

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

André Lopes de Souza

Estimativa Cinemática das Distâncias Estelares

São Paulo

2016

André Lopes de Souza

Estimativa Cinemática das Distâncias Estelares

Monografia do Trabalho de Graduação apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador(a): Prof. Dr. Ramachrisna Teixeira

São Paulo

2016

Agradecimentos

À minha família, por estar sempre presente;

Aos colegas de classe, pelo apoio constante;

Ao orientador Prof. Ramachrisna Teixeira, pela ajuda, correções e incentivos.

Resumo

Este trabalho consiste no estudo de uma estratégia alternativa para estimar as distâncias astronômicas, estimando-as através da contribuição do movimento solar no movimento próprio das estrelas. Essa estratégia possui uma grande incerteza na validade, visto que depende diretamente das medidas do movimento peculiar do Sol e também das precisão das medidas de movimento próprio de cada astro a ser estudado.

Testamos a aplicabilidade dessa estratégia em duas regiões distintas: o aglomerado de Hyades e a associação TW Hydrae, em seguida comparando a distância previamente conhecida dos grupos com os valores obtidos pela estimativa.

Lista de Figuras

1.1	Ilustração da medição de Paralaxe	14
1.2	Componentes triangulares na Paralaxe	14
1.3	Métodos utilizados para estimar a distância de acordo com a escala.	16
2.1	Ilustração do movimento rotacional de uma estrela.	18
2.2	As componentes do movimento Solar.	19
3.1	Exemplo da contribuição do movimento solar.	22
3.2	Exemplo de como obter a distância.	22
4.1	Contribuição do movimento solar para Gamma Tauri.	26
4.2	Contribuição do movimento solar para Delta Tauri.	26
4.3	Contribuição do movimento solar para Epsilon Tauri.	27
5.1	Contribuição do movimento solar para TWA 1.	30
5.2	Contribuição do movimento solar para TWA 5.	30
5.3	Contribuição do movimento solar para TWA 6.	31
5.4	Contribuição do movimento solar para TWA 9A.	31
5.5	Contribuição do movimento solar para TWA 21.	32
5.6	Contribuição do movimento solar para TWA 25.	32

Lista de Tabelas

6.1	Resultados obtidos para as Hyades	33
6.2	Resultados obtidos para <i>TW Hydrae</i>	34

Sumário

1. <i>Introdução</i>	13
1.1 A Importância das Distâncias	13
1.2 Paralaxe	13
1.3 Situação Atual	15
1.3.1 Missão Gaia	15
1.3.2 Outros Métodos	16
2. <i>Movimento Próprio</i>	17
2.1 Coordenadas Galácticas	17
2.2 Movimento Solar e Movimento Peculiar	18
3. <i>Estratégia</i>	21
4. <i>Hyades</i>	25
4.1 Visão Geral	25
4.2 Desenvolvimento	25
5. <i>TW Hydrae</i>	29
5.1 Visão Geral	29
5.2 Desenvolvimento	29
6. <i>Resultados e Conclusão</i>	33
<i>Referências</i>	37

Introdução

1.1 A Importância das Distâncias

A distância das estrelas é uma grandeza de extrema importância para a Astronomia, sendo ferramenta essencial em diversas áreas, tais como o estudo de escalas de distância no Universo, na determinação de características físicas das estrelas, ou ainda no estudo do movimento dos planetas, dentre muitas outras aplicações possíveis.

Apesar da importância da determinação das distâncias, é notório que se trata de uma medida muito difícil de ser obtida com precisão no contexto da Astronomia, visto que as distâncias astronômicas não podem ser medidas diretamente por instrumentos clássicos. Isto é, podemos medir o comprimento de uma casa utilizando uma trena, ou então uma borracha usando uma régua, mas para medir a distância da Terra até a Lua, ou do Sistema Solar até uma estrela próxima, outras estratégias devem ser adotadas.

1.2 Paralaxe

Tradicionalmente, em Astronomia se mede a distância de estrelas próximas através do método da paralaxe. Essa estratégia, ilustrada nas Figuras 1.1 e 1.2, consiste em medir a variação da posição de uma estrela (em relação a um fundo fixo e distante) durante um período de metade de um ano. Dado que a distância da Terra ao Sol é conhecida ($1UA$), a variação angular da posição da estrela (P'') (o qual se dá o nome de paralaxe) uma vez medida, permite calcular a distância (d) da Terra até a estrela através das propriedades do triângulo retângulo, tal como na Equação (1.1).

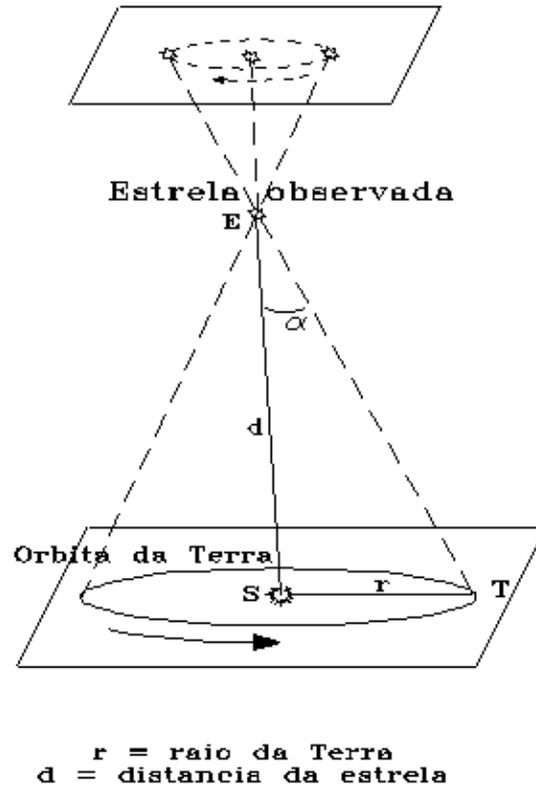


Figura 1.1: Ilustração da medição de Paralaxe.

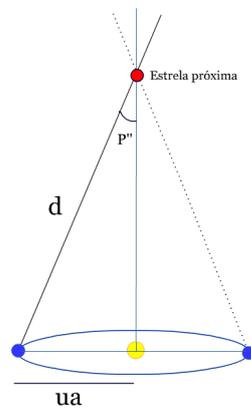


Figura 1.2: Componentes triangulares na Paralaxe.

$$d = \frac{1UA}{\tan(P'')} \quad (1.1)$$

Dada as vastas distâncias que separam as estrelas, o ângulo de deslocamento paralático é muito pequeno, tipicamente da ordem de milissegundos de arco (abreviado por "mas") ao longo de um ano. Naturalmente, para que a medida de distância seja possível, é necessário muita precisão nas medidas astrométricas.

Via de regra, dada a importância da paralaxe na determinação das distâncias astronômicas, se adota a distância correspondente a paralaxe de 1 segundo de arco, abreviada por "parsec" como medida padrão de distância para objetos distantes do Sistema Solar. No Sistema Internacional de medidas, 1 parsec equivale à distância de $3.0857 \times 10^{16}m$.

1.3 Situação Atual

Hoje, é possível medir em frequência de rádio paralaxes de estrelas de até $2kpc$ de distância[Deller (2009)], o que corresponde a uma precisão paralaxe de cerca de $0.5mas/ano$, que pode ser obtida através de interferômetros do tipo VLBI ("Very-long-baseline interferometry").

