

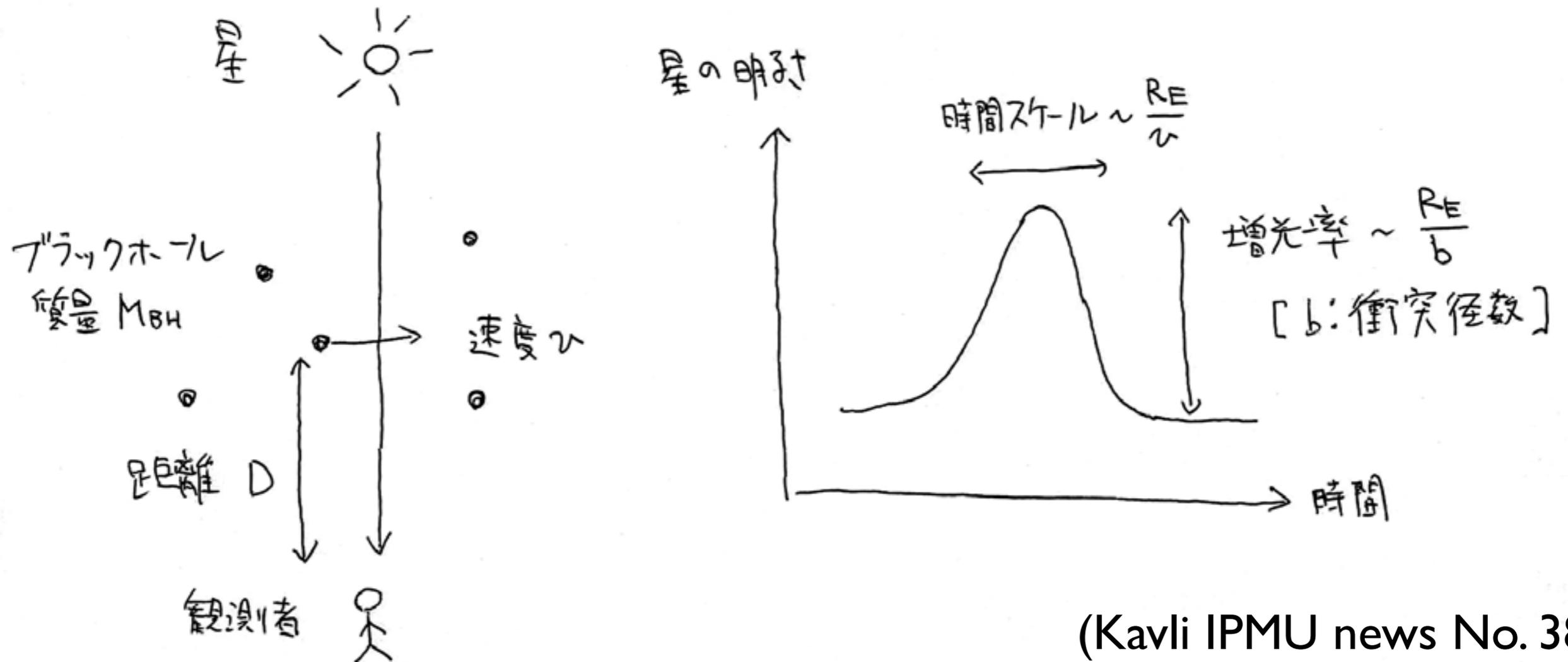
超高増光率重力マイクロレンズ

大栗 真宗

(東京大学 RESCEU/物理/Kavli IPMU)

重力マイクロレンズ

- 手前のコンパクト天体の重力レンズ効果による遠方の星の一時的な増光



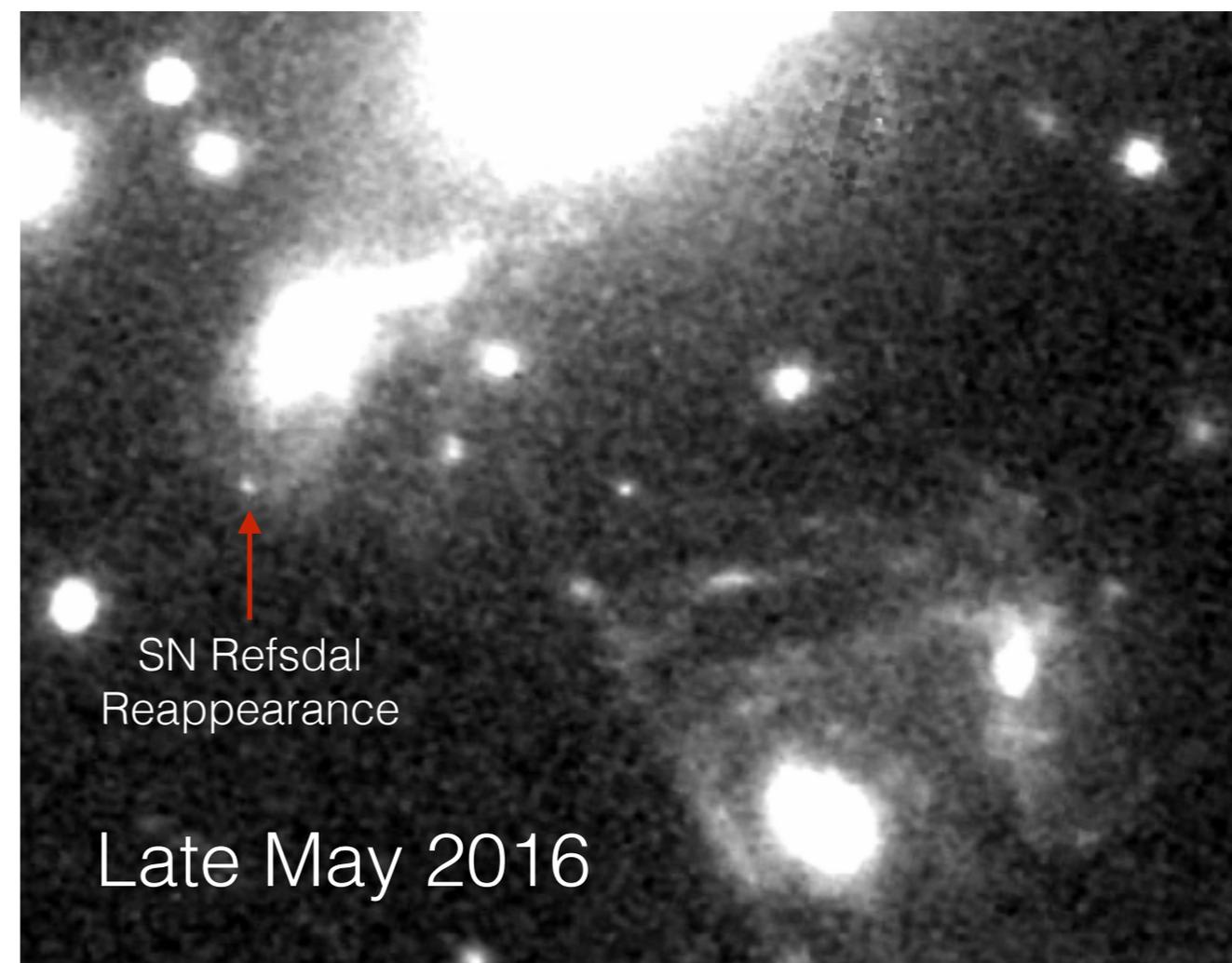
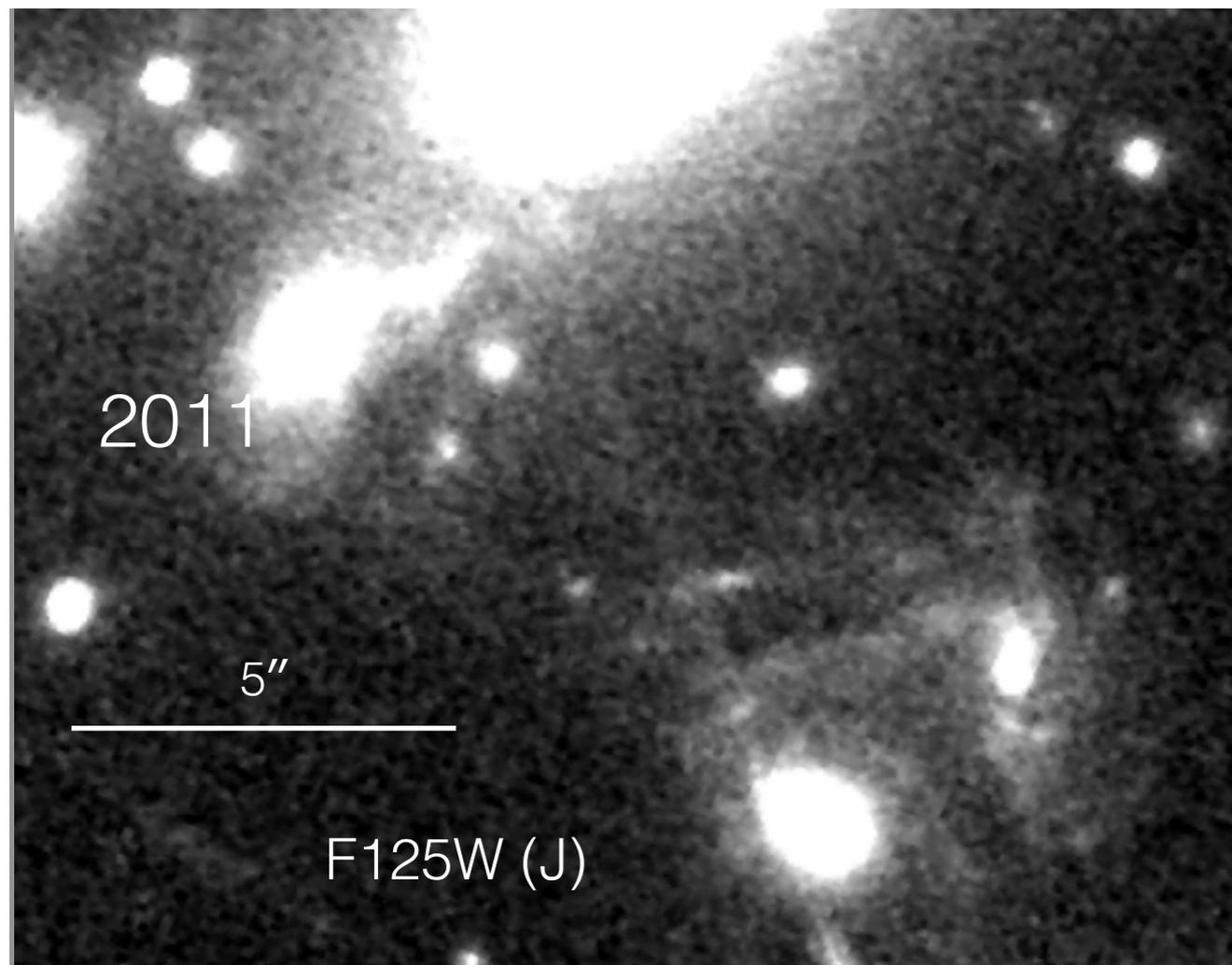
(Kavli IPMU news No. 38)

今回の話

- 銀河団中心部で新しいタイプの変動天体を発見
- 重力レンズで非常に大きく増光された単独の星と解釈 (増光率1000以上)
- 観測からソースとレンズの性質、およびダークマターモデルへの制限可能性を議論する



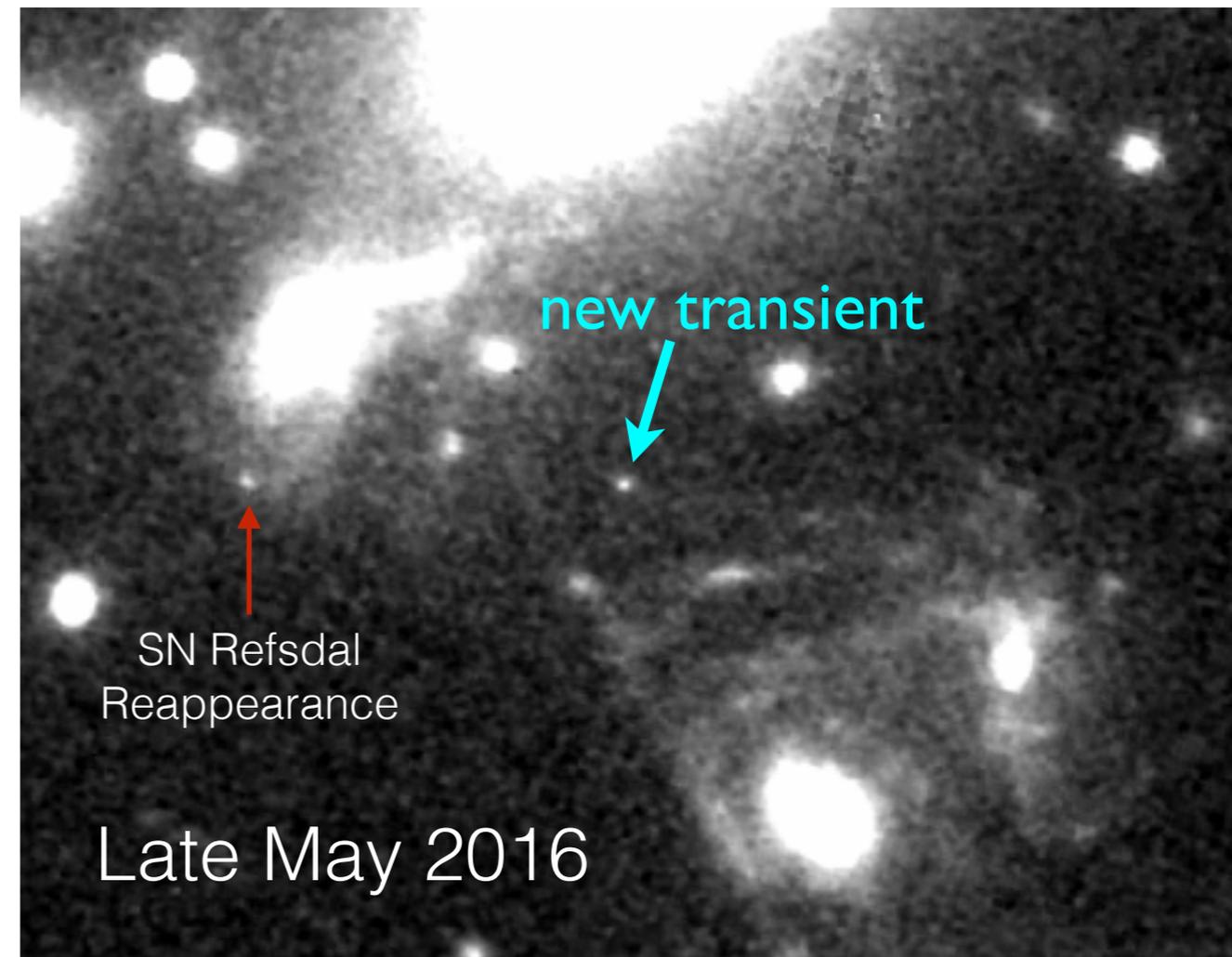
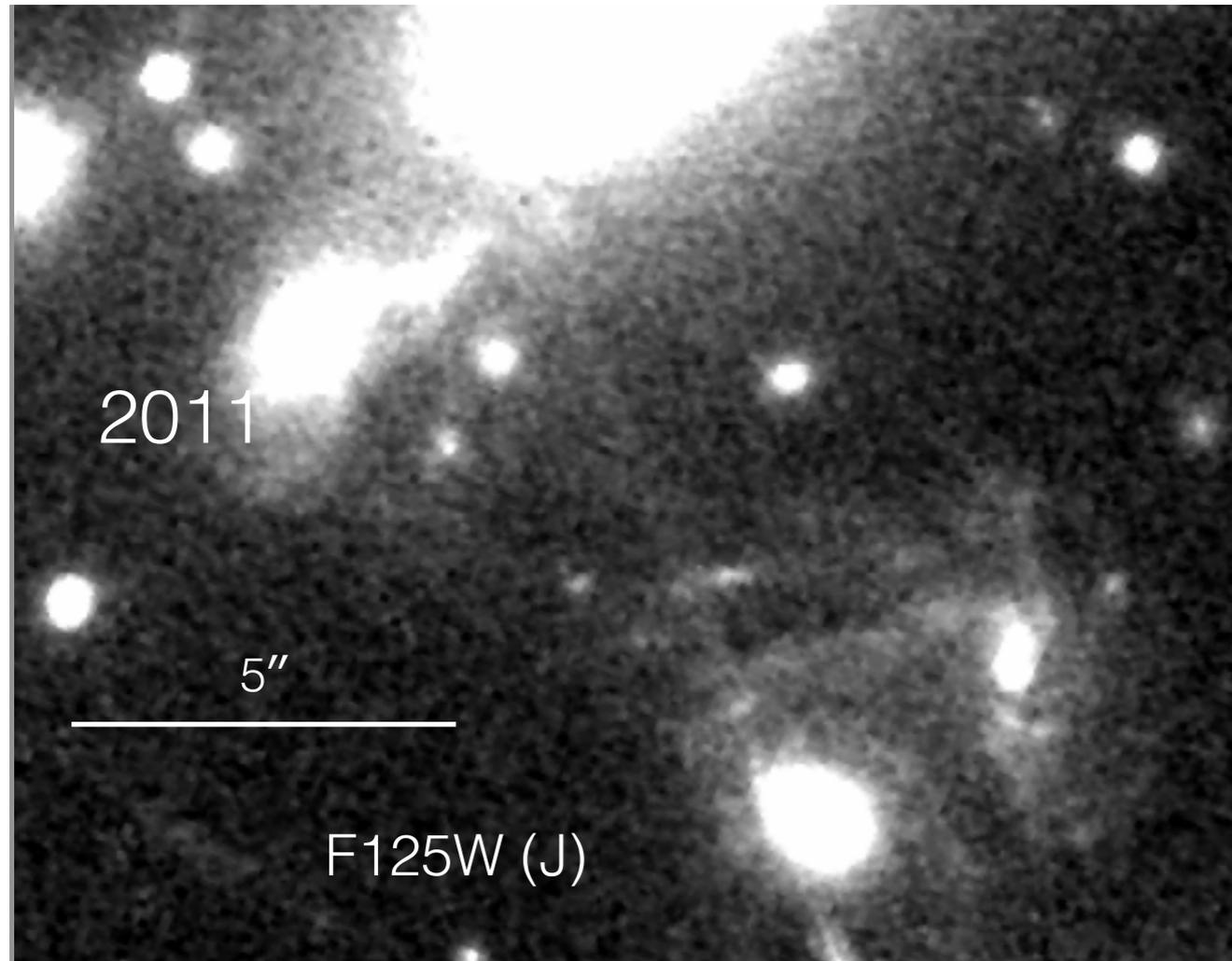
Icarusの発見



