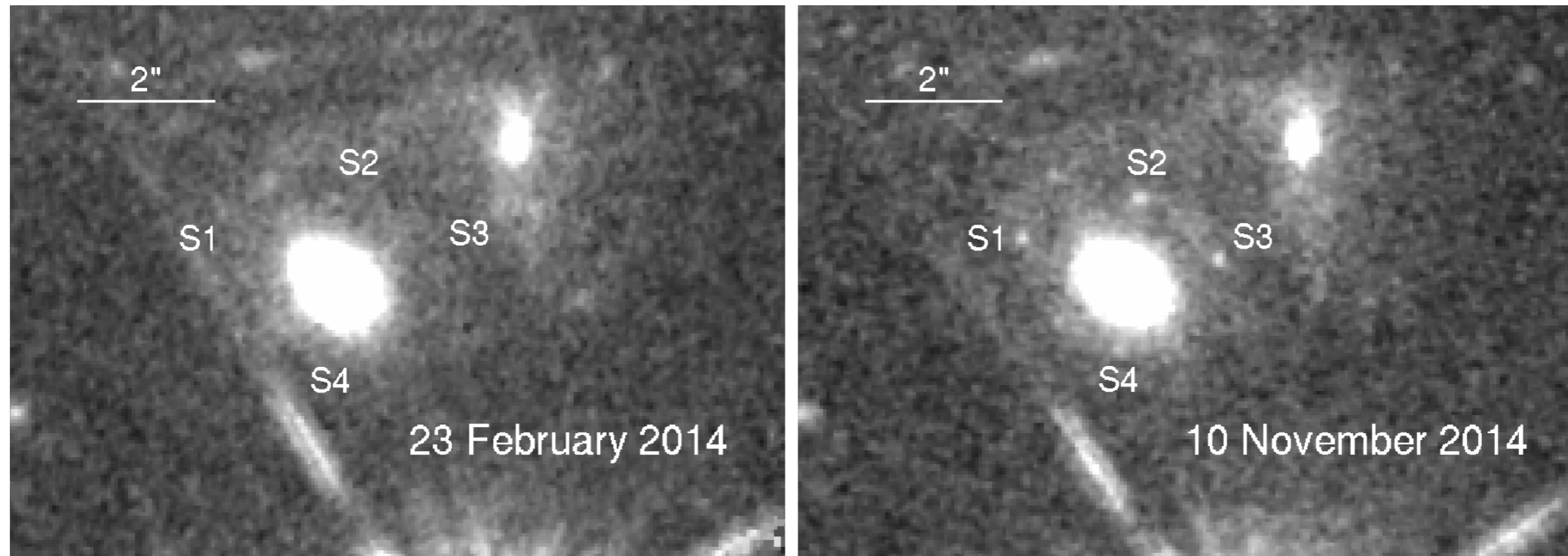


超新星重力レンズSN Refsdal の像の出現予測



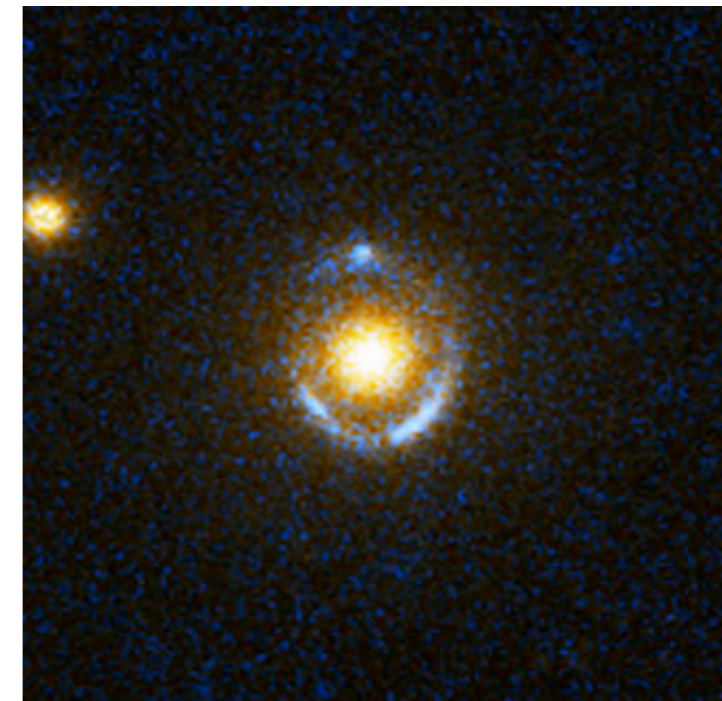
大栗 真宗
(東京大学 RESCEU/物理/カブリIPMU)

