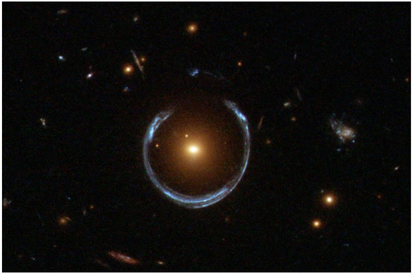
Być albo nie być czarną dziurą

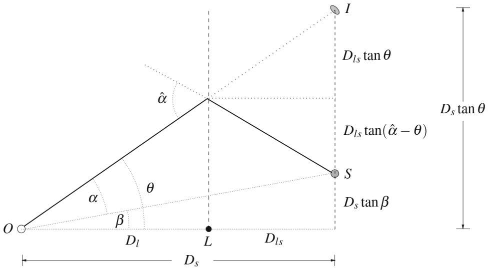
Franciszek Hansdorfer   Jacek Winiarczyk   Łukasz Parda
Tomasz Gruss
Opiekun projektu: dr hab. Radosław Poleski

14 czerwca 2024

- Ogólna teoria względności $\Longrightarrow$
- Masa zakrzywia czasoprzestrzeń $\Longrightarrow$
- Światło idące w pobliżu masy jest odchylane $\Longrightarrow$
- Obserwator widzi obiekty za zakrzywiającą masą w inny sposób $\Longrightarrow$
- Soczewkowanie grawitacyjne



ESA/Hubble, NASA



Principles of Gravitational Lensing, Arthur B. Congdon, Charles R. Keeton [1]

Równanie soczewki:

$$\beta = \theta - \alpha(\theta)$$

Dla punktowej masy mamy [4]:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2}\frac{D_s - D_l}{D_s D_l}}$$

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

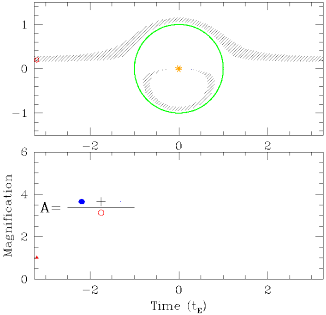
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2+2}{u\sqrt{u^2+4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

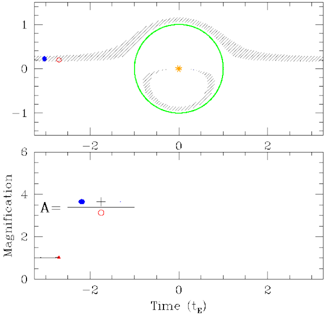
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2+2}{u\sqrt{u^2+4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

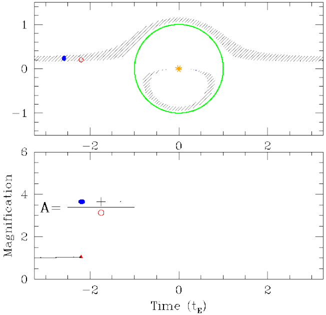
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

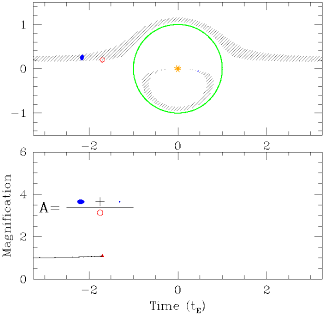
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2+2}{u\sqrt{u^2+4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

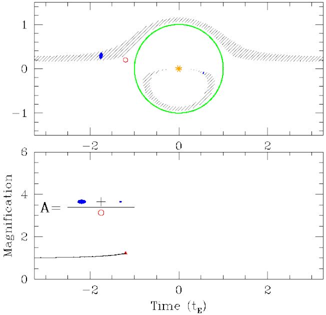
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2+2}{u\sqrt{u^2+4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