(銀河団MACSJ1149.5+2223@z=0.54)



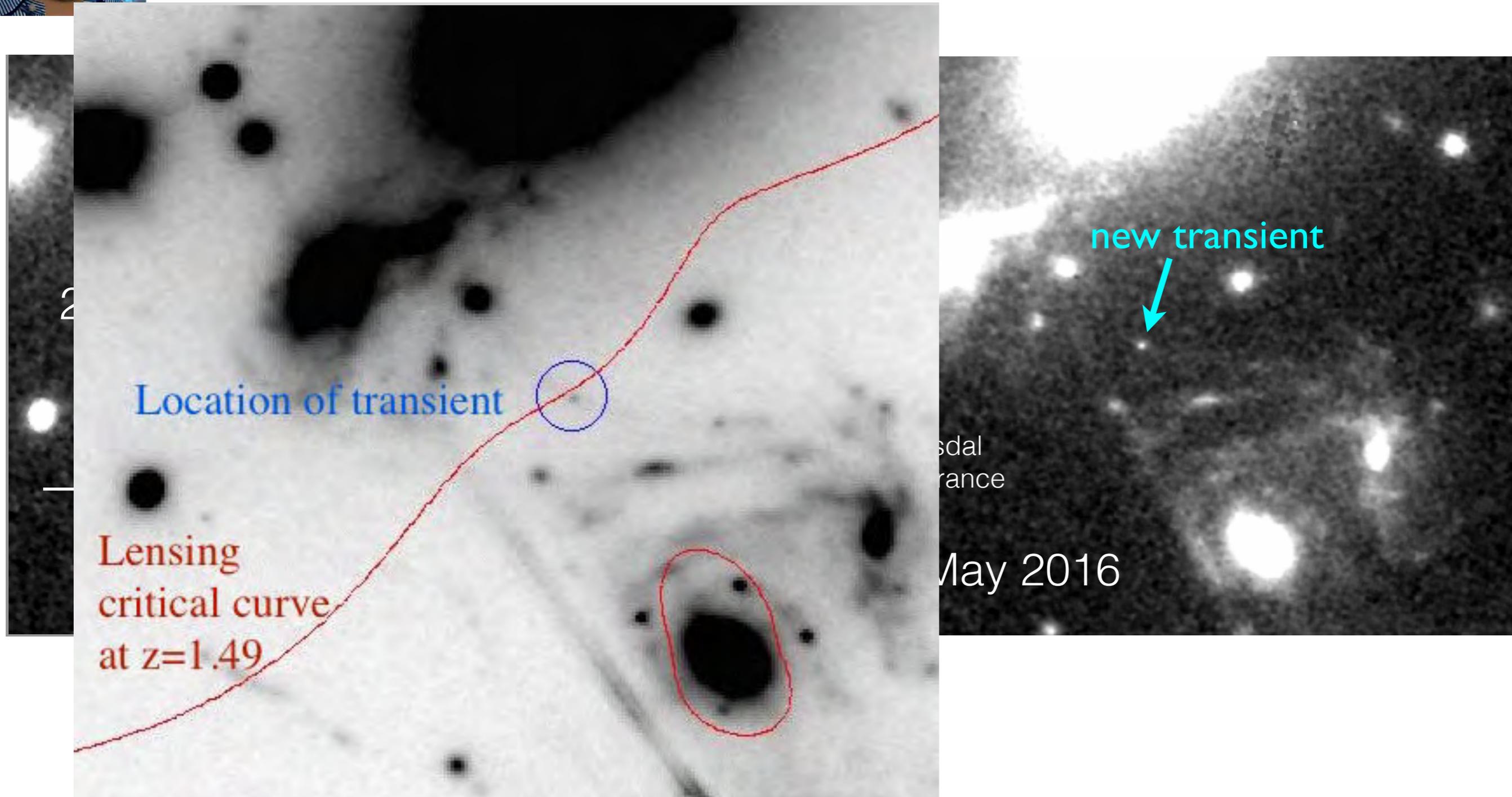
Icarusの発見



(銀河団MACSJ1149.5+2223@z=0.54)

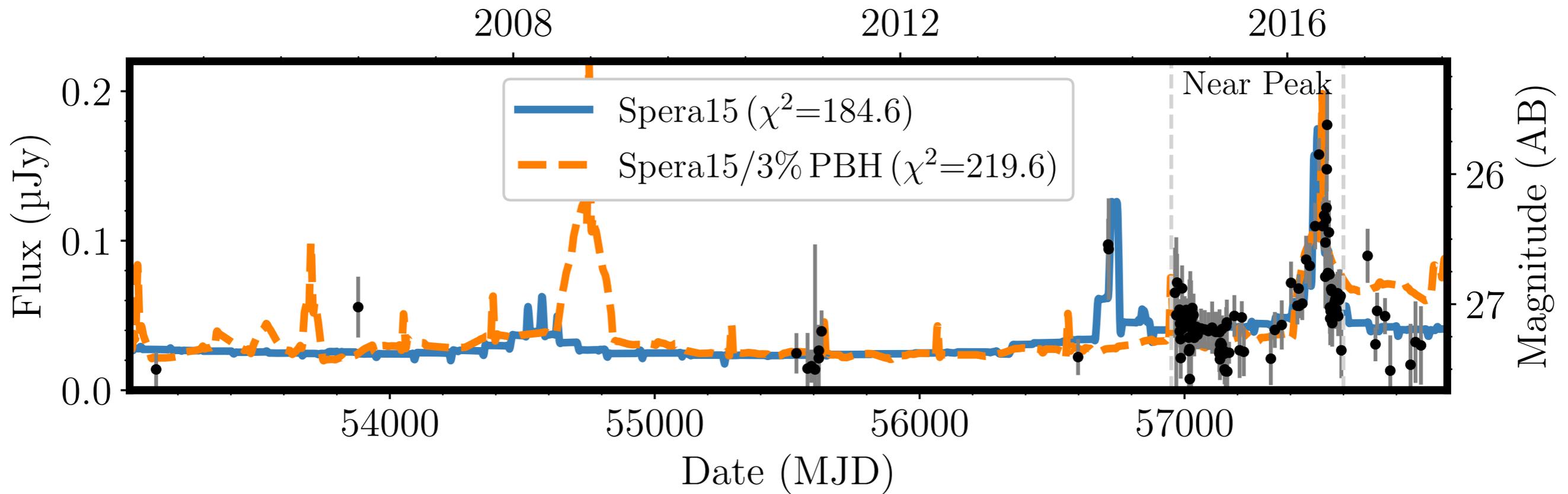


Icarusの発見



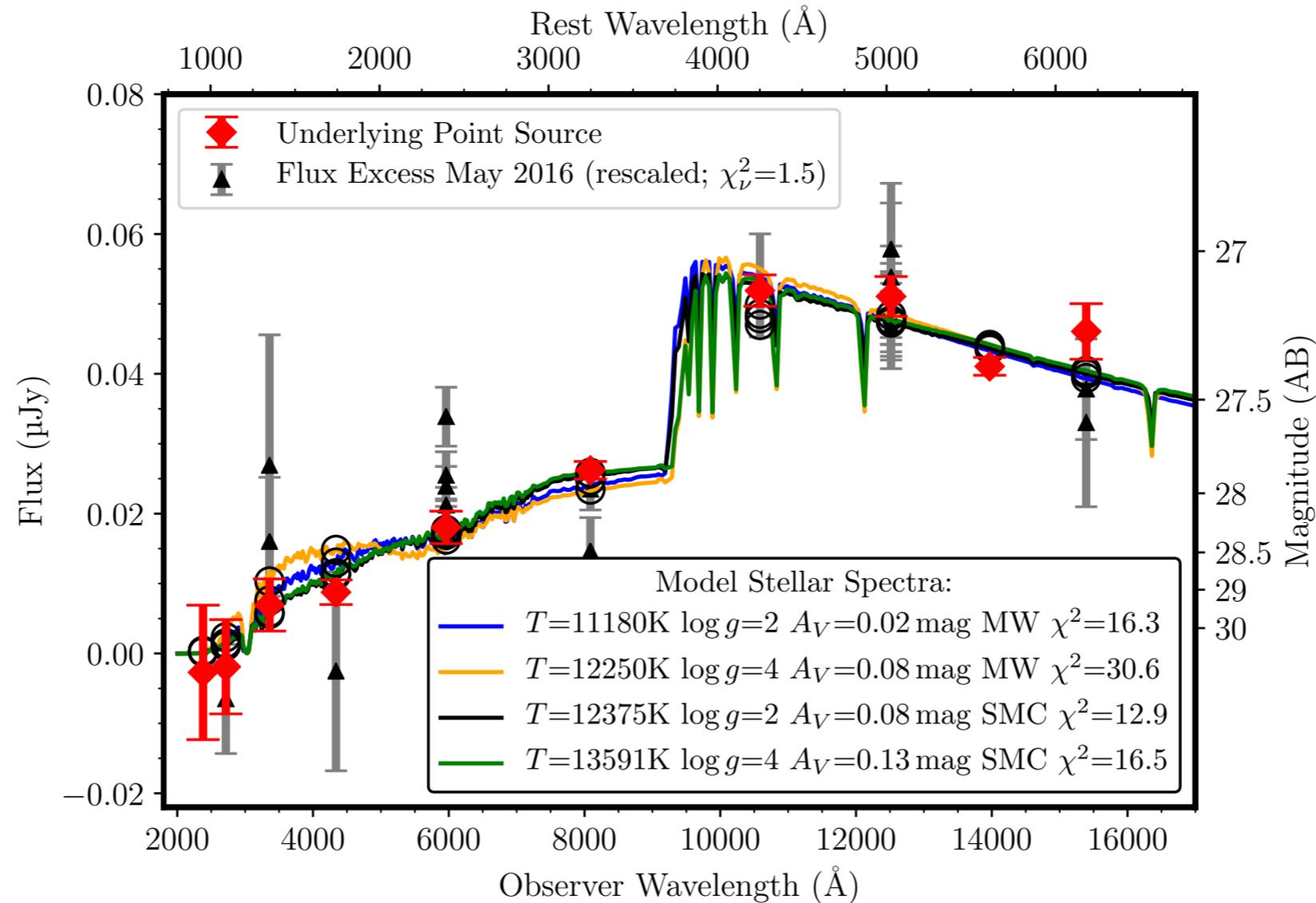
(銀河団MACSJ1149.5+2223@ $z=0.54$)

光度曲線



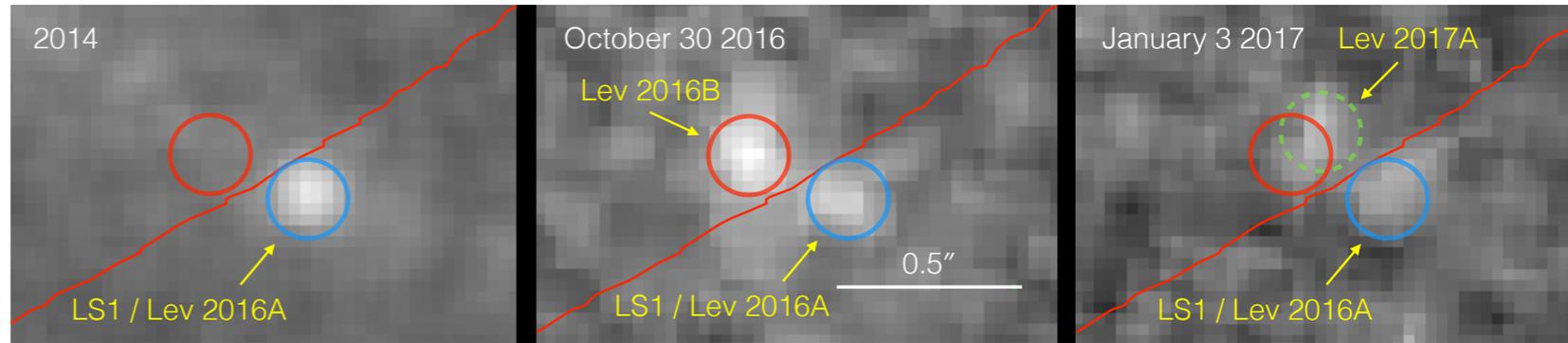
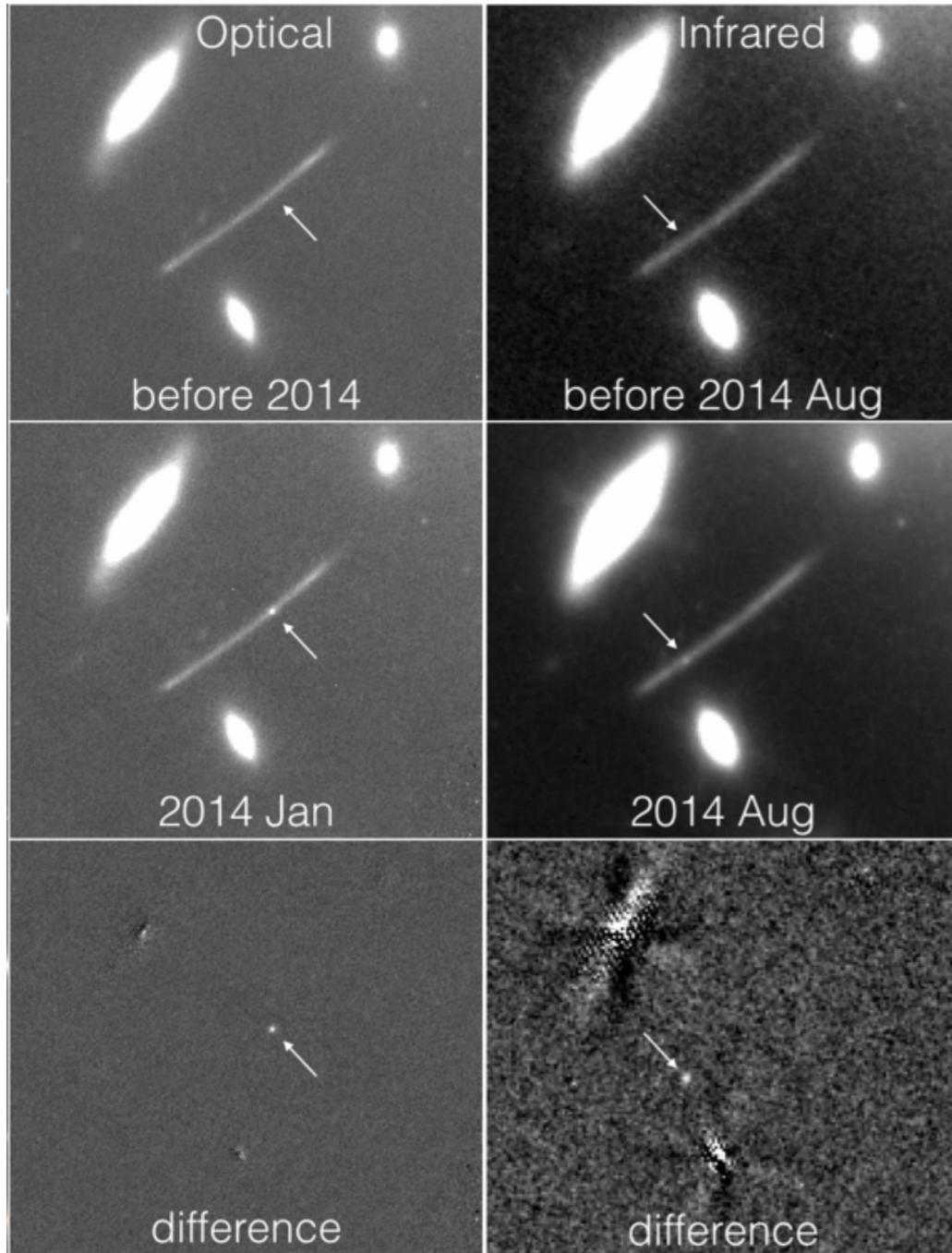
- 徐々に増加、急激な減光 (非対称)