強い重力レンズ

- 複数像、大きな増光
- 多くの応用
 - 宇宙論
 - 銀河の構造進化
 - 遠方天体
 - 天体の微細構造



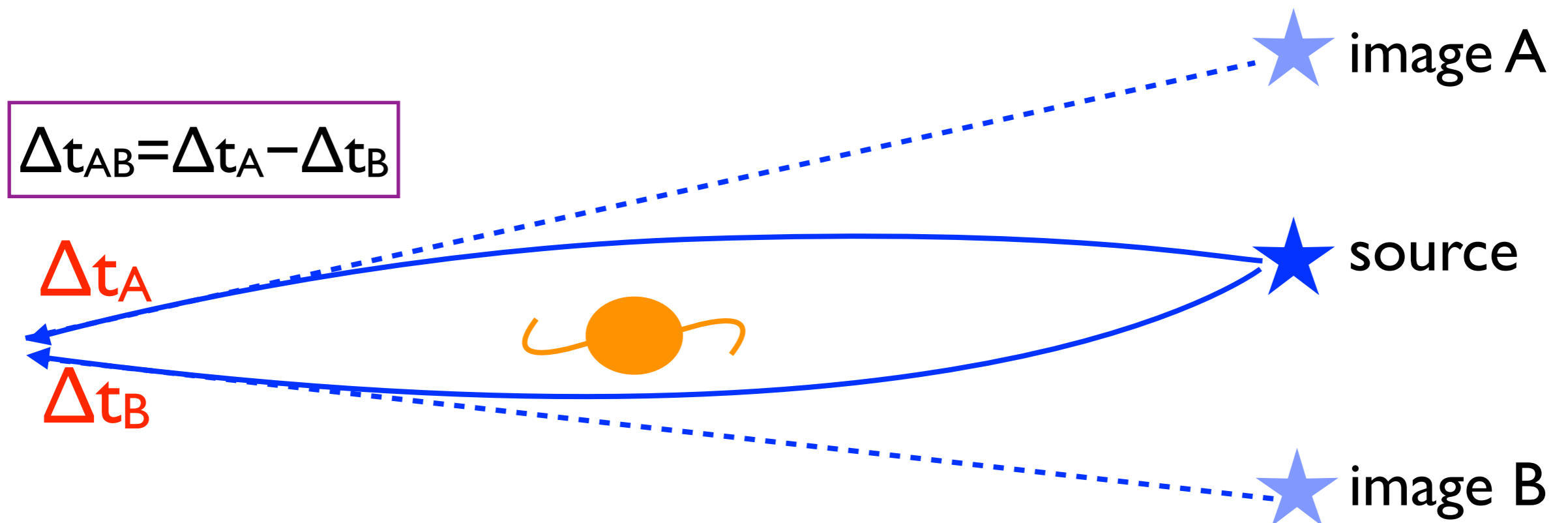
lensed quasar (SQLS)



lensed galaxy (SLACS)

時間の遅れ

- 複数像の到達時刻の遅れ、絶対距離 (H_0) の測定が可能 (Refsdal 1964)
- クエーサーで時間の遅れ測定 $\rightarrow H_0$ に制限
例) $H_0 = 68 \pm 6 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$ (16 lenses, Oguri 2007)
 $H_0 = 70.6 \pm 3.1 \text{ km/s/Mpc}$ (1 lens, Suyu et al. 2010)



時間の遅れの観測量

$$\Delta t = \frac{1 + z_l}{c} \underbrace{\frac{D_{ol} D_{os}}{D_{ls}}}_{\propto H_0^{-1}} \left[\frac{1}{2} \left| \vec{\theta} - \vec{\beta} \right|^2 - \psi(\vec{\theta}) \right]$$

観測

観測された像の位置

ソース位置 レンズポテンシャル

レンズ天体の質量分布に依存

- H_0 を決定するには精確なmass modelingによる
レンズ天体の質量分布の詳細決定が必要不可欠
- 逆に宇宙論パラメタを既知とするとレンズ天体
の質量分布の貴重な情報が得られる
(e.g., mass-sheet degeneracy)



S. Refdal, MNRAS **128**(1964)307

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINING HUBBLE'S PARAMETER AND THE MASSES OF GALAXIES FROM THE GRAVITATIONAL LENS EFFECT*

Sjur Refsdal

(Communicated by H. Bondi)

(Received 1964 January 27)

Summary

The gravitational lens effect is applied to a supernova lying far behind and close to the line of sight through a distant galaxy. The light from the supernova may follow two different paths to the observer, and the difference Δt in the time of light travel for these two paths can amount to a couple of months or more, and may be measurable. It is shown that Hubble's parameter and the mass of the galaxy can be expressed by Δt , the red-shifts of the supernova and the galaxy, the luminosities of the supernova "images" and the angle between them. The possibility of observing the phenomenon is discussed.

1. *Introduction.*—In 1937 Zwicky suggested that a galaxy, due to the gravitational deflection of light, may act as a gravitational lens. He considered the case of a galaxy *A* lying far behind and close to the line of sight through a distant galaxy *B*. If the line of sight through the centre of *B* goes through *A*, the "image" of *A* will be a ring around *B*, otherwise two separated "images" appear, on opposite sides of *B*. The phenomenon has later been discussed by Zwicky (1957) and Klimov (1963), and they both conclude that the possibility of observing the phenomenon should be good. In the present paper the case of a supernova

- 時間の遅れで H_0 を決める手法を初めて提案した論文
- 実は超新星の重力レンズが考えられていた!

超新星重力レンズ

- 遠方天体 ($z \gtrsim 1$) の強い重力レンズ確率は $O(10^{-3})$ とかその程度
- 数年前まで遠方超新星の発見数は $O(10^2)$ (e.g., CFHTLS)
- 最近のサーベイで $O(10^3)$ の水準へ (e.g., Pan-STARRS)
- ようやく発見が期待される時代に

期待される数

Survey	SN (Ia)		SN (cc)		Note
	N_{nonlens}	N_{lens}	N_{nonlens}	N_{lens}	
SDSS-II	4.34×10^2	0.003 (54%)	1.09×10^3	0.01 (40%)	
SNLS	7.52×10^2	0.03 (24%)	1.44×10^3	0.05 (26%)	
PS1/3 π	3.34×10^4	0.28 (53%)	8.23×10^4	0.97 (39%)	detections only
PS1/MDS	2.93×10^3	0.09 (32%)	6.05×10^3	0.16 (30%)	
DES/wide	8.30×10^4	2.7 (29%)	1.62×10^5	4.9 (29%)	detections only
DES/deep	8.95×10^2	0.04 (22%)	1.80×10^3	0.07 (24%)	
HSC/deep	1.10×10^3	0.06 (18%)	2.56×10^3	0.13 (21%)	
JDEM/SNAP ^a	1.36×10^4	2.9 (13%)	5.39×10^4	12.0 (18%)	
LSST	1.39×10^6	45.7 (32%)	2.88×10^6	83.9 (30%)	