Já no espectro visível, o cenário é muito mais restrito. Por exemplo, no caso do catálogo Hipparcos, temos paralaxes com erro relativo menor ou igual a 10% para aproximadamente 20 mil estrelas, até não muito além de $100pc$. Em geral, essas são estrelas brilhantes, usualmente menor do que 10 magnitudes. Esse cenário, deixa uma lacuna muito grande, principalmente para as estrelas fracas e anãs marrons próximas.

1.3.1 Missão Gaia

Atualmente, a melhor referência literária para os valores de paralaxe provém dos dados coletados pelo observatório espacial Gaia. A missão Gaia tem como objeto suceder o projeto Hipparcos, formando o mais preciso e mais completo levantamento astrométrico já feito, incluindo um total de cerca de 1 bilhão de objetos astronômicos, dos quais além de estrelas, estão inclusos também planetas, quasares, cometas, asteróides entre outros. [Gaia Collaboration et al. (2016)]

Além da maior precisão, a missão Gaia também deve fornecer o maior limite para medição de paralaxes já obtido: serão possíveis medir ângulos paraláticos correspondentes a objetos de até $10kpc$ de distância.[Gaia Collaboration et al. (2016)]

1.3.2 Outros Métodos

Além do método da paralaxe, existem vários outros métodos para os quais se pode estimar a distância dos astros, tais como: variação do brilho de Cefeidas, paralaxe espectroscópica, curvas de luz de Supernovas, entre outros.. Tipicamente, cada estratégia é adotada de acordo com a conveniência da escala de distância estudada, tal como ilustra a Figura 1.3.

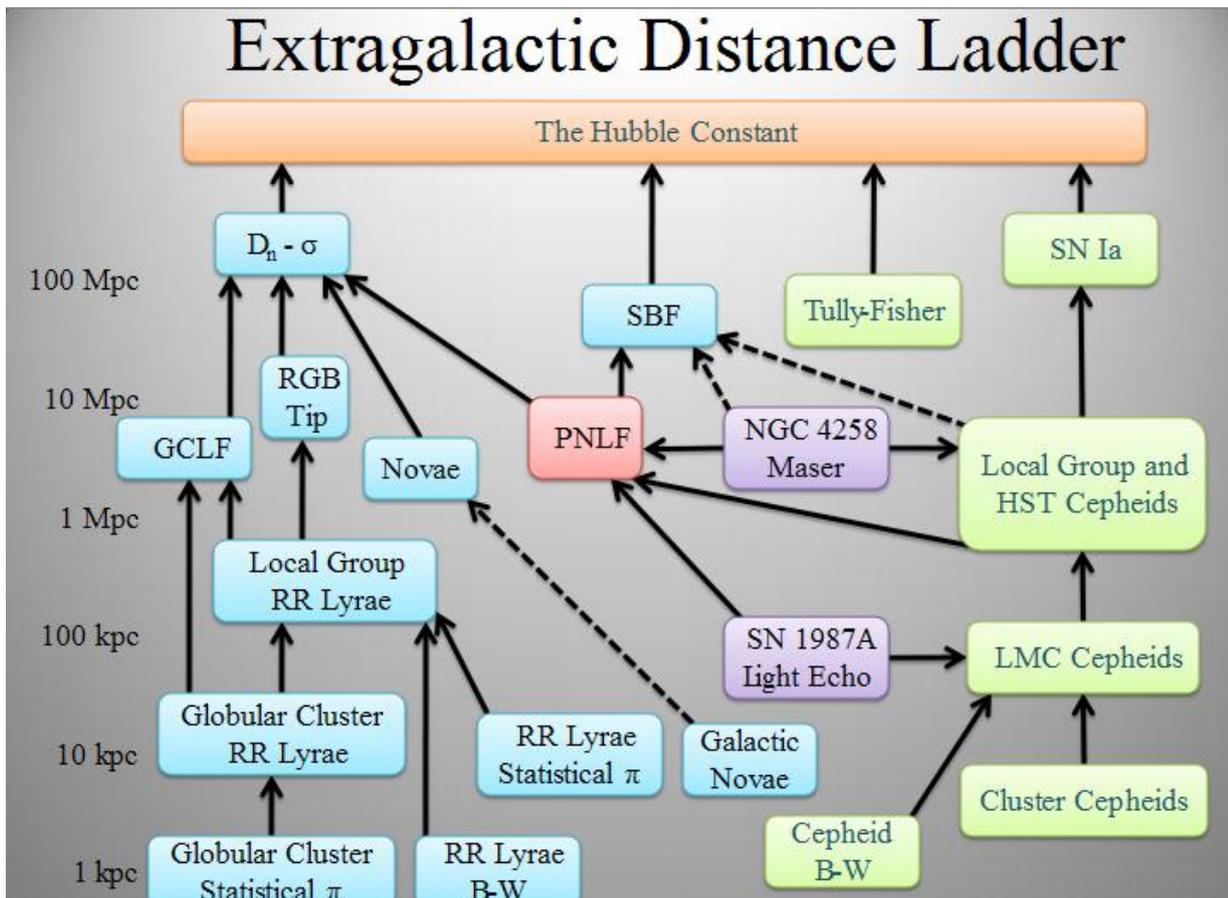


Figura 1.3: Sucessão de métodos tipicamente utilizados para estimar a distância de acordo com a escala.

Movimento Próprio

O Movimento Próprio é a medida da variação na posição de um astro no céu em relação ao centro de massa do Sistema Solar.

Normalmente, esse deslocamento é dado em unidades de milissegundos de arco por ano, abreviado como “*msa*” (ou “*mas*”, de *milliarcsecond* em Inglês). No sistema de coordenadas equatorial o movimento próprio é medido na forma de duas componentes: Ascensão Reta (abreviada por *RA* ou α) e Declinação (abreviada por *DEC* ou δ). Além do sistema equatorial, o movimento próprio também pode ser obtido no sistema de coordenadas galácticas, onde é expresso pelas componentes: longitude galáctica (simbolizado por l) e latitude galáctica (simbolizado por b).

2.1 Coordenadas Galácticas

Tradicionalmente, a grande maioria dos catálogos astronômicos fornecem as medidas de movimento próprio no sistema equatorial. No entanto, para a estimativa de distância que realizaremos nesse trabalho, é mais conveniente utilizar o sistema de coordenadas galáctica.

Para fazer a conversão do sistema equatorial para o sistema galáctico, foi utilizado neste trabalho as equações de *Radoslaw Poleski* em “*Transformation of the equatorial proper motion to the galactic system*” Poleski (2013).

De forma sucinta, as equações abaixo indicam o que o movimento próprio (μ) se converte entre os sistemas tal que:

$$\begin{pmatrix} \mu_{l^*} \\ \mu_b \end{pmatrix} = \frac{1}{\cos b} \begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ -C_2 & C_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_{\alpha^*} \\ \mu_\delta \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Onde os coeficientes C_1 e C_2 são dados por:

$$C_1 = \sin \delta_G \cos \delta - \cos \delta_G \sin \delta \cos(\alpha - \alpha_G) \quad (2.2)$$

$$C_2 = \cos \delta_G \sin(\alpha - \alpha_G) \quad (2.3)$$

2.2 Movimento Solar e Movimento Peculiar

Naturalmente, o Sistema Solar não está fixo em relação ao centro galáctico. O Sol, assim como as demais estrelas, possui um movimento sistemático de rotação em torno do centro galáctico, como também um movimento médio de grupo junto da vizinhança estelar, além de um movimento peculiar em relação ao movimento médio desse grupo.

