0693	0,3831	-0,0405
			+0,3836		+0,2917
(480004) 2014 KD91	16,96 $\pm$ 0,425	0,2613	-0,007	0,3499	-0,0056
			+0,0534		+0,136
(480824) 1999 JO6	16,37 $\pm$ 0,13	0,8072	-0,2139	0,0	-0,0494
			+0,0		+0,3808
(484506) 2008 ER7	20,0 $\pm$ 0,057	0,629	-0,6264	0,371	-0,0693
			+0,3611		+0,5748
(489337) 2006 UM	16,45 $\pm$ 0,41	0,1515	-0,0152	0,0	-0,0502
			+0,0		+0,4548
2001 UG18	20,56 $\pm$ 0,009	0,4619	-0,3297	0,3302	-0,0594
			+0,3148		+0,4306
2005 TF	18,84 $\pm$ 0,529	0,06187	-0,1111	0,1475	-0,0851
			+0,1366		+0,7147
2011 YQ10	18,85 $\pm$ 0,123	0,5894	-0,2069	0,4106	-0,0093
			+0,2388		+0,2049
2014 AD17	19,67 $\pm$ 0,188	0,2481	-0,0	0,3532	-0,0658

Tabela A.2: Continued.

Asteroides	$H_{R0}$	$G_1$	$G_{1err}$	$G_2$	$G_{2err}$
			+0,2576		+0,3348
2016 WJ1	20,98 $\pm$ 0,01	0,2588	-0,1026	0,3721	-0,0019
			+0,2946		+0,1134
2016 WU3	20,06 $\pm$ 0,051	0,8228	-0,0838	0,01938	-0,0665
			+0,0803		+0,5153
2016 RP33	19,05 $\pm$ 0,012	0,8192	-0,0099	0,0	-0,0502
			+0,0		+0,1755
2017 AC5	20,13 $\pm$ 0,326	0,8417	-0,057	0,07513	-0,0471
			+0,0		+0,9755
2017 CR32	22,33 $\pm$ 0,031	0,8571	-0,5498	0,133	-0,0589
			+0,3161		+0,5839
2017 DC38	24,22 $\pm$ 0,08	0,8017	-0,4329	0,0	-0,0273
			+0,0		+0,62
2019 CT4	24,13 $\pm$ 0,273	0,2741	-0,1497	0,388	-0,0848
			+0,4338		+0,264



# Apêndice B

## Curvas de fase dos NEOs

Aqui mostramos, de forma ampliada, as 13 curvas de fase dos NEOs abordados no capítulo 5.

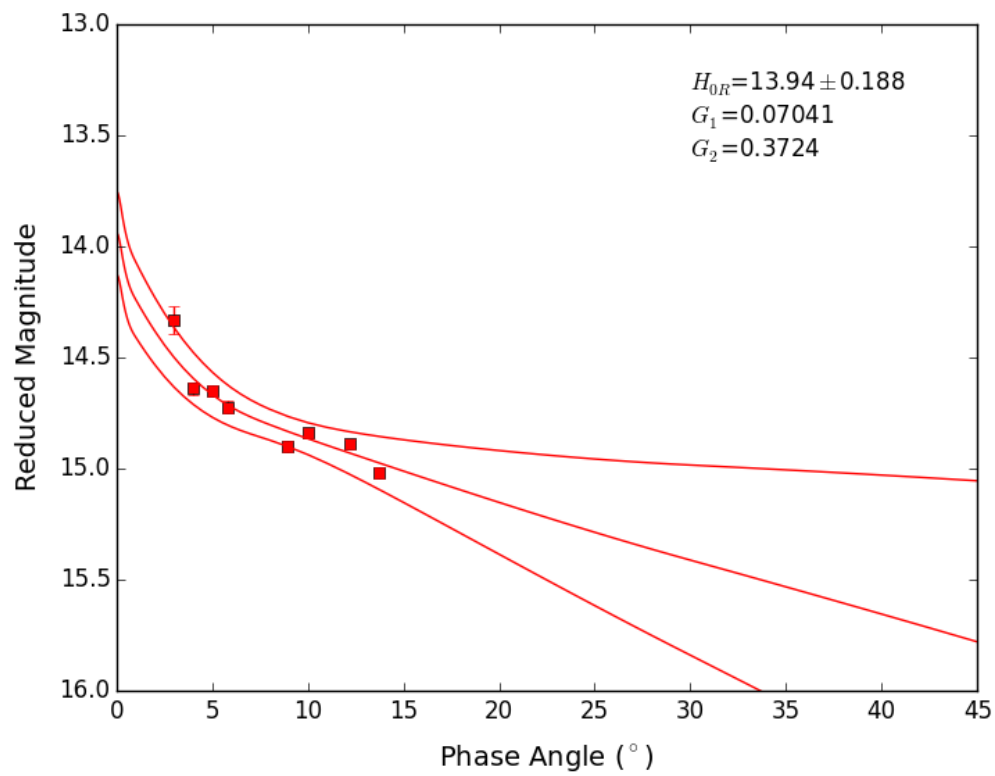


Figura B.1: *(4055) Magellan*.

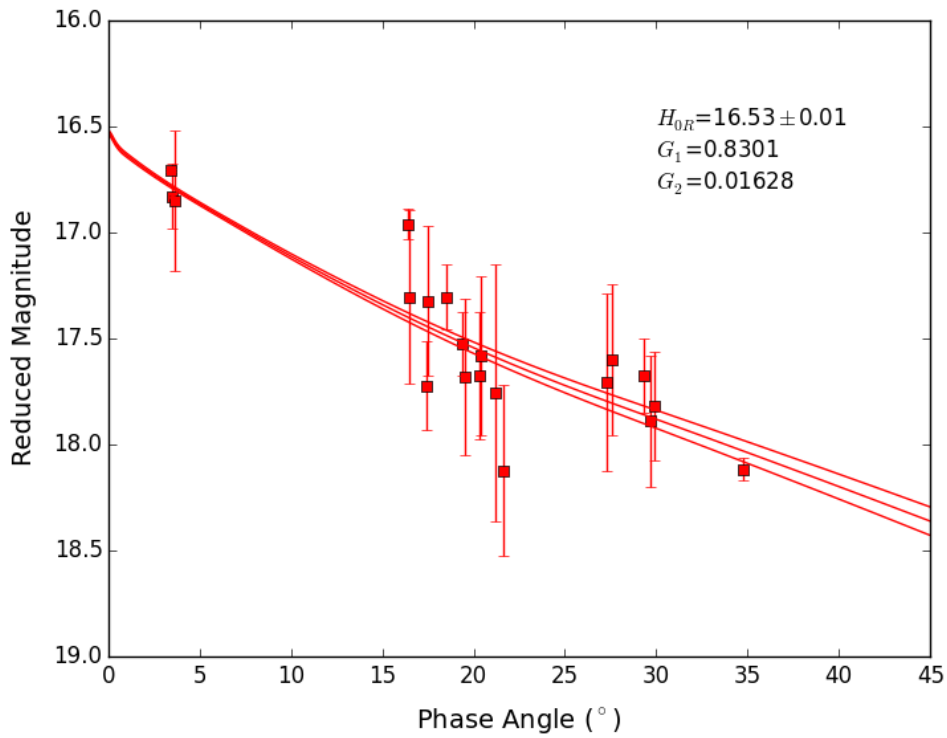


Figura B.2: (18109) 2000 NG11.

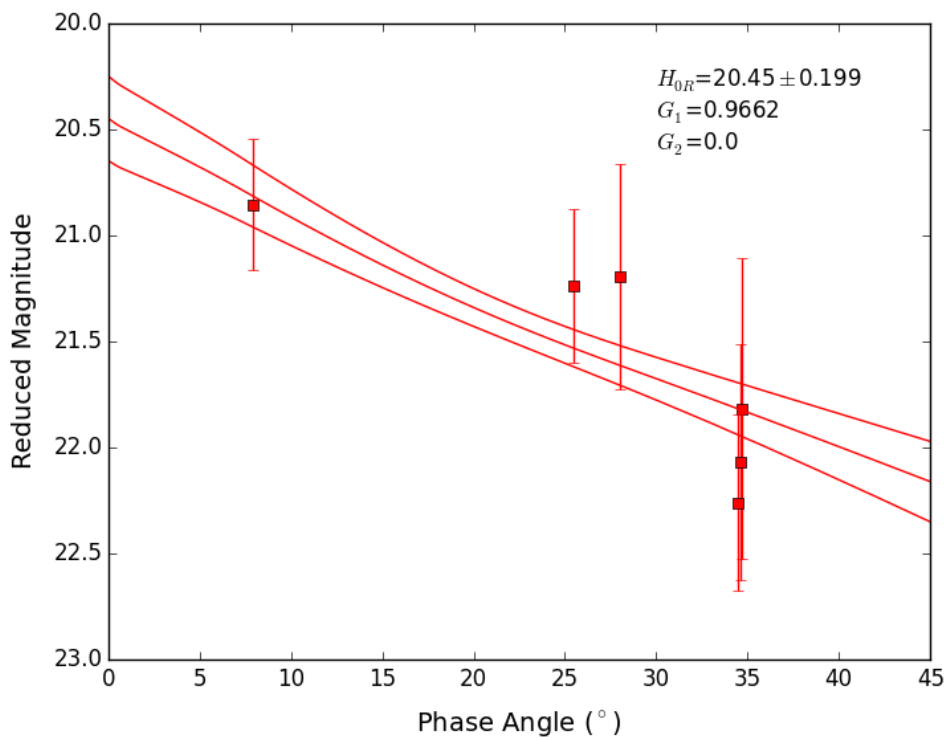


Figura B.3: (65717) 1993 BX3.



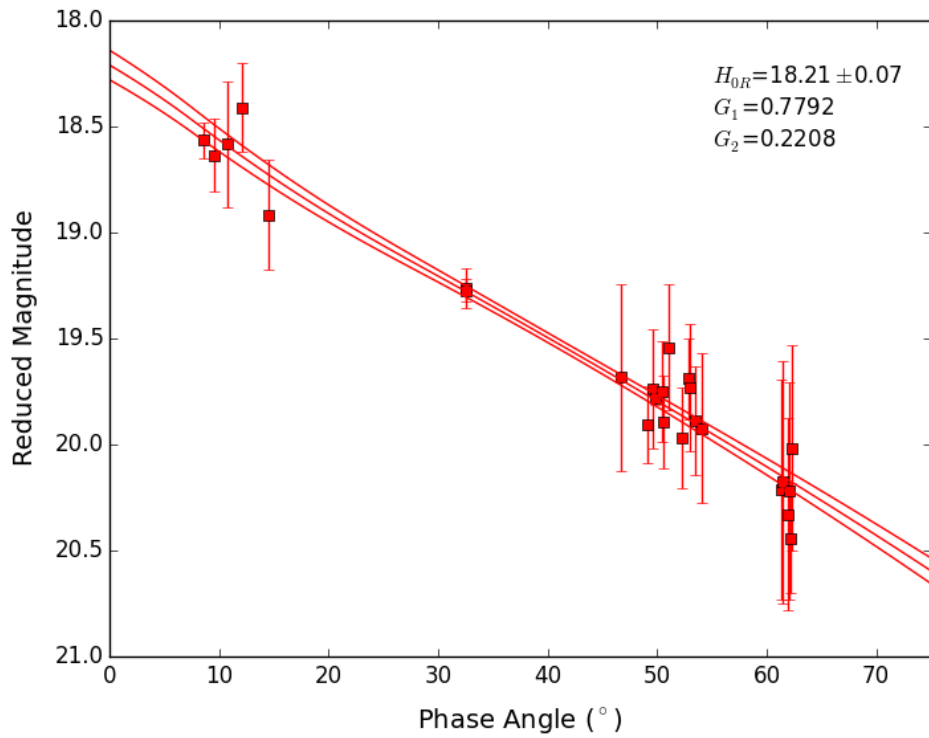


Figura B.4: (99799) 2002 LJ3.

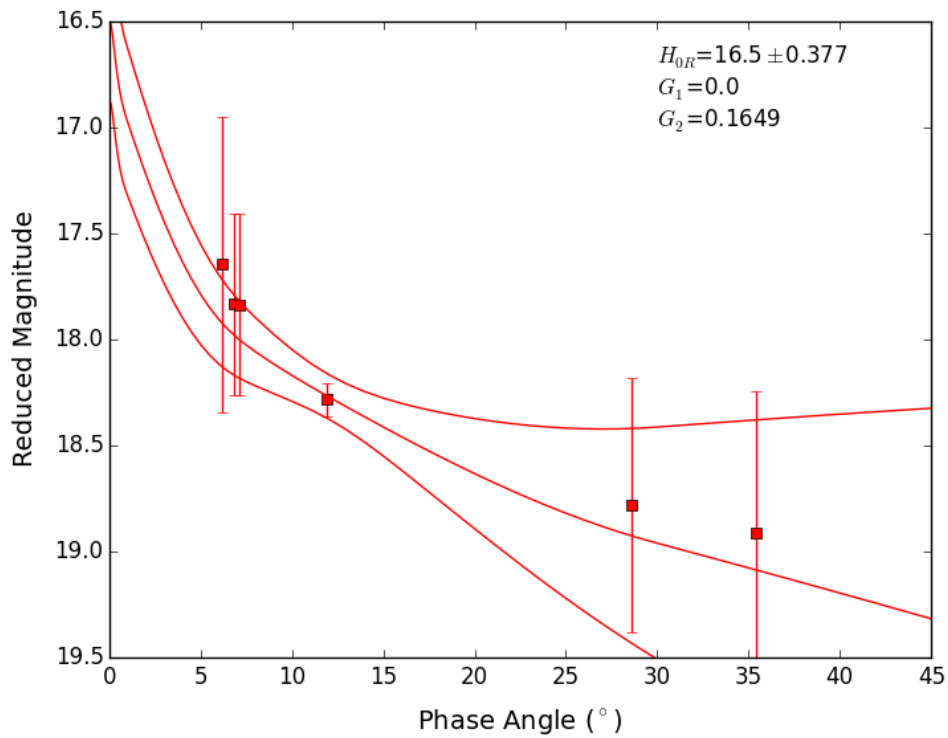


Figura B.5: (174050) 2002 CC19.

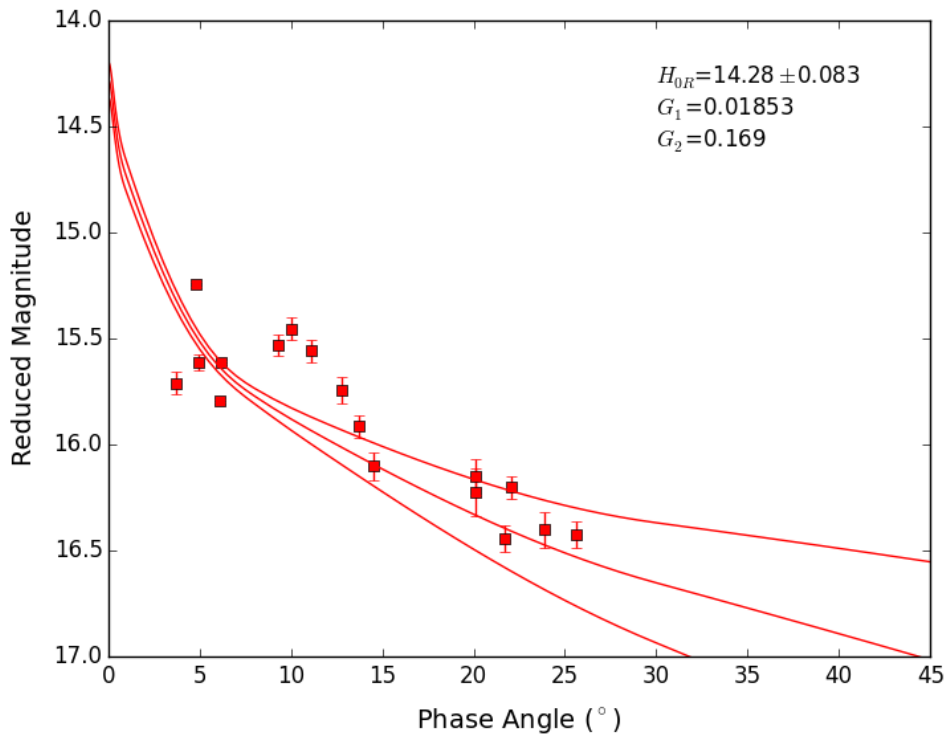


Figura B.6: (40267) 1999 GJ4.

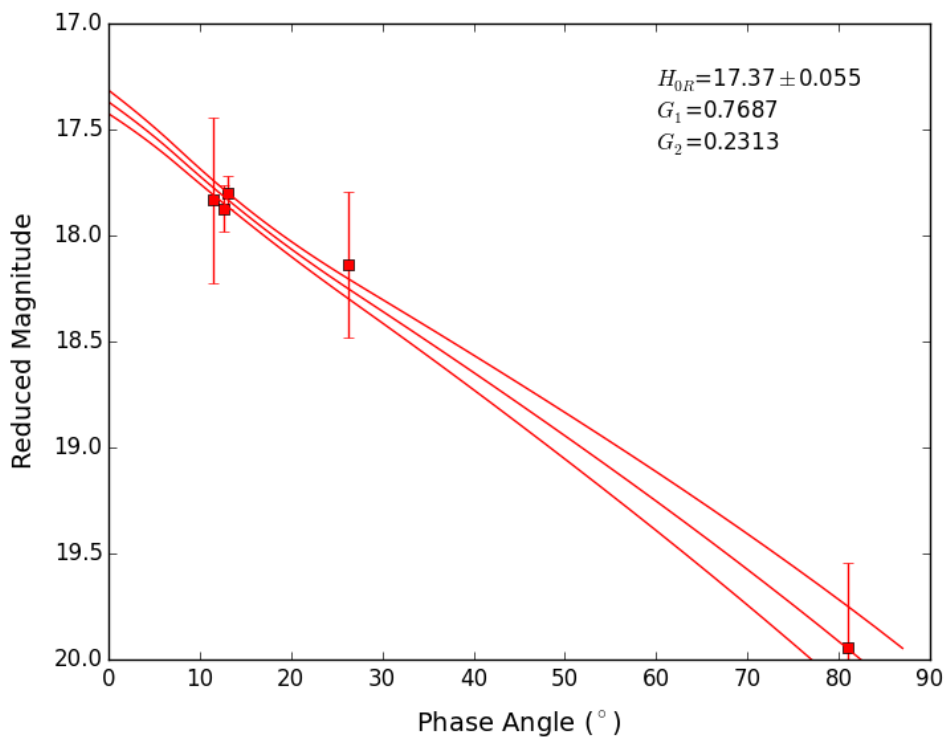


Figura B.7: (417581) 2006 VA3.

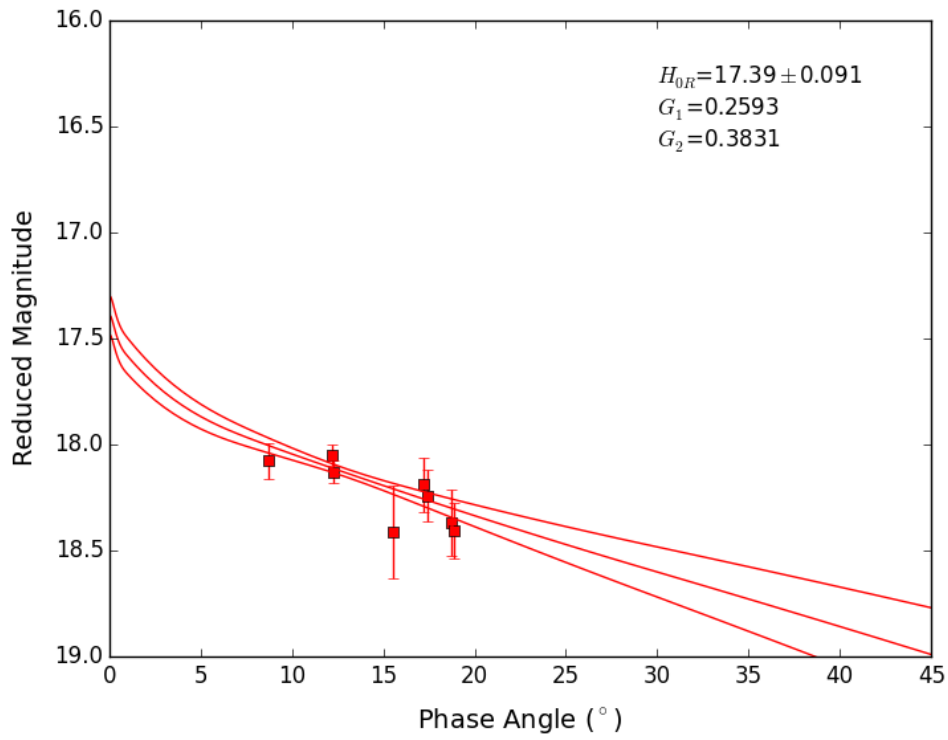


Figura B.8: (464797) 2004 FZ1.

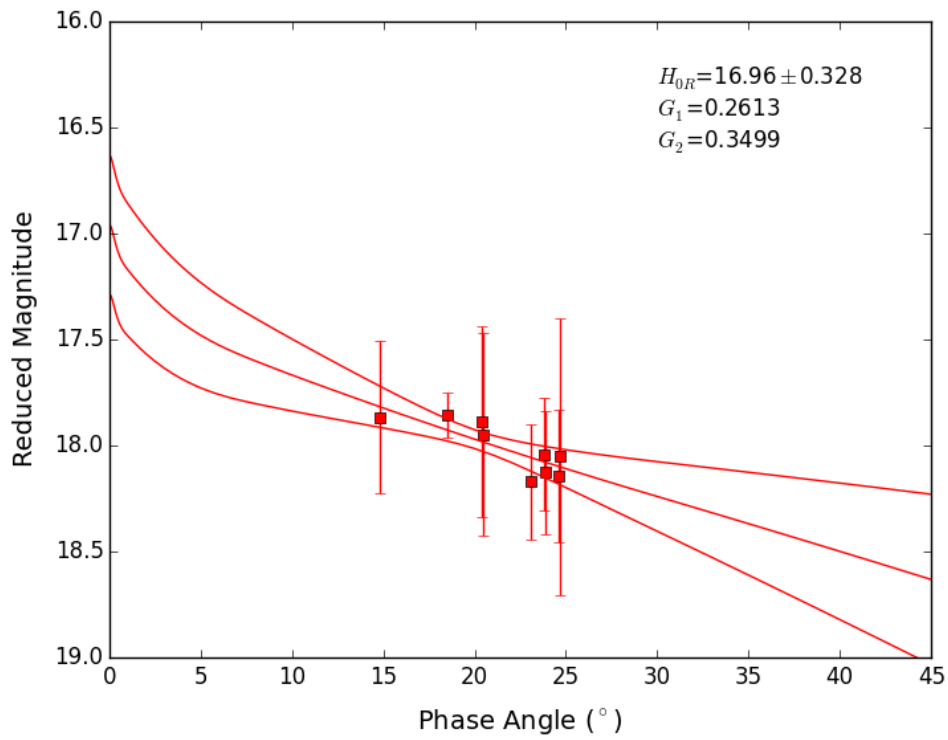
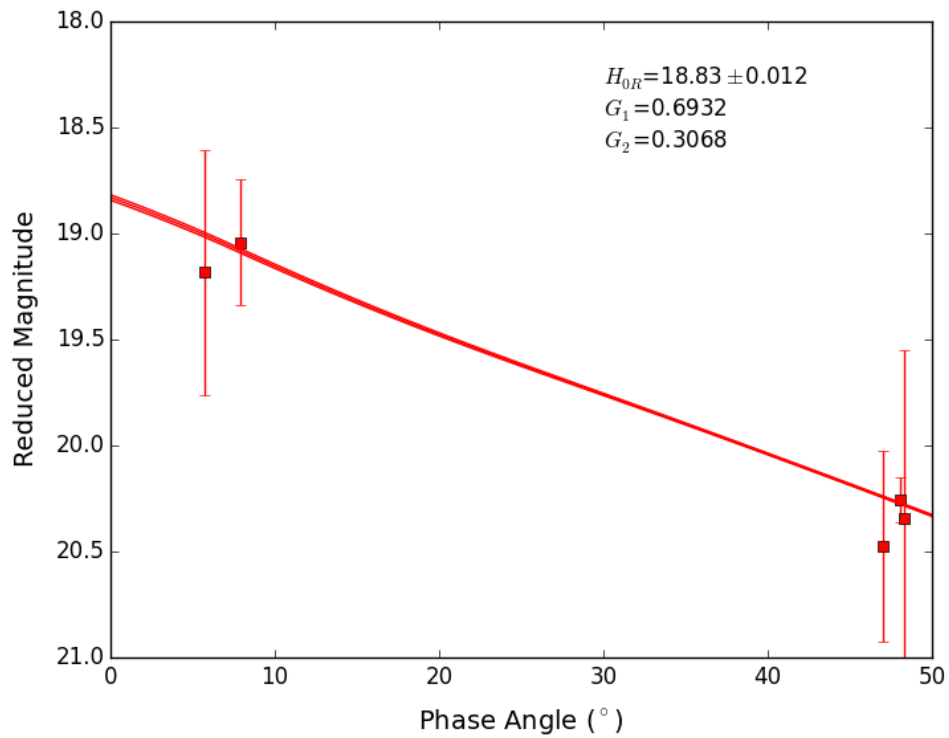
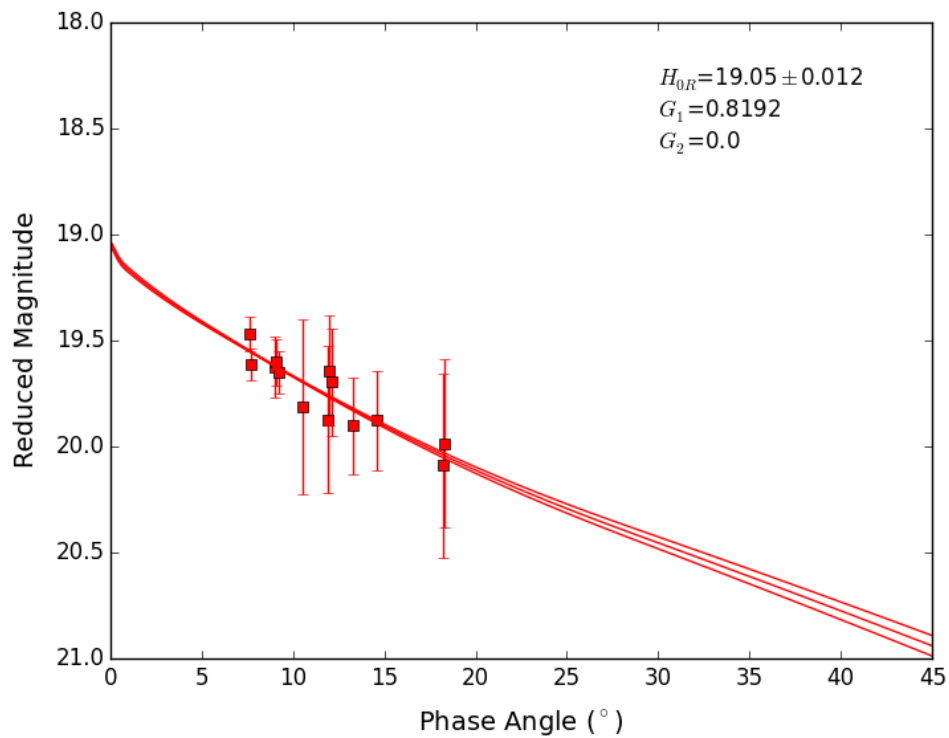


Figura B.9: (480004) 2014 KD91.

Figura B.10: *2011 YQ10*.Figura B.11: *2016 RP33*.

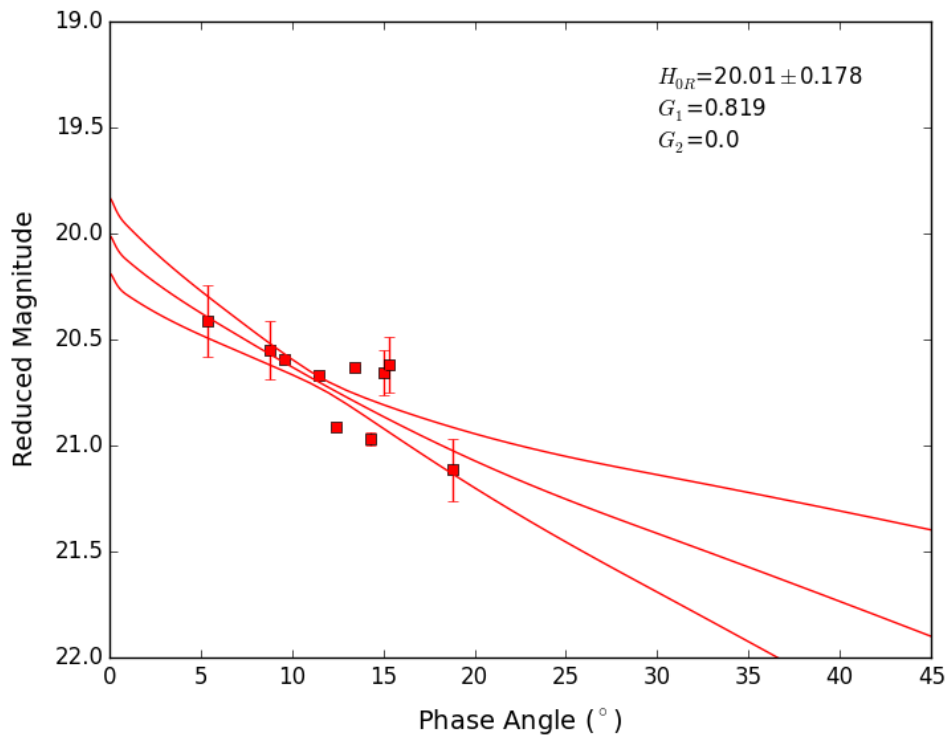


Figura B.12: *2017 AC5*.

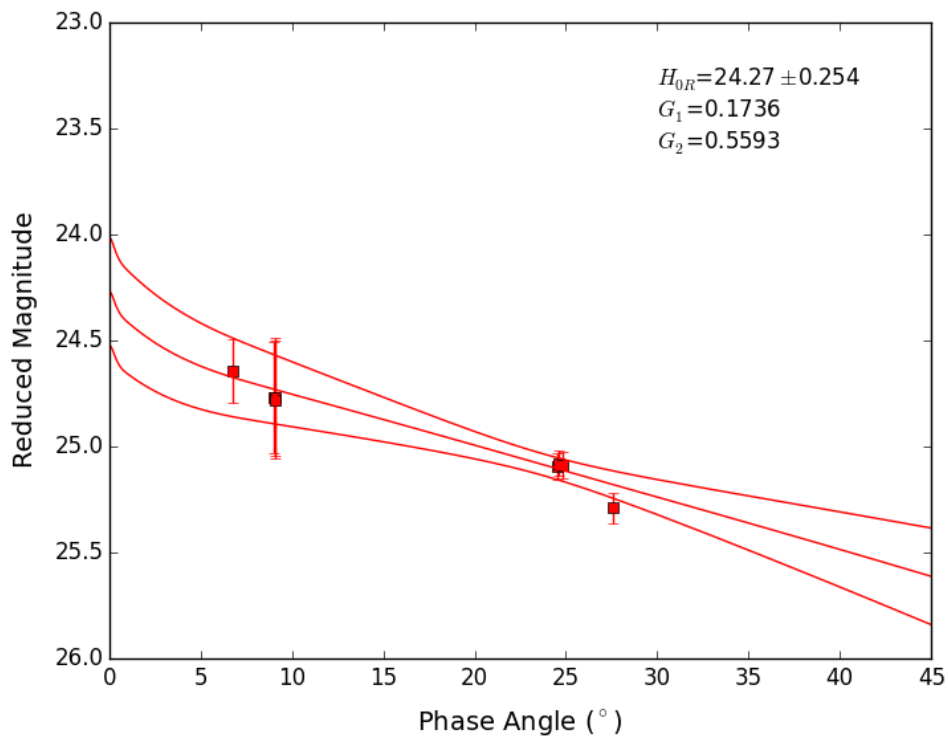


Figura B.13: *2019 CT4*.



# Apêndice C

## Artigos publicados e submetidos originários do trabalho aqui apresentado

Aqui apresentamos os artigos publicados e submetidos como resultados do trabalho desenvolvido.

# Photometric characterization of NEOs: 3 Amor and 3 Apollo<sup>★</sup>

Eduardo Rondón,<sup>1†</sup> Plicida Arcoverde,<sup>1</sup> Filipe Monteiro,<sup>1</sup> Hissa Medeiros,<sup>1</sup>  
Giuliat Navas,<sup>2</sup> Daniela Lazzaro,<sup>1</sup> Jorge M. Carvano<sup>1</sup> and Teresinha Rodrigues<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Observatório Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400 Rio de Janeiro, Brazil

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones de Astronomía, Apartado Postal 264, 5101-A Mérida, Venezuela

Accepted 2019 January 1. Received 2018 December 31; in original form 2018 November 3

## ABSTRACT

We report the results based on a complete photometric characterization method for six near-Earth objects (NEOs), determining the rotational period, the taxonomic classification, the  $V - R$  colour, the absolute magnitude and the slope parameter. The data were acquired at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica, for (138846) 2000 VJ61, 2016 WJ1 and (36236) 1999 VV, of the Apollo group, and (489337) 2006 UM, 2005 TF and (326683) 2002 WP, of the Amor group. The performed analysis enabled us to classify three objects in the S-complex, one in the C-complex and one as a V-type. An estimate of the effective diameter is also given for four of them. Throughout our work is evident the importance of performing a complete photometric characterization in order to derive reliable physical parameters. In particular, we show that the rotational lightcurve amplitude is a very important parameter that needs to be considered when deriving photometric magnitudes of NEOs.

**Key words:** minor planet – asteroids: individual: Amor – asteroids: individual: Apollo.

## 1 INTRODUCTION

The near-Earth object (NEO) population is constituted of small bodies with orbits that are close to, or even cross, that of the Earth. This population is usually divided into four distinct groups depending on their orbital parameters: Atiras, Amors, Apollo and Atens. The first two have Earth-approaching orbits while the last two cross the orbit of the Earth. Due to their serious threat to the Earth it is very important to know their physical properties, especially those that are relevant to the precise determination of their orbit. One of these properties is the rotation period and the spin direction, since accurate modelling of a NEO's trajectory requires inclusion of the Yarkovsky/YORP effects that depend on these parameters. In addition, the study of the physical properties of a large sample of NEOs can help understand the origin and evolution of the population as a whole, and is fundamental for planning future space missions.

Photometric observations of NEOs can be used to derive the rotational lightcurve, the phase curve and the photometric spectrum, which in turn allow the determination of the rotation period, the spin-axis orientation, the shape, the size, the colours and the taxonomy type (Harris et al. 1989; Pravec, Šarounová & Wolf 1996; Pravec,

Wolf & Šarounová 1998; Whiteley, Tholen & Hergenrother 2002; Kaasalainen et al. 2004; Warner, Harris & Pravec 2009; Mommert et al. 2016; Erasmus et al. 2017; Perna et al. 2017; Vaduvescu et al. 2017). It should be stressed that, despite the existence of several dedicated works, these properties have been partially determined only for less than 10 per cent of the more than 19 000 NEOs known. For example, about 1300 objects have a rotational period with good reliability, i.e. a quality code greater than 2- according to the lightcurve database LCDB<sup>1</sup> (Warner et al. 2009), and among these just nearly 200 NEOs have a taxonomic classification derived from spectra.

In order to contribute to the international efforts aiming to increase the knowledge on the NEO population, the IMPACTON project<sup>2</sup> was designed to set up a facility dedicated to the study of these objects. Since 2011 the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Itacuruba, Brazil) has been operating an extensive observational campaign to obtain data for the physical characterization of a large sample of NEOs. In this paper we present the results obtained for six NEOs and discuss the methodology used to establish a complete photometric characterization of these objects.

The present paper is organized as follows: in Section 2 we give a description of the different observational methodologies and data reduction procedures used, in Section 3 we present and discuss the

<sup>★</sup> Observations obtained at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Itacuruba) of the Observatório Nacional (ON-Brazil), and with complementary observations at the Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato operated by Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA- Venezuela).

<sup>†</sup> E-mail: [erondon@on.br](mailto:erondon@on.br)

<sup>1</sup><http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

<sup>2</sup><http://www.on.br/impacton/>



techniques applied to derive the relevant physical parameters from the obtained data, and in Section 4 are given the results for each object separately. Finally, in Section 5 we summarize our results and conclusions.

## 2 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION

The observations presented here were performed between 2016 October and 2017 February at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (code Y28, OASI-Nova Itacuruba), within the framework of the IMPACTON project and at the Observatorio Astronômico Nacional Llano del Hato (OANLH) operated by the Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA-Venezuela).<sup>3</sup> Both observatories are equipped with 1-m telescopes and 2048 x 2048 pixel CCDs but have different fields of view: 11.8' x 11.8' at OASI and 20' x 20' at ONLH. At OASI, observations were performed using the *R*-Cousins filter to derive light and phase curves, and the *g* – *r* – *i* – *z* Sloan Digital Sky Survey (SDSS) filters to obtain photometric spectra. The observations at OANLH were all performed using the *R*-Cousins filter.

