

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**TIAGO FRANCISCO LINS LEAL PINHEIRO**

**Estudo da estabilidade de anéis em exoplanetas**

Guaratinguetá

2019

**Tiago Francisco Lins Leal Pinheiro**

**Estudo da estabilidade de anéis em exoplanetas**

Trabalho Mestrado apresentado ao Conselho da Pós Graduação em Mestrado em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Mestre em Mestrado em Física .

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Rafael Sfair

Guaratinguetá  
2019

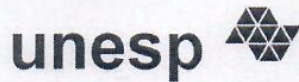


P654E Pinheiro, Tiago Francisco Lins Leal  
Estudo da estabilidade de anéis em exoplanetas / Tiago Francisco Lins Leal Pinheiro – Guaratinguetá, 2019.  
57 f : il.  
Bibliografia: f. 54

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.  
Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair

1. Exoplanetas. 2. Satélites. 3. Métodos de simulação. I. Título.

CDU 523.4(043)



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

TIAGO FRANCISCO LINS LEAL PINHEIRO


ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM FÍSICA”

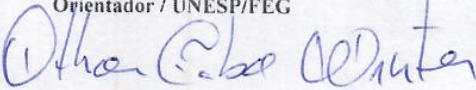
PROGRAMA: FÍSICA

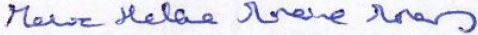
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. RAFAEL SFAIR DE OLIVEIRA  
Orientador / UNESP/FEG

  
Prof. Dr. OTHON CABO WINTER  
UNESP/FEG

  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA HELENA MOREIRA MORAIS  
UNESP/IGCE-RIO CLARO

Março de 2019

## **DADOS CURRICULARES**

### **TIAGO FRANCISCO LINS LEAL PINHEIRO**

**NASCIMENTO** 03/06/1993 - Lorena / SP

**FILIAÇÃO** Roberto Carlos Pinheiro  
Jurema Lins Leal Pinheiro

**2012 / 2016** Bacharelado em Física  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho"

**2017 / 2019** Mestrado em Física  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho"

*Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto e Jurema,  
aos meus irmãos, Maria Teresa, Daniel, Gabriel e Rafael,  
a minha sobrinha Giovanna Maria e amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos, ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Sfair que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais Roberto Carlos Pinheiro e Jurema Lins Leal Pinheiro, e irmãos Maria Teresa, Daniel, Gabriel e Rafael, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos meus amigos que estiveram comigo durante todo o período da graduação e do mestrado, Victor Lattari, Luana Liberato e Gustavo Madeira.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.



Este trabalho contou com o apoio da(s) seguinte(s) entidade(s):

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior

UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

*A medida do amor é amar sem medida.  
(Santo Agostinho)*

## RESUMO

A estrela PDS110 (HD290380) com idade aproximada de 10 milhões de anos, apresentou dois eclipses ocorridos em 2008 e 2011, com duração de 25 dias e queda de aproximadamente 26 % na luminosidade da estrela. Outra estrela J1407 (1SWASP J140747.93-39454.6) apresentou uma complexa série de eclipses com 56 dias de duração. As hipóteses dadas a esses dois eventos foram a passagem da borda de um disco planetário ou um disco circunstelar de uma anã marrom. Neste trabalho foi analisada a natureza desses possíveis sistemas de anéis ao redor de um exoplaneta gigantesco não observado, que teria ocultado essas estrelas. Para estudar o sistema PDS110b, devido ao grande número de variáveis envolvidas ainda desconhecidas neste problema como, por exemplo, massa e excentricidade do planeta, inclinação e extensão do disco, foram criados diversos modelos numéricos considerando a interação gravitacional entre a estrela, o planeta e a partícula do anel. Desta forma foi possível refinar os intervalos dos parâmetros predeterminados através dos dados observacionais, que seriam compatíveis com o eclipse observado. Os resultados indicam que provavelmente os eclipses teriam ocorrido por um planeta com massa entre 50 e 70  $m_{Jup}$ , em uma órbita quase circular ( $e_{PDS110b} < 0,05$ ) e o semieixo maior de 2 ua. O sistema de anel ao redor do PDS110b, teria uma extensão radial de  $\sim 0,2$  ua, significativamente maior que o raio de Roche do planeta e um forte indicio da presença de satélites. Ao analisar o sistema de anéis do J1407b, após a exclusão de algumas propostas do corpo eclipsante ser uma estrela secundária, os estudos propõem um extenso sistema de anéis, formado por no mínimo 37 diferentes anéis e uma possível exolua com massa proporcional a Terra, localizada em uma falha observada em 0,4 ua de distância do planeta. Uma abordagem semelhante a realizada no sistema PDS110b foi aplicada também para o J1407b, assumindo a hipótese que eclipse se deu pela passagem de um exoplaneta gigante gasoso de 10 a 100  $m_{Jup}$  e semieixo maior  $> 3$  ua. Os melhores resultados mostram que J1407b possivelmente tem uma massa maior que 50  $m_{Jup}$ ,  $a_{J1407b} = [4 - 5,6]$  ua, período orbital entre 8,3 e 11,6 anos e  $e_{J1407b} = [0,3 - 0,4]$ . O anel tem 0,3 ua de extensão radial, muito maior que o raio de Roche do planeta, o que colabora com a explicação da formação de satélites nas suas falhas.

**PALAVRAS CHAVES:** Planeta. Sistema de anéis, Satélites e Simulações numéricas.

## ABSTRACT

The star PDS110 (HD290380) is approximately 10 millions years old, underwent two eclipses observed in 2008 and 2011 in the surrounding 25 days with a depth 26 % in the star's luminosity. Other star J1407 (1SWASP J140747.93-39454.6) underwent a complex series of eclipses that lasted 56 days. The hypothesis could explain those events are the transit of the edge one disc circumplanetary or circumstellar (brown dwarf). In this work, we analyzed the nature of a possible ring system around these giant exoplanets would have occulted the star. To study the PDS110b system, in the reason to the large number of unknown variable involved in this problem like: mass and the eccentricity of the PDS110b, inclination and size of the disc, we created a several numerical models considering the only gravitational interactions between the star, the planet and the particle of the ring. We managed to restrict the interval of the parameters predetermined by the observational data. The best models indicate a planet's mass between  $[50 - 70] m_{Jup}$ , in the quasi circular orbit ( $e_{PDS110b} < 0,05$ ) and semi major axis of 2 ua. The ring system around the PDS110b, probably has  $\sim 0,2$  ua of radial extension. To analyze the ring system around J1407b, after excluded some proposals of the eclipsing body to be a secondary star, the studies propose an extensive ring system with radius of 0,6 ua, formed by at least 37 different rings and one possible exomoon with mass proportional to Earth, located at the gap observed at 0.4 ua from the planet. A similar approach to that carried out in the PDS110b system we also applied to J1407b, assuming the hypothesis that eclipse happened by the transit of an gaseous giant exoplanet from 10 to 100  $m_{Jup}$  and a semi major axis  $a > 2,2$  ua. The best show that J1407b probably has a mass  $> 50 m_{Jup}$ ,  $a_{J1407b} = [4 - 5,6]$  ua, orbital period between 8,3 and 11,6 years and  $e_{J1407b} = [0,2 - 0,4]$ . The ring has 0.3 ua of radial extension, much larger than the radius of Roche of the planet, which collaborates with the explanation of the formation of satellites in their gaps.

**KEYWORDS:** Planet, Ring system, Satellite and Numerical Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Efeito durante o trânsito do planeta com e sem anel na velocidade radial (figura superior) e na curva de luz (figura inferior) da estrela. . . . .	16
Figura 2	Esquemática do Sistema de anéis planetários dos quatro planetas gigantes do Sistema Solar. . . . .	19
Figura 3	Curva de luz da Ocultação de Chariklo. . . . .	20
Figura 4	Cordilheira ao redor do equador de Japeto. . . . .	22
Figura 5	Esquemática do sistema PDS110. . . . .	26
Figura 6	Modelo do sistema de anéis do PDS110b. . . . .	26
Figura 7	Curvas da massa do exoplaneta PDS110b em função de sua excentricidade e de $\xi$ . . . . .	28
Figura 8	Fluxograma da criação das simulações numéricas para o sistema PDS110b . . . . .	30
Figura 9	Fluxograma da análise das simulações numéricas para o sistema PDS110b . . . . .	31
Figura 10	Diagrama de condição inicial do caso do anel prógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). . . . .	32
Figura 11	Diagrama de condição inicial do caso do anel retrógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). . . . .	33
Figura 12	Curva do tempo teórico do eclipse de cada conjunto com inclinação $0^\circ$ das partículas em função da velocidade do PDS110b no periastro. . . . .	34
Figura 13	Curva do tempo teórico do eclipse de cada conjunto com inclinação $180^\circ$ das partículas em função da velocidade do PDS110b no periastro. . . . .	35
Figura 14	Efeito do arrasto de Poyting Robertson sobre as partículas do anel, com densidade de $1 \text{ gcm}^{-3}$ (em azul), $2 \text{ gcm}^{-3}$ (em vermelho) e $5 \text{ gcm}^{-3}$ (em verde). . . . .	36
Figura 15	Excentricidade das partículas em função de seu semieixo maior em relação ao planeta. . . . .	38
Figura 16	Gráfico da excentricidade de uma partícula em função do tempo. . . . .	38
Figura 17	Curva de luz da estrela J1407 observada em 2007. . . . .	41
Figura 18	Esquemática das simulações realizada para o sistema J1407b. . . . .	42
Figura 19	Curva da excentricidade do J1407b em função do seu período máximo. . . . .	43
Figura 20	Curvas da massa do exoplaneta J1407b em função de sua excentricidade de $\xi$ . Caso com semieixo maior do planeta está em 3 ua. . . . .	44
Figura 21	Curvas da massa do exoplaneta J1407b em função de sua excentricidade de $\xi$ . Caso com semieixo maior do planeta está em 4 ua. . . . .	45
Figura 22	Curvas da massa do exoplaneta J1407b em função de sua excentricidade de $\xi$ . Caso com semieixo maior do planeta está em 5 ua. . . . .	45
Figura 23	Fluxograma da criação das simulações numéricas para o sistema J1407b. . . . .	47
Figura 24	Fluxograma da análise das simulações numéricas para o sistema J1407b . . . . .	48
Figura 25	Diagrama de condição inicial do caso do anel prógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). . . . .	49
Figura 26	Diagrama de condição inicial do caso do anel retrógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). . . . .	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa do tamanho do raio do anel, supondo que o eclipse tenha ocorrido no periastro. . . . .	27
Tabela 2 – Parâmetros do planeta e do anéis dos melhores conjuntos obtidos por meio das simulações numéricas. . . . .	37
Tabela 3 – Tabela de valores da massa do satélite em função da massa do J1407b, capaz de gerar uma falha de 0,027 ua de largura. . . . .	42
Tabela 4 – Parâmetros do planeta e do anel prógrado dos conjuntos obtiveram o tempo teórico do eclipse próximo ou até mesmo compatível (em negrito) com o observado. . . . .	51
Tabela 5 – Parâmetros do planeta e do anel retrógrado dos conjuntos obtiveram o tempo teórico do eclipse próximo do observado. . . . .	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Detecção de Exoanéis: Sistemas de anéis planetários além do Sistema Solar	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1	Sistemas de anéis em corpos menores	19
2.2	Chariklo	19
2.3	Haumea	20
2.4	Chiron	21
2.5	Região dos anéis mais densos do Sistema Solar	21
2.6	Outros possíveis corpos com anéis no Sistema Solar	22
2.7	A busca para encontrar os primeiros sistemas de anéis extrassolares	23
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE ANÉIS AO REDOR DE PDS110b</b>	<b>25</b>
3.1	Interpretação do Eclipse	25
3.2	Estrutura do sistema de anéis de PDS110b	27
<b>3.2.1</b>	<b>Descrição dos modelos dos exoanéis de PDS110b</b>	<b>29</b>
3.3	Análise das simulações numéricas	30
<b>3.3.1</b>	<b>Efeito do Arrasto de Poynting Robertson</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Discussão</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE ANÉIS AO REDOR DE J1407b</b>	<b>39</b>
4.1	Interpretação do eclipse	39
<b>4.1.1</b>	<b>Modelando um cenário de um disco circumplanetário gigantesco</b>	<b>40</b>
4.2	Descrição dos modelos do sistema de anéis do J1407b	46
4.3	Determinando os parâmetros para o sistema J1407b	47
<b>4.3.1</b>	<b>Discussão</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAS E ETAPAS FUTURAS</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as descobertas de sistemas de anéis em corpos celestes, além dos quatro planetas gigantes do Sistema Solar, levam a refletir se tais sistemas são mais comuns do que se pensava. Por intermédio dos estudos desses exoanéis, espera-se compreender se os sistemas de anéis obedecem algum processo físico fundamental em comum, apesar das diferenças de origem e características. Em geral, as partículas de um anel estão sujeitas a muitas perturbações, como as forças de maré, radiação da estrela, o achatamento do planeta e as forças eletromagnéticas (BURNS; HAMILTON; SHOWALTER, 2001). Estas forças podem atuar isoladamente ou em conjunto, alterando de forma significativa a evolução orbital dos anéis.

Os sistemas de anéis planetários também sofrem com as interações entre as partículas e os satélites do planeta. Esses processos conseguem moldar as estruturas radiais, verticais e azimutais dos anéis. Acredita-se que este seja um mecanismo responsável pela formação de alguns anéis de Júpiter (BURNS et al., 1999), Saturno (Showalter et al. (1985), Hedman et al. (2010)), Urano e Netuno (PORCO, 1991). Desta forma, os satélites atuam como fontes ou removedores de partículas dos anéis. Tais efeitos são amplificados devido a ressonância, repetitivas perturbações que ocorrem em certas frequências.

O estudo dos sistemas de anéis planetários com diferentes características possibilita diversas aplicações na área da dinâmica orbital. Devido à sua semelhança com outros sistemas astrofísicos, os anéis podem ajudar no melhor entendimento da formação de planetas e satélites (Sicardy et al., 2016) e até mesmo de estruturas de galáxias (SHU; YUAN; LISSAUER, 1985).

Desde a revelação do primeiro exoplaneta 51 Pegasi b (MAYOR; QUELOZ, 1995), mais de 6.000 novos planetas já foram encontrados em aproximadamente 5.000 diferentes sistemas estelares (LESIA, 2018). Junto ao aperfeiçoamento das tecnologias de observação, a atenção dos astrônomos está atualmente em encontrar anéis planetários ou até mesmo luas nesses planetas.

Schlichting e Chang (2011) estudaram a natureza de sistemas de anéis hipotéticos que poderiam existir em exoplanetas com o semieixo maior de no máximo 1 ua. O principal obstáculo para a detecção desses exoanéis (considerando que os anéis estão no mesmo plano equatorial desses exoplanetas), está na sua baixa obliquidade, o ângulo entre o eixo de rotação do planeta e a normal com seu plano orbital. Os resultados de Schlichting e Chang (2011) mostraram ainda que devido a proximidade desses planetas com a sua estrela hospedeira, eles tem uma temperatura muito acima de fusão da água e conseqüentemente os anéis seriam constituídos por partículas rochosas, portanto a presença de partículas de gelo seriam improváveis. Seus resultados mostraram que 86 dos 88 exoplanetas avaliados podem possuir anéis rochosos com densidade entre 3 e 5  $g/cm^3$ . Devido à densidade das partículas rochosas ser maior do que a do gelo, os anéis nesses sistemas deveriam ser mais compactos. Dos planetas, 24% possuem condições para manter um anel de tamanho proporcionalmente equivalente ao de Saturno ( $Raio_{Roche}/Raio_{exoplaneta} > 2$ ). Para efeito de comparação, aplicando essa mesma relação em Saturno, tem-se o valor  $\sim 2$ .

Uma motivação para a detecção de exoplanetas é encontrar vida como se conhece aqui na Terra, para isto o planeta precisaria estar dentro da zona habitável. Região na qual o nível de radiação emitida



pela estrela permite a existência de água líquida. Além disso, o planeta precisa ser terrestre (TUSNSKI; VALIO, 2011). Como a maioria dos planetas extrassolares são gigantes gasosos, é possível imaginar um cenário, se for detectada a presença de sistemas de anéis neles, que nas falhas desse anéis possam conter exoluas rochosas e elas poderiam abrigar água líquida.

### 1.1 DETECÇÃO DE EXOANÉIS: SISTEMAS DE ANÉIS PLANETÁRIOS ALÉM DO SISTEMA SOLAR

A descoberta da maior parte dos exoplanetas aconteceu por meio de técnicas fotométricas e espectroscópicas de trânsito, que permitem determinar as características da atmosfera, densidade e até o tamanho dos planetas. A presença de anéis causariam quedas adicionais na curva de luz da estrela que geralmente possuem um mesmo padrão a cada trânsito. Já as luas teriam diferentes posições relativas com o planeta em vários trânsitos, a não ser que elas estejam em ressonância orbital entre a estrela e a órbita planetária (HELLER, 2017).

Segundo Barnes e Fortney (2004), para um planeta com um sistema de anéis parecido como de Saturno, ser detectado por meio de trânsito, requer-se alta precisão fotométrica, possível de ser observado somente por missões espaciais como a missão Kepler.

A sonda espacial Kepler foi lançada em 2009 e ficou operando até 2018 com o intuito de descobrir na Via Láctea exoplanetas como a Terra ou menores dentro da zona habitável. A missão foi importante para o avanço nas descobertas de novos planetas, sendo que até hoje o Kepler já encontrou mais de 2.300 exoplanetas e existem ainda mais de 2.400 candidatos (NASA, 2018b).

Tusnski e Valio (2011) analisaram os critérios para reconhecer exoanéis e exoluas através de métodos fotométricos. Segundo o modelo dos autores o trânsito de um planeta como de Saturno em torno de uma estrela como o Sol. Pode acentuar a queda produzida na curva de luz em 50%. Os resultados mostraram que o mesmo sistema de anéis planetários, poderiam ser detectados através da sonda Kepler, porém o mesmo sistema poderia ser confundido como um simples planeta se forem utilizados os dados da missão CoRoT.

Um sistema de anel planetário assim como o de Saturno pode conter potencialmente uma área superficial maior do que o planeta hospedeiro. Esses sistemas produzem curvas de luz bem diferentes daquelas de um planeta simples, podendo assim serem facilmente detectados. Porém, é possível que a orientação e o tamanho do anel favoreçam para que a fração da luz estelar bloqueada por ele assemelhe-se a um planeta esférico (HEISING; MARCY; SCHLICHTING, 2015).

No Sistema Solar não existe nenhum planeta rochoso com anéis, contudo acredita-se não ser esta a realidade dos exoplanetas. Esses exoanéis poderiam ser notados por meio de efeitos sutis na entrada e saída do trânsito. Porém, segundo Piro (2018) tais efeitos são difíceis de medir e requerem alta precisão fotométrica ou espectroscópica, de tal forma que não sejam confundidos com o raio planetário.

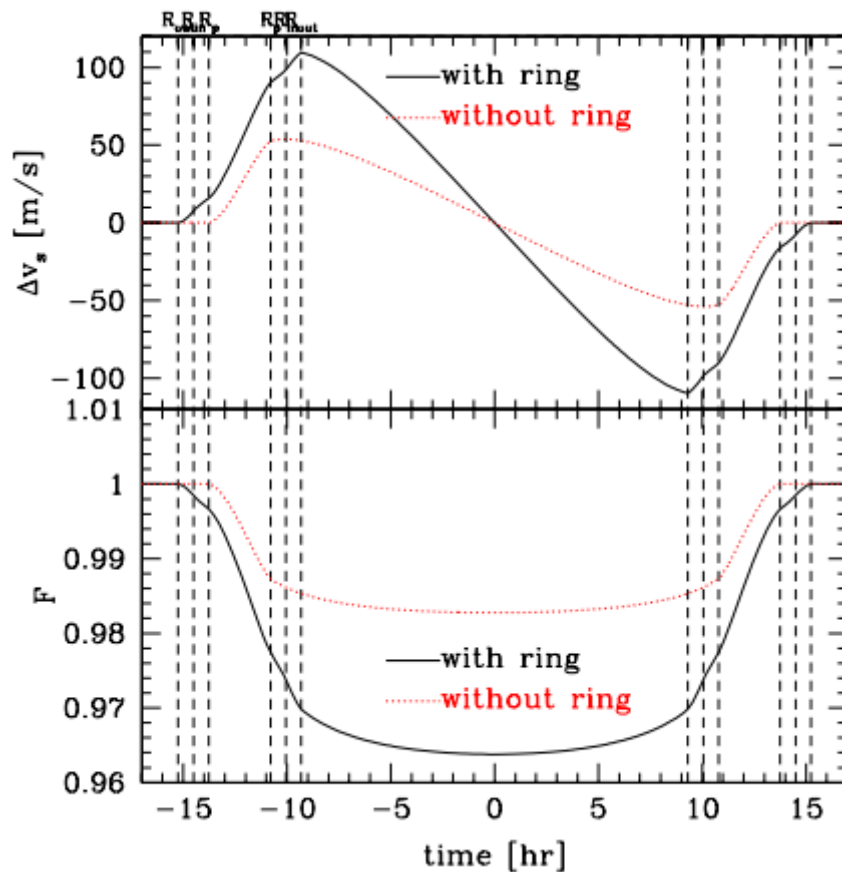
Outro efeito produzido pelo anel na curva de luz é um formato mais arredondado no instante da entrada e da saída (como ilustra a Figura 1). Ambos fatores são proporcionais a opacidade do anel, portanto dependente da composição de suas partículas (TUSNSKI; VALIO, 2011).

Barnes e Fortney (2004) estudaram um fenômeno importante que ocorre com a curva de luz de um sistema de anel planetário. A luz da estrela, ao invés de ser bloqueada pelas partículas do anel, pode

ser difratada na direção do observador, consequentemente ao invés da magnitude da estrela diminuir, temporariamente observa-se um aumento dela.

