



Objectif Terre !

*Les nouvelles exoplanètes
détectées par microlensing*



OGLE 2005-BLG-390Lb

*La première exoplanète
similaire aux planètes
telluriques*

Plan de l'exposé

Généralités sur les microlentilles gravitationnelles

Le réseau de suivi photométrique PLANET

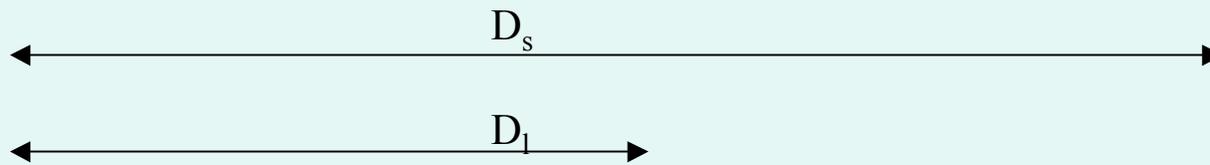
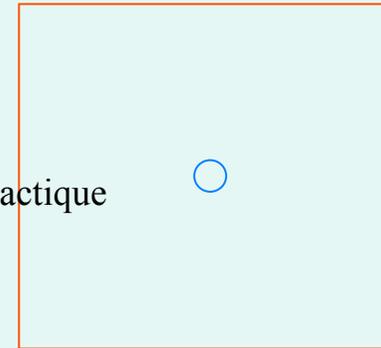
La planète OGLE 2005-BLG-390Lb

Géométrie des lentilles



Astronome

Etoile du Bulbe Galactique



Objet compact

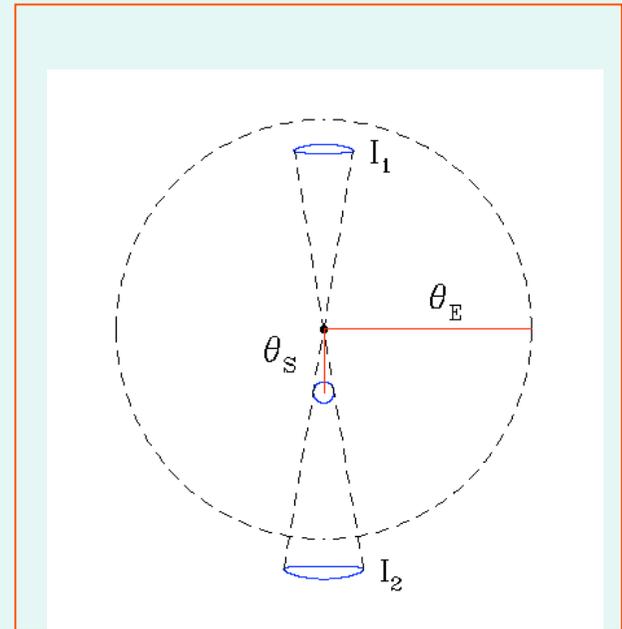
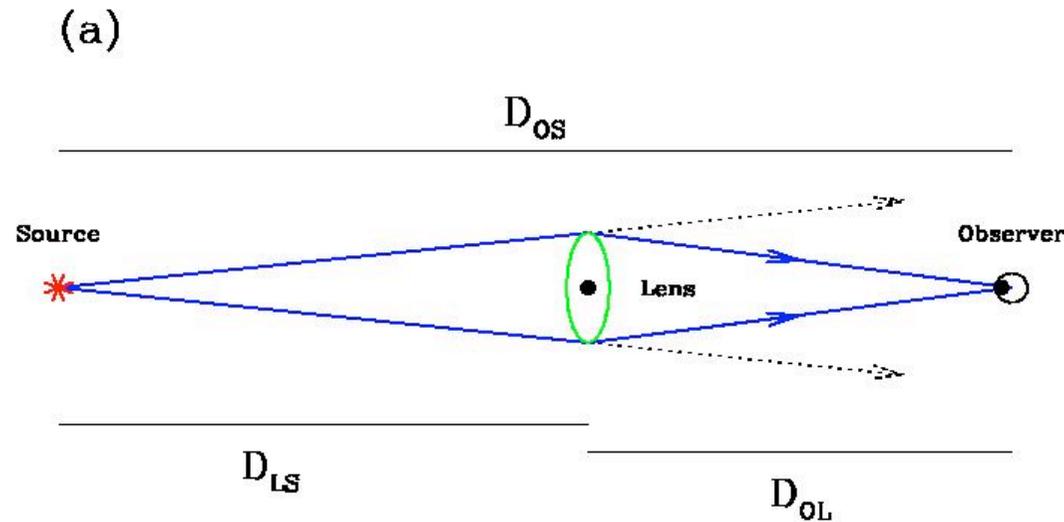


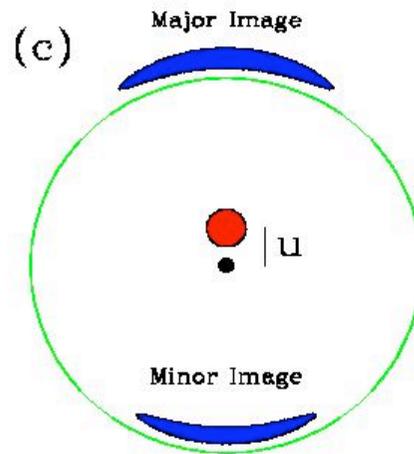
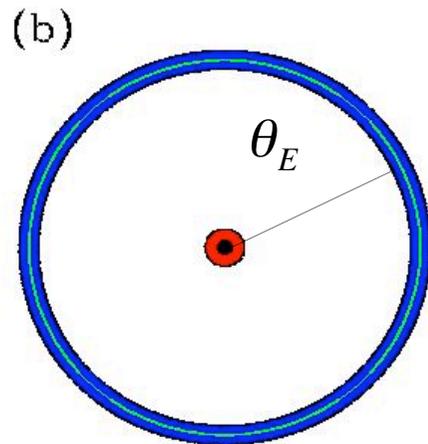
Schéma et ordres de grandeur



$$\alpha = -\nabla\psi = \frac{4GM}{Rc^2}$$

$$R_E(\text{UA}) = 2.854 M^{1/2} D_{OL}^{1/2} \left(1 - \frac{D_{OL}}{D_{OS}}\right)^{1/2}$$

$$\theta_E(\text{mas}) = 2.854 M^{1/2} D_{OL}^{-1/2} \left(1 - \frac{D_{OL}}{D_{OS}}\right)^{1/2}$$

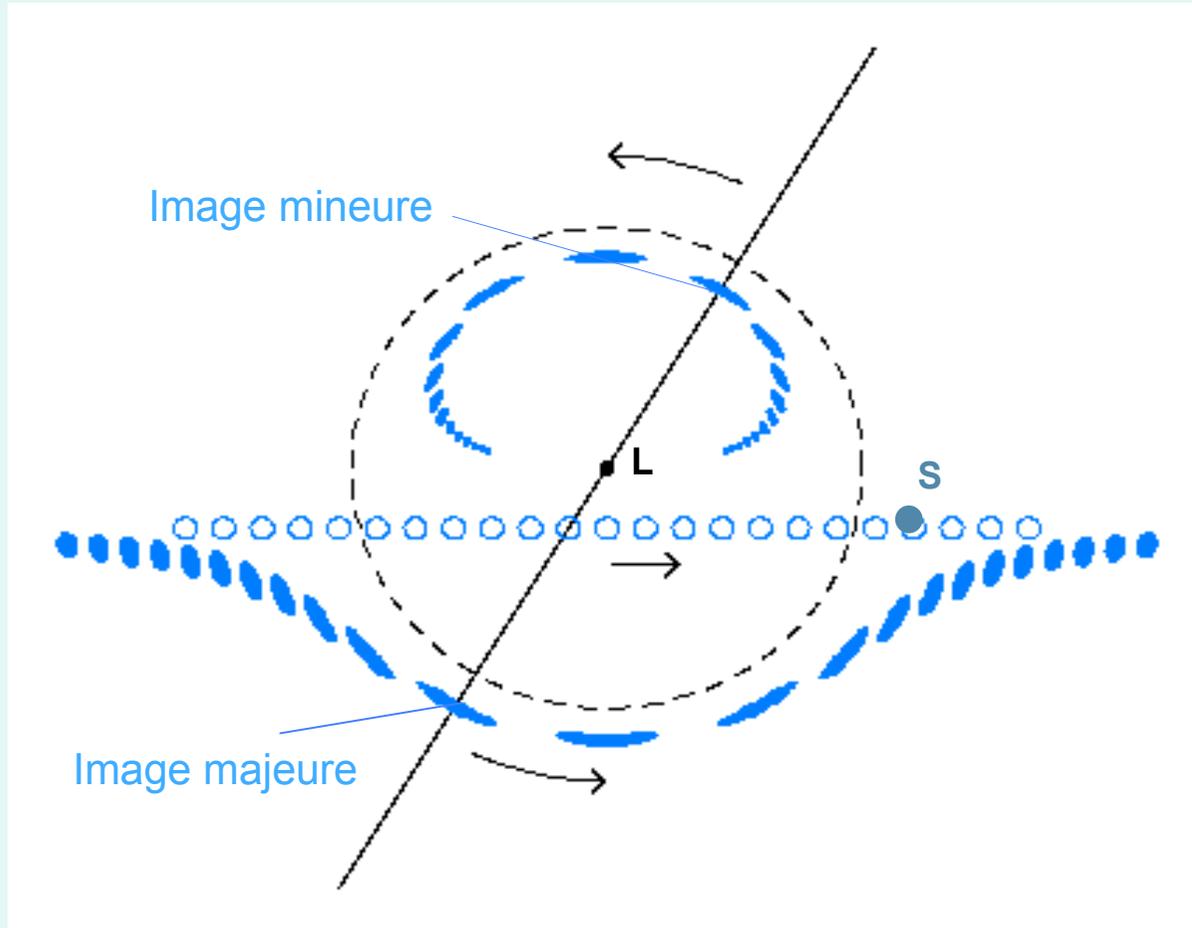


$M = 0.3 M_{\text{sun}}, D_{OL} = 6 \text{ kpc}, D_{OS} = 8 \text{ kpc} :$
 $R_E = 1.9 \text{ UA}, \theta_E = 0.32 \text{ mas}$

Mouvement relatif lentille – source

$$t_E = \frac{R_E}{v_{\perp}}$$

$$\mu = \frac{\theta_E}{t_E} = \frac{v_{\perp}}{D_{OL}}$$



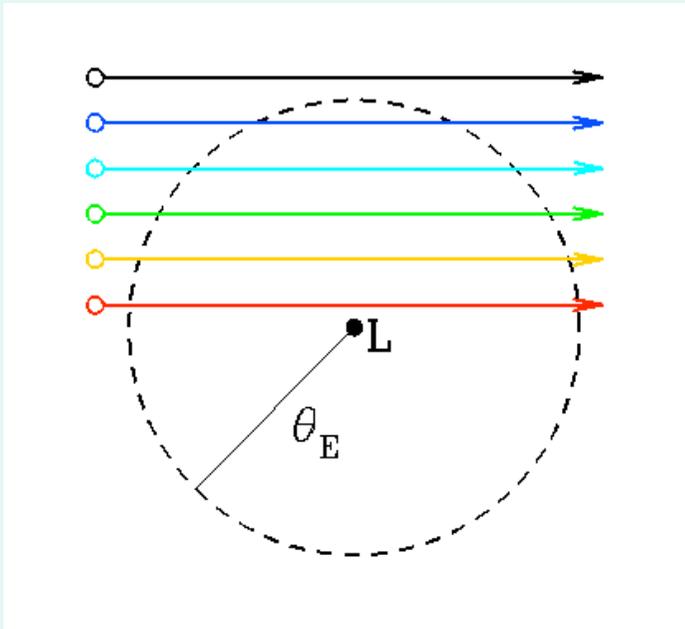
Valeur typique : $\mu = 15 \mu\text{as/j} = 5.5 \text{ mas/an} = 26 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

$$t_E = 20 \text{ j}$$

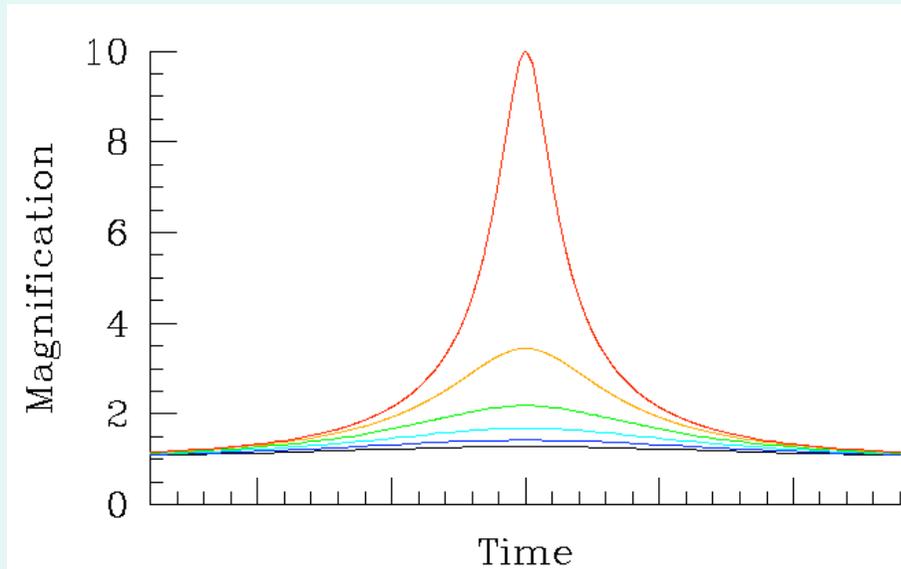
$$v_{\perp} = 150 \text{ km s}^{-1}$$

Relation paramètre d'impact - amplification

Paramètre d'impact



Courbe de lumière 'PSPL'



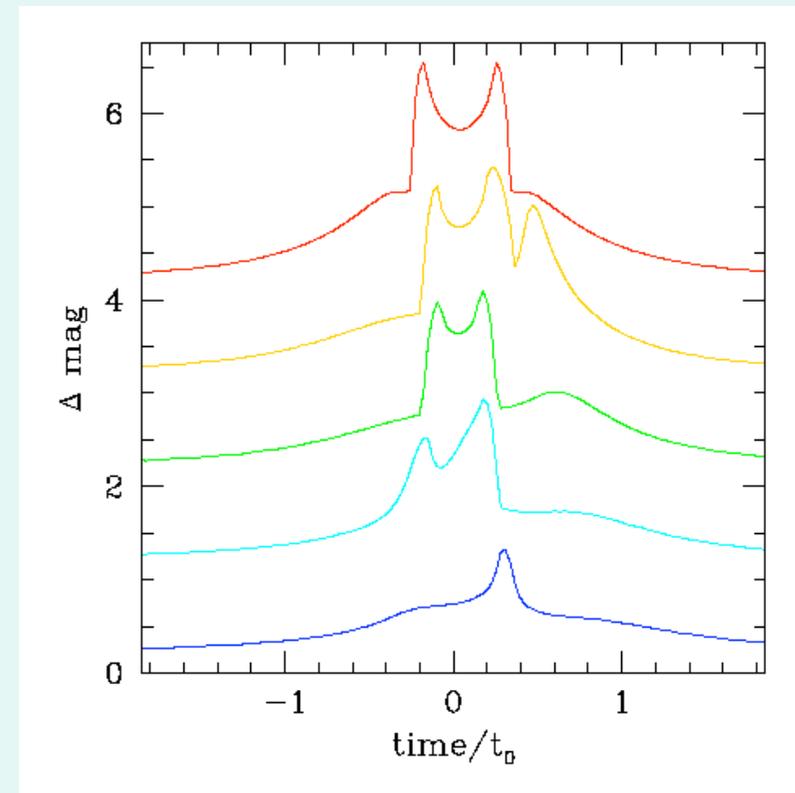
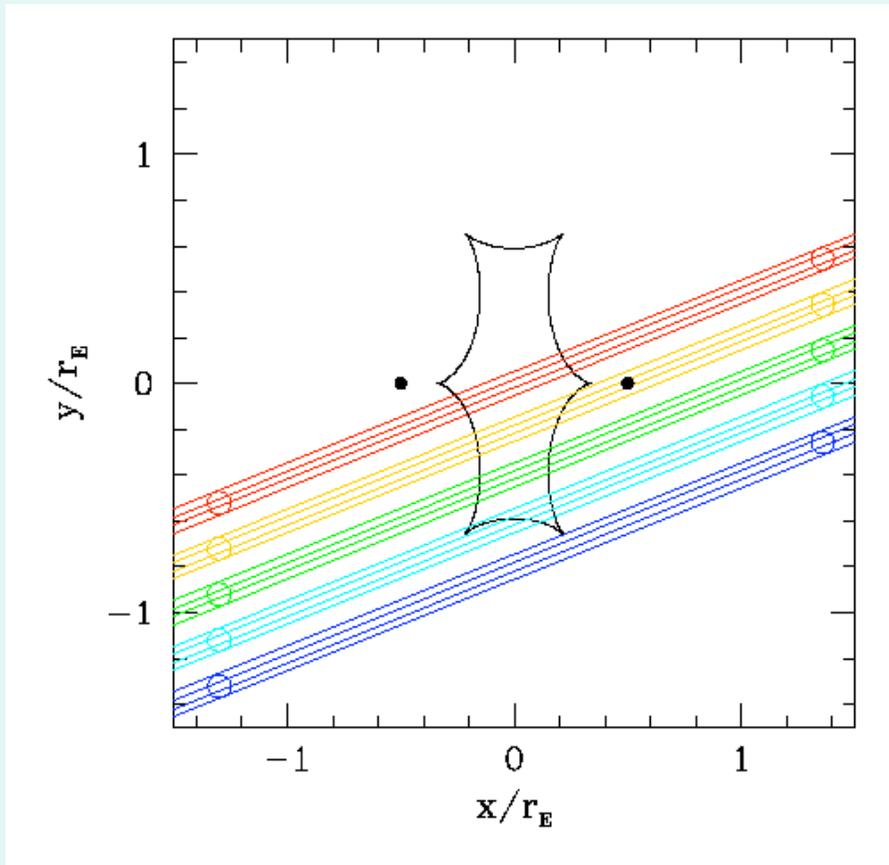
$$u = \frac{\theta}{\theta_E}$$

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

$$u = 1 \Rightarrow A = 1.34$$

$$u \ll 1 \Rightarrow A(u) \approx \frac{1}{u}$$

Lentille binaire : caustique(s)



*Caustique: lieu des positions de la source d'amplification ∞
(dans le plan de la lentille)*

Caustiques des lentilles à planètes

Trois types de configuration:

- rapprochée, intermédiaire, éloignée

Caustiques:

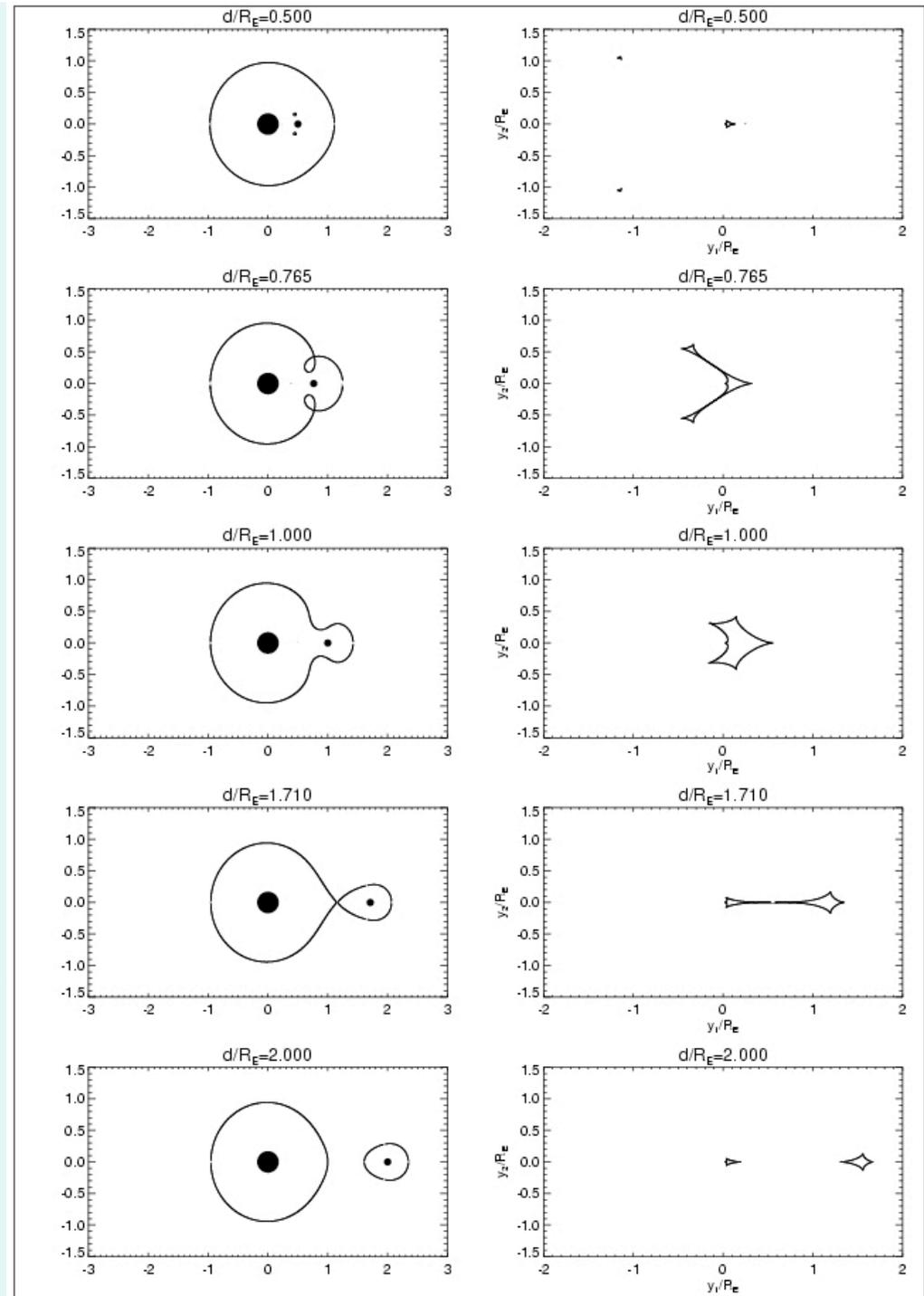
- 1 caustique centrale
- 0-2 caustiques planétaires

