

Poszukiwanie okresowej zmienności w zjawiskach mikrosoczewkowania grawitacyjnego

Piotr Płonka, Michał Małkowski, Barbara Białek
Opiekun: dr hab. Radosław Poleski

Styczeń 2025

1 Założenia projektu

Chcemy przeanalizować dane zakwalifikowane jako zjawiska mikrosoczewkowania z bazy OGLE Early Warning System (EWS) (Udalski 2003) tak, aby określić, czy to możliwe, że obiekt soczewkowany jest gwiazdą zmienną. W tym celu podzielimy dane obserwacyjne na te w trakcie soczewkowania i te poza soczewkowaniem. Następnie przeanalizujemy zmienność sygnałów z obu grup i porównamy, czy wykryta zmienność pokrywa się w obu sygnałach.

2 Dane

Posługujemy się danymi z bazy OGLE z lat 2011-2024 (Udalski, M. K. Szymański, and G. Szymański 2015). Dane zawierały obserwacje zjawisk mikrosoczewkowania grawitacyjnego. W sumie mieliśmy ok. 10 tysięcy zaobserwowanych zjawisk. Interesowały nas proste do dopasowania soczewki pojedyncze i odrzucaliśmy soczewki podwójne.

3 Eliminacja wzmocnienia sygnału wynikającego z mikrosoczewkowania

Dane fotometryczne zostały podzielone na dwie grupy: obserwacje podczas zjawiska soczewkowania (IN) oraz poza nim (OUT). Dane OUT to cały obserwowany sygnał z wyciętym fragmentem mikrosoczewkowania grawitacyjnego. Dla danych z obszaru IN dopasowaliśmy parametry mikrosoczewkowania, tj. czas maksymalnego zbliżenia t_0 , minimalny parametr odległości u_0 oraz czas Einsteina t_E , uwzględniliśmy również efekt blendingu. Na podstawie uzyskanego dopasowania skorygowaliśmy obserwowane jasności, usuwając wzmocnienie wynikające z mikrosoczewkowania grawitacyjnego korzystając z poniższej zależ-

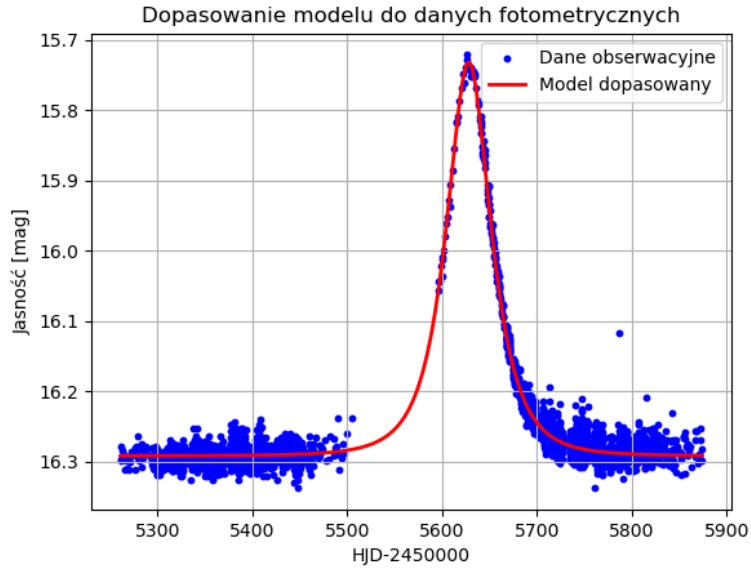
ności (Paczynski 1986):

$$I(t) = I_0 \cdot \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} + I_b \quad (1)$$

