

重力レンズ天文学の進展

大栗 真宗

東京大学大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター

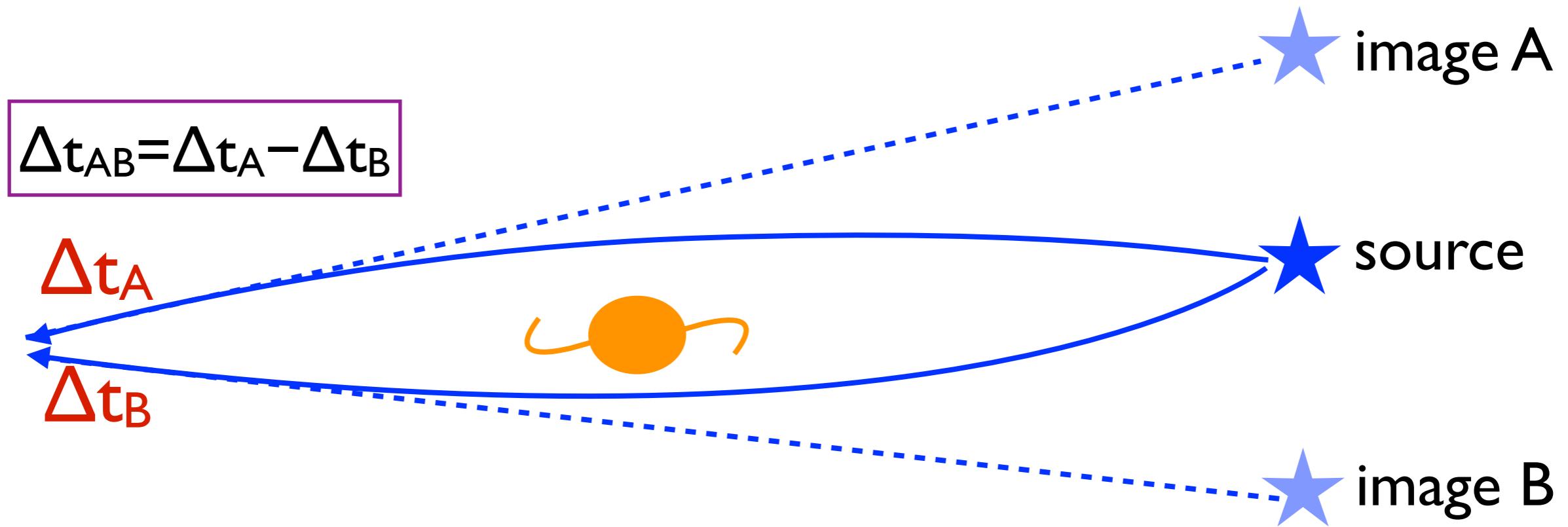
今回の話

- 受賞対象となった研究はいくつありますが、
その中の**新種の時間変動重力レンズの発見**について紹介します



時間の遅れ

- 複数像の到達時刻の遅れにより、絶対距離
(ハッブル定数 H_0) の測定が可能 (Refsdal 1964)
- クエーサー重力レンズをもちいた H_0 測定は
” H_0 tension”もあり最近特に注目





S. Refsdal, 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!

超新星重力レンズはなぜ面白い？

- Ia型の場合には増光率の直接測定が可能
→ **H₀-質量分布縮退を破る** (MO & Kawano 2003)
- 複数像の出現時期予測 (MO, Suto & Turner 2003)
- 既知の光度曲線による時間の遅れ精密測定
- 超新星母銀河を使った質量モデル改善





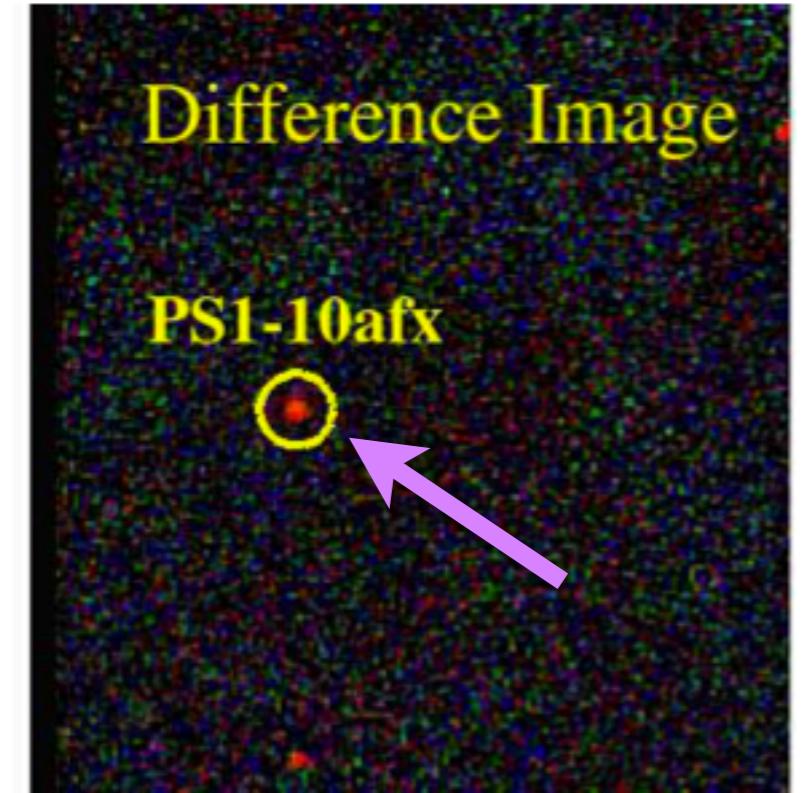
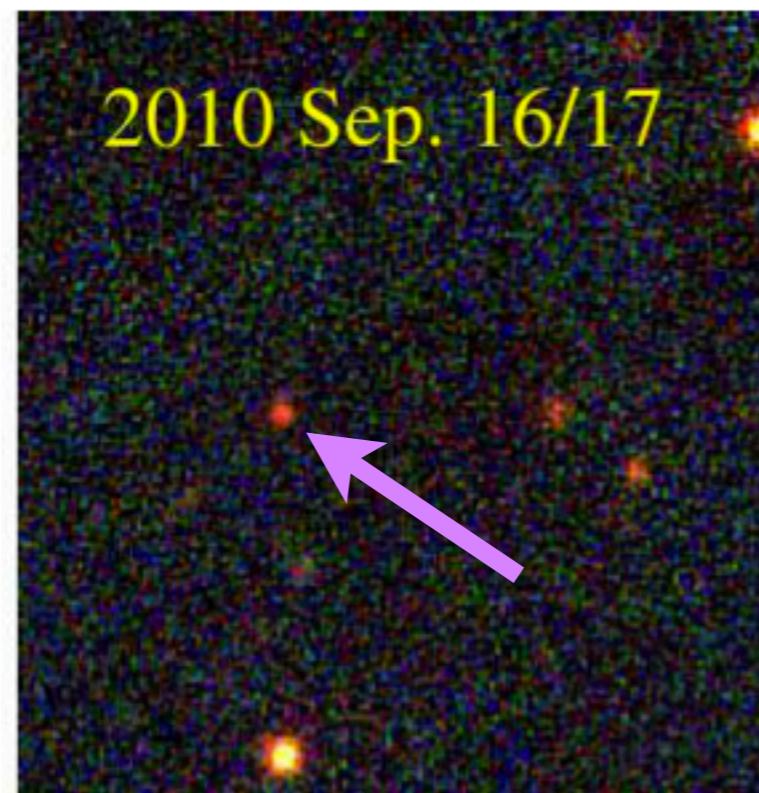
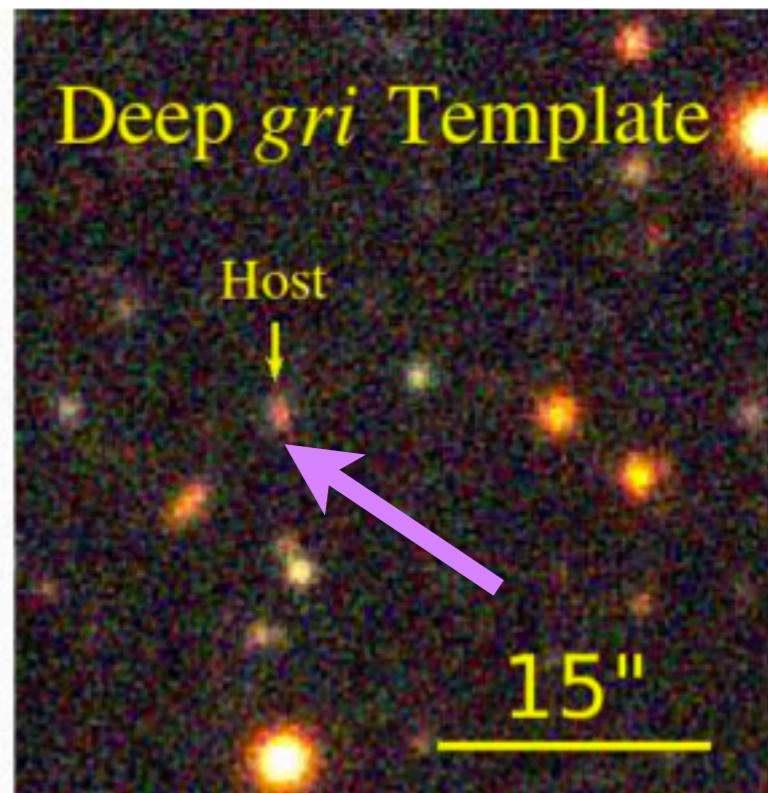
超新星重力レンズの理論予測

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%)	
PS1/3π	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**で初発見？
- **LSST**では多数 (>100) 発見できる