スペクトル



- 強いバルマーブレーク
 → $z=1.49$ (=母銀河の z) のB型星
 [これまでで再遠方の単独の星の観測]

さらに他のイベント



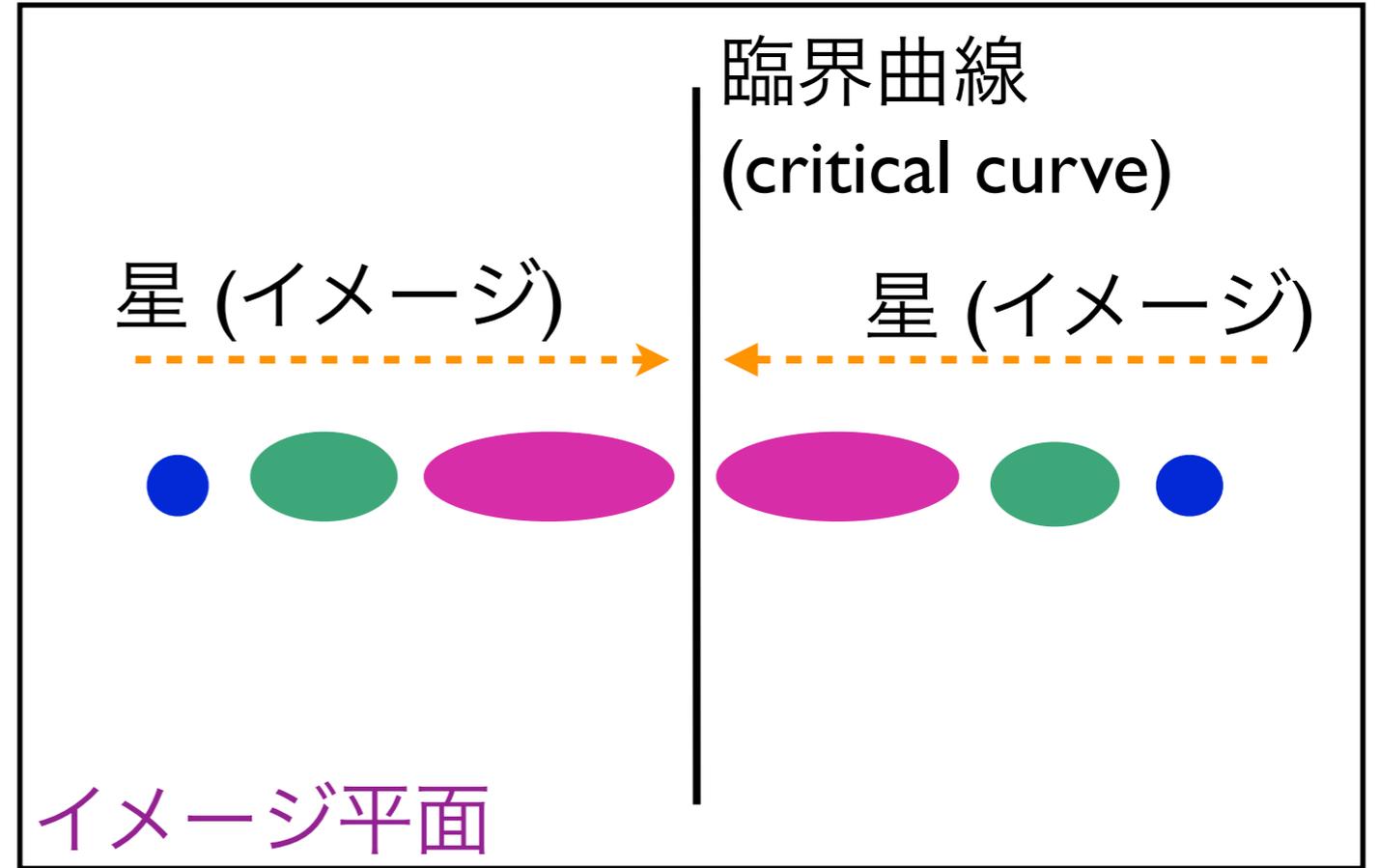
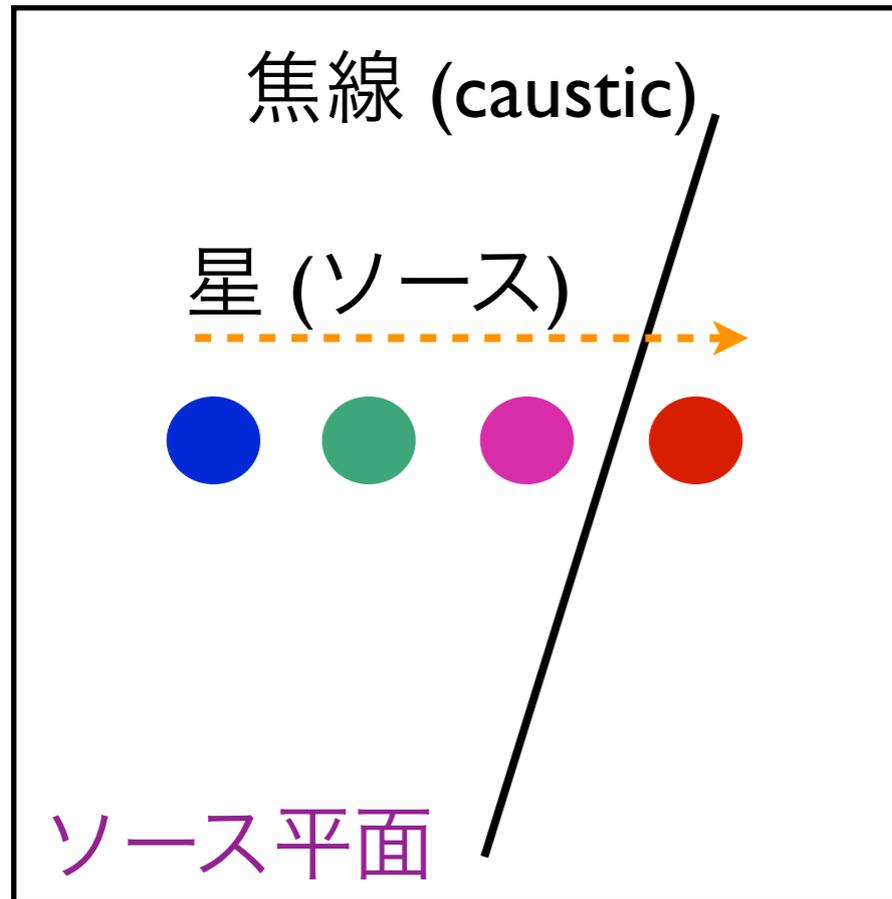
↑ Icarus近傍での他のイベント

(Kelly, ..., MO+, arXiv:1706.10279)

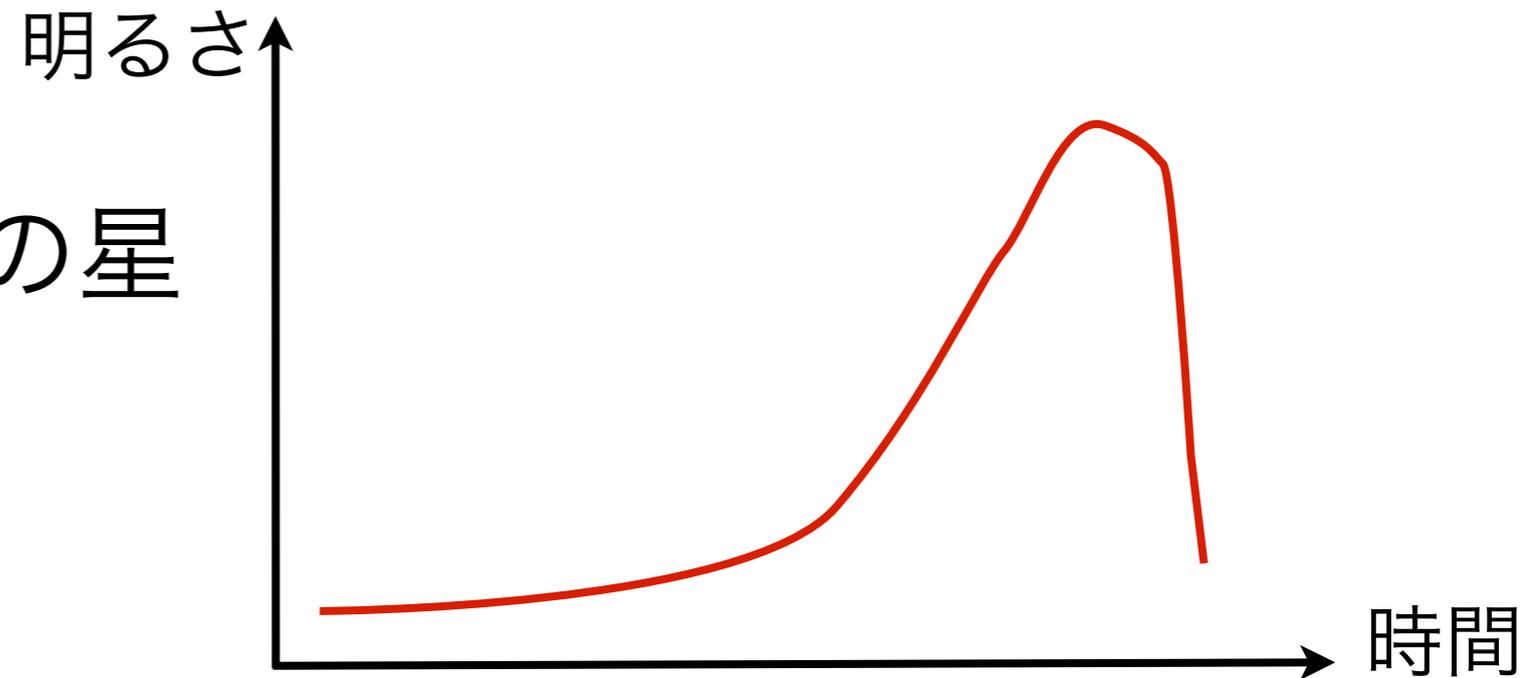
← 他の銀河団でも似たイベント

(Rodney, ..., MO+, arXiv:1707.02434)

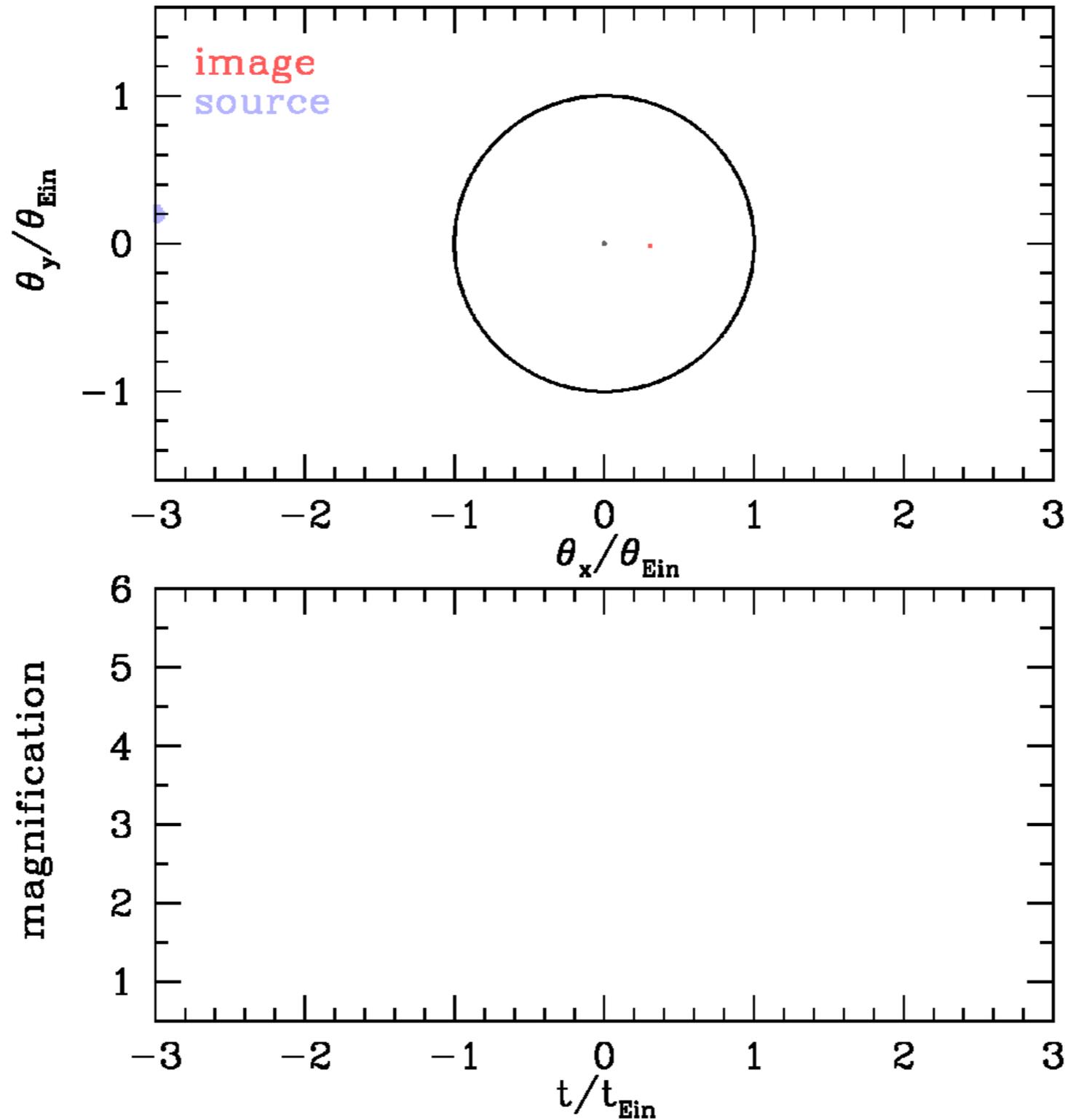
焦線通過 (caustic crossing)



