



OBSERVATÓRIO NACIONAL  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE ROTAÇÃO  
DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA  
COMO PARTE DO PROJETO IMPACTON

JOSÉ WESLEY PEREIRA DA SILVA

ORIENTADORA: DRA. DANIELA LAZZARO

RIO DE JANEIRO - RJ  
2022

DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE ROTAÇÃO DE OBJETOS EM ÓRBITA  
PRÓXIMA DA TERRA COMO PARTE DO PROJETO IMPACTON

José Wesley Pereira da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Astronomia.

Orientadora: Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2022

DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE ROTAÇÃO DE OBJETOS EM ÓRBITA  
PRÓXIMA DA TERRA COMO PARTE DO PROJETO IMPACTON

José Wesley Pereira da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL/MCTI COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ASTRONOMIA.

Examinada por:

---

Dra. Daniela Lazzaro, ON/MCTI

---

Dr. Jose S. Silva Cabrera, IA-UNAM

---

Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo, ON/MCTI

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2022

Wesley Pereira da Silva, José

Determinação do período de rotação de objetos em órbita próxima da Terra como parte do projeto IMPACTON/José Wesley Pereira da Silva. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2022.

XVI, 81 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadora: Daniela Lazzaro

Dissertação (mestrado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 72 – 81.

1. NEOs. 2. Curva de luz. 3. Período de rotação.
4. IMPACTON. I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Determinação do período de rotação de objetos em órbita próxima da Terra como parte do projeto IMPACTON

*À minha mãe Helena, ao meu  
pai Ivanildo, à minha irmã  
Thallyta, ao meu companheiro  
Adriano.*

# Agradecimentos

Após um período turbulento e cheios de desafios em meio a pandemia de COVID-19, com muito esforço e dedicação, finalizo este Mestrado. Aqui apresento meus agradecimentos a todos que tornaram possível a realização deste trabalho, em especial:

Minha orientadora, **professora Dra. Daniela Lazzaro**, pelo suporte, grande paciência, dedicação, atenção e incentivo ao longo de todo o período de desenvolvimento do trabalho. Obrigado por me permitir fazer parte do grandioso projeto IMPACTON.

Meus pais **Helena e Ivanildo** e minha irmã, **Thallyta**, que sempre deram todo seu amor e apoio.

Meu querido **Adriano**. Obrigado por ter compartilhado tantos momentos marcantes, e por ter me apoiado bastante durante esta etapa da minha carreira.

Aos professores **Me. Ibson J. Maciel** e **Me. Cícero J. M. Souza** pelo incentivo inicial que possibilitou minha entrada nessa área do conhecimento. Quero agradecer também ao professor **Dr. Antonio Carlos S. Miranda** por me fazer conhecer o OASI e o projeto IMPACTON.

Aos meus grandes amigos, **Romualdo, Guilherme, JK, Larissa, Allan e Adeilda** por todo apoio.

Aos amigos do projeto IMPACTON, **Marçal, Wesley, Filipe, Plícida e Jonatan** por toda a ajuda que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao **Observatório Nacional**, por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

Aos professores do PPG, **Dra. Daniela Lazzaro, Dr. Roberto Vieira Martins** e **Dra. Simone Daflon**. Um agradecimento especial ao professor **Dr. J.**

**M. Carvano** que trabalhou arduamente para desenvolver e tornar operacional o *pipeline* IMPACTON.

À **equipe do projeto IMPACTON**, por toda iniciativa e esforços para manter a pesquisa brasileira de pequenos corpos do Sistema Solar em andamento. Aos técnicos **Roberto, Santiago e Juliano**. À **equipe de observadores, Filipe, Eduardo, Plícida, Marçal, Jonatan, Wesley e Tatiane** pelas noites de observação. Sem vocês não seria possível a finalização desse trabalho.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES**, que financiou este trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Astronomia (M.Sc.)

## DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE ROTAÇÃO DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA COMO PARTE DO PROJETO IMPACTON

José Wesley Pereira da Silva

Setembro/2022

Orientadora: Daniela Lazzaro

Programa: Astronomia

Os NEOs (do inglês Near-Earth Objects) são pequenos corpos do Sistema Solar em órbitas próximas da órbita da Terra. Esses objetos são divididos em 4 subgrupos: Atiras, Aten, Apollo e Amor. Estudar as propriedades físicas desses corpos é importante não apenas para uma melhor compreensão sobre sua origem e evolução, mas também permite definir estratégias para o caso de descobrir algum objeto que apresente risco de impactar com a superfície terrestre. Atualmente conhece-se 29440 objetos classificados como NEOs mas para apenas 6,5% se tem o período de rotação determinado. Como parte do IMPACTON, o presente trabalho se propõe a determinar o período de rotação de NEOs a partir da análise de curvas de luz.

A metodologia adotada é a observação fotométrica de NEOs, sem período determinado, utilizando o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) do projeto IMPACTON. Os dados permitem obter a curva de luz dos objetos, ou seja, como o brilho varia no tempo. Supondo que a variação no brilho é devido principalmente à forma não esférica dos objetos, a análise da curva de luz permite então determinar o período de rotação.

A redução dos dados foi feita utilizando tanto o *software MPO Canopus* quanto o *Pipeline* IMPACTON, desenvolvido por J.M. Carvano. Este último, de forma automática, identifica os objetos numa imagem e determina suas magnitudes instrumentais e embora bem mais eficiente ainda se encontra em fase de testes. Neste trabalho obtemos dados para 14 NEOs, determinamos ao todo 12 períodos de rotação,

com valores variando entre 1,9 horas e 10,4 horas. Para um asteroide estimamos um limite inferior para o período, enquanto para outro não obtivemos resultados conclusivos.

Abstract of Dissertation presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Astronomy (M.Sc.)

DETERMINING THE ROTATION PERIOD OF OBJECTS IN NEAR-EARTH  
ORBIT AS PART OF THE IMPACTON PROJECT

José Wesley Pereira da Silva

September/2022

Advisor: Daniela Lazzaro

Department: Astronomy

The NEOs (Near-Earth Objects) are small bodies of the Solar System in orbits close to the Earth's orbit, these objects are divided into 4 subgroups: Atiras, Aten, Apollo, and Amor. Studying the physical properties of these bodies is important not only for a better understanding of their origin and evolution but also allows the definition of strategies in case of discovering an object that presents a risk of impacting the Earth's surface. Currently, 29440 objects classified as NEOs are known, but for only 6.5% of them the rotation period has been determined. As part of IMPACTON, the present work aims to determine the rotation period of NEOs from the analysis of their light curves.

The adopted methodology is the photometric observation of NEOs without a known rotation period, using the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) of the IMPACTON project. The data allows to obtain the light curve of the objects, that is, how their brightness changes over time. Assuming that this brightness variation is mainly due to the non-spherical shape of the objects, from the light curve analysis it is possible to derive the rotation period.

The data reduction has been performed using both the *software MPO Canopus* and the *Pipeline IMPACTON*, developed by J.M. Carvano. This last automatically identifies and determines the instrumental magnitudes of all the objects in an image but, although much efficient, is still in a testing phase. In this work we obtained data for 14 NEOs and for 12 of these we determined their rotation periods, with values ranging between 1.9 hours and 10.4 hours. For one asteroid we estimated just

a lower limit for the period, while for another one we did not obtain conclusive results.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetos em órbita próxima da Terra - NEOs . . . . .	1
1.2 Propriedades rotacionais . . . . .	7
1.3 Projeto IMPACTON . . . . .	13
<b>2 Metodologia</b>	<b>15</b>
2.1 Curva de luz e geometria de observação . . . . .	15
2.2 Determinação do período de rotação . . . . .	19
2.3 Observações astronômicas e coleta de dados . . . . .	20
2.3.1 Obtenção dos dados . . . . .	20
2.3.2 A amostra . . . . .	21
2.4 Processamento de dados . . . . .	22
2.4.1 Tratamento das imagens . . . . .	23
2.4.2 Análise fotométrica e obtenção do período de rotação . . . . .	24
2.4.2.1 Fotometria de Abertura . . . . .	24
2.4.2.2 <i>Softwares</i> utilizados para redução fotométrica e obtenção do período . . . . .	28
<b>3 Resultados</b>	<b>31</b>
3.1 Curvas de Luz . . . . .	31
3.1.1 Objetos com períodos determinados . . . . .	32
3.1.2 Curvas de luz incompletas ou com grande dispersão . . . . .	57
3.2 Resumo dos resultados . . . . .	68
<b>4 Conclusões e perspectivas futuras</b>	<b>70</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>72</b>

# Lista de Figuras

1.1	<i>Ilustração esquemática das órbitas características dos diferentes sub-grupos de NEAs.</i> . . . . .	5
1.2	<i>Representação gráfica da localização dos planetas internos do Sistema Solar, de Mercúrio até Júpiter, e os pequenos corpos identificados nesta região com os dados coletados pela missão Gaia. Figura retirada de <a href="https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_sees_strange_stars_in_most_detailed_Milky_Way_survey_to_date">https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_sees_strange_stars_in_most_detailed_Milky_Way_survey_to_date</a>.</i> . . . . .	6
1.3	<i>Distribuição da magnitude absoluta para 68 asteroides em função do período de rotação (esquerda) e da amplitude da curva de luz (direita). Figuras retiradas de McAdoo and Burns (1973)</i> . . . . .	8
1.4	<i>Distribuições das frequências rotacionais e seus respectivos ajustes para grupos de asteroides pequenos e grandes. Figura retirada de Binzel et al. (1989).</i> . . . . .	9
1.5	<i>Esquerda: Distribuição para 460 asteroides com <math>D &gt; 40</math> km onde a curva tracejada respresenta a distribuição Maxwelliana correspondente. Direita: Distribuição para 231 asteróides com <math>0,15 \text{ km} &lt; D \leq 10\text{km}</math> onde a curva tracejada seria a distribuição Maxwelliana. Destes, 164 são NEOs e cruzadores de Marte enquanto o restante são asteroides do Cinturão Principal Interno. Gráficos obtidos de Pravec et al. (2002).</i> . . . . .	10
1.6	<i>Gráfico da frequência de rotação <math>\times</math> diâmetro (rotation frequency <math>\times</math> diameter). A linha horizontal tracejada é a barreira de rotação. Figura retirada de Warner et al. (2021).</i> . . . . .	11
1.7	<i>Gráfico da frequência de rotação <math>\times</math> diâmetro (rotation frequency <math>\times</math> diameter). A linha horizontal tracejada é a barreira de rotação, os círculos em amarelo representam a população de NEAs e os triângulos vermelhos os sistemas binários. Figura retirada de Warner et al. (2021).</i> . . . . .	12

2.1	<i>Configuração relativa do sistema Sol-Asteróide-Terra onde podem ser vistos os ângulos de fase (<math>\alpha</math>) e de aspecto (<math>\theta</math>). Figura adaptada de Silva-Cabrera (2015).</i>	16
2.2	<i>Variação da amplitude da curva de luz de um corpo oblato observado em diferentes ângulos de aspecto (<math>\theta</math>). Figura retirada de Silva-Cabrera (2015).</i>	17
2.3	<i>Curva de luz de um asteroide de acordo com sua dependência com a forma, geometria da observação, espalhamento da luz pela superfície e irregularidades, e as variações de albedo. Figura retirada de Souza (2002).</i>	18
2.4	<i>Ilustração da curva de luz gerada em função da fase rotacional de um objeto alongado. Figura retirada de Souza (2002).</i>	18
2.5	<i>Representação da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide, anel de raio <math>a</math>, e ao céu, anel de raio <math>(b - c)</math>. Figura retirada de Monteiro (2016a).</i>	26
3.1	<i>Curvas de luz do NEO 174050 (2002 CC19) de fevereiro de 2021.</i>	33
3.2	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 174050 (2002 CC19) com os dados obtidos em fevereiro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	34
3.3	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 174050 (2002 CC19) com os dados obtidos em fevereiro de 2021 com o Pipeline IMPACTON. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	35
3.4	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 174050 (2002 CC19) retirada de Pravec (2021).</i>	35
3.5	<i>Curvas de luz do NEO 2001 EC de setembro de 2021.</i>	36
3.6	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2001 EC com os dados obtidos em setembro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	37
3.7	<i>Curvas de luz do NEO 7753 (1988 XB) de dezembro de 2020.</i>	38
3.8	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 7753 (1988 XB) com os dados obtidos em dezembro de 2020. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	39
3.9	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 7753 (1988 XB) retirada de Warner and Stephens (2021a).</i>	40
3.10	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 7753 (1988 XB) retirada de Pravec (2020).</i>	40
3.11	<i>Curvas de luz do NEO 162186 (1999 OP3) de janeiro de 2021.</i>	42

3.12	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 162186 (1999 OP3) com os dados obtidos em janeiro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	43
3.13	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 162186 (1999 OP3) retirada de Warner and Stephens (2021b).</i>	44
3.14	<i>Curvas de luz do NEO 332446 (2008 AF4) de fevereiro de 2021.</i>	45
3.15	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 332446 (2008 AF4) com os dados obtidos em fevereiro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	46
3.16	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 332446 (2008 AF4) retirada de Warner and Stephens (2021b).</i>	46
3.17	<i>Curvas de luz do NEO 450263 (2003 WD158) de julho de 2021.</i>	47
3.18	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 450263 (2003 WD158) com os dados obtidos em julho de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	48
3.19	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 450263 (2003 WD158) retirada de Pravec (2021).</i>	48
3.20	<i>Curvas de luz do NEO 2011 YQ10 de outubro de 2021. Warner and Stephens (2022b)</i>	49
3.21	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 com os dados obtidos em outubro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	50
3.22	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 com os dados obtidos em outubro de 2021 com o Pipeline IMPACTON. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	51
3.23	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 retirada de Pravec (2021).</i>	51
3.24	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 retirada de Warner and Stephens (2022a).</i>	52
3.25	<i>Curvas de luz do NEO 2017 UW42 de fevereiro de 2022.</i>	53
3.26	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2017 UW42 com os dados obtidos em fevereiro de 2022. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	54
3.27	<i>Curvas de luz do NEO 2021 MO1 de outubro de 2021.</i>	55
3.28	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2021 MO1 com os dados obtidos em outubro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	56
3.29	<i>Curvas de luz do NEO 141484 (2002 DB4) de fevereiro e março de 2022.</i>	58

3.30	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 141484 (2002 DB4) com os dados obtidos em fevereiro/março de 2022. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	59
3.31	<i>Curvas de luz do NEO 318160 (2004 QZ2) de dezembro de 2021.</i>	60
3.32	<i>Curvas de luz do NEO 453707 (2010 XY72) de abril de 2021.</i>	62
3.33	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 453707 (2010 XY72) com os dados obtidos em abril de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	63
3.34	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 453707 (2010 XY72) retirada de Pravec (2021).</i>	64
3.35	<i>Curvas de luz do NEO 2021 JQ24 de agosto/setembro de 2021.</i>	65
3.36	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2021 JQ24 com os dados obtidos em agosto/setembro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.</i>	65
3.37	<i>Curva de fase rotacional para o asteroide 2021 JQ24 retirada de Warner and Stephens (2022b).</i>	66
3.38	<i>Curvas de luz do NEO 2021 JT5 de julho de 2021.</i>	67

# Lista de Tabelas

2.1	Propriedades físico-dinâmicas dos NEOs observados. Os elementos orbitais foram obtidos do <i>JPL Horizons</i> em 22-07-2022 enquanto o diâmetro de diversas fontes, conforme indicado. . . . .	22
3.1	Dados observacionais do objeto 174050 (2002 CC19). . . . .	32
3.2	Dados observacionais do objeto 2001 EC. . . . .	36
3.3	Dados observacionais do objeto 7753 (1988 XB). . . . .	38
3.4	Dados observacionais do objeto 162186 (1999 OP3). . . . .	42
3.5	Dados observacionais do objeto 332446 (2008 AF4). . . . .	44
3.6	Dados observacionais do objeto 450263 (2003 WD158). . . . .	47
3.7	Dados observacionais do objeto 2011 YQ10. . . . .	49
3.8	Dados observacionais do objeto 2017 UW42. . . . .	53
3.9	Dados observacionais do objeto 2021 MO1. . . . .	55
3.10	Dados observacionais do objeto 141484 (2002 DB4). . . . .	57
3.11	Dados observacionais do objeto 318160 (2004 QZ2). . . . .	60
3.12	Dados observacionais do objeto 453707 (2010 XY72). . . . .	62
3.13	Dados observacionais do objeto 2021 JQ24. . . . .	64
3.14	Dados observacionais do objeto 2021 JT5. . . . .	67
3.15	Resumo dos resultados obtidos. . . . .	69

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Objetos em órbita próxima da Terra - NEOs

Os processos de formação e evolução do Sistema Solar resultaram em uma diversificada população de corpos celestes que constituem todo nosso sistema planetário. Em geral, esses objetos podem ser divididos em três classes: planetas, planetas anões e pequenos corpos, cada um possuindo características físicas e dinâmicas distintas.

Os planetas, pela definição da União Astronômica Internacional - IAU<sup>1</sup>, a) são corpos que estão em órbita em torno de uma estrela, b) que possuem massa o suficiente para que assumam uma forma em equilíbrio hidrostático, (i.e., para que a gravidade supere as forças de corpo rígido) e c) que tenham esvaziado a vizinhança ao redor de suas órbitas. Os planetas anões são definidos pelos critérios a) e b), porém não obedecem a condição c), por não conseguirem dominar gravitacionalmente a região em que orbitam, como Plutão e Ceres que habitam locais com grande número de pequenos corpos.

Os pequenos corpos do Sistema Solar são objetos que descrevem suas órbitas em torno do Sol, porém não atingiram a massa necessária para conseguir obter uma forma em equilíbrio hidrostático, ou seja, são definidos apenas pela condição a) da IAU, que não limpam sua órbita e tampouco são satélites. Esses objetos se distribuem ao longo de todo Sistema Solar, desde as regiões mais internas, como os asteroides que se concentram em sua maioria no Cinturão Principal de Asteroides (ou MBA, do inglês Main Belt Asteroids), até as mais externas, como os Centauros, os objetos transnetunianos (TNOs) e os cometas. De acordo com o *JPL Horizon - Small-Body Database Query*<sup>2</sup>, hoje são conhecidos mais de 1 milhão e 200 mil pequenos corpos, sendo cerca de 615 mil numerados, ou seja, com órbita bem determinada.

Como são corpos com massas relativamente baixas comparados aos planetas e

---

<sup>1</sup>Disponível em: <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>

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

planetas anões, os pequenos corpos foram pouco alterados depois de sua formação. Assim, esses objetos são reservatórios de informação sobre a formação planetária (Brasser et al. 2006, Bottke and Morbidelli 2017, Raymond and Nesvorný 2022). Por este motivo, o estudo coletivo das propriedades físicas desse grande número de objetos pode contribuir com condições de contorno importantes para o desenvolvimento e validação de modelos de formação e evolução do Sistema Solar (Morbidelli et al. 2015).

Dentre essas várias populações de pequenos corpos do Sistema Solar, se encontram os Objetos Próximos da Terra (ou NEOs, do inglês *Near Earth Objects*), que inclui tanto asteroides (NEAs) quanto núcleos de cometas (NECs) dormentes ou extintos, e que se encontram em órbitas com distância ao periélio (ponto de sua órbita no qual mais se aproxima do Sol)  $q < 1,3$  UA e distância ao afélio (ponto de sua órbita no qual a distância ao Sol é máxima)  $Q > 0,983$  UA. Isso significa que os NEOs cruzam ou aproximam-se bastante da órbita da Terra. Por apresentarem essas características orbitais, o estudo desta população se torna interessante para observações terrestres pois é possível analisar os pequenos corpos do Sistema Solar de menor tamanho, sem a necessidade de usar grandes telescópios (Lupishko and Di Martino 1998, Binzel et al. 2002).

Outra característica importante é que os NEOs são uma população transiente, isto é, os objetos que povoam essa região atualmente se originaram em outras regiões do Sistema Solar. Por causa de encontros próximos, principalmente com planetas terrestres, as órbitas dos NEOs são fundamentalmente instáveis com um tempo médio de residência  $10^6 - 10^7$  anos. Isso implica que esses objetos são removidos do Sistema Solar ou impactam nos planetas terrestres e no Sol, nesta escala de tempo (Morbidelli et al. 2002, Winter et al. 2021).

Por outro lado, desde a descoberta do primeiro NEO (433 Eros) em 13 de agosto de 1898 pelo astrônomo alemão Gustav Witt em Berlim (Alemanha) e, independentemente, por Auguste C. Charlois em Nice (França) a quantidade de objetos conhecidos desta população tem crescido constantemente. Segundo o *JPL Horizon - Small-Body Database Query*, atualmente existem mais de 29 mil NEOs, indicando que essa população deve estar sendo reabastecida a partir de algum reservatório de pequenos corpos. Estudos a partir de modelos dinâmicos (Granvik et al. 2018, Zolotarev and Shustov 2021) e estudos baseados na distribuição taxonômica e composicional (Binzel et al. 2018, Binzel et al. 2019, Marsset et al. 2022) apontam que o Cinturão Principal de Asteroides deve ser a fonte predominante de NEOs.

Classicamente se pensa que colisões no Cinturão Principal geram fragmentos, os quais entram na ressonância de movimento médio 3:1 com Júpiter, entre a parte interna e a intermediária do Cinturão Principal, e na ressonância secular  $\nu_6$  com Saturno, na borda interna do MBA. Em seguida, essas ressonâncias levam a um

aumento das excentricidades das órbitas fazendo com que estas interceptem aquelas dos planetas internos, provocando a ejeção desses fragmentos para as regiões internas e externas do Sistema Solar.

Outro mecanismo importante para o transporte de objetos com tamanhos menores que dezenas de quilômetros é o efeito Yarkovsky, um fenômeno não gravitacional ligado à emissão térmica anisotrópica desses corpos. Foi verificado, por meio de simulações computacionais, que esse efeito provoca uma migração lenta no semieixo maior dos MBA. Dessa forma, alguns desses objetos são capturados em ressonâncias e daí transportados para a região dos NEOs (Bottke et al. 2002, Vokrouhlický et al. 2000). Segundo Michel et al. (2000), asteroides que cruzam a órbita de Marte podem permanecer nesta região por cerca de  $10^7$  anos antes das suas órbitas serem perturbadas por interações gravitacionais e, conseqüentemente, se tornem cruzadores da órbita da Terra. O estudo das propriedades físicas destes corpos pode, portanto, fornecer informações importantes sobre as regiões de sua origem e os caminhos dinâmicos percorridos (Binzel et al. 2015).

O estudo dos NEOs também é importante por ser uma possível fonte de meteoritos (Binzel et al. 2015, DeMeo et al. 2022). Como alguns desses meteoritos datam do início da formação do Sistema Solar, esses objetos podem trazer informações sobre a nebulosa que deu origem a todos os seus componentes. Outro fato interessante é que por serem cruzadores da órbita da Terra, alguns NEOs podem apresentar risco de colisão com nosso planeta. Em 1981 a identificação de uma concentração anômala de irídio no limite entre o período Cretáceo e a era Mesozóica foi associada à cratera de impacto de Chixculub (Alvarez et al. 1980), evento ao qual é atribuída a extinção dos dinossauros há cerca de 65 milhões de anos. Michel (2013) discute o papel fundamental de algumas propriedades físicas para o desenvolvimento de métodos de mitigação para fragmentação ou deflexão de objetos que venham a ameaçar a biosfera da Terra.

Em setembro de 2022 ocorrerá um passo importante na pesquisa de defesa planetária, a missão DART (do inglês, Double Asteroid Redirection Test) da NASA. O objetivo é impactar com Dimorphos, o membro secundário do sistema binário Didymos, e mudar a órbita desse sistema através de um impacto cinético (Adams et al. 2022). Por esses motivos, a determinação das propriedades físicas dessa população de pequenos corpos podem ajudar no desenvolvimento de métodos para evitar uma colisão com a Terra.

De acordo com Shoemaker et al. (1979), a população de NEOs pode ser dividida em quatro subgrupos: Aten, Apollo, Amor e Atira. A definição de cada subgrupo depende de características orbitais como semieixo maior ( $a$ ), distância ao periélio ( $q$ ) e distância ao afélio ( $Q$ ). Asteroides com órbitas com distâncias ao periélio maior do que a distância ao afélio da Terra são definidos como objetos do subgrupo Amor,

satisfazendo as seguintes relações:

$$a \geq 1 \text{ UA} \text{ e } 1,017 \text{ UA} < q \leq 1,3 \text{ UA}$$

Asteroides do subgrupo Apollo são definidos de acordo com as seguintes condições:

$$a \geq 1 \text{ UA} \text{ e } q \leq 1,017 \text{ UA},$$

onde 1,017 é a distância afélica da Terra, portanto, esses objetos são cruzadores da órbita da terrestre quando próximos de seus periélios.

Os asteroides Atens são definidos pelas seguintes características orbitais:

$$a < 1 \text{ UA} \text{ e } Q > 0,983 \text{ UA},$$

também podendo ser cruzadores da órbita terrestre.

Os objetos do subgrupo Atira têm órbitas internas à da Terra: a distância ao afélio de um asteroide Atira é menor do que a distância periélica da Terra (0,983 UA). Isto implica que o semieixo maior do asteroide é também menor do que 0,983 AU. Ou seja,

$$a < 1 \text{ UA} \text{ e } Q < 0,983 \text{ UA}.$$

Esses objetos foram chamados originalmente de “Apohele” por Tholen and Whiteley (1998), com a descoberta do objeto 1998 DK36 que parecia ser o primeiro asteroide coma órbita interna à da Terra. Esse primeiro objeto é agora conhecido como (163693) Atira, dando origem ao nome dessa subpopulação de NEOs (Binzel et al. 2015).

Na Figura 1.1 estão representadas as órbitas características das diferentes subpopulações dos NEOs. Devido às suas propriedades orbitais, os Apollo e os Aten são a população de NEOs que apresentam algum risco para Terra. De acordo com a base de dados *JPL Horizon - Small-Body Database Query*, em 22-08-2022 conhecia-se 29440 objetos classificados como objetos próximos da Terra com, 28 Atiras, 2305 Atens, 16463 Apollos e 16463 Amors, ou seja, cerca de 92% da população de NEOs são dos subgrupos Amor e Apollo, enquanto os Aten correspondem a cerca de 7,5%. Como os Atiras têm órbitas interiores à Terra são difíceis de observar, motivo pelo qual representam menos do que 0,1% dos NEOs conhecidos.

É possível estimar o diâmetro desses objetos levando em consideração que o diâmetro efetivo (D) se relaciona com a magnitude absoluta (H) e com o albedo ( $p_v$ ) através da relação:

$$D = \frac{1329 \times 10^{-H/5}}{\sqrt{p_v}} \text{ km.} \quad (1.1)$$

Dentre os NEOs conhecidos, 10082 têm magnitude absoluta  $H \leq 22$ , ou diâmetro

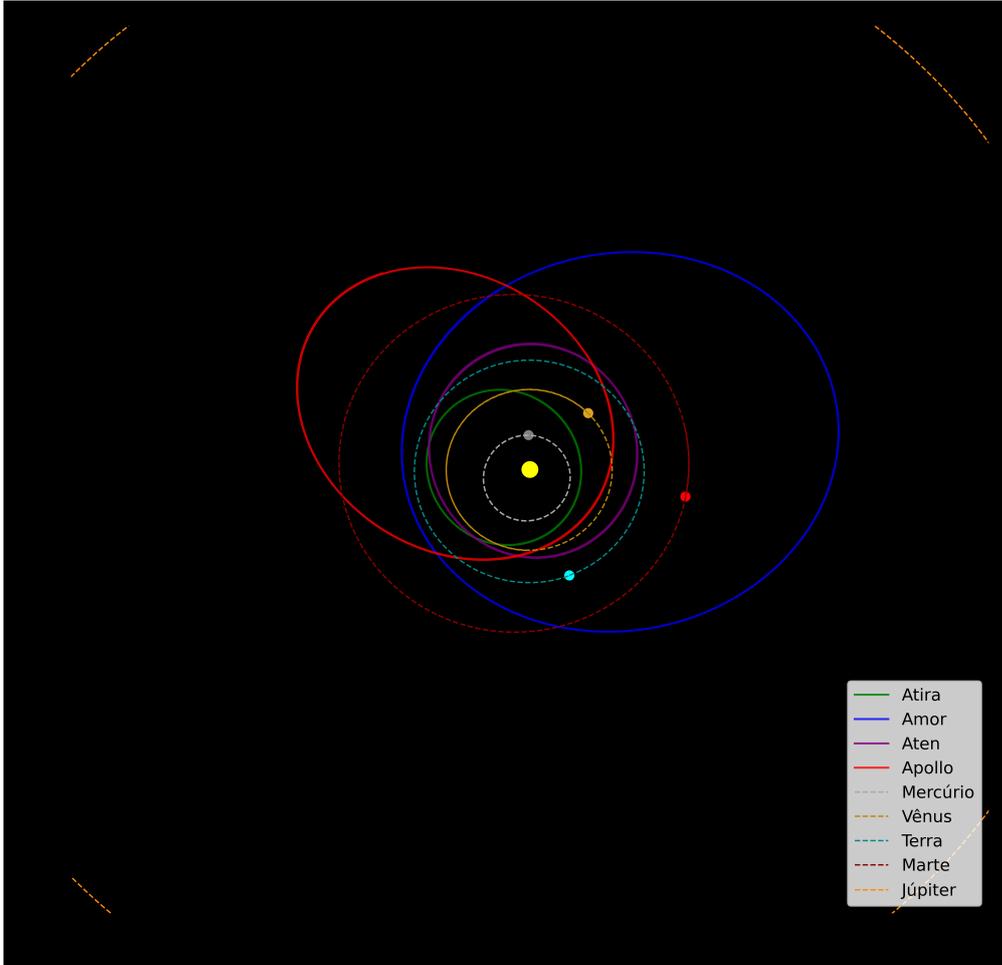


Figura 1.1: Ilustração esquemática das órbitas características dos diferentes subgrupos de NEAs.

(D) maior que 150 m, 1360 têm  $18,872 \leq H \leq 17,75$ , ou  $600 \geq D \geq 1000$  m, e 51  $H \leq 15$ , ou  $D \geq 5$  km, supondo um albedo de 0,14. Os objetos que têm magnitude absoluta  $H \leq 22$  (ou diâmetro médio  $> 140$  m) e um MOID (do inglês *Minimum Orbit Intersection Distance*) menor que 0,05 UA são classificados como PHA sigla para *Potentially Hazardous Asteroids*, ou seja, asteroides potencialmente perigosos.

Os PHAs não irão necessariamente colidir com a Terra, mas por terem um uma distância mínima entre as órbitas menor do que 20 vezes a distância Terra-Lua e por serem objetos grandes o suficiente para, no caso de colisão, causar efeitos destrutivos em diferentes escalas, faz-se necessário esforços observacionais para determinar as propriedades orbitais e características físicas desses objetos. Assim, investigar qual a probabilidade de algum PHA vir a colidir com a Terra e qual sua natureza física é importante para o desenvolvimento de medidas de mitigação no caso de um possível impacto (Perna et al. 2013). O evento de Tunguska é um bom exemplo da destruição local. O incidente ocorreu no dia 30 de julho de 1908 quando um objeto com diâmetro estimado em 60 - 100 m explodiu na atmosfera, devastando uma área de

$2150 \pm 50 \text{ km}^2$  de floresta na Sibéria (Longo 2007). Outro exemplo foi a explosão de um bólido com 15-20 m de diâmetro em Chelyabinsk na Rússia, em 15 de fevereiro de 2013. O estrondo sônico provocado pelo evento destruiu janelas em uma área de cerca de  $5000 \text{ km}^2$ , ferindo várias pessoas (Ivanova et al. 2013). Segundo o *JPL Horizon - Small-Body Database Query*, atualmente estão catalogados 2244 PHAs, sendo 93,9% pertencentes aos subgrupos Apollo e Aten e 5,9% ao subgrupo Amor.