A presença dos anéis também pode ser notada na espectroscopia da estrela pela intensificação dos efeitos de Rossiter-McLaughlin. Se, durante o trânsito o planeta e o anel orbitassem a estrela na mesma direção de sua rotação, eles bloqueariam parte do desvio para o azul da velocidade radial da estrela durante metade do eclipse e na outra metade parte do desvio para o vermelho, porém se o planeta e o anel estiverem transladando a estrela no sentido contrário de sua rotação, eles primeiro bloqueariam o desvio para o vermelho (HELLER, 2017). A Figura 1 extraído de Ohta, Taruya e Suto (2008) ilustra um modelo teórico de como comportaria a curva de luz e a sua velocidade radial da estrela mediante a passagem de um planeta com e sem anel.

Figura 1 – Efeito durante o trânsito do planeta com e sem anel na velocidade radial (figura superior) e na curva de luz (figura inferior) da estrela.



fonte: Ohta, Taruya e Suto (2008).

O eclipse ocorrido com a estrela J1407 em 2007 e, posteriormente, outros dois eclipses que aconteceram com a estrela PDS110 nos anos de 2008 e 2011 são as primeiras evidências da existência de um sistema de anéis extrasolar. Porém as grandes incertezas observacionais não conseguiram determinar diversas características desses corpos elipsantes, nem mesmo se os trânsitos foram devido ao um disco em torno de um exoplaneta gigante ou uma estrela anã marrom.

O objetivo proposto neste trabalho foi analisar a natureza dos dois mais plausíveis exoplanetas candidatos a conter um sistemas de anéis, o PDS110b e J1407b, onde foram investigados os seus parâmetros de tamanho, massa, excentricidade, inclinação.

Devido ao imenso número de variáveis envolvidas, foram realizadas diversas simulações numéricas, utilizando integrador Rebound (REIN; LIU, 2012). Cada simulação analisava uma diferente configuração para o sistema, a fim de verificar as melhores condições para estabilidade do anel. Os capítulos deste trabalho foram organizados da seguinte forma:

No capítulo 2 foi realizado uma revisão bibliográfica dos sistemas de anéis conhecidos no Sistema Solar, desde os quatro planeta gigantes até anéis em corpos pequenos, como Centauros e planetas anões. Também é relatado outros possíveis candidatos no Sistema Solar que já abrigaram ou abrigam sistemas de anéis. Na última seção aborda os primeiros trabalhos já realizados, na busca de sistemas de anéis extrassolares.

O capítulo 3 estuda de forma detalhada o sistema dos anéis do PDS110b, com uma breve resumo do sistema e do eclipse observado referente ao assunto. Em seguida na seção 3.2 serão apresentados os modelos propostos nas simulações numéricas, analisando a interação gravitacionais entre a estrela PDS110, o pressuposto planeta e as partículas do seu anel. Com os resultados foi possível estabelecer as características do exoplaneta e do sistema de anéis compatíveis com o eclipse observados (seção 3.3). Na subseção 3.3.1 foi determinado o raio de Roche e o efeito do arrasto de Poyting-Robertson sobre as partículas.

O capítulo 4 teve como objeto de estudo o planeta J1047b. Primeiramente foi realizada uma descrição bibliográfica do sistema, seguida dos modelos numéricos criados. Na seção 4.3 verificou-se as melhores condições para estabilidade do anel. Por fim, no último capítulo estão as conclusões gerais dos resultados obtidos e as etapas futuras do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Todos os quatro planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis ao seu redor com diferentes características. Os maiores e os mais densos são os de Saturno e Urano, já os de Júpiter e Netuno são mais tênues e formados basicamente por poeira (PATER; LISSAUER, 2015).

O maior, o mais massivo e o mais conhecido sistema de anéis são os de Saturno, visto pela primeira vez por Galileo Galilei. Na época da descoberta ele o interpretou com se fosse um sistema de três corpos. Mais tarde em 1.655, Christiaan Huygens conseguiu observar que aquilo descoberto por Galileu, na verdade era um anel sólido e rígido de Saturno. Somente em 1.895, J. C. Maxwell demonstrou matematicamente, que este anel não era sólido e sim formado por inúmeras partículas (NASA, 2018a).

Atualmente sabe-se que o sistema de Saturno constitui uma estrutura de anéis bem complexa. No passado os estudos ficavam restritas às observações com telescópios terrestre, porém em consequência das imagens das sondas Pioneer 11, Voyager I e II e a Cassini, ocorreu um grande avanço nas descobertas e compreensão da dinâmica desses anéis.

O vasto sistema de anéis de Saturno tem uma extensão radial de 480.000 km do planeta. Os quatro anéis mais densos (C,B,A e F) estão dentro do limite de Roche ( $\sim 2,5$  raios do planeta) e são compostos basicamente por gelo de tamanho desde centímetros até metros (NICHOLSON et al., 2008). Entre os três primeiros anéis (D,C,B) nenhum satélite ainda foi encontrado, somente a partir do anel A. Algumas dessas luas são responsáveis pela formação dos anéis menos densos, formado por partículas de poeira micrométricas (HYODO; OHTSUKI, 2015). Além dos anéis principais, também existem outros anéis menos densos, formados por partículas de poeira, como os anéis G e E (o mais extenso dos anéis) (ESPOSITO, 2002).

Em março de 1.977 os astrônomos James L. Elliot, Edward W. Dunham e Douglas J. Mink através da ocultação da estrela SAO 158687 por Urano, notaram cinco quedas no brilho da estrela antes e depois do eclipse, concluindo assim a existência de anéis (ELLIOT; DUNHAM; MINK, 1977).

As imagens da sonda Voyager II e do Telescópio Espacial Hubble, detectaram a presença de novos anéis e luas em Urano. Ao todo são conhecidos treze anéis ( $\zeta$ , 6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $\epsilon$ ,  $\nu$  e  $\mu$ ) formados principalmente por um material escuro, de tamanho macroscópico ou até mesmo poeira, a maioria deles são levemente excêntricos e inclinados, isto devido a sua interação gravitacional com suas luas (ESPOSITO, 2002).

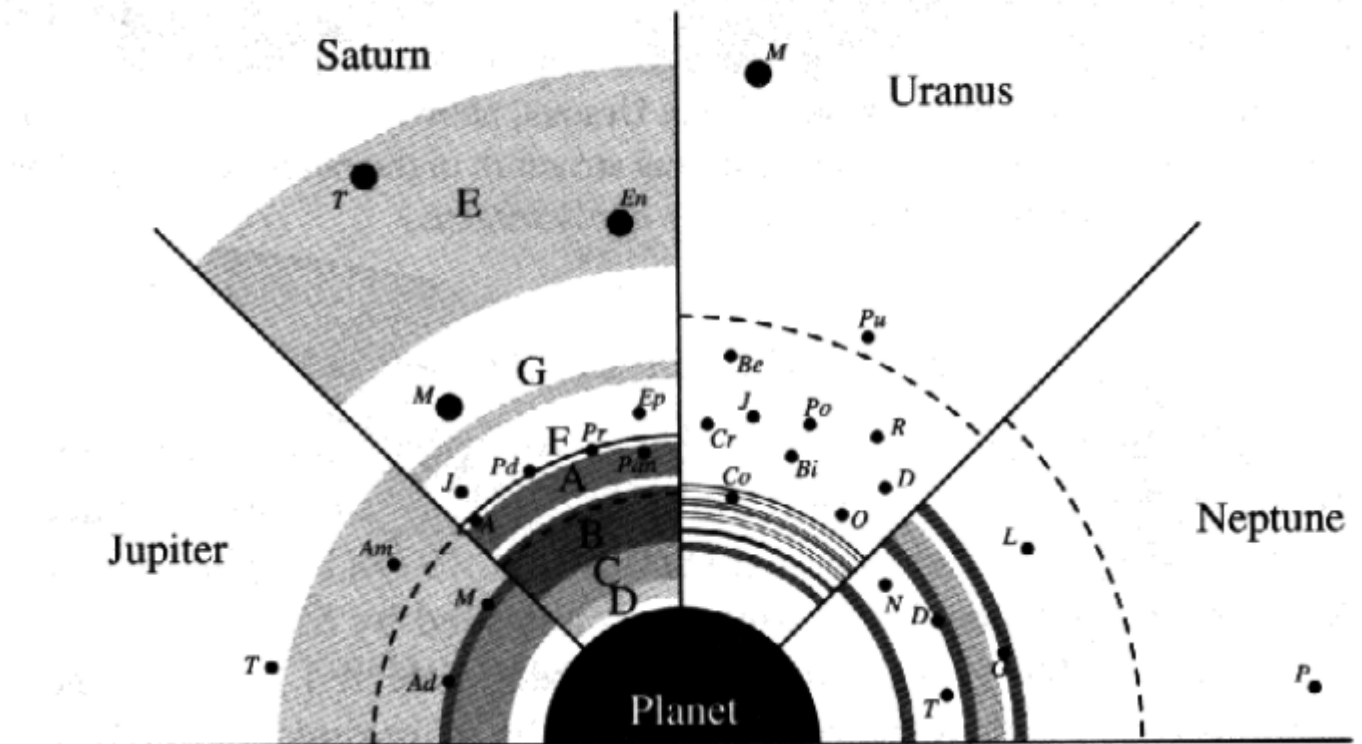
Os anéis de Júpiter foram descobertos por meio das imagens da sonda Voyager I em 1.979 (SMITH et al., 1979), e possuem baixa profundidade óptica, motivo da dificuldade de observá-los. O anel mais próximo de Júpiter (Halo) possui um formato toroidal, sendo composto basicamente por poeira, também é bem espesso, com  $\sim 20.000$  km de largura vertical. Já o anel principal tem um tamanho radial de 129.130 km e largura de  $\sim 7.000$  km. Por fim, o anel Gossamer também é formado por partículas micrométricas e está ligado às luas Amalteia e Tebe (MURRAY; DERMOTT, 1999).

A sonda Voyager II observou pela primeira vez o sistema de anéis de Netuno, formado por cinco anéis tênues e de poeira: Galle, Le Verrier, Lassell, Arago e Adams (Smith et al. (1989), Esposito

(2002)). Uma estrutura interessante encontrada dentro do anel Adams é a presença de cinco arcos nomeados como Liberté, Egalité, Fraternité, Egalité 2 e Courage.

A Figura 2 é uma representação esquemática dos sistemas dos anéis planetários. O tamanho e a localização dos anéis estão em escala conforme o raio do planeta. A linha pontilhada apresenta uma dinâmica importante, onde todos os satélites que orbitam dentro desta linha, devido à força de maré, se aproximam do planeta, ao contrário daqueles que estão além da linha, onde cada vez mais se afastam do planeta.

Figura 2 – Esquematisação do Sistema de anéis planetários dos quatro planetas gigantes do Sistema Solar.



fonte: Murray e Dermott (1999).

## 2.1 SISTEMAS DE ANÉIS EM CORPOS MENORES

A recente descoberta de anéis ao redor de Chariklo, o primeiro sistema de anéis encontrado fora dos quatro planetas gigantes dentro do Sistema Solar, demonstra que pequenos corpos também podem conter tais estruturas. Atualmente já se conhece mais dois pequenos objetos que contêm anéis, Haumea (ORTIZ et al., 2017) e Chiron (está em processo de confirmação) (ORTIZ et al., 2015).

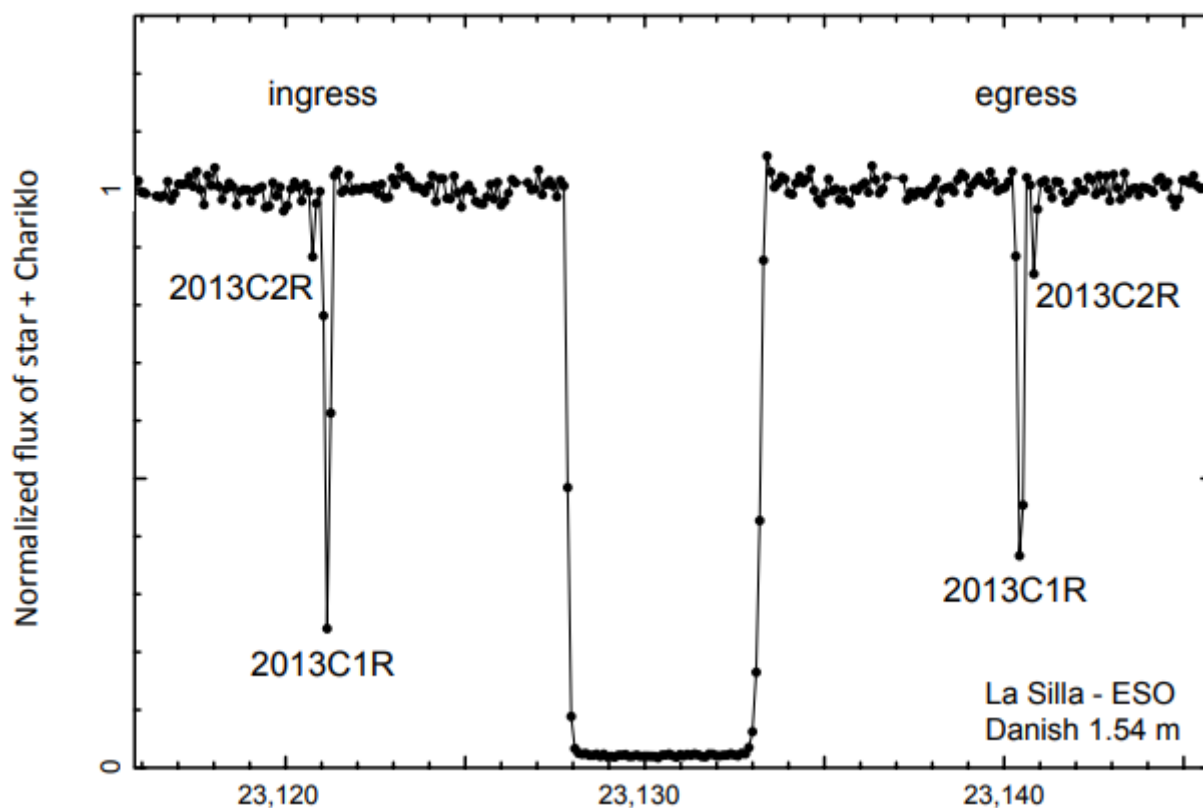
## 2.2 CHARIKLO

Chariklo é o maior Centauro já descoberto e está localizado entre as órbitas de Saturno e Urano, com raio equivalente a  $119 \pm 5$  km, possui uma superfície muito escura, com o albedo de 0,035

$\pm 0,011$  e está perto da ressonância 4:3 com Urano (BRAGA-RIBAS et al., 2014). Centauros são pequenos corpos, sendo seu periélio além da órbita de Júpiter, porém o seu semieixo maior deve ser menor do que o de Netuno ( $< 30$  ua) (Sicardy et al., 2016).

A ocultação de uma estrela em junho de 2013 revelou a presença dos dois anéis estreitos ao redor de Chariklo, como mostra na Figura 3. Devido à geometria das quedas no fluxo da estrela, foi dispensada a ideia de que seriam provocadas por jatos ejetados da superfície de Chariklo (BRAGA-RIBAS et al., 2014).

Figura 3 – Curva de luz da Ocultação de Chariklo.



fonte: Braga-Ribas et al. (2014).

As observações mostraram a presença de dois anéis, o primeiro e o mais denso C1R, situado a uma distância de  $390,6 \pm 0,4$  km de Chariklo, com uma largura radial entre 4,8 e 7,1 km. O segundo anel C2R aparenta ter aproximadamente 10 vezes menos material do que C1R e está a uma distância de  $404,8 \pm 3,3$  km, com largura entre 1 e 3 km. Nenhum material foi encontrado entre os anéis, formando uma falha de  $8,7 \pm 0,4$  km (BRAGA-RIBAS et al., 2014).

A análise do espectro de Chariklo aumentou as evidências da existência de anéis, devido ao desaparecimento na faixa do gelo nos comprimentos de onda em  $1,5 \mu\text{m}$  e  $2 \mu\text{m}$  (DUFFARD et al., 2014).

### 2.3 HAUMEA

Haumea é um dos cinco planetas anões e tem características bastante peculiares: é um corpo com uma rotação rápida e um formato de um elipsoide, sendo suas dimensões  $2.322 \times 1.704 \times 1.138$  km.

Sua densidade é de  $1.885 \text{ kg/m}^3$ , seu albedo é bem elevado (0,51) e possui duas luas, Hi'iaka e Namaka (ORTIZ et al., 2017). Haumea é o primeiro objeto transnetuniano (ou seja qualquer corpo pequeno que orbita o Sol, com o semieixo maior superior à de Netuno) descoberto com anel. As quedas de 50% no fluxo da estrela, observado no eclipse em janeiro de 2017 é consistente com a presença de um estreito e denso anel (ORTIZ et al., 2017).

O anel tem refletividade similar a dos anéis dos centauros Chariklo, Chiron e o planeta Urano, sua largura radial é de 70 km e a uma distância de 2.287 quilômetros de Haumea. O anel está em ressonância 3:1 com o período rotacional de Haumea, além de ser coplanar com Haumea e sua lua Hi'iaka (ORTIZ et al., 2017).

## 2.4 CHIRON

Chiron foi o primeiro centauro descoberto. Ele tem um tamanho de  $215,6 \pm 9,9$  km de diâmetro, um albedo de 0,16 (LIM et al., 2010), uma excentricidade de 0,38, sendo seu periélio em 8,4 ua e afélio em 18,8 ua.

Ocultações realizadas em 2011 verificaram em Chiron características semelhantes às observadas em Chariklo na variação da curva de luz, sendo possivelmente um anel a uma distância radial de  $324 \pm 10$  km (ORTIZ et al., 2015). O fato do espectro de Chiron variar na faixa do gelo também pode ser possivelmente causado pela geometria do anel, complementando a hipótese de sua existência.

Somente as evidências das ocultações de 2011 não são suficientes para comprovar a existência de um sistema de anéis. Entretanto as características das observações não poderiam ser explicadas pela hipótese de jatos cometário. Com a descoberta de um sistema de anéis em Chariklo, Haumea e possivelmente em Chiron, fomenta a ideia de que outros centauros e até mesmo outros TNOs poderiam também possuir anéis (ORTIZ et al., 2015).

## 2.5 REGIÃO DOS ANÉIS MAIS DENSOS DO SISTEMA SOLAR

Um interessante estudo realizado por Hedman (2015) mostrou um possível motivo pelo qual Saturno, Urano, Chariklo e Chiron possuem os anéis mais densos do Sistema Solar. A estrutura dos sistemas de luas e anéis ao redor de Saturno e Urano aparentam possuir um material mais poroso do que aqueles encontrado em torno de Júpiter e Netuno. Sabe-se, também, que a temperatura dos anéis de Saturno, Urano e Chariklo é praticamente a mesma ( $\sim 70K$ ). Por esses motivos, a formação de anéis densos no Sistema Solar pode ser explicada se materiais de gelo se tornarem particularmente fracos (porosos e com facilidade de se fragmentar) a essa temperatura ( $\sim 70K$ ), sendo tal temperatura somente alcançada na distância entre 8 au a 20 au do Sol.

Se aceitarmos o fato que um anel denso precisa ser composto por um material fraco, para evitar agregação e formação de luas, então a distribuição de anéis densos no Sistema Solar estariam restritos nesta região. A temperatura de 70 K é baixa o suficiente para o gelo não sublimar (o que explica nenhum anel na cinturão principal de asteroides), todavia possui uma estrutura interna fraca, que facilmente se fragmenta dentro dos limites de Roche do corpo.

## 2.6 OUTROS POSSÍVEIS CORPOS COM ANÉIS NO SISTEMA SOLAR

Algumas evidências propõe que alguns satélites naturais já abrigaram anéis. Jápeto a terceira maior lua de Saturno é um desses exemplo. Segundo Levison et al. (2011) a formação de uma cordilheira de 20 km de altura e 50 km de espessura que se estende em  $\sim 110^\circ$  ao redor do equador da lua pode ser explicada como sendo o resto de um antigo anel que caiu na sua superfície (Figura 4).

Figura 4 – Cordilheira ao redor do equador de Japeto.



fonte: NASA (2018c).

A teoria propõe que um grande impacto com Jápeto teria gerado um disco de detritos ao redor da lua. Deste disco teria sido formado um sub satélite com uma massa entre 0,005 e 0,021 da massa de Jápeto, então a interação de maré do sub satélite com o disco empurraram os detritos para a superfície de Jápeto, formando a cordilheira e ao mesmo tempo que o afastava da lua, desacelerando a rotação de Jápeto.

Vários estudos (como Krivov e Hamilton (1997), Hamilton (1996), Ishimoto (1996), Juhász e Horányi (1995)) apontam a possibilidade de Marte possuir anéis, apesar deles não terem sido observados. Teoricamente o anel marciano seria formado através de uma nuvem de poeira gerada a partir de impactos de asteroides com suas luas, Fobos e Deimos. Devido a força gravitacional de Marte ser maior, ele capturaria esses detritos, formando um anel ao seu redor (KRIVOV; HAMILTON, 1997).

Plutão era mais um candidato a conter um sistema de anéis. Da mesma forma que Marte, as suas luas Caronte, Nix, Hidra, Cébero e Estige, poderiam ser fontes de poeira para o anel. Por causa da proporção de massa entre Plutão e Caronte, aproximadamente uma razão de 0,11, Caronte tem um campo gravitacional proporcionalmente forte, conseguindo assim reter mais partícula, geradas a partir de um impacto com sua superfície, consequentemente seria um péssimo candidato como fonte desse anel. Steffl e Stern (2007) sugeriram que impactos de corpos pequenos com as luas Nix e Hidra, são capazes de gerar um anel temporário (tempo de vida estimado das partículas do anel seria de 900 anos) no sistema plutônico.

A sonda New Horizons foi lançada em 2006 chegou em Plutão em 14 de julho de 2015, com o intuito de coletar dados da atmosfera, superfícies de Plutão e suas luas, além de estudar outros objetos



do Cinturão de Kuiper. Apesar da sonda não ter detectado nenhum anel ainda, muito material enviado por ela não foi analisado (Sicardy et al., 2016).

