

重力レンズ宇宙論（講義資料）

大栗 真宗

千葉大学 先進科学センター



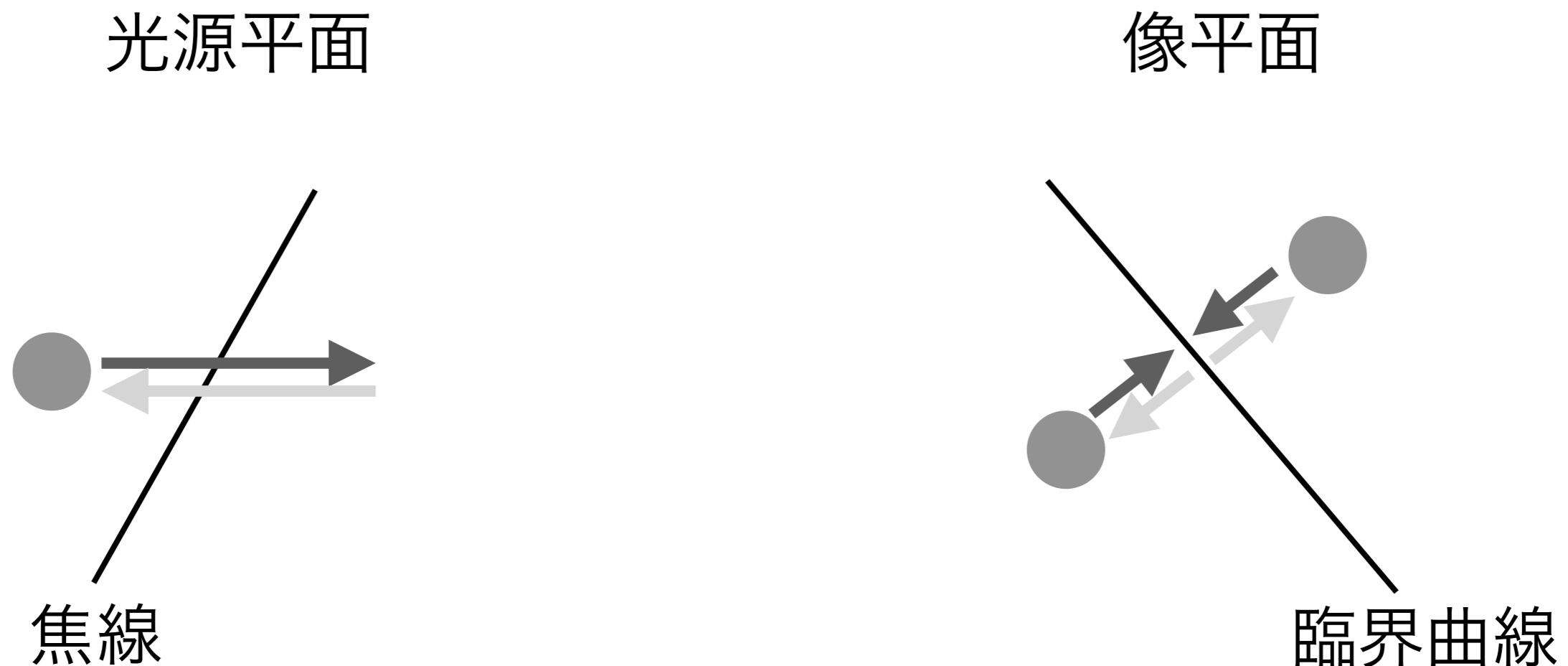
CHIBA
UNIVERSITY



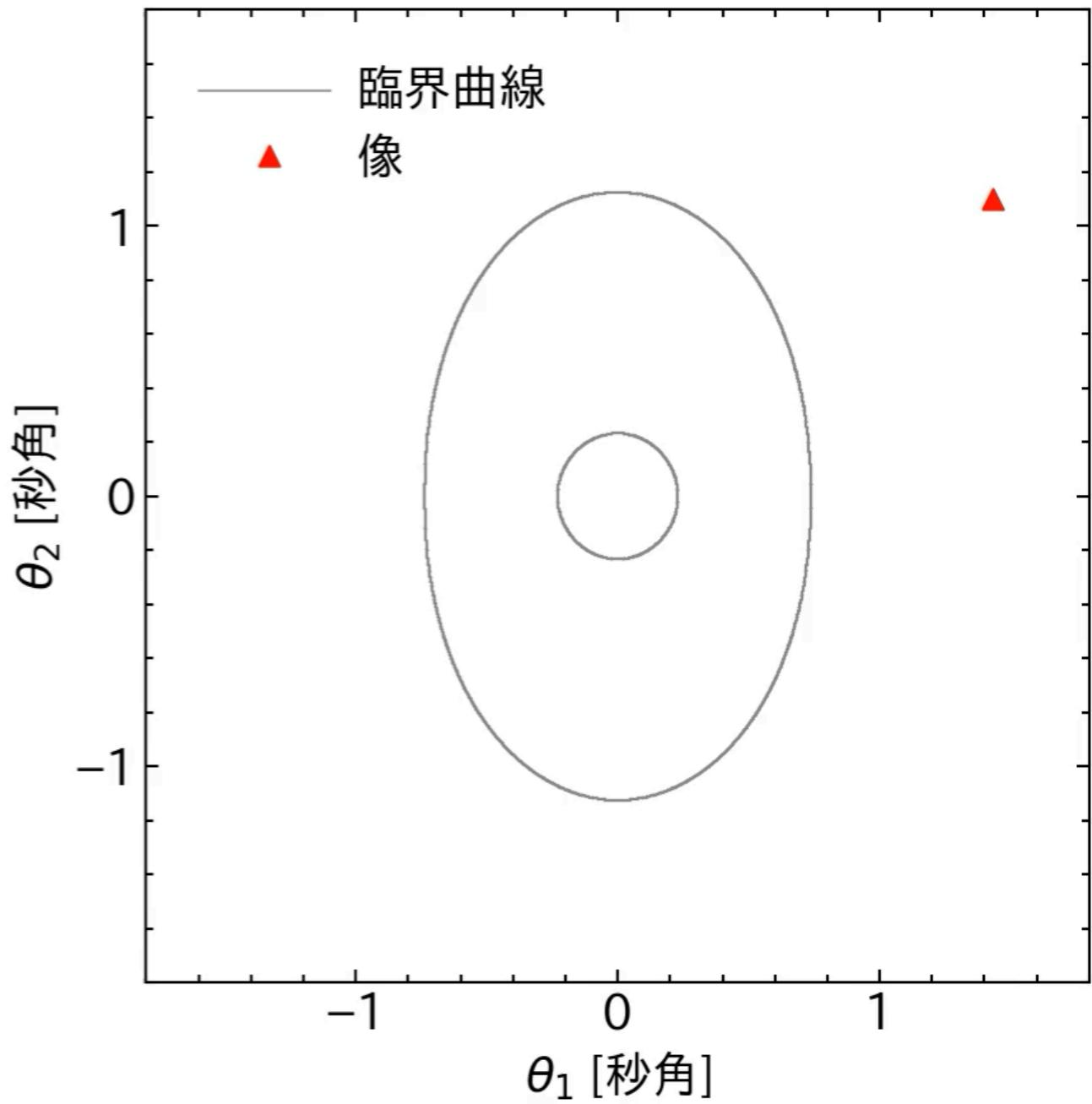
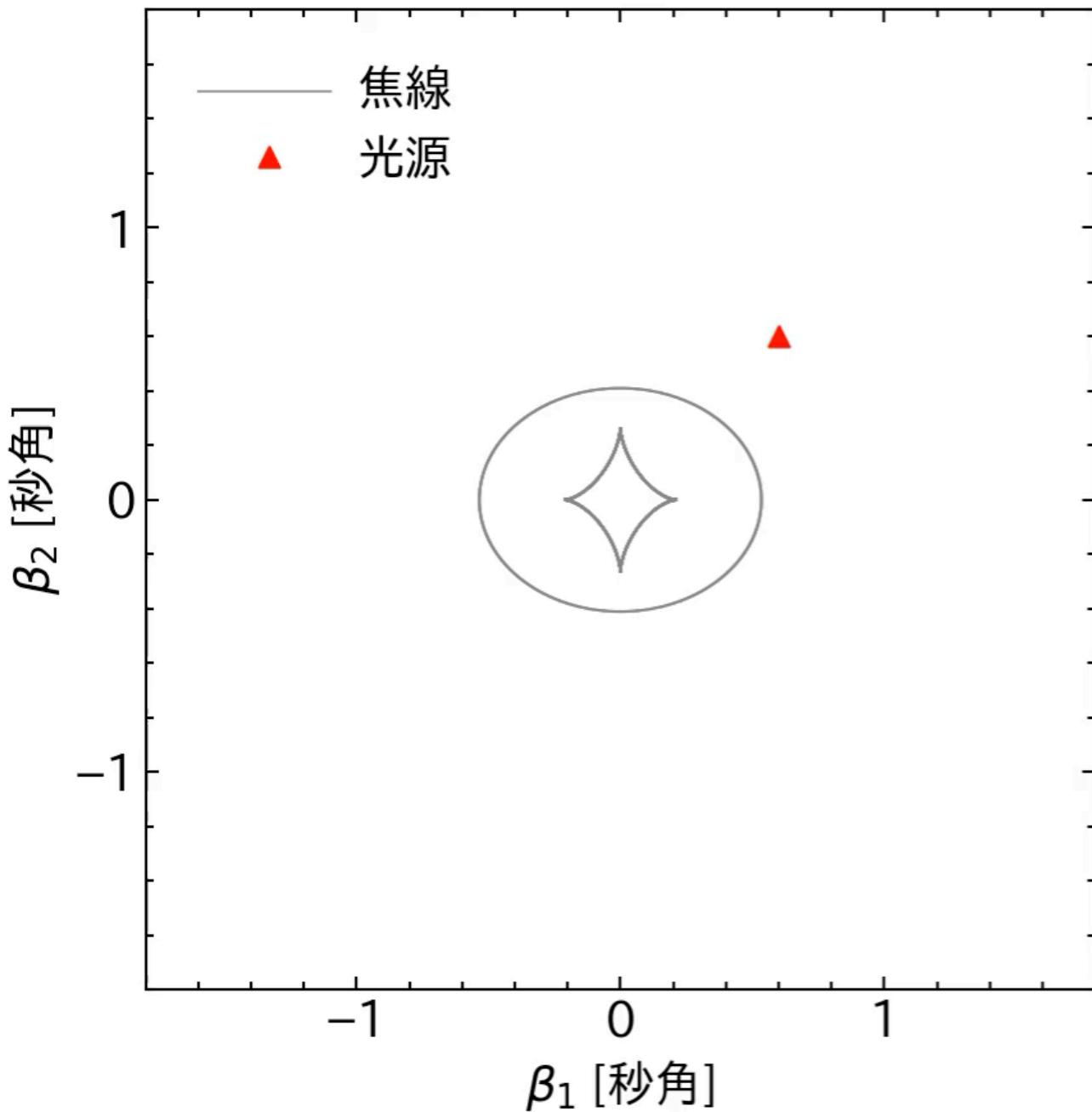
Center for
Frontier
Science

2024/5/30-6/4 集中講義@立教大学

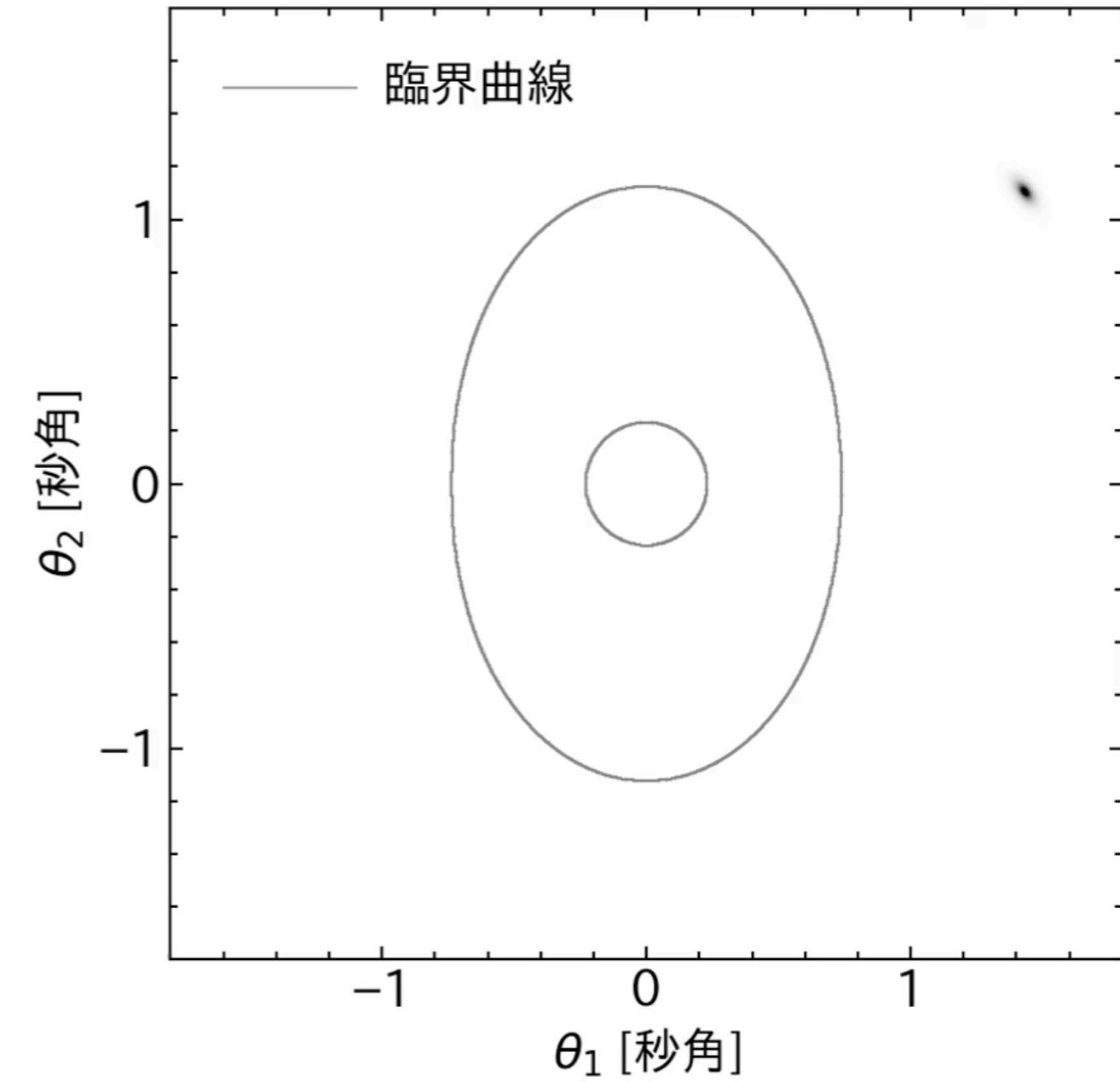
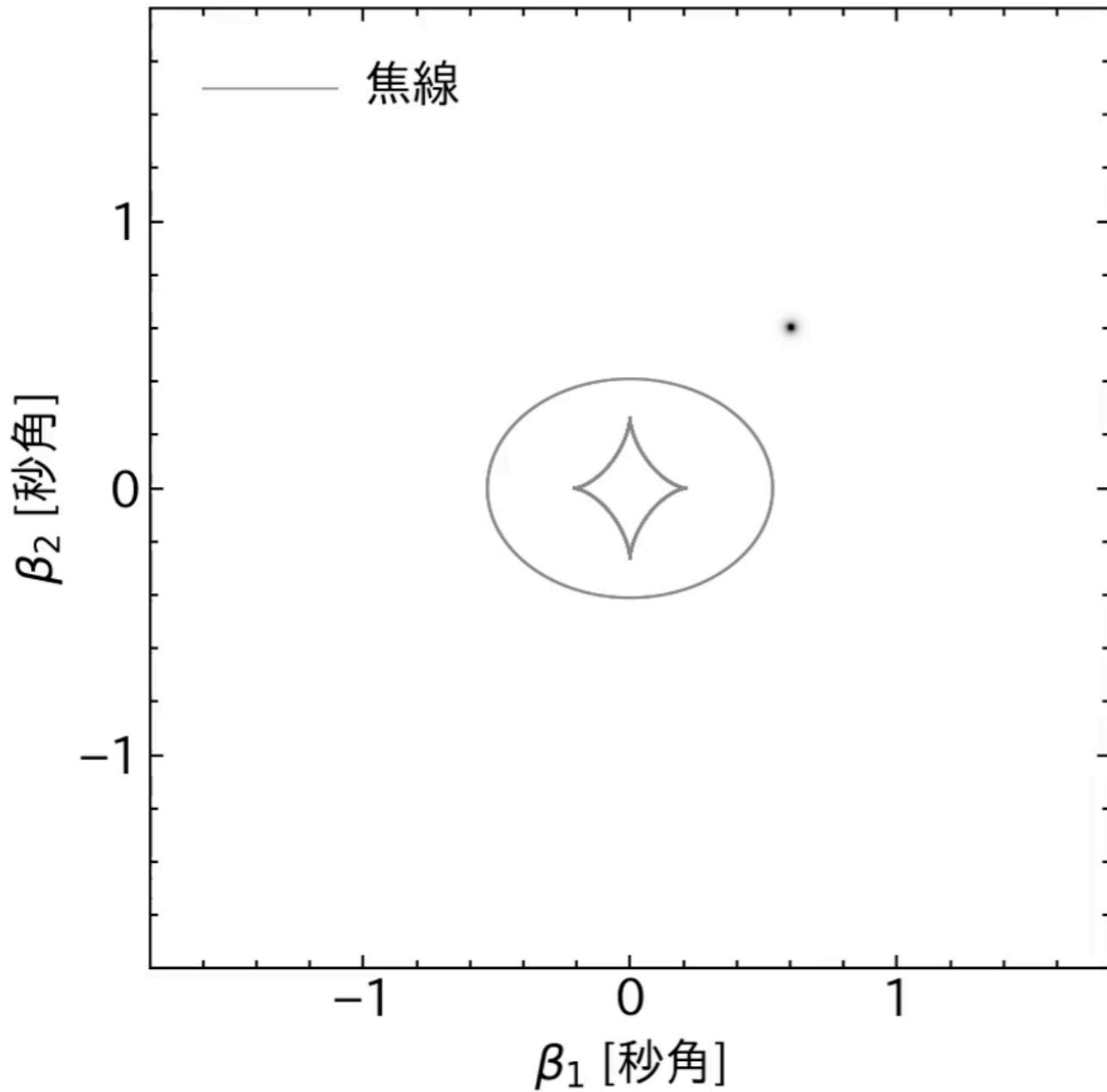
臨界曲線と焦線付近の複数像