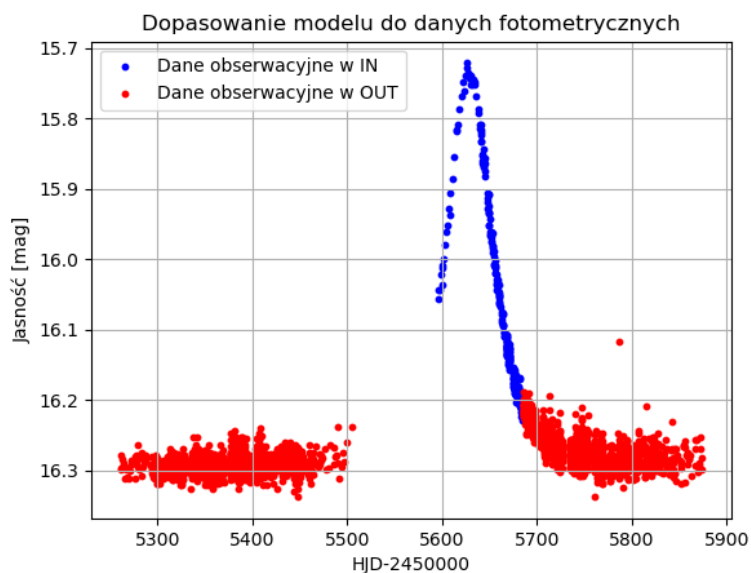
$$u = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{t - t_0}{t_E}\right)^2} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I(t) - I_b}{A(u)} \quad (3)$$

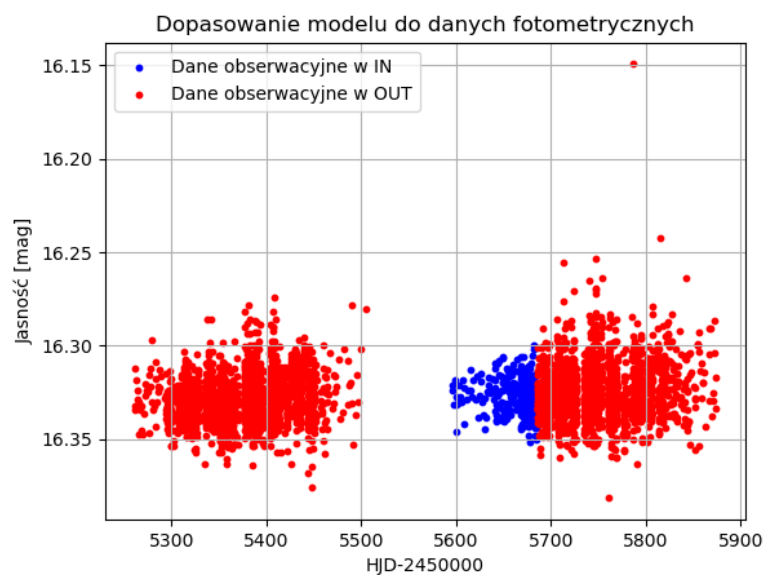
Przedział czasu, który zawiera część zjawiska określoną jako IN został wyznaczony rozwiązując równanie na czasy t_1 oraz t_2 , takie, że wzmocnienie A jest większe od $1 + \frac{\sigma}{I_0}$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym. Przykładowe usunięcie soczewki zostało przedstawione na poniższych rysunkach.



Rysunek 1: Dopasowanie danych do zjawiska mikrosoczewkowania grawitacyjnego.



Rysunek 2: Przedziały podziału zjawiska.



Rysunek 3: Usunięte zjawisko mikrosoczewkowania grawitacyjnego.

4 Analiza pozostałego sygnału

4.1 Analiza okresowości sygnału za pomocą programów `fnpeaks` i `AOV`

Do analizy okresowości w danych fotometrycznych wykorzystaliśmy programy `fnpeaks` oraz `AOV` (Analysis of Variance). Ich zadaniem było wykrycie ewentualnych sygnałów zmienności gwiazdowej w świetle zarejestrowanym podczas zjawiska mikrosoczewkowania.

4.1.1 Program `fnpeaks`

Program `fnpeaks` (Kołaczkowski 2009) został wykorzystany do poszukiwania dominujących częstotliwości w analizowanych danych. Narzędzie to implementuje metodę Fouriera do analizy widmowej, pozwalając na identyfikację głównych okresów zmienności w świetle gwiazdowym. Dane wejściowe składały się z czasów obserwacji oraz jasności źródła, a wynikiem była lista potencjalnych częstotliwości, które mogły wskazywać na zmienność gwiazdy.