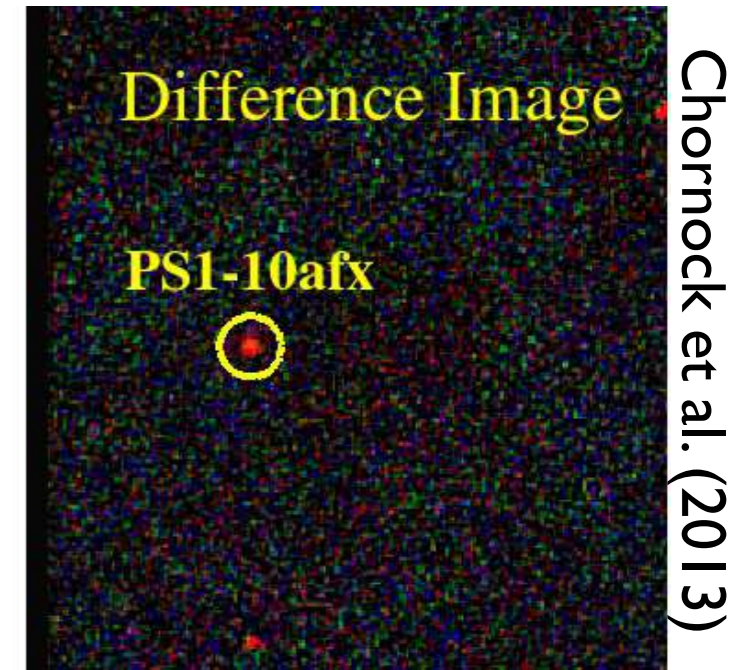
- Pan-STARRS, DES, HSCなどで発見期待
- LSSTでは多数 (>100) 発見できる

観測の進展: 初発見

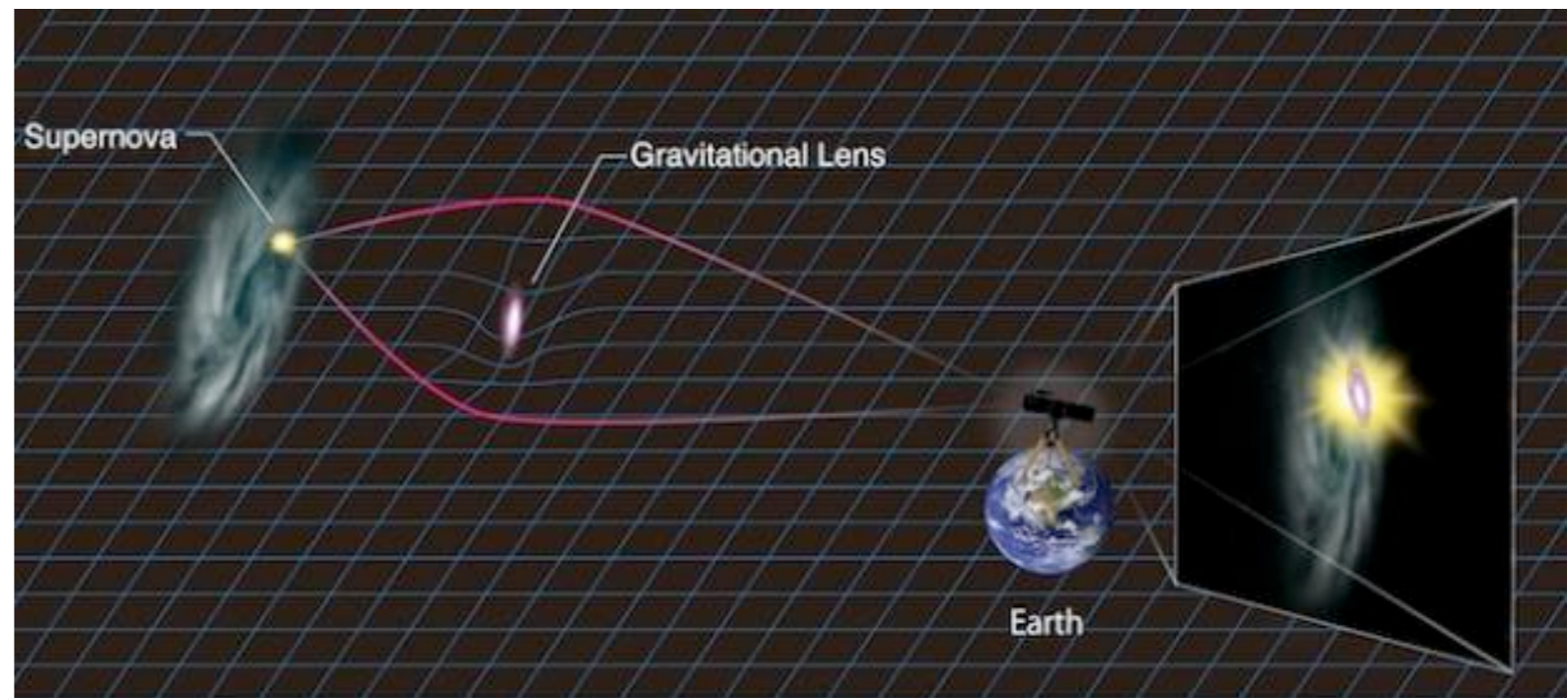
- これまで発見例はなし
- ここ最近初発見が報告された
 - PS1-10afx
 - SN Refsdal

PS1-10afx

- Pan-STARRSで発見された特異な現象
- 重力レンズで30倍増光された普通のIa型超新星であることを突き止めた
→ **強い重力レンズ超新星の初発見**
(Quimby, Oguri, et al. 2014 Science, **344**, 396)