Na Figura 1.2 é mostrada uma representação gráfica do Sistema Solar interior, onde o círculo amarelo no centro representa o Sol, o pontos em azul representam os asteroides próximos à Terra e os cruzadores de Marte, os verdes representam o Cinturão Principal e os laranjas representam os Troianos, nos pontos lagrangeanos L4 e L5 da órbita de Júpiter.

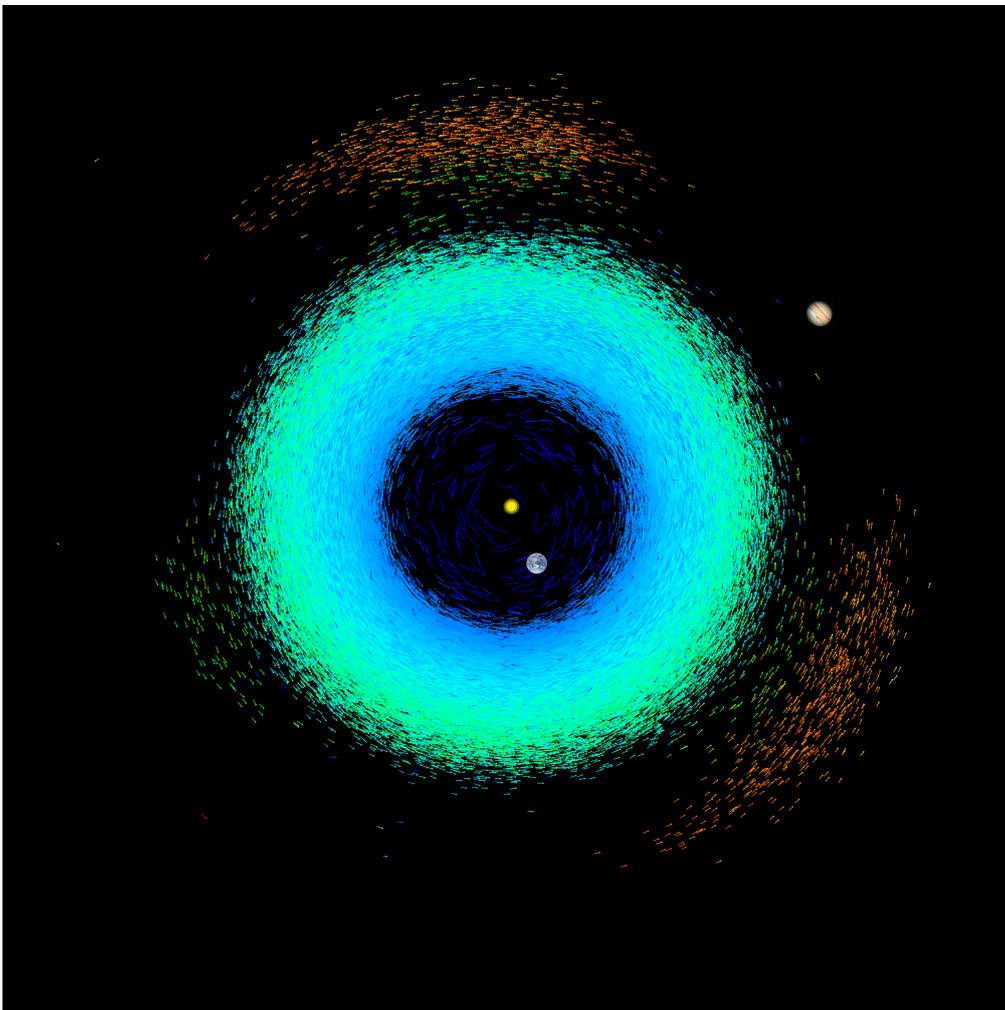


Figura 1.2: *Representação gráfica da localização dos planetas internos do Sistema Solar, de Mercúrio até Júpiter, e os pequenos corpos identificados nesta região com os dados coletados pela missão Gaia. Figura retirada de [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Gaia/Gaia\\_sees\\_strange\\_stars\\_in\\_most\\_detailed\\_Milky\\_Way\\_survey\\_to\\_date](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_sees_strange_stars_in_most_detailed_Milky_Way_survey_to_date).*

Por todas as razões discutidas acima, fica evidente que o estudo das propriedades

físicas dos objetos próximos da Terra tem bastante relevância, tanto para responder questões sobre a formação e evolução dos sistemas planetários como para um melhor entendimento sobre os mecanismos de transporte desses objetos. Este problema se torna fundamental quando se trata de objetos que podem vir a colidir com a Terra, pois como já discutido, os asteroides que cruzam a órbita da Terra representam risco para a biosfera do nosso planeta.

## 1.2 Propriedades rotacionais

Como todos os corpos celestes, os pequenos corpos do Sistema Solar possuem um movimento de rotação em torno de um ou mais eixos principais de inércia. No caso dos asteroides, esta rotação está ligada ao processo de sua formação e evolução colisional. O astrônomo austríaco Theodor von Oppolzer (1901) foi o primeiro a observar que asteroides rotacionam devido ao fato de observar uma variação no brilho do asteroide 433 Eros. Este autor concluiu que essas variações periódicas no brilho seriam o resultado de um corpo irregular girando em torno de seu eixo principal de inércia, com diferentes áreas da superfície refletindo a luz solar incidente.

A partir desta descoberta, Bailey and Pickering (1913) determinaram o primeiro período de rotação para um asteroide, o mesmo que foi observado por von Oppolzer (1901). Eles determinaram um período de 6 horas para o objeto 433 Eros a partir da técnica de fotometria visual. As contribuições iniciais de Groeneveld and Kuiper (1954a), Groeneveld and Kuiper (1954c), Ahmad (1954), Gehrels (1956) e Wood and Kuiper (1963) na determinação de períodos rotacionais para cerca de 20 asteroides possibilitaram então os primeiros estudos sobre a distribuição desta propriedade entre os pequenos corpos do Sistema Solar.

Esses primeiros trabalhos estatísticos analisaram a distribuição do momento angular para uma pequena amostra de 27 asteroides concluindo que seguia uma tendência similar a dos planetas, apresentando um período de rotação entre 5 e 10 horas (Alfvén 1964, Fish 1967 e Hartmann and Larson 1967). Contudo, tais resultados foram baseados em uma análise muito limitada devido ao número muito pequeno de objetos com período de rotação determinado, em particular se comparado com a quantidade conhecida atualmente, que é superior à 33 mil asteroides<sup>1</sup>.

Isso foi resultado de esforços continuados para aumentar o conjunto de asteroides com período de rotação conhecido. Com isso, estudos estatisticamente mais plausíveis foram sendo desenvolvidos a medida que a amostra aumentava. McAdoo and Burns (1973), por exemplo, analisando a distribuição do período de rotação com a magnitude absoluta para 64 asteroides, observaram que asteroides menores

---

<sup>1</sup>*JPL Horizons Small-Body Database Query*, disponível em [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_query.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html)

(maior magnitude) tendem a girar mais rápido do que os maiores e, em geral, possuem curvas de luz irregulares (ver Figura 1.3). Os autores separaram a amostra entre os asteroides menores e irregulares, obtendo um período de rotação médio de 7,7 horas, e os asteroides maiores e mais regulares com período médio de 9,3 horas. Esse trabalho além de mostrar uma relação entre diâmetro (supondo pouca variação de albedo), expresso em termos da magnitude absoluta, e a taxa de rotação ainda reforça a hipótese de que asteroides maiores teriam se fragmentado, formando objetos menores e irregulares (Kuiper et al. 1958, Anders e Wetherill 1967).

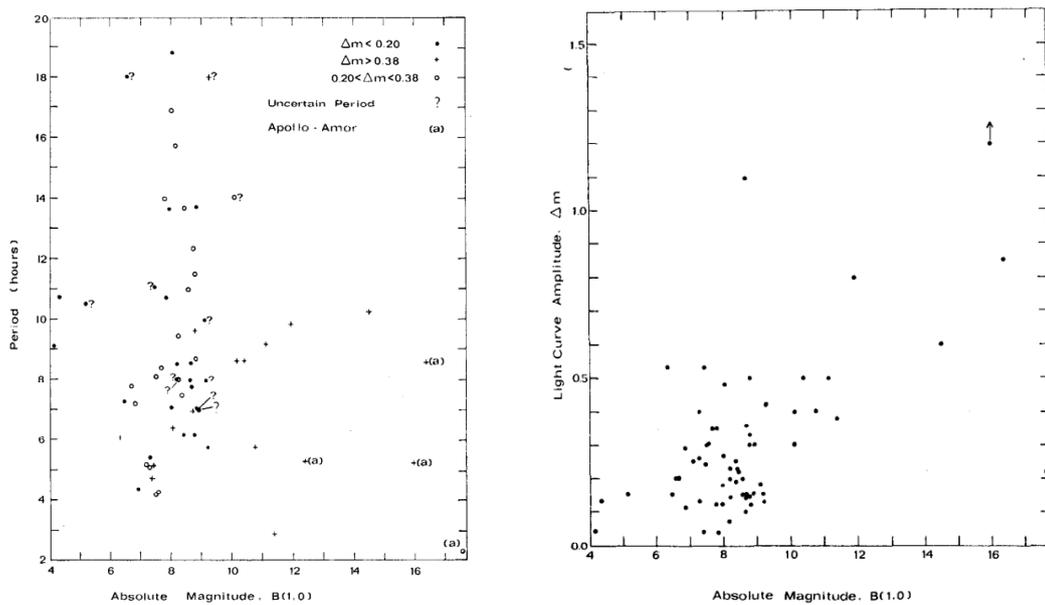


Figura 1.3: *Distribuição da magnitude absoluta para 68 asteroides em função do período de rotação (esquerda) e da amplitude da curva de luz (direita). Figuras retiradas de McAdoo and Burns (1973)*

Dispondo de uma amostra com 182 períodos de rotação, Harris and Burns (1979) mostraram que a distribuição da taxa de rotação com o diâmetro dos asteroides poderia ser ajustada por uma curva Maxwelliana. Isso indicaria tratar-se de um sistema evoluído colisionalmente. Os autores também analisaram uma possível relação entre a distribuição de período rotacional e a composição, ou classe taxonômica, dos objetos. Entretanto, a partir de uma amostra de 132 objetos do Cinturão Principal e excluindo membros de famílias, Tedesco and Zappala 1980 não encontraram relações evidentes entre rotação e composição superficial.

A partir de uma base de dados ainda maior, com 375 asteroides do Cinturão Principal, Binzel et al. (1989) realizaram um estudo estatístico mais robusto sobre a distribuição da taxa de rotação de asteroides em função de vários parâmetros. Nesse estudo os asteroides foram divididos em diversos subgrupos em função de seu diâmetro, mostrando que objetos com diâmetros entre  $125 \text{ km} \leq D \leq 200 \text{ km}$  ou  $D \geq 200 \text{ km}$  apresentam uma distribuição que pode ser bem representada por uma curva

Maxwelliana tridimensional. Isso, novamente confirmaria que os períodos de rotação são resultantes da evolução colisional. Porém, para asteroides com diâmetros iguais ou menores do que 125 km foram observadas mudanças significativas devido a um excesso de rotadores lentos o que afeta a forma da distribuição. A única exceção seria o grupo de asteroides com diâmetro na faixa de  $50 \text{ km} \leq D \leq 125 \text{ km}$ , podendo ser ajustada pela combinação de duas Maxwellianas. Já os asteroides com  $D \leq 50 \text{ km}$  apresentam um excesso de rotadores lentos sendo sua distribuição possivelmente influenciada por diversos processos. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 1.4. Os autores concluíram que esses resultados podem indicar que os objetos maiores do que 125 km atingiram uma distribuição de equilíbrio colisional devido ao longo intervalo, comparado com a idade do Sistema Solar, entre duas colisões. Entretanto, outros processos físicos, tais como reemissão térmica, por exemplo, podem levar à existência de duas ou mais populações, o que poderia explicar as distribuições observadas para os asteroides com diâmetro inferior a 50 km.

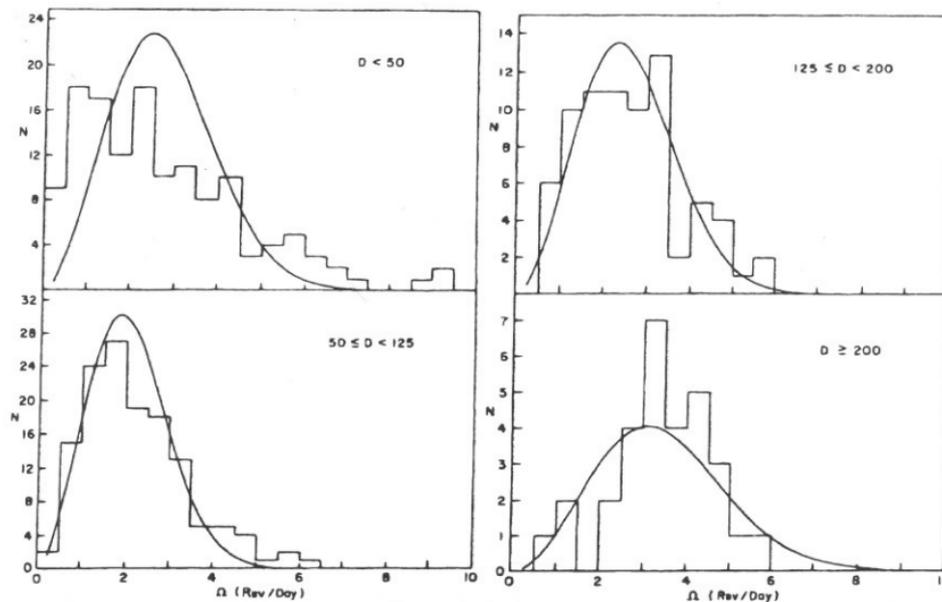


Figura 1.4: *Distribuições das frequências rotacionais e seus respectivos ajustes para grupos de asteroides pequenos e grandes. Figura retirada de Binzel et al. (1989).*

Ainda nesse trabalho, Binzel et al. (1989) analisaram o período de rotação de 28 NEOs, com diâmetro médio em torno de 3 km, comparando-os com uma amostra de asteroides do Cinturão Principal com diâmetros menores que 15 km. Não foram observadas mudanças significativas nas distribuições do período rotacional para essas duas populações embora as amplitudes das curvas de luz dos NEOs tendem a ser maiores daquelas de asteroides do Cinturão Principal. Esse resultado indica que a amostra dos NEOs são objetos mais irregulares.

Comparações de histogramas das taxas de rotação de asteroides com uma distri-

buição Maxwelliana semelhantes a de Binzel et al. (1989) foram feitas por diversos pesquisadores tais como Farinella et al. (1981), Fulchignoni et al. (1995) e Donnison and Wiper (1999). Em geral, todos encontraram uma tendência em que a distribuição da taxa de rotação pode ser descrita por uma curva Maxwelliana para asteroides maiores, mas não para objetos com diâmetros menores do que um certo valor. Um estudo ainda mais robusto foi realizado por Pravec et al. (2002) com um conjunto de períodos de rotação para 984 asteroides. Os autores mostraram que os asteroides com diâmetros superiores à 40 km têm uma distribuição que pode ser ajustada por uma Maxwelliana, enquanto os objetos com diâmetros entre 0,15 km e 10 km apresentam um excesso de rotadores rápidos e lentos, não podendo ser representados por uma Maxwelliana (ver Figura 1.5). Ou seja, para objetos menores, a taxa de rotação é resultado não apenas da evolução colisional mas também de outros processos físicos.

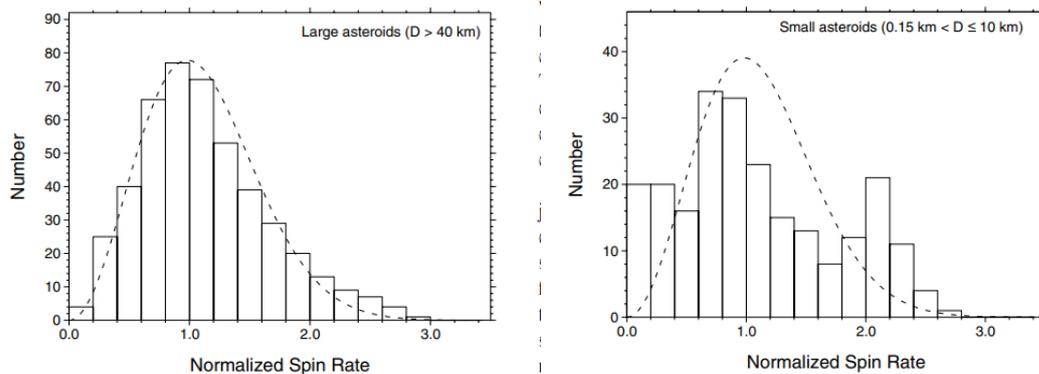


Figura 1.5: *Esquerda: Distribuição para 460 asteroides com  $D > 40$  km onde a curva tracejada representa a distribuição Maxwelliana correspondente. Direita: Distribuição para 231 asteróides com  $0,15 \text{ km} < D \leq 10 \text{ km}$  onde a curva tracejada seria a distribuição Maxwelliana. Destes, 164 são NEOs e cruzadores de Marte enquanto o restante são asteroides do Cinturão Principal Interno. Gráficos obtidos de Pravec et al. (2002).*

Pravec and Harris (2000) identificaram uma ausência de objetos maiores com períodos de rotação menores do que 2,2 horas, como pode ser visto na Figura 1.6. Os autores sugerem que a existência de uma "barreira de rotação" pode ser explicada considerando um modelo com objetos reacumulados ("rubble-pile", em inglês). Esses autores notaram que asteroides com diâmetros maiores do que 200 metros têm tendência a apresentarem período de rotação maior do que 2,2 horas o que poderia ser explicado se esses corpos fossem reacumulados, ou seja, sem resistência a taxas de rotação muito rápidas. Essa barreira de rotação é definida como a "transição" entre objetos reacumulados e monolíticos. Uma análise mais aprofundada da distribuição de taxa de rotação para esses pequenos asteroides (Pravec et al. 2008) indicou que

a distribuição observada parece ser controlada pelo efeito YORP (Rubincam and Bottke 2000), que é devido à reemissão térmica de um corpo em rotação. Também notaram de que existe uma grande concentração de sistemas binários em torno da barreira de rotação, como mostra a Figura 1.7.

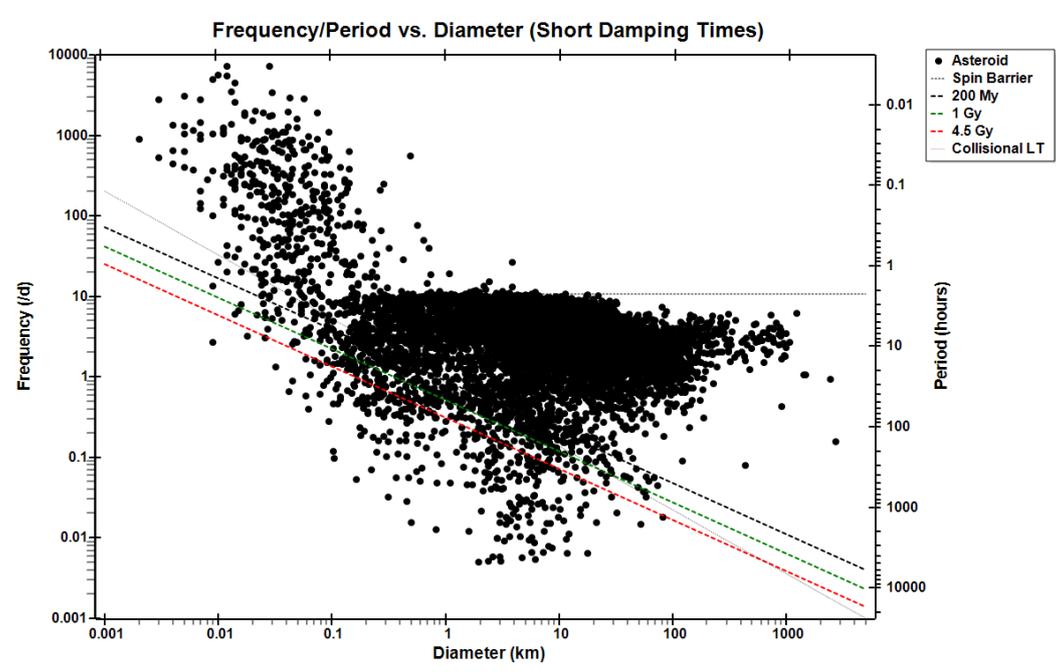


Figura 1.6: Gráfico da frequência de rotação  $\times$  diâmetro (*rotation frequency  $\times$  diameter*). A linha horizontal tracejada é a barreira de rotação. Figura retirada de Warner et al. (2021).

Atualmente existe uma base de dados que reúne informações sobre todos os períodos de rotação determinados até o presente para corpos menores do Sistema Solar (Warner et al. 2009), contendo esta propriedade física para cerca de 33 mil objetos. Obviamente, ainda é uma quantidade pequena ante o número de pequenos corpos conhecido no Sistema Solar, mas mesmo assim é uma ferramenta muito útil para realizar análises estatísticas e visualizar tendências como as que foram discutidas acima. Trabalhos como Holsapple (2014) e Medeiros et al. (2018) utilizam essa base de dados mais recentes para fazerem análises estatísticas cada vez mais robustas. Nesse segundo trabalho, os autores reexaminaram a distribuição da taxa de rotação de asteroides, mostrando que uma Maxwelliana isotrópica e tridimensional não é uma boa representação para distribuição das frequências mesmo para os objetos com diâmetros maiores do que 50 km. Tal resultado mostra que com o aumento da amostra de períodos de rotação é possível ter análises mais realistas e mostrar que mesmo as tendências mais classicamente aceitas podem se revelar erradas.

Dentre os NEOs foram encontrados rotadores extremamente rápidos, como o objeto do subgrupo Apollo 2017 QG18, com período de rotação de 11,87 segundos

e um diâmetro estimado de 11 metros (Thirouin et al. 2018). Na Figura 1.7 podemos observar o gráfico de frequência/período de rotação  $\times$  diâmetro, com os dados retirados de Warner et al. (2021). É possível observar que os NEOs, representados pelos círculos amarelos estão em uma região caracterizada por uma rápida rotação e diâmetros menores, provavelmente sendo fragmentos monolíticos de corpos maiores (Pravec and Harris 2000).

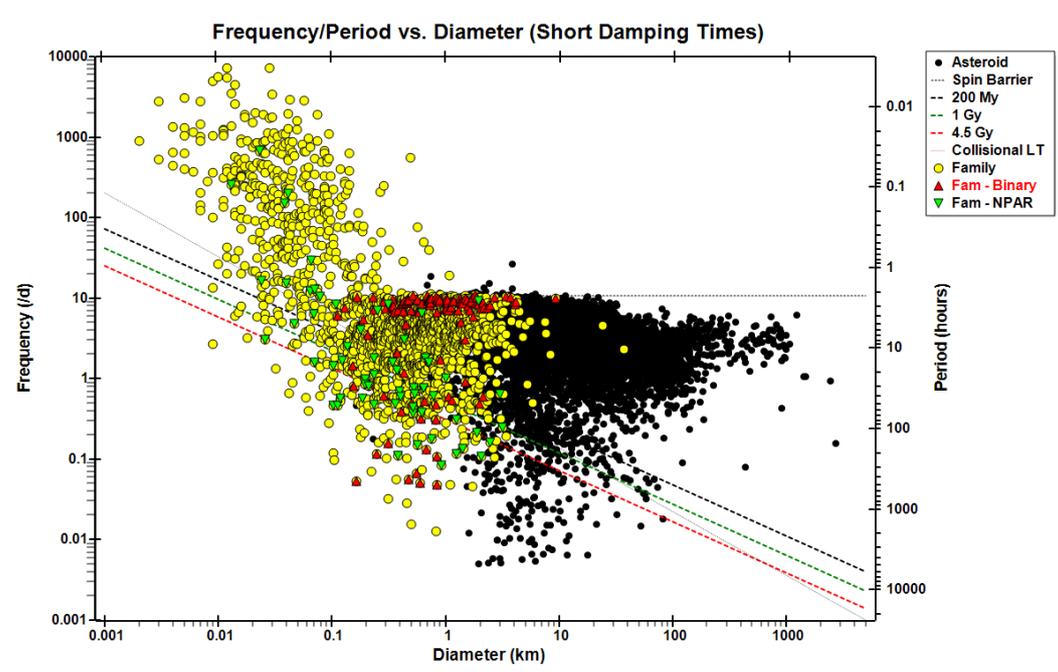


Figura 1.7: Gráfico da frequência de rotação  $\times$  diâmetro (rotation frequency  $\times$  diameter). A linha horizontal tracejada é a barreira de rotação, os círculos em amarelo representam a população de NEAs e os triângulos vermelhos os sistemas binários. Figura retirada de Warner et al. (2021).

Pelo exposto acima, é evidente a necessidade de aumentar o número de asteroides com período de rotação determinado, essenciais para poder modelar melhor a formação e evolução das diversas populações. Nessa perspectiva, o Brasil tem contribuído com este tipo de pesquisa através do grupo de Ciências Planetária do Observatório Nacional, principalmente por meio do projeto IMPACTON.

## 1.3 Projeto IMPACTON

O projeto IMPACTON<sup>2</sup> - Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional, dentro do qual o presente trabalho se insere, tem como o principal objetivo o estudo sistemático de diversas propriedades físicas de pequenos corpos do Sistema Solar, especialmente a população de NEOs. Para tanto, o projeto, iniciado em 2005, visava à instalação e operação de um telescópio dedicado exclusivamente à caracterização física de objetos em órbitas próximas da Terra. Este projeto incluiu a escolha de um local de observação apropriado, a seleção, construção e instalação dos equipamentos de observação, a definição do hardware e software de transmissão de dados e a implementação de um sistema de operação remota (Lazzaro 2010). A infraestrutura instalada, hoje denominada Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) se encontra em operação contínua desde 2011, e conta com um telescópio com espelho principal de 1 metro de diâmetro.

O projeto IMPACTON vem contribuindo com a determinação de diversas propriedades físicas para os pequenos corpos do Sistema Solar, em especial os NEOs. Os estudos de Perna et al. (2017), Monteiro et al. (2017), Monteiro et al. (2018a), Monteiro et al. (2018b) e Monteiro et al. (2020) determinaram as propriedades rotacionais para 132 asteroides, sendo 117 pertencentes a população de NEOs. Lazzaro et al. (2015), Silva and Lazzaro (2015) e Monteiro et al. (2018b) contribuíram com a determinação de polo e forma para 17 pequenos corpos, dentre estes 14 NEOs. Outras propriedades físicas como índices de cor, espectro fotométricos foram determinados para 51 asteroides (Rondón et al. 2019, Martino et al. 2019 e Souza-Feliciano et al. 2020) enquanto para propriedades rotacionais (parâmetro H-G) foram obtidas para 33 NEOs (Ieva et al. 2022).

Dentro dos objetivos do projeto IMPACTON, o presente trabalho apresenta a determinação do período rotacional para um conjunto de NEOs. Vale ressaltar que o principal problema em relação a esta população é que a taxa de descoberta de objetos tem aumentado a cada ano, por outro lado, apenas cerca de 6,5% dos 29440 NEOs conhecidos tem seus períodos de rotação determinados. Neste sentido, por meio do projeto IMPACTON, esta população vem sendo estudada de forma sistemática visando determinar não apenas suas propriedades rotacionais como também outras propriedades físicas de forma geral. O estudo desta população nos permite obter informações sobre os menores corpos do Sistema Solar sem a necessidade do uso de grandes telescópios.

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos, no capítulo 2 são apresentados os métodos de análise de curvas de luz fotométricas para obtenção do período

---

<sup>2</sup>Disponível em <http://impacton.on.br/>

de rotação de NEOs, como se deram as campanhas observacionais e quais técnicas de redução e processamento de dados foram utilizadas. No capítulo 3 são descritos os resultados obtidos a partir de nossas observações enquanto algumas conclusões e perspectivas futuras para nosso trabalho são dadas no capítulo 4.

# Capítulo 2

## Metodologia

O presente trabalho visa a determinação de períodos de rotação para objetos próximos da Terra de forma rápida e eficiente. Para tanto, testamos e utilizamos diversas metodologias para a redução dos dados e a determinação do período de rotação. Neste capítulo, iremos inicialmente abordar alguns conceitos básicos sobre a geometria de observação e rotação de pequenos corpos do Sistema Solar, em seguida iremos abordar como é extraído o período rotacional a partir da análise das curvas de luz por série de Fourier. Por fim, discutiremos como foi feita a escolha dos alvos de nossa amostra e todos os processos de obtenção e redução dos dados, desde as imagens de calibração até as magnitudes que compõem as curvas de luz apresentadas neste trabalho.

### 2.1 Curva de luz e geometria de observação

Uma das formas de determinar o período de rotação de um corpo é medindo a mudança do brilho deste ao longo do tempo, ou seja, observando sua curva de luz. No caso de pequenos corpos do Sistema Solar, em geral objetos de forma irregular, a curva de luz é devida a variações na luz solar refletida pela área iluminada, isto porque as faces de um corpo de forma irregular são diferentes entre si e, portanto, cada face refletirá uma quantidade distinta de luz. Vale aqui lembrar que, os pequenos corpos não têm luz própria como, por exemplo, uma estrela, mas apenas reflete a luz recebida do Sol. Entretanto, a luz refletida, e portanto a curva de luz, não depende apenas da área refletora, mas também da composição superficial, do albedo e das estruturas presentes na superfície do objeto, tais como crateras e montanhas.