Séparation des régimes:

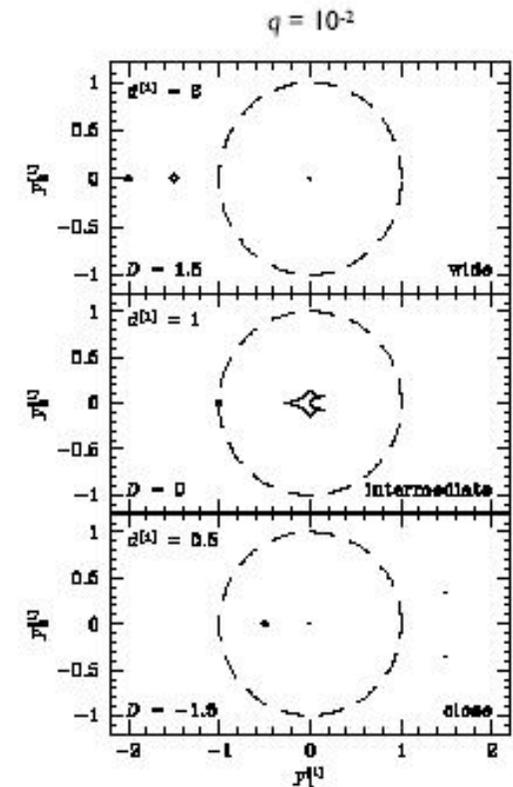
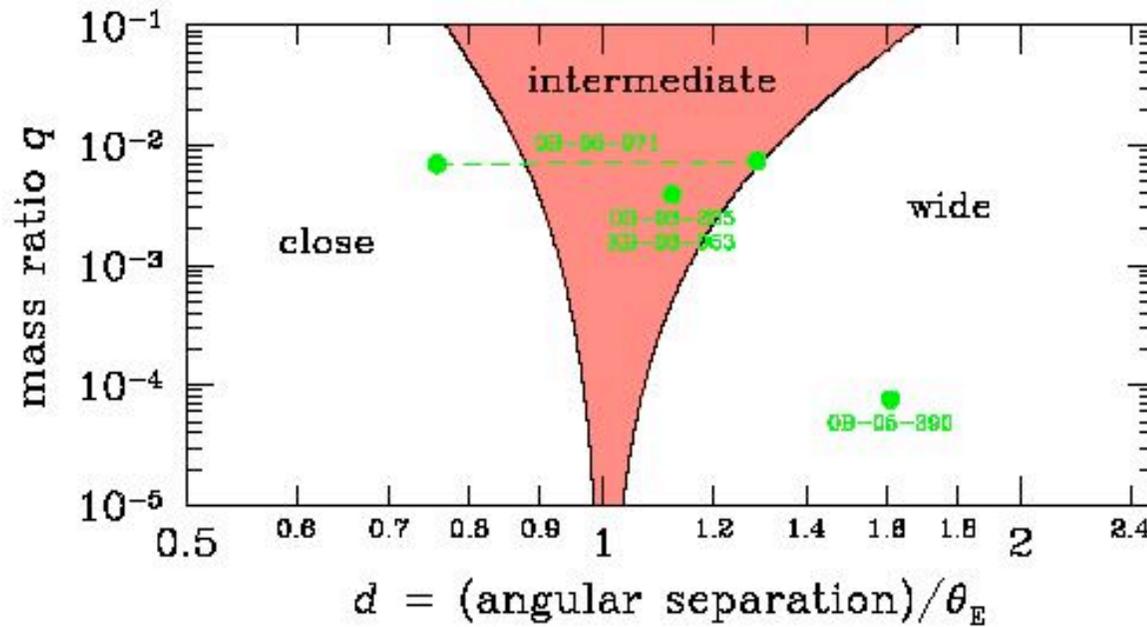
(Erdl & Schneider 1993)

$$\frac{d_c^8}{(1-d_c^4)^3} = \frac{(1+q)^2}{27q} \Rightarrow (q \ll 1): d_c \approx 1 - \frac{3}{4}q^{1/3}$$

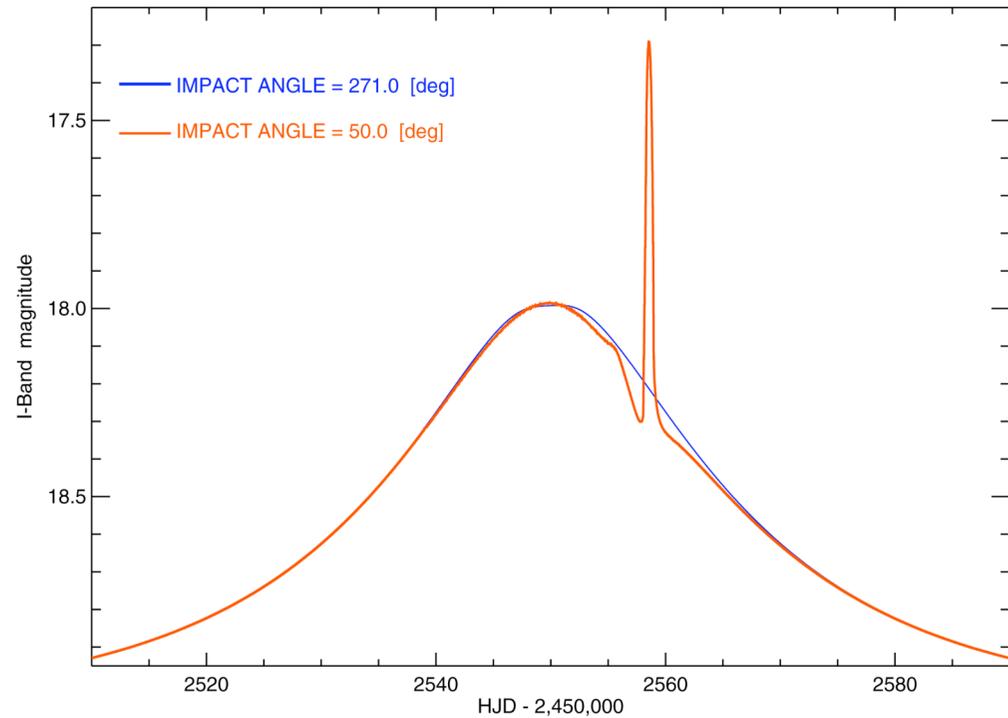
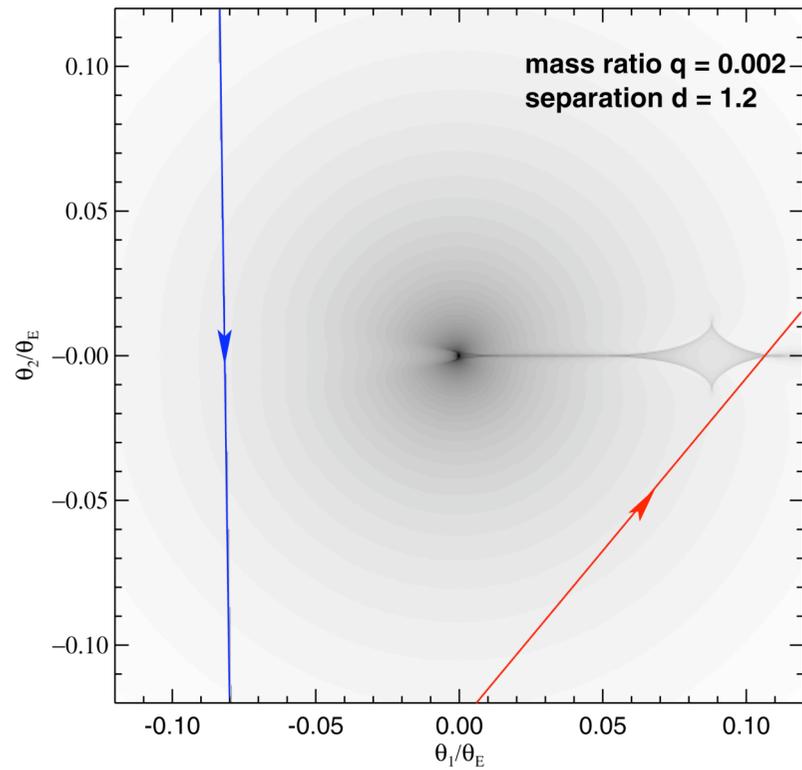
$$d_w = \frac{(1+q^{1/3})^{3/2}}{(1+q)^{1/2}} \Rightarrow (q \ll 1): d_w \approx 1 + \frac{3}{2}q^{1/3}$$



Séparation des régimes



Dévoiler un compagnon planétaire



$$t_E = 20 \text{ j}, M = 0.3 M_{\text{sun}} : t_p = \sqrt{q} t_E$$

$$\text{Jupiter} : q = 3 \cdot 10^{-3} \Rightarrow t_p = 1 \text{ j}$$

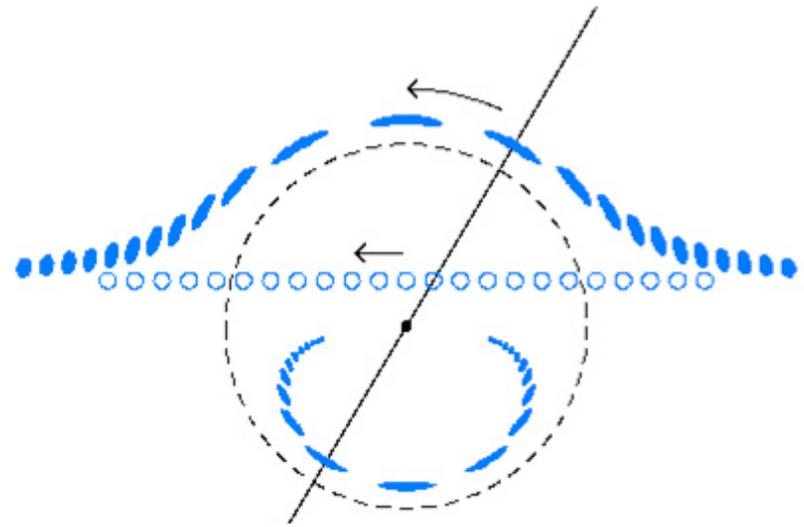
$$\text{Terre} : q = 10^{-5} \Rightarrow t_p = 1.5 \text{ h}$$

Lensing zone

$$d = 0.618 - 1.618 R_E$$

$$d = 1.2 - 3.1 \text{ UA}$$

$$\langle a \rangle = \frac{4}{\pi} d = 1.5 - 3.9 \text{ UA}$$



No. 1, 1992

DISCOVERING PLANETARY SYSTEMS

109

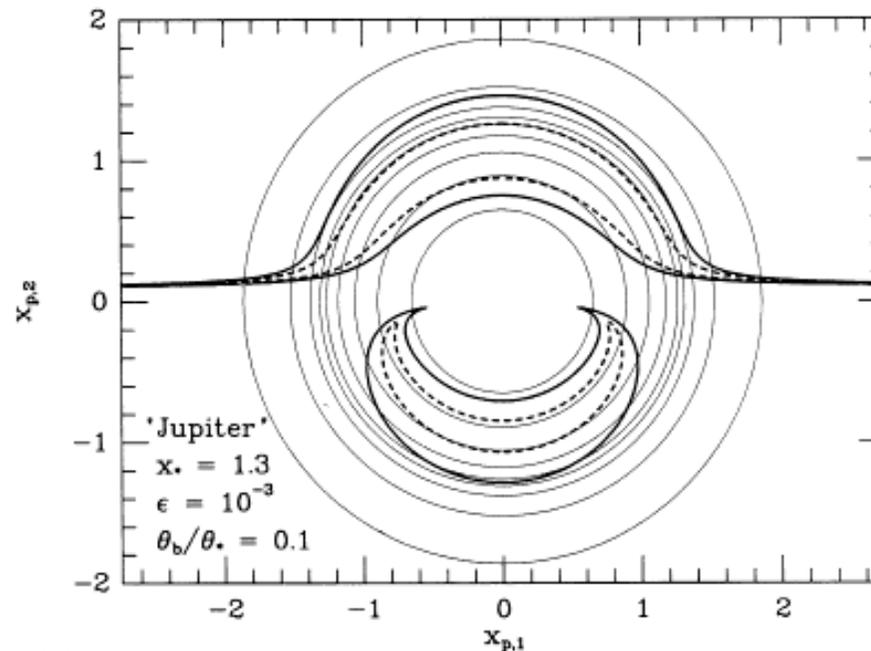
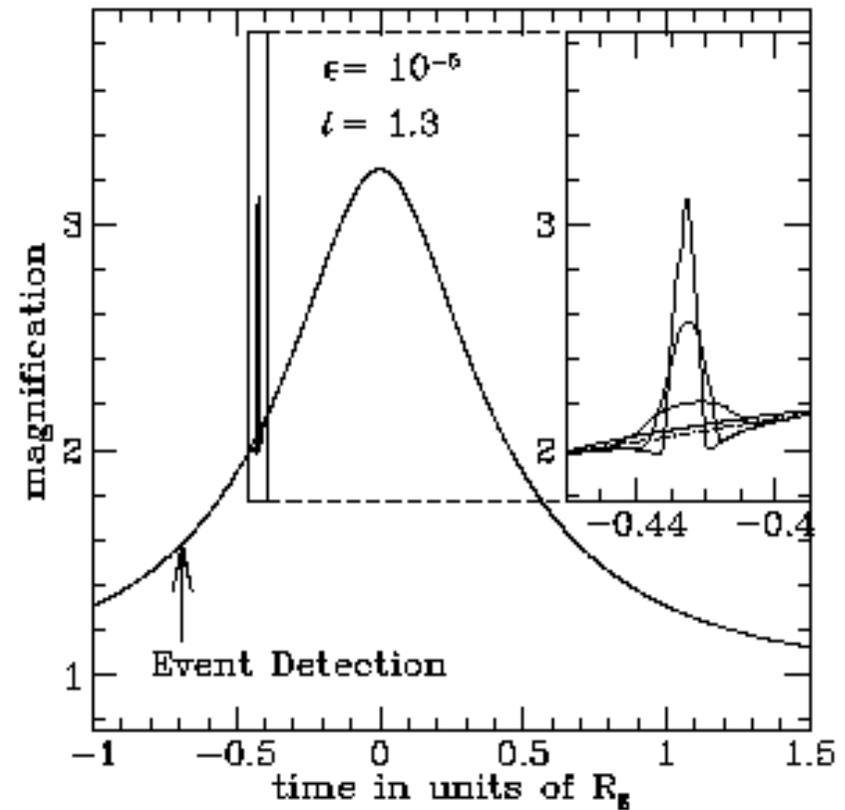
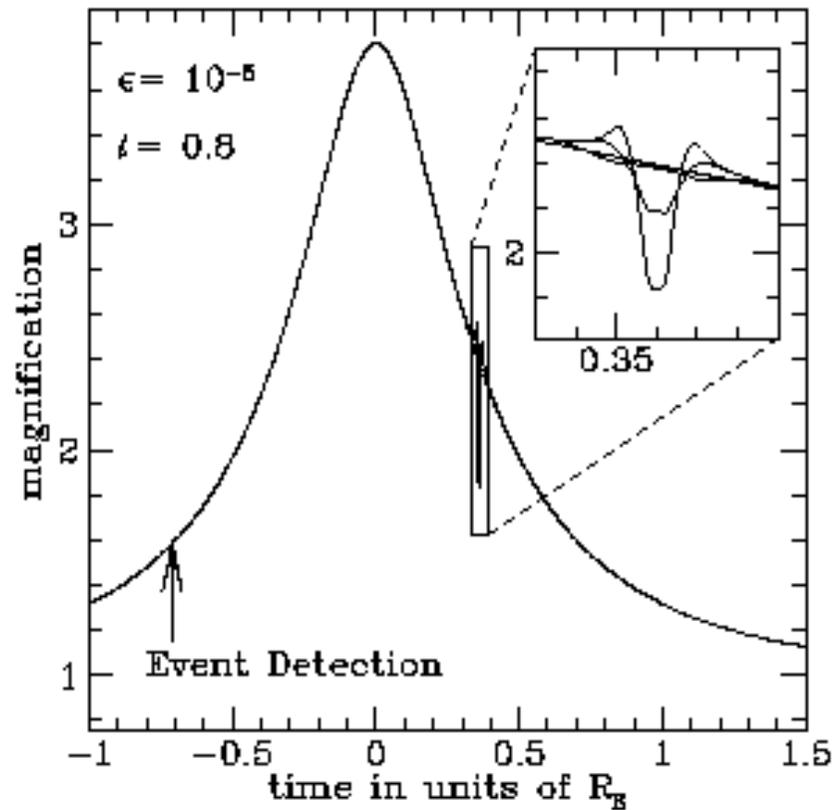


FIG. 4.—Probability distribution of a Jupiter-like planet ($\epsilon = 10^{-3}$, $x_* = 1.3$) on the lens plane (circles) and contours of constant perturbation $\delta_{\min} = \pm 5\%$ (bold solid) and $\pm 20\%$ (bold dashed). Angular distances are in units of the Einstein ring, θ_* . Impact parameter is $\theta_b = 0.1\theta_*$. The area between successive concentric circles contains 10% of the planet's probability. The bold contours in the upper part of the figure are positive perturbations and arise when the planet is close to the brighter unperturbed image. Those in the lower part of the figure are negative and arise when the planet is close to the fainter unperturbed image.

Effet de taille finie de la source

$\rho_* = 0.003, 0.006, 0.013, 0.03$ si $M = 0.3 M_{\text{sun}}$ et $D_{\text{OS}} = 9$ kpc



Géante du clump: $R = 13 R_{\text{sun}} \Rightarrow \theta_* = 6.7 \mu\text{as} \Rightarrow \rho_* = 0.013$ si $D_{\text{OL}} = 0.5 D_{\text{OS}}$

Turn-off M.S.: $R = 3 R_{\text{sun}} \Rightarrow \theta_* = 1.6 \mu\text{as} \Rightarrow \rho_* = 0.006$ si $D_{\text{OL}} = 0.8 D_{\text{OS}}$

Estimation de la taille de la source

- *Le modèle donne:*
$$\rho_* = \frac{\theta_*}{\theta_E} = \frac{t_*}{t_E}$$
- *Un diagramme CMD permet d'estimer la taille de la source par une relation de brillance superficielle:*

$$\log \theta_* (\mu\text{as}) = 3.212 + 0.421 (V - I)_0 - 0.2 I_0$$

- *Méthode du clump des géantes rouges: analogue de la branche horizontale pour les fortes métallicités; position calibrée par les géantes locales d'Hipparcos:*

$$(V - I)_0 = 1.00 \pm 0.05$$

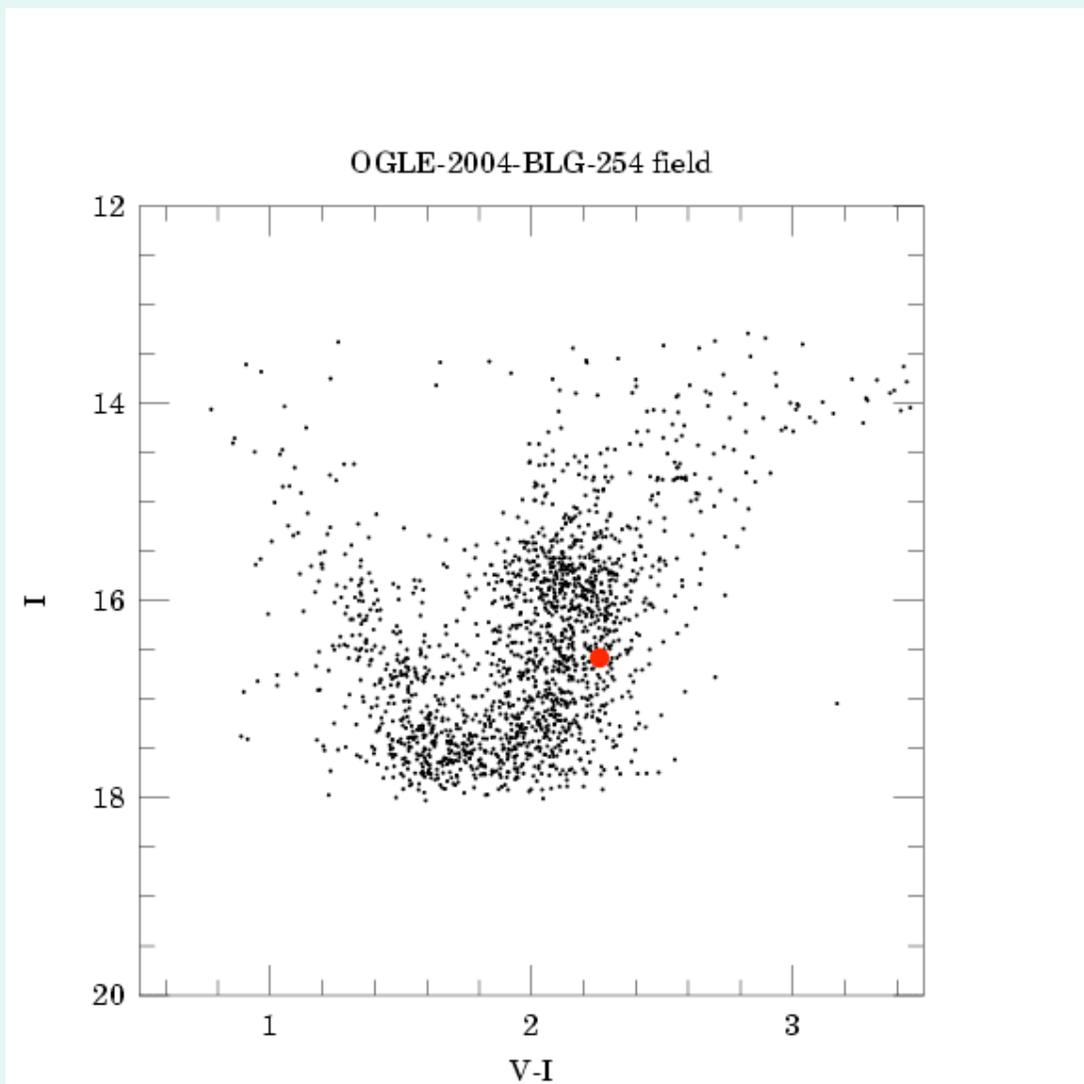
$$M_I = -0.23 \pm 0.03$$

- *Distance au clump dépend de (l,b) à cause de la Barre Galactique:*

$$R_0 = 7.62 \pm 0.32 \text{ kpc}$$

$$\mu_0 = 14.41 \pm 0.09$$

Colour Magnitude Diagramme (CMD)