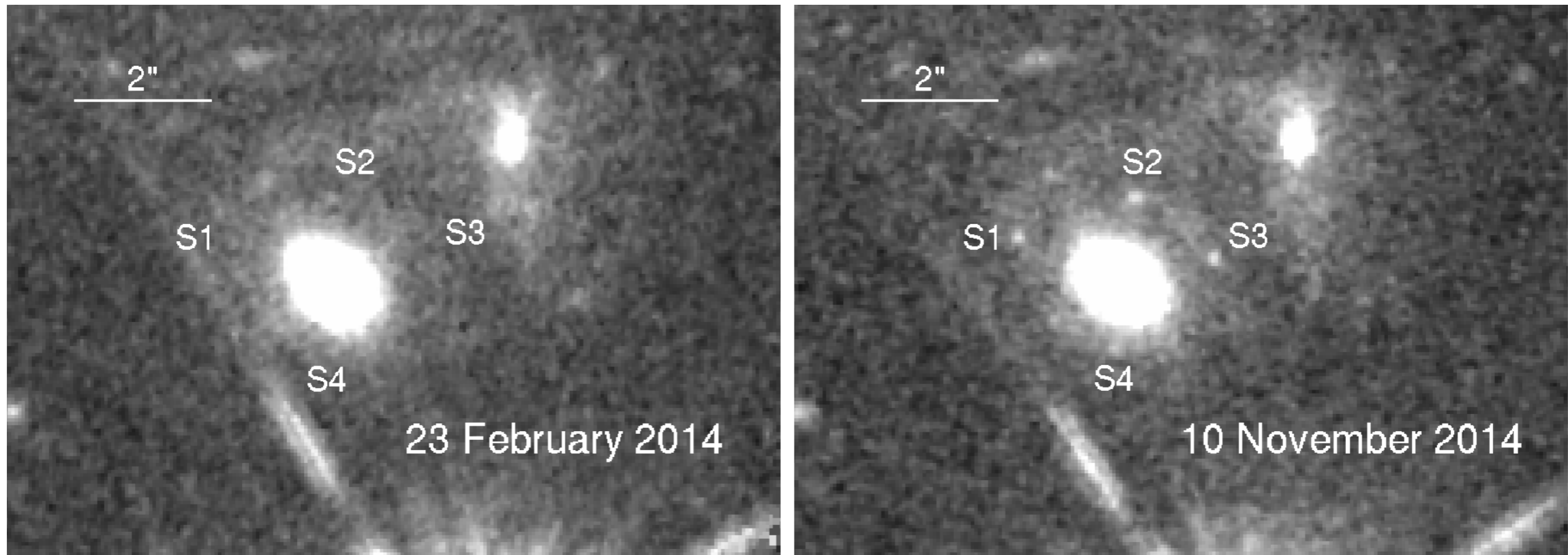


- 残念ながら複数像は分離されず、時間の遅れも測定できなかった



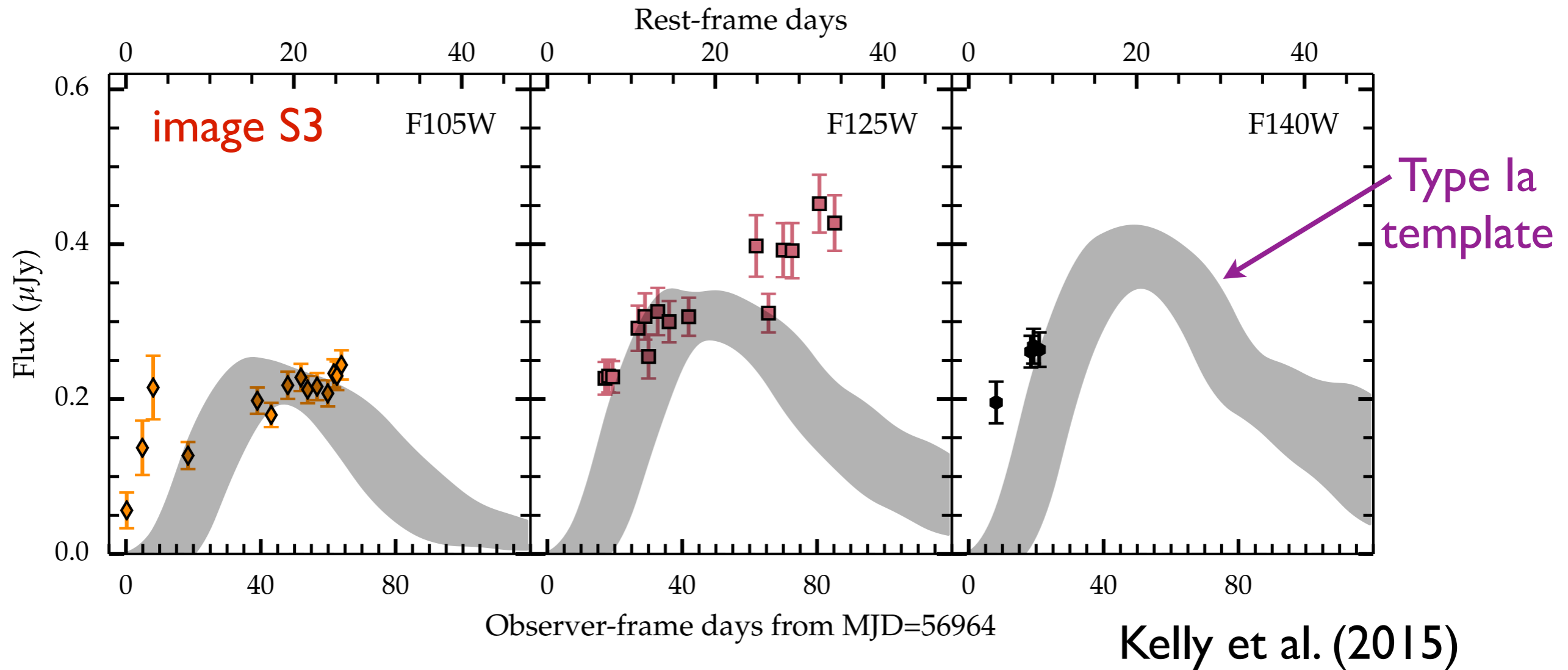
credit: Kavli IPMU

「SN Refsdal」の発見



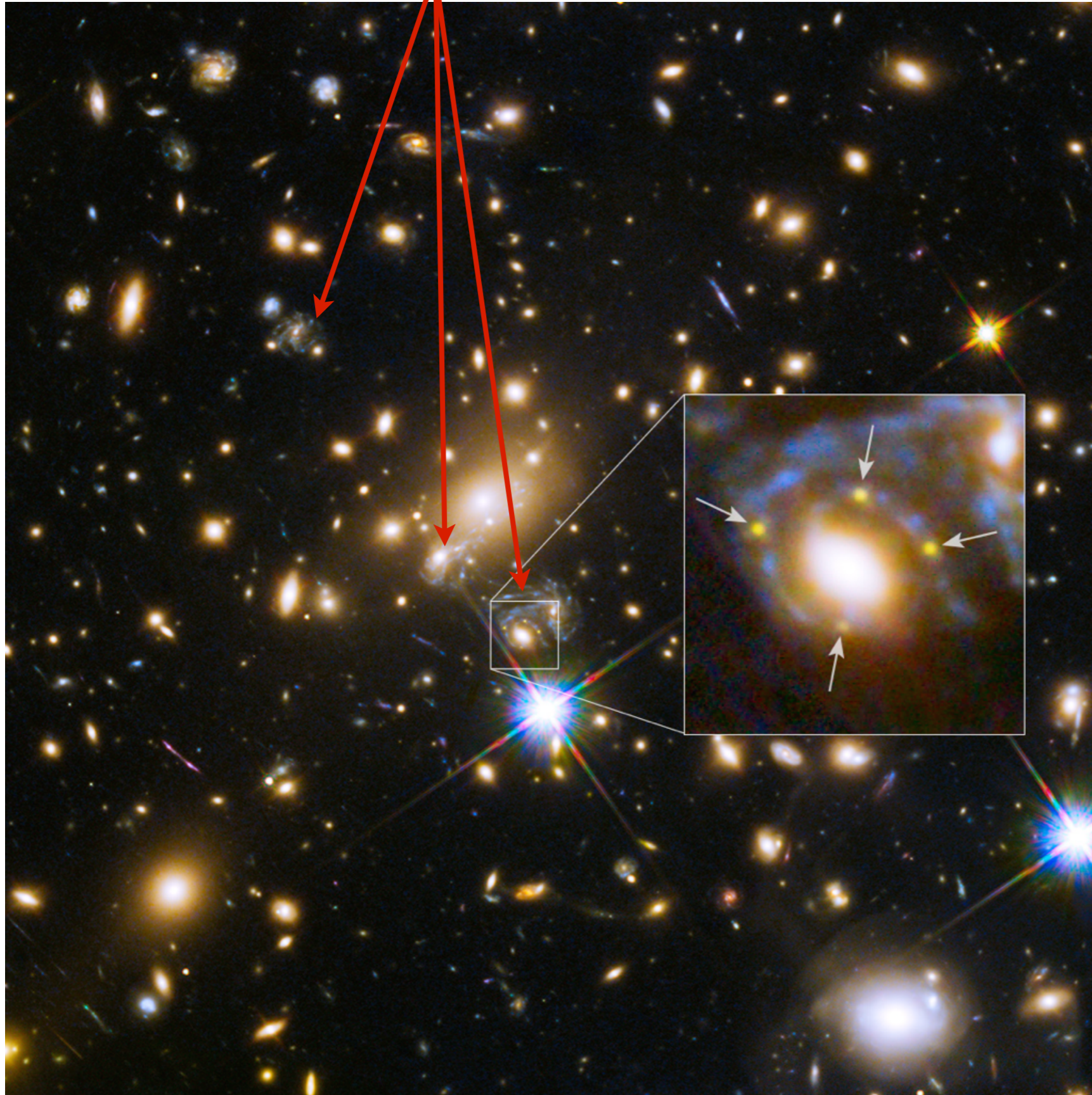
- 楕円銀河の周りに4つの超新星像 ($z=1.49$)
→ 初の複数像が分離された超新星重力レンズ
(Kelly et al. 2015 Science, **347**, 1123)

ライトカーブ