Por outro lado, é importante notar que as posições relativas da Terra, do asteroide e do Sol têm influência direta na nossa observação da variação da luz refletida, ou seja, na curva de luz observada. A Figura 2.1 mostra um exemplo de configuração do sistema Sol-Asteróide-Terra favorável à observação do pequeno corpo. A figura mostra também os ângulos de fase solar ( $\alpha$ ), que é o ângulo Terra-Asteróide-Sol e o

ângulo de aspecto ( $\theta$ ) que é o ângulo entre o eixo principal de rotação do asteroide e a linha de visada de um observador na Terra. Para que as modificações periódicas

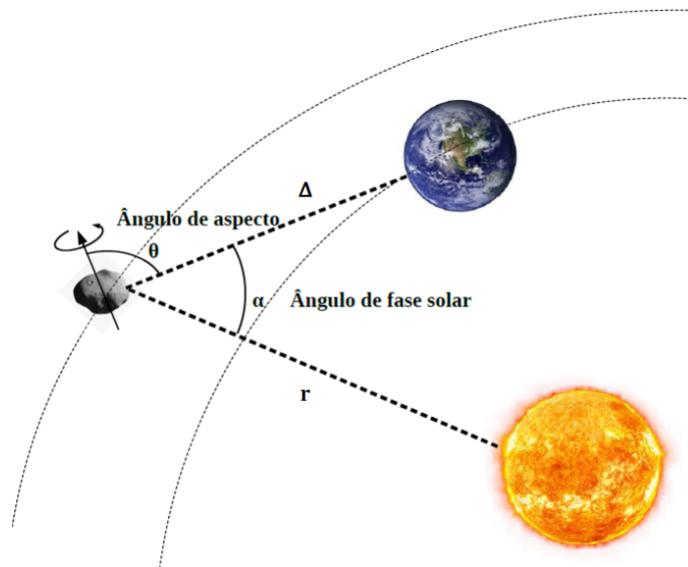


Figura 2.1: *Configuração relativa do sistema Sol-Asteróide-Terra onde podem ser vistos os ângulos de fase ( $\alpha$ ) e de aspecto ( $\theta$ ). Figura adaptada de Silva-Cabrera (2015).*

no brilho sejam observadas da Terra também é necessário que o eixo de rotação do objeto não coincida com a linha de visada do observador. Em outras palavras, o ângulo de aspecto não pode ser igual a zero ou 180, pois neste caso o asteroide nos mostrará sempre a mesma face. Outra possibilidade de não observar variação de brilho é se o objeto tiver uma forma esférica e um albedo constante. Na Figura 2.2 podemos notar, para um mesmo objeto, as diferenças no brilho observado em função de diferentes ângulos de aspecto  $\theta$ . A curva de luz será constante quando o ângulo de aspecto for zero e a amplitude irá aumentar conforme  $\theta$  aumenta, atingindo a máxima amplitude para  $\theta = 90^\circ$ . Desse modo, a amplitude, que é a diferença entre o brilho mínimo e o máximo, é diretamente influenciada pelo ângulo de aspecto, para uma dada forma.

É importante destacar que, durante uma noite de observação ou algumas noites sucessivas, costuma-se considerar os ângulos de aspecto e de fase como constantes. Desse modo, não haverá mudanças significativas na forma da curva de luz. Entretanto, ao longo de um tempo maior, semanas ou meses, dependendo das órbitas e estado rotacional dos objetos, estes ângulos podem mudar de forma significativa que acarretam variações nas formas das curvas de luz. Existem ainda casos especiais, tais como o de um asteroide passando próximo da Terra, em que sua configuração espacial varia em poucos dias. É importante ressaltar que essa variação da curva de luz observada em diferentes configurações nos permite obter também outras propri-

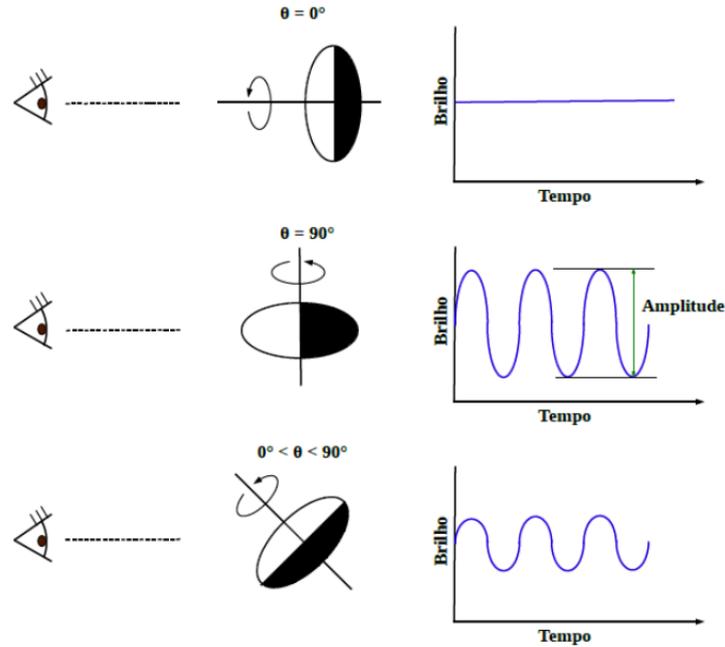


Figura 2.2: *Variação da amplitude da curva de luz de um corpo oblato observado em diferentes ângulos aspecto ( $\theta$ ). Figura retirada de Silva-Cabrera (2015).*

idades, tais como a direção do eixo de rotação e indícios sobre a sua forma (para maiores detalhes ver, por exemplo, Silva-Cabrera, 2015).

A forma de uma curva de luz não é afetada apenas pela configuração geométrica do sistema Sol-Asteróide-Terra, conforme mencionado acima, mas também por algumas características da superfície do corpo. Algumas destas particularidades são mostradas na Figura 2.3. No caso do asteroide não ter composição homogênea, ou apresentar mudanças de composição, ou albedo, então os diferentes materiais irão refletir a luz do Sol de forma distinta ocasionando variações em sua curva de luz. Para curvas de luz regulares e de grandes amplitudes, estas variações são geralmente pequenas e, portanto, podem ser consideradas desprezíveis. Contudo, estas variações podem se tornar importantes no caso de curvas irregulares e/ou com pequena amplitude. Para esse caso, as mudanças no brilho devidas à variação de albedo ou composição podem se confundir com as variações devidas à forma, à configuração espacial e ao espalhamento. O mesmo pode ser dito sobre a presença de crateras e montanhas.

Quando o período de rotação de um objeto é conhecido, podemos representar sua curva de luz em função da fase rotacional (variando de 0 à 1). A Figura 2.4 ilustra o que é observado quando um corpo irregular gira em torno do eixo principal de inércia, ou seja, em rotação pura. Suponha que estamos observando um asteroide de forma irregular e alongada, logo teremos o máximo de luz refletida quando o objeto mostrar sua área maior, na posição 1/4 da figura. A medida que ele rotaciona, a superfície

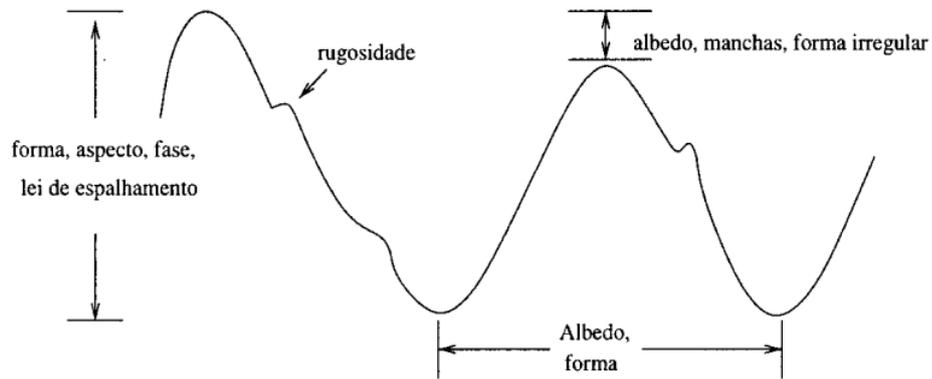


Figura 2.3: Curva de luz de um asteroide de acordo com sua dependência com a forma, geometria da observação, espalhamento da luz pela superfície e irregularidades, e as variações de albedo. Figura retirada de Souza (2002).

refletora vai diminuindo de tamanho. Consequentemente, o brilho vai diminuindo gradualmente até atingir o seu valor mínimo quando o asteroide mostra sua face menor, na posição  $1/2$ . Continuando a girar, volta a mostrar uma área superficial maior, na posição  $3/4$ , e, por fim, novamente a face menor, na posição  $1$ , após uma completa revolução em torno do seu eixo de rotação. Assim, para esse caso, a curva de luz de uma rotação completa teria 2 máximos e 2 mínimos. Para outros casos, como sistemas binários ou múltiplos de asteroides ou para objetos em estado de rotação excitados, a forma da curva de luz pode ser mais complexa (Monteiro et al. 2021 e Warner and Stephens 2022c).

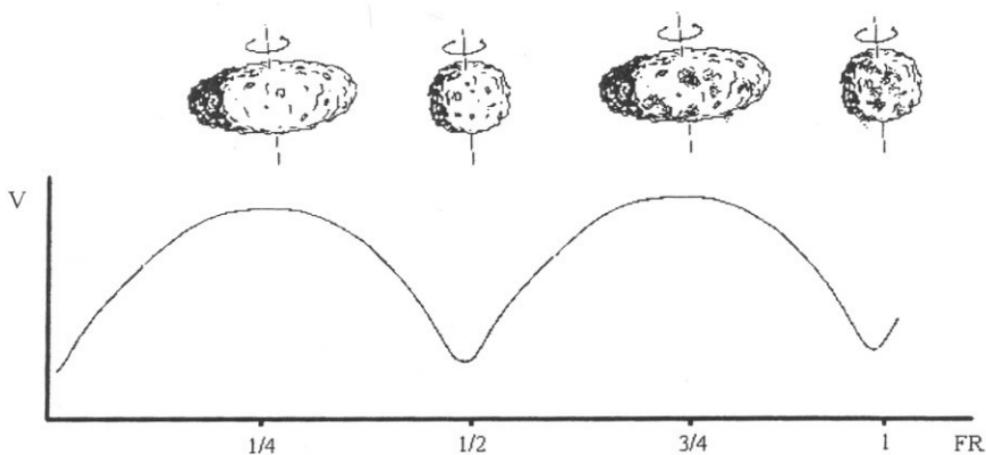


Figura 2.4: Ilustração da curva de luz gerada em função da fase rotacional de um objeto alongado. Figura retirada de Souza (2002).

## 2.2 Determinação do período de rotação

Como foi visto na seção anterior, o período de rotação de um objeto é definido como o intervalo de tempo que este leva para completar uma revolução em torno de seu próprio eixo de rotação. Podemos medir esse intervalo através da observação da variação da área da superfície iluminada, técnica especialmente utilizada no caso de asteroides por, em geral, apresentarem uma forma irregular. Para determinar o período de rotação de um asteroide, geralmente são feitas duas suposições: 1) que a porcentagem de luz refletida é a mesma em toda a superfície do corpo, ou seja, este tem um albedo constante, e 2) que tem uma rotação pura, ou seja, o corpo gira em torno de seu eixo principal de inércia.

Os primeiros a fazerem um levantamento sistemático de curvas de luz para pequenos corpos do Sistema Solar foram Bailey and Pickering (1913). Utilizando fotometria visual, esses autores determinaram o primeiro período de rotação para um asteroide (433 Eros). Essa determinação foi baseada no cálculo do tempo transcorrido entre algumas características da curva de luz, chegando a um período de 0,25 dias, ou seja 6 horas. Atualmente o período de rotação determinado para o 433 Eros é de 5,27 h (Warner and Stephens 2019). Depois, com o advento da fotometria fotoelétrica foi possível obter curvas de luz e períodos de rotação com maior precisão para outros asteroides (Groeneveld and Kuiper 1954b). A partir daí começou a era moderna de observações de pequenos corpos e, conseqüentemente, o aumento de número de curvas de luz para estes objetos. Logo, o problema de identificação do período de rotação passou a ser tratado como um problema de séries temporais, sendo este um problema matemático o qual pode ser resolvido utilizando diversas técnicas. No caso de asteroides o método mais utilizado atualmente é um ajuste por série de Fourier, como proposto por Harris and Young (1983).

Assim, o período de rotação de um asteroide é obtido pelo ajuste de uma série de Fourier à curva de luz observada. Geralmente não é possível cobrir um período completo em uma só noite de observação e o ajuste é feito sobre uma composição de curvas de luz obtidas em noites consecutivas. É importante lembrar que, como foi dito acima, apenas podem ser usadas curvas de luz de noites próximas a fim de garantirmos que os ângulos de fase e de aspecto permanecem constantes, ou com variações insignificantes. A curva de luz composta pode ser então representada pela seguinte série de Fourier:

$$H(\alpha, t) = \bar{H}(\alpha) + \sum_{l=1}^m \left[ A_l \sin \frac{2\pi l}{P}(t - t_0) + B_l \cos \frac{2\pi l}{P}(t - t_0) \right] \quad (2.1)$$

onde  $H(\alpha, t)$  é a magnitude reduzida para um ângulo de fase solar  $\alpha$  e um tempo  $t$ ,  $\bar{H}(\alpha)$  é a magnitude absoluta média para um ângulo de fase  $\alpha$ ,  $A_l$  e  $B_l$  são os

coeficientes de Fourier,  $P$  é o período de rotação,  $t_0$  é o instante no meio do intervalo de observação e  $m$  é o grau do polinômio.

Para obter o período que é melhor representado pela curva de luz composta, a equação 2.1 é ajustada pelo método dos mínimos quadrados. Para determinado grau  $m$ , calcula-se o período  $P$  para o qual o valor da variância seja mínimo. No caso de termos um conjunto muito limitado de dados podemos encontrar mais de um valor aceitável para o período mas, em geral, apenas um período ajusta a curva de luz composta. Se tivermos uma curva de luz bem representada, com uma boa cobertura temporal ao longo de um tempo compatível com o período do objeto, aumentando o grau do polinômio chegaremos mais próximos de uma representação realista das propriedades rotacionais do pequeno corpo.

## 2.3 Observações astronômicas e coleta de dados

### 2.3.1 Obtenção dos dados

A coleta de dados foi realizada pelo grupo de observadores do projeto IMPACTON em missões observacionais que ocorrem mensalmente durante 15 noites, sempre em torno da Lua nova. Essas observações foram feitas utilizando a infraestrutura do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) ao longo de 17 missões observacionais entre dezembro de 2020 e abril de 2022, totalizando 58 noites de observação. As imagens foram obtidas com a câmera CCD  $2048 \times 2048$  PL4240 com resfriamento termoeletrônico. O filtro utilizado para as observações foi o R sistema Johnson-Cousins. Uma descrição mais detalhada do OASI e seus instrumentos estão especificadas em Rondón et al. (2020).

Para obter uma determinação de período de rotação para um NEO com maior acurácia é necessário ter uma curva de luz com uma boa cobertura. Seguindo essa premissa, procuramos observar os NEOs ao longo de duas à quatro noites por missão, escolhendo, em média, um alvo por missão observacional. O tempo de observação de cada noite destinada ao objeto escolhido variou de 0,5 à 5 horas, dependendo das condições meteorológicas e do número de objetos que podem ser observados ao longo da noite.

O tempo de integração para as imagens de ciência é determinado levando em consideração a magnitude visual e o movimento do objeto durante a noite. Para os nossos objetos foram usados tempos de 10 a 180 segundos, levando em consideração a relação entre tempo de exposição e movimento diferencial do alvo. Pois, para tempos de integração muito longos a imagem resultante do asteroide será muito alongada, isso pode prejudicar a determinação das magnitudes instrumentais e, consequentemente, afetar a qualidade da curva de luz obtida.

### 2.3.2 A amostra

Para a seleção dos objetos observados levamos em consideração as seguintes condições:

1. Ser observável do OASI ao menos durante uma missão observacional.
2. Não ter período de rotação publicado até o momento da observação.
3. Ter magnitude visual menor ou igual à 18, para que os dados coletados tenham uma boa qualidade fotométrica.
4. Ter latitude galáctica acima de  $20^\circ$ , para que no momento da observação o objeto não esteja em um campo com muitas estrelas.
5. Não ter movimento diferencial muito grande, principalmente para objetos com magnitude visual acima de 17.

Com base nos critérios listados acima, foram selecionados 23 NEOs. Porém, devido à problemas técnicos e condições meteorológicas adversas, apenas 14 tiveram alguma observação realizada que possibilitou a análise dos dados. Entre esses objetos observados, 8 pertencem ao subgrupo Amor, 5 ao subgrupo Apollo e 1 ao subgrupo Aten. Todos os objetos do subgrupo Apollo são também classificados como PHAs. É importante destacar que ao longo do desenvolvimento desta dissertação a maioria dos asteroides passaram a ter período de rotação publicados, os quais serão devidamente discutidos e comparados com os dados que foram obtidos neste trabalho.

Na tabela 2.1 são listados os NEOs estudados, o subgrupo ao qual pertencem, seus parâmetros orbitais ( $a$ ; semieixo maior,  $e$ ; excentricidade,  $i$ ; inclinação,  $q$ ; distância periélica e  $Q$ ; distância afélica), a magnitude absoluta ( $H$ ) e o diâmetro ( $D$ ). Este último foi calculado a partir de sua magnitude absoluta e o albedo ( $p_v$ ) através da equação 1.1 dada no capítulo 1. Para objetos que não têm albedo conhecido foi considerado um albedo de 0,14 (Pravec et al. 2012). Os asteroides com diâmetros calculados a partir de seu albedo estão indicados na tabela com as devidas referências.

Tabela 2.1: Propriedades físico-dinâmicas dos NEOs observados. Os elementos orbitais foram obtidos do *JPL Horizons* em 22-07-2022 enquanto o diâmetro de diversas fontes, conforme indicado.

Asteroide	Subgrupo	a (UA)	e	i	q (UA)	Q (UA)	H	D (km)
7753 (1988 XB)	Apollo(PHA)	1,47	0,48	3,12	0,762	2,172	18,02	1,00 <sup>1</sup>
141484 (2002 DB4)	Aten	0,86	0,37	16,60	0,541	1,175	16,37	1,03 <sup>2</sup>
162186 (1999 OP3)	Amor	2,71	0,61	27,54	1,057	4,369	15,05	3,80 <sup>4</sup>
174050 (2002 CC19)	Amor	1,28	0,11	50,06	1,139	1,431	17,63	1,16 <sup>4</sup>
318160 (2004 QZ2)	Amor	2,26	0,49	0,97	1,146	3,376	18,13	0,40 <sup>3</sup>
332446 (2008AF4)	Apollo (PHA)	1,38	0,41	8,93	0,814	1,946	19,70	0,45 <sup>4</sup>
450263 (2003 WD158)	Apollo (PHA)	1,43	0,40	16,72	0,842	2,010	18,89	0,41 <sup>3</sup>
453707 (2010 XY72)	Apollo (PHA)	1,13	0,23	31,48	0,874	1,392	18,79	0,49 <sup>2</sup>
2001 EC	Apollo (PHA)	2,60	0,76	0,60	0,610	4,588	18,85	0,66 <sup>4</sup>
2011 YQ10	Amor	2,24	0,52	2,39	1,073	3,412	19,17	0,57 <sup>4</sup>
2017 UW42	Amor	2,45	0,48	6,67	1,267	3,645	17,93	1,00 <sup>4</sup>
2021 JQ24	Amor	3,23	0,67	5,99	1,066	5,387	17,79	1,08 <sup>4</sup>
2021 JT5	Amor	2,64	0,60	14,43	1,044	4,231	20,80	0,27 <sup>4</sup>
2021 MO1	Amor	2,81	0,56	14,47	1,238	4,386	18,57	0,75 <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bus and Binzel (2002), <sup>2</sup>Nugent et al. (2016) , <sup>3</sup>(Trilling et al., 2016, 2010),

<sup>4</sup>Diâmetros estimados utilizando um albedo de 0,14.

## 2.4 Processamento de dados

Nessa seção vamos descrever os procedimentos seguidos desde a coleta das imagens de ciências até a realização da fotometria. Primeiramente, todas as imagens obtidas estão sujeitas a efeitos do instrumento, os quais devem ser removidos. Logo após esse processo de calibração é realizada a fotometria, assim obtendo a variação das magnitudes (calibradas ou relativas) em relação ao tempo, ou seja, a curva de luz. Por fim, aplicando os métodos discutidos na seção 2.2, é feita a determinação do período rotacional.

### 2.4.1 Tratamento das imagens

Para correção das imagens de ciência, obtivemos a cada noite, imagens de calibração *darks* e *flats*. Em geral, quinze imagens de *dark* foram obtidas ao fim de cada noite. As imagens de *flat* foram obtidas no começo da noite, expondo o CCD a uma tela uniformemente iluminada por uma lâmpada branca dentro da cúpula, utilizando tempos de exposição de, em média, 1,8 segundos. Dessa forma, visando obter um número de fótons entre 30% e 50% do nível de saturação do CCD. Sempre foram obtidas 11 imagens de *flat* no filtro R para cada noite.

Todas as imagens de ciência e calibração foram feitas utilizando o CCD com binning 2x2, para aumentar a relação sinal-ruído dos objetos. Uma breve descrição sobre as imagens de calibração é apresentada a seguir:

- *Darks* - Um *dark-frame* é uma imagem de calibração obtida com o obturador fechado por um tempo de exposição igual ao da imagem que se deseja corrigir. Deve ser obtida com a mesma temperatura de funcionamento do CCD, sendo que no nosso caso essa temperatura é de  $-30^{\circ}\text{C}$ . Essa imagem visa corrigir os efeitos de corrente térmica intrínseca no CCD adicionada ao sinal durante a exposição, gerada pela corrente usada para prender os elétrons no seu poço de potencial (corrente de *offset*), como também corrigir efeitos de corrente escura. Esta última é um ruído térmico causado por uma carga elétrica adicional gerada devido à interferência térmica, que se acumula nos pixels do CCD durante o tempo de integração. Para minimizar os ruídos é recomendado obter várias exposições de *darks* e combiná-los em uma única imagem mediana, chamada de *master dark*, para que esta imagem venha a adicionar apenas uma quantidade pequena de ruído às nossas exposições de ciência. O *master dark* deve ser subtraído de todas as imagens de ciência e dos *flats*.
- *Flats* - São imagens que permitem corrigir as diferenças de sensibilidade e incidência de luz que existem nas diversas regiões do CCD. Isto pode ser visto quando o CCD é iluminado uniformemente e os pixels respondem de forma diferente ao estímulo luminoso. Além disso, as imagens de *flats* permitem anular algumas imperfeições do equipamento utilizado, como bordas mais escuras nas imagens e pequenos nódulos escuros originados por grãos de poeira depositados no espelho, redutor focal, filtros e no próprio CCD. As imagens de *flats* podem ser tomadas com o telescópio apontado para o céu (*sky flat*), logo após o ocaso do Sol ou antes do amanhecer, ou para uma superfície plana iluminada por uma luz difusa uniforme (*dome flat*). O tempo de exposição depende da sensibilidade e a contagem obtida deve ser dentro da região de linearidade do CCD, em geral de 30-50%.

Para este trabalho, imagens de ciência e de calibração foram corrigidas usando um *script* em *Python* com as tarefas *IMCOMBINE* e *IMARITH* do *IRAF*<sup>1</sup>, considerando uma imagem como uma matriz de números, cada número representa o brilho de cada pixel. Vamos supor que as imagens de ciência foram obtidas com um tempo de integração de  $\delta$  segundos e as imagens de calibração *flats* têm um tempo de exposição de  $\gamma$  segundos, esta calibração segue o seguinte procedimento:

1. As imagens de *dark*, para cada tempo de integração são combinadas em uma imagem mediana. Assim, teremos o *master dark*  $\delta$  e o *master dark*  $\gamma$ .
2. Subtraindo das imagens de ciência a imagem *master dark*  $\delta$  o resultado será imagens de ciência corrigidas por *darks*.
3. As imagens *flats* são combinadas em uma única imagem mediana que chamaremos de *master flat*.
4. Subtraindo da imagem *master flat* a imagem *master dark*  $\gamma$ , obtemos a imagem *master flat* corrigida.
5. Obtemos a imagem *master flat* normalizada, dividindo pela média das contagens da imagem *master flat* corrigida.
6. Dividimos as imagens de ciência corrigidas por *dark* pela imagem *master flat* normalizada.

Assim, conseguimos obter as imagens de ciência calibradas. A equação 2.2 resume o procedimento de calibração dessas imagens.

$$\text{im. calibradas} = \frac{\text{im. de ciência} - \text{master dark } \delta}{(\text{master flat} - \text{master dark } \gamma) / \langle \text{master flat} - \text{master dark } \gamma \rangle} \quad (2.2)$$

## 2.4.2 Análise fotométrica e obtenção do período de rotação

No que segue, discutiremos os dois tipos de técnicas fotométricas usadas para obter nossos resultados e o motivo da escolha da fotometria diferencial para obter os períodos de rotação dos nossos objetos.

### 2.4.2.1 Fotometria de Abertura

A fotometria, ou medição do fluxo de uma fonte astronômica, é uma das técnicas mais antigas e eficientes para a investigação de pequenos corpos do Sistema Solar. Esta foi a única técnica para investigar a forma e a rotação dos asteroides por muito

---

<sup>1</sup>O *IRAF*, do inglês *Image Reduction and Analysis Facility*, é um sistema de software de propósito geral para a redução e análise de dados astronômicos (Tody 1986 e Tody 1986).

tempo antes do início das observações de radar e imagens diretas. (Lupishko et al. 2007).

Cada tipo específico de fotometria depende da técnica de observação, por exemplo: medida do brilho de um objeto utilizando o olho é denominada de fotometria visual, enquanto chama-se de fotometria fotográfica quando se faz uso de uma câmera fotográfica. Mais recentemente tem se utilizado câmaras CCD, donde o nome de fotometria CCD. Todas essas diversas fotometrias operam em distintas bandas e filtros segundo as necessidades dos objetivos científicos.

A técnica que utilizamos nesse trabalho é a fotometria CCD por abertura, que consiste em somar a contagens nos pixels dentro de uma abertura centrada no objeto estudado e subtrair a contribuição do fundo do céu estimada a partir de uma região próxima da imagem que exclui a fonte (Howell 1992). Convencionalmente, a abertura é centralizada no objeto, embora o cálculo geralmente seja insensível ao posicionamento exato da abertura e, em alguns casos, é desejável deslocar a abertura ligeiramente do centro da fonte para possivelmente omitir o efeito de uma fonte vizinha. A forma da abertura é circular em sua forma mais simples. Inicialmente realizamos a fotometria utilizando a tarefa PHOT do *software IRAF*, que procede da seguinte maneira:

1. são definidos três raios a partir do centro do objeto: o primeiro identificando a região ocupada pelo objeto, e os demais demarcando um anel de céu próximo do objeto (ver Figura 2.5)
2. este anel é usado para se determinar a luminosidade do fundo do céu;
3. mede-se, então, o total de contagens dentro da abertura do objeto, subtrai-se o valor do fundo do céu e, calcula-se assim, uma magnitude instrumental para esse objeto.

A fotometria por abertura pode ser usada com segurança desde que a abertura escolhida contenha apenas a luz emitida ou refletida pela fonte estudada, ou seja, não pode conter luz proveniente de outras fontes.

Esse procedimento é realizado para cada imagem, tanto para o asteroide quanto para as estrelas de comparação e estrela padrão, obtendo assim suas magnitudes instrumentais. É importante destacar que a precisão será melhor quanto mais estáveis forem as condições atmosféricas. A estabilidade atmosférica, no caso de observações aqui na Terra, é importante pois o sinal obtido pelo sistema composto pelo telescópio e detector vai depender da transparência da atmosfera e do tamanho da coluna de ar atravessada pela luz da fonte. Se houver variação na transparência de um instante para outro, como no caso de passagem de nuvens durante uma observação ótica, por exemplo, o sinal também irá mudar.

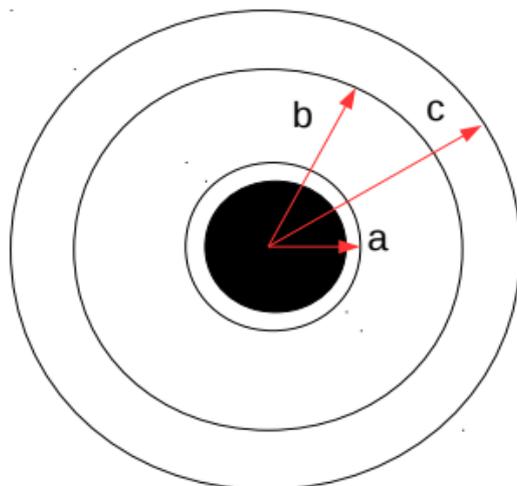


Figura 2.5: Representação da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide, anel de raio  $a$ , e ao céu, anel de raio  $(b - c)$ . Figura retirada de Monteiro (2016a).

Existem dois métodos gerais para fotometria de asteroides. Eles não dependem da maneira como a medição das imagens é feita, mas da forma utilizada para obter e reduzir os dados. Abaixo, descrevemos brevemente esses dois métodos.

### **Fotometria absoluta**

Por meio da fotometria absoluta é possível determinar a magnitude calibrada dos objetos observados. Para obter um bom resultado com menores incertezas, as observações devem ser feitas apenas em noites com pequena extinção e condições atmosféricas estáveis. Para aplicação desse método é necessário inicialmente realizar a correção da extinção atmosférica e, posteriormente, a redução ao sistema padrão de magnitudes de asteroides. Essa metodologia está melhor descrita em Harris and Lupishko (1989), Souza (2002) e Arcoverde (2018). A metodologia adotada para a elaboração de uma curva de luz de um asteroide, mediante o método da fotometria absoluta, está descrito resumidamente nos passos mostrados a seguir:

1. Obter uma sequência de imagens com o asteroide e a estrela padrão.
2. Identificar o asteroide e a estrela padrão.
3. Ajustar a abertura para medição das magnitudes instrumentais.
4. Determinar o coeficiente de extinção atmosférica e encontrar os valores das magnitudes dos alvos corrigidos por efeitos atmosféricos.
5. Encontrar o ponto zero da noite comparando a magnitude corrigida da estrela padrão com sua magnitude catalogada.

6. Subtrair a magnitude corrigida do asteroide pelo ponto zero e encontrar a magnitude reduzida, definida como a magnitude que seria observada se o asteroide estivesse a uma distância padrão de 1 UA tanto do Sol quanto da Terra (ver Figura 2.1).

Dessa forma, a curva de luz é construída como a variação da magnitude reduzida do asteroide com o tempo.

### **Fotometria diferencial**

A fotometria diferencial é um método que permite encontrar a diferença entre a magnitude instrumental de um alvo (asteroide) e à de uma estrela de comparação, ou à média de várias estrelas de comparação. A fotometria diferencial é mais fácil do que a fotometria absoluta, pois fornece uma maior precisão ao medir pequenas variações. Isso é particularmente importante pois a amplitude da curva de luz de alguns asteroides é da ordem de 0,1 magnitudes. Também permite trabalhar em condições fotométricas não tão favoráveis como as necessárias para a fotometria absoluta (Warner 2006) já que as variações atmosféricas que afetam o asteroide afetam de forma similar as estrelas do campo, ou de comparação.

A metodologia adotada para a elaboração de uma curva de luz de um asteroide, mediante o método da fotometria diferencial, está descrito nos passos mostrados a seguir:

1. Obter uma sequência de imagens com o asteroide e as estrelas do campo.
2. Identificar o asteroide e as estrelas que serão utilizadas para comparação.
3. Ajustar a abertura para medição das magnitudes instrumentais.
4. Medir as magnitudes instrumentais tanto do asteroide quanto das estrelas e calcular a magnitude diferencial.

Assim, a curva de luz por esse método seria a variação temporal da magnitude relativa obtida para o asteroide. É importante ressaltar que deve-se utilizar mais de uma estrela de comparação para eliminar problemas com a estrela e também problemas de extinção, como uma variabilidade, por exemplo. Considerando então o brilho das estrelas constante, subtraindo a magnitude instrumental do asteroide da média das magnitudes instrumentais das estrelas de comparação, o que resta será apenas a variação de brilho do pequeno corpo. O processo mais detalhado de obtenção de curvas de luz para asteroides através do método de magnitude diferencial pode ser visto em Monteiro (2016a).