4.1.2 Program `AOV`

Aby dodatkowo zweryfikować okresowość sygnału, zastosowano metodę analizy wariancji (Analysis of Variance) (Schwarzenberg-Czerny 1989), której implementacja znajduje się w programie `AOV`. Metoda ta polega na podziale krzywej jasności na fazy odpowiadające poszczególnym okresom i obliczeniu wariancji w każdej z tych sekcji. Dzięki temu można określić, czy dany okres rzeczywiście jest powtarzalnym sygnałem, a nie przypadkowym szumem.

4.1.3 Wnioski

Analiza danych przy użyciu `fnpeaks` oraz `AOV` umożliwiła identyfikację potencjalnych okresowych zmian w jasności źródła mikrosoczewkowania. Porównanie wyników z tych dwóch programów pozwoliło na bardziej precyzyjne określenie ewentualnych sygnałów zmienności i ocenę ich wiarygodności. Wyniki te posłużyły do dalszej interpretacji zjawiska oraz oceny wpływu zmienności źródła na rejestrowany sygnał mikrosoczewkowania.

4.2 Analiza periodogramów

Aby lepiej zrozumieć charakterystykę gwiazd zmiennych w naszych danych, skorzystaliśmy z programu `vartool` do analizy periodogramów uzyskanych z wcześniejszej analizy sygnału.

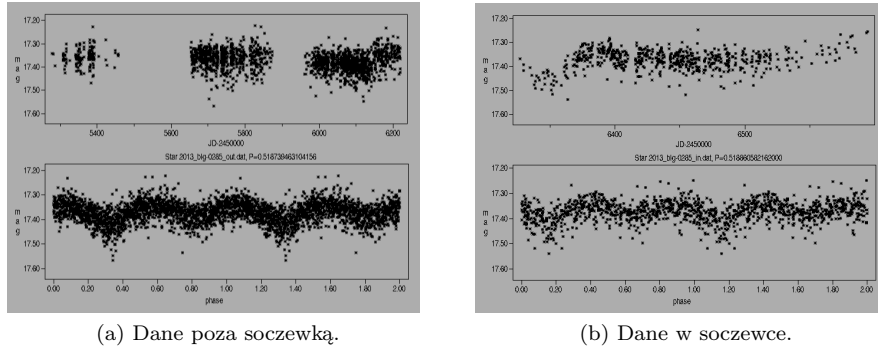
4.2.1 Program `vartool`

Program `vartool` to narzędzie, które dostarcza zestaw funkcji do przetwarzania i analizy krzywych blasku. Obejmuje metody obliczania statystyk zmienności i

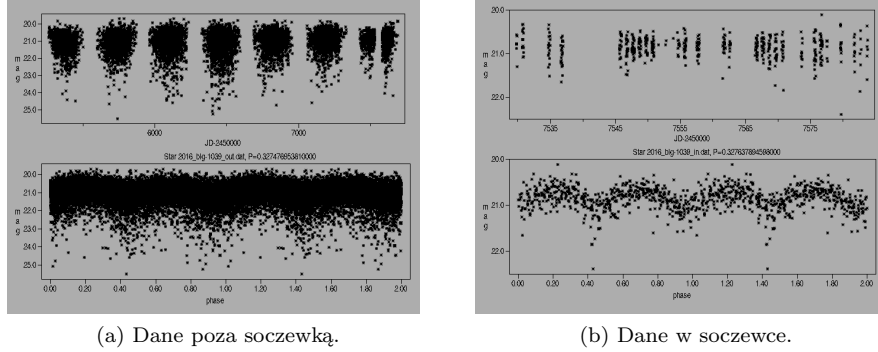
okresowości krzywych blasku, filtrowania, transformacji oraz innych modyfikacji tych danych, a także ich modelowania.

4.2.2 Klasyfikacja obiektów zmiennych

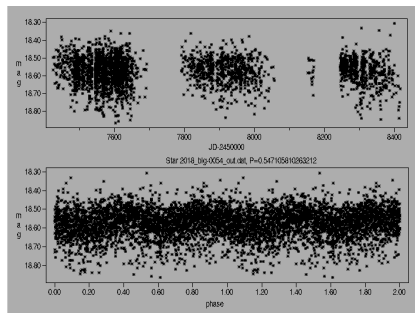
Przeanalizowaliśmy ok. 10 tysięcy obiektów soczewkowanych z bazy OGLE w poszukiwaniu okresowej zmienności w danych. Znaleźliśmy 30 obiektów tego typu. Poniżej, na rysunkach 4 - 14 przedstawiamy kilka przykładów znalezionych gwiazd zmiennych.