Supondo que as estrelas possuem órbitas aproximadamente circulares em torno do centro galáctico, a mecânica clássica prevê um cenário no qual os astros em órbitas mais internas transladam mais rapidamente em torno do centro, isto é, possuem uma velocidade de rotação galáctica maior do que os objetos mais distantes. Desse modo, se espera que o movimento próprio de estrelas próximas apresentaria uma tendência sistemática a ser observada, o mesmo valendo para a velocidade radial.

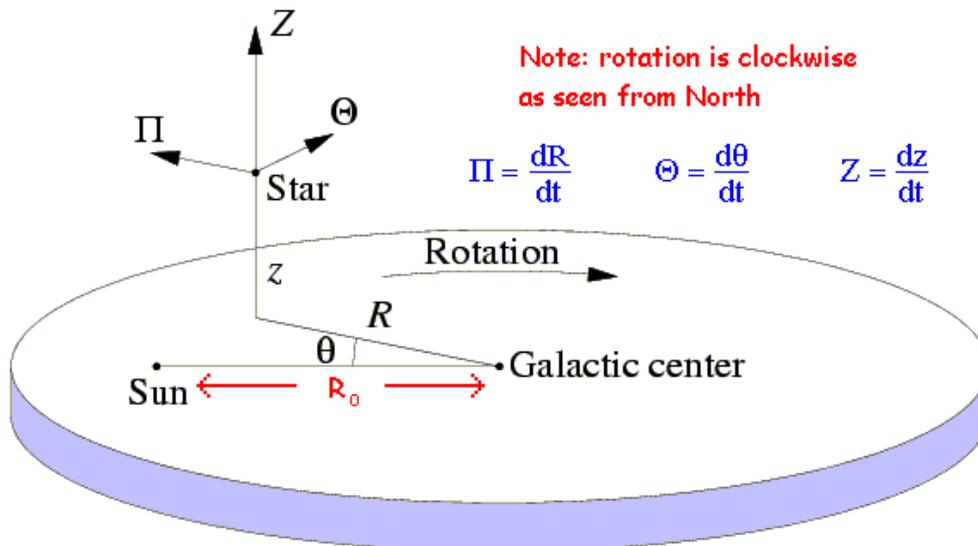


Figura 2.1: Ilustração do movimento cinemático rotacional de uma estrela em torno do centro galáctico.

Desse modo, para uma estrela qualquer, temos que o movimento relativo da estrela ao centro galáctico resulta da contribuição rotacional da estrela ao redor do centro galáctico e também do movimento peculiar da mesma. Porém, visto que o sistema solar não está em repouso em relação ao centro galáctico, o movimento próprio da estrela que observamos contém ainda a contribuição do movimento do observador (*i.e.* movimento do sistema solar) na direção apontada.

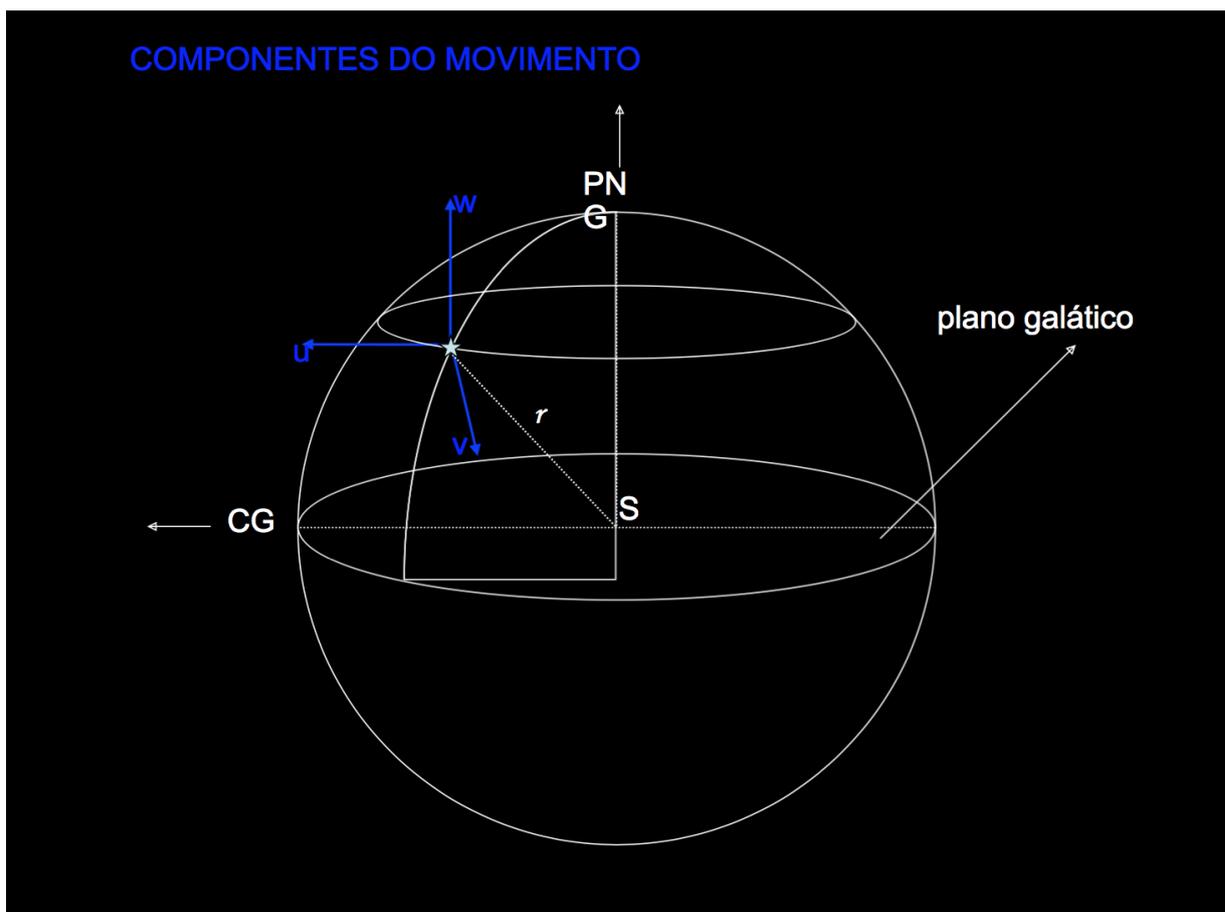


Figura 2.2: As componentes do movimento Solar.

Dessa forma, temos:

- Movimento de uma estrela relativo ao Centro Galáctico:

$$V'_\star = V_\star(R) + v_\star \quad (2.4)$$

- Movimento do Sol relativo ao Centro Galáctico:

$$V'_\odot = V_\odot(R_\odot) + v_\odot \quad (2.5)$$

- Movimento de uma estrela relativo ao Sol (*i.e.* movimento observado):

$$V_{obs} = V'_\star - V'_\odot = [V_\star(R) - V_\odot(R_\odot)] + [v_\star - v_\odot] \quad (2.6)$$

Assumindo que a estrela observada está próxima ao Sol em escalas de distâncias galácticas, podemos assumir que o movimento rotacional galáctico são semelhantes, de modo que as velocidades rotacionais se cancelam:

$$V_\star(R) \approx V_\odot(R_\odot) \implies V_\star(R) - V_\odot(R_\odot) = 0 \quad (2.7)$$

E finalmente, podemos extrair o movimento peculiar das estrelas observando o movimento próprio da mesma e subtraindo a contribuição solar na direção da mesma.

$$v_\star = V_{obs} - v_\odot \quad (2.8)$$

Estratégia

Conforme já mencionado, procura-se estimar a distância de uma estrela à nós a partir do movimento próprio da mesma, e então comparar os valores estimados por essa estratégia com a distância obtida diretamente por paralaxe, investigando a validade da nova estratégia sugerida.

