



UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Física Licenciatura - INFIS

FABRÍCIO SANTOS KALAKI

PREDIÇÃO DE MICROLENTE GRAVITACIONAIS

UBERLÂNDIA-MG

2024

FABRÍCIO SANTOS KALAKI

PREDIÇÃO DE MICROLENTEGRAVITACIONAIS

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Física Licenciatura da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientador: Prof. Dr. Altair Ramos Gomes-Júnior

Coorientador: Dr. Leandro de Almeida

UBERLÂNDIA-MG

2024

FABRÍCIO SANTOS KALAKI

PREDIÇÃO DE MICROLENTEs GRAVITACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso enviado para
aprovação para o curso de graduação de Física
Licenciatura da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 24 de abril de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Altair Ramos Gomes-Júnior – INFIS/UFU

Prof. Dr. Gustavo Foresto Brito de Almeida – INFIS/UFU

Dr. Júlio Ignácio Bueno de Camargo – ON/MCTI

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

K14 2024	<p>Kalaki, Fabricio Santos, 1996- PREDIÇÃO DE MICROLENTES GRAVITACIONAIS [recurso eletrônico] / Fabricio Santos Kalaki. - 2024.</p> <p>Orientador: Altair Ramos Gomes-Júnior. Coorientador: Leandro de Almeida. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Física. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Física. I. Gomes-Júnior, Altair Ramos, 1990-, (Orient.). II. Almeida, Leandro de, 1986-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Física. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 53</p>
-------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Física - Licenciatura

Av. João Naves de Ávila, nº 2121. Campus Santa Mônica - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239 4417 - <http://www.infis.ufu.br/graduacao/fisica-licenciat> - cofis@ufu.br



Ata de Defesa - Graduação

Curso de Graduação em:	Física, grau licenciatura				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso 2 (GFC041) ou Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC - II) - INFIS31003				
Data:	24/04/2024	Hora de início:	18:00	Hora de encerramento:	19:20
Matrícula do Discente:	11911FIS202				
Nome do Discente:	Fabricio Santos Kalaki				
Título do Trabalho:	Predição de microlentes gravitacionais				

Reuniu-se no anfiteatro 5OE, com participação remota de membros pela plataforma Zoom, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Física, grau Licenciatura, assim composta: Prof. Dr. Gustavo - INFIS/UFU, Prof. Dr. Júlio Ignácio Bueno de Camargo - ON/MCTI e pelo Prof. Dr. Altair Ramos Gomes Júnior - INFIS/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Altair Ramos Gomes Júnior apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos membros da banca examinadora, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Altair Ramos Gomes Júnior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2024, às 18:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Foresto Brito de Almeida, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2024, às 18:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julio Ignacio Bueno de Camargo, Usuário Externo**, em 06/05/2024, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5356132** e o código CRC **1234786E**.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o apoio. Seu amor, incentivo e compreensão foram a base que sustentou cada passo que dei rumo a este momento.

Agradeço especialmente à minha madrinha Kiseko, seu amor, carinho, apoio e confiança, fez com que eu chegasse até aqui. Às minhas tias, Kazumi e Emiko. Sua presença e orientação foram fundamentais para que eu enfrentasse os desafios com determinação e confiança, mesmo à distância.

À minha companheira Brenda, não tenho palavras para expressar minha gratidão pelo seu suporte. Seu amor e carinho foram fontes de inspiração em todos os momentos.

Ao meu grande amigo e irmão Marcelo, meu mais profundo agradecimento. Sua companhia e irmandade foram um verdadeiro alicerce durante toda a minha jornada acadêmica.

Aos amigos Leonardo, Olavo e Hélio, compartilho minha gratidão por cada momento de colaboração, aprendizado e diversão que vivemos juntos. Suas amizades tornaram essa jornada ainda mais memorável e significativa.

Agradeço, essencialmente, ao meu orientador, Altair, pela paciência, compreensão, dedicação e profissionalismo, que fez este trabalho ser possível.

Um agradecimento especial aos integrantes do PET Física Licenciatura e, principalmente, à Mariana (tutora). Sua dedicação e comprometimento são admiráveis.

Agradeço também aos professores: Alessandra, Adevailton, Ricardo e Gustavo, pela dedicação e expertise.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e crescimento pessoal e profissional. Que este seja apenas o começo de uma jornada repleta de realizações e sucesso compartilhado.

“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta.”
(Carl Sagan)

RESUMO

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia para prever encontros próximos aparentes entre duas estrelas, usando uma abordagem de propagação robusta do movimento estelar para eventos de microlentes gravitacionais. Essa metodologia incorporou paralaxes e velocidades radiais para melhorar a precisão das previsões. O trabalho se baseou nos resultados obtidos por Kluter et al. (2022), que identificaram 4842 desses encontros. Utilizou-se um código em Python, aproveitando as bibliotecas do `astropy` e `astroquery`, juntamente com dados do catálogo Gaia-DR3. Após análise, encontramos 74.590 previsões no período de 1974 a 2116, das quais 3609 coincidiram com as dos autores. Notavelmente, entre 2010 e 2070, o período examinado por Kluter et al. (2022), identificamos 32.114 encontros próximos, seis vezes mais do que o número anteriormente registrado. Além disso, a partir do período atual (2024) até 100 anos (2116) a época de catálogo (J2016.0), 45.831 eventos foram encontrados.

Palavras-chave: Microlentes Gravitacionais; Metodologia Robusta; Previsões

ABSTRACT

The aim of this study was to develop a methodology for predicting apparent close encounters between two stars, using a robust stellar motion propagation approach for gravitational microlensing events. This methodology incorporated parallaxes and radial velocities to improve the accuracy of the predictions. The work was based on the results obtained by Kluter et al. (2022), who identified 4842 of these encounters. A Python code was used, taking advantage of the `astropy` and `astroquery` libraries, along with data from the Gaia-DR3 catalog. After analysis, we found 74,590 predictions from 1974 to 2116, of which 3609 coincided with those of the authors. Notably, between 2010 and 2070, the period examined by Kluter et al. (2022), we identified 32,114 close encounters, six times more than the number previously recorded. In addition, from the current period (2024) to 100 years (2116) the time of the catalog (J2016.0), 45,831 events were found.

Keywords: Gravitational Microlensing; Robust Methodology; Predictions

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Microlenteamento Gravitacional.....	21
3. Predição de microlenteamento gravitacional.....	23
3.1 Predição preliminar de máxima aproximação entre duas estrelas.....	24
3.2 O cálculo da máxima aproximação e as primeiras propagações.....	25
3.2 Predição robusta de máxima aproximação entre duas estrelas.....	28
4. Resultados.....	31
4.1 Validação das predições.....	31
4.2 Predição de máximas aproximações para os próximos 100 anos.....	37
5. Conclusão e Perspectivas.....	39
6. Referências.....	40
Apêndice 1 - Os parâmetros astrométricos.....	42
Apêndice 2 - O método de seleção do Kluter et al., (2022).....	45

1. INTRODUÇÃO

No século XVI a astronomia passou por uma revolução. Nomes como Galileu Galilei, fortalecendo os estudos de Nicolau Copérnico sobre o heliocentrismo, e Johannes Kepler, elaborando a lei do movimento planetário, também chamada de leis de Kepler, contribuíram significativamente para a ciência. Nesse período, questões sobre vida em outros planetas surgiram com Giordano Bruno que, em 1584, escreveu: “Existem inúmeros sóis e inúmeras Terras que giram em torno dos seus sóis exatamente da mesma forma como os sete planetas do nosso sistema. Os incontáveis mundos do universo não são piores nem menos habitados do que a nossa Terra” (Bruno, 1584). Suas ideias visionárias o levaram à condenação pela inquisição, mas também encorajou os estudos dos exoplanetas, atualmente uma área importante da ciência planetária e da astrobiologia.

Em 1992, os astrônomos Aleksander Wolszczan e Dale Frail, fizeram a primeira descoberta de um exoplaneta. Eles descobriram dois planetas rochosos orbitando uma estrela Pulsar na constelação de Virgo. Logo depois, outro exoplaneta foi descoberto orbitando um sistema binário, composto por uma anã branca e uma pulsar, sendo o primeiro exoplaneta a ser descoberto em um aglomerado globular de estrelas. Essas descobertas iniciais impulsionaram novas pesquisas na área, resultando na identificação e catalogação de muitos outros exoplanetas. (Wolszczan, Frail, 1992)

Para viabilizar essas descobertas, existem atualmente seis técnicas principais de observação de exoplanetas: trânsito planetário, velocidade radial, astrometria, pulsar timing, imagem direta e microlenteamento gravitacional.

A técnica do trânsito planetário (figura 1.1), também chamada de eclipse primário, acontece quando o planeta passa em frente ao disco da estrela, visto a partir da Terra. O que se observa no trânsito planetário é a curva de luz, ou seja, a variação de brilho da estrela com o tempo. Quando o planeta passa na frente da estrela, ocorre a diminuição de seu brilho no momento de entrada do planeta, que volta ao normal na saída. Esta técnica permite inferir o raio do planeta, uma vez que a variação de brilho da estrela depende da área que está sendo bloqueada pelo planeta. Em 1999, descobriu-se o primeiro exoplaneta por meio dessa técnica. Os trânsitos são eventos raros, porém, devido à abundância de estrelas, a probabilidade de observá-los é alta. Por essa razão, essa técnica é a que registra o maior número de descobertas. Desta maneira, para confirmar a presença de um planeta, é necessário observar trânsitos subsequentes pelo mesmo corpo ou comparar com outras técnicas, como as que serão apresentadas a seguir.

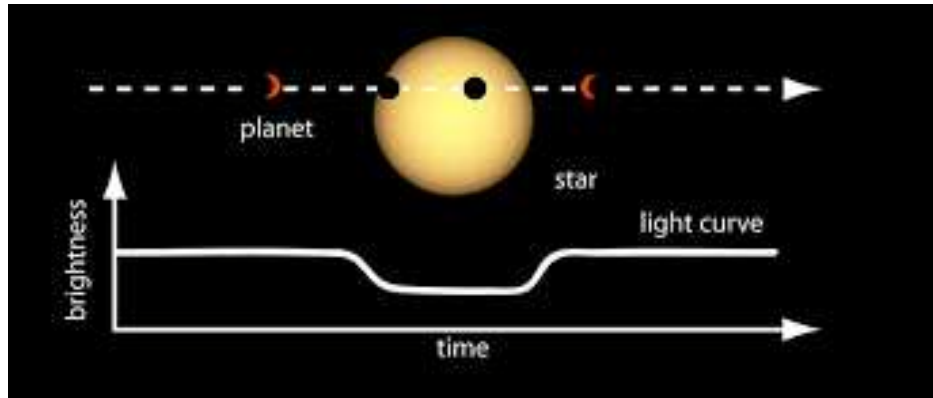


Figura 1.1: A figura mostra um exemplo de trânsito planetário. À medida que o Planeta passa na frente da estrela, parte dessa luz é bloqueada. Esse bloqueio causa uma queda na intensidade luminosa da estrela. Ao passo que o planeta finaliza sua passagem, a intensidade luminosa volta a crescer novamente.

