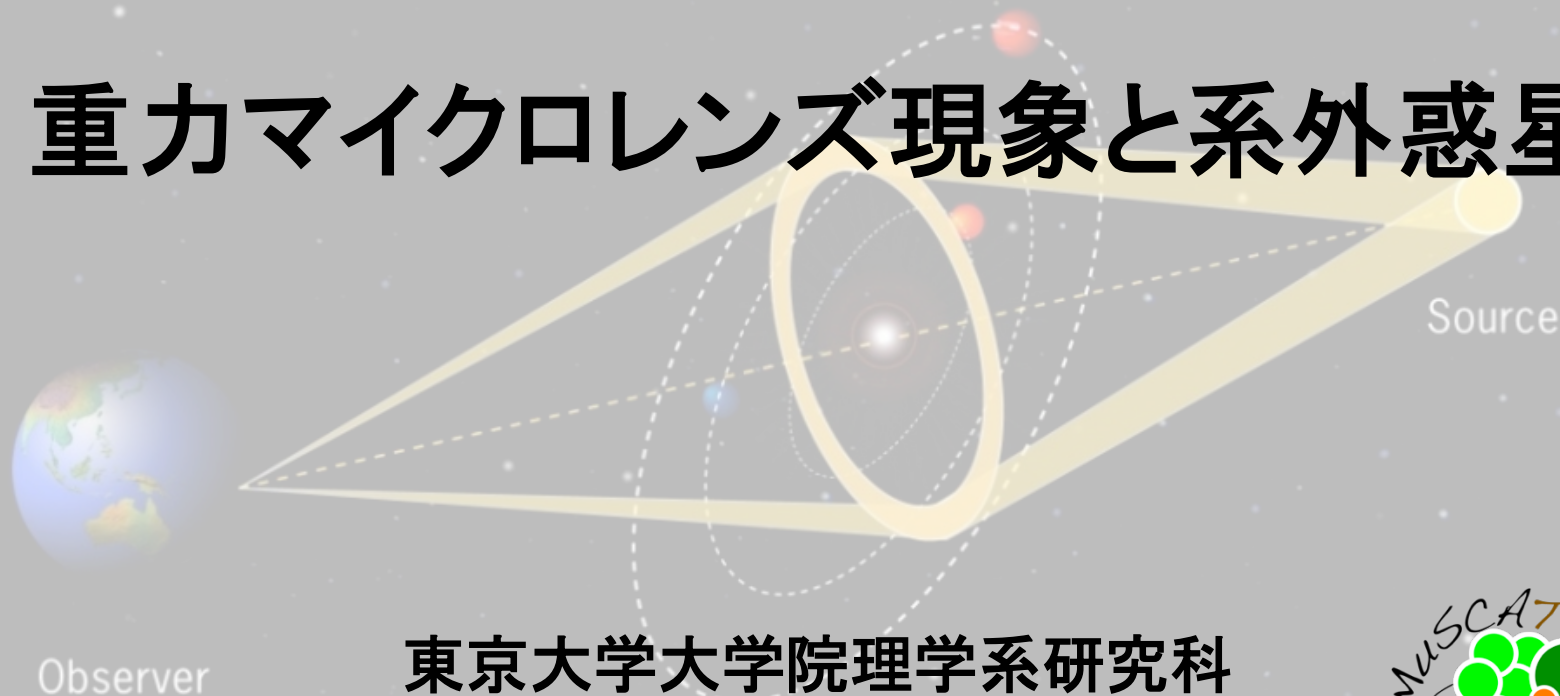
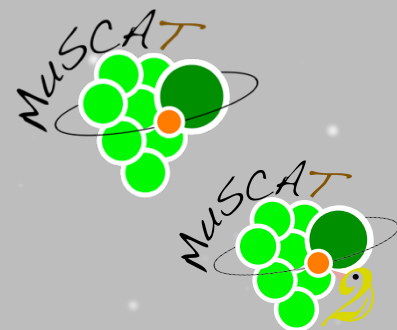


重力マイクロレンズ現象と系外惑星

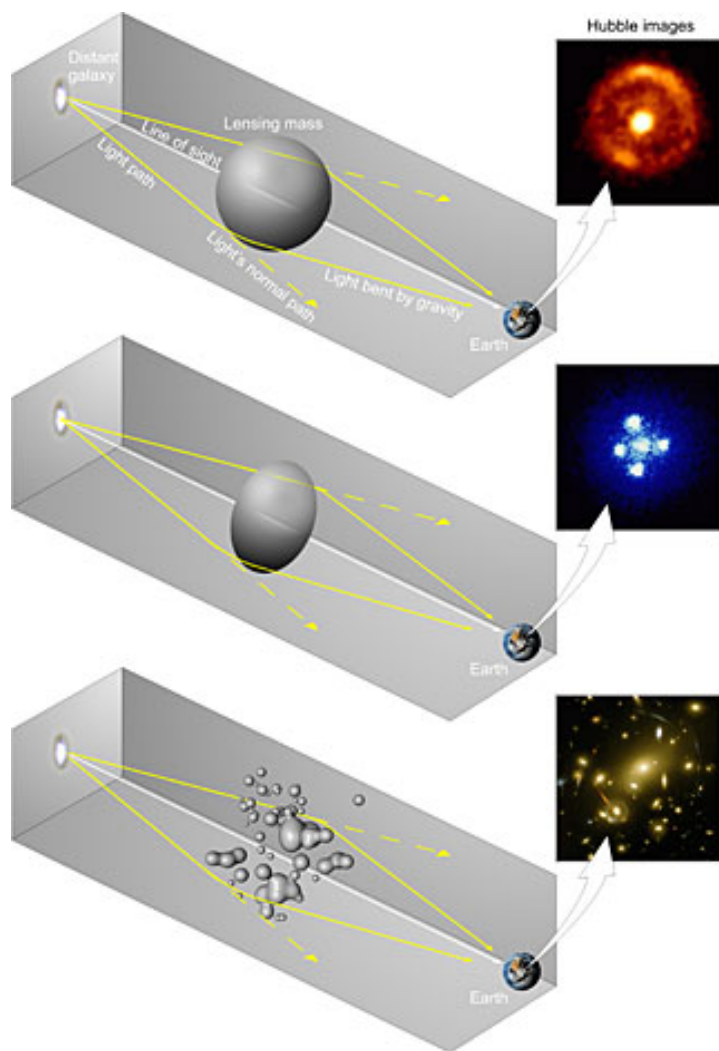


東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻
福井暁彦

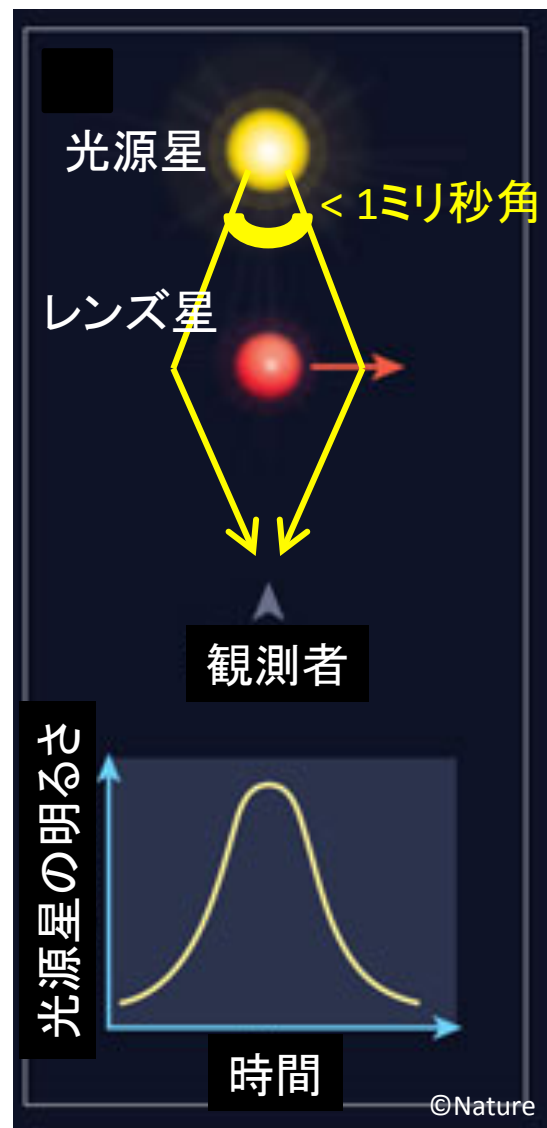


重力マイクロレンズ現象

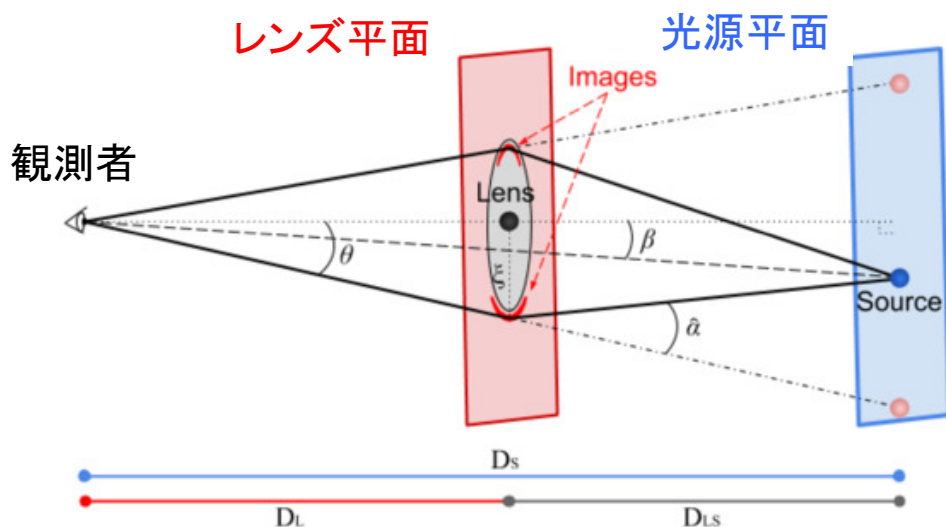
重力レンズ現象



重力マイクロレンズ現象



重力マイクロレンズ現象の性質

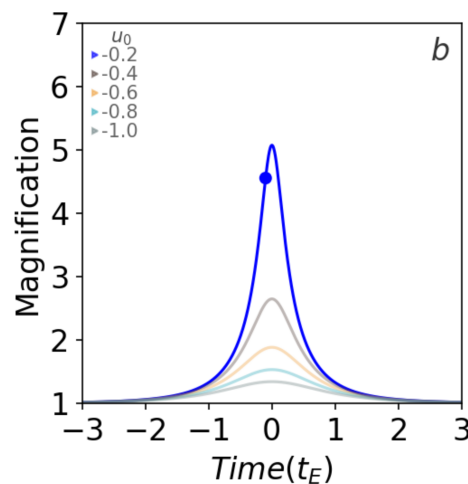
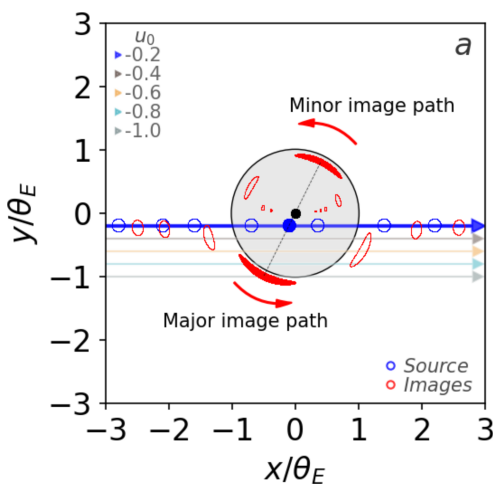