強い重力レンズアニメ (点状光源)



強い重力レンズアニメ (広がった光源)



重力レンズ解析の数値的手法

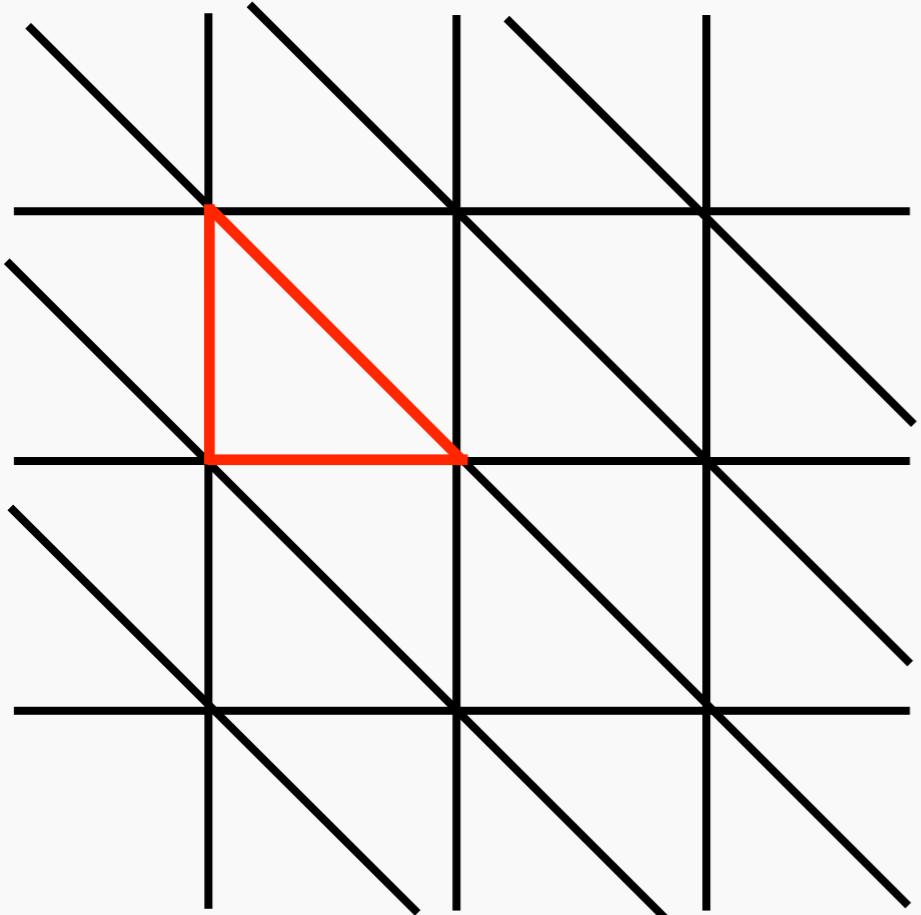
- 一般にレンズ方程式を解析的に解くのは困難

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta})$$

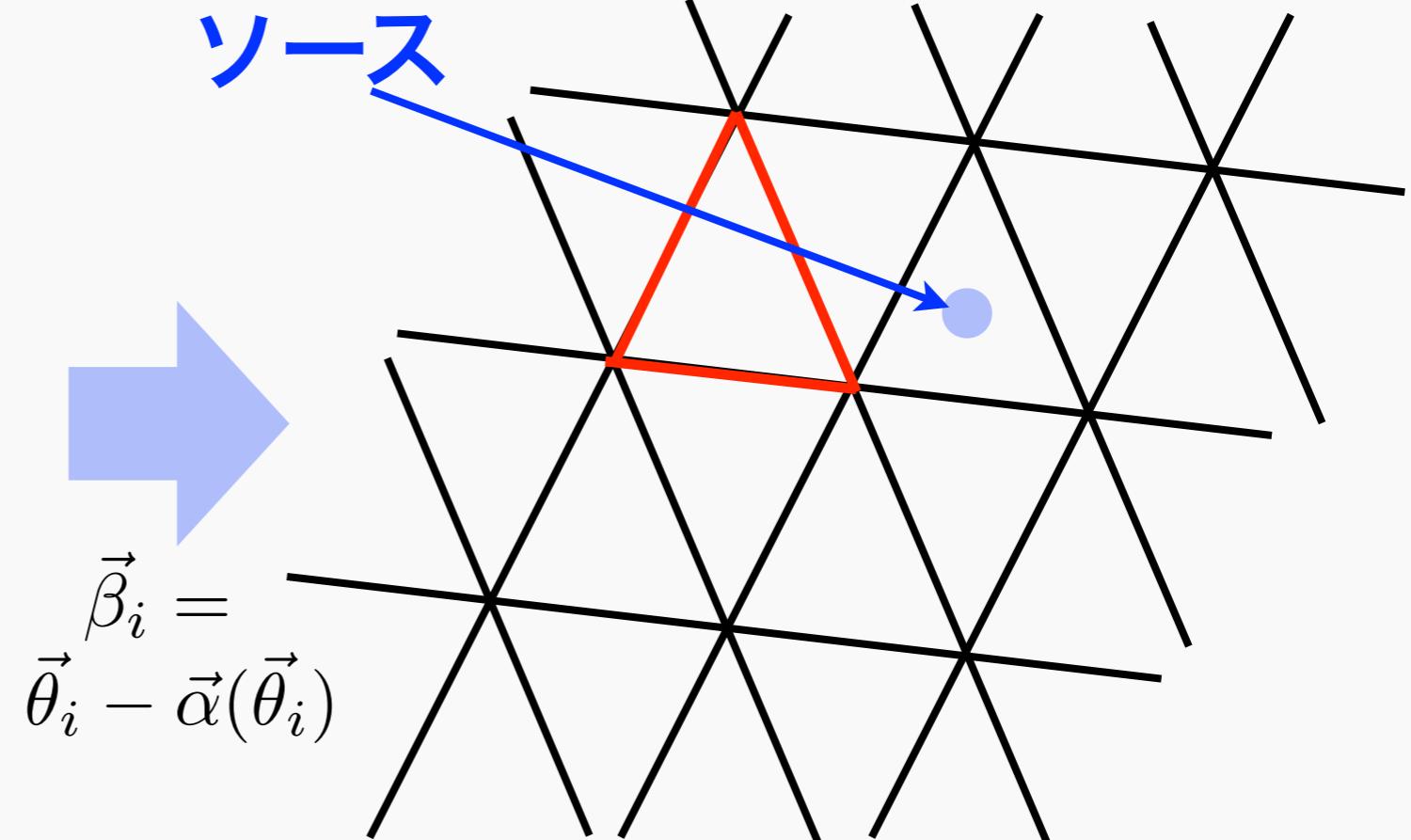
($\vec{\beta} \rightarrow \vec{\theta}$ は非線形、複数の解が許される)

- 数値的にレンズ方程式を解くことが必要

数值的な解の探索

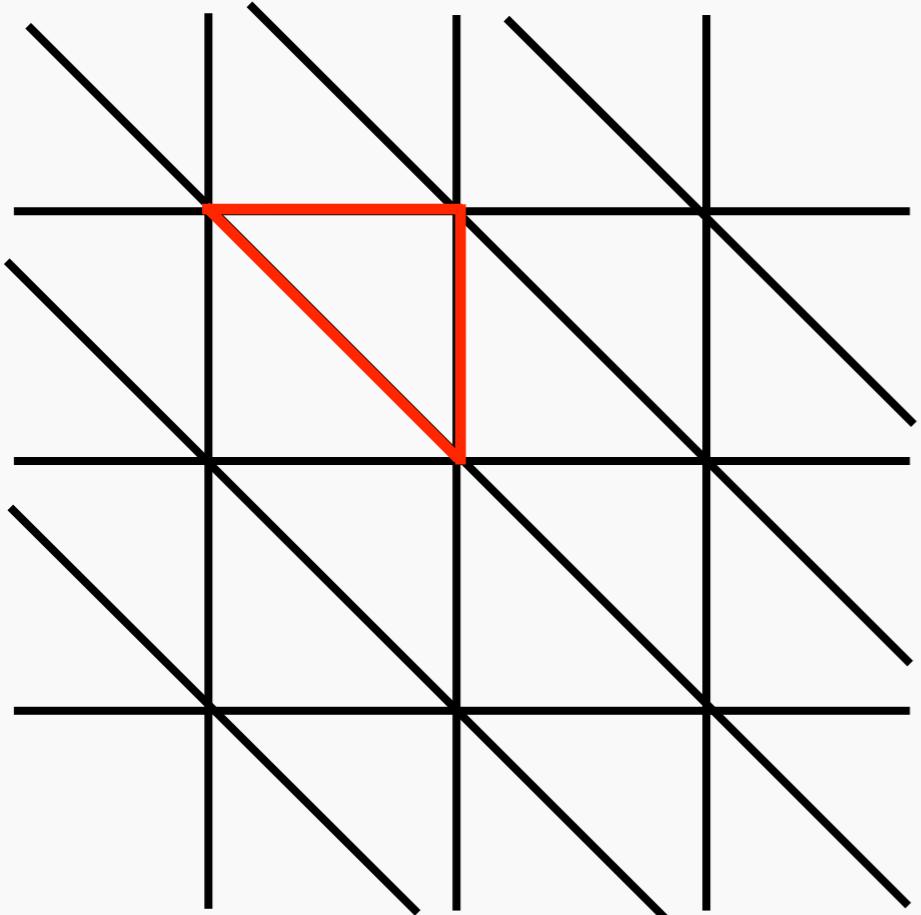


像平面 ($\vec{\theta}_i$)

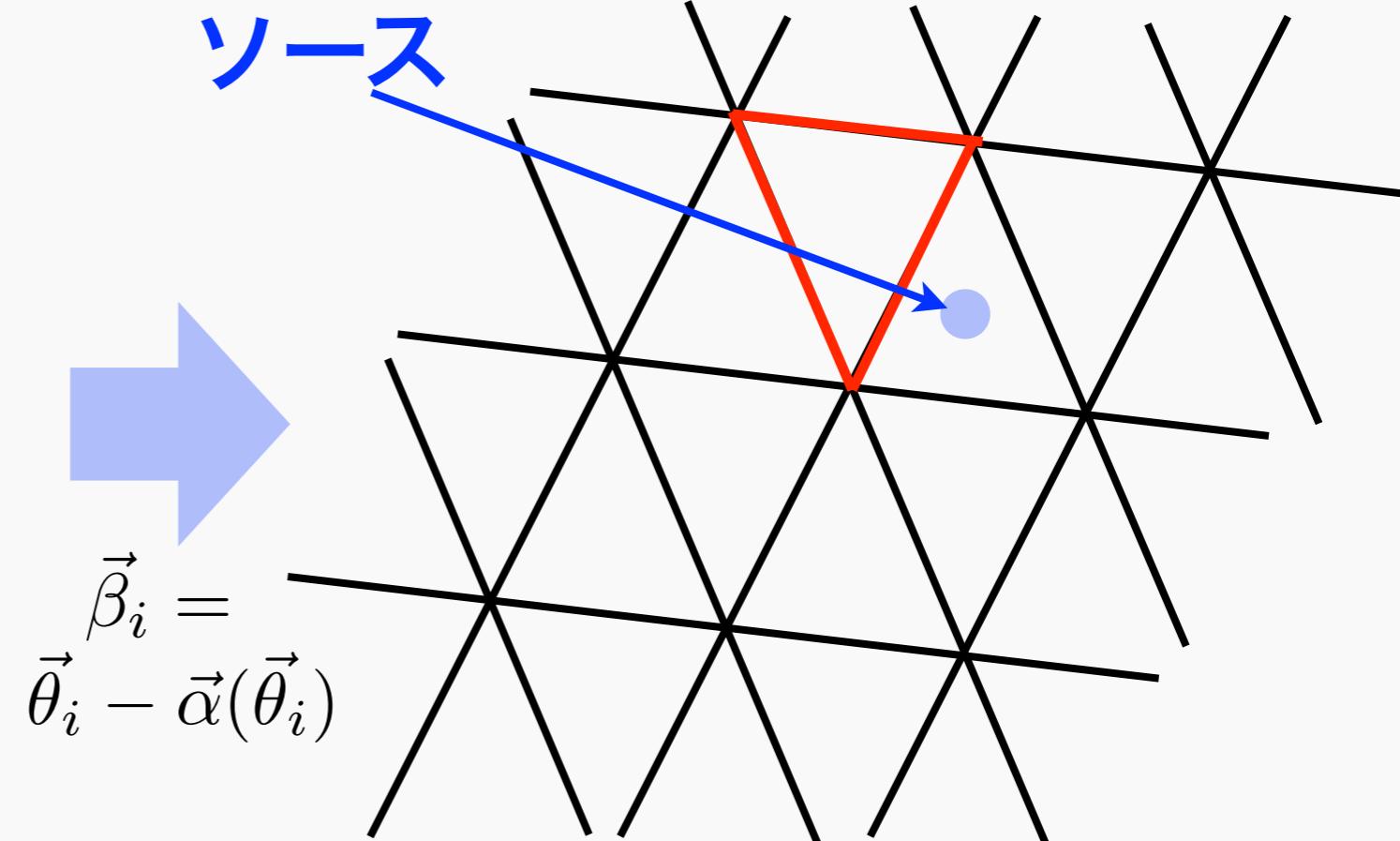


ソース平面 ($\vec{\beta}_i$)

数值的な解の探索

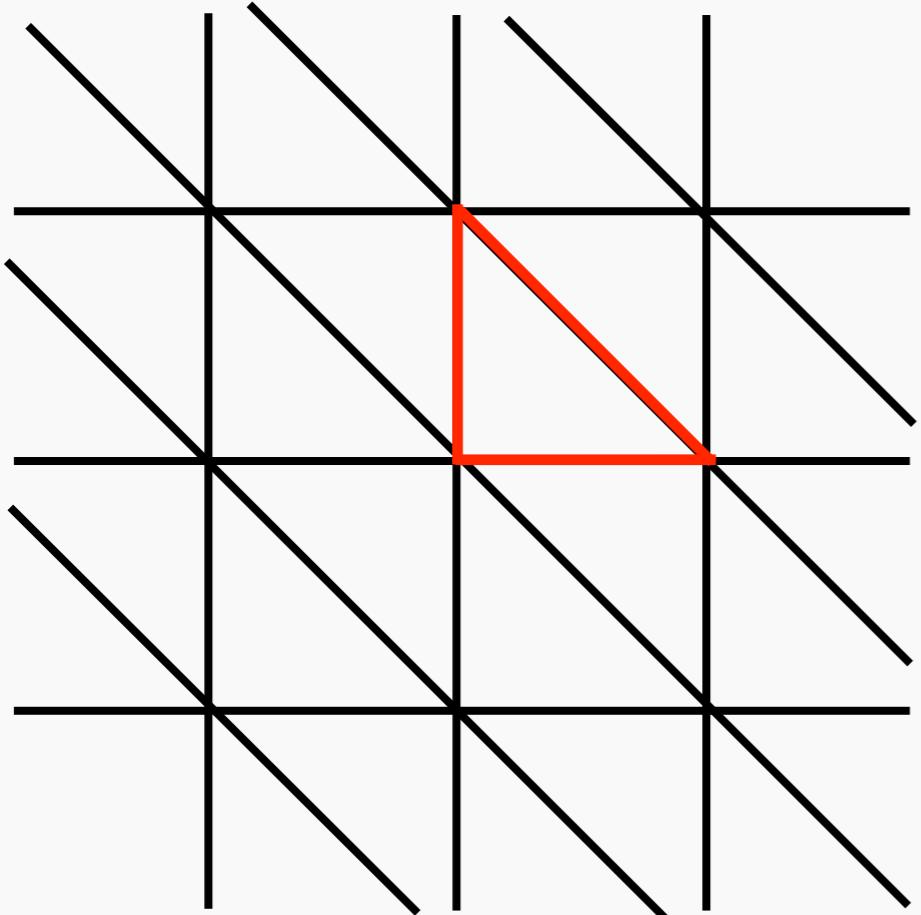


像平面 ($\vec{\theta}_i$)