Fonte: Exoplanet Exploration - NASA

Na técnica de velocidade radial (figura 1.2), o sistema estrela-planeta compartilha um centro de massa comum. Desta forma, o exoplaneta causa uma variação na velocidade radial da estrela, o movimento percebido da estrela em relação à linha de visada do observador. Esta velocidade pode ser medida através do efeito Doppler no espectro da luz da estrela, que gera um desvio para o azul (*Blueshift*) quando a estrela se aproxima e o desvio para o vermelho (*Redshift*) quando se afasta. Essa técnica serve para detectar planetas em sistemas com estrelas de baixa massa, mas pode gerar sinais falsos em regiões com alta concentração de estrelas ou devido à atividade do campo magnético. (Hara e Ford, 2023)

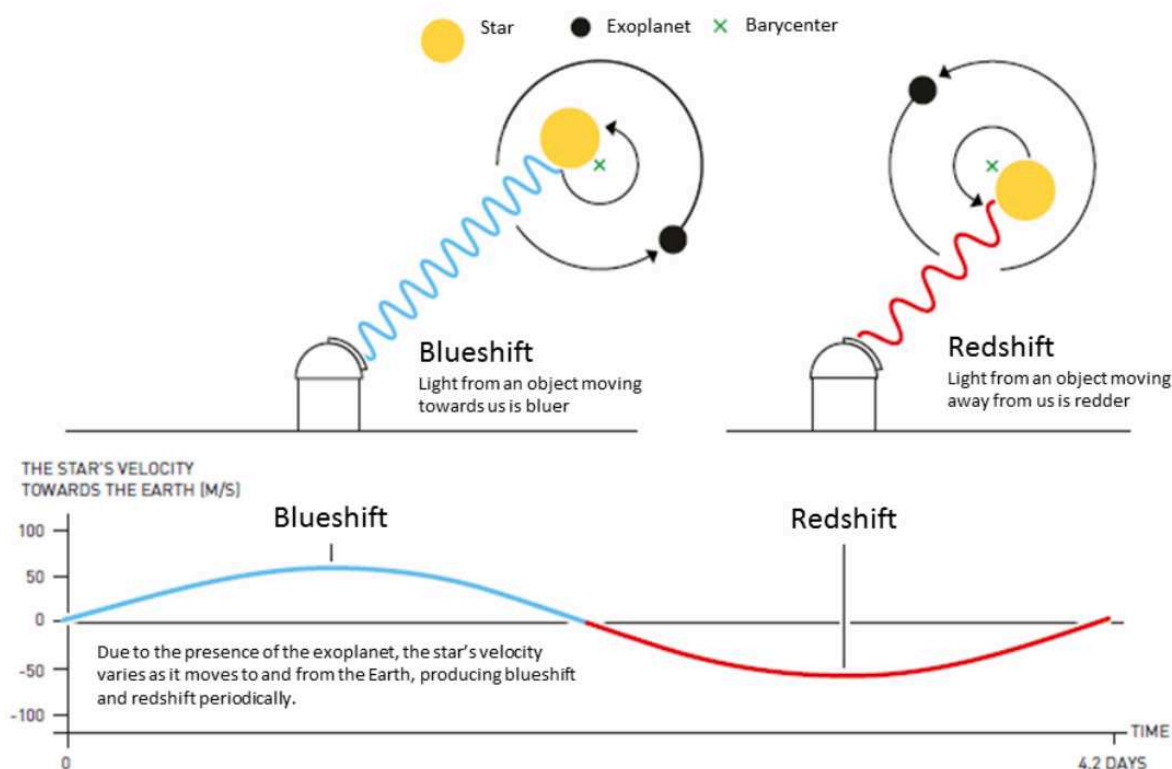


Figura 1.2: Da esquerda para a direita, a estrela está se aproximando do observador, tendo o desvio para o azul. Já a segunda imagem representa o desvio para o vermelho, ou seja, a estrela está se afastando da linha de visada.

Fonte: Mayor, Y. Michel, 2019.

A técnica de astrometria (figura 1.3), utiliza um princípio semelhante ao da velocidade radial. Porém, neste caso, busca-se medir com precisão a posição da estrela. Caso haja um planeta com massa significativa orbitando a estrela, é possível detectar uma variação do movimento da estrela ao redor do centro de massa do sistema. No entanto, essa técnica é desafiadora, pois necessita de uma alta precisão e, até o momento da escrita deste trabalho, apenas 3 planetas foram descobertos¹.

¹ NASA Exoplanet Archive. Disponível em: https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html. Acesso em: 14 abr. 2023.

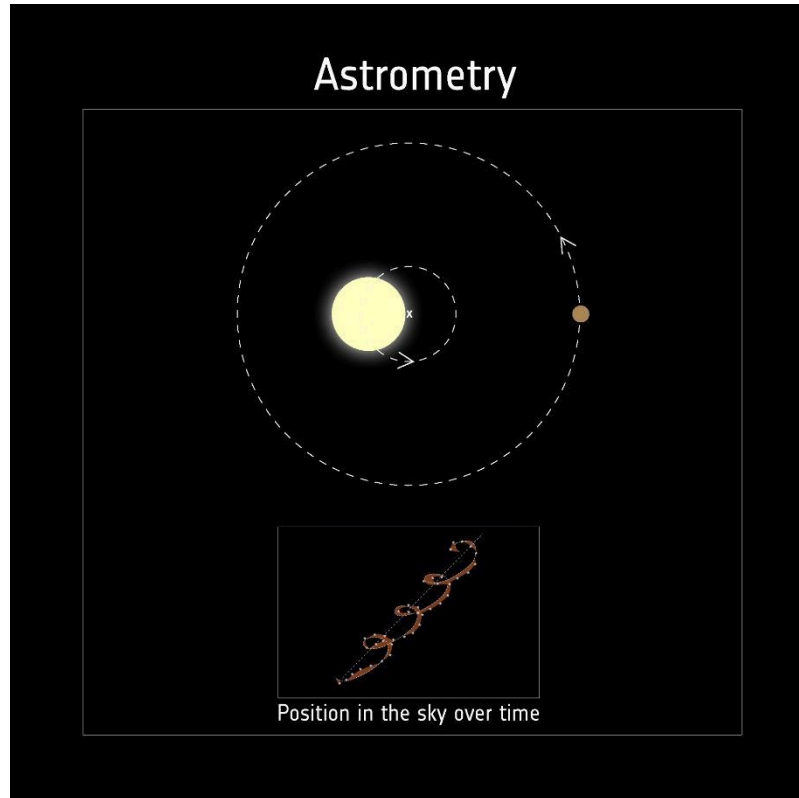


Figura 1.3: A figura acima mostra a variação da posição da estrela ao longo do tempo, à medida que esta oscila em torno do centro de massa do sistema.

Fonte: *European Space Agency (ESA)*

O pulsar timing (figura 1.4) observa a variação dos pulsos emitidos por uma pulsar, uma estrela de nêutrons. Uma estrela de nêutrons é uma remanescente proveniente de uma supernova. Em uma pulsar, a intensidade da luz medida aqui na Terra varia devido à sua rotação. Os pulsos emitidos são bem regulares, sendo mais precisos que um relógio atômico, por exemplo (Allan 1987; Edwards, 2006). A variação dos pulsos permite determinar a órbita e a massa do planeta. Esta técnica resultou na descoberta de 13 exoplanetas, sendo o mais recente confirmado em abril de 2024 (Vleeschower, 2024)

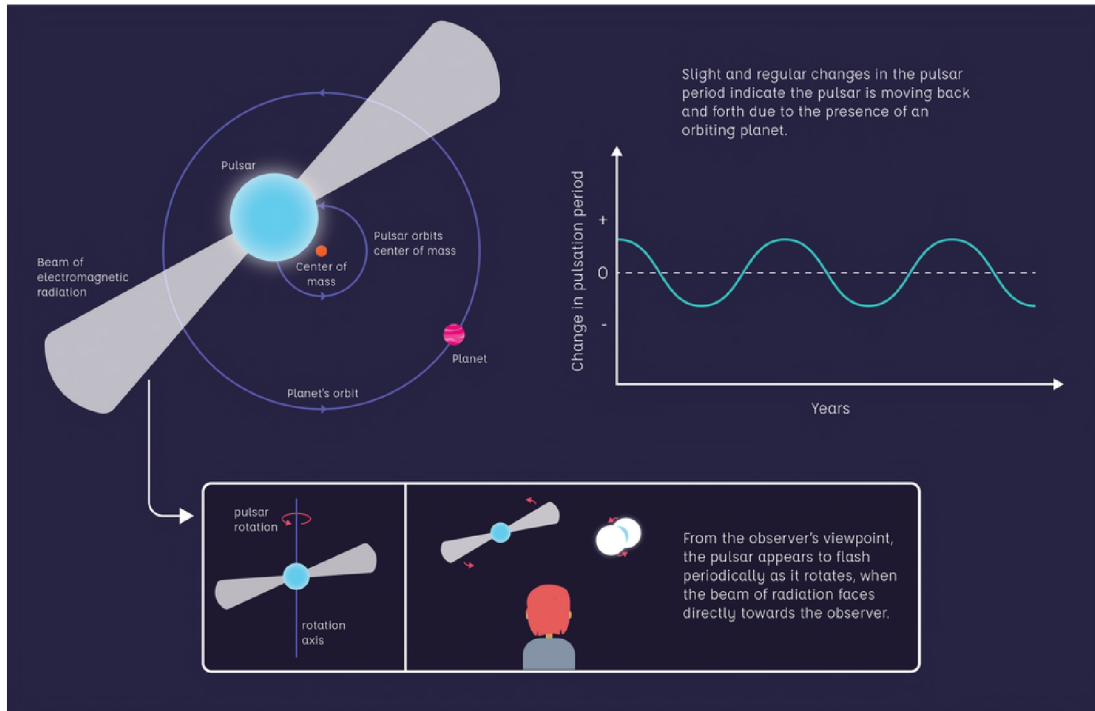


Figura 1.4: O quadro abaixo na figura e o gráfico à direita indicam que o período de rotação de um pulsar em torno de seu eixo é bem determinado, mas a presença de um planeta pode causar variações nesse período.

Fonte: *Las Cumbres Observatory (LCO)*

A detecção por imagem direta (figura 1.5), envolve realizar observações da estrela e remover seu brilho para visualizar o seu entorno, utilizando técnicas de coronografia. Caso haja um exoplaneta, ele pode ser observado. É desafiador devido ao brilho intenso das estrelas, mas, quando combinada com astrometria e velocidade radial, pode fornecer informações precisas sobre a órbita do exoplaneta.

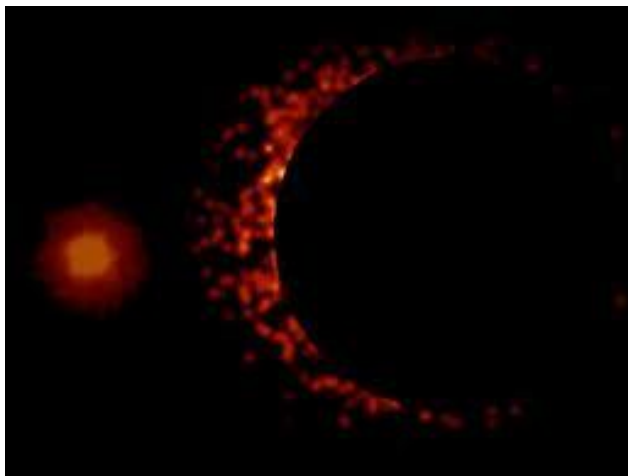


Figura 1.5: Da direita para a esquerda, temos uma estrela que, teve boa parte do seu brilho diminuído para ser possível observar diretamente o exoplaneta, o pequeno objeto circular alaranjado à esquerda.