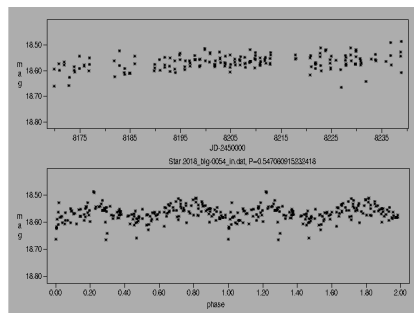
Rysunek 4: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.



Rysunek 5: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

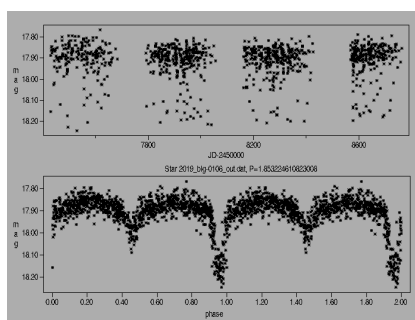


(a) Dane poza soczewką.

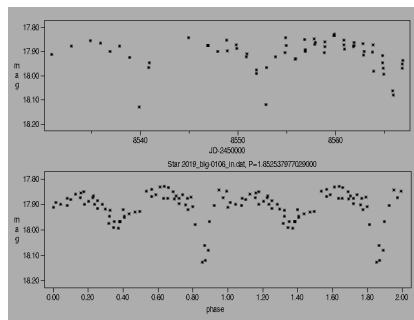


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 6: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

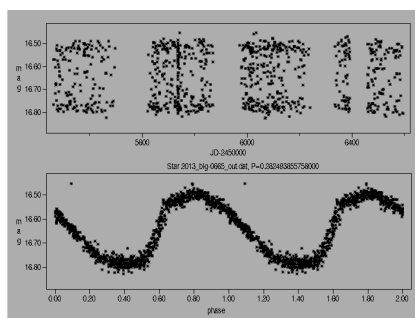


(a) Dane poza soczewką.

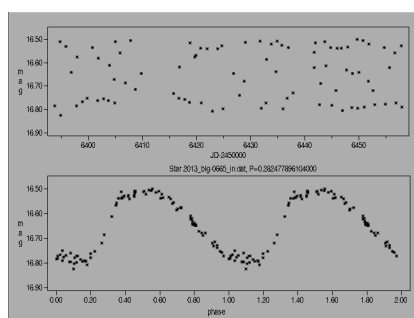


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 7: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

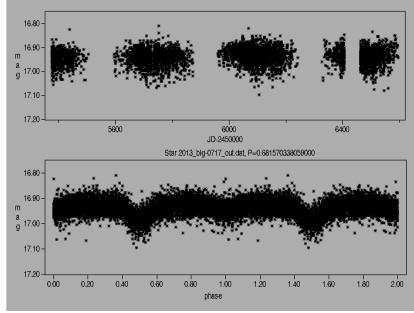


(a) Dane poza soczewką.

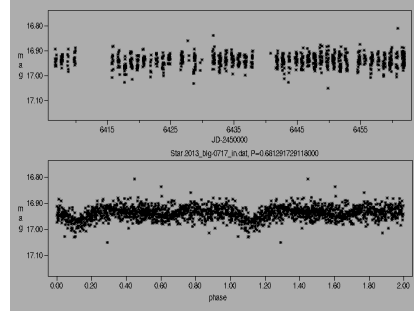


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 8: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej, ten sam co w pracy (So-
szyński et al. 2014)

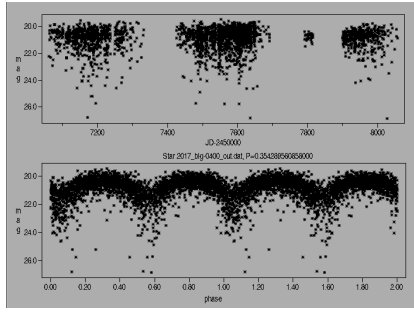


(a) Dane poza soczewką.