In order to obtain the relative magnitudes (for lightcurves) and the photometric magnitudes (for phase curves and spectra), different observational strategies and data reduction procedures were applied for each case. In the first case the telescope was set in sidereal tracking and the NEO observed over one or more nights for several hours. Whenever necessary, the telescope pointing was changed to follow the object. The data reduction was performed using the MAXIM DL package, following the standard procedure in which the science image is corrected for master-bias, master-dark and master-flat. Relative magnitudes were then obtained for each image, by performing the difference between the instrumental magnitude of the NEO and of a field star of similar brightness (usually more than one star is used, to guarantee that it is not variable).

In the case of the photometric magnitudes, the telescope was set to differential tracking mode, but different observational strategies were used to derive phase curves or spectra. In the first case, the NEO and a standard star were observed three or four times over the night in the *R*-Cousins filter. At each time, three or more images were obtained, and the resulting magnitudes were then averaged to reduce the random error. Moreover, the whole procedure was repeated on different nights over one or more months to map different solar phase angles of the NEO. In the second case, i.e. to obtain the photometric spectrum, images of the NEO and a standard star were obtained alternating the filter between *g*, *r*, *i*, *z* and repeating the sequence three or four times over the night. The data reduction in both cases was performed using the IRAF package correcting the science image for bias, dark and flat frames. The instrumental magnitudes for the NEO and the standard star were determined through aperture photometry, using the photometric growth curve (Howell 1989) to determine the optimum aperture. The standard stars were used to compute the zero-point and the extinction coefficient of the night, and the respective uncertainties.

## 3 DERIVING PHYSICAL PARAMETERS

The lightcurve of an object is how its brightness varies over time. In the case of asteroids, this variation is assumed to be mainly due to the rotation of an irregular and/or elongated object. The rotation period and amplitude can thus be obtained by fitting the lightcurve to

a Fourier series (Harris et al. 1989), as given in equation (1), where  $\alpha$  is the solar phase angle (angle between the lines connecting the asteroid to the Sun and the Earth),  $\phi$  is the rotational phase angle,  $V(\phi)$  is the computed reduced magnitude at a phase angle  $\alpha$  and time  $t$ ,  $A_l$  and  $B_l$  are the Fourier coefficients,  $P$  is the rotational period, and  $t_0$  is the zero-point time of the observation:

$$V(\phi) = A_0 + \sum_{l=1}^n [A_l \sin(2\pi l\phi) + B_l \cos(2\pi l\phi)];$$

$$\phi = \left( \frac{t - t_0}{P} \right). \quad (1)$$

On the other hand, the solar phase curve is how the brightness of an asteroid varies with changing solar illumination with respect to the observer. It is well known (Seeliger 1887; Gehrels, Coffeen & Owings 1964; Thorpe 1978; Bowell & Lumme 1979) that this curve exhibits a steep increase at small phase angles, also known as ‘opposition surge’, and a linear behaviour at larger solar phase angles. This non-linear behaviour is attributed to two phenomena: shadow-hiding and coherent backscattering (Hapke 1990, 1993, 2002). In 1985, the IAU Commission 20 adopted a two-parameter magnitude system for asteroids (Bowell et al. 1989) based on the application of the Lumme–Bowell photometric model (Lumme & Bowell 1981) to asteroid phase curves. This system, called the *H* – *G* model, is expressed by equation (2), where  $H(\alpha)$  is the reduced magnitude of an object located at 1 au from the Sun and the Earth,  $H_0$  is the absolute magnitude and  $G$  is the slope parameter. The absolute magnitude is defined as the brightness of an asteroid at 1 au from the Sun and Earth and at  $\alpha = 0^\circ$  (Verbiscer & Veverka 1995). The slope parameter describes the shape of the phase curve and is related to the surface albedo. Values of  $G \approx 0$  produce steep phase curves and are associated with low-albedo objects, while larger values ( $G \approx 1$ ) produce flatter phase curves and tend to be associated with higher albedos:

$$H(\alpha) = H_0 - 2.5 \log[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)]. \quad (2)$$

A new system, denominated *H* – *G*<sub>1</sub> – *G*<sub>2</sub> (Muinonen et al. 2010), was adopted by IAU in 2012 to improve the modelling of the phase curve for high- and low-albedo asteroids. The model is expressed by equation (3), which is fitted to the data using the linear least-squares method:

$$H(\alpha) = H_0 - 2.5 \log[G_1\Phi_1(\alpha) + G_2\Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)], \quad (3)$$

where  $H_0$ ,  $G_1$  and  $G_2$  are the parameters of the model, the functions  $\Phi_1$  and  $\Phi_2$  are related to the linear part of the phase curve while  $\Phi_3$  is associated with the opposition effect. These functions are given, for  $\alpha < 30^\circ$ , by equations (4)–(6):

$$\Phi_1(\alpha) = 1 - \frac{6\alpha}{\pi} \quad (4)$$

$$\Phi_2(\alpha) = 1 - \frac{9\alpha}{\pi} \quad (5)$$

$$\Phi_3(\alpha) = \exp\left(-4\pi \tan^{2/3}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right). \quad (6)$$

More recently Penttilä et al. (2016) showed that, in general, the above basis functions are given in terms of cubic spline functions  $\xi(\alpha)$  (tabulated in their work). Since Muinonen et al.’s model (2010) fails when the number of observations is small or when the data are of low accuracy, this problem is solved using a constrained

<sup>3</sup><http://www.cida.gob.ve/webcida/>

non-linear least-squares algorithm to fit the data to the model (Penttilä et al. 2016). This is the approach used in the present work, since for most of the NEOs in our sample the data are sparse and sometimes have large errors. It is also important to note that, since our magnitudes were obtained in the  $R$ -Cousins filter, the fit to the phase curve gives  $H_{OR}$ . The absolute magnitude  $H_0$  is then derived using colour transformations.

Lastly, the photometric spectrum of an asteroid shows how the reflectance varies with the wavelength and is directly related to the surface composition of the object. The behaviour of the spectrum thus can be used to derive a taxonomic classification. To derive the spectrum of the observed NEOs, the first step was to transform the colour measures  $(m_g - m_r)_A$ ,  $(m_r - m_i)_A$  and  $(m_r - m_z)_A$  in the SDSS system by flux normalizing to the  $r$  band and removing the solar colours  $(m_g - m_r)_\odot$ ,  $(m_r - m_i)_\odot$ ,  $(m_r - m_z)_\odot^4$  (equation 7). This is the same procedure used by Carvano et al. (2010) to derive a taxonomic classification for the asteroids from the SLOAN-MOC4 catalogue, producing templates for the identified classes. We thus compared each of our spectra with these templates and derived the taxonomic classification of the NEO, using a chi-squared best fit:

$$f_x = \frac{\left(\frac{f_x}{f_r}\right)_A}{\left(\frac{f_x}{f_r}\right)_\odot} = 10^{-0.4C_{x-r}},$$

$$C_{x-r} = (m_x - m_r)_A - (m_x - m_r)_\odot. \quad (7)$$

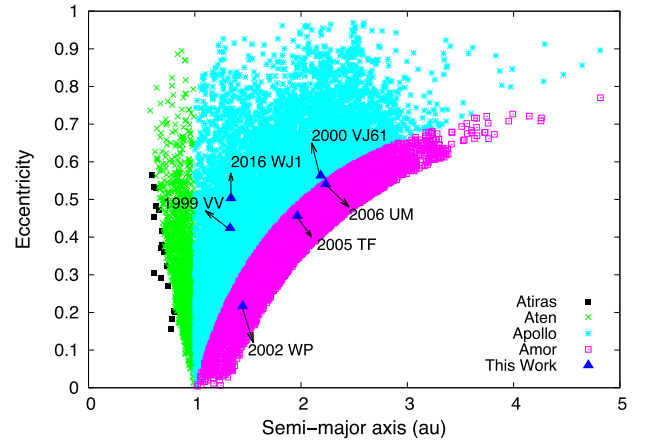
The procedures given above to derive solar phase curves and photometric spectra are valid only for spherical or non-rotating objects. It is noteworthy that, due to the elongated shape of most asteroids, their reduced magnitude can vary considerably. To correct for such an effect, the photometric magnitudes need to be referred to a common rotational phase. This is done using equations (8)–(10), where  $\mathcal{A}$  is the amplitude ratio of the rotational lightcurves, as given by Zappala et al. (1990), and  $\phi_0$  is the phase offset. In this way, for each data set, we get a nominal correction  $\Delta V(\phi)$  that is computed with respect to the rotational phase at the time instant of the observation with the smaller error in that particular set. The value of the correction on each point is then chosen as the one that minimizes the dispersion of the curve. It is important to note, however, that the adopted procedure is valid only if the lightcurve is obtained during the same night, or on consecutive nights, where the amplitude ratio  $\mathcal{A} \approx 1$ :

$$V'(\phi) = \mathcal{A}V(\phi + \phi_0) \quad (8)$$

$$H_c(\alpha) = H(\alpha) - \Delta V'(\phi) \quad (9)$$

$$f_{xc} = f_x 10^{\Delta V'(\phi)}. \quad (10)$$

Finally, the absolute magnitude in the  $R$ -Cousins filter ( $H_{OR}$ ), along with the visual albedo ( $\rho_v$ ), and the colour  $V - R$ , can be used to derive the effective diameter ( $\bar{D}$ ) using equation (11) (Fowler & Chillemi 1992; Harris & Lagerros 2002). In our case the visual albedo is taken directly from the literature or inferred from mean values of the taxonomic class of the object as given by Mainzer et al. (2011), and the colour  $V - R$  is computed using the transformation equation between SDSS magnitudes and  $UBVRcIc$  given by



**Figure 1.** Distribution, in the semi-major versus eccentricity space, of all the known NEOs. The different symbols and colours indicate objects of the diverse groups: Atiras (black full squares), Aten (green crosses), Apollo (cyan stars), Amor (magenta squares), and objects studied in the present work (blue triangles).

Lupton (2005):

$$\bar{D} = \frac{1340 * 10^{-\frac{1}{5}(H_{OR} + V - R)}}{\sqrt{\rho_v}}. \quad (11)$$

## 4 RESULTS

We derived the photometric properties for six NEOs, i.e. three of the Amor group, (326683) 2002 WP, (489337) 2006 UM and 2005 TF, and three of the Apollo group, (36236) 1999VV, (138846) 2000 VJ61 and 2016 WJ1. The location of these objects in the semi-major axis versus eccentricity space is shown in Fig. 1 along with all the known NEOs.

In what follows we will present the results for each object separately, starting with those of the Amor group and followed by those of Apollo. It is important to note that all the objects were observed at OASI and just 2005 TF had complementary observations obtained at OANLH. In Appendix A the Fourier series coefficients  $A_l$  and  $B_l$  of the composite lightcurves are given for each asteroid, as well as the observational circumstances and the derived magnitudes for each set of data.

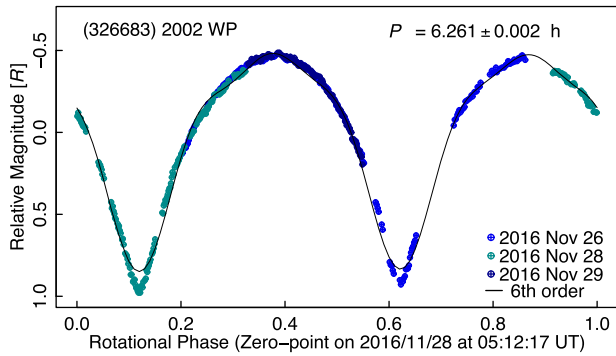
### 4.1 NEOs of the Amor group

#### 4.1.1 (326683) 2002 WP

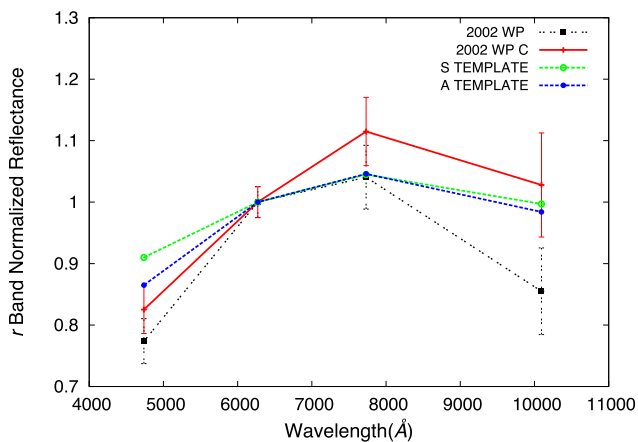
The period for this asteroid was calculated using data obtained on 2016 November 26, 28 and 29. The composite lightcurve was fitted with a sixth-order Fourier series. The derived period,  $P = 6.261 \pm 0.002$  h, and the lightcurve amplitude,  $A = 1.33$  mag (Fig. 2), are similar to that obtained by Vaduvescu et al. (2017) ( $P = 6.273$  h) from observations on 2016 December 2, by Warner (2017b) ( $P = 6.262$  h) from observations on 2016 November 23 and 25 and by Ditteon et al. (2018) ( $P = 6.263$  h) from observations on 2016 November 28 to December 5.

The photometric spectrum for this asteroid was obtained from observations performed on 2016 November 26 and is shown in Fig. 3. In the figure we show the observed magnitudes, normalized at the  $r$  filter, indicated by black dots with corresponding error bars connected by the dotted line. These magnitudes are then corrected to account for the amplitude of the rotational lightcurve, and are shown

<sup>4</sup><http://www.sdss.org/dr12/algorithms/ugrizvegasun/>



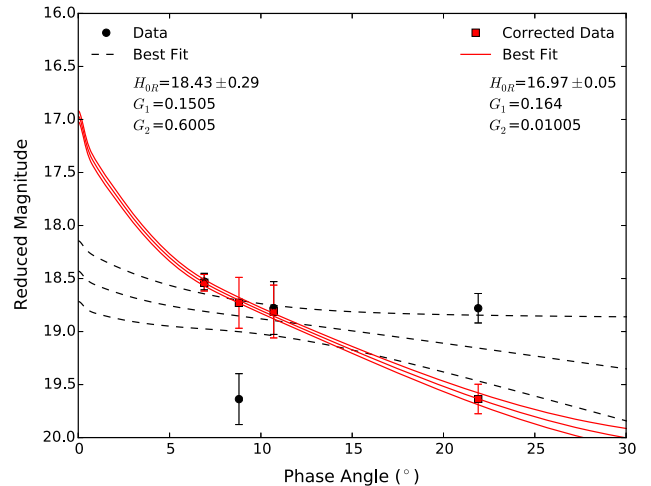
**Figure 2.** Composite lightcurve of the NEO (326683) 2002 WP along with the best Fourier fit (black line).



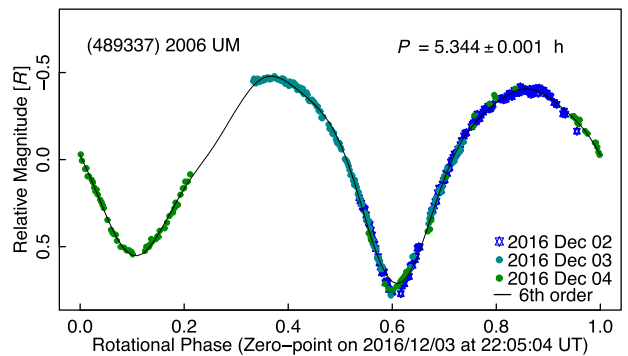
**Figure 3.** Photometric spectrum normalized to the  $r$  filter of the NEO (326683) 2002 WP. The points indicate the magnitude, and respective error, at the band centre for each filter. The diverse lines indicate the observed spectrum (black dotted line), the rotationally corrected spectrum (red solid line) and the templates of the S- (green dashed line) and A-type (blue dashed line) taxonomic classification from Carvano et al. (2010).

by the red dots connected by the solid red line. The significant difference among the two sets of magnitudes is due to the large amplitude of the rotational lightcurve as shown in Fig. 2. The chi-squared test, applied to several templates from the taxonomic scheme by Carvano et al. (2010), indicates that the A-type, of the S-complex, best fits the corrected spectrum. It is important here to note, however, that Carry et al. (2016) classify this asteroid as a D-type using data from the SLOAN-MOC4 catalogue. The discrepancy between the two classifications can be attributed to the large error in the  $z$  filter (of both spectra!) or the large rotational amplitude of this object, or is indicative of surface composition variations. More recently, Erasmus et al. (2017) also observed this NEO and classified it as S-type with a moderate probability (0.47) of belonging to this class. Although this classification is more in agreement with the spectrum given here, we believe that more data are needed to establish the real surface composition of this NEO.

Observations of this asteroid on 2016 November and December allowed magnitudes to be obtained at phase angles ranging from 6.9 to 22 degrees, represented by the black dots in Fig. 4. These observed magnitudes were then corrected to account for the rotational variations and are shown by the red squares in the figure. As expected, due to the large amplitude of the rotational lightcurve, the fit to the corrected magnitudes gives an error envelope much smaller



**Figure 4.** Phase curve of the asteroid (326683) 2002 WP. The black dotted curve and red solid curve represent the fits to the observed and rotationally corrected magnitudes, respectively. In both cases the central curve represents the best fit while the error envelope is given by the upper and lower curves.



**Figure 5.** Composite lightcurve for the NEO (489337) 2006 UM, showing the best Fourier fit (black line).

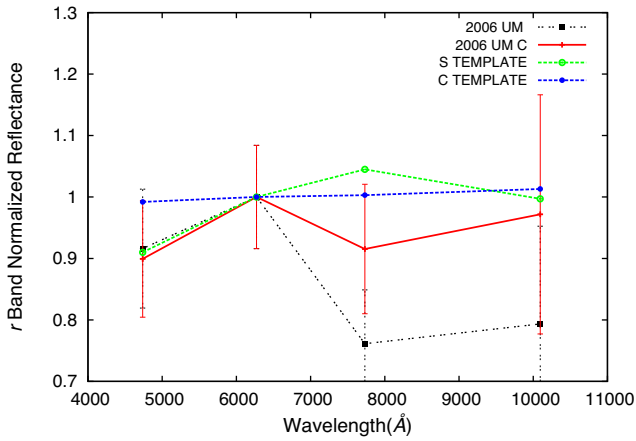
than that to the observed ones. The derived absolute magnitude and slope parameters for this asteroid are:  $H_{0R} = 16.97 \pm 0.05$ ,  $G_1 = 0.164$  and  $G_2 = 0.01005$ . This asteroid is a good example of how important it is to take into account the rotational variations when deriving the absolute magnitude.

Finally, we computed an effective diameter of  $\bar{D} = 0.771 \pm 0.19$  km using equation (11) with the above absolute magnitude and the colour  $V - R = 0.486 \pm 0.035$ , derived from our SLOAN colours, and a visual albedo of  $\rho_v = 0.315 \pm 0.131$ , given in Mainzer et al. (2016).

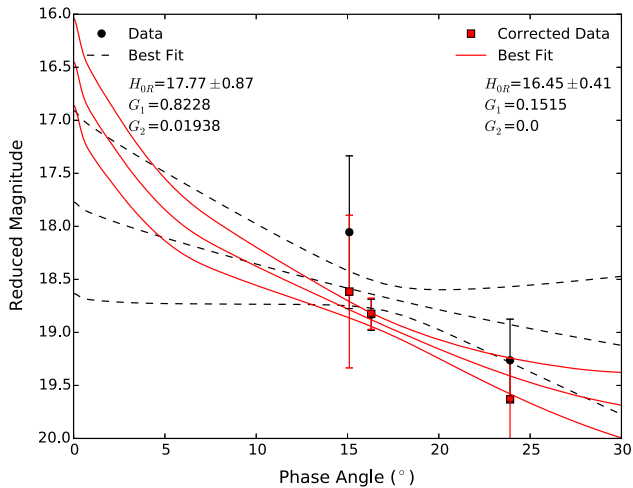
#### 4.1.2 (489337) 2006 UM

This asteroid was observed from 2016 December 2–4, to derive its lightcurve. The data were fitted by a sixth-order Fourier series, giving a rotation period of  $P = 5.344 \pm 0.001$  h and a composite lightcurve amplitude of  $A = 1.191$  mag. The composite lightcurve is shown in Fig. 5 along with the best fit. A similar value,  $P = 5.34480$  h, was obtained by Warner (2017b) from data taken on 2016 November 30 and December 5.

The photometric spectrum of (489337) 2006 UM was derived from observations performed on 2016 December 2, and is shown in Fig. 6, normalized to the  $r$  filter. In the figure, the black dots are



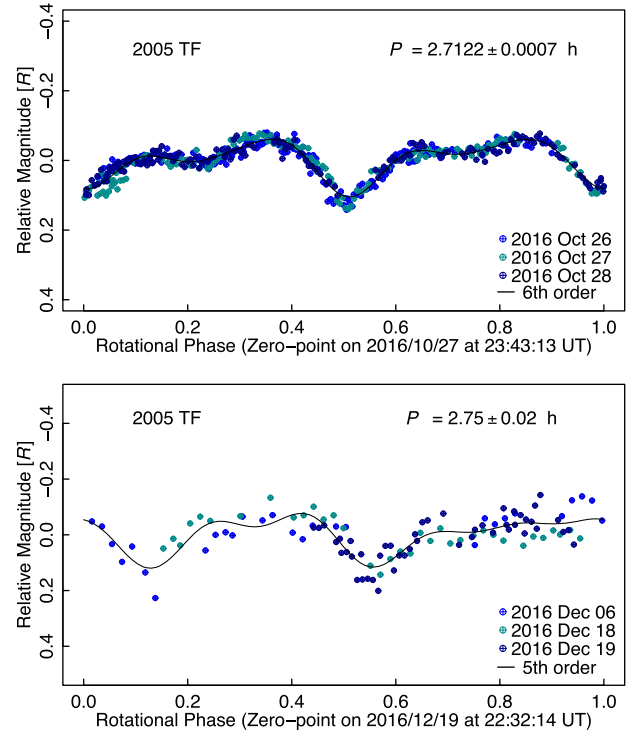
**Figure 6.** Photometric spectrum, normalized to the  $r$  filter, of asteroid (489337) 2006 UM. The points indicate the magnitude, and respective error, at the band centre for each filter. The diverse lines indicate the observed spectrum (black dotted line), the rotationally corrected spectrum (red solid line) and the templates of the S (green dashed line) and C (blue dashed line) taxonomic classification from Carvano et al. (2010).



**Figure 7.** Phase curve for asteroid (489337) 2006 UM. The black dotted curve and red solid curve represent the fits to the observed and rotationally corrected magnitudes, respectively. In both cases the central curve represents the best fit while the error envelope is given by the upper and lower curves.

the observed magnitudes in each filter, with the respective error, while the red dots are the magnitudes corrected for the lightcurve amplitude. Although this correction substantially changes the magnitudes, the resulting reflectance spectrum is not similar to any taxonomic template of Carvano et al. (2010). Taking into account the large errors in the observed magnitudes, this spectrum can be considered compatible with the C-class.

The phase curve for asteroid (489337) 2006 UM contains just a few magnitudes taken on 2016 November and over a very limited solar phase range. These are shown in Fig. 7, where the observed and corrected magnitudes are indicated by black and red points, respectively. The best fit to each data set give quite different values for the absolute magnitudes, i.e.  $H_{0R} = 17.77 \pm 0.87$  and  $H_{0R} = 16.45 \pm 0.41$ . Obviously, the large error envelopes are to be attributed to the small range in solar phase angles, and far from the opposition, covered by the data. It is to be noted, however, that these



**Figure 8.** Composite lightcurve for 2005 TF with the best Fourier fit (black line). The upper and lower panels show data obtained at OASI and OANLH, respectively.

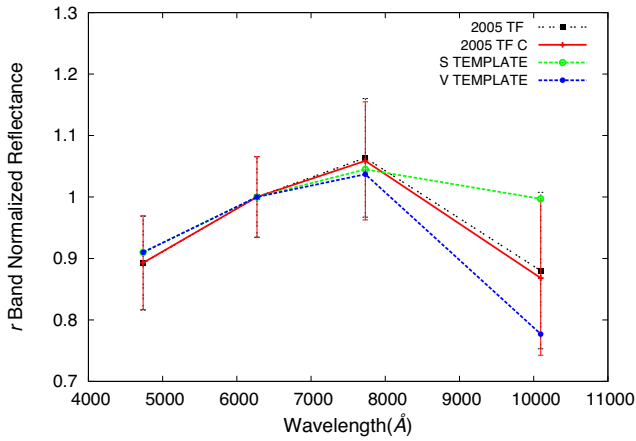
are quite reduced when correcting the magnitudes for the asteroid rotation.

If we assume a C-type taxonomic classification for this NEO, we can assume an albedo  $\rho_v = 0.059 \pm 0.073$ , which is the mean value of the class as given by Mainzer et al. (2011). Then, using the obtained colour  $V - R = 0.429 \pm 0.110$ , we can compute an effective diameter of  $\bar{D} = 2.26$  for this asteroid, but due to the uncertainties on the taxonomic classification the obtained diameter is just indicative.

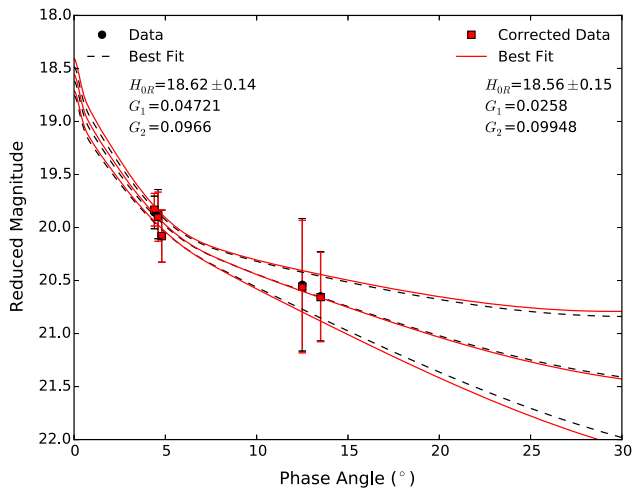
#### 4.1.3 2005 TF

This asteroid was the only one of our sample for which lightcurves were obtained both at OASI, from 2016 October 26–28, and at OANLH, on 2016 December 6, 18 and 19. The OASI observations were fitted by a sixth-order Fourier series yielding a rotation period of  $P = 2.7122 \pm 0.0007$  h with a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.166$  mag (Fig. 8). The OANLH observations were fitted by a fifth-order Fourier series deriving a period of  $P = 2.75 \pm 0.02$  and amplitude of  $A = 0.21$ . Similar values were obtained by Vaduvescu et al. (2017),  $P = 2.724 \pm 0.005$  h and  $A = 0.22$ , from observations on 2016 November 14. Slightly different values were derived by Warner (2017a),  $P = 2.57 \pm 0.005$  h and  $A = 0.29$ , from observations on 2016 September 28–30 and October 1–2. The small variations among the diverse determinations might be attributed to the small amplitude of the lightcurves and the large scattering in the observed magnitudes.

The photometric spectrum for 2005 TF was determined using observations acquired on 2016 October 24 and is shown in Fig. 9. In the figure, the diverse lines represent the observed (dotted black) and the rotation-corrected (solid red) spectra along with templates of S- and V-types from Carvano et al. (2010) (dotted green and blue,



**Figure 9.** Photometric spectrum normalized to the  $r$  filter of the NEO 2005 TF. The points indicate the magnitude, and respective error, at the band centre for each filter. The diverse lines indicate the observed spectrum (black dotted line), the rotationally corrected spectrum (red solid line) and the templates of the S- (green dashed line) and V-type (blue dashed line) taxonomic classification from Carvano et al. (2010).

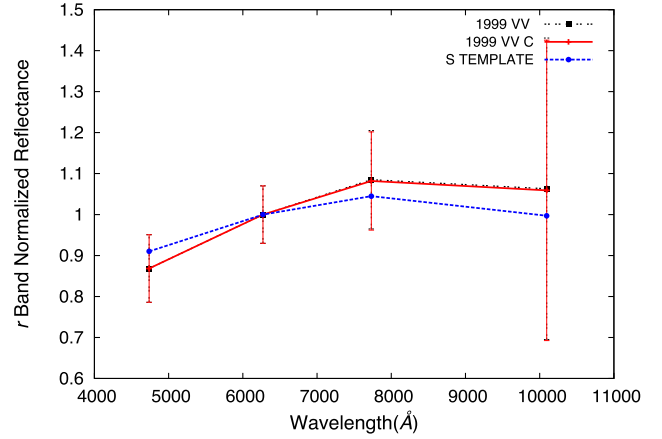


**Figure 10.** Phase curve of the asteroid 2005TF. The black dotted curve represents the fit to the observed magnitudes and the red solid curve that to the rotationally corrected magnitudes. In both case the central curve is the best fit to the data and the upper and lower curves represent the error envelope.

respectively). It is possible to note that the observed and corrected magnitudes do not change significantly due to the small amplitude of the rotational lightcurve. The chi-squared test indicates that the V-type best fits the obtained corrected spectrum.

The phase curve for this NEO was derived from observations performed at OASI over several nights in 2016 December, when the solar phase angle of the asteroid spanned a range from 4.4–13.5 degrees. The obtained magnitudes were corrected by rotation although this resulted in tiny variations due to the small amplitude of the lightcurve.

In Fig. 10 we show the obtained and corrected magnitudes for 2005 TF that give  $H_{0R} = 18.62$ ,  $G_1 = 0.04721$  and  $G_2 = 0.0966$ . It should be noted that, due to the small amplitude of the lightcurve, these values do not change significantly when using rotationally corrected magnitudes.



**Figure 11.** Photometric spectrum, normalized to the  $r$  filter, of the NEO (36236) 1999 VV. The points indicate the magnitude, and respective error, at the band centre for each filter. The diverse lines indicate the observed spectrum (black dotted line), the rotationally corrected spectrum (red solid line) and the template of the S-type (blue dashed line) taxonomic classification from Carvano et al. (2010).

Finally, to determine the effective diameter of the asteroid we first compute the colour  $V - R = 0.434 \pm 0.085$  from our SDSS colours. Then, considering an albedo of  $\rho_V = 0.350 \pm 0.109$ , which is the mean value for the V class as given by Mainzer et al. (2011), we derive the value of  $\bar{D} = 0.361 \pm 0.095$  km.

## 4.2 NEOs of the Apollo group

### 4.2.1 (36236) 1999 VV

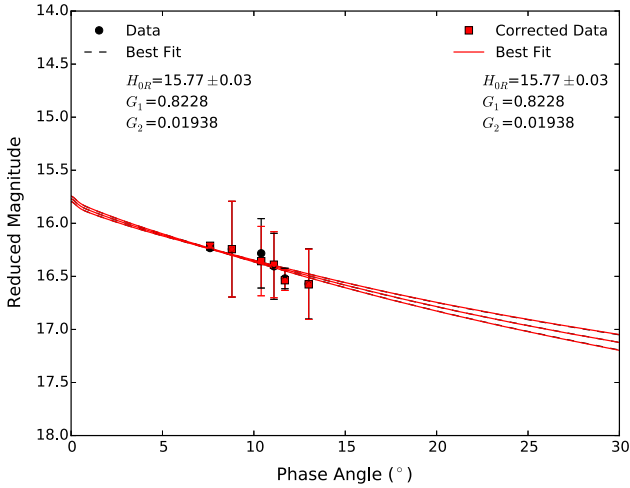
The photometric spectrum for (36236) 1999 VV was obtained with observations performed on 2016 November 27. To perform the correction for the rotation, however, we used data available in the Asteroid Lightcurve Photometry Database (ALCDEF)<sup>5</sup> since it was not possible to derive the lightcurve from our observations. This lightcurve was obtained from data acquired on 2016 November 22, 23 and 25, i.e. on nights very near those of our observations. We thus used the values of  $P = 6.191 \pm 0.02$  h and  $A = 0.132$  mag as derived by Warner (2017b).

In Fig. 11 are given the observed and corrected magnitudes (black and red dots), which are very similar due to the small amplitude of the composite rotational lightcurve. The best fit is obtained for a template of the S-type taxonomic class, which is shown by the blue dotted line.

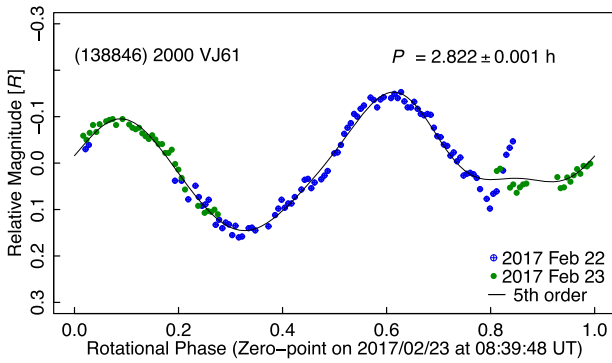
The phase curve for this asteroid was determined from observations obtained during several nights on 2016 November and December, spanning phase angles from 7.6 to 13 degrees. In Fig. 12 are shown the obtained magnitudes along with the best fit, which give the values  $H_{0R} = 15.77 \pm 0.03$ ,  $G_1 = 0.8228$  and  $G_2 = 0.01938$ .

The effective diameter,  $\bar{D} = 1.615 \pm 0.370$ , for asteroid (36236) 1999 VV was computed from equation (11) using the determined colour  $V - R = 0.416 \pm 0.094$  and the absolute magnitude  $H_{0R}$ , as well as the average albedo for the S taxonomic class (Mainzer et al. 2011).

<sup>5</sup><http://alcdef.org>



**Figure 12.** Phase curve of the asteroid (36236) 1999 VV. The black dotted curve represents the fit to the observed magnitudes and the red solid curve that to the rotationally corrected magnitudes. In both cases the central curve is the best fit to the data and the upper and lower curves represent the error envelope.

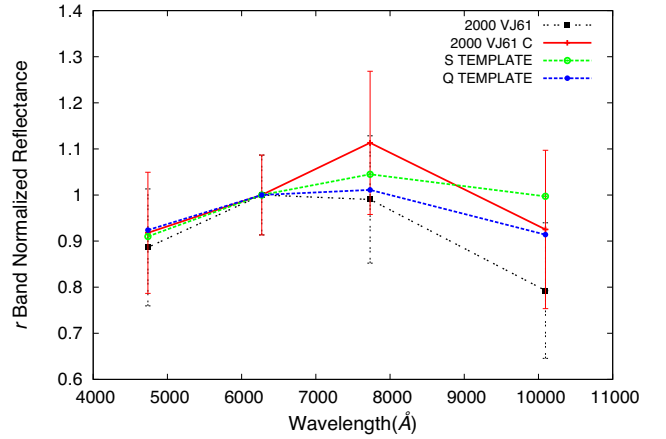


**Figure 13.** Composite lightcurve for the NEO (138846) 2000 VJ61, showing the best Fourier fit (black line).

#### 4.2.2 (138846) 2000 VJ61

We observed this NEO on 2017 February 22 and 23 to derive its lightcurve. The obtained data were fitted by a fifth-order Fourier series, deriving a rotation period of  $P = 2.822 \pm 0.01$  h and a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.30$  mag, as shown in Fig. 13. Erasmus et al. (2017) reported this asteroid as a rapid rotator with a period  $P = 1.29$  h, derived from data obtained over 1.13 h on 2017 February 12. We tried to fit this period to our data, but without success. The good fit to the data with a period of about 2.8 h seems to confirm that our value is the correct one.

The photometric spectrum for this asteroid was determined using magnitudes obtained on 2016 December 6. The magnitudes were corrected to account for the rotational variations as given by the lightcurve (Fig. 13), since the lightcurve amplitude is appreciable. In Fig. 14 are given the observed and corrected magnitudes as well as the derived spectra. Comparing the obtained spectrum with diverse templates of the Carvano et al. (2010) taxonomic scheme, the best fit was obtained for the Q-type class, although the S class cannot be excluded. Although Carry et al. (2016) classify this asteroid as a C-type, analysis of their data indicates that an S-type class cannot be ruled out, since the error in the  $z$  filter is quite large, as in our spectrum. Moreover, these authors do not take into account



**Figure 14.** Photometric spectrum normalized to the  $r$  filter of the NEO (138846) 2000 VJ61. The points indicate the magnitude, and respective error, at the band centre for each filter. The diverse lines indicate the observed spectrum (black dotted line), the rotationally corrected spectrum (red solid line) and the templates of the S- (green dashed line) and Q-type (blue dashed line) taxonomic classification from Carvano et al. (2010).