Fonte: *Exoplanet Exploration* – NASA

Por fim, a técnica de microlenteamento gravitacional (figura 1.6) consiste em um encontro próximo aparente entre duas estrelas a partir do ponto de vista de um observador. Quando isto ocorre, a luz emitida pela estrela de fundo (fonte) percorre o espaço e quando uma estrela intermediária (lente) passa na frente ou próxima da trajetória da luz, a gravidade da lente “curva” a luz vinda de diferentes direções, aumentando o brilho total e produzindo o efeito de lente. Se a estrela lente possuir um planeta em sua órbita, a massa do planeta também irá causar este efeito e a curva de luz poderá apresentar um segundo aumento de brilho, indicando a presença do planeta. A vantagem do microlenteamento, é a capacidade de detectar planetas mais distantes das estrelas em que orbitam, além de ser muito sensível a planetas de baixa massa, de uma massa terrestre ou até 10 vezes menor. (Almeida, 2017; Gould, 2005).

As técnicas apresentadas exigem um monitoramento contínuo das estrelas no céu para que os eventos sejam observados. No caso específico do microlenteamento, se as posições e velocidades das estrelas envolvidas forem conhecidas com precisão suficiente, é possível calcular se e quando um microlenteamento pode ocorrer, tornando-o, até certo ponto, passível de previsão.

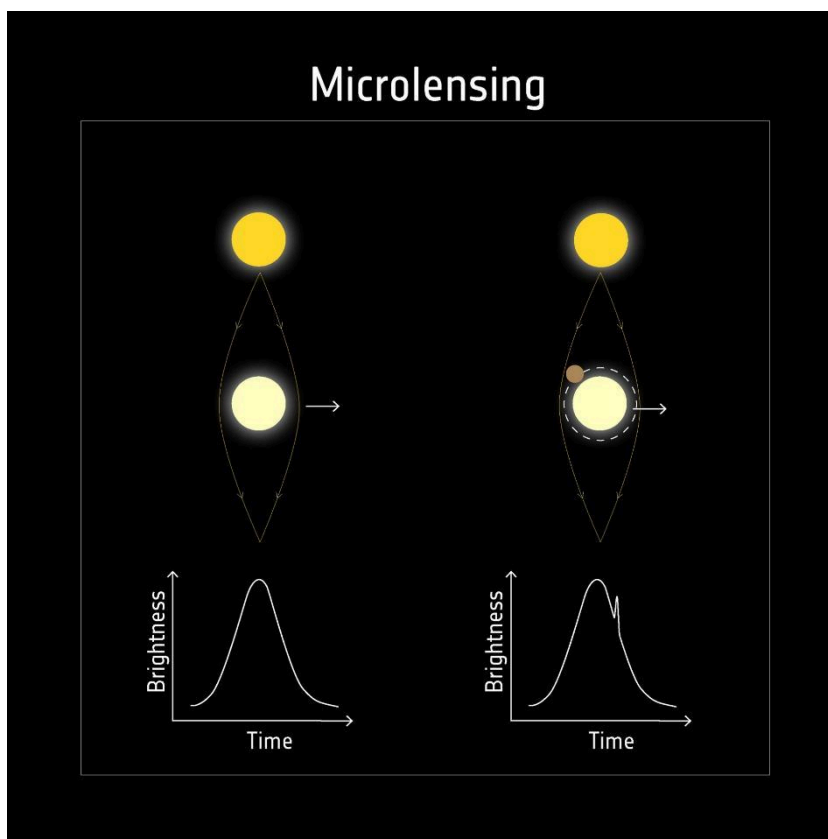


Figura 1.6: Na primeira imagem, da esquerda para a direita, ocorre apenas um aumento de brilho devido ao desvio gravitacional causado pela lente, representado no gráfico de luminosidade em função do tempo. Na segunda imagem, além do aumento de brilho causado pela estrela, também é possível ver um segundo pico de intensidade causado pelo desvio gravitacional do planeta, simbolizado pelo breve decaimento e aumento no gráfico.

Fonte: *European Space Agency (ESA)*

Baseado na premissa de previsibilidade de um microlenteamento gravitacional, Kluter et al. (2022) realizaram previsões astrométricas de microlentes gravitacionais, utilizando estrelas com maiores movimentos próprios, prevendo 4842 eventos entre 2010 e 2066. Esses eventos previstos só foram possíveis devido aos dados do catálogo Gaia-eDR3, essa versão do catálogo é uma versão inicial (early Data Release), não contendo todas as informações em um primeiro instante. O Gaia é um telescópio espacial lançado pela Agência Espacial Europeia (ESA) (figura 1.7), com a função de realizar um mapeamento tridimensional da galáxia. Todo esse mapeamento produziu vários catálogos, sendo o mais atual o catálogo Gaia-DR3, em que estão contidas as informações astrométricas de bilhões de estrelas. O telescópio espacial Gaia tem realizado um mapeamento do céu e produzido um catálogo com posições, movimentos próprios, paralaxes e velocidades radiais até magnitude $G = 20$ (magnitude estelar na região do visível). O Gaia-DR3, fornece posições mais precisas que 1 mili-segundo de arco (mas, do inglês milliarcsecond).



Figura 1.7: Concepção artística do telescópio espacial Gaia.

Fonte: *European Space Agency (ESA)*

Além disso, o método de propagação descrito por Kluter et al. (2022) não é robusto e não considera, por exemplo, a velocidade radial das estrelas. Portanto, o objetivo do trabalho é desenvolver uma metodologia para predição de microlenteamento gravitacional, para o maior número de estrelas possível, utilizando métodos robustos de propagação do movimento estelar. Com isso, ao final das predições, esperamos encontrar um número significativo de eventos de microlentes gravitacionais. Estes dados serão compartilhados posteriormente com a comunidade científica para impulsionar as pesquisas na técnica de detecção e também na área de astrobiologia. Para isso, utilizamos a linguagem de programação Python para prever encontros próximos aparentes entre essas estrelas utilizando os dados do catálogo Gaia-DR3 e os parâmetros astrométricos necessários. Uma etapa posterior deste trabalho é identificar aqueles eventos que possivelmente gerarão efeitos de microlenteamento gravitacional.

2. MICROLENTEAMENTO GRAVITACIONAL

A teoria das microlentes gravitacionais tem como base a Teoria da Relatividade Geral de Einstein de 1915, em que é definido o ângulo de deflexão da luz, ou seja, a luz sofre um desvio de percurso quando há interação com o campo gravitacional de um astro massivo.

No trabalho de Almeida (2017), é detalhada a fundamentação teórica dos eventos de microlentes gravitacionais utilizando o Raio de Einstein como base. Este raio representa a dimensão angular da região em torno do objeto da lente, na qual o campo gravitacional é suficientemente forte para curvar a luz. No entanto, é importante destacar que o Raio de Einstein pressupõe o perfeito alinhamento entre a fonte e a lente, o que é um evento de baixa probabilidade.

No entanto, em observações reais, a estrela fonte passa próxima a estrela lente, logo não é possível considerar o raio de Einstein simétrico do evento perfeitamente alinhado. Nesse sentido, a equação da lente emerge como uma ferramenta fundamental para lidar com esse desalinhamento.

O prefixo micro presente no nome define o grau de precisão do evento. Nesse sentido, a unidade trabalhada nos eventos de microlentes gravitacionais é definida na ordem de microssegundos de arco, ou seja, um microssegundo de arco é um milionésimo de um segundo de arco.

Há dois tipos de microlenteamento: o fotométrico e o astrométrico. O evento astrométrico compreende o deslocamento posicional entre a estrela de fundo e a estrela lente, ou seja, é feita uma análise da variação da posição. A estrela de fundo é fonte emissora de luz e a estrela lente é a estrela próxima, cuja massa irá desviar a luz da fonte. O efeito fotométrico compreende a magnificação do brilho da estrela de fundo na passagem da estrela lente. Ambos os eventos ocorrem simultaneamente. A principal diferença entre os dois tipos de microlenteamento é a distância aparente entre a estrela fonte e a estrela lente em relação ao raio de Einstein. Passagens mais próximas geram o efeito fotométrico mais evidente e passagens mais distantes geram o efeito astrométrico mais evidente.

Como mencionado, o microlenteamento gravitacional possibilita a detecção de exoplanetas. Esta detecção é realizada através do monitoramento constante com um tempo médio de 20 dias, durante o qual são detectadas e caracterizadas as perturbações planetárias ao longo desse período. Essas perturbações são acompanhadas por *surveys*, como o OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*), o MOA (*Microlensing Observations in Astrophysics*) e o KMT (*Korean Microlensing Telescope*), distribuídos longitudinalmente por

todo o hemisfério sul. Os surveys têm a função de identificar variações no brilho das estrelas e gerar alertas para a comunidade, em alguns casos detectando os exoplanetas. Além disso, quando as observações terrestres não são suficientes, são utilizados *surveys* espaciais com amplo campo de visão no infravermelho (Gaudi, 2012).

3. PREDIÇÃO DE MICROLENTEAMENTO GRAVITACIONAL

Passagens próximas aparentes, como microlenteamentos, são úteis em uma diversidade de aplicações. Morgado et al. (2019), por exemplo, utilizaram técnica de máxima aproximação aparente entre Luas Galileanas visando melhorar as efemérides dos satélites. Porém, neste caso, os objetos possuem movimentos aparentes mais complexos e uma metodologia diferente teve de ser desenvolvida. Embora essa metodologia se diferencie da adotada neste trabalho, o estudo de Morgado nos mostra que a utilização de metodologias mais robustas são importantes para uma identificação mais precisa de encontros próximos aparentes.

No trabalho apresentado por Kutler et al. (2022), os autores desenvolveram uma abordagem para prever eventos de microlentes gravitacionais utilizando estrelas com grandes movimentos próprios. O estudo envolveu uma seleção cuidadosa de estrelas com movimentos próprios grandes e de potenciais estrelas de fundo. Os critérios de seleção incluíram movimentos próprios totais superiores a $100 \frac{mas}{yr}$, excluindo estrelas com peso unitário renormalizado (Renormalised Unit Weight Error - RUWE) (Lindgren, 2018) acima de 2 e paralaxe inferior a 5 (para mais detalhes, ver apêndice 2). A seleção final resultou em 4842 potenciais eventos de microlentes gravitacionais.

Como pode ser visto, Kluter et al. (2022) não utilizam todos os parâmetros astrométricos na propagação da posição das estrelas, como a velocidade radial, além de fazer seleções de estrelas a priori. Neste trabalho desenvolvemos uma metodologia para fazer previsões de encontros próximos aparentes entre duas estrelas utilizando propagação robusta do movimento estelar.