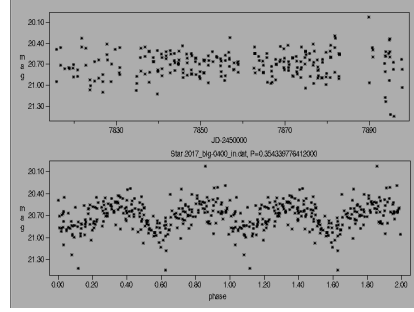


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 9: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

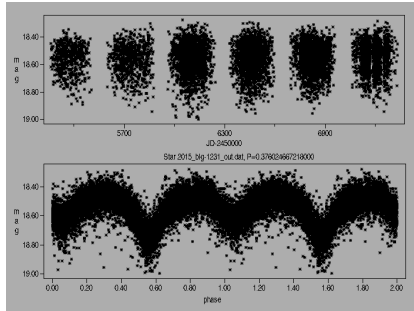


(a) Dane poza soczewką.

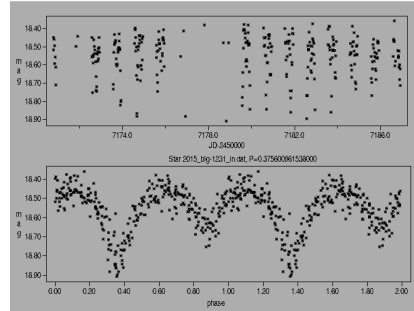


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 10: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

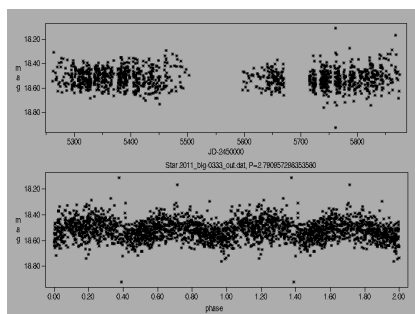


(a) Dane poza soczewką.

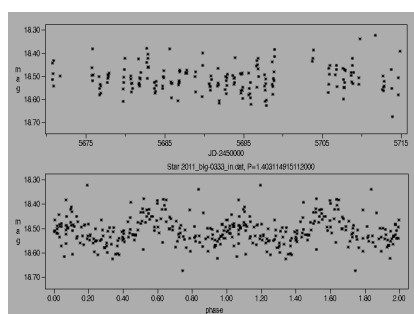


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 11: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

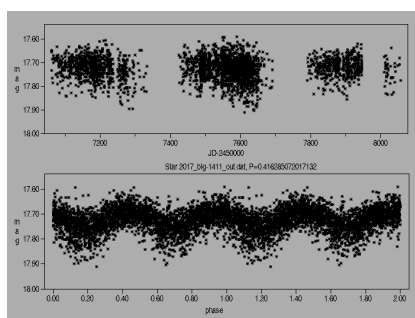


(a) Dane poza soczewką.

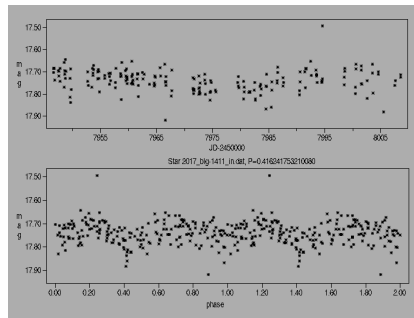


(b) Dane w soczewce.

Rysunek 12: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.



(a) Dane poza soczewką.



(b) Dane w soczewce.

Rysunek 13: Znaleziony obiekt o zmienności okresowej.