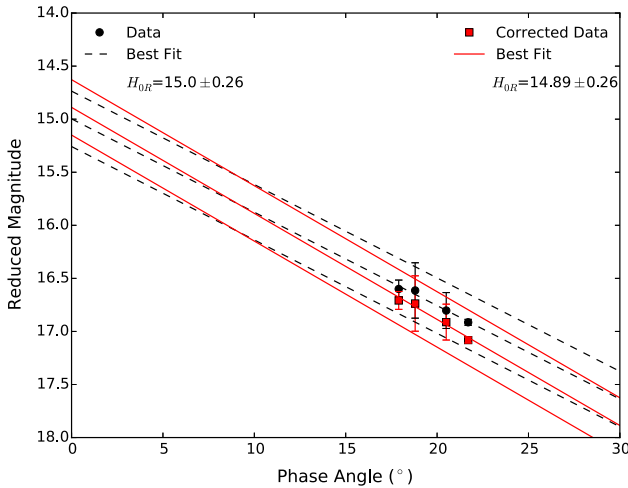
**Table 1.** Summary of the physical parameters derived for each observed NEO.

Asteroid	$P$ (h)	$A$	$T_x$	$V - R$	$H_{0R}$
Amor Group					
(326683) 2002 WP	6.261	1.33	A	0.486	16.97
(489337) 2006 UM	5.344	1.191	C?	0.429	16.45
2005 TF	2.7122	0.22	V	0.434	18.56
Apollo Group					
(36236) 1999 VV	6.191	0.132	S	0.452	15.77
(138846) 2000 VJ61	2.822	0.30	Q	0.416	14.89
2016 WJ1	2.944	0.116	–	–	20.98
Asteroid	$H_0$	$G_1$	$G_2$	$\bar{D}$ (km)	
Amor Group					
(326683) 2002 WP	17.46	0.164	0.010 05	0.771	
(489337) 2006 UM	16.88	0.1515	0.0	2.262	
2005 TF	18.99	0.0258	0.099 48	0.361	
Apollo Group					
(36236) 1999 VV	16.22	0.8228	0.019 38	1.615	
(138846) 2000 VJ61	15.306	–	–	–	
2016 WJ1	–	0.2588	0.3721	–	

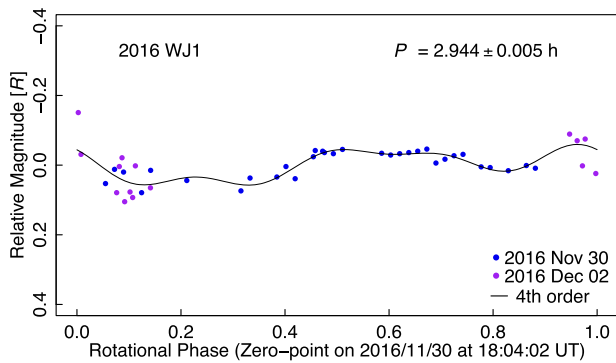
$P$  = period,  $A$  = amplitude,  $T_x$  = taxonomic class,  $V - R$  = colour  
 $H_{0R}$  = absolute magnitude in the  $R$  filter  
 $H_0$  = absolute magnitude in the  $V$  filter  
 $G_1 - G_2$  = slope parameters  
 $\bar{D}$  = effective diameter

the amplitude of the lightcurve, which in this case can be large, substantially modifying the spectrum and the classification. It must be noted that Erasmus et al. (2017) classify this asteroid as S-type, with a high probability (0.81) of belonging to this class. Anyhow, we believe that new observations are necessary to firmly establish the taxonomic classification of this asteroid as well as to verify the existence of compositional variations on its surface. The obtained magnitudes also allowed derivation of the colour  $V - R = 0.416 \pm 0.136$  for this object.

Magnitudes in the  $R$ -Cousins filter were obtained for this NEO on some nights in 2016 November and December, spanning a very limited interval of solar phase angles and far from opposition: from



**Figure 15.** Phase curve of the asteroid (138846) 2000 VJ61. The black dotted curve represents the fit to the observed magnitudes and the red solid curve that to the rotationally corrected magnitudes. In both cases the central curve indicates the best fit to the data and the upper and lower curves represent the error envelope.

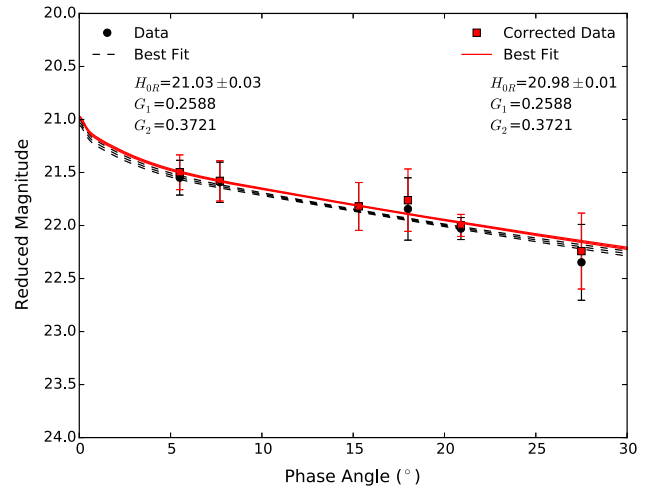


**Figure 16.** Composite lightcurve of the NEO 2016 WJ1, showing the best fit (black line).

17.9 to 21.7 degrees. The obtained phase curve is given in Fig. 15 in which are shown the observed magnitudes as well as those corrected by the rotation. Due to the very limited interval in phase angles, the absolute magnitude was obtained by a linear fit to the corrected data, giving a value of  $H_{0R} = 14.89$  (Fig. 15, solid red curve). The large uncertainty on the absolute magnitude did not allow us to derive an effective diameter for this asteroid.

#### 4.2.3 2016 WJ1

To derive the rotation period for asteroid 2016 WJ1, we performed observations on 2016 November 30 and December 2. The obtained data were fitted by a fourth-order Fourier series, giving a rotation period of  $P = 2.944 \pm 0.05$  h and composite lightcurve amplitude of  $A = 0.116$  mag (Fig. 16). Erasmus et al. (2017), from observations over 1.783 h on 2016 November 29, concluded that this asteroid is a rapid rotator with  $P = 20$  min. This result was not confirmed by Warner (2017b), which derived a period of  $P = 2.68$  h with observations obtained from 2016 November 28–30. Although this value is very similar to ours, the small amplitude of the composite lightcurve makes it more difficult to derive the period. We believe



**Figure 17.** Phase curve of the asteroid 2016 WJ1. The black dotted curve represents the fit to the observed magnitudes and the red solid curve that to the rotationally corrected magnitudes. In both cases the central curve indicates the best fit to the data and the upper and lower curves represent the error envelope.

that new observations are necessary to establish with precision the rotation period for this asteroid.

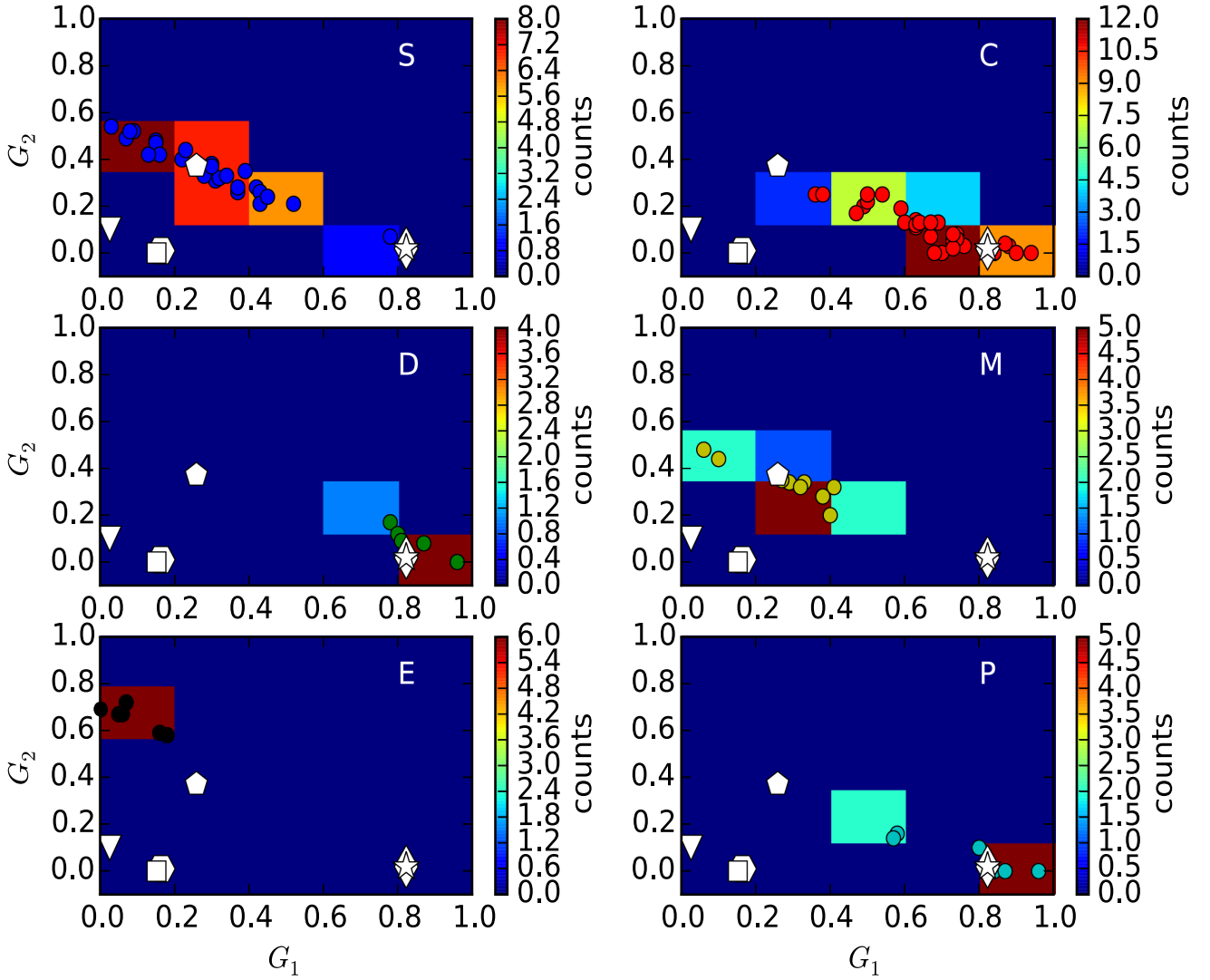
Observations of this asteroid over several nights in 2016 November and December enabled us to obtain magnitudes, in the *R*-Cousins filter, between 5.5 and 27.5 degrees in solar phase angles, the largest range in the present work. In Fig. 17 are shown the observed magnitudes and their best fit, indicated by black dots and lines. Due to the small amplitude of the composite lightcurve, the corrected magnitudes (in red) show minor variations. The derived absolute magnitude is  $H_{0R} = 20.98 \pm 0.01$  and the slope parameters are  $G_1 = 0.2588$  and  $G_2 = 0.3721$ .

For this asteroid, photometric observations were attempted on 2016 December 2 and 5, but the atmospheric conditions were poor on the first night, and the asteroid was very near a bright star on the second. Therefore, we were unable to derive the taxonomic type and the effective diameter for the NEO 2016 WJ1.

## 5 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

We obtained a set of physical parameters for six NEOs, i.e. three of the Amor and three of the Apollo groups. For each asteroid we performed observations on almost consecutive nights to accompany the brightness variations with rotation, wavelength and solar illumination. To achieve this goal, for each selected asteroid, we construct the lightcurve, the photometric spectra, and the phase curve. The results are summarized in Table 1, where for each NEO is given: the rotation period,  $P$ ; the amplitude of the composite lightcurve at the time of observations,  $A$ ; the taxonomic class,  $T_x$ ; the colour ( $V - R$ ); the absolute magnitude in the *R* filter,  $H_{0R}$ ; the absolute magnitude in the *V* filter,  $H_0$ ; the slope parameters,  $G_1 - G_2$ ; and the effective diameter  $\bar{D}$ .

We note that all the observed NEOs have rotation periods in a range from 2.7–6.2 h and the corresponding lightcurves have amplitudes between 0.116 and 1.3 mag. These values were used to correct the magnitudes of the photometric spectra and the phase curves for each NEO. The present results confirm that these corrections are in fact very relevant, in particular when the amplitude is large. In the case of asteroids (489337) 2006 UM and (326683)



**Figure 18.** Bidimensional histogram of the slope parameters  $G_1$ ,  $G_2$  in different taxonomical classes for the sample of 93 main-belt asteroids given in Shevchenko et al. (2016). The positions of our objects are indicated by the following large white symbols: hexagon, (326683) 2002 WP; square, (489337) 2006 UM; triangle, 2005 TF; diamond, (36236) 1999 VV; star, (138846) 2000 VJ61; and pentagon, 2016 WJ1.

2002 WP, for example, the error in the absolute magnitude decreased from 0.87 to 0.41 mag and from 0.29 to 0.05 mag, respectively. Thus, not correcting the magnitudes to account for the rotational variations of the asteroid can lead to unrealistic physical parameters.

Among the six studied asteroids, we have determined their taxonomic classifications with significant confidence, with three of the S-complex, (36236) 1999 VV, (138846) 2000 VJ61 and (326683) 2002 WP, and one of the V-type, 2005 TF. Note that these classifications are consistent with Erasmus et al. (2017), where (326683) 2002 WP and (138846) 2000 VJ61 are classified as S-type. In the case of asteroid (489337) 2006 UM, the large errors in the magnitudes, especially in the  $z$  filter, do not allow for a firm classification. Although the best fit within the classification scheme of Carvano et al. (2010) is the C-type template, other classifications cannot be ruled out.

In order to examine our values of slope parameter within the taxonomic classification approach, we plotted them in the phase space  $G_1 \times G_2$ , together with those of 93 main-belt asteroids of different classes given by Shevchenko et al. (2016), as shown in Fig. 18. In this figure the 93 main-belt asteroids are shown

by coloured dots separately in the respective plots, S, C, D, M, E and P, according to the taxonomic classification attributed to Shevchenko et al. (2016). The coloured rectangles indicate the population density. The NEOs studied in the present work are shown in white symbols. According to these plots, the three asteroids of the Amor group do not fit within any region, in any taxonomic class, and, more importantly, do not even follow the linear trend shown by the data in Shevchenko et al. (2016). For the three asteroids of the Apollo group, we can observe that asteroid 2016 WJ1 can be classified as S-type or M-type (of the X-complex) while (36236) 1999 VV and (138846) 2000 VJ61 are D-, C- or P-type and even S-type, where all these asteroids follow the linear trend showed by Shevchenko et al. (2016). For asteroid 2016 WJ1 we do not have a photometric spectrum in order to compare, but Erasmus et al. (2017) classified this object as X-type, this being one of the possibilities given by the  $G_1 - G_2$  values. For asteroid (36236) 1999 VV, the obtained spectrum (Fig. 11) seems to be compatible with an S-type. However, due to the large errors in the  $z$  filter, a D-type classification cannot be ruled out. For asteroid (138846) 2000 VJ61, the obtained spectrum can be best fitted by a Q-type template (note that this



**Table 2.** Probability of each observed asteroid belonging to a given taxonomic class having specific values  $G_1 - G_2$ .

Asteroid	$\mathcal{P}_{SG_1G_2}$	$\mathcal{P}_{CG_1G_2}$	$\mathcal{P}_{DG_1G_2}$	$\mathcal{P}_{MG_1G_2}$	$\mathcal{P}_{EG_1G_2}$	$\mathcal{P}_{PG_1G_2}$
Amor Group						
(326683) 2002 WP	0	0	0	0	0	0
(489337) 2006 UM	0	0	0	0	0	0
2005 TF	0	0	0	0	0	0
Apollo Group						
(36236) 1999 VV	0	0.016	0.029	0	0	0.014
(138846) 2000 VJ61	0	0.016	0.029	0	0	0.014
2016 WJ1	0.018	0	0	0.0097	0	0

class is part of the S-complex). Using the values of  $G_1 - G_2$  given in Fig. 18, we observe that in the Shevchenko et al. (2016) sample there is just one object of the S-complex with values similar to the ones obtained here.

We further computed the probability of an asteroid belonging to a given spectral type and having specific values of  $G_1$  and  $G_2$ . This was done using equation (12), where  $\mathcal{P}_X$  is the probability of the asteroid having a specific taxonomy type,  $\mathcal{P}_{G_1G_2}$  is the probability of having values  $G_1$  and  $G_2$  inside a specific bin,  $\mathcal{N}_X$  is the number of asteroids in a specific taxonomy class,  $\mathcal{N}_T$  is the total number of asteroids in the sample of Shevchenko et al. (2016), and  $\mathcal{N}_{G_1G_2}$  is the number of particles inside a specific bin.

In Table 2 we can observe that the three asteroids of the Amor group have zero probability of belonging to one of the taxonomic classes showed by Shevchenko et al. (2016). Among the Apollo group, two NEOs, (36236) 1999 VV and (138846) 2000 VJ61, have a higher probability of belonging to the D class and 2016 WJ1 to the S class. For these asteroids, however, the probability of belonging to another taxonomic class is not null. Although this analysis confirms the result obtained from Fig. 18, the results are intriguing. It is to be noted that for the Amor asteroids we have good photometric spectra for two of them: (326683) 2002 WP and 2005 TF, classified as S-type and V-type, respectively. However, the above analysis fails for both asteroids. We can speculate that this is due to the different size ranges of our sample and that of Shevchenko et al. (2016). It is noteworthy that the  $G_1 - G_2$  values given by this author are for main-belt asteroids, which are much larger than those studied here:

$$\mathcal{P}_{XG_1G_2} = \mathcal{P}_X \mathcal{P}_{G_1G_2} = \left( \frac{\mathcal{N}_X}{\mathcal{N}_T} \right) \left( \frac{\mathcal{N}_{G_1G_2}}{\mathcal{N}_X} \right)^2. \quad (12)$$

The first conclusion that we can derive from the above analysis is that the number of objects with good slope parameters and taxonomic classification among the NEO population continues to be very small. Projects like the IMPACTON are therefore very important to increase the sample of NEOs with reliable physical parameters and thus to better understand this very intriguing population. The second conclusion regards the importance of performing a complete photometric characterization in order to derive reliable physical properties. As we have clearly shown, all the physical parameters are related and we cannot derive one without taking into account the others. An obvious example is the photometric magnitude of an asteroid, which depends on the brightness variations due to its shape.

Last but not least, it is noteworthy that among the five NEOs for which a photometric spectrum was obtained and a taxonomic classification was possible, four belong to the S-complex. Erasmus et al. (2017) use photometry on the Johnson–Cousins filters to derive the taxonomic classification for a sample of 39 NEOs, and

report that the number of S-type NEOs appears to be similar to that of the C-complex (plus D and X classes). This result seems not to be in agreement with the work by Carry et al. (2016), which classifies 206 NEOs from SDSS colours, as well as with theoretical works (e.g. Bottke et al. 2002; Greenstreet, Ngo & Gladman 2012), which indicate a greater flux of NEOs from the inner main belt, where there is a majority of S-type asteroids. Differences among the diverse samples and the methodologies used to derive the results might account for the discrepancies in the results but the important point is that only a much larger data set of NEOs with reliable physical parameters will allow this interesting population to be better constrained.

## ACKNOWLEDGEMENTS

ER, PA, FM and HM would like to thank CNPq and CAPES for their support through diverse fellowships. Support by CNPq (305409/2016-6) and FAPERJ (E-26/202.841/2017) is acknowledged by DL. The authors are grateful to the IMPACTON team, in particular to R. Souza and A. Santiago for the technical support. Observations were obtained at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Itacuruba) of the Observatório Nacional (ON-Brazil), with complementary observations from the Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato operated by Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA-Venezuela).

## REFERENCES

- Bottke W. F., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J.-M., Levison H. F., Michel P., Metcalfe T. S., 2002, *Icarus*, 156, 399
- Bowell E., Lumme K., 1979, in Gehrels T., Matthews M. S., eds, *Asteroids*, University of Arizona Press, Tucson. p. 132
- Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. W., 1989, in Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S., eds, *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson. p. 524
- Carry B., Solano E., Eggl S., DeMeo F. E., 2016, *Icarus*, 268, 340
- Carvano J. M., Hasselmann P. H., Lazzaro D., Mothé-Diniz T., 2010, *A&A*, 510, A43
- Ditteen R. et al., 2018, *Minor Planet Bull.*, 45, 13
- Erasmus N., Mommert M., Trilling D. E., Sicking A. A., van Gend C., Hora J. L., 2017, *AJ*, 154, 162
- Fowler J., Chillemi J., 1992, Tedesco, IRAS asteroid data processing. Vol. 17, Tech. Rep., Hanscom Air Force Base, MA, Phillips Laboratory, Phillips Laboratory, Hanscom Air Force Base, Massachusetts
- Gehrels T., Coffeen T., Owings D., 1964, *AJ*, 69, 826
- Greenstreet S., Ngo H., Gladman B., 2012, *Icarus*, 217, 355
- Hapke B., 1990, *Icarus*, 88, 407
- Hapke B., 1993, *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*, Cambridge University Press, Cambridge
- Hapke B., 2002, *Icarus*, 157, 523
- Harris A. W. et al., 1989, *Icarus*, 77, 171

Harris A. W., Lagerros J. S. V., 2002, in Bottke W., Cellino A., Paolicchi P., eds, in *Asteroids in the Thermal Infrared*, University of Arizona Press, Tucson, p. 205

Howell S. B., 1989, *PASP*, 101, 616

Kaasalainen M. et al., 2004, *Icarus*, 167, 178

Lumme K., Bowell E., 1981, *AJ*, 86, 1694

Lupton R., 2005, Transformations between SDSS magnitudes and UBVRIc, Available at: <http://www.sdss.org/dr4/algorithm/sdssUBVRITransform.html>

Mainzer A. et al., 2011, *ApJ*, 741, 90

Mainzer A. K. et al., 2016, NASA Planetary Data System, 247EAR

Mommert M. et al., 2016, *AJ*, 151, 98

Muinsonen K., Belskaya I. N., Cellino A., Delbò M., Levasseur-Regourd A.-C., Penttilä A., Tedesco E. F., 2010, *Icarus*, 209, 542

Penttilä A., Shevchenko V. G., Wilkman O., Muinsonen K., 2016, *Planet. Space Sci.*, 123, 117

Perna D. et al., 2017, *A&A*, 599, L1

Pravec P., Šarounová L., Wolf M., 1996, *Icarus*, 124, 471

Pravec P., Wolf M., Šarounová L., 1998, *Icarus*, 136, 124

Seeliger H., 1887, Zur Theorie der Beleuchtung der grossen Planeten insbesondere des Saturn. Aus den Abhandlungen der k. bayer. Akademie der Wiss. II Cl. 16 Bd. II Abth. Verlag der k. Akademie in Comm. bei G. Franz, Bayer Akademie der Wissenschaften, Munich, Germany

Shevchenko V. G. et al., 2016, *Planet. Space Sci.*, 123, 101

Thorpe T. E., 1978, *Icarus*, 36, 204

Vaduvescu O. et al., 2017, *Earth Moon Planets*, 120, 41

Verbiscer A. J., Veverka J., 1995, *Icarus*, 115, 369

Warner B. D., 2017a, *Minor Planet Bull.*, 44, 22

Warner B. D., 2017b, *Minor Planet Bull.*, 44, 98

Warner B. D., Harris A. W., Pravec P., 2009, *Icarus*, 202, 134

Whiteley R. J., Tholen D. J., Hergenrother C. W., 2002, *Icarus*, 157, 139

Zappala V., Cellino A., Barucci A. M., Fulchignoni M., Lupishko D. F., 1990, *A&A*, 231, 548

## APPENDIX A: ADDITIONAL TABLES

In what follows are given the observational circumstances and the derived parameters described in the paper. In Table A1 are given the values of the Fourier series of the composite rotational lightcurve for each observed asteroid. The observational circumstances of the data obtained to derive the rotational lightcurves, the photometric spectra and the phase curves are given in Tables A2, A3 and A4 respectively.

**Table A1.** Fourier series coefficients. Columns A1–A6 are the sine terms and B1–B6 are the cosine terms of the Fourier model for the lightcurve. The order of best fits is given by the number of coefficients.

Asteroid	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4	A5	B5	A6	B6
<b>Amor Group</b>												
(326683) 2002 WP	0.003 83	0.012 03	0.579 25	0.028 06	−0.002 73	0.010 84	0.023 24	−0.180 89	0.000 58	−0.006 71	−0.078 56	−0.012 07
(489337) 2006 UM	−0.008 87	0.003 28	0.494 42	0.060 19	−0.056 71	0.014 57	0.044 45	−0.084 97	0.017 82	0.015 71	−0.027 15	−0.031 55
2005 TF (OASI)	0.0048	−0.002 85	0.022 17	0.046 86	−0.005 48	−0.006 57	−0.001 23	0.037 91	−0.003 04	−0.000 91	0.002 16	0.007 13
2005 TF (CIDA)	0.0032	−0.0086	0.063	0.012	−0.0046	−0.029	0.02	−0.016	−0.026	−0.011	−	−
<b>Apollo Group</b>												
(36236) 1999 VV	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−
(138846) 2000 VJ61	0.022 50	0.012 45	−0.006 52	−0.076 60	−0.045 96	0.044 50	−0.014 46	0.004 57	−0.014 48	0.012 41	−	−
2016 WJ1	0.006 80	0.017 58	0.017 64	−0.018 86	0.007 57	−0.026 88	0.006 93	0.008 43	−	−	−	−

**Table A2.** Observational circumstances of the rotational lightcurve data. For each asteroid is given: the name, the observation interval, the number of images used, the total span of time of the observations, the distance to the Earth ( $\Delta$ ) and to the Sun ( $r$ ), the solar phase angle ( $\alpha$ ), the apparent  $\bar{V}$  magnitude and the observatory where the data were acquired. The values of  $\Delta$ ,  $r$ ,  $\alpha$  and  $\bar{V}$  are given for the start date.

Asteroid	Date	Images used	Observed time (h)	$\Delta$ (au)	$r$ (au)	$\alpha$ (°)	$\bar{V}$	Observatory
<b>Amor Group</b>								
(326683) 2002 WP	2016/11/26–2016/11/29	466	8.0	0.169	1.142	22.2	15.9	OASI
(489337) 2006 UM	2016/12/02–2016/12/04	379	7.5	0.190	1.149	28.8	16.4	OASI
2005 TF	2016/10/26–2016/10/29	548	11.0	0.143	1.137	4.5	16.7	OASI
	2016/12/06–2016/12/19	112	8.0	0.103	1.072	31.6	16.8	CIDA
<b>Apollo Group</b>								
(138846) 2000 VJ61	2017/02/22–2017/02/23	143	4.5	0.420	1.118	61.7	16.5	OASI
2016 WJ1	2016/11/30–2016/12/02	47	4.0	0.133	1.117	11.0	17.8	OASI

**Table A3.** Observational circumstances and derived magnitudes of the photometric spectra. For each asteroid is given: the name, the date and start time, the filter, the calibrated magnitude (mag) and its error ( $\Delta\text{mag}$ ), the averaged magnitude ( $\overline{\text{mag}}$ ) and its error ( $\Delta\overline{\text{mag}}$ ), the averaged magnitude corrected by rotation ( $\overline{\text{mag}}_c$ ) and its error ( $\Delta\overline{\text{mag}}_c$ ), and the solar phase angle ( $\alpha$ ) at the start instant.

Asteroid	Date	UT	Filter	mag	$\Delta\text{mag}$	$\overline{\text{mag}}$	$\Delta\overline{\text{mag}}$	$\overline{\text{mag}}_c$	$\Delta\overline{\text{mag}}_c$	$\alpha$ (°)				
(326683) 2002 WP	2016/11/27	04:29:27.11	<i>g</i>	16.2255	0.014	16.602	0.017 6429	16.532	0.017 6429	21.9				
	2016/11/27	04:36:51.02	<i>g</i>	16.301	0.016									
	2016/11/27	04:44:14.44	<i>g</i>	16.4155	0.016									
	2016/11/27	04:51:38.49	<i>g</i>	16.5565	0.017									
	2016/11/27	04:59:02.28	<i>g</i>	16.6755	0.0185									
	2016/11/27	05:06:35.08	<i>g</i>	16.9095	0.019									
	2016/11/27	05:14:00.74	<i>g</i>	17.1305	0.023									
	2016/11/27	04:27:50.22	<i>r</i>	15.5205	0.011						15.8835	0.013 6429	15.8835	0.013 6429
	2016/11/27	04:35:13.24	<i>r</i>	15.5945	0.0115									
	2016/11/27	04:42:36.89	<i>r</i>	15.6735	0.012									
	2016/11/27	04:50:00.91	<i>r</i>	15.827	0.0135									
	2016/11/27	04:57:24.61	<i>r</i>	15.9585	0.014									
	2016/11/27	05:04:58.11	<i>r</i>	16.198	0.0165									
	2016/11/27	05:12:23.02	<i>r</i>	16.4125	0.017	15.7304	0.0205	15.6554	0.0205					
	2016/11/27	04:31:01.81	<i>i</i>	15.317	0.016									
	2016/11/27	04:38:25.60	<i>i</i>	15.38	0.018									
	2016/11/27	04:45:49.00	<i>i</i>	15.5665	0.0185									
	2016/11/27	04:53:13.17	<i>i</i>	15.67	0.0195									
	2016/11/27	05:00:36.85	<i>i</i>	15.85	0.0215									
	2016/11/27	05:08:10.85	<i>i</i>	16.042	0.022									
	2016/11/27	05:15:35.36	<i>i</i>	16.2875	0.028									
	2016/11/27	04:33:05.97	<i>z</i>	15.384	0.0295						15.9136	0.055 8571	15.7136	0.055 8571
	2016/11/27	04:40:29.81	<i>z</i>	15.505	0.035									
	2016/11/27	04:47:53.60	<i>z</i>	15.691	0.0425									
	2016/11/27	04:55:17.47	<i>z</i>	15.9195	0.053									
	2016/11/27	05:02:41.10	<i>z</i>	15.9345	0.054									
2016/11/27	05:10:15.55	<i>z</i>	16.2935	0.0685										
2016/11/27	05:17:40.49	<i>z</i>	16.668	0.1085										
(489337) 2006 UM	2016/12/03	01:23:04.60	<i>g</i>	16.677	0.0395	16.7756	0.049	16.7056	0.049	28.8				
	2016/12/03	01:27:40.21	<i>g</i>	16.749	0.0535									
	2016/12/03	01:30:33.48	<i>g</i>	16.8105	0.052									
	2016/12/03	01:33:27.19	<i>g</i>	16.866	0.051									
	2016/12/03	01:21:36.75	<i>r</i>	16.11	0.0435	16.2404	0.045 625	16.1504	0.045 625					
	2016/12/03	01:26:12.82	<i>r</i>	16.2465	0.0445									
	2016/12/03	01:29:05.89	<i>r</i>	16.2655	0.0475									
	2016/12/03	01:31:59.23	<i>r</i>	16.3395	0.047									
	2016/12/03	01:36:00.50	<i>i</i>	16.3185	0.055	16.4264	0.059 25	16.1364	0.059 25					
	2016/12/03	01:39:33.76	<i>i</i>	16.4225	0.062									
	2016/12/03	01:43:06.62	<i>i</i>	16.429	0.057									
	2016/12/03	01:46:40.88	<i>i</i>	16.5355	0.063									
	2016/12/03	01:37:46.07	<i>z</i>	16.445	0.1375	16.3515	0.151 75	16.0415	0.151 75					
	2016/12/03	01:41:18.82	<i>z</i>	16.3125	0.1805									
	2016/12/03	01:44:52.88	<i>z</i>	16.3765	0.127									
	2016/12/03	01:48:26.67	<i>z</i>	16.272	0.162									
2005 TF	2016/10/25	01:16:24.91	<i>g</i>	17.225	0.034	17.289	0.037 25	17.355	0.037 25	4.3				
	2016/10/25	01:28:48.27	<i>g</i>	17.251	0.0345									
	2016/10/25	01:41:14.52	<i>g</i>	17.381	0.0395									
	2016/10/25	01:53:40.11	<i>g</i>	17.299	0.041									
	2016/10/25	01:14:17.97	<i>r</i>	16.6675	0.0335	16.7252	0.035 625	16.7922	0.035 625					
	2016/10/25	01:26:41.27	<i>r</i>	16.682	0.033									
	2016/10/25	01:39:06.81	<i>r</i>	16.826	0.0345									
	2016/10/25	01:51:32.58	<i>r</i>	16.7255	0.0415									
	2016/10/25	01:18:29.63	<i>i</i>	16.485	0.0425	16.5482	0.042 875	16.6202	0.042 875					
	2016/10/25	01:30:53.44	<i>i</i>	16.537	0.0435									
	2016/10/25	01:43:19.64	<i>i</i>	16.645	0.047									
	2016/10/25	01:55:46.00	<i>i</i>	16.526	0.0385									
	2016/10/25	01:22:34.67	<i>z</i>	16.641	0.102	16.7237	0.101 375	16.8057	0.101 375					
	2016/10/25	01:34:59.13	<i>z</i>	16.8885	0.101									
	2016/10/25	01:47:25.17	<i>z</i>	16.682	0.114									
	2016/10/25	01:59:50.85	<i>z</i>	16.6835	0.0885									

Table A3 – continued

Asteroid	Date	UT	Filter	mag	$\Delta\text{mag}$	$\overline{\text{mag}}$	$\overline{\Delta\text{mag}}$	$\overline{\text{mag}}_c$	$\overline{\Delta\text{mag}}_c$	$\alpha$ (°)
(36236) 1999 VV	2016/11/27	05:40:35.66	<i>g</i>	18.072	0.043	18.0729	0.045 125	18.0869	0.045 125	7.7
	2016/11/27	05:52:38.85	<i>g</i>	18.058	0.043					
	2016/11/27	06:04:43.20	<i>g</i>	18.09	0.046	17.4797	0.038 125	17.4937	0.038 125	7.7
	2016/11/27	06:16:48.41	<i>g</i>	18.0715	0.0485					
	2016/11/27	05:37:58.69	<i>r</i>	17.506	0.039	17.2812	0.062 25	17.2982	0.062 25	
	2016/11/27	05:50:01.77	<i>r</i>	17.4425	0.036					
	2016/11/27	06:02:05.41	<i>r</i>	17.4695	0.0375	17.2735	0.317 875	17.2915	0.317 875	
	2016/11/27	06:14:10.05	<i>r</i>	17.501	0.04					
	2016/11/27	05:43:10.30	<i>i</i>	17.255	0.052	17.3216	0.0845	17.1226	0.0845	
	2016/11/27	05:55:13.67	<i>i</i>	17.275	0.0555					
	2016/11/27	06:07:18.60	<i>i</i>	17.237	0.053	17.5333	0.1345	17.2933	0.1345	
	2016/11/27	06:19:24.16	<i>i</i>	17.358	0.0885					
	2016/11/27	05:46:34.55	<i>z</i>	18.42	0.566	17.603	0.143	17.761	0.14	
	2016/11/27	05:58:38.36	<i>z</i>	17.584	0.2265					
2016/11/27	06:10:42.94	<i>z</i>	16.752	0.1455	17.4526	0.132				
2016/11/27	06:22:49.75	<i>z</i>	16.338	0.3335						
(138846) 2000 VJ61	2016/12/06	05:10:13.08	<i>g</i>	17.9216	0.088	17.992	0.0884	17.882	0.0884	17.3
	2016/12/06	05:22:23.53	<i>g</i>	18.029	0.09					
	2016/12/06	05:29:14.91	<i>g</i>	17.9972	0.088	17.421	0.047	17.349	0.047	
	2016/12/06	05:36:06.50	<i>g</i>	17.988	0.087					
	2016/12/06	05:40:35.75	<i>g</i>	18.0241	0.089	17.3216	0.0845	17.1226	0.0845	
	2016/12/06	05:06:45.77	<i>r</i>	17.3218	0.047					
	2016/12/06	05:25:47.86	<i>r</i>	17.4733	0.048	17.5333	0.1345	17.2933	0.1345	
	2016/12/06	05:32:39.42	<i>r</i>	17.4678	0.046					
	2016/12/06	05:45:06.88	<i>i</i>	17.2521	0.083	17.3165	0.123	17.761	0.14	
	2016/12/06	05:53:18.70	<i>i</i>	17.3359	0.086					
	2016/12/06	06:01:31.17	<i>i</i>	17.3443	0.084	17.4526	0.132			
	2016/12/06	06:09:44.17	<i>i</i>	17.3543	0.085					
	2016/12/06	05:49:11.25	<i>z</i>	17.3165	0.123	17.603	0.143	17.761	0.14	
	2016/12/06	05:57:23.20	<i>z</i>	17.603	0.143					
2016/12/06	06:05:36.41	<i>z</i>	17.761	0.14	17.4526	0.132				
2016/12/06	06:13:49.00	<i>z</i>	17.4526	0.132						

**Table A4.** Observational circumstances and derived magnitudes of the phase curves. For each asteroid is given: the name, the date and start time, the instrumental magnitude ( $M_{\text{obs}}$ ), the reduced magnitude ( $M_{\text{red}}$ ), the averaged reduced magnitude ( $\overline{M_{\text{red}}}$ ), the reduced magnitude corrected for the rotation ( $M_{\text{cor}}$ ), the averaged reduced magnitude corrected for the rotation ( $\overline{M_{\text{cor}}}$ ), the error of the reduced magnitude ( $\Delta M$ ), the averaged error of the relative magnitude ( $\overline{\Delta M}$ ), the distance to the Earth ( $\Delta$ ) and to the Sun ( $r$ ), and the solar phase angle ( $\alpha$ ).