Primeiramente, fazemos uma previsão preliminar ignorando a paralaxe e a velocidade radial. Utilizando apenas as posições e velocidades angulares no plano tangente, a previsão pode ser feita utilizando um modelo linear, o que agiliza significativamente a identificação de encontros próximos. A partir dos encontros identificados pelo modelo linear, aplicamos a metodologia de Butkevich & Lindgren (2014) que utiliza um modelo não linear para a propagação robusta do movimento estelar. Por fim, as previsões preliminares são atualizadas.

As aproximações realizadas linearmente ajudam, em um primeiro instante, a definir valores iniciais para o instante e a distância de máxima aproximação entre duas estrelas. Mas,

é necessário ter mais precisão, para isso, mais parâmetros astrométricos são inseridos no processo de predição, principalmente velocidade radial e paralaxe. Ou seja, ao adicionarmos mais parâmetros, a robustez aumenta. Sendo assim, um dos processos metodológicos que foi utilizado neste trabalho para realizar as predições, é o trabalho de Butkevich e Lindegren (2014), em que os autores fazem um tratamento rigoroso do movimento estelar baricêntrico. O baricentro, centro de massa de um sistema, é o ponto em torno do qual os corpos orbitam. Na presença de dois astros, o baricentro geralmente está mais próximo do corpo de maior massa. Segundo os autores, realizar modelagem rigorosa do movimento estelar permite ter maior precisão na posição da estrela em datas mais distantes da época de catálogo, inclusive considerando a variação do tempo de luz.

O tempo de luz compreende o tempo que a luz demora para viajar de um objeto celeste até um observador. O tratamento do tempo de luz na modelagem rigorosa é a diferença entre um sinal luminoso proveniente de uma estrela até o momento em que o sinal é recebido pelo observador. Devido à velocidade finita da luz, o tempo de luz se torna um fator importante que não pode ser ignorado. Essa finitude introduz um atraso entre o que observamos e a posição real de uma estrela. Entretanto, segundo os autores, só é possível ignorar os efeitos do tempo de luz quando os efeitos observáveis forem pequenos se comparados com a precisão astrométrica.

3.1 Predição preliminar de máxima aproximação entre duas estrelas

O processo de predição das microlentes gravitacionais foi realizado computacionalmente utilizando a linguagem de programação *Python*, juntamente com os pacotes *astropy* e *astroquery*. Inicialmente, foi necessário realizar o *download* do catálogo Gaia-DR3, o qual foi feito por meio do Vizier, uma ferramenta para acesso a catálogos astronômicos. Devido à extensão do catálogo Gaia-DR3 (1,5 Terabytes), foi preciso selecionar apenas as informações mais relevantes, sendo elas: *Source* (identificação única das estrelas no catálogo), RA (ascensão reta), DEC (declinação), pmRA (movimento próprio em ascensão reta), pmDEC (movimento próprio em declinação), RV (velocidade radial) e Plx (paralaxe). Esses parâmetros (ver apêndice 1) foram utilizados nos cálculos de máxima aproximação e propagação robusta. Para validar a nossa metodologia, foram baixadas pequenas regiões do céu correspondentes às predições de Kluter.

3.2 O cálculo da máxima aproximação e as primeiras propagações

O ponto de partida das predições é o cálculo da máxima aproximação, em que o objetivo é determinar o instante em que as duas estrelas irão passar próximas uma da outra. Esse parâmetro pode ser determinado de forma vetorial da seguinte forma: primeiramente, tratamos o problema como um movimento retilíneo uniforme com dois corpos em movimento, sendo assim, definimos as posições na esfera celeste como:

$$\vec{P}_1(t) = \vec{p}_{10} + \vec{v}_1 t \quad (1)$$

$$\vec{P}_2(t) = \vec{P}_{20} + \vec{v}_2 t \quad (2)$$

onde $\vec{P}_n(t)$ é definido como a posição da estrela n no instante t . Já \vec{p}_{n0} é a posição da estrela n no instante inicial, dado pela época de catálogo J2016.0, \vec{v}_n a velocidade da estrela, considerada constante e t o intervalo de tempo a partir da época de catálogo, igual para ambas as estrelas. Definidas as posições iniciais, equações (1) e (2), podemos determinar a distância relativa entre as duas estrelas no instante t :

$$\vec{d}(t) = \vec{P}_2(t) - \vec{P}_1(t) \quad (3)$$

Substituindo os valores de $\vec{P}_1(t)$ e $\vec{P}_2(t)$ em $\vec{d}(t)$, temos o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} \vec{d}(t) &= (\vec{p}_{20} + \vec{v}_2 t) - (\vec{p}_{10} + \vec{v}_1 t) \\ \vec{d}(t) &= (\vec{p}_{20} - \vec{p}_{10}) + (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) t \\ \vec{d}(t) &= \vec{d}_0 + \vec{v}_{21} t \end{aligned}$$

(4)

Onde definimos:

$$\vec{d}_0 = \vec{p}_{20} - \vec{p}_{10} \quad (5)$$

$$\vec{v}_{21} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad (6)$$

Na expressão (5) temos a distância relativa entre as duas estrelas na época do catálogo e na equação (6) a velocidade relativa entre elas, sendo constante.

Agora, é necessária determinar o instante de máxima aproximação entre as duas estrelas, que denominaremos t_{MA} . No instante de máxima aproximação, os vetores distância e velocidade relativas devem ser perpendiculares entre si. Por isso, o produto escalar entre eles será nulo. O produto escalar também será nulo no instante de máximo afastamento, porém em movimento retilíneos isso não deve ocorrer, então:

$$\begin{aligned} \vec{d}(t_{MA}) \cdot \vec{v}_{21} &= 0 \\ \left(\vec{d}_0 + \vec{v}_{21} t_{MA} \right) \cdot \vec{v}_{21} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Como desejamos encontrar o valor de t_{MA} , basta realizar a distributiva com o vetor \vec{v}_{21} assim, temos:

$$\vec{d}_0 \cdot \vec{v}_{21} + |\vec{v}_{21}|^2 \cdot t_{MA} = 0$$

Agora, isolamos o termo t_{MA} , logo:

$$t_{MA} = - \frac{\vec{d}_0 \cdot \vec{v}_{21}}{|\vec{v}_{21}|^2}$$

(8)

Com a equação (8), agora é possível determinar o tempo de máxima aproximação entre as duas estrelas, dada suas posições e velocidades relativas.

Entretanto, para calcularmos de fato o tempo de máxima aproximação entre duas estrelas, é importante trabalhar com os parâmetros astrométricos. Sendo assim, devemos substituir os valores de \vec{d}_0 (posição relativa) e \vec{v}_{21} (velocidade relativa) pelos seus respectivos parâmetros: posição (ascensão reta e declinação) e movimentos próprios (movimentos próprios em ascensão reta e declinação). Sendo assim, temos uma nova versão da equação (8), dada por:

$$t_{MA} = - \frac{(\Delta\alpha_0 \cos \delta, \Delta\delta_0) \cdot (\mu_{\alpha_2}^* - \mu_{\alpha_1}^*, \mu_{\delta_2} - \mu_{\delta_1})}{|(\mu_{\alpha_2} - \mu_{\alpha_1}, \mu_{\delta_2} - \mu_{\delta_1})|^2}$$

Reorganizando os termos:

$$t_{MA} = - \frac{(\mu_{\alpha_2}^* - \mu_{\alpha_1}^*) \cdot \Delta\alpha_0 \cos \delta + (\mu_{\delta_2} - \mu_{\delta_1}) \Delta\delta_0}{(\mu_{\alpha_2} - \mu_{\alpha_1})^2 + (\mu_{\delta_2} - \mu_{\delta_1})^2}$$

(9)

Para mais informações sobre os parâmetros astrométricos (ver apêndice 1).

A metodologia de máxima aproximação preliminar foi aplicada para todos os apontamentos, onde Kluter et al. (2022) identificou uma predição. Deste modo, foram calculadas máximas aproximações entre todas as estrelas em um raio de 1 minuto de arco das predições feitas por Kluter. Para focar em eventos de maior interesse, mantivemos apenas as predições que ocorreram entre 50 anos antes e 100 anos depois da época de catálogo, e com distâncias menores que 1 segundo de arco. Estes apontamentos foram salvos em tabelas e, para garantir que as predições fossem únicas, utilizamos como índice da tabela um texto contendo o código “*Source*” das duas estrelas (ver tabela 3.2). Conjuntamente aos códigos das estrelas, foram salvos os valores de dt e dmin, em que dt representa o instante de máxima aproximação definido na equação (9) e dmin é a distância entre as duas estrelas, calculadas utilizando a equação (4) para o instante de máxima aproximação.

Tabela 3.2: Tabela dos primeiros resultados obtidos pelo método de máxima aproximação. Da esquerda para a direita, a coluna índice apresenta os códigos Source das duas estrelas, enquanto as colunas Estrelas 1 e Estrela 2 são os códigos individuais. As colunas dt e dmin são os instantes e distâncias de máxima aproximação.

Índice	Estrela 1	Estrela 2	dt (yr)	dmin (mas)
5339892298928753792- 5339892298963783424	533989229892 8753792	533989229896 3783424	2096.86	9717.96
5339892298929097984- 5339892367684811520	533989229892 9097984	533989236768 4811520	2004.27	9691.18
5339892298963789696- 5339892367684811520	533989229896 3789696	533989236768 4811520	2004.06	329.82
5339892328987756928- 5339892367684811520	533989232898 7756928	533989236768 4811520	2008.60	9352.35

Fonte: Autores

3.2 Predição robusta de máxima aproximação entre duas estrelas.

Após a obtenção dos dados dos instantes e das distâncias de máxima aproximação, é necessário aplicar o cálculo de propagação robusta para aumentar a precisão desses instantes, considerando agora a paralaxe e a velocidade radial. Para esse objetivo, foi utilizada uma função de propagação robusta do movimento estelar implementada no pacote *Python* SORA (Gomes-Júnior, A. R. et al., 2022). Essa função possibilita a propagação para cada estrela individualmente e para cada instante de tempo. Assim, para cada predição encontrada pelo método aproximado, foram calculadas as posições para um intervalo de 300 dias antes e depois, com passo de um dia ao redor do instante de máxima aproximação preliminar. Por fim, um novo mínimo para o instante de máxima aproximação foi identificado. Esse processo é realizado para cada par de estrelas identificado com a máxima aproximação (ver tabela 3.2.1).

Tabela 3.2.1: Mesmo que a tabela 3.2, com a inclusão dos instantes e distâncias de máxima aproximação encontrados com o método robusto.

Índice	Estrela 1	Estrela 2	dt (yr)	dmin (mas)	dt robusto (yr)	dmin robusto (mas)
5339892298928753792-5339892298963783424	5339892298928753792	5339892298963783424	2096.86	9717.96	2096.98	9717.89
5339892298929097984-5339892367684811520	5339892298929097984	5339892367684811520	2004.27	9691.18	2004.24	9625.50
5339892298963789696-5339892367684811520	5339892298963789696	5339892367684811520	2004.06	329.82	2004.07	367.13

Fonte: Autores

A diferença entre os dois métodos pode ser visualizada nas figuras 3.2.2 e 3.2.3. A figura 3.2.2, exemplifica a máxima aproximação utilizando o método linear para as estrelas (código), em função da variação da declinação e ascensão reta, não considerando a velocidade radial e paralaxe. Já a figura 3.2.3, apresenta o método de propagação robusto, o qual incorpora esses parâmetros.