## 2.7 A BUSCA PARA ENCONTRAR OS PRIMEIROS SISTEMAS DE ANÉIS EXTRASSOLARES

Várias observações estão sendo realizadas com a finalidade de confirmar a existência dos exoanéis e das exoluas. Heising, Marcy e Schlichting (2015) analisaram as curvas de luz de vinte e um exoplanetas a partir de dados fotométricos do Kepler, a maioria Júpiteres quentes e não encontraram nenhuma evidência para qualquer anel. Porém foi concluído que a metodologia utilizada depende muito da qualidade e quantidade dos dados, o que não descarta existir vários possíveis anéis nesses planetas. É importante ressaltar que os planetas estudados estão próximos da estrela, ao contrário dos planetas gigantes do Sistema Solar, sendo assim talvez os anéis não sejam tão comuns nesses casos.

Aizawa et al. (2017) examinaram os dados das curvas de luz de 89 candidatos a planeta de longo período (a maioria > 200 dias) do telescópio espacial Kepler, a fim de averiguar a presença de anéis como de Saturno. Os autores identificaram um candidato razoável (KIC 10403228) com sinais de existência de um anel através de um ajuste sistemático de parâmetros na sua curva de luz, indicando duas possíveis soluções: uma correspondente a um planeta semelhante a de Saturno com um anel inclinado e outra com um sistema binário com disco circunstelar ao redor de uma estrela anã.

Aizawa et al. (2018) escolheram 168 candidatos a planeta do Kepler, com uma grande razão entre sinal ruído, de forma que fosse possível estudar as características minúsculas e de curta duração dos anéis. Em consequência desse critério, a maioria dos exoplanetas eram de curto período e possivelmente conteriam anéis rochosos devido à proximidade do planeta com a estrela. Eles concluíram que nenhum candidato exibe indícios da presença de anéis.

Um trabalho realizado por Santos et al. (2015) estudou a possibilidade de encontrar algum sinal de anel no primeiro exoplaneta descoberto (51 Pegasi b). Os resultados a princípio não puderam confirmar a existência dele, porém no caso de um sistema de anel inclinado em relação ao plano orbital do planeta poderia explicar o trânsito observado.

Etangs et al. (2017) analisaram a curva de luz do CoRoT-9b, juntamente com os dados fotométricos da sonda Spitzer, na busca por exoanéis e exosatélites. Apesar de não confirmado, os resultados mostraram a possibilidade de existência de um sistema de anel que se estende até o limite de Roche do planeta, supondo um anel com uma inclinação menor que  $13^\circ$  em relação ao ângulo de visada e provavelmente composto por gelo.

Kalas et al. (2008) verificaram que o primeiro exoplaneta descoberto por método de imagem direta, Fomalhaut b de aproximadamente três massas de Júpiter, localizado a uma distância de 119 ua da estrela hospedeira, pode abrigar anéis, devido as falhas observadas no fluxo do brilho da estrela em alguns comprimentos de onda.

Anglada et al. (2017) destacaram em seu artigo a possibilidade de ter detectado um novo exoplaneta com anéis orbitando a estrela Proxima Centauri, conhecida como a estrela mais próxima da Terra a possuir um planeta terrestre.

Em 2007 através da análise da curva de luz da estrela J1407, a interpretação para uma complexa série de eclipses foi a existência de um possível planeta gigantesco, com sistema de anéis de aproxima-

damente uma massa da Terra espalhada e uma extensão radial de 0,6 ua, formando assim um sistema 600 vezes maior que de Saturno (MAMAJEK et al., 2012). O planeta não observado (J1407b) teria mais de 10 massas de Júpiter, e uma falha localizada em 0,4 ua, a qual possivelmente seria gerada por um satélite (KENWORTHY; MAMAJEK, 2015).

Para Kenworthy e Mamajek (2015) o sistema de anéis é consideravelmente maior que o raio de Roche do planeta, ocupando uma fração significativa do seu raio de Hill. Os anéis mais distantes sofrem um processo de acreção de partículas, o que pode resultar na formação de um satélite. A rápida variação da densidade do anel em função do raio pode ser explicada ou por meio de uma ressonância de Lindblad, causada por um exosatélite não observado, ou através de um processo dinâmico de formação de satélites.

Uma outra estrela, catalogada como PDS110, apresentou quedas relevantes nas suas curvas de luz ( $\sim 30\%$ ), durante aproximadamente 25 dias, em novembro de 2008 e em janeiro de 2011, ocasionadas por um planeta nomeado de PDS110b ou por uma outra estrela anã marrom (OSBORN et al., 2017). Contudo o período desse objeto seria de  $808 \pm 3$  dias. Osborn et al. (2017) propõe que os eclipses seriam ocasionados pela passagem da borda de um disco ao redor desse corpo não observado. Tanto os eclipses ocorridos com a estrela J1407 como a PDS110 foram objeto de estudo deste trabalho.

### 3 SISTEMA DE ANÉIS AO REDOR DE PDS110b

A estrela PDS110 também identificada como HD290380, IRAS05209-0107, GLMP 91, 2MASS J05233100-0104237 e TYC 4753-1534-1, é uma estrela jovem associada ao grupo Ori OB 1a, com aproximadamente 11 milhões de anos e está a uma distância de 345 parsec. Ela está em observação desde 1.990 (Garcia-Lario et al. (1990), Torres et al. (1995), Gregorio-Hetem e Hetem (2002), Rojas, Gregorio-Hetem e Hetem A. (2008), Osborn et al. (2017)).

A estrela é mais de duas vezes maior que o Sol ( $2,23 R_{\odot}$ ) e tem uma massa equivalente a  $\sim 1,6$  vezes a massa solar. A temperatura efetiva da estrela é estimada em  $6.400 K$ , com luminosidade  $\log(L/L_{\odot}) = 0,89$  e magnitude absoluta de  $M_V = 2,54$  (OSBORN et al., 2017).

Ela apresenta um excesso de infravermelho, aproximadamente 25 % do total de sua luminosidade (figura 3 de Osborn et al. (2017)), o que indica presença de um disco circunstelar. Osborn et al. (2017) estimaram a dimensão desse disco e os resultados apontaram para a existência de dois discos. O mais interno possui uma extensão de aproximadamente  $\sim 0,2$  ua, muito pequeno para ser detectado através de método de imagem direta. Já o disco mais externo é inclinado, formado por poeira e seu tamanho pode chegar a 300 ua.

#### 3.1 INTERPRETAÇÃO DO ECLIPSE

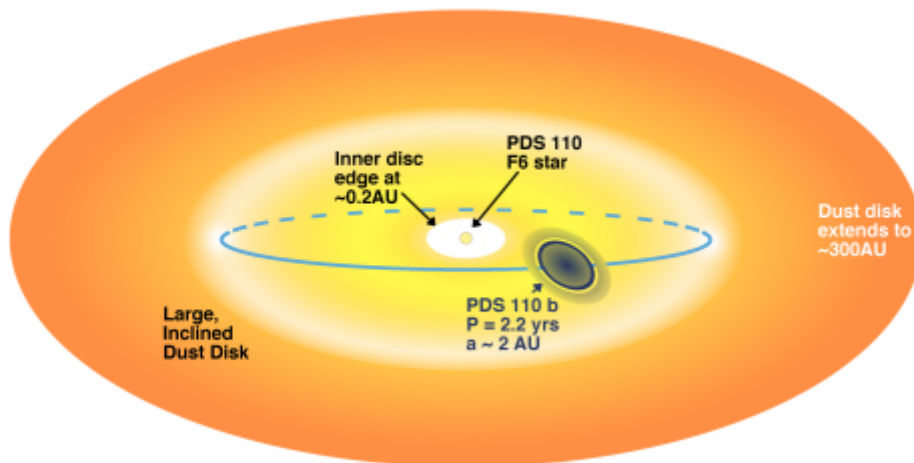
A estrela PDS110 foi monitorada pelos telescópios WASP (Wide Angle Search for Planets), KELT (Kilodegree Extremely Little Telescope), TRES (Tillinghast Reflector Echelle Spectrograph), ASSA (All-Sky Automated Survey) e outros. Dois eventos foram detectados em 2008 e 2011, ambos possuem características semelhantes: como forma, quedas no brilho ( $\sim 26\%$ ) e duração ( $\sim 25$  dias) (OSBORN et al., 2017).

A proposta é que os eclipses tenham sido ocasionados pela passagem da borda de um disco ao redor de um corpo não observado, propondo dois diferentes cenários.

A primeira hipótese sugere que o eclipse tenha ocorrido por um disco em torno de uma segunda estrela (uma anã marrom), implicando que tal corpo tenha uma inclinação orbital baixa em relação ao disco circunstelar interno da estrela primária. Porém um disco inclinado o suficiente para passar pela linha de visão da estrela primária. Se a estrela PDS110 estivesse sendo observado por um ângulo visada ( $\sim 30^\circ$ ), o disco deveria ter um raio maior que 1 ua e uma massa com proporção estelar, o que provavelmente seria detectado pelo espectro óptico (OSBORN et al., 2017).

No segundo cenário, ilustrado na Figura 5, o eclipse aconteceu devido ao trânsito de um pequeno corpo (o exoplaneta PDS110b) contendo um sistema de anéis inclinado em relação a sua órbita. Para os autores esta é a hipótese mais plausível, e o corpo poderia ser invisível durante o eclipse. A Figura 5 apresenta uma esquematização de todo o sistema PDS110. A estrela no centro e ao seu redor o seu disco mais interno, quente e de poeira, sendo orbitada pelo exoplaneta PDS110b e seu anel, observados no eclipse, e posteriormente o segundo e mais extenso e inclinado disco circunstelar.

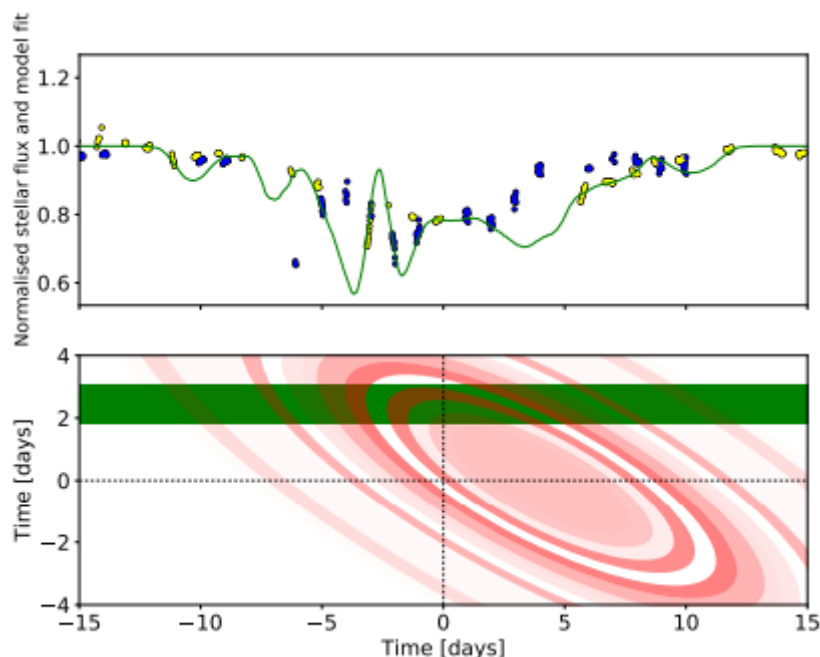
Figura 5 – Esquematisação do sistema PDS110.



fonte: Osborn et al. (2017).

No quadro superior da Figura 6, são mostrados os dados da curva de luz da estrela PDS110 em diferentes épocas do eclipse, proporcionando maior consistência na curva de luz em função do tempo, assumindo o dia zero como o centro dos respectivos eclipses. A curva em verde mostra o melhor ajuste de um modelo de anéis. A parte inferior da figura apresenta uma esquematização desse sistema de anéis. A intensidade da cor está de acordo com a transmissão do anel, e em verde mostra o caminho e o diâmetro da estrela PDS110 durante o eclipse.

Figura 6 – Modelo do sistema de anéis do PDS110b. O gráfico superior, contém os pontos da curva de luz em função do tempo, observados em 2008 e 2011, nas cores amarela e azul, respectivamente. A ilustração inferior mostra uma esquematização do anel.



fonte: Osborn et al. (2017).

O modelo de anéis compatível com os resultados obtidos na Figura 6, observa-se que há mais

pontos de inflexão durante a entrada do que na saída do planeta PDS110b no eclipse, em comparação com ambas épocas. Até o momento os dois eclipses não comprovam a hipótese da existência de um anel ao redor do PDS110b, porém futuras observações podem confirmar ou não a presença dele.

### 3.2 ESTRUTURA DO SISTEMA DE ANÉIS DE PDS110b

O intervalo de um pouco mais de dois anos entre os eclipses sugere um período orbital para o exoplaneta de 808 dias. Considerando a massa da estrela PDS110 1,6 vezes a massa do Sol, partindo da terceira lei de Kepler, foi calculado que o possível exoplaneta PDS110b tenha um semieixo maior equivalente a  $\sim 2$  ua (OSBORN et al., 2017).

Como mencionado na seção anterior, o eclipse provavelmente teria sido ocasionado pela borda de um disco planetário. Relacionando as duas informações com o tempo de duração do eclipse ( $t_e$ ) é possível estimar o tamanho radial do anel através da expressão (KENWORTHY et al., 2014) :

$$r_{anel} = \frac{v_e t_e}{2} \quad (3.1)$$

tem que  $v_e$  é a velocidade do planeta durante o eclipse.

Osborn et al. (2017) estimaram o diâmetro do anel em  $\sim 0,3$  ua para uma velocidade orbital do PDS110b de  $\sim 27 \text{ km/s}^1$  (assumindo uma órbita circular). Para investigar a extensão do anel em um cenário excêntrico, foi proposto que o eclipse tenha ocorrido durante a passagem do corpo no seu periastro região de maior velocidade orbital do planeta. Nessas condições a velocidade do planeta é determinada por (MURRAY; DERMOTT, 1999):

$$v_p = \frac{2\pi a}{P} \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \quad (3.2)$$

sendo  $a$  é semieixo maior,  $e$  a excentricidade e  $P$  o período orbital do planeta. A tabela 1 mostra os valores calculados da velocidade do planeta no periastro e o raio do anel, considerando sua passagem pelo periastro e com um tempo de duração do eclipse de 25 dias.

Tabela 1 – Estimativa do tamanho do raio do anel, supondo que o eclipse tenha ocorrido no periastro.

<b>e</b>	<b><math>V_p</math> (km/s)</b>	<b><math>r_{anel}</math> (ua)</b>
<b>0</b>	26,9	0,19
<b>0.1</b>	29,8	0,21
<b>0.2</b>	33,0	0,24
<b>0.3</b>	36,7	0,26
<b>0.4</b>	41,1	0,30
<b>0.5</b>	46,6	0,34
<b>0.6</b>	53,9	0,39
<b>0.7</b>	64,1	0,46
<b>0.8</b>	80,8	0,58
<b>0.9</b>	117,4	0,85

fonte: Autoria Própria.

A esfera de Hill é a região onde um corpo tem maior influência gravitacional sobre as presença de

perturbações gravitacionais de outro corpos. O raio de Hill para o caso excêntrico é aproximadamente calculado como (HAMILTON; BURNS, 1992):

$$r_{Hill} \approx a(1 - e) \sqrt[3]{\frac{m}{3M_s}} \quad (3.3)$$

sendo  $m$  a massa do planeta e  $M_s$  a massa de sua estrela. A razão entre o raio do anel e o raio de Hill, auxilia na compreensão da estabilidade do anel e para isso definimos o parâmetro  $\xi$  como:

$$\xi = \frac{r_{anel}}{r_{Hill}} \quad (3.4)$$

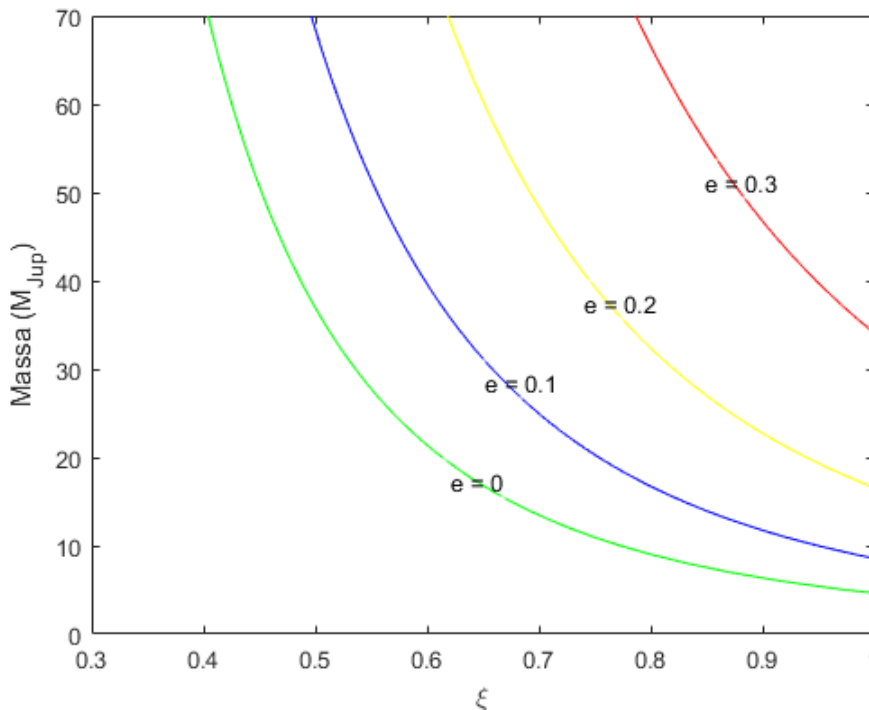
Se  $\xi < 1$ , significa que o anel está dentro da região de domínio gravitacional do planeta. Domingos, Winter e Yokoyama (2006) estudaram a zona de estabilidade de um satélite ao redor de um planeta gigante (assumindo a razão de massa entre os corpos de  $10^{-3}$ ) e verificaram que o limite desta região seria  $\sim 0.5 r_{Hill}$  do planeta para caso prógrado e  $\sim 0.95 r_{Hill}$  no caso retrógrado.

Utilizando uma combinação das equações de 3.1 a 3.4, obtém-se a expressão 3.5, que relaciona a massa do planeta em função da sua excentricidade e do fator  $\xi$ . Através da equação 3.5 é perceptível que a massa do planeta é inversamente relacionada ao cubo de  $\xi$ .

$$m \approx \frac{3M_s}{\sqrt{1 - e}} \left( \frac{\pi t_e \sqrt{1 + e}}{\xi P} \right)^3 \quad (3.5)$$

Assumindo a massa da estrela como  $1,6 M_{\odot}$ , o período do planeta de 808 dias, o tempo do eclipse de 25 dias e aplicando para o intervalo de massa do PDS110b estipulado por Osborn et al. (2017) entre  $1,8$  e  $70 M_{Jup}$ , adotando diferentes valores de excentricidade, obtém-se as curvas da Figura 7.

Figura 7 – Curvas da massa do exoplaneta PDS110b em função de sua excentricidade e de  $\xi$ .



fonte: Autoria Própria.

Verifica-se na Figura 7 que para excentricidades inferiores a 0,4 é possível obter  $\xi < 1$ , principalmente se o planeta for bem massivo. Já em casos com excentricidades superiores a 0,3 os valores de  $\xi$  são superiores a 0,8, independente da massa. Assim, dificilmente poderia se explicar a estabilidade de um anel para tais excentricidades. Mesmo reduzindo o tempo do eclipse, não se encontra mudança significativas. Isso ocorre porque a esfera de Hill varia com o tempo e atinge sua dimensão mínima no periastro. Para  $e \geq 0,4$ , a separação entre o planeta e a estrela se restringe a no máximo 1,3 ua, aumentando a influência gravitacional da estrela sobre as partículas do anel.

### 3.2.1 Descrição dos modelos dos exoanéis de PDS110b

Com o intuito de entender como seria a estrutura dos anéis ao redor do PDS110b e suas características físicas e orbitais. Através de simulações numéricas, neste trabalho buscou-se restringir os intervalos de diversos parâmetros, que não foram determinados observacionalmente e seriam compatíveis com o eclipse observado. O integrador utilizado foi Rebound/IAS15 (REIN; LIU, 2012), que possui o passo adaptativo.

Para investigar a estabilidade do sistema anel, uma abordagem diferente da convencional foi realizada com a finalidade de obter-se ganho computacional. Desconsiderando as interações entre as partículas do anel, foi proposto a criação de inúmeras simulações numéricas do problema elíptico de três corpos: a estrela PDS110, o exoplaneta hipotético e uma partícula do seu anel (partícula teste), todos coplanares.

Nas simulações a estrela tinha a massa equivalente a  $1,6 M_{\odot}$  e um raio de  $2,23 R_{\odot}$ . Já a maioria dos parâmetros do planeta eram escolhidos aleatoriamente (utilizando a função do integrador `reb_random_uniform`, que retorna a variável aleatória, que segue uma distribuição de probabilidade uniforme dentro do intervalo predeterminado), como: a massa, entre 1,8 e  $70 M_{Jup}$ , a excentricidade, entre 0 e 0,3, através Figura 7 verificou-se que para valores maiores que 0,3, o fator  $\xi$  excede 0,8. O raio que era calculado conforme a massa definida, pressupondo que o PDS110b ser um gigante gasoso, a densidade adotada a ele foi a mesma de Júpiter ( $1.326 \text{ kg/m}^3$  (NASA, 2018b)). Apenas o semieixo maior do planeta era igual em todas simulações 2 ua.

Cada simulação atribuía para a partícula em relação ao planeta os valores aleatoriamente do semieixo maior ( $a_p$ ) e da anomalia verdadeira ( $f$ ), já excentricidade inicial era zero em todas as simulações. Dentro dos seguintes intervalos  $a_p = [0,01 - 0,5]$  ua, e  $f = [0^{\circ} - 360^{\circ}]$ . Segundo a tabela 1, o intervalo de 0,5 ua é aproximadamente o dobro do raio de um anel em torno de um planeta com excentricidade 0,3, portanto o suficiente para estudar um sistema de anel dentro das condições propostas.