Asteroid	Date	UT	$M_{\text{obs}}$	$M_{\text{red}}$	$\overline{M_{\text{red}}}$	$M_{\text{cor}}$	$\overline{M_{\text{cor}}}$	$\Delta M$	$\overline{\Delta M}$	$\Delta$ (au)	$r$ (au)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	
(326683) 2002 WP	2016/11/27	04:16:41.92	16.982	18.612	18.780	19.517	19.636	0.139	0.139	0.169	1.141	21.9	
		04:18:15.72	16.981	18.859		19.693		0.139					
		04:19:50.00	16.987	18.865		19.699		0.139					
	2016/12/03	04:43:28.00	16.809	18.751	18.778	18.788	18.811	0.247	0.249	0.156	1.138	10.7	
		04:44:52.19	16.830	18.771		18.808		0.248					
		04:46:16.83	16.844	18.784		18.821		0.249					
	2016/12/04	04:47:40.88	16.867	18.807	19.637	18.827	18.729	0.250	0.240	0.240	0.154	1.138	8.8
		03:18:21.45	17.607	19.605		18.697		0.240					
		03:19:15.94	17.643	19.640		18.732		0.240					
	2016/12/05	03:20:10.56	17.640	19.637	18.529	18.729	18.540	0.240	0.078	0.078	0.153	1.138	6.9
		03:21:04.49	17.669	19.666		18.758		0.240					
		03:35:17.19	16.549	18.521		18.521		0.078					
	(489337) 2006 UM	2016/11/24	03:36:21.44	16.554	18.526	18.055	18.526	18.615	0.078	0.720	0.221	1.199	15.1
			03:37:25.53	16.569	18.541		18.563		0.078				
			00:10:14.17	17.425	18.057		18.594		0.722				
2016/11/24		00:11:58.41	17.417	18.055	18.833	18.591	18.824	0.721	0.147	0.217	1.194	16.3	
		00:13:42.39	17.412	18.049		18.585		0.720					
		00:15:27.17	17.423	18.059		18.692		0.718					
2016/11/30		23:27:30.74	17.749	18.879	19.263	18.864	19.632	0.148	0.388	0.199	1.165	23.9	
		23:29:14.77	17.731	18.862		18.847		0.147					
		23:30:58.85	17.677	18.808		18.802		0.147					
2016/11/30		23:32:42.80	17.651	18.783	19.263	18.783	19.632	0.146	0.388	0.199	1.165	23.9	
		01:15:14.08	17.900	19.241		19.654		0.387					
		01:16:38.14	17.919	19.260		19.607		0.388					
2005 TF		2016/10/03	01:18:02.06	17.949	19.289	20.649	19.289	20.656	0.388	0.421	0.253	1.245	13.5
			03:18:42.55	19.969	20.625		20.647		0.422				
			03:22:48.85	19.968	20.624		20.628		0.422				
	2016/10/05	03:26:54.33	20.040	20.697	20.540	20.693	20.557	0.421	0.625	0.242	1.235	12.5	
		03:33:16.33	19.904	20.577		20.528		0.621					
		03:37:21.17	19.883	20.557		20.518		0.622					
	2016/10/24	03:57:56.44	19.804	20.484	19.858	20.484	19.832	0.627	0.154	0.153	1.148	4.4	
		04:02:00.63	19.860	20.541		20.610		0.629					
		04:11:21.35	18.508	19.896		19.896		0.151					
	2016/10/24	04:15:25.91	18.492	19.879	19.858	19.864	19.832	0.152	0.154	0.153	1.148	4.4	
		04:19:30.67	18.458	19.843		19.816		0.154					
		04:23:34.91	18.464	19.848		19.805		0.155					
	2016/10/27	04:27:39.14	18.442	19.824	19.874	19.774	19.898	0.157	0.232	0.143	1.136	4.6	
		03:34:20.70	18.371	19.868		19.924		0.231					
		03:36:24.55	18.374	19.870		19.906		0.232					
2016/10/28	03:38:29.11	18.377	19.871	20.082	19.881	0.237	0.232	0.140	1.133	4.8			
	03:40:33.35	18.390	19.884		19.881		0.233						
	02:46:12.25	18.436	20.053		20.050		0.246						
(36236) 1999 VV	2016/11/26	02:48:16.00	18.452	20.069	16.233	20.066	16.212	0.237	0.020	0.896	1.868	7.6	
		02:50:19.89	18.486	20.103		20.103		0.237					
		02:52:23.91	18.485	20.102		20.105		0.271					
	2016/11/30	04:26:59.35	19.227	16.309	16.244	16.233	16.243	0.021	0.451	0.908	1.873	8.8	
		04:30:03.93	19.120	16.202		16.202		0.019					
		04:33:08.02	19.161	16.243		16.241		0.021					
	2016/12/03	04:36:12.15	19.096	16.178	16.283	16.173	16.356	0.020	0.327	0.921	1.877	10.4	
		05:12:42.81	19.297	16.254		16.254		0.447					
		05:14:47.72	19.292	16.245		16.245		0.451					
	2016/12/04	05:16:52.05	19.284	16.232	16.405	16.230	16.390	0.455	0.311	0.926	1.878	11.1	
		04:56:33.28	19.362	16.318		16.366		0.293					
		05:21:31.01	19.358	16.275		16.356		0.332					
	2016/12/04	05:24:57.31	19.338	16.248	16.405	16.330	16.390	0.339	0.311	0.926	1.878	11.1	
		05:28:21.67	19.387	16.291		16.373		0.345					
		04:29:51.13	19.471	16.432		16.408		0.294					
2016/12/04	04:33:34.83	19.442	16.399	16.385	16.375	16.368	0.298	0.307	0.307	0.307	0.307		
	04:40:28.28	19.437	16.385		16.368		0.307						

Table A4 – continued

Asteroid	Date	UT	$M_{\text{obs}}$	$M_{\text{red}}$	$\overline{M}_{\text{red}}$	$M_{\text{cor}}$	$\overline{M}_{\text{cor}}$	$\Delta M$	$\overline{\Delta M}$	$\Delta$ (au)	$r$ (au)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
(138846) 2000 VJ61	2016/12/05	04:47:55.85	19.473	16.412	16.520	16.401	16.536	0.316	0.097	0.932	1.879	11.7
		04:51:41.35	19.464	16.397		16.389		0.322				
		04:56:59.44	19.481	16.406		16.401		0.330				
		04:28:17.67	19.524	16.499		16.503		0.095				
		04:32:21.66	19.544	16.521		16.534		0.097				
		04:36:25.66	19.526	16.504		16.524		0.098				
	2016/12/07	04:40:29.89	19.576	16.556	16.583	0.100						
		03:38:05.22	19.708	16.621	16.619	0.325	0.331	0.944	1.882	13.0		
		03:42:10.06	19.735	16.644	16.645	0.329						
		03:46:14.11	19.624	16.529	16.534	0.333						
		03:50:18.47	19.589	16.490	16.504	0.337						
		04:57:10.30	19.727	16.832	16.914	16.832	17.081	0.025	0.028	0.927	1.787	21.7
2016 WJ1	2016/11/29	05:00:14.35	19.661	16.766	16.803	16.964	16.912	0.031	0.169	0.884	1.764	20.5
		05:03:18.33	19.887	16.992		17.205		0.026				
		05:09:38.90	19.962	17.067		17.324		0.032				
		05:54:51.44	19.509	16.832		16.943		0.169				
		05:57:55.24	19.464	16.787		16.897		0.169				
		06:00:59.13	19.487	16.809		16.917		0.169				
	2016/12/03	06:04:02.95	19.462	16.783	16.890	0.170						
		06:34:25.02	19.232	16.612	16.614	16.780	16.737	0.269	0.261	0.829	1.734	18.8
		06:37:28.95	19.232	16.635	16.788	0.246						
		06:40:33.47	19.228	16.606	16.714	0.271						
		06:43:37.60	19.229	16.603	16.712	0.247						
		06:49:55.00	19.240	16.616	16.693	0.273						
2016/12/05	04:54:44.53	19.115	16.597	16.600	16.708	16.708	0.084	0.084	0.803	1.718	17.9	
	04:58:08.95	19.106	16.588	16.697	0.084							
	05:01:50.28	19.129	16.611	16.720	0.084							
	03:57:05.69	19.627	21.533	21.549	21.453	21.498	0.162	0.164	0.164	1.150	5.5	
	04:00:09.49	19.623	21.528	21.480	0.163							
	04:03:13.14	19.688	21.592	21.552	0.164							
	2016/11/29	04:06:16.92	19.643	21.545	21.507	0.166						
		04:28:46.67	19.420	21.567	21.548	21.579	0.187	0.190	0.148	1.133	7.7	
		04:31:51.72	19.467	21.612	21.597	0.189						
		04:34:56.13	19.450	21.593	21.581	0.191						
		04:38:00.41	19.455	21.596	21.591	0.194						
		02:22:05.86	19.172	21.799	21.821	21.801	21.820	0.226	0.226	0.119	1.100	15.3
2016/12/02	02:24:39.91	19.190	21.816	21.816	0.226							
	02:27:14.08	19.222	21.848	21.842	0.227							
	03:29:18.10	19.100	21.851	21.844	21.763	21.761	0.290	0.294	0.111	1.091	18.0	
	03:32:22.28	19.076	21.824	21.738	0.293							
	03:35:26.28	19.090	21.835	21.752	0.296							
	03:38:30.56	19.123	21.865	21.790	0.299							
2016/12/05	03:46:35.63	19.025	21.968	22.029	21.968	21.999	0.102	0.104	0.104	1.082	20.9	
	03:49:59.66	19.092	22.036	22.030	0.104							
	03:53:24.05	19.084	22.030	22.020	0.105							
	03:56:48.10	19.138	22.085	21.980	0.107							
	02:45:05.38	19.051	22.255	22.347	22.166	22.241	0.350	0.358	0.091	1.065	27.5	
	02:51:23.10	18.938	22.135	22.022	0.357							
2016/12/07	02:54:47.27	19.325	22.518	22.405	0.361							
	02:58:11.50	19.292	22.480	22.370	0.366							

This paper has been typeset from a  $\text{\LaTeX}$  file prepared by the author.

# A comprehensive study of the opposition effect on 15 NEOs

S. Ieva<sup>1</sup>,<sup>\*</sup> P. Arcoverde,<sup>2</sup> E. Rondón<sup>2</sup>, A. Giunta,<sup>3</sup> E. Dotto,<sup>1</sup> D. Lazzaro<sup>2</sup>, E. Mazzotta Epifani,<sup>1</sup> D. Perna,<sup>1</sup> C. Fanasca,<sup>1</sup> T. Rodrigues,<sup>2</sup> F. Monteiro<sup>2</sup>, H. Medeiros,<sup>2,4</sup> J. S. Silva-Cabrera<sup>2,5</sup> and A. Di Paola<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INAF - Osservatorio Astronomico di Roma, Via Frascati 33, I-00040, Monte Porzio Catone, RM, Italy

<sup>2</sup>Observatório Nacional, Rua Gen. José Cristino 77, 20921-400 Rio de Janeiro, Brazil

<sup>3</sup>ASI - Agenzia Spaziale Italiana, Via del Politecnico, I-00133, Roma, Italy

<sup>4</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), c/Vía Lactea sn, E-38205 La Laguna, Spain

<sup>5</sup>CONACYT - Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), AP 106, Ensenada 22800, BC, México

Accepted 2022 April 18. Received 2022 April 14; in original form 2022 February 17

## ABSTRACT

We report the results we derived analyzing photometric measurements obtained at different phase angles for 15 Near-Earth Objects (NEOs), observed from Campo Imperatore observatory, and Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). The performed analysis allows us to taxonomically classify them using several independent techniques, thus constraining their surface composition. The majority of this sample is in agreement with a pristine carbonaceous composition (C-complex/D-type asteroids), while few NEOs are composed of more evolved (e.g. S/M/E-type bodies) material. With this work we made evident that a comprehensive characterization of a NEO can be achieved through the coupling of spectrophotometric data and phase curve assessment. This is crucial in case these objects become target of future rendez-vous, sample-return or mitigation missions.

**Key words:** techniques: photometric – minor planets, asteroids: general – minor planets, asteroids: individual: NEO.

## 1 INTRODUCTION

The opposition effect, namely the sharp increase in brightness at low phase angles, is a powerful proxy to understand the physical characteristics of the surface of small bodies, such as composition and roughness. This effect, studied in detail since the late 70s, has been observed on airless small bodies, meteorites and even satellites from both ground and space (See Belskaya & Shevchenko 2000, and references therein).

It is believed that opposition effect is mainly due to two separate mechanisms, both depending on albedo: shadow hiding and coherent backscatter (Hapke 1993; Shkuratov et al. 1994). Shadow hiding generally dominates for phase angles  $\alpha > 5^\circ$  and, according to Hapke (1993) its effect increases with the decrease of albedo; at lower phase angles coherent backscatter is more important and relative contribution is believed to be around 20–60 per cent for low-albedo asteroids, and 80–90 per cent for moderate and high albedo bodies (Belskaya & Shevchenko 2000).

The number of small bodies with known surface composition has greatly increased in the last two decades, thanks to recent technological advancements in the observational field. However, the number of bodies with a known solar phase function is still very limited. This is mainly because the needed observations must span a wide range of phase angle values (as close as possible to the opposition and up to at least  $25^\circ$ ) and requires repeated observations of the same body for several nights.

Near-Earth Objects (NEOs) represent an optimal case study on how the opposition effect varies on different surfaces, compositions

and texture roughness. In fact, due to their proximity, they are often bright enough to be observable at least for several weeks, and they usually have a larger span of available data compared to other small bodies, being able to be observed up to even  $\alpha \sim 90^\circ$ . At the moment, nearly 29 000 NEOs have been discovered. However, physical properties are known for roughly a 10 per cent of them (Galache et al. 2015), mostly from photometric and spectroscopic data. Phase function characterization is instead available only for a very limited sample, often together with light curve characterization and only for a limited phase angle dataset (See e.g. Reddy et al. 2015; Tatsumi et al. 2018; Huang et al. 2021).

To potentially bridge this gap, we focused a dedicated work on solar phase curve characterization for several NEOs, repeatedly observing them at different phase angles over the course of several weeks during the same apparition, in the framework of the NEOShield-2 project (Ieva et al. 2016). In this work, we present the results for phase curve characterization we obtained for 15 NEOs observed between 2015 and 2017 from Campo Imperatore observatory (Italy) and the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Brazil). In Section 2, we report the observations and data reduction procedures. In Section 3, the curve parametrization is described in greater detail. Section 4 presents the obtained analysis, while Section 5 reports discussion and conclusions.

## 2 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION

The NEOs presented in this paper have been selected from the Physical Properties Priority List developed to support the observation campaigns through an advanced prioritization algorithm (Cortese et al. 2017). We preferentially chose targets with the smallest possible

\* E-mail: [simone.ieva@inaf.it](mailto:simone.ieva@inaf.it)

angle during the observation period, ideally with a sampling of at least few points lower than  $5^\circ$  to better cover the opposition surge, and with slow apparent motion ( $<2$  arcsec/min) to minimize trailing effects.

## 2.1 Campo Imperatore

Part of the NEOs presented in this work were observed using the 0.9-meter Schmidt Telescope located at the Campo Imperatore observatory (Italy). The telescope is equipped with a 4096x4096 CCD covering a field of view of  $1.15 \times 1.15$  square degrees and a scale of 1 arcsec/pixel. Observations were performed in r-Sloan band between 2016 May and 2017 June. For each selected asteroid we obtained photometric observations at different phase angles.

The reduction sequence follows standard procedures: the instrumental signature was removed from the raw data by subtracting the bias level and a master dark frame, normalizing to unit gain and correcting for photometric uniformity by dividing out a master flat-field. Photometric calibration for each frame was performed with aperture photometry technique, using the software SExtractor, developed by Bertin & Arnouts (1996) against a filtered set of several calibrator sources selected from the APASS point source catalog (DR10) that fall within the same frame. The calibrators were selected from stable solar analog stars with reliable and repeatable photometry across multiple epochs and possibly isolated stars not contaminated by bad pixels.

Differences between the instrumental and APASS magnitudes were then used to derive a calibration zero-point. Asteroid instrumental magnitudes were converted into absolute r-magnitudes and reduced to unitary geocentric and heliocentric distances. Finally, r-Sloan magnitudes were transformed into R-Cousin magnitudes using the equation from Jordi, Grebel & Ammon (2006):

$$r - R = (0.267 \pm 0.005)(V - R) + (0.088 \pm 0.003),$$

using V-R colors from Pravec et al. (2012) when a taxonomic class was available, or assuming solar V-R colors. Final magnitudes and observational conditions are reported in Appendix.

## 2.2 OASI

The remaining data shown in this work were obtained at the OASI in the framework of the IMPACTON project, between 2015 September and 2017 October. The images were obtained with the 1-meter diameter telescope using a CCD camera with an array of  $1024 \times 1024$  pixels and alternatively the array of  $2048 \times 2048$  pixels, using a R-Cousin filter (See Rondón et al. 2020, for further details).

In order to obtain the photometric magnitudes for the solar phase curves the telescope was set in differential tracking mode. Each NEO target and Landolt standard star were observed repeatedly four times over the course of the night, and the resulting magnitudes were then averaged to reduce the random error. The whole procedure was repeated for subsequent nights over one or several months in order to map the curve at different phase angles.

The data reduction was performed using IRAF software, correcting the science images by bias, dark, and flat frames, similarly to what performed on the Campo Imperatore data. The instrumental magnitudes for the NEOs and the standard stars were determined through aperture photometry, using the photometric growth curve (Howell 1989) to determine the optimum aperture. The standard stars were then used to compute the zero-point, the extinction coefficient for the night and the final uncertainties. Final magnitudes,

reduced to unitary geocentric and heliocentric distances are reported in Appendix.

## 3 CURVE PARAMETRIZATION

From 2012 the IAU adopted a three parameter fit model, the  $H-G_1-G_2$ , developed by Muinonen et al. (2010) as the standard fit for solar phase curve modeling. In this model the parameter  $H$  is the absolute magnitude,  $G_1$  and  $G_2$  are known as the inclination parameters of the curve. However, since Muinonen modelization fails when the number of observations is small or when the data have low accuracy, we decided to use the approach of Penttilä et al. (2016), which solves this problem using a constrained non-linear least squares algorithm to fit the data to the model. In this model, the phase curve is described as:

$$H(\alpha) = H_0 - 2.5 \log[G_1 \Phi_1(\alpha) + G_2 \Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2) \Phi_3(\alpha)],$$

where  $\Phi_1$  and  $\Phi_2$  are the phase function associated to the linear part and  $\Phi_3$  is associated to the opposition effect.

Before fitting the model to our data it is important to note that the solar phase curves are widely affected by the shape of the object, which causes dispersion effect over the points of the curve, resulting in a greater dispersion if the body is more elongated. Indeed, the elongated shape of an asteroid can cause a large amplitude in the magnitude determination, depending if the object is at the minimum or the maximum of its light curve. This could potentially lead to large fluctuations in the final values. To correct for such effect, for NEOs with an available light curve characterization, we used the following equations:

$$\begin{aligned} V'(\varphi) &= AV(\varphi + \varphi_0), \\ H'(\alpha) &= H(\alpha) - \Delta V'(\varphi), \end{aligned}$$

resulting in a nominal correction for each data point, computed with respect to the rotational phase of the object at the time of the observation. This correction was applied only to points of the NEOs phase curve characterization obtained in close dates respect to the rotational light curve. In this way we avoid effects caused by change in the aspect angle.  $V$  in this case is the Fourier function of the rotational light curve extrapolated to the date when the phase curve was taken,  $A$  is the amplitude ratio of the rotational light curves, as given by Zappala et al. (1990), and  $\varphi + \varphi_0$  is the rotational phase offset. For a complete description, see Rondón et al. (2019). Period and amplitude determined for these light curves are reported in Tab. 1. Final parametrized curves are reported in Fig. 1.

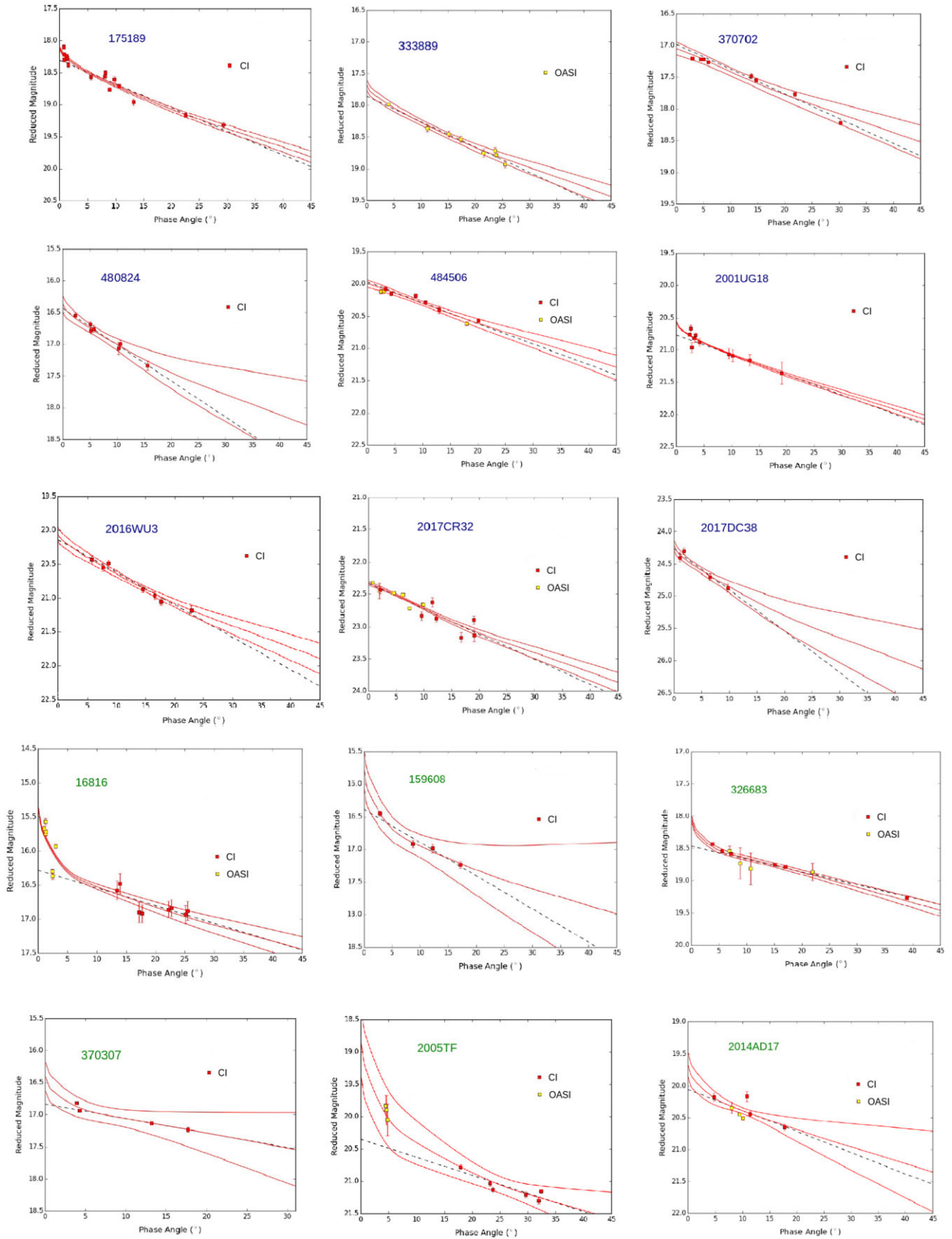
## 4 ANALYSIS

In order to establish a plausible physical composition for the observed NEOs and infer the role of the composition on opposition effect, we use several independent techniques. First, it is worth to notice that few NEOs have a characterization present in literature. For 159608, 326683, and 333889 albedo values are available, and they are reported in Table 1 in bold. Moreover, 7 targets have a spectral characterization on the SMASS website,<sup>1</sup> obtained in the framework of the MITHNEOS (the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey) project. Taxonomical classes for these spectra are reported on the first column of Table 2.

In addition, from a preliminary analysis of the overall shape of the curve and in particular around the opposition, it is possible to

<sup>1</sup><http://smass.mit.edu/catalog.php>





**Figure 1.** Phase curve parametrization for the 15 NEOs presented in this work. Top: 9 NEOs characterized by almost none or very little opposition effect; bottom: the remaining 6 NEOs with moderate/high opposition effect. Red filled squares show data acquired at Campo Imperatore, while yellow squares represent points taken at OASI. The red curves represent the  $H-G_1-G_2$ -model fit and the uncertainty envelope for the model, while the black dotted line shows the linear fit.

**Table 1.** Period and amplitude, absolute magnitude  $H_R$ , the b coefficient, albedo,  $G_1$ ,  $G_2$  OE, and COB as described in Section 4 for all the NEOs considered in this work.

NEO	P (hr)	A	$H_R$	b	albedo	$alb_{env}$	$G_1$	$G_2$	OE	COB
16816 1997UF9	...	...	$15.39 \pm 0.03$	$0.026 \pm 0.009$	0.292	0.183-0.464	0.000	0.332	$0.779 \pm 0.028$	$0.996 \pm 0.072$
159608 2002AC2	...	...	$15.79 \pm 0.29$	$0.038 \pm 0.008$	<b>0.200</b> <sup>d</sup>	0.100-0.300	0.123	0.231	$0.465 \pm 0.044$	$0.721 \pm 0.068$
175189 2005EC224	...	...	$18.11 \pm 0.02$	$0.035 \pm 0.004$	0.117	0.078-0.177	0.589	0.181	$0.156 \pm 0.031$	$0.481 \pm 0.095$
326683 2002WP	$6.261 \pm 0.002^a$	$1.33^a$	$18.05 \pm 0.05$	$0.020 \pm 0.002$	<b>0.315</b> <sup>e</sup>	0.184-0.446	0.000	0.602	$0.328 \pm 0.038$	$0.845 \pm 0.098$
333889 1998SV4	...	...	$17.69 \pm 0.08$	$0.037 \pm 0.004$	<b>0.110</b> <sup>f</sup>	0.068-0.149	0.706	0.107	$0.142 \pm 0.030$	$0.454 \pm 0.091$
370307 2002RH52	$4.219 \pm 0.002^b$	$0.36^b$	$16.41 \pm 0.23$	$0.024 \pm 0.005$	0.363	0.225-0.585	0.000	0.572	$0.347 \pm 0.045$	$0.803 \pm 0.104$
370702 2004NC9	$7.526 \pm 0.002^c$	$0.52^c$	$17.05 \pm 0.10$	$0.038 \pm 0.003$	0.091	0.071-0.118	0.818	0.181	$0.064 \pm 0.014$	$0.400 \pm 0.087$
480824 1999JO6	...	...	$16.37 \pm 0.13$	$0.057 \pm 0.005$	0.015	0.010-0.030	0.807	0.000	$0.034 \pm 0.025$	$0.104 \pm 0.076$
484506 2008ER7	...	...	$20.00 \pm 0.06$	$0.038 \pm 0.006$	0.091	0.052-0.157	0.629	0.371	$0.024 \pm 0.015$	$0.176 \pm 0.112$
2001UG18	...	...	$20.56 \pm 0.01$	$0.031 \pm 0.002$	0.184	0.155-0.219	0.462	0.330	$0.194 \pm 0.072$	$0.619 \pm 0.229$
2005TF	$2.7122 \pm 0.0007^a$	$0.166^a$	$18.84 \pm 0.53$	$0.033 \pm 0.004$	0.154	0.106-0.223	0.062	0.147	$1.146 \pm 0.276$	$1.166 \pm 0.542$
2014AD17	$8.486 \pm 0.002^b$	$0.22^b$	$19.67 \pm 0.19$	$0.028 \pm 0.007$	0.239	0.126-0.452	0.248	0.353	$0.305 \pm 0.083$	$0.690 \pm 0.188$
2016WU3	...	...	$20.06 \pm 0.05$	$0.049 \pm 0.003$	0.031	0.022-0.042	0.882	0.019	$0.068 \pm 0.025$	$0.219 \pm 0.047$
2017CR32	$14.910 \pm 0.002^b$	$0.43^b$	$22.33 \pm 0.03$	$0.039 \pm 0.007$	0.079	0.042-0.129	0.857	0.133	$0.010 \pm 0.018$	$0.058 \pm 0.104$
2017DC38	...	...	$24.22 \pm 0.08$	$0.060 \pm 0.005$	0.012	0.007-0.018	0.802	0.000	$0.016 \pm 0.055$	$0.047 \pm 0.163$

Note. the b coefficient, indicating the linear slope of the curve is computed for  $\alpha > 5^\circ$ , except for 370307 and 2017DC38. Period and amplitude were published in: a) Rondón et al. (2019); b) Warner (2017); c) Monteiro et al. (2018); Bold albedoes are retrieved from: d) Trilling et al. (2010) e) Mainzer et al. (2011); f) Mainzer et al. (2012).

**Table 2.** The derived taxonomy for each NEO considered in this work, according to: a) available spectra in literature; b) its overall shape, and the taxa estimated according to the online tool described in Penttilä et al. (2016); c) the  $G_1$ – $G_2$  phase space, as reported in Fig. 2; d) the OE computation, as shown in Fig. 3; e) the COB estimation, as reported in Fig. 4; f) the final taxa we assign to each object, summarizing all the previous analysis.

NEO	spectra <sup>a</sup>	curve shape <sup>b</sup>	$G_1$ $G_2$ phase <sup>c</sup>	OE estim <sup>d</sup>	COB estim <sup>e</sup>	Final taxa <sup>f</sup>
16816 1997UF9	...	S/M	S?	...	S	<b>S</b>
159608 2002AC2	S	S/M	S?	S	S/M	<b>S</b>
175189 2005EC224	...	D	C/P	C/D	D	<b>D</b>
326683 2002WP	S	S/M	S	S	S	<b>S</b>
333889 1998SV4	D	D	C	C/D	D	<b>D</b>
370307 2002RH52	E?	E	S	S/E	S/E	<b>S/E</b>
370702 2004NC9	...	C	D	C/D	D	<b>D</b>
480824 1999JO6	...	C	C	C	C	<b>C</b>
484506 2008ER7	...	C	C?	C/D	C	<b>C</b>
2001UG18	...	S/M	S/M	S	S/M	<b>S/M</b>
2005TF	S	S/M	S?	...	...	<b>S</b>
2014AD17	S	S/M	S	S	S	<b>S</b>
2016WU3	...	C	C	C	C	<b>C</b>
2017CR32	C	C	D	C/D	C	<b>C</b>
2017DC38	...	C	C	C	C	<b>C</b>

establish a potential taxonomy for all targets considered in this work. An almost flat and linear phase curve is indeed symptomatic for a contribution of shadow hiding effect dominating even at lower phase angles, suggesting a primitive composition (e.g. C-/D-type). A strong surge around opposition can be associated with a strong coherent backscatter contribution, typical of more evolved (e.g. S/M/E-type) composition. To strengthen our analysis, we decided to use the online tool developed by Penttilä et al. (2016) to assign a taxonomical class. Taxonomy derived from phase curve shape is discussed in greater detail in Section 4.1.

The  $G_1$ – $G_2$  parameters derived from our parametrization of the curves (reported in Fig. 1 and Table 1) can also be used to indicate a potential taxonomy, as it has been done in Penttilä et al. (2016). This inferred taxonomy will be discussed in Section 4.2.

Finally, we used the results of Belskaya & Shevchenko (2000), that correlate albedo and phase curve parameters, (specifically the Opposition Effect amplitude, hereafter OE and the COherent Backscatter contribution, or COB) to discriminate between asteroid

compositions. Albedo is available only for a limited selection of objects in literature. As stated above, among NEOs present in our sample, only three (159608, 326683, and 333889) have a reported albedo values. For the others we retrieve an albedo estimation using the results of Belskaya & Shevchenko (2000), which established a robust linear anticorrelation between the logarithm of the albedo and the linear coefficient of the phase curve b. Indeed, it is worth noting that known albedoes in literature and the ones derived from the linear coefficient b are in good agreement.

We adopted the most common definition for the OE, as the relative increase of magnitude at a phase angle of  $0.3^\circ$  compared to the extrapolation of the linear part of the curve (reported as a dotted line in Fig. 1), computed in this case for phase angles greater than  $5^\circ$  (except for 370307 and 2017DC38, for which we use all 4 points due to the limited dataset in the linear region). The relative contribution of COB has been estimated as the ratio of the OE to the absolute increase in magnitude between  $0.3^\circ$  and  $5^\circ$ , computed on the parametrized curve. Error bars for OE and COB have been computed using the values

in a narrow region ( $\pm 0.1^\circ$ ) around  $0.3^\circ$  and  $5^\circ$ . Albedo uncertainties have been derived by propagating the errors associated with the linear fit. Final values for albedo, linear coefficient  $b$ , OE and COB are reported in Table 1. Taxonomy estimated from OE and COB analysis are discussed in Section 4.3 and 4.4 respectively.

#### 4.1 Taxonomy from phase curve shape

In Fig. 1, we reported the final parametrization obtained for the 15 NEOs presented in this paper, together with a linear fit computed for phase angles  $> 5^\circ$ . More than half of the curves has almost no opposition surge at lower phase angles, while the remaining curves show a moderate or even high opposition effect. In particular, nine NEOs, shown on top of Fig. 1 (175189, 333889, 370702, 480824, 484506, 2001UG18, 2016WU3, 2017CR32, and 2017DC38) are identified by a very flat phase curve, or with a very small opposition effect, suggesting that shadow hiding effect is dominating.

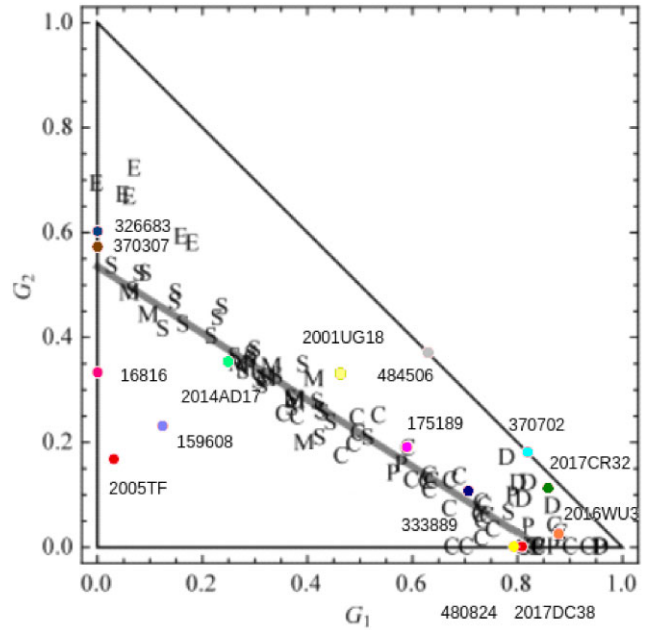
The remaining NEOs, on the bottom of Fig. 1 (16816, 159608, 326683, 370307, 2005TF, and 2014AD17) are instead characterized by a moderate/high opposition increase, symptomatic of an important contribution from the coherent backscattering too. While sometimes it can be difficult to characterize the proper amplitude of opposition effect straight from the shape of the phase curve itself, to strengthen our analysis we decided to use the online tool developed by Penttilä et al. (2016), which assigned a preliminary taxonomical class for each NEO in the sample, based on the lowest value of the Bayesian Information Criterion (BIC).

We selected the nonlinear constrained fit for the motivations expressed in Section 3. Taxa attributed by the online tool are shown in the second column of Table 2. This analysis confirms that flattish-like curves and curves with very small opposition surge are best identified as a primitive taxonomic class (e.g. C- or D-type NEOs) characterized by a small albedo, while a moderate/high surge at small phase angles are associated with moderate/high albedo classes (e.g. S/M and E-type asteroids). The only noticeable exception is represented by 2001UG18, which shows a very limited surge around opposition, but it has been classified according to the online tool as a potential S/M-type (the two classes has very similar parameters, according to Penttilä et al. 2016).

#### 4.2 Taxonomy from $G_1$ – $G_2$ phase space

Penttilä et al. (2016), using values originally computed in Shevchenko et al. (2016) for 93 asteroids, showed that  $G_1$  and  $G_2$  parameters can be used to discriminate between different taxa. In this representation, shown in Fig. 2, several taxonomic classes can be found along a main diagonal in the  $G_1$ – $G_2$  space, with the exception of D- and E-type asteroids. It is important here to notice that our computation of  $G_1$  and  $G_2$  follows a constrained nonlinear least-squares algorithm (Penttilä et al. 2016), while the Shevchenko et al. (2016) data use a linear least-squares algorithm (Muinonen et al. 2010), due to their better phase angle coverage. As stated in the previous section, the two approaches are similar and theoretically should match, making this an independent technique to obtain a taxonomy. However, for few NEOs the larger uncertainties prevail from obtain a clear indication of their taxonomic class.