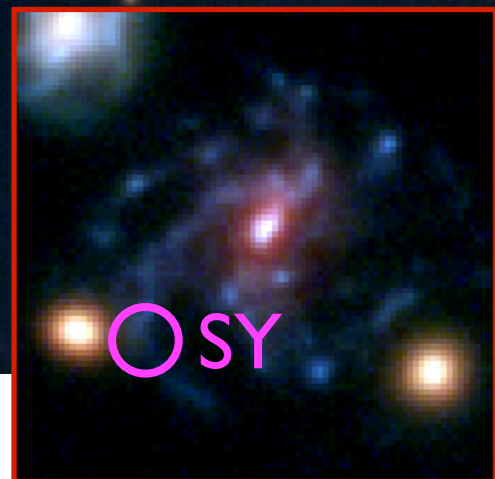
- (残念ながら) Ia型ではない

超新星母銀河



- レンズ銀河は $z=0.54$ 銀河団のメンバ (Frontier Fields)
- 超新星母銀河自体が銀河団レンズで三つ(四つ)に分裂
- さらなる超新星像が存在？

- 直後の解析では4つの観測された超新星像以外に2つの像を予言
- 一つ(SX)は~1年後、もう一つ(SY)は~17年前に出現した
- SXについては今後の観測で検証可能！



SY (~17年前)



SX (~1年後)



S1-S4 (現在)

時間の遅れの予言(競争?)