O primeiro passo consiste em, uma vez dado o movimento próprio do astro, transformá-lo em coordenadas galácticas caso os dados ainda não estejam nesse formato, o que frequentemente é o ocorre. Isso pode ser feito através da equação (2.1).

Em seguida, dadas as coordenadas galácticas de um astro (l, b) e conhecendo de antemão as componentes do movimento solar ($u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}$) Mignard (2000), é possível calcular a contribuição do movimento solar ($\mu_L \cos b, \mu_b$) para uma dada paralaxe (π) Abad et al. (2003). A contribuição solar em função da paralaxe e da posição do astro é dada pelas equações (3.1) e (3.2):

$$\mu_L \cos b = \frac{\pi}{4.7405} [u_{\odot} \sin(l) - v_{\odot} \cos(l)] \quad (3.1)$$

$$\mu_b = \frac{\pi}{4.7405} [u_{\odot} \cos(l) \sin(b) + v_{\odot} \sin(l) \sin(b) - w_{\odot} \cos(b)] \quad (3.2)$$

Dessa forma, para cada valor de paralaxe fornecido, as equações acima retornam a contribuição solar na direção de l e b , e assim pode-se traçar uma reta representativa dessa contribuição com diversos valores de paralaxe.

Por exemplo, temos no gráfico abaixo 3.1 uma reta representativa da contribuição solar na direção de Rho Oph F para uma dada distância, oriunda da aplicação das equações acima.

Em seguida, dado o movimento próprio de um astro no aglomerado em questão, nesse caso Rho Oph F, podemos inserir o Astro no gráfico (vide 3.2) e compará-lo com a reta

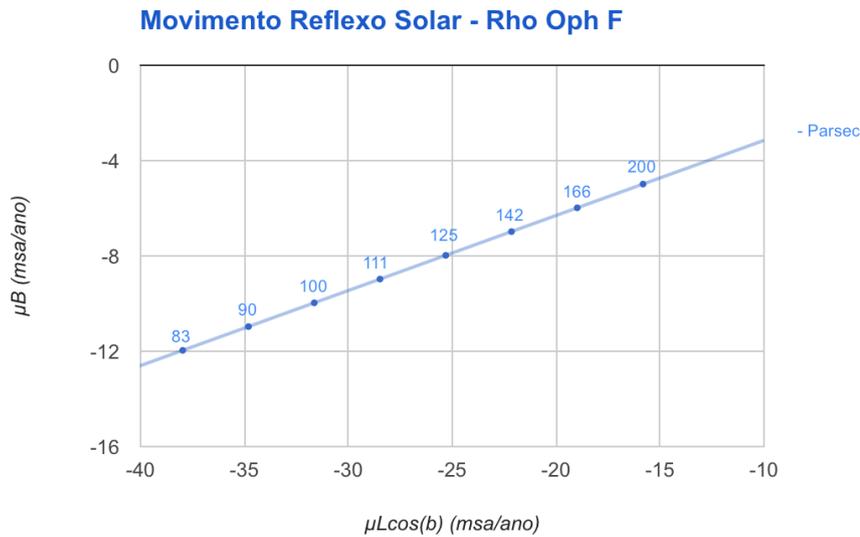


Figura 3.1: Na linha azul consta a contribuição do movimento solar na direção de Rho Oph F. Cada ponto azul na reta corresponde a contribuição correspondente à uma dada distância em Parsecs.

de contribuição solar. O movimento peculiar da estrela corresponde a distância do ponto à reta.

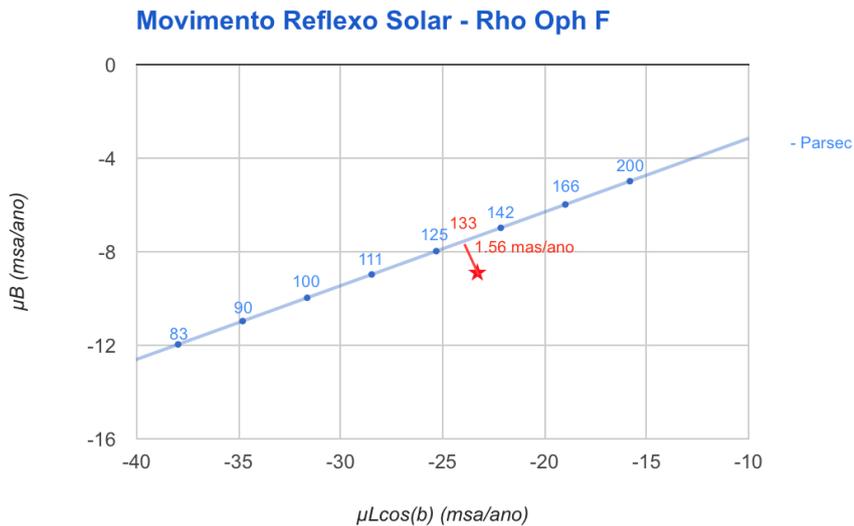


Figura 3.2: O movimento próprio (em coordenadas galácticas) de Rho Oph F é inserido no gráfico. Da distância do astro à reta, o movimento peculiar do astro é obtido e a distância pode ser estimada.

A estratégia adotada consiste na hipótese de que extraindo o movimento peculiar da estrela, toda a contribuição restante no movimento da mesma é devido ao movimento solar em tal direção. Portanto, caso a hipótese for válida, pode-se estimar a distância do Sistema Solar até o astro subtraindo o movimento peculiar do ponto, fazendo-o "cair" na reta de contribuição solar.

Partindo da hipótese feita, podemos através da reta perpendicular que liga o ponto à reta de contribuição solar, fazer uma estimativa da distância do objeto até o Sistema Solar. Isto é, estimar a distância da estrela em questão levando em conta apenas o movimento reflexo do Sol e a posição da mesma.

Conforme mostra 3.2, usando da estratégia para o caso de Rho Oph F, foi estimado uma distância de $133pc$.

Hyades

4.1 *Visão Geral*

Hyades é o aglomerado aberto mais próximo do Sistema Solar, e por isso também é um dos mais estudados na literatura. Localizado na constelação de Touro, o aglomerado tem formato aproximadamente esférico, e consiste de centenas de estrelas que compartilham da mesma idade, origem, composição química. Além das características citadas, as estrelas da Hyades compartilham de um mesmo movimento de grupo, o que as tornam excelentes candidatas ao teste da estratégia de obtenção da distância através do movimento reflexo solar.

A distância das Hyades é especialmente importante porque se trata do aglomerado com a melhor distância conhecida até o momento Perryman et al. (1998). Isso se deve ao fato de que a distância das Hyades até o Sistema Solar foi mensurada por três vias distintas: por paralaxe através do Hipparcos van Leeuwen (2009), por diagrama cor-magnitude Majaess et al. (2011), e ainda por paralaxe através do telescópio espacial Hubble McArthur et al. (2011). Todos os resultados apontam para uma distância de cerca de $47pc$ do centro das Hyades até o Sistema Solar.

Foram selecionadas três estrelas muito brilhantes do aglomerado para o teste da estratégia, comparando os resultados estimados com aqueles fornecidos pelo Hipparcos.