Nine NEOs analysed in this work lies along the diagonal originally identified in the work of Penttilä et al. (2016). In particular, 326683 and 370307 are in between the S- and E-type regions, closer to the S-type region, while 2014AD17 and 2001UG18 appear to belong to the S-complex group. 175189, 333889, 480824, 2016WU3, and 2017DC38 are in a region close to the C-complex, while 370702



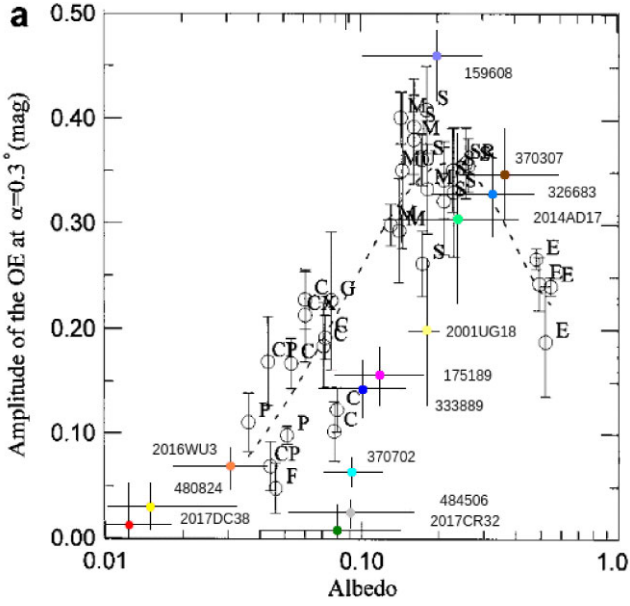
**Figure 2.** The  $G_1$  and  $G_2$  values computed from our parametrization, overlaid on Fig. 2 from Penttilä et al. (2016). The letters indicate the asteroid type, and some classes are grouped into larger complexes for simplicity (e.g. B-types into the C-complex or Q-type asteroids into the S-complex).

and 2017CR32 agree with a D-type composition. Four NEOs are distant from the regions originally identified in Penttilä et al. (2016), with 16816, 159608, and 2005TF showing parameters similar to the S-group, and 484506 to the C-group. This is probably due to larger uncertainties in their parametrization, or in the case of 16816 to its exceptional opposition effect. The derived classification is reported in the third column of Table 2.

#### 4.3 Taxonomy from Opposition Effect amplitude

We use the results of Belskaya & Shevchenko (2000) to infer a plausible taxonomy for each NEO according to its albedo and the magnitude of their OE. In Fig. 3 we report albedo versus OE amplitude for the NEOs analysed in this paper, overlaid on the original figure from Belskaya & Shevchenko (2000). The derived taxonomic classes are reported in the fourth column of Table 2. Most of our targets seem to have a primitive composition, with 480824, 2016WU3, and 2017DC38 similar to a C-type composition. Another group (175189, 333889, 370702, 484506, and 2017CR32) show similar parameters than the ones found along the relation discovered by Belskaya & Shevchenko (2000) and akin to the carbonaceous C-complex mineralogy. However, the fact that they share a slightly larger albedo than the rest, appearing on a parallel trend respect the original one and with a larger OE than the C-complex, could make some of these bodies (in particular 175189, 333889, and to some extent 370702) also compatible with a D-type nature, a class not originally considered by Belskaya & Shevchenko (2000) probably due to its extreme rarity among small bodies.

The remaining part of the NEOs shows a similarity with high-albedo bodies: S, M and E-type asteroids. In particular 159608, 326683, and 2014AD17 are compatible once again with a S-type composition. 2001UG18 appears in an intermediate place in this plot, between the D-type group and the S-type bodies. However, its higher albedo and OE amplitude (taking into account the large error



**Figure 3.** Dependence of the OE versus albedo for our sample of NEOs, overimposed on fig. 3a from Belskaya & Shevchenko (2000). Classification derived from this analysis is shown on the fourth column of Table 2.

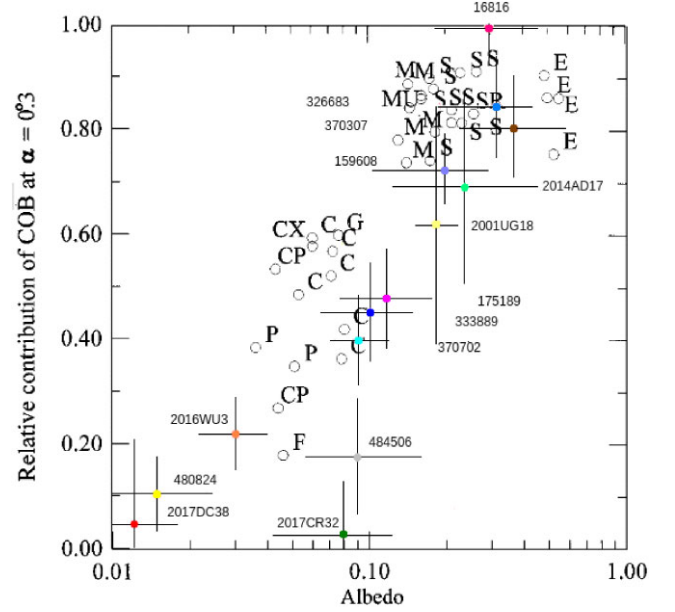
bar) seems to be compatible with a silicatic composition, therefore we estimated for this NEO a probable S-type nature. The OE analysis locates 370307 in a region between the S- and E-type asteroids. However, the very high albedo measured by the NEOWISE survey could make 370307 the only E-type asteroid in this batch.

Finally, 16816 and 2005TF show a very high OE (0.779 and 1.146, respectively) that are not included in Fig. 3 but could potentially confirm their S-type nature. For the first one we have a very good coverage at phase angles  $< 5^\circ$ , although a detailed characterization could help unveil the reason behind its unusual high OE. For the latter, the great dispersion in some data points translates in a very uncertain parametrization, leading to a large error in its OE determination. However, its S-type nature has already been confirmed by the analysis performed in Rondón et al. (2019).

#### 4.4 Taxonomy from Coherent Backscatter contribution

In Fig. 4, we show albedo versus the relative contribution of the coherent backscatter (COB), as defined above, overimposing our results on to the original figure from Belskaya & Shevchenko (2000). This retrieved taxonomic classification is reported in the fifth column of Table 2. For several NEOs the similarity with primitive C-complex classes is confirmed. In particular, 480824, 484506, 2017CR32, and 2017DC38 have less than 20 per cent of COB. They are all below the targets originally identified in Belskaya & Shevchenko (2000), except for 484506, which is similar to one object classified as F-type, a very primitive class of asteroids now included in the C-complex. 2016WU3 shows a COB of 22 per cent, consistent with a C-type body and in agreement with low albedo asteroids, as stated in the Introduction.

175189, 333889, and 370702 are in a very narrow region within this plot, with a relative COB contribution between 40 and 50 per cent. The fact that they show very similar values for COB, but in agreement with objects classified as P-types in the Tholen (1989) classification (and similar to D-type in the more recent DeMeo et al.



**Figure 4.** Dependence of the COB versus albedo for our sample of NEOs, overimposed on fig. 7 from Belskaya & Shevchenko (2000). Classification derived from this analysis is shown on the fifth column of Table 2.

2009, taxonomy) could support once again the possibility that these NEOs could belong to the D-type class.

159608, 2001UG18, and 2014AD17 are in an intermediate regime, having between 60 and 80 per cent of COB contribution, and suggesting that coherent backscatter mechanism is still not completely dominating. The large uncertainties however make these NEOs more compatible with a moderate/high albedo class of small bodies, like S- or M-type asteroids. 16816 and 326683 instead exhibit a relative COB beyond 80 per cent, in agreement with what is supposed for moderate and high-albedo asteroids. Finally, 370307 is once again compatible with both a S-type and an E-type composition, due to its 80 per cent COB contribution and its very high albedo.

## 5 DISCUSSION & CONCLUSIONS

The analysis performed on the overall shape of the parametrized curves, the  $G_1-G_2$  parameter, the OE amplitude and the COB contribution has established a potential composition for all the NEOs observed in this work. A practical summary of the taxonomical classes we suggest for each NEO using independent techniques is presented in Tab.2, together with our suggested taxonomy in the final column.

480824, 484506, 2016WU3, 2017CR32, and 2017DC38, due to their overall shape of the parametrized phase curve, their low OE amplitude and their COB contribution below 30 per cent are hypothesized to belong to the C-complex group. This is confirmed even by the extremely flat spectrum available in literature for 2017CR32, which resembles a typical C-type classification.

175189, 333889, and 370702 are still in agreement with the C-complex macrogroup [and defined as C/P using the Tholen 1989, taxonomy in the original work of Belskaya & Shevchenko (2000)]. However, for these NEOs the presence of a small OE amplitude, typical for D-type phase curves (Shevchenko et al. 2012), their higher albedo respect to the C-complex group and the spectrum available for 333889, which resembles a D-type nature, let us convinced that a possible D-type composition is more than plausible. Their

COB is also very similar among them and alike to some asteroids defined originally as P-type asteroids in the Tholen (1989) taxonomy, which share some similarities with D-type bodies in the most recent DeMeo et al. (2009) taxonomy. We suggest for these NEOs a D-type composition.

4 NEOs (16816, 159608, 326683, and 2014AD17) show OE and COB parameters compatible with high albedo asteroids. This is in agreement with their pronounced opposition surge at small phase angles in their phase curve, which could be compatible with S-type bodies, as suggested by the taxonomy derived using the Penttila online tool. This taxonomy was even confirmed by the spectra available in literature for some of them and their location in the  $G_1$ – $G_2$  phase space. The phase curve of 2001UG18 shows a very little OE amplitude, and curve parameters transitional between the more primitive D-types and the more evolved S/M-type bodies. Nevertheless, due to its high estimated albedo we are inclined to assign to this NEO a potential S-type composition. 2005TF on the other hand has a parametrized curve (and a known spectrum) typical of S-type objects. However, due to a great dispersion in the parametrization curve nor OE nor COB were computed firmly.

Finally, 370307 shows an intermediate phase curve, similar somewhat to S-type bodies, but OE and COB parameters intermediate between S- and E-types. Moreover, the anomalous spectral behaviour for this object, very flattish but also pretty noisy, and its extremely high albedo suggest a potential E-type classification.

With this work, we have shown that with a coordinated effort it is possible to obtain a good phase curve characterization and establish a plausible composition for several NEOs. The complete understanding of the physical characteristics for these objects is crucial not only because they allow to sample a range of close bodies pertaining to different compositions, but also because their extreme accessibility makes them potential targets of future rendezvous, sample-return or even mitigation space missions. The need to perform for them a complete physical characterization is therefore crucial.

In the future, dedicated surveys to phase curve characterization, in synergy with photometric and spectroscopic observations, will allow to assess a reliable taxonomic class and establish a potential composition for the target, using only complementary techniques from ground, prior to the mission. This will also help in the never-ending struggle of the characterization of small and dark NEOs, which are already the predominance of the new NEO discoveries (see Ieva et al. 2020). For example, the determination of a precise H from the phase curve analysis and the retrieval of a reliable albedo of the body using an independent technique (e.g. radar) will properly derive the diameter of the body, one of the key quality need to be assessed from ground in case of a potential impact.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Dr. Vasili Shevchenko for his help in improving this paper, even in this difficult time for his country. SI would like to acknowledge that he stands together with the Ukrainian people and against any form of military aggression. This project has received funding from the EU Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement no.870403 (project NEOROCKS). We acknowledge financial support from ASI (contract no. 2017-37-H.0 CUP F82F17000630005: “OSIRIS-REx Partecipazione scientifica alla missione per la fase E”). The authors from the Observatorio Nacional were supported by several fellowships from CAPES, CNPq,

and FAPERJ. Support by CNPq (proc. 305409/2016-6) and FAPERJ (proc. E-26/202.841/2017) is acknowledged by DL. This article is based on observations obtained at the Italian Campo Imperatore observatory and at the OASI (Itacuruba) of the Observatório Nacional, Brazil. Part of the data utilized in this publication were obtained and made available by the MITHNEOS MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey. The IRTF is operated by the University of Hawaii under contract 80HQTR19D0030 with the National Aeronautics and Space Administration. The MIT component of this work is supported by NASA grant 80NSSC18K0849.

## DATA AVAILABILITY

The data underlying this article will be shared on reasonable request to the corresponding author.

## REFERENCES

- Belskaya I. N., Shevchenko V. G., 2000, *Icarus*, 147, 94  
 Bertin E., Arnouts S., 1996, *A&AS*, 117, 393  
 Cortese M. et al., 2017, *M&PS*, 52, 522  
 DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J., 2009, *Icarus*, 202, 160  
 Galache J. L., Beeson C. L., McLeod K. K., Elvis M., 2015, *Planet. Space Sci.*, 111, 155  
 Hapke B., 1993, *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*, Topics in Remote Sensing., Cambridge University Press, Cambridge, UK  
 Howell S. B., 1989, *PASP*, 101, 616  
 Huang J. N., Muinonen K., Chen T., Wang X. B., 2021, *Planet. Space Sci.*, 195, 105120  
 Ieva S., Dotto E., Lazzaro D., Perna D., Fulvio D., Fulchignoni M., 2016, *MNRAS*, 455, 2871  
 Ieva S. et al., 2020, *A&A*, 644, A23  
 Jordi K., Grebel E. K., Ammon K., 2006, *A&A*, 460, 339  
 Mainzer A. et al., 2011, *ApJ*, 743, 156  
 Mainzer A. et al., 2012, *ApJ*, 760, L12  
 Monteiro F., Arcoverde P., Medeiros H., Rondon E., Souza R., Rodrigues T., Lazzaro D., 2018, *Minor Planet Bull.*, 45, 221  
 Muinonen K., Belskaya I. N., Cellino A., Delbò M., Levasseur-Regourd A.-C., Penttilä A., Tedesco E. F., 2010, *Icarus*, 209, 542  
 Penttilä A., Shevchenko V. G., Wilkman O., Muinonen K., 2016, *Planet. Space Sci.*, 123, 117  
 Pravec P., Harris A. W., Kušnirák P., Galád A., Hornoch K., 2012, *Icarus*, 221, 365  
 Reddy V. et al., 2015, *ApJ*, 811, 65  
 Rondón E., Arcoverde P., Monteiro F., Medeiros H., Navas G., Lazzaro D., Carvano J. M., Rodrigues T., 2019, *MNRAS*, 484, 2499  
 Rondón E. et al., 2020, *PASP*, 132, 065001  
 Shevchenko V. G. et al., 2012, *Icarus*, 217, 202  
 Shevchenko V. G. et al., 2016, *Planet. Space Sci.*, 123, 101  
 Shkuratov Y. G., Starukhina L. V., Kreslavsky M. A., Opanasenko N. V., Stankevich D. G., Shevchenko V. G., 1994, *Icarus*, 109, 168  
 Tatsumi E. et al., 2018, *Icarus*, 311, 175  
 Tholen D. J., 1989, in Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S., eds, *Asteroids II*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, p. 1139  
 Trilling D. E. et al., 2010, *AJ*, 140, 770  
 Warner B. D., 2017, *Minor Planet Bull.*, 44, 223  
 Zappala V., Cellino A., Barucci A. M., Fulchignoni M., Lupishko D. F., 1990, *A&A*, 231, 548

## APPENDIX A: APPENDIX: FIGURES AND TABLES

**Table A1.** Observational conditions for NEOs characterized in this work: observatory, UT date, phase angle  $\alpha$ , and the final R-magnitude, as shown in Fig. 1.

Object	Observatory	Date (UT)	$\alpha$ (°)	Rmag
16816	OASI	28/10/2016	1.0	15.67 ± 0.03
1997UF9	OASI	29/10/2016	1.2	15.57 ± 0.05
	OASI	27/10/2016	1.2	15.75 ± 0.03
	OASI	27/10/2016	1.3	15.72 ± 0.03
	OASI	25/10/2016	2.4	16.30 ± 0.04
	OASI	25/10/2016	2.5	16.37 ± 0.05
	OASI	24/10/2016	3.0	15.93 ± 0.03
	CI	16/11/2016	13.4	16.58 ± 0.14
	CI	16/11/2016	13.9	16.48 ± 0.15
	CI	21/11/2016	17.2	16.90 ± 0.15
	CI	22/11/2016	17.7	16.92 ± 0.13
	CI	30/11/2016	22.2	16.86 ± 0.12
	CI	01/12/2016	22.7	16.84 ± 0.12
	CI	06/12/2016	25.1	16.93 ± 0.13
	CI	07/12/2016	25.5	16.88 ± 0.14
159608	CI	01/01/2017	2.9	16.45 ± 0.04
2002AC2	CI	24/12/2016	8.7	16.92 ± 0.06
	CI	18/12/2016	12.3	16.99 ± 0.07
	CI	11/12/2016	17.2	17.24 ± 0.06
175189	CI	18/03/2017	0.7	18.10 ± 0.03
2005EC224	CI	17/03/2017	0.8	18.22 ± 0.03
	CI	17/03/2017	0.8	18.30 ± 0.03
	CI	16/03/2017	1.3	18.24 ± 0.03
	CI	16/03/2017	1.4	18.28 ± 0.03
	CI	19/03/2017	1.4	18.26 ± 0.04
	CI	19/03/2017	1.5	18.38 ± 0.03
	CI	24/03/2017	5.6	18.57 ± 0.04
	CI	27/03/2017	8.1	18.56 ± 0.03
	CI	27/03/2017	8.2	18.50 ± 0.03
	CI	28/03/2017	9.0	18.76 ± 0.03
	CI	29/03/2017	9.8	18.61 ± 0.05
	CI	30/03/2017	10.7	18.71 ± 0.03
	CI	03/04/2017	13.3	18.96 ± 0.05
	CI	13/04/2017	22.6	19.17 ± 0.03
	CI	22/04/2017	29.3	19.32 ± 0.04
326683	CI	07/12/2016	3.8	18.41 ± 0.02
2002WP	CI	10/12/2016	5.6	18.52 ± 0.02
	OASI	05/12/2016	6.9	18.54 ± 0.08
	CI	10/12/2016	7.1	18.56 ± 0.03
	OASI	04/12/2016	8.8	18.73 ± 0.24
	OASI	03/12/2016	10.7	18.81 ± 0.25
	CI	14/12/2016	15.1	18.73 ± 0.03
	CI	15/12/2016	17.0	18.77 ± 0.03
	OASI	27/11/2016	21.9	18.86 ± 0.14
	CI	01/01/2017	39.0	19.25 ± 0.02
333889	OASI	19/09/2015	4.0	17.99 ± 0.02
1998SV4	OASI	16/09/2015	11.2	18.36 ± 0.05
	OASI	14/09/2015	15.1	18.45 ± 0.05
	OASI	13/09/2015	17.3	18.54 ± 0.05
	OASI	11/09/2015	21.5	18.75 ± 0.07
	OASI	10/09/2015	23.6	18.71 ± 0.05
	OASI	10/09/2015	23.8	18.78 ± 0.04
	OASI	09/09/2015	25.5	18.93 ± 0.05

**Table A1** – continued

Object	Observatory	Date (UT)	$\alpha$ (°)	Rmag
370307	CI	27/03/2017	3.9	16.82 ± 0.02
2002RH52	CI	31/03/2017	4.3	16.94 ± 0.02
	CI	16/03/2017	13.2	17.13 ± 0.03
	CI	12/03/2017	17.7	17.23 ± 0.04
370702	CI	22/02/2017	3.0	17.21 ± 0.03
2004NC9	CI	20/02/2017	4.5	17.22 ± 0.03
	CI	02/03/2017	5.0	17.22 ± 0.03
	CI	03/03/2017	5.9	17.27 ± 0.03
370702	CI	11/03/2017	13.8	17.48 ± 0.05
2004NC9	CI	12/03/2017	14.7	17.55 ± 0.04
	CI	19/03/2017	21.9	17.77 ± 0.04
	CI	28/03/2017	30.3	18.22 ± 0.04
480824	CI	01/12/2016	2.4	16.55 ± 0.05
1999JO6	CI	06/12/2016	5.1	16.69 ± 0.05
	CI	07/12/2016	5.2	16.79 ± 0.05
	CI	07/12/2016	5.7	16.76 ± 0.06
	CI	17/12/2016	10.3	17.07 ± 0.09
	CI	18/12/2016	10.7	17.00 ± 0.07
	CI	01/01/2017	15.7	17.34 ± 0.08
484506	OASI	05/03/2017	2.4	20.12 ± 0.03
2008ER7	OASI	04/03/2017	2.9	20.11 ± 0.03
	CI	03/03/2017	3.2	20.08 ± 0.04
	CI	02/03/2017	4.3	20.15 ± 0.03
	CI	27/02/2017	8.7	20.18 ± 0.03
	CI	26/02/2017	10.5	20.29 ± 0.04
	CI	16/03/2017	12.9	20.40 ± 0.06
	OASI	23/02/2017	17.9	20.61 ± 0.03
	CI	22/02/2017	20.1	20.57 ± 0.04
2001UG18	CI	21/11/2016	2.5	20.76 ± 0.03
	CI	22/11/2016	2.7	20.66 ± 0.05
	CI	16/11/2016	2.8	20.96 ± 0.08
	CI	22/11/2016	3.3	20.82 ± 0.07
	CI	23/11/2016	3.5	20.77 ± 0.04
	CI	23/11/2016	4.2	20.88 ± 0.06
	CI	30/11/2016	9.5	21.06 ± 0.08
	CI	01/12/2016	10.2	21.09 ± 0.09
	CI	06/12/2016	13.3	21.16 ± 0.09
	CI	17/12/2016	19.1	21.36 ± 0.17
2005TF	OASI	24/10/2016	4.4	19.83 ± 0.15
	OASI	27/10/2016	4.6	19.89 ± 0.23
	OASI	28/10/2016	4.8	20.34 ± 0.24
	CI	16/11/2016	17.9	20.76 ± 0.04
	CI	22/11/2016	23.2	21.02 ± 0.04
	CI	22/11/2016	23.7	21.12 ± 0.04
	CI	01/12/2016	29.6	21.19 ± 0.04
	CI	06/12/2016	31.9	21.28 ± 0.05
	CI	10/12/2016	32.4	21.14 ± 0.04
2014AD17	CI	11/01/2017	4.7	20.17 ± 0.06
	OASI	23/01/2017	8.0	20.34 ± 0.09
	OASI	25/01/2017	9.4	20.44 ± 0.02
	OASI	26/01/2017	10.1	20.51 ± 0.03
	OASI	27/01/2017	10.8	20.11 ± 0.08
	CI	02/01/2017	11.4	20.44 ± 0.05
	CI	24/12/2016	17.8	20.66 ± 0.05
2016WU3	CI	08/12/2016	5.7	20.43 ± 0.06

**Table A1** – *continued*

Object	Observatory	Date (UT)	$\alpha$ (°)	Rmag
2017CR32	CI	09/12/2016	7.7	$20.55 \pm 0.06$
	CI	10/12/2016	8.7	$20.49 \pm 0.05$
	CI	15/12/2016	14.5	$20.87 \pm 0.06$
	CI	17/12/2016	16.6	$20.97 \pm 0.05$
	CI	18/12/2016	17.7	$21.05 \pm 0.06$
	CI	23/12/2016	22.9	$21.18 \pm 0.06$
	OASI	24/03/2017	0.8	$22.32 \pm 0.02$
	OASI	25/03/2017	1.9	$22.45 \pm 0.12$
	CI	25/03/2017	2.0	$22.44 \pm 0.06$
	OASI	26/03/2017	4.6	$22.48 \pm 0.02$
	OASI	22/03/2017	6.2	$22.51 \pm 0.02$
	OASI	27/03/2017	7.3	$22.72 \pm 0.02$
	CI	27/03/2017	9.6	$22.83 \pm 0.07$
	OASI	28/03/2017	9.7	$22.66 \pm 0.02$
2017CR32	OASI	28/03/2017	9.9	$22.66 \pm 0.02$
	CI	19/03/2017	11.5	$22.72 \pm 0.08$
	CI	29/03/2017	12.2	$22.87 \pm 0.06$
	CI	17/03/2017	16.7	$23.08 \pm 0.08$
	CI	16/03/2017	19.0	$22.90 \pm 0.07$
2017DC38	CI	31/03/2017	19.1	$23.13 \pm 0.10$
	CI	28/03/2017	1.1	$24.40 \pm 0.06$
	CI	27/03/2017	1.8	$24.30 \pm 0.05$
	CI	31/03/2017	6.5	$24.70 \pm 0.05$
	CI	31/03/2017	9.7	$24.88 \pm 0.07$

This paper has been typeset from a  $\text{\TeX/L\AA\TeX}$  file prepared by the author.

# Physical properties of NEOs derived from their phase curves

Plícida Arcoverde<sup>a,\*</sup>, Eduardo Rondón<sup>a</sup>, Filipe Monteiro<sup>a</sup>, Wesley Pereira<sup>a</sup>, Simone Ieva<sup>b</sup>, Daniela Lazzaro<sup>a</sup>, Tatiana Michtchenko<sup>c</sup>, Marçal Evangelista<sup>a</sup>, Jonatan Michimani<sup>a</sup>, Wesley Mesquita<sup>a</sup>, Tatiane Corrêa<sup>a</sup>, Elisabetta Dotto<sup>b</sup>, Alessio Giunta<sup>b</sup>, Andrea Di Paola<sup>b</sup>, Hissa Medeiros<sup>d</sup>, Jorge M. Carvano<sup>a</sup> and Teresinha Rodrigues<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Observatório Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>b</sup>INAF - Osservatorio Astronomico di Roma, via Frascati 33, I-00078, Monteporzio Catone (Roma), Italy

<sup>c</sup>Universidade de São Paulo, IAG, Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, 05508-090, São Paulo, Brasil

<sup>d</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), C/Vía Láctea sn, 38205, La Laguna, Spain

## ARTICLE INFO

Keywords:  
NEOs  
Phase curves

## ABSTRACT

The observation of Near-Earth objects (NEOs) allows us to study the physical characteristics of the smallest size bodies of our Solar System as well to impose constraints on their origin and evolution. Among the diverse physical properties of a small body, the way its surface reflects light according to the illumination angle, what is called the photometric phase curve, is of the utmost importance. Therefore, we set up an observational campaign in order to determine the phase curve for a large number of NEOs, deriving their absolute magnitude,  $H$ , and the  $G_1$  and  $G_2$  parameters. Then, using data from the dual-band photometry phase curves of NEOs and Main Belt object (MB), acquired by the Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System telescopes Survey, we analyzed the behavior in the phase space  $G_1$  vs  $G_2$  of 21,865 MB and 105 NEOs. The objects were separated in three albedo ranges - low, medium and high - and three diameter ranges - smaller than 10km, larger than 10km but smaller than 50km, and larger than 50km. We present here the obtained phase curves for 13 NEOs, 8 belonging to the Amor group and 5 to the Apollo group, along with the rotation period for 3 of them and the V-R colour for 4. The data was acquired mainly at the Astronomical Observatory of Sertão de Itaparica (Brazil), with some NEOs also observed at the Osservatorio di Campo Imperatore (Italy). Considering all the objects observed in our campaign we analyzed an homogeneous dataset of 32 NEOS. From the large MB data set we found evidence that the distribution in the  $G_1$ - $G_2$  phase space has strong dependence not only on the albedo but also on the object's size. This is particularly true for the smaller objects. The main result being that, on the contrary to what occurs with the MB and larger objects, we are unable to estimate the albedo of a NEO from its phase curve parameters. Obviously, a larger dataset of very small MB objects is needed to confirm if the above mentioned behaviour is specific to NEOs or to all very small Solar System bodies.

## 1. Introduction

The study of the different physical properties of small bodies in the Solar System provides a better understanding on how they are distributed within the different populations. These distributions, in turn, allow us to obtain important information about the physical processes that are acting, or that acted in the past, and to impose constraints to the formation and evolution models of our planetary system.


Near Earth objects (NEO), which can be asteroids or comets, form a particularly interesting population to study (e.g. (Binzel, Reddy and Dunn, 2015)). Considering that these objects are in unstable orbits over the age of the Solar System, this implies that it is a transient population, whose main source is estimated to be the innermost regions of the Main Belt of asteroids (MB) (Michel, Zappalà, Cellino and Tanga, 2000; Bottke, Morbidelli, Jedicke, Petit, Levison, Michel and Metcalfe, 2002; Morbidelli, Walsh, O'Brien, Minton and Bottke, 2015). Therefore, several studies are being carried on to confirm this hypothesis and to identify the most probable regions which deliver the NEOs to their

current location. One approach is the comparison of the physical properties of different populations.

Important physical properties of atmosphereless bodies can be derived from their phase curves which represent how the object's brightness varies with the solar phase angle. These properties are based on the understanding that the physical properties of the material present on the object's surface can be retrieved from the analysis of the scattering of the incident solar radiation. In particular, properties related to the composition, texture, and roughness can be determined (Hapke, 1981, 1984; Lumme and Bowell, 1981; Hapke, 1986; Helfenstein and Veeverka, 1989).

The current models that describe the phase curve of atmosphereless objects, adopted by the IAU since 2010, are the H- $G_1 - G_2$  and the H- $G_{12}$  (Muinonen, Belskaya, Cellino, Delbò, Lvasseur-Regourd, Penttilä and Tedesco, 2010; Penttilä, Shevchenko, Wilkman and Muinonen, 2016). In Penttilä et al. (2016) it is suggested a constrained non-linear least-squares method for the 3-parameter model H- $G_1 - G_2$ , to ensure a good phase curve fit even with few data. On the other hand, in cases with a good coverage, the two methods are equivalent, there is no restriction between the linear and non-linear methods.

\*Corresponding author

 plicidaarcoverde@on.br (P. Arcoverde)  
ORCID(s):



The absolute magnitude,  $H$ , is defined as the reduced magnitude at zero solar phase angle, and is fundamental to correctly determine the diameter of a body, when its albedo is known. On the other hand, the slope parameters,  $G_1 - G_2$ , give information on the albedo, taxonomic type, surface roughness and porosity (Belskaya and Shevchenko, 2000; Warner, Harris and Pravec, 2009; Shevchenko, Belskaya, Muinonen, Penttilä, Krugly, Velichko, Chiorny, Slyusarev, Gaftonyuk and Tereschenko, 2016). It is important to note that in order to have a reliable determination of these parameters, it is necessary a good coverage in terms of phase angles, the best being between nearly  $0^\circ$  up to  $30 - 35^\circ$ . The most crucial region is between  $0^\circ$  and  $\sim 8^\circ$ , where it take place the opposition effect (OE). This phenomenon is characterized by the exponential increase in brightness of objects without atmosphere caused by shadowing-mechanism and coherent-backscattering effects (e.g. Irvine (1966); Hapke (1981); Shkuratov, Kreslavsky, Ovcharenko, Stankevich, Zubko, Pieters and Arnold (1999); Morozhenko and Vidmachenko (2013); Mishchenko and Dlugach (1992); Mishchenko (1992); Belskaya and Shevchenko (2000); Mishchenko, Dlugach, Liu, Rosenbush, Kiselev and Shkuratov (2009); Muinonen, Mishchenko, Dlugach, Zubko, Penttilä and Videen (2012)).

With the aim to obtain physical parameters of NEOs since 2017 we set up an observational campaign to derive phase curves of these objects (Rondón, Arcoverde, Monteiro, Medeiros, Navas, Lazzaro, Carvano and Rodrigues (2019); Rondón, Lazzaro, Carvano, Monteiro, Arcoverde, Evangelista, Michimani, Mesquita and Rodrigues (2022), and Ieva et al. (accepted)), and here we present the results for 13 NEOs. The total sample of 32 acquired by the observing campaign was then used to perform a comparative study between the phase curve parameters of NEOs and objects from the MB.

The present work is organized as follows: in Section 2 we describe the observations and data reduction, as well as the methodology used to derive the phase curve parameters. In Section 3 we present and discuss the results for each NEO separately. In Section 4 we first describe the databases used to compare NEOs with MB objects and then perform several analysis searching for trends that can help derive physical information on a body from its phase curve parameters.

## 2. Observations

### 2.1. Observations and data reduction

The data to derive the NEOs phase curves was mostly obtained at the *Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica* (OASI, Brazil), within the framework of the IMPACTON project (Lazzaro, 2010; Rondón, Lazzaro, Rodrigues, Carvano, Roig, Monteiro, Arcoverde, Medeiros, Silva, Jasmim, Prá, Hasselmann, Ribeiro, Dávalos and Souza, 2020). The observations were performed using the 1-m telescope and two CCD cameras with different pixel arrays, one of  $1024 \times 1024$  and the other of  $2048 \times 2048$  (details on the available instrumentation at OASI are given in Rondón

et al. (2020)). A R-Cousins filter was used in all observations that took place between September 2016 and March 2021.

To obtain the reduced magnitude at different solar phase angles, thus the phase curve, we observed our target and a Landolt standard star three or four times over the night. At each time, four or more images were obtained, and the resulting magnitudes were then averaged to reduce the random error. The whole procedure was repeated on different nights over one or more months to map different solar phase angles of the NEO. The data reduction was performed using Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) software, correcting the science image by bias, dark and flat frames. Through these corrected images we determined the instrumental magnitudes and their errors for the asteroid and the standard star using aperture photometry through growth curve (Howell, 1989). The standard stars were used to compute the zero point and the extinction coefficient of the night, and the respective uncertainties.

In order to determine the phase curve corrected by the object's rotation, as explained in the next section, it was also necessary to obtain simultaneously its lightcurve. The lightcurve was determined by observing the target over several hours per night using differential tracking. The lightcurve was then obtained using standard procedures to derive relative or reduced magnitudes, and the period determined by a Fourier fit (Harris et al. 1978).

Some NEOs were also observed at the *Osservatorio di Campo Imperatore* (CI, Italy). The observations were performed using the 0.9m Schmidt Telescope equipped with a  $4096 \times 4096$  CCD covering a field of view of  $1.15 \times 1.15$  square degrees and a scale of  $1''/\text{pixel}$ . A Sloan Digital Sky Survey (SDSS) r filter was used in all observations obtained between May 2016 and June 2017. For these observations were applied standard reduction techniques and also was necessary to transform the reduced magnitudes to the R-Cousins filter as described in Ieva et al. 2022.

All magnitudes and observational conditions from OASI and CI are reported in the Appendix 3.

### 2.2. Parameters determination

Since 2010 the IAU adopted the three parameters model  $H - G_1 - G_2$  developed by Muinonen et al. (2010) as the standard fit for solar phase curve modeling. However, when the number of observations is small or when the data has low precision, the fit fails. Penttilä et al. (2016) solves this problem using a restricted nonlinear least-squares algorithm to fit the data to the model. Since our data are obtained at spaced intervals and sometimes with few observations we, thus, used this approach where the curve parameters are given from the equations below:

$$H(\alpha) = H_0 - 2.5 \log_{10}[(G_1 \Phi_1(\alpha) + G_2 \Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2) \Phi_3(\alpha)] \quad (1)$$

Before fitting the model to our data it is important to note that the solar phase curve is highly affected by the shape

of the object, especially if this is elongated. The elongated shape of an asteroid can cause large variations, or amplitude, of the lightcurve which can lead to significant differences between the magnitude determined at the minimum or the maximum. These variation result in fluctuations of the phase curve points with large influence on the fit errors.

To correct this effect, it is necessary to determine the lightcurve of the asteroid at the same time in which the data of the phase curve is taken, or very near it. Thus, we use the amplitude of the rotational lightcurve following the methodology applied in Rondón et al. (2019), using equations (2) - (4):

$$V'(\phi) = VA(\phi + \phi_0) \quad (2)$$

$$H'_c(\alpha) = H(\alpha) - \Delta V'(\phi) \quad (3)$$

$$f_{xc} = f_x 10^{\Delta V'(\phi)} \quad (4)$$

where  $A$  is the amplitude ratio of the rotational lightcurves and  $\phi_0$  is the phase shift. As a result, we obtain a nominal correction  $V(\phi)$  that will be applied to the reduced magnitudes, minimizing the dispersion of the curve. It is important to note, that in some cases we used data from the MPC database (<https://aldef.org/>) when this was obtained near the time of our observations.

Once the absolute magnitude, the V - R color and the visible albedo are known, it is possible to determine the diameter of the object using the equation (5) (Tedesco, Veeder, Fowler and Chillemi, 1992; Harris and Lagerros, 2002; Rondón et al., 2019). In our case, we use visual albedo values from the literature for the NEOs that we derive the V - R color, since the absolute magnitude is obtained in the R-Cousins filter ( $H_{0R}$ ):

$$D = \frac{1340 * 10^{-1/5(H_{0R}+V-R)}}{\sqrt{p_v}} \quad (5)$$

In table 1 for each of the 13 observed NEOs is given, the name, the group, the period of observation and the solar phase interval. Whenever available, is also given the albedo from NEOWISE (Mainzer, Bauer, Grav, Masiero, Cutri, Dailey, Eisenhardt, McMillan, Wright, Walker, Jedicke, Spahr, Tholen, Alles, Beck, Brandenburg, Conrow, Evans, Fowler, Jarrett, Marsh, Masci, McCallon, Wheelock, Wittman, Wyatt, DeBaun, Elliott, Elsbury, Gautier, Gomillion, Leisawitz, Maleszewski, Micheli and Wilkins, 2011), the taxonomic classification derived by different authors, as well as the the period rotation and lightcurve amplitude used for correction. The obtained corrected magnitudes are given in the Appendix 4.