- 2014/11/23 Kelly et al. arXiv:1411.6009 (発見論文)
- 2014/11/24 Oguri arXiv:1411.6443
[$\Delta t_{s4-s1}=23\text{days}$, $\Delta t_{sx-s1}=360\text{days}$, $\Delta t_{sy-s1}=-6200\text{days}$]
- 2014/11/25 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v1
[$\Delta t_{s4-s1}=45\text{days}$, $\Delta t_{sx-s1}=1330\text{days}$, $\Delta t_{sy-s1}=-4900\text{days}$]
- 2015/02/03 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v2
[$\Delta t_{s4-s1}=7\text{days}$, $\Delta t_{sx-s1}=240\text{days}$, $\Delta t_{sy-s1}=-4300\text{days}$]
- 2015/04/22 Diego et al. arXiv:1504.05953
[$\Delta t_{s4-s1}=-$ ---, $\Delta t_{sx-s1}=380\text{days}$, $\Delta t_{sy-s1}=-3300\text{days}$]
- 2015/09/30 Jauzac et al. arXiv:1509.08914v1
[$\Delta t_{s4-s1}=-16\text{days}$, $\Delta t_{sx-s1}=530\text{days}$, $\Delta t_{sy-s1}=-4200\text{days}$]
- 2015/10/14 Jauzac et al. arXiv:1509.08914v3
[$\Delta t_{s4-s1}=-60\text{days}$, $\Delta t_{sx-s1}=450\text{days}$, $\Delta t_{sy-s1}=-4700\text{days}$]

なぜ食い違っているのか？

- 単純な計算ミス？
- 銀河団の重力レンズモデリングは一般に像の位置を完全に再現はできないが (rms \sim 0.4''-2'') 時間の遅れは像の位置のずれがもるに効く
- 時間の遅れはnon-localなので大局的な質量密度分布をちゃんと精度よく決める必要
- 時間の遅れの観測は質量モデルの検証、改善に非常に有用 (cf. 銀河スケール)

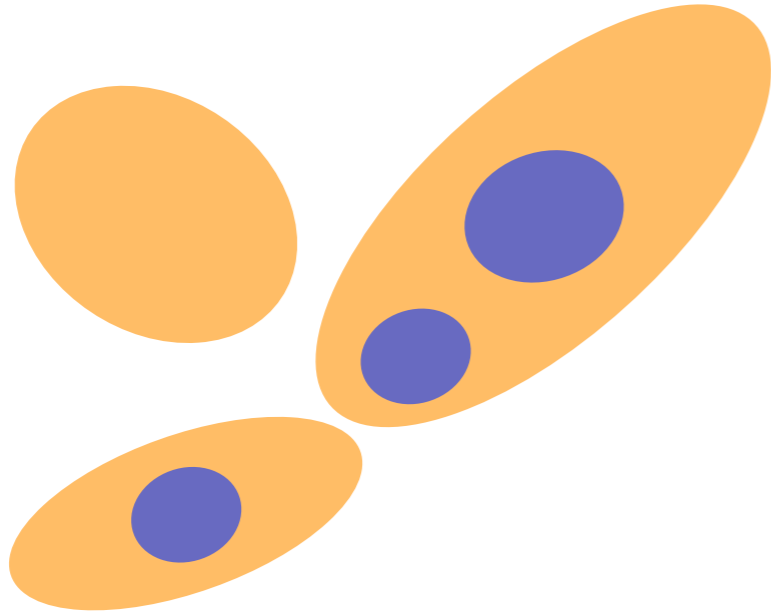


比較プロジェクト

- 多くの追観測データを加え同じ条件で質量モデリングを行い結果の比較をする
- 参加したグループ
 - WSLAP+ (Diego, Broadhurst)
 - GLEE (Grillo, Suyu, Halkola, et al.)
 - glafic (大栗, 川俣, 石垣)
 - Lenstool (Sharon, Johnson)
 - LTM (Zitrin)

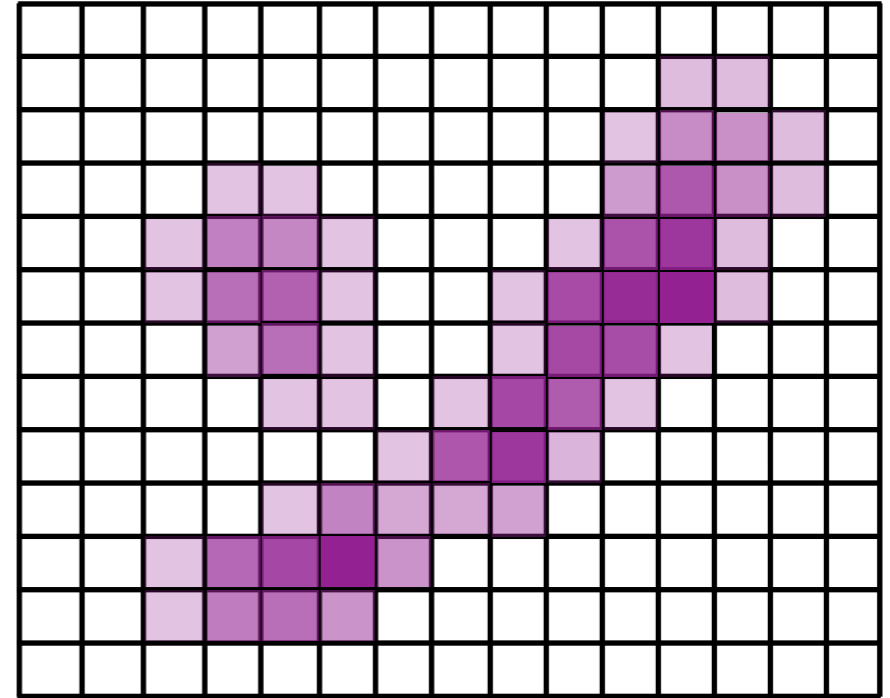


“parametric”