超新星 PS1-10afx の発見

- 非常に明るく赤い特異な超新星 ($z=1.388$) が2010年8月31日に発見される
- Pan-STARRSチームは新種の**超高輝度超新星**と結論



Chornock+2013

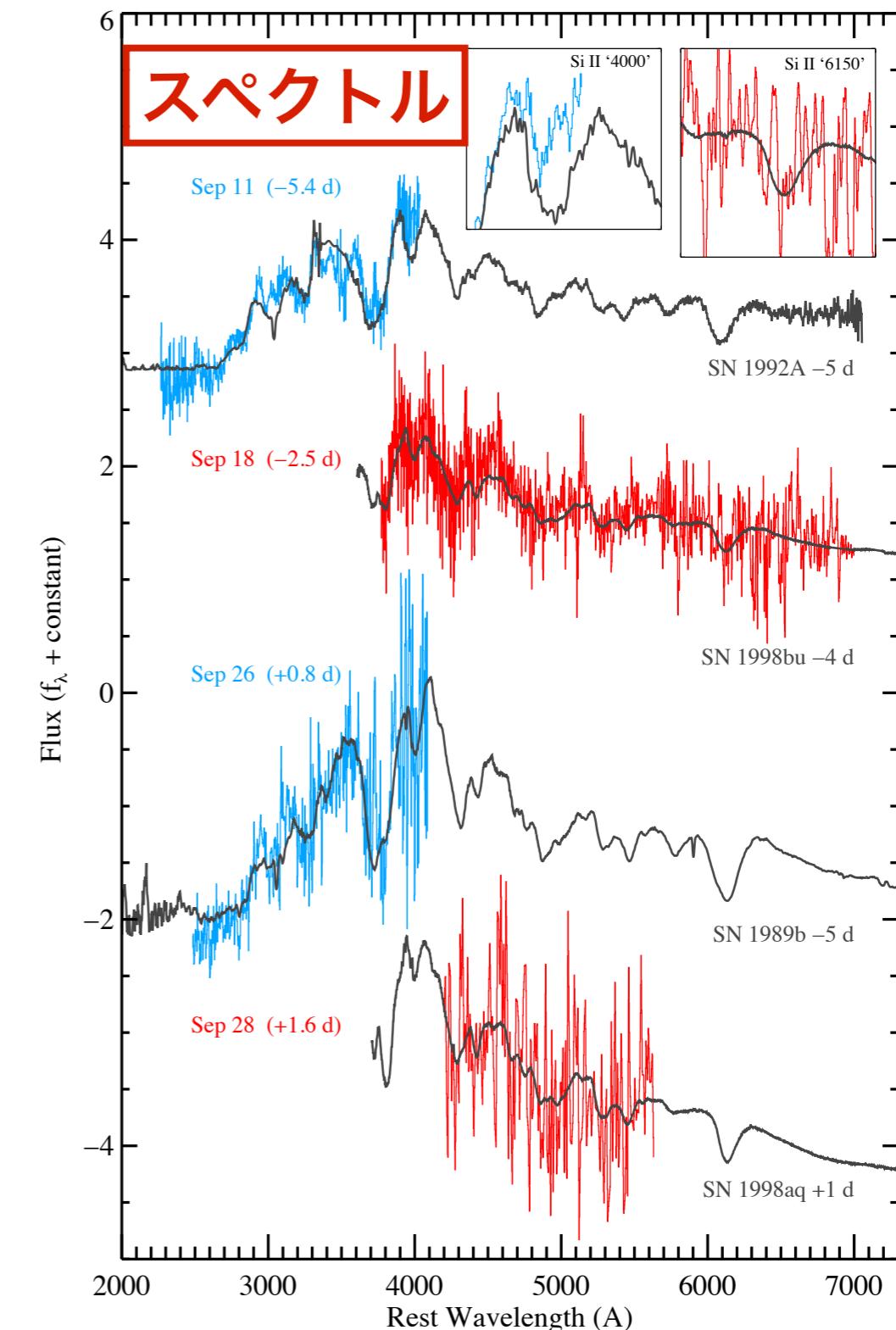
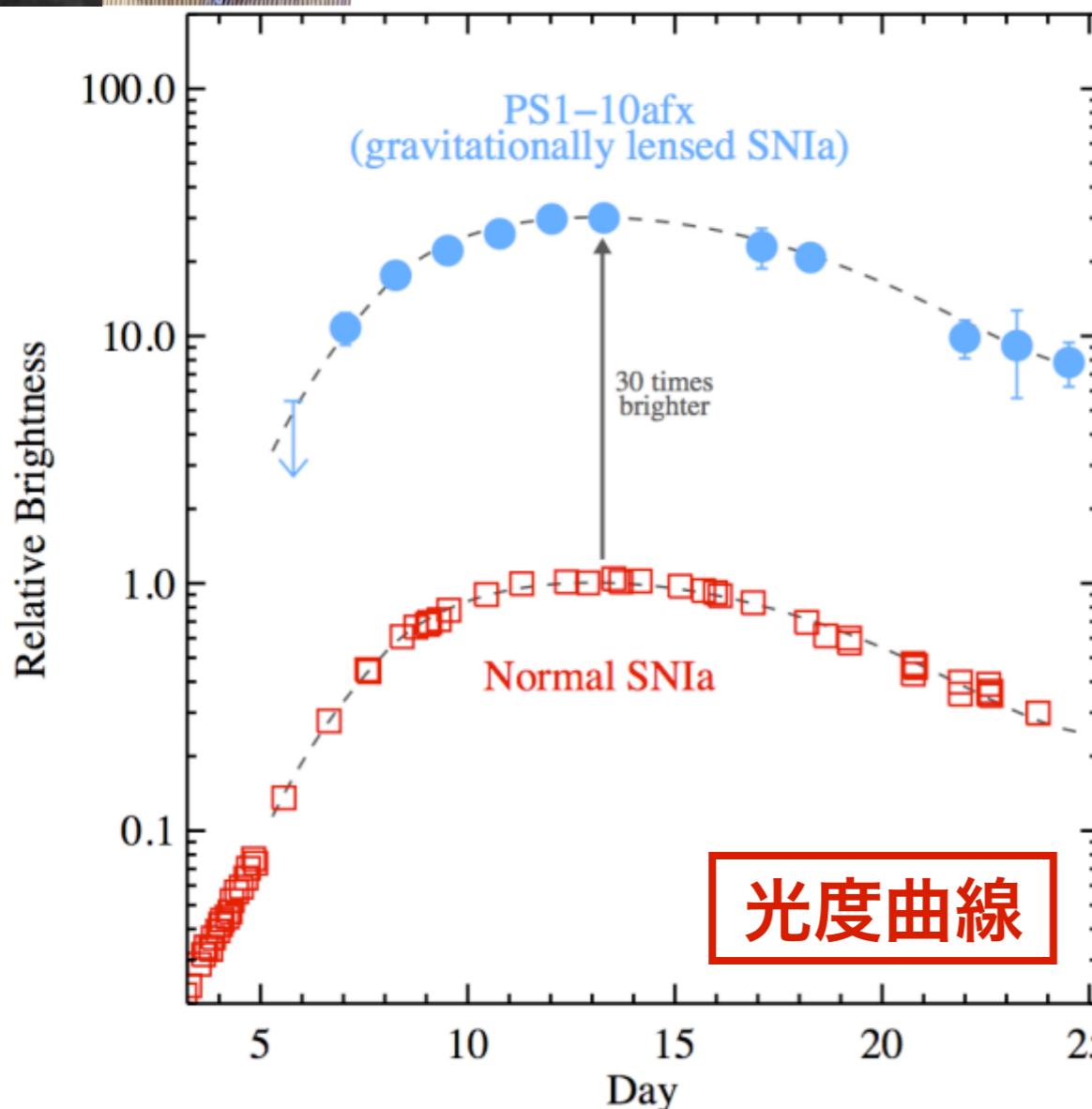
PSI-10afx 発見論文が出た後...



- 超高輝度超新星の専門家であるIPMU ポストドク(当時)の Robert Quimby が興味を持ちデータを自分でチェック
- データを見ると PSI-10afx はどうも **Ia型超新星**に似ているようだ...
- IPMUでの議論を元に **新しいシナリオ**を提唱



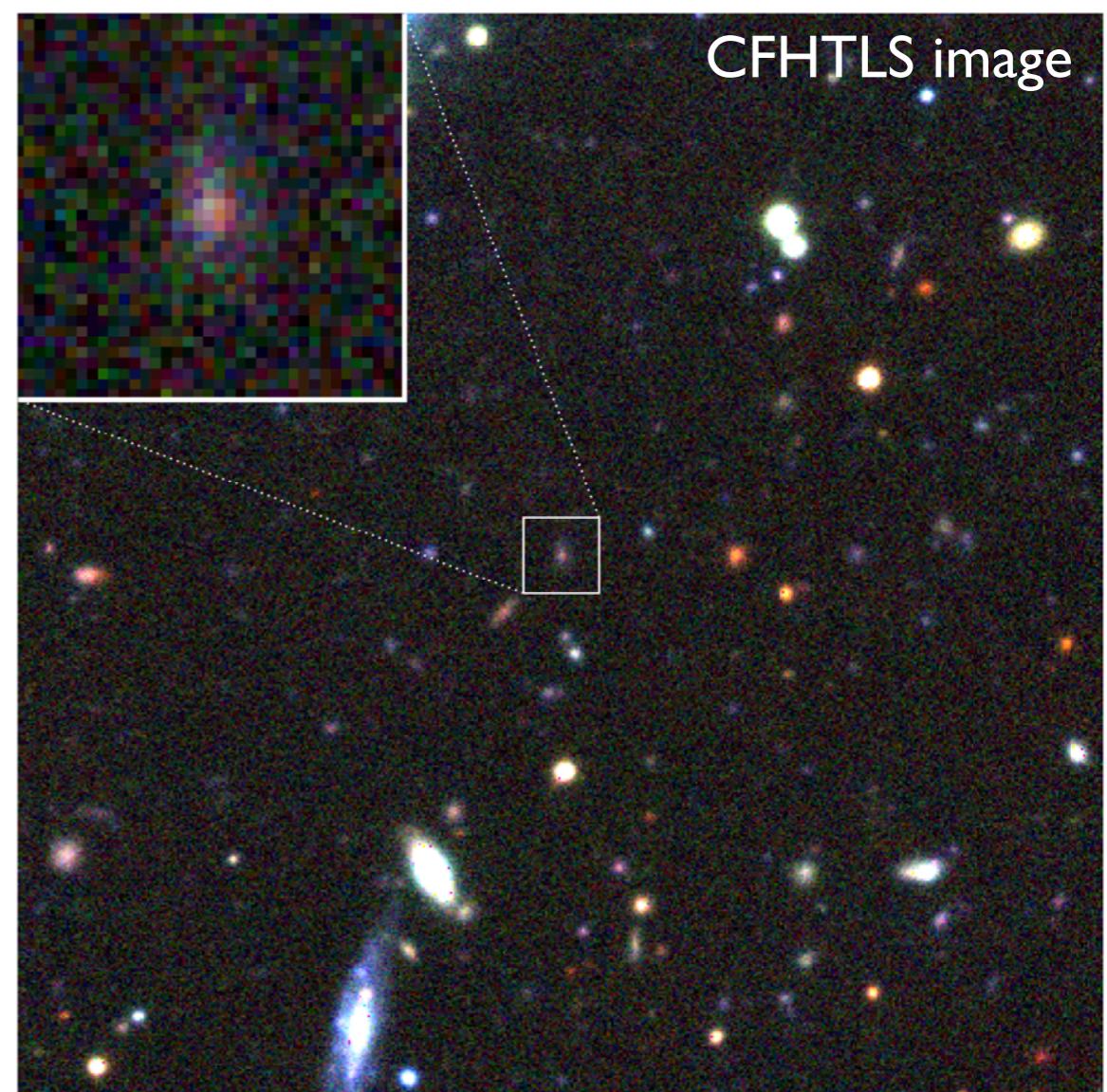
PS1-10afx のIa型解釈



- 普通のIa型超新星が重力レンズで**約30倍に増光**されていれば説明可能

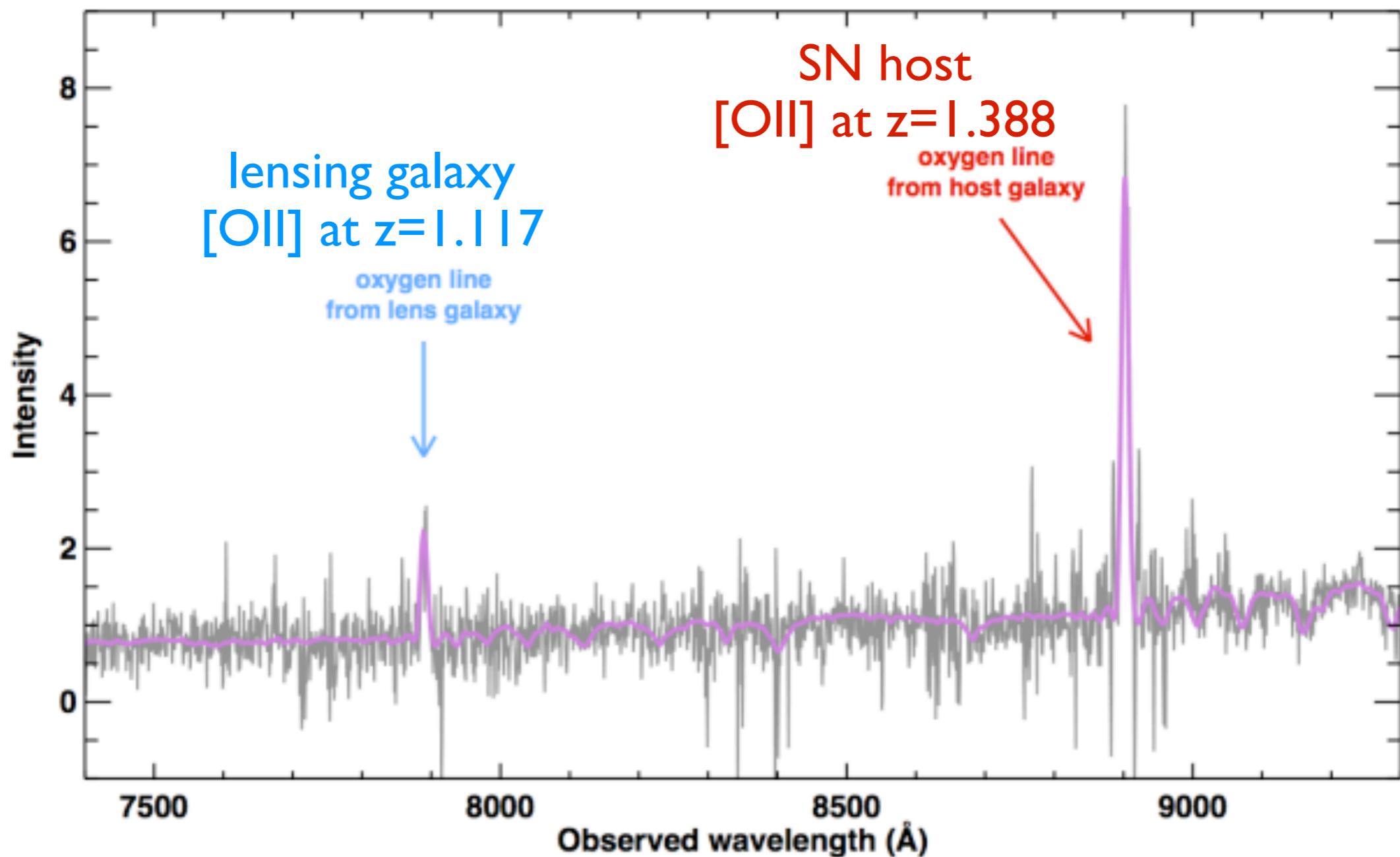
批判：レンズ銀河は何处？

- 超新星爆発前の画像を見ても銀河は一つだけ
- 我々はこの銀河が実は**超新星母銀河と手前のレンズ銀河が重なった**ものとの仮説を立てた
- 2013年9月7日のケック望遠鏡の6.5時間の分光観測でこの仮説を検証