- 左右対称の光度曲線
- 増光率は波長に依らない
- タイムスケール(t_E)はレンズ天体の質量、距離、相対速度に依存

アインシュタイン半径通過時間: t_E

$$t_E = \frac{1}{\mu} \sqrt{\kappa M_L \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \right)}$$

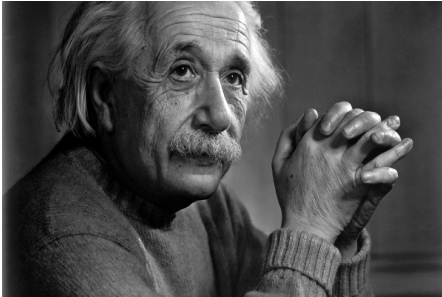
μ : 相対固有運動
 M_L : レンズ天体の質量
 D_L : レンズ天体の距離
 D_S : 光源星の距離
 κ : 定数



(少なくとも統計的に) レンズ天体の質量分布を推定出来る

重力マイクロレンズとダークマター探索

- 1936年にアインシュタインが重力マイクロレンズ現象について考察。



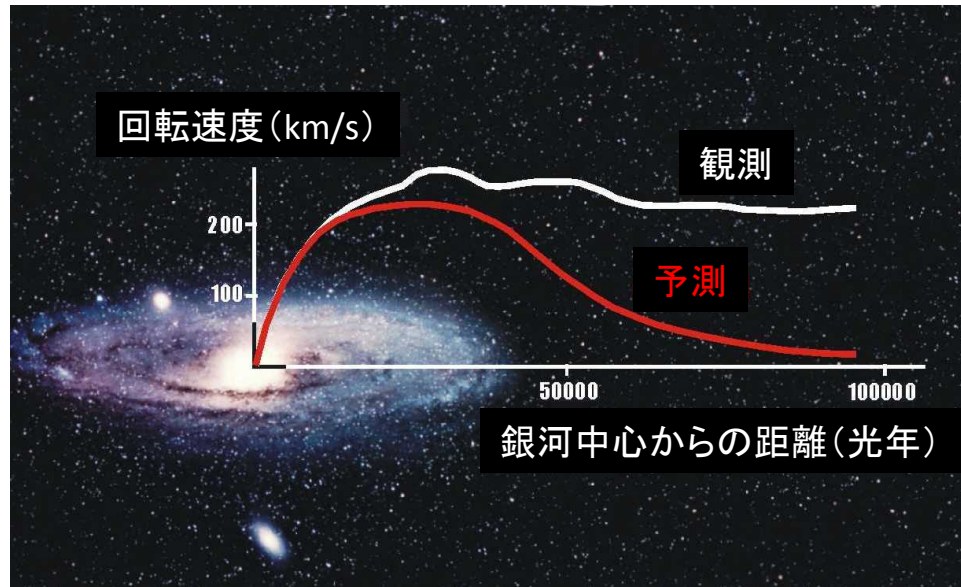
*'There is **no great chance** of observing this phenomenon'* (A. Einstein, 1936, Science)

- 1986年にボーダン・パチンスキーが、重力マイクロレンズをダークマター探索に使うことを提案。



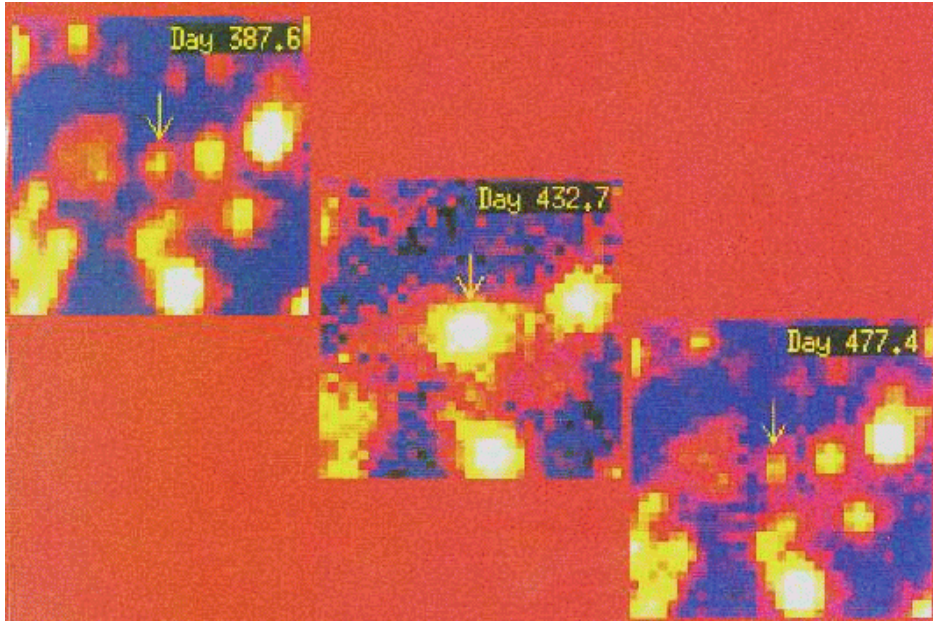
*'Monitoring the brightness of **a few million stars** may lead to a discovery of **dark halo objects**'* (B. Paczynski, 1986)

重力マイクロレンズとダークマター探索

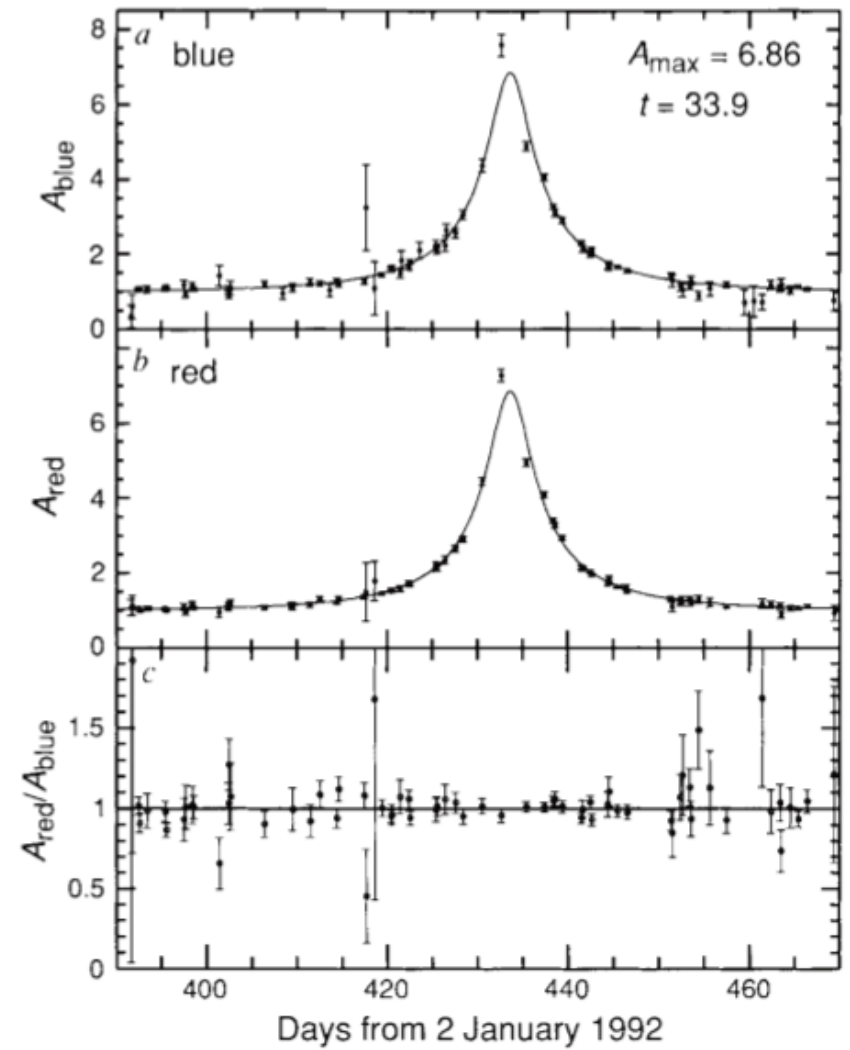


- 銀河系の回転速度の観測から、目に見えない物質(ダークマター)の存在が明らかに。
- ダークマターはハローにも分布
- ダークマター候補の1つが、褐色矮星や古い白色矮星、中性子星、ブラックホールなどの暗い天体(MAssive Compact Halo Objects, **MACHOs**)
- **大マゼラン星雲**をモニター観測することで、**MACHOs**が引き起こす**重力マイクロレンズ現象**を発見出来るかもしれない。