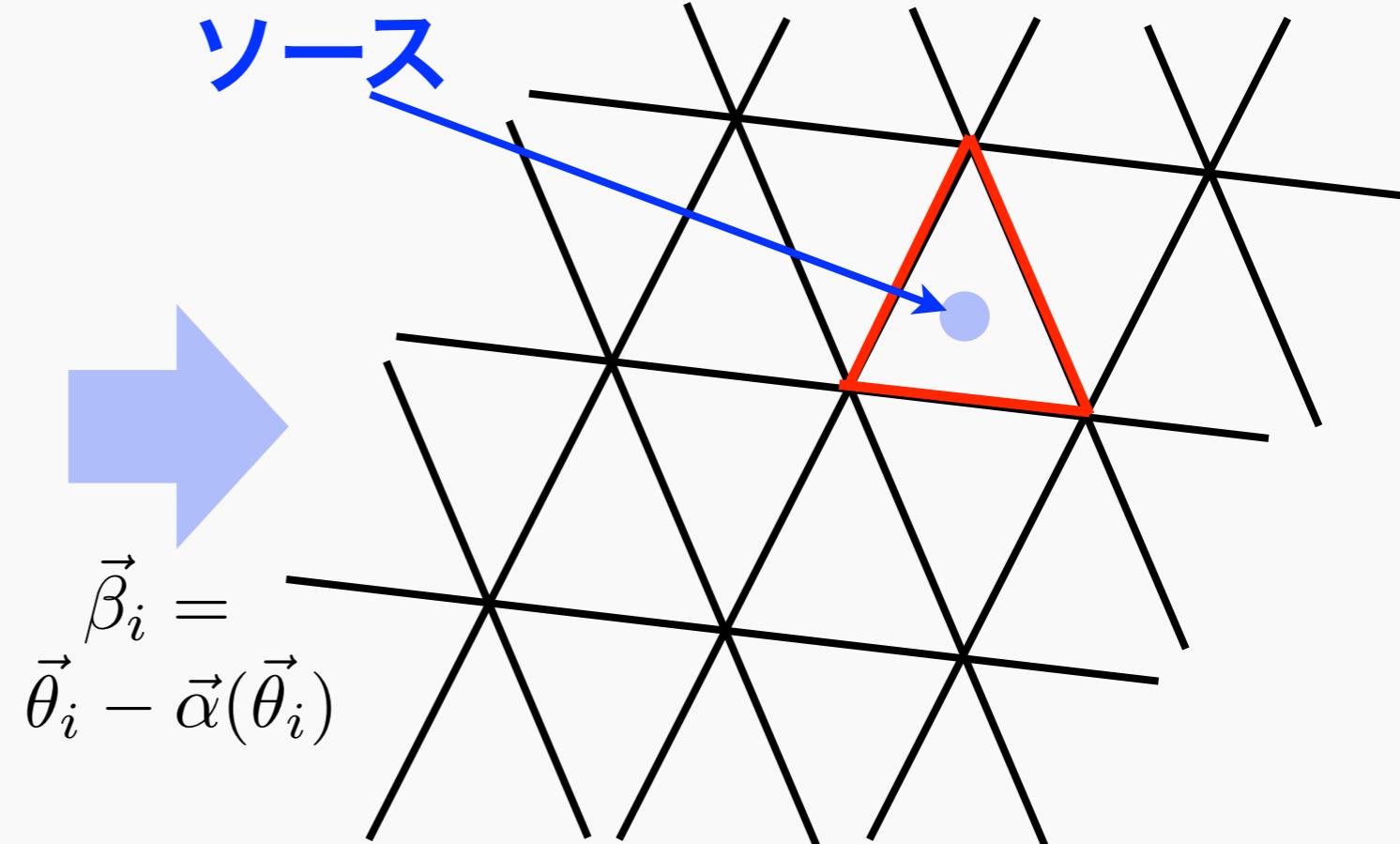


ソース平面 ($\vec{\beta}_i$)

数值的な解の探索



像平面 ($\vec{\theta}_i$)

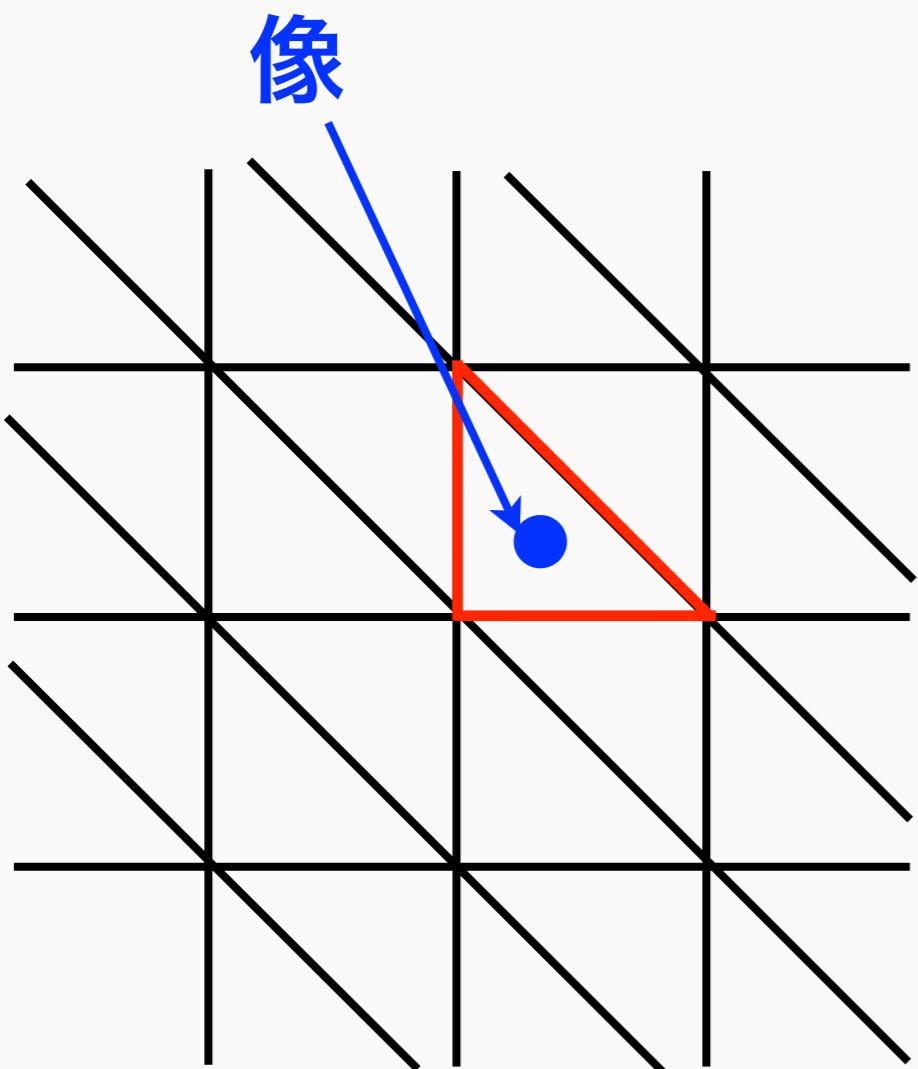


ソース平面 ($\vec{\beta}_i$)

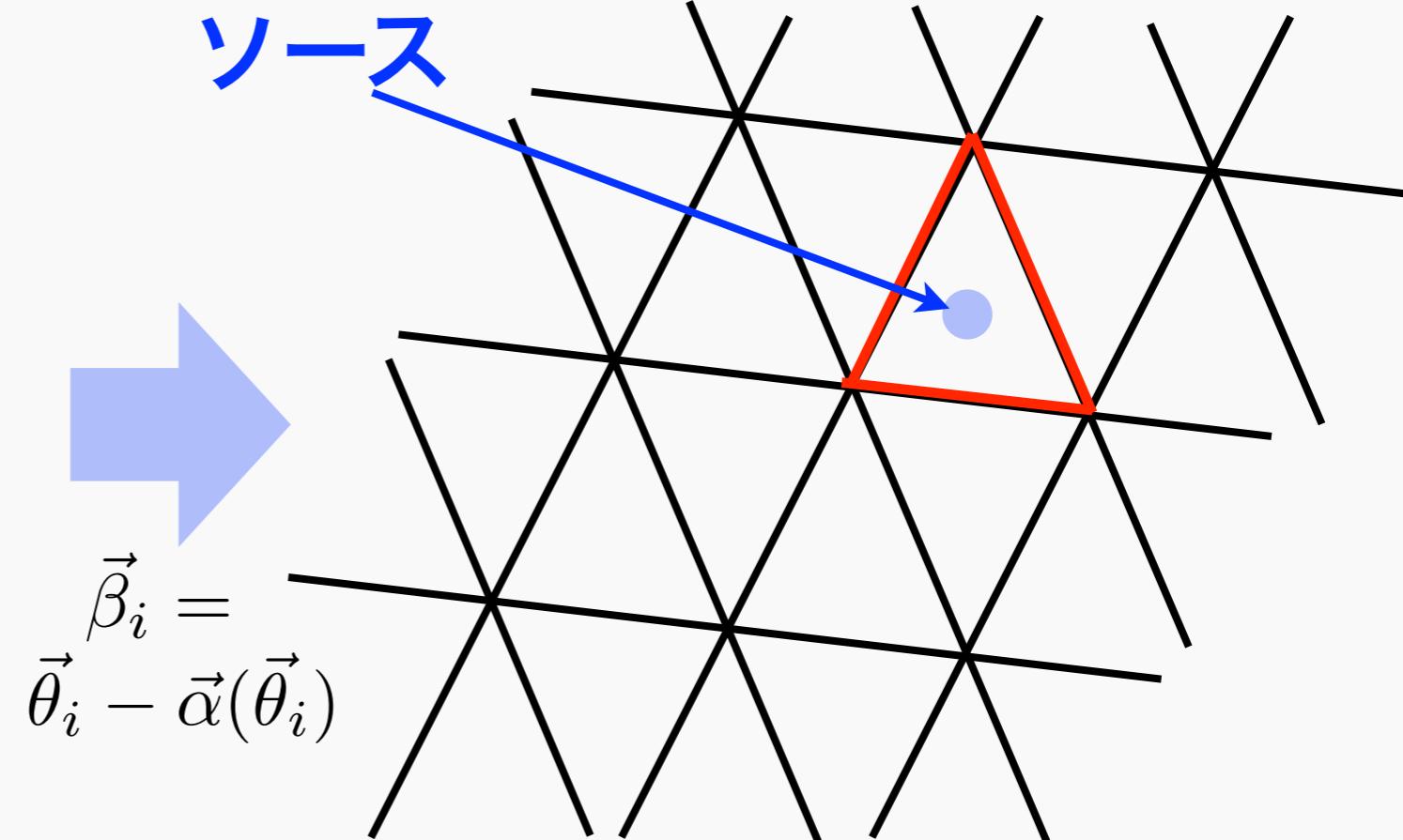
ソース

$$\vec{\beta}_i = \vec{\theta}_i - \vec{\alpha}(\vec{\theta}_i)$$

数值的な解の探索



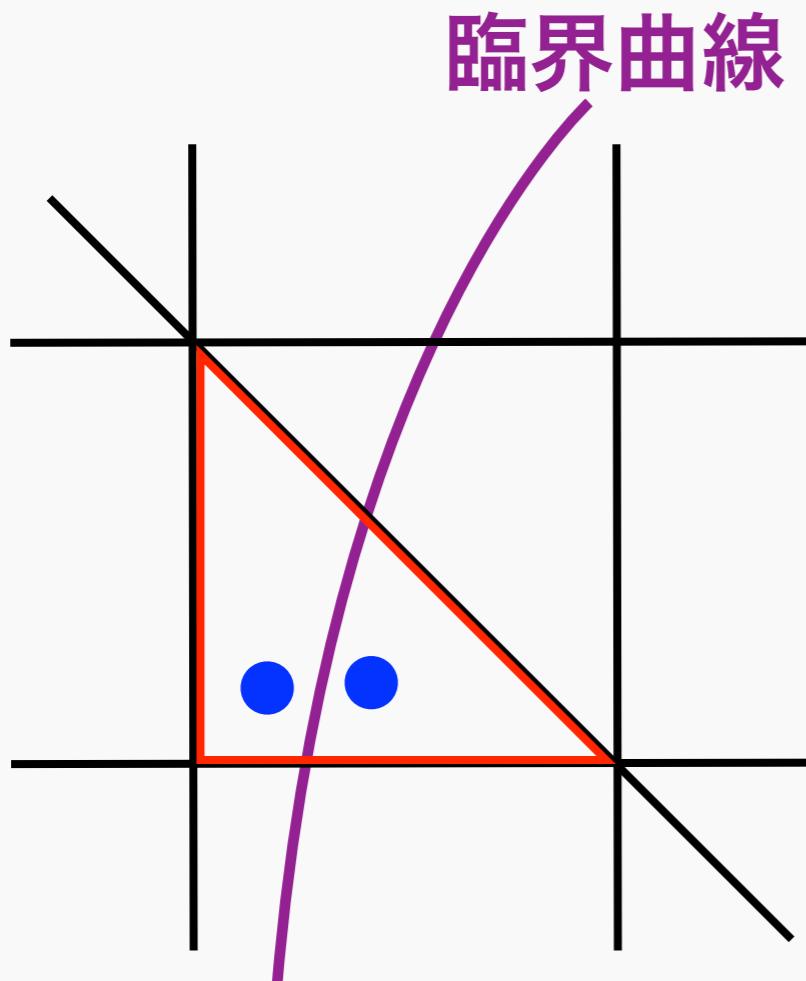
像平面 ($\vec{\theta}_i$)



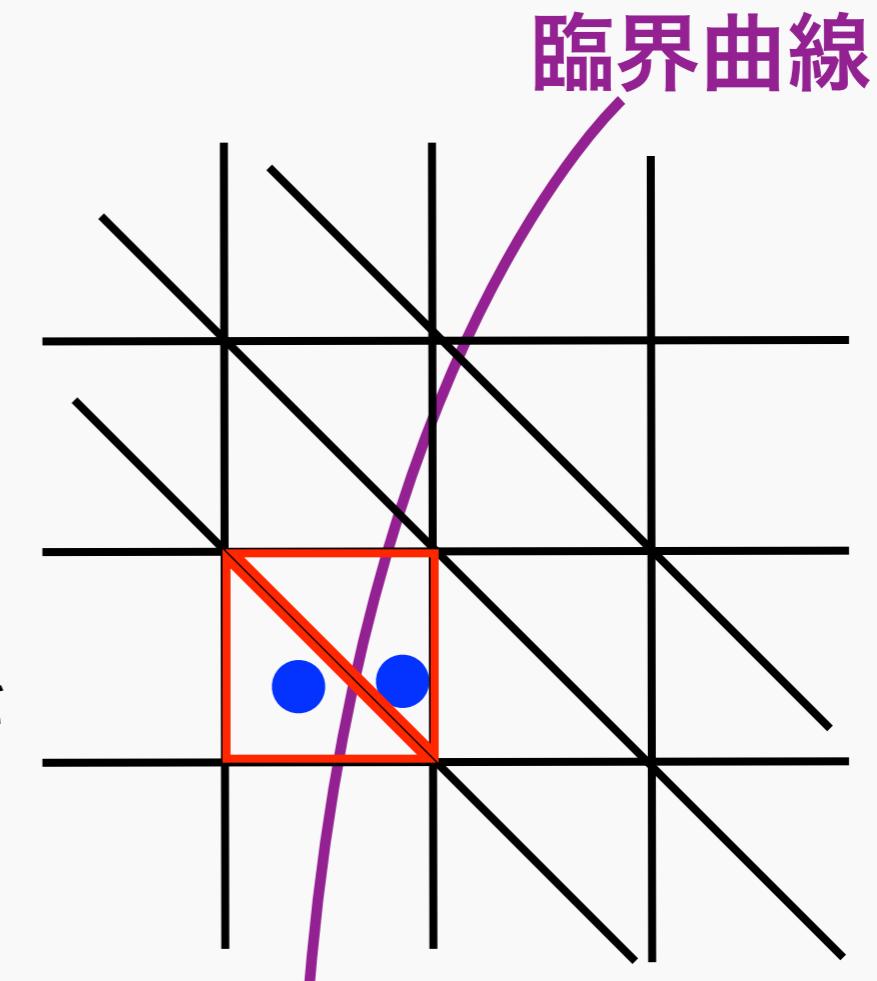
$$\vec{\beta}_i = \vec{\theta}_i - \vec{\alpha}(\vec{\theta}_i)$$

ソース平面 ($\vec{\beta}_i$)