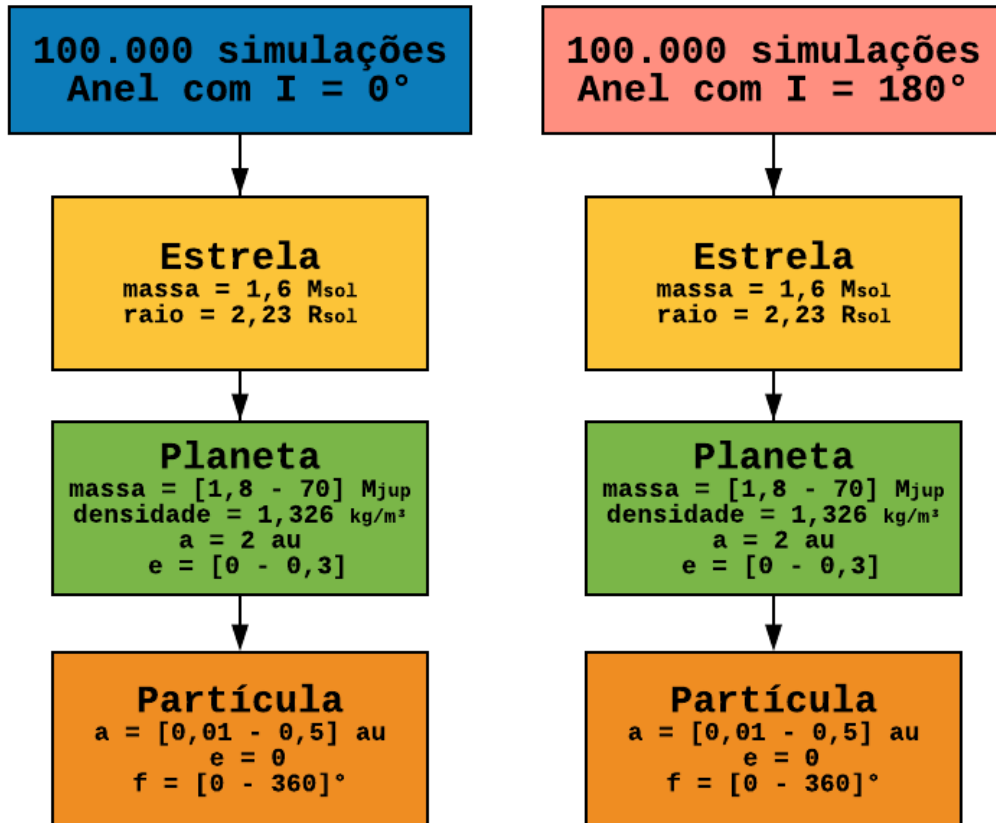
Ao todo foram realizadas 200.000 diferentes simulações, sendo metade delas com a inclinação da partícula em  $0^{\circ}$  (caso prógrado) e a outra metade em  $180^{\circ}$  (caso retrógrado), explorando assim as duas situações extremas.

O tempo total determinado para cada simulação foi de  $250 \times 10^4$  dias, equivalente a 10.000 vezes o período orbital de uma partícula situada em 0,5 ua de um planeta com massa de  $1,8 M_{Jup}$  (entre todos possíveis cenários, este possui o maior período orbital que uma partícula pode ter). Quando ocorria a colisão física entre alguns dos corpos ou quando a partícula entrava em órbita hiperbólica em relação

ao planeta, era considerada ejeta e a simulação era interrompida no mesmo instante.

Com essa imensa variedade de simulações foi possível analisar quase todas prováveis configurações do exoplaneta e seu sistema de anel. A Figura 8 exemplifica o esquema utilizado nas simulações numéricas.

Figura 8 – Fluxograma da criação das simulações numéricas para o sistema PDS110b .



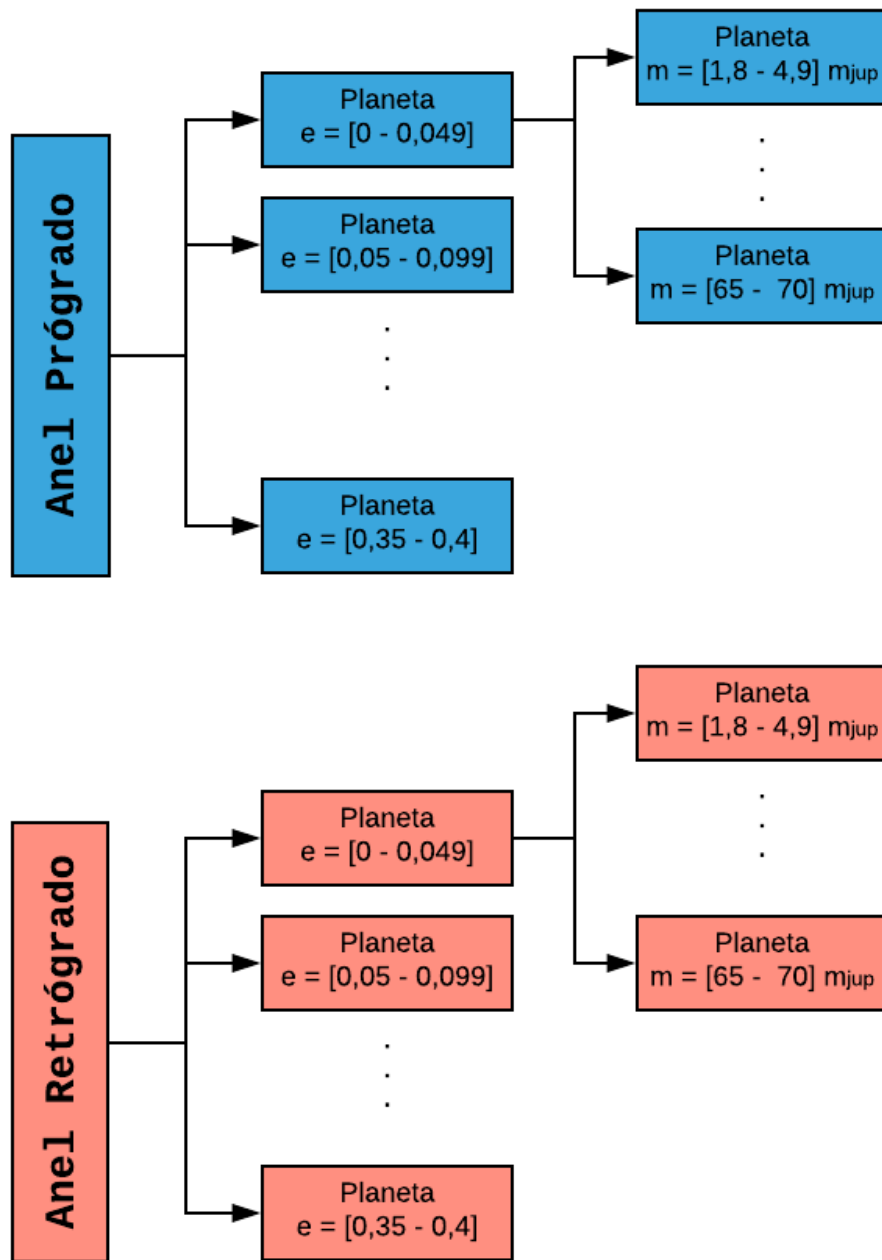
fonte: Autoria Própria.

### 3.3 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para explorar os resultados obtidos, as simulações foram separadas em diferentes conjuntos, levando em conta os critérios de massa e excentricidade do planeta, além da inclinação da partícula. Primeiramente foram separadas todas as simulações das partículas com inclinações  $0^\circ$  (prógrado) das  $180^\circ$  (retrógrado). Posteriormente cada um dos dois conjunto foram divididos por seis diferentes grupos de excentricidade do planeta em intervalos de  $\Delta e = 0,05$ . Por fim, cada grupo foi subdividido em mais 14 novos subgrupos de massa com o intervalo  $\Delta m \sim 5 M_{Jup}$ , totalizando em 168 diferentes conjuntos, como mostra a esquematização da Figura 9.



Figura 9 – Fluxograma da análise das simulações numéricas para o sistema PDS110b .

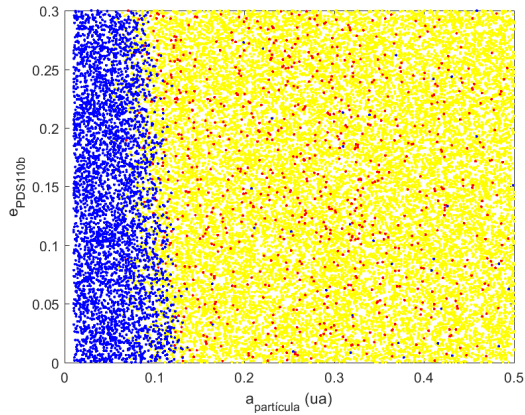


fonte: Autoria Própria.

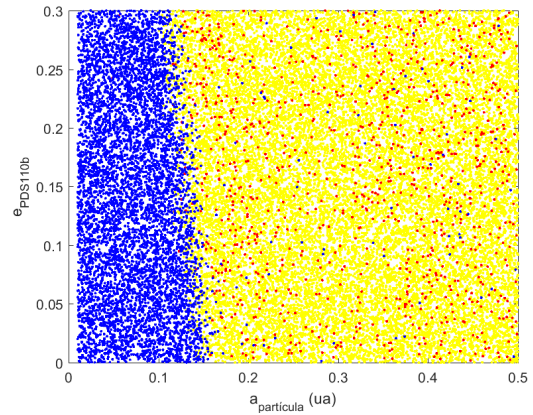
Em aproximadamente 3% das simulações ocorreram colisões entre a partícula e o planeta e 62% das simulações tiveram ejeção da partícula do sistema de anéis. Considerando como ejetadas todas as partículas que entram em órbita hiperbólica em relação ao planeta. Foi considerado um sistema estável, toda vez onde os três corpos permaneciam nas simulações durante período inteiro ( $250 \times 10^4$  dias).

Inicialmente, a maioria dos grupos continham em torno 1.500 diferentes combinações de simulações e as Figuras 10 e 11 mostram mapas de condições iniciais do semieixo maior da partícula pela excentricidade do planeta de várias simulações dentro de um certo intervalo de massa.

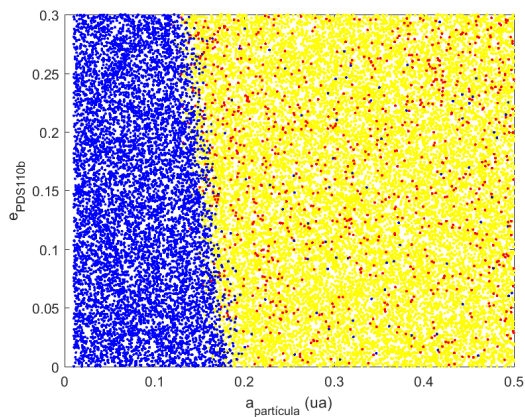
Figura 10 – Diagrama de condição inicial do caso do anel prógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). Em azul são as simulações estáveis, em amarelo as que ocorreram ejeção das partículas e em vermelho colisões. Em cada gráfico massa do planeta varia dentro um certo intervalo.



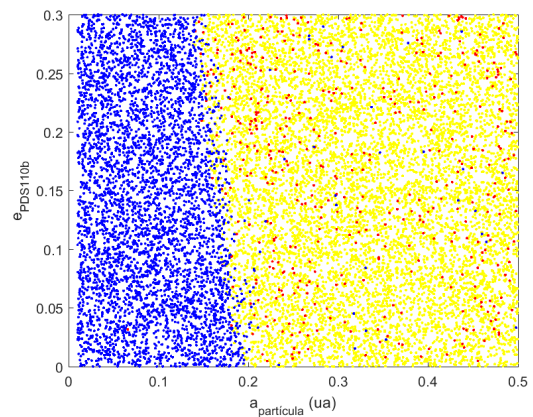
(a)  $\Delta m = 1,8 - 19,9 M_{Jup}$



(b)  $\Delta m = 20 - 39,9 M_{Jup}$



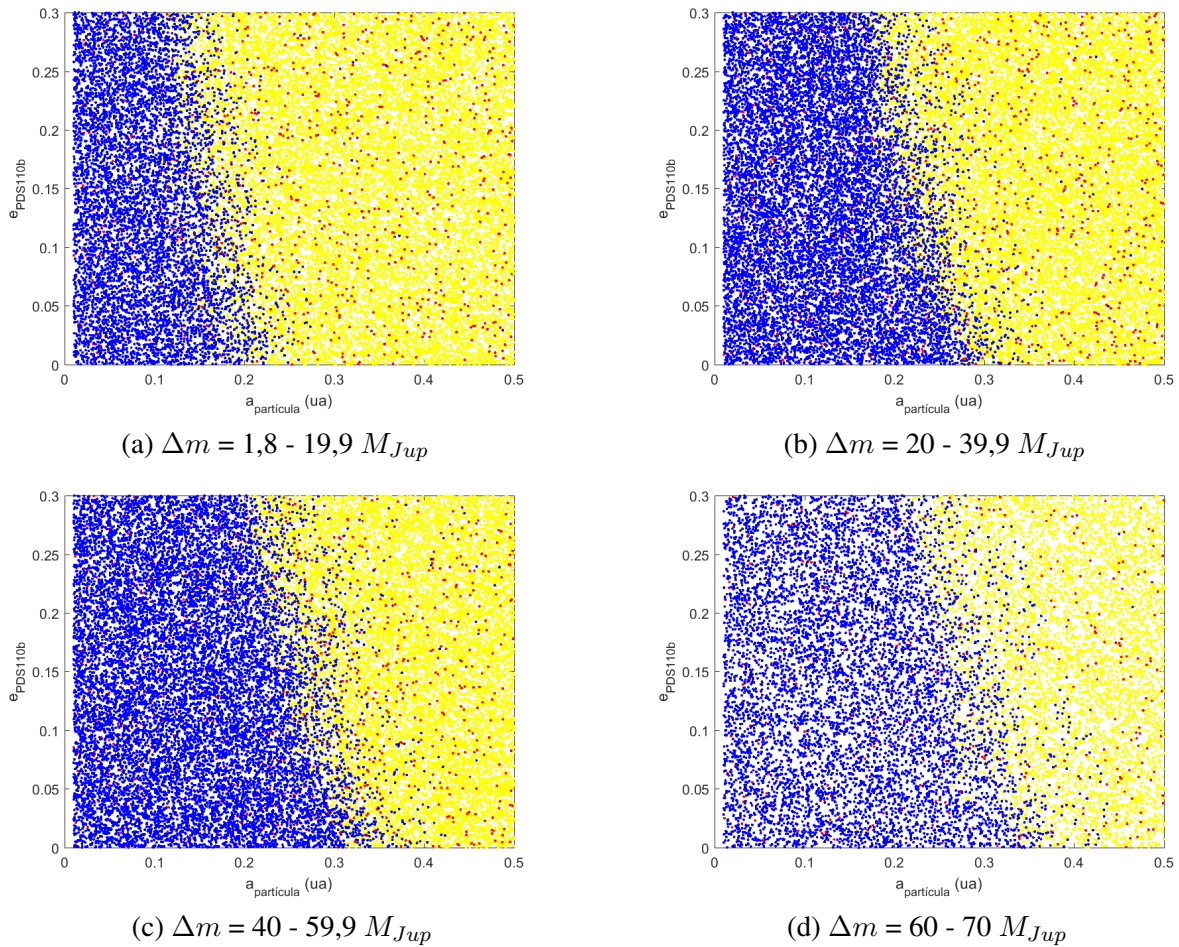
(c)  $\Delta m = 40 - 59,9 M_{Jup}$



(d)  $\Delta m = 60 - 70 M_{Jup}$

fonte: Autoria Própria.

Figura 11 – Diagrama de condição inicial do caso do anel retrógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). Em azul são as simulações estáveis, em amarelo as que ocorreram ejeção das partículas e em vermelho colisões. Em cada gráfico massa do planeta varia dentro um certo intervalo.



fonte: Autoria Própria.

A variável da excentricidade do planeta é fundamental para determinar a extensão da região estável do conjunto, assim como observado na Figura 10 e Figura 11. Isto acontece porque o planeta está razoavelmente próximo da estrela ( $\sim 2$  ua) e a medida que ele se torna mais excêntrico, ele se aproxima mais da estrela e as partículas sofrem gravitacionalmente uma perturbação maior. Por exemplo, um conjunto com o mesmo intervalo de massa entre  $m_{PDS110b} = 60 - 70 M_{Jup}$  (gráfico (d) da Figura 10), o limite da zona de estabilidade (em azul) atinge aproximadamente 0,2 ua para valores de excentricidades menores que 0,05, enquanto para excentricidades maiores que 0,25 seu tamanho é de 0,15 ua.

A massa do planeta também é um fator determinante na proporção de simulações estáveis. Isso ocorre porque quanto maior for a massa do planeta, maior é seu domínio gravitacional sobre as partículas. Na Figura 10 e Figura 11 nota-se esse efeito a medida que o conjunto aumenta seu intervalo de massa.

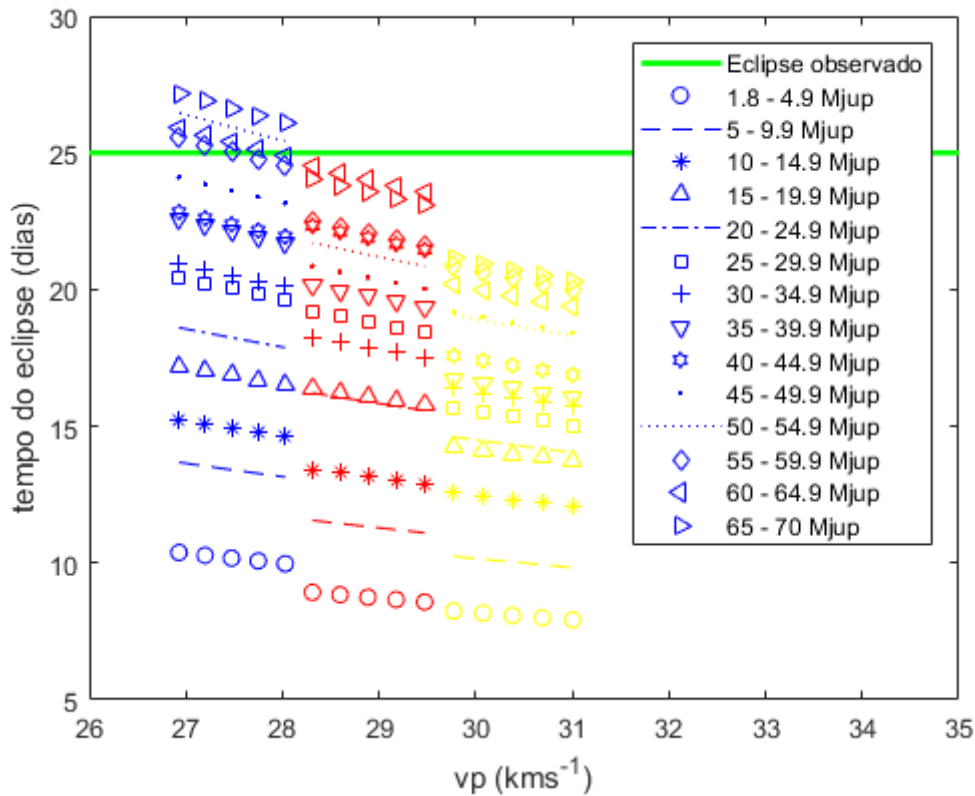
As simulações que envolvem partículas em órbitas retrógradas (gráficos da Figura 11), são muito mais estáveis que em orbitas prógradas (gráficos da Figura 10), como já esperado, chegando a quase a dobrar a extensão da zona de estabilidade.

A segunda etapa na análise dos resultados foi calcular teoricamente o tempo de duração do eclipse.

Partindo da equação 3.1, utilizando a extensão do raio do anel como a distância da partícula estável mais externa ao planeta e assumindo que o eclipse tenha ocorrido na passagem pelo periastro. Com isso foi obtida a curva do tempo do eclipse em função da velocidade do planeta hipotético, aplicando o cálculo da velocidade do periastro ( $v_p$ ) para todos os valores de excentricidade que estão dentro do intervalo daquele conjunto.

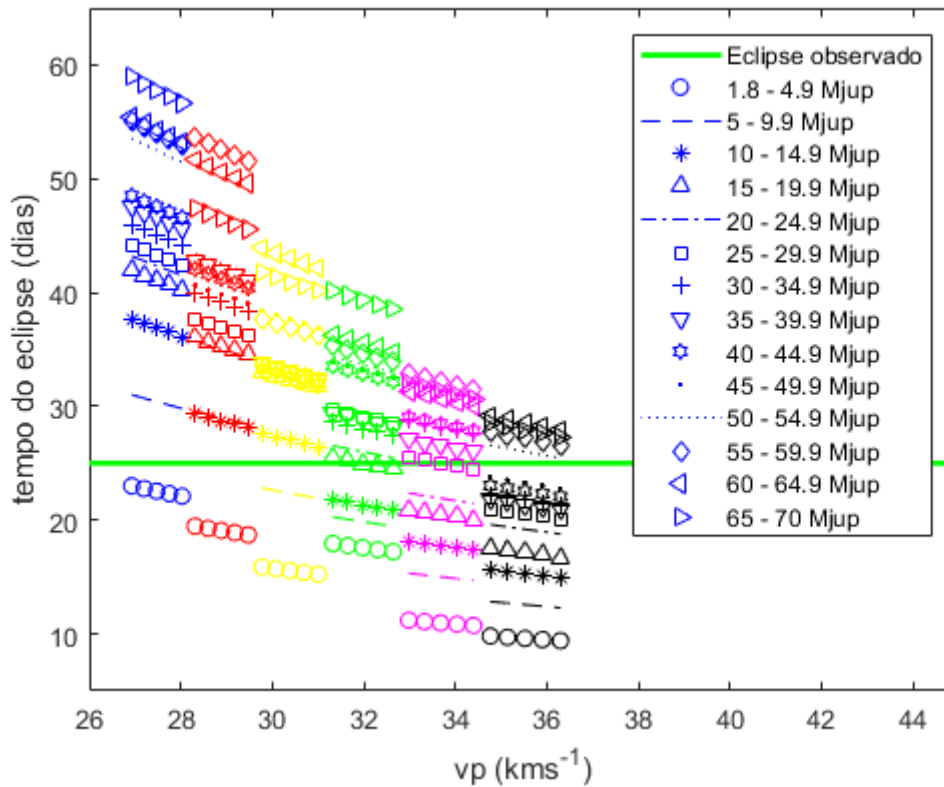
A Figura 12 e Figura 13 mostram o tempo e a velocidade teórica do planeta durante o eclipse, para uma anel com inclinação  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente. A faixa em verde de cada figura indica o tempo do eclipse observado (aproximadamente 25 dias).

