



"Raio X" das lentes gravitacionais conhecidas

Palavras-Chave: Lentes gravitacionais, quasares, base de dados

Autores(as):

Pedro Henrique do Vale Cunha, IAG – USP

Prof. Dr. Ramachrisna Teixeira (orientador), IAG – USP

INTRODUÇÃO:

As lentes gravitacionais são um fenômeno astronômico que ocorre quando a gravidade de um objeto massivo, como uma galáxia ou um aglomerado de galáxias, desvia a luz de uma fonte distante, como uma estrela ou quasar, em direção ao observador. Isso cria a ilusão de que a fonte está em diferentes posições no céu, resultando em múltiplas imagens da mesma fonte, dependendo da disposição entre o observador, a lente e a fonte. Previsto pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, esse fenômeno tem sido uma ferramenta valiosa na astrofísica para estudar, por exemplo, a distribuição da matéria escura nas galáxias e estimar parâmetros cosmológicos, como a densidade de matéria e a expansão do universo.

Em 2015, o grupo Gaia Gravitational Lenses (Gaia GraL) foi formado para realizar um amplo levantamento de quasares lenseados por galáxias. Utilizando algoritmos de aprendizado de máquina e métodos de inteligência artificial no processamento de sinais, o grupo identifica candidatas a novas lentes. As confirmações são feitas através de observações espectroscópicas realizadas em vários telescópios ao redor do mundo. Desde então, dezenas de novas lentes foram descobertas, significativamente aumentando o número total conhecido.

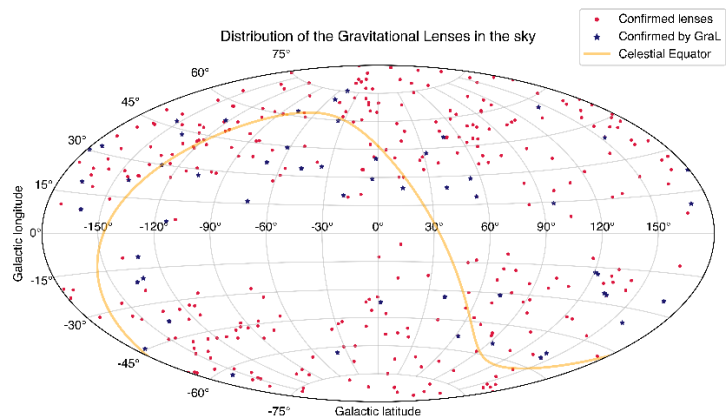
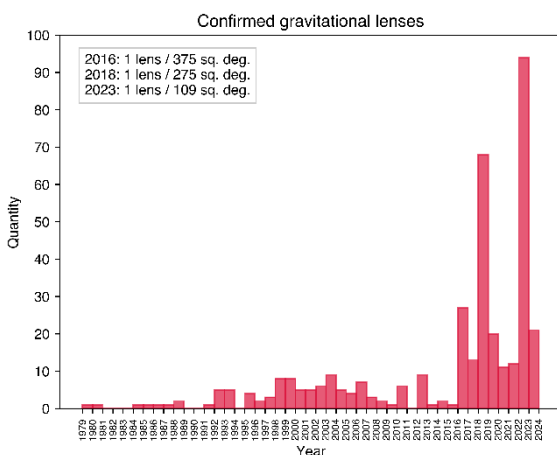


Figura 1: Ano de publicação das lentes gravitacionais confirmadas. **Figura 2:** Distribuição das lentes gravitacionais confirmadas no céu em coordenadas galácticas até a última atualização da base de dados, em 07 de junho de 2023. Em azul, estão representadas as lentes confirmadas pelo grupo Gaia GraL, 35 no total (30 duplas e 5 quads).

Para mapear todas as lentes conhecidas, o grupo Gaia GraL criou uma base de dados contendo informações astrométricas e fotométricas de todas as lentes de quasares confirmadas. Como membro do grupo,

meu papel é manter, organizar, corrigir, enriquecer e atualizar essa base de dados com novas descobertas de quasares lenseados por galáxias.