最初の重力マイクロレンズ現象の発見



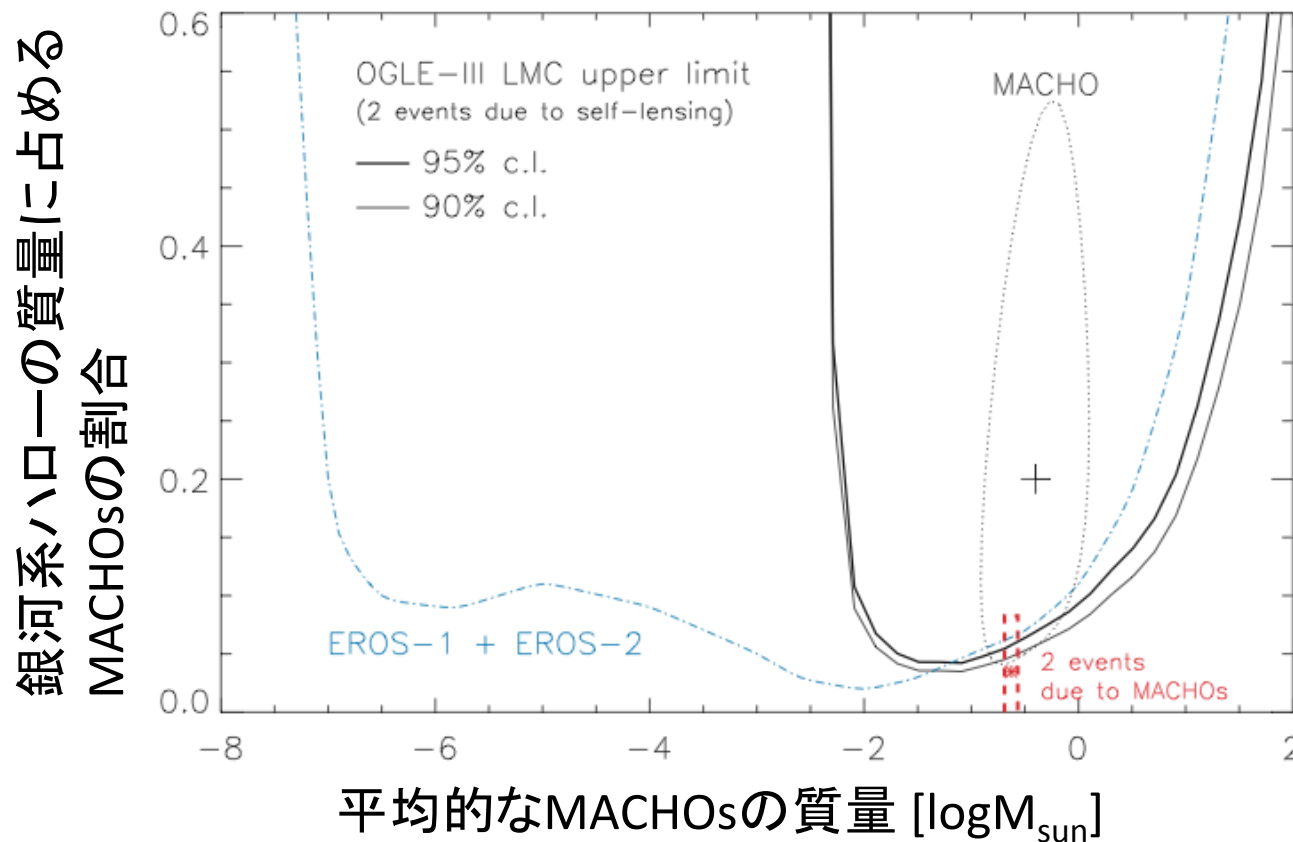
MACHOグループとEROSグループが
独立に最初の数イベントを発見



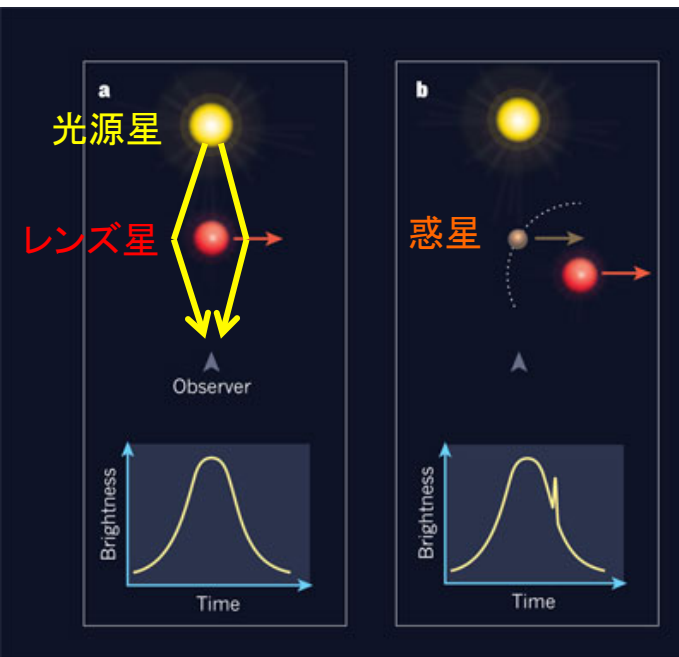
Alcock et al. 1993, Nature

MACHOsの存在度への制限

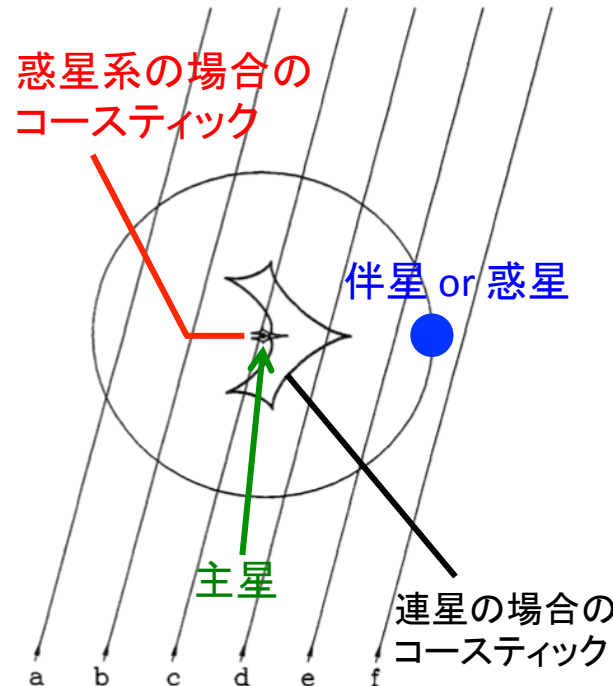
- 複数のグループ (MACHO, EROS, OGLE, MOA) が大マゼラン星雲を探索
 - **MACHO**: 10 events from 6-year survey
 - **EROS**: no event from 7-year survey
 - **OGLE**: 2 events from 8-year survey
- **MACHOsが銀河系ハローに占める割合はせいぜい10%。主要成分でない。**



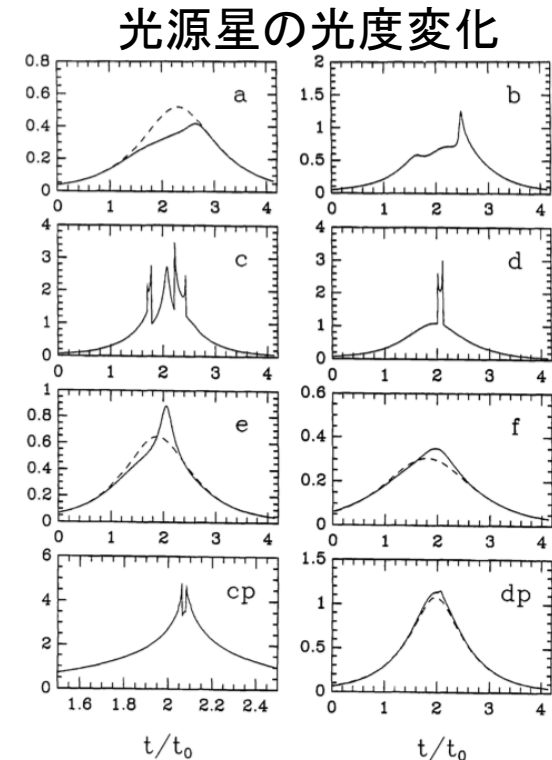
重力マイクロレンズ現象を用いた系外惑星探索



©Nature



天球面での光源星の軌跡

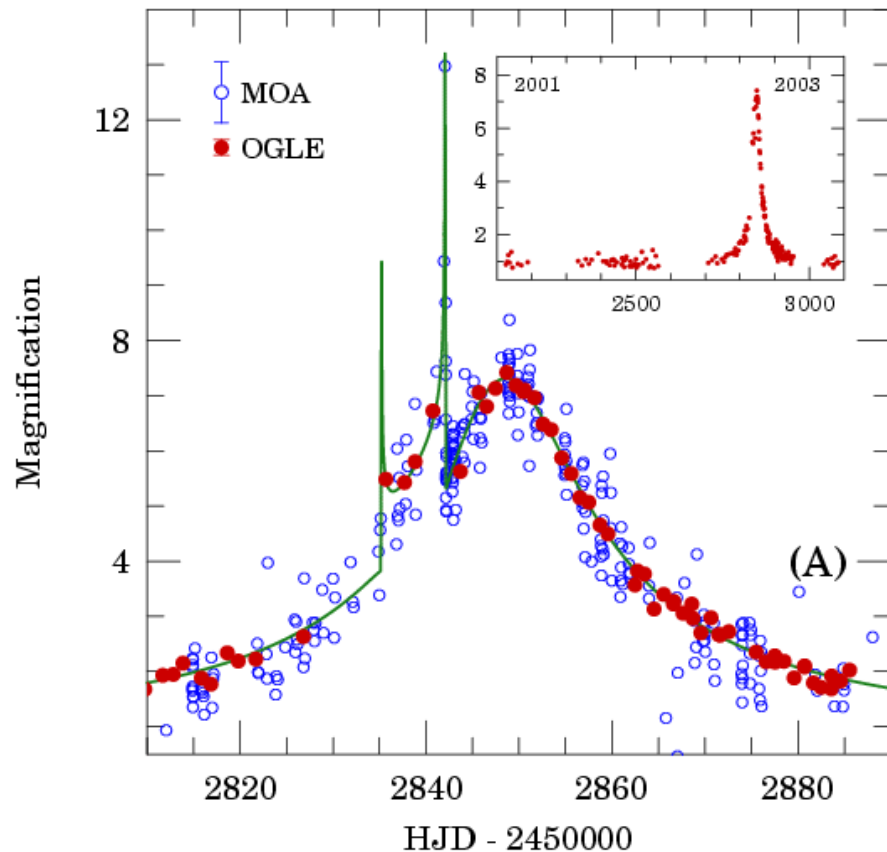


Mao & Paczynski 1991

- レンズ天体に伴星が存在すると、光度曲線に“逸脱”(アノーマリ)が見られる。
- 伴星の質量や軌道に応じて、理論上増光率が無限大になる「コースティック」が形成。
- 光源星が通過する軌道に応じて、様々な形状のアノーマリが生じ得る。

最初の系外惑星イベント

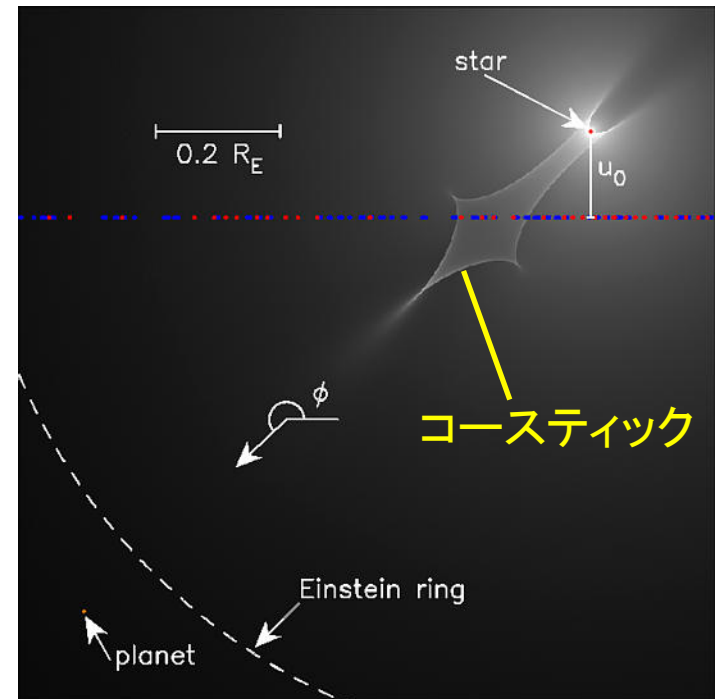
OGLE-2003-BLG-235/MOA-2003-BLG-53



$$\begin{aligned} M_s &= 0.63^{+0.07}_{-0.09} M_{\text{sun}} \\ M_p &= 2.5^{+0.7}_{-0.6} M_{\text{jup}} \end{aligned}$$

Bond, et al. 2004, ApJ

増光率マップ



Microlensing Observations in Astrophysics (MOA)

