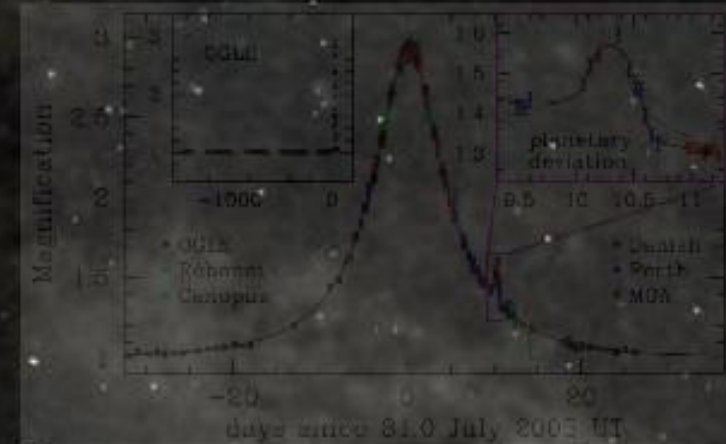


# Mikrosoczewkowanie grawitacyjne



Dr Tomasz Mrozek  
Instytut Astronomiczny  
Uniwersytet Wrocławski

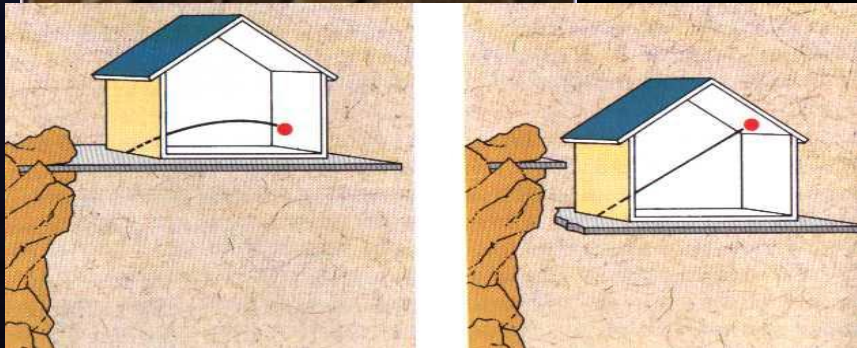
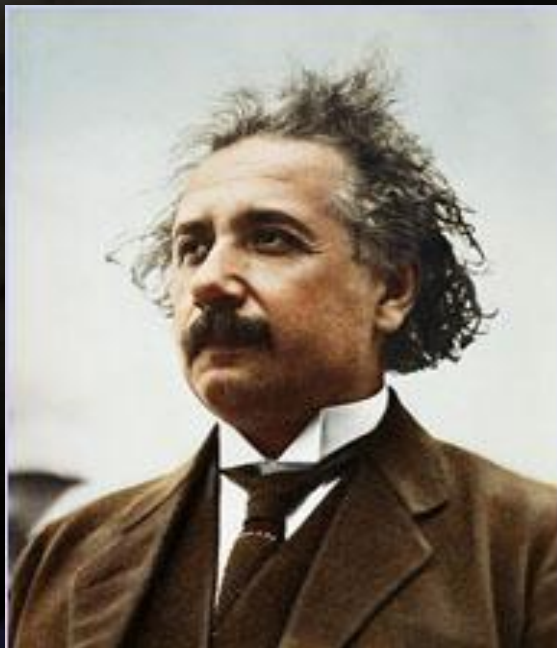
# Ogólna teoria względności

**OTW została ogłoszona w 1915.**

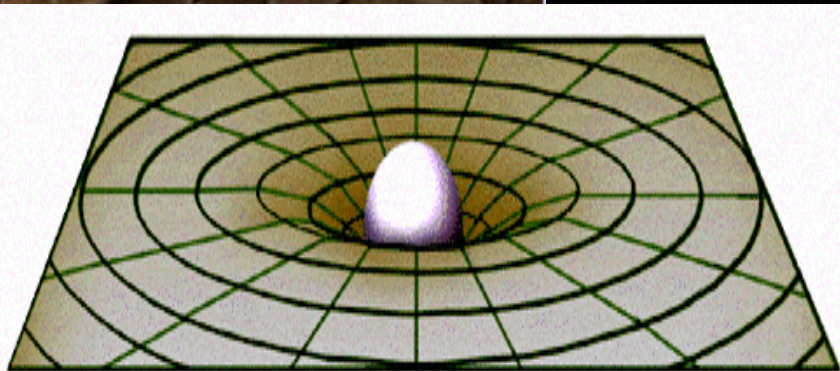
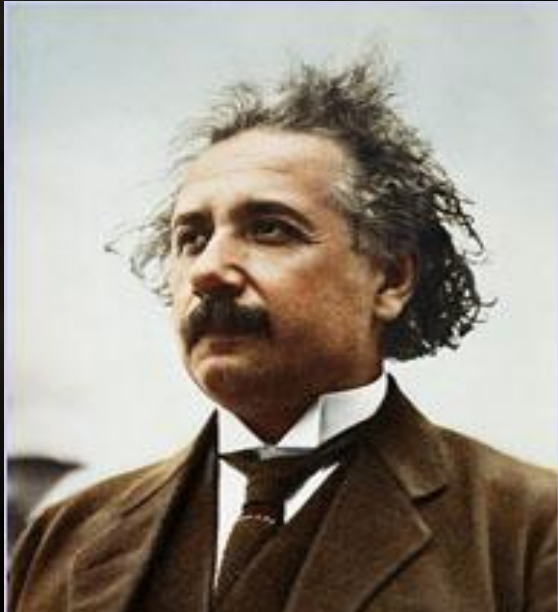
**Podstawowa idea względności:**

**nie możemy mówić o takich wielkościach jak prędkość i przyspieszenie bez zdefiniowania układu odniesienia**

**podstawowe założenie:  
sformułować prawa fizyczne i opis ruchu tak aby miały identyczną postać matematyczną bez względu na używany do opisu układ odniesienia**



# Ogólna teoria względności



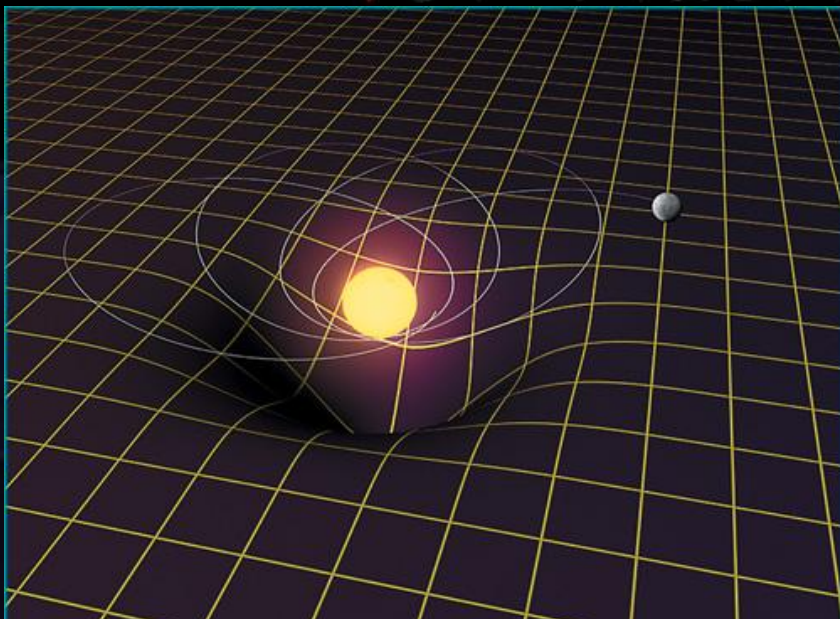
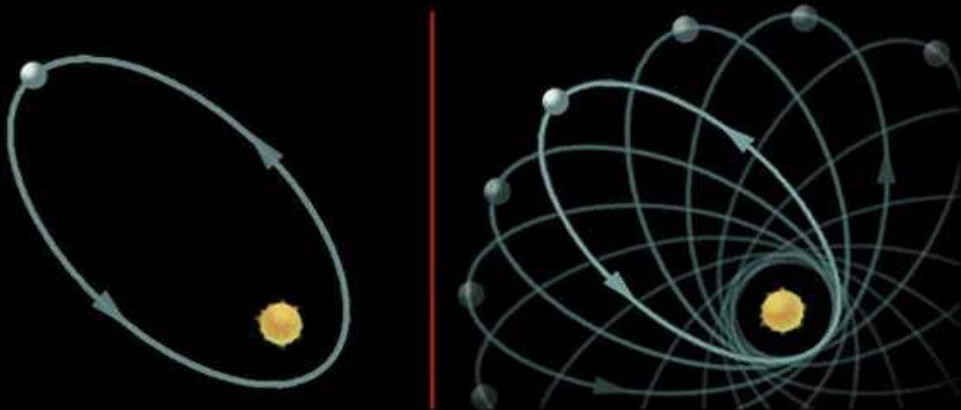
**Podstawowy wniosek:**

**siła grawitacji wynika z lokalnej geometrii czasoprzestrzeni (każda masa jest źródłem zakrzywienia otaczającej ją czasoprzestrzeni)**