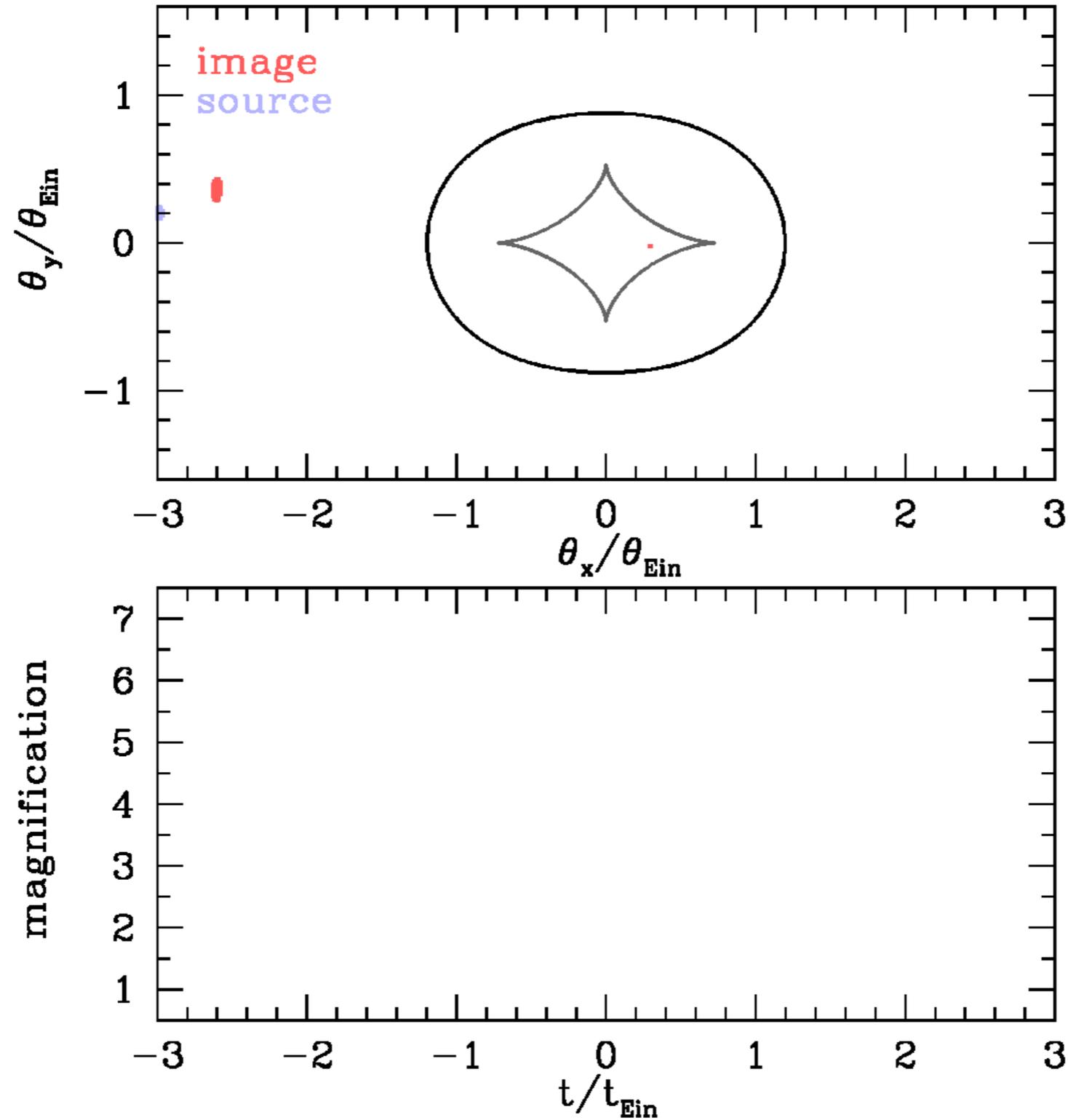
- 焦線を通過する単独の星
→ 非対称な光度曲線



普通のマイクロレンズの例



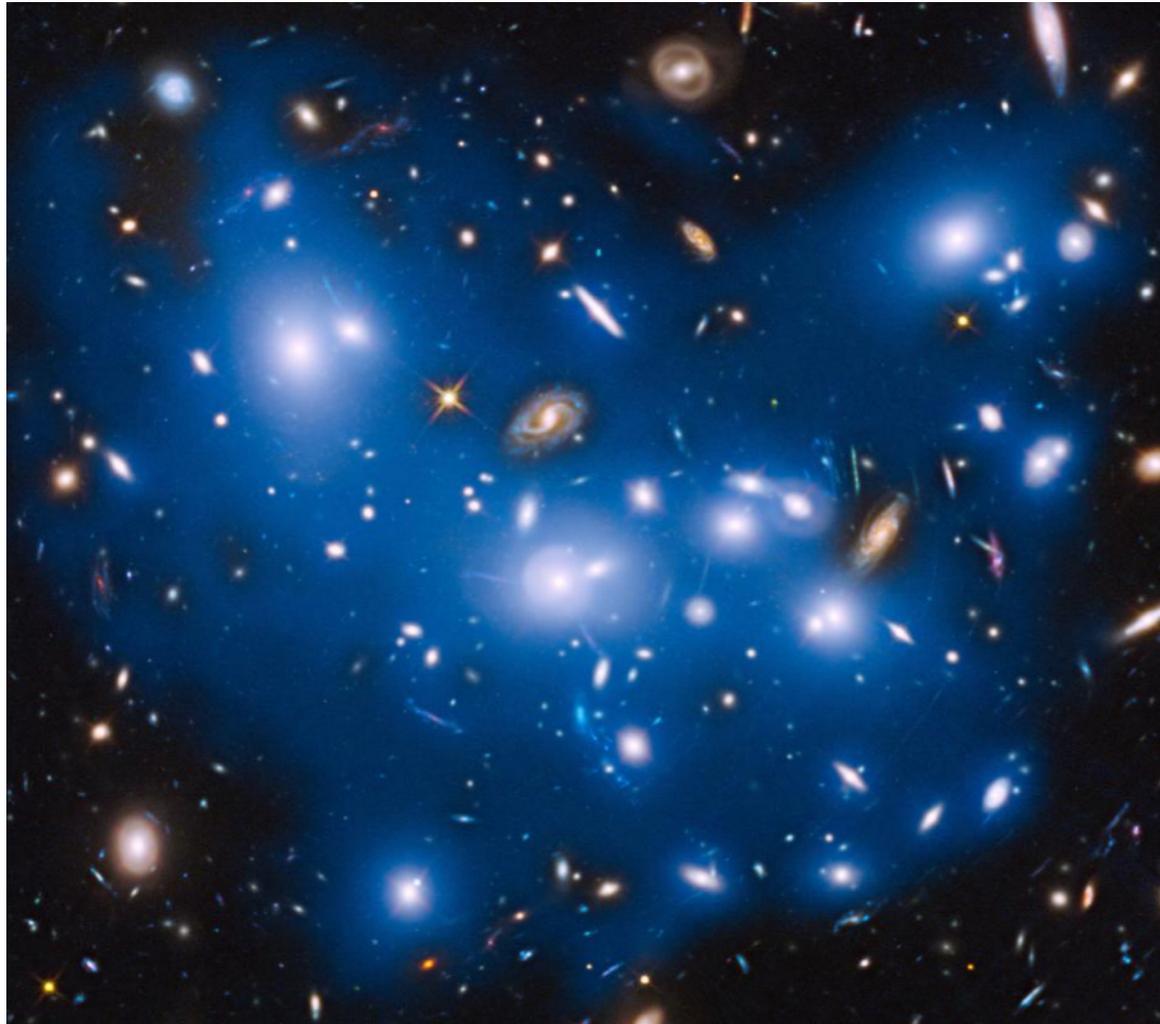
焦線通過 (caustic crossing) の例



巨大アーク内の焦線通過

- Miralda-Escude (1991) が銀河団背後の重力レンズを受けた巨大アーク内の単独の星の焦線通過の観測可能性を議論
- 滑らかな銀河団質量分布のみを考慮
- しかしながらほんのわずかなコンパクト天体が存在するだけで焦線の構造が大幅に変更される (Diego, ..., MO+ 2017; Venumadhav+ 2017)
- たとえダークマター自体がなめらかであっても **Intra-Cluster Light (ICL)** の星がそのようなコンパクト天体の役割を担う

Intra-Cluster Light (ICL)



NASA/ESA/IAC/HFF team, STScI

- 銀河団内の広がった放射
- DM分布に沿った分布
- 銀河団内の銀河の外側から剥ぎ取られた星の放射に由来

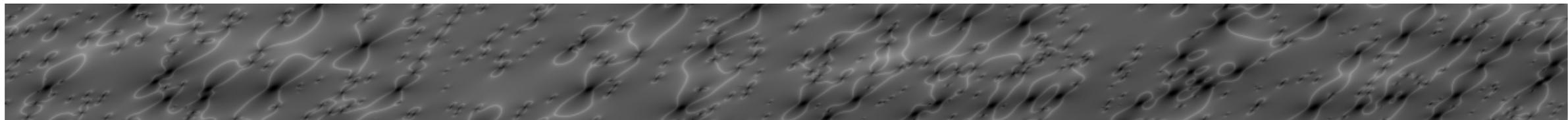


ICLの影響

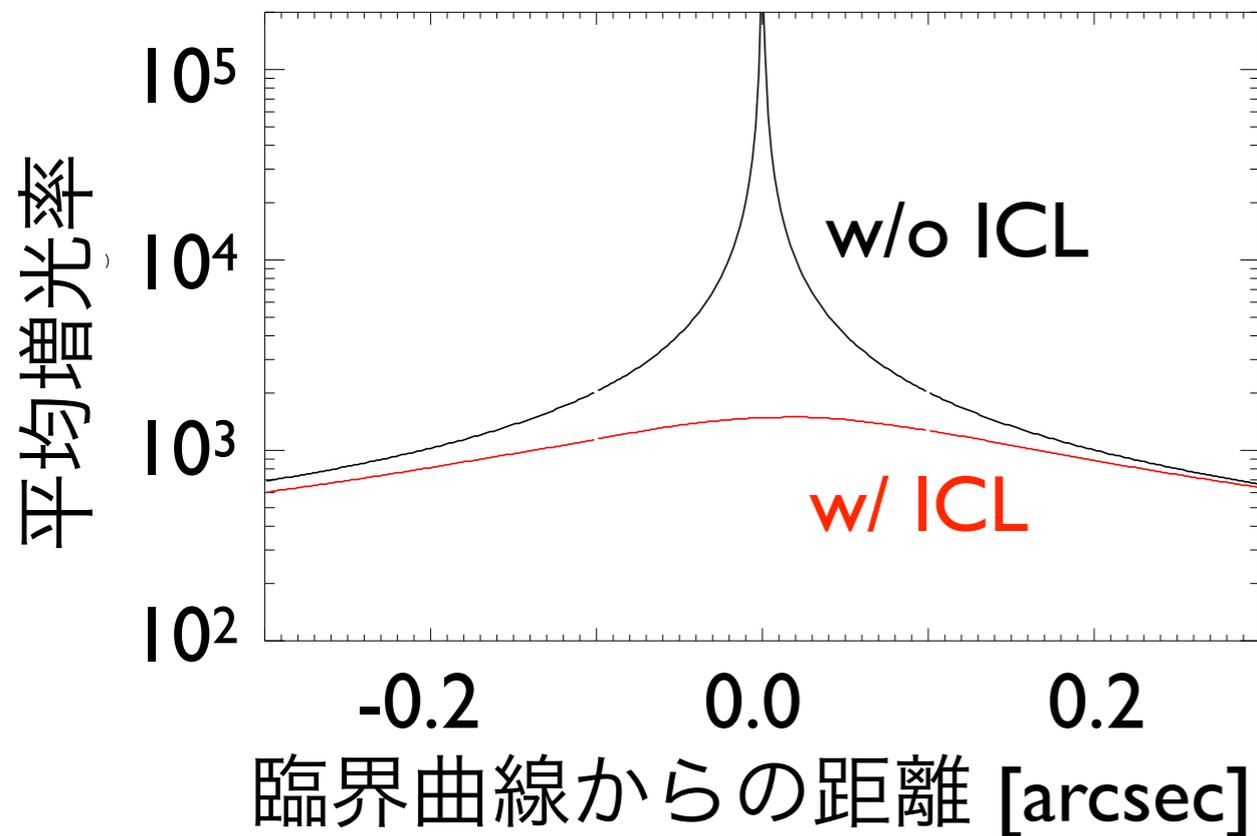
- ICLによる臨界曲線の「破壊」



w/o ICL



w/ ICL



- 臨界曲線の破壊により増光率がサチる
- コンパクト天体の存在を考慮することは Icarus の解釈に必須

焦線通過 (caustic crossing) を理解する

- Icarusのような銀河団巨大アーク内の焦線通過イベントはコンパクトDM (e.g., PBH) の有用なプローブになりうる
- このような焦線通過観測からそのレンズとソースにたいしてどのような情報が得られるだろうか？

単純な解析モデル

- 点質量レンズ (質量 M)
+ 一定の convergence $\bar{\kappa}$ と shear $\bar{\gamma}$
- 巨大アーク内の高増光率領域は
$$\mu_t^{-1} = 1 - \bar{\kappa} - \bar{\gamma} \approx 0$$
- 点質量レンズの臨界曲線と焦線は
 $\bar{\kappa}$ と $\bar{\gamma}$ のために大幅に変更をうける