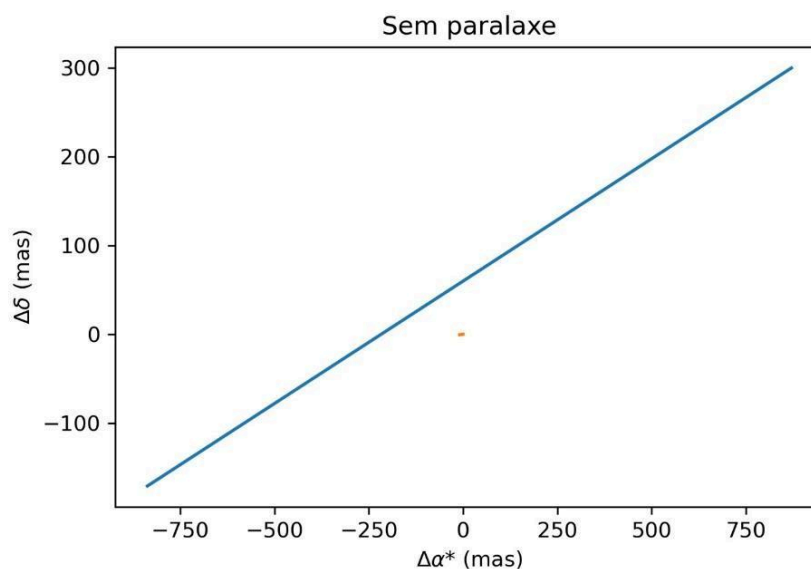


Figura 3.2.2: Exemplo de encontros próximo (5339892367684811520-5339892367648994432) de máxima aproximação com o método linear. A linha em azul mostra o movimento da estrela 1 ao longo do tempo. A linha em laranja mostra o movimento da estrela 2 ao longo do tempo. A origem está na coordenada da estrela 2 na época de catálogo. Elas seguem movimentos retilíneos no plano do céu.

Fonte: autores

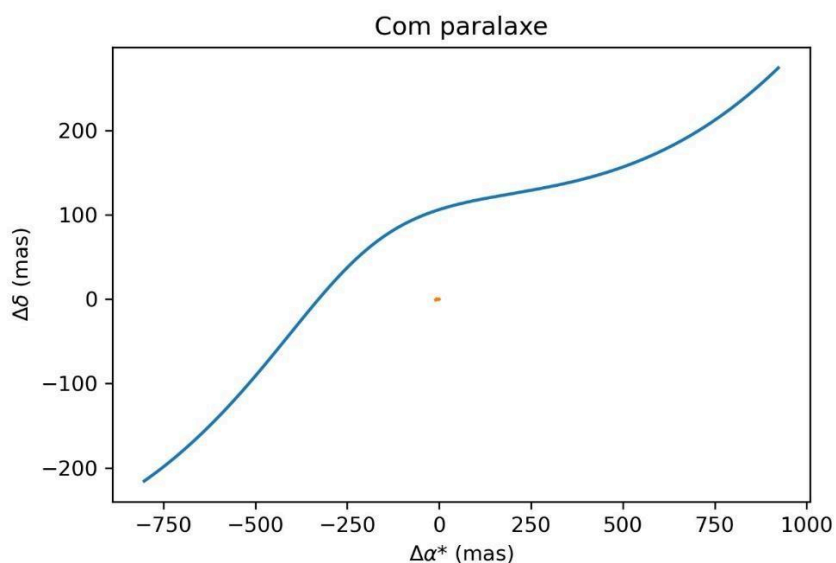


Figura 3.2.3: Mesmo que a figura 3.2, porém agora considerando a paralaxe e a velocidade radial.

Fonte: autores

Com base nos dados obtidos das máximas aproximações, linear e robusta, é realizado o cálculo das barras de erro. Por fim, estimamos a barra de erro dos instantes e distâncias de máxima aproximação utilizando a biblioteca *Astropy Uncertainties*, do *Astropy*. Com essa biblioteca, é criada uma distribuição normal para cada parâmetro astrométrico utilizado, sendo o desvio padrão a incerteza de cada parâmetro obtida do catálogo Gaia-DR3. Em seguida, as incertezas são propagadas utilizando o método de Monte Carlo a partir das equações (9) e (4) (ver tabela 3.2.4).

Tabela 3.2.4: Mesmo que a tabela 3.2.1 (sem as colunas, Estrela 1 e Estrela 2), com a inclusão das barras de erro do instante (Erro dt) e distância (edmin) de máxima aproximação.

Índice	dt (yr)	dmin (mas)	dt robusto (yr)	dmin robusto (mas)	Erro dt (yr)	edmin (mas)
5339892298928753792-5339892298963783424	2096.86	9717.96	2096.98	9717.89	565.21	116.20
5339892298929097984-5339892367684811520	2004.27	9691.18	2004.24	9625.50	0.0028	6.78
5339892298963789696-5339892367684811520	2004.06	329.82	2004.07	367.13	0.0002	0.69
5339892328987756928-5339892367684811520	2008.60	9352.35	2008.70	9292.31	0.0002	0.58

Fonte: Autores

4. RESULTADOS

As tabelas compiladas com as predições realizadas utilizando os métodos aproximados e robustos podem ser acessadas por meio do link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1AtVW7BDOqKG8Cfekpkkrhxfhapf5mQKI?usp=sharing>.

Inicialmente, será feita uma comparação entre as predições geradas e aquelas obtidas por Kluter et al. (2022), para validar a metodologia e identificar diferenças entre os métodos. Posteriormente, uma vez validada a metodologia, será realizada uma análise em todo o conjunto de predições.

4.1 Validação das predições

No trabalho de Kluter et al. (2022), foram realizadas 4842 predições. Desse total, através da metodologia desenvolvida neste trabalho, foram encontrados 3609 correspondentes aos mesmos apontamentos apresentados pelos autores. Uma análise preliminar dos apontamentos faltantes mostrou que uma ou ambas as estrelas envolvidas na predição não foram recuperadas do catálogo, apesar de outras estrelas no campo terem sido encontradas. Ainda é necessária uma análise mais cuidadosa para identificar as razões pelas quais estas estrelas não foram recuperadas.

A tabela 4.1 mostra um conjunto pequeno de predições realizadas pelo nosso método que também foram preditas por Kluter et al. (2022). As colunas exibem as informações dos instantes (dt) e distâncias (dmin) de máxima aproximação linear e robusta, juntamente com suas respectivas barras de erro (Erro tempo e Erro distância). Adicionalmente, são incluídas colunas com as informações fornecidas por Kluter et al. (2022) para cada predição, definidas nas colunas Ano (instante de máxima aproximação), erro do ano, distância e o erro da distância.

Inicialmente, observa-se uma maior proximidade entre os instantes de máxima aproximação obtidos pelo nosso método e aqueles obtidos por Kluter et al. (2022). Apesar de Kluter et al. (2022) não terem empregado a velocidade radial das Estrelas, a utilização dos outros 5 parâmetros já se mostrou suficiente para caracterizar adequadamente as predições.

Tabela 4.1: Mesmo que a tabela 3.2.4, porém, adicionando as colunas: ano (instante de máxima aproximação) e o erro do ano, distância e o erro da distância, referentes às predições encontradas por Kluter et al. (2022).

dt Linear (yr)	dmin Linear (mas)	dt Robusto (yr)	Erro tempo (yr)	dmin Robusto (mas)	Erro distância (mas)	Ano (Kluter) (yr)	Erro ano (Kluter) (yr)	Distância (Kluter) (mas)	Erro distância (Kluter) (mas)
2010.5076	1474.5534	2010.4161	0.0010	1459.2714	2.8832	2010.4140	0.0011	1461.10	2.90
2010.5052	44.416748	2010.4992	0.0336	47.4342	8.7935	2010.4910	0.0350	47.50	9.10
2010.6223	57.284294	2010.5910	0.0010	103.8072	2.0764	2010.5870	0.0011	104.80	2.10
2010.6185	54.451327	2010.6103	0.0025	49.3961	1.5107	2010.6064	0.0026	49.40	1.50
2010.6820	41.531804	2010.6650	0.0230	43.8595	4.3102	2010.6640	0.0230	43.90	4.30
2010.6581	2876.6865	2010.6767	0.0004	2653.1172	2.1741	2010.6752	0.0004	2654.30	2.20
2010.6033	3793.5367	2010.7183	0.0036	3652.7299	4.7179	2010.7206	0.0039	3652.20	5.00
2011.0097	394.7767	2010.7320	0.0016	383.8190	0.3808	2010.7330	0.0016	383.74	0.39

Fonte: autores

Apesar de semelhantes, algumas das predições exibem diferenças significativas entre os dois métodos. Para identificar uma tendência, elaboramos um gráfico (ver gráfico 4.1.1) que ilustra a diferença entre os instantes de máxima aproximação obtidos com os dois métodos ao longo do tempo. Essa análise foi realizada calculando a diferença entre os tempos robustos e os de Kluter et al. (2022), mantendo-a em função do ano.

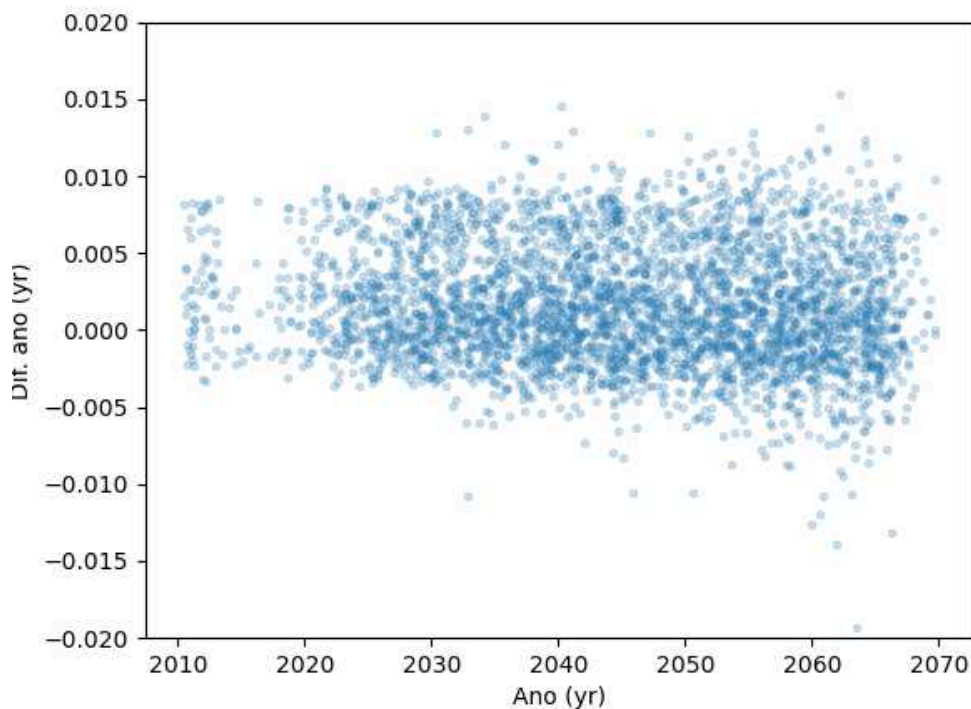


Gráfico 4.1.1: Representação da diferença entre os tempos do método robusto e de Kluter et. al. (2022) em função do ano.