### 3. Results

#### 3.1. NEOs phase curves

In this work we derived phase curves for 13 NEOs, 8 belonging to the Amor group - (4055) Magellan, (18109) 2000 NG11, (99799) 2002 LJ3, (174050) 2002 CC19, (480004) 2014 KD91, 2011 YQ10, 2016 RP33, 2017 AC5 - and 5 to the Apollo group - (40267) 1999 GJ4, (65717) 1993 BX3, (417581) 2006 VA3, (464797) 2004 FZ1, and 2019 CT4. Among these, (65717) 1993 BX3 is also classified as PHA (Potentially Hazardous Asteroids). For four NEOs, (65717) 1993 BX3, (174050) 2002 CC19, (417581) 2006 VA3 and 2011 YQ10, we also obtained their V - R color.

In table 2 are summarized the derived absolute magnitudes and slope parameters as well as the V - R color, with respective date and phase angle at which it was acquired. The obtained phase curves, with respective fit to the  $H-G_1 - G_2$  model, will be shown and discussed below for each one of the observed NEO.

##### 3.1.1. (4055) Magellan

Classified as a V-type (Sanchez, Michelsen, Reddy and Nathues, 2013; Thomas et al., 2014; Vereš, Jedicke, Fitzsimmons, Denneau, Granvik, Bolin, Chastel, Wainscoat, Burgett, Chambers, Flewelling, Kaiser, Magnier, Morgan, Price, Tonry and Waters, 2015; Carry et al., 2016; Lin et al., 2018; Binzel et al., 2019), this NEO, belonging to the Amor group, was observed only at CI between February and March 2017. With an albedo of  $p_v = 0.330$  and a diameter of  $D = 2.781\text{km}$  determined by Mainzer et al. (2011), this NEO had a phase angle coverage from  $3.0^\circ$  to  $13.7^\circ$ , and the derived magnitude and absolute slope parameters are  $H_{0R} = 13.94 \pm 0.188$ ,  $G_1 = 0.07041$  and  $G_2 = 0.3724$ . In Fig. 1 is shown the phase curve, which presents a large opposition surge, as expected for high albedo objects (Belskaya and Shevchenko, 2000).

The rotation period for this NEO was determined by several authors (Erasmus, Mommert, Trilling, Sickafoose, van Gend and Hora, 2017; Vaduvescu, Macias, Tudor, Predatu, Galád, Gajdoš, Világi, Stevance, Errmann, Unda-Sanzana, Char, Peixinho, Popescu, Sonka, Cornea, Suci, Toma, Santos-Sanz, Sota, Licandro, Serra-Ricart, Morate, Mocnik, Diaz Alfaro, Lopez-Martinez, McCormac and Humphries, 2017; Warner, 2017a; Pravec, 2019; Ieva et al., 2020). However, to correct our magnitudes we used the data from Warner (2017b), with a rotation period of  $P = 7.52\text{h} \pm 0.01$  and a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.38$  mag, since it was obtained close to our observations, on 2017 March 08. Moreover, we corrected only the magnitudes obtained in dates close to the obtained lightcurve by Warner (2017b), the three points with smaller phase angles, since applying the correction to all points could generate a greater dispersion.

This NEO also has phase curve in the  $H-G_1 - G_2$  model determined by Mahlke, Carry and Denneau (2021), with phase angle coverage from  $2.5^\circ$  to  $37.5^\circ$  in the cyan filter, deriving an absolute magnitude and slope parameters of  $H_{0R} = 14.96 \pm 0.070$ ,  $G_1 = 0.0093$  and  $G_2 = 0.6546$ , and a phase angle coverage from  $1.5^\circ$  to  $49.5^\circ$  in the orange filter,

**Table 1**

For each observed NEO is given the name, the period of observation, the solar phase angle interval, the albedo, the taxonomic type, when available, the rotation period and lightcurve amplitude used for correction.

Asteroid	Group	observation period	Phase angle interval ( $^{\circ}$ )	albedo <sup>1</sup> $p_v$	Tax. type	Period (h)	Amplitude (mag)
(4055) Magellan	Amor	02/2017 - 03/2017	3.0 - 13.7	0.330	V <sup>2</sup>	7.52 <sup>3</sup>	0.38
(18109) 2000 NG11	Amor	02/2018 - 10/2018	3.4 - 34.8	-	C <sup>4</sup> /X <sup>5</sup>	4.252 <sup>6</sup>	0.84
(40267) 1999 GJ4	Apollo	02/2017 - 03/2017	3.7 - 25.6	0.453	S <sup>7</sup> /Sq <sup>8</sup>	4.958 <sup>9</sup>	1.00
(65717) 1993 BX3	Apollo (PHA)	02/2021 - 03/2021	7.9 - 34.7	0.15 <sup>7</sup>	-	20.331 <sup>10</sup>	0.83
(99799) 2002 LJ3	Amor	08/2018 - 12/2018	8.6 - 62.3	0.43 <sup>11,12</sup>	Sq <sup>13</sup> /S <sup>5</sup> /Q <sup>2</sup>	2.64 <sup>6</sup> 0.23	
(174050) 2002 CC19	Amor	02/2021 - 02/2021	6.2 - 35.4	-	-	3.514	0.09
(417581) 2006 VA3	Apollo	02/2021 - 02/2021	11.3 - 81	0.145 <sup>14</sup>	-	5.481 <sup>6</sup>	0.40
(464797) 2004 FZ1	Apollo	08/2016 - 08/2016	8.7 - 18.9	0.103 <sup>14</sup>	Sr <sup>2</sup>	-	-
(480004) 2014 KD91	Amor	09/2016 - 10/2016	14.8 - 26.6	0.125 <sup>14</sup>	-	2.835 <sup>6</sup>	0.17
2011 YQ10	Amor	10/2021 - 12/2021	5.7 - 48.3	-	-	4.824	0.144
2016 RP33	Amor	09/2016 - 09/2016	7.6 - 18.3	-	-	-	-
2017 AC5	Amor	02/2017 - 03/2017	5.4 - 18.8	-	S <sup>15</sup>	5.922 <sup>3</sup>	0.81
2019 CT4	Apollo	03/2019 - 03/2019	6.75 - 26.6	-	-	5.291	0.82

**References;** (1) Mainzer et al. (2011), (2) Binzel, DeMeo, Turtelboom, Bus, Tokunaga, Burbine, Lantz, Polishook, Carry, Morbidelli, Birlan, Vernazza, Burt, Moskovitz, Slivan, Thomas, Rivkin, Hicks, Dunn, Reddy, Sanchez, Granvik and Kohout (2019), (3) Warner (2017a), (4) Dandy, Fitzsimmons and Collander-Brown (2003), (5) Carry, Solano, Eggel and DeMeo (2016), (6) Monteiro et al.(2022) in preparation, (7) Lin, Ip, Lin, Cheng, Lin and Chang (2018), (8) Binzel, Lupishko, di Martino, Whiteley and Hahn (2002), (9) Warner (2017c), (10) Warner and Stephens (2021), (11) Mueller, Delbo', Hora, Trilling, Bhattacharya, Bottke, Chesley, Emery, Fazio, Harris, Mainzer, Mommert, Penprase, Smith, Spahr, Stansberry and Thomas (2011), (12) Trilling, Mueller, Hora, Harris, Bhattacharya, Bottke, Chesley, Delbo, Emery, Fazio, Mainzer, Penprase, Smith, Spahr, Stansberry and Thomas (2010), (13) Thomas, Emery, Trilling, Delbo', Hora and Mueller (2014), (14) Masiero, Smith, Teodoro, Mainzer, Cutri, Grav and Wright (2020b), (15) Ieva, Dotto, Mazzotta Epifani, Perna, Fanasca, Lazzarin, Bertini, Petropoulou, Rossi, Micheli and Perozzi (2020).

**Table 2**

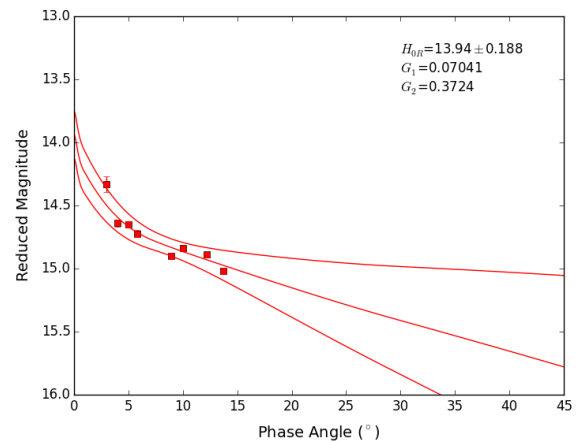
Determined parameter for 13 NEOs observed at OASI and CI. In the upper part are given the phase curve parameters were the columns indicate the asteroid name, the absolute magnitude ( $H_{R0}$ ), and the slope parameters ( $G_1$  and  $G_2$ ). In the lower part are given the V - R colors derived for four objects along with the date and phase angle at which the color was acquired.

Asteroid	$H_{R0}$	$G_1$	$G_2$
(4055) Magellan	13.94 $\pm$ 0.188	0.07041	0.3724
(18109) 2000 NG11	16.53 $\pm$ 0.01	0.8301	0.01628
(40267) 1999 GJ4	14.28 $\pm$ 0.083	0.01853	0.169
(65717) 1993 BX3	20.45 $\pm$ 0.199	0.9662	0.0
(99799) 2002 LJ3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	0.2208
(174050) 2002 CC19	16.5 $\pm$ 0.377	0.0	0.1649
(417581) 2006 VA3	17.37 $\pm$ 0.055	0.7687	0.2313
(464797) 2004 FZ1	17.39 $\pm$ 0.091	0.2593	0.3831
(480004) 2014 KD91	16.96 $\pm$ 0.328	0.2613	0.3499
2011 YQ10	18.83 $\pm$ 0.012	0.6932	0.3068
2016 RP33	19.05 $\pm$ 0.012	0.8192	0.0
2017 AC5	20.01 $\pm$ 0.178	0.819	0.0
2019 CT4	24.27 $\pm$ 0.254	0.1736	0.5593

Asteroid	V - R	date	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
(65717) 1993 BX3	0.484	2021/03/13	7.9
(174050) 2002 CC19	0.231	2021/02/11	35.4
(417581) 2006 VA3	0.435	2021/02/11	26.3
2011 YQ10	0.496	2021/10/05	47.7

deriving an absolute magnitude and slope parameters of  $H_{00}$  = 14.81  $\pm$  0.091,  $G_1$  = 0.1281 and  $G_2$  = 0.7384. Both curves were derived with data from the ATLAS catalogue (Tonry,



**Figure 1:** Phase curve of the NEO (4055) Magellan. The points are the corrected reduced magnitudes, with respective errors, while the lines indicate the best fit to the  $H-G_1 - G_2$  model and the envelope error.

Denneau, Flewelling, Heinze, Onken, Smartt, Stalder, Weiland and Wolf, 2021), the phase curve parameters are dependent on the used filter as well as on the phase angle coverage and to the removal or not of rotational effects, thus, the above differences in the obtained values are to be expected.

### 3.1.2. (18109) 2000 NG11

The phase curve for this NEO belonging to the Amor group was obtained over 19 nights, between February and October 2018, at OASI. It has the best coverage among all

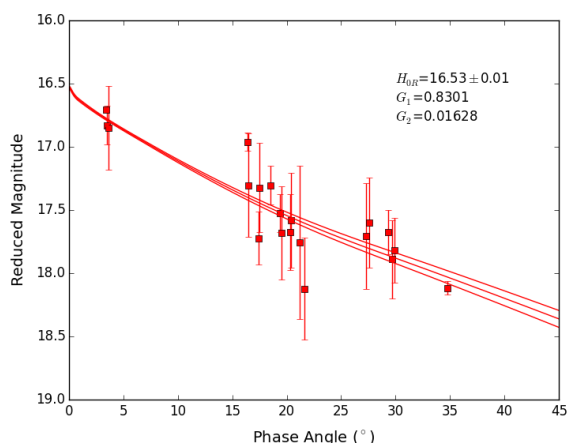


Figure 2: Same as Fig. 1 for the NEO (18109) 2000 NG11.

our sample, both in the opposition effect region, with the lowest solar phase angle of  $3.4^\circ$ , and in the linear region, with data up to  $34.8^\circ$ . The phase curve is shown in Fig. 2 and the derived absolute magnitude and slope parameters are  $H_{0R} = 16.53 \pm 0.01$ ,  $G_1 = 0.8301$  and  $G_2 = 0.01628$ . It is noteworthy that due to the well covered phase curve, the fit has very small errors in the absolute magnitude and slope parameters.

The lightcurve used to correct for reduced magnitudes was determined by Monteiro et al. (2022) (in preparation) from observations obtained on November 11 and 12, 2018, at OASI. The derived rotational period has a value of  $P = 4.252\text{h} \pm 0.001$  with a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.84$  mag. Due to the large amplitude, corrections for rotational effects on the phase curve were applied only to the data obtained between November and December, corresponding to the phase angle interval of  $27.3^\circ$  to  $35^\circ$ . The remaining magnitudes were not corrected for rotation, fact that might be responsible for the fluctuations visible around the fit at phase angles between 15 to 22. It is noteworthy, however, that this fact does not affect the determination of a very good fit to the data.

Finally it is important to mention that the rotational period of this NEO was previously determined by several authors (Pravec, 2000; Warner, 2014; Chang, Ip, Lin, Cheng, Ngeow, Yang, Waszczak, Kulkarni, Levitan, Sesar, Laher, Surace and Prince, 2015; Waszczak, Chang, Ofek, Laher, Masci, Levitan, Surace, Cheng, Ip, Kinoshita, Helou, Prince and Kulkarni, 2015; Carbognani, 2017; Warner and Stephens, 2019), all with values similar to the one here determined, thus none within the period of our observations. Moreover, it was taxonomically classified as C-type by Dandy et al. (2003) and as X-type by Carry et al. (2016), both from photometric spectra.

### 3.1.3. (40267) 1999 GJ4

This target was observed over 15 nights between February and March 2017, with data obtained both at OASI and CI, resulting in a phase angle coverage from  $3.7^\circ$  up to  $25.6^\circ$ .

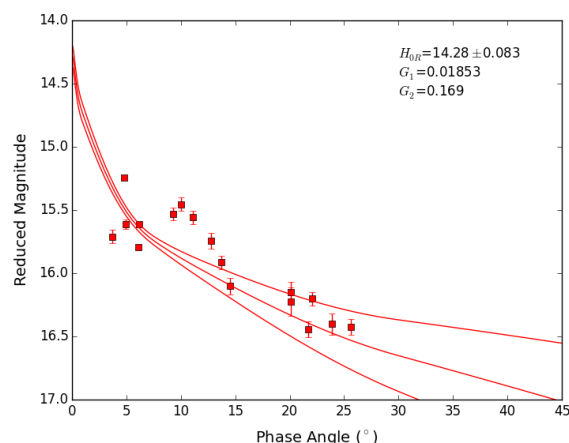


Figure 3: Same as Fig. 1 for the NEO (40267) 1999 GJ4.

Belonging to the Apollo group, it was classified by Lin et al. (2018) as S- and later as Sq-type by Binzel et al. (2019). Mainzer et al. (2011) determined an albedo  $p_v = 0.450$  and a diameter of  $D = 1.641\text{km}$  for this asteroid.

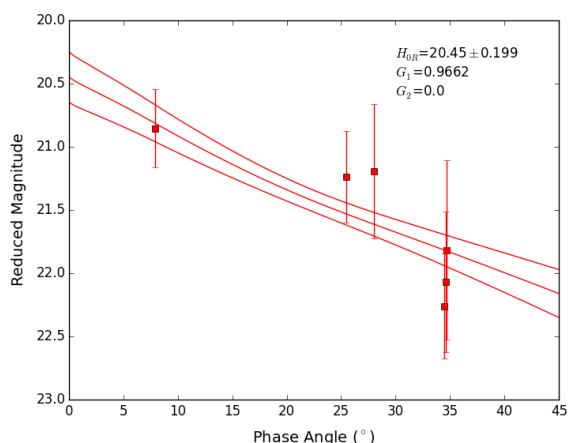
Rotational effect were corrected using data by Warner (2017b), obtained on 2017 February 07, with a period of  $P = 4.958\text{h} \pm 0.0005$  and a composite lightcurve amplitude of  $A = 1.00$  mag. Since several authors (Galád, Pravec, Kušnirák, Gajdoš, Kornoš and Világi, 2005; Polishook, 2012; Warner, 2014; Waszczak et al., 2015; Vaduvescu et al., 2017; Ďurech, Hanuš and Alí-Lagoa, 2018) obtained lightcurves with amplitudes ranging from 0.67 up to 1.1, we applied the correction only to those magnitudes obtained close to the epoch of the data by Warner (2017b), i.e., at phase angles between  $3.7^\circ$  and  $11.1^\circ$ .

Due to the good phase angle coverage, especially in the opposition effect region, the fit has very small errors in absolute magnitude and slope parameters. The phase curve is shown in Fig. 3 and the derived absolute magnitude and slope parameters are  $H_{0R} = 14.28 \pm 0.083$ ,  $G_1 = 0.01853$  and  $G_2 = 0.169$ .

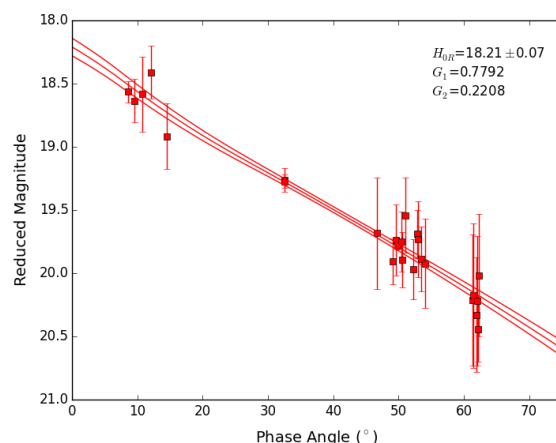
A phase curve for this NEO in the  $H-G_1-G_2$  model was previously determined by Mahlke et al. (2021), with a phase angle coverage from  $2.34^\circ$  to  $58.39^\circ$  in the orange filter, from data of the ATLAS catalogue, deriving an absolute magnitude and slope parameters of  $H_{0o} = 14.96 \pm 0.076$ ,  $G_1 = 0.0093$  and  $G_2 = 0.6546$ . As mentioned above, the different filters and phase angle coverage might explain the differences in the derived parameters (see section 4).

### 3.1.4. (65717) 1993 BX3

This asteroid, belonging to the Apollo group, has a medium albedo of  $p_v = 0.15$  and a mean diameter of  $D = 200$  m as given by Binzel et al. (2002), and is the only PHA in our sample. For this object, it was possible to determine the color  $V - R = 0.484 \pm 0.309$ , and from the equation (5), we derived the effective diameter of  $D = 225\text{m} \pm 0.169$ , similar to the value found by Binzel et al. (2002). The phase curve was obtained at OASI over 4 nights between 2021 February



**Figure 4:** Same as Fig. 1 for the NEO (65717) 1993 BX3.



**Figure 5:** Same as Fig. 1 for the NEO (99799) 2002 LJ3.

4 and March 13, with a phase angle coverage ranging from  $7.9^\circ$  up to  $34.7^\circ$ .

The rotational period for this object was determined by diverse authors (Mottola, De Angelis, Di Martino, Erikson, Hahn and Neukum, 1995; Pravec, 2020; Warner and Stephens, 2021) but we used the value given by Warner and Stephens (2021) to correct our magnitudes, since the data was obtained near our observations, between February and March 2021. Thus, the used period was  $P = 20.331\text{h} \pm 0.002$  with a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.83$  mag. As can be seen in Fig. 4, some points still show relatively large dispersion, which can be attributed to the individual error of each magnitude or/and to the lack of data in the OE, besides the good range of phase angles. The derived values for the absolute magnitude and slope parameters are  $H_{0R} = 20.45 \pm 0.199$ ,  $G_1 = 0.9662$  and  $G_2 = 0.0$ .

### 3.1.5. (99799) 2002 LJ3

This NEO, of the Amor group, was observed at OASI from August to December, 2018. The derived values for the absolute magnitude and the slope parameters are  $H_{0R} = 18.21 \pm 0.07$ ,  $G_1 = 0.7792$  and  $G_2 = 0.2208$ , as shown in Fig. 5.

Although the phase curve is composed by data taken over several months, the correction for the rotational effects was performed using only one lightcurve determined by Monteiro et al. (2022) (in preparation) from observations on 2018 November 03, 05, 07 and 08 at OASI. These resulted in a rotational period of  $P = 2.64\text{h} \pm 0.001$  and amplitude of  $A = 0.23$  mag. Due to the small lightcurve amplitude, and the the fact that the phase curve does not present large fluctuations, we believe that the performed corrections are reliable.

This NEO has been observed by several authors resulting in slightly different taxonomic classifications such as Sq- by Thomas et al. (2014), S- by Carry et al. (2016), and Q-type by Binzel et al. (2019). Mueller et al. (2011) and Trilling et al. (2010) determined a high albedo of  $p_v = 0.43$ , however, our fit presents a flat behavior in the OE region which seems

not to be compatible, according to Belskaya and Shevchenko (2000). Obviously, this can be due to the lack of data in the OE region, for  $\alpha < 5^\circ$ , in our phase curve. It is to be noted, however, that the good coverage in the linear region of the fit resulted in small errors both in the absolute magnitude and slope parameters.

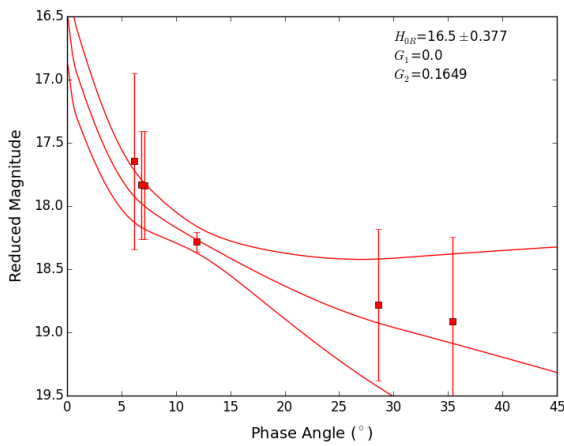
### 3.1.6. (174050) 2002 CC19

This NEO is an object of the Amor group and was observed at OASI during 5 nights on February 2021. The phase curve has a good angle coverage, from  $6.2^\circ$  to  $34.4^\circ$  (Fig. 6), with indication of a significant opposition surge. However, due to the non photometric conditions, the magnitudes present large errors which, in turn, lead to significant errors in the absolute magnitude and the slope parameters:  $H_{0R} = 16.5 \pm 0.377$ ,  $G_1 = 0.0$  and  $G_2 = 0.1649$ . With observations in the V-Johnson-Cousins filter, it was possible to derive the color  $V - R = 0.230 \pm 0.472$ .

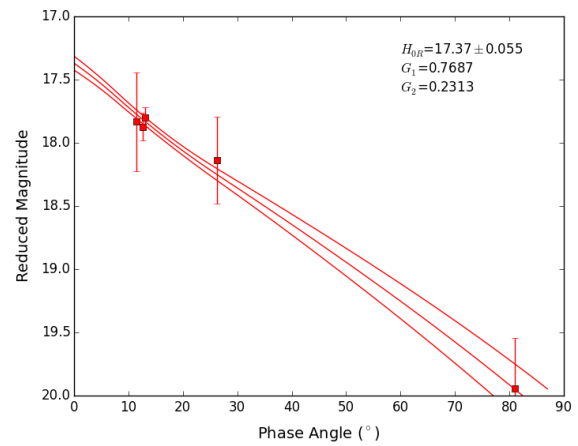
For this object, the lightcurve used to correct for the rotational effects was determined using the IMPACTON pipeline from observation at OASI on 2021 February 06 and 07. The data was fitted by a fourth-order Fourier series, giving a rotation period of  $4.22\text{h} \pm 0.01$  and a composite lightcurve amplitude of  $0.093\text{mag}$ . Using the quality code scheme developed by Harris and Young (1983), we attribute a quality code U=3 to this composite lightcurve. The rotational lightcurve is shown in Fig. 7. A different values was derived by Pravec (2021),  $P = 3.514\text{h} \pm 0.002$  and  $A = 0.086$ , from observations on 2021 February 12, 13 and 14, but with a quality code U=2, due to the low coverage of the data.

### 3.1.7. (417581) 2006 VA3

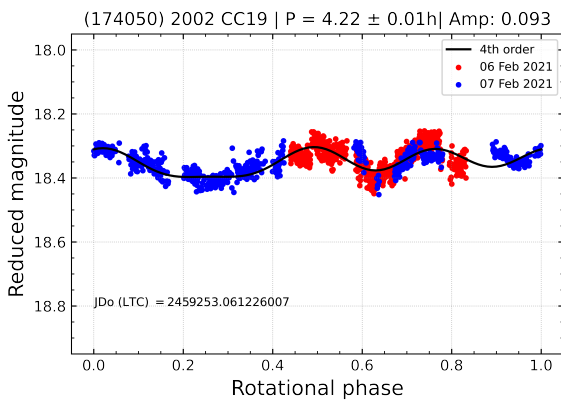
Classified as an object of the Apollo group, this NEO has a determined albedo of  $p_v = 0.145$  and a diameter of  $D = 1.041\text{m}$  (Masiero et al., 2020b). This asteroid was observed at OASI over five nights between 2021 February and March, having the largest phase angle coverage of our sample: from  $11.3^\circ$  up to  $81^\circ$ . Although the phase curve does not have



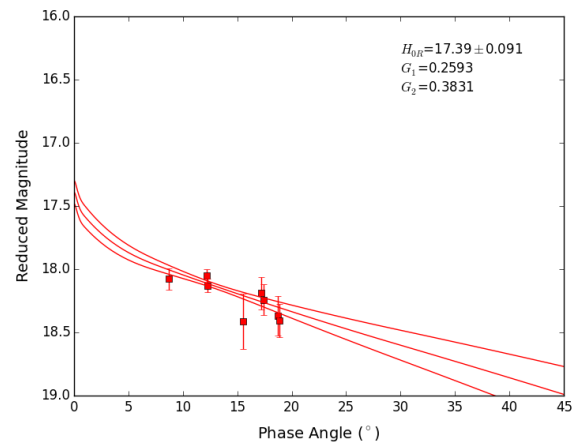
**Figure 6:** Same as Fig. 1 for the NEO (174050) 2002 CC19.



**Figure 8:** Same as Fig. 1 for the NEO (417581) 2006 VA3.



**Figure 7:** Composite lightcurve of the NEO (174050) 2002 CC19. The blue and red dots are from February 06 and 07, respectively. The black line indicate the best fit obtained with a fourth-order Fourier fit. The zero phase is on 2021/02/07 at 13:28:10 UT



**Figure 9:** Same as Fig. 1 for the NEO (464797) 2004 FZ1.

good coverage in the OE region, the fit presents very small errors in both absolute magnitude and slope parameters. The phase curve is shown in Fig. 8 and the derived absolute magnitude and slope parameters are  $H_{0R} = 17.37 \pm 0.055$ ,  $G_1 = 0.7687$  and  $G_2 = 0.2313$ .

The lightcurve used to correct for rotational effects was determined by Monteiro et al. (in preparation), based on observations obtained on 2021 February 09, 10, 11, and 12, at the OASI. A period of  $P = 5.481\text{h} \pm 0.002$  and a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.40$  mag were derived.

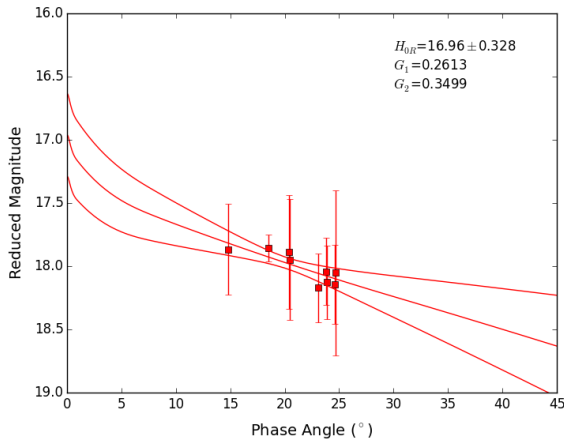
Lastly, we calculate an effective diameter of  $D = 0.967\text{km} \pm 0.283$  using the equation (5) with the absolute magnitude and albedo above, with the color  $V - R = 0.435 \pm 0.343$ , derived for us, we find the effective diameter similar to that found by Masiero et al. (2020b).

### 3.1.8. (464797) 2004 FZ1

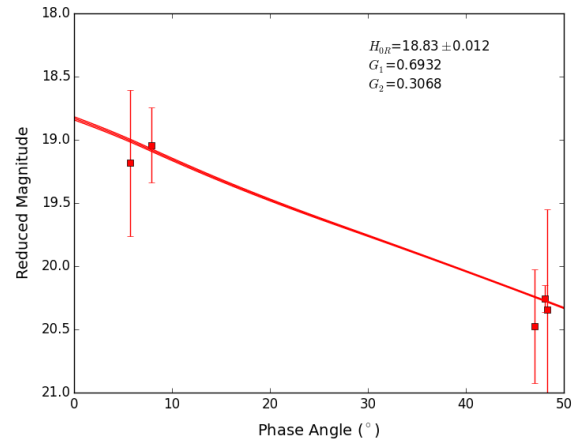
This asteroid is classified as Sr-type by Binzel et al. (2019), with an albedo of  $0.103 \pm 0.060$ , and diameter  $D$

$= 0.975$  km determined by Masiero et al. (2020b). This target, belonging to the Apollo group, was observed during 5 nights in August 2016, at OASI. The phase curve has an angle coverage from  $8.8^\circ$  to  $17.4^\circ$ , and is shown in Fig. 9. Although the magnitudes that compose the phase curve have very small errors, which indicates that they were obtained on photometric nights, the absolute magnitude determined has significant errors. This is probably due to the non-coverage of the OE region and the small phase angle coverage, with points concentrated around  $10$ - $25^\circ$ . The derived values for the absolute magnitude and slope parameters are  $H_{0R} = 17.39 \pm 0.091$ ,  $G_1 = 0.2593$  and  $G_2 = 0.3831$ .

This NEO has a rotational period of  $45.4\text{h} \pm 0.2$  with a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.39$ , determined by Warner (2017c) from data obtained over several nights on August 2016. Thus, correction for rotational effects was performed using data from this lightcurve, acquired on the same period of our observations.



**Figure 10:** Same as Fig. 1 for the NEO (480004) 2014 KD91.



**Figure 11:** Same as Fig. 1 for the NEO 2011 YQ10.

### 3.1.9. (480004) 2014 KD91

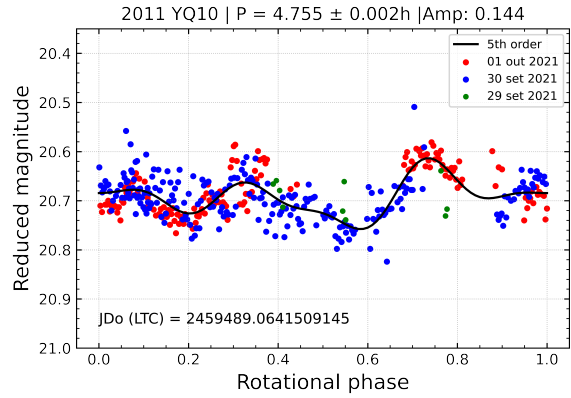
This asteroid of the Amor group, with a moderate albedo of 0.2 (Masiero, Mainzer, Bauer, Cutri, Grav, Kramer, Pittichová, Sonnett and Wright, 2020a) and a diameter of 0.125m (Masiero et al., 2020b)), was observed at OASI during eight nights between September and October 2016. This resulted in a small phase angle coverage, varying just from  $14.8^\circ$  to  $26.6^\circ$ , and with no points in the OE region. Although a rotation period was previously determined by several authors (Warner, 2016; Carbognani, 2017; Vaduvescu et al., 2017; Monteiro, Arcoverde, Medeiros, Rondon, Souza, Rodrigues and Lazzaro, 2018) a new lightcurve was obtained in the same period of our observations. A period of  $2.835\text{h} \pm 0.001$  and a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.17$  mag were determined (Monteiro et al. in preparation).

The fitted phase curve, shown in Fig.10, resulted in values for the absolute magnitude and slope parameters of  $H_{0R} = 16.96 \pm 0.328$ ,  $G_1 = 0.2613$  and  $G_2 = 0.3499$ . Due to the very concentrated data, and far from the opposition effect region, the fit has large errors.

### 3.1.10. 2011 YQ10

Classified as a NEO of the Amor group, this object was observed over 7 nights between October and December 2021. Its phase curve has a coverage from  $5.9^\circ$  up to  $48.3^\circ$  and shows a flat behavior in the region of the opposition effect. Although the large errors in the reduced magnitudes, the good coverage in phase angle made it possible to obtain absolute magnitude and slope parameters with small errors. The fitted phase curve, shown in Fig.11, provided values of the absolute magnitude and slope parameters of  $H_{0R} = 18.83 \pm 0.012$ ,  $G_1 = 0.6932$  e  $G_2 = 0.3068$ .

For this NEO, corrections for rotational effects were performed using a lightcurve obtained at OASI on 2021 September 29 and 30, and October 01 as shown in Fig. 12. The data was fitted by a fifth-order Fourier series, deriving a rotation period of  $P = 4.755\text{h} \pm 0.002$  and a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.144$  mag, with a quality code  $U=2$ . The period of this object was previously determined



**Figure 12:** Composite lightcurve of the NEO 2011 YQ10. The green, blue and red dots are from September 29, 30 and October 01, respectively. The black line indicate the best fit obtained with a fifth-order Fourier fit. The zero phase is on 2021/10/01 at 13:32:23 UT

by other authors, Pravec (2021) determined a period of  $P = 4.824\text{h} \pm 0.0007$  with a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.08$  mag, and Warner and Stephens (2022) determined a period of  $P = 4.827\text{h} \pm 0.002$  with a composite lightcurve amplitude of  $A = 0.14$  mag, taken on 2021 November 8, and 2021 September 16, respectively, which do not differ much from those determined here. For this NEO we also derive the color  $V - R = 0.496 \pm 0.296$ .

### 3.1.11. 2016 RP33

This NEO, belonging to the Amor group, was observed over 7 nights on 2016 September. With a phase angle coverage of  $7.6^\circ$  to  $14.7^\circ$  (Fig. 13), its phase curve indicates a significant opposition surge. However, the lack of coverage in the opposition effect region gives us an error of 0.3 mag in the absolute magnitude, with values of  $H_{0R} = 19.05 \pm 0.012$ ,  $G_1 = 0.8192$  and  $G_2 = 0.0$ .

This object has a rotational period determined from observations on 2016 September both by Warner (2017c),

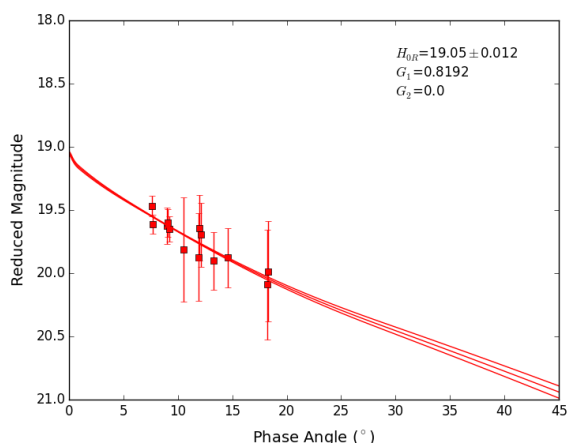


Figure 13: Same as Fig. 1 for the NEO 2016 RP33.

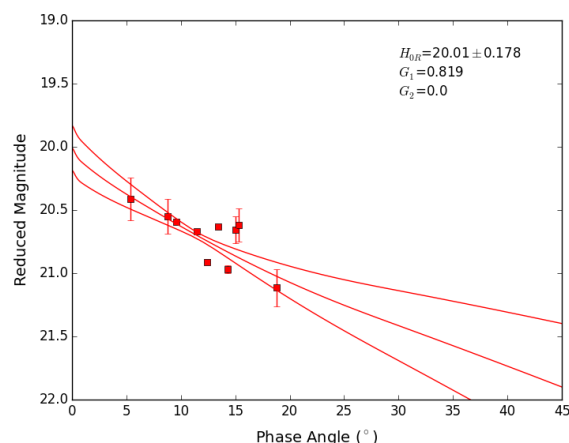


Figure 14: Same as Fig. 1 for the NEO 2017 AC5.