Figura 12 – Curva do tempo teórico do eclipse de cada conjunto com inclinação  $0^\circ$  das partículas em função da velocidade do PDS110b no periastro. Em azul são os conjuntos com o intervalo de excentricidade do planeta  $\Delta e = [0 - 0,049]$ , em vermelho  $\Delta e = [0,05 - 0,099]$  e em amarelo  $\Delta e = [0,1 - 0,149]$ .



fonte: Autoria Própria.

Figura 13 – Curva do tempo teórico do eclipse de cada conjunto com inclinação  $180^\circ$  das partículas em função da velocidade do PDS110b no periastro. Em azul são os conjuntos com o intervalo de excentricidade do planeta  $\Delta e = [0 - 0,049]$ , em vermelho  $\Delta e = [0,05 - 0,099]$ , em amarelo  $\Delta e = [0,1 - 0,149]$  em verde  $\Delta e = [0,15 - 0,199]$ , em roxo  $\Delta e = [0,2 - 0,249]$  e em preto  $\Delta e = [0,25 - 0,3]$ .



fonte: Autoria Própria.

### 3.3.1 Efeito do Arrasto de Poynting Robertson

O arrasto de Poynting Robertson é uma componente da força de radiação da estrela, que provoca um importante efeito em partículas micrométricas reduzindo continuamente a sua energia e consequentemente o seu semieixo maior, de forma que elas espiralam em direção ao planeta (BURNS; LAMY; SOTER, 1979).

O tempo de decaimento ( $t_{PR}$ ) de uma partícula de um anel, com raio ( $s$ ), densidade  $\rho$ , semieixo maior ( $a$ ) e inclinação ( $I$ ) é:

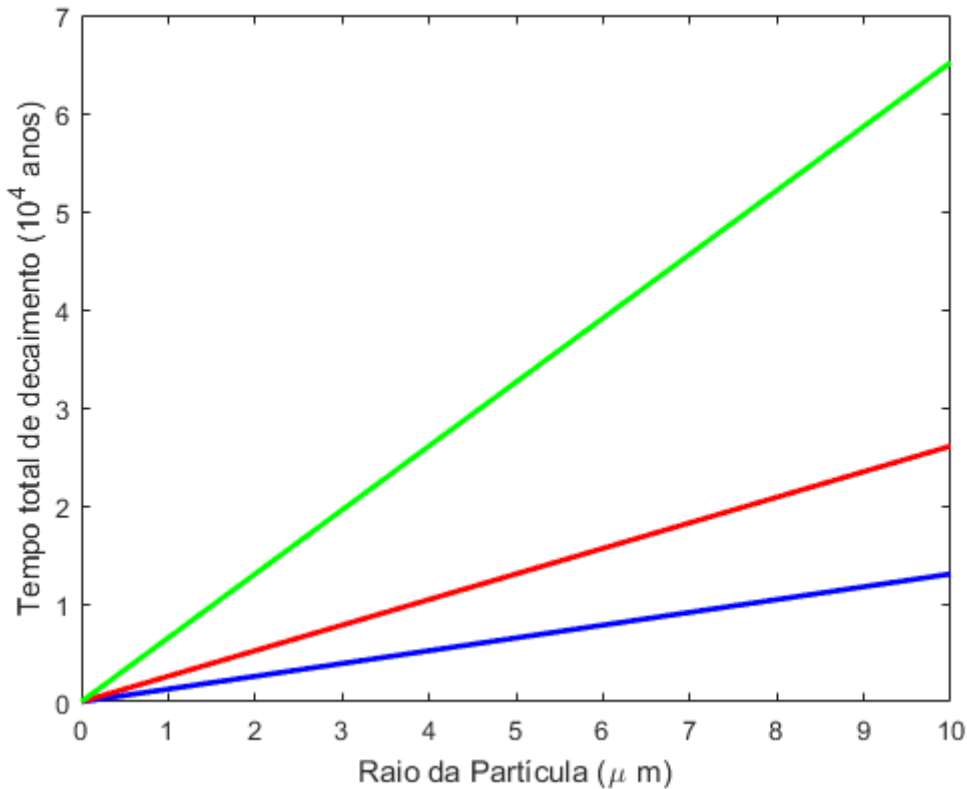
$$t_{PR} \sim \frac{8\rho s c^2}{3(L/4\pi a^2)Q_{PR}(5 + \cos^2(I))} \quad (3.6)$$

em que  $c$  é a velocidade da luz,  $L$  a luminosidade da estrela e  $Q_{PR}$  é o fator de eficiência da radiação (adotado como 1). Como PDS110b provavelmente tem órbita excêntrica, devido a grande radiação estelar, o efeito de Poynting Robertson é significativo sobre as partículas de seu anel.

A Figura 14 mostra o tempo total de decaimento da partícula mais externa do anel ( $\sim 0,2$  U.A.) até o planeta PDS10b, com diferentes densidades e tamanhos. Com o gráfico é possível concluir que as partículas micrométricas rapidamente se decairiam para o planeta, em um tempo total na ordem de

grandeza de  $10^4$  anos, dificultando a presença de anéis de poeira nesse sistema. Portanto se observado que tal tipo de anel é composto por partículas pequenas é porque existe algum mecanismo servindo de fonte para tais partículas.

Figura 14 – Efeito do arrasto de Poyting Robertson sobre as partículas do anel, com densidade de  $1 \text{ gcm}^{-3}$  (em azul),  $2 \text{ gcm}^{-3}$  (em vermelho) e  $5 \text{ gcm}^{-3}$  (em verde).



fonte: Autoria Própria.

### 3.3.2 Discussão

Como pode-se verificar na Figura 12 e Figura 13, o tempo teórico do eclipse dos conjuntos diminui relativamente na maioria dos casos, quando comparado o mesmo intervalo de massa, com diferentes intervalos de excentricidade. Isso porque a extensão do anel vai diminuindo a medida que o planeta torna-se excêntrico.

O material do disco de cada conjunto se reduz de 0,5 ua para no mínimo 0,2 ua (Figura 10) e 0,4 ua (Figura 11), o que corresponde a um valor do fator  $\xi > 0,5$  e  $\xi > 1$  para o caso prógrado e retrógrado, respectivamente, o que está coerente com o encontrado na literatura.

Uma interessante característica encontrada nas simulações instáveis é o fato da maioria delas ocorrerem a colisão ou ejeção em um tempo de até no máximo 30 períodos orbitais do planeta.

Apenas alguns conjuntos puderam reproduzir o eclipse observado no caso prógrado, ao contrário do caso retrógrado, que sendo mais estável. Obteve diversos grupos que explicam o eclipse.

Em todos os casos com anel retrógrado conseguiu-se obter um sistema de anéis bem extensos comparados ao prógrado, podendo chegar a um raio de  $\sim 0,4$  ua. No entanto anéis com tamanha

extensão extrapolam muito o tempo médio observado nos eclipses, como mostra a Figura 13.

Contudo sistemas de anéis retrógrados, apesar de serem mais estáveis, são muito mais improváveis de existir e difícil de explicar sua formação. Por esta razão os resultados das simulações com o anel em órbitas prógradas são estaticamente mais prováveis. Considerando apenas os sistemas com órbitas prógradas, as características dos conjuntos onde o tempo teórico do eclipse foram compatíveis com o observado (linha verde Figura 12), obtidos das simulações estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do planeta e do anéis dos melhores conjuntos obtidos por meio das simulações numéricas.

$\Delta m_{PDS110b}$ ( $m_{Jup}$ )	$\Delta e_{PDS110b}$	Inclinação do anel ( $^{\circ}$ )	$r_{anel}$	$t_e$ (dias)
50 - 54,9	0 - 0,049	0	$\sim 0,2$	25 - 26
55 - 59,9	0 - 0,049	0	$\sim 0,2$	24 - 25
60 - 64,9	0 - 0,049	0	$\sim 0,2$	24 - 25
65 - 70	0 - 0,049	0	$\sim 0,21$	26 - 27
65 - 70	0,05 - 0,099	0	$\sim 0,19$	23 - 24

fonte: Autoria Própria.

Em resumo, o planeta PDS110b possivelmente está  $\sim 2$  ua da estrela e tem um período orbital de 808 dias (OSBORN et al., 2017). Através do resultados das simulações o planeta deve ter entre 50 a 70  $m_{Jup}$  e provavelmente possui uma órbita circular ou quase circular em torno da estrela ( $e < 0,05$ ).

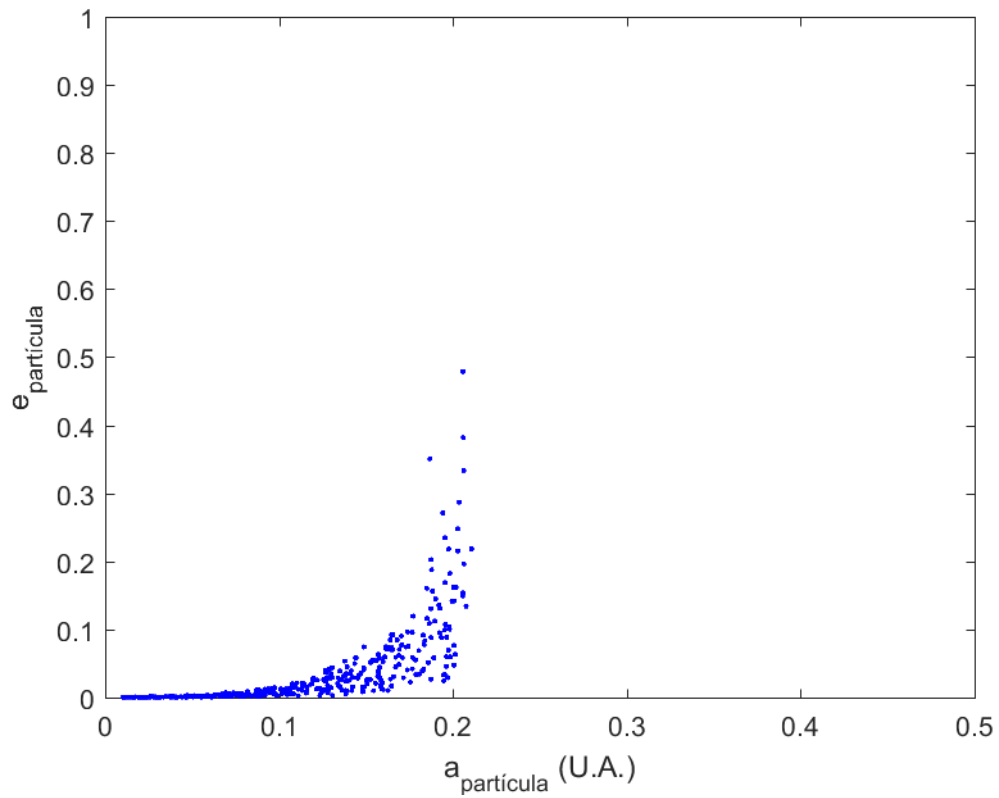
O anel deve ter uma extensão radial de  $\sim 0,2$  ua. Considerando a densidade do PDS110b equivalente a densidade de Júpiter  $\rho_p = 1,326 \text{ g/cm}^3$  (NASA, 2018b), e a densidade média das partículas do anel como  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ , ou de 2 a 5  $\text{g/cm}^3$  (no caso de partículas rochosas), foi calculado a razão entre o raio do anel e o raio de Roche ( $R_{Roche}$ ).

Assumindo o possível intervalo de massa do PDS110b obtido das simulações entre (50 - 70)  $m_{Jup}$ . Os valores da razão  $r_{anel}/R_{Roche}$  são maiores que 35, o que mostra ser um sistema com grande potencial de conter satélites, para qualquer densidade média das partículas do anel maior a 1  $\text{g/cm}^3$ , muito superior ao sistema de Saturno é de 3,4, tal diferença ocorre devido o sistema de anéis em estudo ser proporcionalmente  $\sim 62$  vezes maior do que Saturno.

A Figura 15 mostra o semieixo maior e excentricidade das partículas do sistema anel prógrado do conjunto onde  $m_{PDS110b} = [60 - 64,9] m_{Jup}$  e  $e_{PDS110b} < 0,05$ , que reproduziu os eclipses observados.

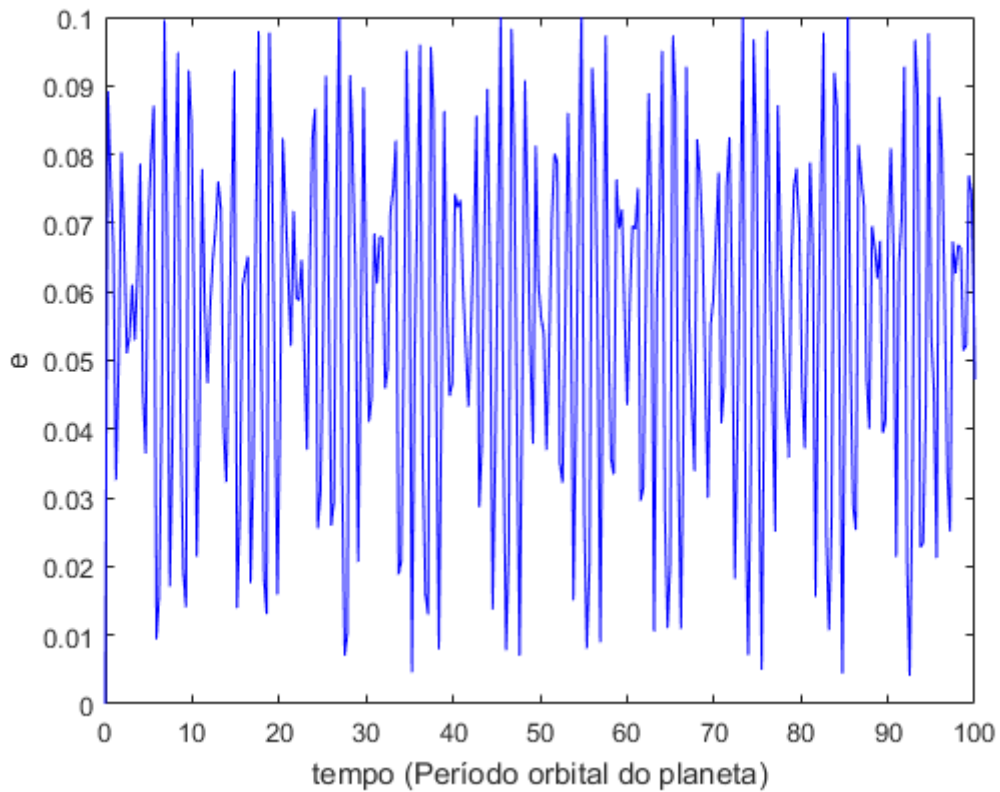
Através da Figura 15 pode-se notar que as partículas ganham excentricidade a medida que elas se afastam do planeta hospedeiro. O gráfico da Figura 16 mostra um exemplo desse efeito periódico sofrido na excentricidade por essas partículas em função do período orbital do planeta, uma justificativa alternativa para o fato do disco apresentar variações azimutais.

Figura 15 – Excentricidade das partículas em função de seu semieixo maior em relação ao planeta.



fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Gráfico da excentricidade de uma partícula em função do tempo.



fonte: Autoria Própria.



## 4 SISTEMA DE ANÉIS AO REDOR DE J1407b

A estrela 1SWASP J140747.93-39454.6, também conhecida como J1407, é uma estrela jovem de 16 milhões de anos, pertencente à pré sequência principal e associado ao grupo Sco-Cen OB. Segundo Werkhoven, Kenworthy e Mamajek (2014) a estrela está a 113 parsec de distância da Terra, possui uma massa equivalente a  $0,9 M_{\odot}$  e tem período rotacional de 3,21 dias. Kenworthy et al. (2014) determinaram o raio da J1407 igual a  $0,96 R_{\odot}$ , sua temperatura de  $4400 K$ , e sua luminosidade de  $\log(L/L_{\odot}) \sim -0,478$  e magnitude  $V \simeq 12,3$ .

### 4.1 INTERPRETAÇÃO DO ECLIPSE

Monitorada pelos telescópios SuperWASP (Super Wide Angle Search for Planets) e pela ASAS (All Sky Automated Survey), a estrela apresentou uma complexa série de eclipses no decorrer de 56 dias, de março à maio de 2007. Foram identificados ao menos cinco dias com quedas  $> 0,5$  mag, um eclipse central profundo  $> 3,3$  mag, cercado por dois pares de queda com  $\sim 1$  mag que ocorreram simetricamente entre  $\pm 12$  dias e  $\pm 24$  dias antes e depois, além de uma significativa queda de  $> 1$  mag, durante 12 dias (MAMAJEK et al., 2012).

Os autores especulam que este evento tenha sido ocasionado pela passagem de um extenso disco ao redor de uma estrela, ou em torno de um exoplaneta gigante. Para Werkhoven, Kenworthy e Mamajek (2014) somente a própria estrela não poderia explicar uma redução de mais de 95 % na sua intensidade, nem as finas estruturas observadas.

Mamajek et al. (2012) discutiram as possibilidades da existência de sistema binário (J1407B) e que o eclipse tenha sido ocorrido por um disco circunstelar, descartando as seguintes hipóteses:

- *Uma estrela primária gigante vermelha e um disco circunstelar em torno de uma estrela azul de fraco brilho pode ser a origem do eclipse?*

Devido ao espectro de J1407, não há uma evidência dela ser uma estrela gigante e tal cenário não explica a estrutura observada semanas antes e depois do eclipse.

- *Um disco orbitando uma estrela compacta remanescente pode ser a causa do eclipse?*

Como o sistema é muito jovem ( $\sim 16$  milhões de anos), não teria como conter uma estrela de nêutrons ou uma anã branca.

- *Pode o eclipse ser explicado por um sistema binário de estrelas ou pelo próprio disco circunstelar da J1407?*

A estrela J1407 carece de excesso de infravermelho, o que rejeita a hipótese da existência de um disco poeira ao seu redor. Além disso, como a duração do eclipse foi de aproximadamente 56 dias, os próprios autores estimaram que o período orbital mínimo do corpo secundário deveria ser de 850 dias. Assim a razão entre o tempo do eclipse e o período orbital do corpo seria  $< 0,06$ , significativamente inferior a razão encontrada em sistema de estrelas binárias com um disco

circunstellar como por exemplo V718 PErsei e KH 15 (cerca de 0,2 e 0,3), rejeitando também esta possibilidade.

- *O eclipse poderia ser explicado por um disco circunstellar que ocultou a estrela uma única vez?*

Devido ao fato de não ter identificado mais de um eclipse até o momento é possível que o eclipse tenha sido uma ocorrência única. Entretanto, tal ideia requer um disco muito fino (razão entre a espessura e raio do disco de  $10^{-8}$ ), além de não explicar as quedas simétricas encontradas em  $\pm 12$  e  $\pm 26$  dias ao redor do centro do eclipse. Observações futuras podem derrubar esta proposta.

- *Pode o eclipse ter ocorrido devido à um disco circunstellar orbitando uma estrela mais massiva?*

Novamente devido à falta de excesso de infravermelho é difícil considerar a presença de um disco orbitando uma estrela mais massiva, sendo mais provável que o corpo secundário tenha uma massa inferior a da estrela J1407.

#### 4.1.1 Modelando um cenário de um disco circumplanetário gigantesco

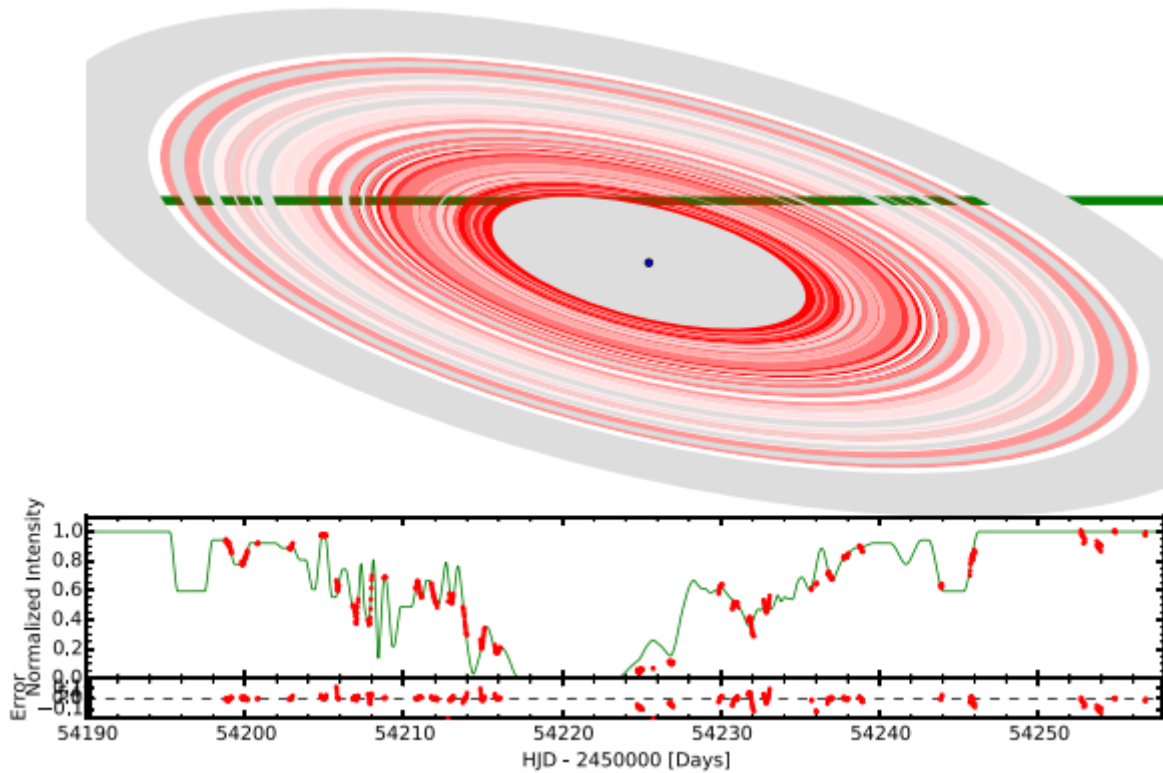
Após a exclusão de algumas explicações astrofísicas para o eclipse, Kenworthy e Mamajek (2015) analisaram o possível modelo de sistema de anéis em torno de um planeta (J1407b), através dos dados fotométricos obtidos do telescópio SuperWASP, removendo tanto os desvios sistemáticos entre as câmeras observadoras e as pequenas amplitudes na variação estelar na curva de luz.