4.2 *Desenvolvimento*

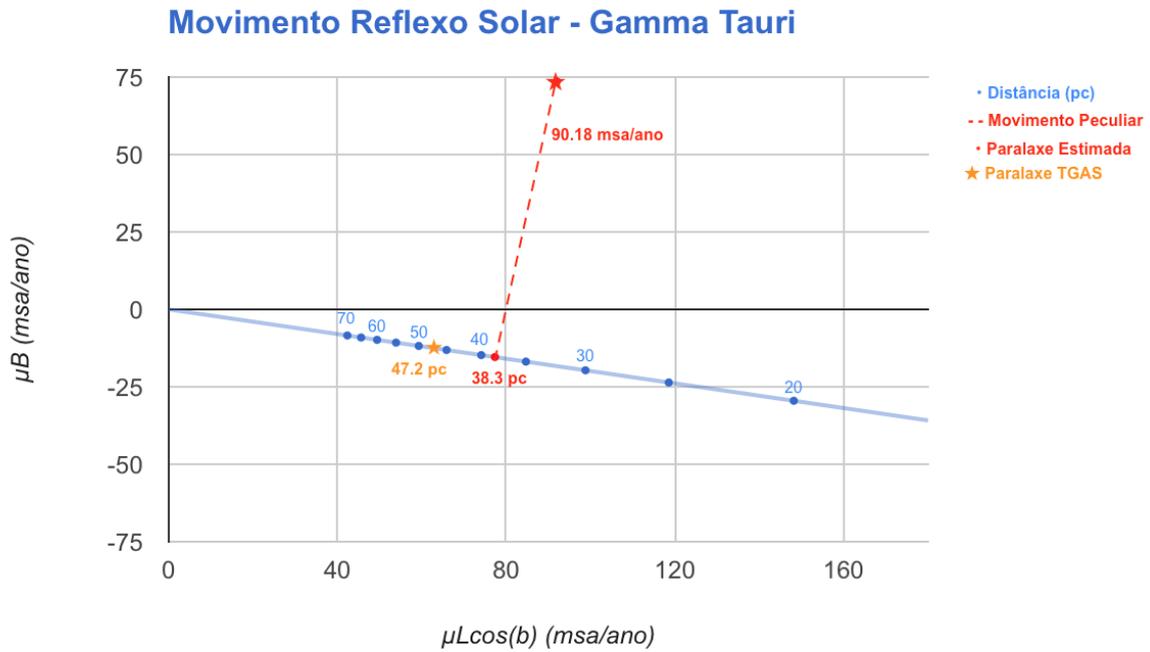


Figura 4.1: Contribuição do movimento solar na direção de Gamma Tauri. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

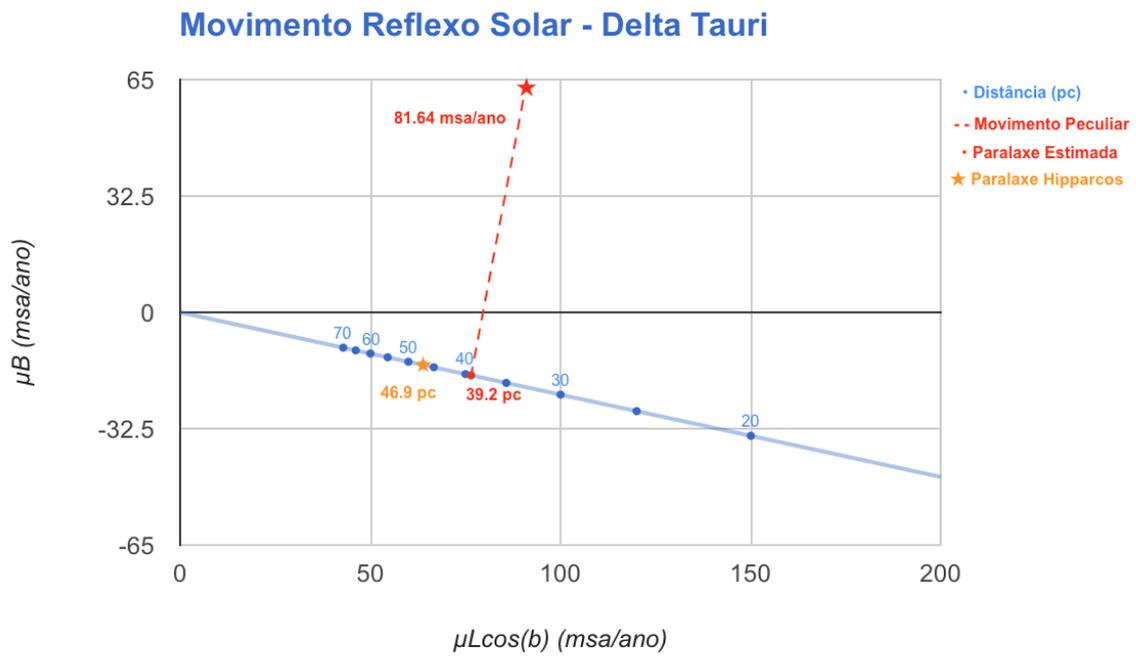


Figura 4.2: Contribuição do movimento solar na direção de Delta Tauri. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

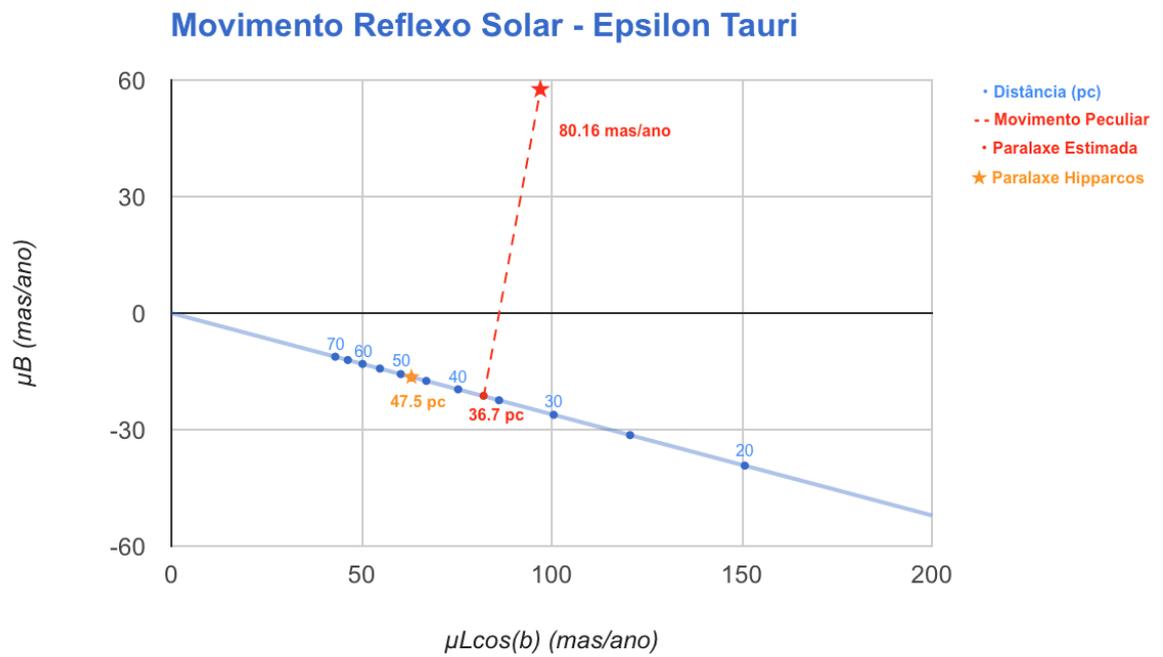


Figura 4.3: Contribuição do movimento solar na direção de Epsilon Tauri. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

TW Hydrae

5.1 Visão Geral

Dando sequência ao teste da estratégia, dessa vez a mesma será empregada para estimar a distância de alguns objetos na associação *TW Hydrae*, também conhecida como TWA.