#### 2.4.2.2 *Softwares* utilizados para redução fotométrica e obtenção do período

Com o objetivo de realizar uma redução de dados de forma eficiente, e assim obter o período rotacional dos objetos de nossa amostra, optamos por reduzir os dados utilizando *softwares* que minimizam o tempo de redução.

Classicamente, a obtenção de parâmetros como as magnitudes instrumentais dos alvos de interesse é realizada utilizando o *IRAF* através da tarefa *DIGIPHOT* com o pacote *APPHOT*. Para tanto, é necessário um longo processo de identificação do asteroide no campo, assim como a coleta das coordenadas desses objetos na imagem. Essa identificação pode ser feita obtendo duas ou mais imagens seguidas do campo com as coordenadas do asteroide. Através da comparação das imagens é fácil identificar o alvo, já que este será o objeto que se moveu em relação aos demais. Devido ao movimento do asteroide em relação ao movimento sideral, essa coleta de coordenadas deve ser feita para cada imagem.

Para nosso trabalho, esse processo de identificação do campo e coleta de coordenadas de asteroide + estrelas de comparação se torna bastante ineficiente pois demanda muito tempo. Como mencionado anteriormente, para se ter uma boa cobertura da curva de luz precisamos observar o asteroide por algumas horas, o que leva à coleta de uma grande quantidade de imagens. Obter as coordenadas dos objetos para cada imagem e fazer a redução fotométrica desta forma inviabiliza uma determinação rápida do período de rotação.

Por essas razões, iniciamos alguns testes com o *pipeline* de redução do projeto IMPACTON que está em fase de implementação e testes. O *pipeline* IMPACTON é um programa de redução de dados obtidos no OASI desenvolvido pelo Dr. Jorge M. Carvano. A seguir, vamos apresentar brevemente como é feita a redução fotométrica e a obtenção do período de rotação com este programa.

As imagens obtidas no OASI são armazenadas numa servidora específica, na rede interna do Observatório Nacional, e com isso conseguimos acessar e trabalhar com essas imagens a partir do *pipeline*. As calibrações das imagens de ciência são realizadas com o próprio *pipeline*, seguindo passos semelhantes aos descritos na subseção 2.4.1. Após esse processo, é realizada a detecção automática de fontes nas imagens usando o *SExtractor*<sup>2</sup>, depois é feita a identificação das fontes detectadas por meio do catálogo *Gaia*<sup>3</sup>.

O *pipeline* realiza a busca de pequenos corpos do Sistema Solar que estejam presentes nas imagens e realiza fotometria para obter as magnitudes instrumentais automaticamente. Por fim, o *pipeline* fornece uma tabela SQL como arquivo de saída com os dados da redução. Essa tabela contém os dados sobre a fotometria e

---

<sup>2</sup>Bertin and Arnouts (1996)

<sup>3</sup>Carrasco et al. (2016) e Arenou et al. (2018)

astrometria realizadas no processo, como também as magnitudes calibradas das estrelas do catálogo *Gaia* e as efemérides dos asteroides detectados. O processamento desses dados é feito com um *script* em *Python 2*, que ao fim fornece informações tais como a magnitude calibrada dos alvos e suas configurações observacionais.

A obtenção das magnitudes é semelhante à descrita na subseção 2.4.2.1 em Fotometria absoluta. A diferença na metodologia é que o cálculo do ponto zero é feito para cada imagem com as estrelas identificadas no campo do asteroide. O ponto zero é obtido medindo a diferença entre as magnitudes instrumentais das estrelas do catálogo *Gaia* e suas magnitudes tabeladas no filtro G. Então, obtemos as magnitudes calibradas para o asteroide. Assim, podemos exportar a redução, que é disponibilizada em uma tabela em formato TXT com as seguintes informações: Data Juliana, magnitude calibrada, erro da magnitude, massa de ar, tempo de exposição da imagem, ângulo de fase, distância geocêntrica e heliocêntrica do alvo e suas efemérides. Depois obtemos a magnitude reduzida através da equação,

$$M_{red} = M_{cal} - 5 \log(r\Delta) \quad (2.3)$$

onde  $M_{red}$ ,  $M_{cal}$  são as magnitudes reduzida e calibrada, respectivamente,  $r$  é a distância heliocêntrica do asteroide e  $\Delta$  sua distância geocêntrica.

Por fim, construímos uma tabela com os dados contendo a Data Juliana, as magnitudes reduzidas e os respectivos erros. Esse arquivo é processado em um *script* em *Fortran* que faz a busca do melhor período de rotação, esse programa é baseado no método desenvolvido pelo Harris and Young (1983), descrito na seção 2.2. Com isso, determinamos o período de rotação sendo aquele que apresenta a menor dispersão.

Como o processo de identificação e obtenção das magnitudes instrumentais dos alvos é realizado de forma automática proporcionando uma redução que leva em média 1 hora e 20 minutos por pasta de dados, o *Pipeline IMPACTON* é uma boa alternativa para fazer reduções fotométricas e processamentos rápidos. Porém ainda esta em fase de ajustes e testes. Algumas curvas de luz obtidas por meio dessa redução serão apresentadas no capítulo 3.

Por esse motivo, optamos por fazer a redução usando a última versão do *software* de fotometria *MPO Canopus*, desenvolvido por Warner (2018). A redução é realizada da seguinte forma:

1. As imagens de entrada precisam ser calibradas antes, essa calibração é descrita na subseção 2.4.1.
2. É realizada a astrometria de forma automática, identificando as estrelas no campo através de catálogos e, conseqüentemente, o asteroide a ser estudado.

3. São escolhidas as aberturas para análise e o tipo de fotometria desejada, no nosso caso, a fotometria diferencial.
4. É feita a escolha de três até cinco estrelas de comparação e são obtidas magnitudes instrumentais do asteroide e das estrelas de forma automática.
5. Utilizando a tarefa *lightcurve analysis* encontramos o período de rotação para nosso alvo.

Levando-se em consideração esses aspectos, por proporcionar uma obtenção de período rotacional de forma rápida e fácil, escolhemos usar o *MPO Canopus* como a ferramenta de análise dos nossos dados.

# Capítulo 3

## Resultados

A seguir apresentamos a análise e os resultados das curvas de luz obtidas para os NEOs de nossa amostra, assim como sua comparação com os períodos determinados na literatura. É importante ressaltar que para alguns objetos não foi possível determinarmos seu período de rotação porque as noites de observação foram insuficientes ou desfavoráveis à fotometria, de forma a se obter poucas imagens e uma curva de luz com poucos pontos e com muita dispersão. Desta forma, dividimos os asteroides estudados em dois grupos: aqueles com período determinado e os que apresentam grande dispersão ou curvas de luz incompletas.

### 3.1 Curvas de Luz

Todas as curvas de luz obtidas com o *MPO Canopus* foram construídas utilizando a diferença entre a magnitude instrumental do asteroide e a magnitude instrumental de uma ou mais estrelas do campo. As curvas de luz reduzidas com o *Pipeline IMPACTON* foram feitas utilizando magnitude reduzida, ou seja, a magnitude observada do NEO caso estivesse a uma distância de 1 UA tanto do Sol quanto da Terra. A determinação do período de rotação dos alvos estudados foi feita utilizando o método da análise de séries de Fourier conforme descrito na seção 2.2. Os gráficos das curvas individuais para cada asteroide são apresentados utilizando a mesma escala de magnitude relativa para melhor visualizar a variação da amplitude.

A análise das curvas de luz apresentadas descreve basicamente três fatores importantes:

1. O número de noites usadas na determinação do período. Às vezes nem todas as noites em que um asteroide foi observado foram utilizadas, já que aquelas com pouca cobertura só dificultam a obtenção de um período.
2. O grau do ajuste da série de Fourier.

### 3. O período determinado.

Na descrição dos nossos resultados, atribuímos para cada período determinado um código de confiabilidade (U), assumindo valores de 1 à 3, conforme proposto por Warner et al. (2009). O código U1 indica um período de rotação estimado a partir de uma cobertura fragmentada ou com baixa amplitude, nesse caso o valor do período pode estar completamente errado. O fator U2 indica que a curva de luz contém ao menos um máximo e um mínimo, apresentando uma cobertura inferior à total, de modo que o período pode estar errado em 30%, correspondendo a um resultado razoavelmente seguro. Esse código também pode apresentar resultados onde existe uma ambiguidade quanto ao número de extremos por período ou o número de ciclos decorridos entre as curvas de luz. Por fim, a escala U3 indica uma curva de luz detalhada o suficiente para a determinação de um período de rotação correto e sem ambiguidades.

Para cada NEO é apresentada uma tabela com os dados observacionais sempre na seguinte ordem: data, ascensão reta (AR) e declinação (DEC) no referencial J2000<sup>1</sup>, tempo de observação transcorrido entre a primeira e última imagem em cada noite, distância à Terra ( $\Delta$ ), distância ao Sol ( $r$ ), ângulo de fase ( $\alpha$ ) e magnitude visual (V).

#### 3.1.1 Objetos com períodos determinados

##### 174050 (2002 CC19)

O asteroide 174050 (2002 CC19) pertencente ao subgrupo Amor e tem um diâmetro estimado de 1,16 km. Este NEO foi observado ao longo de 8,36 horas durante três noites na missão observacional de fevereiro de 2021. As circunstâncias observacionais estão descritas na Tabela 3.1 e na Figura 3.1 são apresentadas as curvas de luz por magnitude relativa para cada noite de observação.

Tabela 3.1: Dados observacionais do objeto 174050 (2002 CC19).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	$r$ (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
05/02/2021	08 53 41,1	+27 09 45	0,69	0,162	1,145	11,0	14,7
07/02/2021	08 48 33,2	+32 32 23	2,70	0,166	1,144	16,1	14,9
08/02/2021	08 43 55,4	+36 56 29	5,47	0,170	1,144	20,4	15,1

Para esse objeto realizamos a análise com dois métodos de redução, além da redução feita pelo *MPO Canopus* foi feita a análise a partir dos dados reduzidos pelo

<sup>1</sup>Obtidos pelo *Minor Planet Center*, disponível em: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>

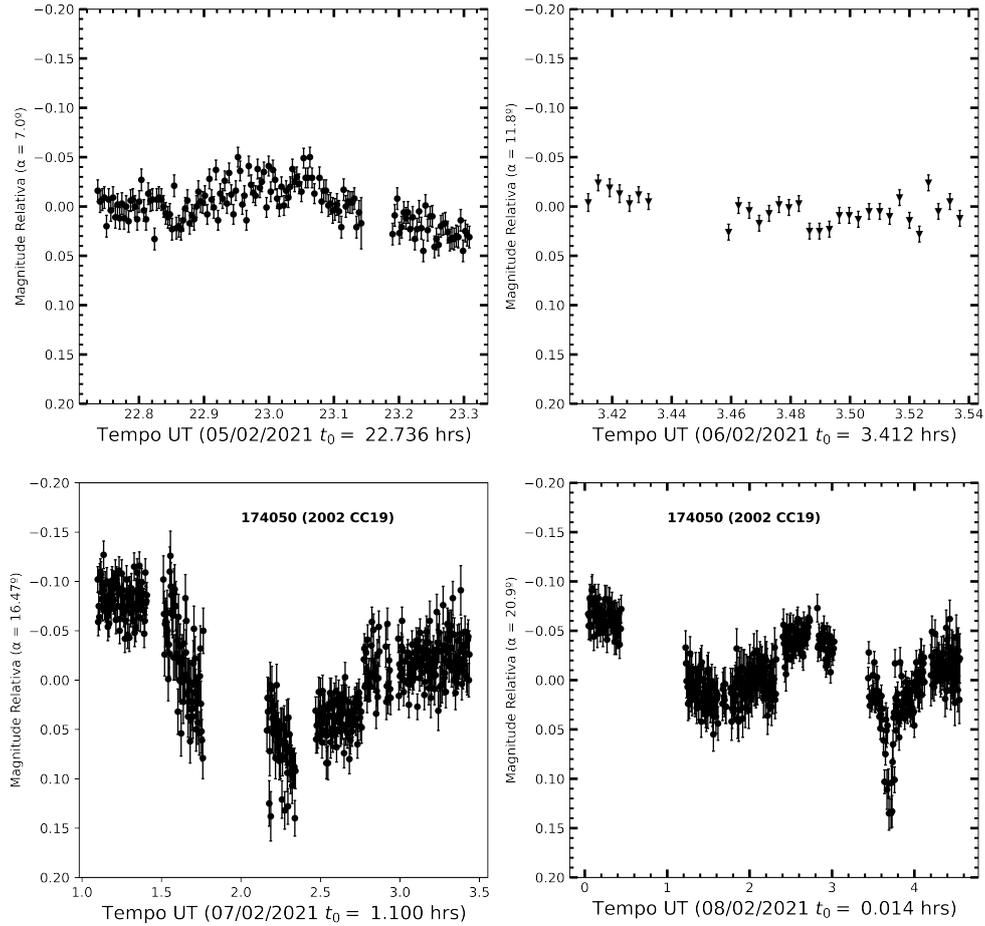


Figura 3.1: *Curvas de luz do NEO 174050 (2002 CC19) de fevereiro de 2021.*

*Pipeline* IMPACTON. Na Figura 3.2 é mostrada a curva composta com magnitude relativa obtida pelo *MPO Canopus*, sendo que o período rotacional que forneceu o melhor ajuste para as três noites, utilizando um polinômio de Fourier de ordem 4, foi de  $4,274 \pm 0,021$  horas com uma amplitude de 0,21 mag. Atribuímos o código de confiabilidade U3 devido à curva de luz detalhada e com boa cobertura.

Realizamos também a redução com o *Pipeline* IMPACTON, de acordo com a metodologia de processamento descrita no capítulo 2. Encontramos um período de  $4,22 \pm 0,01$  horas que corresponde ao melhor ajuste para um polinômio de Fourier de grau 4. As noites utilizadas para obtenção dos dados foram apenas as do dia 07 e 08 de fevereiro, os poucos pontos referentes a noite do dia 05 não foram incluídos na análise por dificultar a obtenção de uma curva de luz razoável. A amplitude da curva de luz composta pelo método de magnitude absoluta foi de 0,093 mag, como pode ser visto na Figura 3.3. Atribuímos também índice de confiança U3 por apresentar uma boa cobertura do período. Esse resultado foi submetido para publicação no artigo de Arcoverde et al. (2022). Obtemos uma curva de luz com uma baixa amplitude e com erros consideráveis nas magnitudes. O tamanho das barras de erro está relacionado ao método de obtenção das magnitudes já que pelo *pipeline* são usadas

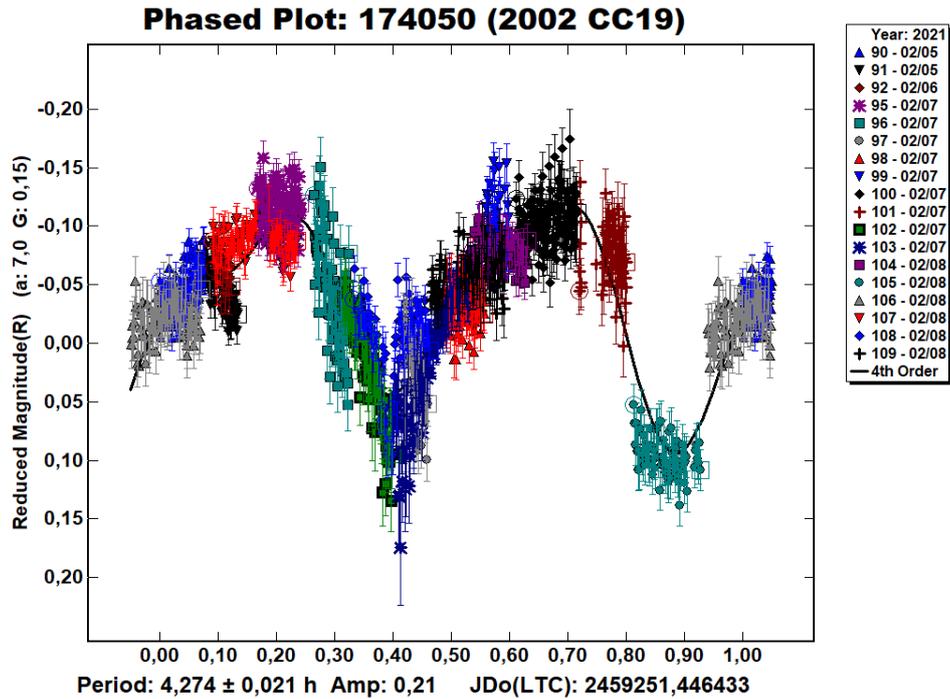


Figura 3.2: Curva de fase rotacional para o asteroide 174050 (2002 CC19) com os dados obtidos em fevereiro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

todas as estrelas identificadas para encontrar o ponto zero, ou seja, estrelas com magnitudes altas e, conseqüentemente, com erros maiores nessa medida, acabam contribuindo para o cálculo do erro propagado. Por outro lado, a redução feita pelo *MPO Canopus* só utiliza entre duas à cinco estrelas de comparação escolhidas pelo operador, o que possibilita a escolha das que não apresentarem erros grandes na medida da magnitude. Entretanto, apesar da diferença nos erros, encontramos períodos muito próximos utilizando os dois métodos. Vale também mencionar que a análise com o *MPO Canopus* utilizou uma noite de dados adicional, porém como são poucos pontos isso não provocou muita diferença no resultado.

Um período diferente foi encontrado por Pravec (2021) para este NEO, ou seja, de  $3,514 \pm 0,002$  horas com um ajuste de ordem 5. Os dados que compõem a curva apresentada na Figura 3.4 foram obtidos em 12, 13 e 14 de fevereiro de 2021, a curva de luz composta tem uma amplitude de 0,086 mag. O índice de confiabilidade atribuído a essa solução foi U2 por apresentar uma baixa cobertura dos dados. Consideramos a nossa solução como correta por ter uma maior cobertura e baixa dispersão.

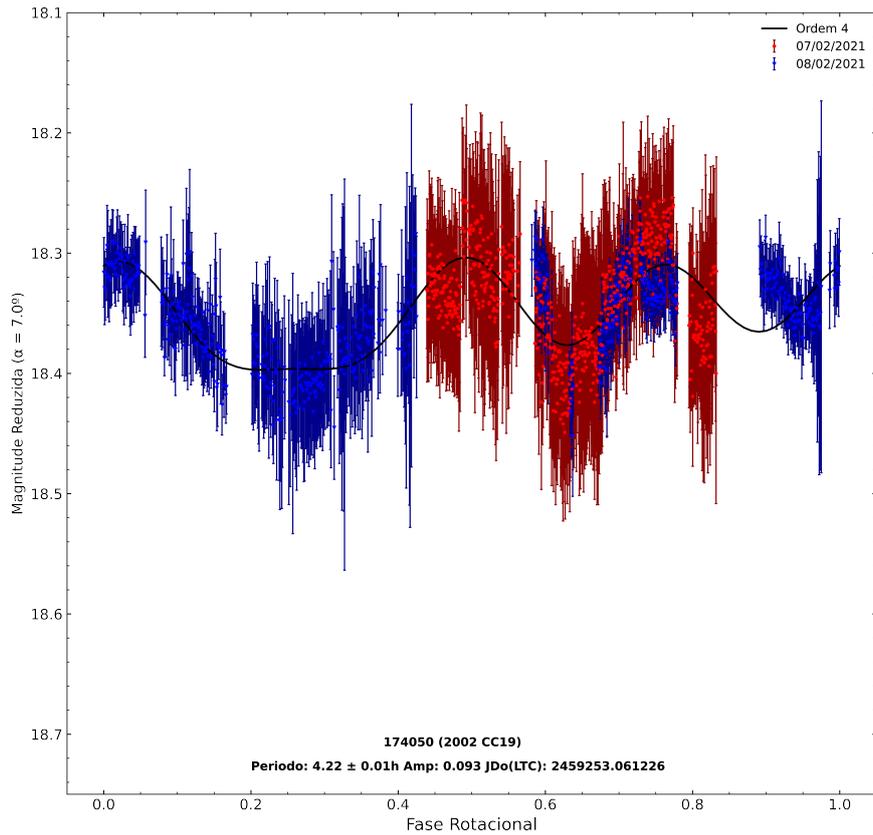


Figura 3.3: Curva de fase rotacional para o asteroide 174050 (2002 CC19) com os dados obtidos em fevereiro de 2021 com o Pipeline IMPACTON. A linha contínua representa o melhor ajuste.

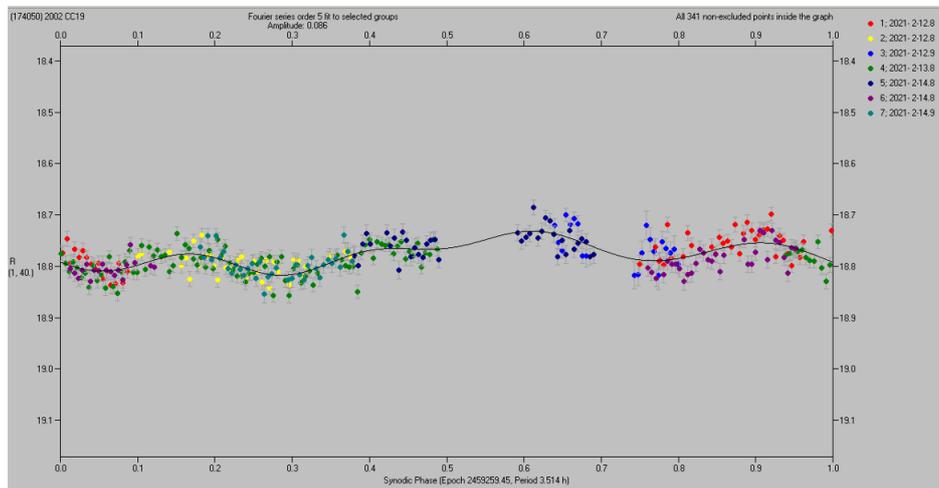


Figura 3.4: Curva de fase rotacional para o asteroide 174050 (2002 CC19) retirada de Pravec (2021).

### 2001 EC

O NEO Apollo 2001 EC tem um diâmetro estimado de 0,66 km e é classificado como um asteroide potencialmente perigoso (PHA). A coleta de dados ocorreu durante a missão observacional de setembro de 2021 nas noites 10 e 12, quando o

objeto foi observado num total de 5,41 horas. Esse foi o objeto que teve a maior variação no ângulo de fase da nossa amostra, como pode ser visto na Tabela 3.2, o asteroide estava muito próximo da Terra ocasionando uma variação de  $14^\circ$  no ângulo de fase solar durante as duas noites de observação. As curvas de luz obtidas são apresentadas na Figura 3.5.

Tabela 3.2: Dados observacionais do objeto 2001 EC.

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
10/09/2021	19 03 30,1	-19 32 36	3,03	0,095	1,053	58,6	15,8
12/09/2021	18 11 53,6	-19 53 22	2,38	0,086	1,029	72,6	15,9

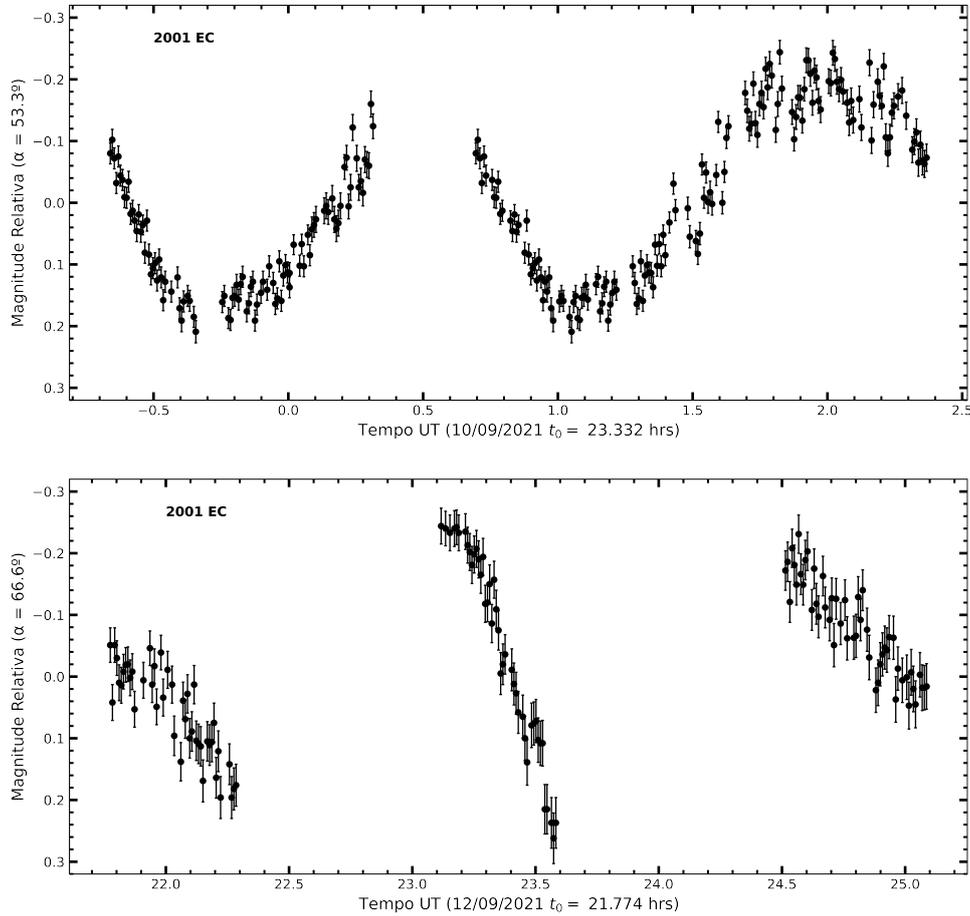


Figura 3.5: *Curvas de luz do NEO 2001 EC de setembro de 2021.*

A Figura 3.6 mostra o ajuste, feito por série de Fourier, e uma curva de luz composta com uma amplitude de 0,51 mag, indicando ser um objeto alongado. O período determinado foi de  $3,11 \pm 0,01$  horas com um ajuste de polinômio de 5<sup>a</sup> ordem. A curva apresenta uma baixa dispersão pois existe uma boa cobertura,

principalmente nos pontos de mínimo e de máximo que estão bem definidos. Foi atribuído um grau de confiabilidade U3 a este período sendo esta é a primeira determinação deste parâmetro para o asteroide.

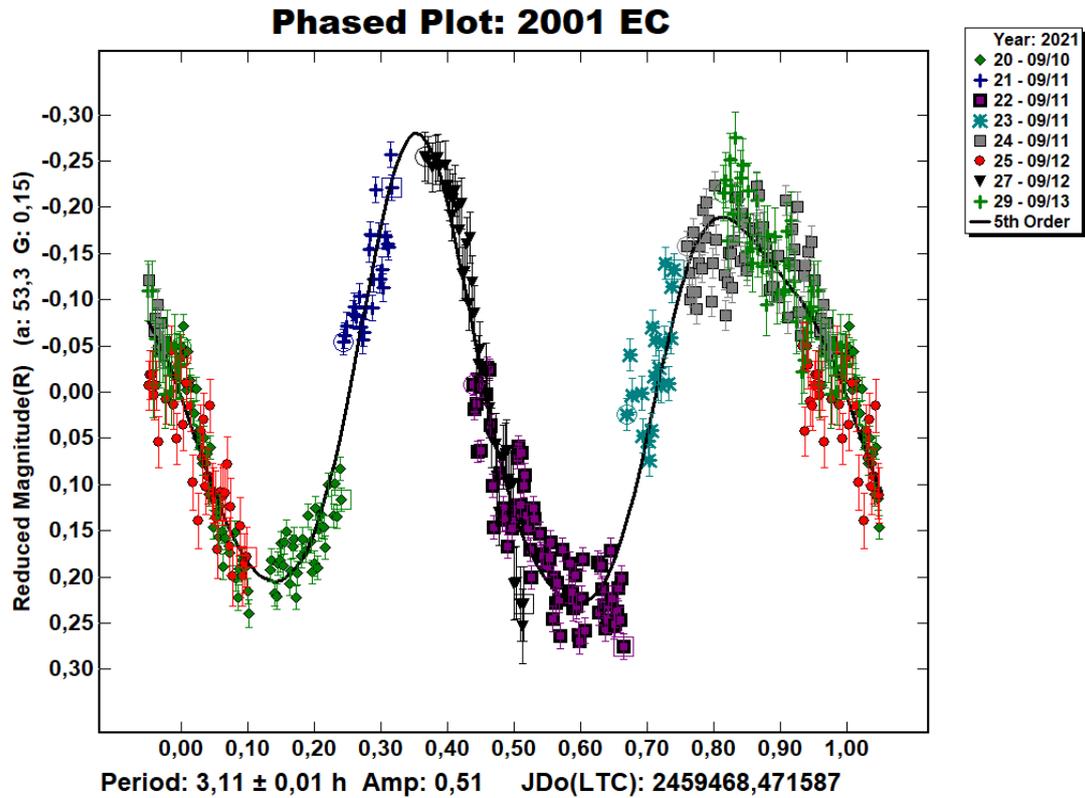


Figura 3.6: *Curva de fase rotacional para o asteroide 2001 EC com os dados obtidos em setembro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

### 7753 (1988 XB)

O objeto 7753 (1988 XB) faz parte do subgrupo Apollo e é classificado como asteroide potencialmente perigoso (PHA), com um diâmetro estimado de 1,0 *km*. Esse objeto foi observado ao longo de duas noites na missão observacional de dezembro de 2020, as circunstâncias observacionais são apresentadas na Tabela 3.3. As curvas de luz obtidas por magnitude relativa para cada noite são apresentadas na Figura 3.7.

Tabela 3.3: Dados observacionais do objeto 7753 (1988 XB).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
21/12/2020	06 11 21,2	+28 30 20	4,78	0,209	1,192	4,9	15,4
22/12/2020	06 08 29,2	+28 34 34	4,32	0,216	1,199	4,4	15,5

Na Figura 3.8 é mostrada a curva de luz composta com estas duas noites, somando cerca de 9 horas de observação. Utilizando o método de ajuste por análise de Fourier, descrito no capítulo 2, foi procurado o período de rotação. O melhor resultado foi obtido com um polinômio de ordem 5 o qual ajusta um período de rotação de  $6,66 \pm 0,02$  horas com dispersão de 1.49. A amplitude da curva de luz é de 0,11 mag, o que parece indicar uma forma aproximadamente esférica ou uma configuração na qual observamos a face próxima ao eixo de rotação. Apesar desta curva de luz ter um certo grau de dispersão, os pontos cobrem bem o período determinado. A esse período demos um código de confiabilidade U2 por apresentar uma razoável superposição dos pontos das duas noites, porém não é um resultado conclusivo.