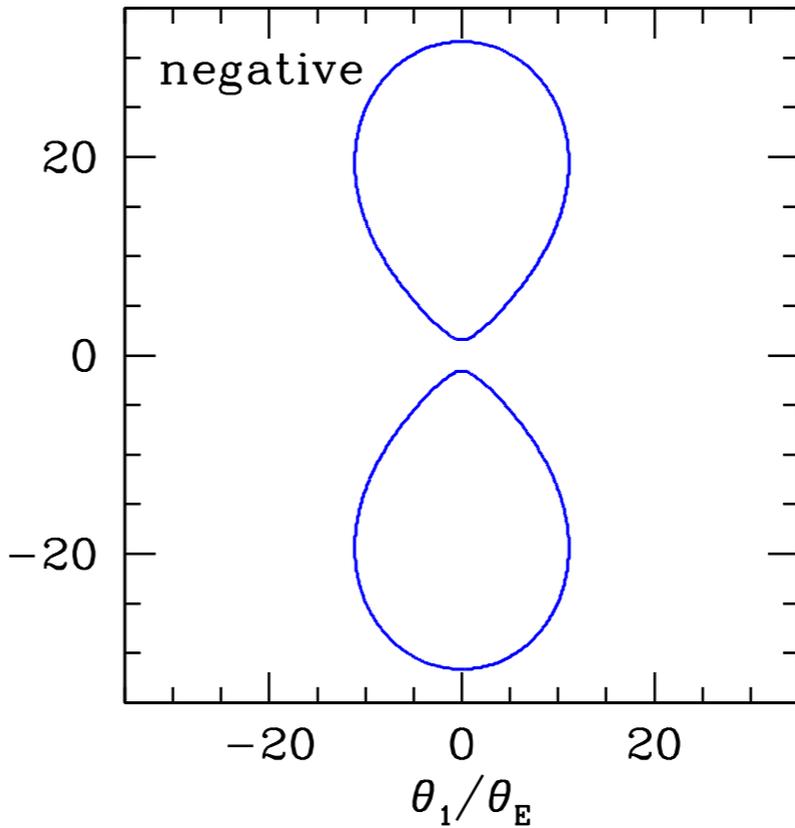
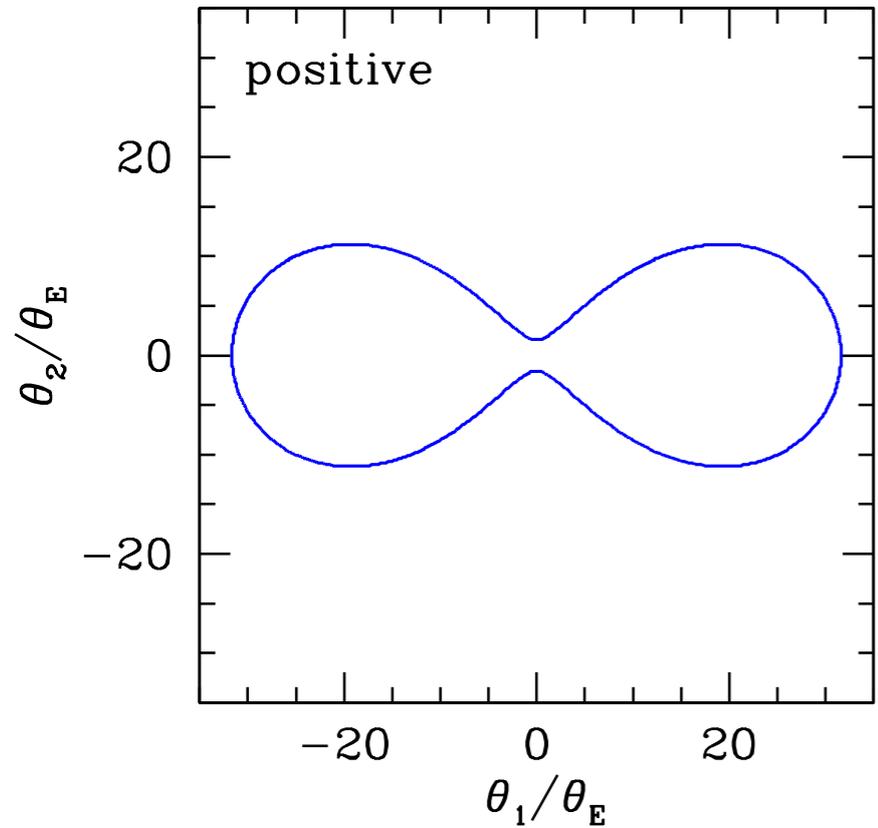
イメージ平面 (臨界曲線)

ソース平面 (焦線)

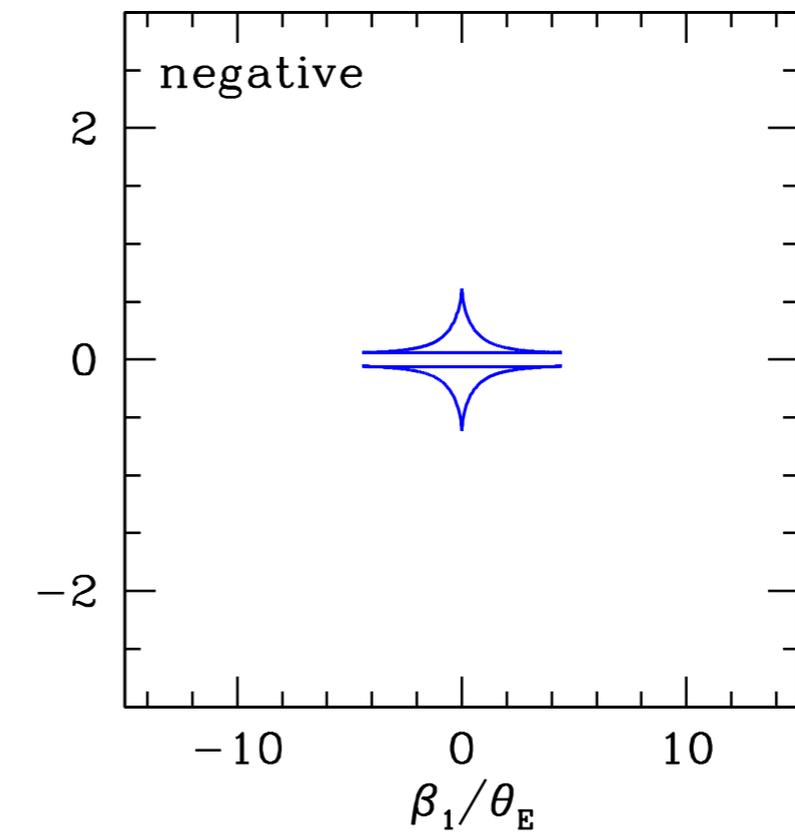
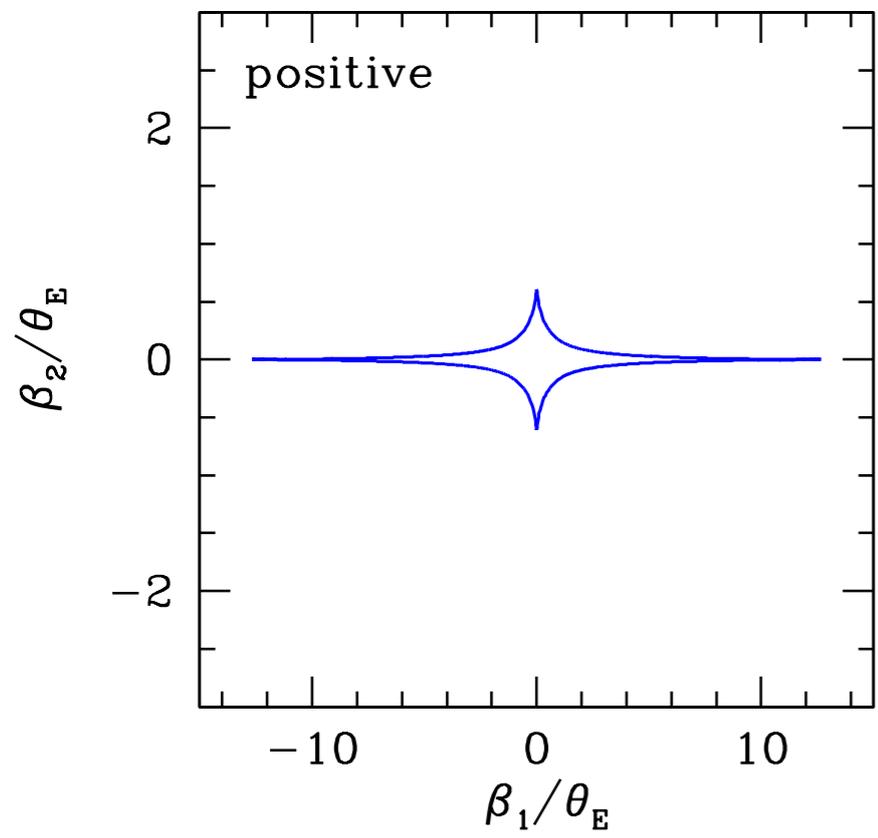
正パリティ ($\mu_t > 0$)

負パリティ ($\mu_t < 0$)

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ls}}{D_{os}D_{ol}} \right)^{1/2}$$



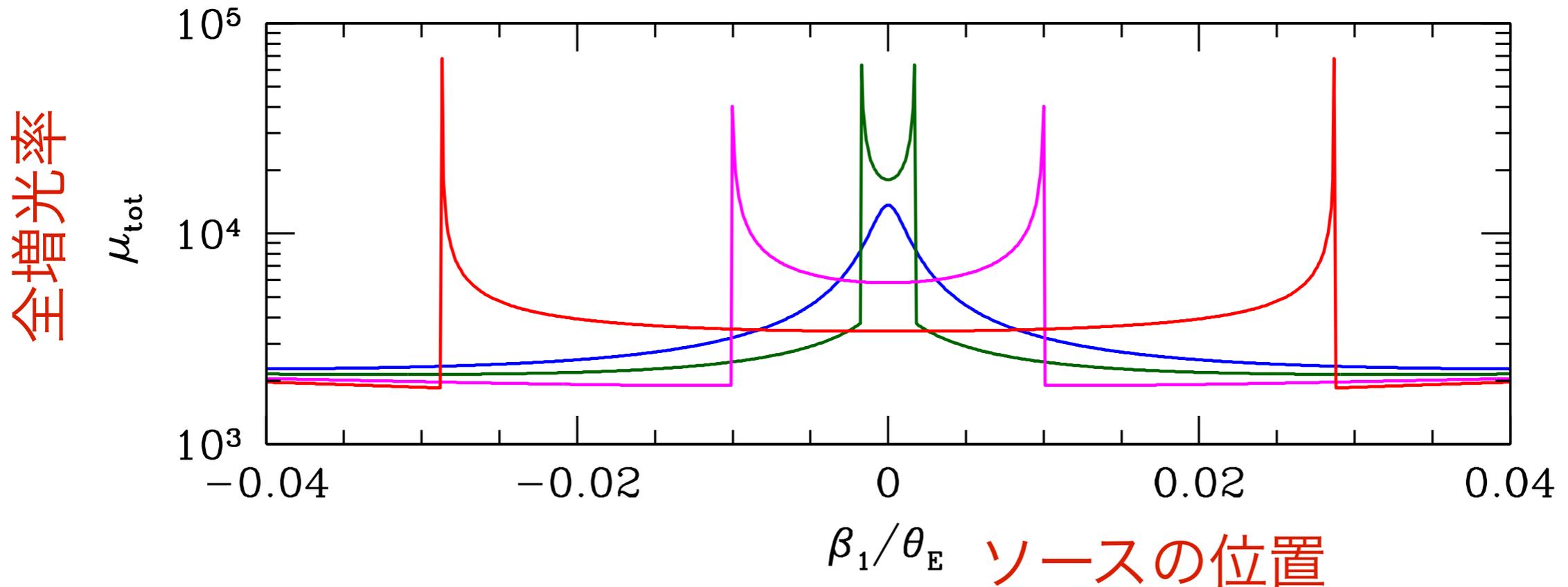
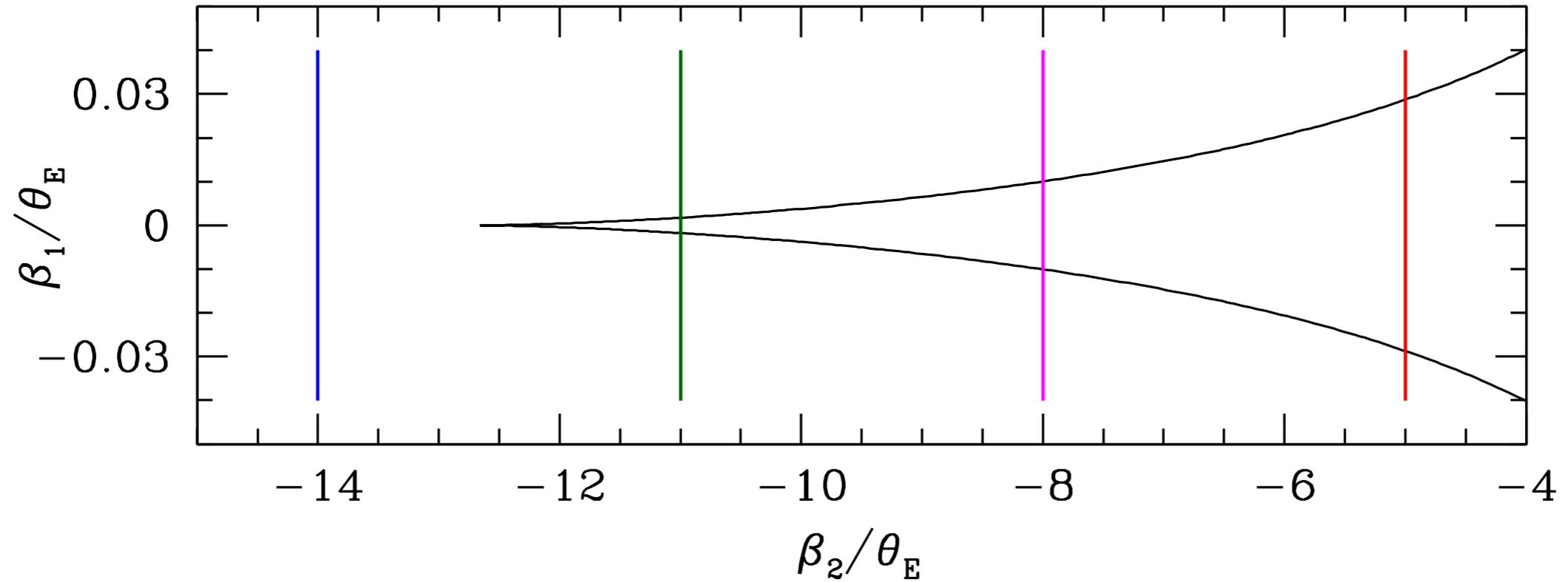
臨界曲線の
サイズは
 θ_E よりも
ずっと大きい



焦線は非常に
細長くなるが
囲まれる
面積は $\approx \theta_E$

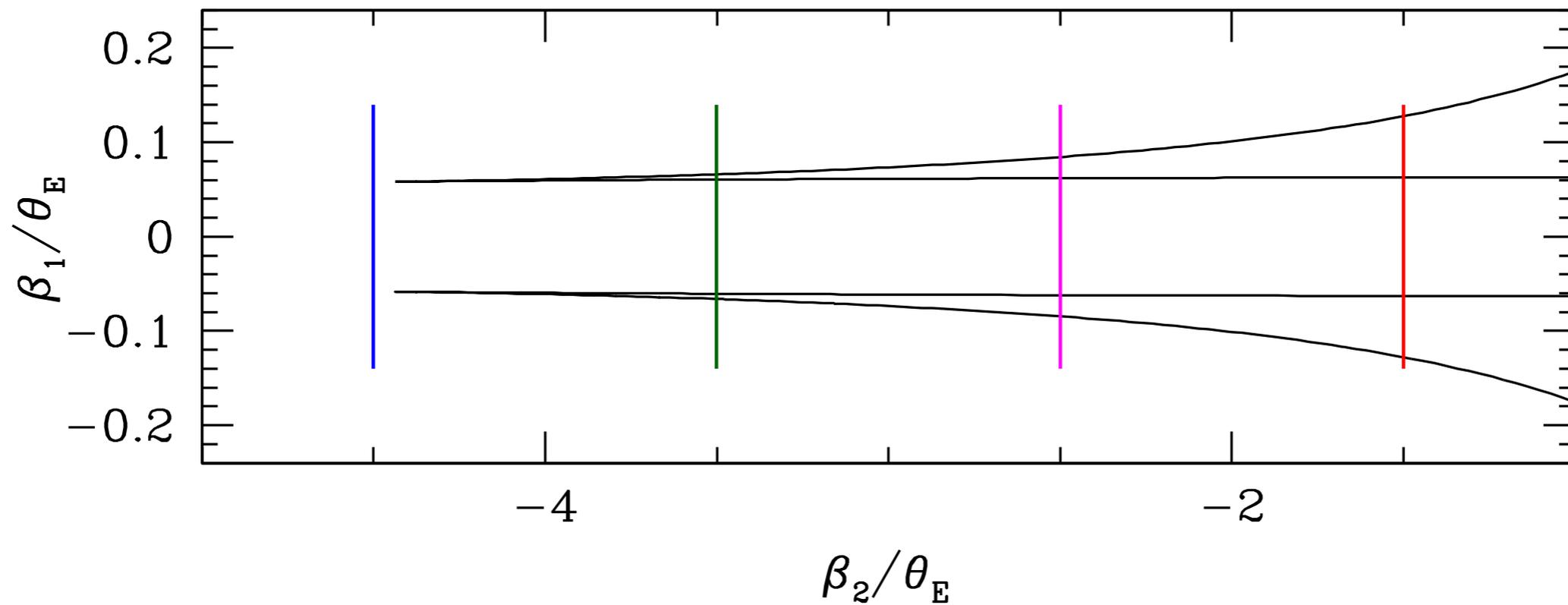
($\mu_t^{-1} = 0.001, \mu_r^{-1} = 0.401$) ($\mu_t^{-1} = -0.001, \mu_r^{-1} = 0.399$)