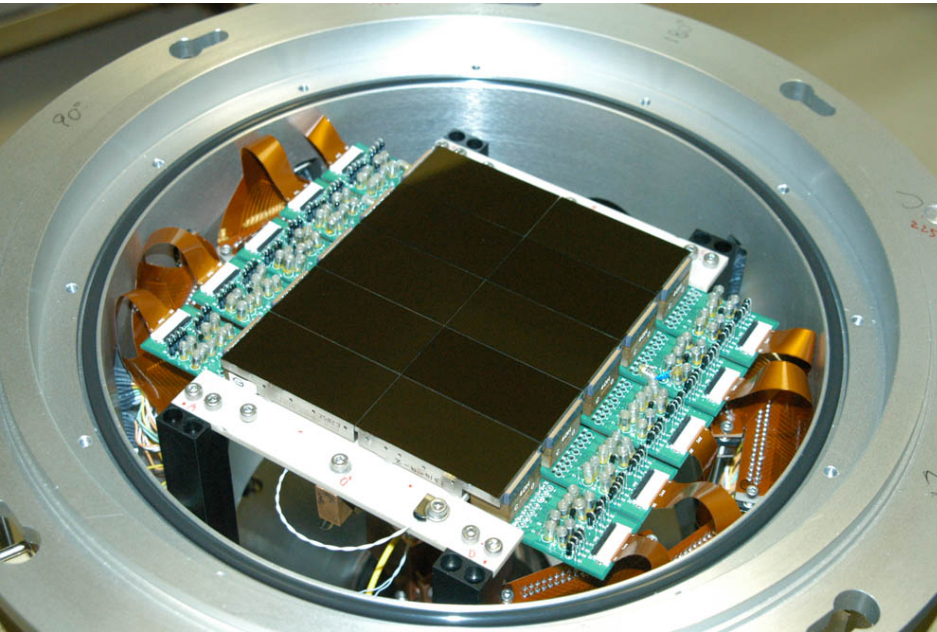
- 日本-NZ-USの国際共同研究チーム
 - 日本: 名古屋大学、大阪大学、東京大学など
 - NZ: カンタベリー大、マッシー大、オークランド大など
 - US: NASA(ゴダード)
- ニュージーランド・Mt.John天文台に専用の望遠鏡を設置し、重カマイクロレンズを探索



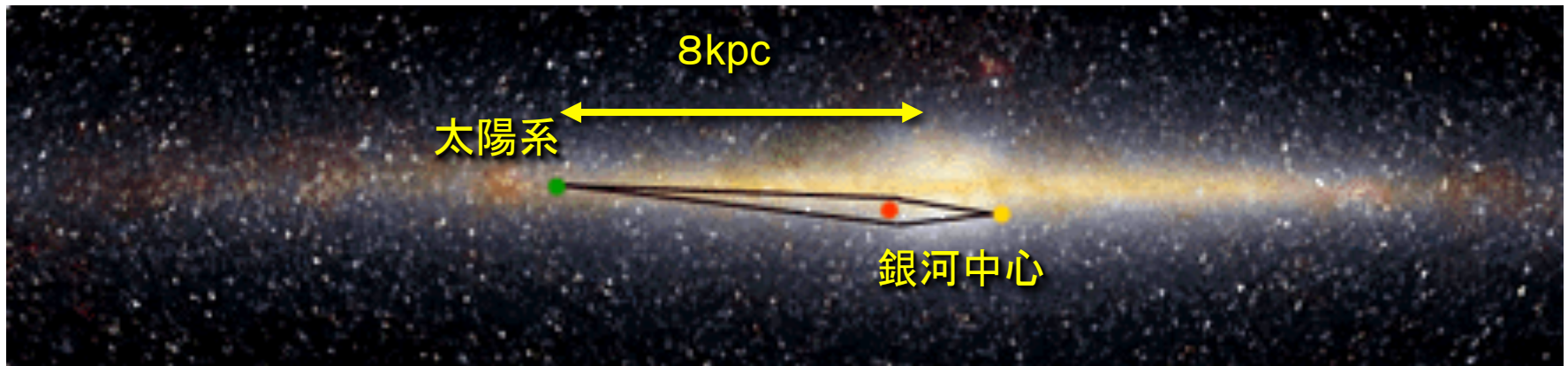
Mt.John Observatory in New Zealand

MOA-II 1.8m望遠鏡+主焦点広視野カメラ (2005-)

口径 : 1.8m
CCD : 2k x 4k x 10枚
視野 : 2.2 平方度
(満月の約10倍)



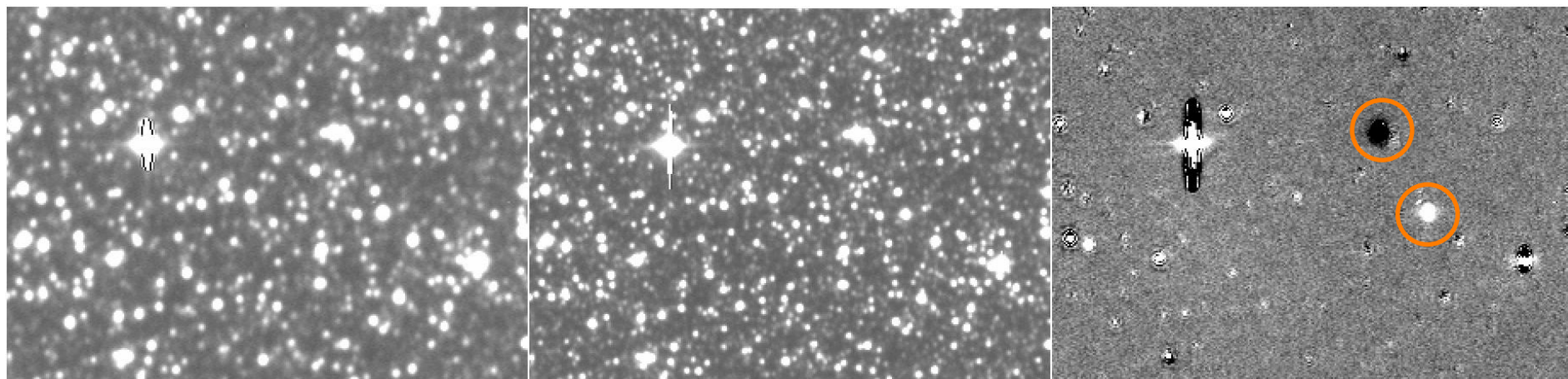
観測領域と観測頻度



- 銀河中心方向の約1億個の星をモニター
 - 単星レンズイベント：年間~600イベント検出
 - 惑星イベント候補：全体の約1%
- 最大15分に1回の頻度で観測
 - 惑星アノーマリのタイムスケール
 - 木星質量：~数日
 - 地球質量：~数時間

差分画像解析によるイベント検出

- 銀河中心領域は星が極めて密集
- シーイングの良い日に撮った画像(リファレンス)を各画像のシーイングに合わせて鈍らせ、差引くことで、変光星を効率的に検出可
- リアルタイムで画像を解析し、いち早くイベントを発見



Observed — Reference = Difference

リアルタイム惑星検出とフォローアップ

惑星イベント: MOA-2009-BLG-266

World-wide microlens community

サーベイグループ

- MOA (NZ)
- OGLE (Chile)