# OTW - wnioski

## MERCURY'S ORBIT

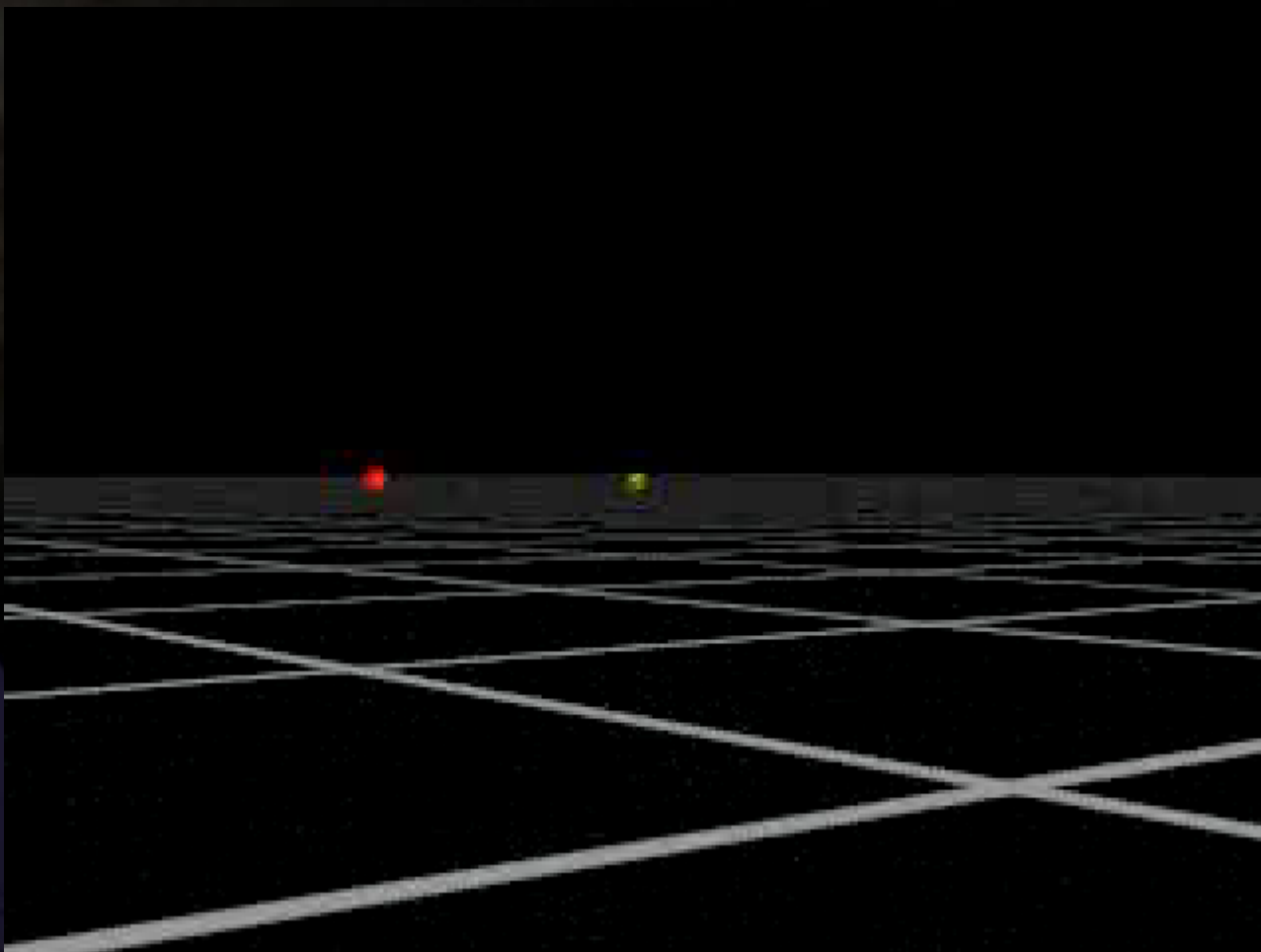


**Ruch peryhelium ciała  
obiegającego dużą masę**

**Wynik potwierdzony przez  
obserwacje Merkurego i  
pulsarów w układach  
podwójnych**

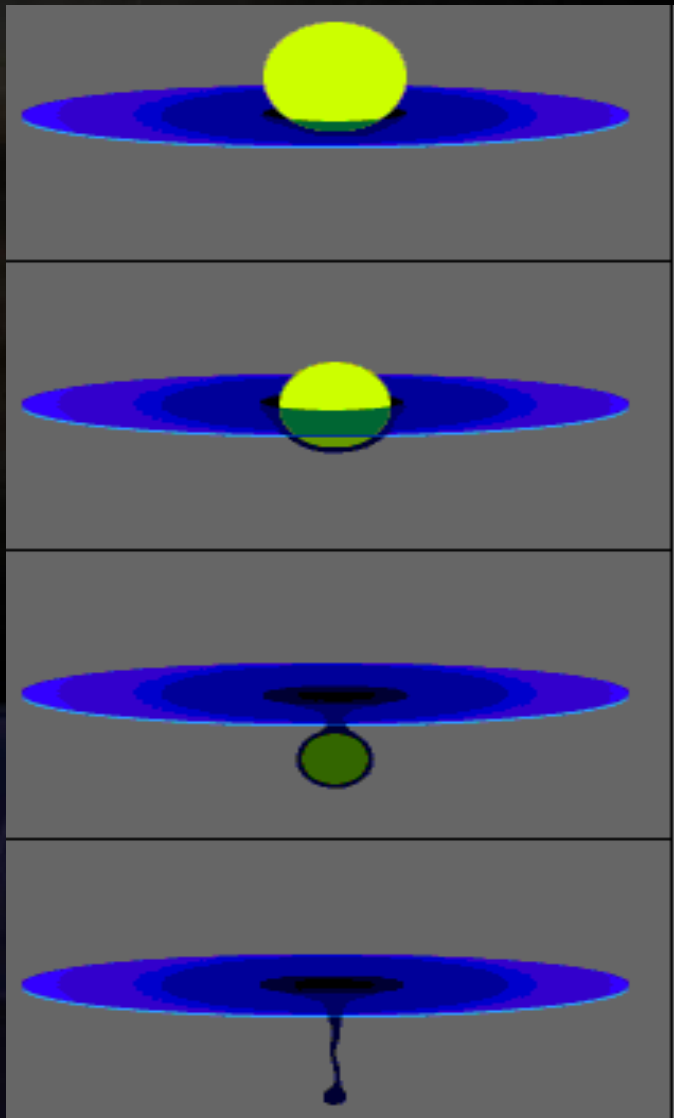


# OTW - wnioski





# OTW - wnioski



**Istnienie czarnych dziur**

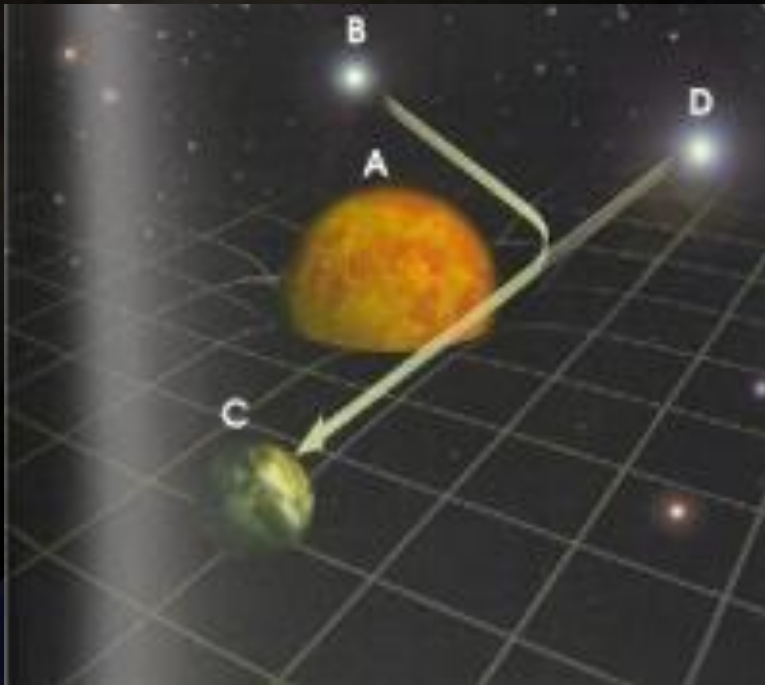
**Czarne dziury pojawiają się tam  
gdzie kończy się OTW (osobliwość)**

**W latach 90-tych potwierdzone  
bez wątpliwości w centrach  
galaktyk**





# OTW - wnioski



-spowolnienie zegarów w poruszających się układach

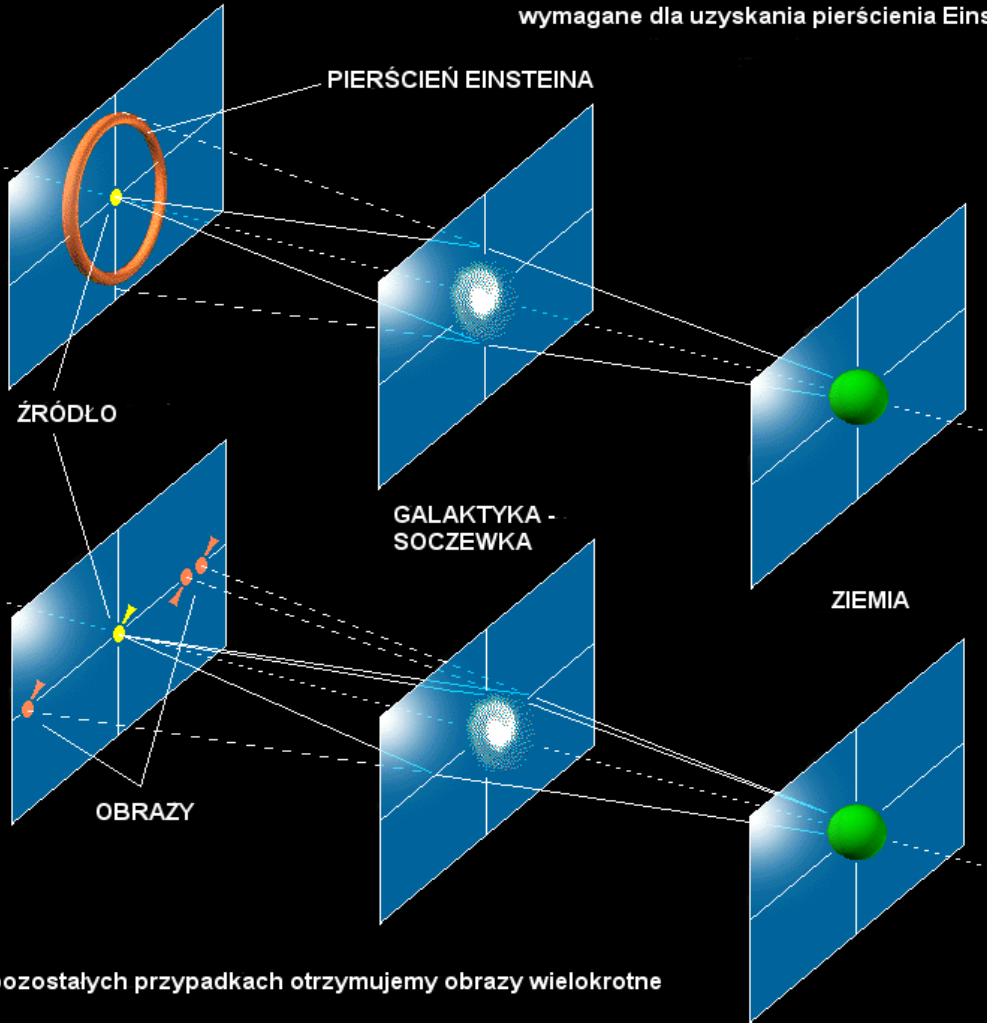
-istnienie fal grawitacyjnych (niepotwierdzone bezpośrednio)

-zakrzywienie promieni świetlnych przy przechodzeniu w pobliżu dużej masy (pierwszy wniosek OTW, który został potwierdzony przez obserwacje)



# Soczewkowanie grawitacyjne

Położenie źródło - soczewka - obserwator  
wymagane dla uzyskania pierścienia Einsteina



W pozostałych przypadkach otrzymujemy obrazy wielokrotne

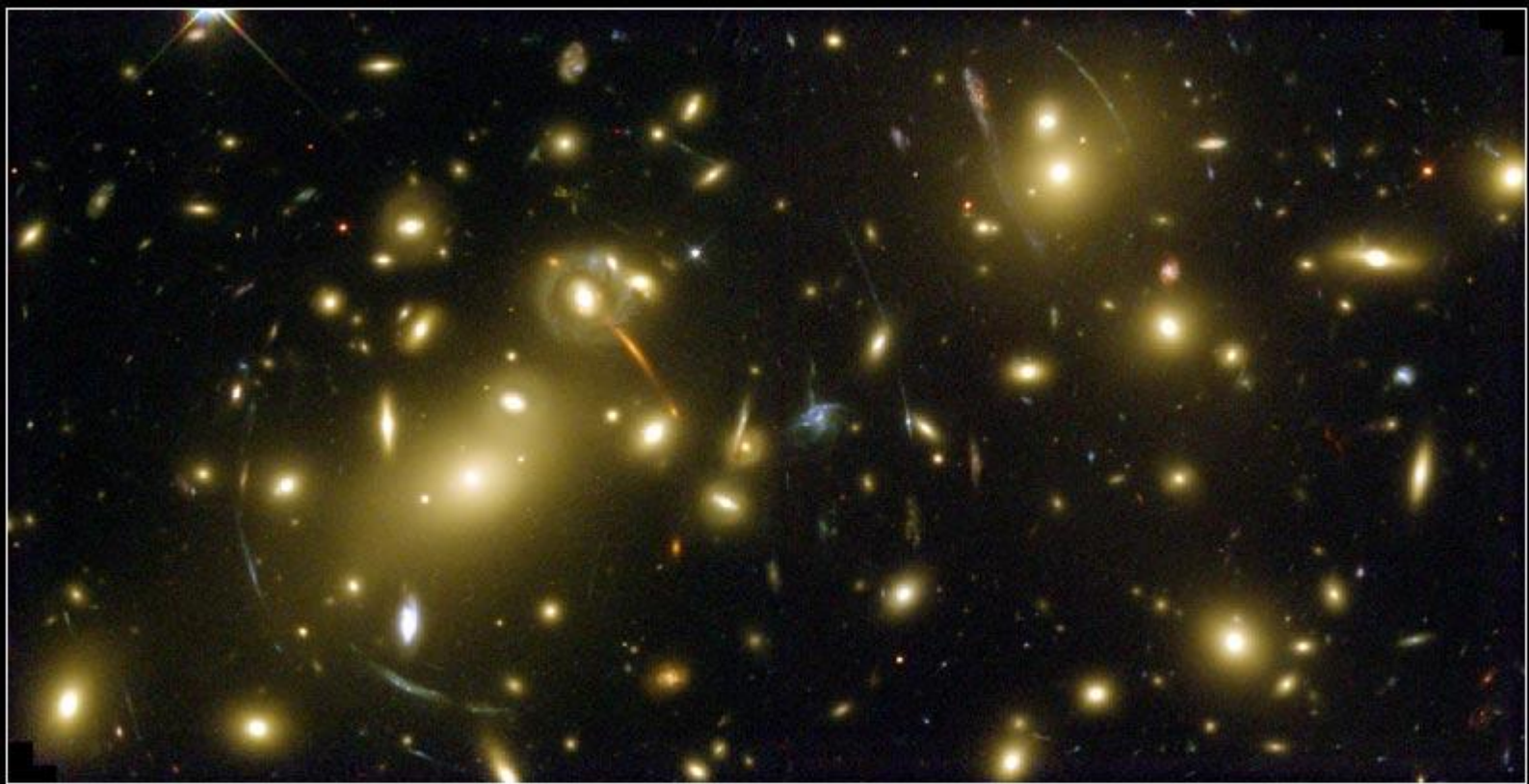
**masa powoduje takie ugięcie przestrzeni, że promienie od źródła punktowego poruszają się tak jak w soczewce**

**Jeśli soczewka i źródło znajdują się w jednej linii to widzimy promień Einsteina. W przeciwnym przypadku obserwujemy obrazy wielokrotne**