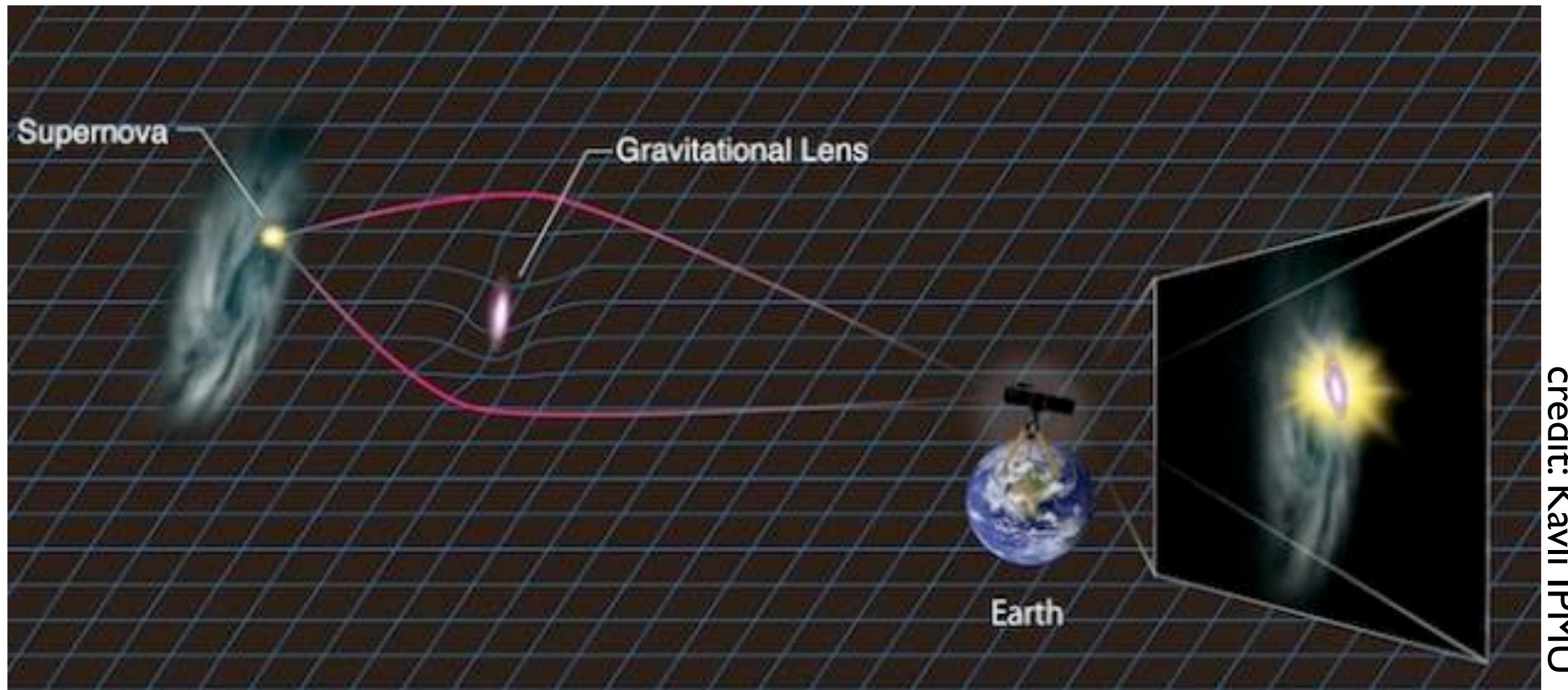


レンズ銀河の検出



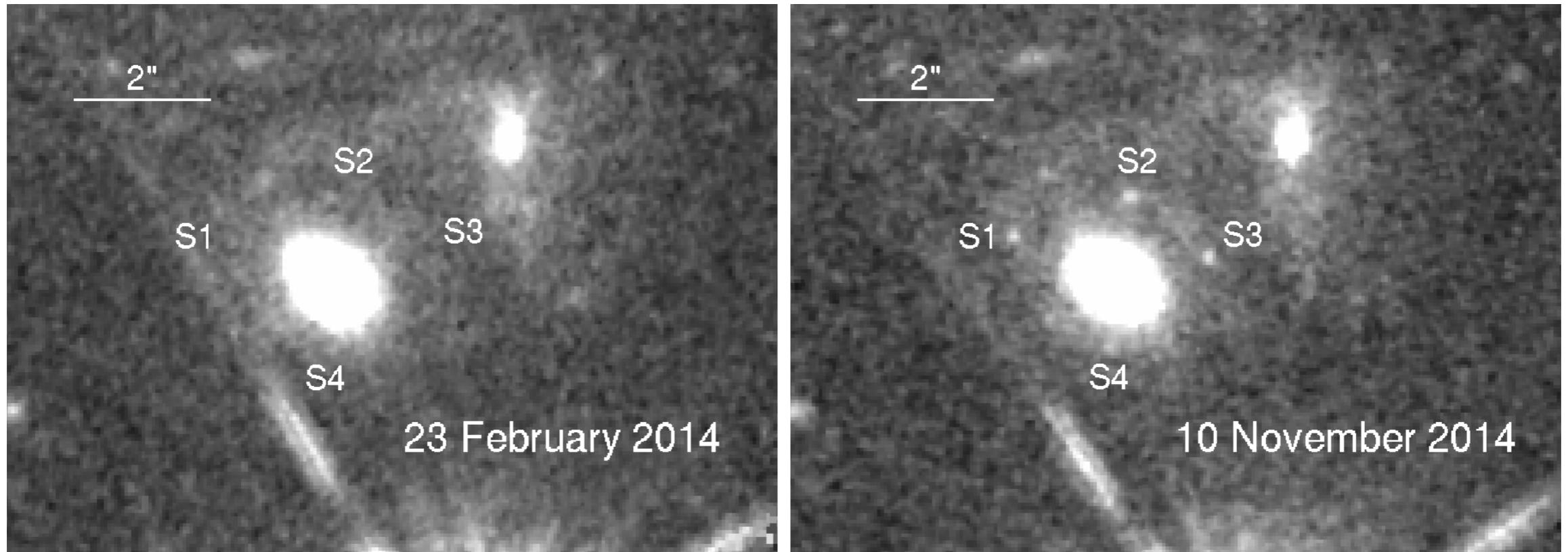
- 手前の銀河を検出し**重力レンズ**であることを証明！

重力レンズ超新星の初発見



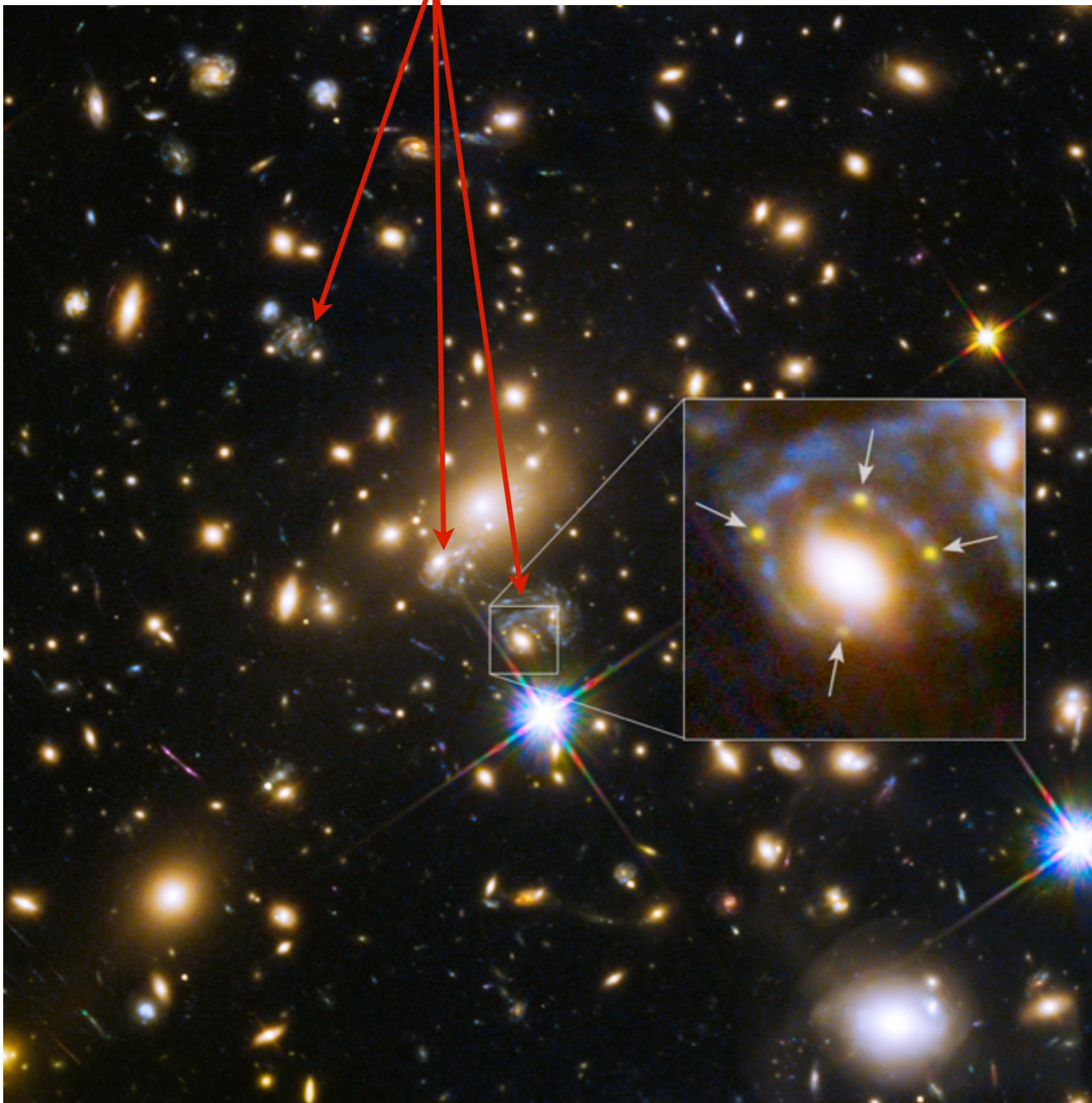
- PS1-10afxは超新星の強い重力レンズの初発見
- ただし、複数像を分離できたわけではないので間接的な発見である

