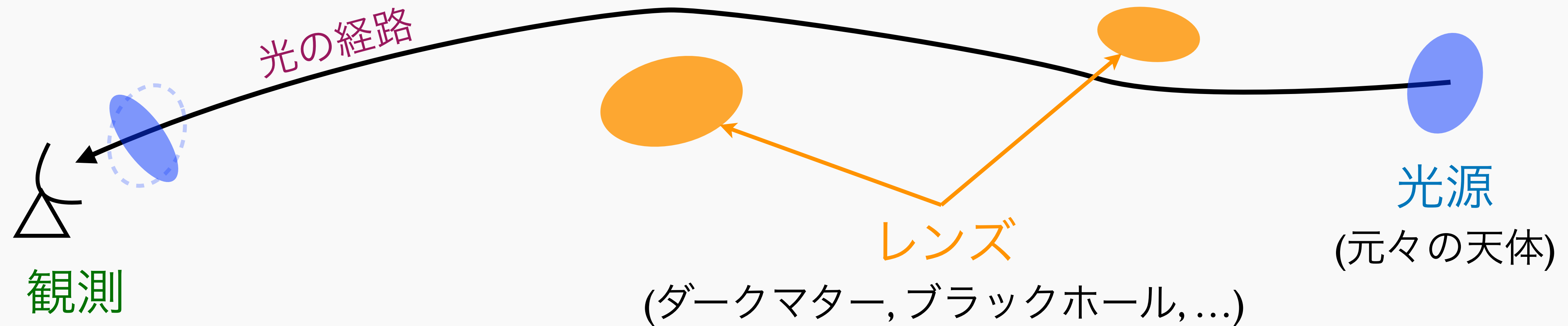


重力レンズ時間の遅れで探る宇宙

大栗 真宗

千葉大学 先進科学センター

重力レンズとは



- 一般相対論によって予言される
- 密度の非一様性による光の経路の曲がり
- 複数像の形成, 天体の形状のゆがみや増光など

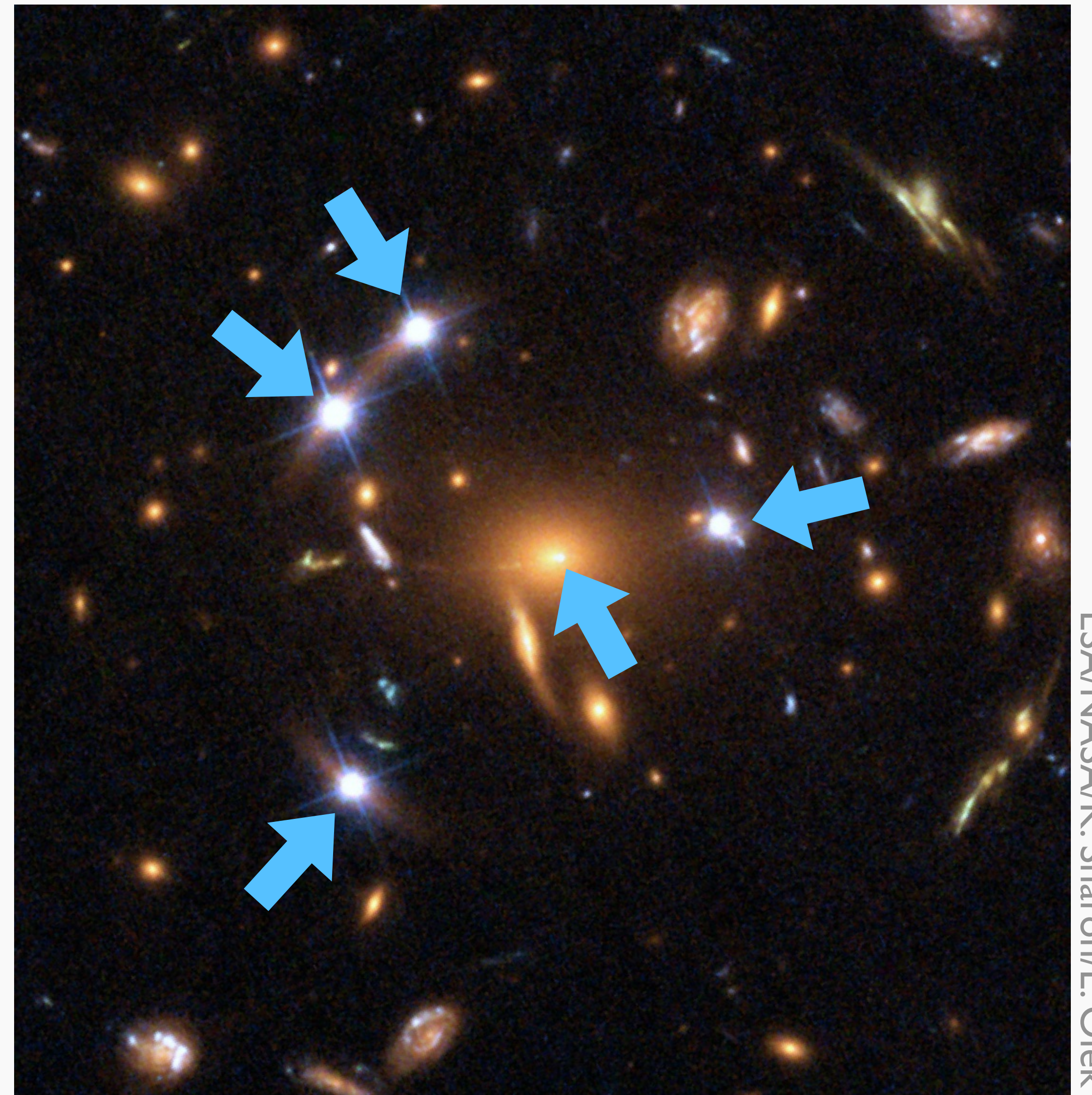
重力レンズの例

SDSS J1004+4112

銀河団によって引き起こされた
重力レンズクエーサー五重像

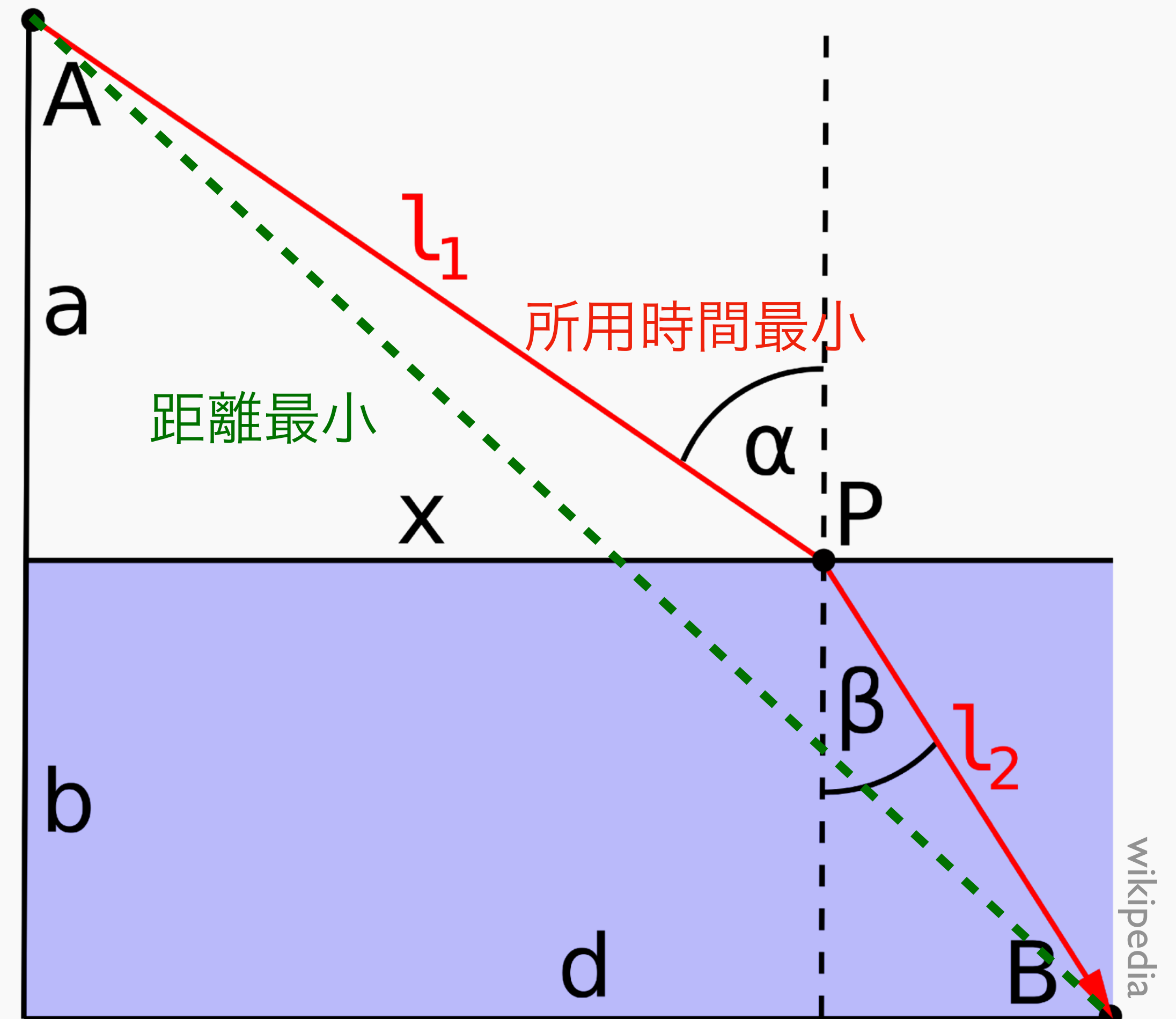
Inada, MO+ Nature, **426**, 810 (2003)