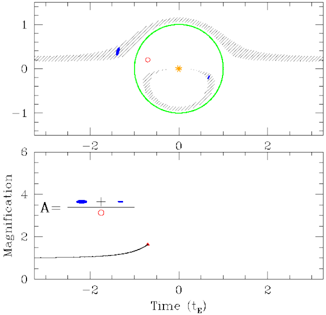
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

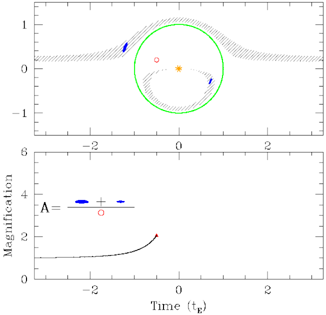
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

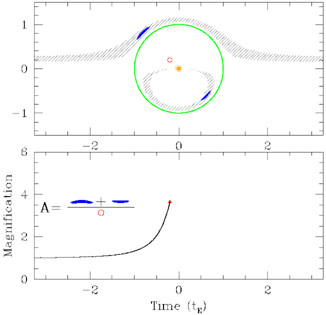
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

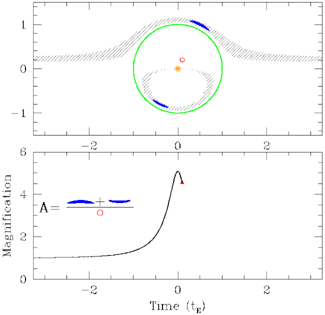
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

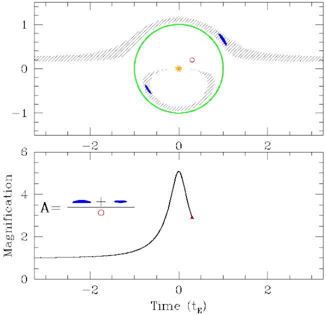
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

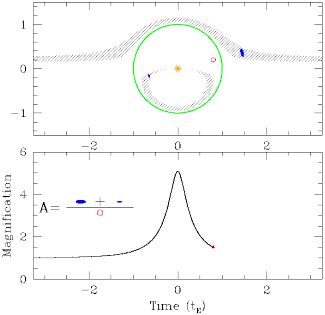
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

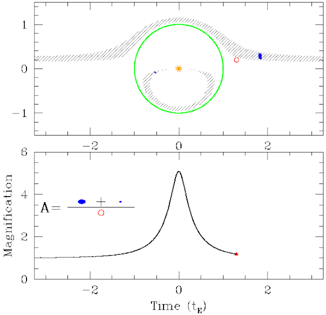
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_{\odot}$$

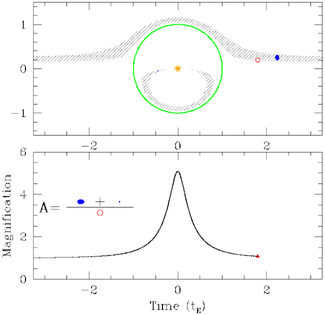
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_{\odot}$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

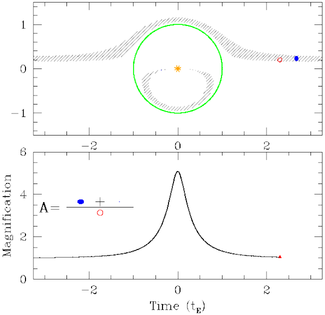
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

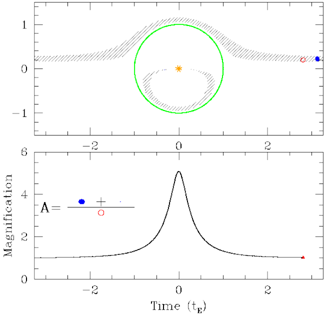
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

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



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

Mikrosoczewkowanie

$$M \sim M_\odot$$

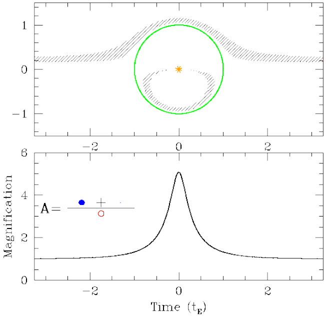
Na przykład dla $D_s = 8$ kpc, $D_l = 4$ kpc, $M = 1M_\odot$:

$$\theta_E = 0.32 \text{ mas}$$

Dla $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ wzmocnienie źródła określa wzór [4]:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