Os autores concluíram que a presença de um extenso sistema de anéis inclinado é compatível com os dados observados. O tamanho do anel é consideravelmente maior que limite de Roche do planeta e ocupa uma fração significativa do seu raio de Hill. O melhor modelo do anel possui uma extensão radial de 0,6 ua ( $9 \times 10^7$  km), com uma massa total estimada em  $100 M_{lua}$ .

A curva de luz da Figura 17 mostra a variação na intensidade luminosa da estrela em função do tempo. Durante o trânsito do corpo secundário em frente a estrela, houve o bloqueio de mais de 95 % da luminosidade da estrela. Ao longo do período observacional (56 dias) foram encontradas 24 pontos de inflexão durante a entrada do planeta e 16 na saída (Figura 8 de Werkhoven, Kenworthy e Mamajek (2014)), indicado a presença de ao menos 24 diferentes anéis. Kenworthy e Mamajek (2015) fizeram uma análise mais detalhada dos dados do eclipse e propuseram que o sistema na verdade seria composto por 37 anéis. Alguns desses pontos de inflexão foram observados diretamente, enquanto outros foram deduzidos através da irregularidade na inclinação na curva de luz entre observações noturnas consecutivas.

Kenworthy et al. (2014) estudaram as possibilidades de um anel em torno de um corpo secundário com massa de dimensões planetárias ou de uma anã marrom ( $m = [10-100] M_{Jup}$ ) para explicar os dados do eclipse. Os autores sugerem que J1407b, no caso de órbita circular tenha um período entre 3,5 e 13,8 anos, correspondente a um semieixo maior no intervalo de [2,2 - 5,6] ua. Assim, ele seria um sistema de anel grande o suficiente para ocupar uma fração maior que 0,15 do raio de Hill e ser bem maior que o raio de Roche, confirmando os trabalhos anteriores, o que propõe a existência de satélites. Ao considerar J1407b em órbitas elípticas, nos casos de  $e > 0,7$ , o anel ocuparia uma fração significativa do raio de Hill ( $\xi > 0,5$ ), o que dificultaria a explicação para a estabilidade do anel.

Figura 17 – Curva de luz da estrela J1407 observada em 2007. Em vermelho os anéis pertencentes a esse sistema e a intensidade da cor é proporcional com a transmissão do anel. Em verde ilustra o caminho da estrela J1407 atrás do planeta durante o eclipse e a espessura desta linha corresponde ao diâmetro da estrela. O gráfico na parte inferior apresenta em verde a intensidade transmitida em função do tempo. Os pontos observados estão em vermelho e indica a luminosidade de J1407 normalizada com sua intensidade fora do eclipse.



fonte: Kenworthy e Mamajek (2015).

Na Figura 17 observa-se uma variação da densidade do anel em função da sua distância radial, caracterizando que algum processo dinâmico está removendo as partículas do anel. Tal processo pode ser devido a formação de satélites que, gravitacionalmente, aglutinam as partículas e criam falhas no anel.

Kenworthy e Mamajek (2015) observaram uma falha no disco (Figura 6 do artigo) a uma distância radial desde  $5,9 \times 10^7$  km até  $6,3 \times 10^7$  km ( $\sim 0,027$  ua de largura), possivelmente causada por um satélite não observado.

O encontro de partículas de uma anel com um satélite coorbital provoca perturbações temporárias nas partículas, aumentando suas excentricidades, de forma que elas fiquem em orbitas caóticas e se espalhem, formando a falha no anel. A largura da falha do anel ( $W_{ch}$ ) formada pela perturbação desse satélite na excentricidades da partícula é dada por (HÄNNINEN, 1993):

$$W_{ch} \sim 2,1\mu^{\frac{1}{3}}a_{sat} \quad (4.1)$$

em que  $\mu$  a razão de massa entre o satélite e o planeta dada por:

$$\mu = \frac{m_{sat}}{m} \quad (4.2)$$

onde  $m_{sat}$  e  $a_{sat}$  são a massa e o semieixo maior do satélite, respectivamente e  $m$  é a massa do planeta.

Aplicando este cálculo na falha observada por Kenworthy e Mamajek (2015) no sistema J1407b, tem-se a tabela 3, que mostra os valores estimados para a massa do satélite em função da massa do suposto planeta, assumindo os valores do semieixo maior do satélite de  $a_{sat} = 0,4$  ua e o tamanho da falha no anel de  $W_{ch} = 0,027$  ua.

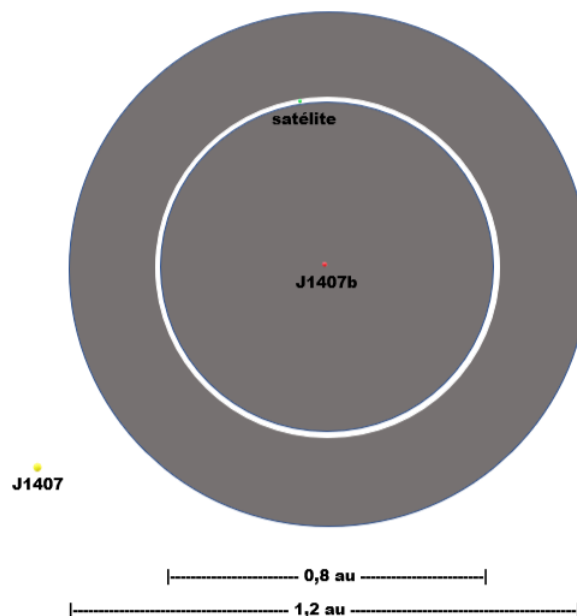
Tabela 3 – Tabela de valores da massa do satélite em função da massa do J1407b, capaz de gerar uma falha de 0,027 ua de largura.

$m_{J1407b}$ ( $m_{Jup}$ )	$m_{lua}$ ( $m_{Jup}$ )	$m_{J1407b}$ ( $m_{Jup}$ )	$m_{lua}$ ( $m_{Jup}$ )
10	0,1	60	0,61
20	0,2	70	0,71
30	0,3	80	0,82
40	0,4	90	0,92
50	0,51	100	1

fonte: Autoria Própria.

A Figura 18 ilustra uma representação do sistema de anéis do J1407b. O tamanho da estrela J1407 está proporcional a dimensão do anel, que segundo Kenworthy e Mamajek (2015) tem um raio aproximado de 0,6 ua, com uma falha em 0,4 ua, possivelmente ocasionada por um satélite.

Figura 18 – Esquemática das simulações realizada para o sistema J1407b.



fonte: Autoria Própria.

Combinando as equações (3.1) e (3.3), foi realizada um estudo com uma abordagem semelhante à de Werkhoven, Kenworthy e Mamajek (2014), onde estima o período máximo do planeta J1407b em função da sua excentricidade. Foi considerado que o eclipse tenha acontecido durante a passagem pelo periastro do planeta e que o raio do anel seja do tamanho do raio de Hill (isto é  $\xi = 1$ ). A equação que

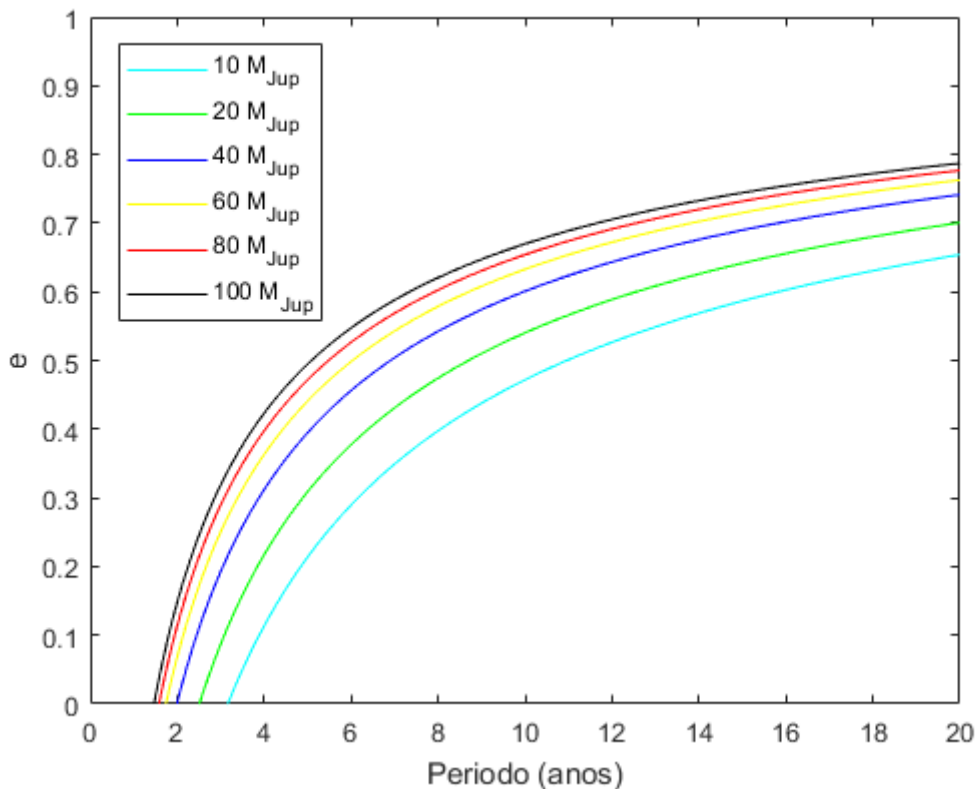
descreve o período máximo do planeta é dada por:

$$P_{max} = \pi t_e \sqrt{\frac{1+e}{(1-e)^3}} \sqrt[3]{\frac{3M_s}{m}} \quad (4.3)$$

Na Figura 19 cada curva representa o período máximo para diferentes massas do J1407b, dentro do intervalo entre 10 a 100  $m_{Jup}$  proposto por Kenworthy et al. (2014). O tempo do eclipse adotado foi 56 dias e a massa da estrela  $M_s = 0,9 M_\odot$ . Na figura dada um certo valor para a massa do planeta, são permitidos todos os valores de período abaixo da curva que a representa.

Considerando os estudos de Kenworthy et al. (2014) que mostrou que o corpo secundário deve um período menor de 13,8 anos, através da gráfico da Figura 19, conclui-se que este corpo pode ter no máximo 0,7 de excentricidade .

Figura 19 – Curva da excentricidade do J1407b em função do seu período máximo.



fonte: Autoria Própria.

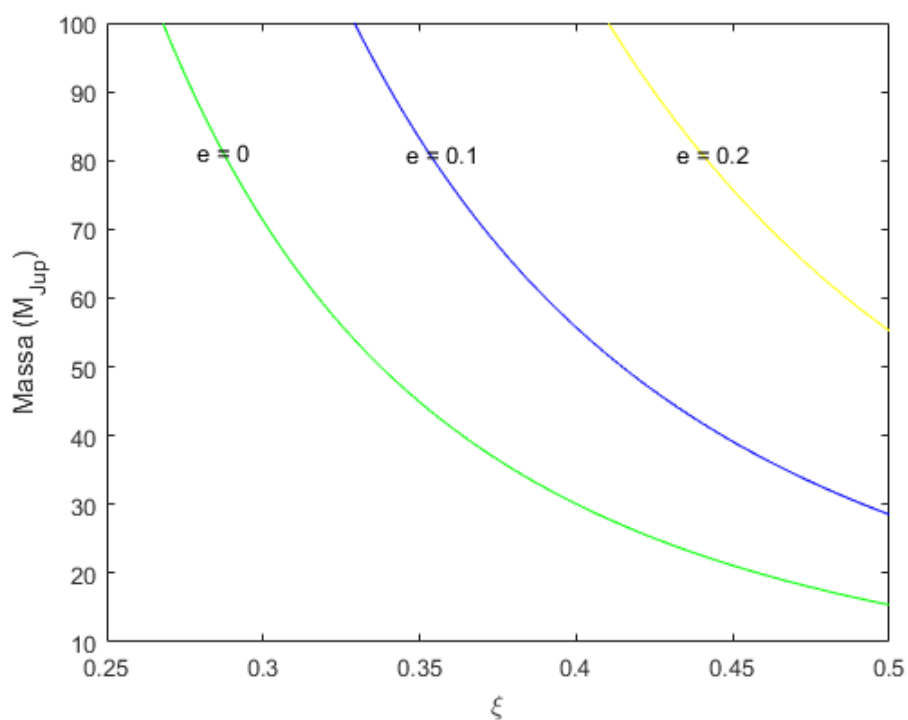
Aplicando a equação 3.5 no sistema J1407b, supondo para o cálculo do período do planeta, os seguintes valores de semieixos  $a_{J1407b} = 2, 3, 4$  e 5 ua. Assumindo a massa da estrela de  $0,9 M_\odot$ , o tempo do eclipse de 56 dias e o intervalo de massa do J1407b entre 10 e 100  $M_{Jup}$ , como proposto por Kenworthy et al. (2014), obtém-se as curvas da massa do planeta em função de  $\xi$ , da sua excentricidade e do seu semieixo maior.

Martin et al. (2011) verificaram que o limite de um disco circumplanetário é de  $\xi \sim 0,4$ . Ayliffe e Bate (2009) estimaram através de simulações hidrodinâmicas que o valor de  $\xi$  seria  $\sim R_{Hill}/3$ . Domingos, Winter e Yokoyama (2006) analisaram o limite região estável para satélites ao redor de

planetas gigantes gasosos seria  $\xi \sim 0.5$  no caso prógrado. Fundamentando-se nas previsões teóricas e nos resultados do sistema PDS110b ( $\xi < 0,5$ , caso prógrado), foi considerado que um anel com  $\xi > 0,5$  é improvável.

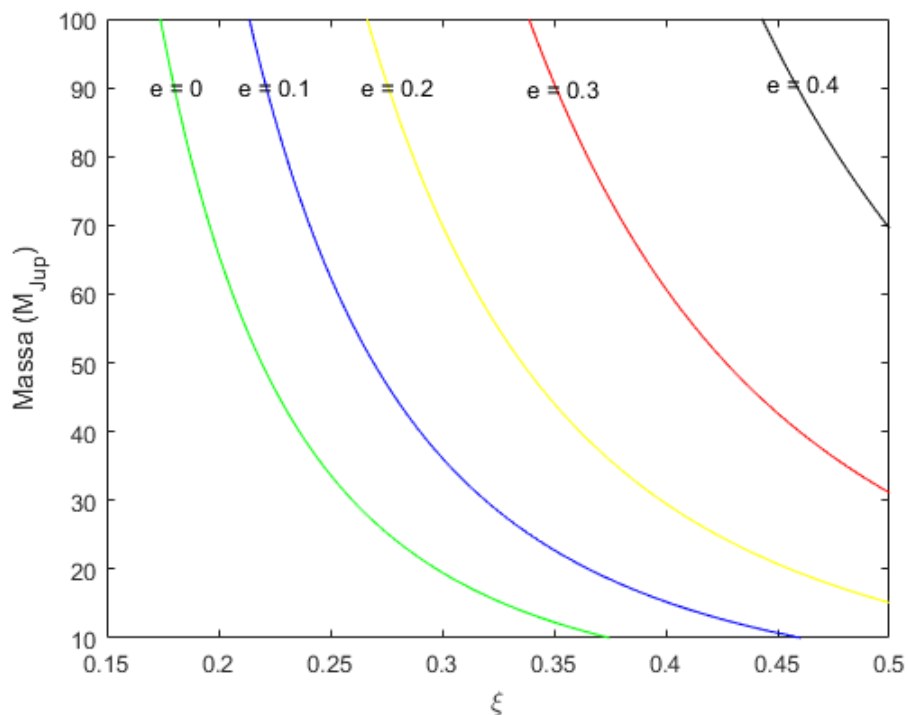
Os resultados da análise da massa do planeta em função de sua excentricidade e do fator  $\xi$  estão apresentados nas Figuras 20, 21 e 22, para os valores do semieixo maior do J1407b de 3, 4 e 5 ua, respectivamente. Quando  $a_{J1407b}$  é igual a 2 ua, independente do valor de excentricidade do planeta,  $\xi$  sempre será maior que 0,5.

Figura 20 – Curvas da massa do exoplaneta J1407b em função de sua excentricidade de  $\xi$ . Caso com semieixo maior do planeta está em 3 ua.



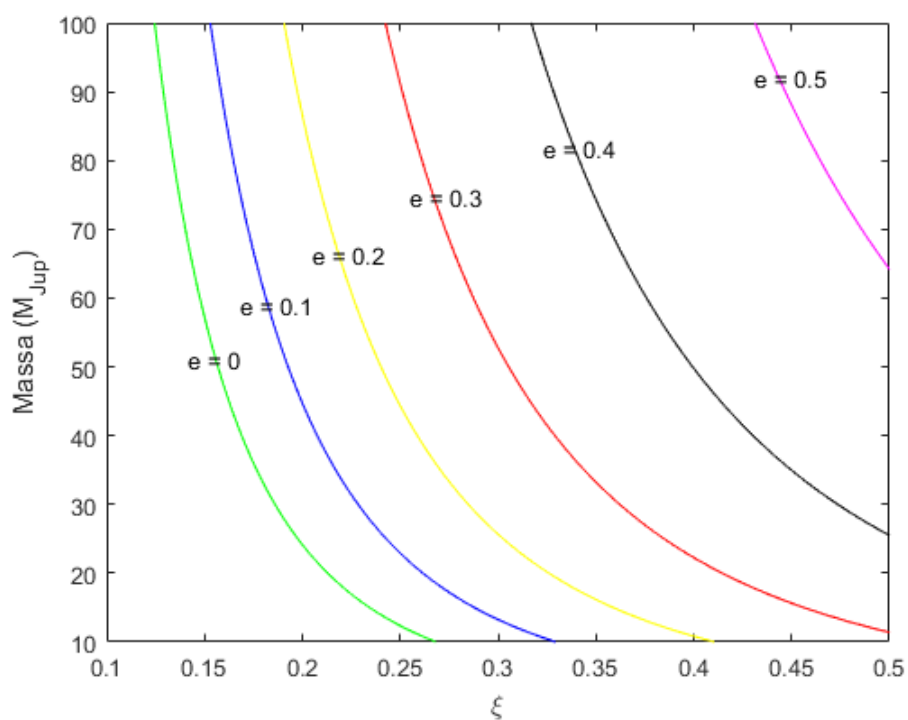
fonte: Autoria Própria.

Figura 21 – Curvas da massa do exoplaneta J1407b em função de sua excentricidade de  $\xi$ . Caso com semieixo maior do planeta está em 4 ua.



fonte: Autoria Própria.

Figura 22 – Curvas da massa do exoplaneta J1407b em função de sua excentricidade de  $\xi$ . Caso com semieixo maior do planeta está em 5 ua.



fonte: Autoria Própria.

## 4.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DO SISTEMA DE ANÉIS DO J1407b

Neste trabalho, devido as inúmeras variáveis desconhecidas sobre o sistema J1407b (como massa, semieixo maior e excentricidade do J1407b, a dimensão e inclinação do anel, entre outros) foi realizado uma abordagem similar à adotada para o sistema PDS110b, com a finalidade de determinar características para sistema J1407b que explicariam o eclipse ocorrido.

Da mesma maneira que no capítulo anterior foram realizados dois grandes conjuntos de simulações numéricas, sendo um deles com as partículas do anel em órbitas prógradas e outro em órbitas retrógradas. Cada simulação continha quatro corpos: a estrela J1407, o exoplaneta J1407b, a exolua e uma partícula do anel. Foi considerada apenas a interação gravitacional entre os objetos. As simulações foram realizadas com integrador Rebound/IAS15 (REIN; LIU, 2012).

Nas simulações os parâmetros da estrela foram os mesmos para todos sistemas. Adotamos a sua massa de  $0,9 M_{\odot}$  e o raio de  $0,96 R_{\odot}$ . Para o exoplaneta as variáveis da massa, do semieixo maior e da excentricidade foram determinadas aleatoriamente (utilizando a da função do integrador *reb\_random\_uniform*) dentro dos seguintes intervalos:  $m_{J1407b} = [10 - 100] M_{Jup}$ ,  $a_{J1407b} = [3 - 5,6]$  ua e  $e_{J1407b} = [0 - 0,4]$ , de acordo com os limites proposto por Kenworthy et al. (2014) e Kenworthy e Mamajek (2015). Com exceção quando o semieixo do planeta estava entre  $a_{J1407b} = [3 - 3,9]$  ua, onde o intervalo da excentricidade adotado foi de  $[0 - 0,2]$ , baseando-se nos resultados da Figura 20, que mostra que para  $e_{J1407b}$  maior que 0,2, os valores do fator  $\xi$  seriam superiores a 0,5. Supondo J1407b um gigante gasoso e perfeitamente esférico, o raio do planeta foi definido conforme a massa escolhida e a densidade de Júpiter ( $1.326 \text{ kg/m}^3$  (NASA, 2018b)).