A associação TWA é composta por cerca de 30 estrelas muito jovens, e sabe-se que o aglomerado está localizado a cerca de 50 parsecs do Sistema Solar Zuckerman e Song (2004). Todas as estrelas da associação aparentam ter aproximadamente a mesma idade, entre 5 e 10 milhões de anos e, além disso, compartilham de um movimento comum típico da associação, o que torna a associação um excelente candidato ao teste da estratégia.

Os astros da associação TWA selecionados para o teste foram aqueles que possuem os dados de coordenadas e movimento próprio disponíveis no catálogo "TGAS" Michalik et al. (2015) (*Tycho-Gaia Astrometric Solution*), garantindo assim a melhor qualidade possível dos dados astrométricos utilizados.

Em seguida, após estimadas as distâncias, o valor estimado será comparado com as distâncias indicadas pelo catálogo TGAS. Em dois casos em especial, ocorre que o catálogo Hipparcos também possui uma medida da distância para o astro em questão. Nesses casos, a medida do Hipparcos também aparece nos gráficos para comparação.

5.2 Desenvolvimento

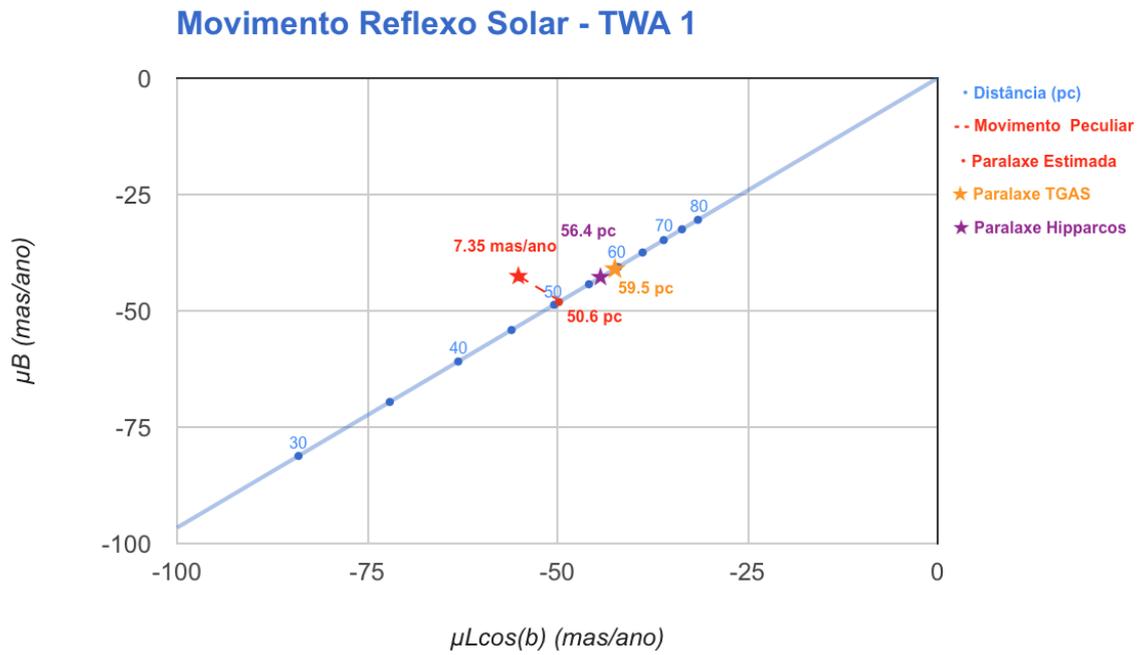


Figura 5.1: Contribuição do movimento solar na direção de TWA 1. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

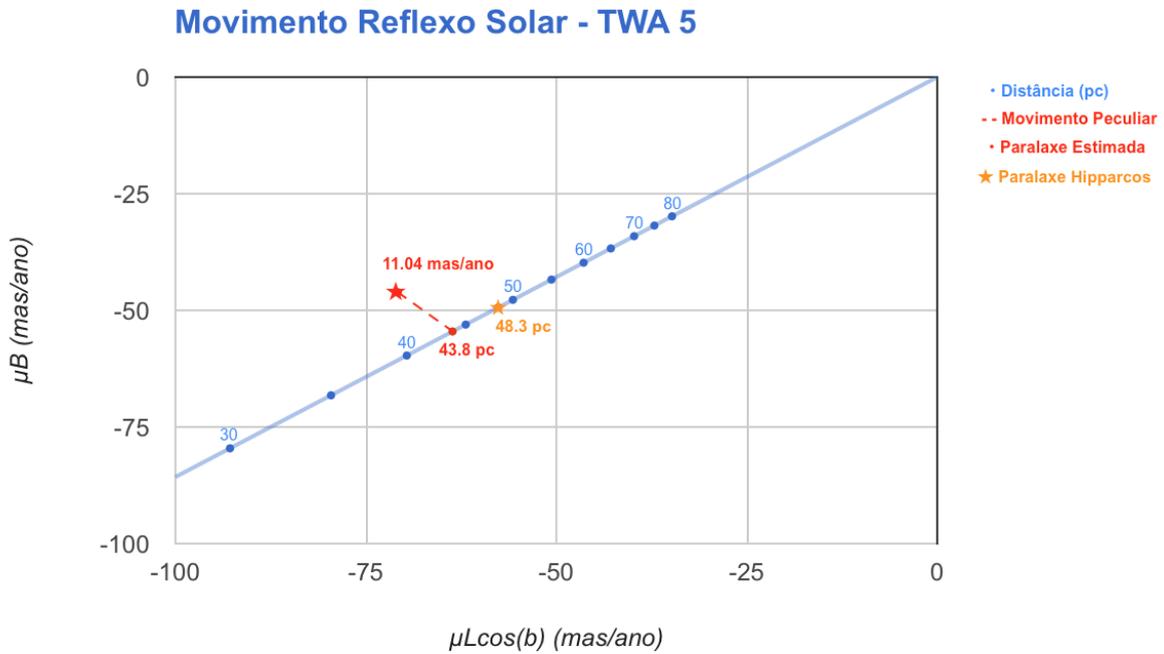


Figura 5.2: Contribuição do movimento solar na direção de TWA 5. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