$P = 4.682\text{h} \pm 0.002$  and  $A = 0.15$  mag, and by Monteiro et al. (2018),  $P = 4.707\text{h} \pm 0.001$  and  $A = 0.22$  mag. The light curve reported in Monteiro et al. (2018) was observed in the same period as our observations, on 2016 September 24, and therefore we use it to make corrections for rotational effects on our phase curve.

### 3.1.12. 2017 AC5

With data from 10 nights of observations between 2017 February and March, both at OASI and CI, we determined the phase curve shown in Fig. 14 for this NEO of the Amor group. This asteroid shows the smallest errors in magnitudes of all the sample, and the phase angle coverage is from  $5.4^\circ$  to  $18.8^\circ$ . The absolute magnitude values and slope parameters of the curve are given by  $H_{0R} = 20.13 \pm 0.236$ ,  $G_1 = 0.8417$  and  $G_2 = 0.07512$ .

The rotational period of this NEO was determined by several authors (Erasmus et al., 2017; Vaduvescu et al., 2017; Warner, 2017a; Pravec, 2019; Ieva et al., 2020), but to correct our magnitudes we used the data from Warner (2017a) since it was obtained near our observations. The composite lightcurve reported by Warner (2017a) provided a rotational period of  $P = 5.922\text{h} \pm 0.005$  and a high amplitude of  $A = 0.81$  mag.

Among the other known physical properties of this NEO, it is important to note that it was classified as S-type by Ieva et al. (2020).

### 3.1.13. 2019 CT4

This object has the shortest observation interval of all our sample, with just two nights of observation, on 2019 February 28 and March 1. The resulting phase angle coverage, however, is quite significant, from  $6.75^\circ$  to  $26.6^\circ$ , as can be seen in Fig. 15. The first night of observation, with  $\alpha > 20^\circ$ , was photometric resulting in magnitudes with small errors. However, the atmospheric conditions on the second night were not so good as shown by the larger magnitude errors for  $\alpha < 10^\circ$ . This resulted in significant errors in the

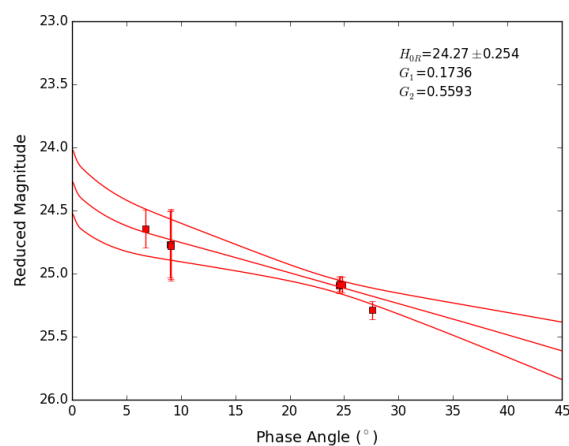


Figure 15: Same as Fig. 1 for the NEO 2019 CT4.

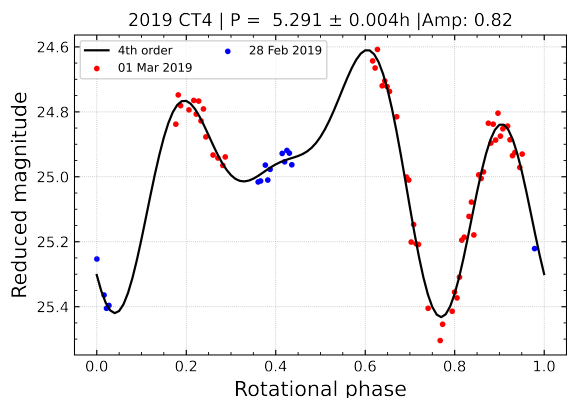
absolute magnitude and in the slope parameters with values of  $H_{0R} = 24.27 \pm 0.254$ ,  $G_1 = 0.1736$  and  $G_2 = 0.5593$ .

The correction for rotation effects was performed from a lightcurve obtained on the two nights of our observations at OASI. In Fig. 16 we present the obtained lightcurve with a fourth-order Fourier series fit resulting in a rotational period of  $P = 5.291\text{h} \pm 0.004$  and amplitude of  $A = 0.82$  mag, with a quality code  $U=1$ . This large lightcurve amplitude, made this correction very important to avoid large dispersion in the phase curve fit.

## 4. Analysis

As already mentioned, important physical parameters of atmosphereless bodies can be derived from their phase curve. The most direct being the absolute magnitude which, in turn, can lead to the determination of an object's effective diameter when its albedo is known. However, in our sample just six objects, over 13, do have a published albedo beside the fact that our absolute magnitude is in the R filter when to compute the effective diameter (Lupton, 2005), it should



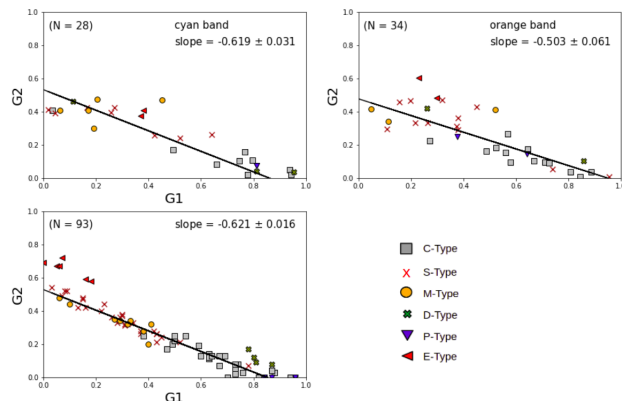


**Figure 16:** Composite lightcurve of the NEO 2019 CT4. The blue and red dots are from February 28 and March 01, respectively. The black line indicate the best fit obtained with a fourth-order Fourier series fit. The zero phase is on 2019/03/01 at 9:17:23.8 UT.

be in the V filter. Of course, it could be possible to infer the albedo of an object from its taxonomic classification, when known, and use a solar V - R colour in order to transform our  $H_{0R}$  in  $H_{0V}$ . All these assumptions would tend to increase the associated errors in the computed effective diameter and we believe it will be sort of useless. Hence, we derived the diameter for only two of the four objects that we determined the V - R color, as they have a previously determined albedo.

On the other hand, the slope parameters  $G_1$  and  $G_2$ , can help derive other physical properties such as high/low albedo and probable taxonomic class, when we are able to observe tendencies analyzing large data sets. In Rondón et al. (2019), for example, was used the data from 93 Main Belt (MB, in what follows) with well-determined taxonomy and albedo, taken from the work by Shevchenko et al. (2016). Thus, a plot in the  $G_1 \times G_2$  phase space allowed to see how the parameters derived for 6 NEOs fitted into the taxonomic type preferred regions defined in that work (see fig. 18 of Rondón et al. (2019)). More recently was used a larger sample of 15 NEOs (Ieva et al. accepted) to derive their taxonomic classification using several techniques. Thus, we decided to use our now larger NEOs data base, with the slope parameters for 32 NEOs, obtained mostly with the same instrumentation and with the same methodology (Rondón et al. (2019), Rondón et al. (2022), Ieva et al. accepted, present work), to investigate their link to the MB population. But, in order to have robust results, we also need a larger database for the MB population than the one used in Shevchenko et al. (2016).

To this end, we used consider using the Asteroid Absolute Magnitude and Slope (AAMS) catalog (Muinonen et al., 2010; Oszkiewicz, Muinonen, Bowell, Trilling, Penttilä, Pieniluoma, Wasserman and Enga, 2011). This catalog contains more than 46,000 MB objects with curve phase parameters in the H-G, H- $G_{12}$  and the H- $G_1 - G_2$  models. However, when trying to reproduce Shevchenko et al. (2016) results regarding the  $G_1 - G_2$  phase space, using using the same objects, we found great differences. This can be due to



**Figure 17:**  $G_1$  versus  $G_2$  for a set of MB objects given in Shevchenko et al. (2016), lower panel, and for the same objects in the ATLAS catalogue in the cyan and orange filter, upper panels left and right, respectively. The different colours indicate the object's taxonomic classification as specified in the bottom right box, while the black line indicate the linear fits to the data with slope and standard deviation given in each figure.

the larger errors in H in the AAMS catalog as well as the fact that it does not specifies in which filters the magnitudes were determined. When we tried to filter the sample using just objects with the smaller errors, the data set turns out to be too small to be useful.

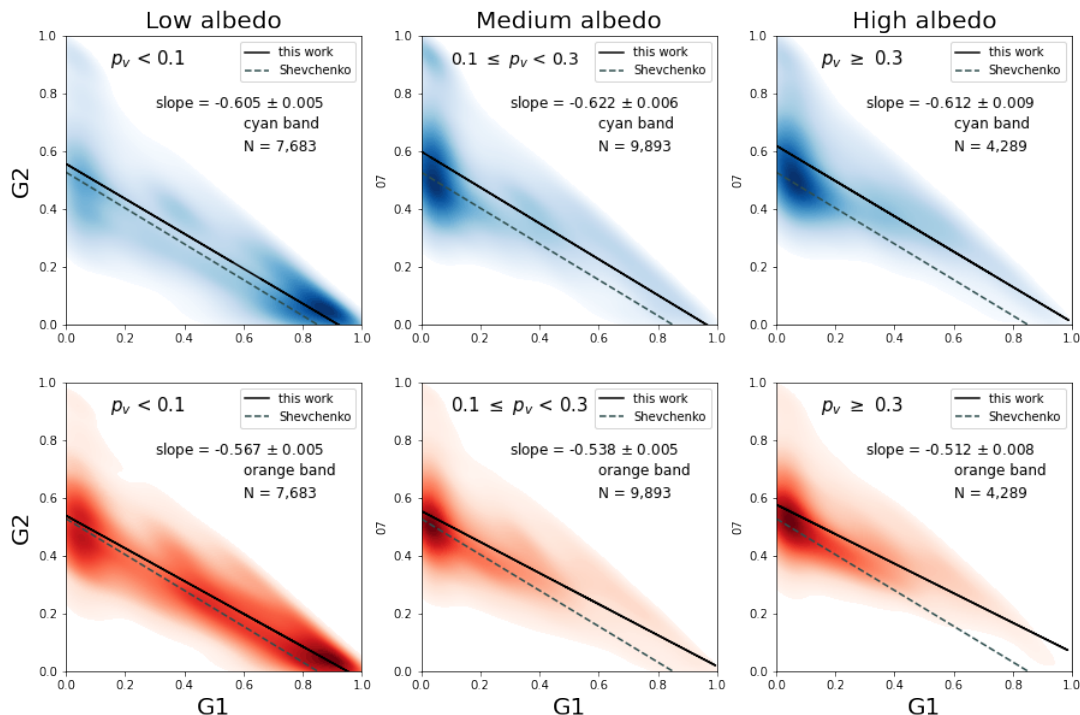
Another recent catalog of asteroid phase curves is from the ATLAS dual-band photometry<sup>1</sup> (Mahlke et al., 2021). This catalog contains about 94,777 asteroid phase curves from dual-band photometry acquired by the Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System telescopes Survey (ATLAS, Tonry, Denneau, Heinze, Stalder, Smith, Smartt, Stubbs, Weiland and Rest (2018)), with magnitudes observed in two filters: a passband between 420 and 650nm called cyan and a passband between 560 and 820nm called orange. Mahlke et al. (2021) using this catalog gives phase curve parameters in the H- $G_{12}$  and the H- $G_1 - G_2$  models, although we used just the last one since it is the same used in our works. The phase angle coverage and standard deviation of H- $G_1 - G_2$  model fit, are also given in catalogue, which will be shown below that it is more in accordance with Shevchenko et al. (2016) results.

In what follows we will first analyze the correlation between  $G_1 - G_2$  and the albedo for the MB population, as in the work by Shevchenko et al. (2016), then we will analyze the same correlation with the diameter and, finally, discuss how our NEOs fit into this scenario.

#### 4.1. Correlation $G_1 - G_2$ for the Main Belt

As a first step, we searched for the 93 Shevchenko et al. (2016) objects in the phase curves in the ATLAS dual-band photometry and found 28 objects with curves in the cyan band and 34 in the orange band. Fig. 17 shows the correlation between  $G_1$  and  $G_2$  for the ATLAS data (upper panels)

<sup>1</sup><https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=VII/288>



**Figure 18:**  $G_1$ ,  $G_2$ -distributions for three albedo ranges: low albedo, medium albedo, and high albedo, comprising 21,865 objects, from asteroid phase curves catalogue from ATLAS dual-band photometry, observed in cyan (blue fit) and orange (red fit). The distributions are represented by 2 D Gaussian kernel density estimators (KDE) fitted to the  $G_1$ ,  $G_2$ -pairs. The black line corresponds to the linear fit of the sample with slope value shown, and the dashed line corresponds to the linear fit with the 93 MB of the Shevchenko et al. (2016) work, for comparison. N is the number of asteroids in each albedo range. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

and from Shevchenko et al. (2016) (bottom panel), for comparison. The different point colours represent the different taxonomic classification of the asteroids while the black line is the linear fit, which was computed not considering the D and E-type objects, as in Shevchenko et al. (2016). The bottom panel shows clearly the separation of the S and M-type objects in the upper left region of the fit and the C and P-type in the bottom right region. In the case of the data from ATLAS observations, the data appears more scattered, probably due to the smaller number of objects, but, generally it reproduces well Shevchenko et al. (2016) results.

It is noteworthy that Mahlke et al. (2021) finds evidence of wavelength dependence of phase curve coefficients. Analyzing the cyan and orange filters used by ATLAS Survey (Tonry et al., 2018), and the V and R filters of Johnson-Cousin system, we found that the passband of the V filter, between 470 and 700 nm, is similar to that of the cyan band, while the passband of the R filter, between 550 and 900 nm, is similar to the orange band. This may explain the similarity of the slope of the linear fit of the data obtained in the cyan band, of -0.619, with that from the Shevchenko et al. (2016) data, of -0.621, where most of the objects were obtained in the V filter of the Johnson-Cousin system.

As the distribution in  $G_1 - G_2$  phase space is related to the wavelength, as shown by Mahlke et al. (2021), as a second step, we used phase curves from the ATLAS catalog

that have data in both the cyan and orange bands. Of these objects, we used only those with an albedo determined by NEOWISE (Mainzer et al., 2011), obtaining a sample of 21,865 MB objects.

In Fig. 18, we give the  $G_1$ ,  $G_2$ -distributions for three albedo ranges: low albedo, medium albedo, and high albedo, comprising 21,865 objects, from asteroid phase curves catalogue from ATLAS dual-band photometry, observed in cyan (blue fit) and orange (red fit). The distributions are represented by 2 D Gaussian kernel density estimators (KDE) (Waskom, Gelbart, Botvinnik, Ostblom, Hobson, Lukauskas, Gemperline, Augspurger, Halchenko, Warmenhoven, Cole, De Ruiter, Vanderplas, Hoyer, Pye, Miles, Swain, Meyer, Martin, Bachant, Quintero, Kunter, Villalba, Brian, Fitzgerald, Evans, Williams, O’Kane, Yarkoni and Brunner, 2020), of the seaborn package from python, fitted to the  $G_1$ ,  $G_2$ -pairs. These intervals were defined as low  $p_v < 0.1$ , medium  $0.1 \leq p_v < 0.3$  and high  $p_v \geq 0.3$ . The black line corresponds to the linear fit of the sample and the dashed line to the linear fit to 93 MB from Shevchenko et al. (2016), just for comparison. We can see that the clustering is similar in both band, however in the low albedo range in the orange filter we observe a second cluster with less density. On the other hand, for low albedo we observe that the clustering is in lower-right, while in the medium and high albedo is in upper-left, this clearly show a dependence of the parameters

Physical properties of NEOs derived from their phase curves

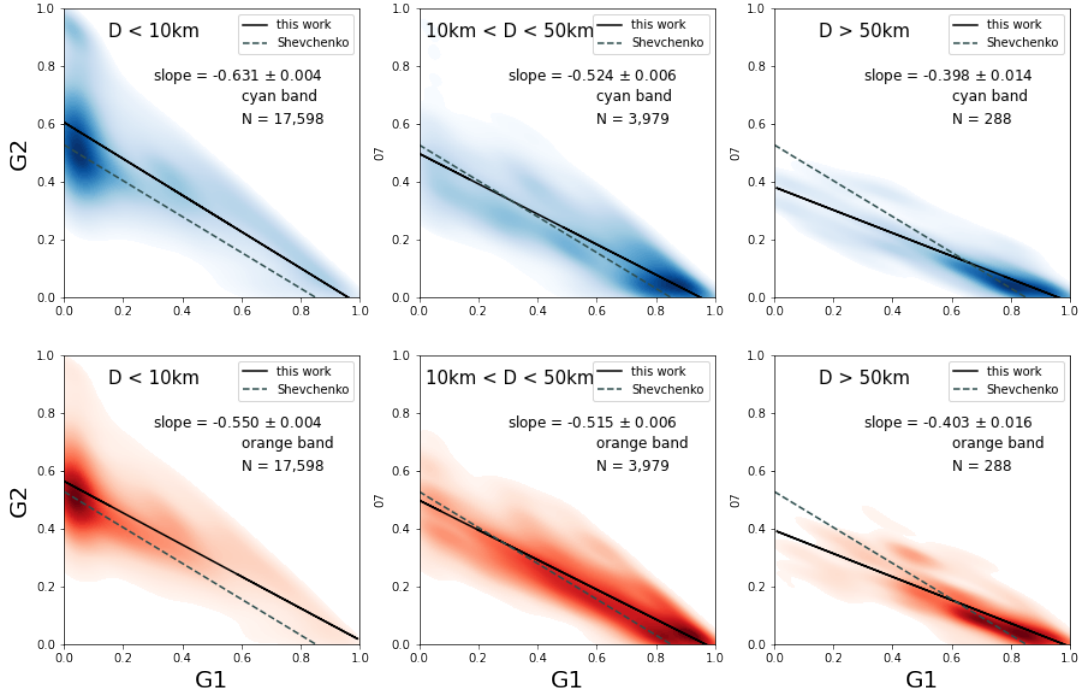


Figure 19: Distribution of  $G_1$ ,  $G_2$  for three diameter range  $D < 10$  km,  $10 \text{ km} < D < 50$  km, and  $D > 50$  km.

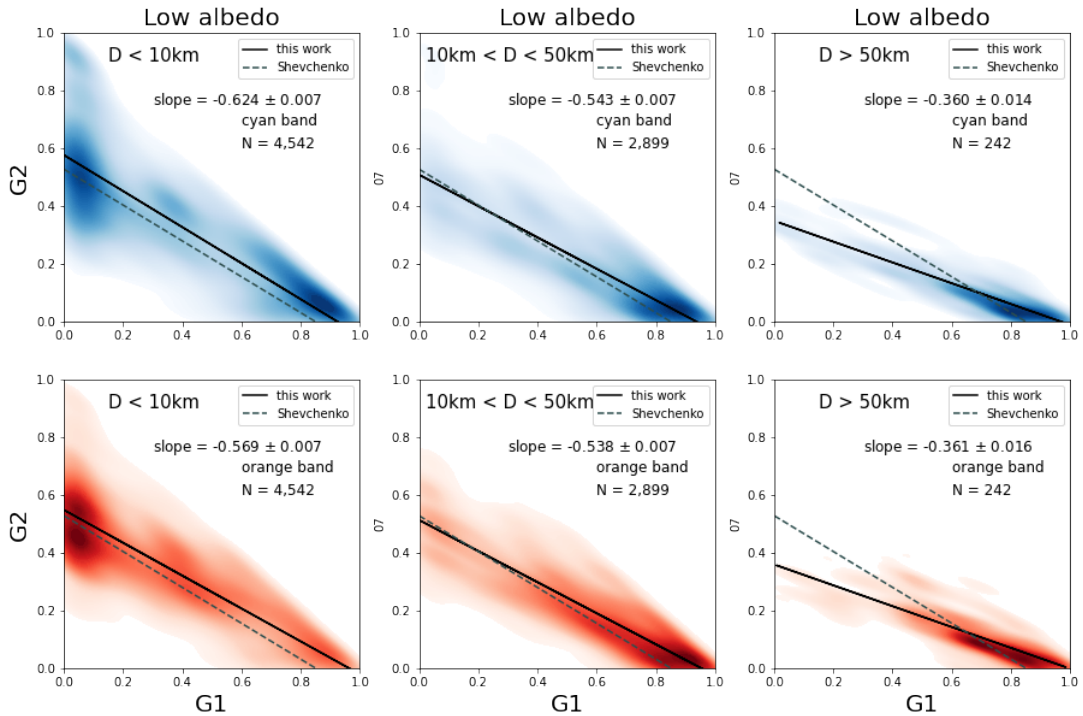
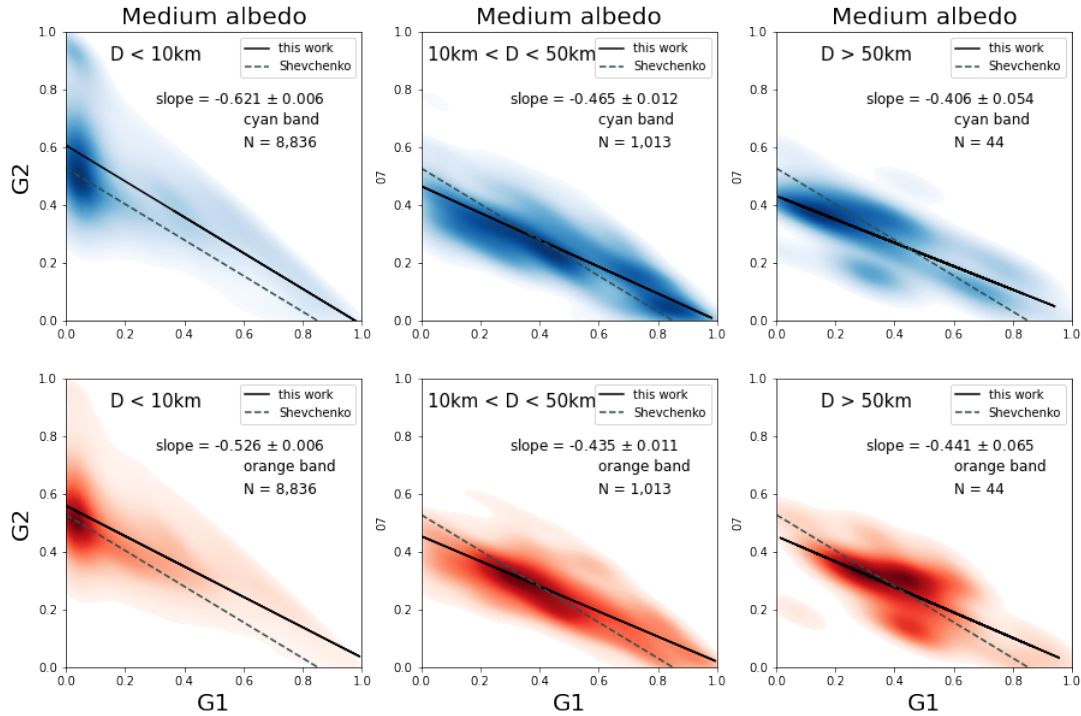


Figure 20: Similar to Fig. 18. but separating by diameters the objects with low albedo classification, with a sample of 7,683 objects.

$G_1$ ,  $G_2$  with the albedo. Lastly, we observe a dependence of the linear fit slope with the filters, where the slope for the cyan band is around -0.6 and for orange band is around -0.5.

The albedo-dependence of the opposition effect and photometric slope described by Belskaya and Shevchenko (2000) has been extensively explored to study the correlation between the taxonomy of an asteroid and the slope parameters of the phase curve  $G_1 - G_2$  (Penttilä et al. (2016);



**Figure 21:** Similar to Fig. 18. but separating by diameters the objects with medium albedo classification, with a sample of 9,893 objects.

Shevchenko et al. (2016); Rondón et al. (2019), Ieva et al. (accepted). However, the question is whether the object's size has any influence on this correlation.

To better analyze this point, we used KDE 2 D adjusted to the  $G_1 - G_2$  parameter for 3 diameter ranges:  $D < 10\text{ km}$ ,  $10\text{ km} < D < 50\text{ km}$ , and  $D > 50\text{ km}$ . The result is shown in Fig. 19 where the black and dashed lines are as in Fig. 18. We observe that the clustering is similar in both band. For  $D < 10\text{ km}$  we observe that the clustering is in upper-left, while for  $D > 10\text{ km}$  it is in lower-right, which clearly show a dependence of the parameters  $G_1$ ,  $G_2$  with the size. We also observe a dependence of the linear fit slope with the filter and the size.

We further analyzed this point repeating the KDE 2 D to the parameters  $G_1 - G_2$  for the 3 diameter ranges and each albedo range. The results are shown in Figs. 20, 21 and 22 for the low, medium and high albedo, respectively. These figures clearly show the strong dependence of the  $G_1$  and  $G_2$  phase space with the objects size. When separating by albedo and diameter, we see that the position of the concentration of objects is independent of the filter and that for objects with  $D > 10\text{ km}$  the behavior is very similar to that already found by Shevchenko et al. (2016), with low albedo objects in the lower-right region, medium albedo in the central part, and high albedo in the upper-left. On the other hand, objects with  $D < 10\text{ km}$  are always concentrated in the upper-left region of the correlation, regardless of the albedo. Finally, we see that the correlation slope, for each albedo range in both filters, decreases as the size of the asteroid diameter increases.

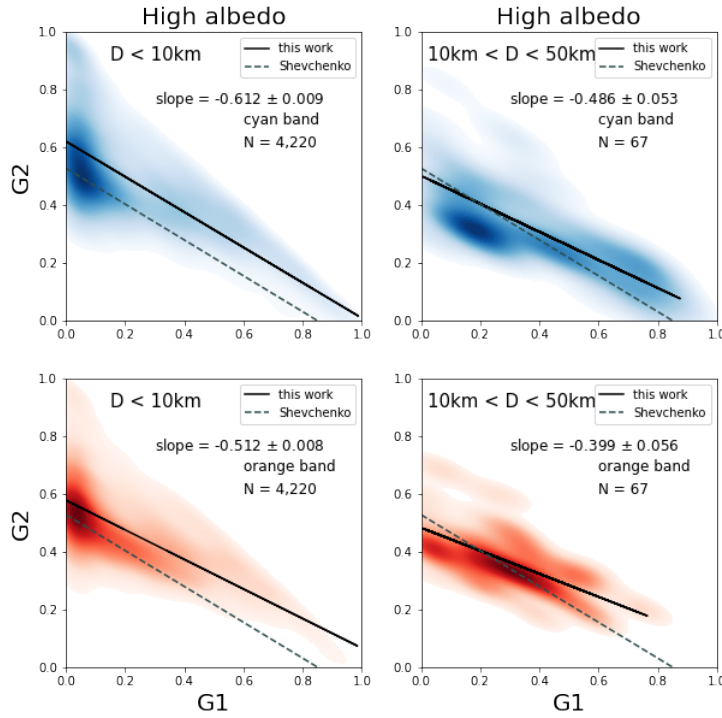
Regarding the slope this also differs depending on the objects size, independently of the band. Lets consider the blue band. For the small low albedo objects the slope is around -0.64, but it decreases as the sizes increases, up to -0.36 for objects with  $D > 50\text{km}$ . The same occurs, to a lesser extent, for medium and high albedo objects, going from -0.62 to -0.41, and from -0.61 to -0.48, respectively.

These analysis highlights the surprising result that the  $G_1$  vs  $G_2$  phase space has strong dependence on the size as well as the albedo of the objects. Therefore, having the position of an object in this space does not necessarily indicates its albedo, which depends also on the object size.

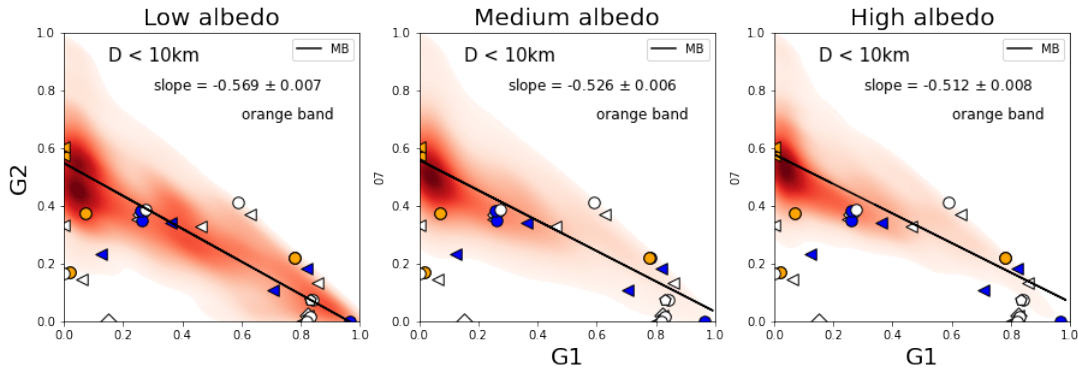
## 4.2. NEOs versus Main Belt

Having obtained the general distribution of MB objects in the  $G_1$  vs  $G_2$  phase space according to their albedo and size, we will now turn to our NEOs and see what information can be obtained. The data set include phase curve parameter for 32 NEOs obtained in the present work as well as by Rondón et al. (2019, 2022), and by Ieva et al. (accepted), including just one determination for each object (for convenience, the complete list is given in the Table 4). As mentioned above, this set is quite homogeneous since all the phase curve parameters were obtained using the same procedures. Considering that NEOs are all small, with diameter smaller than 10km, and that our phase curves were determined in the R filter of the Johnson-Cousins system, more similar to the ATLAS orange band, we compared only the  $G_1$ ,  $G_2$  distribution of MB for this size and band for the three albedo ranges - low, medium and high - (as given in

Physical properties of NEOs derived from their phase curves



**Figure 22:** Similar to Fig. 18. but separating by diameters the objects with medium albedo classification, with a sample of 4,289 objects.

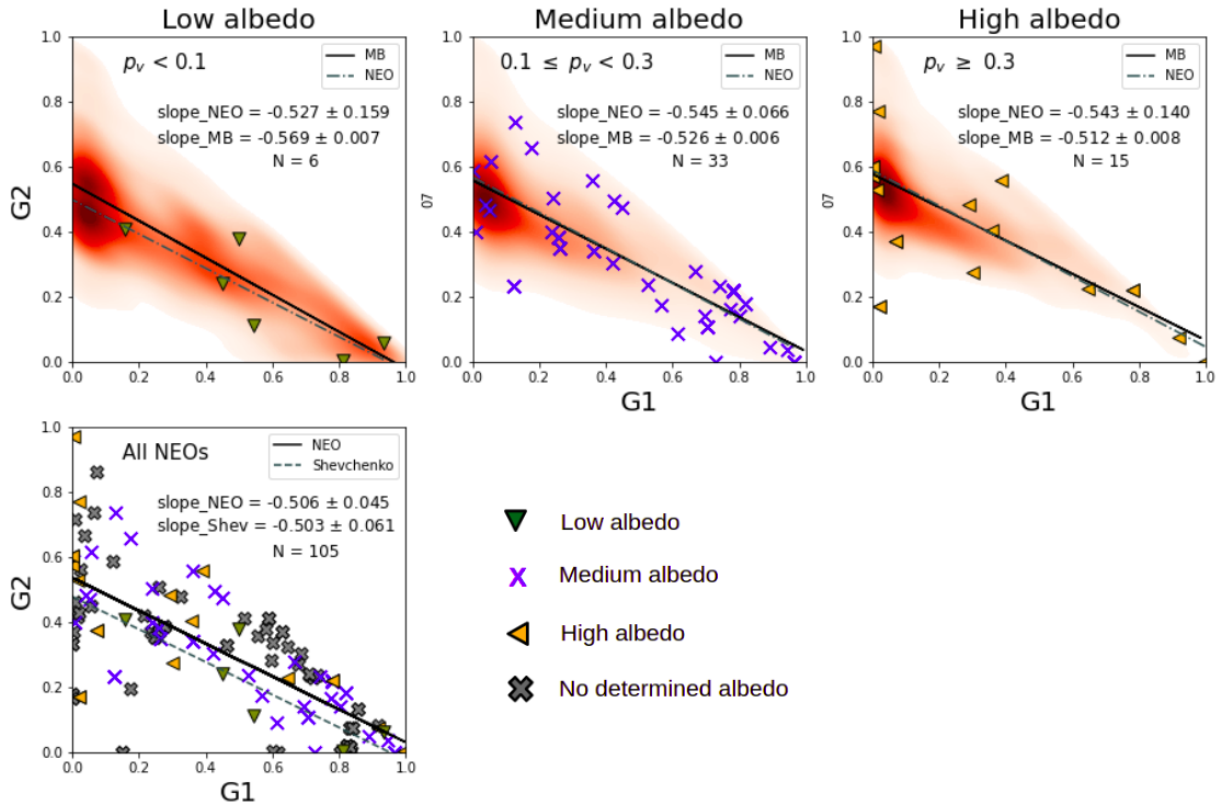


**Figure 23:** Same as Fig. 18 for distributions by 2 D Gaussian kernel density estimators (KDE) fitted to the  $G_1, G_2$ -pairs with three albedo ranges for MB with  $D < 10$  km. The symbols, circles, diamonds, pentagon, and triangles represent data from the present work, from Rondón et al. (2019), from Rondón et al. (2022), and from Ieva et al. accepted, respectively. The white, blue and yellow colors indicate objects with no albedo determination, of low and of medium albedo, respectively. For more details see the text.

figures 20, 21 and 22) and plotted our NEOs values. These are shown by colored symbols in Fig. 23 where the different symbols indicate objects obtained in the present work (circles), in Rondón et al. (2019) (diamonds), in Rondón et al. (2022) (pentagon), and in Ieva et al. accepted (triangles). On the other hand, the white symbols indicate objects with no albedo determination while orange and blue refer to high and medium albedo, respectively. The black line corresponds to the linear fit of the MB sample, as given in figures 20, 21 and 22.

Analyzing Fig. 23 we clearly notice that most of the NEOs follow a correlation, as for the MB objects. Only 6

objects are outside this correlation region, and we attribute this behavior to the large errors of their phase curve, either due to the lack of correction for rotational effects, as in the case of (16816) 1997 UF9, (40267) 1999 GJ4 and (159608) 2002 AC2, or the large errors in the magnitudes, as in the case of (174050) 2002 CC19, (489337) 2006 UM and 2005 TF. Accounting for the rotational effects and having a good phase angle coverage allows us to have more accurate  $G_1$  and  $G_2$  values. In the case of the (326683) 2002 WP, for example, a first phase curve was obtained in Rondón et al. (2019), and the object fell outside the correlation region (see figure 18 Rondón et al. (2019)). However, after a better coverage of



**Figure 24:** Same as Fig. 18 for distributions by 2 D Gaussian kernel density estimators (KDE) fitted to the  $G_1, G_2$ -pairs for MB  $D < 10$ km with three albedo ranges for all NEOs with determined albedo (upper panels), and for all 105 NEO sample (bottom panel). The different colours indicate the object's albedo classification as specified in the bottom right box, while the black line indicate the linear fits to the MB data and dashed line indicate the linear fits to the NEO.

the phase angle, obtained in Ieva et al. accepted, the same object follows the expected linear trend.

Searching for more evidences on the NEOs distribution in the  $G_1$ - $G_2$  space we found 73 NEOs in the database of phase curves obtained with ATLAS observations and in the orange band. Including these objects we obtained a sample of 105 NEOs. In Fig 24, we show the density distribution map of  $G_1, G_2$  for three albedo ranges, low, medium and high, for MB with  $D < 10$ km and plotted the values of  $G_1$  and  $G_2$  of our NEOs sample, including those which do not have an albedo. In this figure, objects with low, medium, high and no determined albedo are represented by different symbols.

Investigating the slope parameters of all the sample of 105 NEOs, a linear fit slope of  $-0.506 \pm 0.045$  was obtained (Fig 24 bottom panel). We also observed a strong linear correlation between parameters  $G_1$  and  $G_2$ , with a correlation coefficient of  $-0.742$ . This strong correlation was also observed by Muinonen et al. (2010) and Shevchenko et al. (2016), but in our case we cannot use this correlation to infer the albedo since the distribution does not show any clear preference region with the albedo.

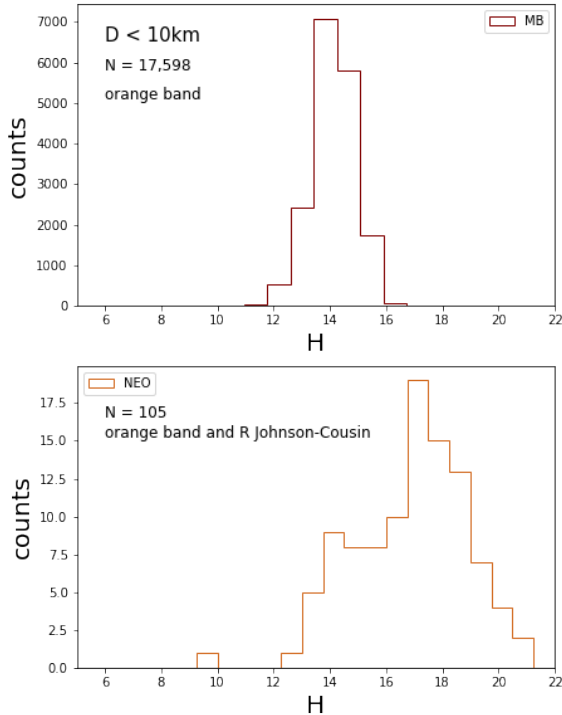
As can be seen in Fig. 24, the values of the slope parameters between NEOs and MB with sizes smaller than 10 km is very similar, reflecting the likeness of the R and orange bands. On the other hand, no specific concentrations

are observed among NEOs in the  $G_1$ - $G_2$  phase space, which can be attributed to the small sample. Moreover, as can be observed in the size distribution shown in Fig. 25, the NEOs are much smaller than the MB objects, even the smallest ones, and in order to compare the two samples we need to have comparable sizes in both samples.