数値的な解の探索



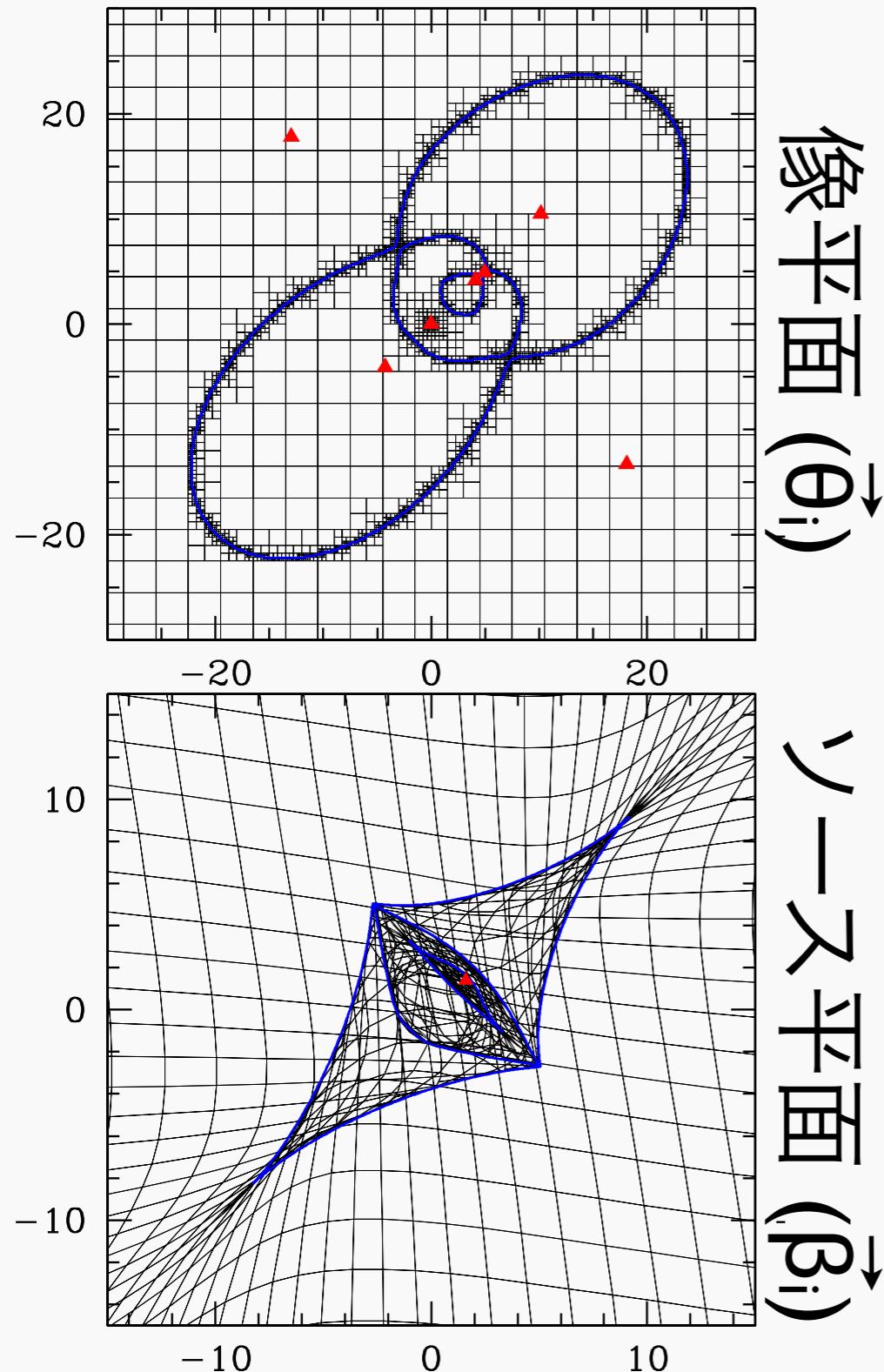
→
グリッドを
細かく



像平面 ($\vec{\theta}_i$)
複数像を分解
できていない

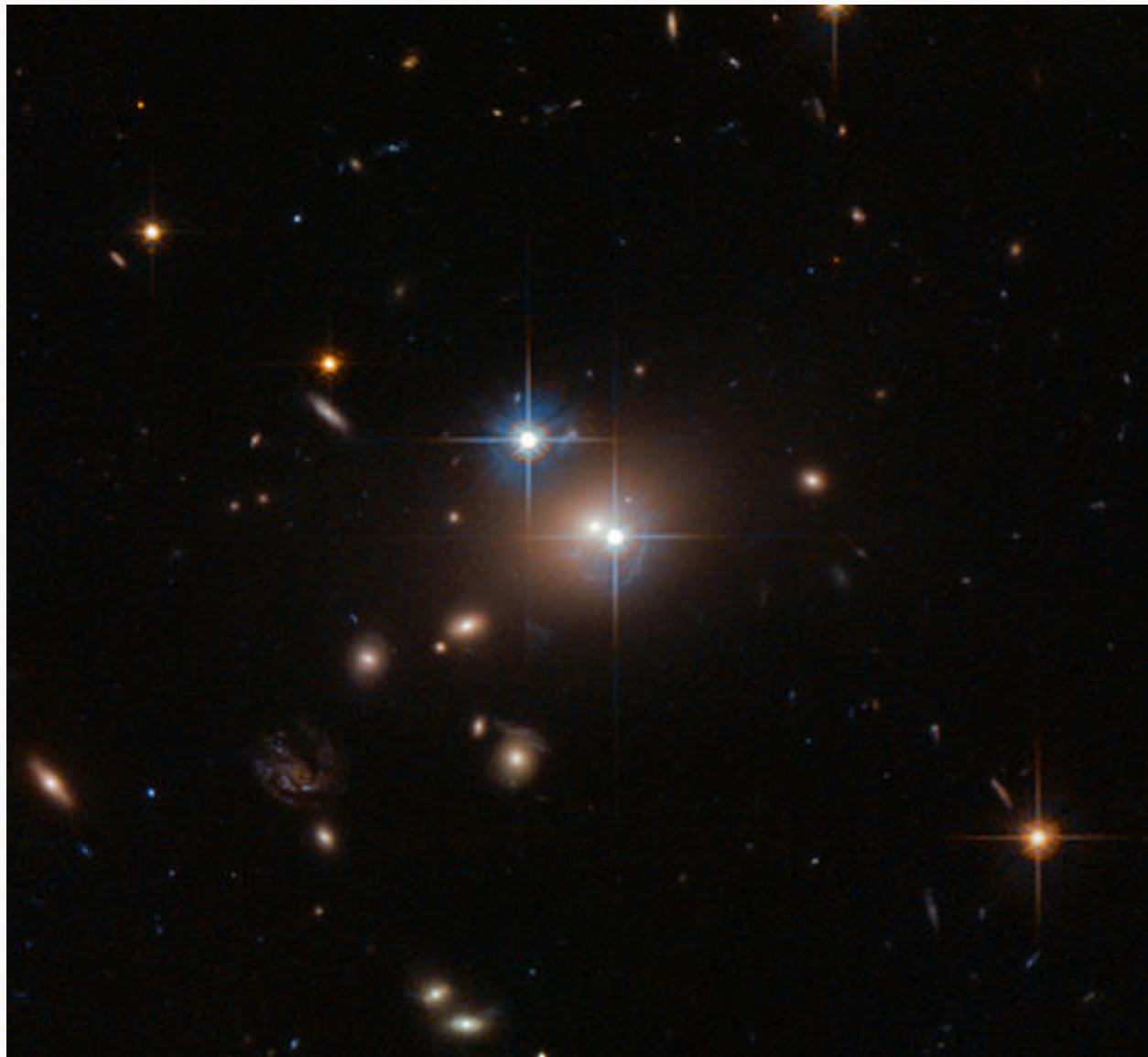
像平面 ($\vec{\theta}_i$)
複数像を分解
できている

レンズ方程式の数値的求解



- 高いグリッド分解能は臨界曲線近傍でのみ必要となる
- **適合格子 (adaptive grid)** を使うことで効率的にレンズ方程式を解ける
- 左の例では7つの複数像をうまく分離して求めることができている

強い重力レンズ解析



Hubble/ESA/NASA

NASA/ESA/CSA/STScI

- **観測量** : 複数像の位置、フラックス比

複数像形状 (銀河)、時間の遅れ (クエーサー、超新星etc)

強い重力レンズ解析

- 複数像の位置

光源の位置 β が共通 $\rightarrow \theta_j - \alpha(\theta_j) = \theta_k - \alpha(\theta_k)$

質量分布への制限

- 実際にはカイ2乗を最小化しパラメータ決定

$$\chi^2_{\text{pos}} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \frac{\left| \theta_{ij}^{\text{obs}} - \theta_{ij}(\beta_i; p_{\text{model}}) \right|^2}{\sigma_{ij}^2}$$

光源の数 各光源jの複数像の数
位置の誤差

光源平面でのカイ2乗の評価

- カイ2乗の評価で重力レンズ方程式を解く必要

重力レンズ方程式→各光源jの複数像の位置

$$\chi_{\text{pos}}^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \frac{\left| \theta_{ij}^{\text{obs}} - \theta_{ij}(\beta_i; p_{\text{model}}) \right|^2}{\sigma_{ij}^2}$$

- 近似的に評価し重力レンズ方程式求解を回避

$$\chi_{\text{pos}}^2 \simeq \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \frac{\left| \left[A(\theta_{ij}^{\text{obs}}; p_{\text{model}}) \right]^{-1} [\beta_{ij}^{\text{obs}}(p_{\text{model}}) - \beta_i] \right|^2}{\sigma_{ij}^2}$$

高速な評価が可能

フラックス比および時間の遅れ

- フラックス比

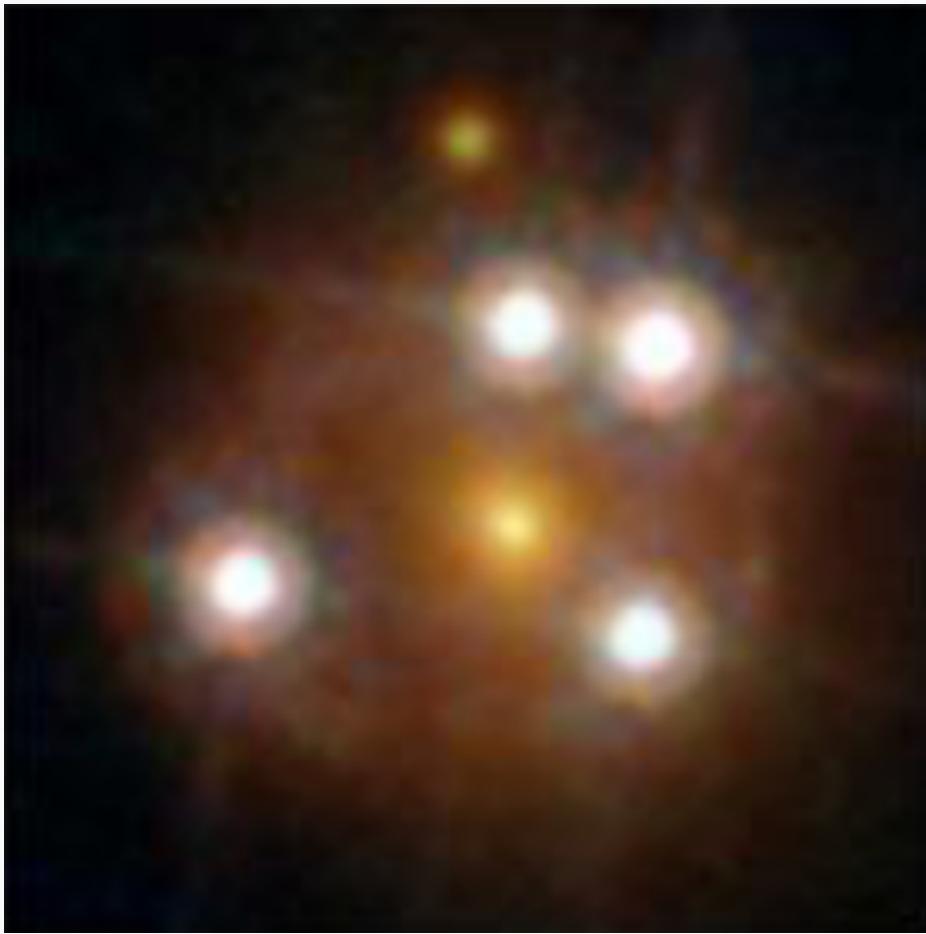
$$\chi_{\text{flux}}^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \frac{\left[f_{ij}^{\text{obs}} - \left| \mu_{ij}(\beta_i; p_{\text{model}}) \right| f_{\text{src},i} \right]^2}{\sigma_{f,ij}^2}$$

- 時間の遅れ

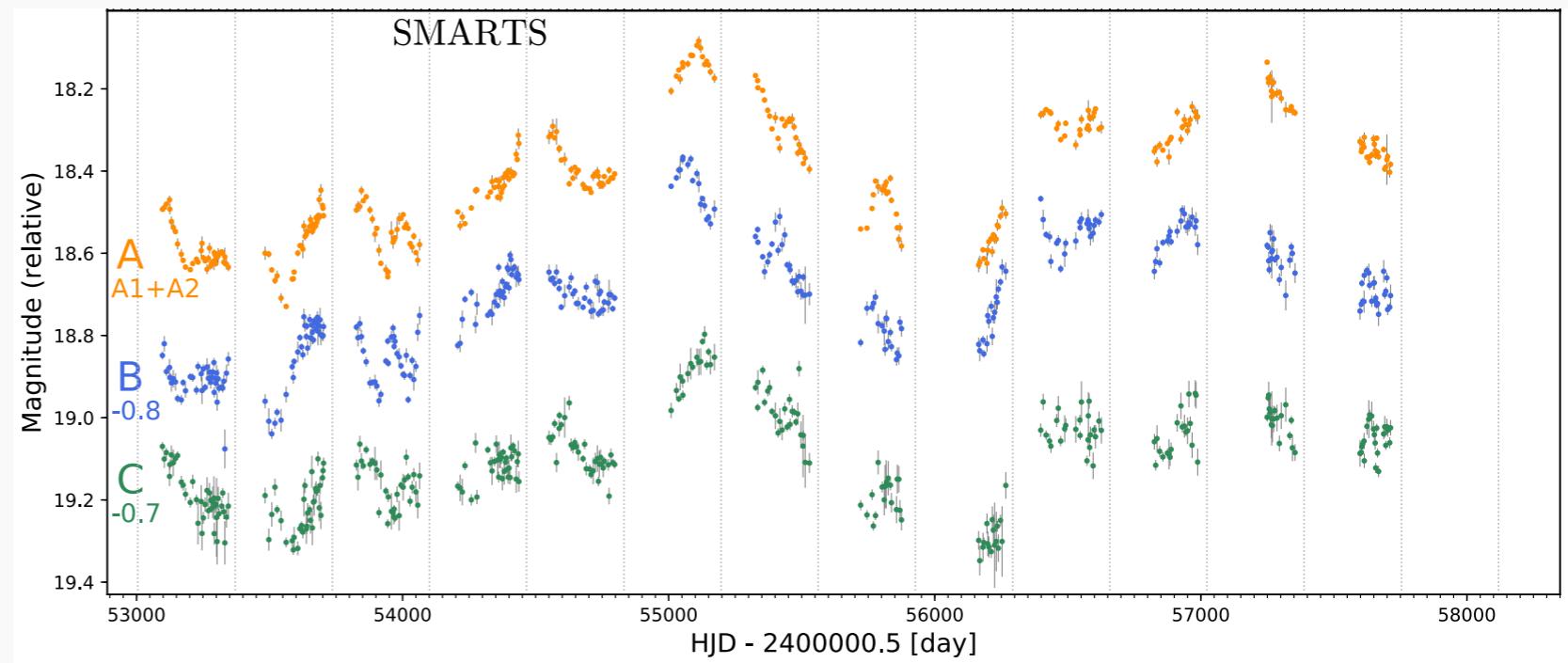
$$\chi_{\text{td}}^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} \frac{\left[\Delta t_{ij}^{\text{obs}} - \Delta t_{ij}(\beta_i; p_{\text{model}}) - \Delta t_i \right]^2}{\sigma_{\Delta t,ij}^2}$$

例: クエーサー重力レンズ

- 四重像クエーサー重力レンズ WFI2033-4723
 $z_s = 1.662, z_l = 0.661$, 最大分離角 2.53 秒角



Suyu+2017



Bonvin+2019

13年 (!) のモニタ観測に基づく
時間の遅れの測定 (最大~60日)

質量モデリング

- WFI2033-4723の質量モデリング
観測的制限: 像+レンズ銀河の位置、
フラックス比、時間の遅れ

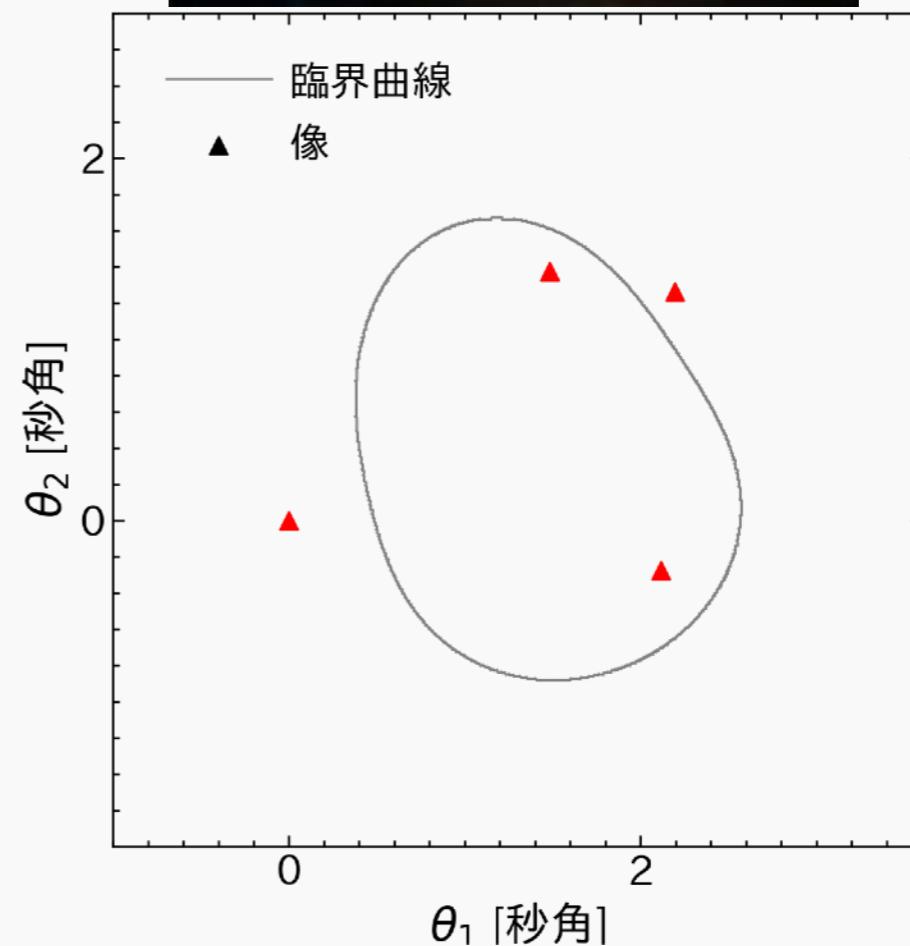
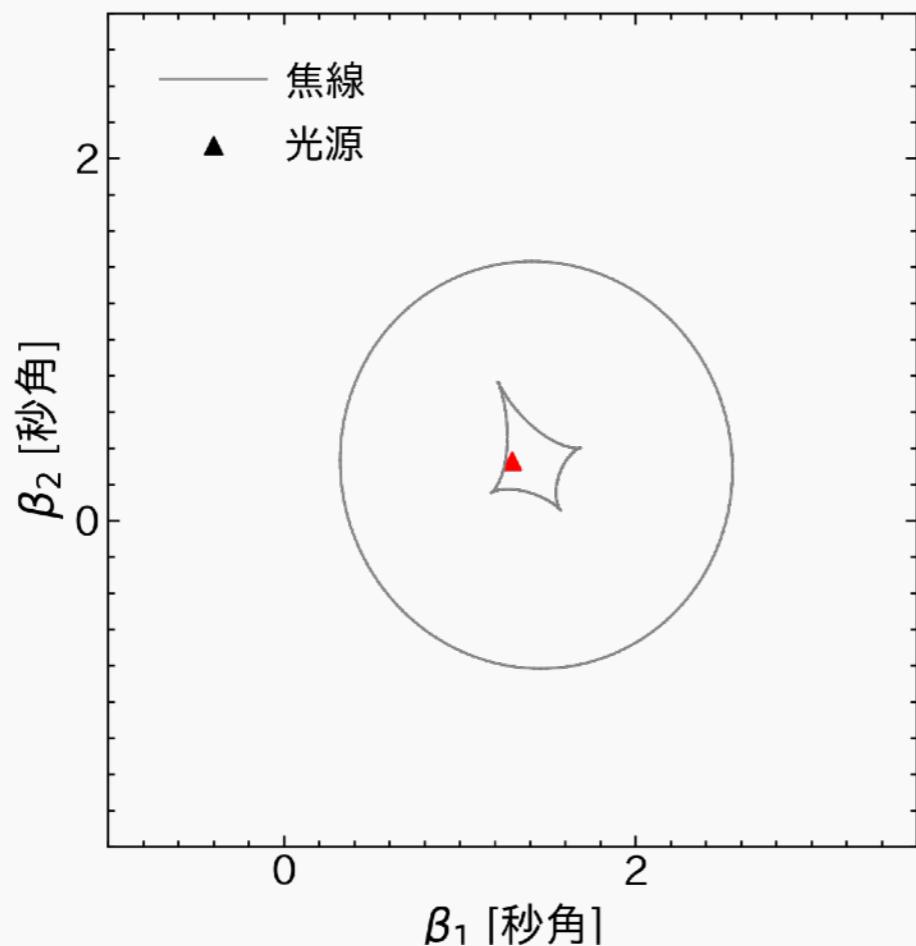
$$\mathbf{N_{const}=15}$$