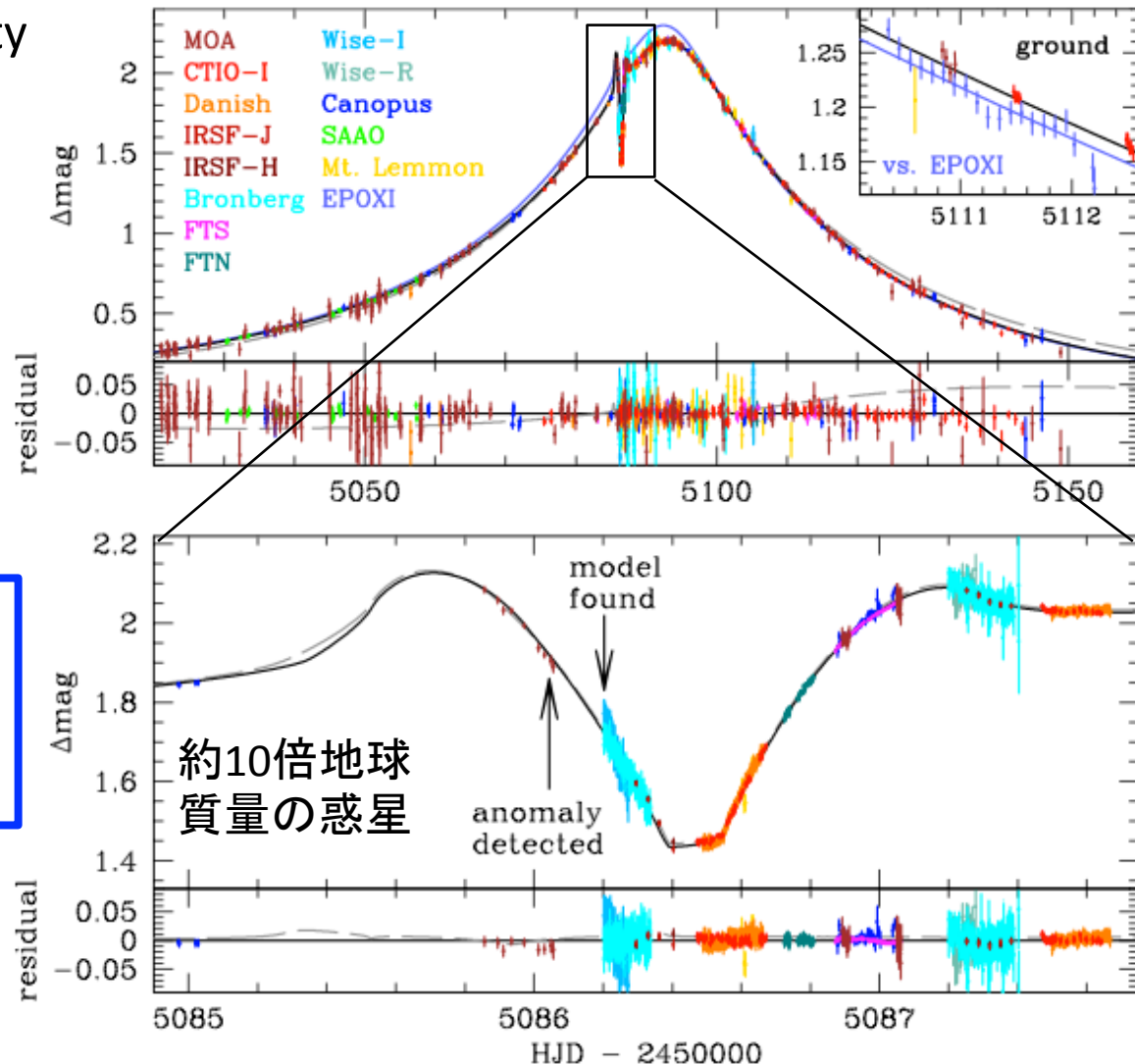
通常イベント・
アラート

アノーマリ・
アラート

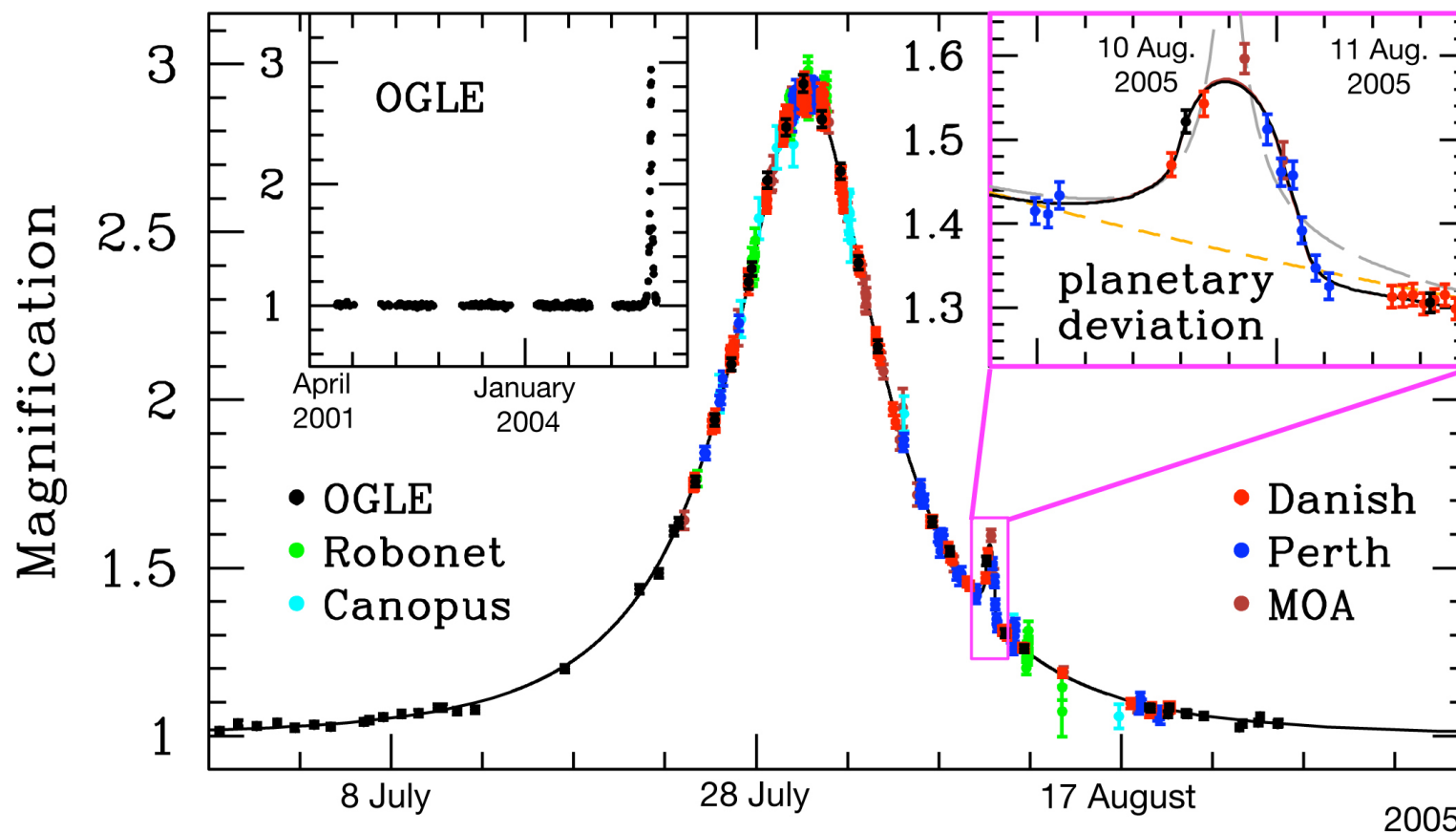
フォローアップグループ

- MicroFUN (world wide)
- PLANET (world wide)

※ アマチュア天文家も多く参加



5.5x地球質量の惑星: OGLE-2005-BLG-390lb

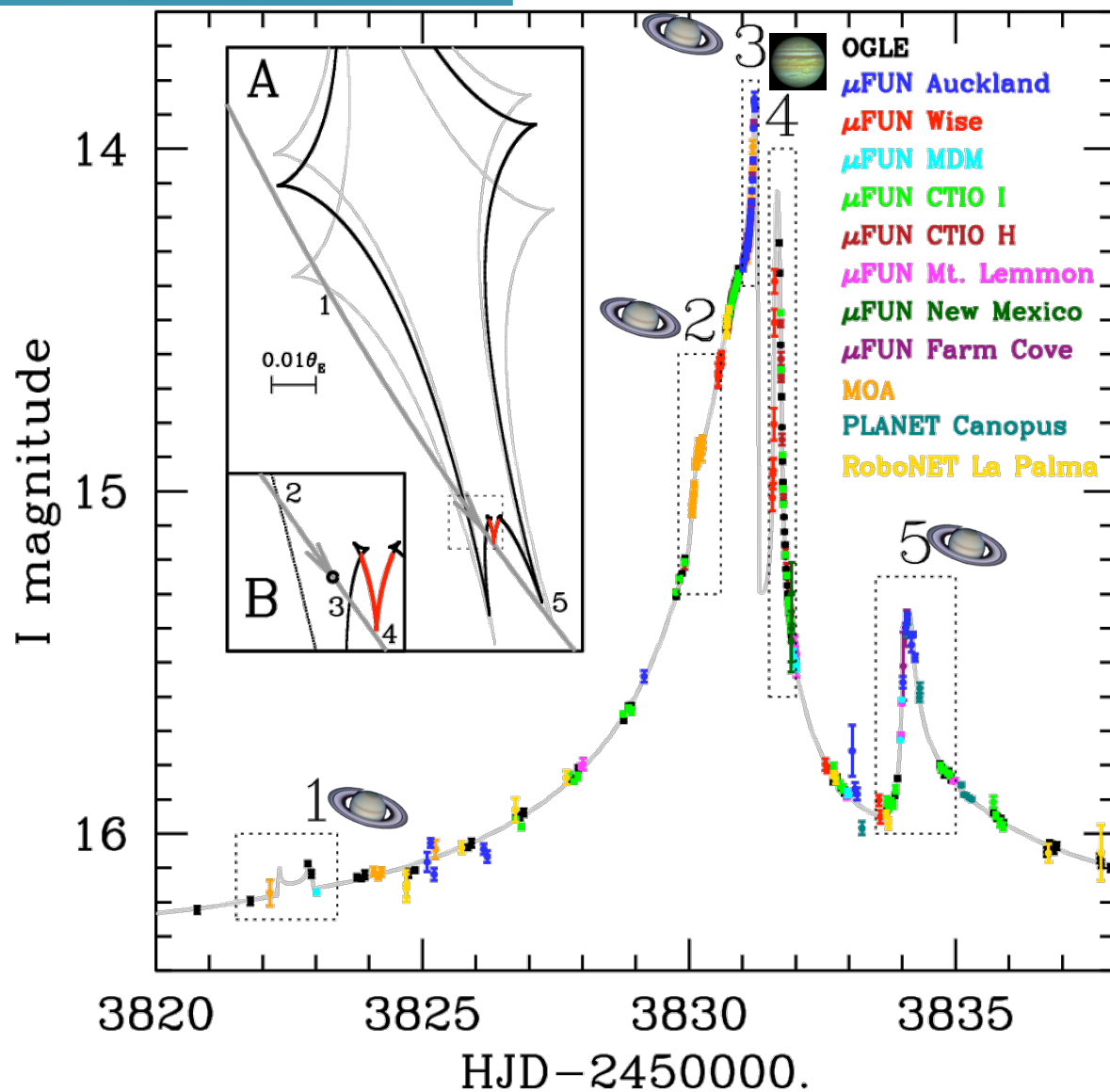


発見当時(2005年時点)で最軽量の惑星

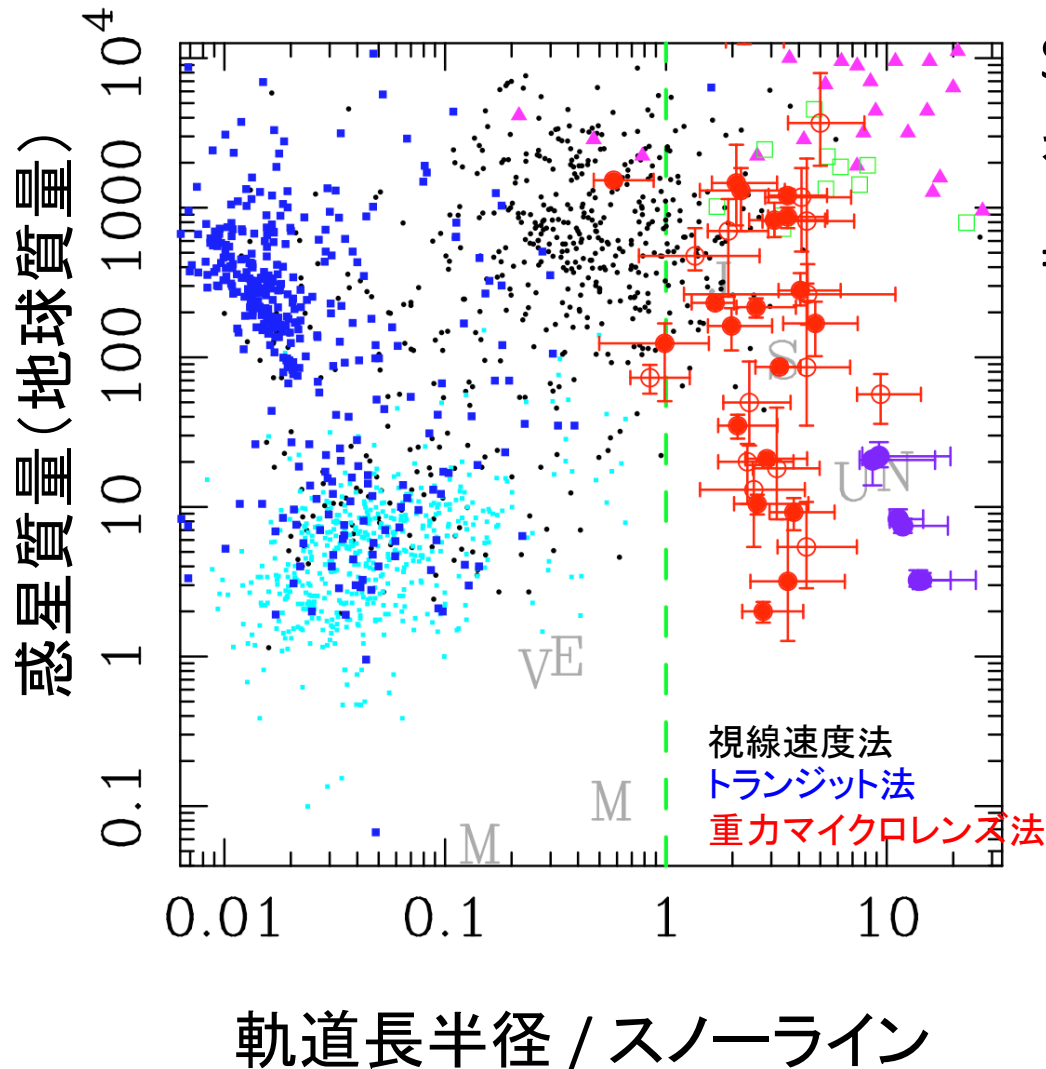
Beaulieu et al. 2006, Nature

土星と木星の縮小版 : OGLE-2006-BLG-109L

- ✓ 5つの特徴をもつ
- ✓ 4つ目の特徴は別の惑星によるもの
- ✓ 内側は**木星の半分**、外側は**土星の半分**の質量と軌道
- ✓ 主星の質量も**太陽の半分**
- ✓ **太陽系のスケールを半分にしたような惑星系**