Plan de l'exposé

Généralités sur les microlentilles gravitationnelles

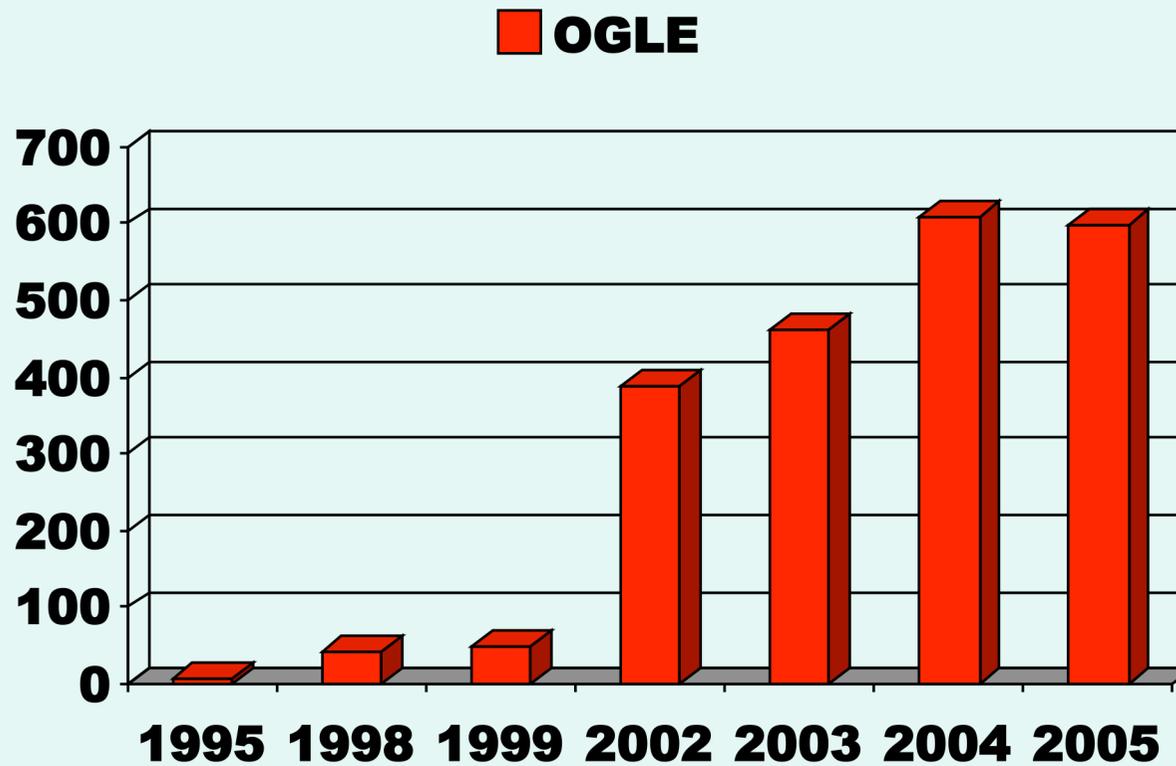
Le réseau de suivi photométrique PLANET

La planète OGLE 2005-BLG-390Lb

Les télescopes d'alerte

1993: Macho (†1999), Ogle, EROS (†2003)

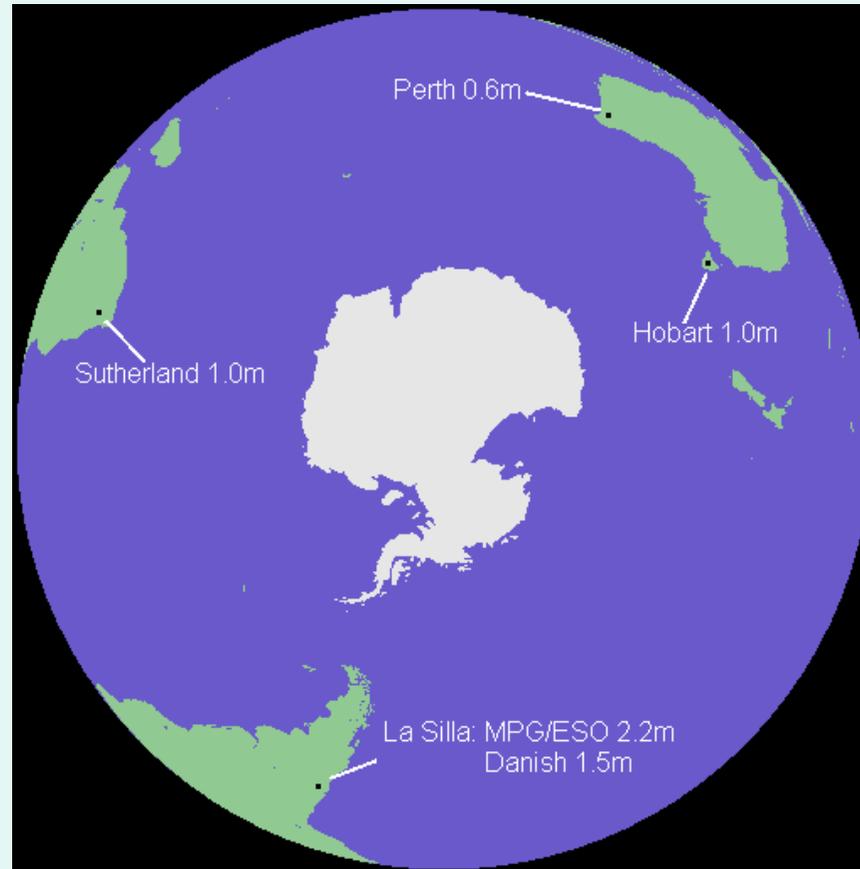
1995: MOA



PLANET (1995–200?) Probing Lensing Anomaly NETwork

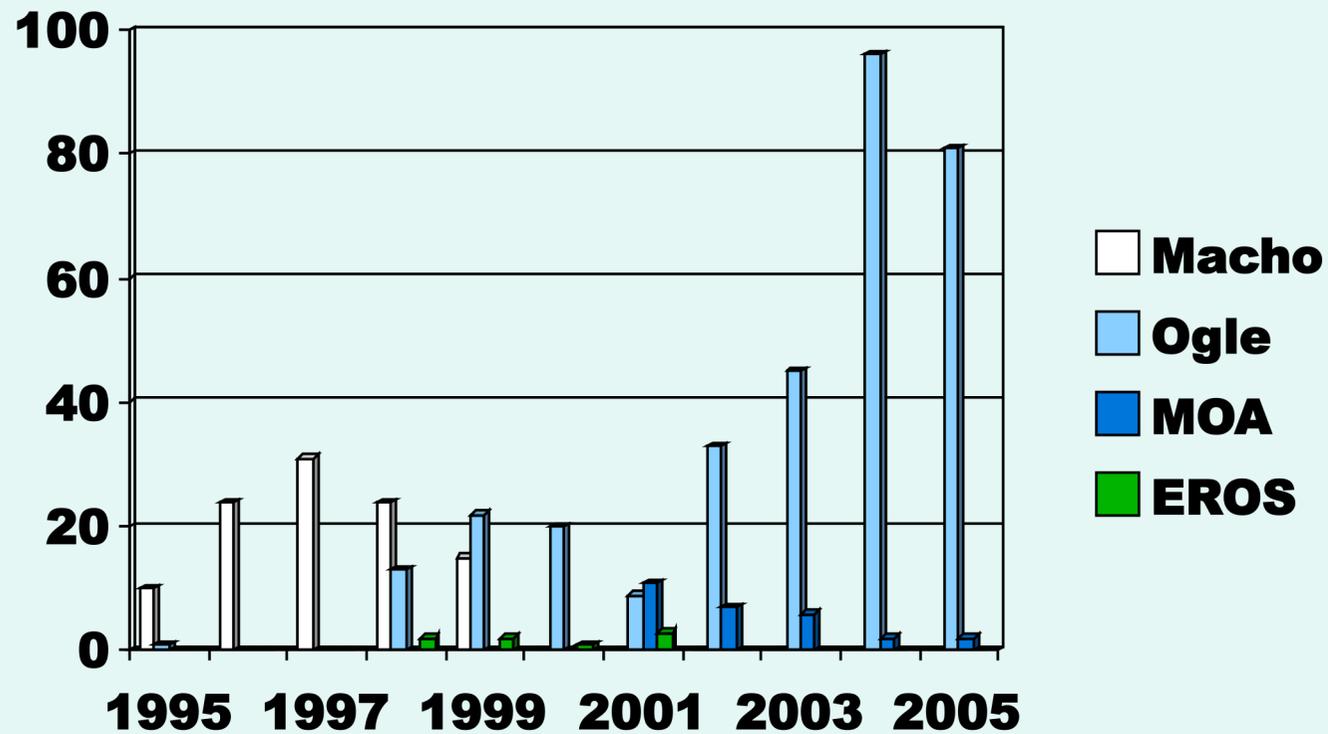
- *32 collaborateurs, 18 institutions, 10 pays*
- *5 télescopes*
- *Accord de coopération avec RoboNET
(réseau de 3 télescopes robotiques UK)*

Réseau de télescopes PLANET



« *Le Soleil ne se lève jamais sur PLANET* »

Les alertes suivies et leur origine



Les autres réseaux de suivi (les amis)

- GMAN (Global Microlensing Alert Network): 1995 – 1999, CTIO 0.9m
- MPS (Microlensing Planet Search): 1997 - 1999, 1.9m Mount Stromlo
- MicroFUN (Microlensing Follow-Up Network): 2003, CTIO 1.3m, CTIO-Yale 1.0m, Wise 1.0m, Palomar 1.5m, MDM 2.4m, 2 télescopes amateur
- RoboNET: 2004, Faulkes-N 2m, Liverpool 2m, (Faulkes-S 2m)
- OGLE-III EEWS: 2003

Plan de l'exposé

Généralités sur les microlentilles gravitationnelles

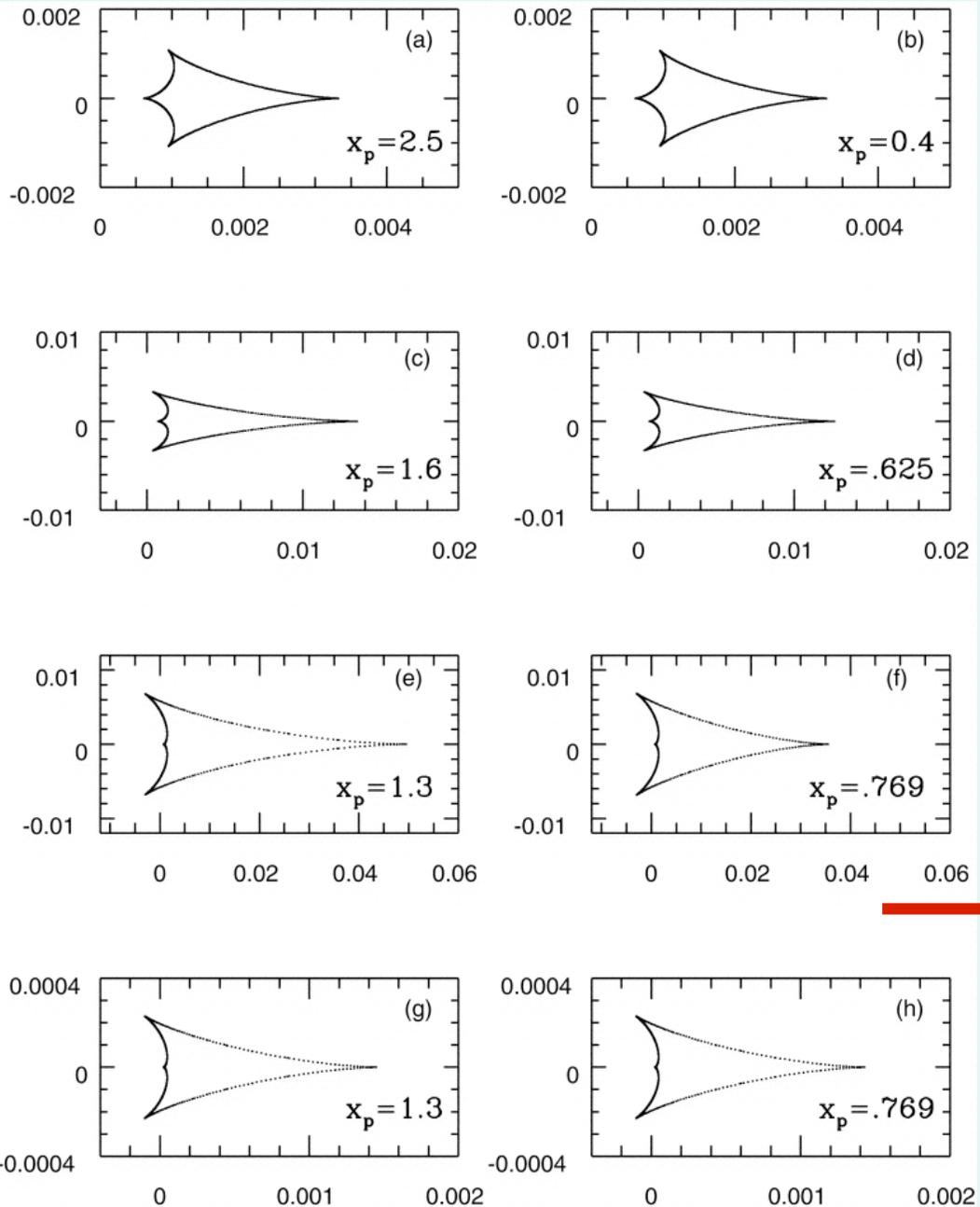
Le réseau de suivi photométrique PLANET

La planète OGLE 2005-BLG-390Lb

Les premiers pas ...

- *Plusieurs annonces ensuite infirmées:*
 - MACHO 1997-BLG-41
 - MACHO 1998-BLG-35
 - OGLE 2000-BLG-012
- *Explications:*
 - Unicité du modèle: planète vs. binaire en rotation
 - Précision photométrique
 - Source résolue
 - Parallaxe
- *Problème de la caractérisation*

Caustique centrale: dégénérescence $d - 1/d$



*Jupiter:
dégénérescence d*

*1/30^e Jupiter:
dégénérescence q*

2003: MOA 2003-BLG-53/OGLE 2003-BLG-235

Bond et al., 2004, ApJ 606, L155

BEST FIT (Bennett):

Lens distance = 5.2 kpc

90% c.l. range is 2.3 - 5.4 kpc

Proj. separation = 3.0 AU

90% c.l. range is 1.3 - 3.1 AU

Stellar mass = $0.36 M_{\odot}$

90% c.l. range is $0.08 - 0.39 M_{\odot}$

Planet mass = $1.5 M_{\text{JUP}}$

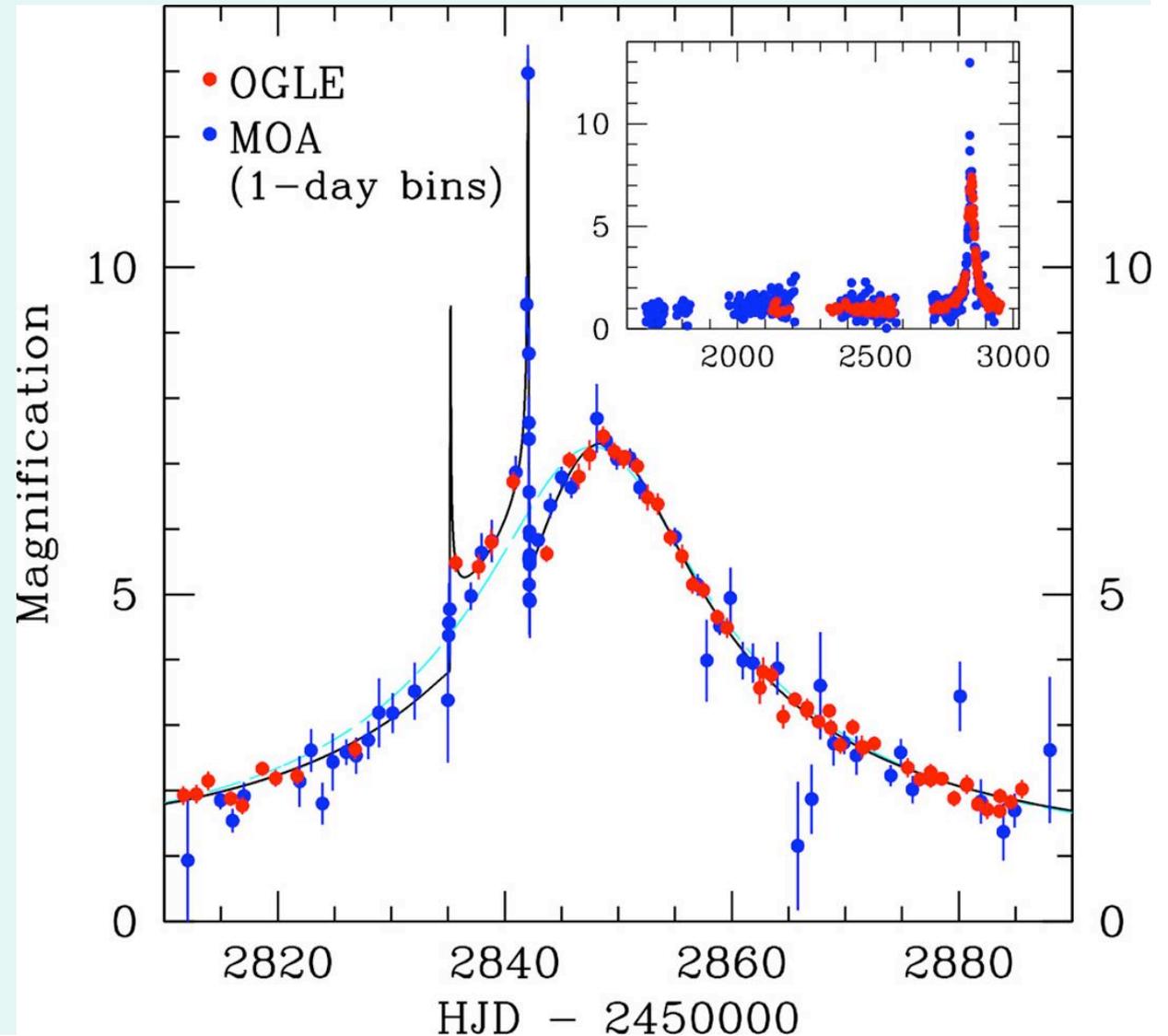
90% c.l. range is $0.3 - 1.6 M_{\text{JUP}}$

But if lens star is a $0.6 M_{\odot}$
white dwarf:

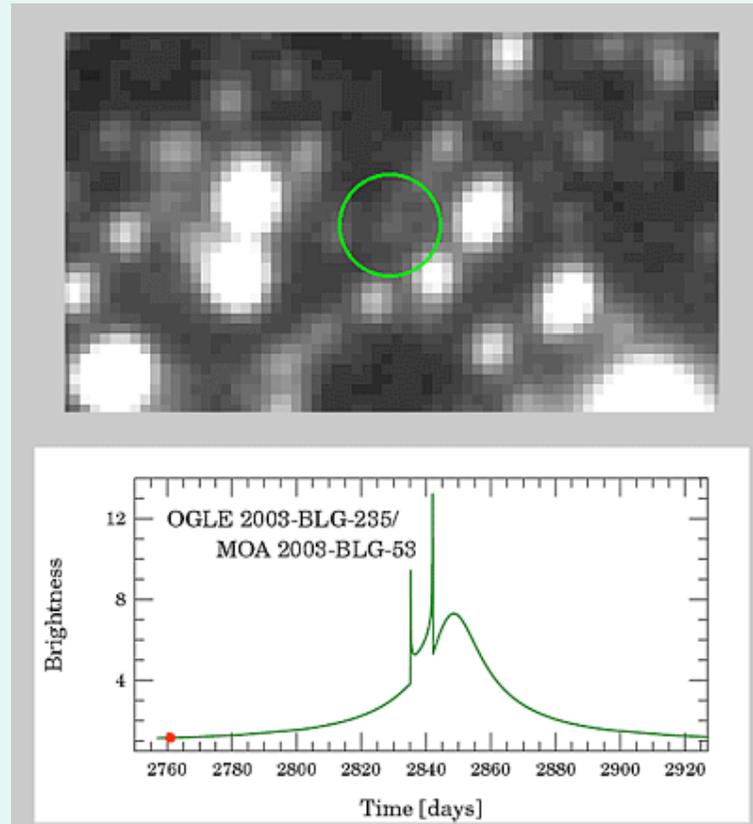
$D_{\text{lens}} = 6.1 \text{ kpc}$

$a_p = 1.8 \text{ AU}$

$M_p = 2.5 M_{\text{JUP}}$

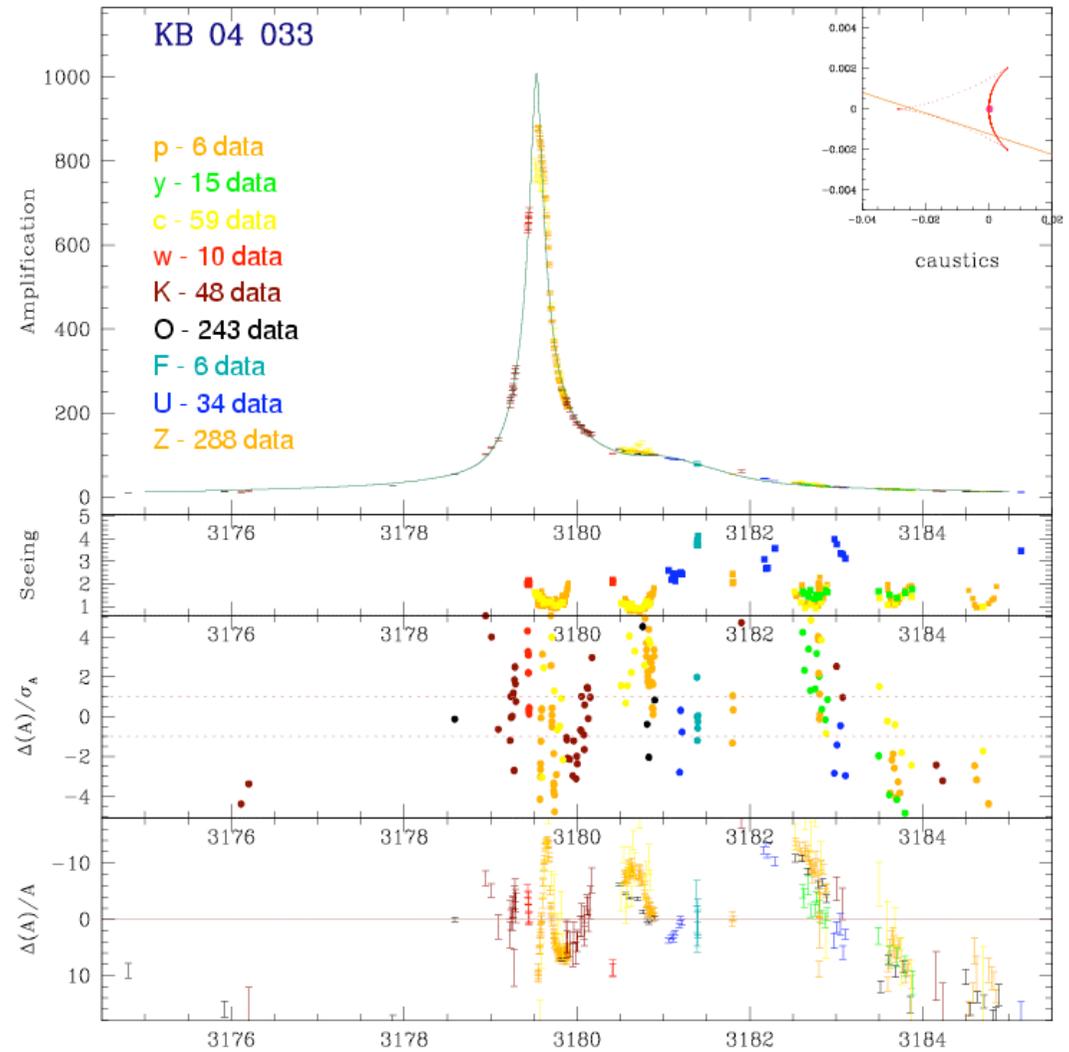


Animation (Udalski)