SN Refsdal の発見

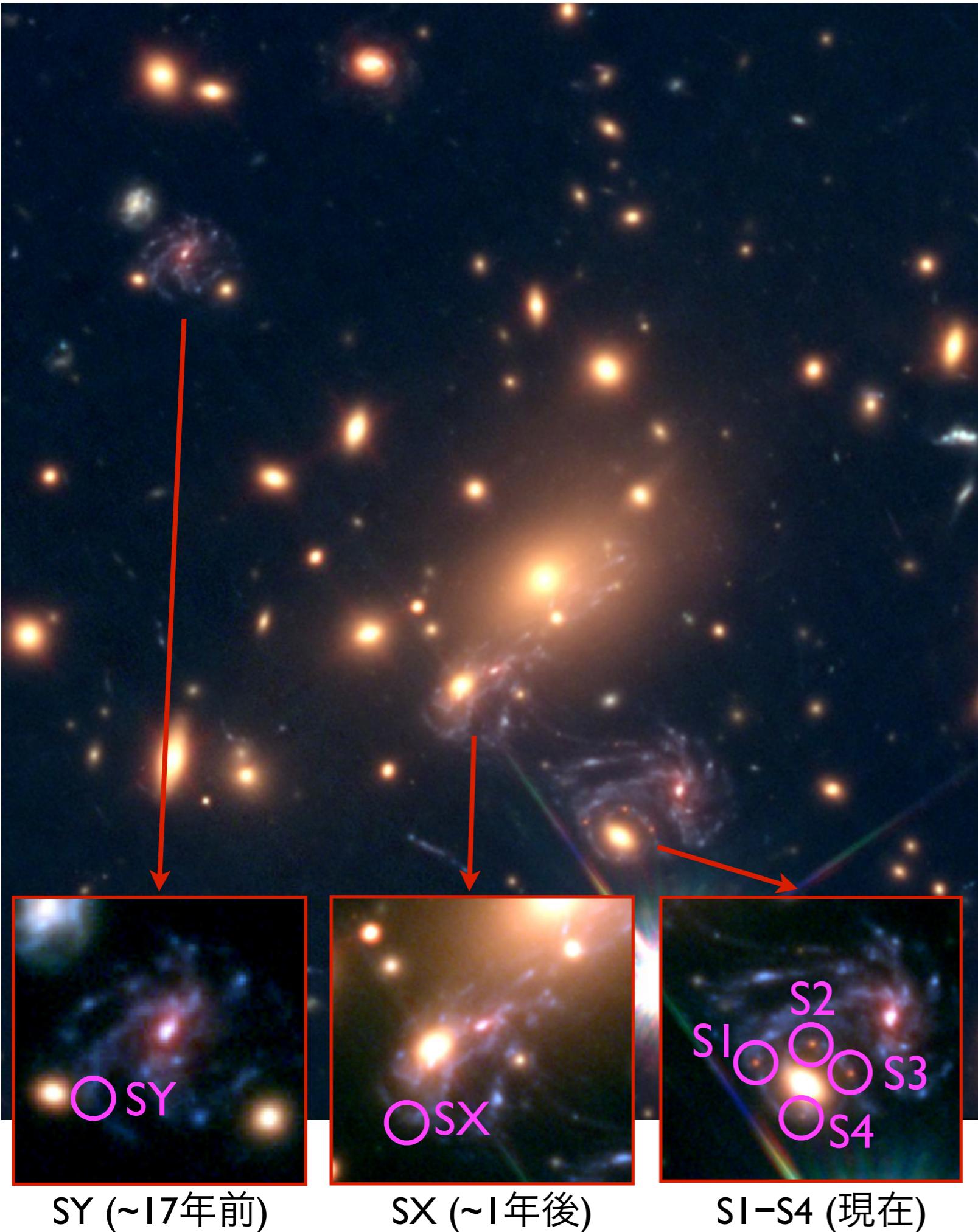


- 楕円銀河の周りに4つの超新星像 ($z=1.49$)
→ 初の複数像が分離された超新星重力レンズ

超新星母銀河



- レンズ銀河は銀河団 MACS J1149 ($z=0.54$) のメンバ銀河
- 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！
(falsifiable!)**

時間の遅れの予言 (競争?)

2014年11月23日 Kelly et al. arXiv:1411.6009 (発見論文)

時間の遅れの予言 (競争?)

2014年11月23日 Kelly et al. arXiv:1411.6009 (発見論文)

2014年11月24日 Oguri arXiv:1411.6443

SXは**360日後**に出現

時間の遅れの予言 (競争?)

2014年11月23日 Kelly et al. arXiv:1411.6009 (発見論文)

2014年11月24日 Oguri arXiv:1411.6443

SXは360日後に出現

2014年11月25日 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v1

SXは1330日後に出現

時間の遅れの予言(競争?)

2014年11月23日 Kelly et al. arXiv:1411.6009 (発見論文)

2014年11月24日 Oguri arXiv:1411.6443

SXは**360日後**に出現

2014年11月25日 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v1

SXは**1330日後**に出現

2015年02月03日 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v2

SXは**240日後**に出現

時間の遅れの予言(競争?)

2014年11月23日 Kelly et al. arXiv:1411.6009 (発見論文)

2014年11月24日 Oguri arXiv:1411.6443

SXは**360日後**に出現

2014年11月25日 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v1

SXは**1330日後**に出現

2015年02月03日 Sharon & Johnson arXiv:1411.6933v2

SXは**240日後**に出現

2015年04月22日 Diego et al. arXiv:1504.05953

SXは**380日後**に出現

2015年09月30日 Jauzac et al. arXiv:1509.08914v1

SXは**530日後**に出現

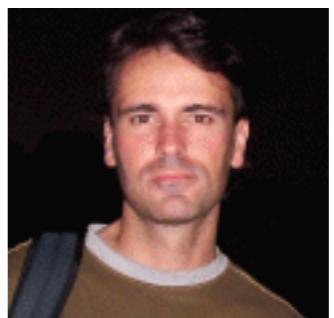
.....

質量モデルの違いに起因



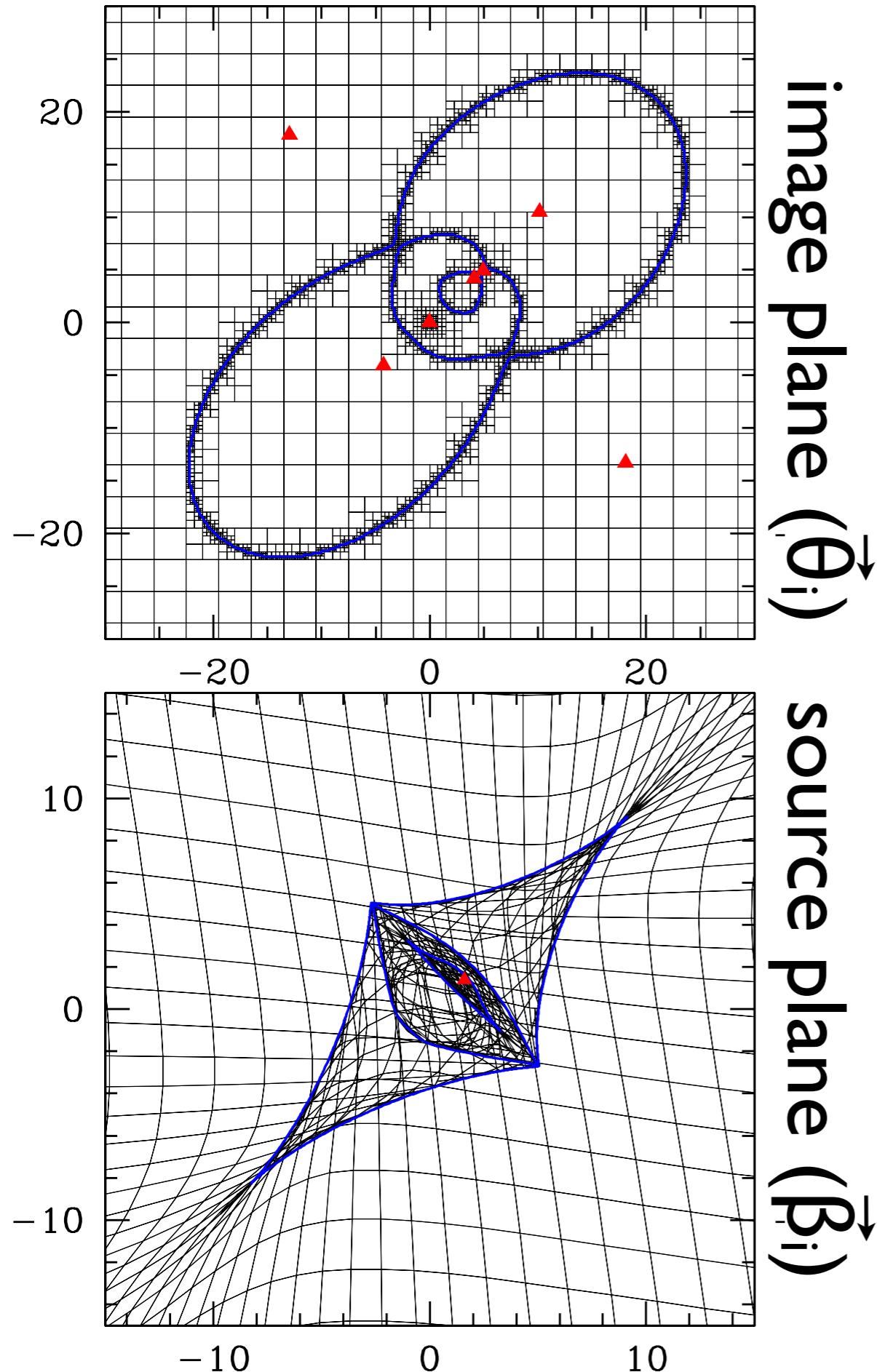
比較プロジェクト

- 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](#) (MO, Kawamata, Ishigaki)
 - [Lenstool](#) (Sharon, Johnson)
 - [LTM](#) (Zitrin)