- 数個のパラメタで表される component (halo, galaxy, ...) の組み合わせで質量分布を表現
- パラメタを最適化

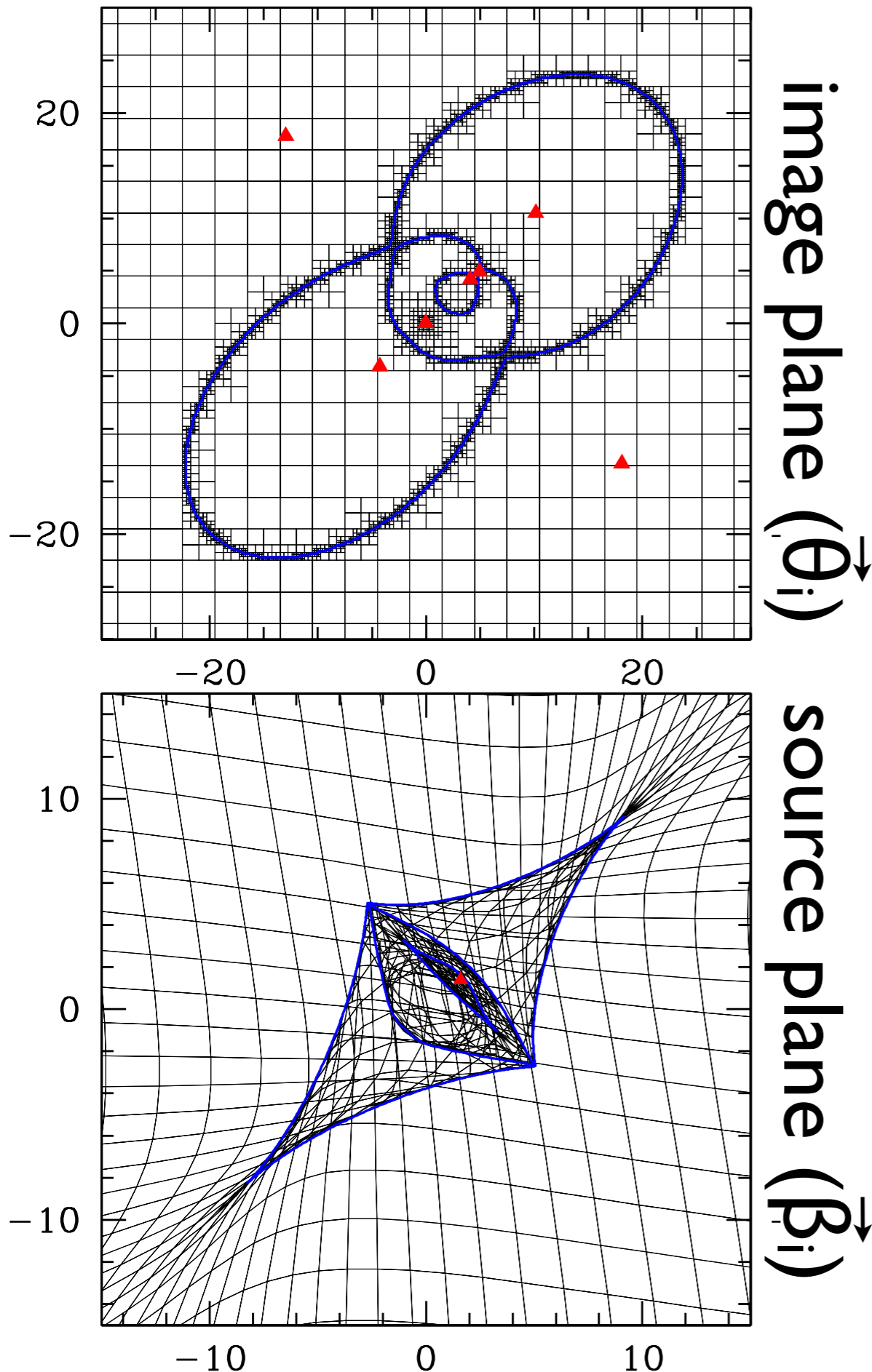
“non-parametric”