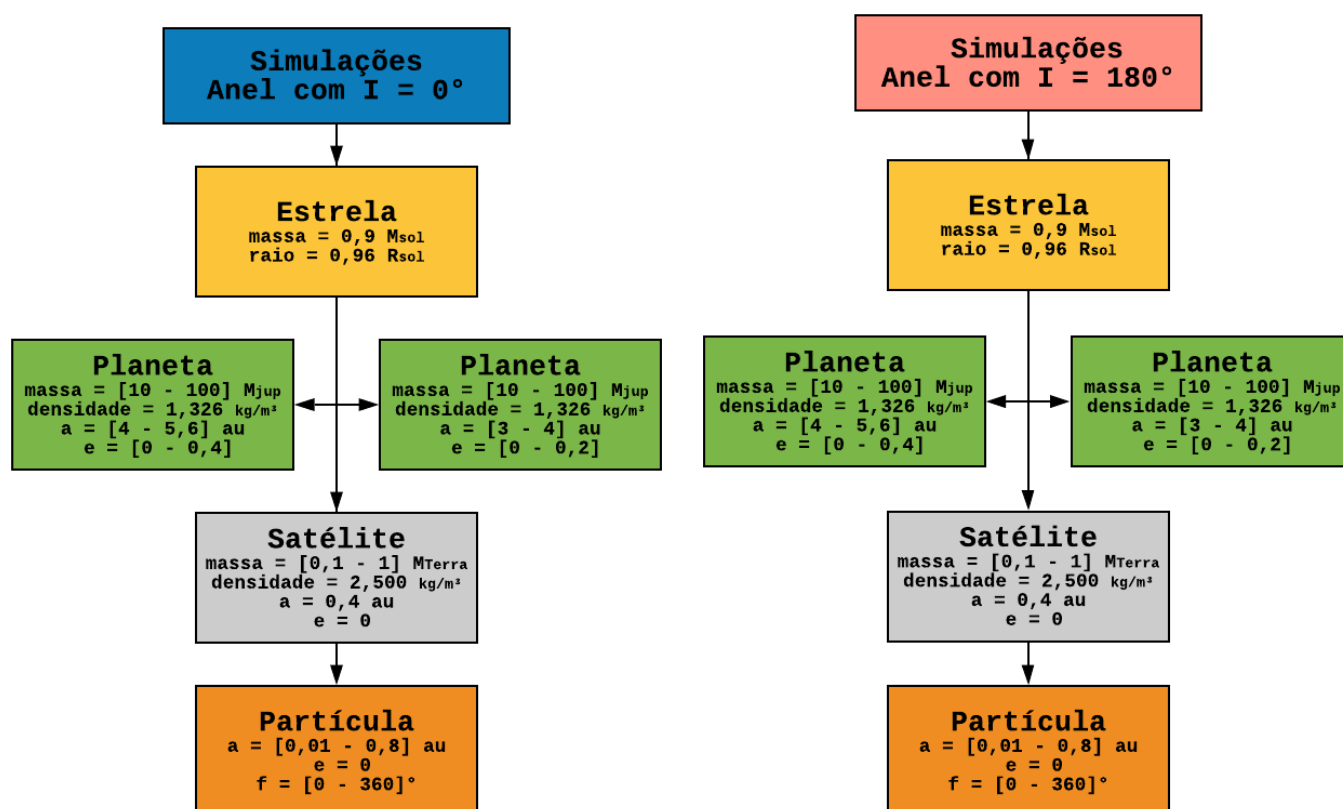
Como discutido na seção 4.1.1, pressupõe-se que a falha observada no disco em 0,4 ua de distância do planeta deve-se a presença de um satélite. Portanto foi incluído este suposto satélite nas simulações, a fim de analisar sua interação com o anel. Para isto foi definido em cada simulação de forma aleatória a massa da lua hipotética dentro do intervalo  $m = [0,1 - 1] M_{terra}$ , conforme a tabela 3. Seu semieixo maior foi fixado em 0,4 ua, inicialmente em órbita circular. Para calcular o seu raio considerou-se a densidade a média dos quatro maiores satélites de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes, Calisto) ( $\rho_{exolua} \approx 2,5 \text{ kg/m}^3$ ).

A partícula do anel inicialmente estava em órbita inicialmente circular, não tinha massa e foi atribuída para a variável do seu semieixo maior um valor aleatório dentro do intervalo de  $a = [0,01 - 0,8]$  ua de distância do planeta, já que a dimensão do anel proposta por Kenworthy e Mamajek (2015) era de 0,6 ua. A anomalia verdadeira também foi definida aleatoriamente entre  $0^{\circ}$  e  $360^{\circ}$ .

Cada conjunto de 84.000 simulações, as partículas e as luas tinham inclinação de  $0^{\circ}$  ou  $180^{\circ}$ . O tempo total determinado para estabilidade do sistema foi de  $600 \times 10^4$  dias, equivalente a 10.000 vezes o período orbital da partícula mais externa em torno do J1407b com massa de  $10 M_{Jup}$  (assim como no capítulo anterior, este é o período de uma partícula no caso mais extremo). As colisões foram registradas quando ocorriam choque físico entre dois corpos do sistema e no mesmo instante a simulação era interrompida. Todas as partículas que terminaram em órbitas hiperbólicas em relação ao planeta foram consideradas ejetadas. A Figura 23 mostra uma esquematização da criação das condições iniciais para as simulações numéricas.



Figura 23 – Fluxograma da criação das simulações numéricas para o sistema J1407b.



fonte: Autoria Própria.

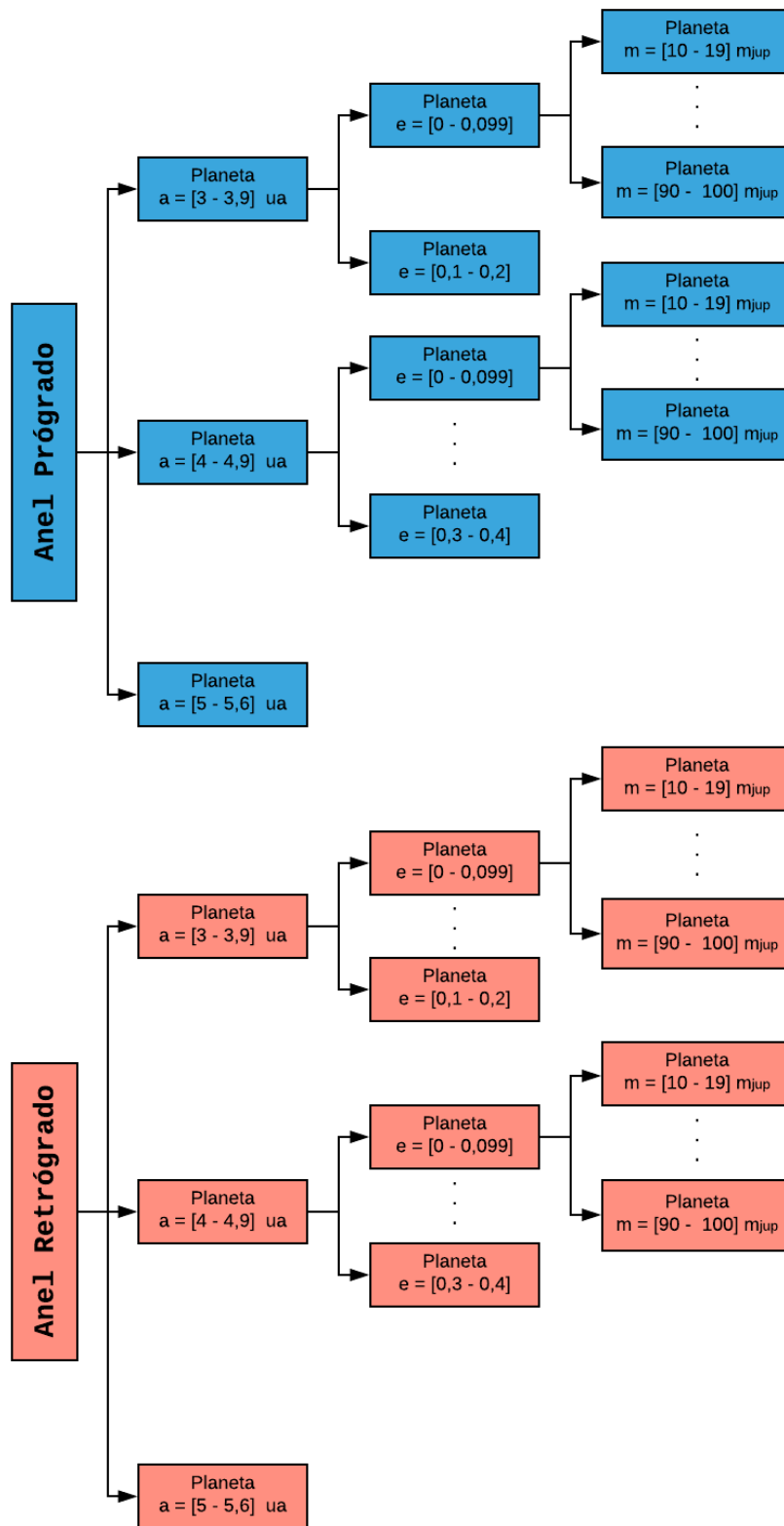
### 4.3 DETERMINANDO OS PARÂMETROS PARA O SISTEMA J1407b

Para analisar os resultados uma abordagem similar à do capítulo anterior foi realizada. Primeiramente todas as simulações foram separadas em 180 diferentes conjuntos a fim de agrupar as variáveis envolvidas no problema em pequenos intervalos.

Os critérios aplicados para distinguir cada conjuntos foram: inclinação da partícula ( $0^\circ$  ou  $180^\circ$ ); semieixo maior, excentricidade e massa do planeta, dentro dos respectivos intervalos com  $\Delta a \approx 1$  ua,  $\Delta e = 0,1$  e  $\Delta m = 10 M_{Jup}$ , como mostra o fluxograma da Figura 24.

Foram excluídas da análise final todos os sistemas que tiveram colisões ou ejeção das partículas. Em aproximadamente 45 % das simulações as partículas foram ejetadas e outros 1 % sofreram colisões. Dentro das simulações que registram colisões, 74 % delas foram entre a partícula e lua, 21 % entre a partícula e o planeta, 5 % entre a lua e o planeta.

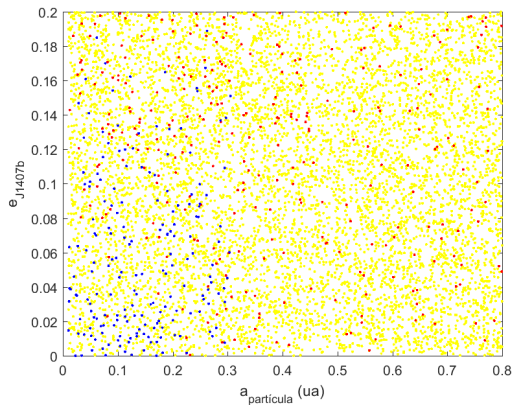
Figura 24 – Fluxograma da análise das simulações numéricas para o sistema J1407b .



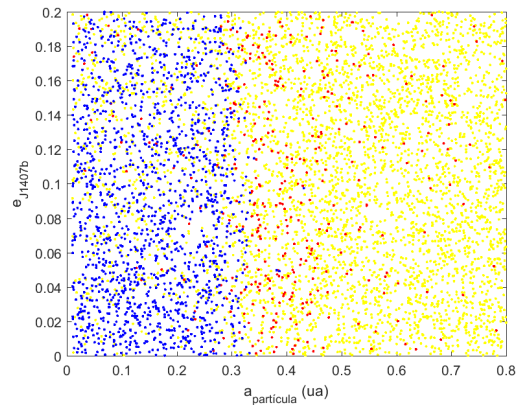
fonte: Autoria Própria.

A Figura 25 e Figura 26 mostram mapas de condições iniciais ( $a_{particula} \times e_{J1407b}$ ) de vários conjunto dentro de um certo intervalo de massa e semieixo do planeta.

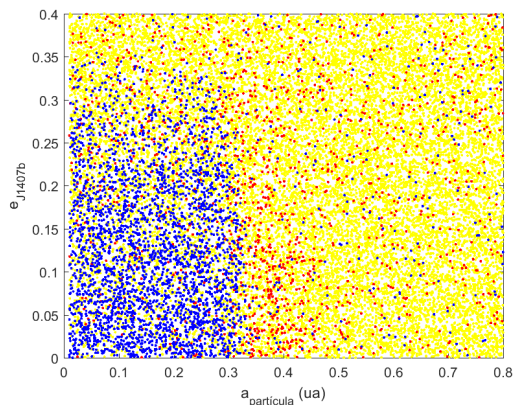
Figura 25 – Diagrama de condição inicial do caso do anel prógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). Em azul são as simulações estáveis, em amarelo as que ocorreram ejeção das partículas e em vermelho colisões. Em cada gráfico massa e semieixo maior do planeta varia dentro um certo intervalo.



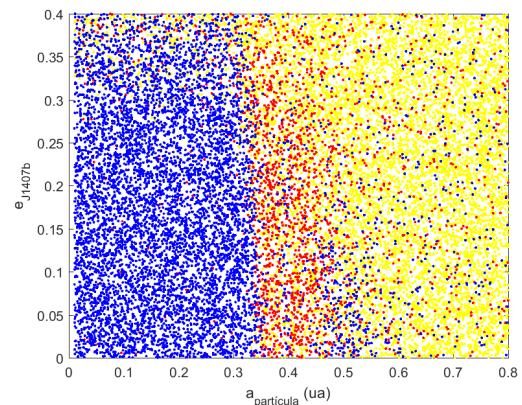
(a)  $\Delta a = [3 - 3,9]$  ua,  $\Delta m = [10 - 49,9]$   $m_{Jup}$



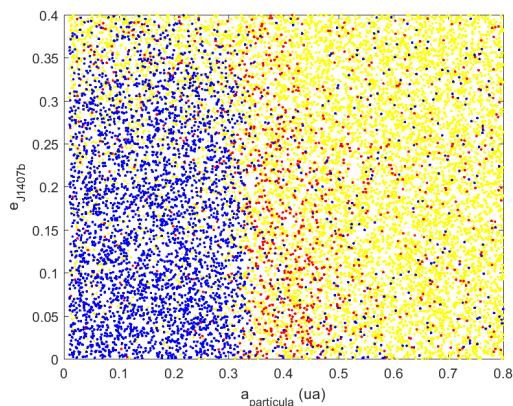
(b)  $\Delta a = [3 - 3,9]$  ua,  $\Delta m = [50 - 100]$   $m_{Jup}$



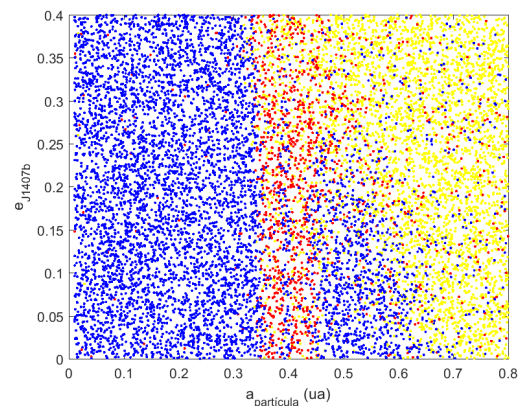
(c)  $\Delta a = [4 - 4,9]$  ua,  $\Delta m = [10 - 49,9]$   $m_{Jup}$



(d)  $\Delta a = [4 - 4,9]$  ua,  $\Delta m = [50 - 100]$   $m_{Jup}$



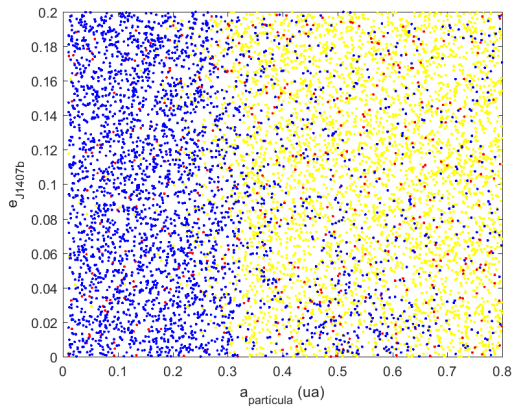
(e)  $\Delta a = [5 - 5,6]$  ua,  $\Delta m = [10 - 49,9]$   $m_{Jup}$



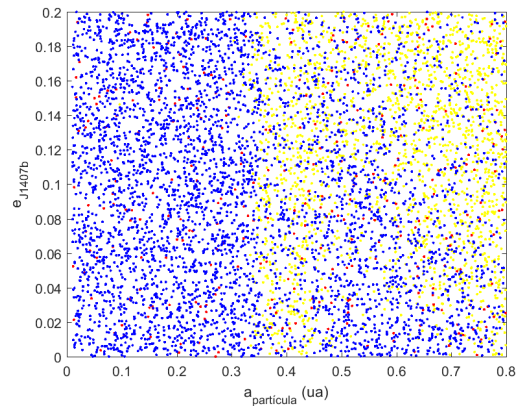
(f)  $\Delta a = [5 - 5,6]$  ua,  $\Delta m = [50 - 100]$   $m_{Jup}$

fonte: Autoria Própria.

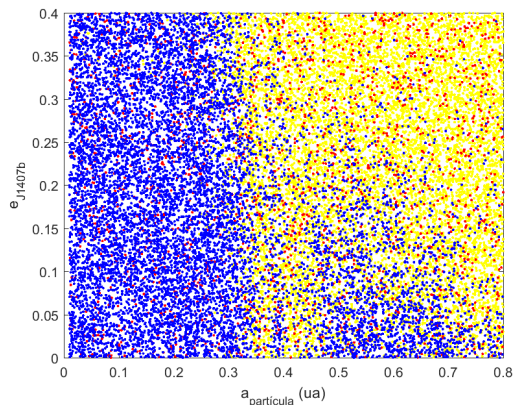
Figura 26 – Diagrama de condição inicial do caso do anel retrógrado ( $a_{particula} \times e_{PDS110b}$ ). Em azul são as simulações estáveis, em amarelo as que ocorreram ejeção das partículas e em vermelho colisões. Em cada gráfico massa e semieixo maior do planeta varia dentro um certo intervalo.



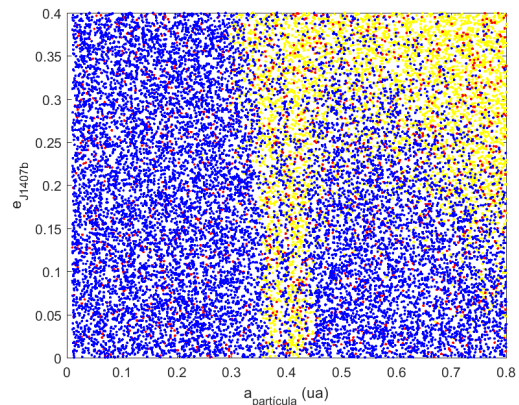
(a)  $\Delta a = [3 - 3,9]$  ua,  $\Delta m = [10 - 49,9]$   $m_{Jup}$



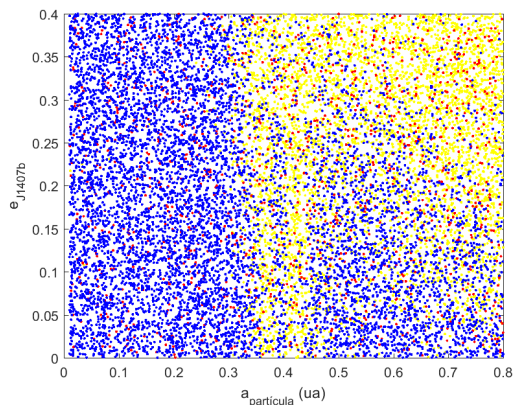
(b)  $\Delta a = [3 - 3,9]$  ua,  $\Delta m = [50 - 100]$   $m_{Jup}$



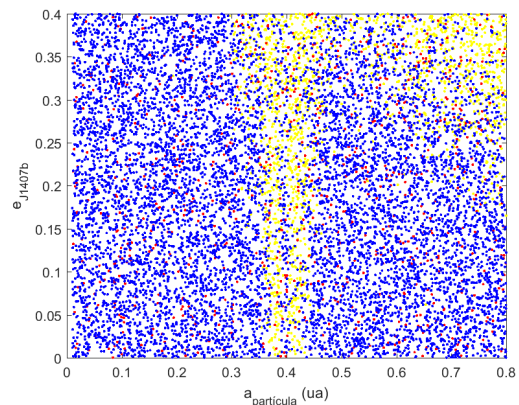
(c)  $\Delta a = [4 - 4,9]$  ua,  $\Delta m = [10 - 49,9]$   $m_{Jup}$



(d)  $\Delta a = [4 - 4,9]$  ua,  $\Delta m = [50 - 100]$   $m_{Jup}$



(e)  $\Delta a = [5 - 5,6]$  ua,  $\Delta m = [10 - 49,9]$   $m_{Jup}$



(f)  $\Delta a = [5 - 5,6]$  ua,  $\Delta m = [50 - 100]$   $m_{Jup}$

fonte: Autoria Própria.

No caso do anel prógrado a porção de simulações estáveis com  $a_{J1407b} < 3$  ua é muito pequena, quando a massa do planeta é inferior a  $50 M_{Jup}$  (Figura 25a) ao contrário do que se observa no caso retrógrado (Figura 26a). Com o aumento do semieixo do planeta, maior é a quantidade de simulações estáveis (Figura 25a e Figura 25c), uma vez que como a distância do planeta em relação a estrela aumenta, menor é o efeito da perturbação gravitacional da estrela sobre a partícula.

Quanto maior os valores dos parâmetros do semieixo maior, da massa e menor a excentricidade do planeta, mais estável é o conjunto, isto porque essas condições contribuem para aumentar a região de maior influência gravitacional do planeta sobre as partículas (Figura 25a e Figura 25d), como discutido no capítulo anterior. Na Figura 25c e Figura 25e nota-se que no caso prógrado, para  $m_{J1407b} < 50 m_{Jup}$ , com  $e_{J1407b} > 0,3$  e  $e_{J1407b} > 0,35$ , respectivamente, o número de simulações estáveis é insignificante.