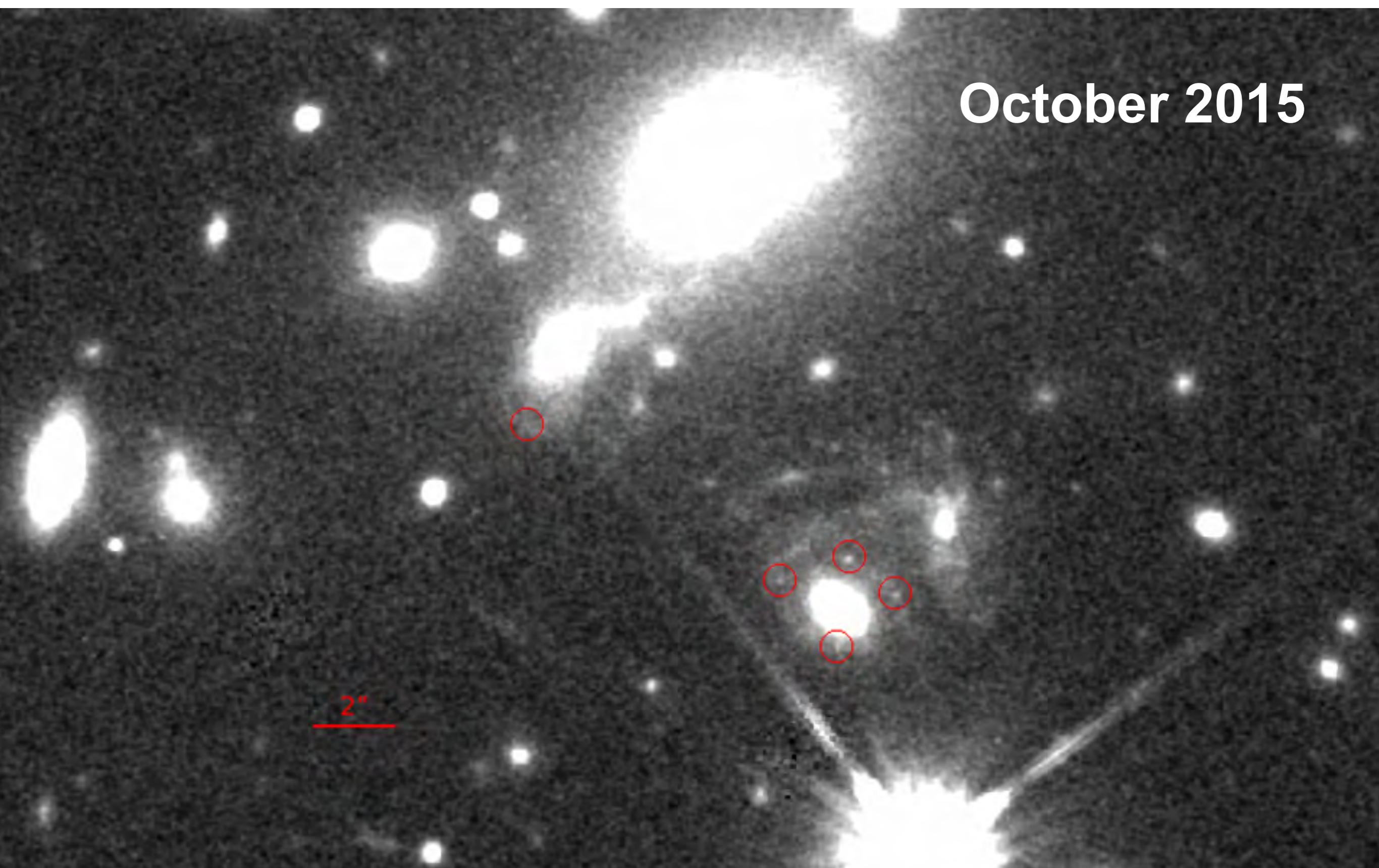


glafic

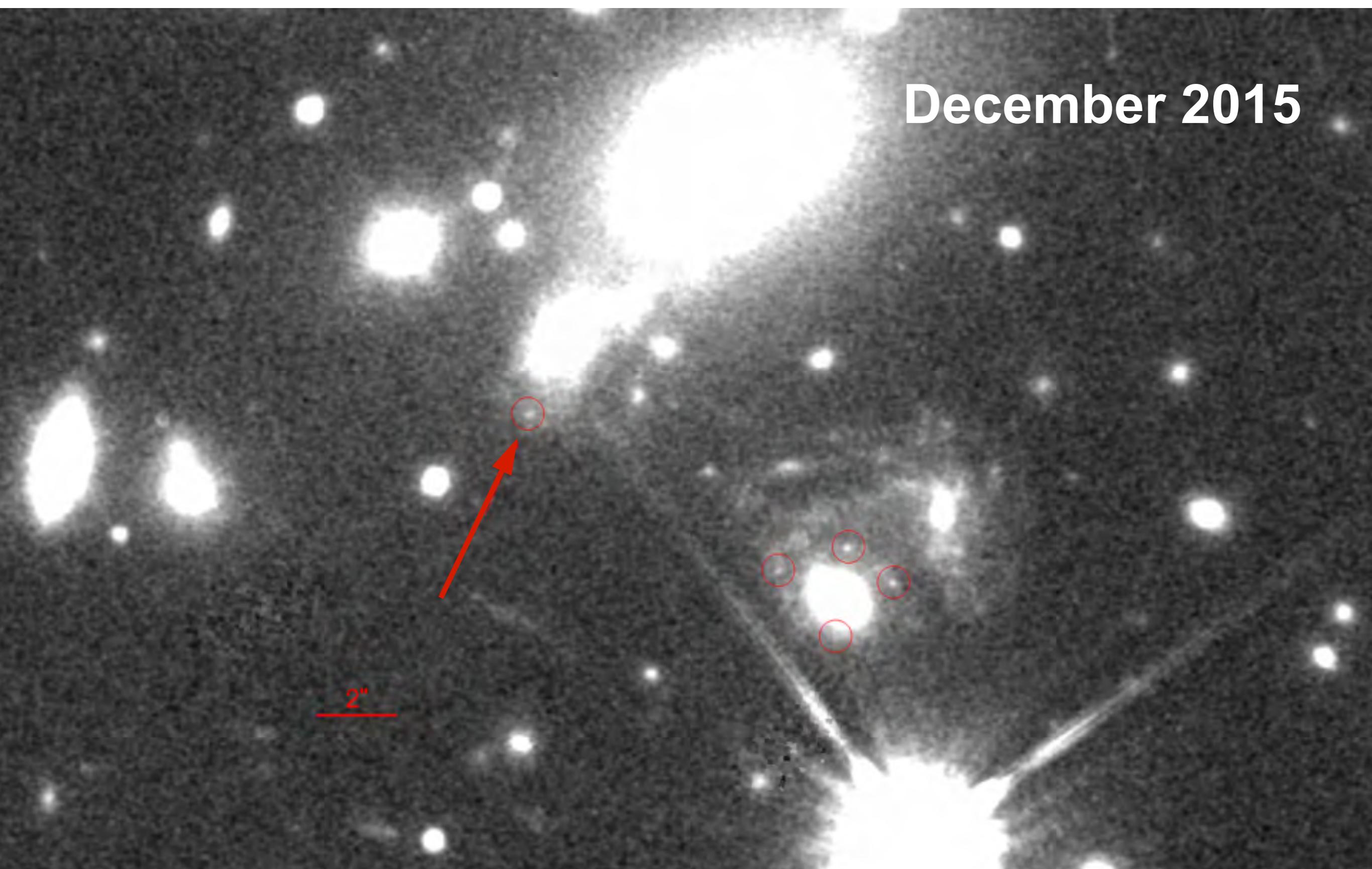
- 重力レンズ解析のための公開ソフトウェア
- 適合格子を用いた効率的なレンズ方程式解き
- 質量モデリングのための様々な機能 (e.g. MCMC)
- 興味/質問のある人は私まで