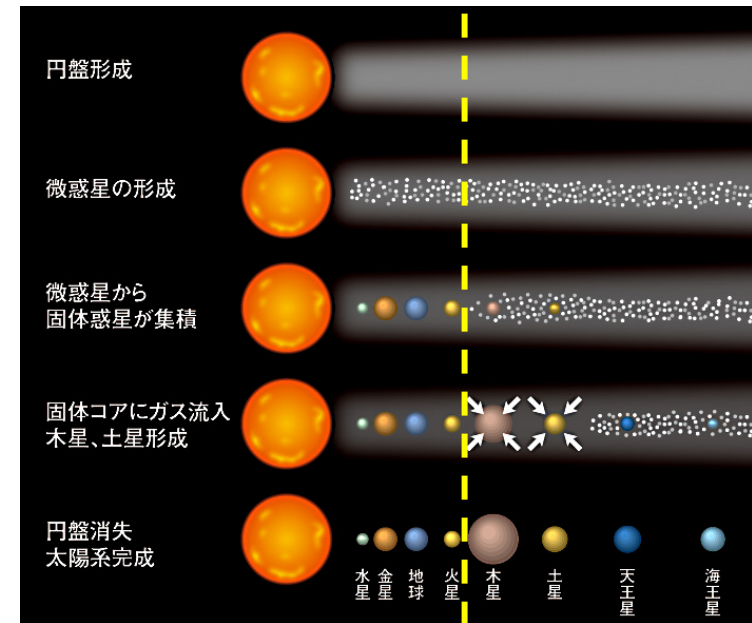
発見された惑星の分布



Snow line (雪線) 以遠の惑星
を多数発見(>70個)

=> 惑星形成の現場

惑星形成標準シナリオ



スノーライン

重力マイクロレンズ法の欠点

- フォローアップ観測が困難
 - 同一の惑星系が再度重力μレンズを起こす確率は極めて低い
 - 惑星系の距離が遠い(数kpc)ため、**他の手法での観測が困難**



近傍星における重力マイクロレンズ

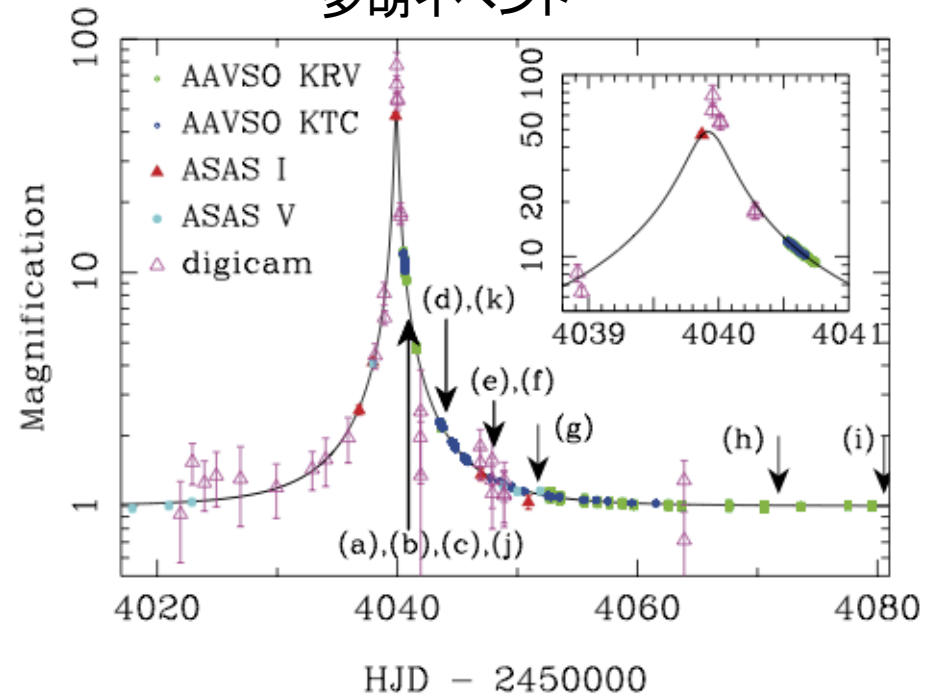
RATES OF MICROLENSING EVENTS

V_{lim}	$N_{\star, \text{tot}}$	$\langle \tau \rangle$	Γ_{tot} (yr^{-1})
12.....	0.10×10^7	0.12×10^{-8}	0.08
14.....	0.47×10^7	0.25×10^{-8}	0.57
16.....	2.0×10^7	0.52×10^{-8}	3.8
18.....	7.5×10^7	0.92×10^{-8}	23.0

NOTES.—Rates of near-field microlensing events, Γ_{tot} , expected from all-sky surveys with various magnitude limits, V_{lim} . Also listed are the total number of stars that can be monitored from the surveys, $N_{\star, \text{tot}}$, and the average optical depth to lensing, $\langle \tau \rangle$.

C. Han 2007

多胡イベント



A. Fukui et al. 2007

- 銀河中心以外の星が重力マイクロレンズを起こす確率は低い
 - $V < 12\text{mag}$ で12年に1回、 $V < 14\text{mag}$ で2年に1回（増光率 > 1.34 倍）
- 多胡イベント
 - 2006年に多胡昭彦氏、櫻井幸夫氏がカシオペア座方向で発見
 - $V = 11.4\text{ mag}$ の星が7等にまで増光（増光率 ~ 50 倍）

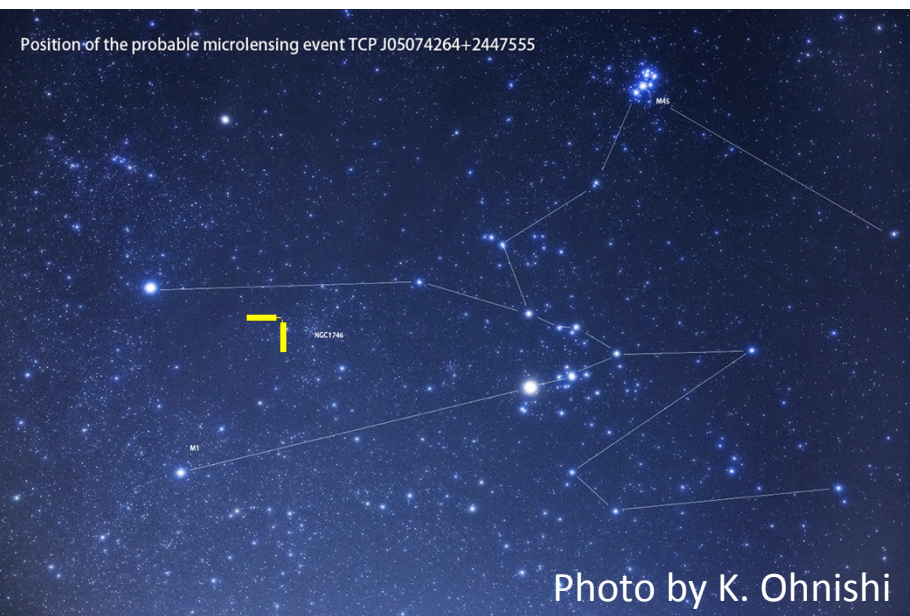
小嶋イベント (TCP J05074264+2447555)



小嶋正氏

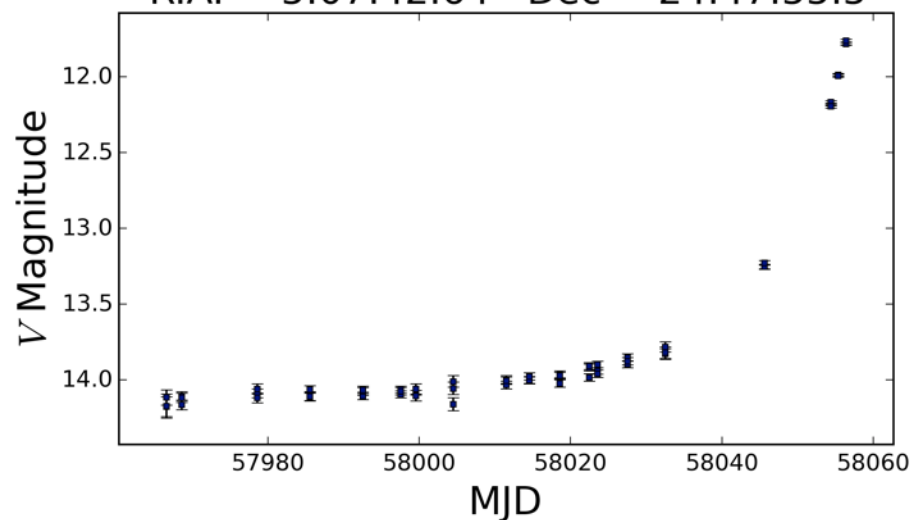
(天文月報2018年11月号より)

- 2017年10月31日、小嶋正氏(群馬県)が新星探索中におうし座方向で増光天体を発見
 - V=13.9等 => 約11等
 - 機材: Canon EOS 6D + 135mm f3.2 lens
- 分光スペクトルに変化が無いことから、変光星コミュニティの間で重力マイクロレンズ現象の可能性が指摘



ASAS-SN light curve at the time of discovery

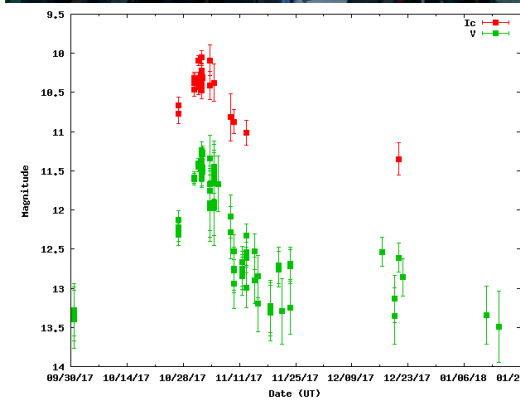
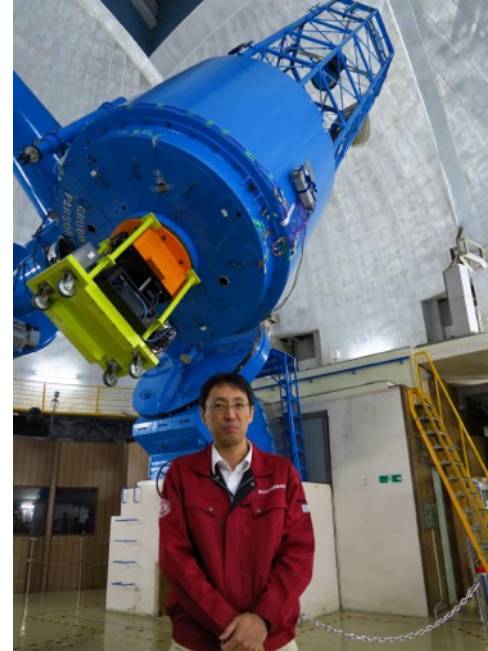
R.A. = 5:07:42.64 Dec = 24:47:55.5