Table Browser for 1: GL_database_components_07042023.csv

Name	source_id	Type	Confirmed	RA_sixa	DEC_sixa	Component	Nb_of_galaxies	Diameter	Max_distance	Author	BibCode
784	PMNJ2004-1349	Double	1	20 04 07 02	-13 49 30 95	G	1	1,13	1,13	2001Winn	2001AJ...121.1223W
785	PMNJ2004-1349	Double	1	20 04 07 07	-13 49 30 70	A	1	1,13	1,13	2001Winn	2001AJ...121.1223W
786	PSJ205143-111444	Quad	0	20 51 43 42	-11 14 44 16	A	0	4,59	4,59	2018Rusu	2018ArXiv180307175R
787	PSJ205143-111444	Quad	0	20 51 43 42	-11 14 44 16	B	0	4,59	4,59	2018Rusu	2018ArXiv180307175R
788	PSJ205143-111444	Quad	0	20 51 43 42	-11 14 44 16	C	0	4,59	4,59	2018Rusu	2018ArXiv180307175R
789	PSJ205143-111444	Quad	0	20 51 43 42	-11 14 44 16	D	0	4,59	4,59	2018Rusu	2018ArXiv180307175R
790	PSJ0140+4107	Double	1	01 40 49 00	41 07 59 90	B	0	1,33	1,33	2018Lemon	2018MNRAS...479.5060L
791	PSJ0140+4107	Double	1	01 40 49 08	41 08 01	A	0	1,33	1,33	2018Lemon	2018MNRAS...479.5060L
792	PSJ042913.17+142840.9	Quad	1	04 29 13	+14 28 40	A	2	1,11	1,11	2022Desira	2022MNRAS...509.738C
793	PSJ042913.17+142840.9	Quad	1	04 29 13	+14 28 40	B	2	1,11	1,11	2022Desira	2022MNRAS...509.738C
794	PSJ042913.17+142840.9	Quad	1	04 29 13	+14 28 40	C	2	1,11	1,11	2022Desira	2022MNRAS...509.738C
795	PSJ042913.17+142840.9	Quad	1	04 29 13	+14 28 40	D	2	1,11	1,11	2022Desira	2022MNRAS...509.738C
796	PSS2322+1944	Double	1	23 22 07 20	19 44 23 00	A	1	1,5	1,65	2002Cox	2002A&A...387.406C
797	PSS2322+1944	Double	1	23 22 07 20	19 44 23 00	B	1	1,5	1,65	2002Cox	2002A&A...387.406C
798	PSS2322+1944	Double	1	23 22 07 22	19 44 21 99	G	1	1,5	1,65	2002Cox	2002A&A...387.406C
799	Q0142-100	Double	1	01 45 16 50	-09 45 17	A	1	2,23	2,23	1987Surdej	1987Natur...329.695S
800	Q0142-100	Double	1	01 45 16 82	-09 45 17 57	G	1	2,23	2,23	1987Surdej	1987Natur...329.695S
801	Q0142-100	Double	1	01 45 16 64	-09 45 17 61	B	1	2,23	2,23	1987Surdej	1987Natur...329.695S
802	Q0957+561	Double	1	10 01 21 93	55 53 46 46	G2	2	6,17	6,41	1979Weymann	1979ApJ...233L.43W
803	Q0957+561	Double	1	10 01 20 78	55 53 49 40	A	2	6,17	6,41	1979Weymann	1979ApJ...233L.43W
804	Q0957+561	Double	1	10 01 20 95	55 53 44 37	G1	2	6,17	6,41	1979Weymann	1979ApJ...233L.43W
805	Q0957+561	Double	1	10 01 20 93	55 53 43 35	B	2	6,17	6,41	1979Weymann	1979ApJ...233L.43W
806	Q1017-207	Double	1	10 17 24 07	-20 47 00 37	B	1	0,85	3,01	1996Claeskens	1996A&A...305L.9C
807	Q1017-207	Double	1	10 17 24 08	-20 47 00 38	G	1	0,85	3,01	1996Claeskens	1996A&A...305L.9C
808	Q1017-207	Double	1	10 17 24 13	-20 47 00 40	A	1	0,85	3,01	1996Claeskens	1996A&A...305L.9C
809	Q1208+101	Double	1	12 10 57 16	09 54 25 60	A	0	0,46	0,46	1986Hazard	1986Natur...322.38H
810	Q1208+101	Double	1	12 10 57 16	09 54 25 60	B	0	0,46	0,46	1986Hazard	1986Natur...322.38H
811	Q1355-2257	Double	1	13 55 43 30	-22 57 23 25	B	1	1,22	1,37	2003Morgana	2003AJ...126.696M
812	Q1355-2257	Double	1	13 55 43 31	-22 57 23 20	G	1	1,22	1,37	2003Morgana	2003AJ...126.696M
813	Q1355-2257	Double	1	13 55 43 38	-22 57 22 90	A	1	1,22	1,37	2003Morgana	2003AJ...126.696M
814	QJ0158-4325	Double	1	01 58 41 33	-43 25 04 60	B	1	1,22	1,33	1995Maza	1995RMxAA...31.119M
815	QJ0158-4325	Double	1	01 58 41 39	-43 25 04 33	G	1	1,22	1,33	1995Maza	1995RMxAA...31.119M
816	QJ0158-4325	Double	1	01 58 41 44	-43 25 04 20	A	1	1,22	1,33	1995Maza	1995RMxAA...31.119M
817	RXJ0911+0551	Quad	1	09 11 27 30	05 50 52 79	D	1	3,37	3,37	1997Bade	1997A&A...317L.13B