5 Tabela z wynikami

Nr	Nazwa zjawiska	Okres
1.	OGLE-2013_blg-0665	0.282494
2.	OGLE-2015_blg-1231	0.376025
3.	OGLE-2014_blg-1131	0.441686
4.	OGLE-2013_blg-0717	0.681570
5.	OGLE-2023_blg-1127	0.363313
6.	OGLE-2017_blg-1411	0.416285
7.	OGLE-2018_blg-0013	0.709950
8.	OGLE-2016_blg-1148	0.292269
9.	OGLE-2013_blg-0285	0.518739
10.	OGLE-2019_blg-0106	1.853225
11.	OGLE-2012_blg-1159	1.559697
12.	OGLE-2019_blg-0616	0.687332
13.	OGLE-2018_blg-0417	72.99270
14.	OGLE-2019_blg-0370	0.695241
15.	OGLE-2011_blg-0333	2.790957
16.	OGLE-2018_blg-0054	0.547106
17.	OGLE-2014_blg-0833	42.64392
18.	OGLE-2019_blg-0877	18.05054
19.	OGLE-2017_blg-1102	12.69036
20.	OGLE-2011_blg-0656	19.37985
21.	OGLE-2014_blg-1914	0.315447
22.	OGLE-2013_blg-0248	7.235890
23.	OGLE-2017_blg-0400	0.354290
24.	OGLE-2018_blg-1782	0.374336
25.	OGLE-2016_blg-1039	0.327477
26.	OGLE-2016_blg-1672	0.298873
27.	OGLE-2016_blg-0221	0.445137
28.	OGLE-2012_blg-0776	0.695072
29.	OGLE-2014_blg-0807	0.517331
30.	OGLE-2015_blg-1887	1.608881
31.	OGLE-2015_blg-0064	26.24672
32.	OGLE-2013_blg-0790	0.408739
33.	OGLE-2023_blg-0096	0.846991

Tabela 1: Tabela z nazwami i okresami obiektów zmiennych.

6 Podsumowanie

Przeprowadziliśmy analizę danych przedstawiających krzywe jasności ze wzmocnieniem wynikającym z mikrosoczewkowania grawitacyjnego,

Tym sposobem udało nam się zaobserwować 30 obiektów o okresowej zmienności. Okresy w oddzielnych plikach OUT i IN w wysokim stopniu się pokrywają, mimo ich oddzielnej analizy.

W przyszłości planujemy kontynuować projekt, powiększyć go o jeszcze więcej danych z OGLE oraz umieścić dokładną klasyfikację obiektów zmiennych.

Bibliografia

- Kołaczkowski, Zbigniew (2009). *FNPEAKS: Program do analizy widma amplitudowego dla szeregów czasowych*. <https://helas.astro.uni.wroc.pl/deliverables.php?active=fnpeaks>. Instytut Astronomiczny, Uniwersytet Wrocławski. (Visited on 02/07/2025).
- Paczynski, B. (Feb. 1986). “Gravitational Microlensing at Large Optical Depth”. In: 301, p. 503. DOI: [10.1086/163919](https://doi.org/10.1086/163919).
- Schwarzenberg-Czerny, A. (Nov. 1989). “On the advantage of using analysis of variance for period search.” In: 241, pp. 153–165. DOI: [10.1093/mnras/241.2.153](https://doi.org/10.1093/mnras/241.2.153).
- Soszyński, I. et al. (Sept. 2014). “Over 38000 RR Lyrae Stars in the OGLE Galactic Bulge Fields”. In: 64.3, pp. 177–196. DOI: [10.48550/arXiv.1410.1542](https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.1542). arXiv: [1410.1542](https://arxiv.org/abs/1410.1542) [astro-ph.SR].
- Udalski, A. (Dec. 2003). “The Optical Gravitational Lensing Experiment. Real Time Data Analysis Systems in the OGLE-III Survey”. In: 53, pp. 291–305. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/0401123](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0401123). arXiv: [astro-ph/0401123](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0401123) [astro-ph].
- Udalski, A., M. K. Szymański, and G. Szymański (Mar. 2015). “OGLE-IV: Fourth Phase of the Optical Gravitational Lensing Experiment”. In: 65.1, pp. 1–38. DOI: [10.48550/arXiv.1504.05966](https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.05966). arXiv: [1504.05966](https://arxiv.org/abs/1504.05966) [astro-ph.SR].
- Wyrzykowski, L. et al. (June 2006). “The Optical Gravitational Lensing Experiment. Variable Baseline Microlensing Events in the Galactic Bulge.” In: 56, pp. 145–169. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/0607134](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0607134). arXiv: [astro-ph/0607134](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0607134) [astro-ph].