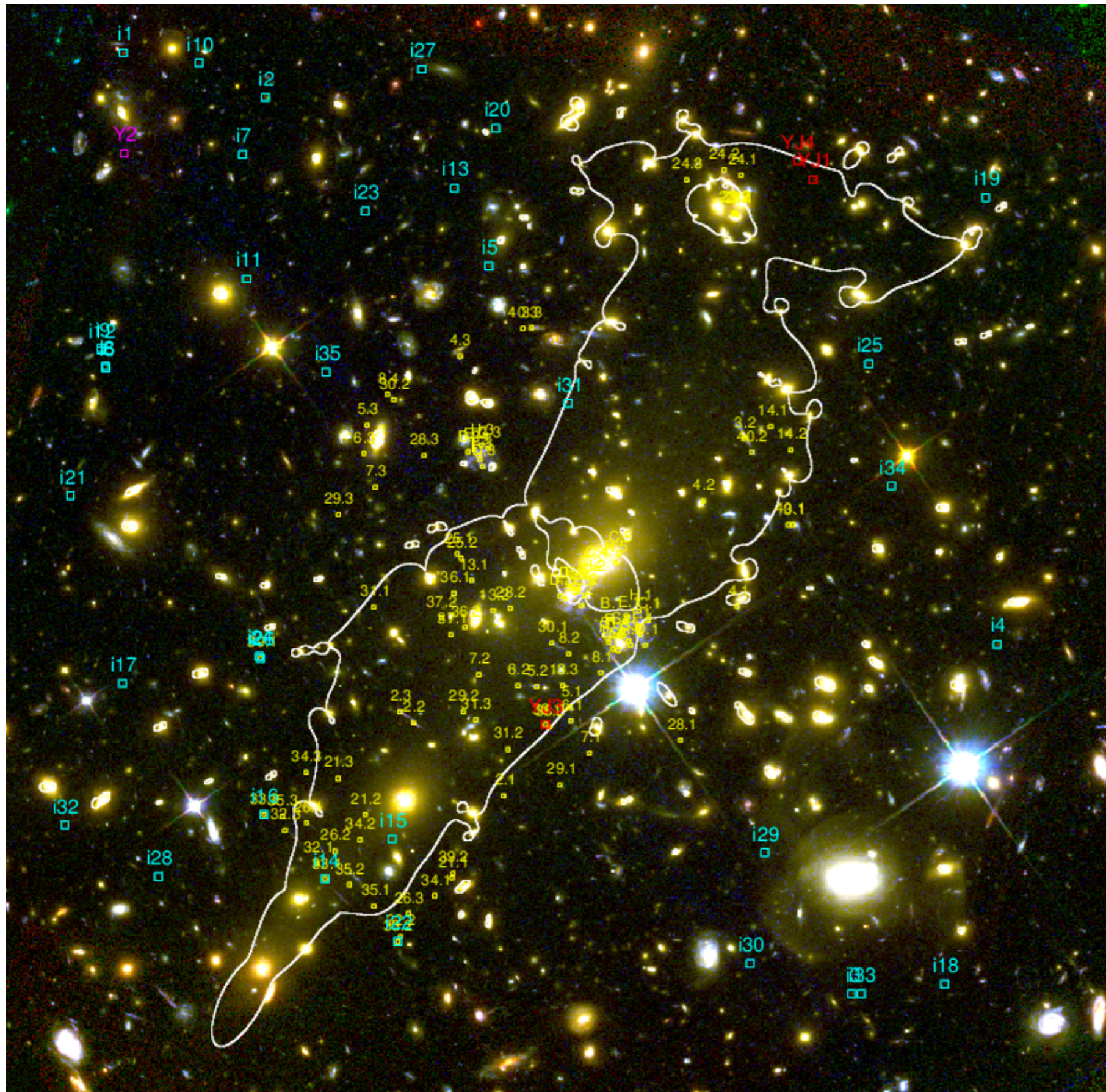


- 質量面密度をグリッドで表し質量分布を表現 (自由度高い)
- 観測を再現するように各グリッドの値を決定

glafic

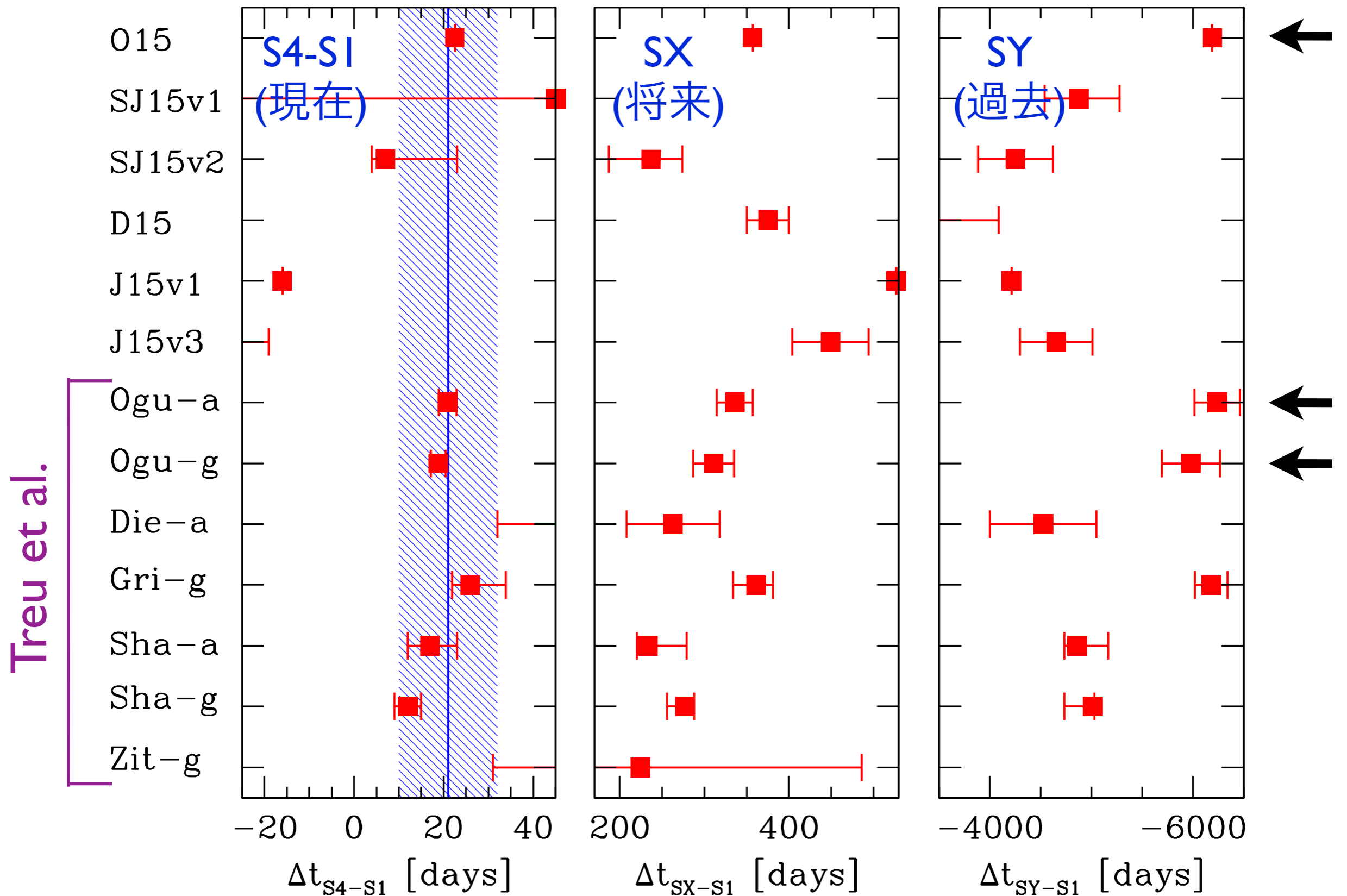
- 重力レンズ解析のための公開ソフトウェア (“parametric” mass modeling)
- 適合格子を用いた効率的なレンズ方程式解き
- 質量モデリングのための様々な機能 (e.g. MCMC)
- 興味/質問のある人は私まで





- glaficを用いたモデリング
- 100個以上の複数像を再現するように質量分布決定 (~200 constraints, ~100 parameters)
- 複数像の位置を $\text{rms} \sim 0.4''$ と良く再現

予言された時間の遅れ



重力レンズ超新星SN Refsdal

- 複数像が観測され時間の遅れが測定された初めての重力レンズ超新星
- 近い将来の像の出現が予言されている
(銀河系外天文学で研究者人生より短い時間スケールのモデル予言がなされそれが実際に検証される稀有な例)
- 観測との比較 (blind test!) で銀河団重力レンズの理解が深まると期待される