Totat: 1.534 Visible: 1.534 Selected: 1

Figura 3: Fragmento da base de dados de lentes gravitacionais mantida pelo grupo Gaia GraL. Atualmente, a base conta com 376 lentes confirmadas e 242 candidatas. Cada linha representa uma componente de cada lente.

OBJETIVOS:

Para mapear todas as lentes conhecidas, o grupo Gaia GraL criou uma base de dados contendo informações astrométricas e fotométricas de todas as lentes de quasares confirmadas. Como membro do grupo, meu papel é manter, organizar, corrigir, enriquecer e atualizar essa base de dados com novas descobertas de quasares lenseados por galáxias.

DADOS:

A base de dados contém nomes, coordenadas (RA/DEC), tipo (double/quad), componentes (A, B, C, D, G1, G2, G3, ...), separação angular máxima entre as componentes, redshifts da(s) galáxia(s) defletora(s) e do quasar-fonte, parâmetros Gaia, referência do descobridor, etc. Cada linha corresponde a uma componente de cada lente. Ao todo, temos 376 lentes gravitacionais, sendo 297 duplas e 79 quads. Além disso, há informações parciais de 242 candidatas. As candidatas são objetos publicados com alta probabilidade de serem lentes, mas ainda sem confirmação espectroscópica.

A fim de analisar apenas as lentes gravitacionais confirmadas, deixando de lado as candidatas, filtramos a nossa tabela usando a biblioteca Pandas no Python e associando a tabela a um dataframe no R.

METODOLOGIA:

Utilizamos bibliotecas em Python e em R para gerar os gráficos, histogramas, calcular correlações e traçar linhas de tendência. Um dos programas desenvolvidos é responsável por calcular, a partir das coordenadas presentes na tabela, a máxima separação angular entre as componentes de cada lente, nos dando informação sobre o diâmetro aparente da lente no céu.