# Soczewkowanie grawitacyjne



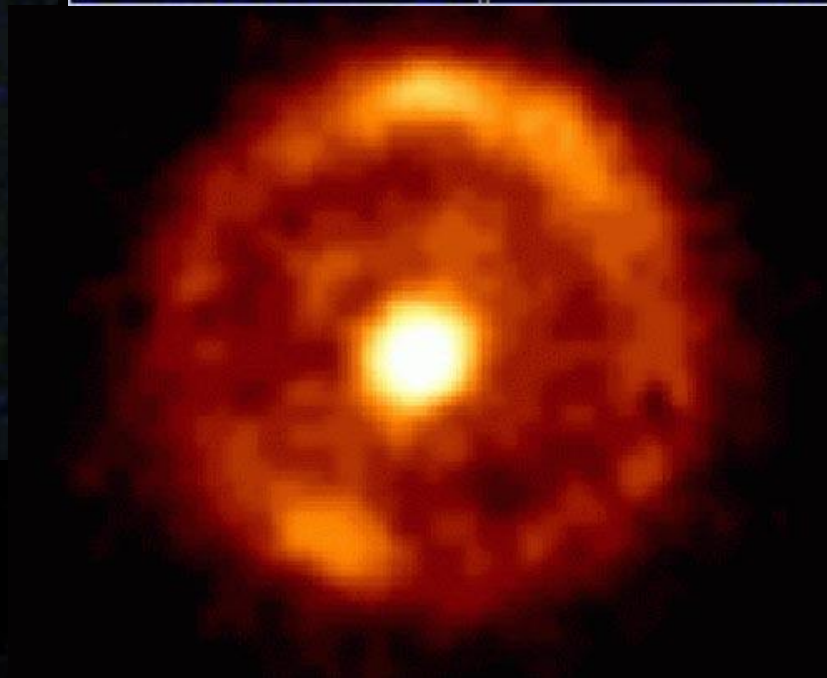
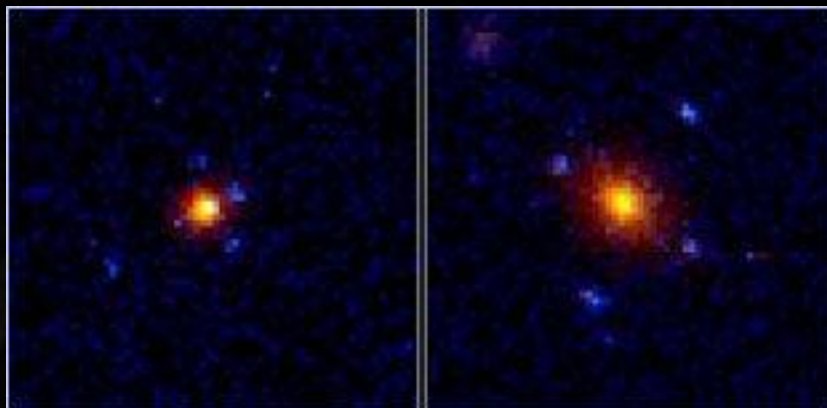
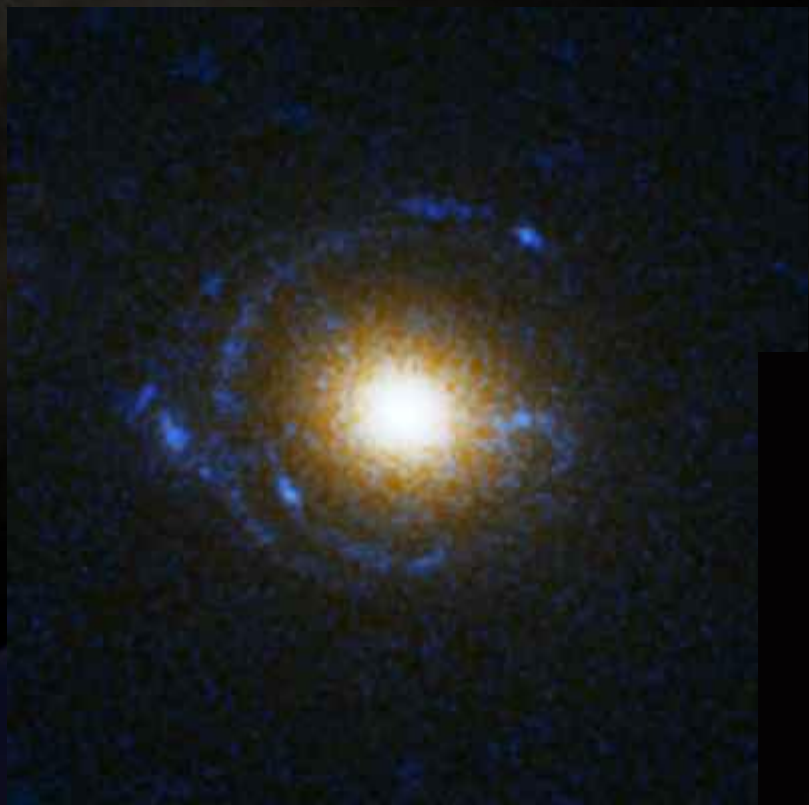
**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08



# Soczewkowanie grawitacyjne





# prof. Bohdan Paczyński



**ur. 8 lutego 1940 w Wilnie  
zm. 19 kwietnia 2007 w Princeton**

**1959-1962 – na Uniwersytecie  
Warszawskim**

**1964 – doktorat z astronomii**

**1962-1982 – pracował w Instytucie  
Astronomii (od 1975 CAMK)**

**1974 – habilitacja**

**1979 – profesor**

**1982-1989 – profesor na wydziale  
astrofizyki w Uniwersytecie Princeton**

**1989-2007 – prowadził katedrę  
im. Lymana Spitzera Jr. w Princeton**



# prof. Bohdan Paczyński



## Główne kierunki badań:

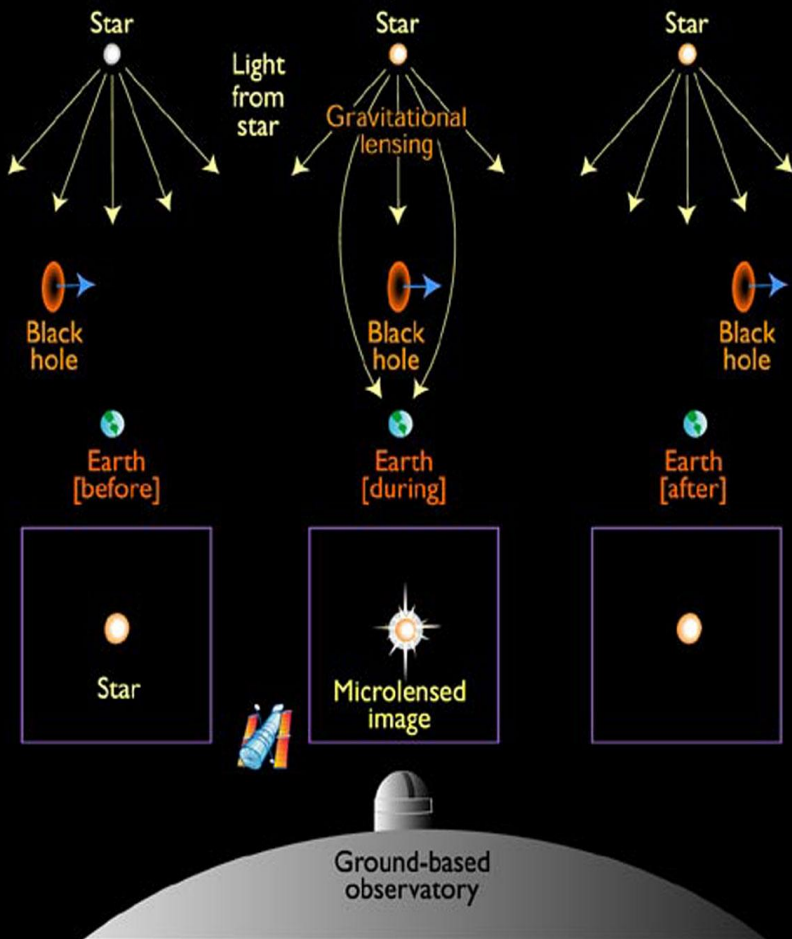
- ewolucja układów podwójnych
- błyski gamma
- teoria dysków akrecyjnych
- mikrosoczewkowanie grawitacyjne

autor około 300 prac (w tym 150 jako samodzielny autor)



# Mikrosoczewkowanie grawitacyjne

## Gravitational Microlensing by Black Hole

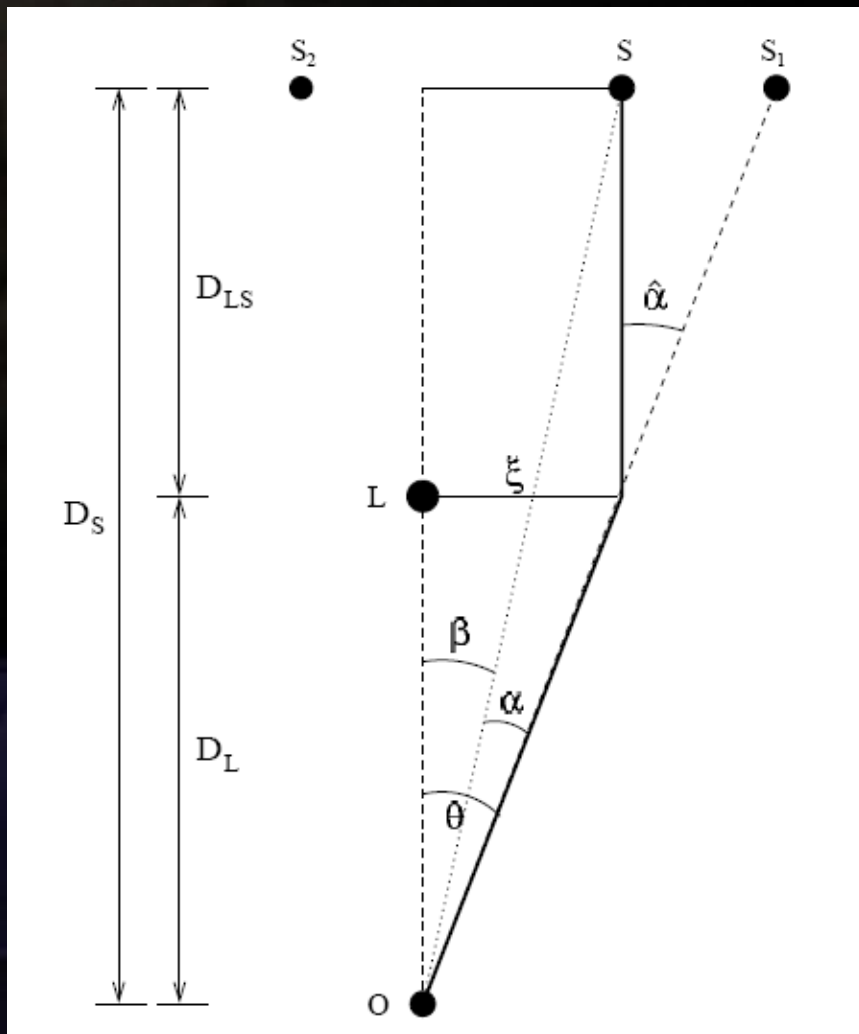


Paczyński, B., *Gravitational Microlensing at Large Optical Depth*, 1986, *Ap. J.*, 301, 503

- model zjawiska mikrosoczewkowania
- charakterystyczny kształt pojaśnienia
- oszacowanie prawdopodobieństwa zajścia zjawiska – problem ciemnej materii



# Geometria zjawiska



**O – obserwator**

**L – soczewka**

**S – źródło**

**$S_1, S_2$  – obrazy**

**$\xi$  – parametr zderzenia**

**$\hat{\alpha}$  – kąt załamania promienia**

**Odległości:**

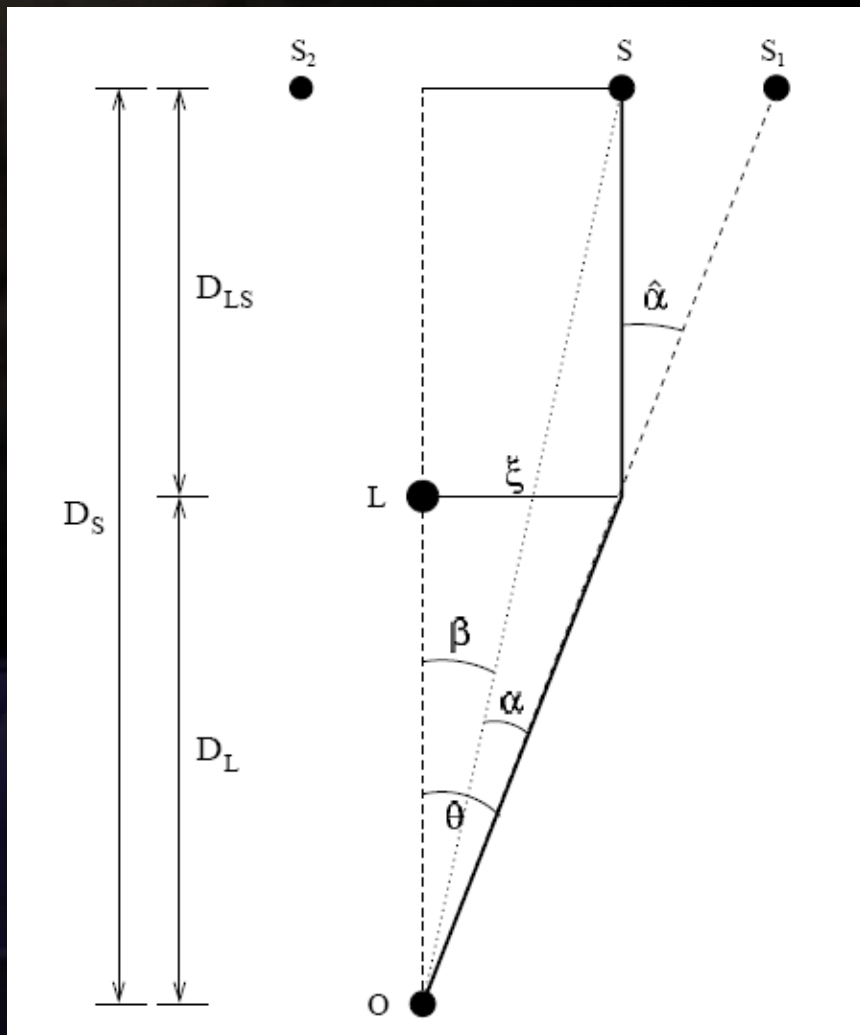
**$D_S$  – źródło-obszawator**

**$D_{LS}$  – soczewka-źródło**

**$D_L$  – soczewka-obszawator**



# Geometria zjawiska



Kąt załamania promienia światelnego pod wpływem punktowej masy  $M_L$ :