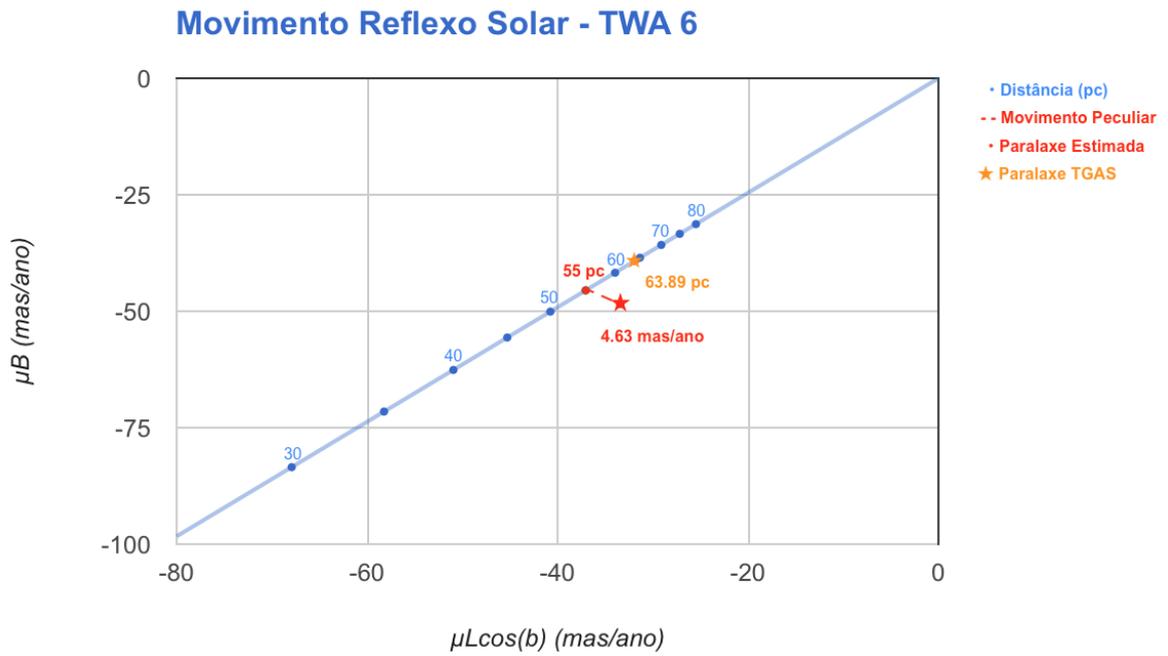


Figura 5.3: Contribuição do movimento solar na direção de TWA 6. Subtraindo o movimento peculiar, é possível estimar a distância.

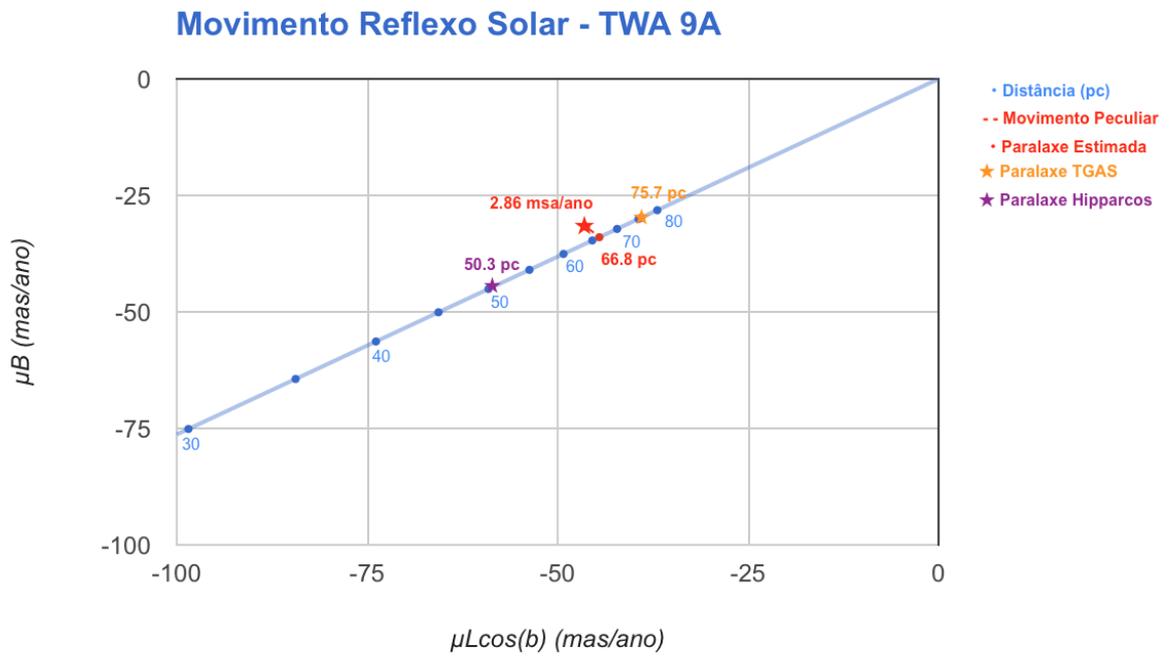


Figura 5.4: Contribuição do movimento solar na direção de TWA 0A. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

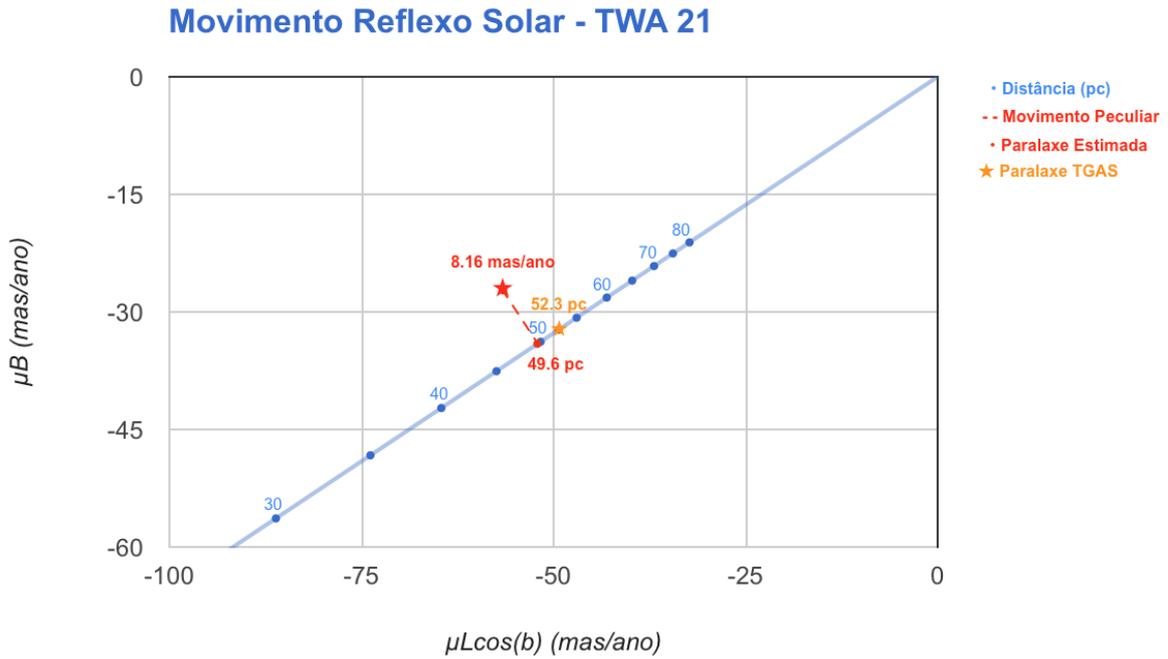


Figura 5.5: Contribuição do movimento solar na direção de TWA 21. Subtraindo o movimento peculiar, é estimada a distância.