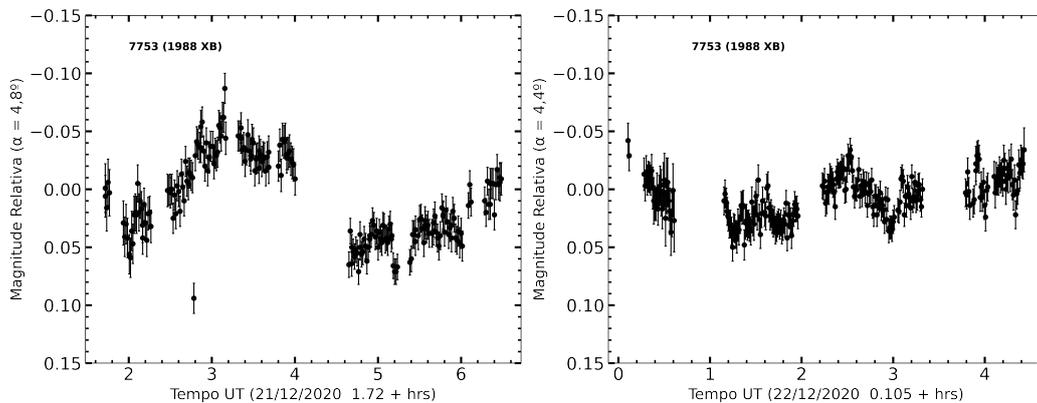


Figura 3.7: *Curvas de luz do NEO 7753 (1988 XB) de dezembro de 2020.*

Dois valores de período de rotação estão publicados para este objeto. Warner and Stephens (2021a) determinaram um período de  $42,2 \pm 0,2$  horas com ajuste de um

polinômio de ordem 10 a partir de dados coletados durante oito noites de observação entre novembro e dezembro de 2020. A curva de fase rotacional é mostrada na Figura 3.9 com amplitude de 0.60 mag. Um valor semelhante foi obtido por Pravec (2020), que determinaram um período de  $42,5 \pm 2,0$  horas, esse valor foi estimado usando os dados de quatro noites, de 7 à 10 de dezembro de 2020, a amplitude obtida para a curva de fase rotacional foi de 0,2 mag como pode ser visto na Figura 3.10.

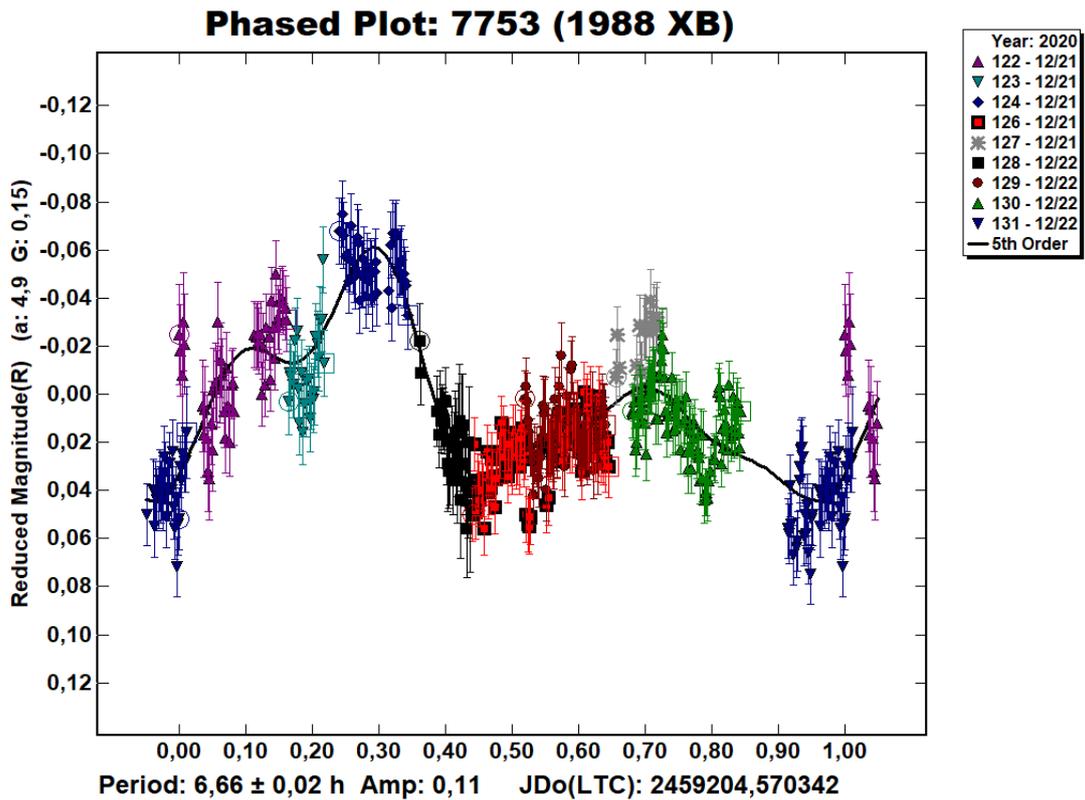


Figura 3.8: Curva de fase rotacional para o asteroide 7753 (1988 XB) com os dados obtidos em dezembro de 2020. A linha contínua representa o melhor ajuste.

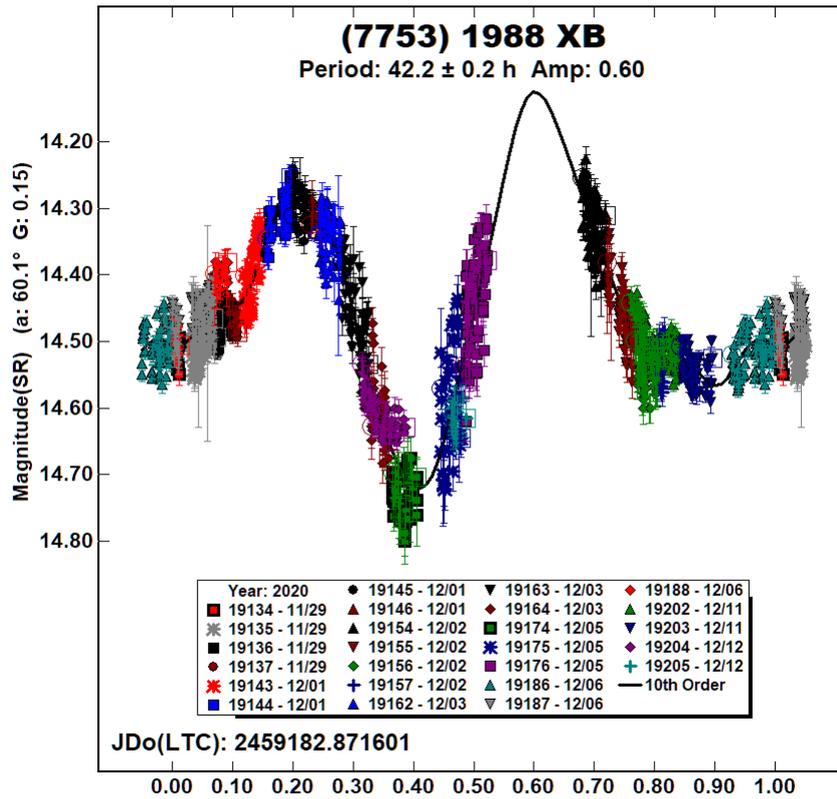


Figura 3.9: Curva de fase rotacional para o asteroide 7753 (1988 XB) retirada de Warner and Stephens (2021a).

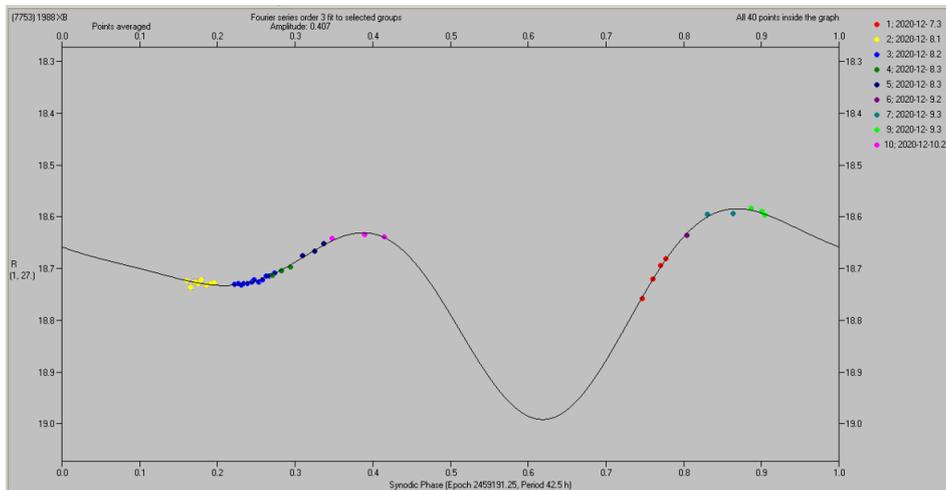


Figura 3.10: Curva de fase rotacional para o asteroide 7753 (1988 XB) retirada de Pravec (2020).

Nossos resultados diferem bastante dos apresentados na literatura, as amplitudes são diferentes entre si pois as observações ocorreram em ângulos de fase diferentes. Os dados de Warner and Stephens (2021a) foram obtidos para um ângulo de fase ( $\alpha$ ) inicialmente de  $60,1^\circ$ , a curva de fase de Pravec (2020) foi obtida com  $\alpha = 30,3^\circ$  e a nossa curva foi obtida com  $\alpha = 4,9^\circ$ . Essa mudança na geometria de observação pode causar uma variação na amplitude obtida. Como os nossos dados

são apenas para duas noites, acreditamos que não há pontos suficientes para cobrir o período mais provável determinado pelos outros autores, e as tentativas de forçar uma solução próxima às dadas na literatura produziram resultados insatisfatórios. Assim, consideramos a solução apresentada pelo Warner and Stephens (2021a) como o período mais confiável, pois apresenta uma melhor cobertura da rotação.

### 162186 (1999 OP3)

O NEO Amor 162186 (1999 OP3) possui um diâmetro estimado de 3,8 km, numa órbita com um semieixo maior de 2.71 UA, excentricidade de 0,61 e inclinação de 27,54°. Esse objeto foi observado durante três noites em janeiro de 2021, totalizando 11,51 horas de observação. A Tabela 3.4 apresenta as efemérides das noites enquanto as curvas de luz individuais são apresentadas na Figura 3.11. As curvas das noites 17 e 19 de janeiro têm algumas interrupções devido à passagem de nuvens, assim como estrelas do campo na proximidade do objeto.

Tabela 3.4: Dados observacionais do objeto 162186 (1999 OP3).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ (°)	Mag (V)
17/01/2021	09 06 28,3	+24 15 09	5,42	0,917	1,883	8,2	16,8
18/01/2021	09 04 28,8	+24 03 39	2,08	0,905	1,874	7,5	16,7
19/01/2021	09 02 37,7	+23 52 50	4,01	0,895	1,867	6,8	16,7

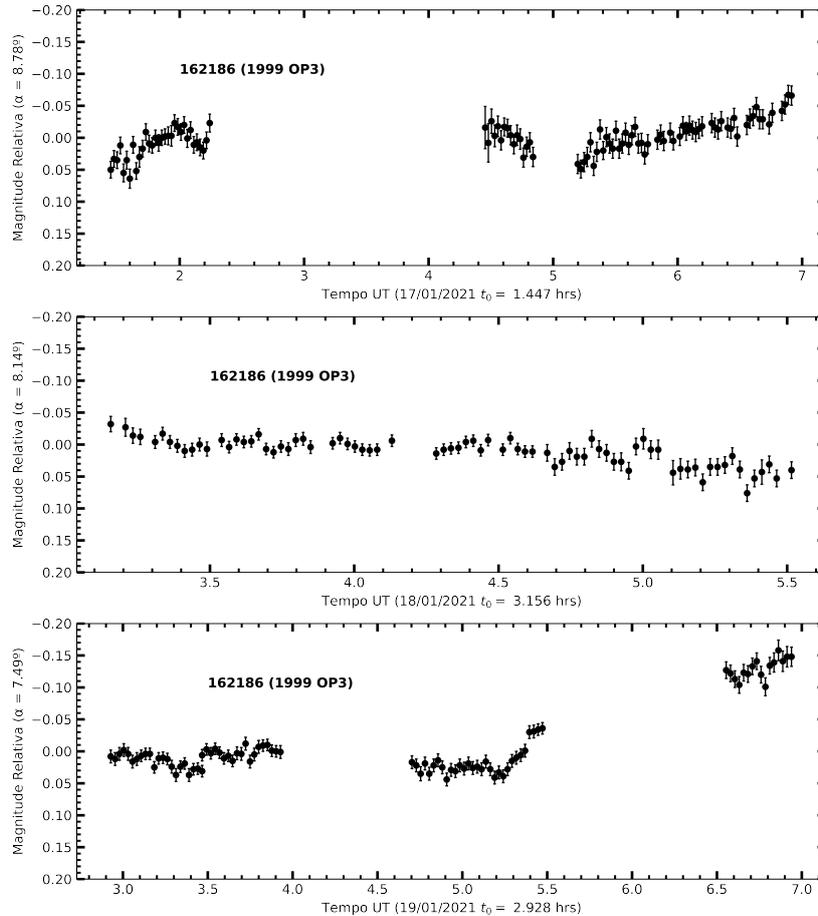


Figura 3.11: *Curvas de luz do NEO 162186 (1999 OP3) de janeiro de 2021.*

O ajuste dos pontos obtidos nessas noites fornecem um período de  $10,37 \pm 0,01$  horas com um polinômio de Fourier de ordem 6 e a amplitude da curva de fase rotacional é de 0,23 mag indicando um objeto aproximadamente esférico ou observado em uma configuração particular. A curva de luz composta, mostrada na Figura 3.12, apresenta uma dispersão razoável mas, apesar de não cobrir todo o período rotacional, os pontos estão bem distribuídos definindo dois máximos e dois mínimos. Atribuímos um índice de confiabilidade U2.

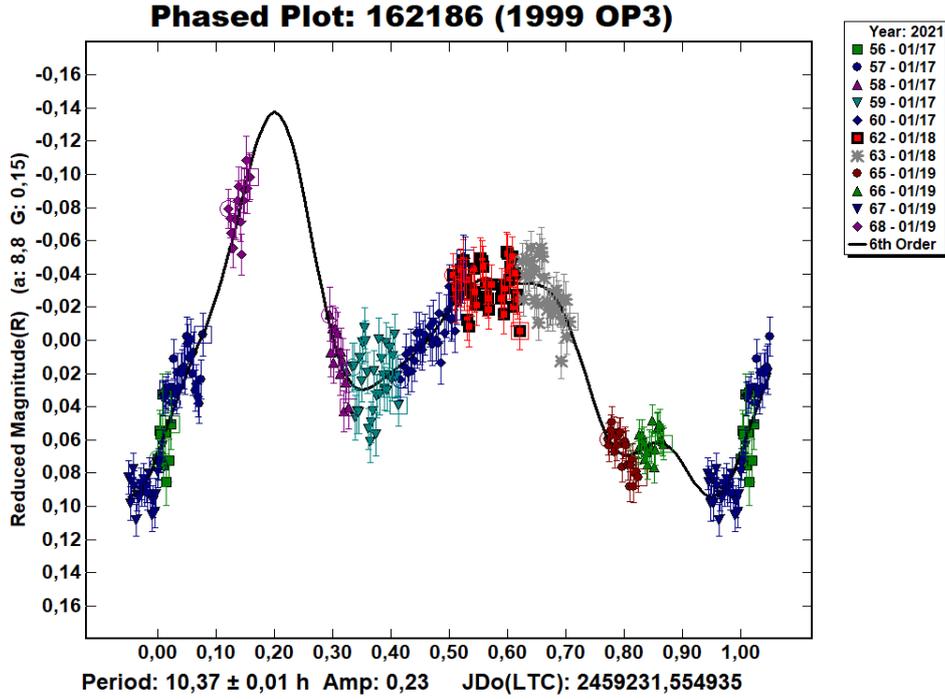


Figura 3.12: Curva de fase rotacional para o asteroide 162186 (1999 OP3) com os dados obtidos em janeiro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Foram encontrados dois períodos publicados para este asteroide. Silva-Cabrera (2015) encontrou um valor de 14 horas com índice de confiabilidade U1, sendo os dados obtidos em três noites de observação: 26 e 27 de março e 20 de maio de 2012. Outro valor foi obtido por Warner and Stephens (2021b), com período de rotação de  $8,36 \pm 0,03$  horas e amplitude de 0,04. Os pontos que compõem a curva de luz obtida por Warner and Stephens (2021b) foram adquiridos dias antes das nossas observações, como pode ser visto na Figura 3.13. Como essa curva de luz apresenta uma amplitude muito pequena o resultado obtido é altamente questionável, pois apresenta uma curva de luz com pouca variação, podendo ser atribuída ao ruído. Por esses motivos consideramos a nossa solução como mais confiável.

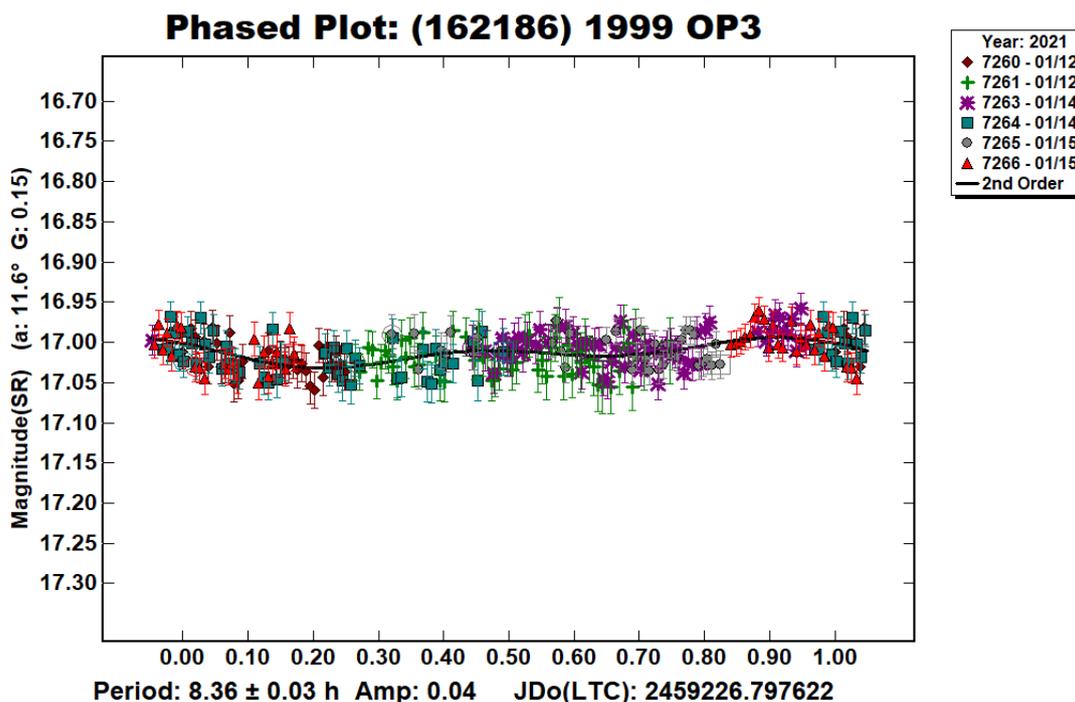


Figura 3.13: Curva de fase rotacional para o asteroide 162186 (1999 OP3) retirada de Warner and Stephens (2021b).

### 332446 (2008 AF4)

O NEO PHA do subgrupo Apollo 332446 (2008 AF4) tem um diâmetro de 450 metros e órbita com semieixo maior de 1,38, excentricidade 0,41 e inclinação de 8,93°. Os dados para esse objeto foram coletados durante duas noites em fevereiro de 2021, somando um total de 2,2 horas de observação. Na Tabela 3.5 são dadas as circunstâncias observacionais e na Figura 3.14 as curvas de luz obtidas para cada noite.

Tabela 3.5: Dados observacionais do objeto 332446 (2008 AF4).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ (°)	Mag (V)
05/02/2021	09 03 54,5	+41 13 02	1,22	0,198	1,168	21,2	17,6
06/02/2021	09 02 39,9	+41 11 43	0,98	0,205	1,74	21,4	17,7

A Figura 3.15 mostra a curva de luz composta obtida, ajustada por um período de  $3,2597 \pm 0,0203$  horas com amplitude de 0,22 mag. A curva apresenta poucos pontos, porém bem distribuídos definindo dois máximos e dois mínimos. Atribuímos um fator de confiabilidade U2 a este período.

Warner and Stephens (2021b) determina um valor de período de  $3.0472 \pm 0.0006$  horas a partir de 3 noites em janeiro de 2021. O autor destaca que a forma da curva

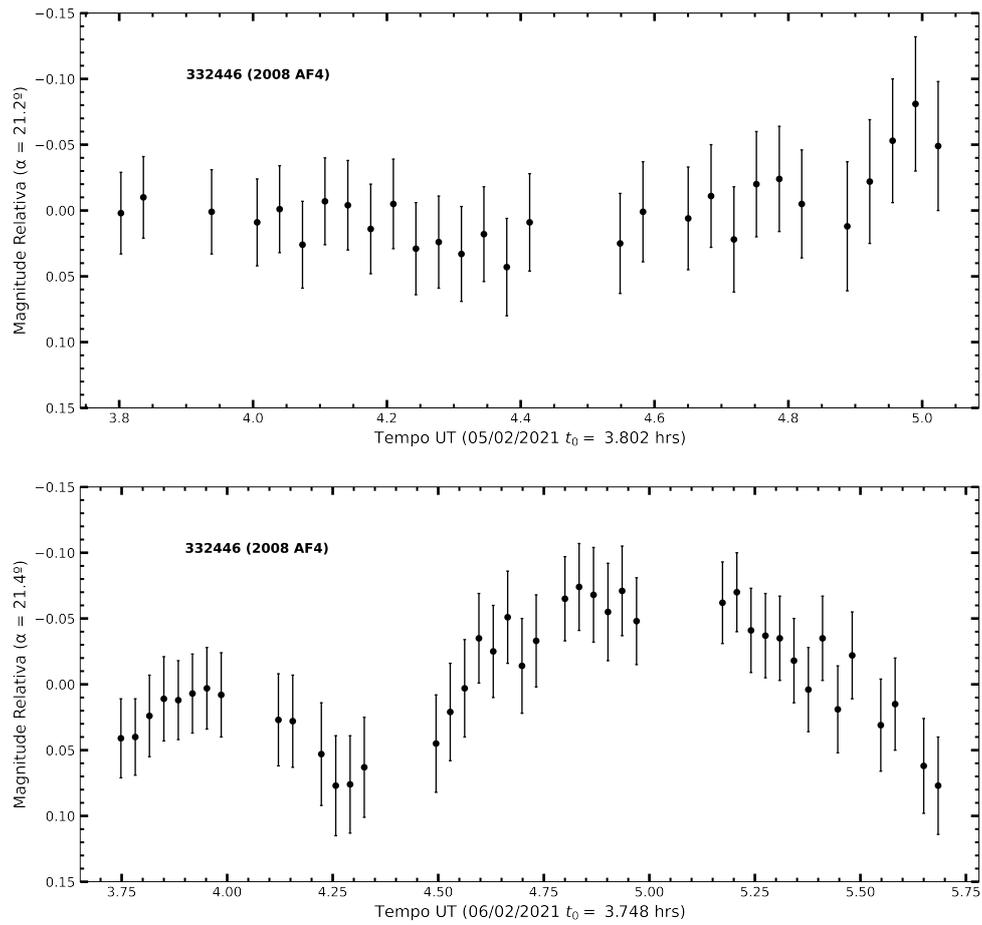


Figura 3.14: *Curvas de luz do NEO 332446 (2008 AF4) de fevereiro de 2021.*

é influenciada pelo efeito de sombra devido aos ângulos de fase solar maiores que  $65^\circ$  em que o NEO estava ao longo da observação. Foi realizado um ajuste de ordem 10 e a curva de luz composta tem uma amplitude de 0,14 mag (ver Figura 3.16). Nosso resultado, ainda que próximo, não concorda com o de Warner and Stephens (2021b), provavelmente devido ao fato da fase solar ser menor nas nossas observações, da ordem de 21 graus.

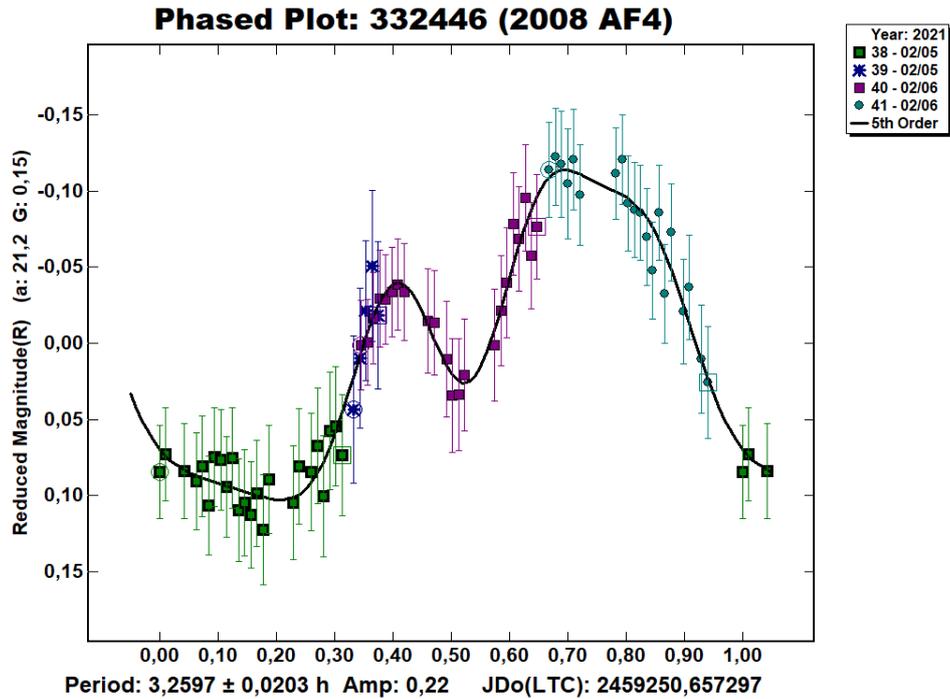


Figura 3.15: Curva de fase rotacional para o asteroide 332446 (2008 AF4) com os dados obtidos em fevereiro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

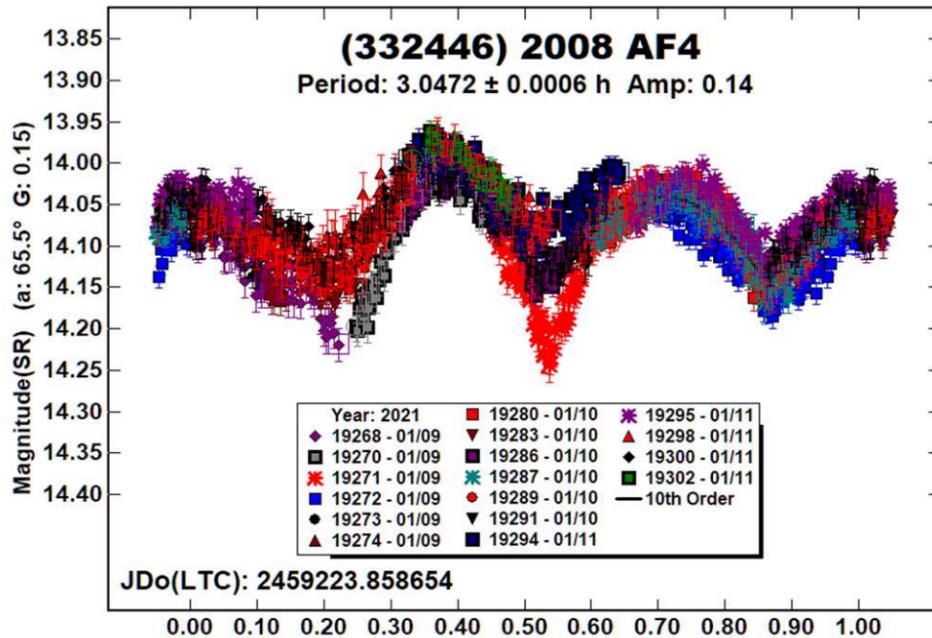


Figura 3.16: Curva de fase rotacional para o asteroide 332446 (2008 AF4) retirada de Warner and Stephens (2021b).

### 450263 (2003 WD158)

O asteroide 450263 (2003 WD158) é classificado como potencialmente perigoso, pertence ao subgrupo Apollo e possui um diâmetro de 0,41 km. Esse NEO foi

observado na missão de julho de 2021 no OASI, quando conseguimos obter uma qualidade razoável de dados apenas na madrugada de 14 de julho com cerca de 2 horas de observação, como pode ser visto na Tabela 3.6. A curva de luz obtida utilizando magnitude relativa é dada na Figura 3.17.

Tabela 3.6: Dados observacionais do objeto 450263 (2003 WD158).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
14/07/2021	18 22 26,6	-48 52 58	1,94	0,239	1,228	24.9	17,3

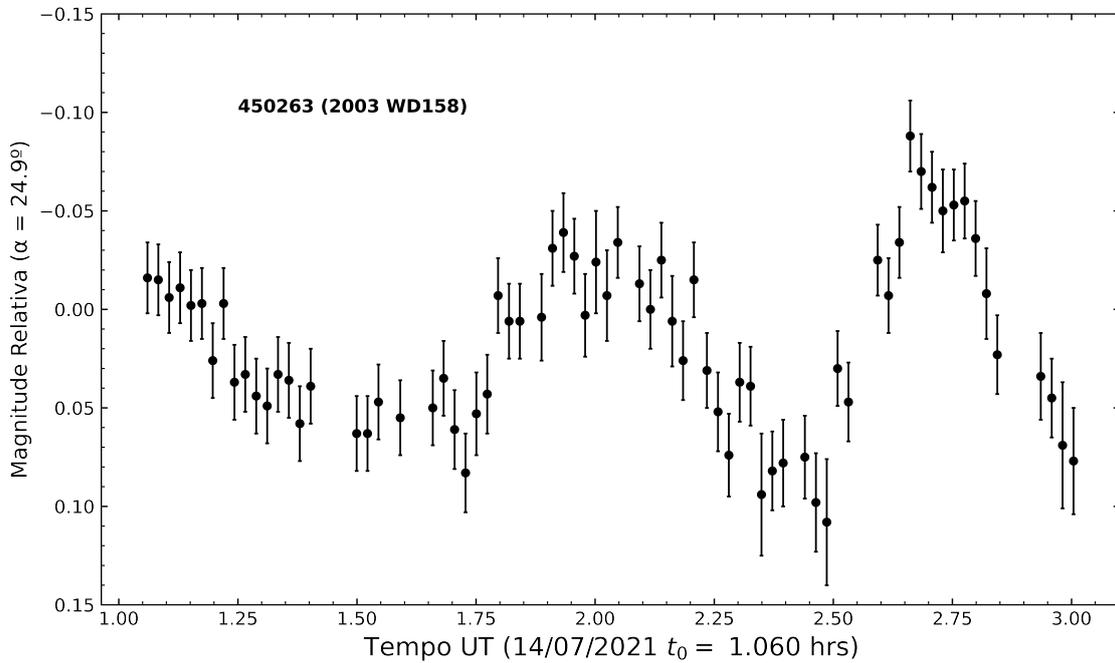


Figura 3.17: *Curvas de luz do NEO 450263 (2003 WD158) de julho de 2021.*

A Figura 3.18 mostra a curva de luz ajustada por um período de  $1,948 \pm 0,262$  horas e amplitude de 0,17 mag. O ajuste foi feito com polinômio de Fourier de ordem 3 e atribuímos um índice de confiança U2 ao período obtido.

Nossos dados diferem bastante do período obtido por Pravec (2021), que encontrou o valor de 1540 horas com uma curva de luz com amplitude de 2,13 mag. A solução dada pelo autor possui um código de confiabilidade U3. A curva de luz mostrada na Figura 3.19 é composta por dados obtidos ao longo de 26 noites de observação entre os meses de novembro de 2020 e janeiro de 2021. Um resultado interessante, pois os dados apontam para um rotador super lento com forma bastante irregular.