[クエーサー: 超大質量ブラックホール
にガスが降着し明るく輝く天体]



フェルマーの原理

- 光の経路は所要時間が最小(停留点)となるように決定される
- 幾何光学の基本原則
- 重力レンズにおいても同様



フェルマーの原理と重力レンズ効果

- 膨張宇宙におけるフェルマーの原理 (η : 共形時間, χ : 共動動径距離)

$$\delta \int d\eta = \delta \int_0^{\chi_s} d\chi \left[1 - \frac{2\Phi}{c^2} + \frac{f_K^2(\chi)}{2} \omega_{ab} \frac{dx^a}{d\chi} \frac{dx^b}{d\chi} \right] = 0$$

ヌル条件 $ds^2 = 0$

$$= L \left(x^a, \frac{dx^a}{d\chi}, \chi \right)$$

➡ $\frac{d}{d\chi} \left(\frac{\partial L}{\partial (dx^a/d\chi)} \right) - \frac{\partial L}{\partial x^a} = 0$ オイラー-ラグランジュ方程式

➡ $\frac{d}{d\chi} \left[f_K^2(\chi) \omega_{ab} \frac{dx^b}{d\chi} \right] + \frac{2}{c^2} \Phi_{,a} = 0$ 重力レンズ効果による経路の曲がりの式