正パリティでの光度曲線 (焦線2回通過)

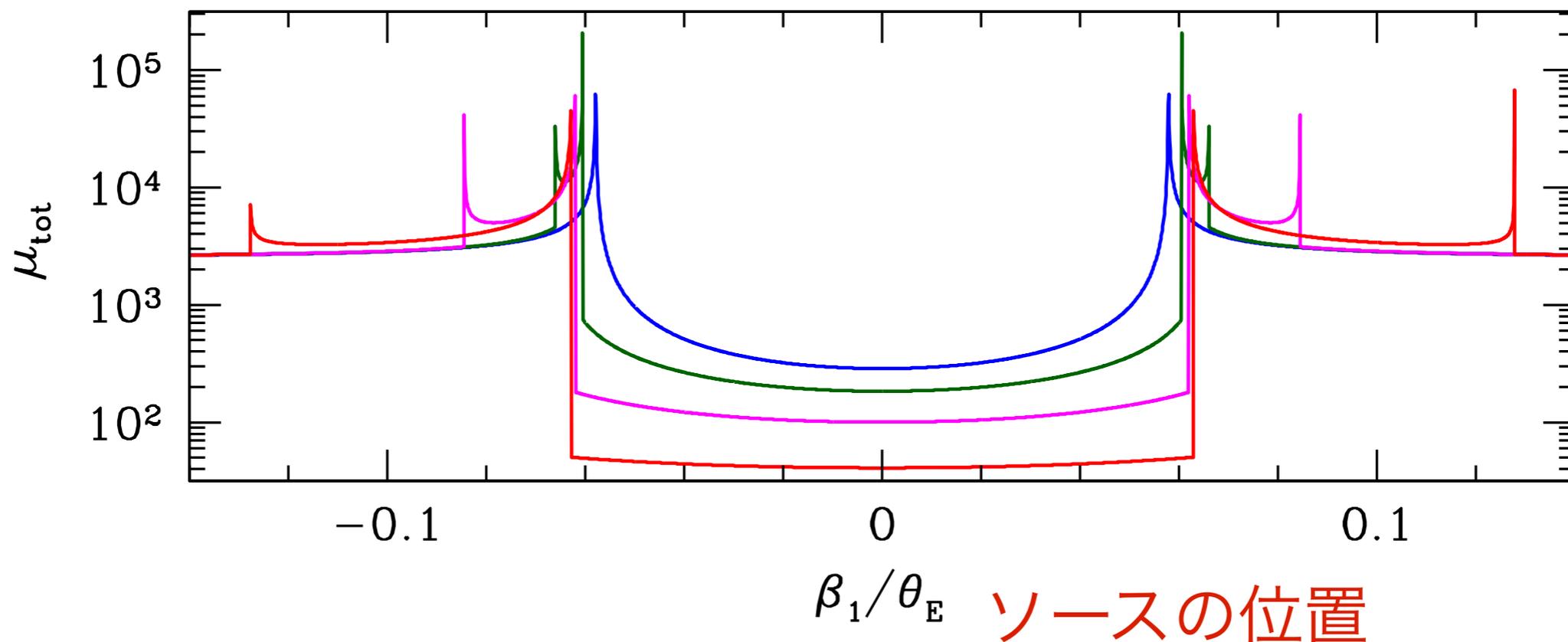


($\mu_t^{-1}=0.001$, $\mu_r^{-1}=0.401$)

負パリティでの光度曲線 (焦線4回通過)



全増光率



($\mu_t^{-1} = -0.001$, $\mu_r^{-1} = 0.399$)

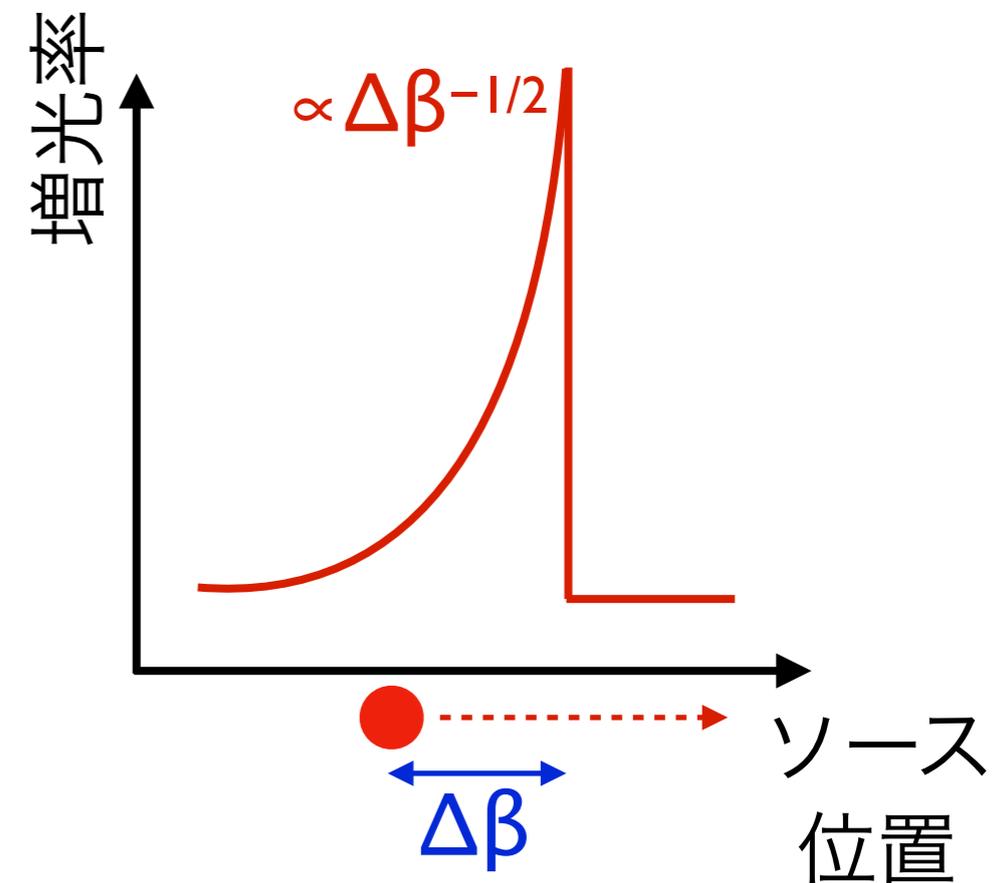
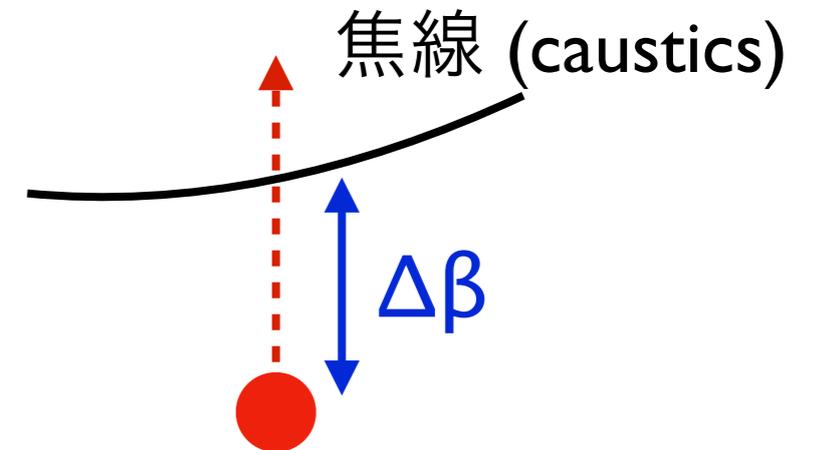
ソースの位置

漸近的振る舞い

- 焦線近傍での全増光率は
距離 $\Delta\beta \rightarrow 0$ で増大

$$\mu(\Delta\beta) \approx \mu_t \mu_r \left(\frac{\theta_E}{\sqrt{\mu_t} \Delta\beta} \right)^{1/2}$$

- 孤立した点質量レンズに比べ増光率は $\mu_t^{3/4} \mu_r \gg 1$ だけ大きい (銀河団ポテンシャルと点質量レンズ両方の増光の重ね合わせ)



有限ソースサイズ効果

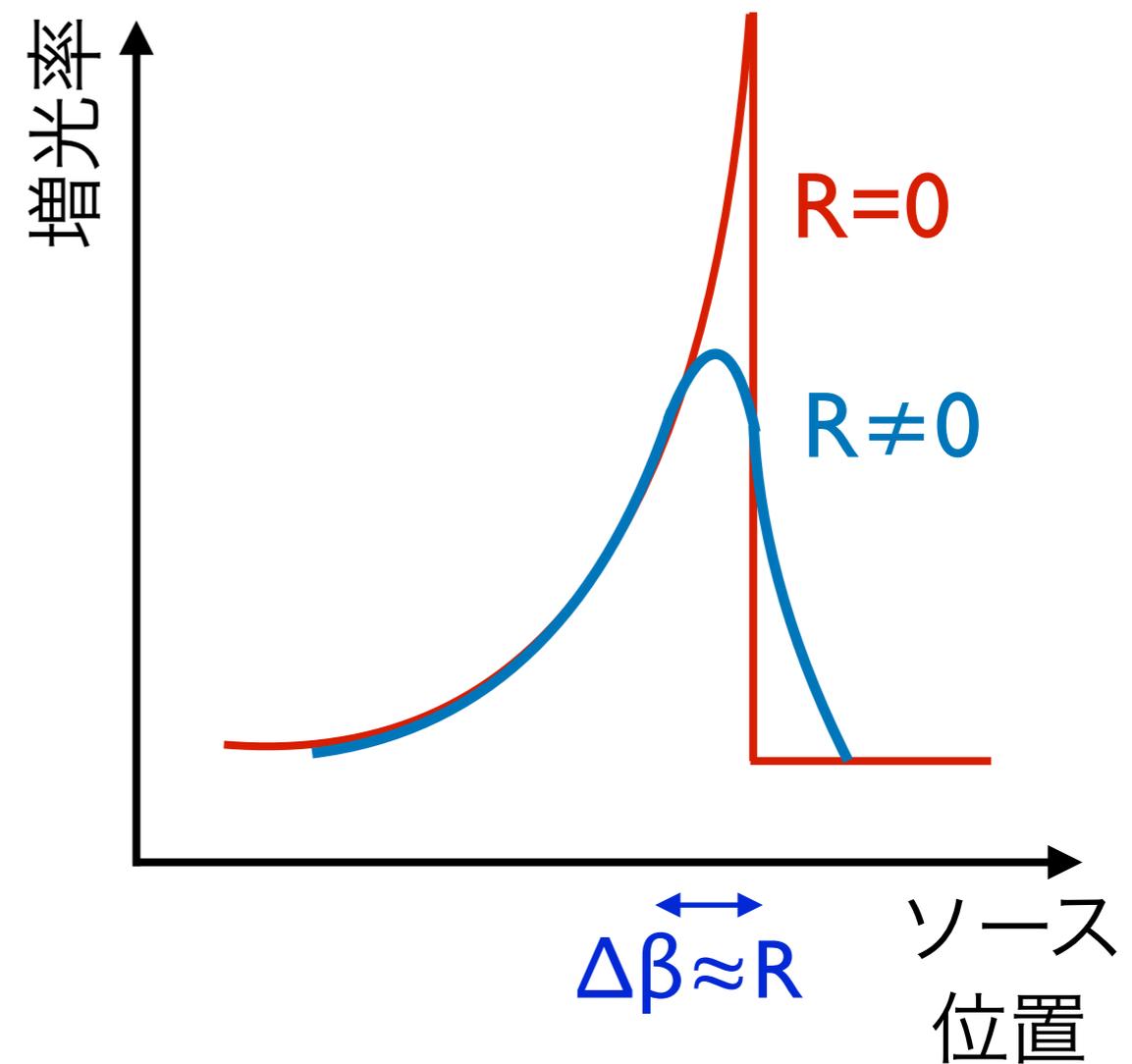
- ソースとなる星は有限の半径Rを持つ

→ 最大増光率が存在

$$\mu_{\max} \approx \mu(\Delta\beta = R) \approx \mu_t \mu_r \left(\frac{\theta_E}{\sqrt{\mu_t} R} \right)^{1/2}$$

小さい星半径Rほど

大きい最大増光率 μ_{\max}



増光された星の観測可能性

- 大きい半径を持つ星は最大増光率 μ_{\max} が小さいが、そのような星はもともと明るい

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4$$

L: 光度
R: 半径
T: 温度

- 半径の大きい (もともとの光度が大きい) 星のほうが観測される最大明るさは大きい

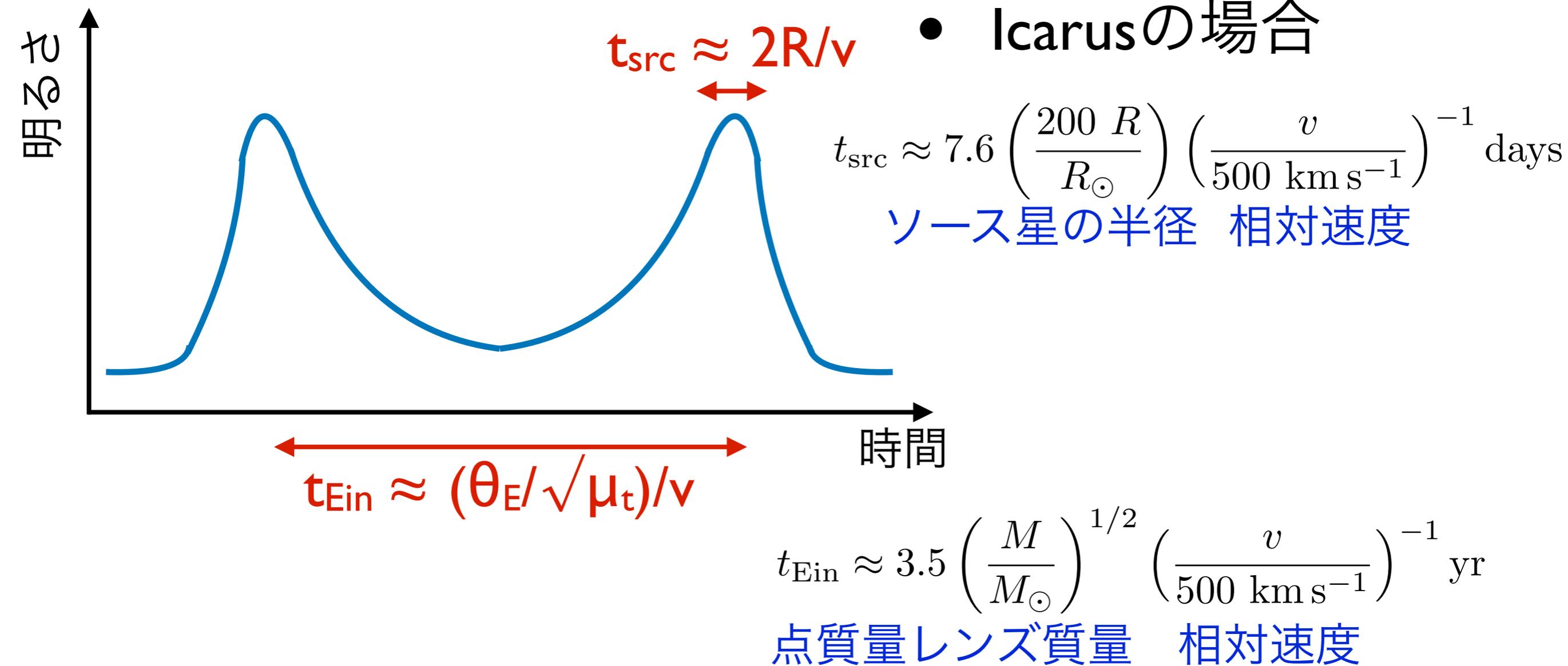
$$f_{\max} \propto \mu_{\max} L \propto R^{-1/2} L \propto R^{3/2} T^4$$