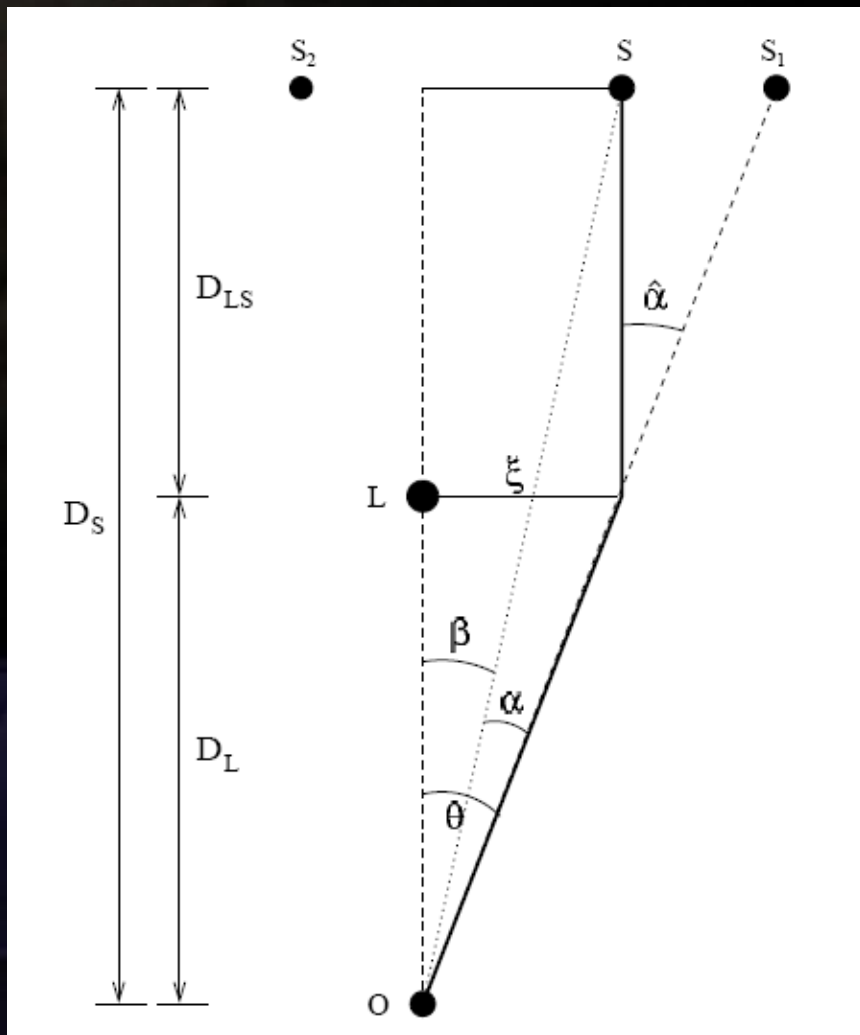
$$\hat{\alpha}(\xi) = \frac{4GM_L}{c^2\xi}$$

Dla małych kątów ( $\text{tg}\alpha \approx \alpha$ ) otrzymujemy:

$$\theta D_S = \beta D_S + \hat{\alpha} D_{LS}$$



# Geometria zjawiska



Wprowadzając zredukowany kąt załamania ( $\alpha$ ) :

$$\alpha = \frac{D_{LS}}{D_S} \hat{\alpha}$$

otrzymujemy równanie soczewki:

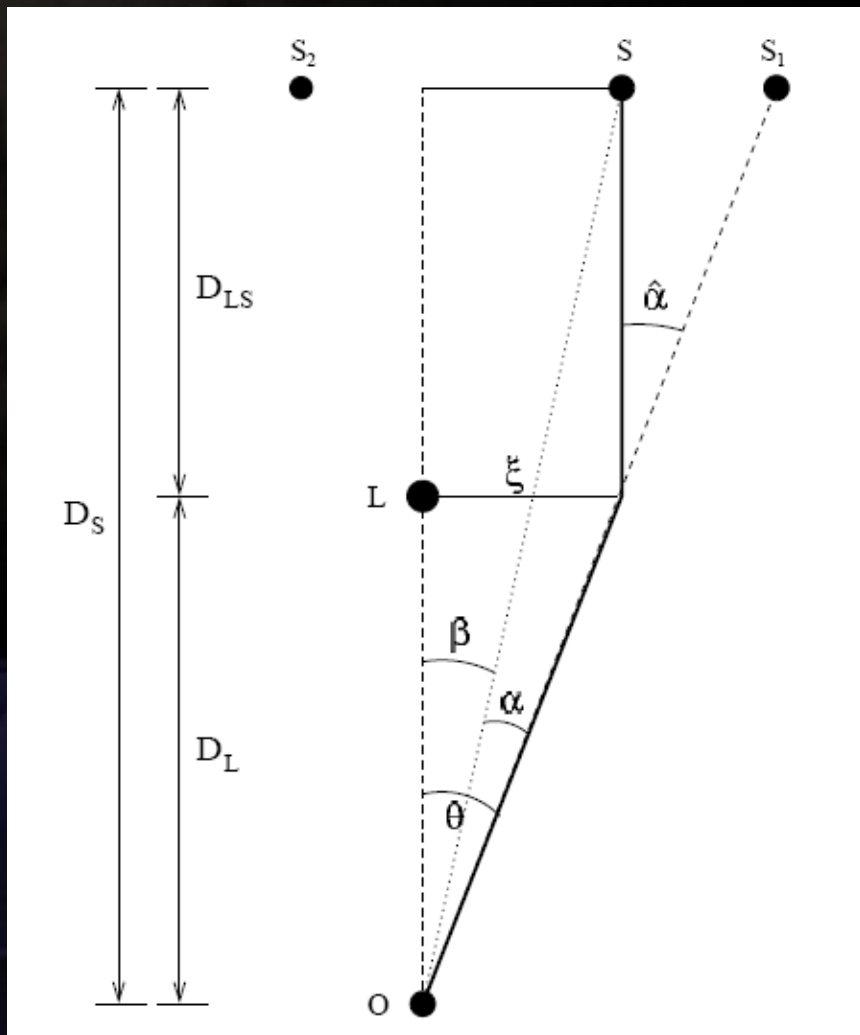
$$\beta = \theta - \alpha(\theta)$$

pozwalające uzyskać położenia obrazów źródła





# Geometria zjawiska



**Promień kątowy promienia Einsteina:**

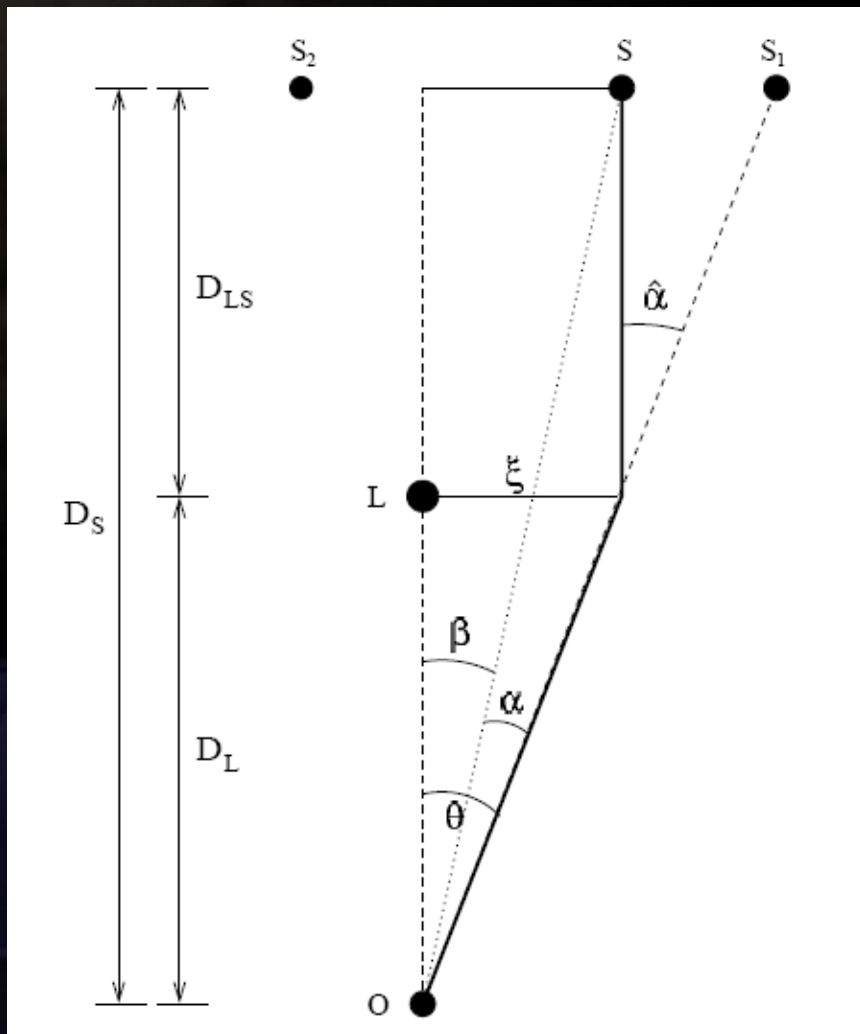
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$$

**Wstawiając do wyrażenia na kąt zredukowany:**

$$\alpha = \frac{\theta_E^2}{\theta}$$



# Geometria zjawiska



Wtedy równanie soczewki:

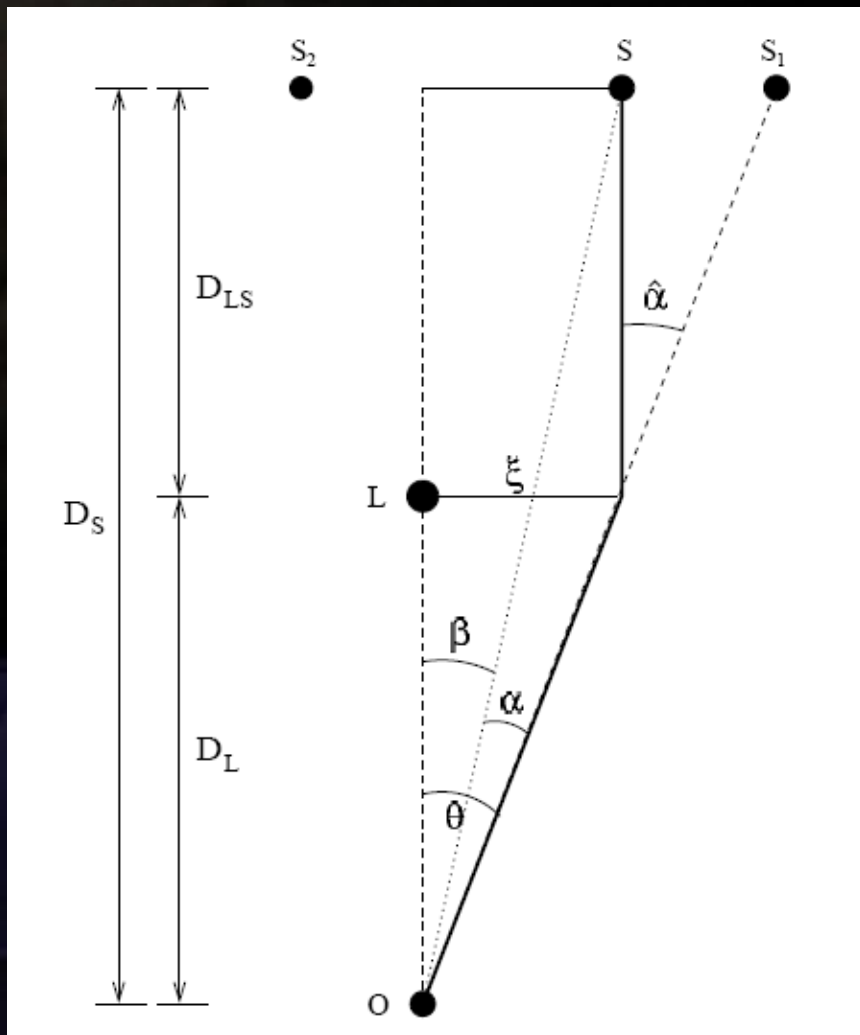
$$\beta = \theta - \frac{\theta_E^2}{\theta}$$

Ma dwa rozwiązania:

$$\theta_{\pm} = \frac{1}{2} \left( \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2} \right)$$



# Geometria zjawiska



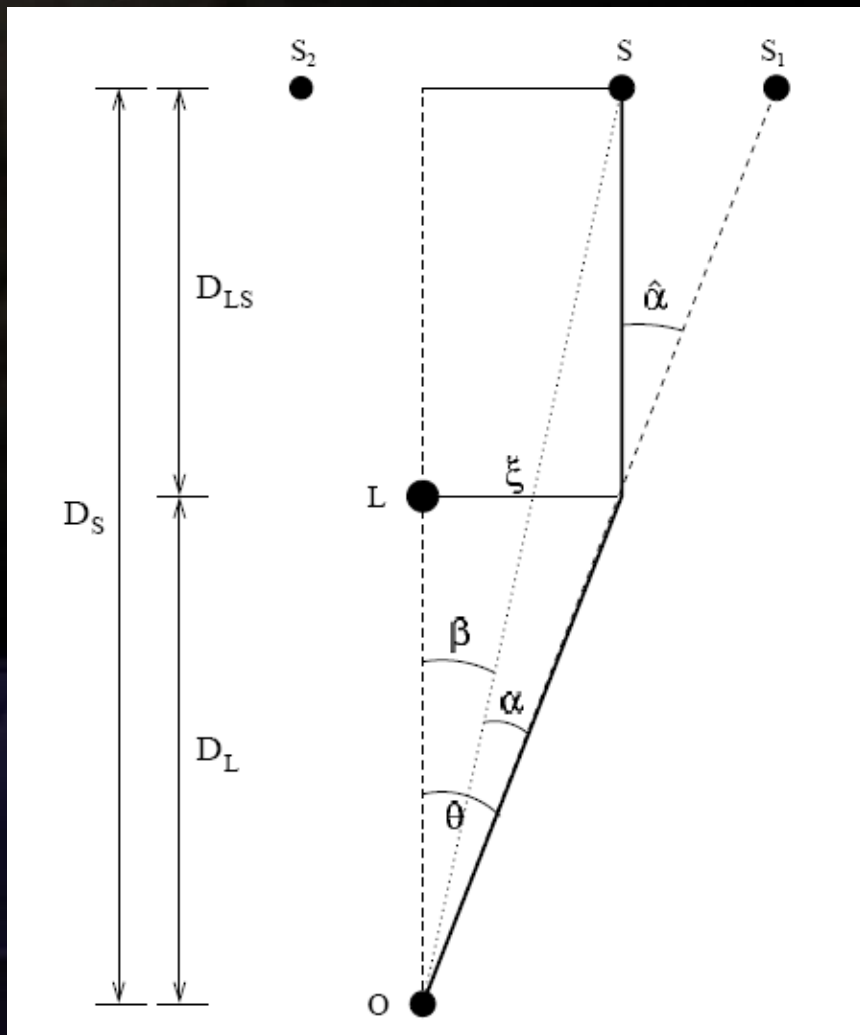
Wzmocnienie jest stosunkiem rozmiarów kątowych obrazu i źródła:

$$A = \frac{\theta \, d\theta}{\beta \, d\beta}$$

Współczesne teleskopy nie pozwalają obserwować dwóch rozdzielonych obrazów. Widoczne jest jedynie sumaryczne wzmocnienie:



# Geometria zjawiska



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

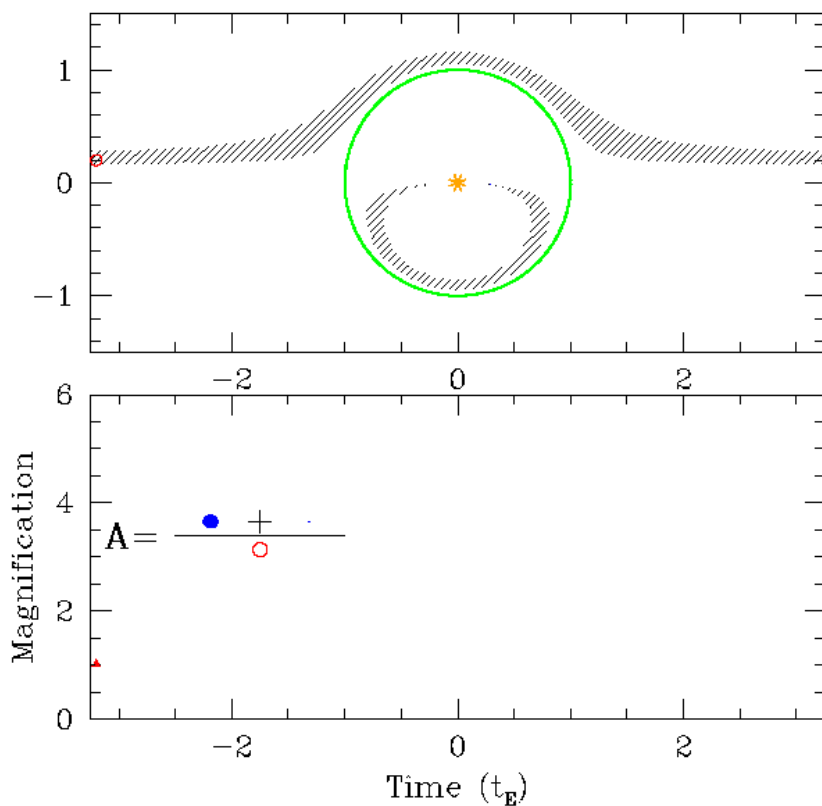
gdzie:

$$u = \frac{\beta}{\theta_E}$$

jest odległością kątową między źródłem a soczewką w jednostkach kąтового promienia Einsteina



# Wzmocnienie jasności

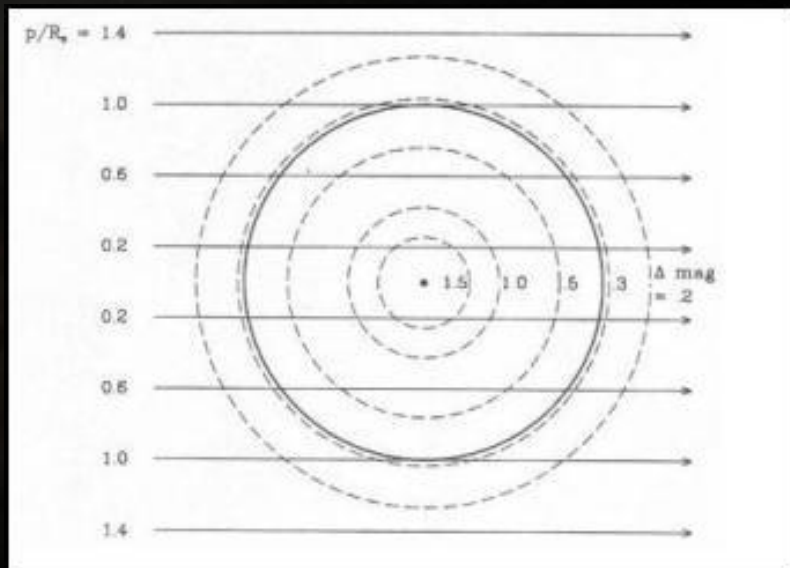


**Gdybyśmy mieli doskonały teleskop...**

**Nie mamy. Wszystko co możemy obserwować to wzrost jasności związany z tym, że mikrosoczewkowanie zachowuje jasność powierzchniową ale powiela obraz gwiazdy**



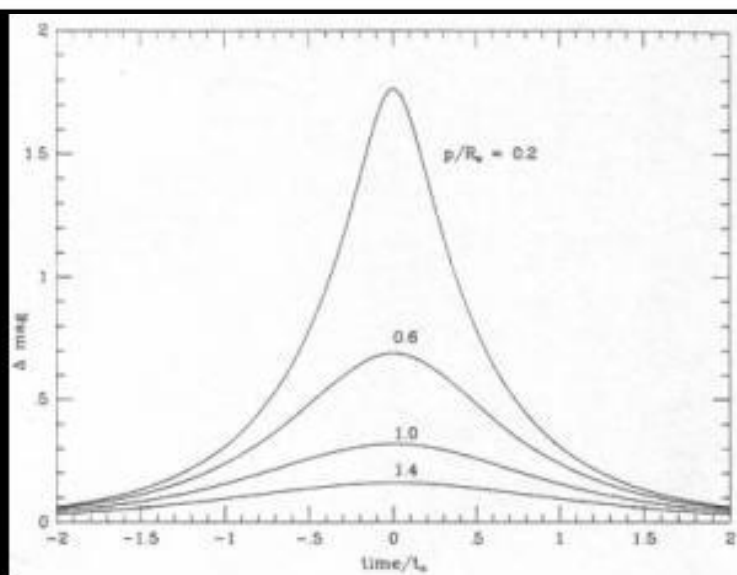
# Wzmocnienie jasności



Wzmocnienie jest funkcją odległości kątowej między soczewką a źródłem:

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

$$u = \frac{\beta}{\theta_E}$$



krzywa Paczyńskiego



# Pierwsze obserwacje



**Od początku lat 90-tych rozpoczęły działanie trzy projekty:**

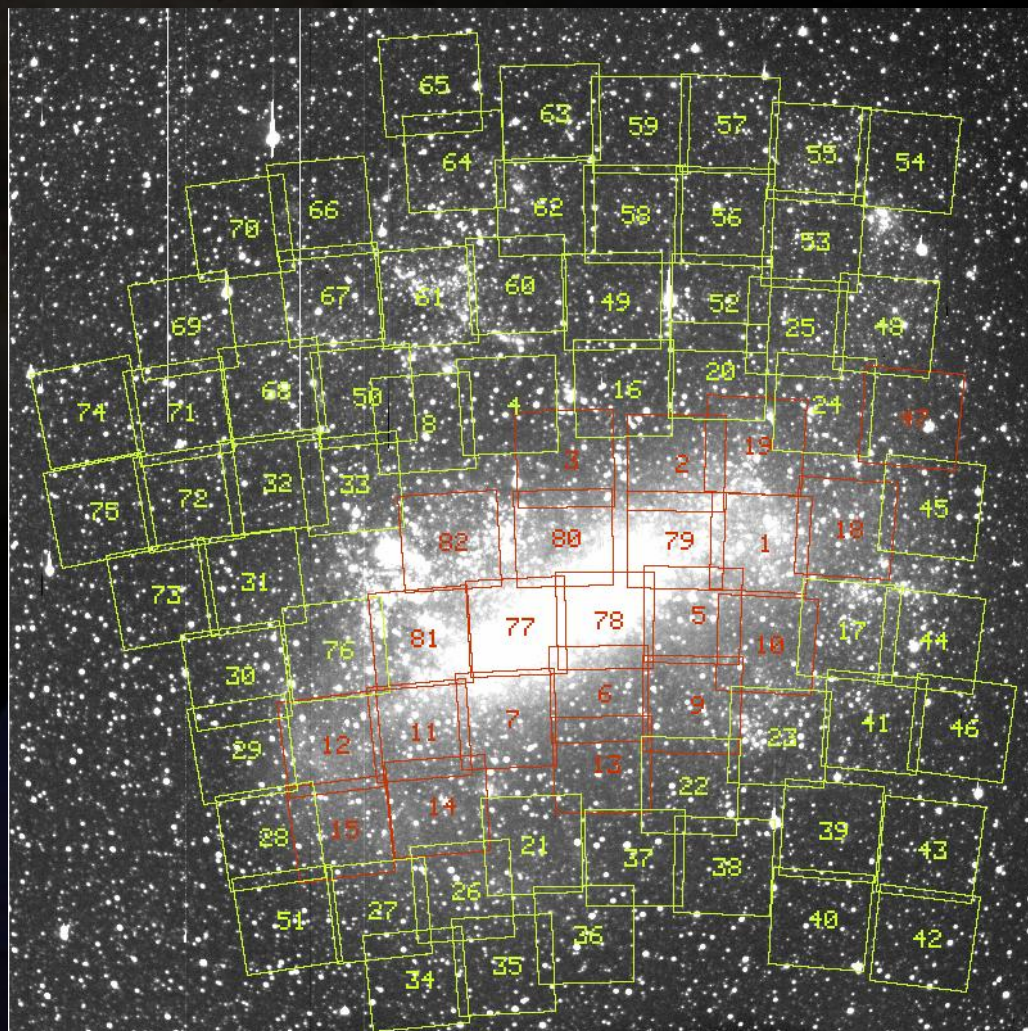
**EROS (fr. *Experience de Recherche d'Objects Sombres*)**

**MACHO (ang. *Massive Compact Halo Objects*)**

**OGLE (ang. *The Optical and Gravitational Lensing Experiment*)**



# Pierwsze obserwacje



**Obserwacje prowadzone w kilkudziesięciu polach obejmujących obszary bardzo bogate w gwiazdy**

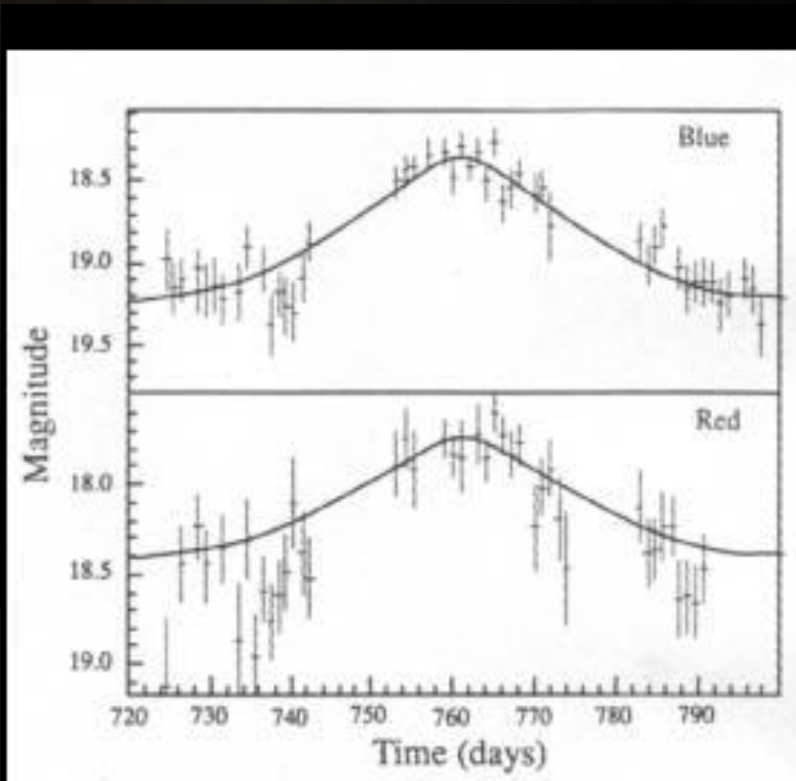
**Jednocześnie monitoruje się do 200 000 000 gwiazd**