Em geral, as simulações retrógradas são mais estáveis que as prógradas, porém tais sistemas são muito improváveis. É notável uma concentração de pontos vermelhos na região em torno 0,4 ua (Figuras 25b,c,d,e e f), indicando um número maior de colisões. Colisões ocasionadas devido aos choques entre o satélite e a partícula, a falha provocada pelo satélite fica evidente nos gráficos da Figura 26 (no caso retrógrado) e nas Figuras 25d e f.

Definindo o raio do anel como a distância da partícula mais externa em relação ao planeta, é possível calcular o tempo teórico de duração do eclipse através da equação 3.1, assumindo que o eclipse tenha ocorrido durante a passagem do J1407b pelo periastro.

As características dos sistemas dos conjuntos que melhores conseguiram se aproximaram do eclipse observado estão resumidos na tabela 4 para os casos dos anéis prógrados e na tabela 5 os casos dos anéis retrógrado.

Tabela 4 – Parâmetros do planeta e do anel prógrado dos conjuntos obtiveram o tempo teórico do eclipse próximo ou até mesmo compatível (em negrito) com o observado.

$a_{J1407b}$ (au)	$e_{J1407b}$	$m_{J1407b}$ ( $m_{Jup}$ )	Período (anos)	$r_{anel}$ (ua)	$t_e$ (dias)
3 - 3,9	0 - 0,09	50 - 59,9	5,3 - 8,2	0,30	56 - 72
3 - 3,9	0 - 0,09	70 - 79,9	5,2 - 8,1	0,31	58 - 74
3 - 3,9	0 - 0,09	90 - 100	5,2 - 8,1	0,33	60 - 78
<b>3 - 3,9</b>	<b>0,1 - 0,19</b>	<b>60 - 69,9</b>	<b>5,3 - 8,2</b>	<b>0,30</b>	<b>50 - 65</b>
3 - 3,9	0,1 - 0,19	70 - 79,9	5,3 - 8,1	0,33	55 - 71
<b>3 - 3,9</b>	<b>0,1 - 0,19</b>	<b>80 - 89,9</b>	<b>5,2 - 8,1</b>	<b>0,30</b>	<b>50 - 65</b>
3 - 3,9	0,1 - 0,19	90 - 100	5,2 - 8,1	0,32	53 - 69
4 - 4,9	0,2 - 0,29	40 - 49,9	8,3 - 11,5	0,31	55 - 69
4 - 4,9	0,3 - 0,39	50 - 59,9	8,2 - 11,5	0,36	57 - 72
<b>4 - 4,9</b>	<b>0,3 - 0,39</b>	<b>60 - 69,9</b>	<b>8,1 - 11,4</b>	<b>0,32</b>	<b>50 - 63</b>
<b>4 - 4,9</b>	<b>0,3 - 0,39</b>	<b>70 - 79,9</b>	<b>8,1 - 11,4</b>	<b>0,31</b>	<b>48 - 60</b>
<b>4 - 4,9</b>	<b>0,3 - 0,39</b>	<b>80 - 89,9</b>	<b>8,1 - 11,3</b>	<b>0,33</b>	<b>51 - 64</b>
4 - 4,9	0,3 - 0,39	90 - 100	8,0 - 11,3	0,38	58 - 74
5 - 5,6	0,3 - 0,39	40 - 49,9	11,5 - 13,7	0,31	55 - 65
5 - 5,6	0,3 - 0,39	50 - 59,9	11,4 - 13,6	0,32	57 - 68
5 - 5,6	0,3 - 0,39	60 - 69,9	11,4 - 13,5	0,33	57 - 68

fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 – Parâmetros do planeta e do anel retrógrado dos conjuntos obtiveram o tempo teórico do eclipse próximo do observado.

$a_{J1407b}$ (au)	$e_{J1407b}$	$m_{J1407b}$ ( $m_{Jup}$ )	Período (anos)	$r_{anel}$ (ua)	$t_e$ (dias)
3 - 3,9	0 - 0,09	10 - 19,9	5,4 - 8,3	0,37	70 - 90
3 - 3,9	0,1 - 0,19	10 - 19,9	5,4 - 8,3	0,34	59 - 76
3 - 3,9	0,1 - 0,19	10 - 19,9	5,4 - 8,3	0,39	66 - 86
4 - 4,9	0,2 - 0,29	10 - 19,9	8,3 - 11,7	0,37	67 - 84
4 - 4,9	0,3 - 0,39	10 - 19,9	8,2 - 11,7	0,28	44 - 56
5 - 5,6	0,3 - 0,39	10 - 19,9	11,6 - 13,9	0,39	70 - 84

fonte: Aurtoria Própria.

### 4.3.1 Discussão

Werkhoven, Kenworthy e Mamajek (2014) sugerem fortemente que o corpo elipsante (J1407b) tenha um período orbital  $< 15$  anos. A análise do período máximo desse corpo mostrou que este objeto não poderia ter excentricidade superior a 0,7 (Figura 19) para que o seu disco não exceda o tamanho do seu raio de Hill.

A estabilidade de um disco circumplanetário foi limitada em  $\xi < 0,5$ . Nessa condição, considerando um planeta de curto período ( $< 15$  anos), o eclipse ocorrido poderia ser explicado somente se a excentricidade do corpo fosse dentro dos intervalos:  $e_{J1407b} < 0,2$  para  $a_{J1407b} = [3 - 4]$  ua e  $e_{J1407b}$  menor que 0,4 para  $a_{J1407b} = [4 - 5,6]$  ua, no caso de  $a_{J1407b} < 3$  ua, provavelmente o sistema seria instável, pois o tamanho do anel excederia  $0,5 R_{Hill}$  do planeta, independente do valor da excentricidade (como discutido na seção 4.1.1).

Após uma análise teórica e predeterminando os possíveis intervalos dos parâmetros de  $e_{J1407b}$  e  $a_{J1407b}$ , as simulações numéricas ajudaram a compreender melhor as características do corpo. As simulações com o anel retrógrado são mais estáveis, assim como no sistema de anéis PDS110b, apesar de serem estatisticamente improváveis, entretanto é importante entender seus efeitos dinâmicos.

Segundo Kenworthy e Mamajek (2015) pode-se considerar que eclipse ocorreu entre 52 e 60 dias, e todos os conjuntos tabelados em negrito correspondem a este intervalo de tempo. Os conjuntos também reproduziram um anel com raio de aproximadamente 0,3 ua, o que está dentro do limite proposto por Werkhoven, Kenworthy e Mamajek (2014), onde o anel mais externo do J1407b deve estar a uma distância radial entre 0,3 e 0,6 ua.

Os anéis prógrados ocupam uma fração significativa do  $R_{Hill}$  do planeta ( $\xi < 0,5$ ), compatível com os estudos teóricos. Nas simulações de partículas retrógradas, essa região de estabilidade, nos casos mais extremos pode se estender até próximo à um raio de Hill, portanto  $\xi < 1$ .

A tabela 4 mostra as características dos sistemas com anéis prógrados que possuem o tempo teórico do eclipse compatível com o observado. Segundo os resultados da tabela o semieixo maior do J1407b provavelmente seria maior que 4 ua e um período orbital entre 8 e 13,6 anos, com uma excentricidade entre 0,3 e 0,4. Uma outra possibilidade, o planeta teria uma excentricidade um pouco menor ( $e$  até 0,2), porém o semieixo maior do planeta estaria entre 3 e 4 ua, nestes casos a densidade das simulações estáveis nesses conjuntos são inferiores aquelas onde o planeta possui  $a_{J1407b} > 4$  ua. Em todos esses

casos a massa do planeta eram superiores a  $50 m_{Jup}$  e através das simulações numéricas conseguiu-se restringir os intervalos propostos por meio dos dados observacionais, que foram:  $m_{J1407b} = [10 - 100] m_{Jup}$  e  $a_{J1407b} = [2,2 - 5,6]$  ua (KENWORTHY et al., 2014). Futuras observações, na detecção de um novo eclipse, auxiliará na determinação no semieixo maior e no período orbital.

De modo geral, os sistemas com massa inferior a  $50 m_{Jup}$  são instáveis ou produzem nos um anel muito pequeno para justificar o tempo do eclipse. Nas situações onde  $a_{J1407b} > 4$  ua,  $m_{J1407b} > 50 m_{Jup}$  e com excentricidade pequena ( $e_{J1407b} < 0,2$ ), o anel formado por esses sistemas são bem extensos e o eclipse produzido por eles excedem o tempo observado.

Considerando a dimensão do anel  $\sim 0,3$  ua, a densidade do J1407b proporcional a densidade de Júpiter, ( $\rho_p = 1,326 \text{ g/cm}^3$  (NASA, 2018b)), a massa do planeta  $> 50 m_{Jup}$ , a razão entre o raio do anel e o raio de Roche é maior que 58, mostrando que o anel é significativamente maior que o limite de Roche do planeta, como proposto por Kenworthy et al. (2014), Kenworthy e Mamajek (2015), Rieder e Kenworthy (2016).

A análise do semieixo maior pela excentricidade das partículas, mostra que medida que elas se afastam do planeta hospedeiro, elas sofrem perturbações periódicas na sua excentricidade, assim como no sistema PDS110b, possivelmente em razão do disco apresentar variações azimutais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAS E ETAPAS FUTURAS

Neste trabalho estudou-se a estabilidade de possíveis sistemas de exoanéis. Através de várias simulações numéricas, envolvendo um grande número de parâmetros livres, como massa, semieixo maior, excentricidade do planeta, inclinação, extensão do anel, entre outros. Analisamos assim diversas configurações dos sistemas (PDS110b e J1407b) a fim de estabelecer quais são as suas características compatíveis com os eclipses observados.

Os dois eclipses que ocorreram com a estrela PDS110 são consistentes com um imenso sistema de anéis ao redor de um exoplaneta não observado. Os resultados das simulações numéricas indicam que o PDS110b provavelmente tem uma massa entre 50 e 70  $m_{Jup}$  e excentricidade menor que 0,05, limitando assim a incerteza na massa proposta por Osborn et al. (2017).

Os sistemas de anéis em torno do planeta tem aproximadamente 0,4 ua de diâmetro, ocupando uma fração significativa raio de Hill do planeta. Devido ao fato do raio do anel ser várias vezes superior ao limite de Roche, muito provavelmente este planeta abriga vários satélites.

A análise do efeito de Poyting-Robertson sobre partículas micrométricas, apontam que caso detectado um anel composto partículas de poeira, significa que existe um mecanismo de fonte dessas partículas, pois rapidamente ( $10^4$  anos) elas decairiam em direção ao planeta.

O eclipse acontecido com a estrela J1407 pode ser interpretado pela a ocultação de um sistema de anéis em torno de um exoplaneta gigante gasoso com massa e semieixo maior entre  $m_{J1407b} = [10 - 100] m_{Jup}$  e  $a_{J1407b} = [2,2 - 5,6]$  ua, respectivamente (KENWORTHY et al., 2014). Após uma análise teórica, onde verificou que para a estabilidade do anel, os valores  $e_{J1407b}$  e  $a_{J1407b}$  teriam que ser menor que 0,4 e maior que 3 ua, respectivamente. Os conjuntos de simulações que melhores reproduzem o eclipse observado indicam que J1407b teria massa maior que 50  $m_{Jup}$ ,  $a_{J1407b} = [4 - 5,6]$  ua e  $e_{J1407b}$  maior que 0,3, restringindo os limites propostos a partir dos dados observacionais.

O anel provavelmente possui um raio  $\sim 0,3$  ua, grande o bastante para conter luas nas suas falhas, como proposto em trabalhos anteriores. Futuras observações dos dois sistemas estudados poderão trazer não só a confirmação dos anéis, como também maiores detalhes das características desses sistemas.

Uma etapa que esta em desenvolvimento neste trabalho é uma análise sobre a perturbação secular sofridas pelas partículas mais externas do anel, baseado no trabalho de Domingos, Moraes e Prado (2008), que estuda a perturbação do terceiro corpo para o caso de órbitas elípticas, na finalidade de compreender melhor o efeito da variação periódica da sua excentricidade.



## REFERÊNCIAS

- AIZAWA, M. et al. Systematic search for rings around kepler planet candidates: Constraints on ring size and occurrence rate. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 155, n. 5, p. 206, 2018.
- AIZAWA, M. et al. Toward detection of exoplanetary rings via transit photometry: Methodology and a possible candidate. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 153, n. 4, p. 193, 2017.
- ANGLADA, G. et al. Alma discovery of dust belts around proxima centauri. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 850, n. 1, p. L6, 2017.
- AYLIFFE, B. A.; BATE, M. R. Circumplanetary disc properties obtained from radiation hydrodynamical simulations of gas accretion by protoplanets. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 397, n. 2, p. 657–665, 2009.
- BARNES, J. W.; FORTNEY, J. J. Transit detectability of ring systems around extrasolar giant planets. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 616, n. 2, p. 1193, 2004.
- BRAGA-RIBAS, F. et al. A ring system detected around the centaur (10199) chariklo. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 508, n. 7494, p. 72, 2014.
- BURNS, J. A.; HAMILTON, D. P.; SHOWALTER, M. R. Dusty rings and circumplanetary dust: Observations and simple physics. In: **Interplanetary Dust**. [S.l.]: Springer, 2001. p. 641–725.
- BURNS, J. A.; LAMY, P. L.; SOTER, S. Radiation forces on small particles in the solar system. **Icarus**, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 1–48, 1979.
- BURNS, J. A. et al. The formation of jupiter’s faint rings. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 284, n. 5417, p. 1146–1150, 1999.
- DOMINGOS, R.; WINTER, O.; YOKOYAMA, T. Stable satellites around extrasolar giant planets. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 373, n. 3, p. 1227–1234, 2006.
- DOMINGOS, R. d. C.; MORAES, R. V. de; PRADO, A. de A. Third-body perturbation in the case of elliptic orbits for the disturbing body. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2008, 2008.
- DUFFARD, R. et al. Photometric and spectroscopic evidence for a dense ring system around centaur chariklo. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 568, p. A79, 2014.
- ELLIOT, J. L.; DUNHAM, E.; MINK, D. The rings of uranus. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 267, n. 5609, p. 328, 1977.
- ESPOSITO, L. W. Planetary rings. **Reports on Progress in Physics**, IOP Publishing, v. 65, n. 12, p. 1741, 2002.
- ETANGS, A. L. des et al. Search for rings and satellites around the exoplanet corot-9b using spitzer photometry. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 603, p. A115, 2017.
- GARCIA-LARIO, P. et al. Near infrared survey of iras sources with colours like planetary nebulae. ii. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 82, p. 497–512, 1990.

- GREGORIO-HETEM, J.; HETEM, A. Classification of a selected sample of weak t tauri stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, The Royal Astronomical Society, v. 336, n. 1, p. 197–206, 2002.
- HAMILTON, D. P. The asymmetric time-variable rings of mars. **Icarus**, Academic Press, v. 119, n. 1, p. 153–172, 1996.
- HAMILTON, D. P.; BURNS, J. A. Orbital stability zones about asteroids: II. the destabilizing effects of eccentric orbits and of solar radiation. **Icarus**, v. 96, n. 1, p. 43 – 64, 1992. ISSN 0019-1035.
- HÄNNINEN, J. Numerical simulations of moon—ringlet interaction. **Icarus**, Elsevier, v. 103, n. 1, p. 104–123, 1993.
- HEDMAN, M. Why are dense planetary rings only found between 8 and 20 au? **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 801, n. 2, p. L33, 2015.
- HEDMAN, M. et al. Aegaeon (saturn liii), a g-ring object. **Icarus**, Elsevier, v. 207, n. 1, p. 433–447, 2010.
- HEISING, M. Z.; MARCY, G. W.; SCHLICHTING, H. E. A search for ringed exoplanets using kepler photometry. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 814, n. 1, p. 81, 2015.
- HELLER, R. On the detection of extrasolar moons and rings. **arXiv preprint arXiv:1701.04706**, 2017.
- HYODO, R.; OHTSUKI, K. Saturn’s f ring and shepherd satellites a natural outcome of satellite system formation. **Nature Geoscience**, Nature Publishing Group, v. 8, n. 9, p. 686, 2015.
- ISHIMOTO, H. Formation of phobos/deimos dust rings. **Icarus**, Elsevier, v. 122, n. 1, p. 153–165, 1996.
- JUHÁSZ, A.; HORÁNYI, M. Dust torus around mars. **Journal of Geophysical Research: Planets**, Wiley Online Library, v. 100, n. E2, p. 3277–3284, 1995.
- KALAS, P. et al. Optical images of an exosolar planet 25 light-years from earth. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 322, n. 5906, p. 1345–1348, 2008.
- KENWORTHY, M. et al. Mass and period limits on the ringed companion transiting the young star j1407. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 446, n. 1, p. 411–427, 2014.
- KENWORTHY, M. A.; MAMAJEK, E. E. Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of j1407b: Sculpting by exomoons? **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 800, n. 2, p. 126, feb 2015.
- KRIVOV, A. V.; HAMILTON, D. P. Martian dust belts: waiting for discovery. **Icarus**, Elsevier, v. 128, n. 2, p. 335–353, 1997.
- LESIA. **Exoplanètes**. 2018. Disponível em: <<http://exoplanetes.esep.pro/index.php>>.
- LEVISON, H. F. et al. Ridge formation and de-spinning of iapetus via an impact-generated satellite. **Icarus**, Elsevier, v. 214, n. 2, p. 773–778, 2011.
- LIM, T. et al. “tnos are cool”: A survey of the trans-neptunian region-iii. thermophysical properties of 90482 orcus and 136472 makemake. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 518, p. L148, 2010.

- MAMAJEK, E. E. et al. Planetary construction zones in occultation: Discovery of an extrasolar ring system transiting a young sun-like star and future prospects for detecting eclipses by circumsecondary and circumplanetary disks. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 143, n. 3, p. 72, feb 2012.
- MARTIN, R. G. et al. Tidal warping and precession of be star decretion discs. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 416, n. 4, p. 2827–2839, 2011.
- MAYOR, M.; QUELOZ, D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 378, n. 6555, p. 355, 1995.
- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar system dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 1999.
- NASA. **Huygens Probe**. 2018. Disponível em: <<https://attic.gsfc.nasa.gov/huygensgcms/Shistory.htm>>.
- NASA. **Solar System Exploration**. 2018. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/planets/jupiter/overview/>>.
- NASA. **Solar System Exploration**. 2018. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/resources/13726/iapetus-up-close/>>.
- NICHOLSON, P. D. et al. A close look at saturn's rings with cassini vims. **Icarus**, Elsevier, v. 193, n. 1, p. 182–212, 2008.
- OHTA, Y.; TARUYA, A.; SUTO, Y. Predicting photometric and spectroscopic signatures of rings around transiting extrasolar planets. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 690, n. 1, p. 1, 2008.
- ORTIZ, J. et al. Possible ring material around centaur (2060) chiron. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 576, p. A18, 2015.
- ORTIZ, J. L. et al. The size, shape, density and ring of the dwarf planet haumea from a stellar occultation. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 550, n. 7675, p. 219, 2017.
- OSBORN, H. et al. Periodic eclipses of the young star pds 110 discovered with wasp and kelt photometry. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 471, n. 1, p. 740–749, 2017.
- PATER, I. D.; LISSAUER, J. J. **Planetary sciences**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.
- PIRO, A. L. Can rocky exoplanets with rings pose as sub-neptunes? **The Astronomical Journal**, American Astronomical Society, v. 156, n. 2, p. 80, aug 2018.
- PORCO, C. C. An explanation for neptune's ring arcs. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 253, n. 5023, p. 995–1001, 1991.
- REIN, H.; LIU, S.-F. Rebound: an open-source multi-purpose n-body code for collisional dynamics. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 537, p. A128, 2012.
- RIEDER, S.; KENWORTHY, M. A. Constraints on the size and dynamics of the j1407b ring system. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 596, p. A9, 2016.
- ROJAS, G.; GREGORIO-HETEM, J.; HETEM A., J. Towards the main sequence: detailed analysis of weak line and post-T Tauri stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 387, n. 3, p. 1335–1343, 05 2008. ISSN 0035-8711.

SANTOS, N. et al. Detecting ring systems around exoplanets using high resolution spectroscopy: the case of 51 pegasi b. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 583, p. A50, 2015.

SCHLICHTING, H. E.; CHANG, P. Warm saturns: On the nature of rings around extrasolar planets that reside inside the ice line. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 734, n. 2, p. 117, jun 2011.

SHOWALTER, M. et al. Satellite "wakes" and the orbit of the encke gap moonlet. In: **Bulletin of the American Astronomical Society**. [S.l.: s.n.], 1985. v. 17, p. 716.

SHU, F. H.; YUAN, C.; LISSAUER, J. J. Nonlinear spiral density waves - an inviscid theory. **The Astrophysical Journal**, v. 291, p. 356–376, apr 1985.

Sicardy, B. et al. Rings beyond the giant planets. **Planetary Ring Systems**, dez. 2016.

SMITH, B. A. et al. Voyager 2 at neptune: Imaging science results. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 246, n. 4936, p. 1422–1449, 1989.

SMITH, B. A. et al. The jupiter system through the eyes of voyager 1. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 204, n. 4396, p. 951–972, 1979.

STEFFL, A. J.; STERN, S. A. First constraints on rings in the pluto system. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 133, n. 4, p. 1485, 2007.

TORRES, C. et al. Search for t tauri stars based on the iras point source catalog. ii. **The Astronomical Journal**, v. 109, p. 2146, 1995.

TUSNSKI, L. R. M.; VALIO, A. Transit model of planets with moon and ring systems. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 743, n. 1, p. 97, 2011.

WERKHOVEN, T. I. M. van; KENWORTHY, M. A.; MAMAJEK, E. E. Analysis of 1swasp j140747.93394542.6 eclipse fine-structure: hints of exomoons. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 441, n. 4, p. 2845–2854, 2014.