仮定するモデル: 特異等温楕円体+外部歪み場
+高次の摂動

$$\mathbf{N_{param}=12}$$

質量モデリングの結果

- 観測された複数像の位置 etc. を再現
- $\chi^2=4.3$ (自由度3)



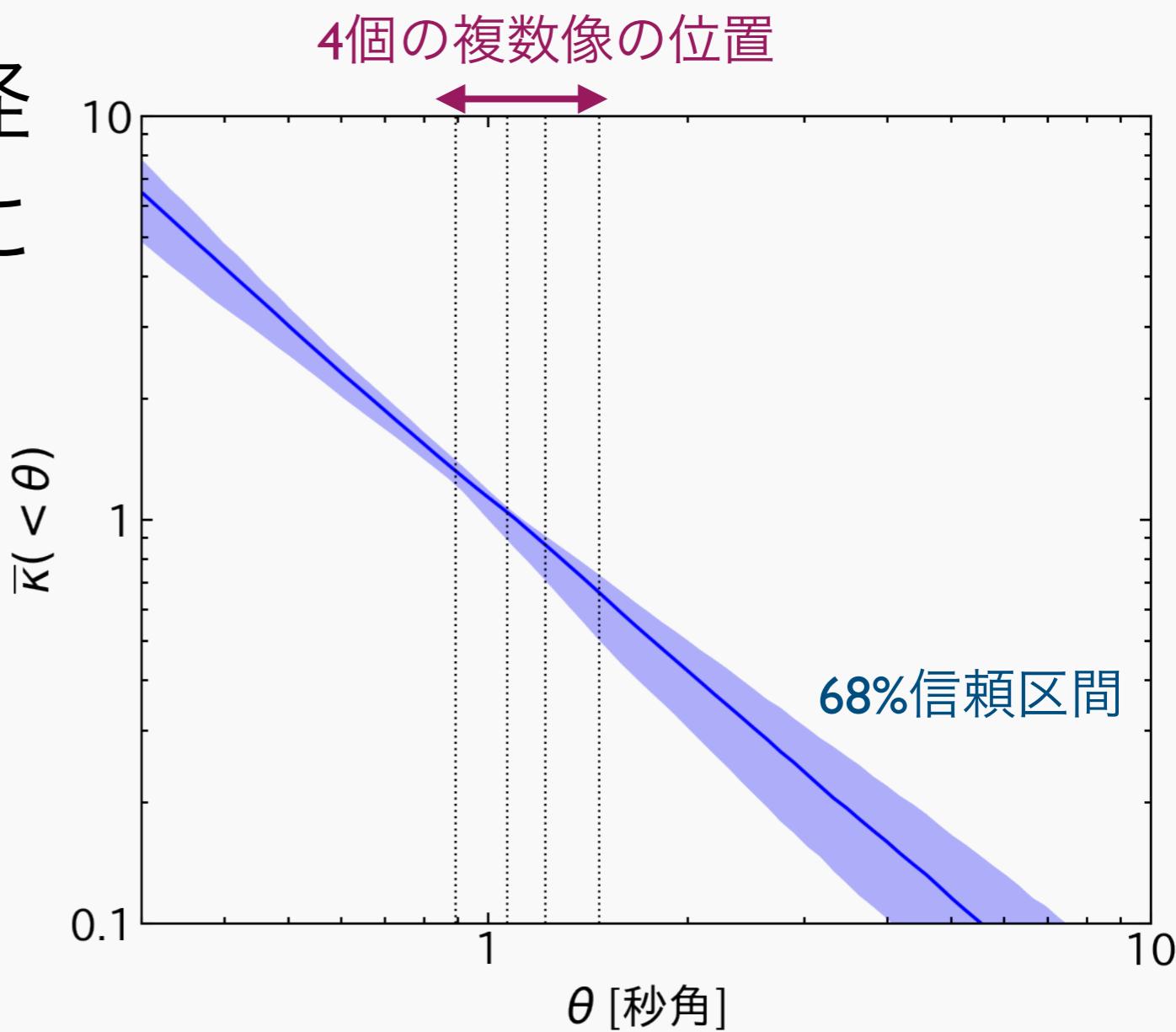
幕分布楕円体への拡張

- 幕への制限は弱い $\rho(r) \propto r^{-\eta}$

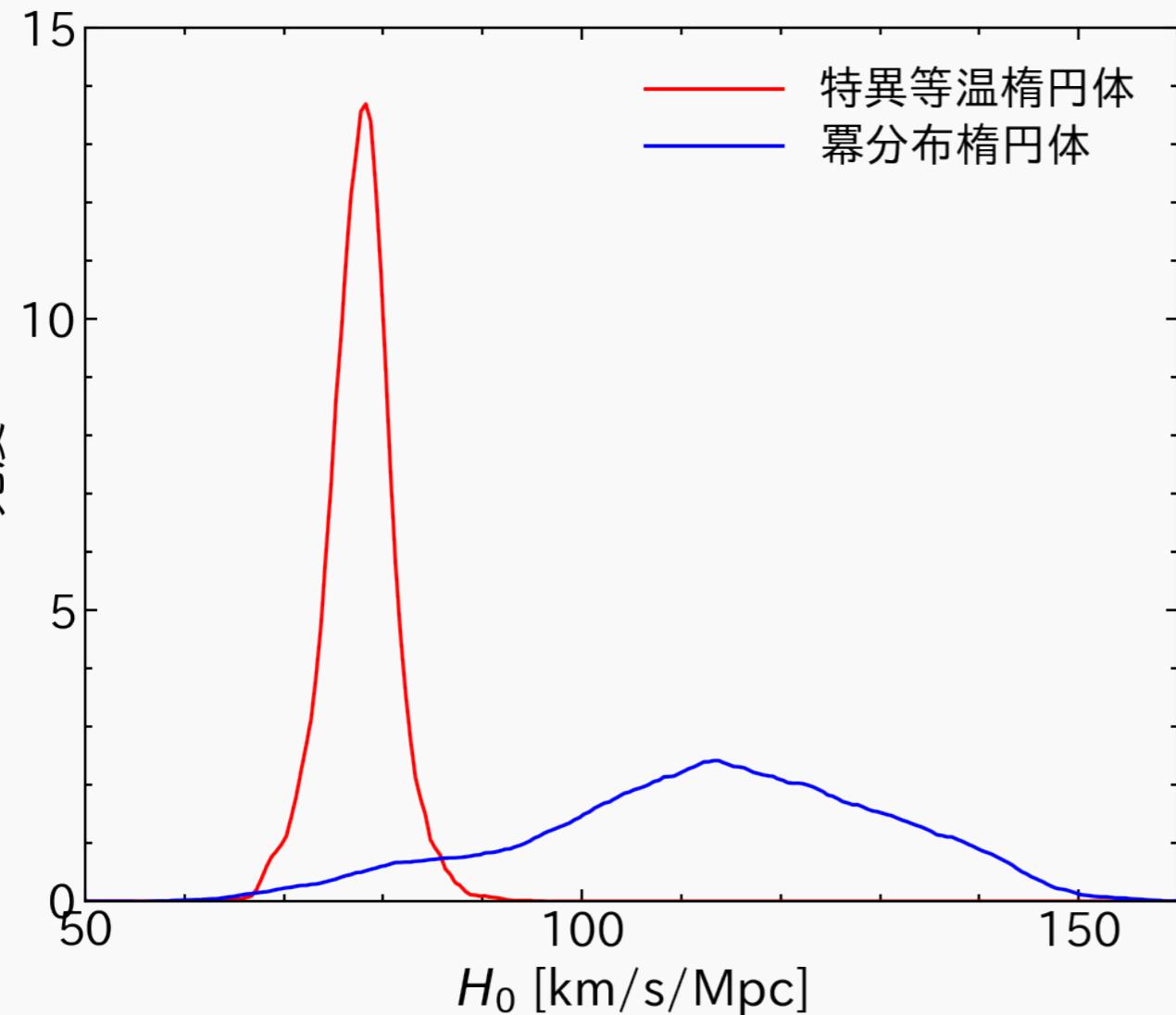
- AINSHULTAIN半径内の質量は、モデルによらず決まる

$$\bar{\kappa}(<\theta_{\text{Ein}}) = 1$$

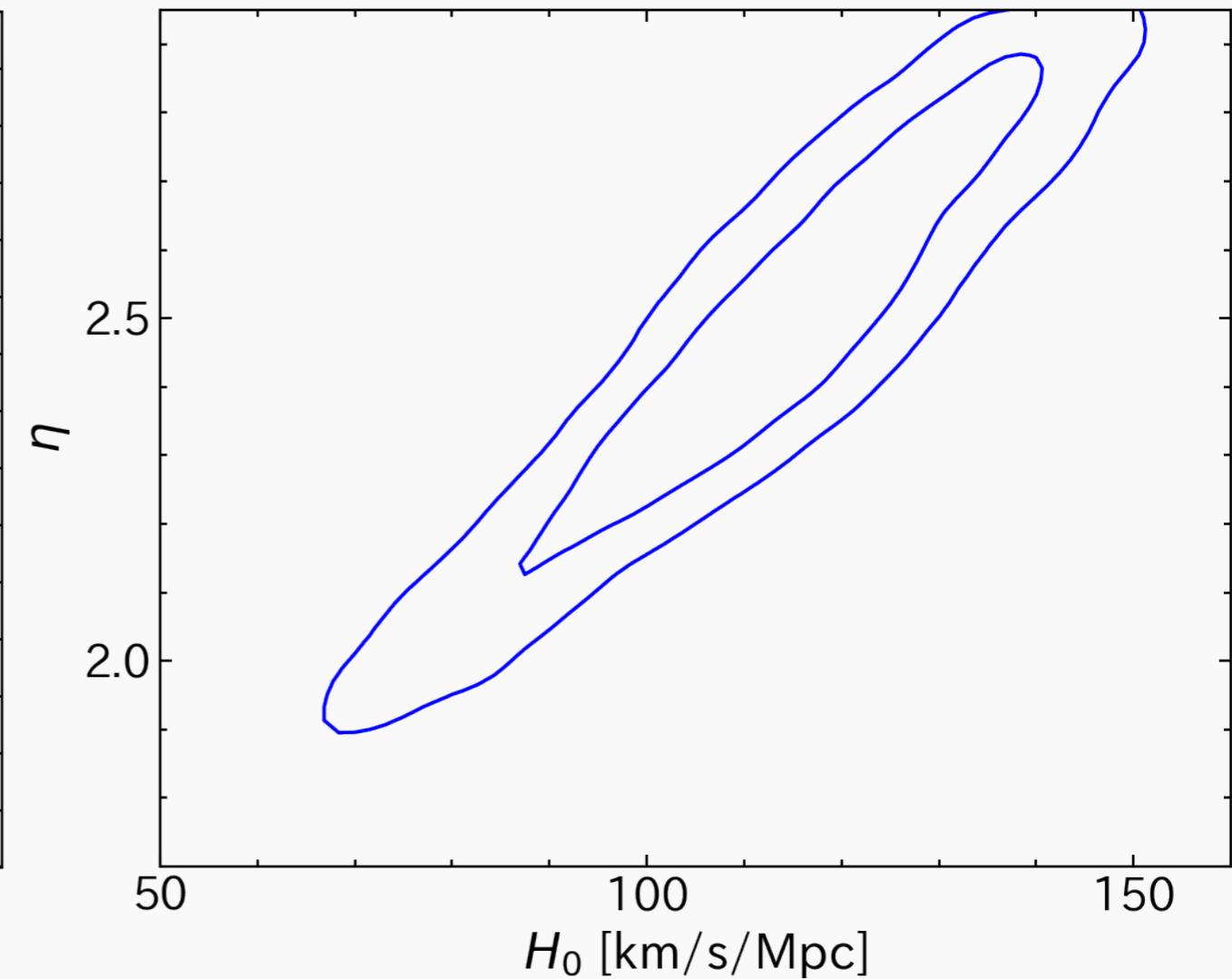
$$\theta_{\max} \simeq 2\theta_{\text{Ein}}$$



ハッブル定数の制限



- 幕分布では制限が弱い



- 幕とH0の縮退
(\approx 質量-薄板縮退)