## 5. Conclusions

In the present study we have determined the phase curves, corrected for rotational effects for 13 NEOs, 8 belonging to the Amor group, 5 to the Apollo group, with one classified as PHA. This is a substantial addition to the available NEO data set for which the phase angle coverage has been well measured, in most cases in the opposition effect region and in the linear part of the phase curve.

In order to perform the correction for rotational effects we also obtained lightcurves for most of the NEOs with complementary observations over the same period as the phase curve magnitudes. New values for the rotation periods of three NEOs - (174050) 2002 CC19, 2011 YQ10 and 2019 CT4 - are here presented while the rest will be described in a paper in preparation (Monteiro et al. 2022). It is worth mentioning that we provided the first estimate of the rotational period for the object 2019 CT4.



**Figure 25:** Histogram of the absolute magnitude of MB with  $D < 10\text{km}$  (upper panel), and of our sample of NEOs (lower panel).

In the search for correlations between the  $G_1$  and  $G_2$  parameters, which could indicate physical properties of the studied objects, we analyzed the behaviour of a large sample of MB asteroids phase curves from dual-band photometry (Mahlke et al., 2021) acquired by the Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System Telescopes Survey (ATLAS, Tonry et al. (2018)). This catalog contains phase curves with magnitudes observed in two filters, called cyan and orange. When comparing the  $G_1$  and  $G_2$  correlations between the orange and cyan filters of the ATLAS survey, for the objects shown by Shevchenko et al. (2016), we see that the slopes are different (Fig. 17), which indicates that the parameters  $G_1$  and  $G_2$  are dependent on the used filters. On the other hand, we see that the correlation of  $G_1$  vs  $G_2$  shown by Shevchenko et al. (2016) with data that were acquired in the Johnson V filter is similar to the correlation in the cyan filter of the ATLAS survey (Fig. 17-upper-left and 17-lower-left), while the  $G_1$  vs  $G_2$  correlation of our NEOs, which were observed in the R-Cousins filter (Fig. 24-lower panel) is similar to the correlation in the ATLAS orange filter (Fig. 17-upper-right). This was to be expected, because the passband and the effective wavelength of the cyan and orange filter is very close to the filters V and R of the Johnson-Cousin system respectively, and as we know the  $G_1$  and  $G_2$  values depend of the filter.

When analyzing the phase space  $G_1$  vs  $G_2$  for MB objects we found that there is a strong correlation not only on the albedo, but also on the size. For asteroids with  $D > 10\text{km}$  the behavior is similar to that shown by Shevchenko et al. (2016)

while for those with  $D < 10\text{km}$  there is just one preferred region in the phase space  $G_1$  vs  $G_2$ . It is important to note that the size was not considered in previous analysis (see, for example Shevchenko et al. (2016)) and this is the first time that it has been proven to be an important parameter.

Finally, when we studying the behavior of the NEOs in the  $G_1$  vs  $G_2$  phase space and compare with that of the MB we observe that the the slope of NEOs is similar to the MB with diameter less than 10 km. On the other side, we note that no preferential region is visible in the  $G_1$  vs  $G_2$  space depending on the albedo. This makes it difficult to infer a NEO albedo just for its position in the  $G_1$  vs  $G_2$  space. More observations are clearly necessary to understand the behaviors here described.

Last, but not least, in this work we show once more the importance of a dedicated telescope, such as OASI, as well as coordinated efforts, in order to achieve a good determination of important physical properties of NEOs, especially when continuous observations are of utmost importance, such as in the case of phase curves.

## Acknowledgements

P.A., E.R., F.M., M.E, W.P. and J.M. would like to thank CNPq, FAPERJ and CAPES for their support through diverse fellowships. Support by CNPq (310964/2020-2) and FAPERJ (E-26/202.841/2017 and E-26/201.001/2021) is acknowledged by D.L. The authors are grateful to the IMPACTON team, in special to R. Souza, A. Santiago and J. Silva for the technical support. Observations were obtained at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Itacuruba) of the Observatório Nacional (ON-Brazil), with complementary observations at the Osservatorio di Campo Imperatore (Italy).

## A. Additional tables

The following are given observational circumstances and parameters derived from the phase curves. In table A1, the observational circumstances and parameters of the phase curves derived in this work are given. Table A2, are the parameters of the phase curves of the 32 NEOs used in our analysis.

Table 3: Observational circumstances and derived magnitudes of the phase curves. For each asteroid is given: the name, the date, the calibrated magnitude (mag), and the solar phase angle ( $\alpha$ ).

Asteroid	Observatory	Date	mag	$\alpha$ (°)
(4055) Magellan	CI	2017/03/12	$14.333 \pm 0.063$	3.0
	CI	2017/03/01	$14.639 \pm 0.027$	4.0
	CI	2017/02/27	$14.649 \pm 0.027$	5.0
	CI	2017/03/17	$14.722 \pm 0.027$	5.8
	CI	2017/02/20	$14.899 \pm 0.027$	8.9
	CI	2017/03/24	$14.839 \pm 0.021$	10.0
	CI	2017/03/28	$14.889 \pm 0.021$	12.2
	CI	2017/03/31	$15.019 \pm 0.027$	13.7
(18109) 2000 NG11	OASI	2018/09/06	$16.707 \pm 0.007$	3.4
	OASI	2018/09/09	$16.829 \pm 0.151$	3.5
	OASI	2018/09/05	$16.848 \pm 0.331$	3.6
	OASI	2018/08/12	$16.960 \pm 0.074$	16.4
	OASI	2018/10/03	$17.304 \pm 0.410$	16.5
	OASI	2018/08/10	$17.723 \pm 0.211$	17.4
	OASI	2018/10/05	$17.322 \pm 0.356$	17.5
	OASI	2018/10/07	$17.304 \pm 0.151$	18.5
	OASI	2018/08/06	$17.524 \pm 0.152$	19.4
	OASI	2018/10/09	$17.681 \pm 0.368$	19.5
	OASI	2018/10/11	$17.674 \pm 0.301$	20.3
	OASI	2018/10/11	$17.581 \pm 0.377$	20.4
	OASI	2018/10/13	$17.754 \pm 0.607$	21.2
	OASI	2018/10/14	$18.122 \pm 0.405$	21.6
	OASI	2018/10/31	$17.706 \pm 0.419$	27.3
	OASI	2018/11/01	$17.602 \pm 0.356$	27.6
	OASI	2018/11/08	$17.676 \pm 0.174$	29.3
	OASI	2018/11/10	$17.889 \pm 0.310$	29.7
OASI	2018/11/11	$17.820 \pm 0.255$	29.9	
OASI	2018/12/11	$18.117 \pm 0.052$	34.8	
(40267) 1999 GJ4	CI	2017/02/20	$15.710 \pm 0.053$	3.7
	OASI	2017/02/21	$15.245 \pm 0.011$	4.8
	CI	2017/02/21	$15.613 \pm 0.035$	4.9
	OASI	2017/02/22	$15.792 \pm 0.007$	6.1
	OASI	2017/02/22	$15.611 \pm 0.006$	6.2
	OASI	2017/02/25	$15.532 \pm 0.051$	9.3
	CI	2017/02/26	$15.455 \pm 0.053$	10.0
	CI	2017/02/27	$15.559 \pm 0.053$	11.1
	CI	2017/03/01	$15.743 \pm 0.063$	12.8
	CI	2017/03/02	$15.913 \pm 0.053$	13.7
	CI	2017/03/03	$16.103 \pm 0.063$	14.5
	CI	2017/03/11	$16.223 \pm 0.112$	20.1
	CI	2017/03/11	$16.153 \pm 0.082$	20.1
	CI	2017/03/14	$16.443 \pm 0.063$	21.7
	CI	2017/03/15	$16.203 \pm 0.053$	22.1
	CI	2017/03/19	$16.403 \pm 0.082$	23.9
CI	2017/03/24	$16.423 \pm 0.063$	25.6	
(65717) 1993 BX3	OASI	2021/03/13	$20.854 \pm 0.309$	7.9



Table 3: Continued.

Asteroid	Observatory	Date	mag	$\alpha$ (°)
	OASI	2021/02/11	21.235 $\pm$ 0.362	25.5
	OASI	2021/02/09	21.195 $\pm$ 0.533	28.0
	OASI	2021/02/04	22.260 $\pm$ 0.414	34.5
	OASI	2021/02/04	22.068 $\pm$ 0.559	34.6
	OASI	2021/02/04	21.816 $\pm$ 0.712	34.7
(99799) 2002 LJ3	OASI	2018/09/06	18.565 $\pm$ 0.086	8.6
	OASI	2018/09/09	18.636 $\pm$ 0.173	9.6
	OASI	2018/09/05	18.584 $\pm$ 0.298	10.8
	OASI	2018/08/12	18.410 $\pm$ 0.211	12.1
	OASI	2018/10/03	18.917 $\pm$ 0.260	14.5
	OASI	2018/08/10	19.261 $\pm$ 0.095	32.5
	OASI	2018/10/05	19.272 $\pm$ 0.052	32.6
	OASI	2018/10/07	19.684 $\pm$ 0.441	46.7
	OASI	2018/08/06	19.904 $\pm$ 0.182	49.1
	OASI	2018/10/09	19.739 $\pm$ 0.281	49.6
	OASI	2018/10/11	19.779 $\pm$ 0.034	49.8
	OASI	2018/10/11	19.752 $\pm$ 0.238	50.4
	OASI	2018/10/13	19.896 $\pm$ 0.219	50.6
	OASI	2018/10/14	19.541 $\pm$ 0.296	51.1
	OASI	2018/10/31	19.968 $\pm$ 0.237	52.3
	OASI	2018/11/01	19.690 $\pm$ 0.193	52.9
	OASI	2018/11/08	19.731 $\pm$ 0.299	53.0
	OASI	2018/11/10	19.889 $\pm$ 0.256	53.5
	OASI	2018/11/11	19.923 $\pm$ 0.354	54.1
	OASI	2018/12/11	20.211 $\pm$ 0.519	61.3
	OASI	2018/11/01	20.178 $\pm$ 0.571	61.5
	OASI	2018/11/08	20.329 $\pm$ 0.454	61.9
	OASI	2018/11/10	20.221 $\pm$ 0.513	62.1
	OASI	2018/11/11	20.443 $\pm$ 0.260	62.2
	OASI	2018/12/11	20.017 $\pm$ 0.486	62.3
(174050) 2002 CC19	OASI	2021/02/04	17.644 $\pm$ 0.697	6.2
	OASI	2021/02/04	17.834 $\pm$ 0.427	6.8
	OASI	2021/02/04	17.835 $\pm$ 0.428	7.1
	OASI	2021/02/05	18.284 $\pm$ 0.076	11.9
	OASI	2021/02/09	18.780 $\pm$ 0.600	28.6
	OASI	2021/02/11	18.913 $\pm$ 0.671	35.4
(417581) 2006 VA3	OASI	2021/02/04	17.832 $\pm$ 0.391	11.4
	OASI	2021/02/05	17.872 $\pm$ 0.111	12.7
	OASI	2021/02/05	17.798 $\pm$ 0.080	13.0
	OASI	2021/02/11	18.136 $\pm$ 0.343	26.3
	OASI	2021/03/13	19.941 $\pm$ 0.395	81.0
(464797) 2004 FZ1	OASI	2016/08/27	18.078 $\pm$ 0.084	8.7
	OASI	2016/08/29	18.049 $\pm$ 0.051	12.2
	OASI	2016/08/29	18.131 $\pm$ 0.053	12.3
	OASI	2016/08/31	18.413 $\pm$ 0.218	15.5
	OASI	2016/09/01	18.190 $\pm$ 0.126	17.2
	OASI	2016/09/01	18.242 $\pm$ 0.121	17.4
	OASI	2016/09/02	18.369 $\pm$ 0.157	18.7
	OASI	2016/09/02	18.408 $\pm$ 0.131	18.9
(480004) 2014 KD91	OASI	2016/10/07	17.867 $\pm$ 0.358	14.8
	OASI	2016/10/04	17.858 $\pm$ 0.106	18.5
	OASI	2016/10/02	17.889 $\pm$ 0.451	20.4
	OASI	2016/10/02	17.947 $\pm$ 0.480	20.5
	OASI	2016/09/29	18.171 $\pm$ 0.270	23.1

Table 3: Continued.

<b>Asteroid</b>	<b>Observatory</b>	<b>Date</b>	<b>mag</b>	<b><math>\alpha</math> (°)</b>
	OASI	2016/09/28	$18.042 \pm 0.265$	23.8
	OASI	2016/09/28	$18.128 \pm 0.293$	23.9
	OASI	2016/09/27	$18.143 \pm 0.313$	24.6
	OASI	2016/09/27	$18.052 \pm 0.652$	24.7
2011 YQ10	OASI	2021/12/01	$19.184 \pm 0.576$	5.7
	OASI	2021/12/07	$19.041 \pm 0.296$	7.9
	OASI	2021/10/07	$20.475 \pm 0.452$	47.0
	OASI	2021/10/03	$20.257 \pm 0.108$	48.1
	OASI	2021/10/01	$20.342 \pm 0.790$	48.3
2016 RP33	OASI	2016/09/24	$19.468 \pm 0.083$	7.6
	OASI	2016/09/24	$19.613 \pm 0.077$	7.7
	OASI	2016/09/25	$19.627 \pm 0.143$	9.0
	OASI	2016/09/25	$19.602 \pm 0.109$	9.1
	OASI	2016/09/25	$19.648 \pm 0.100$	9.2
	OASI	2016/09/26	$19.811 \pm 0.411$	10.5
	OASI	2016/09/27	$19.872 \pm 0.346$	11.9
	OASI	2016/09/27	$19.642 \pm 0.258$	12.0
	OASI	2016/09/27	$19.696 \pm 0.254$	12.1
	OASI	2016/09/28	$19.903 \pm 0.228$	13.3
	OASI	2016/09/29	$19.877 \pm 0.233$	14.6
	OASI	2016/10/02	$20.090 \pm 0.436$	18.2
	OASI	2016/10/02	$19.985 \pm 0.397$	18.3
2017 AC5	CI	2017/03/16	$20.414 \pm 0.169$	5.4
	CI	2017/03/02	$20.549 \pm 0.139$	8.8
	OASI	2017/03/21	$20.591 \pm 0.015$	9.6
	OASI	2017/03/23	$20.670 \pm 0.017$	11.5
	OASI	2017/03/24	$20.915 \pm 0.019$	12.4
	OASI	2017/03/25	$20.630 \pm 0.019$	13.4
	OASI	2017/03/26	$20.969 \pm 0.030$	14.3
	CI	2017/02/20	$20.656 \pm 0.109$	15.0
	CI	2017/03/27	$20.619 \pm 0.129$	15.3
	CI	2017/03/31	$21.115 \pm 0.149$	18.8
2019 CT4	OASI	2019/03/01	$24.645 \pm 0.150$	6.75
	OASI	2019/03/01	$24.768 \pm 0.261$	9.0
	OASI	2019/03/01	$24.767 \pm 0.279$	9.1
	OASI	2019/03/01	$24.780 \pm 0.279$	9.2
	OASI	2019/02/28	$25.095 \pm 0.063$	24.5
	OASI	2019/02/28	$25.079 \pm 0.060$	24.6
	OASI	2019/02/28	$25.085 \pm 0.063$	24.8
	OASI	2019/02/28	$25.290 \pm 0.074$	27.6

**Table 4**This is the parameters  $H-G_1 - G_2$  of the phase curves of the 32 NEOs used in our analysis

Asteroid	$H_{R0}$	$G_1$	$G_2$
(4055) Magellan	13.94 $\pm$ 0.188	0.07041	0.3724
(16816) 1997 UF9	15.39 $\pm$ 0.026	0.0	0.3322
(18109) 2000 NG11	16.53 $\pm$ 0.01	0.8301	0.01628
(36236) 1999 VV	115.77 $\pm$ 0.03	0.8228	0.01938
(65717) 1993 BX3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	0.2208
(99799) 2002 LJ3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	0.2208
(159608) 2002 AC2	15.79 $\pm$ 0.29	0.1234	0.2317
(163693) Atira	15.7 $\pm$ 0.529	0.8238	0.0
(174050) 2002 CC19	16.5 $\pm$ 0.377	0.0	0.1649
(175189) 2005 EC224	18.11 $\pm$ 0.024	0.5895	0.1814
(326683) 2002 WP	18.05 $\pm$ 0.048	0.0	0.6025
(333889) 1998 SV4	17.69 $\pm$ 0.079	0.7062	0.1075
(370307) 2002 RH52	16.41 $\pm$ 0.226	0.0	0.5726
(370702) 2004 NC9	17.05 $\pm$ 0.101	0.8187	0.1813
(40267) 1999 GJ4	14.28 $\pm$ 0.083	0.0185	0.169
(417581) 2006 VA3	18.21 $\pm$ 0.07	0.7792	0.2208
(464797) 2004 FZ1	17.39 $\pm$ 0.091	0.2593	0.3831
(480004) 2014 KD91	16.96 $\pm$ 0.425	0.2613	0.3499
(480824) 1999 JO6	16.37 $\pm$ 0.13	0.8072	0.0
(484506) 2008 ER7	20.0 $\pm$ 0.057	0.629	0.371
(489337) 2006 UM	16.45 $\pm$ 0.41	0.1515	0.0
2001 UG18	20.56 $\pm$ 0.009	0.4619	0.3302
2005 TF	18.84 $\pm$ 0.529	0.06187	0.1475
2011 YQ10	18.85 $\pm$ 0.123	0.5894	0.4106
2014 AD17	19.67 $\pm$ 0.188	0.2481	0.3532
2016 WJ1	20.98 $\pm$ 0.01	0.2588	0.3721
2016 WU3	20.06 $\pm$ 0.051	0.8228	0.01938
2016 RP33	19.05 $\pm$ 0.012	0.8192	0.0
2017 AC5	20.13 $\pm$ 0.326	0.8417	0.07513
2017 CR32	22.33 $\pm$ 0.031	0.8571	0.133
2017 DC38	24.22 $\pm$ 0.08	0.8017	0.0
2019 CT4	24.13 $\pm$ 0.273	0.2741	0.388

## References

- Belskaya, I.N., Shevchenko, V.G., 2000. Opposition Effect of Asteroids. *Icarus* 147, 94–105. doi:10.1006/icar.2000.6410.
- Binzel, R.P., DeMeo, F.E., Turtelboom, E.V., Bus, S.J., Tokunaga, A., Burbine, T.H., Lantz, C., Polishook, D., Carry, B., Morbidelli, A., Birlan, M., Vernazza, P., Burt, B.J., Moskovitz, N., Slivan, S.M., Thomas, C.A., Rivkin, A.S., Hicks, M.D., Dunn, T., Reddy, V., Sanchez, J.A., Granvik, M., Kohout, T., 2019. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). 324, 41–76. doi:10.1016/j.icarus.2018.12.035, arXiv:2004.05090.
- Binzel, R.P., Lupishko, D., di Martino, M., Whiteley, R.J., Hahn, G.J., 2002. Physical Properties of Near-Earth Objects, in: *Asteroids III*, pp. 255–271.
- Binzel, R.P., Reddy, V., Dunn, T.L., 2015. The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. pp. 243–256. doi:10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch013.
- Botke, W.F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.M., Levison, H.F., Michel, P., Metcalfe, T.S., 2002. Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus* 156, 399–433. doi:10.1006/icar.2001.6788.
- Carbognani, A., 2017. Asteroids Lightcurves Analysis at OAVDA: 2016 January - October. *Minor Planet Bulletin* 44, 52–57.
- Carry, B., Solano, E., Eggl, S., DeMeo, F.E., 2016. Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry. 268, 340–354. doi:10.1016/j.icarus.2015.12.047, arXiv:1601.02087.
- Chang, C.K., Ip, W.H., Lin, H.W., Cheng, Y.C., Ngeow, C.C., Yang, T.C., Waszczak, A., Kulkarni, S.R., Levitan, D., Sesar, B., Laher, R., Surace, J., Prince, T.A., 2015. Asteroid Spin-rate Study Using the Intermediate Palomar Transient Factory. 219, 27. doi:10.1088/0067-0049/219/2/27, arXiv:1506.08493.
- Dandy, C.L., Fitzsimmons, A., Collander-Brown, S.J., 2003. Optical colors of 56 near-Earth objects: trends with size and orbit. 163, 363–373. doi:10.1016/S0019-1035(03)00087-3.
- Erasmus, N., Mommert, M., Trilling, D.E., Sicafoose, A.A., van Gend, C., Hora, J.L., 2017. Characterization of Near-Earth Asteroids Using KMTNET-SAAO. 154, 162. doi:10.3847/1538-3881/aa88be, arXiv:1709.03305.
- Galád, A., Pravec, P., Kušnirák, P., Gajdoš, Š., Kornoš, L., Világi, J., 2005. Joint Lightcurve Observations of 10 Near-Earth Asteroids from Modra and ONDŘEJOV. *Earth Moon and Planets* 97, 147–163. doi:10.1007/s11038-006-9066-x.
- Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy. I. Theory. *JGR* 86, 4571–4586.
- Hapke, B., 1984. Bidirectional reflectance spectroscopy. III - Correction for macroscopic roughness. *Icarus* 59, 41–59. doi:10.1016/0019-1035(84)90054-x.
- Hapke, B., 1986. Bidirectional reflectance spectroscopy. IV - The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus* 67, 264–280. doi:10.1016/0019-1035(86)90108-9.
- Harris, A.W., Lagerros, J.S.V., 2002. Asteroids in the Thermal Infrared, in:

- Asteroids III, pp. 205–218.
- Harris, A.W., Young, J.W., 1983. Asteroid rotation IV. 1979 observations. 54, 59–109. doi:10.1016/0019-1035(83)90072-6.
- Helpenstein, P., Veverka, J., 1989. Physical characterization of asteroid surfaces from photometric analysis, in: Binzel, R.P., Gehrels, T., Matthews, M.S. (Eds.), *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson, pp. 557–593.
- Howell, S.B., 1989. Two-Dimensional Aperture Photometry: Signal-to-Noise Ratio of Point-Source Observations and Optimal Data-Extraction Techniques. 101, 616. doi:10.1086/132477.
- Ieva, S., Dotto, E., Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Fanasca, C., Lazzarin, M., Bertini, I., Petropoulou, V., Rossi, A., Micheli, M., Perozzi, E., 2020. Extended photometric survey of near-Earth objects. 644, A23. doi:10.1051/0004-6361/202038968.
- Irvine, W.M., 1966. The Shadowing Effect in Diffuse Reflection. *JGR* 71, 2931. doi:10.1029/JZ071i012p02931.
- Lazzaro, D., 2010. Photometric and spectroscopic studies of small Solar System bodies and the IMPACTON project. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina* 53, 315–324.
- Lin, C.H., Ip, W.H., Lin, Z.Y., Cheng, Y.C., Lin, H.W., Chang, C.K., 2018. Photometric survey and taxonomic identifications of 92 near-Earth asteroids. 152, 116–135. doi:10.1016/j.pss.2017.12.019.
- Lumme, K., Bowell, E., 1981. Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. II. Interpretation. *AJ* 86, 1705–1721. doi:10.1086/113055.
- Lupton, 2005. "transformations between sdss magnitudes and ubv-cic. <http://www.sdss3.org/dr8/algorithms/sdssUBVRItransform.php>. Accessed: 2022-03-28.
- Mahlke, M., Carry, B., Denneau, L., 2021. Asteroid phase curves from ATLAS dual-band photometry. 354, 114094. doi:10.1016/j.icarus.2020.114094, arXiv:2009.05129.
- Mainzer, A., Bauer, J., Grav, T., Masiero, J., Cutri, R.M., Dailey, J., Eisenhardt, P., McMillan, R.S., Wright, E., Walker, R., Jedicke, R., Spahr, T., Tholen, D., Alles, R., Beck, R., Brandenburg, H., Conrow, T., Evans, T., Fowler, J., Jarrett, T., Marsh, K., Masci, F., McCallon, H., Wheelock, S., Wittman, M., Wyatt, P., DeBaun, E., Elliott, G., Elsbury, D., Gautier, T., I., Gomillion, S., Leisawitz, D., Maleszewski, C., Micheli, M., Wilkins, A., 2011. Preliminary Results from NEOWISE: An Enhancement to the Wide-field Infrared Survey Explorer for Solar System Science. 731, 53. doi:10.1088/0004-637X/731/1/53, arXiv:1102.1996.
- Masiero, J.R., Mainzer, A.K., Bauer, J.M., Cutri, R.M., Grav, T., Kramer, E., Pittichová, J., Sonnett, S., Wright, E.L., 2020a. Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5. 1, 5. doi:10.3847/PSJ/ab7820, arXiv:2002.07941.
- Masiero, J.R., Smith, P., Teodoro, L.D., Mainzer, A.K., Cutri, R.M., Grav, T., Wright, E.L., 2020b. Physical Properties of 299 NEOs Manually Recovered in Over Five Years of NEOWISE Survey Data. 1, 9. doi:10.3847/PSJ/ab8638, arXiv:2003.14406.
- Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., Tanga, P., 2000. NOTE: Estimated Abundance of Atens and Asteroids Evolving on Orbits between Earth and Sun. *Icarus* 143, 421–424. doi:10.1006/icar.1999.6282.
- Mishchenko, M.I., 1992. The angular width of the coherent back-scatter opposition effect - an application to icy outer planet satellites. *Astrophysics and Space Science* 194, 327–333. doi:10.1007/BF00644001.
- Mishchenko, M.I., Dlugach, J.M., Liu, L., Rosenbush, V.K., Kiselev, N.N., Shkuratov, Y.G., 2009. Direct Solutions of the Maxwell Equations Explain Opposition Phenomena Observed for High-Albedo Solar System Objects. *ApJL* 705, L118–L122. doi:10.1088/0004-637X/705/2/L118.
- Mishchenko, M.I., Dlugach, Z.M., 1992. The amplitude of the opposition effect due to weak localization of photons in discrete disordered media. *Astrophysics and Space Science* 189, 151–154. doi:10.1007/BF00642962.
- Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Rondon, E., Souza, R., Rodrigues, T., Lazzaro, D., 2018. Rotational Period Determination for 12 Near-Earth Asteroids. *Minor Planet Bulletin* 45, 221–224.
- Morbideilli, A., Walsh, K.J., O'Brien, D.P., Minton, D.A., Bottke, W.F., 2015. The Dynamical Evolution of the Asteroid Belt. pp. 493–507. doi:10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch026.
- Morozhenko, A.V., Vidmachenko, A.P., 2013. Shadow mechanism and the opposition effect of brightness of atmosphereless celestial bodies. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* 29, 228–236. doi:10.3103/S088459131305005X.
- Mottola, S., De Angelis, G., Di Martino, M., Erikson, A., Hahn, G., Neukum, G., 1995. The near-earth objects follow-up program: First results. 117, 62–70. doi:10.1006/icar.1995.1142.
- Mueller, M., Delbo', M., Hora, J.L., Trilling, D.E., Bhattacharya, B., Bottke, W.F., Chesley, S., Emery, J.P., Fazio, G., Harris, A.W., Mainzer, A., Mommert, M., Penprase, B., Smith, H.A., Spahr, T.B., Stansberry, J.A., Thomas, C.A., 2011. ExploreNEOs. III. Physical Characterization of 65 Potential Spacecraft Target Asteroids. 141, 109. doi:10.1088/0004-6256/141/4/109.
- Muironen, K., Belskaya, I.N., Cellino, A., Delbò, M., Lvasseur-Regourd, A.C., Penttilä, A., Tedesco, E.F., 2010. A three-parameter magnitude phase function for asteroids. *Icarus* 209, 542–555. doi:10.1016/j.icarus.2010.04.003.
- Muironen, K., Mishchenko, M.I., Dlugach, J.M., Zubko, E., Penttilä, A., Videen, G., 2012. Coherent Backscattering Verified Numerically for a Finite Volume of Spherical Particles. *ApJ* 760, 118. doi:10.1088/0004-637X/760/2/118.
- Oszkiewicz, D.A., Muironen, K., Bowell, E., Trilling, D., Penttilä, A., Pieniluoma, T., Wasserman, L.H., Enga, M.T., 2011. 112, 1919–1929. doi:10.1016/j.jqsrt.2011.03.003.
- Penttilä, A., Shevchenko, V.G., Wilkman, O., Muironen, K., 2016. H<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> photometric phase function extended to low-accuracy data. *Planetary and Space Science* 123, 117–125. doi:10.1016/j.pss.2015.08.010.
- Polishook, D., 2012. Lightcurves and Spin Periods of Near-Earth Asteroids, The Wise Observatory, 2005 - 2010. *Minor Planet Bulletin* 39, 187–192.
- Pravec, 2000. "prepublished" periods of asteroids. <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.htm>. Accessed: 2022-02-23.
- Pravec, 2019. "prepublished" periods of asteroids. <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.htm>. Accessed: 2022-02-23.
- Pravec, 2020. "prepublished" periods of asteroids. <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.htm>. Accessed: 2022-02-23.
- Pravec, 2021. "prepublished" periods of asteroids. <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.htm>. Accessed: 2022-02-23.
- Rondón, E., Arcoverde, P., Monteiro, F., Medeiros, H., Navas, G., Lazzaro, D., Carvano, J.M., Rodrigues, T., 2019. Photometric characterization of NEOs: 3 Amor and 3 Apollo. 484, 2499–2513. doi:10.1093/mnras/stz024.
- Rondón, E., Lazzaro, D., Carvano, J., Monteiro, F., Arcoverde, P., Evangelista, M., Michimani, J., Mesquita, W., Rodrigues, T., 2022. A photometric study of members of the NEOs Atiras population. 372, 114723. doi:10.1016/j.icarus.2021.114723.
- Rondón, E., Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J.M., Roig, F., Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Silva, J., Jasmim, F., Prá, M.D., Hasselmann, P., Ribeiro, A., Dávalos, J., Souza, R., 2020. OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies—Some Results on NEO's Physical Properties. 132, 065001. doi:10.1088/1538-3873/ab87a7.
- Sanchez, J.A., Michelsen, R., Reddy, V., Nathues, A., 2013. Surface composition and taxonomic classification of a group of near-Earth and Mars-crossing asteroids. 225, 131–140. doi:10.1016/j.icarus.2013.02.036, arXiv:1302.4449.
- Shevchenko, V.G., Belskaya, I.N., Muironen, K., Penttilä, A., Krugly, Y.N., Velichko, F.P., Chiorny, V.G., Slyusarev, I.G., Gaftonyuk, N.M., Tereschenko, I.A., 2016. 123, 101–116. doi:10.1016/j.pss.2015.11.007.
- Shkuratov, Y.G., Kreslavsky, M., Ovcharenko, A., Stankevich, D., Zubko, E., Pieters, C., Arnold, G., 1999. Opposition effect from clementine data and mechanisms of backscatter. *Icarus* 141, 132–155.
- Tedesco, E.F., Veeder, G.J., Fowler, J.W., Chillemi, J.R., 1992. The IRAS Minor Planet Survey. The IRAS Minor Planet Survey, Final Report by E.R. Tedesco, G.J. Veeder, J.W. Fowler, and J.R. Chillemi. Phillips Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, December 1992. PL-TR-92-2049.

- Thomas, C.A., Emery, J.P., Trilling, D.E., Delbó, M., Hora, J.L., Mueller, M., 2014. Physical characterization of Warm Spitzer-observed near-Earth objects. 228, 217–246. doi:10.1016/j.icarus.2013.10.004, arXiv:1310.2000.
- Tonry, J.L., Denneau, L., Flewelling, H., Heinze, A.N., Onken, C.A., Smartt, S.J., Stalder, B., Weiland, H.J., Wolf, C., 2021. VizieR Online Data Catalog: ATLAS all-sky stellar ref. catalog, ATLAS-REFCAT2 (Tonry+, 2018). VizieR Online Data Catalog, J/ApJ/867/105.
- Tonry, J.L., Denneau, L., Heinze, A.N., Stalder, B., Smith, K.W., Smartt, S.J., Stubbs, C.W., Weiland, H.J., Rest, A., 2018. ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System. 130, 064505. doi:10.1088/1538-3873/aabadf, arXiv:1802.00879.
- Trilling, D.E., Mueller, M., Hora, J.L., Harris, A.W., Bhattacharya, B., Bottke, W.F., Chesley, S., Delbo, M., Emery, J.P., Fazio, G., Mainzer, A., Penprase, B., Smith, H.A., Spahr, T.B., Stansberry, J.A., Thomas, C.A., 2010. ExploreNEOs. I. Description and First Results from the Warm Spitzer Near-Earth Object Survey. 140, 770–784. doi:10.1088/0004-6256/140/3/770.
- Vaduvescu, O., Macias, A.A., Tudor, V., Predatu, M., Galád, A., Gajdoš, Š., Világi, J., Stevance, H.F., Errmann, R., Unda-Sanzana, E., Char, F., Peixinho, N., Popescu, M., Sonka, A., Cornea, R., Suci, O., Toma, R., Santos-Sanz, P., Sota, A., Licandro, J., Serra-Ricart, M., Morate, D., Mocnik, T., Diaz Alfaro, M., Lopez-Martinez, F., McCormac, J., Humphries, N., 2017. The EURONEAR Lightcurve Survey of Near Earth Asteroids. Earth Moon and Planets 120, 41–100. doi:10.1007/s11038-017-9506-9.
- Đurech, J., Hanuš, J., Alí-Lagoa, V., 2018. Asteroid models reconstructed from the Lowell Photometric Database and WISE data. 617, A57. doi:10.1051/0004-6361/201833437, arXiv:1807.02083.
- Vereš, P., Jedicke, R., Fitzsimmons, A., Denneau, L., Granvik, M., Bolin, B., Chastel, S., Wainscoat, R.J., Burgett, W.S., Chambers, K.C., Flewelling, H., Kaiser, N., Magnier, E.A., Morgan, J.S., Price, P.A., Tonry, J.L., Waters, C., 2015. Absolute magnitudes and slope parameters for 250,000 asteroids observed by Pan-STARRS PS1 - Preliminary results. 261, 34–47. doi:10.1016/j.icarus.2015.08.007, arXiv:1506.00762.
- Warner, B.D., 2014. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2013 September-December. Minor Planet Bulletin 41, 113–124.
- Warner, B.D., 2016. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2015 June-September. Minor Planet Bulletin 43, 66–79.
- Warner, B.D., 2017a. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 December thru 2017 April. Minor Planet Bulletin 44, 223–237.
- Warner, B.D., 2017b. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 December thru 2017 April. Minor Planet Bulletin 44, 223–237.
- Warner, B.D., 2017c. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 July-September. Minor Planet Bulletin 44, 22–36.
- Warner, B.D., Harris, A.W., Pravec, P., 2009. The asteroid lightcurve database. 202, 134–146. doi:10.1016/j.icarus.2009.02.003.
- Warner, B.D., Stephens, R.D., 2019. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2018 July-September. Minor Planet Bulletin 46, 27–40.
- Warner, B.D., Stephens, R.D., 2021. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2021 January - March. Minor Planet Bulletin 48, 294–302.
- Warner, B.D., Stephens, R.D., 2022. Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2021 August-October. Minor Planet Bulletin 49, 16–22.
- Waskom, M., Gelbart, M., Botvinnik, O., Ostblom, J., Hobson, P., Lukauskas, S., Gemperline, D.C., Augspurger, T., Halchenko, Y., Warmenhoven, J., Cole, J.B., De Ruiter, J., Vanderplas, J., Hoyer, S., Pye, C., Miles, A., Swain, C., Meyer, K., Martin, M., Bachant, P., Quintero, E., Kunter, G., Villalba, S., Brian, Fitzgerald, C., Evans, C., Williams, M.L., O’Kane, D., Yarkoni, T., Brunner, T., 2020. mwaskom/seaborn: v0.11.1 (December 2020). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.4379347.
- Waszczak, A., Chang, C.K., Ofek, E.O., Laher, R., Masci, F., Levitan, D., Surace, J., Cheng, Y.C., Ip, W.H., Kinoshita, D., Helou, G., Prince, T.A., Kulkarni, S., 2015. Asteroid Light Curves from the Palomar Transient Factory Survey: Rotation Periods and Phase Functions from Sparse Photometry. 150, 75. doi:10.1088/0004-6256/150/3/75, arXiv:1504.04041.