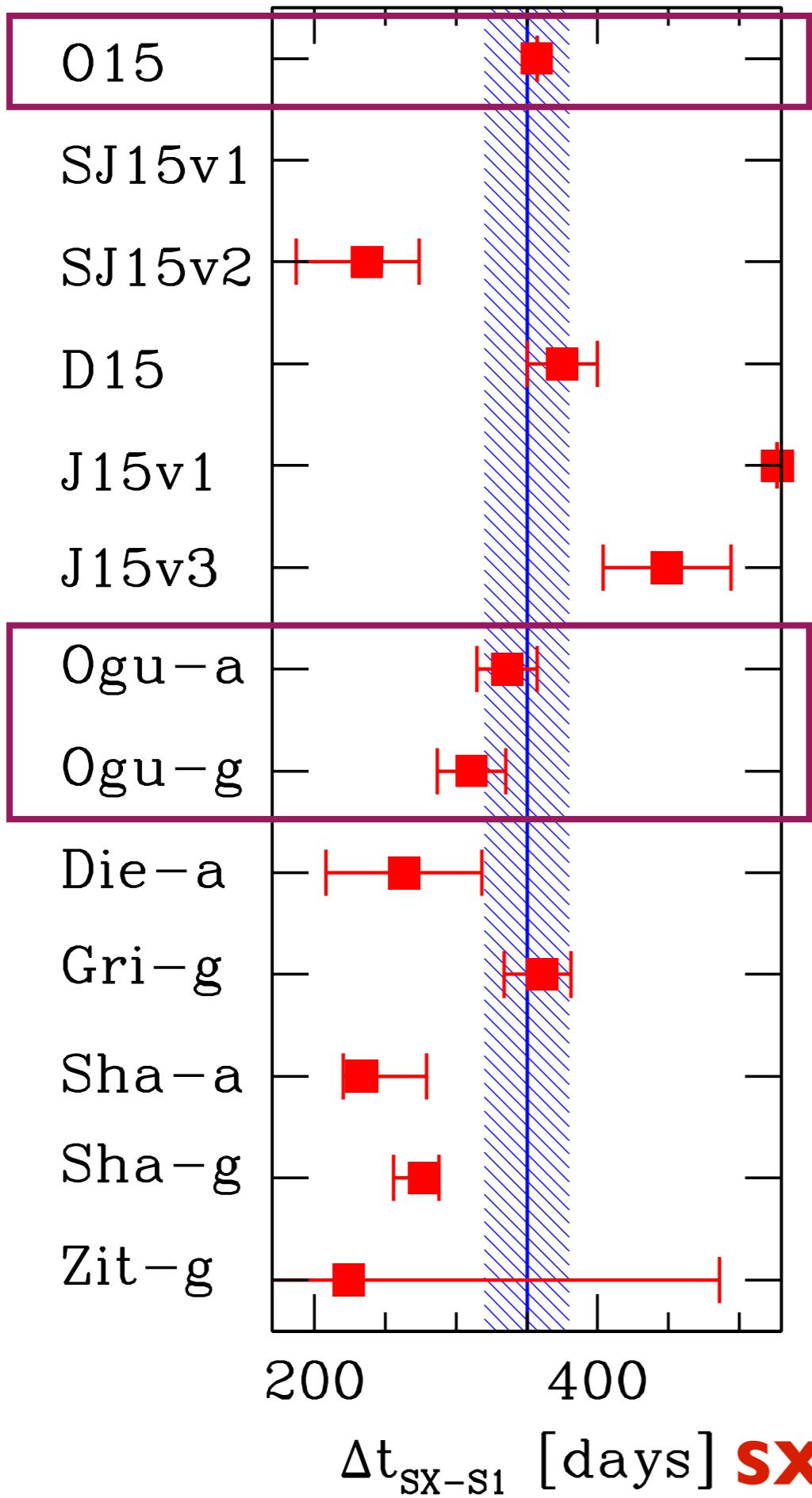


October 2015



December 2015

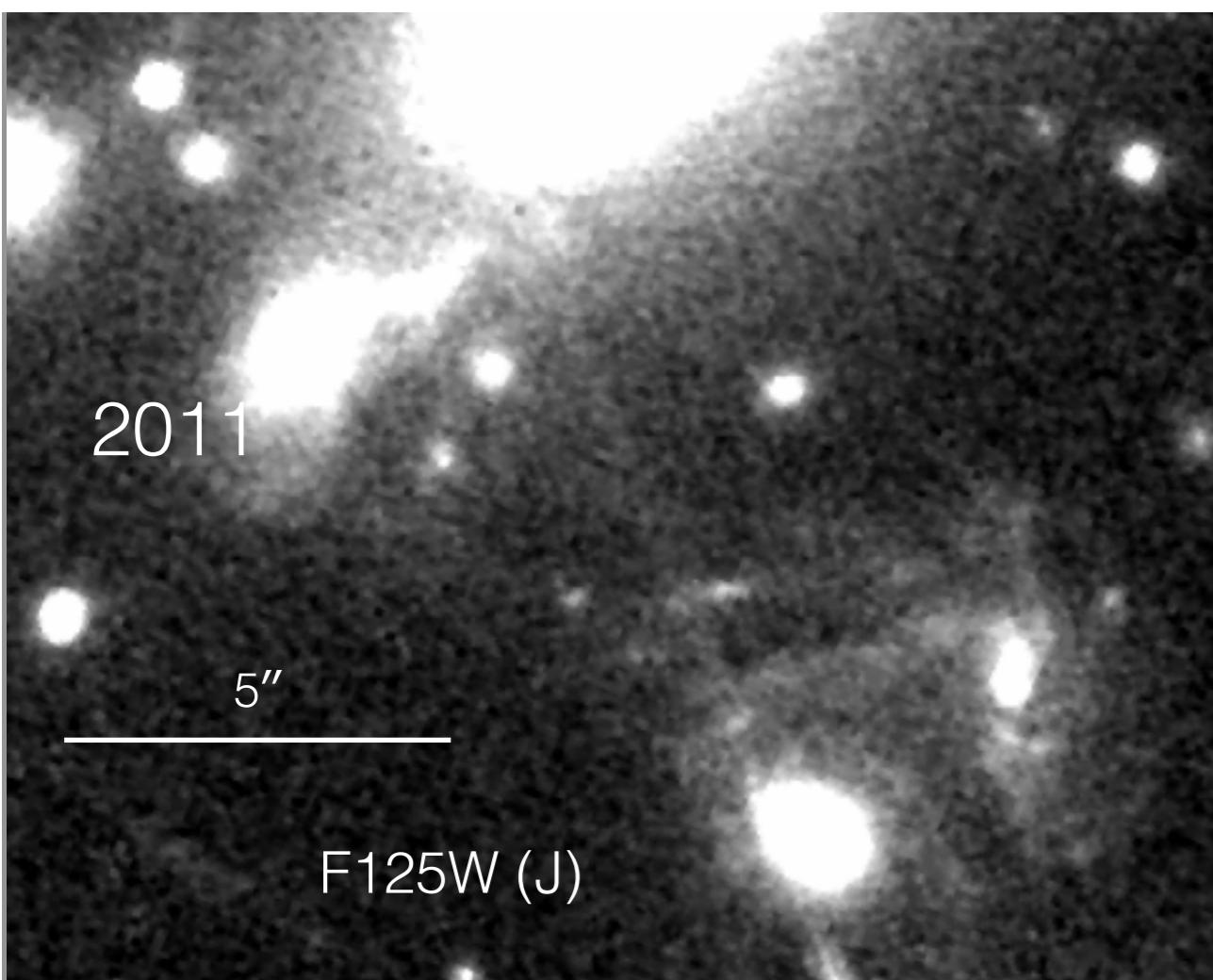




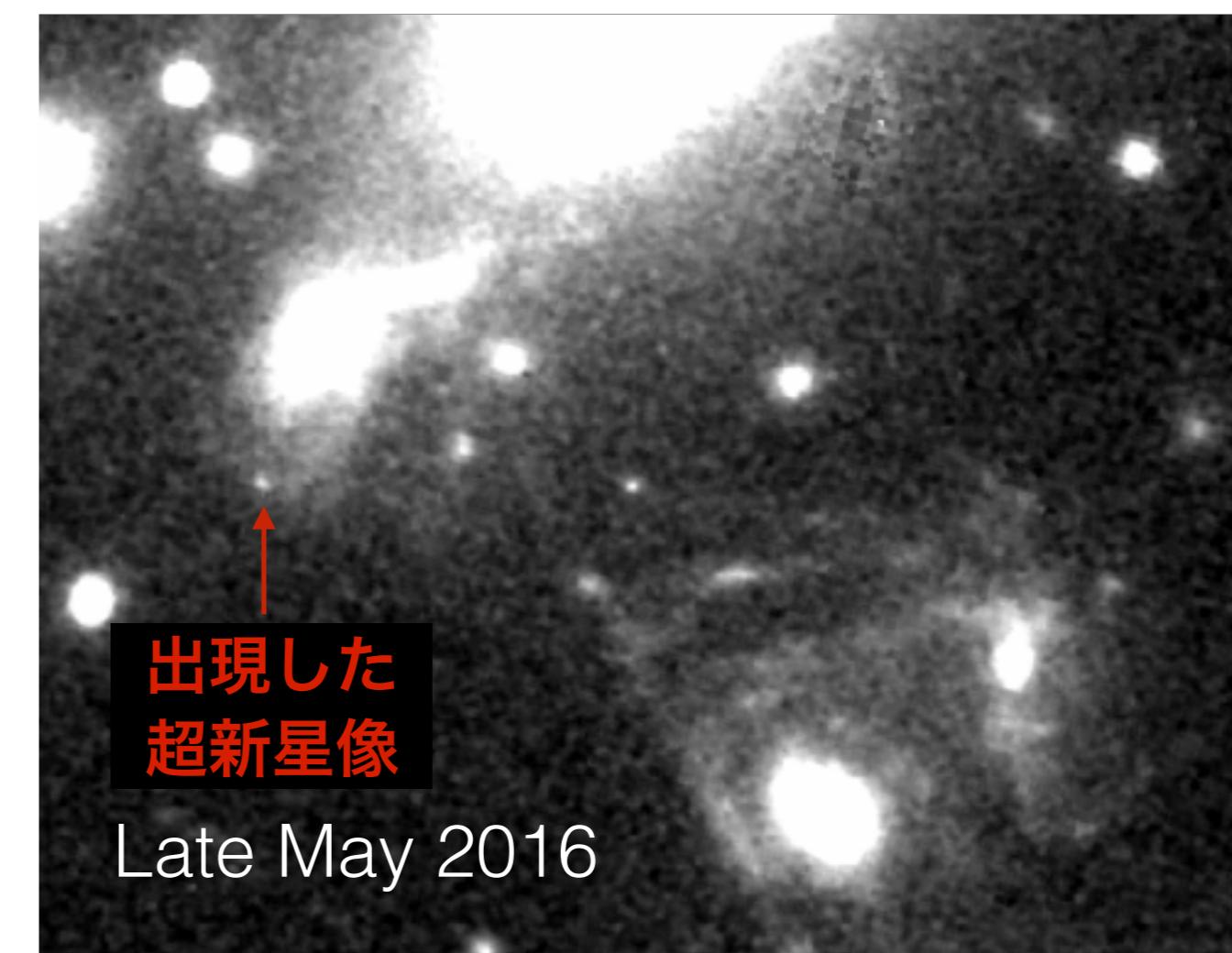
- 観測からSXの出現時期は
~350日後と判明 (Kelly+2016)
- 我々の予言とよく一致！
- 銀河団内のダークマター
分布の我々の理解が概ね
正しいことがわかった