Fonte: autores

No gráfico 4.1.1, os pontos azuis são as diferenças entre os instantes de máxima aproximação obtidos com o método robusto e o Kluter et al. (2022). Nota-se que a dispersão dos tempos aumenta à medida que as previsões se estendem para o futuro. Este padrão é particularmente evidente entre os anos de 2030 a 2070, sugerindo que os parâmetros dependentes do tempo, como movimentos próprios, paralaxe, velocidade radial e tempo de luz se tornam mais importantes à medida que nos afastamos da época de catálogo. A média da diferença entre o ano robusto e o Kluter é $\mu = 0.0014$ anos e o desvio padrão $\sigma = 0.016$ anos. A mediana das incertezas do instante de máxima aproximação é igual a 0.039 anos. Isso mostra que as diferenças entre os dois métodos é, em geral, menor que as incertezas. Logo, nossos instantes estão em concordância com os obtidos por Kluter et al., (2022).

Já o gráfico 4.1.2 apresenta a diferença entre os instantes de tempo divididos pela barra de erro e nota-se um comportamento peculiar. Os pontos não se dispersam mais à medida que avançam no tempo, como ilustrado no gráfico 4.1.1. Pelo contrário, a dispersão é mais evidente no início. Isso se deve às barras de erro serem menores quanto mais próximo da época do catálogo. Além disso, a dispersão das diferenças entre os dois métodos é uma ordem

de grandeza maior que o valor médio, indicando que ambos os métodos estão de acordo em relação aos instantes de máxima aproximação.

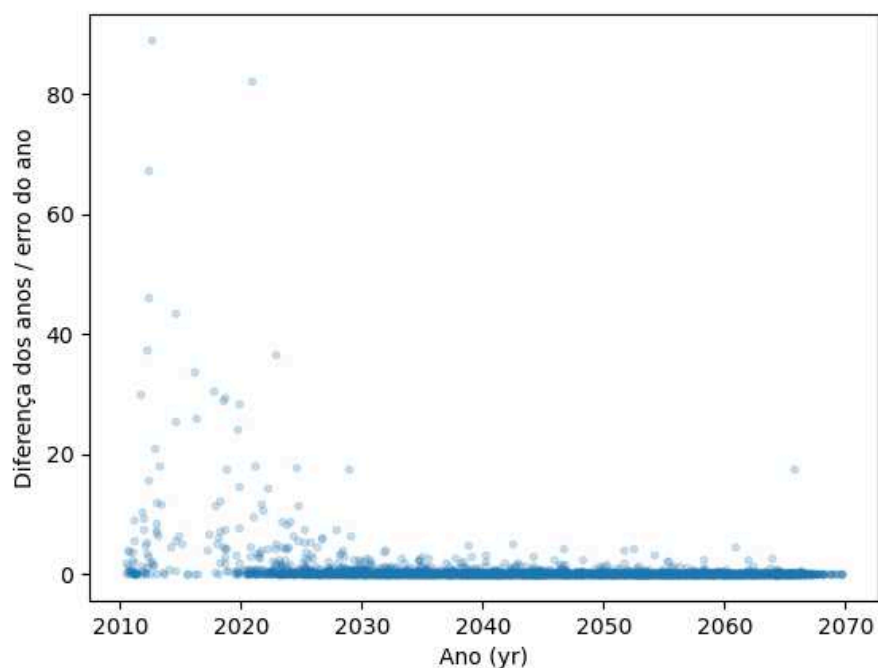


Gráfico: 4.1.2: Distribuição da diferença dos anos divididos pela barra de erro em função do ano.

Fonte: Autores

Apesar do gráfico 4.1.1 mostrar que a diferença entre os dois métodos aumenta com o tempo, quando relacionamos esta diferença com respeito às barras de erro, vemos que, na verdade, as maiores discrepâncias entre os dois métodos ocorrem próximo à época de catálogo (J2016.0). Provavelmente, isso se deve à incerteza do instante de máxima aproximação ser muito menor quanto mais próximo da época de referência.

Assim como o tempo, a distância de máxima aproximação se mostrou precisa (ver tabela 4.1). O valor robusto, ao ser comparado com o de Kluter et al. (2022), é próximo. Essa comparação é ilustrada no gráfico 4.1.3.

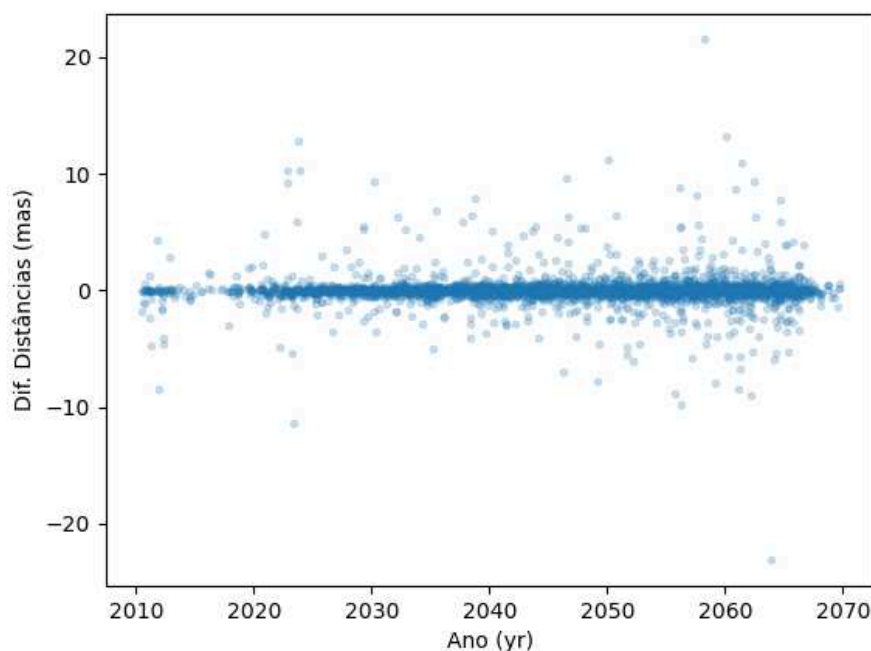


Gráfico 4.1.3: Distribuição da diferença de distâncias entre o método robusto e o Kluter et. al, (2022) em função do ano.

Fonte: autores

No gráfico, é possível observar que boa parte dos pontos está bem centralizada. Com alguns pontos divergindo a partir do intervalo entre 2020 e 2030 e com as maiores discrepâncias entre os anos de 2060 e 2070. Assim como feito para os tempos de máxima aproximação, a média e o desvio padrão da diferença das distâncias são respectivamente: $\mu = -0.0023$ (mas) e $\sigma = 1.21$ (mas). A mediana das incertezas em distância é de 9.29 mas. Isso mostra que em distância, os dois métodos estão em concordância.

Para visualizar as distribuições das distâncias, pode-se representá-las graficamente, mostrando a variação ao longo dos anos, como ilustrado no gráfico 4.1.4. Ao observar o gráfico, nota-se um comportamento semelhante ao do gráfico 4.1.2. No entanto, no gráfico 4.1.2, as maiores diferenças ocorrem nos intervalos de 2010 e 2020, enquanto no gráfico 4.1.4, o intervalo de maiores diferenças está entre 2020 e 2030.

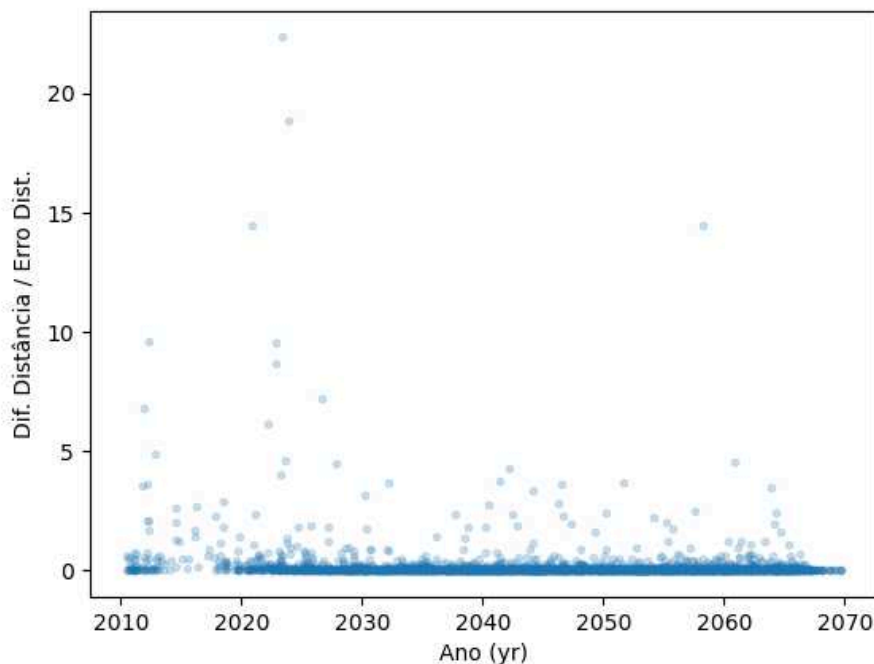


Gráfico 4.1.4: Distribuição da diferença de distâncias divididos pela barra de erro da distância em função do ano.

Fonte: autores

Os resultados apresentados acima validam a nossa metodologia mostrando que ela é capaz de identificar as mesmas previsões de Kluter et al. (2022) com diferenças entre si menores que as incertezas, em sua maioria, tanto para o instante quanto para a distância de máxima aproximação. Desta forma, outros encontros próximos identificados durante este trabalho também podem ser considerados de interesse científico.

Em síntese, a metodologia funcionou para as 3609 previsões encontradas, sendo compatíveis com as do Kluter et al. (2022) e, em certos momentos, sendo até melhor, uma vez que é feita uma propagação robusta levando em consideração a velocidade radial, não utilizada pelos autores.

4.2 Predição de máximas aproximações para os próximos 100 anos

Na seção 4.1 validamos a nossa metodologia encontrando as mesmas predições que Kluter et al. (2022). As diferenças observadas eram esperadas devido ao método mais robusto implementado neste trabalho.

Adicionalmente, todos os apontamentos foram condensados em uma única tabela de comparação, chamada “Predições_unicas.csv”, presente no link no início da seção 4. Nessa tabela estão contidas 74.530 predições de encontros próximos entre estrelas no intervalo de 1974-2116. Primeiramente, selecionamos todas as predições encontradas no intervalo de 2010 a 2070, o mesmo período utilizado por Kluter et al. (2022). Neste intervalo, foram preditos um total de 32.114 encontros próximos entre estrelas nas mesmas regiões do céu, em um intervalo de 1 minuto de arco. Importante notar que este valor representa mais de 6 vezes o número de predições publicadas por Kluter et al. (2022). Essa diferença se deve principalmente às grandes restrições na seleção de objetos realizadas pelo autor. A figura 4.2 mostra o número de eventos por ano encontrados.