**Obłoki Magellana, Centrum Galaktyki – pozwalają odkrywać soczewki należące do naszej Galaktyki**



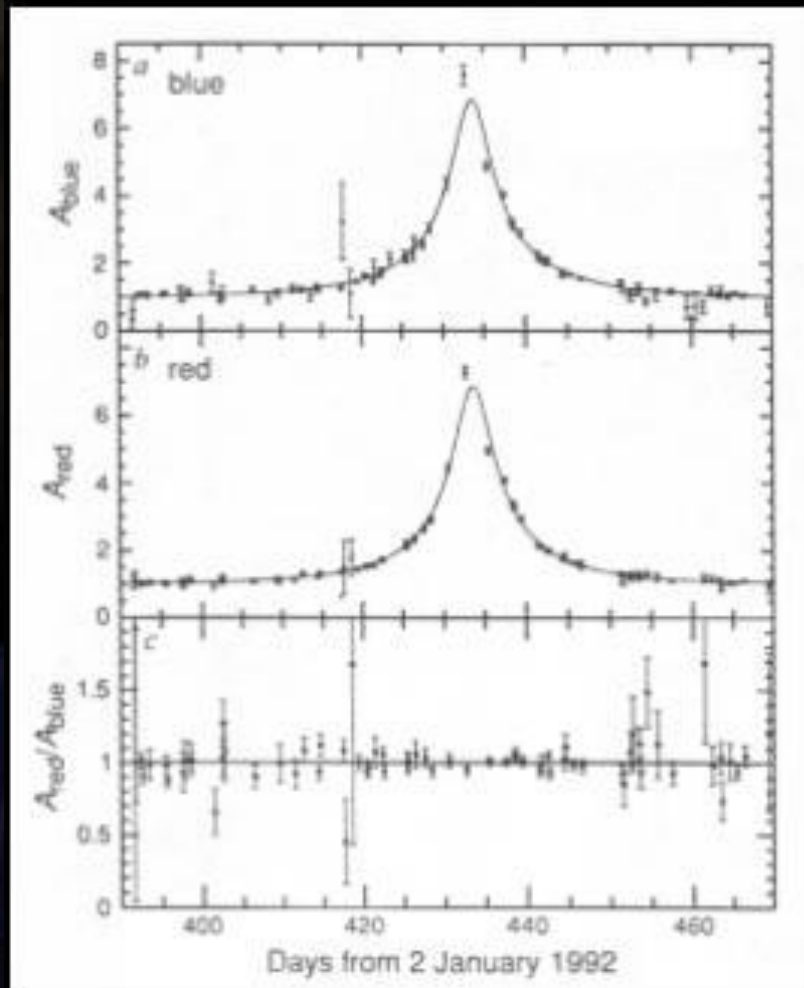


# Pierwsze obserwacje



|   |                |
|---|----------------|
| Jasność przed i po<br>zjawisku [mag]                              | $19.3 \pm 0.2$ |
| Data maksymalnego<br>wzmocnienia                                  | 1 II 1992      |
| Czas trwania<br>zjawiska [dni]                                    | $27 \pm 2$     |
| Maksymalne<br>wzmocnienie $\Delta\text{mag}$<br>(filtr niebieski) | $1.0 \pm 0.1$  |
| Maksymalne<br>wzmocnienie $\Delta\text{mag}$<br>(filtr czerwony)  | $1.0 \pm 0.1$  |

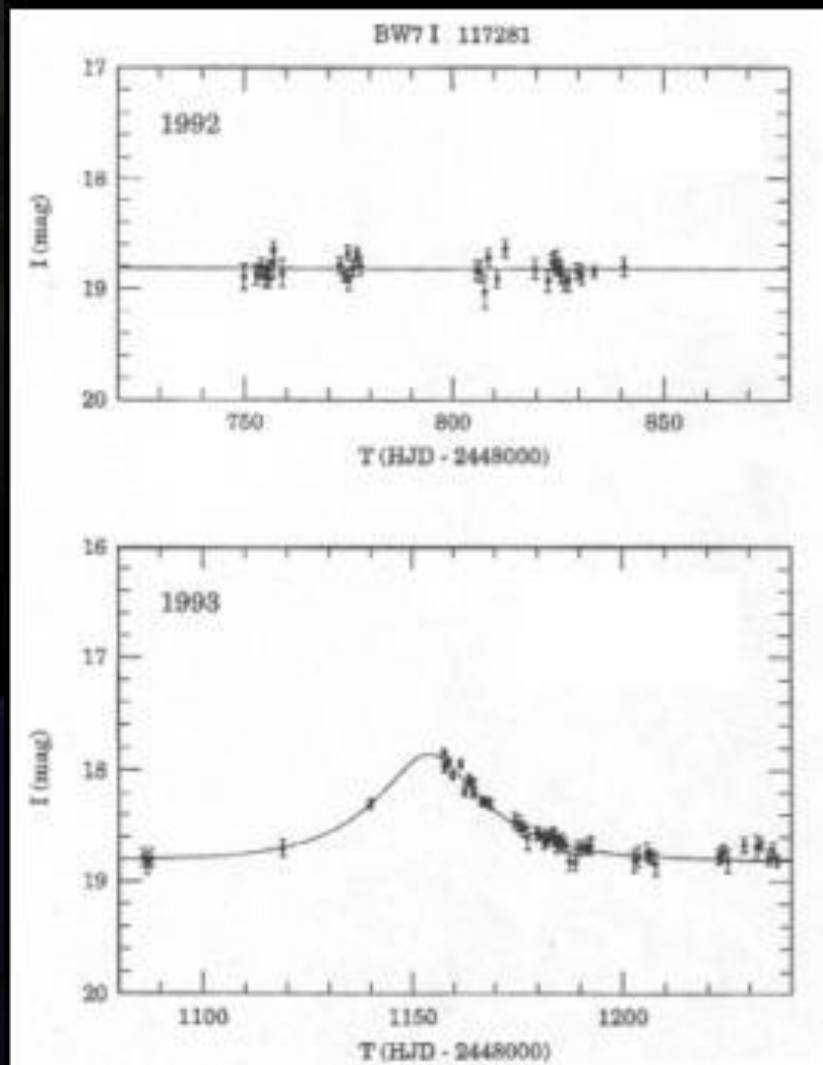
# Pierwsze obserwacje



Jasność przed i                    19.6  
po zjawisku  
[mag]  
Czas trwania                     $33.9 \pm 0.26$   
zjawiska [dni]  
Wzmocnienie A                 $6.86 \pm 0.11$   
( $\Delta mag =$   
 $2.5 \log A$ )



# Pierwsze obserwacje



|  |                |
|--|----------------|
| Jasność przed i po zjawisku[mag]                 | 18.82          |
| Data maksymalnego wzmocnienia                    | 15 VI 1993     |
| Czas trwania zjawiska [dni]                      | $23.8 \pm 0.9$ |
| Wzmocnienie A ( $\Delta\text{mag} = 2.5\log A$ ) | $2.4 \pm 0.1$  |



# Po 15-tu latach

---

**Za mało wyjaśnień aby tłumaczyły istnienie ciemnej materii**

**Odkrycie ogromnej liczby nowych gwiazd zmiennych**

**Odkrycie kilku tranzytów dużych planet**

**Jest to jedyna istniejąca obecnie metoda, która pozwala na odkrywanie planet o masach porównywalnych z masą Ziemi**



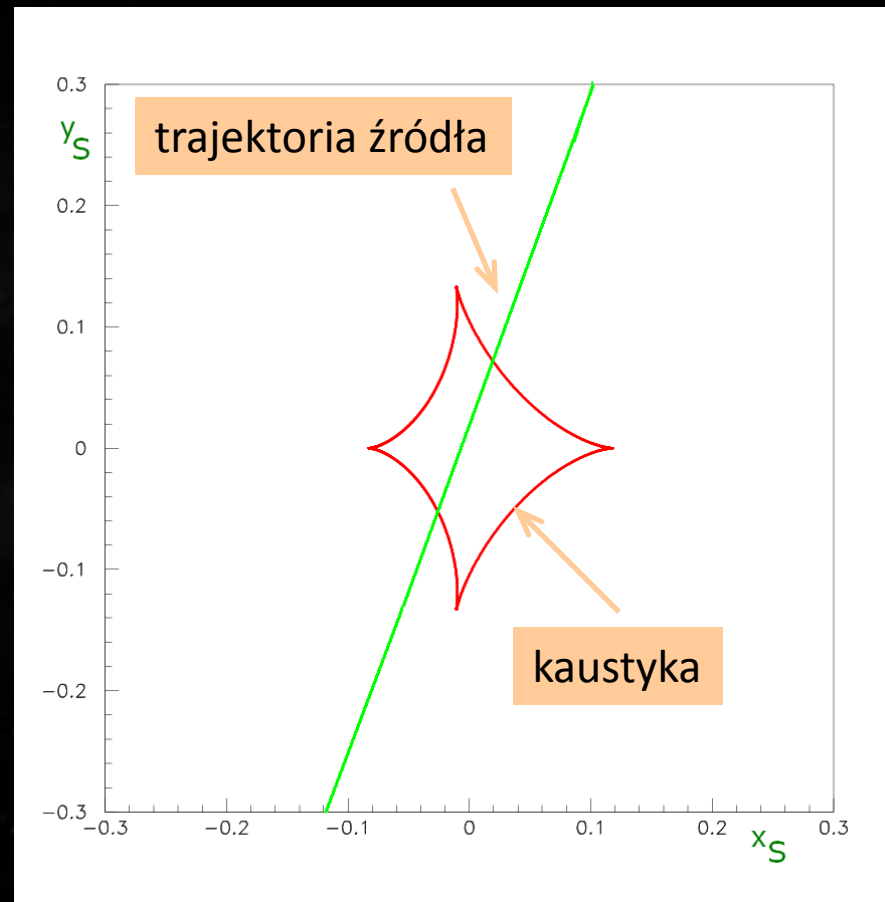
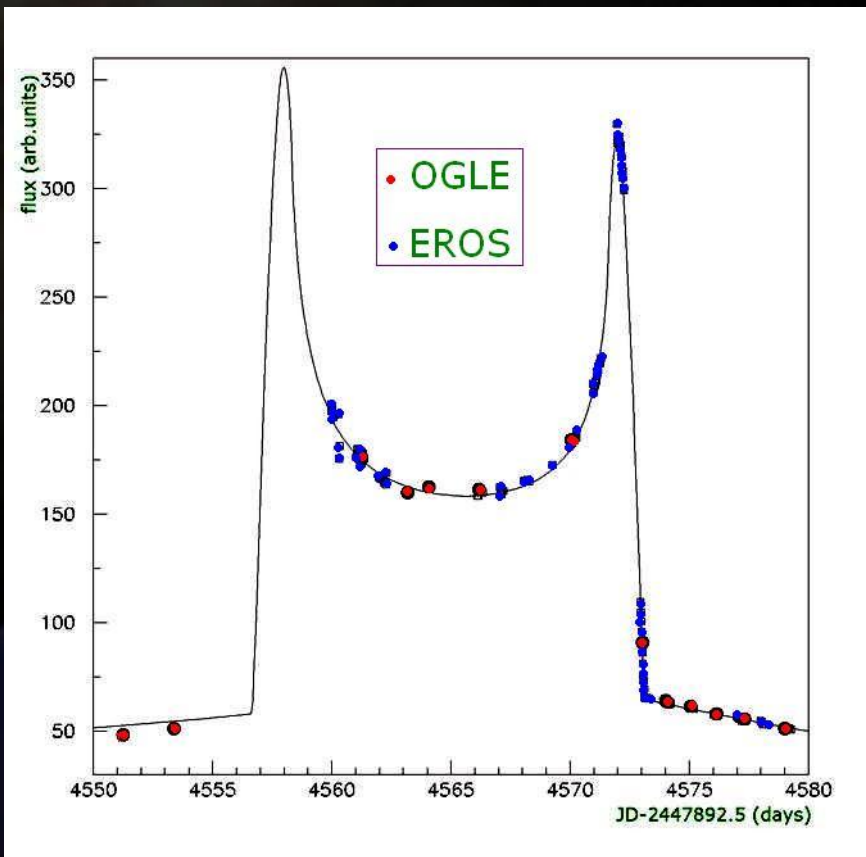
# Krzywe kaustyczne



**Kaustyka - hiperpowierzchnia będąca obwiednią wiązki promieni świetlnych rozchodzących się z ustalonego, punktowego źródła światła, odbitych od innej hiperpowierzchni (kaustyka refleksyjna) lub załamanych przez pewien układ optyczny (diakaustyka)**

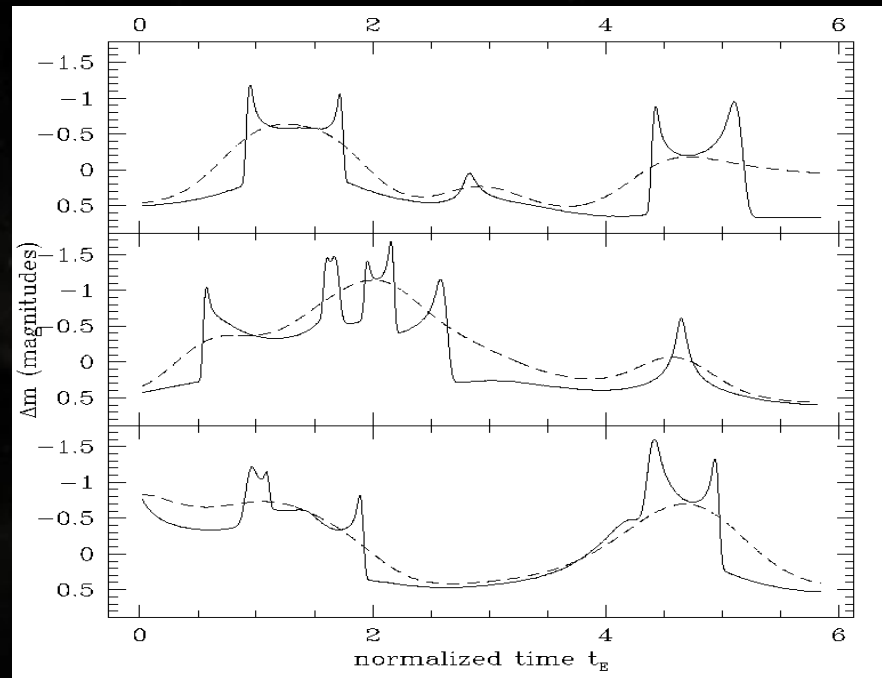
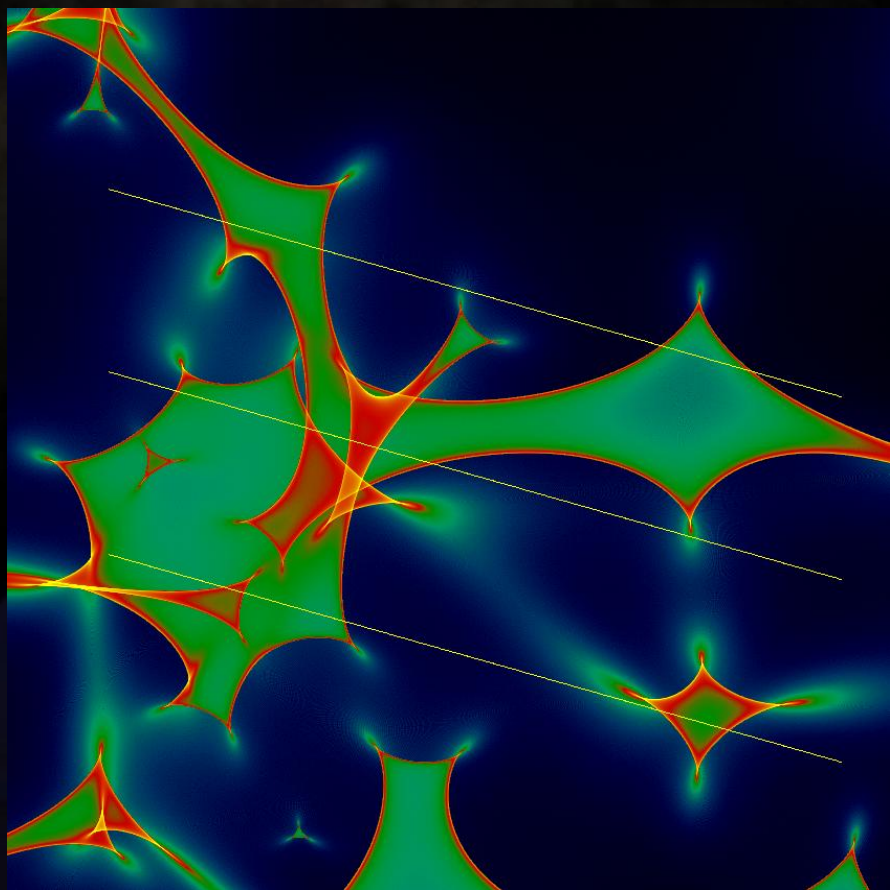