- 具体的に Icarus の場合

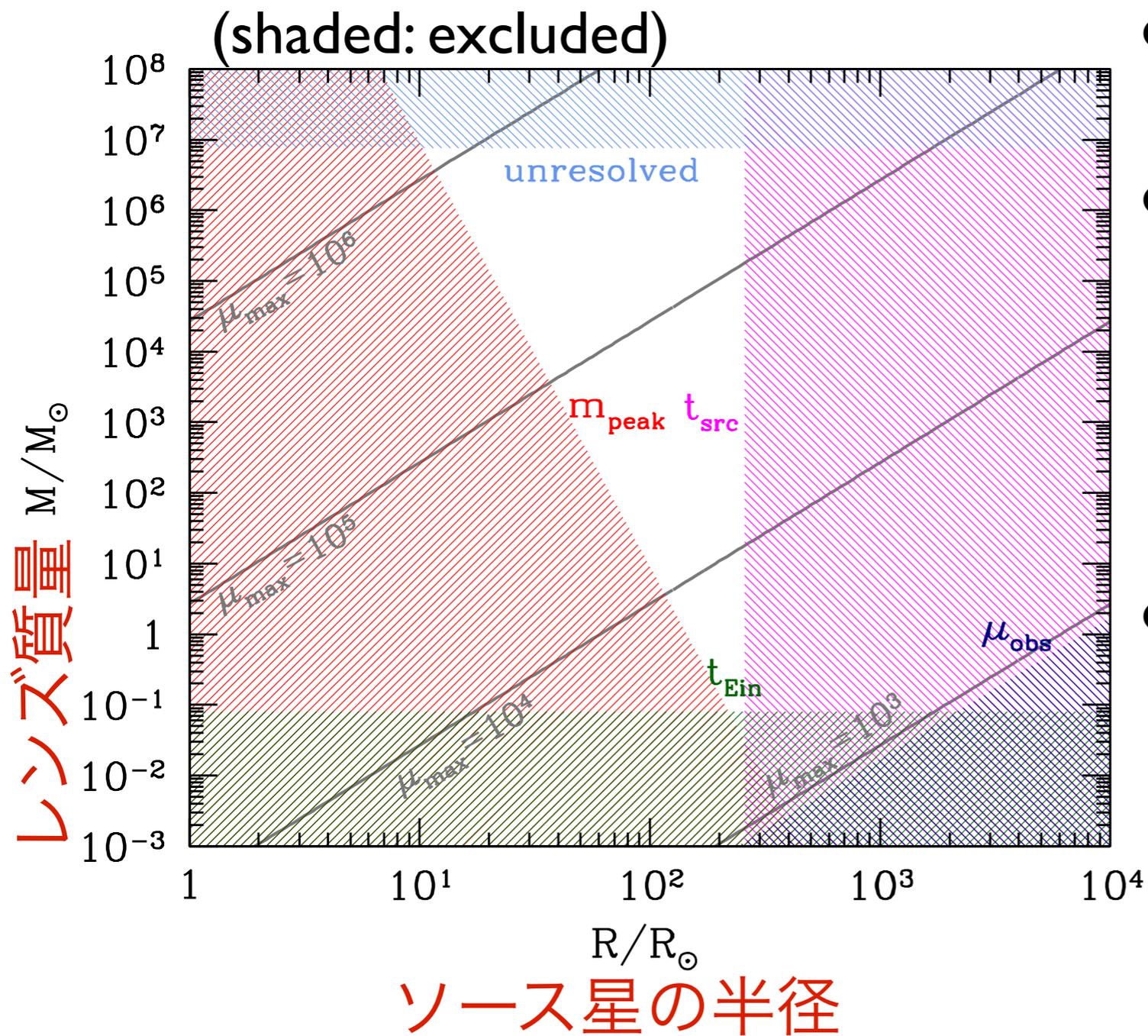
$$m_{\text{peak}} \approx 25.5 - 3.75 \log \left(\frac{200 R}{R_{\odot}} \right) - 0.625 \log \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)$$

ソース星の半径 点質量レンズ質量

光度曲線の時間スケール

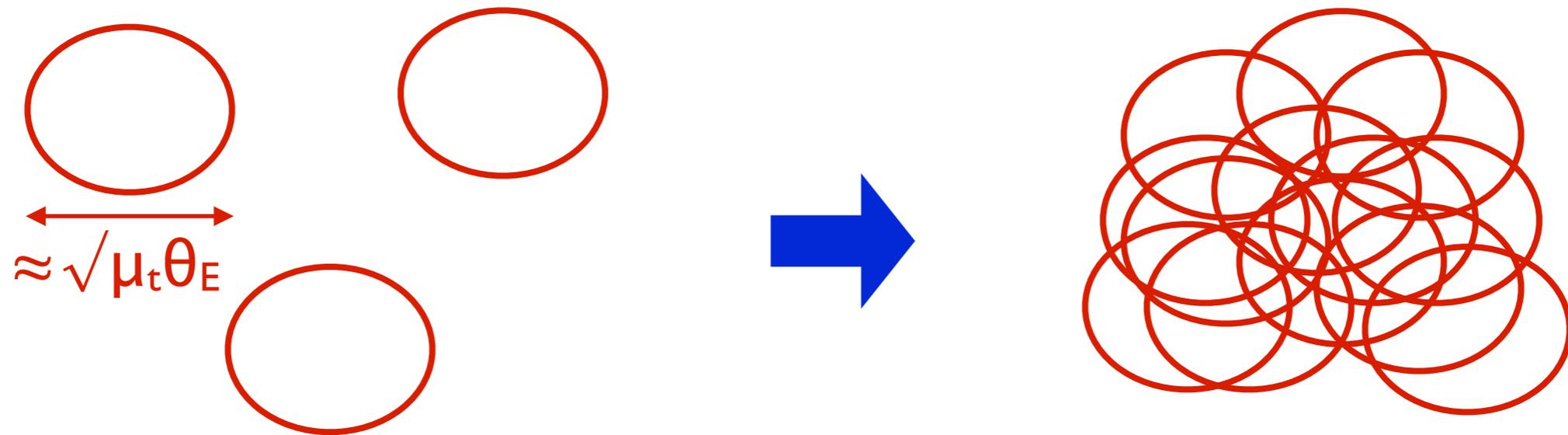


レンズとソースへの制限



- Icarusの場合の制限
- レンズ質量はICLの星の質量 ($\sim 1 M_{\text{sun}}$) と無矛盾
- 最大増光率は $R \approx 180 R_{\text{sun}}$ および $M \approx 0.3 M_{\text{sun}}$ の場合 $\mu_{\text{peak}} \approx 4300$

サチュレーション (Saturation)



低質量密度 Σ

高質量密度 Σ

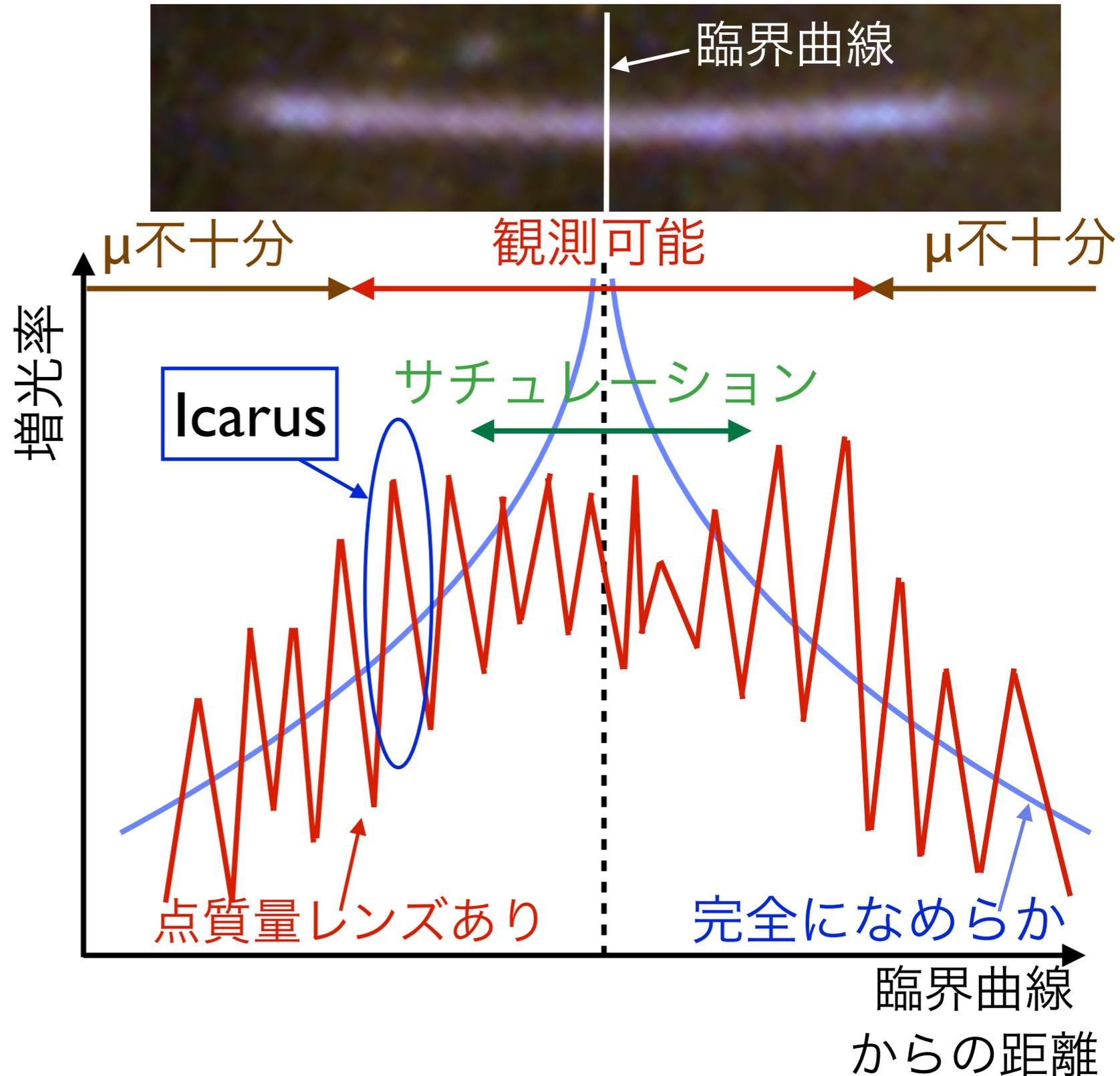
- 点質量レンズの数密度が十分大きくなると
アインシュタイン半径が重なってくる
→ 増光率がサチる

$$\tau = \frac{\Sigma}{M} \pi (\sqrt{\mu_t} \theta_E D_{ol})^2$$

$\tau \gtrsim 1 \rightarrow$ サチる

焦線通過: 定性的理解

- 臨界曲線から遠いと不十分な増光率
- 中心部では平均増光率がサチる
- 焦線通過は「正しい」範囲でのみ観測される



イベントレート

- 焦線通過の期待されるイベントレート

$$\frac{dN}{dt} = 2 \int_{\theta_{h,\min}}^{\theta_{h,\max}} d\theta_h n_{\text{star}} w_{\text{arc}} \mu_t \mu_r \frac{\Sigma}{M} 2 \frac{\sqrt{\mu_t}}{\mu_r} D_{ol}^2 \theta_E u$$

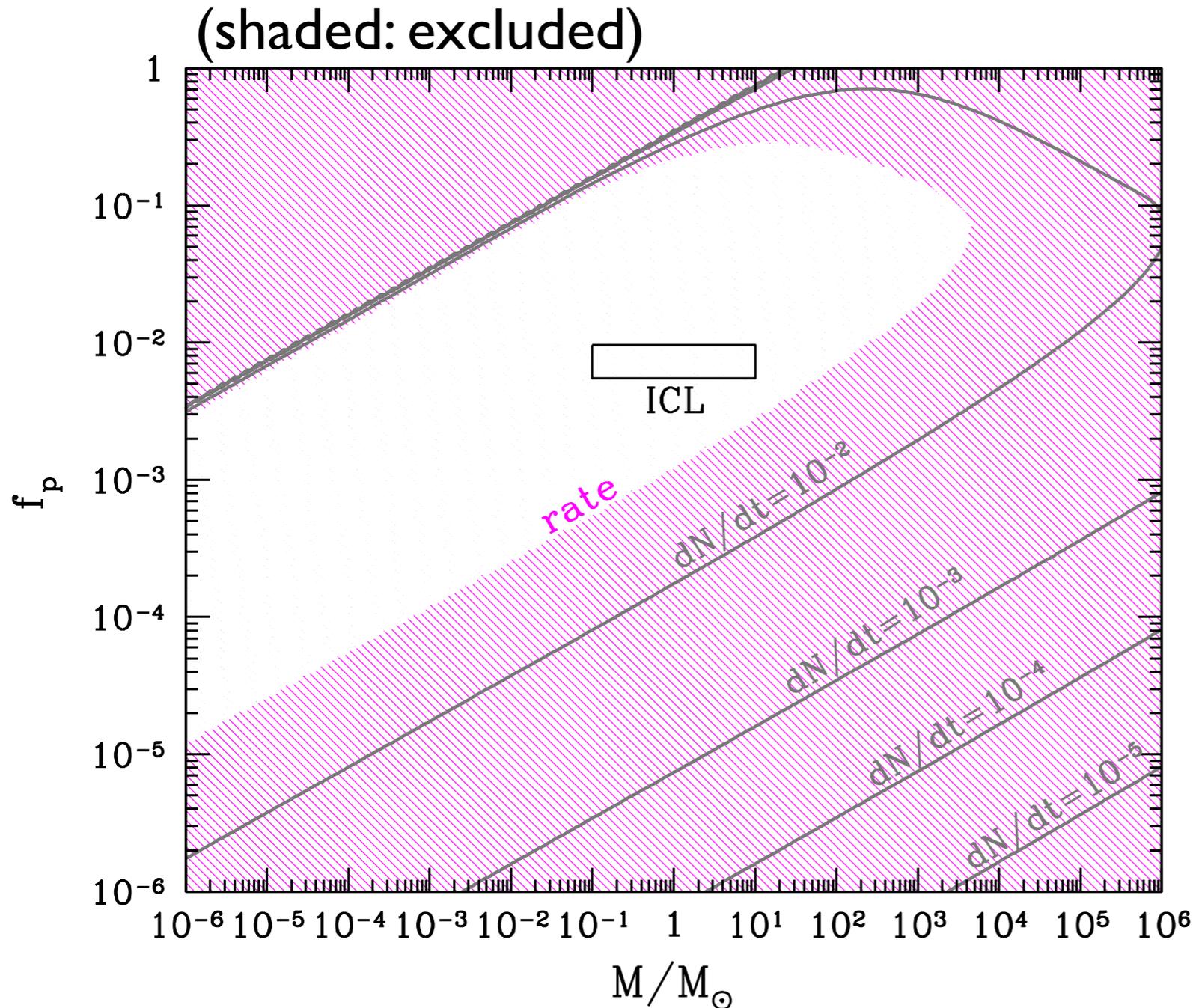


$$+ 2 \int_0^{\theta_{h,\min}} d\theta_h n_{\text{star}} w_{\text{arc}} \mu_t \mu_r \frac{\Sigma}{M} 2 \frac{\sqrt{\mu_t}}{\mu_r} D_{ol}^2 \theta_E u \Big|_{\mu_t, \max}$$