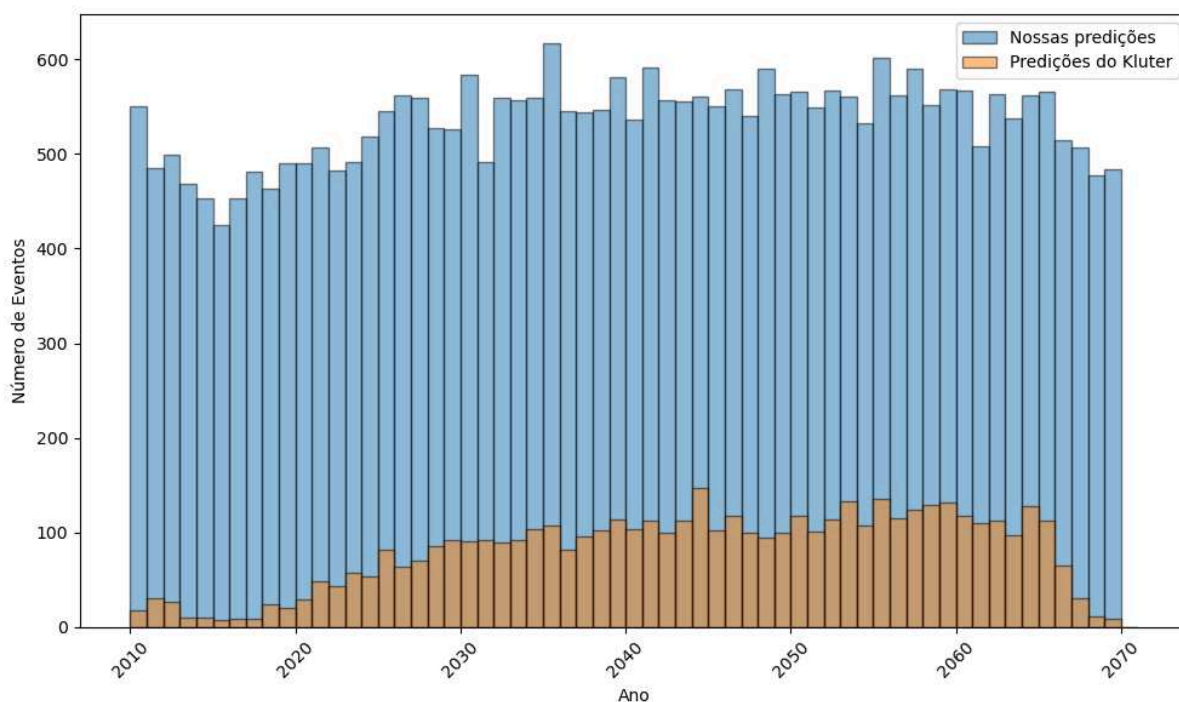


Gráfico 4.2: Distribuição de eventos por ano identificados pelo método robusto (azul) e por Kluter (laranja) no intervalo de 2010 a 2070.

Fonte: autores

Das predições realizadas, encontramos 45.831 máximas aproximações entre a época atual (2024) até 100 anos após a época de catálogo (2116). A distribuição do número de eventos por ano está apresentada na figura 4.2.1.

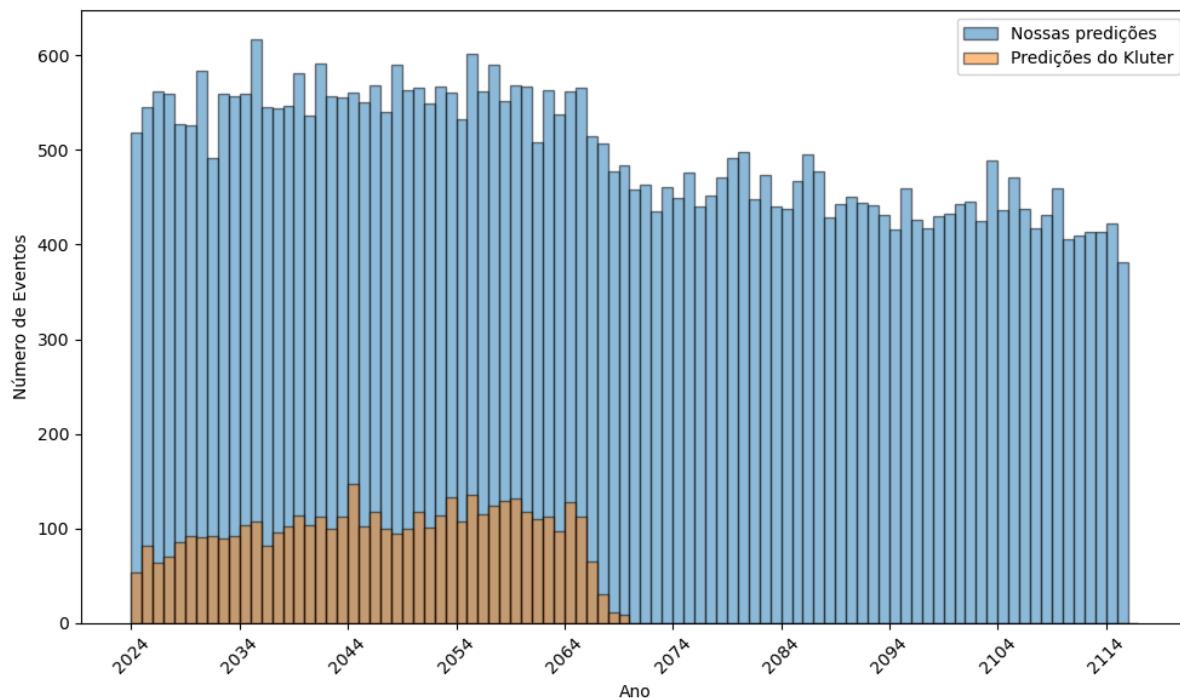


Gráfico 4.2.1: O mesmo que o gráfico 4.1.9, mas agora para os intervalos de 2024 a 2116.

Fonte: autores

5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Este estudo demonstrou a eficácia da metodologia de máxima aproximação robusta na previsão de eventos de microlentes gravitacionais, comparando-se com as previsões de Kluter et al. (2022). Das previsões feitas por Kluter que também foram encontradas pela nossa metodologia, os instantes e distâncias de máxima aproximação são similares, comprovando a nossa capacidade de calcular encontros próximos aparentes entre estrelas. Das previsões não identificadas, uma análise mais cuidadosa será feita em uma próxima etapa deste projeto. Mas nota-se que os encontros não foram identificados devido a falhas no download das estrelas envolvidas, e não na metodologia de previsão. Além disso, como realizamos a busca de encontros próximos entre todas as estrelas de uma região, em contraste com Kluter et.al (2022) que realizou as previsões utilizando estrelas de maiores movimentos próprios, encontramos um número maior de previsões que aquelas publicadas pelo autor.

Para o futuro, será necessário filtrar as previsões obtidas utilizando parâmetros astrofísicos de um microlenteamento gravitacional como a magnitude e o raio de Einstein, além de considerar a equação da lente para casos de desalinhamento da fonte e da lente. Com isso, aplicaremos a metodologia para todo o céu. Outra etapa, será comparar as previsões passadas com os microlenteamentos efetivamente observados. Portanto, o trabalho de Almeida (2017) servirá como base para refinamentos da metodologia, uma vez que emprega uma abordagem semi-analítica que incorpora esses parâmetros astrofísicos e inclui uma análise adicional da topologia das microlentes gravitacionais.

6. REFERÊNCIAS

ALLAN, David W. Millisecond pulsar rivals best atomic clock stability. In: **41st Annual Symposium on Frequency Control**. IEEE, 1987. p. 2-11.

ALMEIDA, Leandro de. **Estudo da topologia de microlentes gravitacionais e a descoberta de exoplanetas do tipo Terra na zona habitável**. 2017. Dissertação de Mestrado. Brasil.

Boczko, R. **Conceitos de Astronomia**, 1984, São Paulo, Blücher. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5300798/mod_resource/content/1/Conceitos_de_astromonia.pdf >. Acesso em: 03 dez. 2023.

BRUNO G. (1584) **De L'infinito Universo E Mondi**.

BUTKEVICH, Alexey G.; LINDEGREN, Lennart. **Rigorous treatment of barycentric stellar motion: Perspective and light-time effects in astrometric and radial velocity data**. arXiv preprint arXiv:1407.4664, 2014.

EDWARDS, Russell T.; HOBBS, G. B.; MANCHESTER, R. N. TEMPO2, a new pulsar timing package–II. The timing model and precision estimates. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 372, n. 4, p. 1549-1574, 2006.

GAUDI, B. Scott. Microlensing surveys for exoplanets. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 50, p. 411-453, 2012.

GOULD, Andrew. Microlensing search for planets. **New Astronomy Reviews**, v. 49, n. 7-9, p. 424-429, 2005.

GOMES-JÚNIOR, A. R. et al. SORA: Stellar occultation reduction and analysis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 511, n. 1, p. 1167-1181, 2022.

HARA, Nathan C.; FORD, Eric B. Statistical methods for exoplanet detection with radial velocities. **Annual Review of Statistics and Its Application**, v. 10, n. 1, p. 623-649, 2023.

KLÜTER, Jonas et al. Prediction of Astrometric-microlensing Events from Gaia eDR3 Proper Motions. **The Astronomical Journal**, v. 163, n. 4, p. 176, 2022.

LINDEGREN, L. 2018, **Re-normalising the astrometric chi-square in Gaia DR2**, Tech. Rep. GAIA-C3-TN-LU-LL-124, Lund Observatory.

MAYOR, Y. Michel. Finding New Worlds: Didier Queloz and Michel Mayor's Nobel Prize in Physics 2019. **Rev. Cubana Fis**, v. 36, p. 152, 2019.

MORGADO, B. et al. APPROX–mutual approximations between the Galilean moons: the 2016–2018 observational campaign. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 482, n. 4, p. 5190-5200, 2019.

SEAGER, Sara (Ed.). **Exoplanets**. University of Arizona Press, 2011.

VLEESCHOWER, L. et al. Discoveries and timing of pulsars in M62. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, p. stae816, 2024.

WOLSZCZAN, Aleksander; FRAIL, Dail A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+ 12. **Nature**, v. 355, n. 6356, p. 145-147, 1992.

APÊNDICE 1 - OS PARÂMETROS ASTROMÉTRICOS

Além de compreender os processos de formação das microlentes gravitacionais, é necessário, também, entender quais são os parâmetros astrométricos para se realizar as predições. Para melhor compreender estes parâmetros, definimos uma esfera imaginária ao redor da Terra, chamada esfera celeste, que representa a projeção dos astros no céu, vistas da Terra. Como os astros variam sua posição ao longo do tempo, é preciso compreender esse movimento para observá-los. Sendo assim, os parâmetros que definem posição e velocidade são: ascensão reta, declinação, movimento próprio em ascensão reta e movimento próprio em declinação.