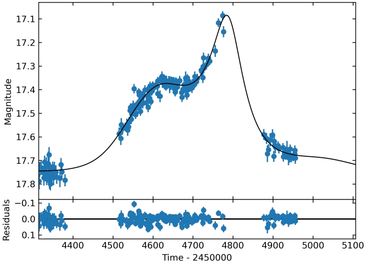
$$u(t) = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{t - t_0}{t_E}\right)^2}$$



Animation by B.S. Gaudi - microlensing-source.org

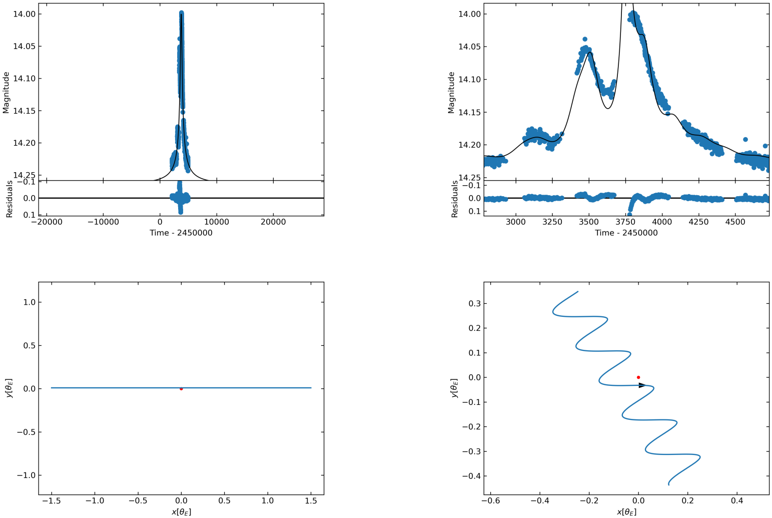
Paralaksa

Dla $t_{\mathsf{E}} > 30$ d ruchu Ziemi wokół Słońca przestaje być pomijalny. Wtedy wzór na $u(t)$ jest bardziej skomplikowany.



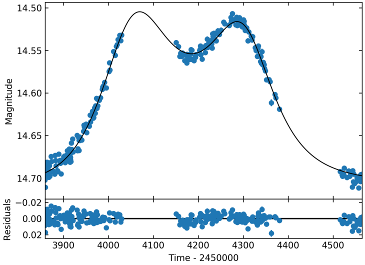
PAR-20, $u_0 < 0$

Paralaksa



Xallarap

Jeżeli źródło jest częścią układu podwójnego, to jego ruch orbitalny może mieć znaczący wpływ na parametr $u(t)$. To zjawisko nosi nazwę xallarap (parallax od tyłu) [6].



PAR-06.10

Mulens Model [3], to paczka służąca do modelowania zjawisk mikrosoczewkowania. Do dopasowania krzywej, używany jest algorytm MCMC (Próbkowanie Monte Carlo łańcuchami Markowa).

Opis projektu

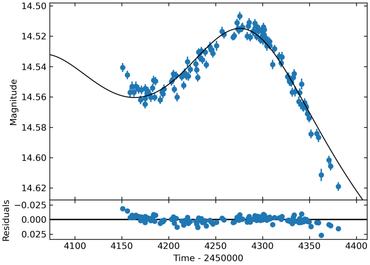
59 zjawisk wykazujących dominujący wpływ paralaksy(?), z przeglądu OGLE-III (Wyrzykowski et al. 2016 [5]).

A co jeśli źródło jest w układzie podwójnym?