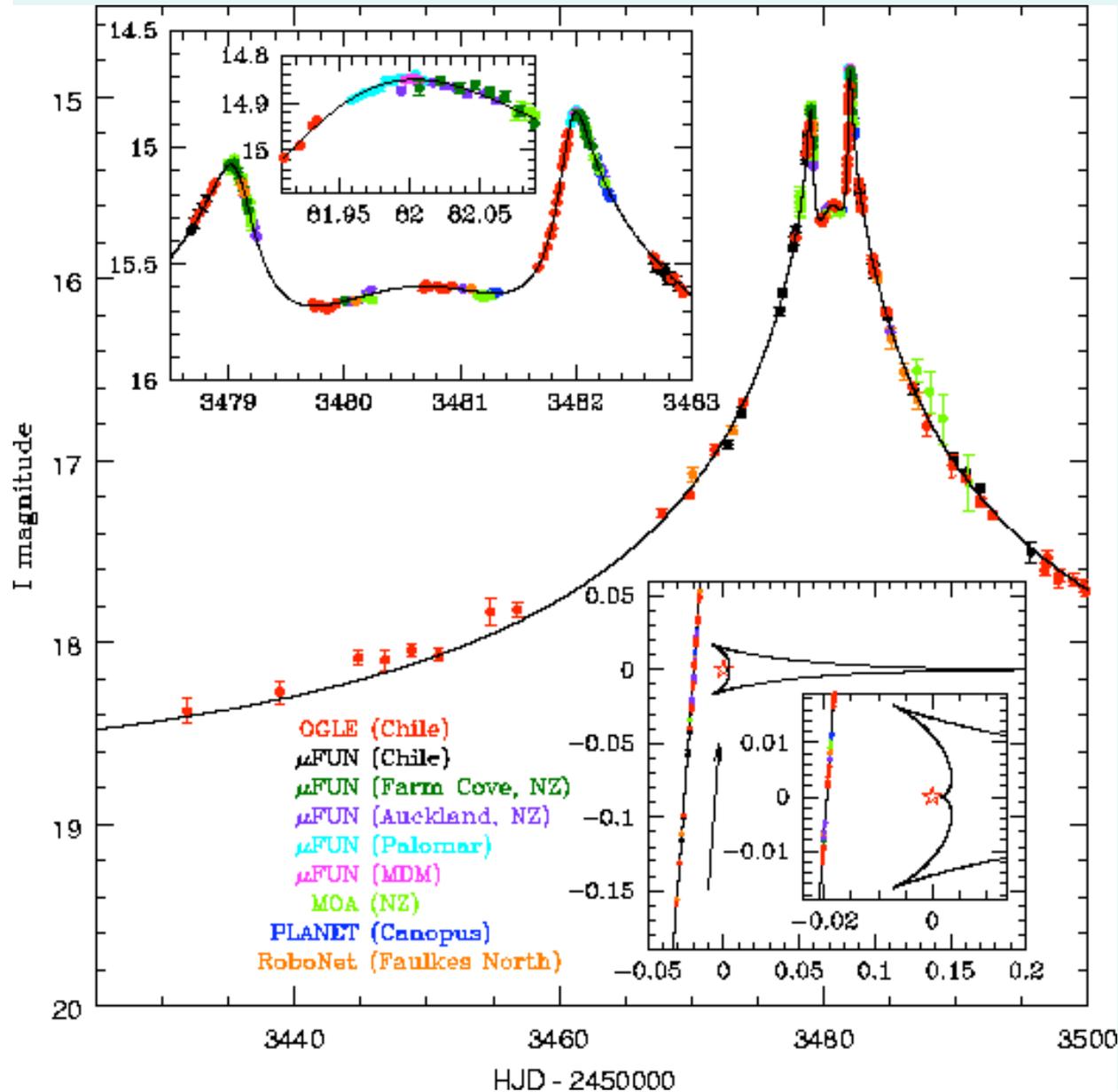


2004: MOA 2004-BLG-33

En cours de modélisation



2005 (1): OGLE 2005-BLG-071



Two models:

close binary :

$$d=0.758$$

$$q=6.7 \cdot 10^{-3}$$

wide binary :

$$d=1.294$$

$$q=7.1 \cdot 10^{-3}$$

Wide slightly favoured:

$$\Delta\chi^2 = 22$$

$$M_* \sim 0.13 M_{\text{sun}}$$

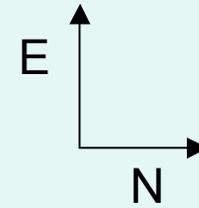
$$D_{\text{OL}} = 2.9 \pm 1.2 \text{ kpc}$$

$$0.9 M_{\text{JUP}}$$

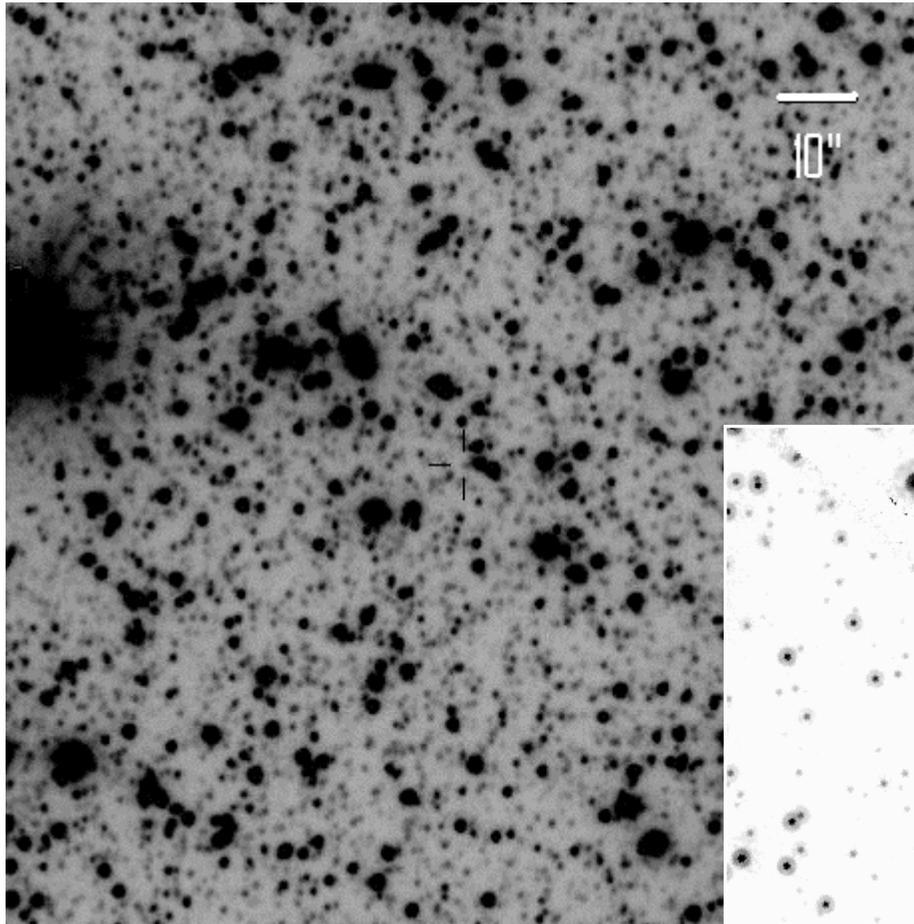
$$a \sim 2.3 \text{ AU}$$

$$P \sim 10 \text{ yr}$$

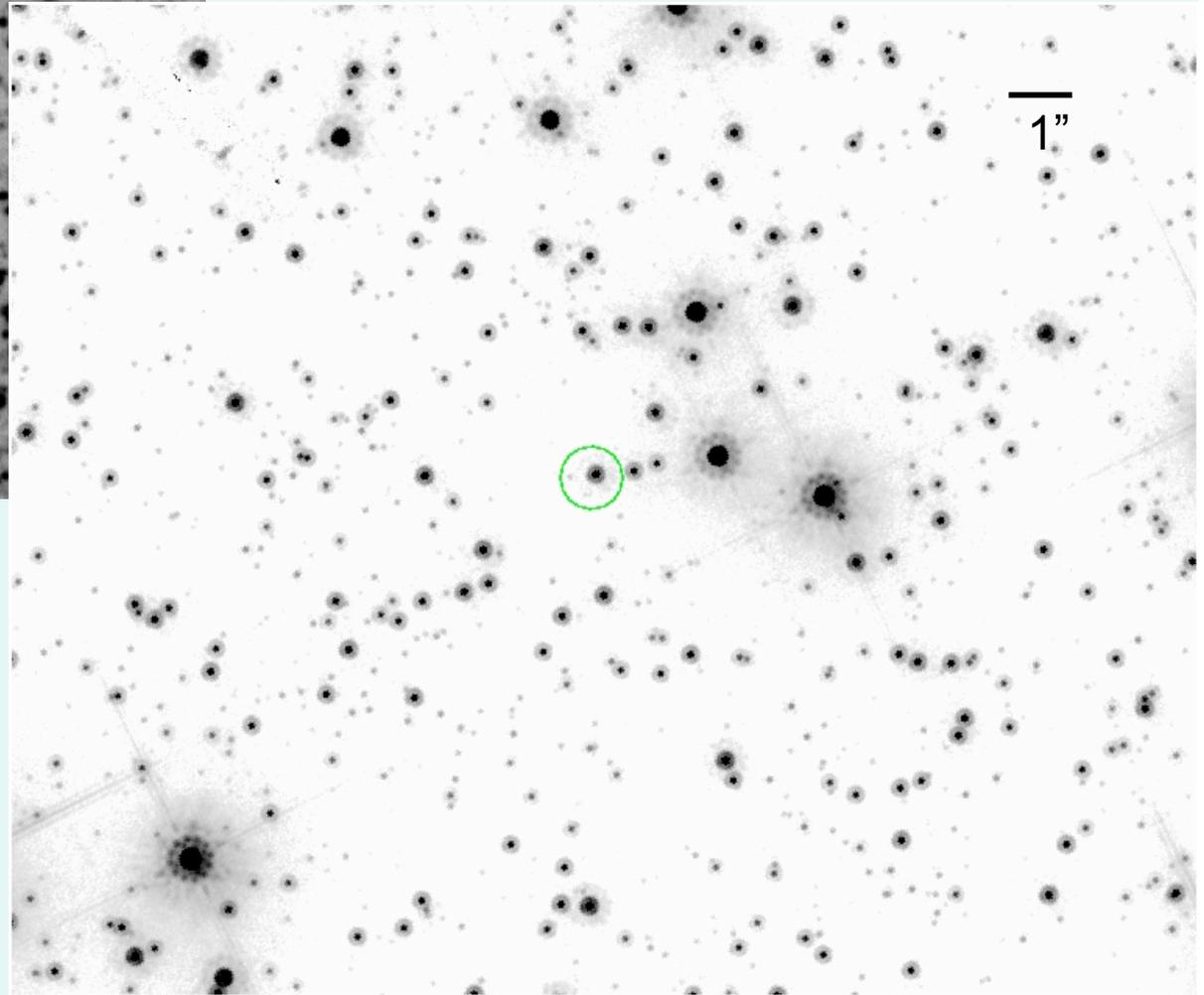
Subo Dong[©]



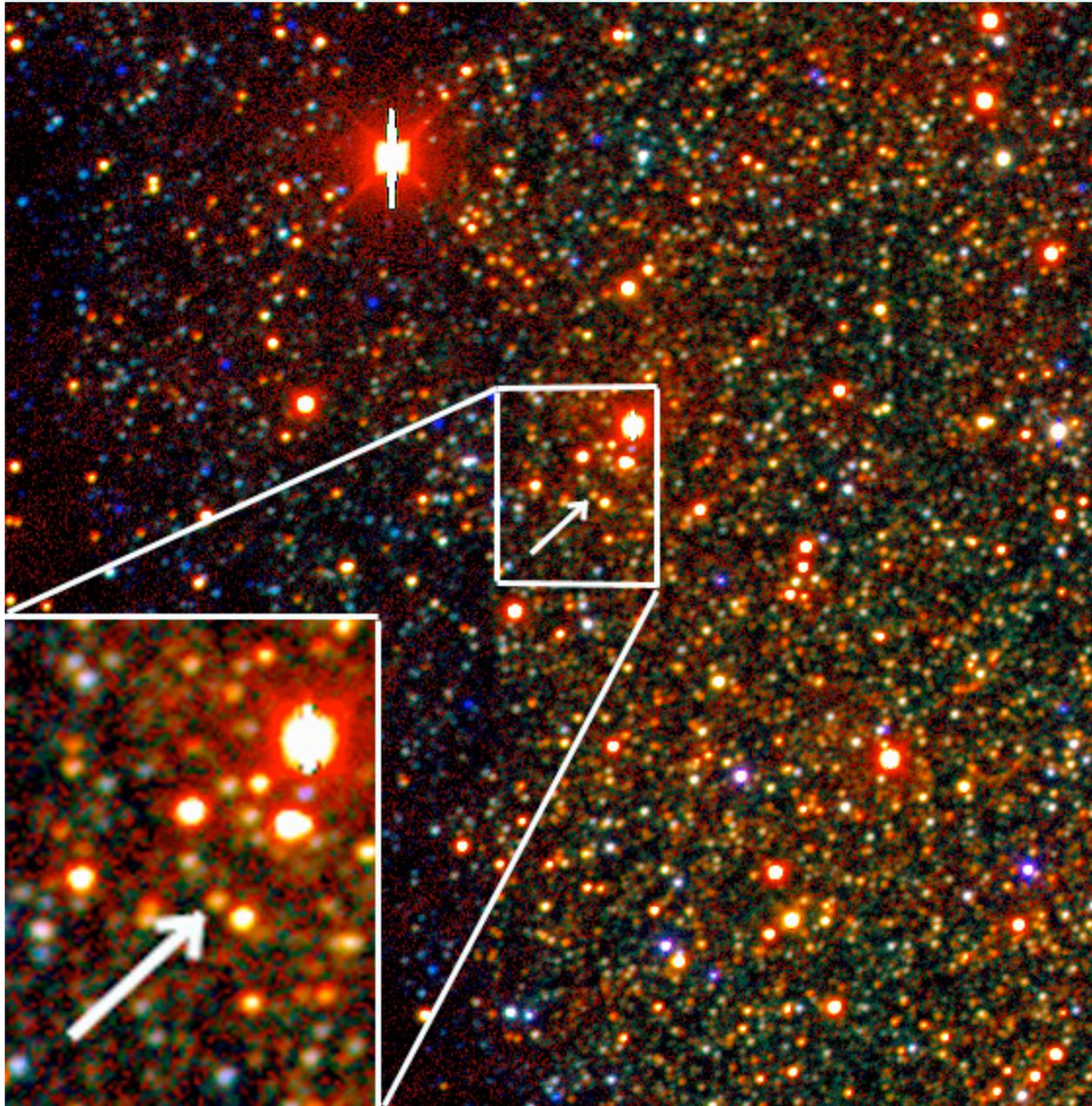
HST Image



OGLE Field



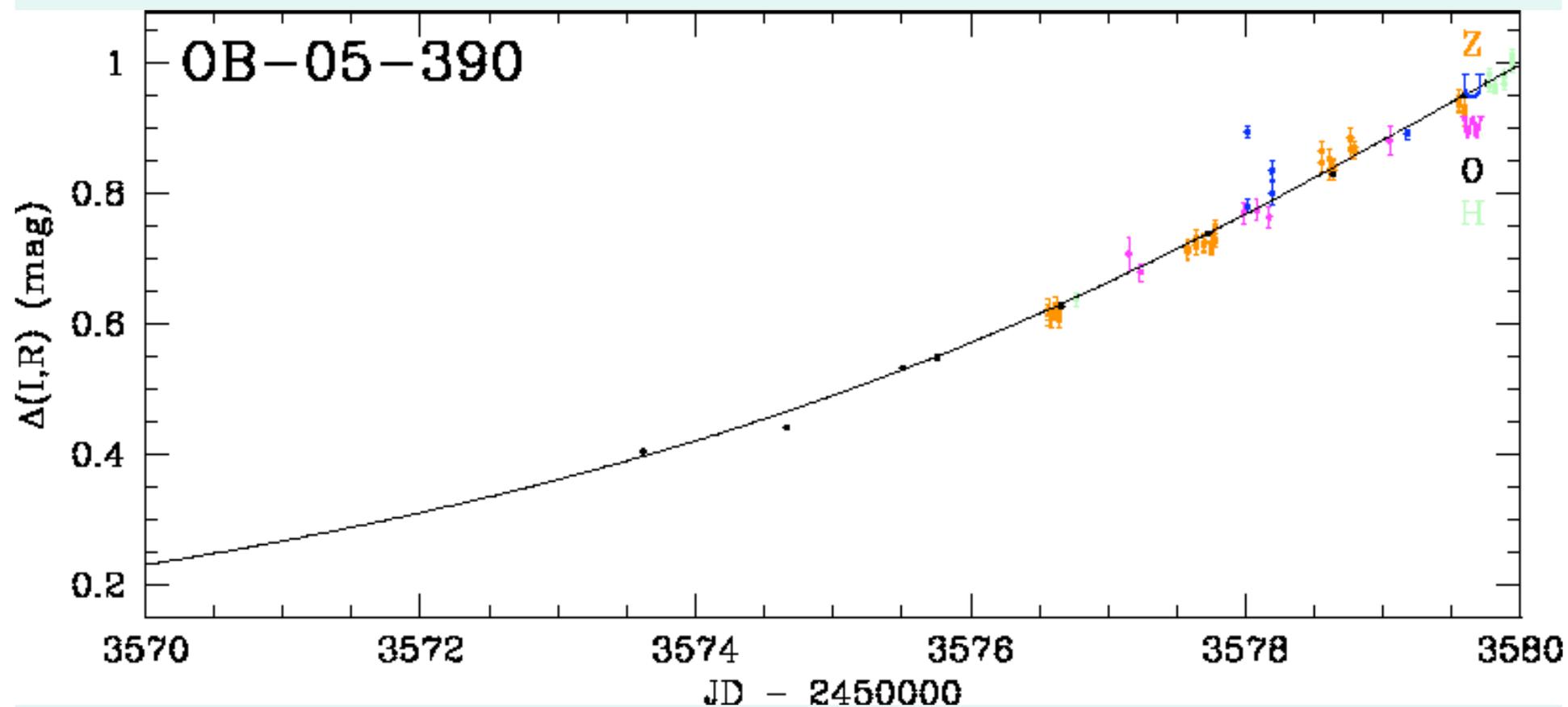
2005 (2): OGLE 2005-BLG-390



Historique d'une découverte (1)