A ascensão reta (α) é uma coordenada do Sistema de Referência Equatorial Celeste (ver Figura A-1.1). O valor de α é medido sobre o Equador Celeste e compreende o intervalo de:

$$0 \leq \alpha \leq 360^\circ$$

no sentido anti-horário se visto pelo polo norte. Os valores de α são mais utilizados em hora, sendo definido como:

$$0 \leq \alpha \leq 24^h$$

De modo geral, podemos dizer que ascensão reta é a posição longitudinal do astro na esfera celeste. Já a declinação, representada por δ é o ângulo compreendido entre o Equador Celeste e o astro, dividido em dois hemisférios: norte e sul, assim, a variação de δ está entre os intervalos:

$$-90^\circ \leq \delta \leq +90^\circ$$

O sentido positivo indica a posição para astros no hemisfério norte e negativa para o hemisfério sul. Assim como a ascensão reta, a declinação pode ser interpretada como a posição latitudinal do astro no Sistema de Referência Equatorial Celeste. (Boczko, 1984).



Figura A-1.1: A figura apresenta o Sistema de Referência Equatorial Celeste. A ascensão reta é o ângulo medido a partir do centro da esfera sobre o Equador Celeste, iniciando do Ponto Vernal e crescendo na direção Leste. A declinação é o ângulo medido a partir do centro da esfera iniciando no Equador Celeste em direção aos polos.

Fonte: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS²

Os movimentos próprios das estrelas são os deslocamentos aparentes no céu ao longo do tempo, únicos para cada estrela e independentes um do outro. Esses deslocamentos ocorrem tangencialmente na esfera celeste, sem componentes radiais. O movimento próprio pode ser separado em duas componentes perpendiculares: o movimento próprio em ascensão reta e em declinação.

O movimento próprio em ascensão reta (μ_{α}), é uma componente de deslocamento de uma estrela na esfera celeste, sendo medido paralelamente ao Equador Celeste. Já o movimento próprio em declinação (μ_{δ}), é a componente de deslocamento vertical da estrela na esfera celeste, sendo medido perpendicularmente à linha do Equador Celeste. (Boczko, 1984)

Outros dois parâmetros utilizados nas predições são: paralaxe (ver figura A-1.2) e velocidade radial. A paralaxe compreende uma mudança aparente na posição de objetos distantes no céu, quando há mudanças na posição do observador. Ainda, a paralaxe é utilizada para calcular a distância de estrelas distantes, esse processo é chamado de paralaxe anual ou baricêntrica. A velocidade radial, mencionada anteriormente, refere-se ao movimento da estrela que se desloca para frente ou para trás na direção de visada do observador.

² Sistema de Coordenadas. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/coord.htm#equatoriais>

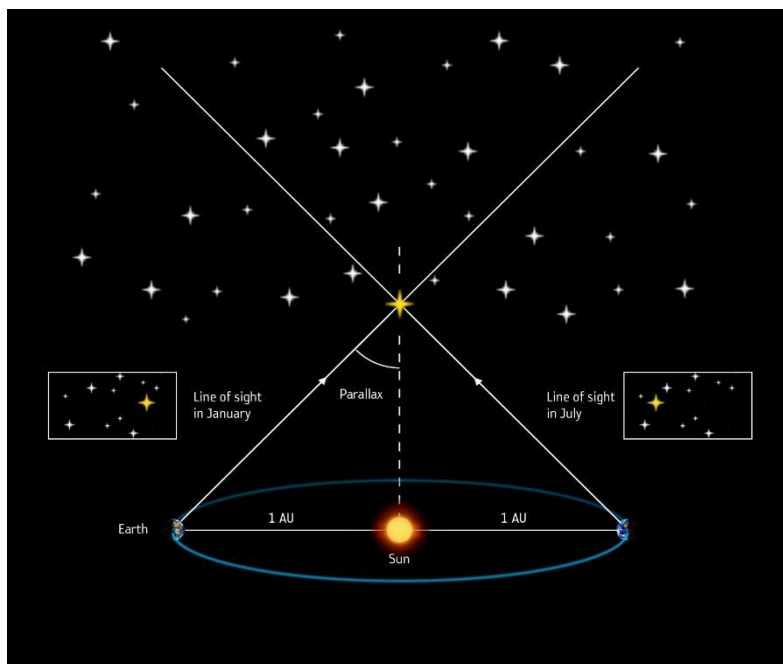


Figura A-1.2: A figura representa a medida da paralaxe de uma estrela, a partir da órbita da Terra, utilizando geometria. A medida utiliza o diâmetro de duas unidades astronômicas (a.u).

Fonte: *European Space Agency (ESA)*

Outro conceito importante é a projeção cilíndrica, um método de representação cartográfica que mapeia a superfície da Terra em um cilindro e a planifica. Durante o processo de planificação, são formadas linhas paralelas e meridianos (linhas verticais) perpendiculares entre si. Os meridianos têm distâncias igualmente espaçadas, enquanto os paralelos não. Conseqüentemente, à medida que se afasta do Equador, os círculos se achatam na direção norte-sul e se alonga na direção leste-oeste. Para preservar a forma desses círculos, é necessário multiplicar a ascensão reta pelo cosseno da declinação (ver equação 9). O símbolo (*) que acompanha os movimentos próprios em ascensão reta já considera esse produto de α pelo cosseno.

APÊNDICE 2 - O MÉTODO DE SELEÇÃO DO KLUTER ET AL., (2022)

No estudo de Kluter et al. (2022), os pesquisadores utilizaram estrelas com movimentos próprios grandes na predição de eventos de microlentes gravitacionais, devido à maior probabilidade dessas estrelas transitarem na frente de outras no céu. Para isso, eles realizaram um processo de seleção criterioso dessas estrelas. A lista de estrelas de movimentos próprios grandes (*Higher-Proper-Motion Stars* - HPMSs) foi compilada ao selecionar HPMSs como possíveis lentes para eventos de microlentes astrométricas, envolvendo diversas etapas no processo de seleção. Primeiro, os autores definiram critérios de seleção para as HPMSs e depois para as potenciais estrelas de fundo (*Potential Background Stars* - BGS).

Para as HPMSs, os critérios de seleção incluíram movimentos próprios absolutos superiores a $100 \frac{mas}{yr}$. Foram aplicados filtros de qualidade para excluir aquelas com erro de RUWE acima de 2 e com paralaxe inferior a 5. Cerca de 440.000 fontes no Gaia eDR3 preencheram esses critérios. Para validar a seleção, a lista de HPMSs foi cruzada com o Catálogo Gaia de Estrelas Próximas (*Gaia Catalogue of Nearby Stars* - GCNS). O processo de seleção assegurou a exclusão de fontes incertas e a identificação de pares de estrelas em movimento conjunto. Essa lista foi então utilizada para identificar Estrelas de Fundo (BGSs) adequadas para potenciais eventos de microlentes astrométricas.

Para filtrar as BGS, uma caixa retangular foi definida no céu para cada HPMSs, utilizando as posições das estrelas percorridas no intervalo entre J2010.5 e J2066.0. e uma meia-largura de 7 mas. Entre todas as estrelas nesta caixa, foram selecionadas BGSs com base em critérios como paralaxe, magnitude e disponibilidade de magnitudes do Gaia. As BGSs com paralaxes significativamente negativas, magnitudes G mais fracas que $G = 21,5$ e aquelas sem magnitudes G no Gaia eDR3 foram excluídas. Cortes de qualidade foram aplicados, como a exclusão de BGS com RUWE acima de 2. Filtros foram aplicados com base nas diferenças de paralaxe e movimento próprio entre as HPMSs e as BGSs para evitar estrelas binárias físicas e pares de estrelas em movimento conjunto.

O deslocamento entre as posições do Gaia DR2 e do Gaia eDR3 foi utilizado como uma medida alternativa para estimar os movimentos próprios que estavam ausentes em algumas estrelas no Gaia eDR3. Os pesquisadores compararam as posições das estrelas nos dois conjuntos de dados para identificar diferenças ou deslocamentos. Essas diferenças de posição foram então utilizadas, para estimar os movimentos próprios aproximados das estrelas

que não tinham essa informação no Gaia eDR3. Esse método permitiu inferir o movimento das estrelas ao longo do tempo e preencher os dados de movimento próprio ausentes no Gaia eDR3. Este método ajudou a identificar estrelas potencialmente em movimento conjunto, distinguir entre estrelas de fundo e fontes incertas, e melhorar a precisão das previsões para eventos de microlentes astrométricas.

Os autores realizaram um filtro para selecionar fontes mais brilhantes que magnitude $G = 18$ para refinar ainda mais a seleção de BGSs. Um processo de inspeção visual de imagens do Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*), 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*) e DSS2 (*Digitized Sky Survey*) foi conduzida para candidatos selecionados para confirmar a existência de BGSs. Desta forma, foram selecionadas 4842 potenciais estrelas de microlentes gravitacionais. A figura A-2 abaixo, foi retirada diretamente do trabalho de Kluter et al. (2022) para resumir as etapas do processo de seleção das HPMSs e BGS.

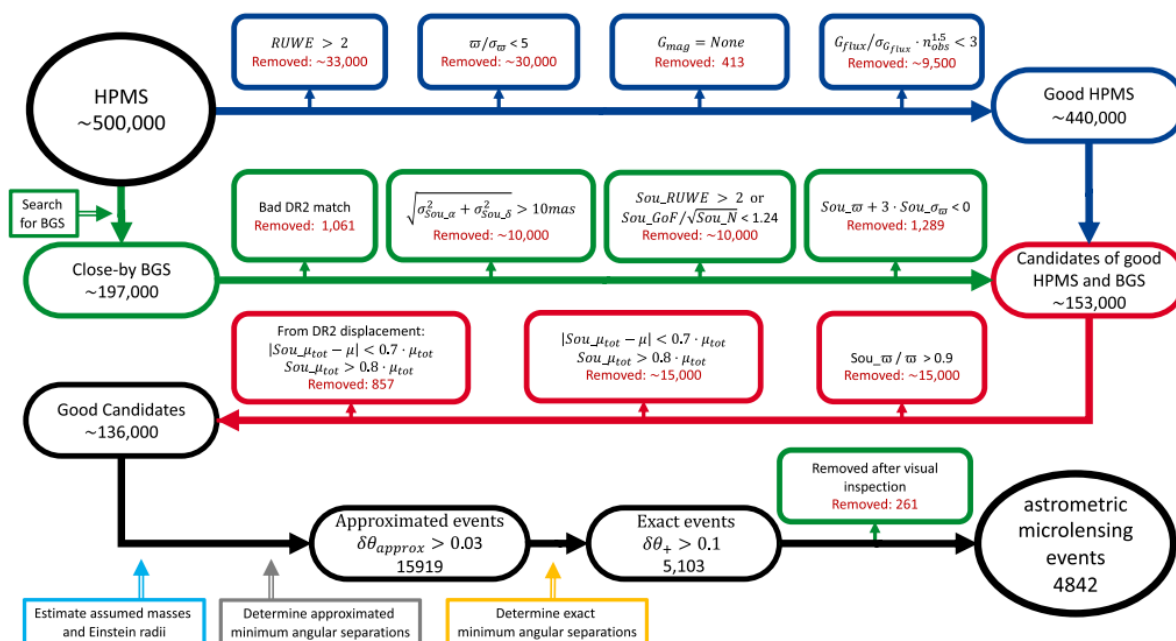


Figura A-2: Resumo do processo de seleção feita por Kluter et al., (2022), para as HPMSs e BGS.

Fonte: Kluter et.al., (2022)