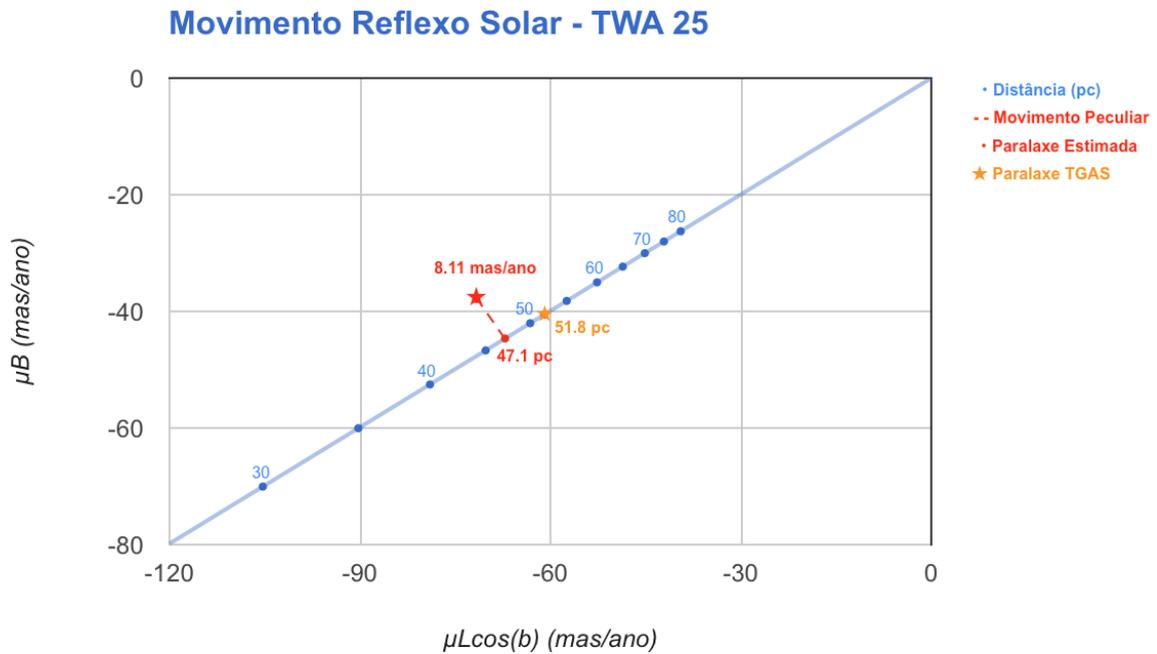


Figura 5.6: Contribuição do movimento solar na direção de TWA 25. Subtraindo o movimento peculiar, é possível estimar a distância.

Resultados e Conclusão

Os resultados obtidos para as estimativas de distância (e conseqüentemente, paralaxe) para as estrelas selecionadas no aglomerado Hyades estão sintetizados na 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados obtidos para as Hyades

Objeto	Mov. Pec. (mas/ano)	Par. HIP (mas)	Par. - Estimativa (mas)	Dist. HIP (pc)	Dist. - Estimativa (pc)
Gamma Tauri	90.18	21.17	25.1	47.23	39.8
Delta Tauri	81.64	21.29	24.2	46.97	41.3
Epsilon Tauri	80.16	21.04	25.5	47.52	39.2

Como pode-se observar, nos três casos a estimativa não chegou ao valor conhecido da Paralaxe. Em todos eles, as estimativas de distância ficaram abaixo do valor esperado, com uma discordância da ordem de 10% do valor absoluto da distância conhecida.

Nota-se também que o movimento peculiar das estrelas do aglomerado é notoriamente alto nos três casos, apresentando um valor de movimento peculiar maior do que a soma vetorial das componentes do movimento próprio.

Da mesma forma, foi obtido para as estrelas da associação TW Hydrae os dados da 6.2.

Tabela 6.2 - Resultados obtidos para *TW Hydrae*

Objeto	Mov. Pec. (mas/ano)	Par. HIP (mas)	Par. - Estimativa (mas)	Dist. HIP (pc)	Dist. - Estimativa (pc)
TWA 1	7.35	16.8	19.7	59.52	50.6
TWA 5	11.04	20.69	22.8	48.33	43.8
TWA 6	4.63	15.65	18.2	63.89	55.0
TWA 9A	2.86	13.21	15.1	75.70	66.3
TWA 21	8.16	19.09	20.2	52.38	49.6
TWA 25	8.11	19.29	21.3	51.84	47.1

No caso de *TWHydrae*, ocorreu o mesmo efeito: todos os valores estimados fornecem uma distância menor do que aquela medida pelo Gaia no TGAS, o que inevitavelmente leva à hipótese de que possa estar ocorrendo algum erro sistemático no processo.

No entanto, é notório que para as estrelas de *TWHydrae* foi obtido um movimento peculiar notoriamente menor do que aqueles encontrados nas Hyades. Em especial, percebe-se também o efeito oposto a aquele encontrado para as Hyades: em todos os casos, o movimento peculiar é muito menor do que a soma vetorial das componentes do movimento próprio.

Uma possível causa para o insucesso das estimativas talvez esteja nos valores das componentes de velocidade solar adotadas, uma vez que as mesmas são frequentemente atualizadas na literatura. Em especial, a última estimativa feita para essas componentes apresenta valores distintos dos que foram adotados ao início desse trabalho Bobylev (2016).

Um teste mais apurado da estratégia pode ser feito repetindo o que foi feito no trabalho, mas dessa vez levando em conta um número muito maior de astros (como por exemplo o catálogo Hipparcos inteiro). Com um número grande de medidas em todas as direções e distâncias, seria possível procurar por padrões, de modo a testar por exemplo se o modelo só permanece válido até um certo limite de distância, ou então se o mesmo está limitado até certa latitude/longitude galáctica.

Outro questionamento a ser considerado, é quanto a veracidade de (eq). Caso a mesma for verdadeira, seria de se esperar que a estratégia seja precisa inversamente proporcional à distância. Uma maneira de testar esse último palpite, seria aplicando a mesma estratégia para um grupo grande de estrelas muito próximas. Certamente, dados astrométricos de

muitos novos objetos próximos e de brilho muito fraco (tais como anãs vermelhas e marrons) e que não foram medidos pelo Hipparcos, virão a ser disponibilizados pelo Gaia nos próximos meses, no que será o maior levantamento astrométrico já feito, possibilitando uma melhor investigação dessa hipótese.

Tais questionamentos e hipóteses, assim como a confirmação da validade da estratégia em si, não podem ser respondidos apenas por esse trabalho.

Referências Bibliográficas

- Abad C., Vieira K., Bongiovanni A., Romero L., Vicente B., An extension of Herschel's method for dense and extensive catalogues. Application to the determination of solar motion, *A&A*, 2003, vol. 397, p. 345
- Bobylev V. V., The Galaxy Kinematics from the Cepheids with the Proper Motions from the GAIA DR1 Catalog, *ArXiv e-prints*, 2016
- Deller A. T., Precision VLBI astrometry: Instrumentation, algorithms and pulsar parallax determination, Swinburne University, 2009, Tese de Doutorado
- Gaia Collaboration Brown A. G. A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J., Mignard F., Drimmel R., co-authors ., Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties, *ArXiv e-prints*, 2016
- Majaess D. J., Turner D. G., Lane D. J., Krajcic T., Deep Infrared ZAMS Fits to Benchmark Open Clusters Hosting Delta Scuti Stars, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 2011, vol. 39, p. 219
- McArthur B. E., Benedict G. F., Harrison T. E., van Altena W., Astrometry with the Hubble Space Telescope: Trigonometric Parallaxes of Selected Hyads, *AJ*, 2011, vol. 141, p. 172
- Michalik D., Lindegren L., Hobbs D., The Tycho-Gaia astrometric solution . How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data, *A&A*, 2015, vol. 574, p. A115
- Mignard F., Local galactic kinematics from Hipparcos proper motions, *A&A*, 2000, vol. 354, p. 522

Perryman M. A. C., Brown A. G. A., Lebreton Y., Gomez A., Turon C., Cayrel de Strobel G., Mermilliod J. C., Robichon N., Kovalevsky J., Crifo F., The Hyades: distance, structure, dynamics, and age, *A&A*, 1998, vol. 331, p. 81

Poleski R., Transformation of the equatorial proper motion to the Galactic system, *ArXiv e-prints*, 2013

van Leeuwen F., Parallaxes and proper motions for 20 open clusters as based on the new Hipparcos catalogue, *A&A*, 2009, vol. 497, p. 209

Zuckerman B., Song I., Young Stars Near the Sun, *ARA&A*, 2004, vol. 42, p. 685