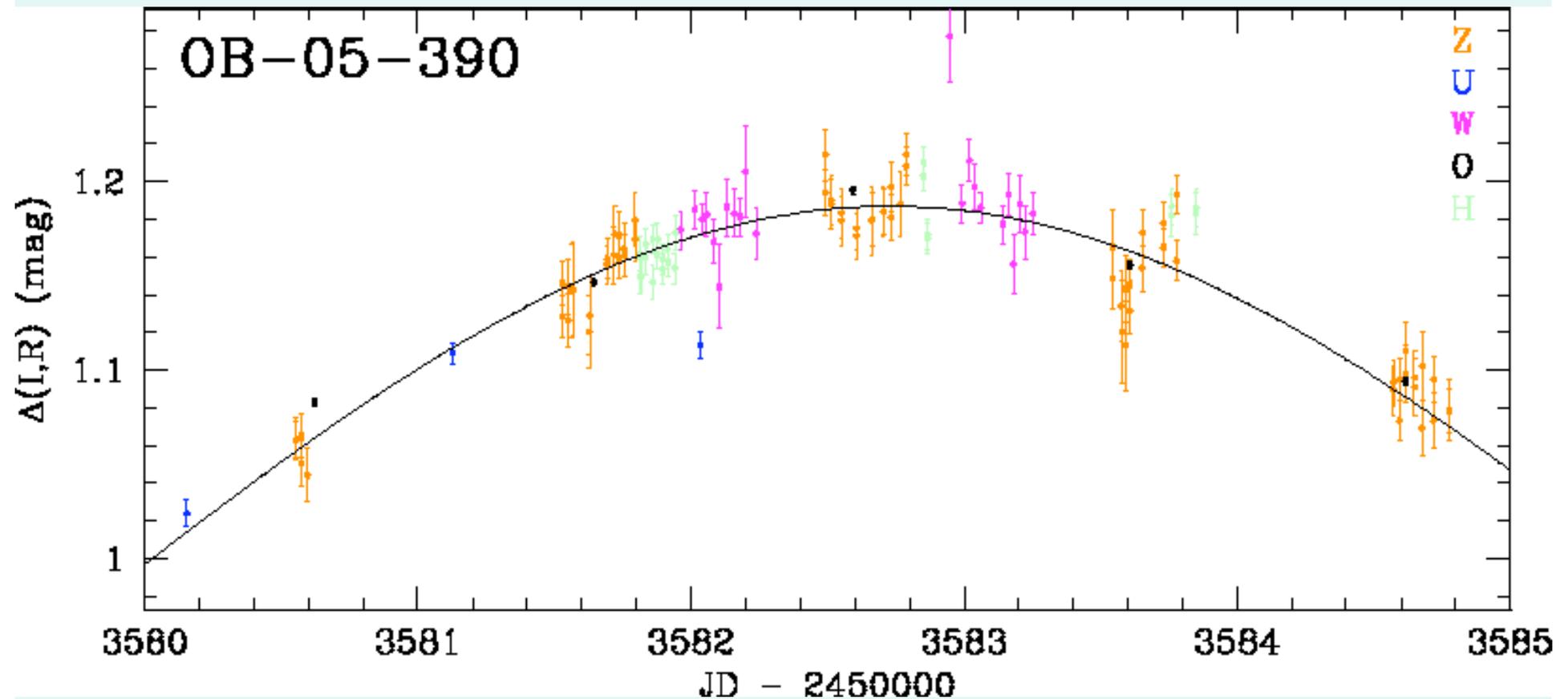
OGLE alerte le 11 juillet 2005

PLANET observe à partir du 25 juillet



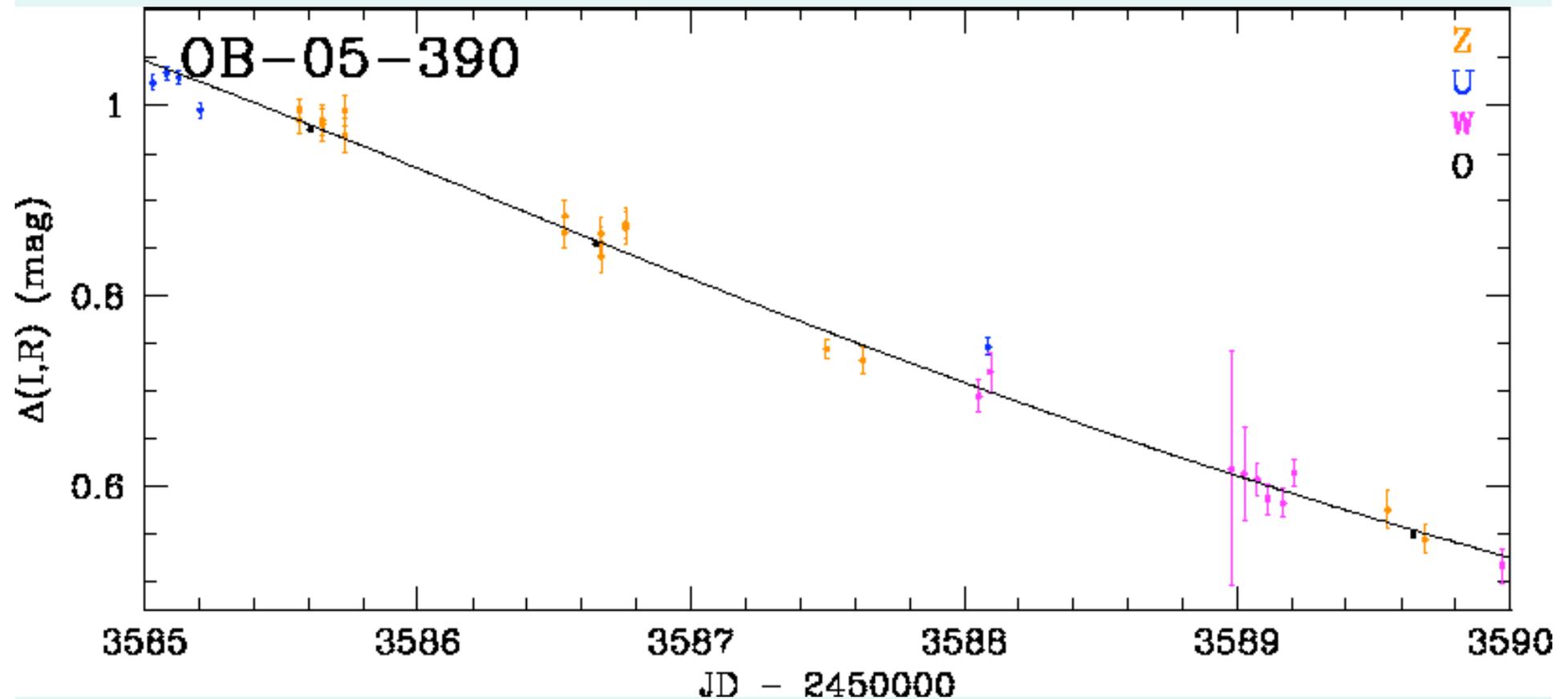
Historique d'une découverte (2)

Maximum atteint le 31 juillet: $A = 2.9$



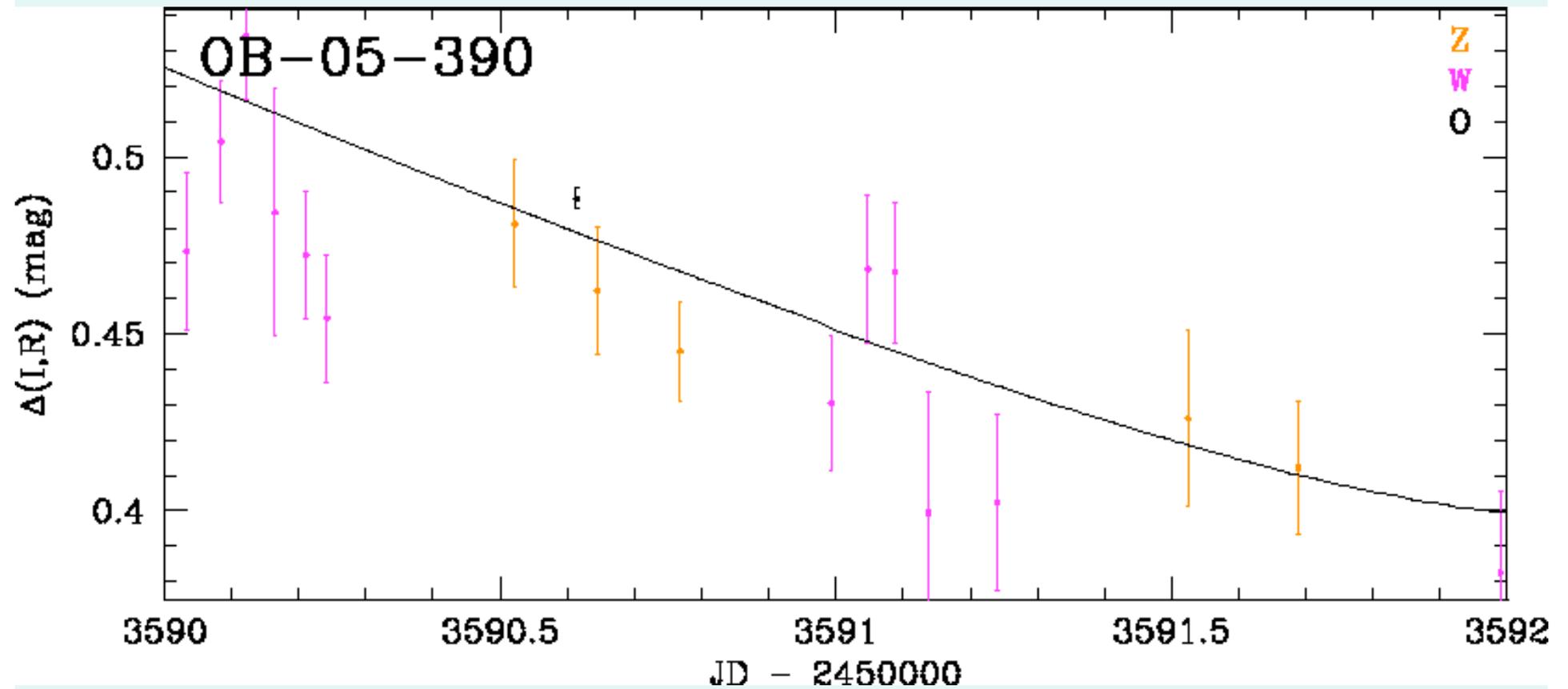
Historique d'une découverte (3)

Début août: another boring event ...



Historique d'une découverte (4)

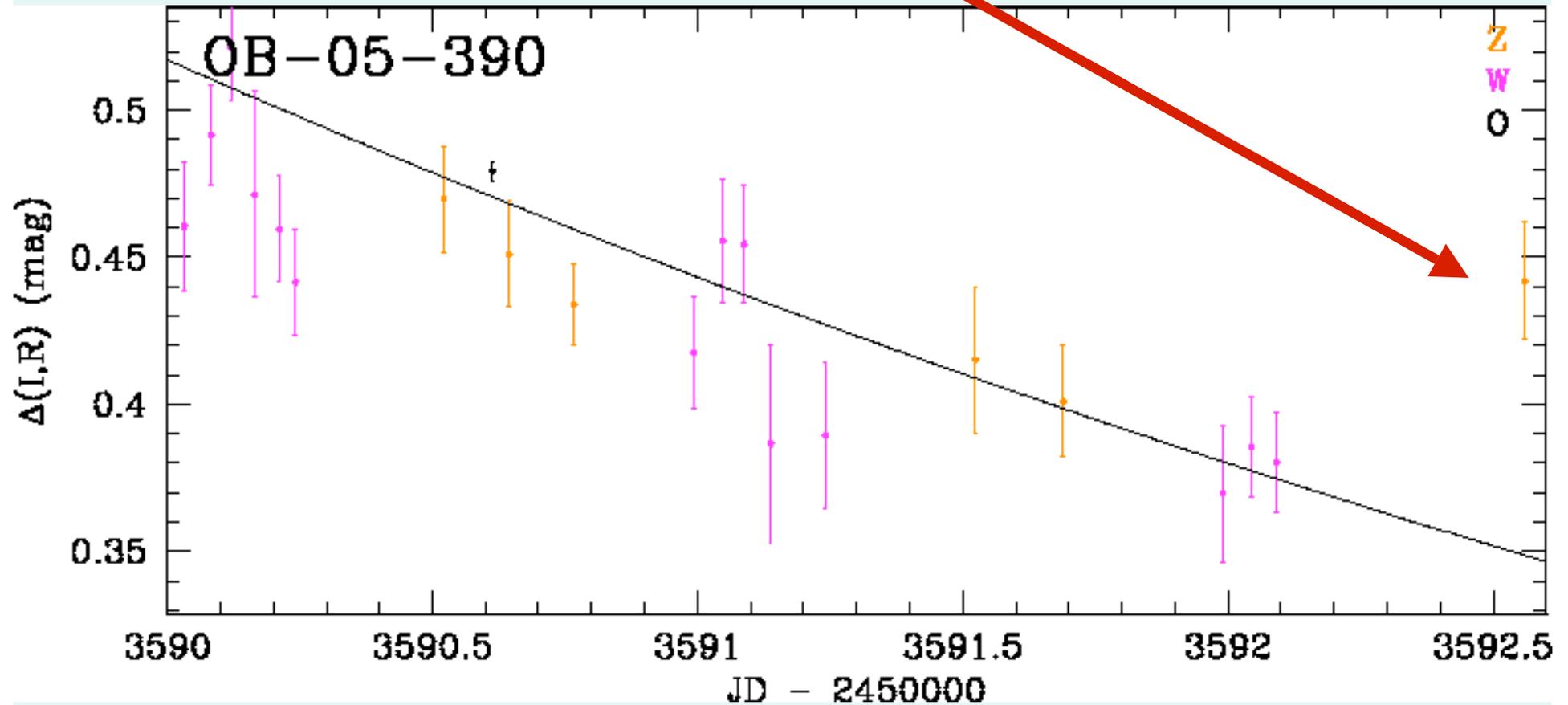
Should we drop it?



Historique d'une découverte (5)

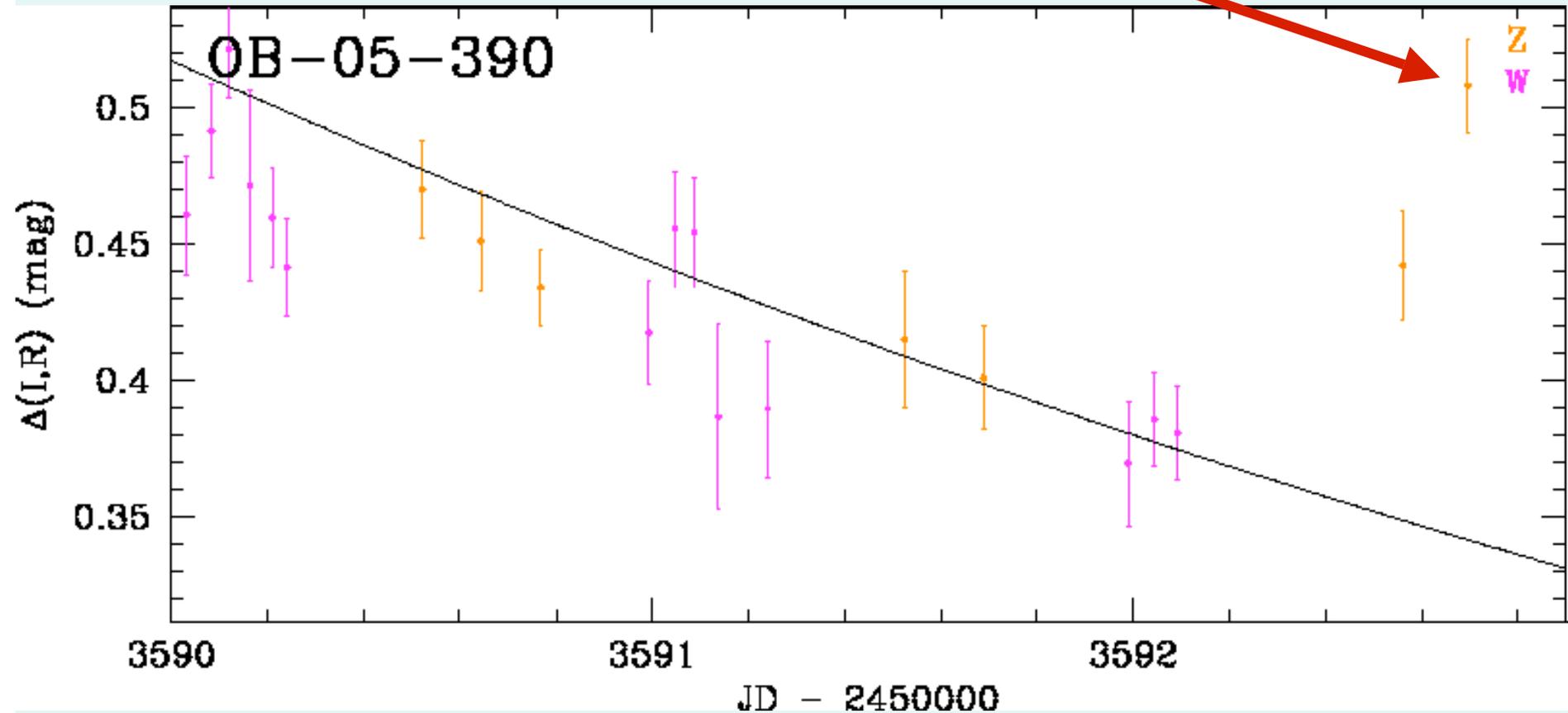
?

Nuit du 10 août



Historique d'une découverte (6)

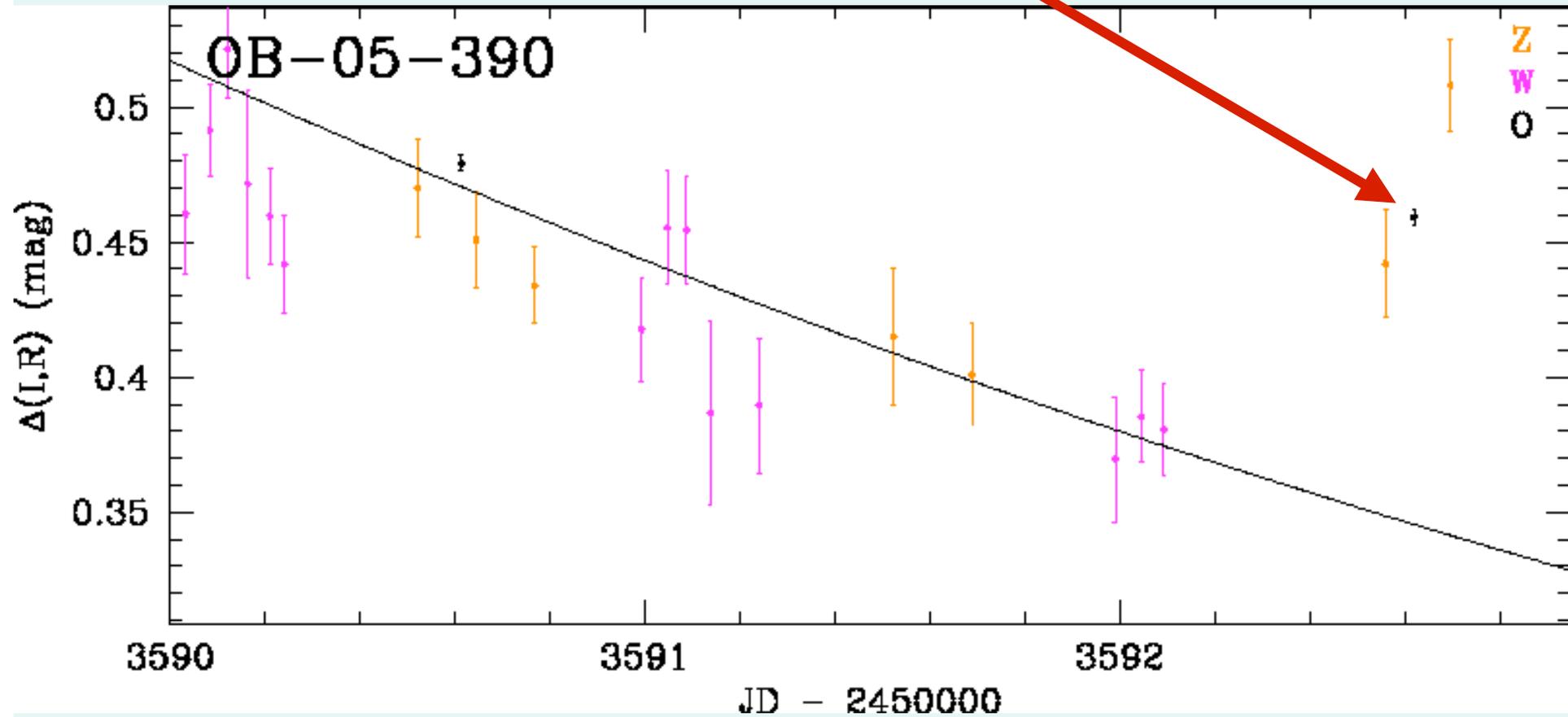
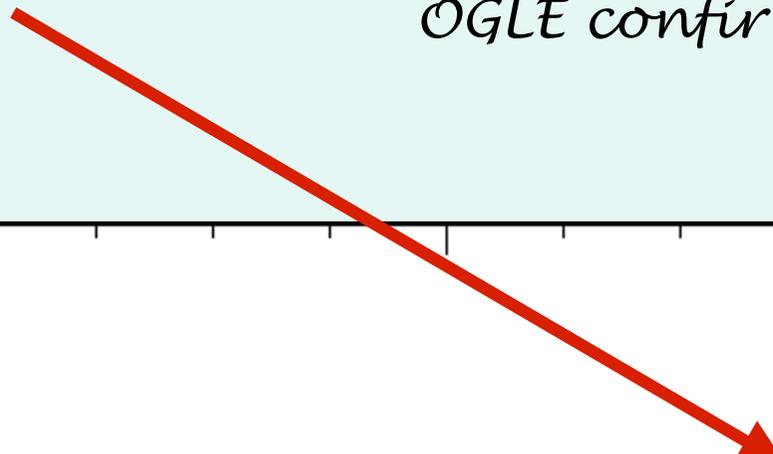
☹️ ???