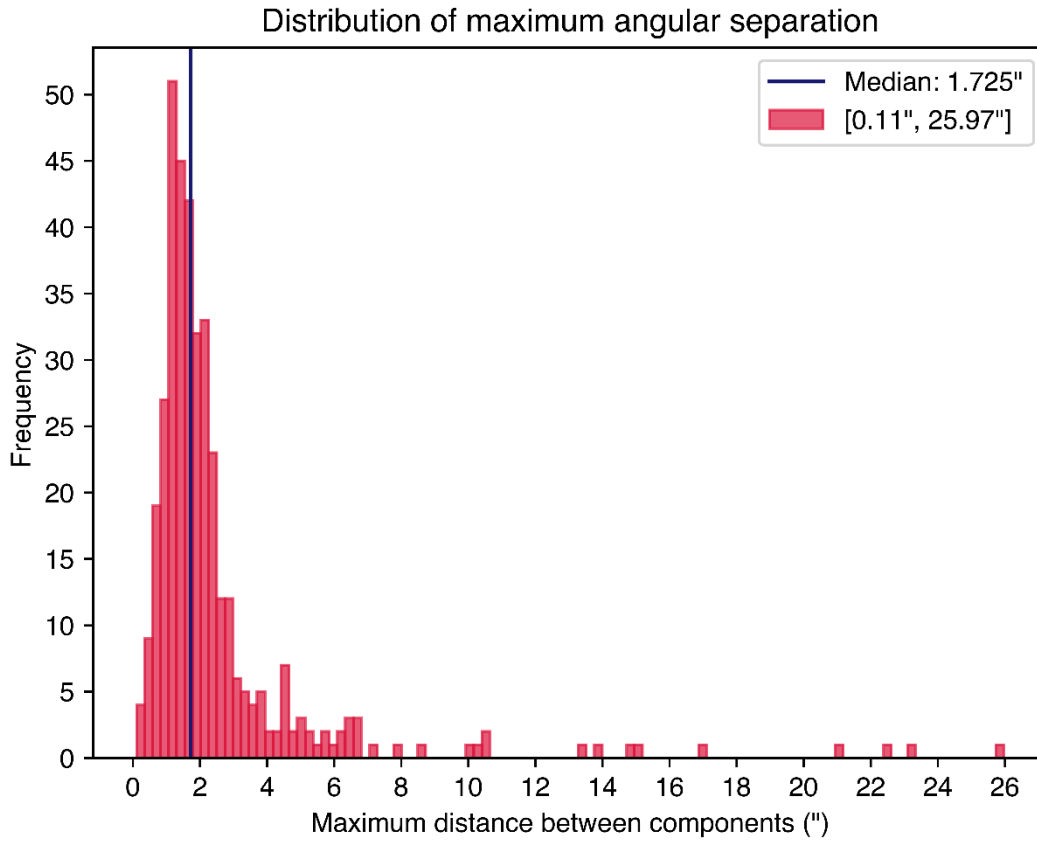


Figura 4: Fragmento da base de dados de lentes gravitacionais mantida pelo grupo Gaia GrL. Atualmente, a base conta com 376 lentes confirmadas e 242 candidatas. Cada linha representa uma componente de cada lente.

Tendo em mãos os dados de redshift da galáxia defletora e do quasar-fonte, estimamos a massa da defletora utilizando a Equação da Lente (1), considerando que toda a massa está distribuída uniformemente dentro do raio de Einstein da lente. Como estamos trabalhando com objetos pontuais, a lente gravitacional não produz anéis ou arcos, mas apenas imagens múltiplas de um mesmo quasar. Deste modo, calculamos o diâmetro ($\Delta\theta$) através da maior distância entre as componentes de cada lente e consideramos metade deste valor como sendo o raio de Einstein (θ_E).

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}} \quad (1)$$

Podemos considerar, em primeira aproximação, que a distância é dada por z^*c/H_0 , onde z é o redshift, c é a velocidade da luz e H_0 é o parâmetro de Hubble. Para este trabalho, consideramos $H_0 = 70$ km/s/Mpc. Desta forma, convertendo as grandezas, utilizamos a Equação (2) e obtemos a distribuição de massa das galáxias defletoras em massas solares.

$$M_L = \frac{\Delta\theta^2 c^2}{16GM_\odot} \frac{c}{H_0} \frac{z_S z_L}{z_S - z_L} \quad (2)$$

ANÁLISE E RESULTADOS:

Utilizando a metodologia adotada para calcular a massa da galáxia defletora, causadora do efeito de lente, estimamos massas na faixa de $6 \times 10^9 M_{\odot}$ a $8 \times 10^{13} M_{\odot}$. A existência de galáxias de alta massa (ou dupla de galáxias) possivelmente está associada às lentes de maior separação angular no céu, como mostrado na Figura 4. Os valores, embora tratem apenas de uma primeira estimativa, parecem se adequar bem à realidade, se comparado com os valores típicos de massa de galáxia.