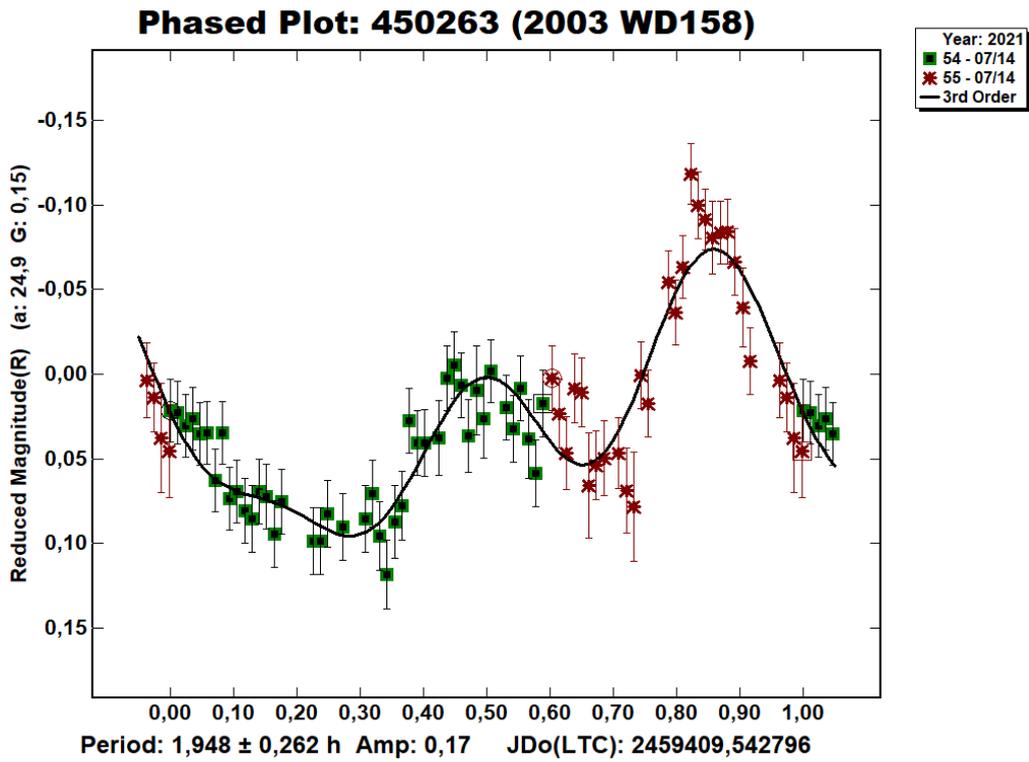


Figura 3.18: Curva de fase rotacional para o asteroide 450263 (2003 WD158) com os dados obtidos em julho de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

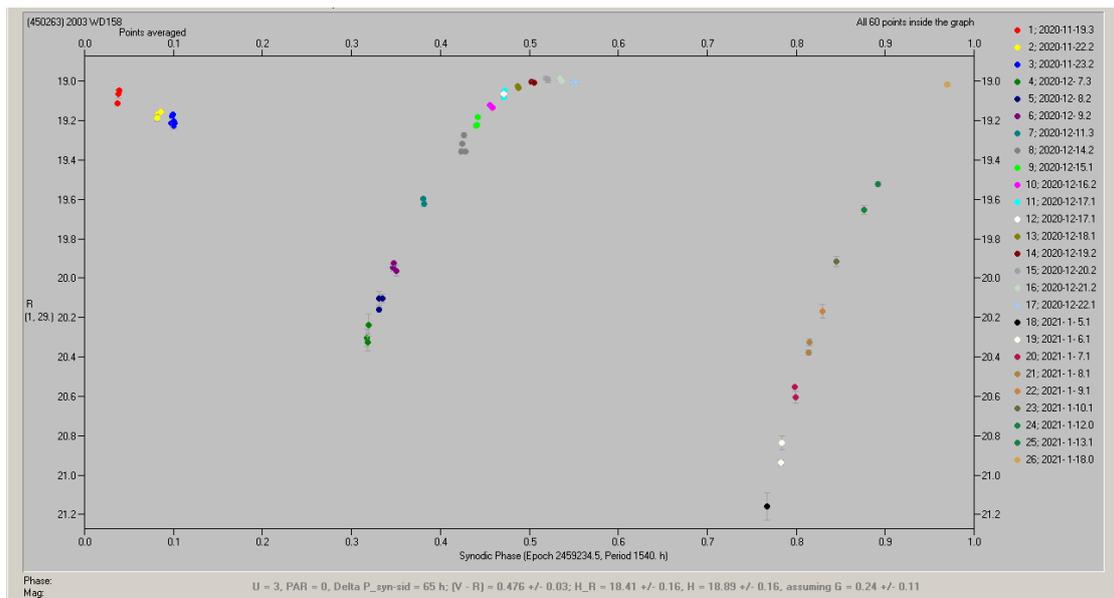


Figura 3.19: Curva de fase rotacional para o asteroide 450263 (2003 WD158) retirada de Pravec (2021).

## 2011 YQ10

O objeto 2011 YQ10 é um NEO do subgrupo Amor com diâmetro de 0,57 km, tendo sido observado nas noites de 1 e 2 de outubro de 2021 ao longo de 4,64 horas. As circunstâncias observacionais são apresentadas na Tabela 3.7 enquanto as curvas de luz de cada noite na Figura 3.20.

Tabela 3.7: Dados observacionais do objeto 2011 YQ10.

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
01/10/2021	104 02 10,5	-00 10 26	3,33	0,119	1,077	48,3	16,4
02/10/2021	04 06 31,5	+00 18 23	1,31	0,122	1,029	48,3	16,5

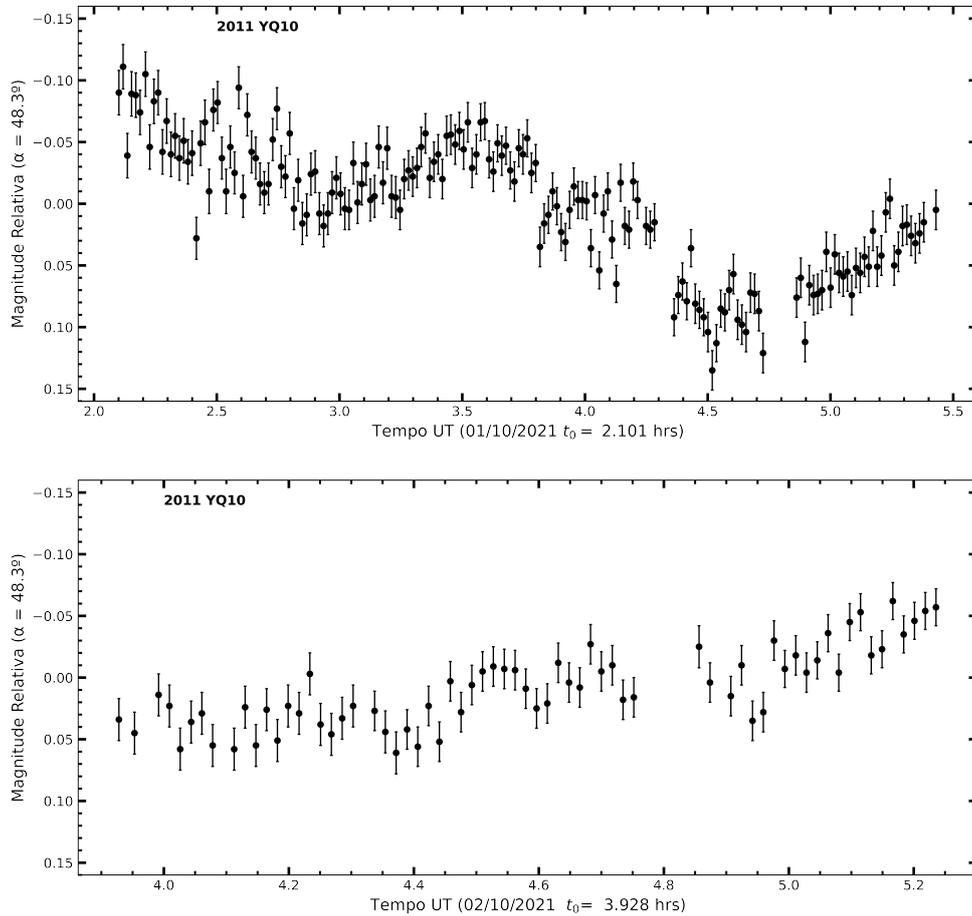


Figura 3.20: *Curvas de luz do NEO 2011 YQ10 de outubro de 2021.* Warner and Stephens (2022b)

Assim como para o objeto 174050 (2002 CC19), os dados obtidos para o NEO 2011 YQ10 foram processados tanto utilizando o *MPO Canopus* quanto o *Pipeline IMPACTON*. A figura 3.21 mostra o ajuste feito a partir do *MPO Canopus*, onde

a curva de luz composta apresenta uma amplitude de 0,19 mag e um período de  $4,7347 \pm 0,0505$  horas. Esse ajuste foi obtido com polinômio de Fourier de grau 4, os pontos estão com bastante dispersão e a curva não apresenta uma boa cobertura. Por estes motivos, atribuímos um índice de confiança U2 para essa solução.

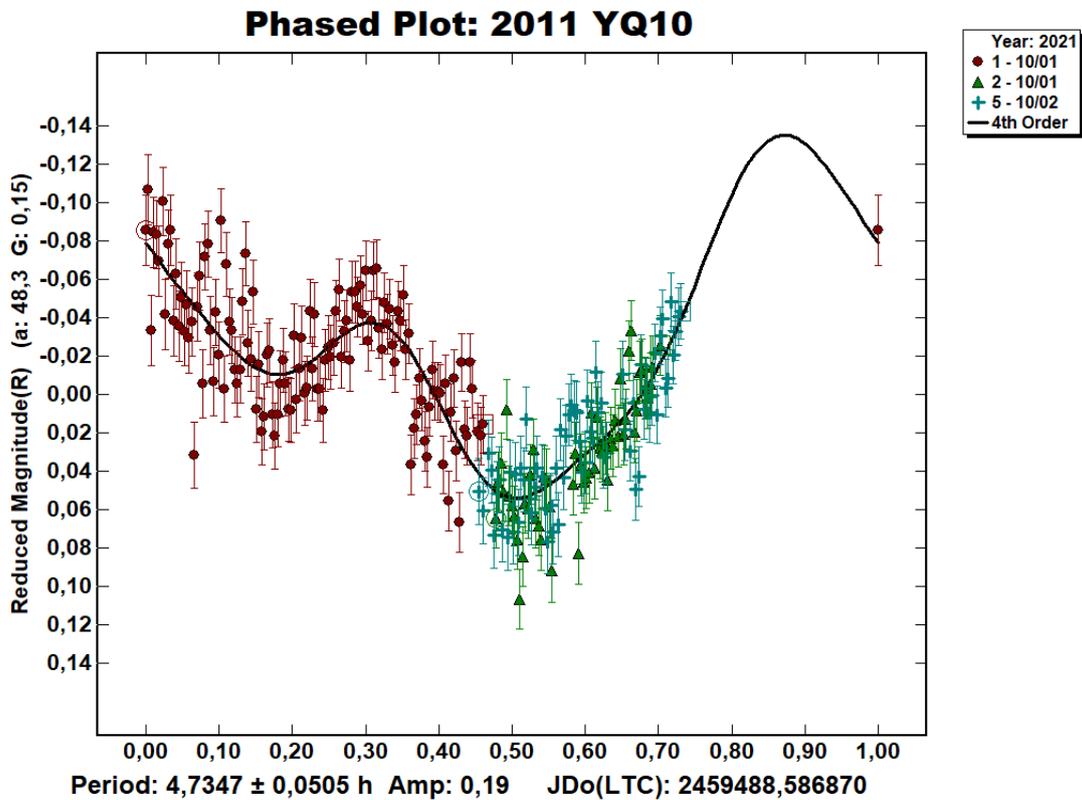


Figura 3.21: Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 com os dados obtidos em outubro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Com as magnitudes obtidas pelo método de fotometria absoluta com o *Pipeline*, encontramos o melhor ajuste, com um polinômio de Fourier de grau 5, com um período de  $4,755 \pm 0,002$  horas e uma amplitude de 0,144 mag na curva de luz, como mostra a Figura 3.22. Devido à dispersão dos pontos e à irregularidades na curva de luz obtida, foi atribuído um índice de confiança U2 para esse período. Este resultado foi utilizado para corrigir a curva de fase deste NEO e incluído no artigo Arcoverde et al. (2022).

Novamente pode-se notar que pelo método de magnitude absoluta usado no *Pipeline* IMPACTON existe um erro maior na determinação das magnitudes. Com dados obtidos nas mesmas noites também encontramos curvas de luz diferentes, apresentando diferentes amplitudes e uma pequena mudança no período de rotação. Novos estudos deverão esclarecer o motivo dessas discrepâncias de forma a tornar a metodologia de obtenção das propriedades rotacionais a mais eficiente e precisa possível.

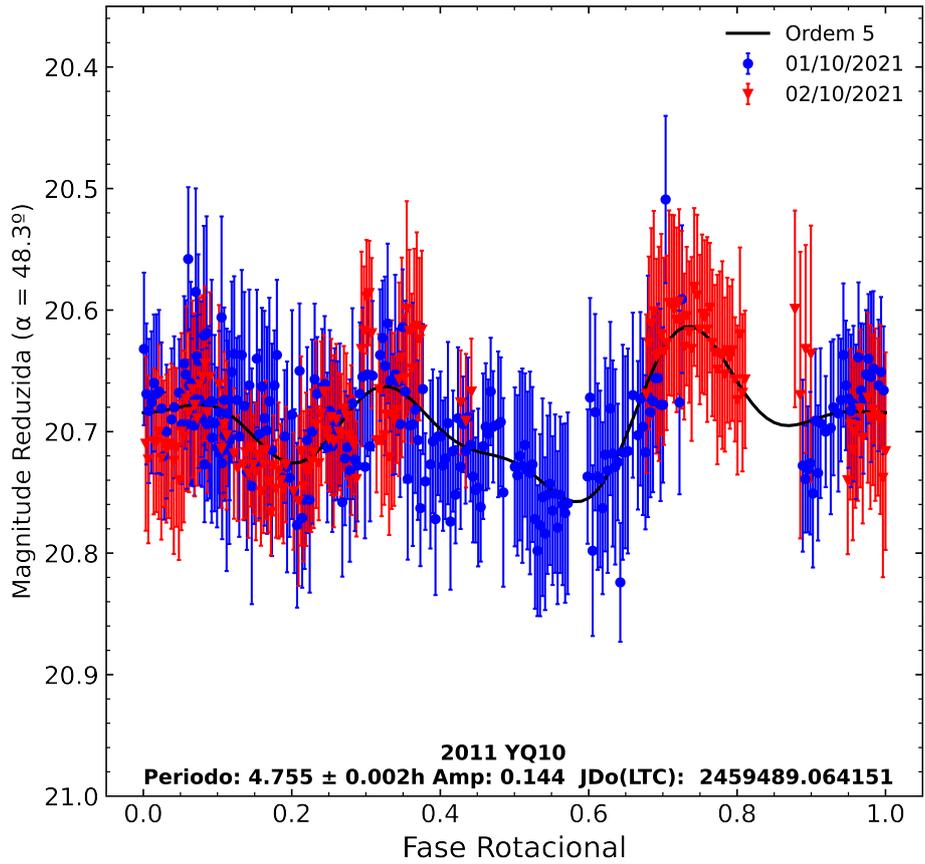


Figura 3.22: Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 com os dados obtidos em outubro de 2021 com o Pipeline IMPACTON. A linha contínua representa o melhor ajuste.

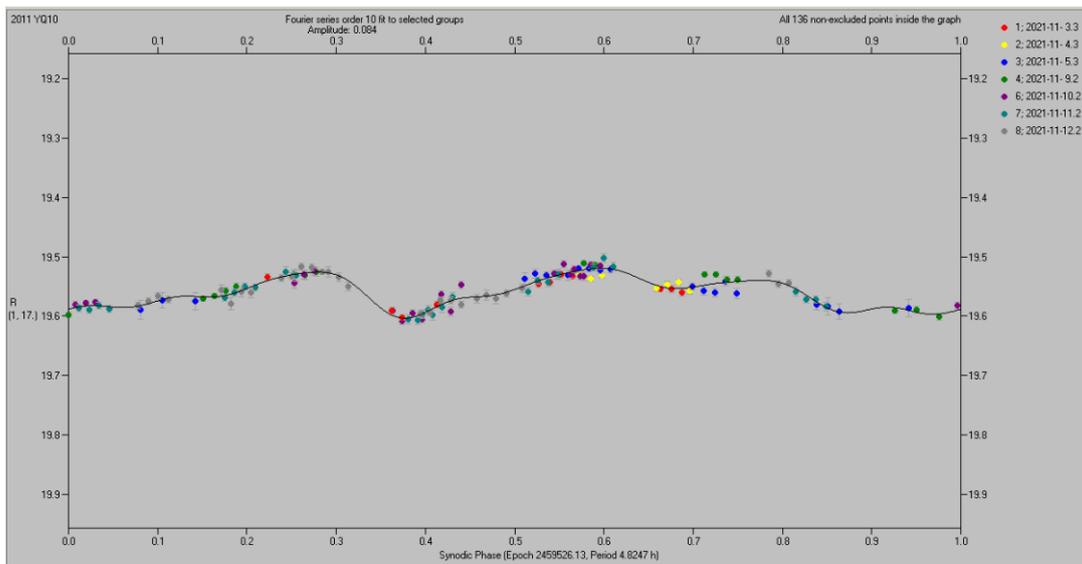


Figura 3.23: Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 retirada de Pravec (2021).

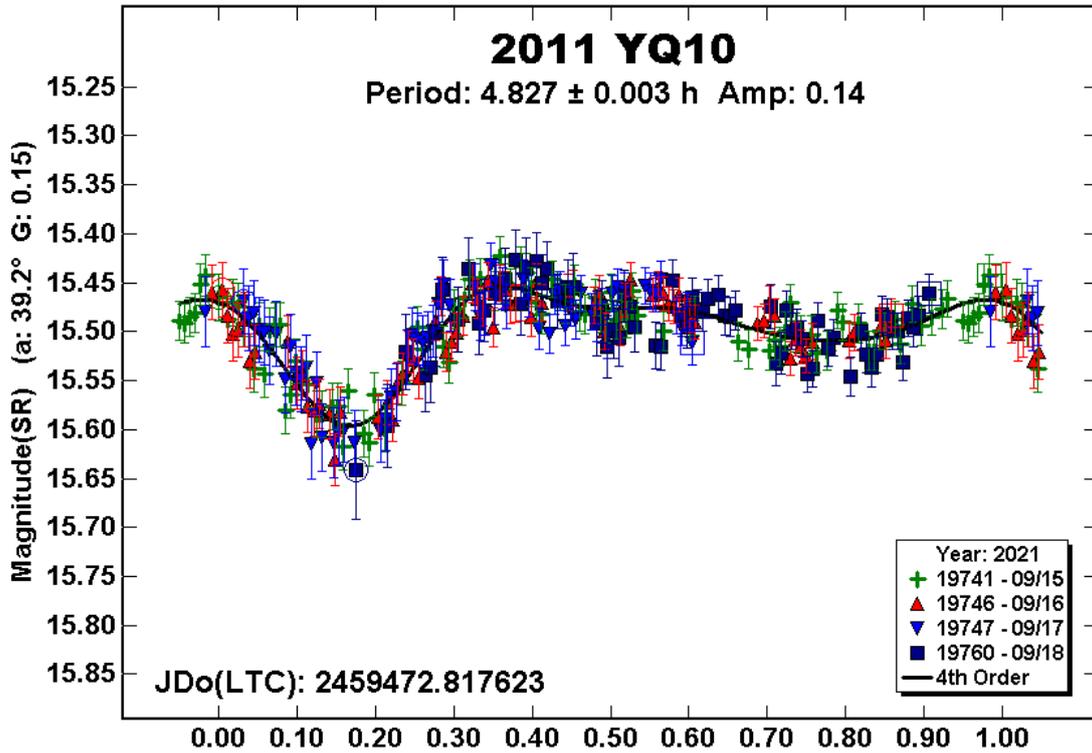


Figura 3.24: Curva de fase rotacional para o asteroide 2011 YQ10 retirada de Warner and Stephens (2022a).

O período de rotação desse asteroide foi também determinado por outros autores, Pravec (2021) encontrou um período de  $4,8247 \pm 0,0007$  horas com dados obtidos durante sete noites em novembro de 2021. A curva de luz obtida (Figura 3.23) tem uma amplitude de 0,084 mag e foi atribuído um índice de confiabilidade U3. Warner and Stephens (2022a) determinou um período de  $4,827 \pm 0,002$  horas e amplitude 0,14 mag com dados referentes à quatro noites de setembro de 2021. Consideramos a solução de Pravec (2021) como a que melhor representa o período de rotação deste NEO devido à cobertura maior da curva de luz composta.

### 2017 UW42

O asteroide Amor 2017 UW42 de diâmetro estimado em 1,00 km, foi observado entre as noites de 1 a 3 de fevereiro de 2022 num total de 4,52 horas de observação. A Tabela 3.8 apresenta as circunstâncias observacionais e as respectivas curvas de luz resultantes na Figura 3.25.

Apesar de apresentar dados ruidosos, conseguimos ajustar um período de rotação de  $2,4668 \pm 0,0043$  horas para curva de luz composta apresentada na Figura 3.26 e tendo uma amplitude de 0,13 mag. O melhor ajuste foi feito com um polinômio de Fourier de grau 5. Foi atribuído um índice de confiabilidade U2 para esta solução, já que mais observações são necessárias para se obter um período com maior confiança. Até o momento está é a única solução para o período rotacional deste NEO.

Tabela 3.8: Dados observacionais do objeto 2017 UW42.

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
01/02/2022	06 08 30,0	+17 14 33	1,57	0,343	1,267	30,1	17,5
02/02/2022	06 10 10,1	+16 56 01	0,44	0,345	1,267	30,6	17,5
03/02/2022	06 11 56,8	+16 36 58	2.51	0,347	1,267	31,0	17,5

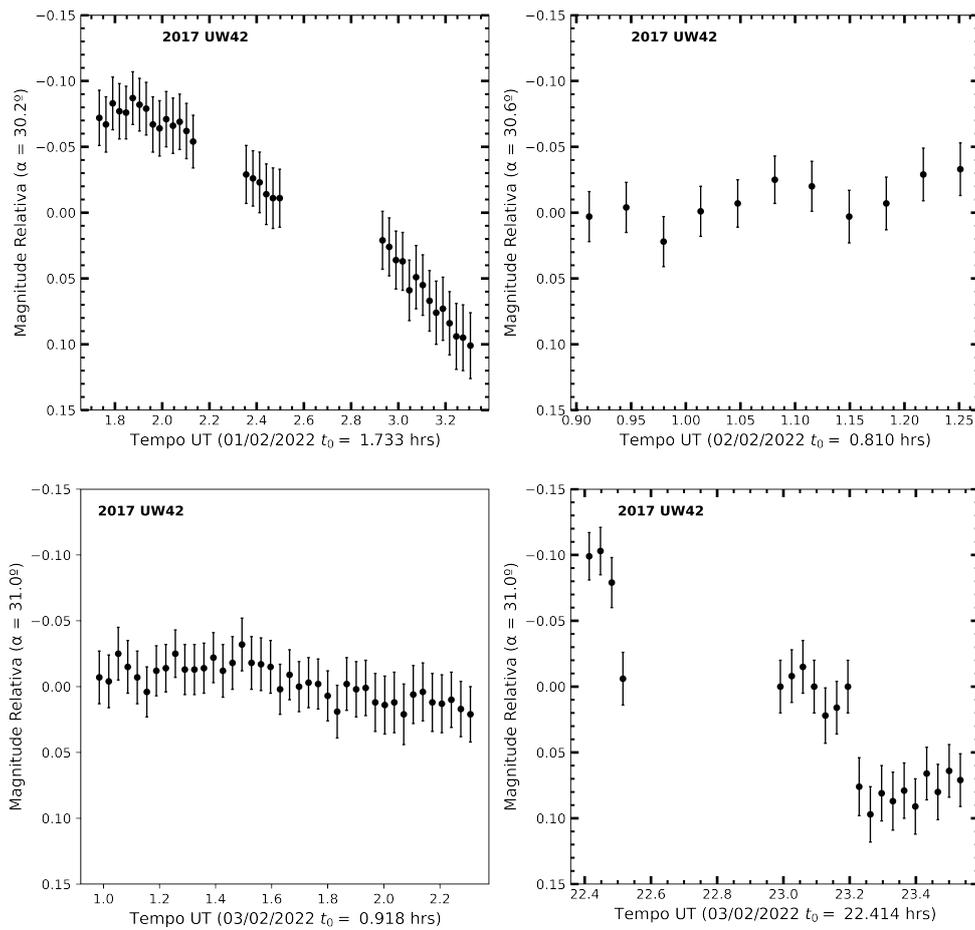


Figura 3.25: Curvas de luz do NEO 2017 UW42 de fevereiro de 2022.

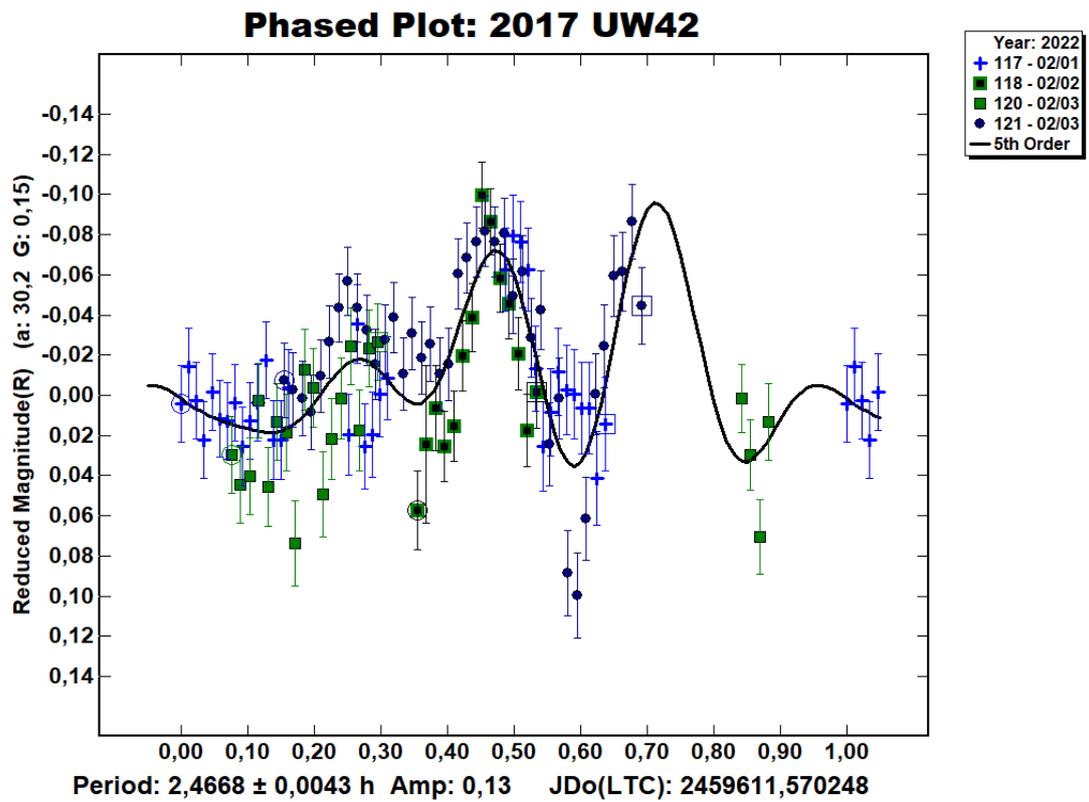


Figura 3.26: Curva de fase rotacional para o asteroide 2017 UW42 com os dados obtidos em fevereiro de 2022. A linha contínua representa o melhor ajuste.

## 2021 MO1

O objeto 2021 MO1, outro NEO do subgrupo Amor, tem um diâmetro estimado em 0,75 km e foi observado nos dias 08, 09 e 11 de outubro de 2021 totalizando 3,95 horas de observação. As circunstâncias observacionais são apresentadas na Tabela 3.9 e as curvas de luz obtidas por fotometria diferencial para cada noite são mostradas na Figura 3.27.

Tabela 3.9: Dados observacionais do objeto 2021 MO1.

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	Mag (V)
08/10/2021	23 34 16,8	-16 13 58	0,26	0,275	1,246	23,4	17,3
09/10/2021	23 34 37,1	-15 07 56	2,49	0,277	1,247	23,4	17,3
11/10/2021	23 35 26,3	-12 42 02	1,20	0,281	1,250	23,4	17,3

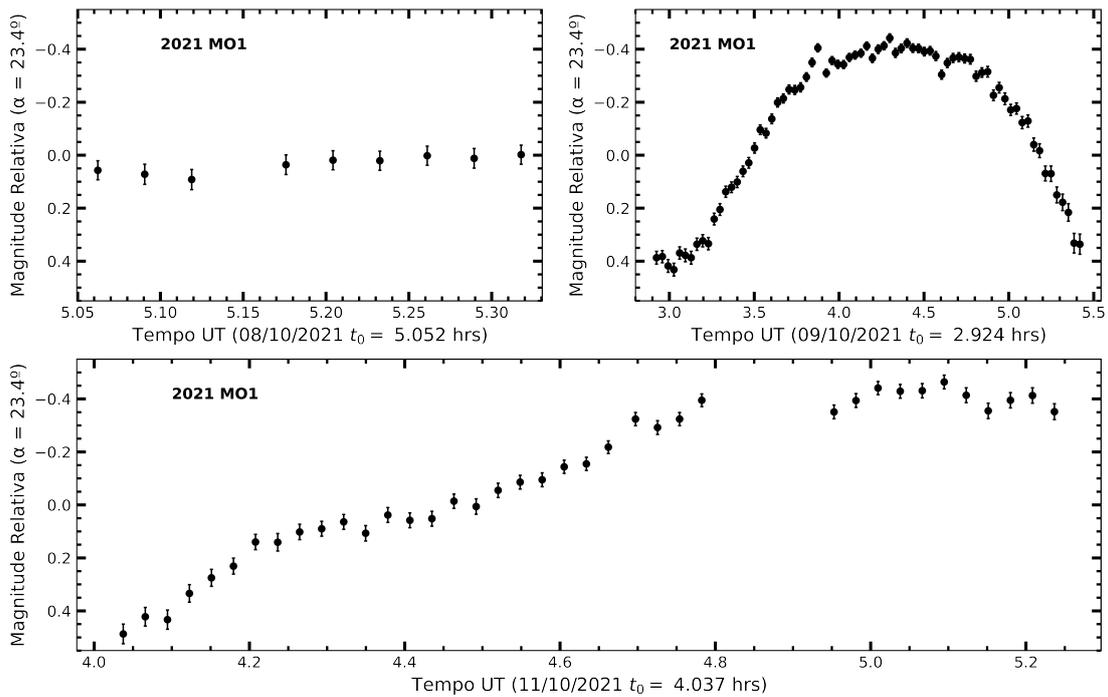


Figura 3.27: Curvas de luz do NEO 2021 MO1 de outubro de 2021.