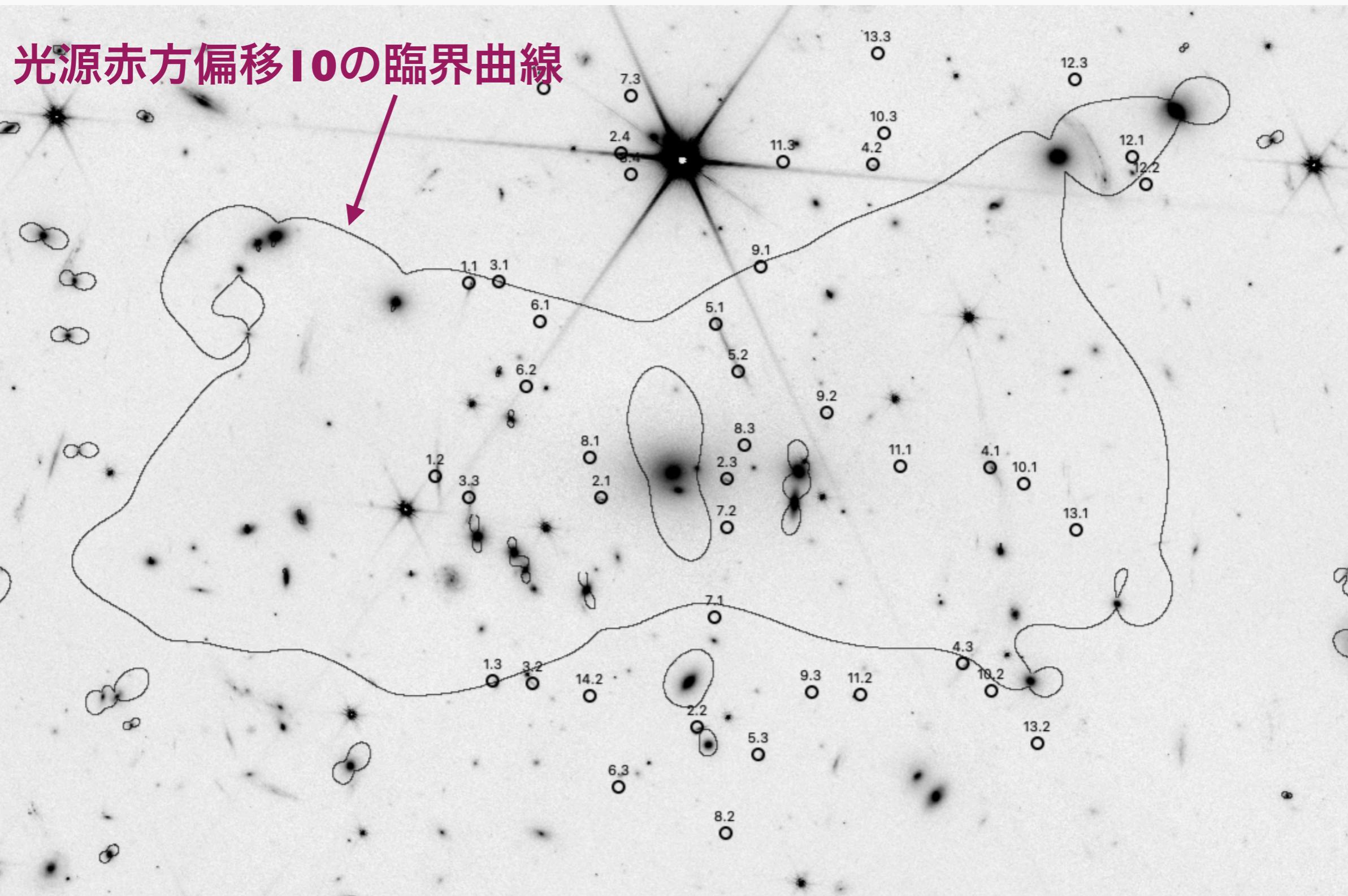
例: 銀河団重力レンズ



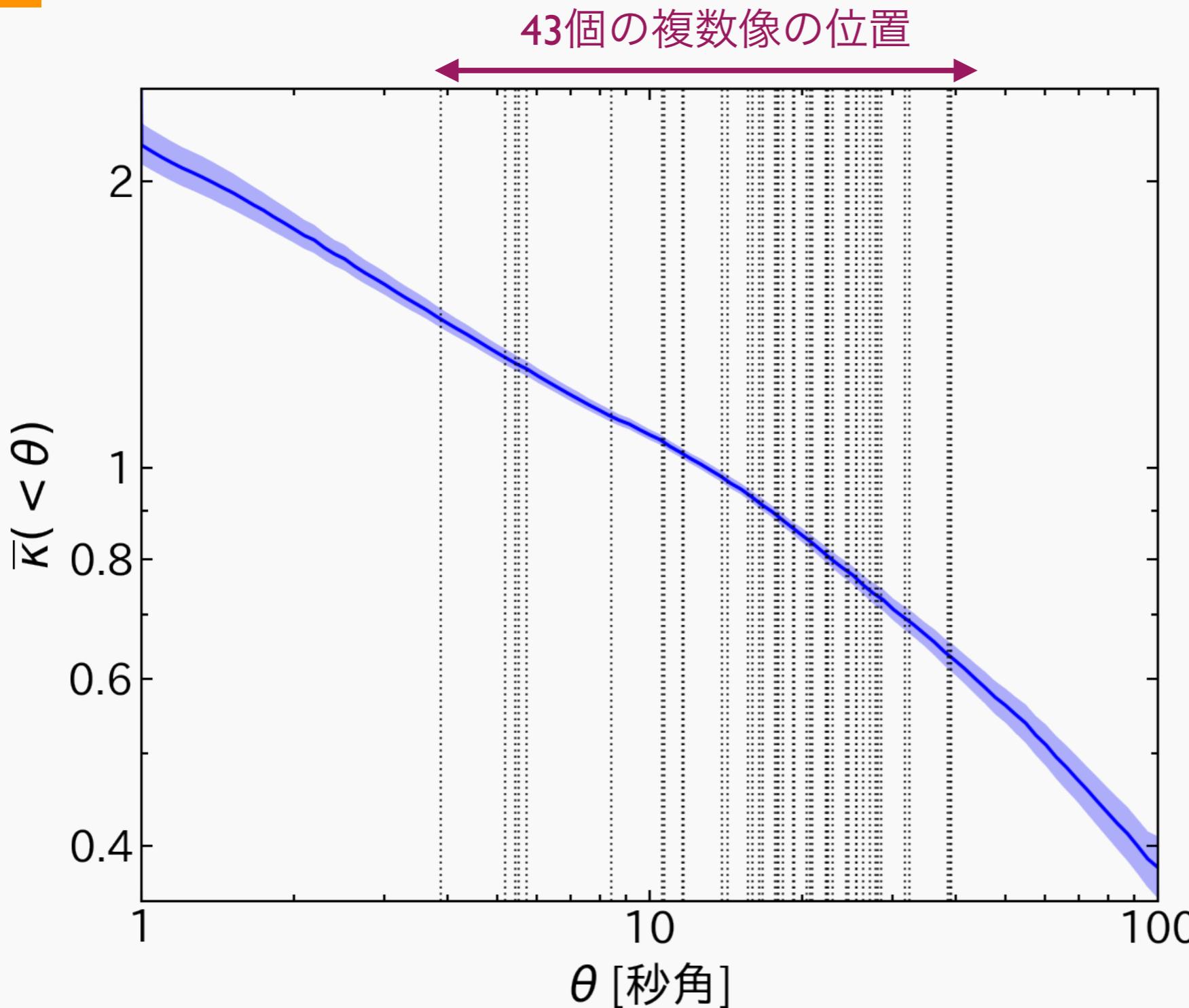
JWSTの
最初の
観測対象
の一つ

14個の
背景銀河
から、
43個の
複数像

最適化された質量モデル



平均収束場



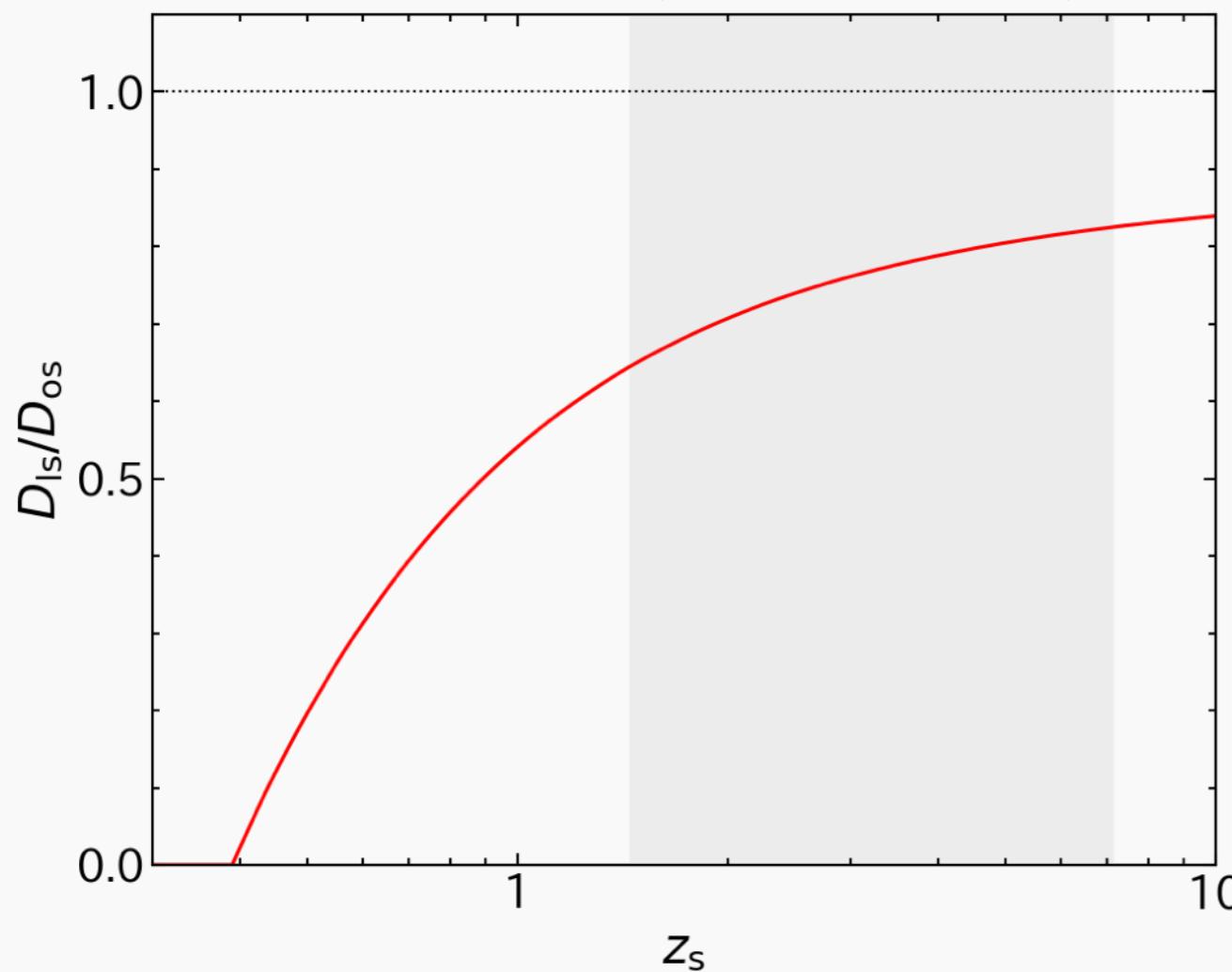
幅広い半径にわ
たって複数像が
存在



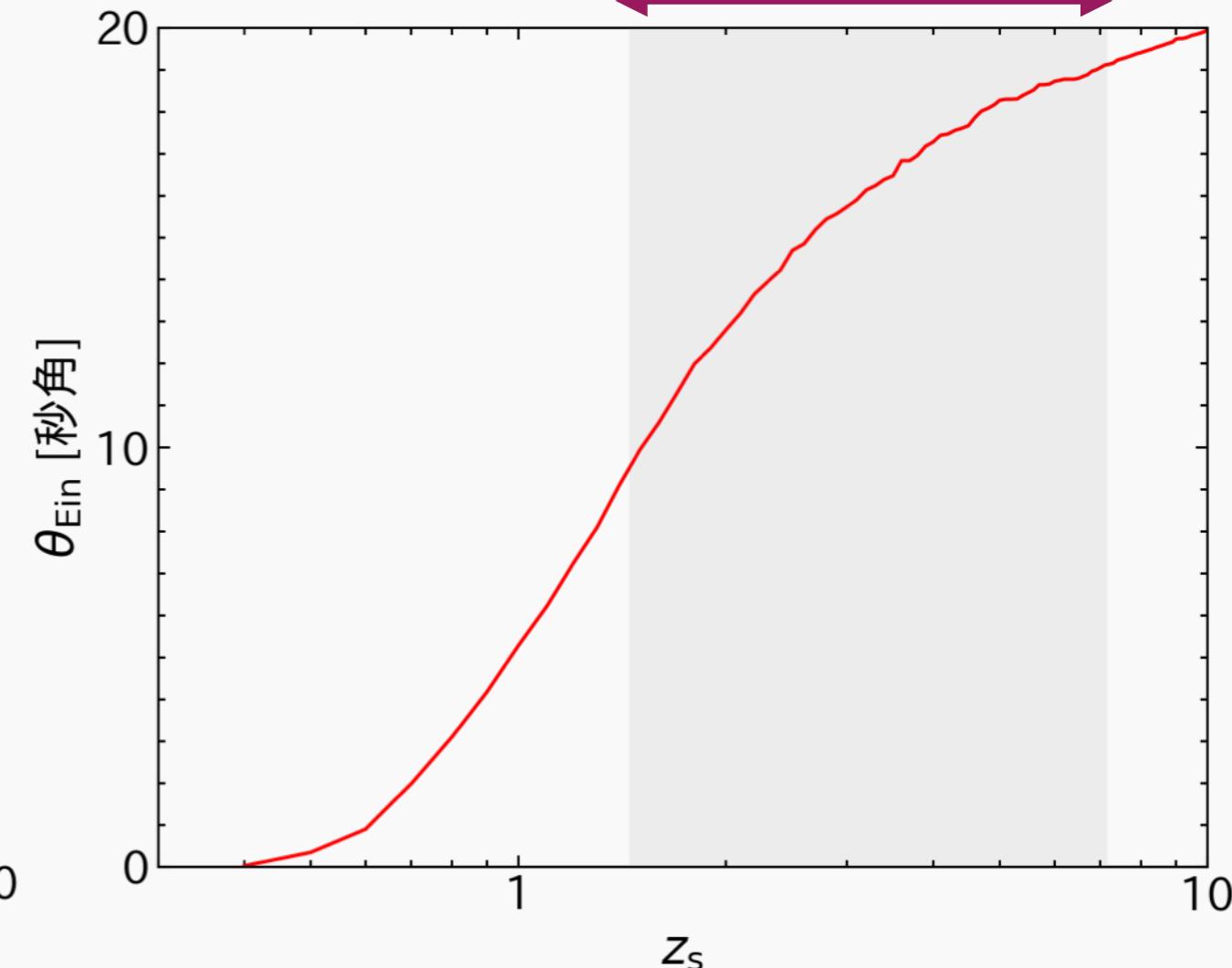
密度分布を、幕
まで含めてよく
制限できる

光源赤方偏移依存性

|4個の光源の赤方偏移の範囲|



|4個の光源の赤方偏移の範囲|

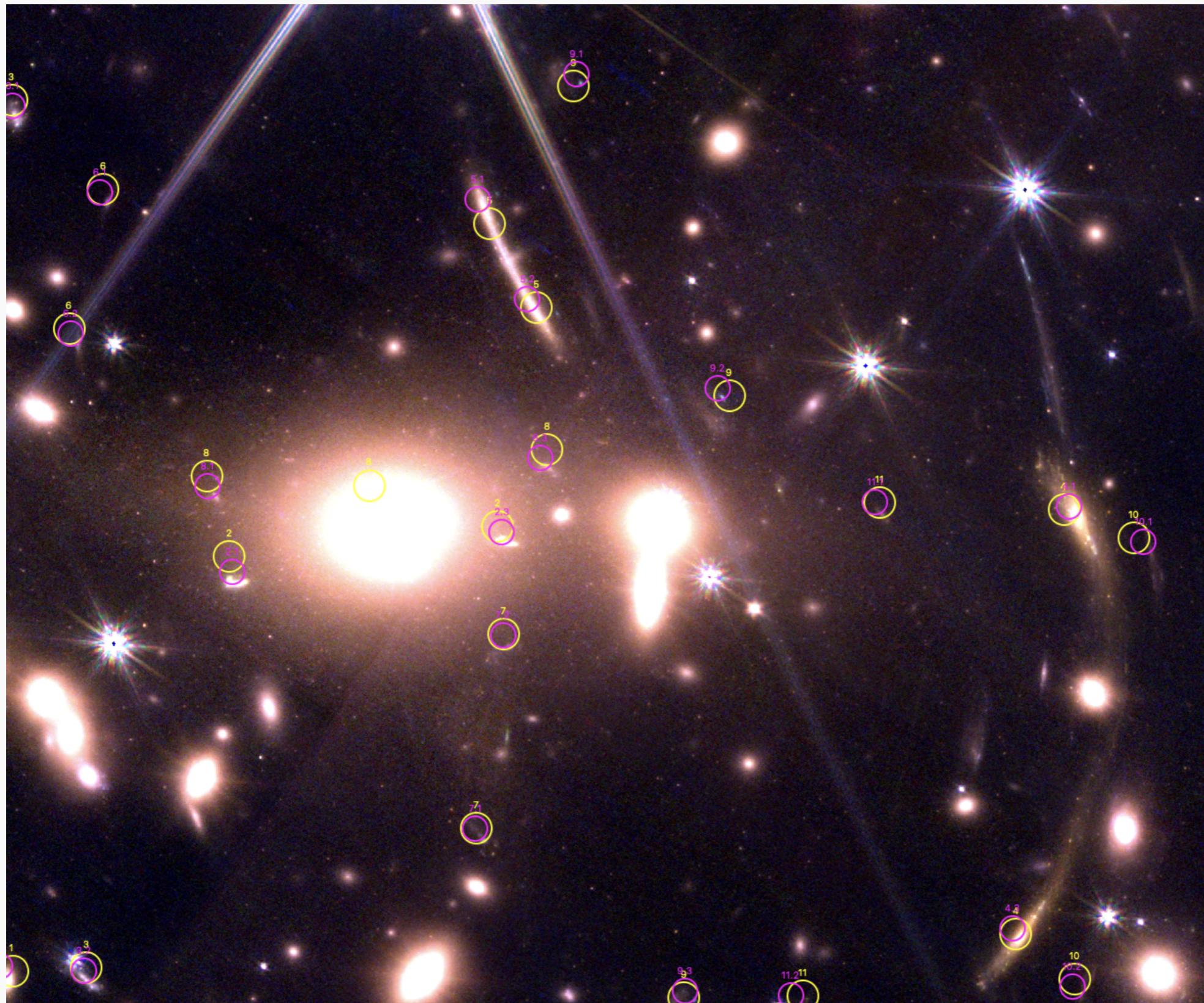


$$\Sigma_{cr}^{-1} \propto \frac{D_{ls}}{D_{os}}$$

θ_{Ein} が光源の
赤方偏移依存

複数の半径で
 $\bar{k}(<\theta_{Ein}) = 1$
の制限

銀河団強重力レンズ解析の問題点



観測された
像の位置

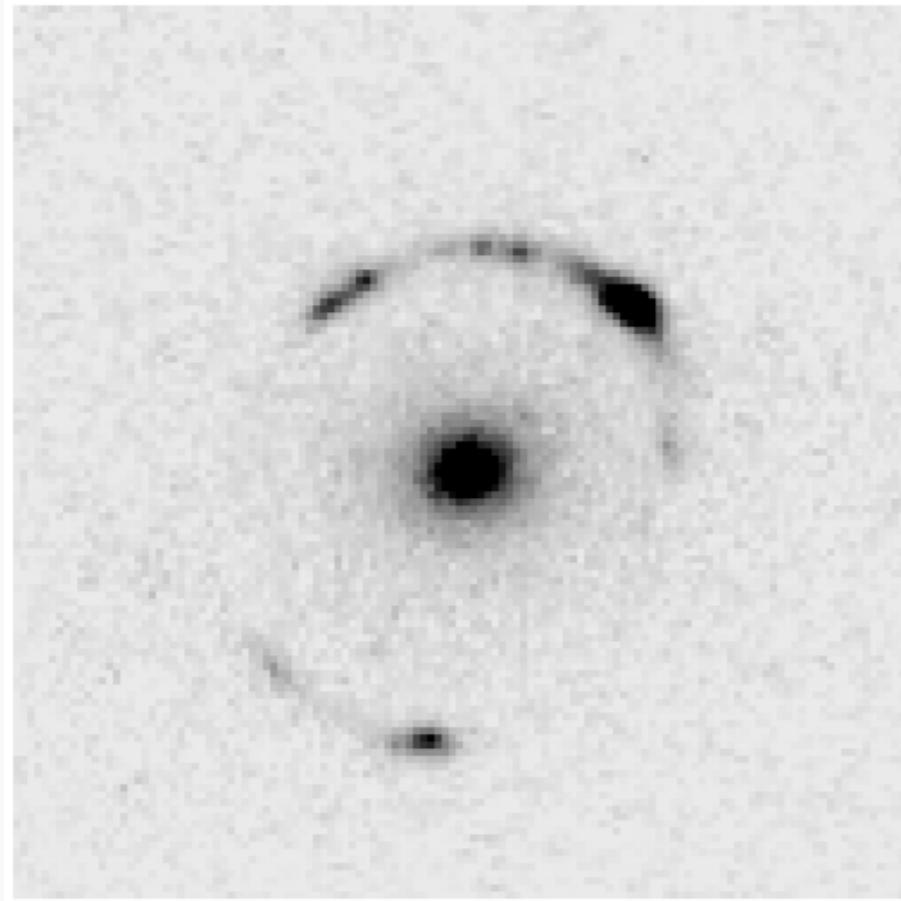
質量モデルで
予言された