Historique d'une découverte (7)



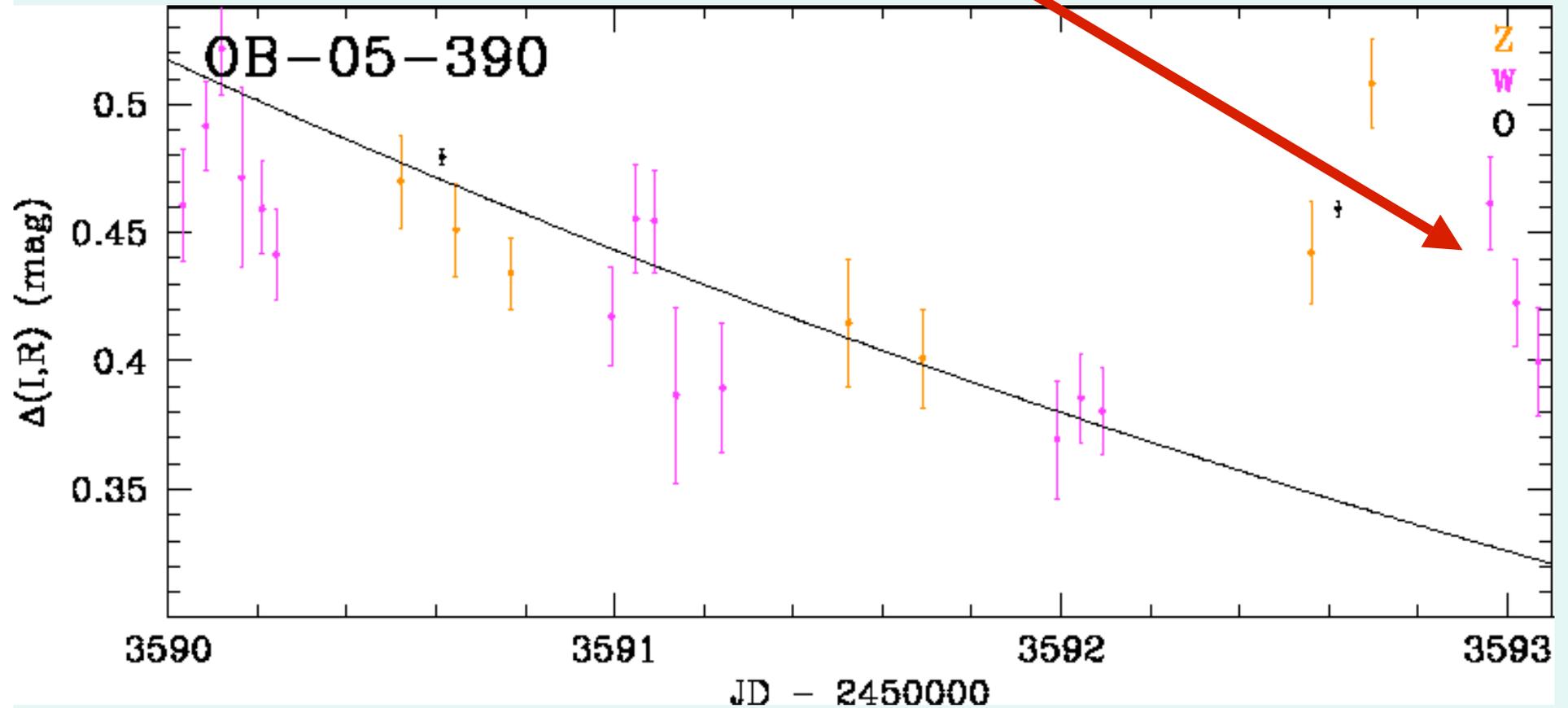
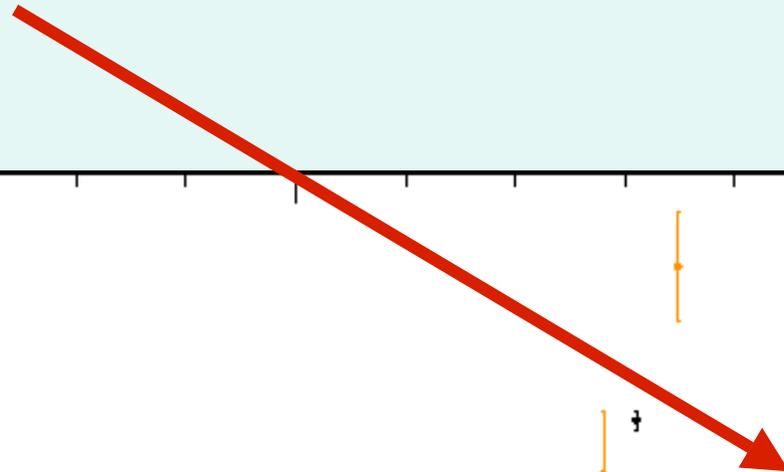
*Le 11 août,
OGLE confirme*



Historique d'une découverte (8)

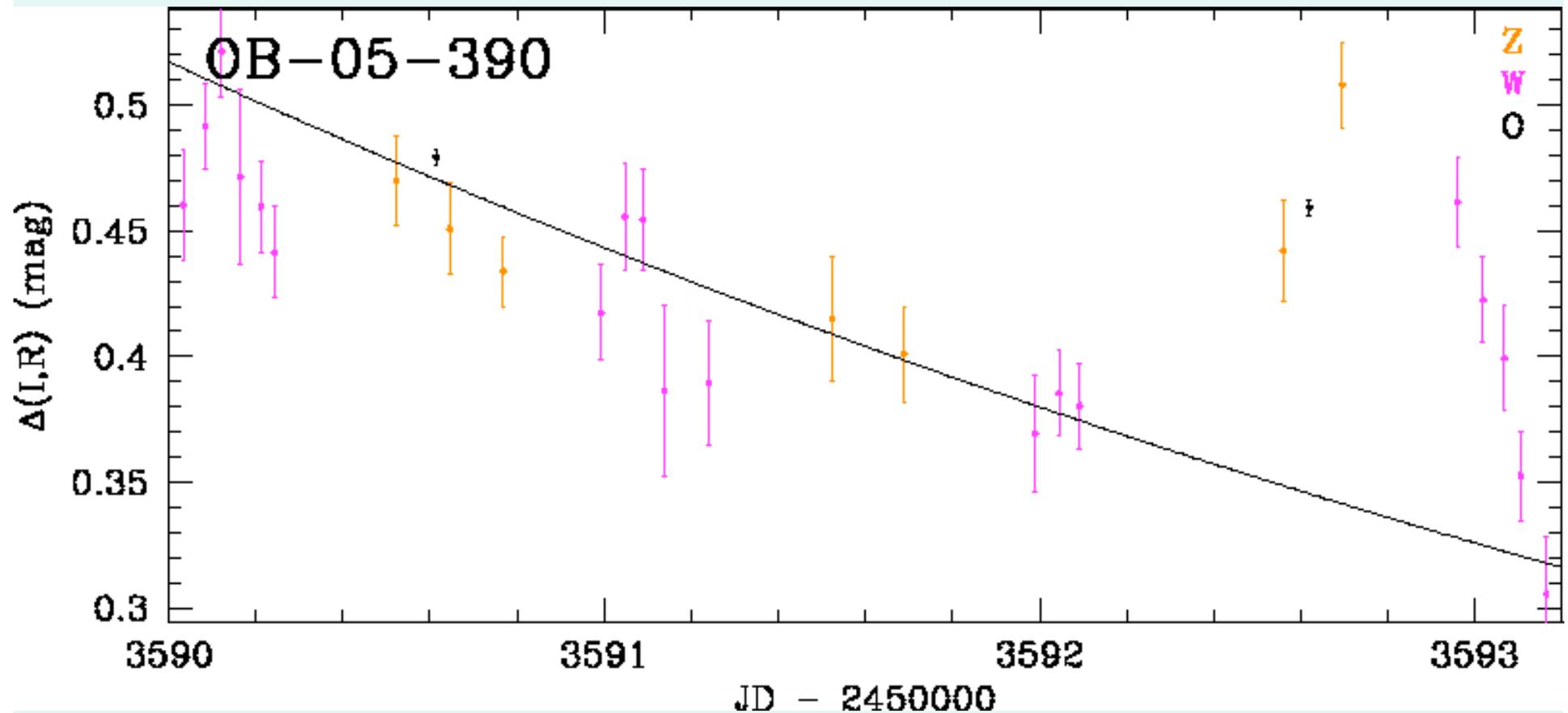


Yes !



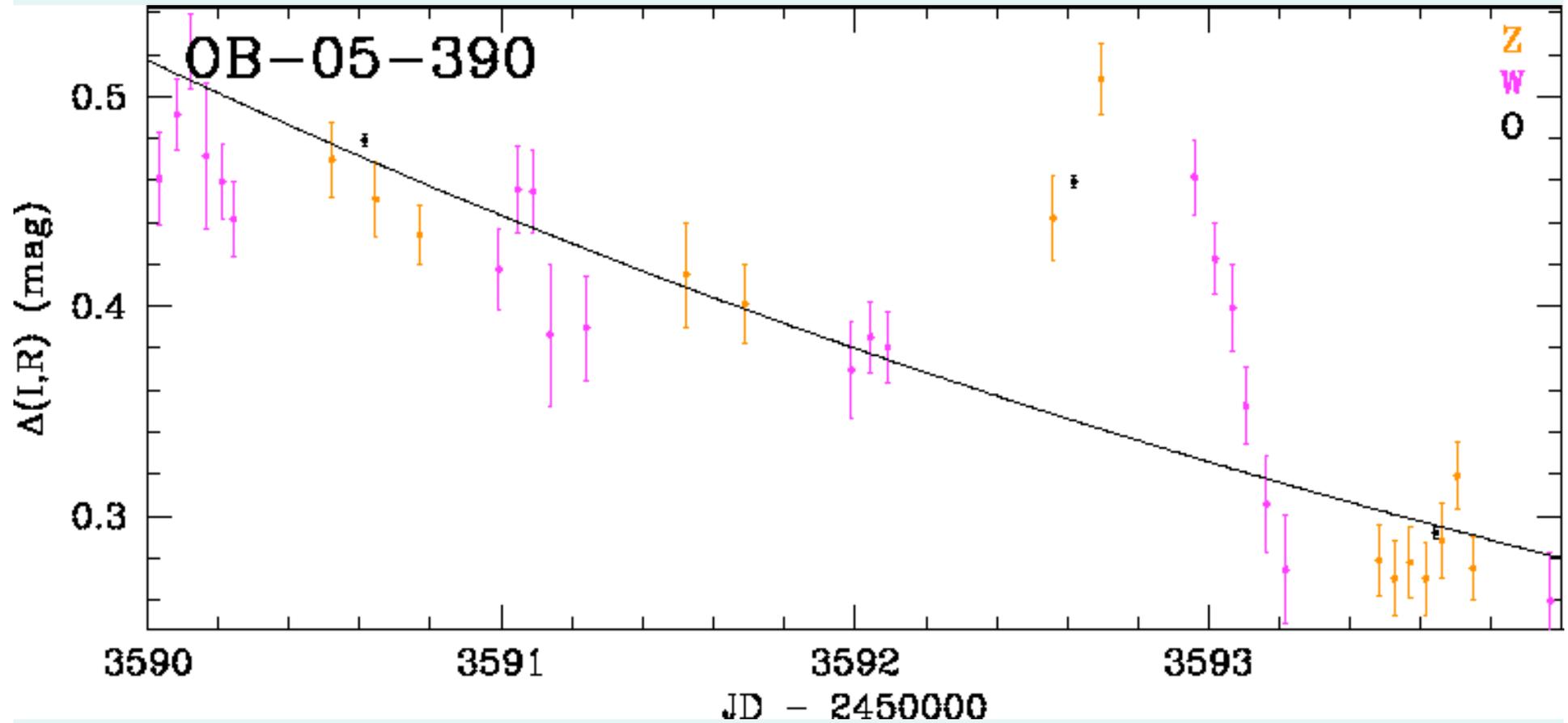
Historique d'une découverte (9)

☺ Yessssssssssss !



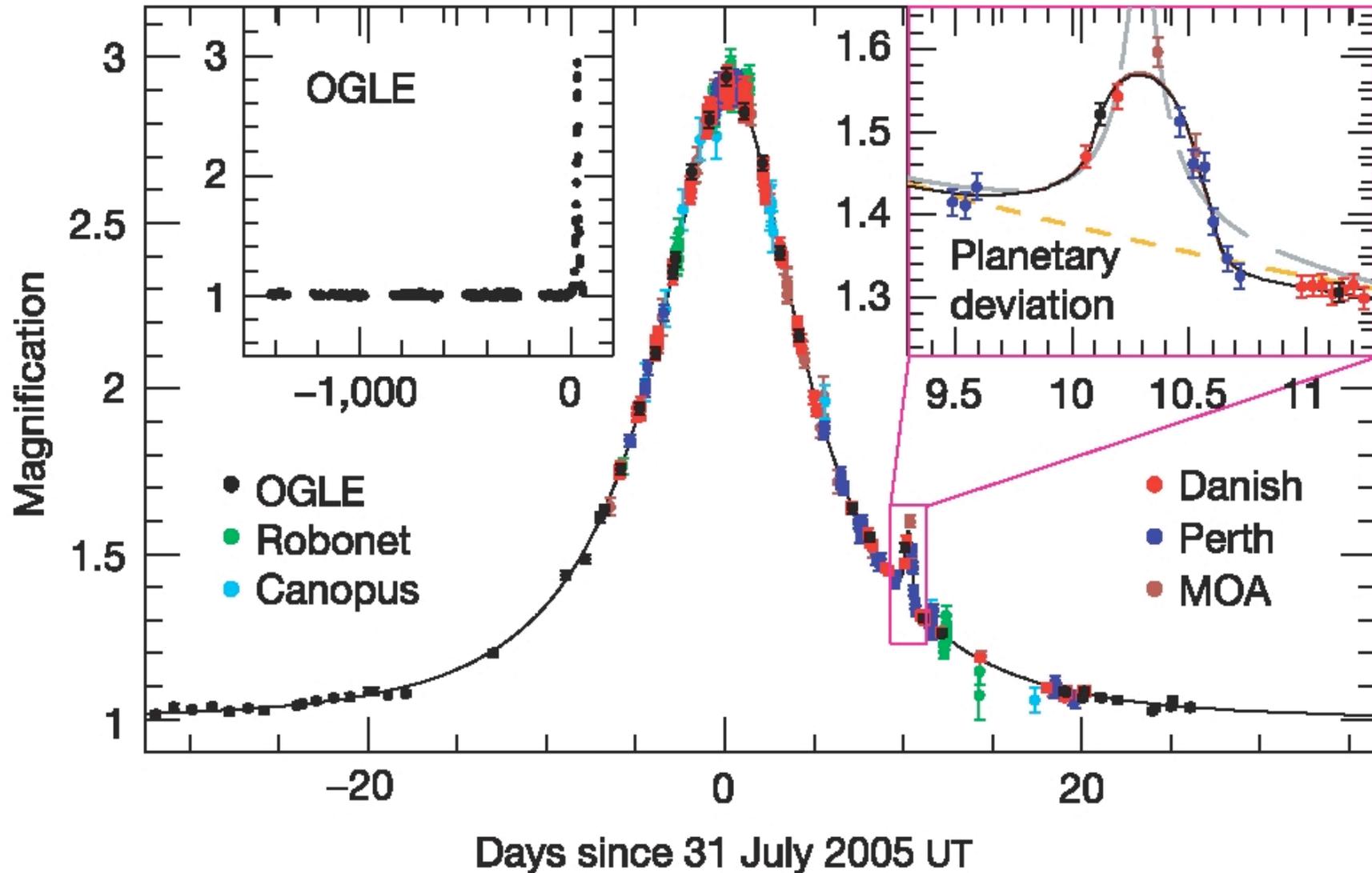
Historique d'une découverte (10)

☺ YESSSSSSSSSSSSSSSSSS!

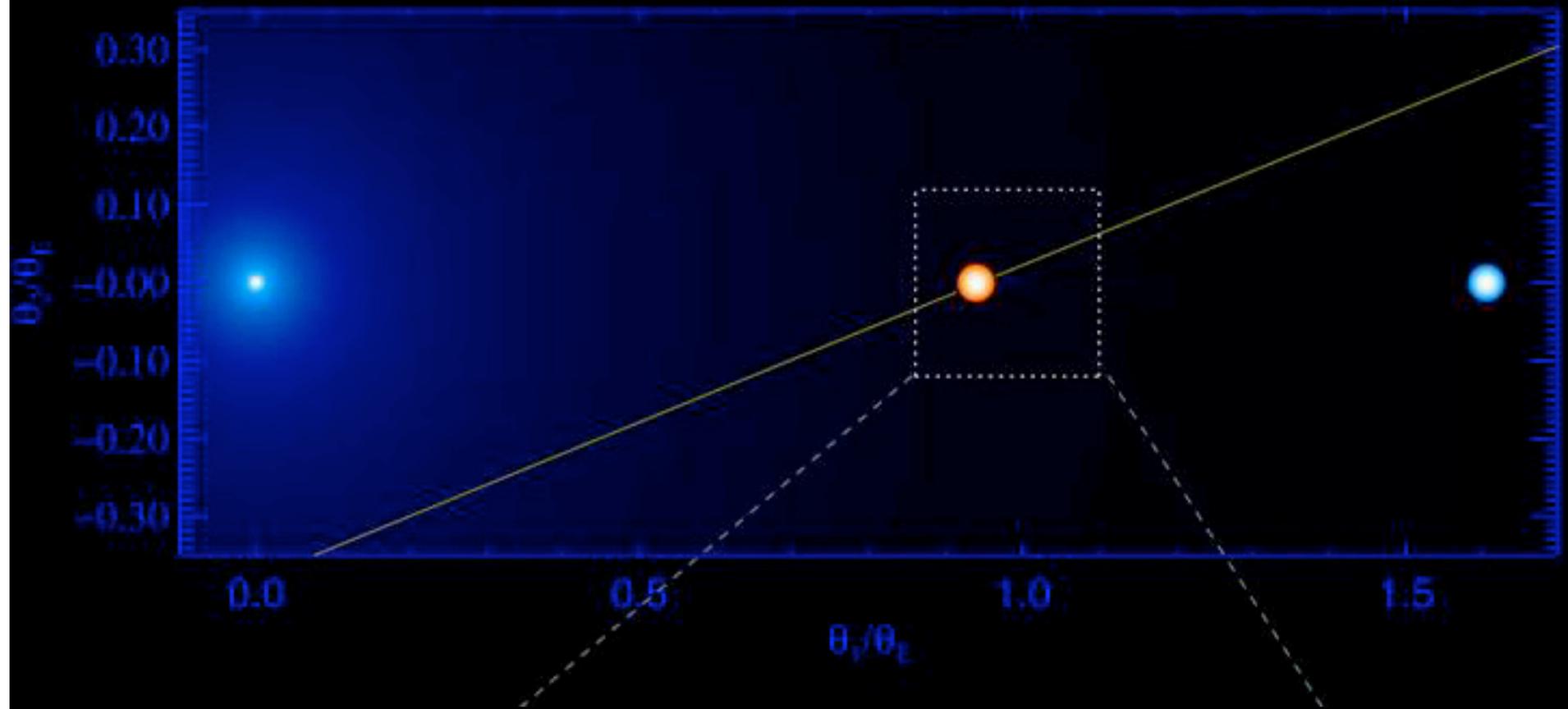


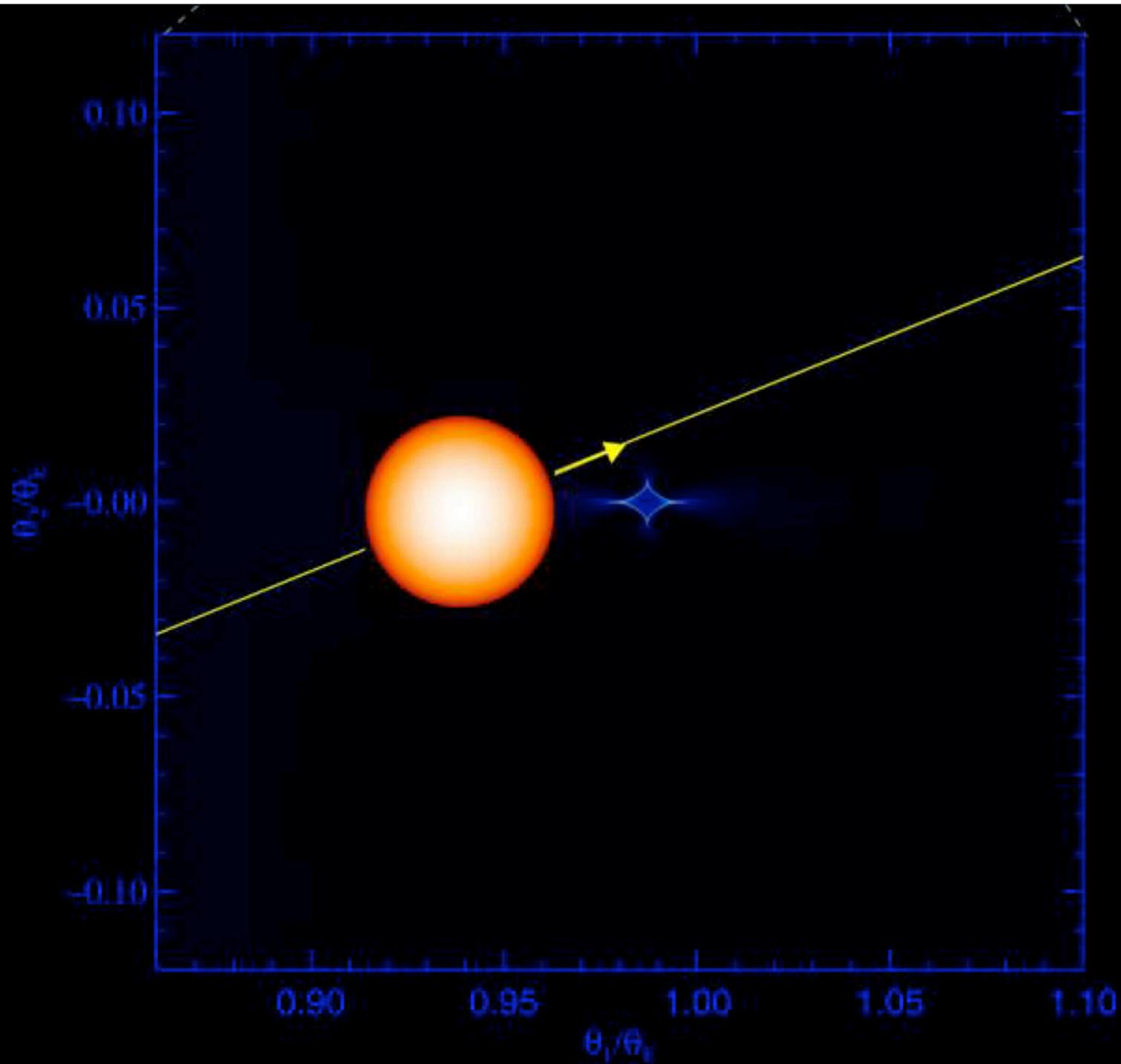
Une coopération: PLANET/RoboNET, OGLE, MOA-II

Au tour des modélisateurs!