A curva de luz composta, assim como o ajuste por série de Fourier são apresentados na Figura 3.28. O melhor ajuste foi obtido com polinômio de ordem 5 para um período de rotação de  $5,09 \pm 0,01$  horas, obtendo uma amplitude da curva de luz de 1,22 mag. O NEO 2021 MO1 apresenta a curva de luz com maior amplitude de nossa amostra, indicando que pode ser um objeto muito alongado. Apesar de apresentar dois máximos e dois mínimos bem definidos e baixa dispersão, a curva de luz não tem uma grande cobertura dos pontos. Por esse motivo, atribuímos um

índice de confiança U2 a esse período, sendo essa a única solução para período desse objeto até o momento da escrita desta dissertação.

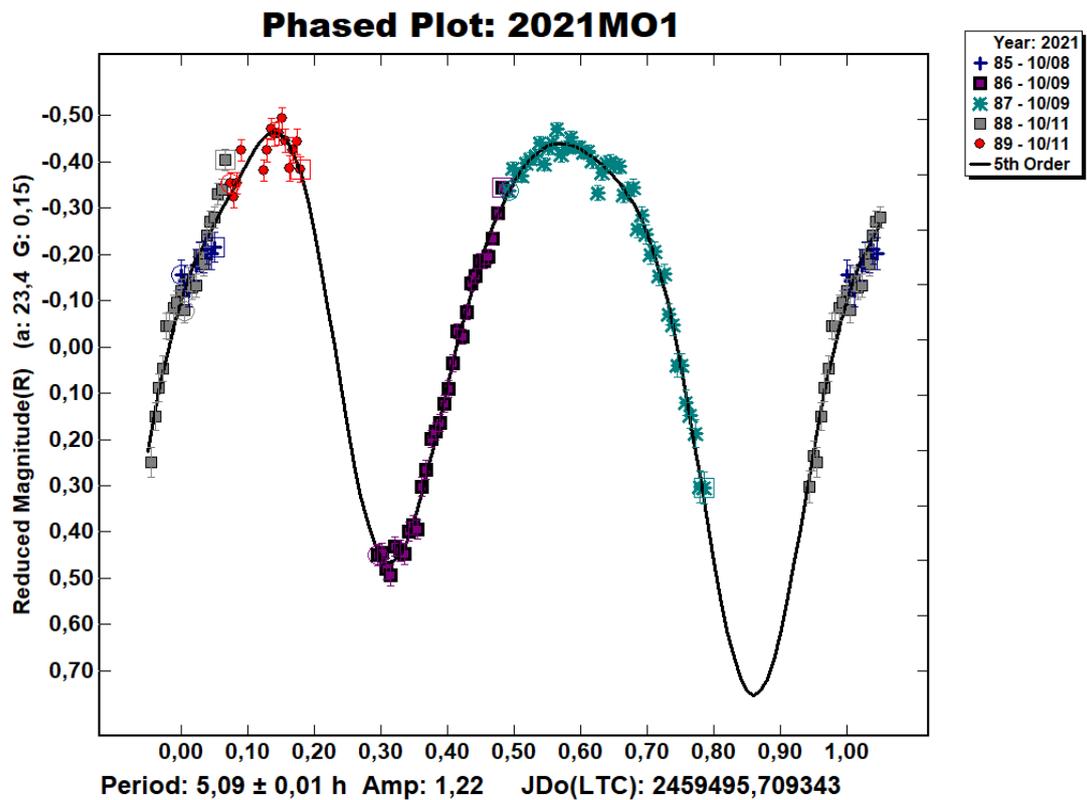


Figura 3.28: Curva de fase rotacional para o asteroide 2021 MO1 com os dados obtidos em outubro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

### 3.1.2 Curvas de luz incompletas ou com grande dispersão

#### 141484 (2002 DB4)

O asteroide 141484 (2002 DB4) é o único do subgrupo Aten de nossa amostra, tendo a menor órbita com semieixo maior de 0,86 UA, além de uma excentricidade de 0,37, inclinação de  $4,8^\circ$  e um diâmetro estimado de 1,03 km. Este NEO foi observado durante duas noites, 28 de fevereiro e 1 de março de 2021, num total de 1,69 horas, com poucos pontos obtidos, conforme mostrado na Figura 3.29. Na Tabela 3.10 são apresentadas as circunstâncias observacionais para este objeto. Não

Tabela 3.10: Dados observacionais do objeto 141484 (2002 DB4).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
28/02/2022	05 35 32,1	-20 27 25	0,55	0,483	1,170	56,6	17,2
01/03/2022	05 36 53,4	-19 58 12	1,15	0,488	1,171	56,7	17,2

foi possível compor uma curva de luz muito satisfatória com os dados sendo que o melhor ajuste, com polinômio de grau 4, forneceu um período de  $2,74 \pm 0,02$  horas (Figura 3.30). A curva apresenta pouca cobertura e uma amplitude de 0,25 mag. Esta é a primeira estimativa do período para este asteroide, um código de confiabilidade U1 foi atribuído ao período.

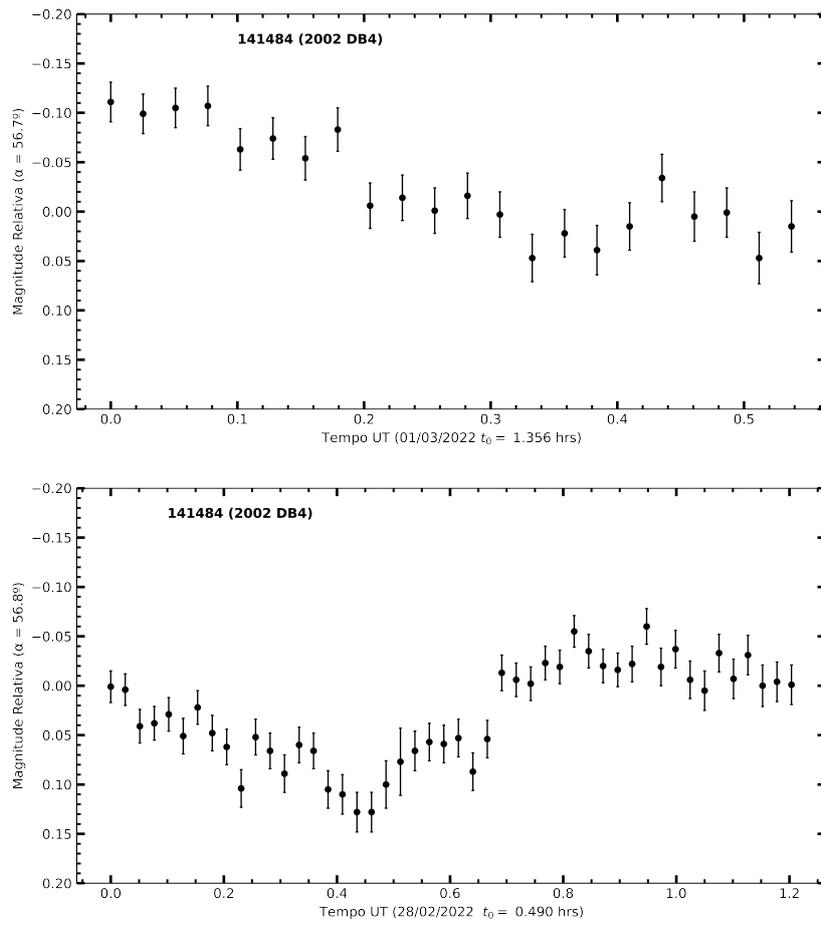


Figura 3.29: *Curvas de luz do NEO 141484 (2002 DB4) de fevereiro e março de 2022.*

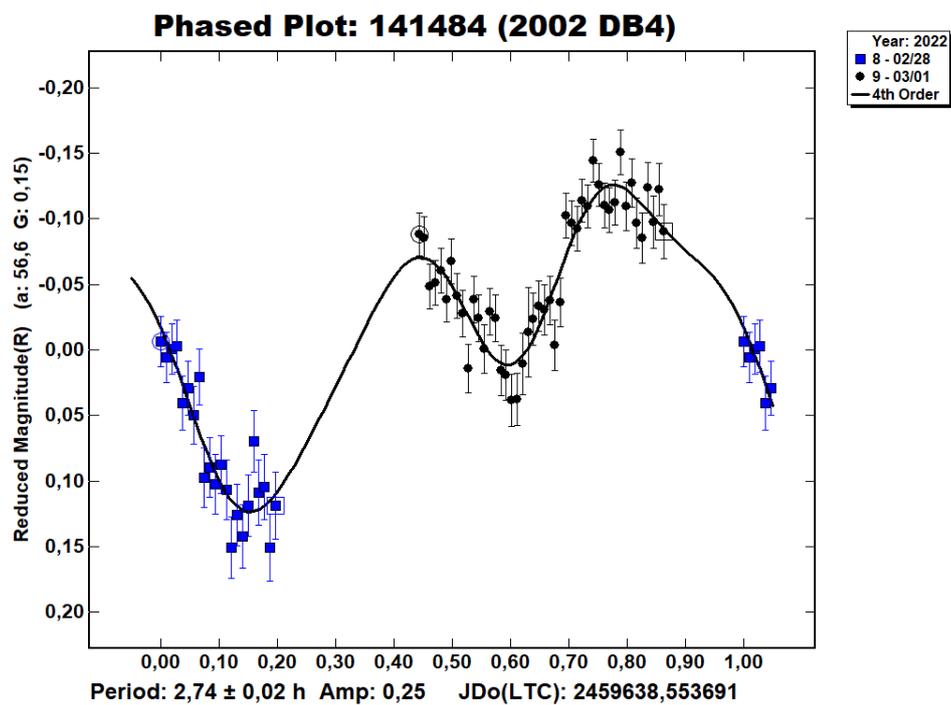


Figura 3.30: Curva de fase rotacional para o asteroide 141484 (2002 DB4) com os dados obtidos em fevereiro/março de 2022. A linha contínua representa o melhor ajuste.

### 318160 (2004 QZ2)

O asteroide 318160 (2004 QZ2) faz parte de subgrupo Amor e tem um diâmetro estimado de 400 metros. Esse foi um dos objetos para os quais não conseguimos obter dados suficiente para determinar o período rotacional. Inicialmente foi pedido tempo de observação no OASI para quatro noites da missão de dezembro de 2021, porém só foi possível obter dados com alguma qualidade durante a madrugada de 3 de dezembro. Devido às condições atmosféricas adversas e o campo com muitas estrelas não foi possível aproveitar os dados das demais noites. A Tabela 3.11 mostra as efemérides do alvo na noite que foi observado e na Figura 3.31 é apresentada a curva de luz obtida com os dados da observação. Essa curva de luz é um resultado

Tabela 3.11: Dados observacionais do objeto 318160 (2004 QZ2).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	Mag (V)
03/12/2021	08 51 25,6	+14 57 19	1,54	0,299	1,160	48,2	17,6

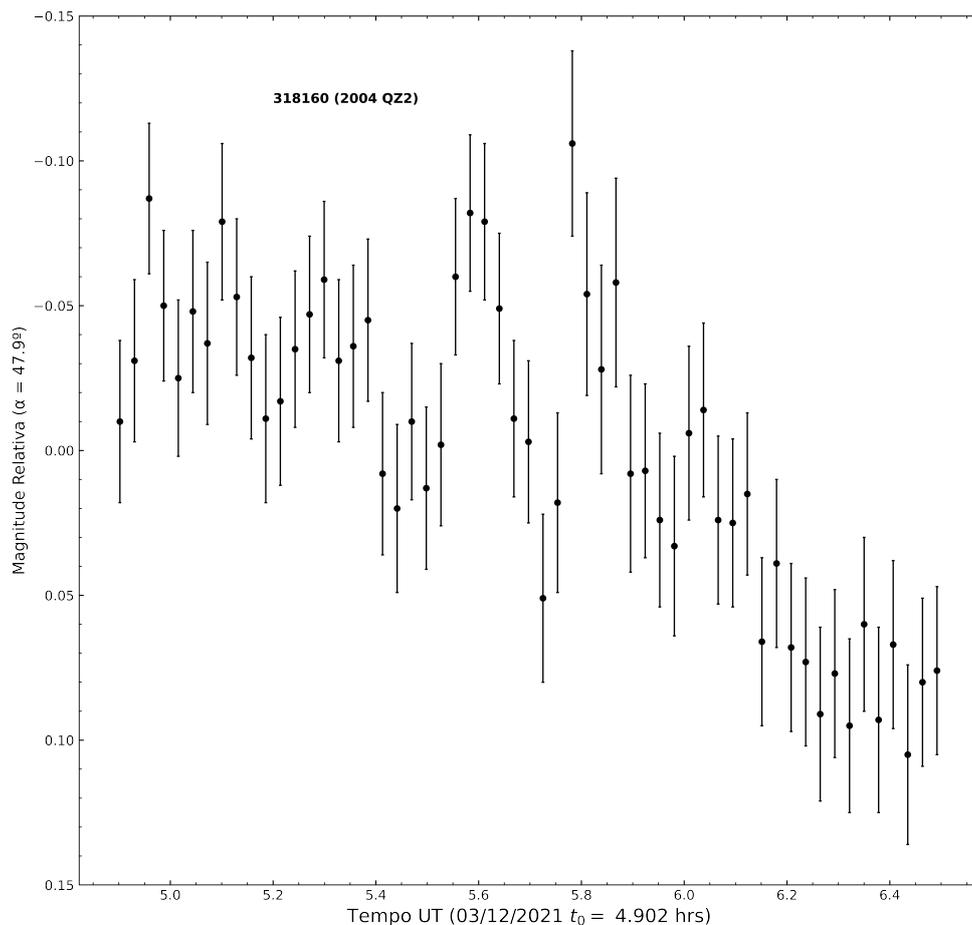


Figura 3.31: Curvas de luz do NEO 318160 (2004 QZ2) de dezembro de 2021.

de apenas 1,54 horas de observação mas podemos notar que durante esse intervalo

houve um aumento na magnitude relativa. Considerando que, em geral, a curva de luz apresenta dois máximos e dois mínimos, podemos estimar que o período de rotação do NEO 318160 (2004 QZ2) deva ser maior do que 6 horas. Até o momento da escrita desta dissertação não se encontrou período de rotação publicado para esse asteroide.

### 453707 (2010 XY72)

O objeto 453707 (2010 XY72) também é classificado como PHA, tem um diâmetro de 0,49 km e uma órbita com semieixo maior de 1,13 UA e excentricidade de 0,23. As observações deste NEO foram realizadas durante as noites 08, 09 e 10 de abril de 2021, durando 5 horas no total. As efemérides e a duração da observação para cada noite são dadas na Tabela 3.12 e as respectivas curvas de luz na Figura 3.32.

Tabela 3.12: Dados observacionais do objeto 453707 (2010 XY72).

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
08/04/2021	14 54 24,6	+12 40 43	1,78	0,347	1,305	24,8	18,2
09/04/2021	14 50 21,5	+12 12 24	0,79	0,339	1,303	23,7	18,1
10/04/2021	14 46 18,5	+11 43 32	2,47	0,333	1,301	22,7	18,8

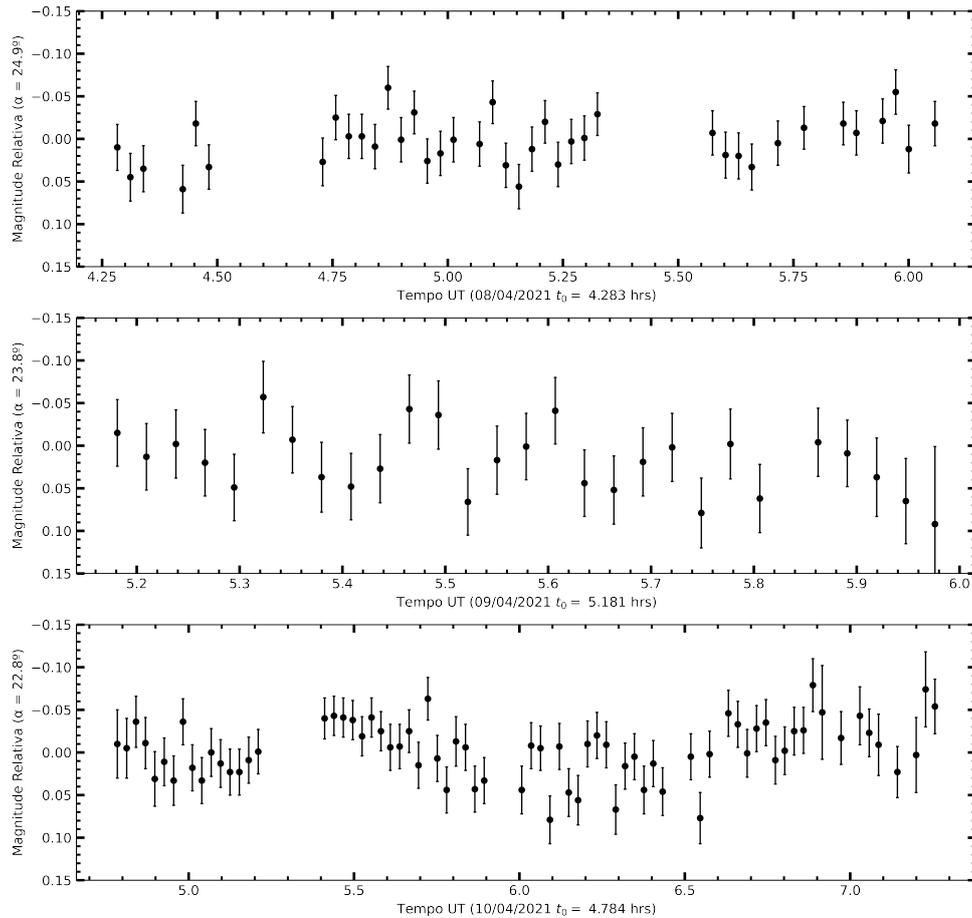


Figura 3.32: Curvas de luz do NEO 453707 (2010 XY72) de abril de 2021.

O melhor ajuste para curva de luz composta foi obtido com um período de

rotação de  $9,05 \pm 0,13$  horas e uma amplitude de 0,29 mag. Esta curva (Figura 3.33) é bastante irregular e apresenta uma dispersão considerável entre os pontos. Tal dispersão é causada pela presença de muitas estrelas no campo do asteroide, isso dificultou a obtenção das magnitudes instrumentais do asteroide. Por apresentar pouca cobertura e uma alta dispersão, atribuímos um índice de confiabilidade U1 a nossa solução, ou seja, esse período de rotação pode estar completamente errado.

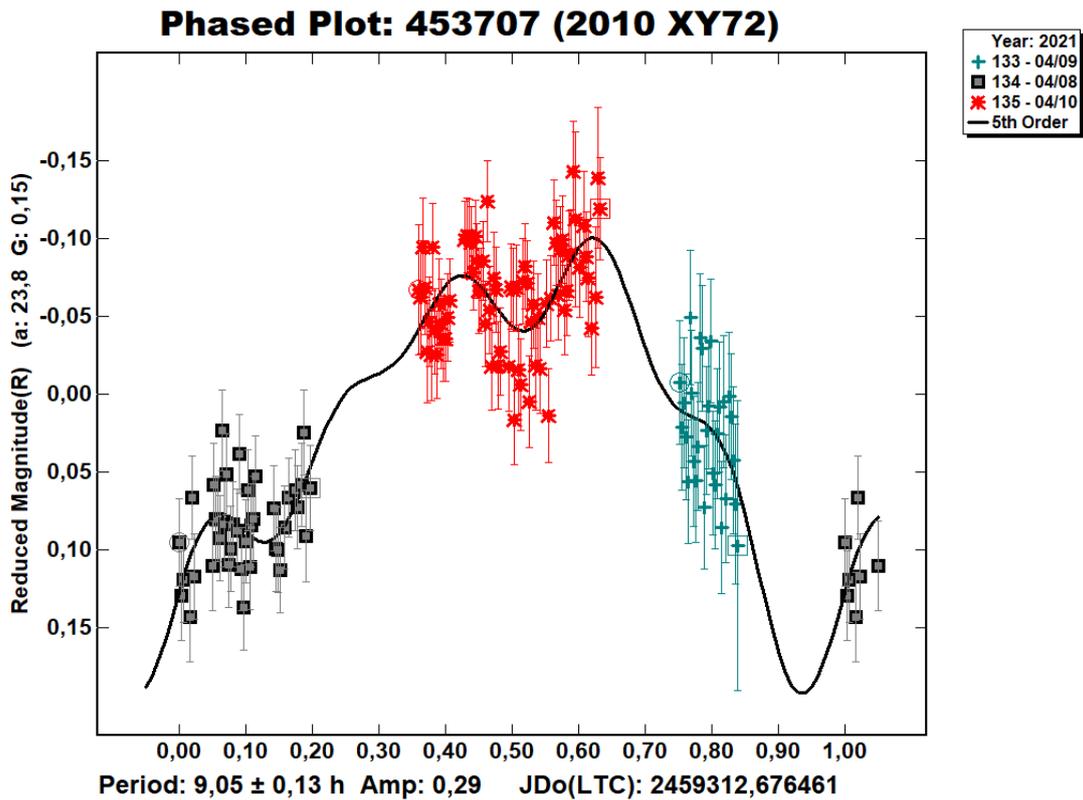


Figura 3.33: Curva de fase rotacional para o asteroide 453707 (2010 XY72) com os dados obtidos em abril de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.

Uma melhor solução foi determinada por Pravec (2021) que obteve um período de  $13,248 \pm 0,005$  horas com dados obtidos durante nove noites de observação. A Figura 3.34 mostra a curva de luz composta com uma amplitude de 0,16 mag. Foi atribuído um índice de confiança U3 a este período. Portanto, consideramos a solução de Pravec (2021) como sendo a mais correta devido à maior cobertura observacional.

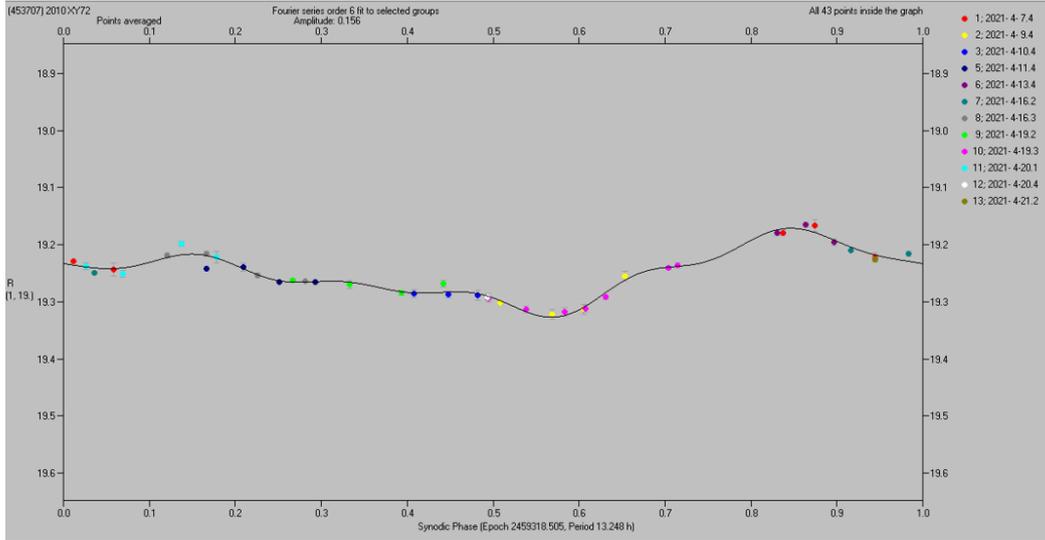


Figura 3.34: Curva de fase rotacional para o asteroide 453707 (2010 XY72) retirada de Pravec (2021).

## 2021 JQ24

O objeto 2021 JQ24 faz parte do subgrupo Amor e é o asteroide com maior semieixo de nossa amostra ( $a = 3,23$  UA), tem um diâmetro estimado de 1080 metros. As observações para este NEO ocorreram durante a missão observacional de agosto/setembro de 2021, entre os dias 31 de agosto e 2 de setembro como mostra a Tabela 3.13. A duração das observações somam um total de 4,82 horas. A Figura 3.35 apresenta as curvas de luz resultantes.

Tabela 3.13: Dados observacionais do objeto 2021 JQ24.

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	$r$ (UA)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Mag (V)
31/08/2021	02 51 22,1	-23 00 16	1,72	0,185	1.108	53,7	16,3
01/09/2021	02 59 34,8	-22 08 18	1,39	0,184	1.104	54,7	16,3
02/09/2021	03 07 10,1	-21 17 48	1,71	0,183	1.101	55,7	16,3

A curva de luz composta (ver Figura 3.36) apresenta algumas irregularidades na qual os pontos possuem um grau considerável de dispersão. Com esses dados ajustamos um período rotacional de  $5,65 \pm 0,02$  horas com uma amplitude de 0,17 mag. Devido a dispersão e baixa cobertura dos dados atribuímos um índice de confiabilidade U1 a esta solução.

Warner and Stephens (2022b) conseguiram determinar uma melhor solução devido a boa cobertura dos pontos, como visto na Figura 3.37. Com dados coletados durante 13 noites de observações, os autores determinaram um período de  $20.923 \pm 0,005$  horas e amplitude de 0,22 mag. Esse resultado difere bastante do nosso,

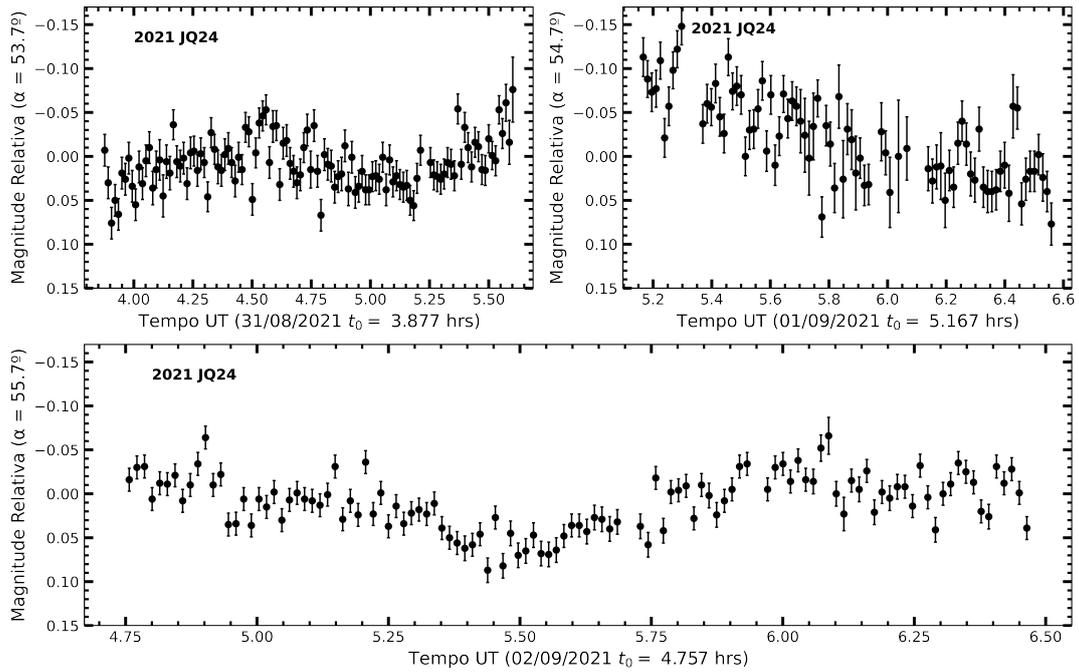


Figura 3.35: *Curvas de luz do NEO 2021 JQ24 de agosto/setembro de 2021.*

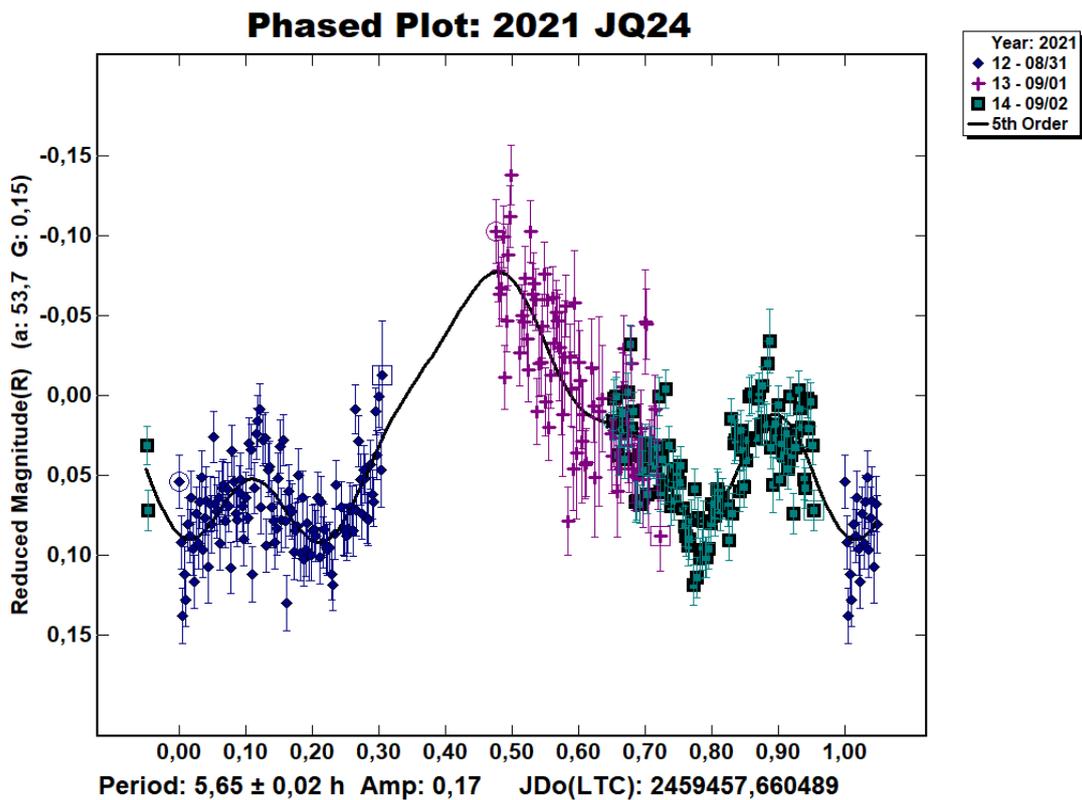


Figura 3.36: *Curva de fase rotacional para o asteroide 2021 JQ24 com os dados obtidos em agosto/setembro de 2021. A linha contínua representa o melhor ajuste.*

como mencionado acima, a qualidade na determinação do período de Warner and Stephens (2022b) é possível porque foram dedicadas mais noites de observação para

o objeto 2021 JQ24. Assim, consideramos a solução dos autores citados como o período correto para este NEO por apresentar uma maior cobertura observacional.