前原氏による独立の検証

- 前原裕之氏（国立天文台岡山）
 - 変光星や恒星フレアの専門家
 - 当時、私の隣の居室
- 広視野カメラによる独立検証
 - 独自の広視野サーベイ(KWS)でイベントを確認
 - 2色で増光パターンが同じ
 - 他の変光星では説明が困難
- 188cm望遠鏡/HIDESによる高分散分光
 - 11月1日に岡山188cm望遠鏡+HIDESで高分散分光
 - 増光した星は通常のF型星
 - 変光星に見られるような輝線は無し

⇒ 重力マイクロレンズ現象 (Atel #10919)

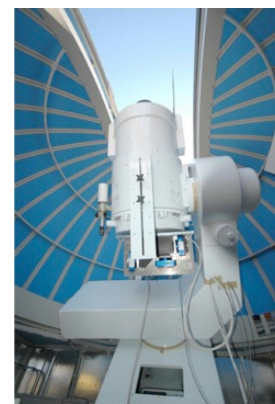


多色測光フォローアップ観測

- 高価値イベント
 - 光源星が明るい
 - ⇒ 惑星の検出効率が高い
 - レンズ星が近傍(<800pc)
 - ⇒ 近傍星の質量測定
- 測光フォローアップ
 - OAO 188cm/MuSCAT (g, r, z)
 - OAO 91cm (K)
 - OAO 50cm (g, Rc, Ic)
 - JAXA/ISAS 1.3m (I, J)
 - 京産大1.3 m (g, Rc)
 - カナリア諸島1.52m/MuSCAT2 (g, r, i, z)



OAO 1.88m



OAO 50cm



OAO 91cm



カナリア諸島1.52m

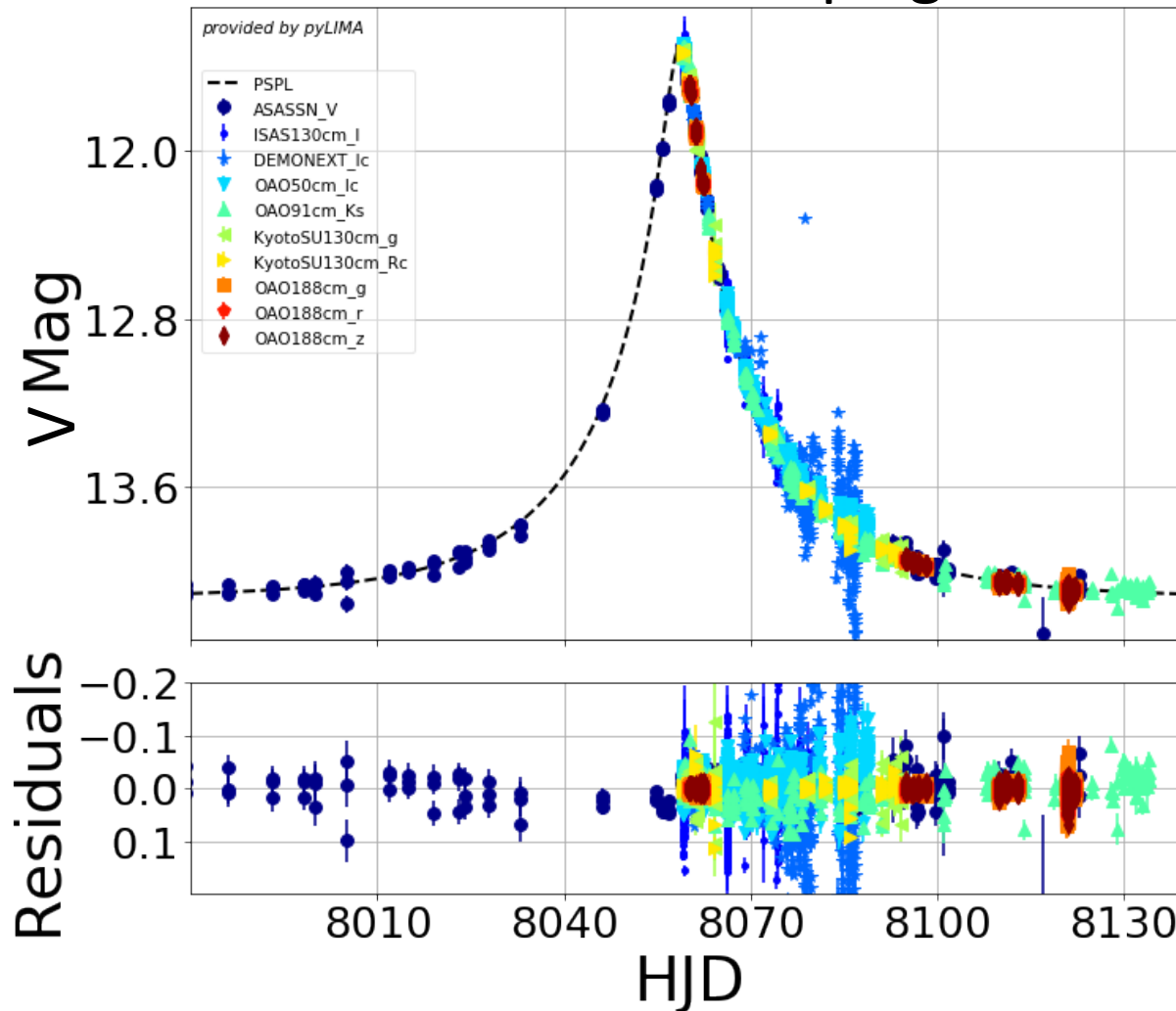


JAXA/ISAS 1.3m



京都産業大学1.3m

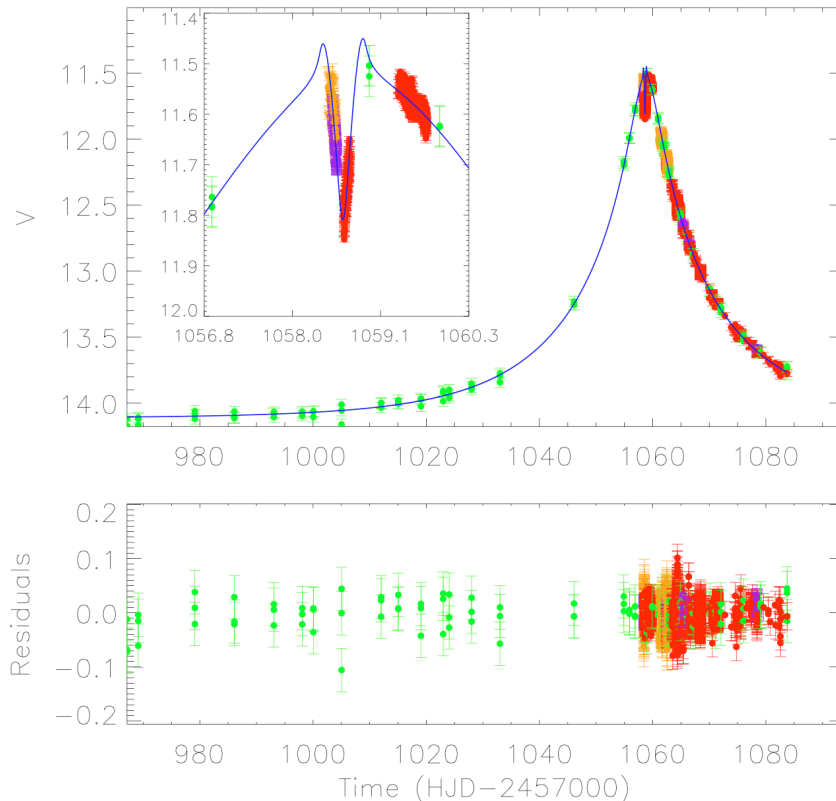
ASAS-SN + follow-up light curve



増光ピークの半日後から追観測開始。
単星レンズモデルに沿って減光。惑星による逸脱は検出されず。

惑星検出の報告

TCP J05074264+2447555



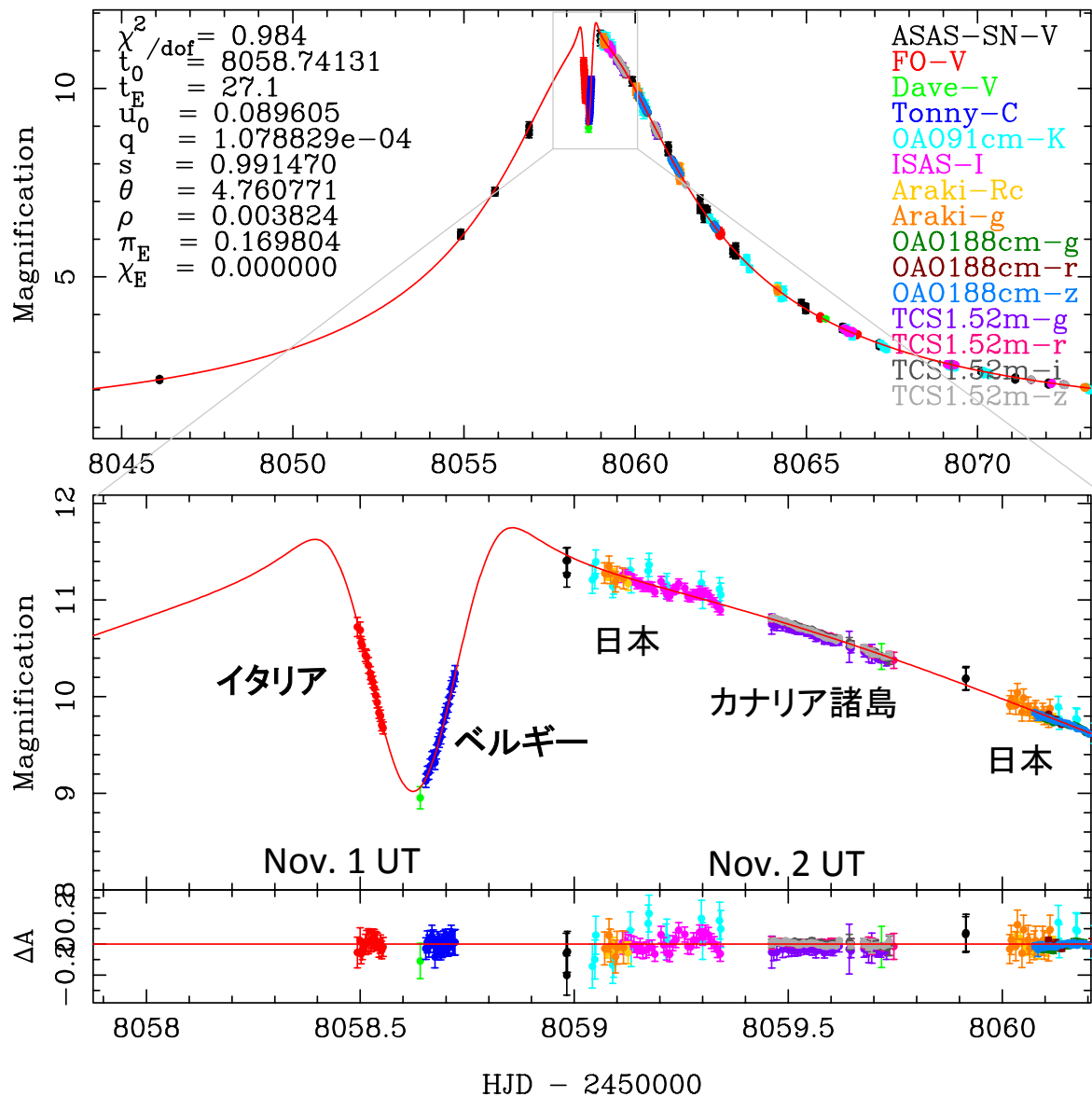
Nucita et al. 2018

- 海外のアマチュア天文家がピーク付近(我々の追観測開始直前)で**光度曲線の逸脱**(アノーマリ)を検出
- イタリアの研究チームが解析
 - 質量比: $1 \times 10^{-4} \rightarrow$ **惑星**
- 距離と質量が縮退
 - 銀河モデル(質量関数、個数密度分布、速度分布)を使って距離と質量を確率的に推定