# Soczewki podwójne



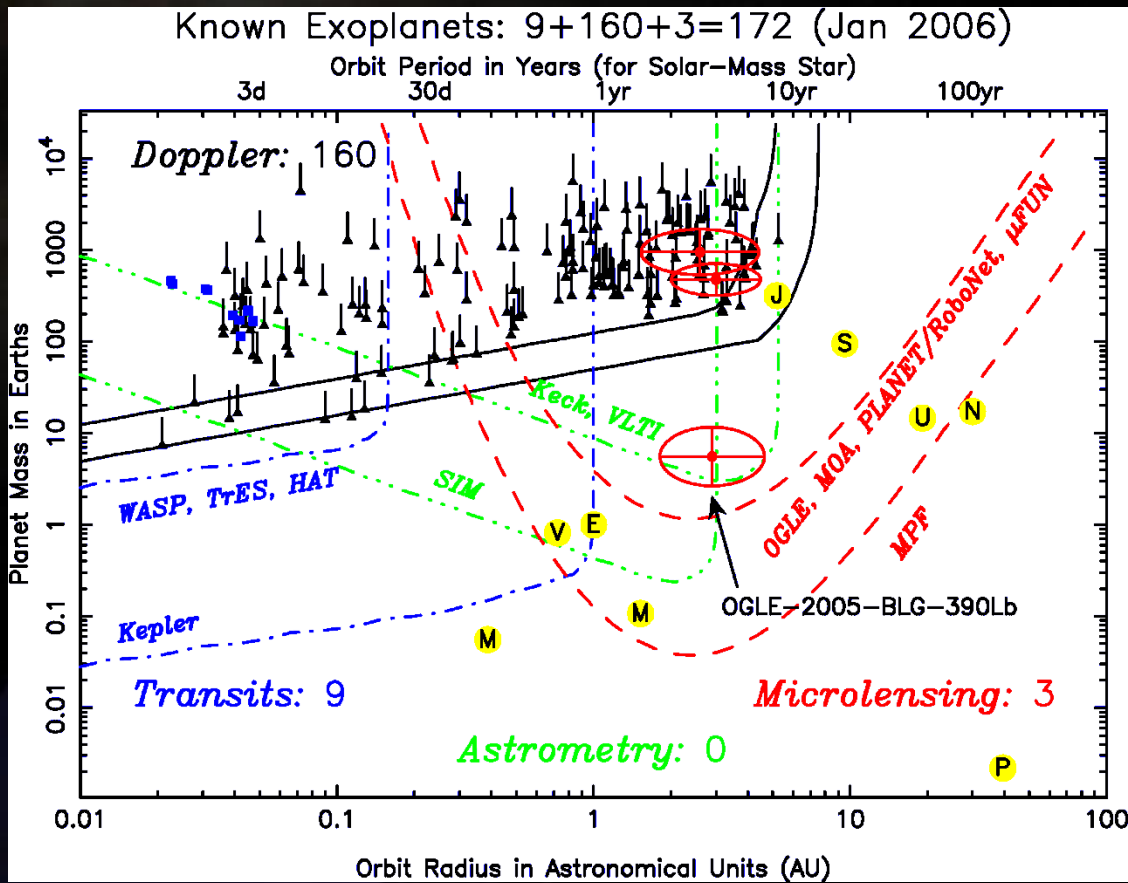


# Układy wielokrotne



**Pozwalają określić rozkład masy  
w soczewkach – np. w galaktyce**

# Planety typu ziemskiego



Limity obserwacyjne i  
znane planety:

Prędkości radialne (160)

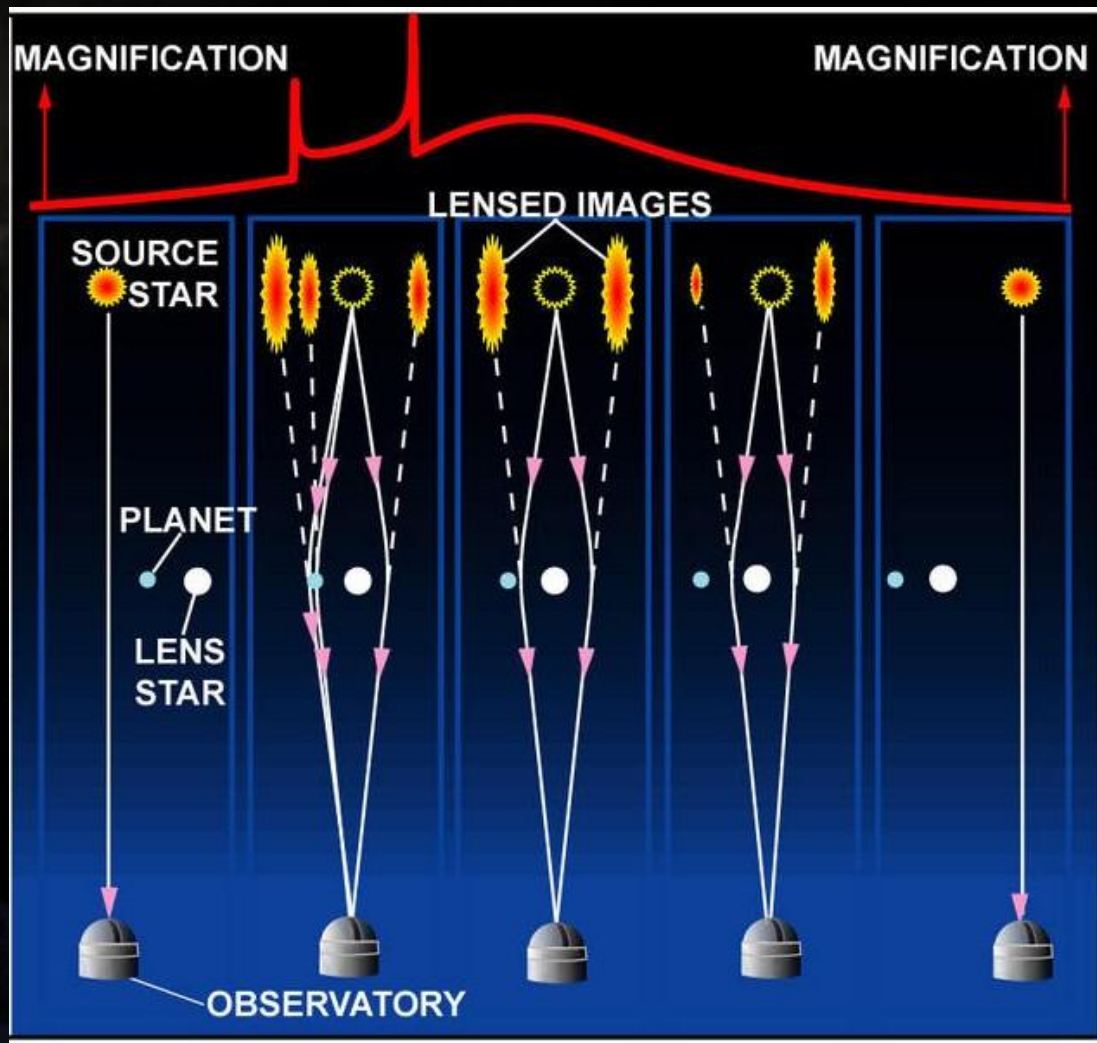
Tranzyty (9)

Mikrosoczewkowanie (3)