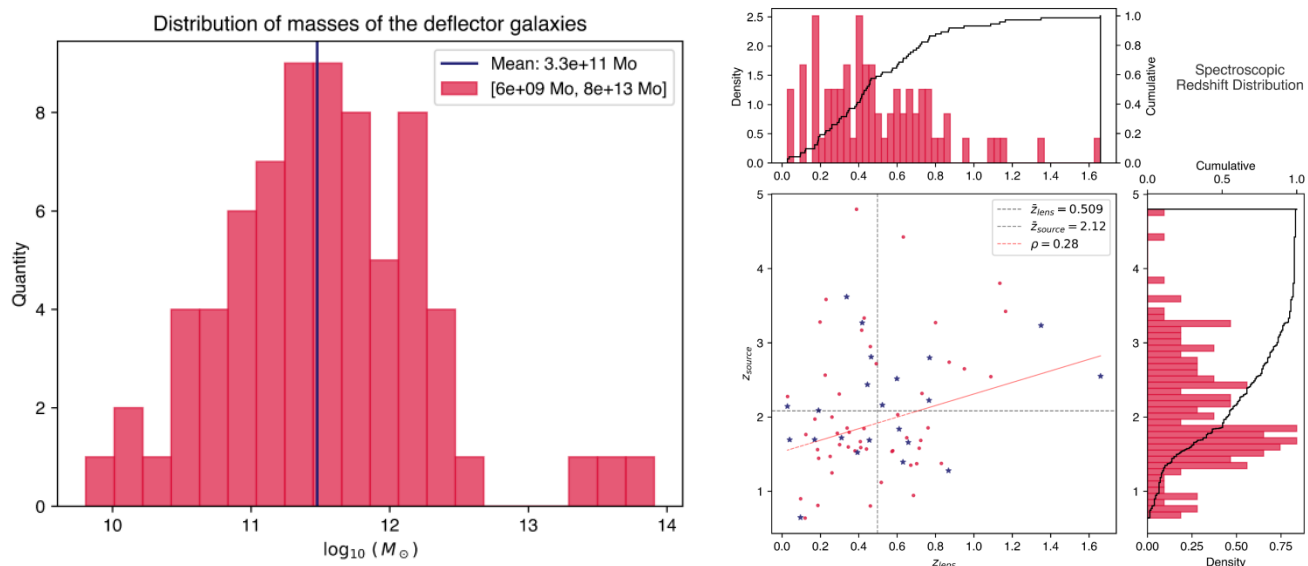


Figura 5: Distribuição da massa das galáxias em massas solares e escala logarítmica. **Figura 6:** Distribuição dos redshifts espectroscópicos das fontes e galáxias defletoras para lentes duplas (vermelho) e quads (azul). As linhas cinzas pontilhadas marcam as médias.

Representamos, na Figura 7, a distribuição de magnitudes nas diferentes bandas fotométricas do Gaia: B, G e R, respectivamente. Podemos perceber que, apesar de serem os objetos mais luminosos do Universo, por se tratarem de objetos extragalácticos muito distantes, a magnitude dos quasares são relativamente altas, chegando a 21.8 na banda G: no limite fotométrico da sensibilidade do telescópio espacial Gaia.