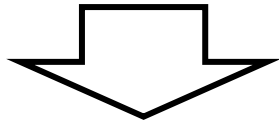
M型星(約 $0.25M_{\text{sun}}$)をまわる
スーパーアース($9 \pm 7M_{\text{Earth}}$)

光度曲線モデルの改善



光度曲線モデルの改善

先行研究データ + 高精度追観測
データを使ってモデルを詳細決定



追加の効果

- 有限ソース効果
- パララックス効果
- レンズの放射光
(可視g,r,i,z, 近赤外K)

を検出

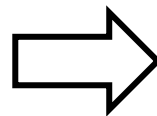
⇒ 距離と質量の縮退が解ける

$$D = 450^{+110}_{-75} \text{ pc}$$

$$M_s = 0.55^{+0.08}_{-0.06} M_{\text{Sun}}$$

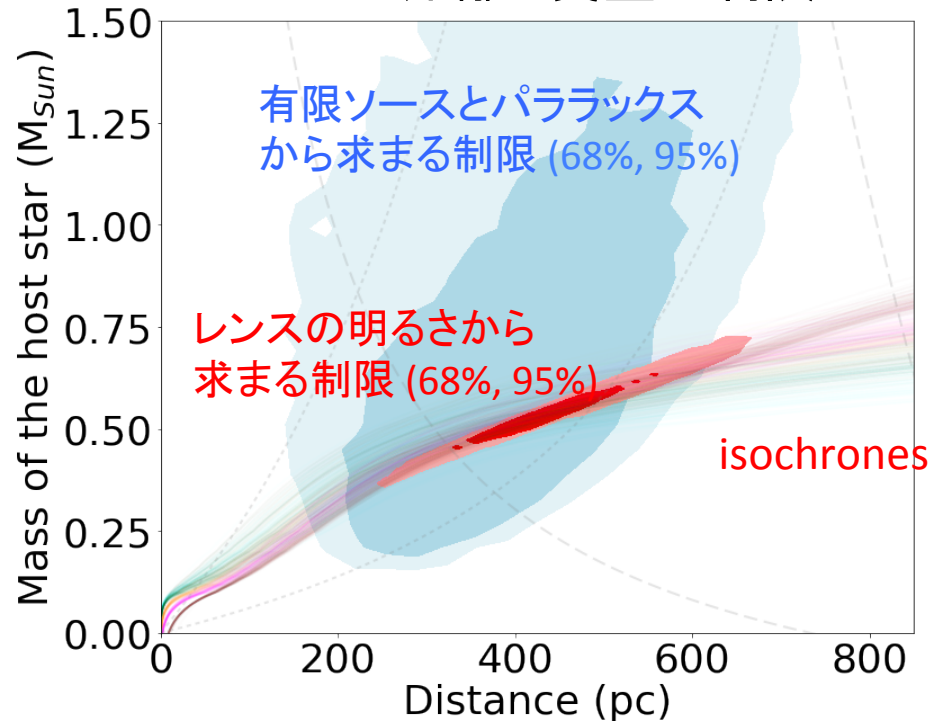
$$M_p = 20 \pm 3 M_{\text{Earth}}$$

$$\text{射影距離} = 1.3^{+0.9}_{-0.4} \text{ AU}$$

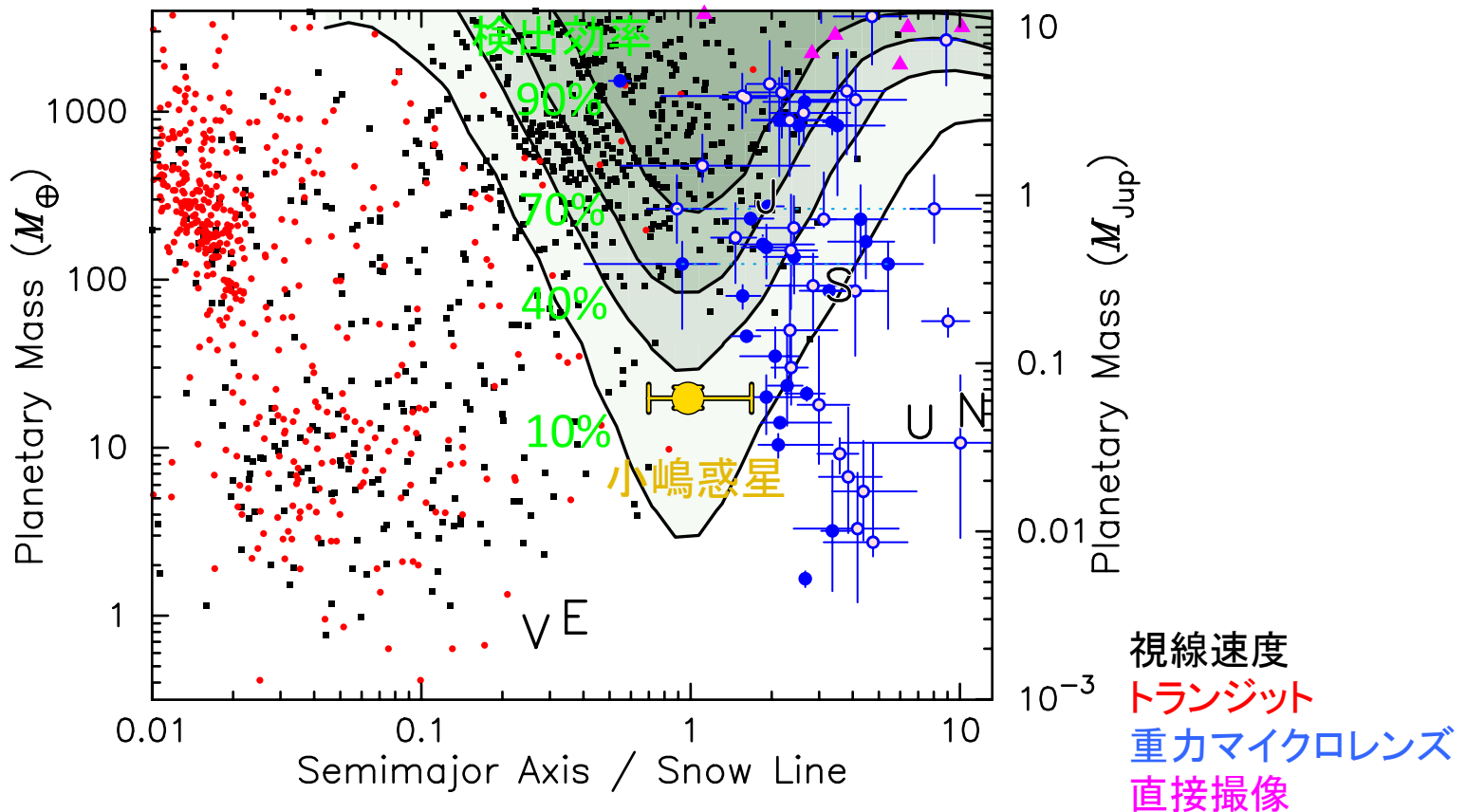


近傍のK/M型星を周る
海王星質量惑星

主星の距離と質量の制限



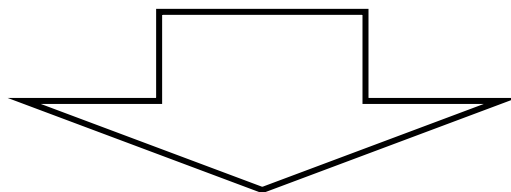
小嶋惑星：雪線上の海王星型惑星



- 雪線上の海王星質量惑星 ⇒ **未開拓領域**
- 検出効率は約30% (⇔木星型の場合は90%以上)
- 雪線付近で海王星質量の惑星が豊富に存在する可能性

期待されるフォローアップ観測

- 主星が近傍(450pc)で**明るい**($K=13.7$)
- 主星と光源星が**数年以内に空間分離**
 - 相対固有運動: 約46mas/yr



重力マイクロレンズ惑星系で初めて
詳細フォローアップ観測が可能

➤ 近赤外分光観測

- 主星の金属量

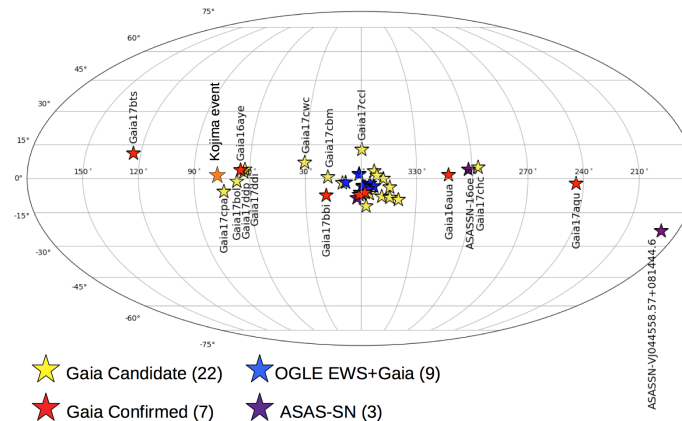
➤ 視線速度観測

- 既存の8m級望遠鏡 → 内側を周る巨大惑星の探索
- 次世代大型望遠鏡 → 今回発見された惑星の軌道決定

今後の近傍イベント探索の可能性

- 今回と同等に明るいイベントは稀
 - 約10年に1回程度？ ($V < 12$ 等)
- 暗いイベントまで含めると、発生頻度は増える
 - $V < 14$ 等で、約2年に1回
- 発生頻度は星の密度の2乗で増加
 - 銀河面が高い(銀河面以外では極めて低い)

Gaia Science Alertsで発見/確認
された重カマイクロレンズイベントの分布



まとめ

- 重力マイクロレンズ現象の観測から”見えないもの”が見える
- 大マゼラン雲における重力マイクロレンズ探索から、MACHOsがダークマターの主成分で無いことが明らかに。
- 銀河中心方向の探索から、これまでに70個以上の系外惑星が発見。
- 2017年10月に小嶋氏がおうし座方向で重力マイクロレンズ現象を発見。惑星の存在が明らかに。
- 銀河面をより暗い星まで探索すると、同様のイベントが発見出来る可能性。