M, V, E, J, S, U, N, (P) – Układ  
Słoneczny

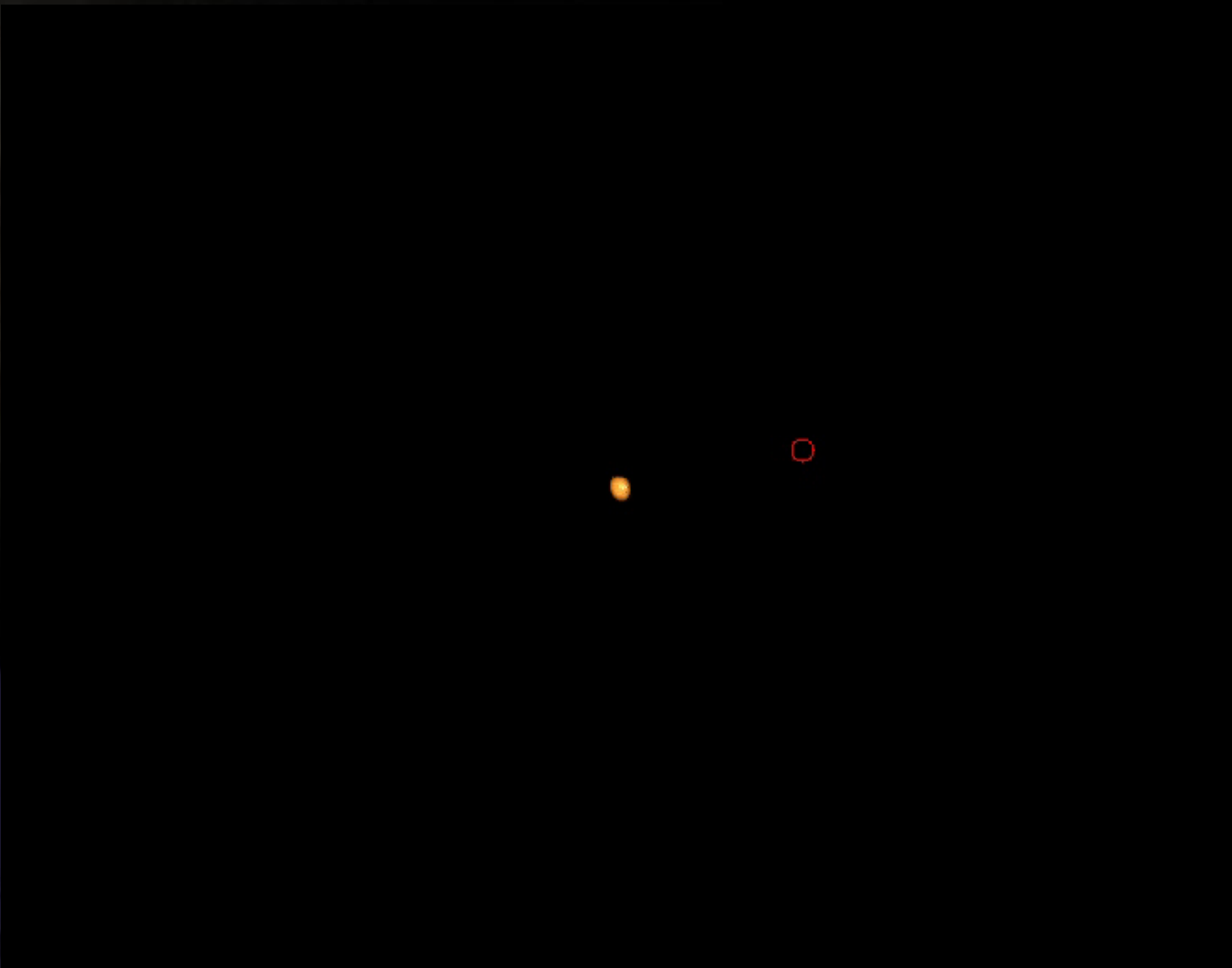


# Planety typu ziemskiego

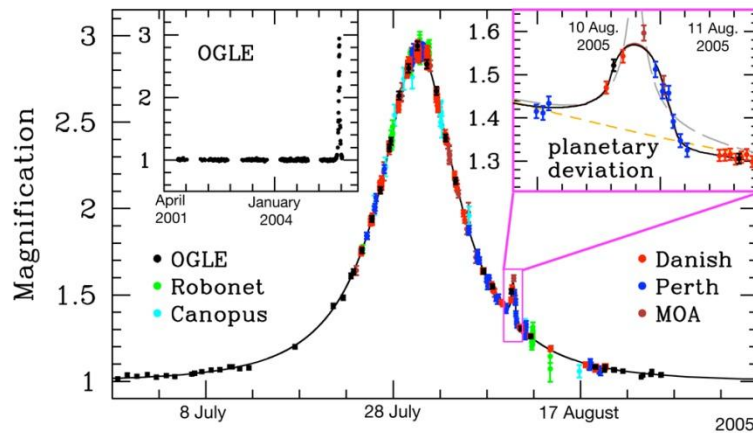
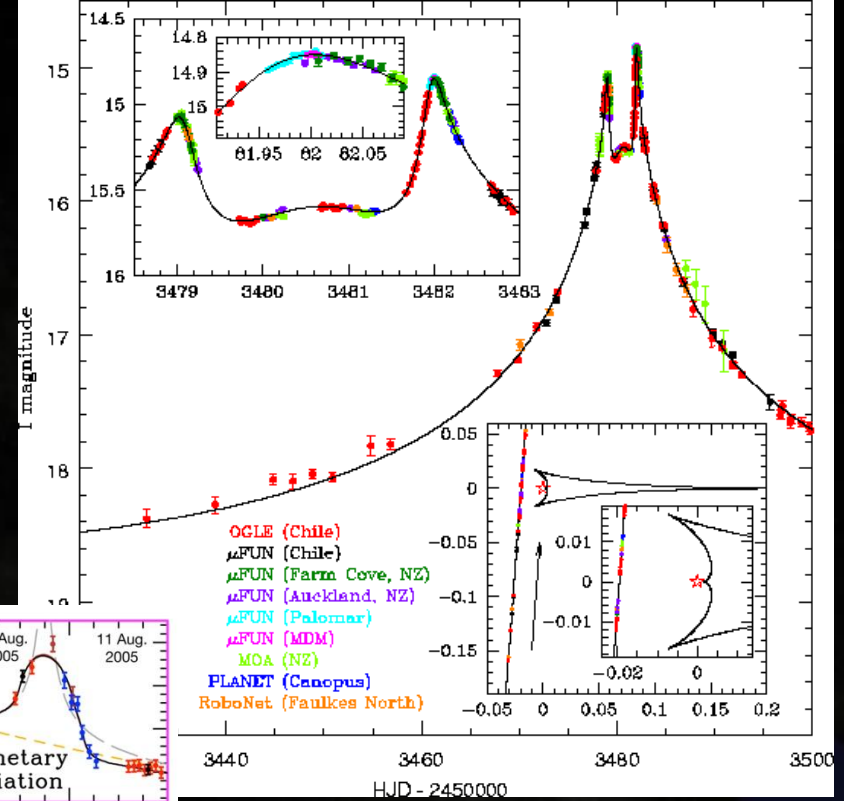
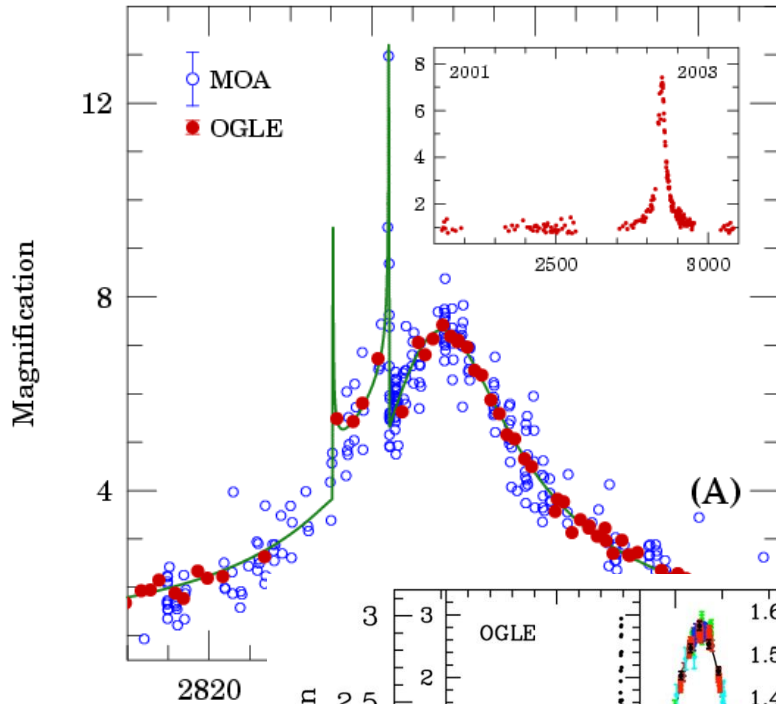




# Planety typu ziemskiego

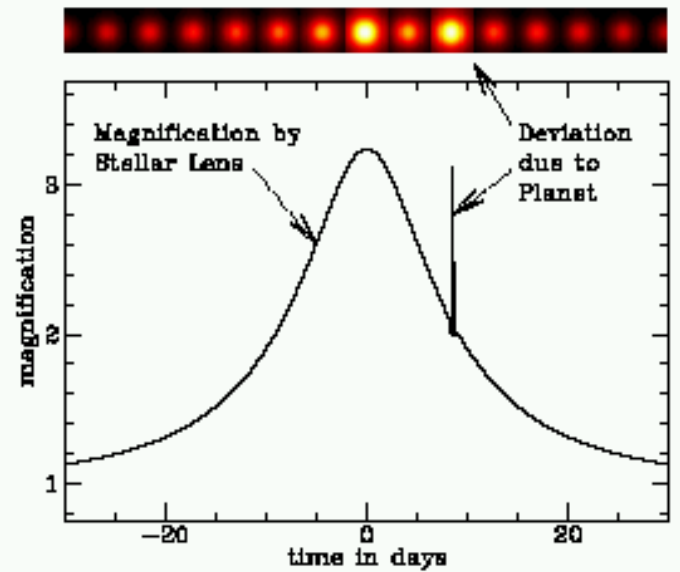
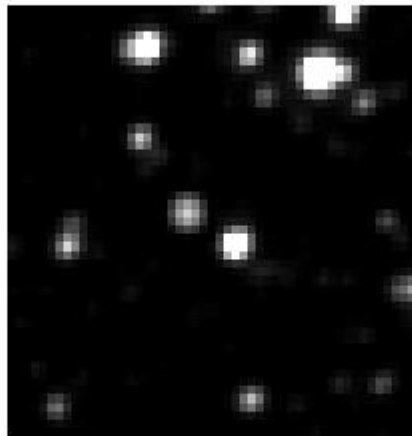


# Planety typu ziemskiego



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

# Planety typu ziemskiego

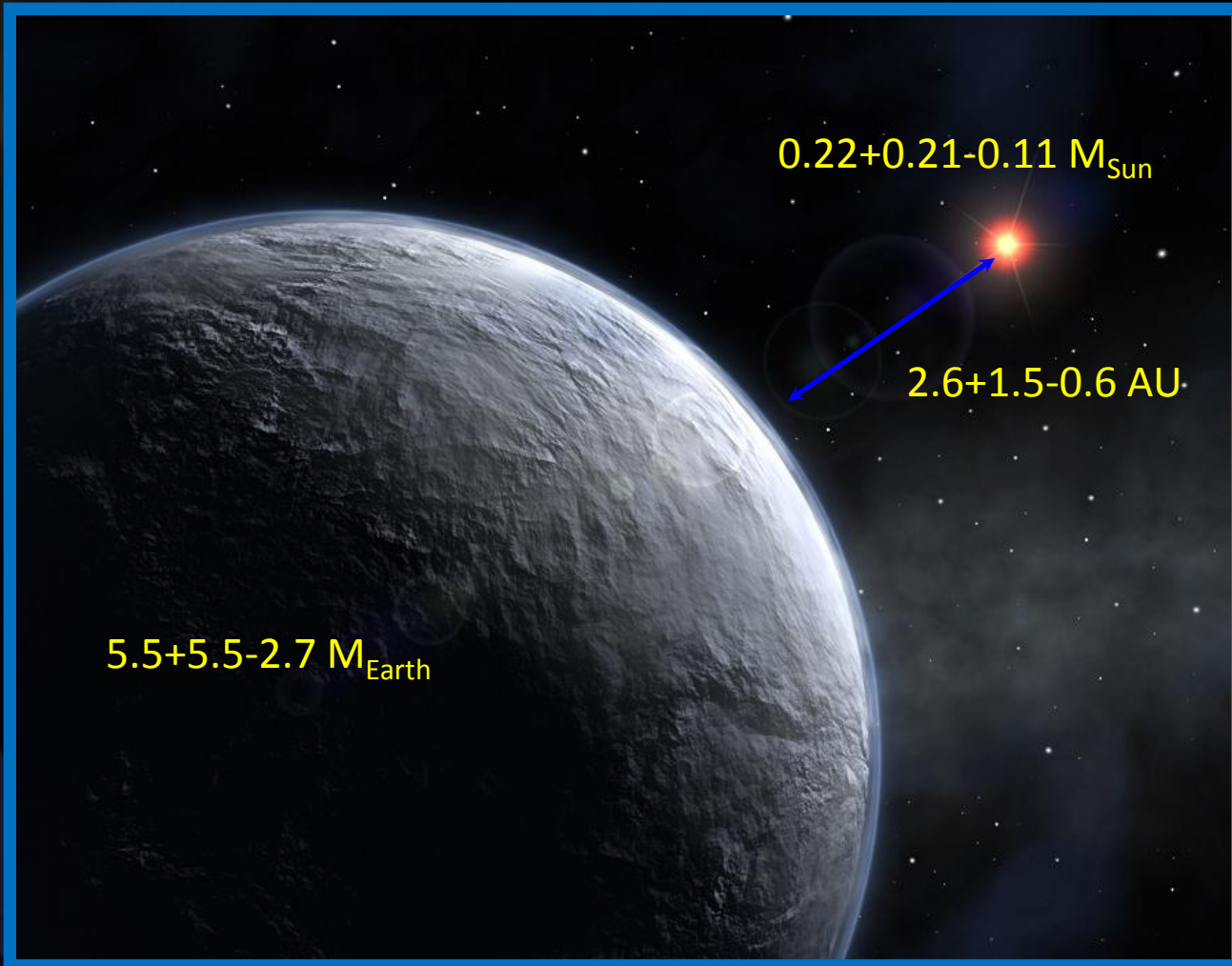


# Planety typu ziemskiego

## Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing\*

J.-P. Beaulieu<sup>1,4</sup>, D. P. Bennett<sup>1,3,5</sup>, P. Fouqué<sup>1,6</sup>, A. Williams<sup>1,7</sup>, M. Dominik<sup>1,8</sup>, U. G. Jørgensen<sup>1,9</sup>, D. Kubas<sup>1,10</sup>, A. Cassan<sup>1,4</sup>, C. Coutures<sup>1,11</sup>, J. Greenhill<sup>1,12</sup>, K. Hill<sup>1,12</sup>, J. Menzies<sup>1,13</sup>, P.D. Sackett<sup>1,14</sup>, M. Albrow<sup>1,15</sup>, S. Brilliand<sup>1,10</sup>, J.A.R. Caldwell<sup>1,16</sup>, J. J. Calitz<sup>1,17</sup>, K. H. Cook<sup>1,18</sup>, E. Corrales<sup>1,4</sup>, M. Desort<sup>1,4</sup>, S. Dieters<sup>1,12</sup>, D. Dominis<sup>1,19</sup>, J. Donatowicz<sup>1,20</sup>, M. Hoffman<sup>1,19</sup>, S. Kane<sup>1,21</sup>, J.-B. Marquette<sup>1,4</sup>, R. Martin<sup>1,7</sup>, P. Meintjes<sup>1,17</sup>, K. Pollard<sup>1,15</sup>, K. Sahu<sup>1,22</sup>, C. Vinter<sup>1,9</sup>, J. Wambsganss<sup>1,23</sup>, K. Woller<sup>1,9</sup>, K. Horne<sup>1,8</sup>, I. Steele<sup>1,24</sup>, D. M. Bramich<sup>1,8,24</sup>, M. Burgdorf<sup>1,24</sup>, C. Snodgrass<sup>1,25</sup>, M. Bode<sup>1,24</sup>, A. Udalski<sup>2,26</sup>, M.K. Szymański<sup>2,26</sup>, M. Kubiak<sup>2,26</sup>, T. Więckowski<sup>2,26</sup>, G. Pietrzyński<sup>2,26,27</sup>, I. Soszyński<sup>2,26,27</sup>, O. Szewczyk<sup>2,26</sup>, Ł. Wyrzykowski<sup>2,26,28</sup>, B. Paczyński<sup>2,29</sup>, F. Abe<sup>3,30</sup>, I. A. Bond<sup>3,31</sup>, T. R. Britton<sup>3,15,32</sup>, A. C. Gilmore<sup>3,15</sup>, J. B. Hearnshaw<sup>3,15</sup>, Y. Itow<sup>3,30</sup>, K. Kamiya<sup>3,30</sup>, P. M. Kilmartin<sup>3,15</sup>, A. V. Korpela<sup>3,33</sup>, K. Masuda<sup>3,30</sup>, Y. Matsubara<sup>3,30</sup>, M. Motomura<sup>3,30</sup>, Y. Muraki<sup>3,30</sup>, S. Nakamura<sup>3,30</sup>, C. Okada<sup>3,30</sup>, K. Ohnishi<sup>3,34</sup>, N. J. Rattenbury<sup>3,28</sup>, T. Sako<sup>3,30</sup>, S. Sato<sup>3,35</sup>, M. Sasaki<sup>3,36</sup>, T. Sekiguchi<sup>3,30</sup>, D. J. Sullivan<sup>3,33</sup>, P. J. Tristram<sup>3,32</sup>, P. C. M. Yock<sup>3,32</sup>, T. Yoshioka<sup>3,30</sup>

# Planety typu ziemskiego



# KONIEC