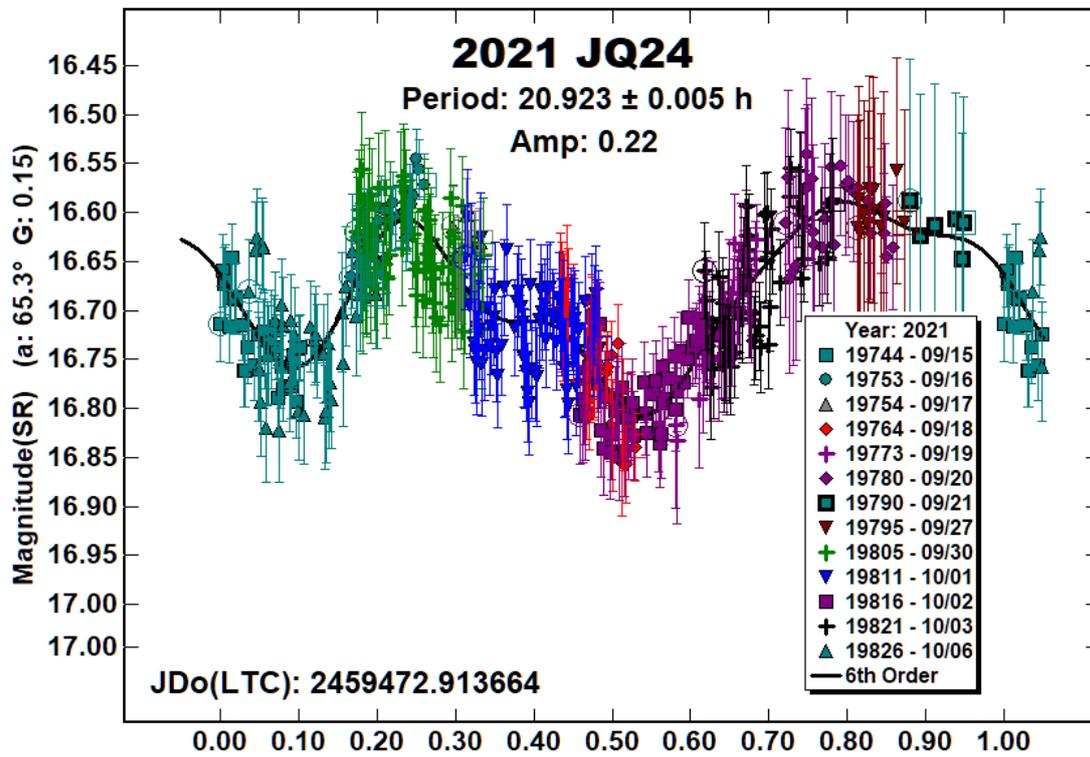


Figura 3.37: Curva de fase rotacional para o asteroide 2021 JQ24 retirada de Warner and Stephens (2022b).

## 2021 JT5

O NEO 2021 JT5 também faz parte do subgrupo Amor e possui um diâmetro estimado de 270 metros. Não conseguimos obter dados suficientes para ajustar ou obter alguma indicação do período de rotação deste objeto, pois só foi observado durante 22 minutos da noite de 13 de julho de 2021. Devido ao movimento rápido do asteroide no campo e a problemas relacionados às condições climáticas não foi possível obter mais dados. Na Tabela 3.14 estão as efemérides deste pequeno intervalo de observação.

Tabela 3.14: Dados observacionais do objeto 2021 JT5.

Data	AR (J2000)	DEC (J2000)	Tempo de Obs. (h)	$\Delta$ (UA)	r (UA)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	Mag (V)
13/07/2021	19 06 27,4	-58 13 53	0.37	0,063	1,068	34,6	16,3

Na curva de luz obtida (ver Figura 3.38) podemos notar uma queda de brilho suave, porém podendo ser apenas ruído. Portanto, não foi possível extrair mais informações sobre esse objeto assim como não foi encontrado o período de rotação na literatura.

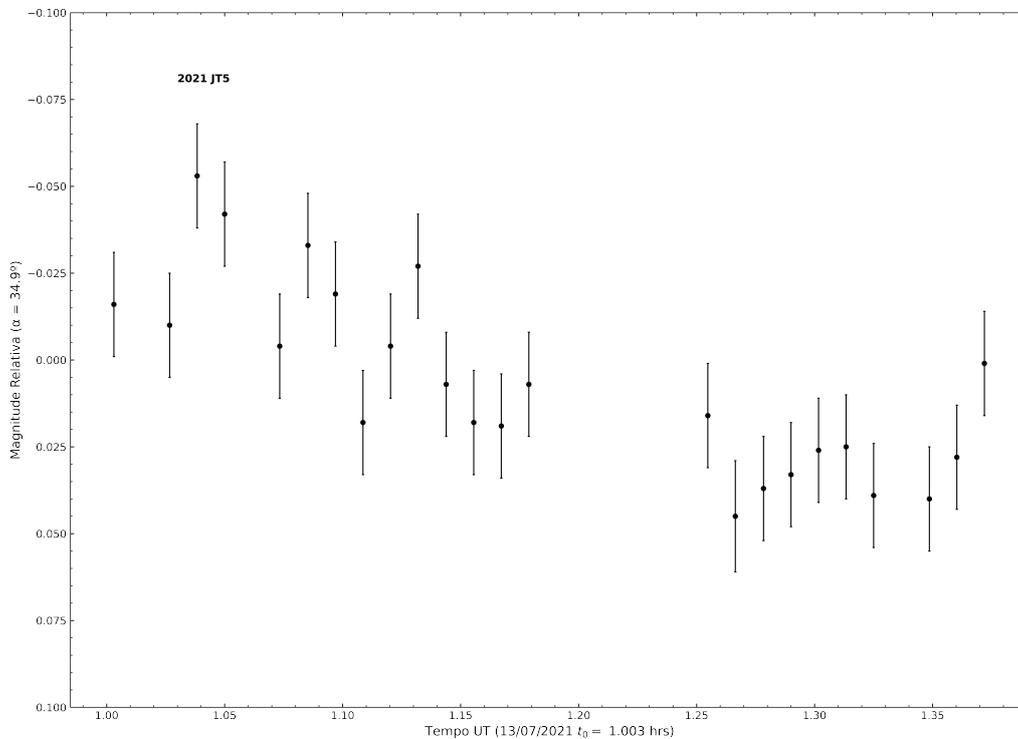


Figura 3.38: Curvas de luz do NEO 2021 JT5 de julho de 2021.

## 3.2 Resumo dos resultados

Conforme mostrado ao longo do trabalho, dos 23 objetos selecionados para observação apenas para 14 foi possível fazer alguma análise. Dentre esses NEOs, conseguimos determinar período rotacional com fator de confiança maior ou igual à U2 para 9 objetos, enquanto para 2 com fator U3, indicando uma boa qualidade dos resultados. Determinamos o período com índice de confiabilidade U1 para três objetos de nossa amostra, ou seja, esses resultados podem estar completamente errados. Para um objeto determinamos apenas um limite inferior de período enquanto para outro não foi possível obter nenhum indício. A Tabela 3.15 apresenta o resumo dos resultados obtidos nesse trabalho que estão organizados da seguinte forma: nome do objeto, período de rotação determinado através de série de Fourier, amplitude da curva de fase rotacional, índice de confiabilidade da solução obtida. Os resultados indicados por “\*” representam soluções obtidas a partir do *pipeline* IMPACTON.

Analisando os valores de períodos obtidos com índice de confiabilidade  $\geq$  U2, foi percebido que os resultados têm uma média de aproximadamente 4,66 horas e uma mediana de 4,27 horas. Esses valores estão de acordo com os valores médios de período de rotação para a população de rotadores rápidos que são de  $8,73 \pm 3,17$  horas e  $5,4 \pm 0,63$  horas, a média e mediana respectivamente.

Nossos resultados reforçam a importância de que para se obter um período de rotação com uma boa qualidade é essencial se ter uma boa cobertura da curva de luz. Muitas das nossas observações foram com poucas noites e também com muitas interrupções devido ao céu coberto por nuvens, campo com muitas estrelas, entre outros problemas. O que torna possível a determinação de períodos de rotação que apresentam código de confiabilidade U3 é a possibilidade de ter dados de mais de uma noite e com poucas interrupções. Para o objeto 2001 EC, que foi observado durante 2 noites com uma cobertura de 5,41 horas, conseguimos determinar o seu período rotacional com uma boa qualidade. Isso está de acordo com o estudo estatístico de Warner and Harris (2010), que mostraram que a precisão dos períodos determinados são melhores para objetos que possuem período  $\leq 8,0$  horas e amplitude da curva de fase  $\geq 0,3$  mag.

Para o outro objeto que atribuímos um código de confiança U3, o NEO 174050 (2002 CC19), obtivemos um período com uma ótima qualidade. Pois as observações ocorreram durante três noites o que possibilitou uma grande cobertura temporal. Apesar da amplitude ser menor que o valor estabelecido pelos autores foi possível obter um bom resultado, contribuindo com uma melhor solução para o período rotacional deste NEO.

Devido a problemas relacionados ao atraso da redução dos dados, a maioria dos objetos de nossa amostra já tem períodos publicados na literatura. Mesmo assim,

Tabela 3.15: Resumo dos resultados obtidos.

NEO	Período de rotação (horas)	Amplitude	Índice de confiabilidade
174050 (2002 CC19)	4,274 ± 0,021 4,22 ± 0,01*	0,21 0,093*	U3 U3
2001 EC	3,11 ± 0,01	0,59	U3
7753 (1988 XB)	6,66 ± 0,02	0,11	U2
162186 (1999 OP3)	10,37 ± 0,01	0,23	U2
332446 (2008 AF4)	3,2587 ± 0,0203	0,22	U2
450263 (2003 WD158)	1,948 ± 0,262	0,17	U2
2011 YQ10	4,7347 ± 0,0505 4,755 ± 0,002*	0,19 0,144*	U2 U2
2017 UW42	2,4668 ± 0,0043	0,13	U2
2021 MO1	5,09 ± 0,01	1,22	U2
141484 (2002 DB4)	2,74 ± 0,02	0,25	U1
318160 (2004 QZ2)	> 6,0	-	-
453707 (2010 XY72)	9,05 ± 0,13	0,29	U1
2021 JQ24	5,65 ± 0,02	0,17	U1
2021 JT5	-	-	-

\* Períodos de rotação determinados com *pipeline* IMPACTON

ainda conseguimos determinar períodos de rotação de forma inédita para os NEOs 2001 EC (U3), 2021 MO1 (U2), 2017 UW42 (U2) e 141484 (2002 DB4) (U1). Conseguimos ainda uma melhor solução para dois objetos com período determinados, os asteroides 174050 (2002 CC19) e 162186 (1999 OP3) e estabelecer um limite inferior de período para o objeto 318160 (2004 QZ2).

# Capítulo 4

## Conclusões e perspectivas futuras

No presente trabalho contribuimos para o aumento do conjunto de informações sobre as propriedades rotacionais dos NEOs, com dados obtidos através de um observatório astronômico dedicado a esse tipo de pesquisa. Os nossos dados somados com os trabalhos de Silva-Cabrera (2015), Monteiro (2016b), Perna et al. (2017), Monteiro et al. (2017), Monteiro et al. (2018a), Monteiro et al. (2018b) e Monteiro et al. (2020) totalizam a determinação de períodos de rotação para 143 pequenos corpos com dados obtidos exclusivamente do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). É importante mencionar que os resultados aqui apresentados são consequência direta de grandes esforços, coletivos e individuais, para a sustentabilidade e operacionalidade sistemática do OASI e do projeto IMPACTON. O funcionamento do OASI se deve a uma equipe preocupada em manter toda a infraestrutura do observatório em operação, possibilitando a realização das observações.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram realizadas 17 missões observacionais totalizando 58 noites de observação, muitas dessas observações foram marcadas por vários desafios e problemas que ajudaram para obtenção conhecimento e experiência relacionadas as técnicas e estratégias observacionais. Dos 23 NEOs escolhidos para serem estudados, obtivemos o período de rotação para 14, alguns com boa qualidade, sendo que para três pela primeira vez.

Vale ressaltar que ao longo deste trabalho buscamos encontrar uma metodologia de redução de dados que proporcionasse uma determinação de períodos rotacionais de NEOs rápida e eficiente. Isso porque, embora a seleção dos objetos levasse em conta como critério o fato do NEO não ter período publicado, para a maioria dos objetos quando finalmente conseguimos determinar seu período este já havia sido publicado por outros autores. Vimos que apesar das divergências entre os resultados do *MPO Canopus* e do *pipeline* IMPACTON, esta última ferramenta de processamento de dados possibilita uma mais rápida determinação de período, sendo portanto a que deve ser utilizada no futuro. Para tanto, como próximos passos, precisamos realizar uma investigação mais aprofundada sobre as divergências en-

contradas e buscar soluções. Com isso, teremos uma ferramenta que tornará mais rápida e eficiente a determinação de períodos rotacionais, facilitando a obtenção de propriedades rotacionais inéditas que permitam estudos estatísticos robustos sobre a evolução dos pequenos corpos. Portanto, pretendemos dar continuidade a esta pesquisa, aprimorando a determinação dos períodos de rotação, assim como obtendo outras propriedades físicas tais como a direção do eixo de spin, a forma e propriedades superficiais para objetos da importante população de NEOs.

# Referências Bibliográficas

- Adams, E., Smith, E., Fletcher, Z., O’Shaughnessy, D., Tropic, B., Volland, K., Roufberg, L., Huang, P., John, J., Abel, E., Ottman, G., Harrington-Duff, P., Atchison, J., Bellerose, J., Harvey, R., Reynolds, E., Cheng, A., Rivkin, A., and Chabot, N. (2022). Double Asteroid Redirection Test (DART) Planetary Defense Mission: First Months in Flight and Readiness for Impact. In *LPI Contributions*, volume 2678 of *LPI Contributions*, page 2953.
- Ahmad, I. I. (1954). Photometric Studies of Asteroids.IV. The Light-Curves of Ceres, Hebe, Flora, and Kalliope. *Astronomical Journal*, 120:551.
- Alfvén, H. (1964). On the Origin of the Asteroids. *Icarus*, 3(1):52–56.
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., and Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208:1095–1108.
- Anders, E. (1965). Fragmentation history of asteroids. *Icarus*, 4(4):399–408.
- Arcoverde, P. (2018). Curvas de fase de objetos em órbita próxima da Terra como parte do projeto IMPACTON. *Dissertação de Mestrado*.
- Arcoverde, P., Rondón, E., Monteiro, F., Pereira, W., Ieva, S., Lazzaro, D., Michtchenko, T., Evangelista, M., Michimani, J., Mesquita, W., Corrêa, T., Dotto, E., Giunta, A., Di Paola, A., Medeiros, H., Carvano, J., and Rodrigues, T. (2022). Physical properties of NEOs derived from their phase curves. *Icarus* (sumetido). *Icarus* (sumetido).
- Arenou, F., Luri, X., Babusiaux, C., Fabricius, C., Helmi, A., Muraveva, T., Robin, A. C., Spoto, F., Vallenari, A., Antoja, T., Cantat-Gaudin, T., Jordi, C., Leclerc, N., Reylé, C., Romero-Gómez, M., Shih, I. C., Soria, S., Barache, C., Bossini, D., Bragaglia, A., Breddels, M. A., Fabrizio, M., Lambert, S., Marrese, P. M., Massari, D., Moitinho, A., Robichon, N., Ruiz-Dern, L., Sordo, R., Veljanoski, J., Eyer, L., Jasiewicz, G., Pancino, E., Soubiran, C., Spagna, A., Tanga, P., Turon, C., and Zurbach, C. (2018). Gaia Data Release 2. Catalogue validation. *A&A*, 616:A17.

- Bailey, S. I. and Pickering, E. C. (1913). Observations of Eros and other asteroids. *Annals of Harvard College Observatory*, 72(5):165–189.
- Bertin, E. and Arnouts, S. (1996). SExtractor: Software for source extraction. *A&A*, 117:393–404.
- Binzel, R. P., DeMeo, F., Morbidelli, A., Carry, B., Granvik, M., Burbine, T., Vernazza, P., and Birlan, M. (2018). Near-Earth Asteroid and Meteorite Source Regions: The Big Picture. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*, volume 50 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 105.03.
- 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., Farinella, P., Zappala, V., and Cellino, A. (1989). Asteroid rotation rates: distributions and statistics. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, pages 416–441.
- Binzel, R. P., Lupishko, D. F., Di Martino, M., Whiteley, R. J., and Hahn, G. J. (2002). Physical properties 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 255–271.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, *University of Arizona Press, Tucson*, pages 243–256.
- Bottke, W. and Morbidelli, A. (2017). Using the Main Asteroid Belt to Constrain Planetesimal and Planet Formation. In Elkins-Tanton, L. T. and Weiss, B. P., editors, *Planetesimals: Early Differentiation and Consequences for Planets*, pages 38–68.
- 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.

- Brasser, R., Duncan, M. J., and Levison, H. F. (2006). Oort Cloud Formation in the Primordial Solar Environment. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38*, volume 38 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 54.02.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158:146–177.
- Carrasco, J. M., Evans, D. W., Montegriffo, P., Jordi, C., van Leeuwen, F., Riello, M., Voss, H., De Angeli, F., Busso, G., Fabricius, C., Cacciari, C., Weiler, M., Pancino, E., Brown, A. G. A., Holland, G., Burgess, P., Osborne, P., Altavilla, G., Gebran, M., Ragaini, S., Galletti, S., Cocozza, G., Marinoni, S., Bellazzini, M., Bragaglia, A., Federici, L., and Balaguer-Núñez, L. (2016). Gaia Data Release 1. Principles of the photometric calibration of the G band. *A&A*, 595:A7.
- DeMeo, F. E., Burt, B. J., Marsset, M., Polishook, D., Burbine, T. H., Carry, B., Binzel, R. P., Vernazza, P., Reddy, V., Tang, M., Thomas, C. A., Rivkin, A. S., Moskovitz, N. A., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2022). Connecting asteroids and meteorites with visible and near-infrared spectroscopy. *Icarus*, 380:114971.
- Donnison, J. R. and Wiper, M. P. (1999). Bayesian statistical analysis of asteroid rotation rates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 302(1):75–80.
- Farinella, P., Paolicchi, P., and Zappala, V. (1981). Analysis of the spin rate distribution of asteroids. *A&A*, 104(1):159–165.
- Fish, F. F. (1967). Angular momenta of the planets. *Icarus*, 7(1-3):251–256.
- Fulchignoni, M., Barucci, M. A., di Martino, M., and Dotto, E. (1995). On the evolution of the asteroid spin. *A&A*, 299:929.
- Gehrels, T. (1956). Photometric Studies of Asteroids. V. The Light-Curve and Phase Function of 20 Massalia. *Astronomical Journal*, 123:331.
- Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., and Michel, P. (2018). Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus*, 312:181–207.
- Groeneveld, I. and Kuiper, G. P. (1954a). Photometric Studies of Asteroids. I. *Astronomical Journal*, 120:200.

- Groeneveld, I. and Kuiper, G. P. (1954b). Photometric Studies of Asteroids. I. *Astronomical Journal*, 120:200.
- Groeneveld, I. and Kuiper, G. P. (1954c). Photometric Studies of Asteroids. II. *Astronomical Journal*, 120:529.
- Harris, A. W. and Burns, J. A. (1979). Asteroid rotation I. Tabulation and analysis of rates, pole positions and shapes. *Icarus*, 40(1):115–144.
- Harris, A. W. and Lupishko, D. F. (1989). Photometric lightcurve observations and reduction techniques. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, pages 39–53.
- Harris, A. W. and Young, J. W. (1983). Asteroid rotation IV. 1979 observations. *Icarus*, 54(1):59–109.
- Hartmann, W. K. and Larson, S. M. (1967). Angular momenta of planetary bodies. *Icarus*, 7(1-3):257–260.
- Holsapple, K. (2014). Reconstructing the spin distributions of main-belt asteroids. In Muinonen, K., Penttilä, A., Granvik, M., Virkki, A., Fedorets, G., Wilkman, O., and Kohout, T., editors, *Asteroids, Comets, Meteors 2014*, page 219.
- Howell, S. B. (1992). Astronomical CCD observing and reduction techniques. In *Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques*, volume 23 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*.
- 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. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513(2):3104–3112.
- Ivanova, M., Badyukov, D., Ryazantsev, K., Lorenz, C., Demidova, S., Sadilenko, D., Artemieva, N., Korochantsev, A., Skripnik, A., Ivanov, A., and Nazarov, M. (2013). Fall, searching and first study of the chelyabinsk meteorite. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, pages 5366–.
- Kuiper, G. P., Fujita, Y., Gehrels, T., Groeneveld, I., Kent, J., van Biesbroeck, G., and van Houten, C. J. (1958). Survey of Asteroids. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 3:289–427.

- 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.
- Lazzaro, D., Silva, J. S., Rodrigues, T., Márcio Carvano, J., Roig, F., Souza, R. P. e., and IMPACTON Team (2015). The IMPACTON Project: Pole and Shape of Seven near-Earth Asteroids. In *IAU General Assembly*, volume 29, page 2256779.
- Longo, G. (2007). The Tunguska Event. In *Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach*, pages 303–330.
- Lupishko, D. and Di Martino, M. (1998). Physical properties of near-earth asteroids. *Planetary and space science*, 46:47–74.
- Lupishko, D. F., Kruglyi, Y. N., and Shevchenko, V. G. (2007). Photometry of asteroids. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 23(6):235–244.
- Marsset, M., DeMeo, F. E., Burt, B., Polishook, D., Binzel, R. P., Granvik, M., Vernazza, P., Carry, B., Bus, S. J., Slivan, S. M., Thomas, C. A., Moskovitz, N. A., and Rivkin, A. S. (2022). The Debaised Compositional Distribution of MITHNEOS: Global Match between the Near-Earth and Main-belt Asteroid Populations, and Excess of D-type Near-Earth Objects. *The Astronomical Journal*, 163(4):165.
- Martino, S., Tancredi, G., Monteiro, F., Lazzaro, D., and Rodrigues, T. (2019). Monitoring of Asteroids in Cometary Orbits and Active Asteroids. *Planetary and Space Science*, 166:135–148.
- McAdoo, D. C. and Burns, J. A. (1973). Further Evidence For Collisions Among Asteroids. *Icarus*, 18(2):285–293.
- Medeiros, H., Lazzaro, D., and Kodama, T. (2018). Spin distribution of asteroids - Statistical model revisited. *Planetary and Space Science*, 160:77–83.
- Michel, P. (2013). Physical properties of Near-Earth Objects that inform mitigation. *Acta Astronautica*, 90(1):6–13.
- Michel, P., Migliorini, F., Morbidelli, A., and Zappalá, V. (2000). The Population of Mars-Crossers: Classification and Dynamical Evolution. *Icarus*, 145:332–347.
- Monteiro, F. (2016a). Determinação das Propriedades Rotacionais de Asteroides em Órbitas Próximas da Terra Através do Projeto IMPACTON. *Dissertação de Mestrado*.

- Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Rondon, E., Souza, R., Rodrigues, T., and Lazzaro, D. (2018a). 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. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(4):5403–5414.
- Monteiro, F., Silva, J. S., Lazzaro, D., Arcoverde, P., Medeiros, H., Rodrigues, T., and Souza, R. (2018b). Rotational properties of near-earth objects obtained by the IMPACTON project. *Planetary and Space Science*, 164:54–74.
- Monteiro, F., Silva, J. S., Lazzaro, D., Arcoverde, P., Medeiros, H., Souza, R., and Rodriggues, T. (2017). Lightcurve Analysis for Ten Near-Earth Asteroids. *Minor Planet Bulletin*, 44(1):20–22.
- Monteiro, F., Silva, J. S., Tamayo, F., Rodrigues, T., and Lazzaro, D. (2020). Shape model and spin direction analysis of PHA (436724) 2011 UW158: a large superfast rotator. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 495(4):3990–4005.
- Monteiro, F. V. d. M. (2016b). *DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ROTACIONAIS DE ASTEROIDES EM ÓRBITAS PRÓXIMAS DA TERRA Através DO PROJETO IMPACTON*. PhD thesis, Observatório Nacional, Curso de Pós-Graduação em Astronomia, Rio de Janeiro.
- 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., Walsh, K. J., O’Brien, D. P., Minton, D. A., and Bottke, W. F. (2015). The Dynamical Evolution of the Asteroid Belt. In Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., editors, *Asteroids IV*, University of Arizona Press, Tucson, pages 493–507.
- Nugent, C. R., Mainzer, A., Bauer, J., Cutri, R. M., Kramer, E. A., Grav, T., Masiero, J., Sonnett, S., and Wright, E. L. (2016). NEOWISE Reactivation Mission Year Two: Asteroid Diameters and Albedos. *The Astronomical Journal*, 152(3):63.

- Perna, D., Barucci, M. A., and Fulchignoni, M. (2013). The near-Earth objects and their potential threat to our planet. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21:65.
- Perna, D., Popescu, M., Monteiro, F., Lantz, C., Lazzaro, D., and Merlin, F. (2017). An investigation of the low- $\Delta V$  near-Earth asteroids (341843) 2008 EV5 and (52381) 1993 HA. Two suitable targets for the ARM and MarcoPolo-M5 space missions. *A&A*, 597:A57.
- Pravec, P. (2020). "prepublished" periods of asteroids. <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt> Acessado: 2022-07-20. *Ondrejov NEO Photometric Program*.
- Pravec, P. (2021). "prepublished" periods of asteroids. <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt> Acessado: 2022-07-20. *Ondrejov NEO Photometric Program*.
- Pravec, P. and Harris, A. W. (2000). Fast and Slow Rotation of Asteroids. *Icarus*, 148(1):12–20.
- Pravec, P., Harris, A. W., Kušnirák, P., Galád, A., and Hornoch, K. (2012). Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations. *Icarus*, 221(1):365–387.
- Pravec, P., Harris, A. W., and Michalowski, T. (2002). Asteroid Rotations. In *Asteroids III*, pages 113–122.
- Pravec, P., Harris, A. W., Vokrouhlický, D., Warner, B. D., Kušnirák, P., Hornoch, K., Pray, D. P., Higgins, D., Oey, J., Galád, A., Gajdoš, Š., Kornoš, L., Világi, J., Husárik, M., Krugly, Y. N., Shevchenko, V., Chiorny, V., Gaftonyuk, N., Cooney, W. R., Gross, J., Terrell, D., Stephens, R. D., Dyvig, R., Reddy, V., Ries, J. G., Colas, F., Lecacheux, J., Durkee, R., Masi, G., Koff, R. A., and Goncalves, R. (2008). Spin rate distribution of small asteroids. *Icarus*, 197(2):497–504.
- Raymond, S. N. and Nesvorný, D. (2022). Origin and Dynamical Evolution of the Asteroid Belt. In *Vesta and Ceres. Insights from the Dawn Mission for the Origin of the Solar System*, page 227.
- 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. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484:2499–2513.

- Rondón, E., Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J. M., Roig, F., Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Silva, J., Jasmim, F., De Pra, M., 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. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132:12.
- Rubincam, D. P. and Bottke, W. F. (2000). The YORP Effect and the Spin of Small Asteroids. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 1399.
- 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. In Boyce, J. M., Collins, P. S., and Dwornik, S. E., editors, *Reports of Planetary Geology Program*, pages 3–5.
- Silva, J. S. and Lazzaro, D. (2015). Pole and shape of (1459) Magnya, the outer main belt basaltic asteroid. *A&A*, 580:A70.
- Silva-Cabrera, J. S. (2015). Propriedades rotacionais, direção do polo e modelo de forma de asteroides em órbita próxima da Terra. Primeiros resultados do projeto IMPACTON. *Tese de Doutorado*.
- Souza, R. A. P. (2002). Determinação do Período Rotacional de Pequenos Asteroides. *Dissertação de Mestrado*.
- Souza-Feliciano, A. C., De Prá, M., Pinilla-Alonso, N., Alvarez-Candal, A., Fernández-Valenzuela, E., De León, J., Binzel, R., Arcoverde, P., Rondón, E., and Evangelista, M. S. (2020). Analysis in the visible range of NASA Lucy mission targets: Eurybates, Polymele, Orus and Donaldjohanson. *Icarus*, 338:113463.
- Tedesco, E. F. and Zappala, V. (1980). Rotational properties of asteroids: Correlations and selection effects. *Icarus*, 43(1):33–50.
- Thirouin, A., Moskovitz, N. A., Binzel, R. P., Christensen, E. J., DeMeo, F. E., Person, M. J., Polishook, D., Thomas, C. A., Trilling, D., Willman, M. C., Burt, B., Hinkle, M. L., and Pugh, T. (2018). The Mission Accessible Near-Earth Objects Survey: Four Years of Photometry. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 239(1):4.
- Tholen, D. J. and Whiteley, R. J. (1998). Results From NEO Searches At Small Solar Elongation. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abs-*

*tracts #30*, volume 30 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 16.04.

- Tody, D. (1986). The IRAF Data Reduction and Analysis System. In Crawford, D. L., editor, *Instrumentation in astronomy VI*, volume 627 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 733.
- Trilling, D. E., Mommert, M., Hora, J., Chesley, S., Emery, J., Fazio, G., Harris, A., Mueller, M., and Smith, H. (2016). NEOSurvey 1: Initial Results from the Warm Spitzer Exploration Science Survey of Near-Earth Object Properties. *The Astronomical Journal*, 152(6):172.
- 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. *The Astronomical Journal*, 140(3):770–784.
- Vokrouhlický, D., Milani, A., and Chesley, S. R. (2000). Yarkovsky Effect on Small Near-Earth Asteroids: Mathematical Formulation and Examples. *Icarus*, 148(1):118–138.
- von Oppolzer, E. (1901). Notiz betr. Planet (433) Eros. *Astronomische Nachrichten*, 154(14):297.
- Warner, B. (2018). MPO Software, MPO Canopus v10.7.7.0. *Bdw Publishing*.
- Warner, B. D. (2006). A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis. In *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis*.
- Warner, B. D. and Harris, A. W. (2010). Potential Biases In Future Asteroid Lightcurve Surveys. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, volume 42 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 46.09.
- Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. (2009). The asteroid lightcurve database. *Icarus*, 202(1):134–146.
- Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. (2009). The asteroid lightcurve database. Acesso em 20 de junho de 2022. <http://www.MinorPlanet.info/php/lcdb.php>. *Icarus*, 202(1):134–146.

- Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. (2021). Asteroid Lightcurve Database (LCDB) Bundle V4.0. Acesso em 20 de junho de 2022. <http://www.MinorPlanet.info/php/lcdb.php>. *NASA Planetary Data System*, page 10.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2019). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2018 July-September. *Minor Planet Bulletin*, 46(1):27–40.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2021a). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2020 September to 2021 January. *Minor Planet Bulletin*, 48(2):170–179.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2021b). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2021 January - March. *Minor Planet Bulletin*, 48(3):294–302.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2022a). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2021 August-October. *Minor Planet Bulletin*, 49(1):16–22.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2022b). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at the Center for Solar System Studies: 2021 October-December. *Minor Planet Bulletin*, 49(2):83–89.
- Warner, B. D. and Stephens, R. D. (2022c). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis At The Center For Solar System Studies: 2022 February-March. *Minor Planet Bulletin*, 49(3):176–179.
- Wetherill, G. W. (1967). Collisions in the Asteroid Belt. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 72:2429.
- Winter, O. C., Mendes, L. L., and Araujo, R. A. N. (2021). On the Dynamical Evolution and Lifetime of NEAs. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 53 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 107.02.
- Wood, X. H. J. and Kuiper, G. P. (1963). Photometric Studies of Asteroids. *Astronomical Journal*, 137:1279.
- Zolotarev, R. V. and Shustov, B. M. (2021). On the Dynamic Evolution of the Population of Near-Earth Asteroids. *Astronomy Reports*, 65(6):518–527.