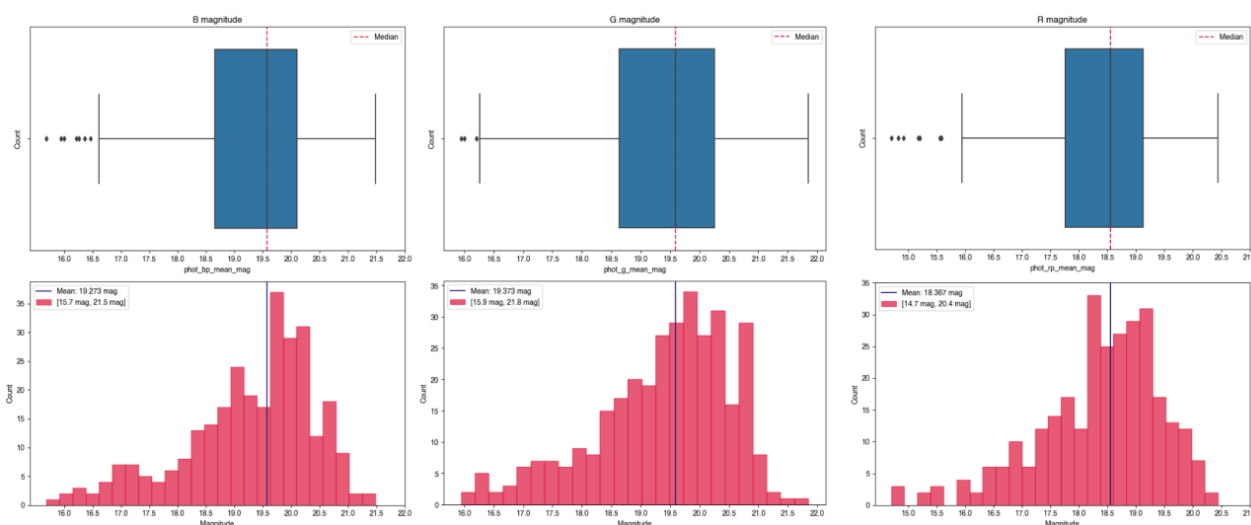


Figura 7: Distribuição dos valores de magnitude nas bandas B, G e R da componente A, a mais brilhante, de cada lente confirmada. Na banda G, a lente 2MASXJ01471020+4630433 é a que possui a componente mais brilhante: 15.944 mag, já a J2350+3654 é a que possui a mais fraca das componentes A, medindo 21.846 mag, no limite da visibilidade Gaia. Em azul, a linha vertical traz o valor mediano da distribuição, equivalente a 19.568 mag. O boxplot mostra o comportamento dos quartis.

Percebemos um evidente avermelhamento das componentes causado pela imensa quantidade de poeira do meio interestelar e intergaláctico que a luz teve que atravessar até chegar até nós. Notamos, além disso, um corte no espaço cor-cor resultante de uma filtragem prévia dos dados para a classificação dos objetos como quasares, feita durante o pré-processamento dos dados provenientes do Gaia.

Quanto ao redshift, notamos que há uma fraca correlação ($\rho = 0.28$) entre o valor medido para o quasar e do seu defletor. Essa correlação está provavelmente relacionada à geometria do problema, que não permite certas configurações para que o quasar sofra o efeito de lente, mas que ainda assim possui uma grande componente de aleatoriedade na distribuição.

Usamos um módulo de Gaussian Mixture Model (GMM) para a distribuição de redshifts e encontramos, em cada um dos casos, dois grupos distintos que parecem estar separados pelas médias das distribuições.

Assim como no caso da paralaxe, o movimento próprio de quasares, por se tratarem de objetos extragalácticos extremamente distantes, pode ser considerado nulo. Não só isso, mas o próprio modelo cosmológico vigente, Λ CDM, assume que os quasares não possuem movimento na direção transversal, mas apenas radial, devido à expansão do Universo. A Figura 10 apresenta o diagrama Vector-Point-Plot dos movimentos próprios medidos para todas as componentes de todos os sistemas de lentes confirmadas. Cada ponto dá o movimento próprio de uma componente, com suas respectivas barras de erro. A concentração perto do centro do diagrama mostra a consistência dos dados com o valor nulo esperado. Observamos, no entanto, outliers com altos valores de movimento, tanto em ascensão reta, como em declinação.

CONCLUSÕES:

Apesar de ainda serem objetos raros, o número de descobertas e confirmações de novas lentes gravitacionais de quasares vêm crescendo a cada ano. A fim de estudar as propriedades mais gerais dessa classe de objetos, realizamos um levantamento estatístico das diversas grandezas das lentes presentes na base de dados do grupo Gaia GraL.

Utilizando técnicas estatísticas, conseguimos realizar uma análise dos principais componentes de amostras da base de dados de quasares lenseados, através da realização de distribuições, correlações, ajustes e estimativas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J.H.J., Brown A.G.A., Vallenari A., Babusiaux C. et al., 2016a, A&A, 505A, 1G.
- [2] Gaia Collaboration, Brown A.G.A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J.H.J., Mignard F. et al., 2018, A&A, 616, A1.
- [3] Robin et al., 2012, A&A, vol. 543, p. A100.
- [4] Krone-Martins A.G.O., Ducourant C., Teixeira R. et al. 2013, A&A, 556, A102.
- [5] De Souza R., Krone-Martins A., Dos Anjos S., Ducourant C. and Teixeira R., 2014, A&A, 568, A124.
- [6] Bienaymé, O., Leca, J., and Robin, A. C., "A new dynamically self-consistent version of the Besançon Galaxy model", Astronomy and Astrophysics, vol. 620, 2018. doi:10.1051/0004-6361/201833395.
- [7] Finet, F. & Surdej, J. 2016, A&A, 590, A42.