謎の変動天体イカロスの発見



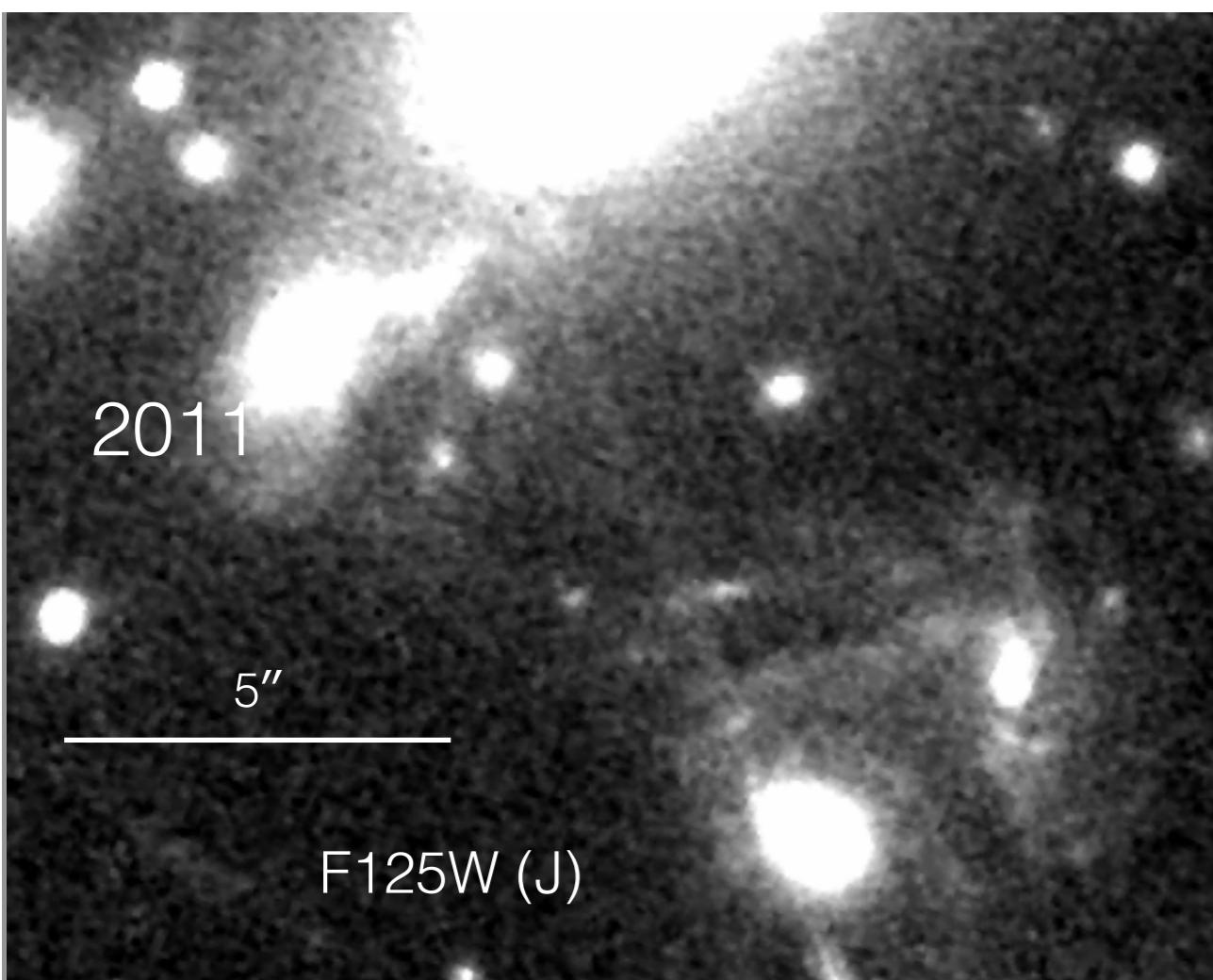
2011年のハッブル宇宙望遠鏡画像



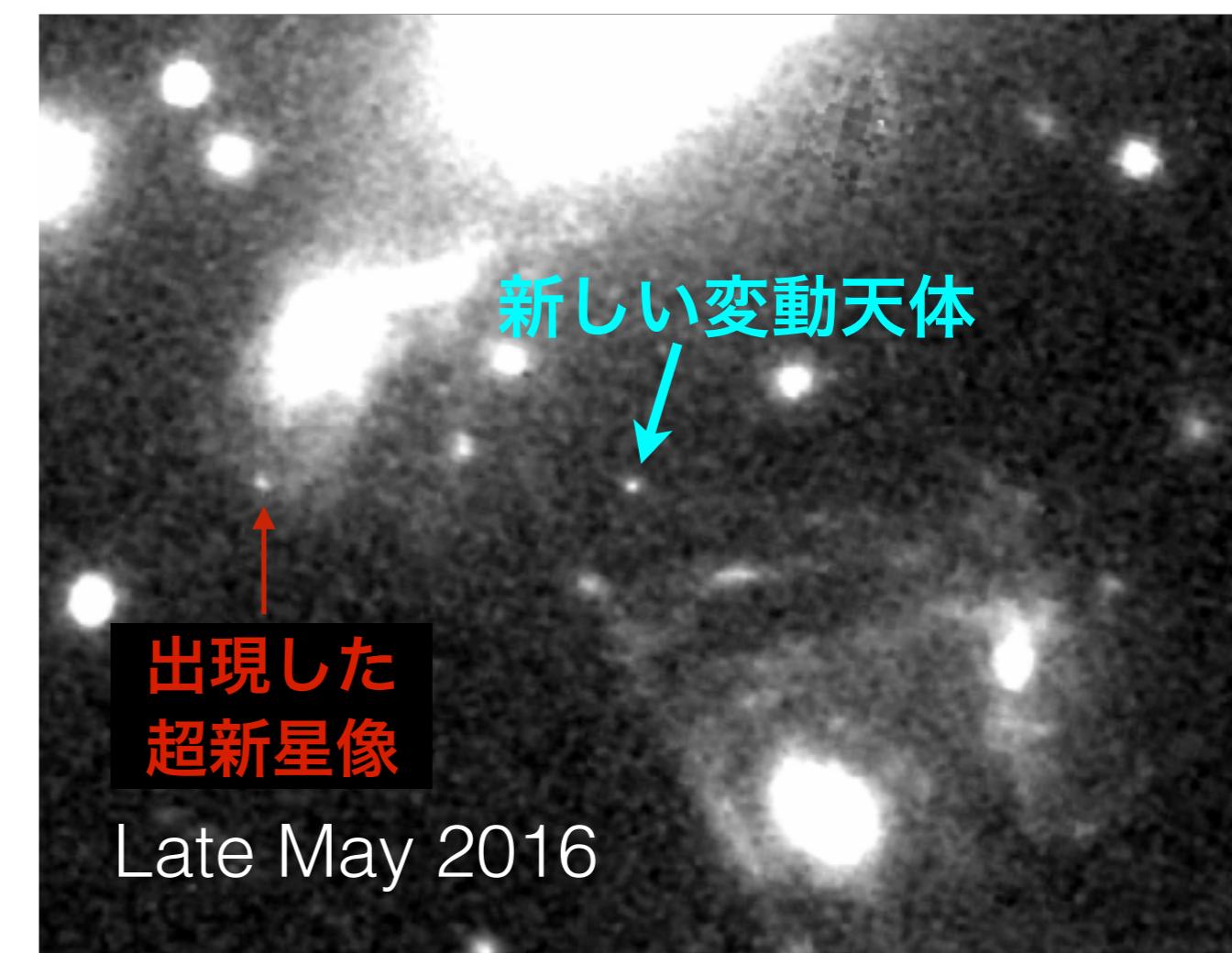
2016年のハッブル宇宙望遠鏡画像



謎の変動天体イカロスの発見

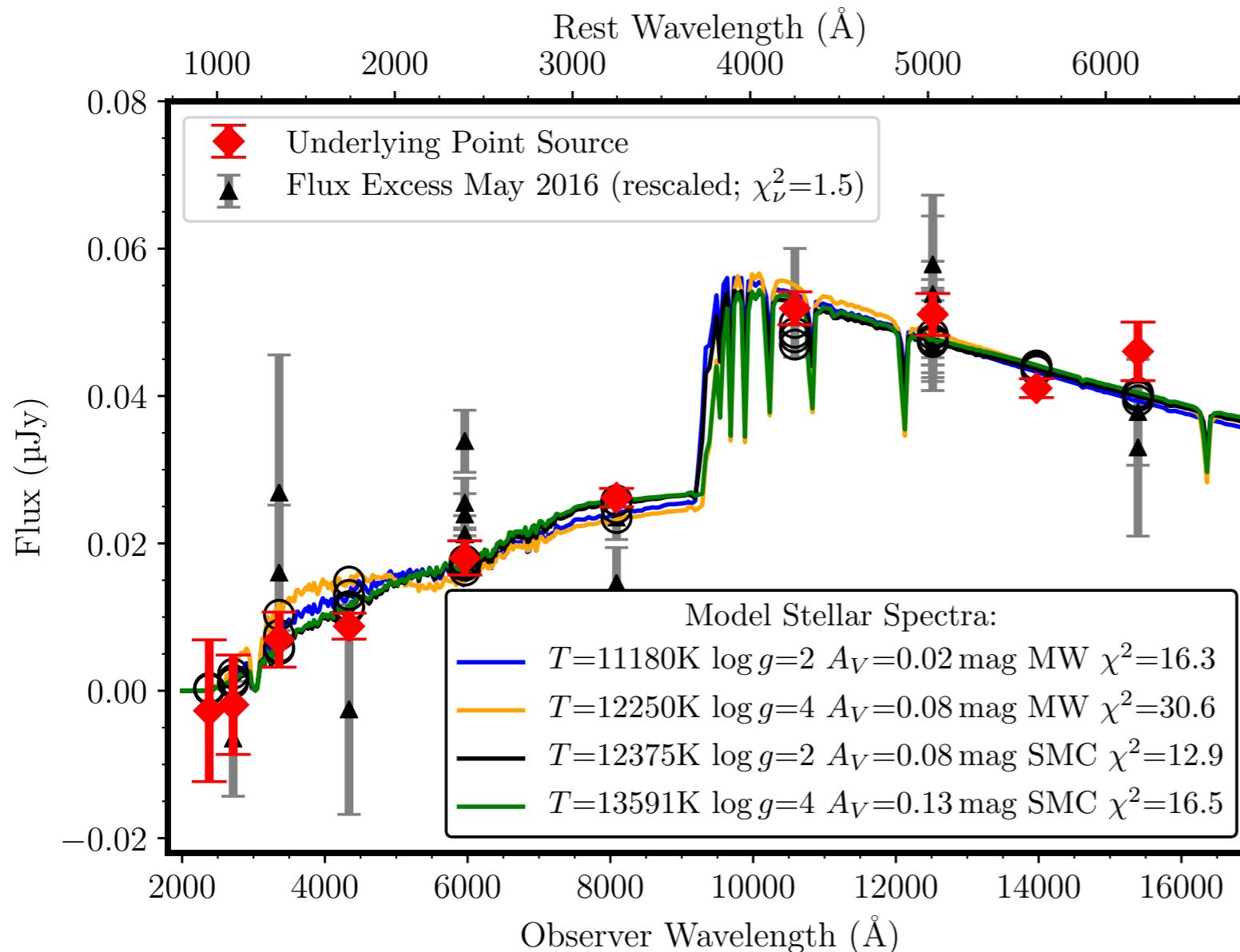


2011年のハッブル宇宙望遠鏡画像



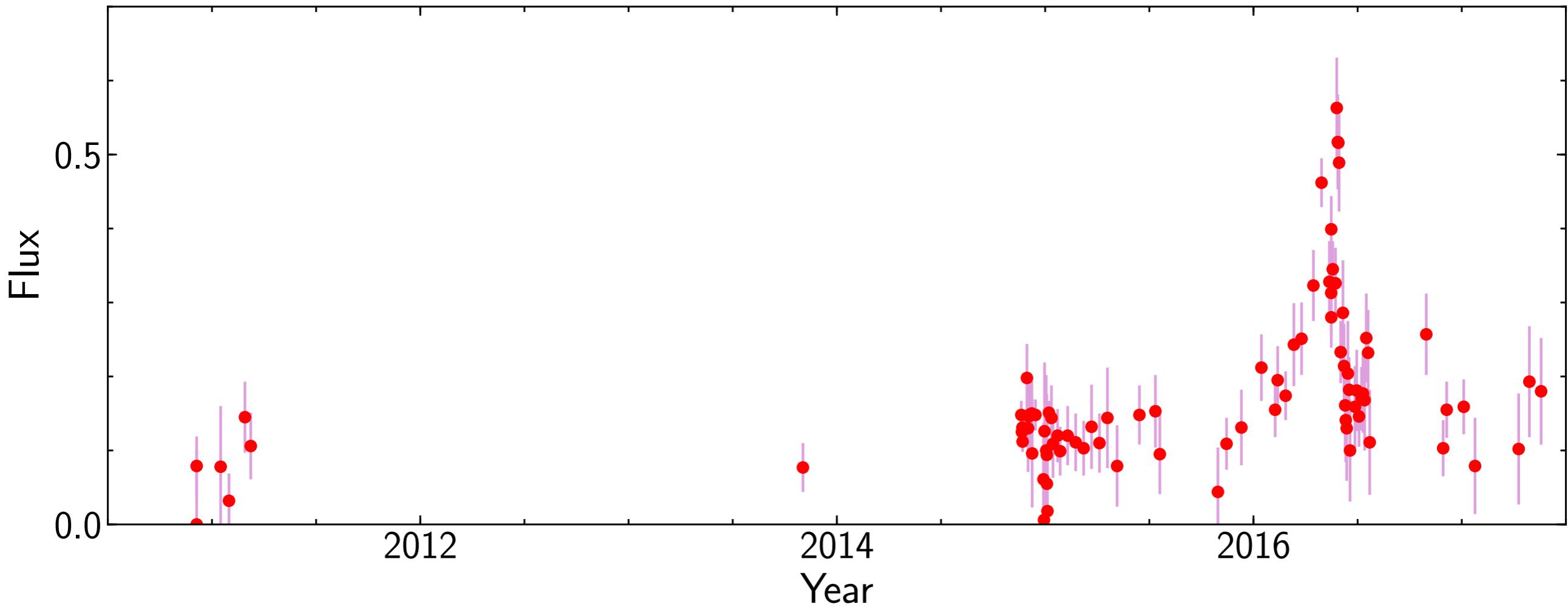
2016年のハッブル宇宙望遠鏡画像

スペクトル



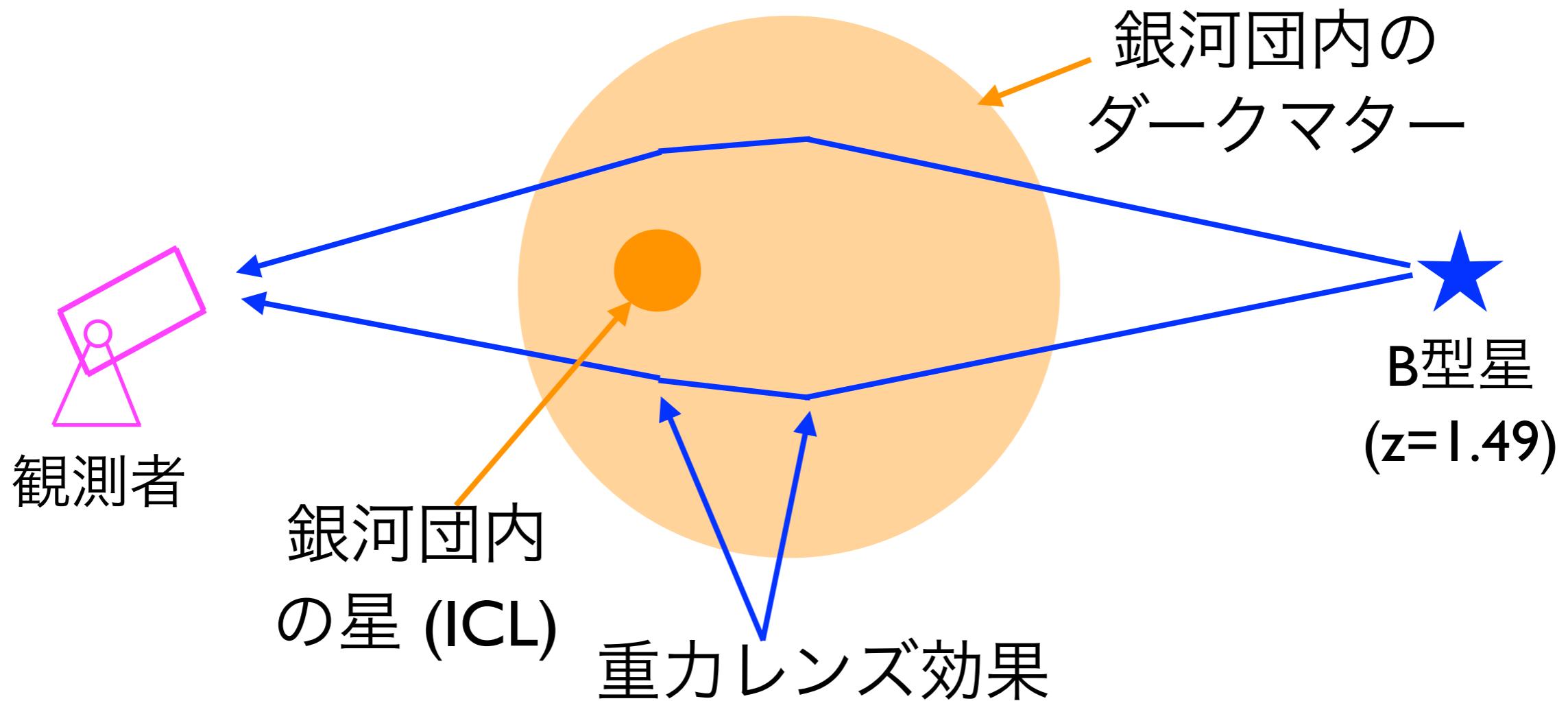
- $z=1.49$ のバルマ
不連続
- 超新星爆発とは
不一致
- **B型星とよく一致**