Géométrie du système





Paramètres mesurés du modèle

Enfin un exemple canonique de planète par microlentille (Gould & Loeb 1992, Bennett & Rhie 1996)

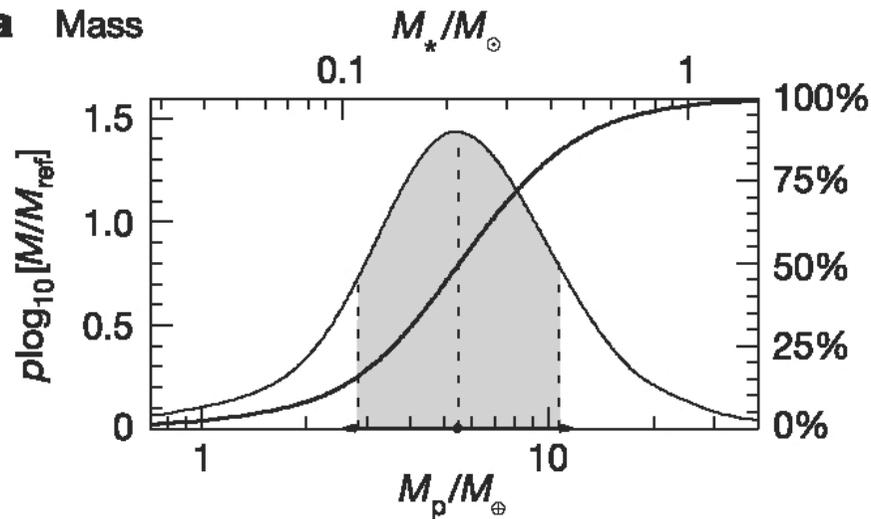
Table 1 | Microlensing fit parameters

d	$1.610 \pm 0.008R_E$
q	$(7.6 \pm 0.7) \times 10^{-5}$
Closest approach	$0.359 \pm 0.005R_E$
Einstein ring radius crossing time	11.03 ± 0.11 days
Time of closest approach	31.231 ± 0.005 July 2005 UT
Source star radius crossing time	0.282 ± 0.010 days
θ	2.756 ± 0.003 rad

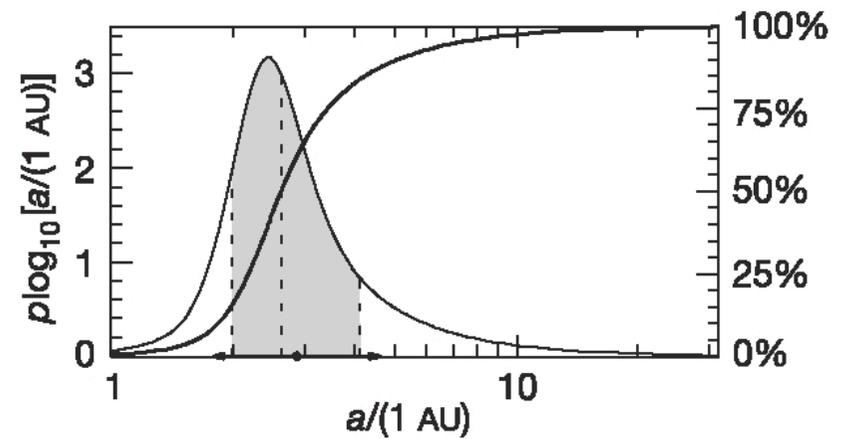
The parameters for the best binary lens model for the OGLE 2005-BLG-390 microlensing event light curve are shown with their 1σ uncertainties. Some of these parameters are scaled to the Einstein ring radius, which is given by $R_E = 2\sqrt{GM D_L(D_S - D_L)/(c^2 D_S)}$, where M is the mass of the lens, G is the newtonian constant of gravitation, c the speed of light in vacuum, and D_L and D_S are the lens and source distances, respectively.

Densité de probabilité des paramètres déduits

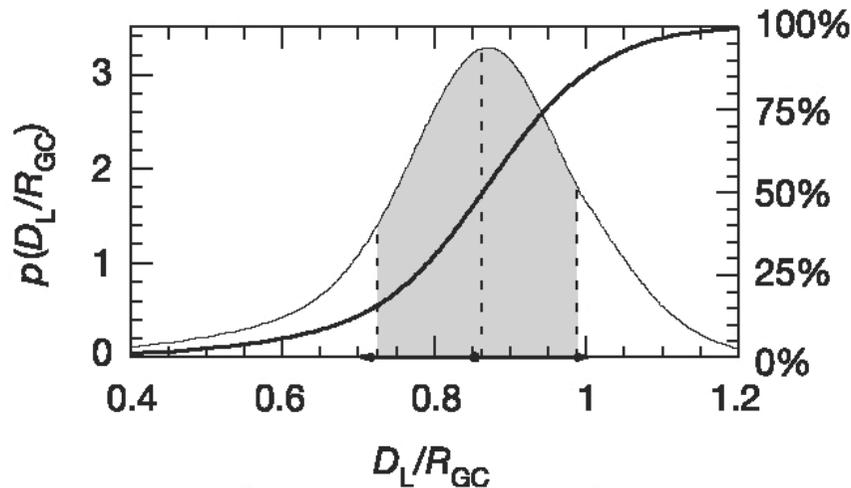
a Mass



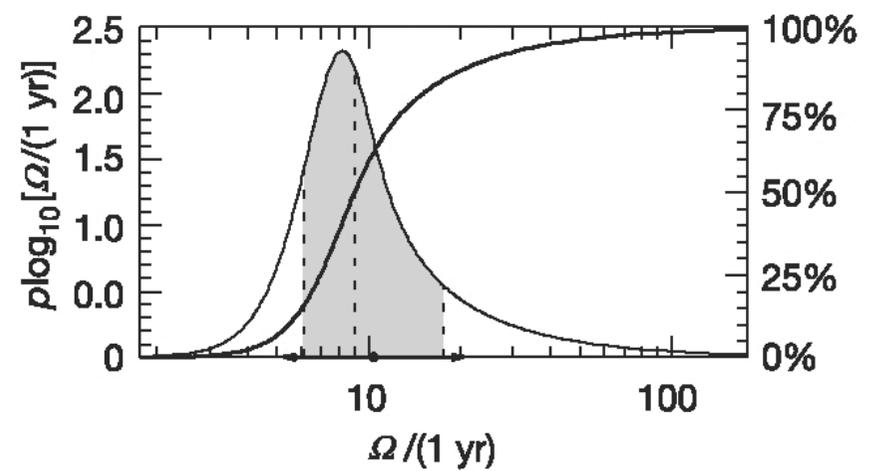
c Orbital radius



b Lens distance



d Orbital period



Paramètres adoptés

- Source distance $D_S = 1.05 \pm 0.25 R_{GC}$ ($R_{GC} = 7.62 \pm 0.32$ kpc)
- Source star: a Galactic Bulge giant G4 III, $R_S = 9.6 \pm 1.3 R_{SUN}$
- Primary lens mass: $M_* = 0.22^{+0.21}_{-0.11} M_{SUN}$
- Primary lens distance: $D_L = 6.6 \pm 1.0$ kpc
- Planet mass: $M_p = 5.5^{+5.5}_{-2.7} M_{EARTH}$
- Planet separation: $a = 2.6^{+1.5}_{-0.6}$ AU
- Orbital period: $P = 9.0^{+8.7}_{-2.9}$ years

Précision de ces paramètres?

Cas de OGLE 2005-BLG-071

- *Utilisation du modèle galactique: dépend des contraintes: t_E seul, t_E et taille finie, t_E et parallaxe:*

$$M_* = 1.27, 0.67, 0.25 M_{\text{sun}}$$

- *Dans le cas où les effets de taille finie et la parallaxe sont mesurés (en cours):*

$$\pi_E = 0.47 \pm 0.21 \quad \pi_{\text{rel}} = \pi_E \theta_E = 0.23 \text{ mas} \Rightarrow D_L = 2.9 \text{ kpc si } D_S = 8 \text{ kpc}$$

$$M_* = \frac{1}{8.15} \frac{\theta_E}{\pi_E} = 0.13 M_{\text{sun}} \Rightarrow M_p = 0.9 M_{\text{jup}}$$

- *Utilisation du « blending »: on suppose que le blending est dû à la lentille:*

$$I_s = 19.53 \quad I_b = 21.29 \quad A_I = 1.20 \Rightarrow I_{0,b} \geq 20.1 \Rightarrow M_{\text{lens}} \geq 7.8 \Rightarrow \text{ST} \geq \text{M2V} \Rightarrow M \leq 0.4 M_{\text{sun}}$$

Température et rayon de la planète OGLE 2005-BLG-390

- *Caractéristiques de l'étoile:*

$$L_* = 0.0057 L_{\text{SUN}}, R_* = 0.23 R_{\text{SUN}}, T_* = 3320 \text{ K}$$

- *Caractéristiques de la planète:*

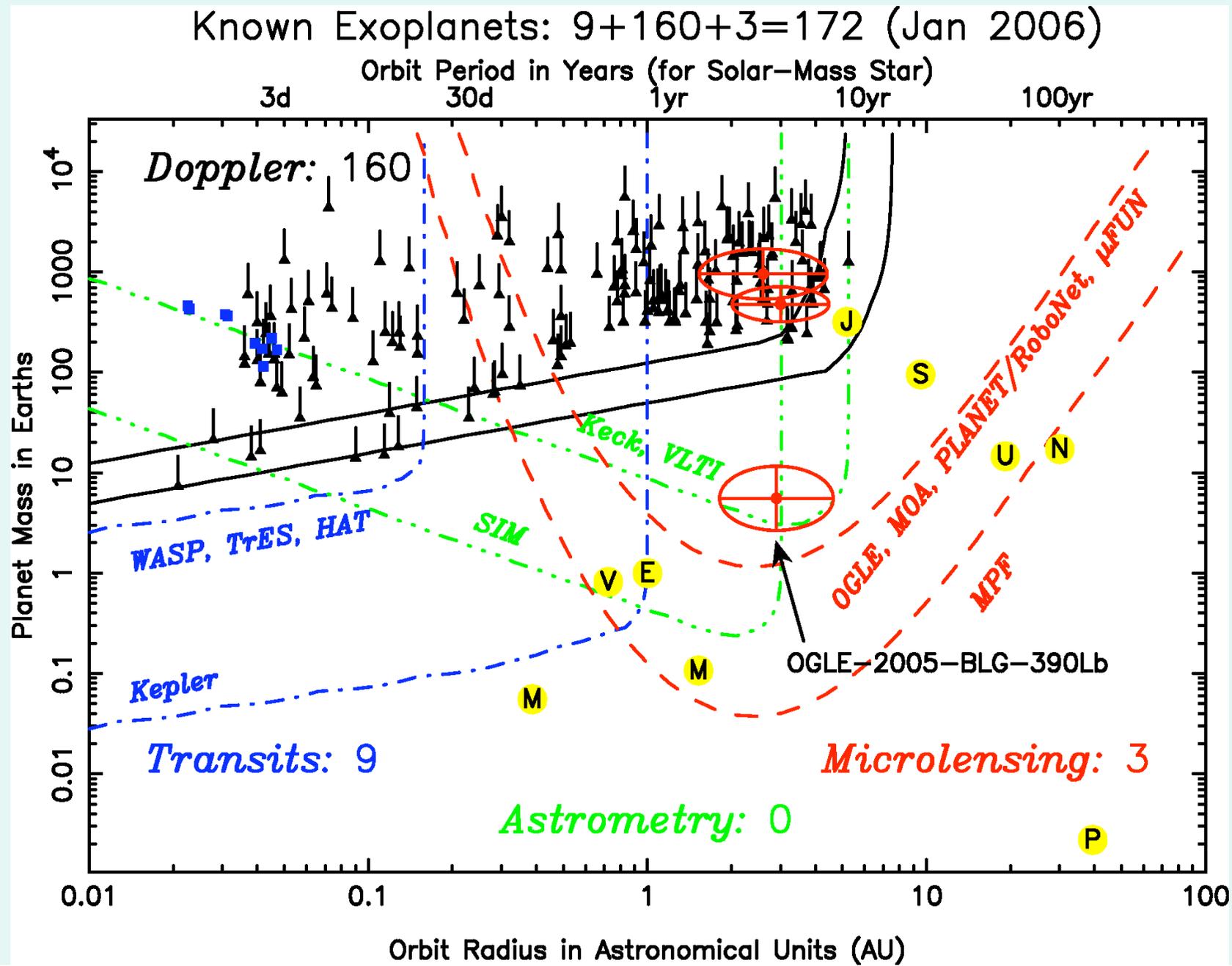
$$T_p = T_* \sqrt{\frac{R_*}{430 a}} (1 - A)^{1/4} \quad T_p = 42 \text{ K} = -230 \text{ }^\circ\text{C} \text{ si } A = 0.4 \text{ (Neptune)}$$

- *Modèle Léger et al. (2004):*

$$R_p = 1.9 R_{\text{EARTH}} \text{ si } \rho = 4.34 \text{ g cm}^{-3} : \text{ planète océan}$$

$$R_p = 1.6 R_{\text{EARTH}} \text{ si } \rho = 7.74 \text{ g cm}^{-3} : \text{ planète rocheuse}$$

Diagramme masse - séparation des exoplanètes connues



26 janvier 2006: Nature

LETTERS

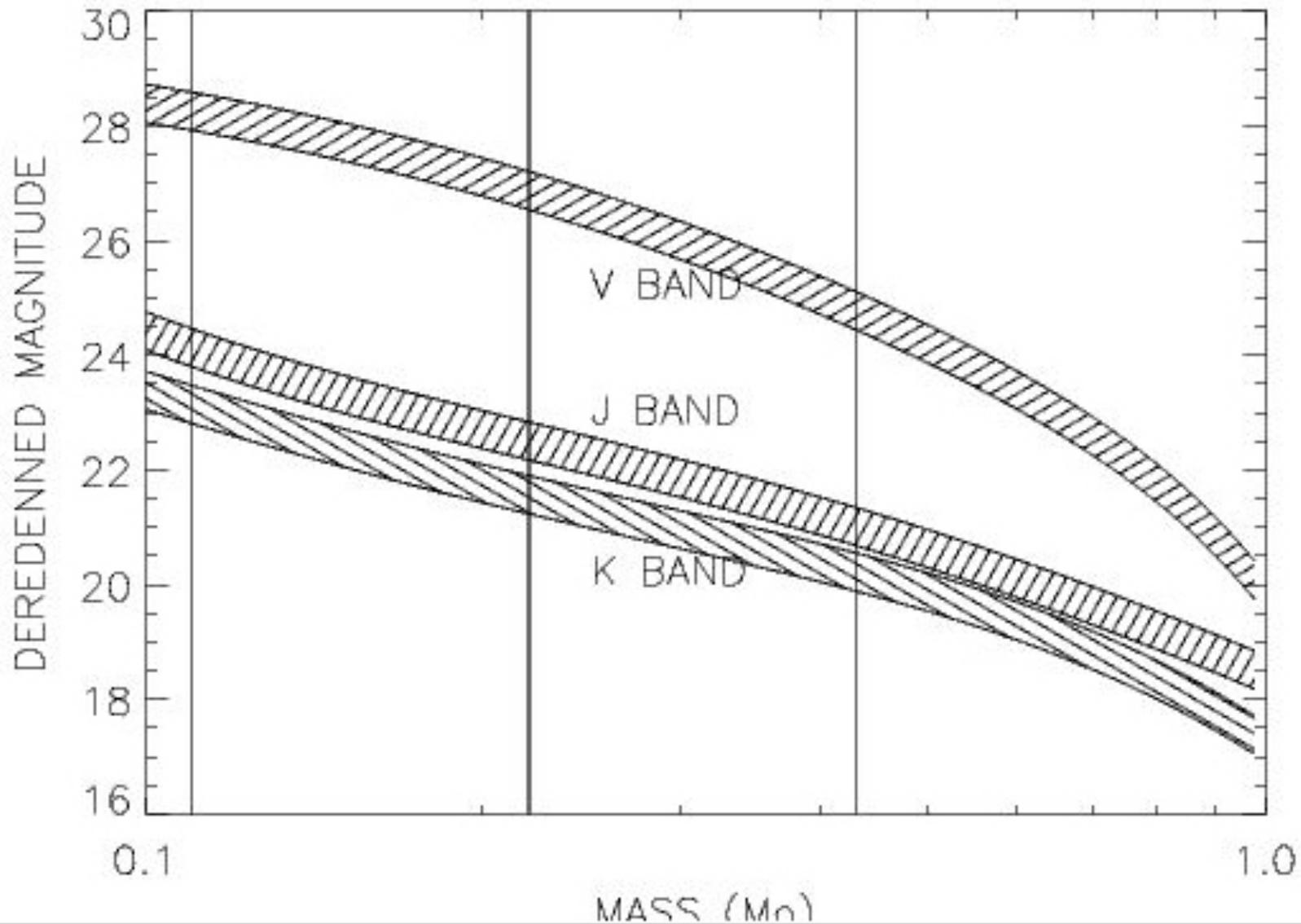
Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing

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

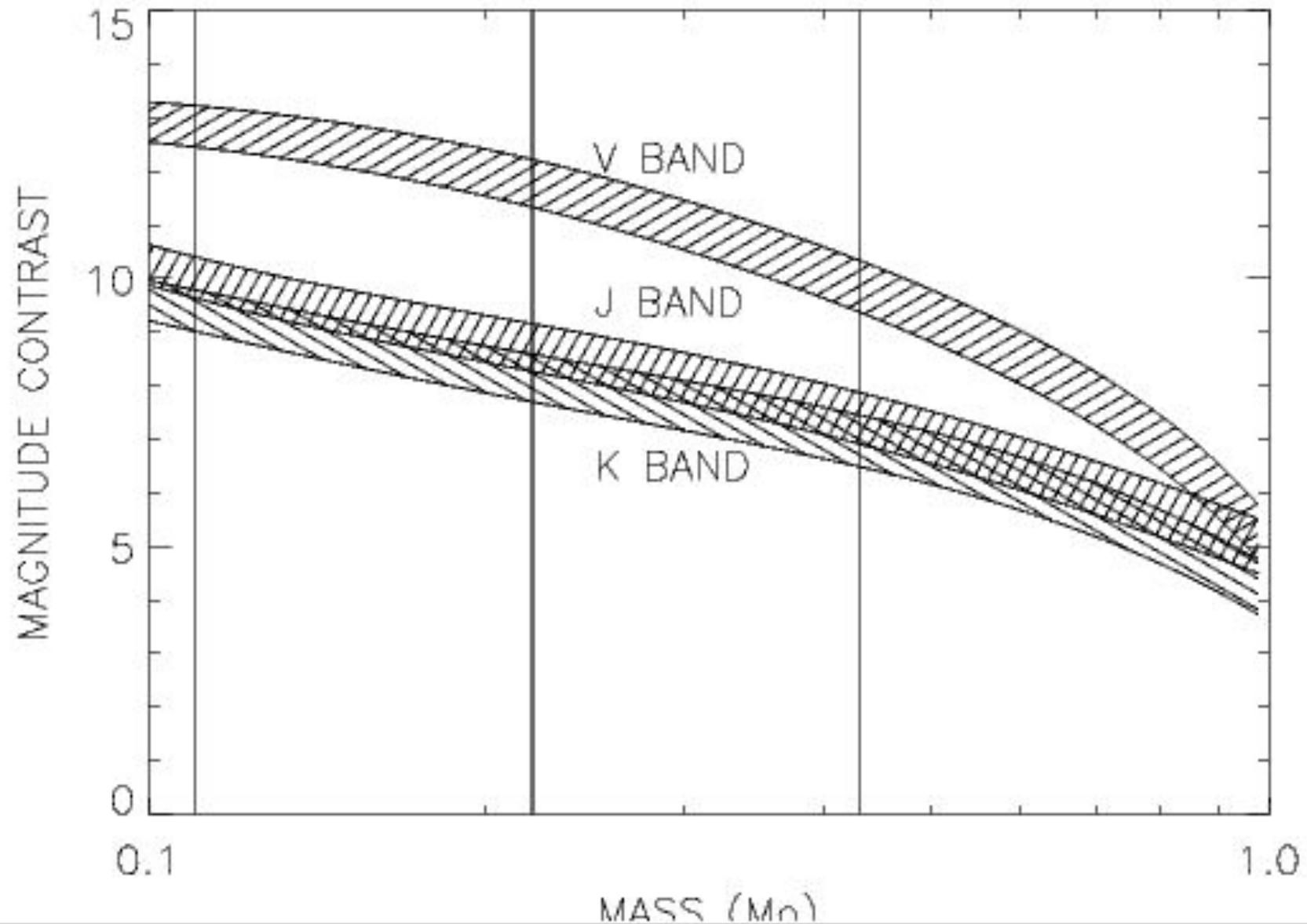
Et maintenant ...