サチった中心領域からの寄与

Icarus領域のイベントレート

点質量レンズの質量割合



レンズ質量

多くの点質量レンズ
強いサチュレーション

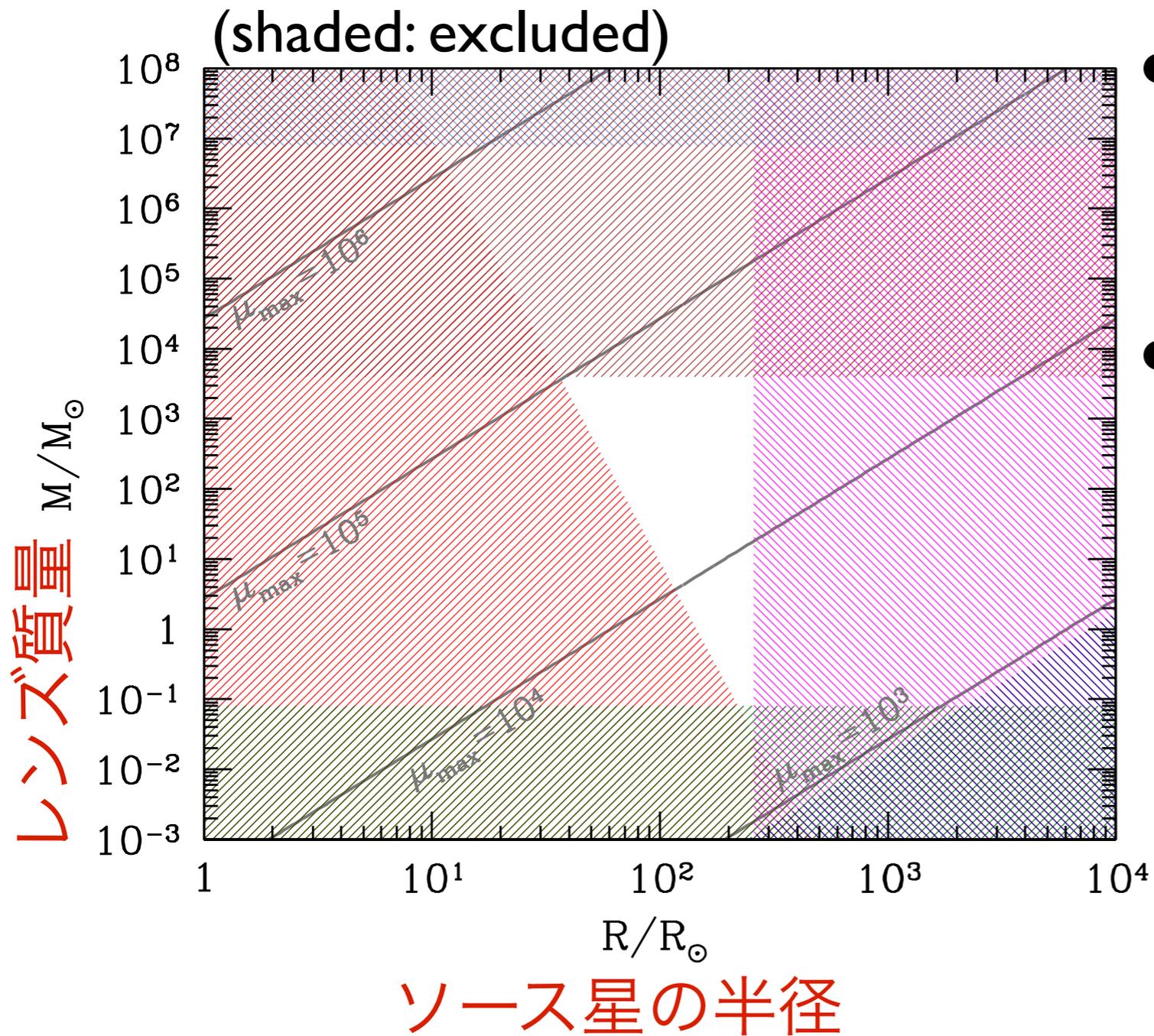
少ない点質量レンズ
弱いサチュレーション

- ICLの星で観測されたレートを説明可能

← 最大増光率小さい

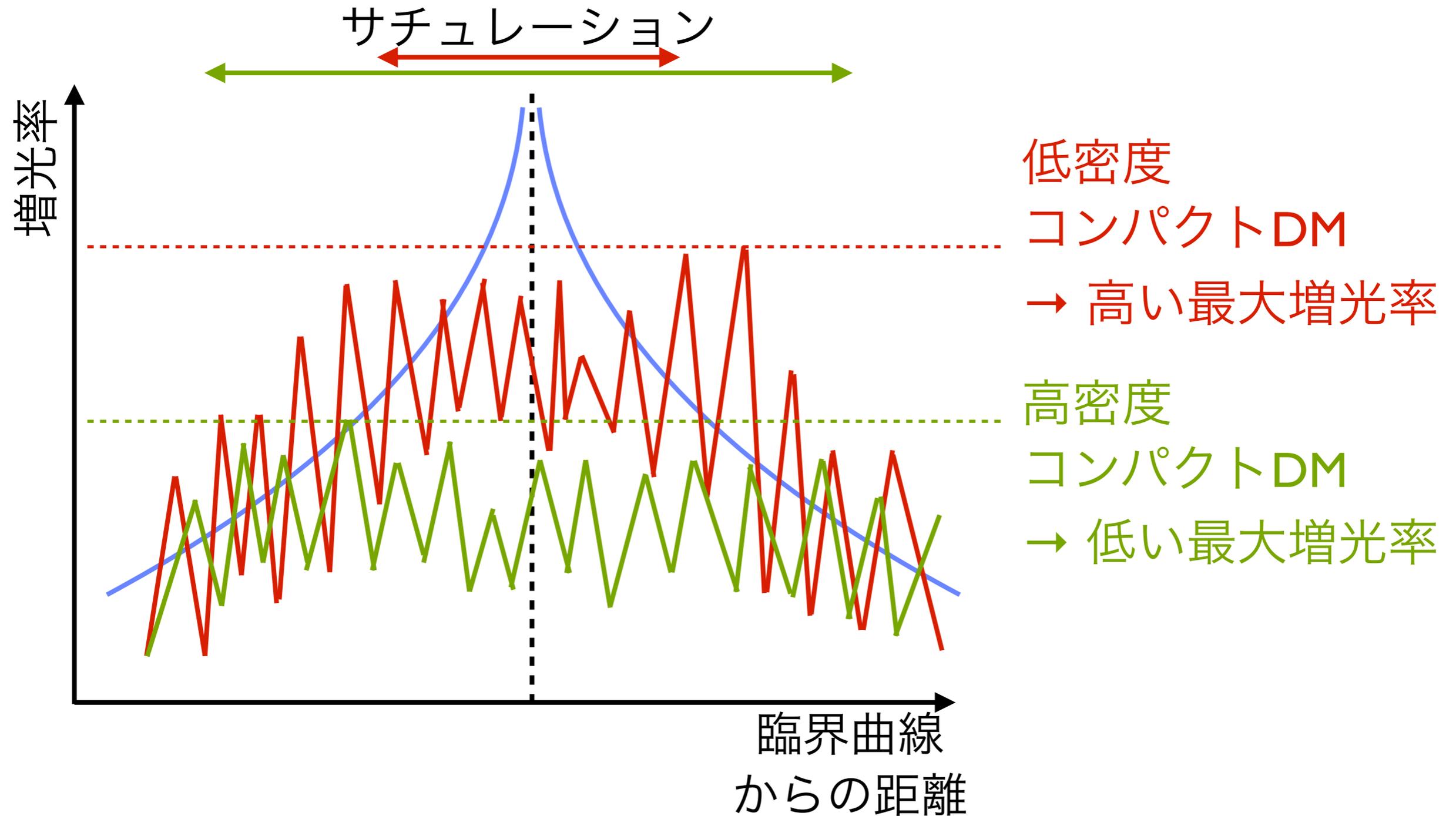
→ 平均自由行程大きい

レートを含めた制限



- イベントレートからの制限を追加
- ICLの星 ($\sim 1 M_{\text{sun}}$) は依然として無矛盾

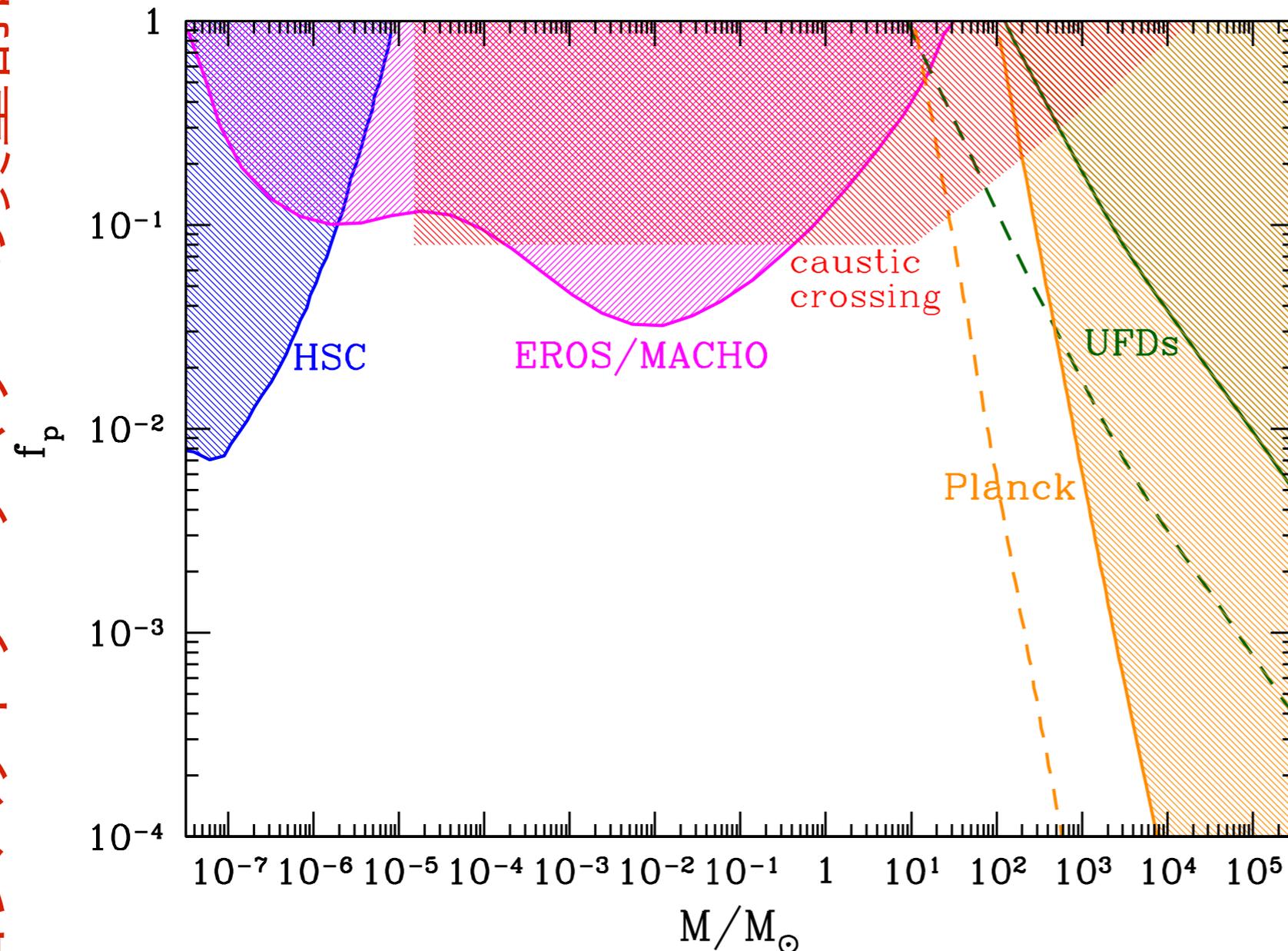
コンパクトダークマターへの制限



- ICLの存在下でコンパクトダークマターを制限可

コンパクトダークマターへの制限

コンパクトダークマターの質量割合

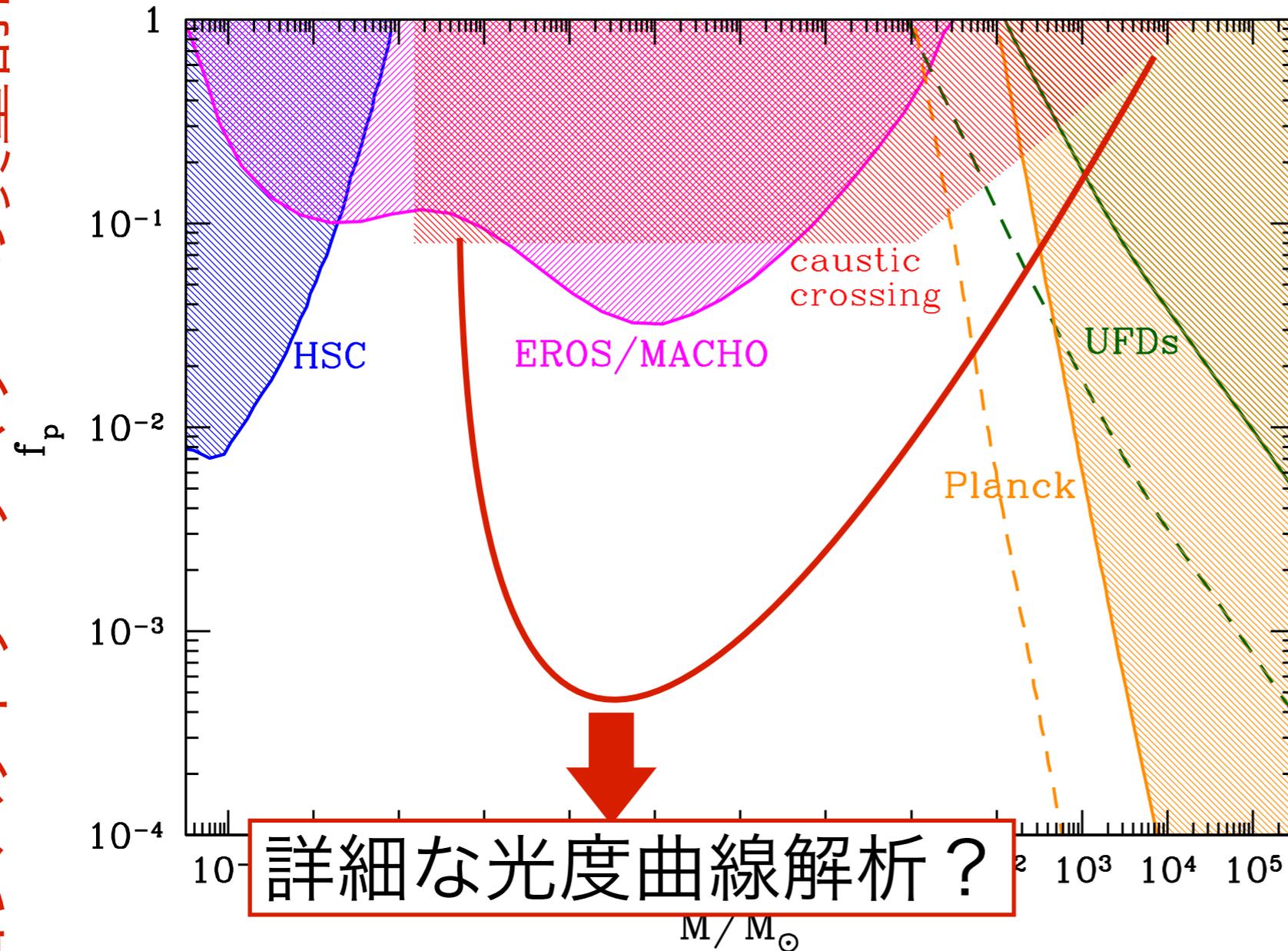


コンパクトダークマターの質量

- 密度が高すぎると強くサチって最大増光率が小さすぎ観測を説明不可

コンパクトダークマターへの制限

コンパクトダークマターの質量割合



- 密度が高すぎると強くサチって最大増光率が小さすぎ観測を説明不可

コンパクトダークマターの質量

まとめ

- 銀河団の高増光率領域において**全く新しいタイプの変動天体**を発見した
- 巨大アーク内の**単独の星**が銀河団内のコンパクト天体により非常に増光されたものと解釈できる ($\mu_{\text{peak}} \approx 4000$ for Icarus)
- Icarusイベントは**ICLの星**によって引き起こされたという解釈と無矛盾
- 解釈は複雑だが**DM研究**の多大なポテンシャル
- さらなる理論的/観測的研究が待たれる