位置

有意な
(大きな)
位置のずれ

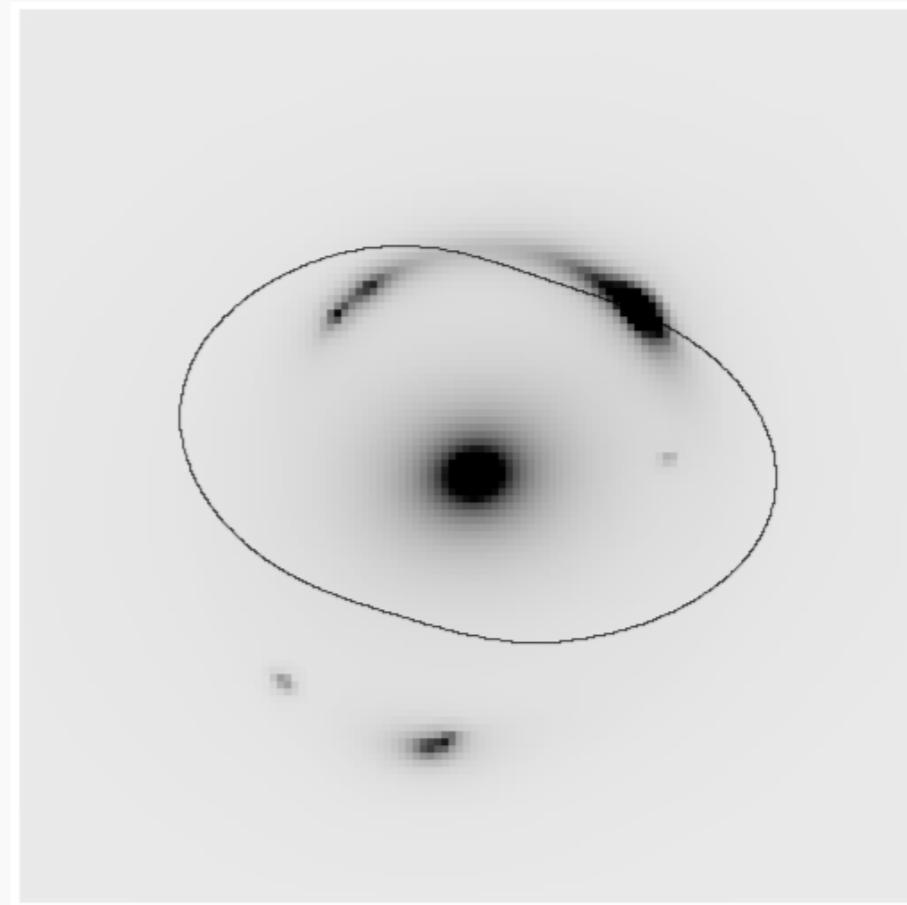
実際の構造
の複雑さに
起因

例: 広がった光源

SDSSJ002927.38+254401.7 (Shu+2016)



質量モデリングの結果

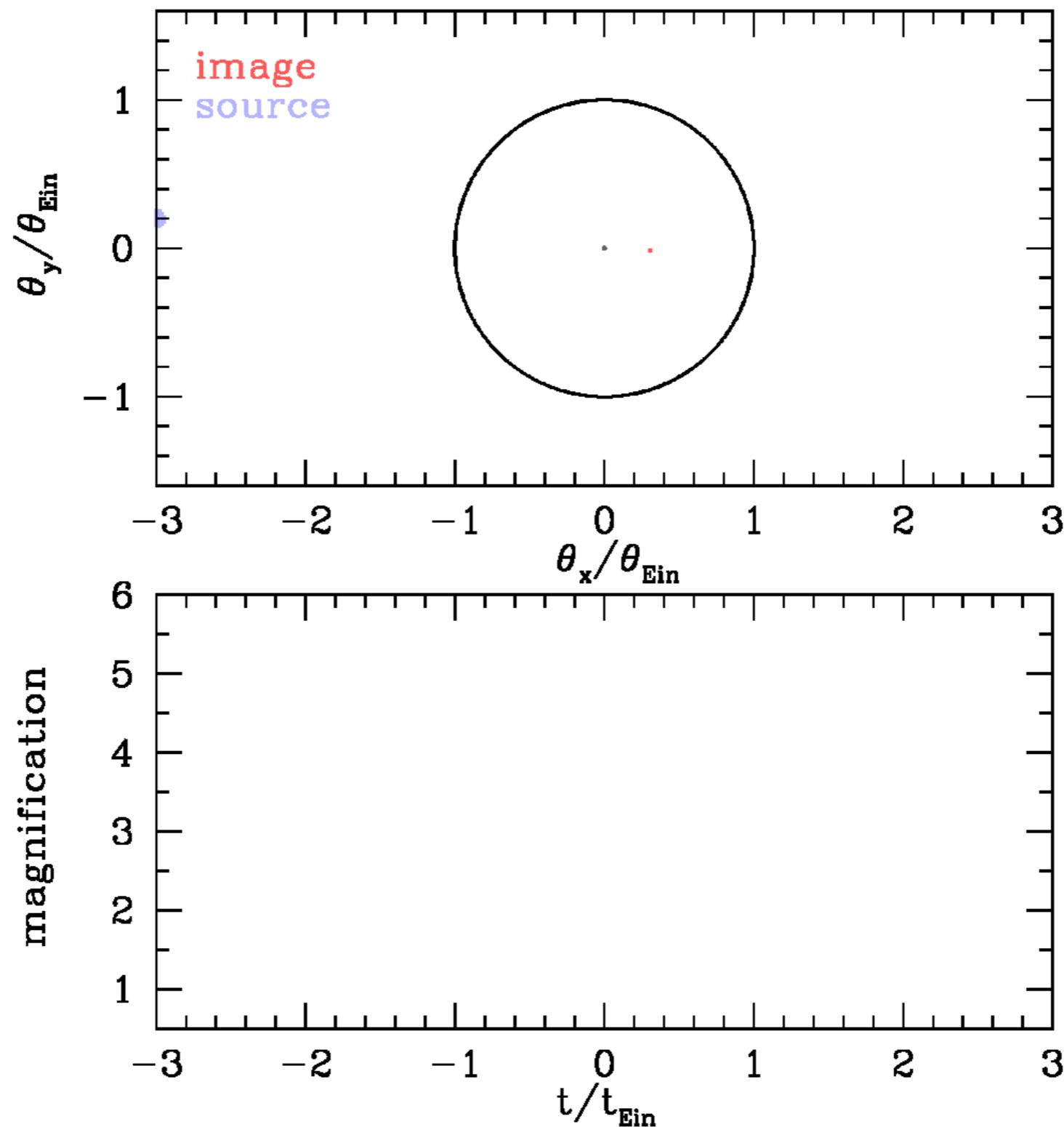


- 全てのピクセルをフィット

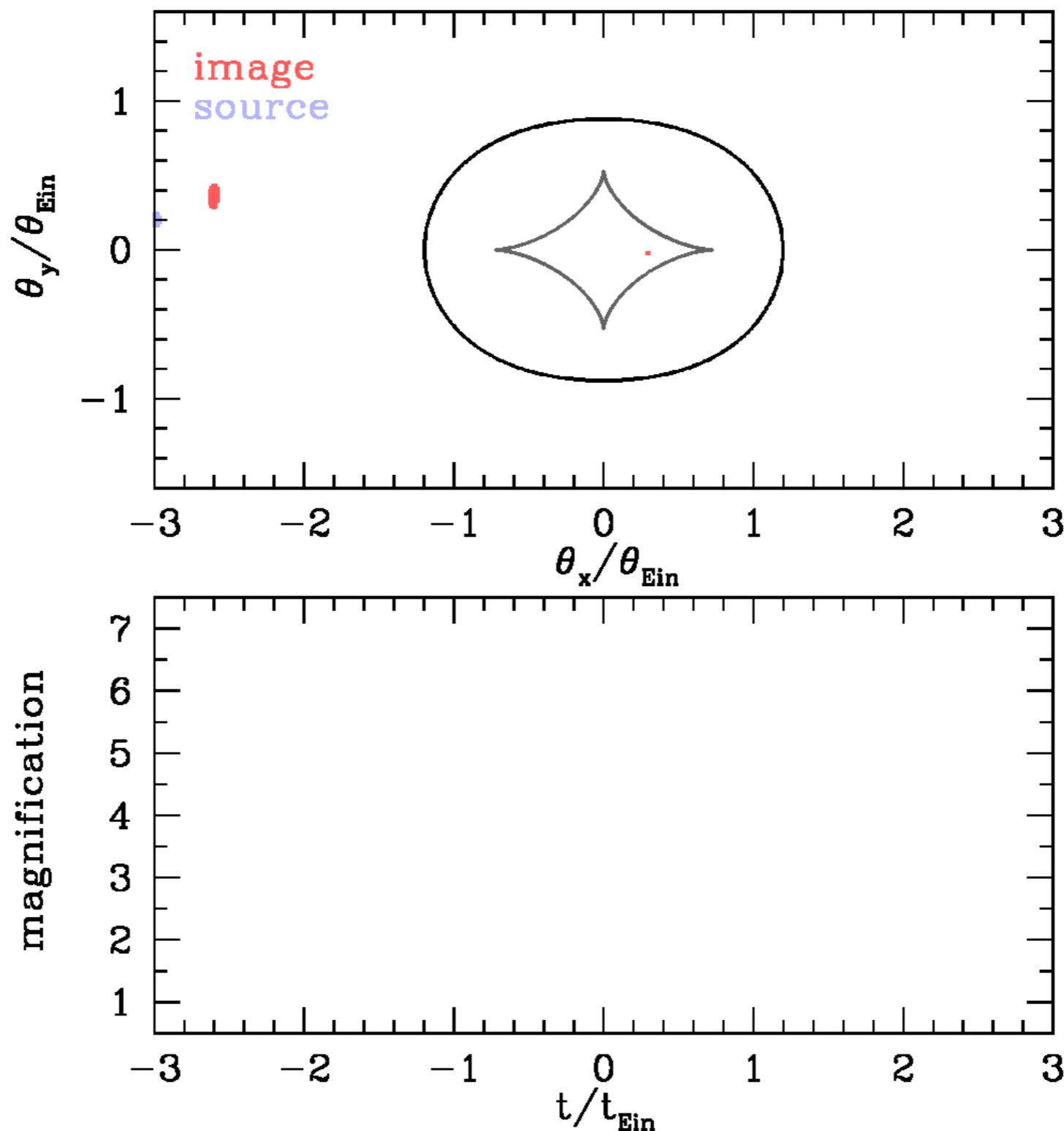
$$\chi_{\text{ext}}^2 = \sum_{i_x=1}^{N_x} \sum_{i_y=1}^{N_y} \frac{\left[f^{\text{obs}}(i_x, i_y) - f(i_x, i_y; \mathbf{p}_{\text{source}}, \mathbf{p}_{\text{model}}) \right]^2}{\sigma^2(i_x, i_y)}$$

課題: **計算コスト**
光源の複雑さ
質量分布の複雑さ
...

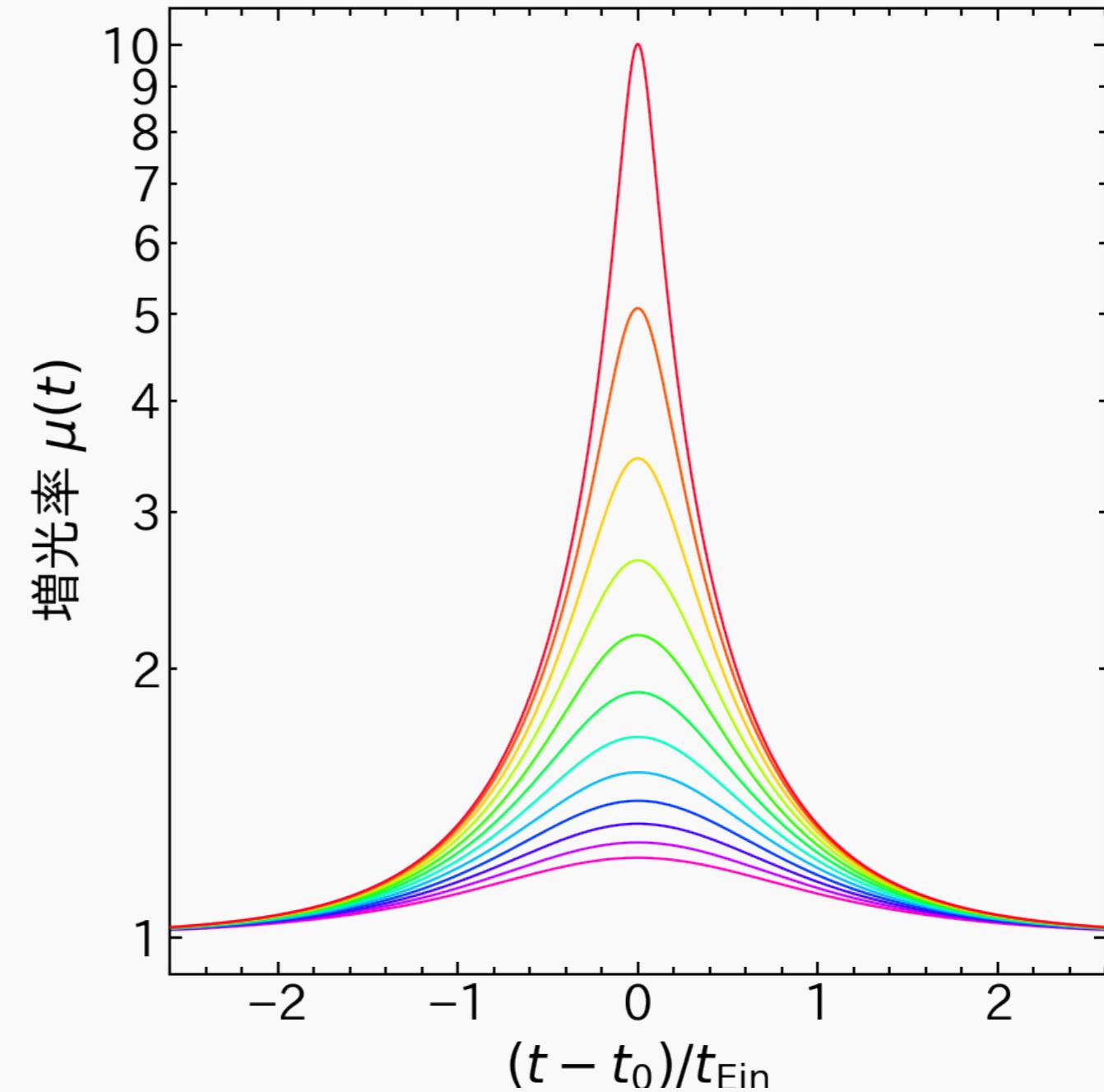
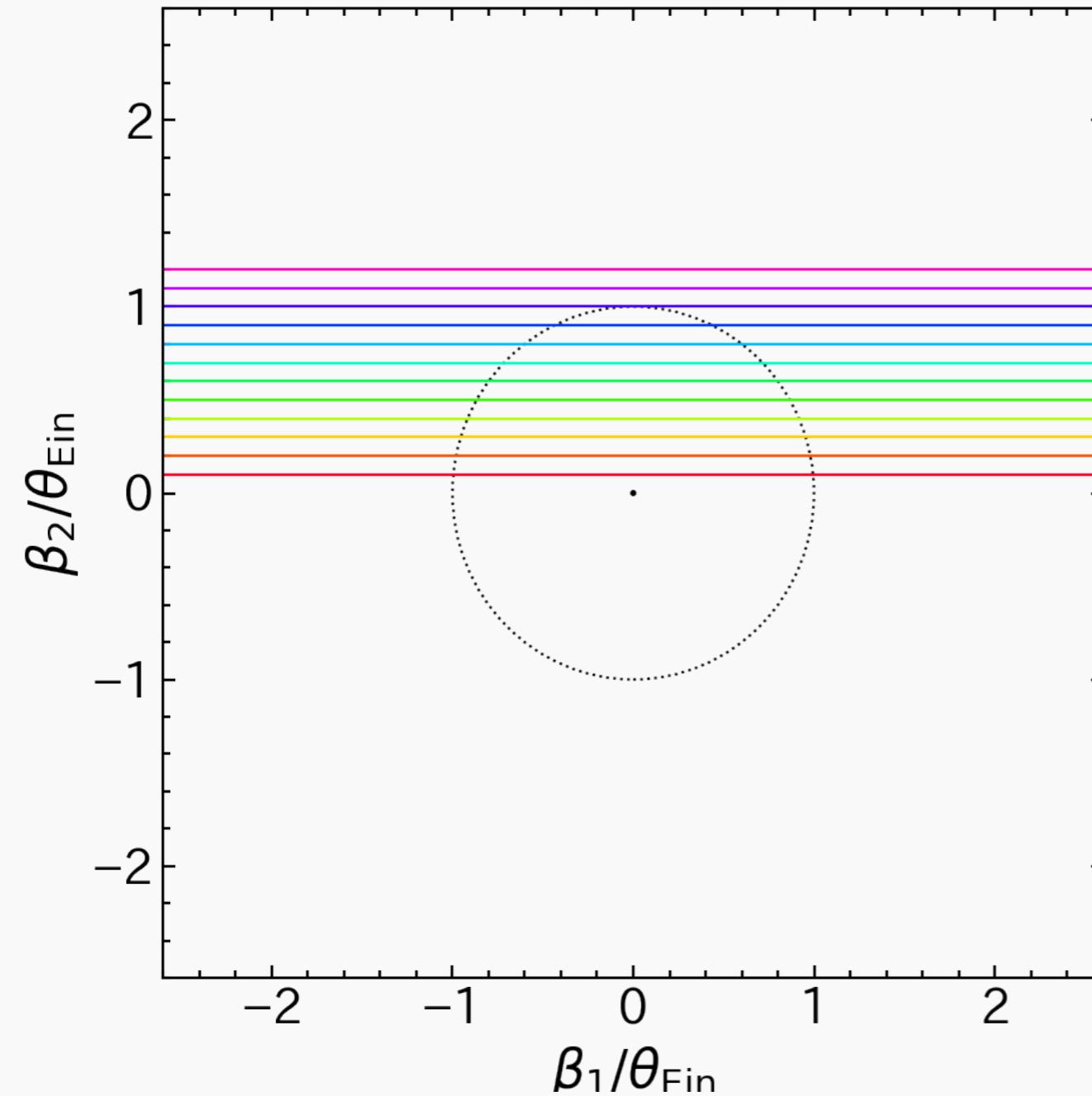
重力マイクロレンズ（点質量レンズ）