Détecter l'étoile dans 10 ans?

$$\mu = 6.8 \pm 1.0 \text{ mas yr}^{-1}$$

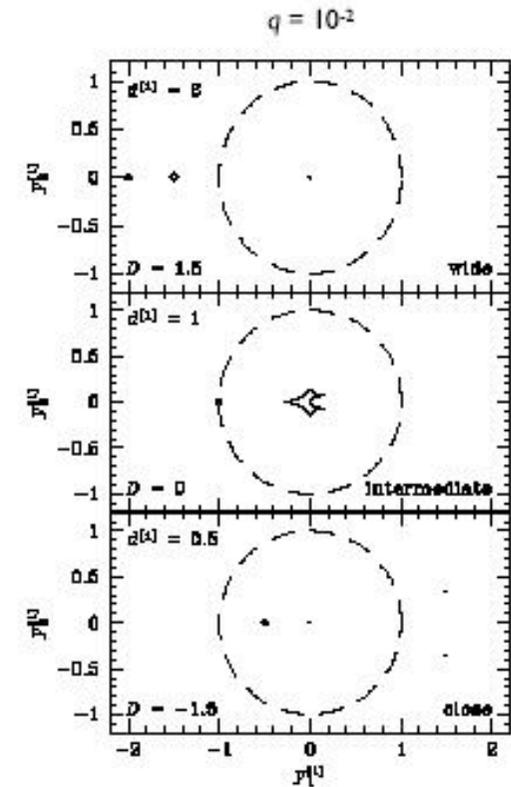
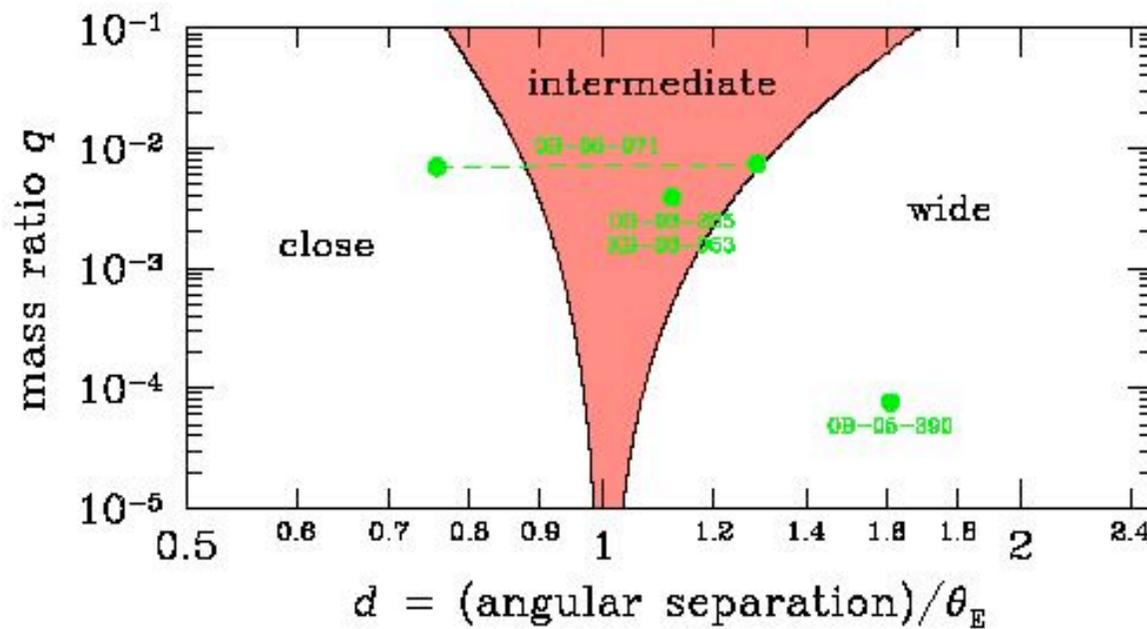


L'important, c'est ... le contraste



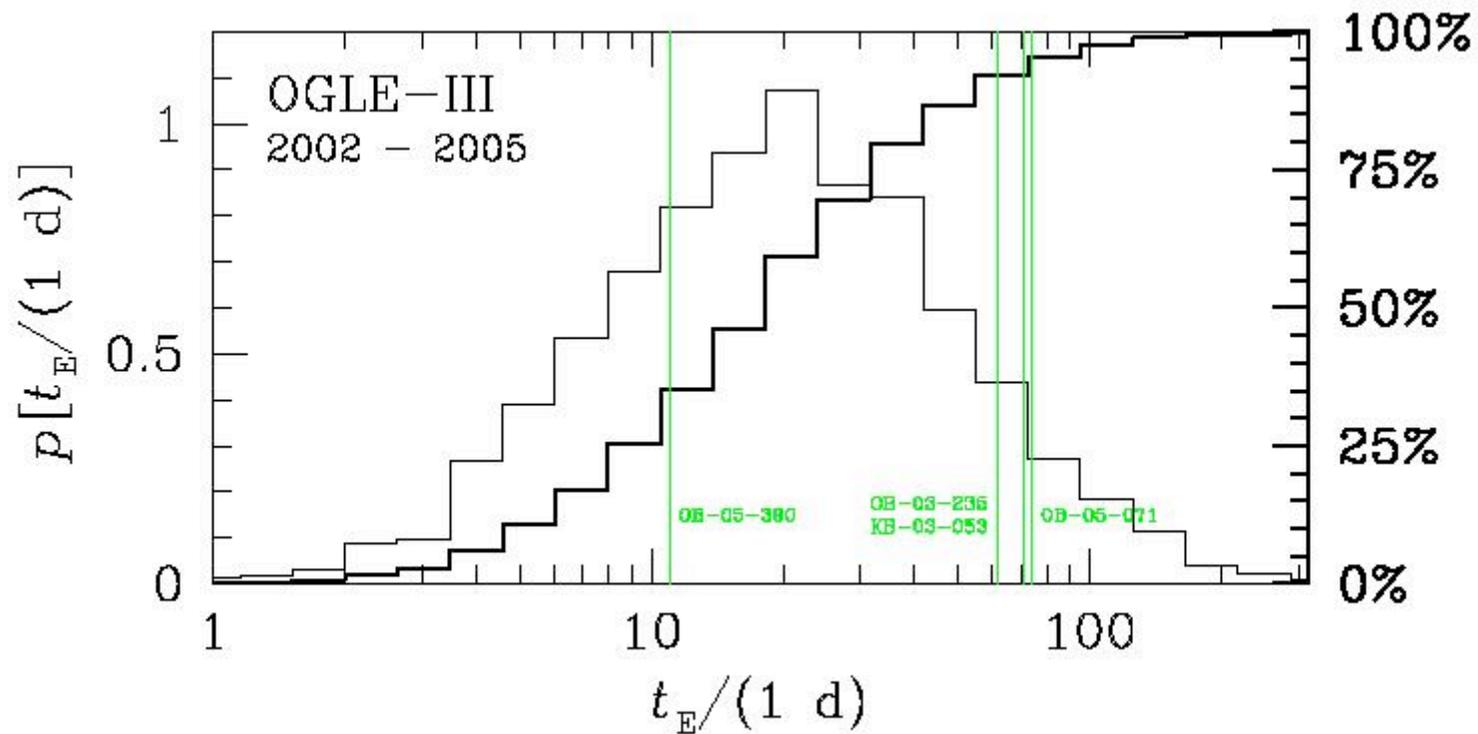
Stratégie pour le futur

Ne pas arrêter trop tôt le suivi: $d = 1.6$

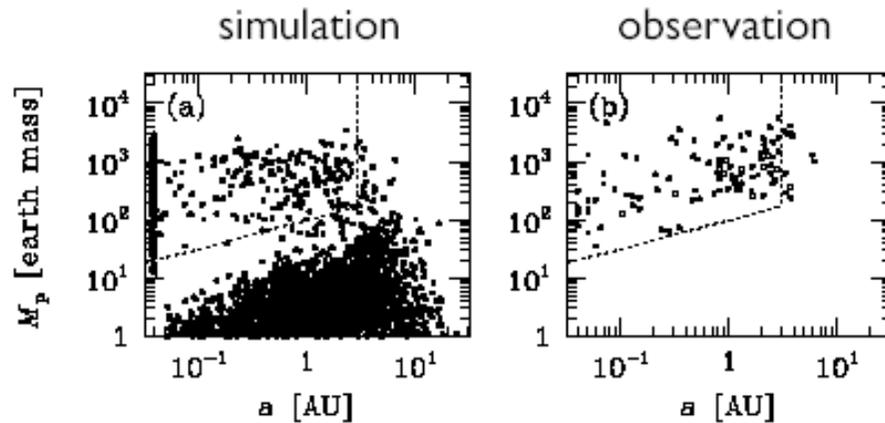


Durées caractéristiques

Les planètes géantes préfèrent-elles les événements longs (étoiles plus massives)?

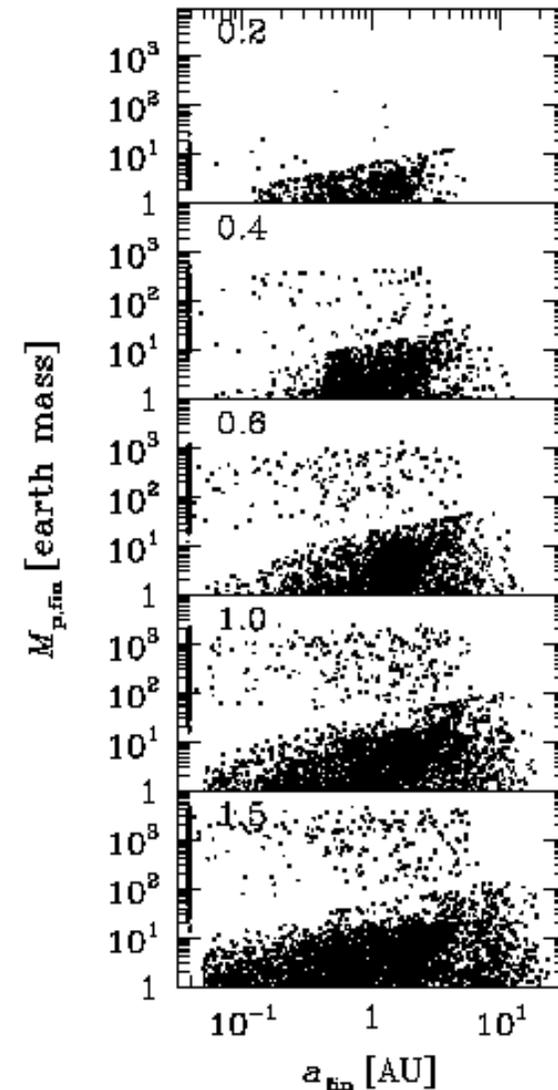
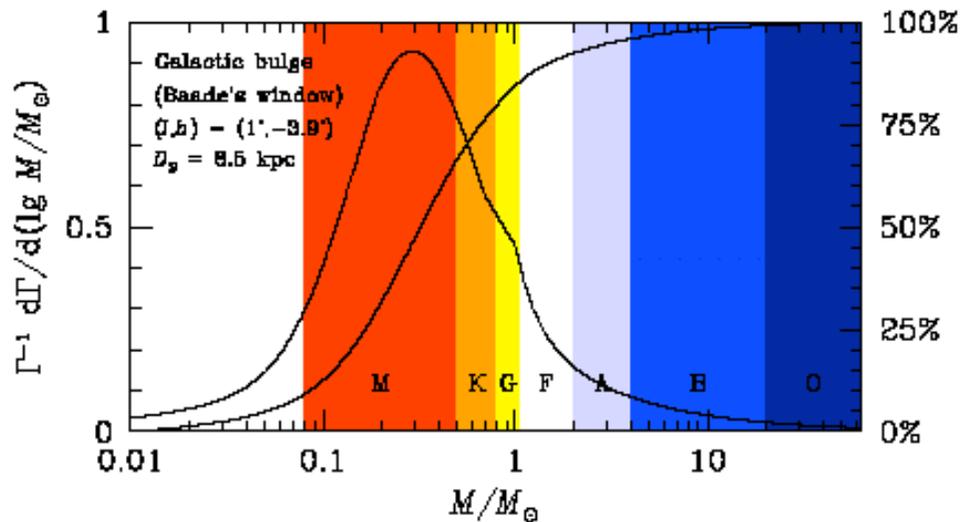


Modèle d'accrétion de coeur



Ida S., Lin D. N. C., 2004, *Aj* 616, 567

Stellar mass probed by microlensing



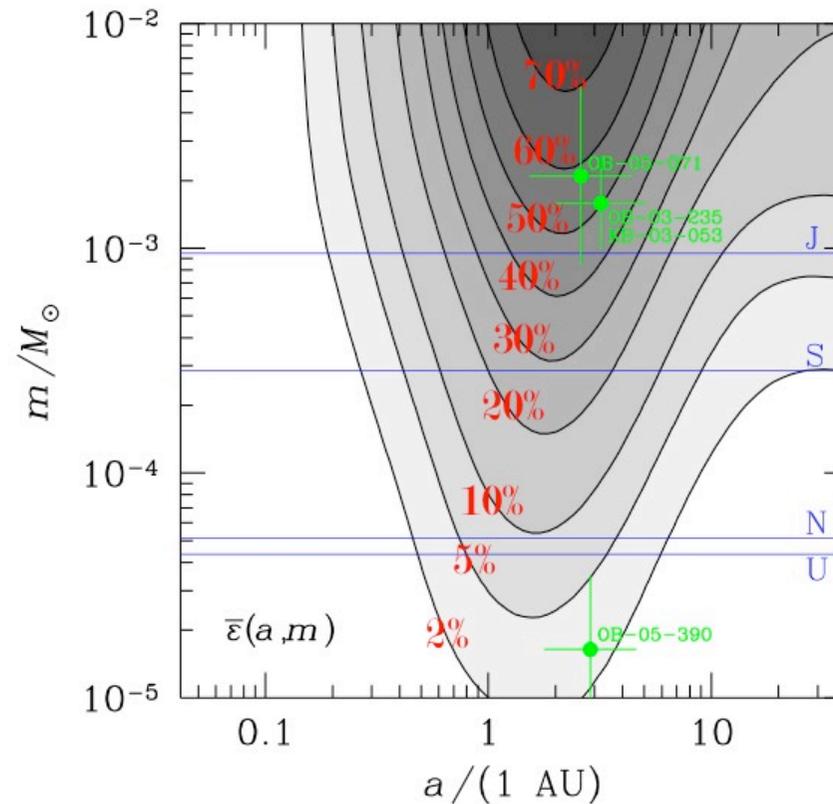
Ida S., Lin D. N. C., 2005, *Aj* 626, 1045

Efficacité de détection

*Les événements sans anomalie
contraignent le nombre de planètes*

PLANET detection efficiency

on prime events ($\sim 1/3$ of sample)



A. Cassan et al. (PLANET collaboration), in preparation

Stratégie d'observation: caustique centrale ou planétaire?

- *Centrale: prédictible dans les rares événements de forte amplification; petite et difficile à caractériser (dégénérescence)*
- *Planétaire: événements communs de faible amplification; plus grande et plus facile à caractériser, mais imprédictible*

$$x_c = x_p - \frac{1}{x_p} : \text{planetary caustic position}$$

$$u_c = \frac{qx_p}{(x_p - 1)^2} : \text{central caustic tip}$$

Conclusions (1)

Détection \neq caractérisation: 3 détections ET 3 caractérisations ☺

3 planètes par microlentilles, pour 3 scénarios :

- 2 caustiques centrales: une de forte amplification, l'autre moyenne
- 1 caustique planétaire

=> Ne pas suivre seulement les événements de forte amplification

2 ~Jupiters, 1 ~5 Terres

- Bonne indication que les petites planètes solides sont plus nombreuses que les géantes gazeuses autour des étoiles M, car le rapport de probabilité est de 50 à 1
- Confirme les prédictions du modèle d'accrétion de cœur, au moins pour les sous-Neptune

2 événements longs, 1 court

- Les planètes géantes sont plus nombreuses autour des étoiles de plus grande masse

(Im)précision des paramètres du système étoile - planète

Détecter directement la lentille !

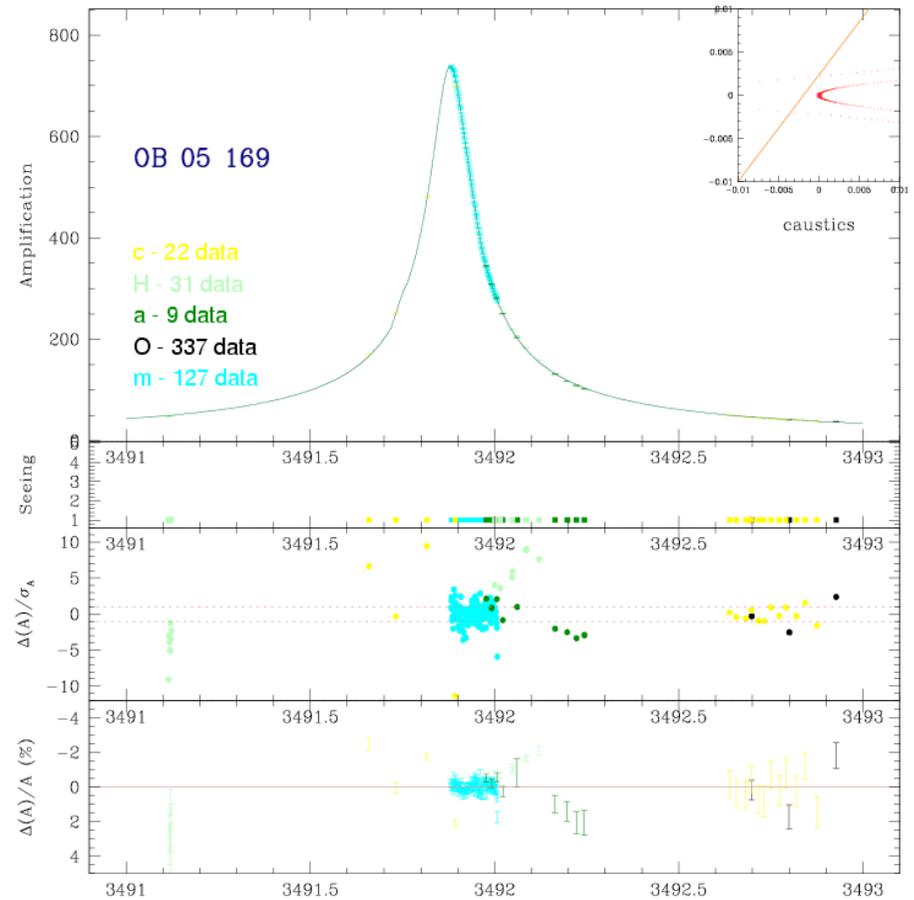
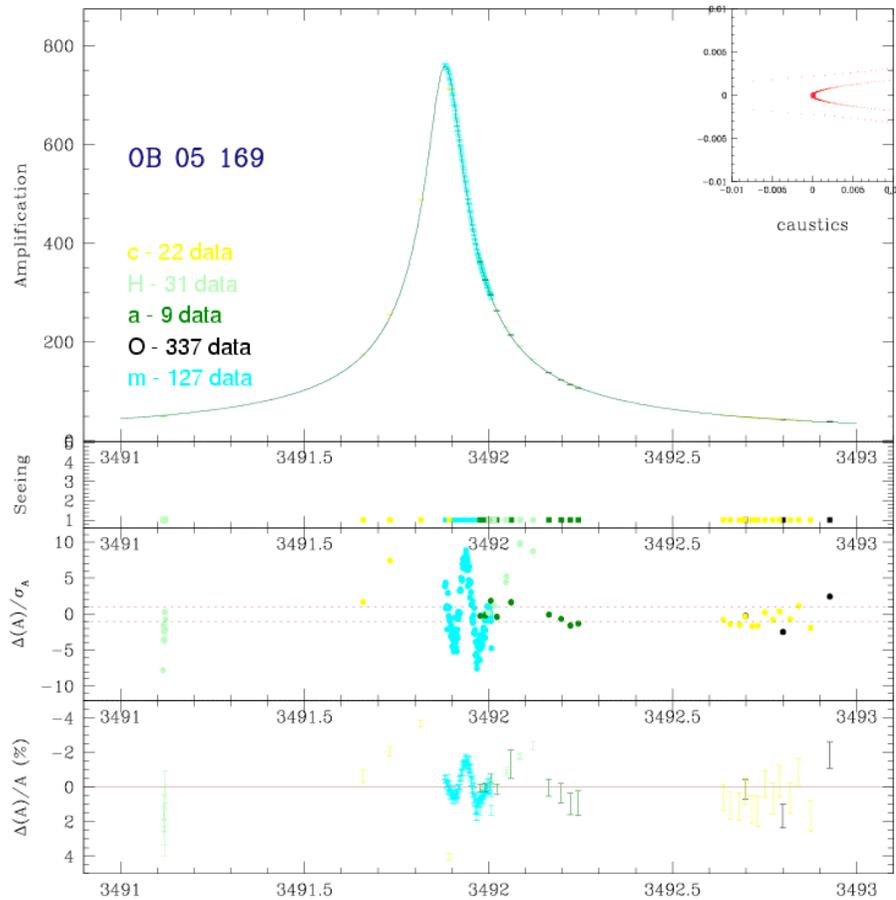
Conclusions (2)

- *Les observations OGLE ont repris en février 2006*
- *Modélisations d'événements passés en cours: quelques candidats prometteurs*
- *La « concurrence » vient d'annoncer sa propre détection*
- *Champ en plein essor: les intéressés sont les bienvenus*

2005 (3): OGLE 2005-BLG-169

- *Nouvelle planète de 13 masses terrestres détectée par microFUN et OGLE dans un événement de très grande amplification (800, soit 7.3 mag)*

Comparaison fit PSPL et ESBL



Comparaison des 4 planètes (1)

Événement	q	b	caustique	amplification maximale	source
OB03235 = KB03053	0.0039	1.120	unique	7.6	MS
OB05071 close $\Delta\chi^2 = 22$	0.0067	0.758	centrale	44	MS
OB05071 wide	0.0071	1.294	unique $d_w=1.297$	42	MS
OB05169 close $\Delta\chi^2 = 0.27$	0.000083	0.9819	unique $d_c=0.969$	800	MS
OB05169 wide	0.000086	1.0198	unique $d_w=1.067$	806	MS
OB05390	0.0000757	1.6097	planétaire	2.9	RG

Comparaison des 4 planètes (2)

	t_E days	u_0 R_E	θ_* μas	θ_E mas	μ mas yr^{-1}	D_L kpc	M_* M_{sun}	M_p M_{earth}	a AU	K m s^{-1}
OB03235	61.5	0.133	0.50	0.52	3.1	5.2	0.36	470	3.9	40
OB05071 wide	70.9	0.0236	0.48	0.48	2.5	2.9	0.13	300	2.0	57
OB05169 wide	42.3	0.0012	0.44	1.00	8.6	2.7	0.49	13	3.4	1.1
OB05390	11.0	0.359	5.25	0.20	6.8	6.5	0.22	5.5	2.7	0.65

Contraintes dues au « blending »

	I_s	I_{blend}	V-I	I_0	$(V-I)_0$	E(V-I)	A_l $=I_s - I_0$	$I_{\text{bl},0}$	$M_{l,\text{lens}}$ \geq	ST_{lens} \geq	M_* \leq
OB03235	19.70 ± 0.15 phm	20.7 ± 0.4 phm	1.58 ± 0.02 phm	18.6	0.76	0.82 Sumi		19.6	6.0	K5V	0.67
OB05071	19.53 HST?	21.29 HST?		18.33 CMD	0.45 CMD		1.20	20.1	7.8	M2V	0.4
OB05169	20.43 Ogle nc	19.91 Ogle nc		19.17 CMD	0.75 CMD		1.26	18.6	6.5	K7V	0.6
OB05390	15.66 Ogle nc	18.18 Ogle nc		14.25 CMD	0.85 CMD		1.41	16.8	2.7	F2V	1.5