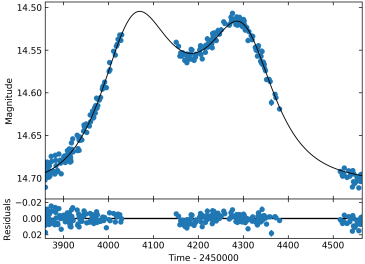
Porównanie modeli

Nazwa	$\Delta\chi^2$	$\chi^2_{Paraxall}$
PAR-05	52.8	2360.0
PAR-06	304.5	4567.6
PAR-14	37.3	7164.4
PAR-39	129.9	13677.8
PAR-57	59681.0	4335.8
PAR-58	34.8	1087.9
PAR-59	124.1	2175.5

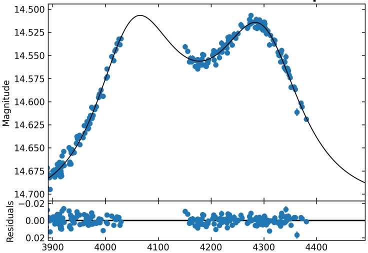
Parallax



Xallarap



Parallax + Xallarap



Wyniki

PAR-06

Parametr	wartość
$t_0[d]$	$2454179.345^{+7.17}_{-5.95}$
u_0	$-0.722^{+0.05}_{-0.05}$
$t_E[d]$	$203.621^{+8.04}_{-7.99}$
π_{EN}	$-0.014^{+0.02}_{-0.02}$
π_{EE}	$-0.035^{+0.01}_{-0.01}$
$\xi_{\text{period}}[d]$	$392.271^{+3.46}_{-3.58}$
$\xi_{\text{semimajor axis}}$	$0.154^{+0.01}_{-0.02}$

Kontynuacje badań

	(Wyrzykowski et at. 2016 [5])	My
Nazwa	$M[M_\odot]$	$M_{lens}[M_\odot]$
PAR-05	$3.3^{+2.7}_{-1.5}$	?
PAR-06	$1.0^{+1.3}_{-0.5}$	?
PAR-14	$0.2^{+0.3}_{-0.1}$	?
PAR-39	$2.2^{+1.5}_{-1.1}$	?
PAR-57	-	?
PAR-58	-	?
PAR-59	-	?

Kontynuacje badań

- Wyznaczenie masy soczewek, dla których nasz model jest lepszy od modelu z paralaksą.
- Ponowne wymodelowanie zjawisk, w celu zmniejszenia niepewności.
- Zbadanie wpływu innych efektów na model (np. soczewka potrójna).

Bibliografia

[1] Arthur B. Congdon and Charles R. Keeton. *Principles of Gravitational Lensing: Light Deflection as a Probe of Astrophysics and Cosmology*. Springer International Publishing, 2018. ISBN: 9783030021221. DOI: 10.1007/978-3-030-02122-1.

[2] P. Mróz and Ł. Wyrzykowski. "Measuring the Mass Function of Isolated Stellar Remnants with Gravitational Microlensing I. Revisiting the OGLE-III Dark Lens Candidates". In: Acta Astron. 71 (June 2021), pp. 89–102. DOI: 10.32023/0001-5237/71.2.1.

[3] R. Poleski and J. C. Yee. "Modeling microlensing events with MulensModel". In: *Astronomy and Computing* 26 (Jan. 2019), p. 35. DOI: 10.1016/j.ascom.2018.11.001.

[4] Peter Schneider, Jürgen Ehlers, and Emilio E. Falco. *Gravitational Lenses*. Springer Berlin Heidelberg, 1992. ISBN: 9783662037584. DOI: 10.1007/978-3-662-03758-4.

[5] Ł. Wyrzykowski et al. "Black hole, neutron star and white dwarf candidates from microlensing with OGLE-III". In: MNRAS 458 (May 2016), pp. 3012–3026. DOI: 10.1093/mnras/stw426.

[6] Ruocheng Zhai et al. "OGLE-2017-BLG-0448Lb: A Low Mass–Ratio Wide-orbit Microlensing Planet?" In: AJ 167 (Apr. 2024), p. 162. DOI: 10.3847/1538-3881/ad284f.