光度曲線



- 次第に明るくなり、その後急激に暗くなる
- 明るさのピーク付近で~10日くらいの急激な変化

解釈

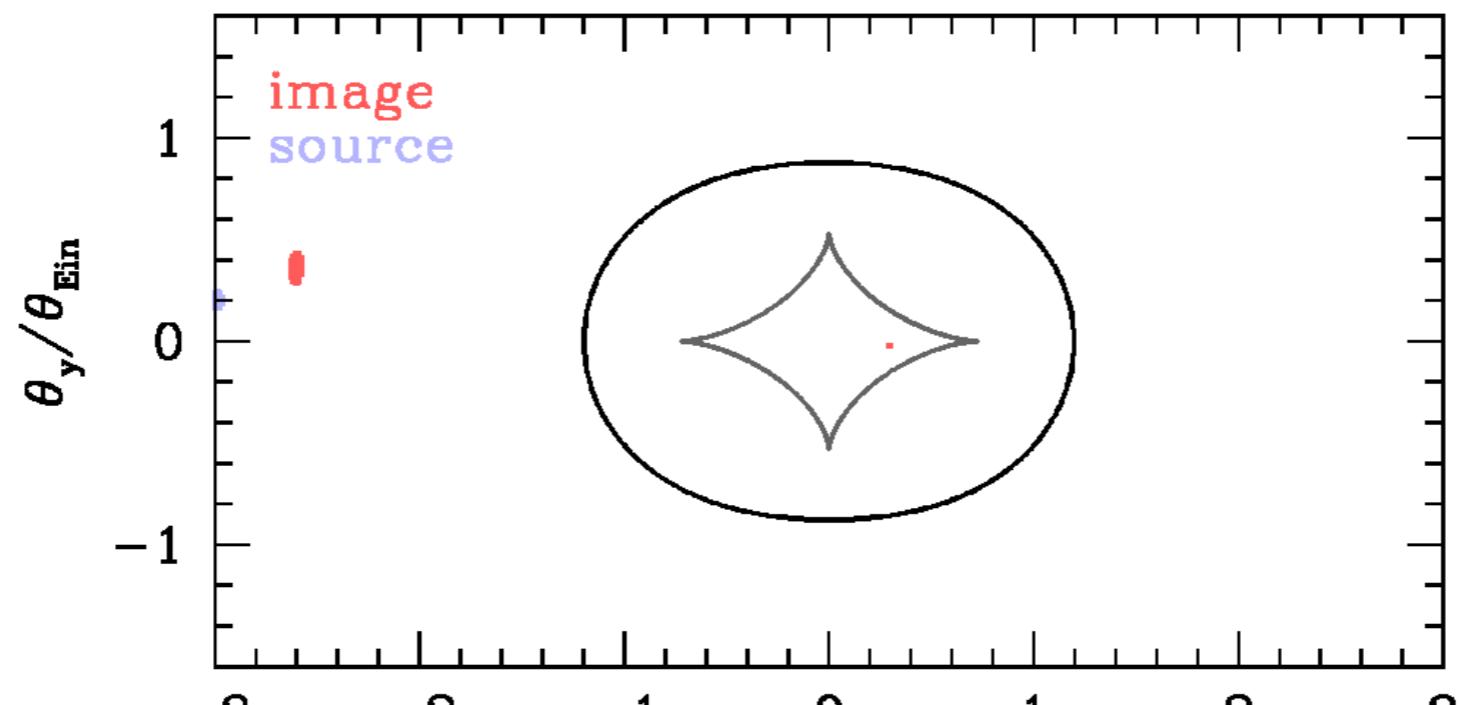


- 銀河団内のダークマターの重力レンズで増光してさらに銀河団内の星でも重力レンズ増光
- 焦線通過 (caustic crossing) による超高増光

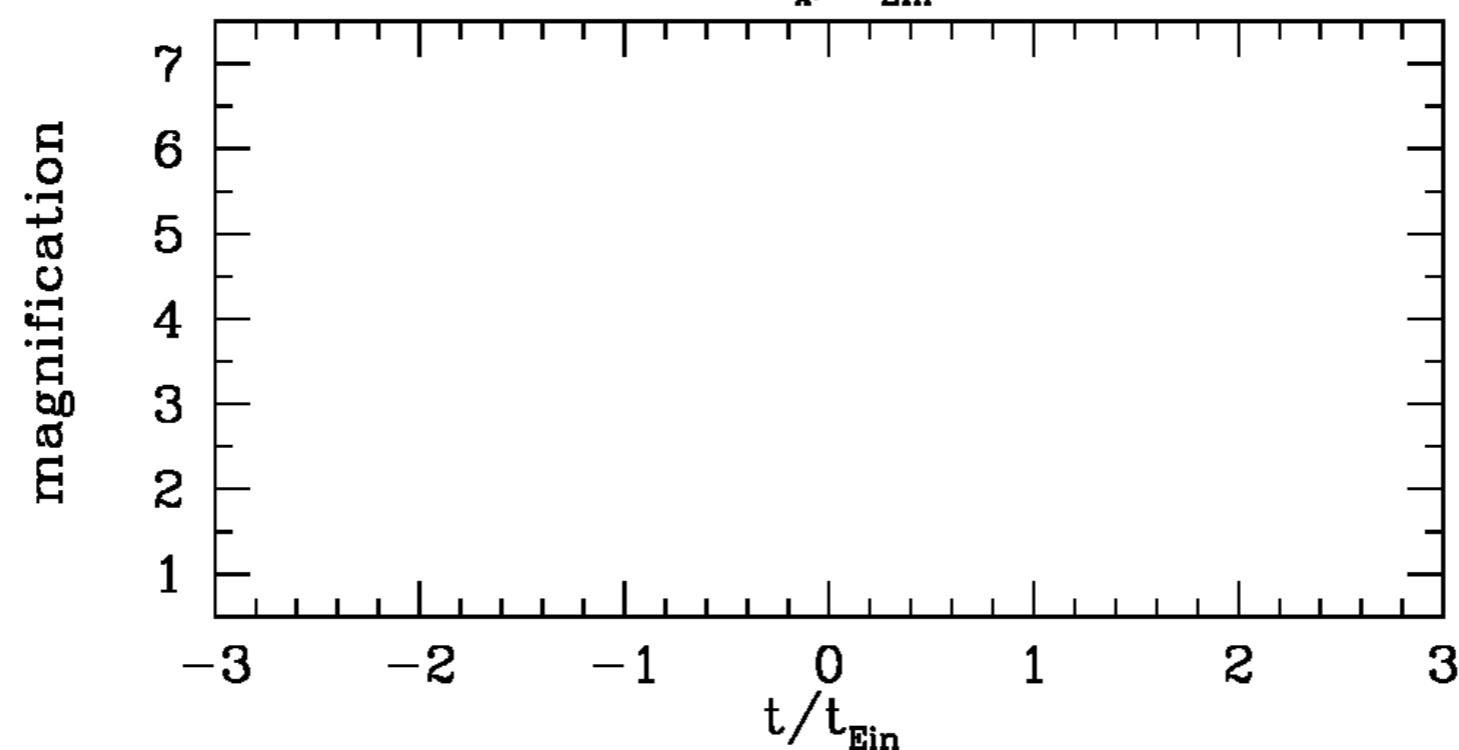
焦線通過 (caustic crossing)

image: 実際に
観測

source: 重力
レンズ効果が
なかった場合
に観測

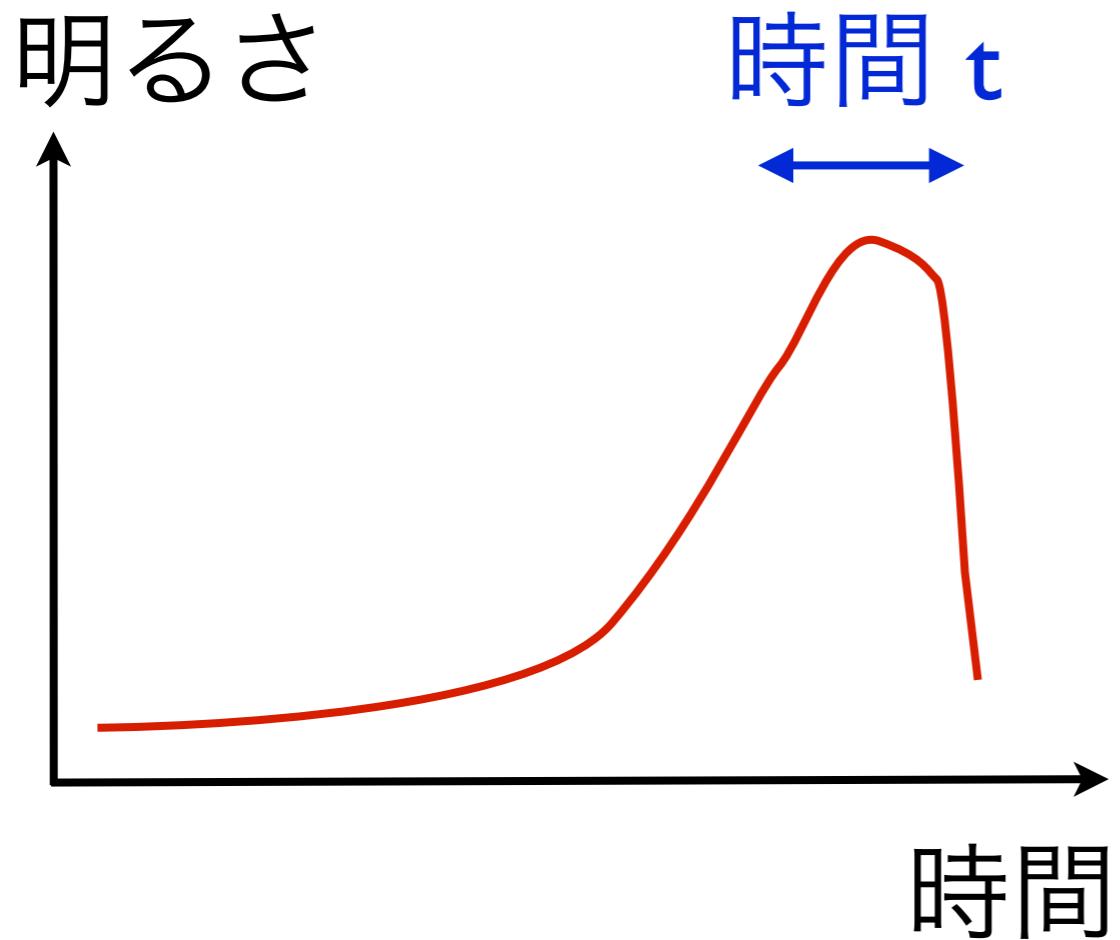


← 観測の分解能
が足りない
ため像の形状
は観測不可能



← 星の明るさの
時間変動で
重力レンズ
効果を観測

重力レンズされた遠方天体の大きさ



- ピーク付近の明るさの変化は増光される遠方天体の大きさで決まる

$$t \sim \frac{R}{v} \quad \begin{array}{l} R: \text{天体の大きさ} \\ v: \text{移動速度} (\sim 500 \text{km/s}) \end{array}$$

- 今回の観測では $t \sim 10$ 日
- 推定される大きさは
 $R \sim 200 R_{\odot}$

単独の星の大きさ!

イカロスの発見

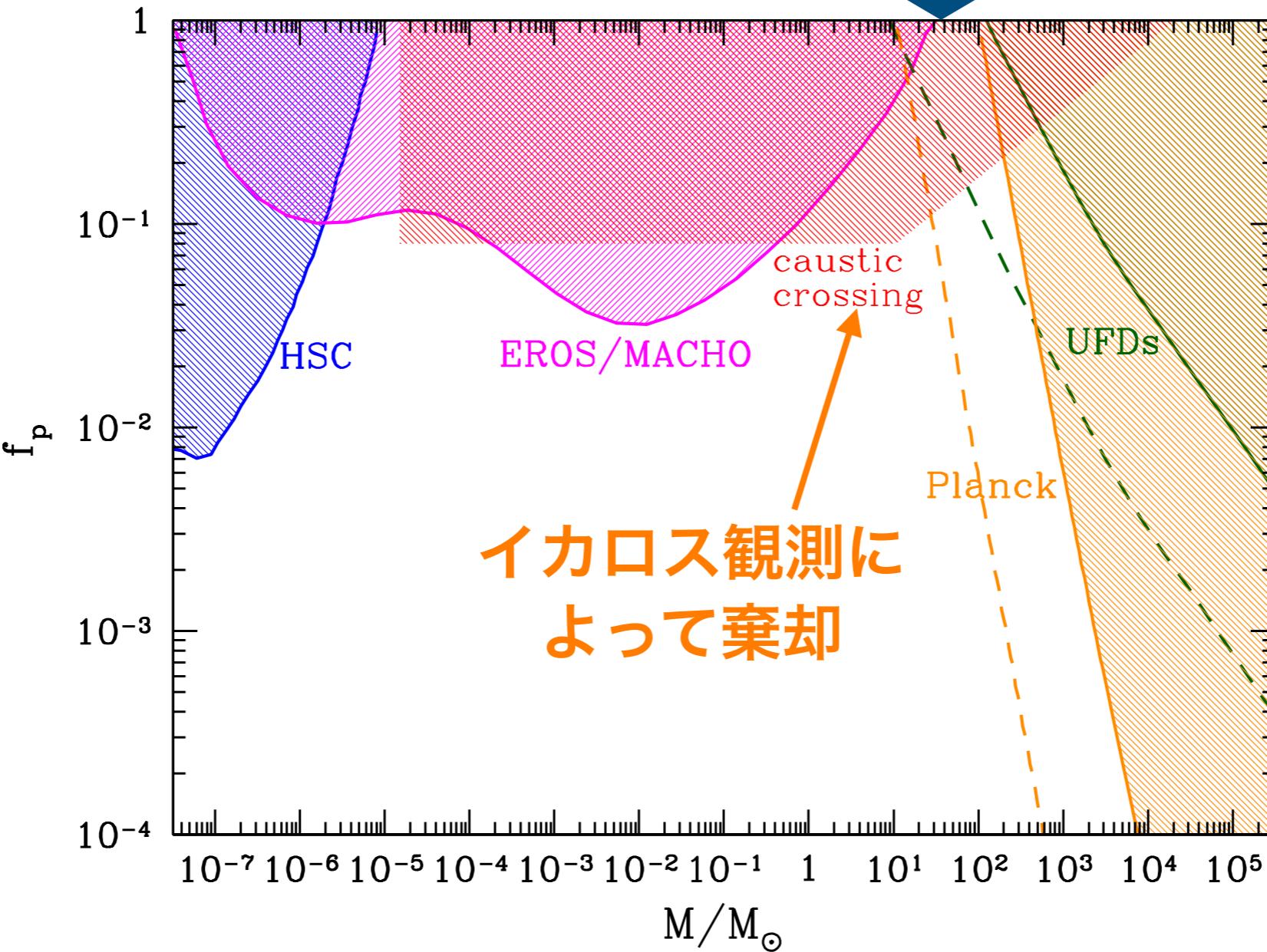
- $z=0.54$ の銀河団の背後にある $z=1.49$ の**単独の星**「イカロス」を発見した
- 最大**4000倍**程度の大畳な重力レンズ増光
- 単独の星の観測の**最遠方記録**を大幅に更新した



PBHダークマターの制限

重力波で発見されたブラックホール

全ダークマターに対するPBHの割合



PBHの質量 (太陽質量との比)

まとめ

- 長らく発見が期待されていた超新星重力レンズの初発見に幸運にも貢献できました
- 偶然にも単独の星が超増光重力レンズで観測される新現象も発見されました。その解釈にも寄与できました
- 今後も様々な「発見」に出会えるよう精進したいと思います
- ありがとうございました