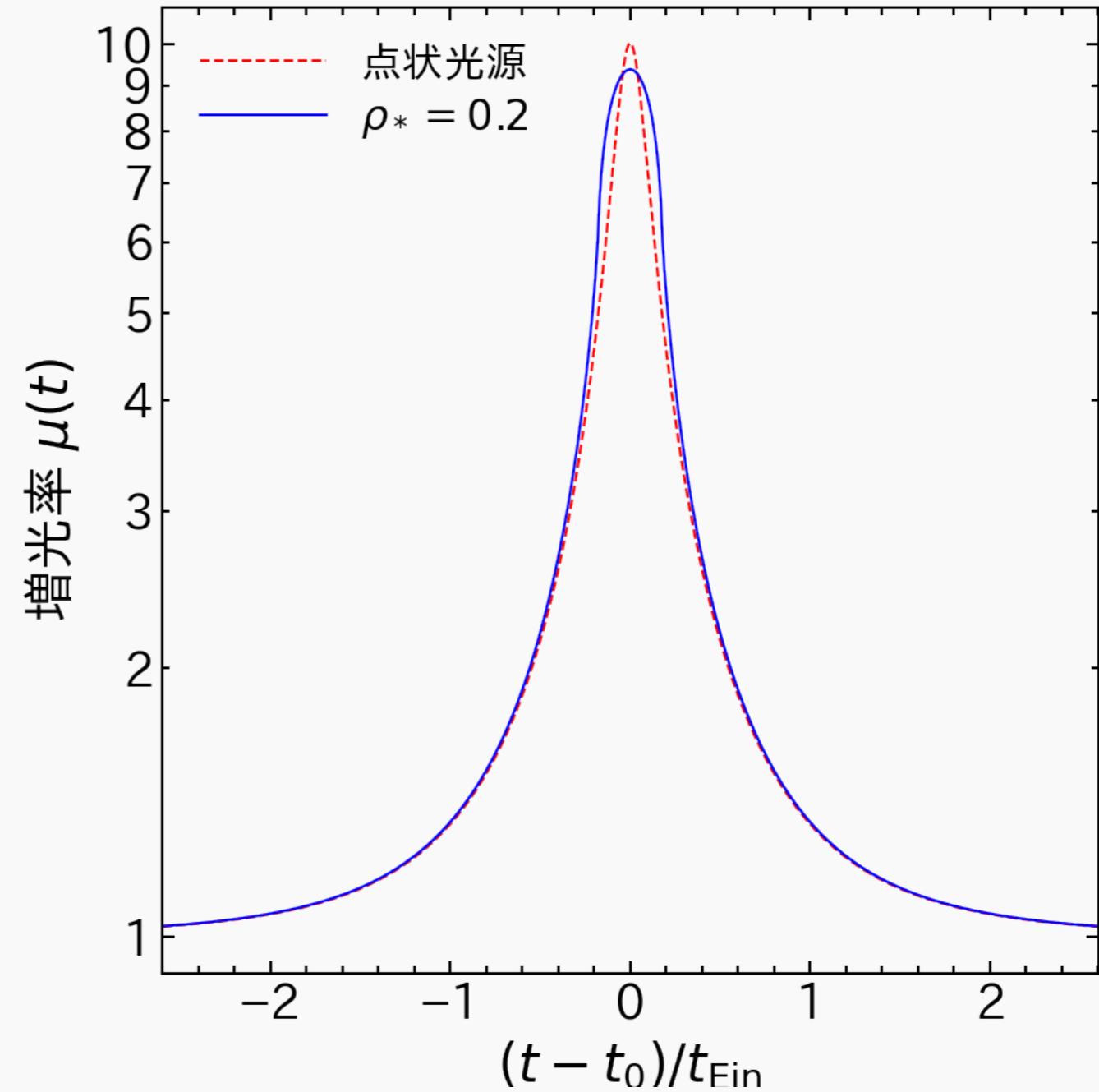
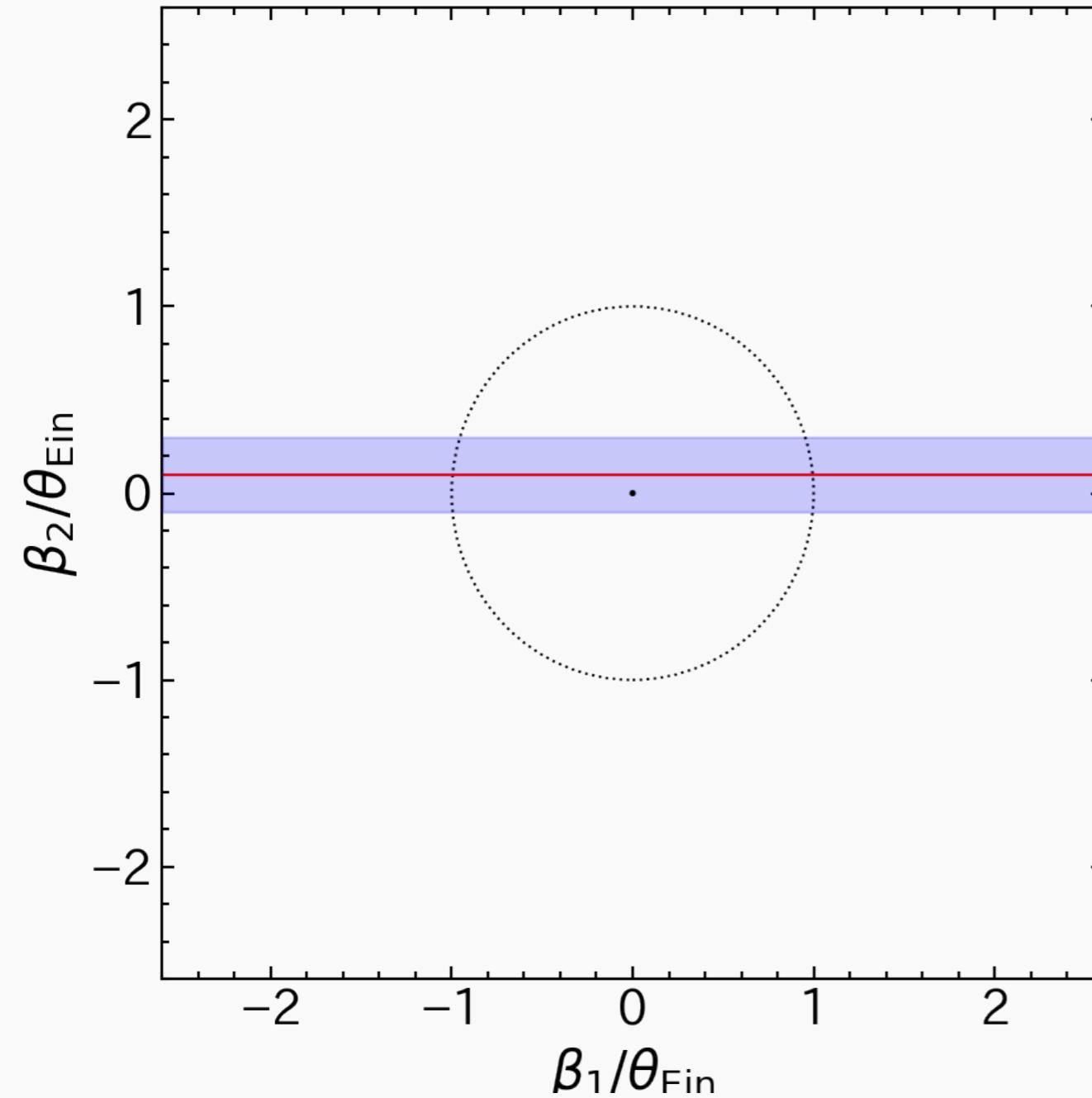
重力マイクロレンズ（焦線通過）



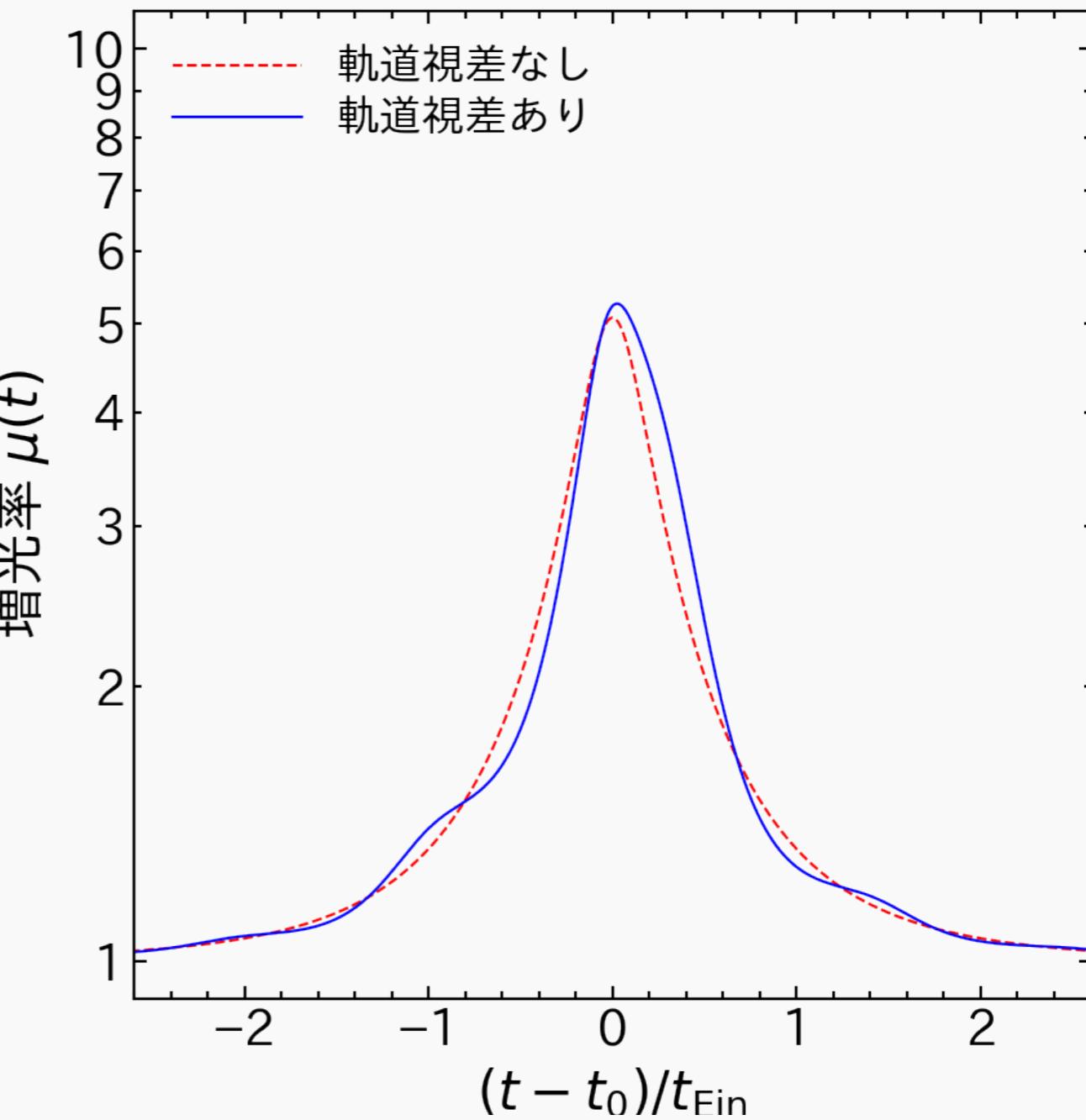
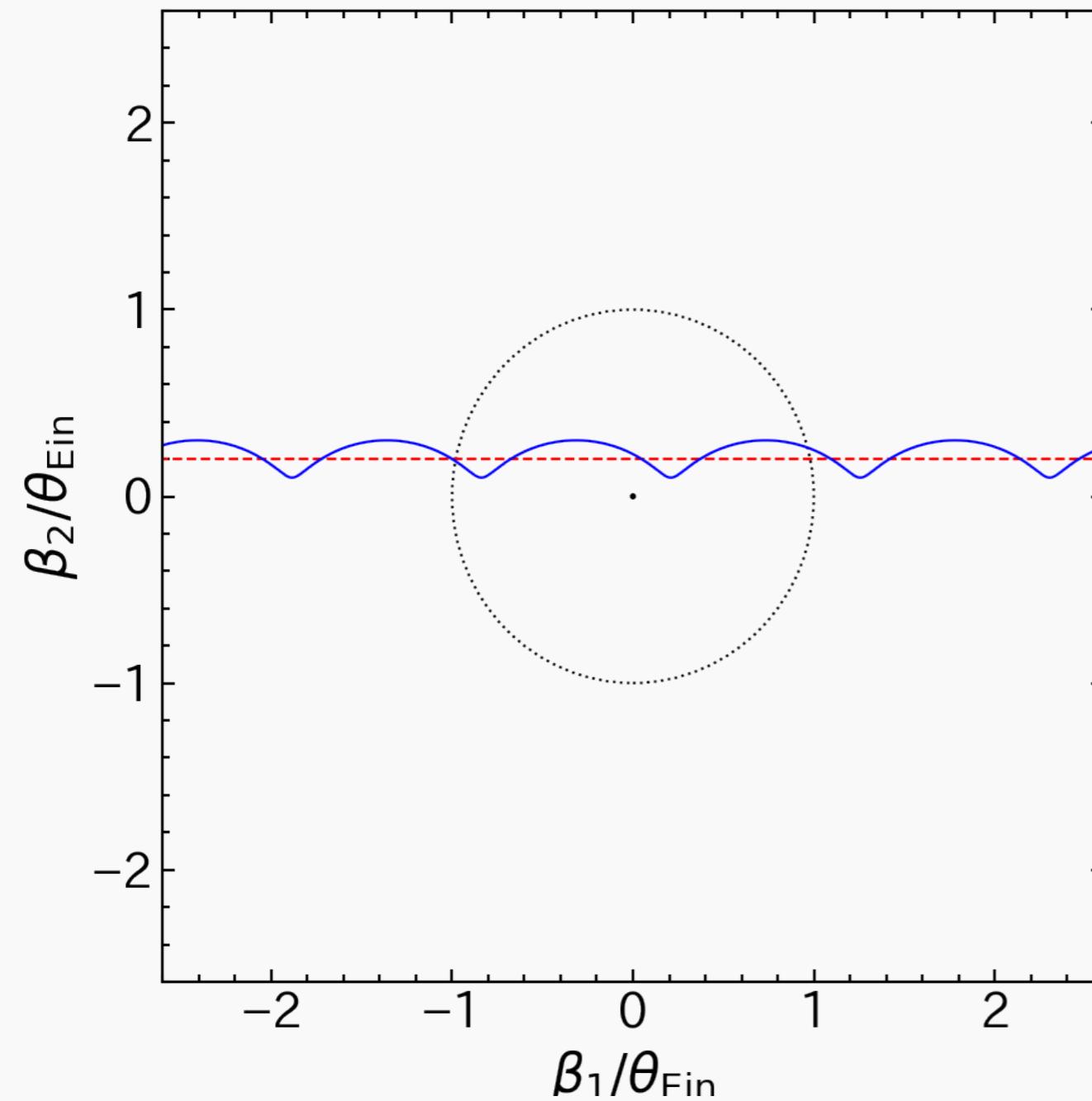
点質量レンズの増光曲線



光源の大きさの影響



重力マイクロレンズ視差（軌道視差）



重力マイクロレンズ視差 (3角視差)