重力レンズ時間の遅れ

- 時間の遅れの表式

$$\Delta t = \int_{\text{w/ lensing}} d\eta - \int_{\text{w/o lensing}} d\eta$$

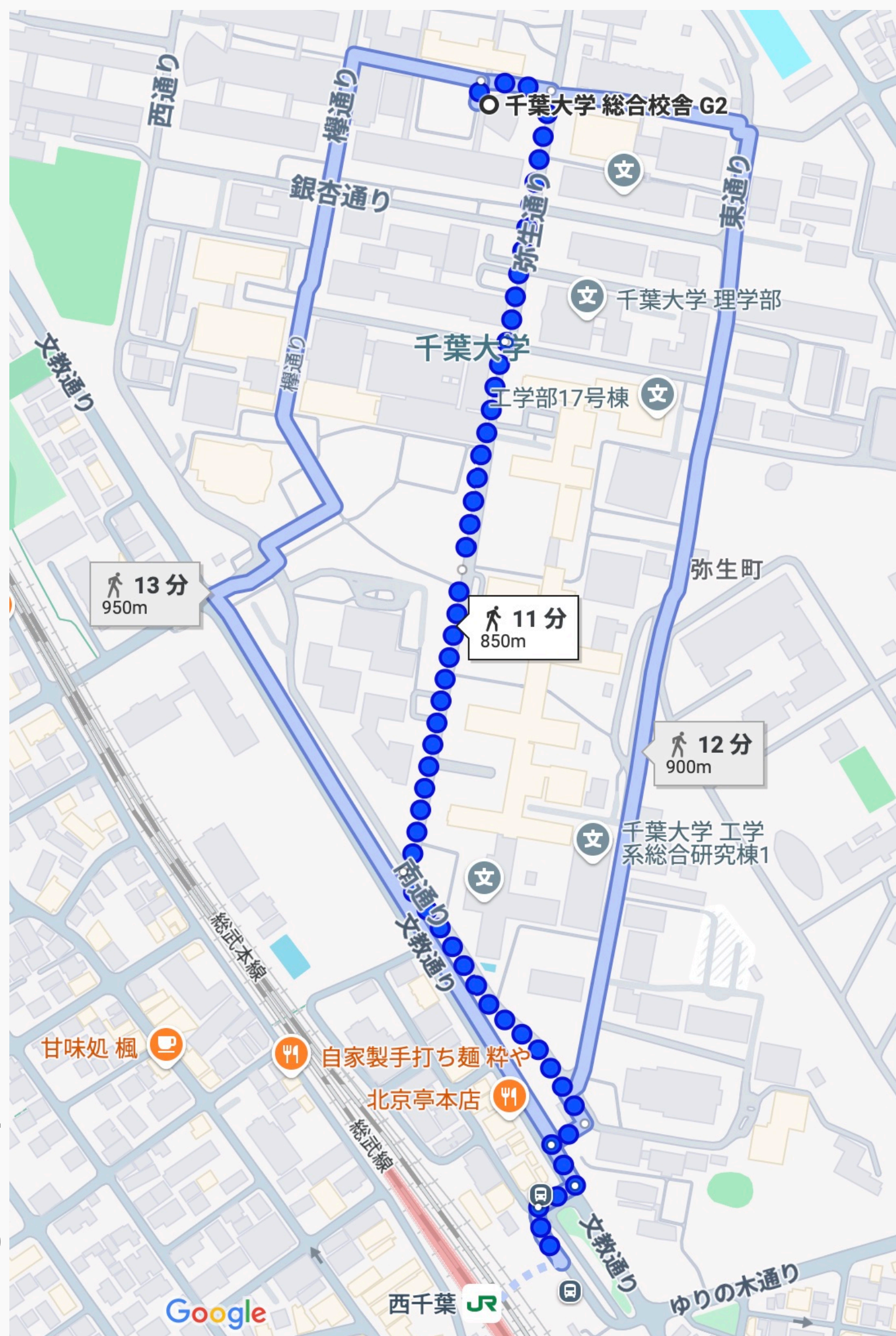
$$= \frac{1}{c} \int_0^{\chi_s} d\chi \left[\frac{f_K^2(\chi)}{2} \left| \frac{d\theta}{d\chi} \right|^2 - \frac{2\Phi}{c^2} \right]$$

→ 幾何学的な時間の遅れ Δt_{geom}

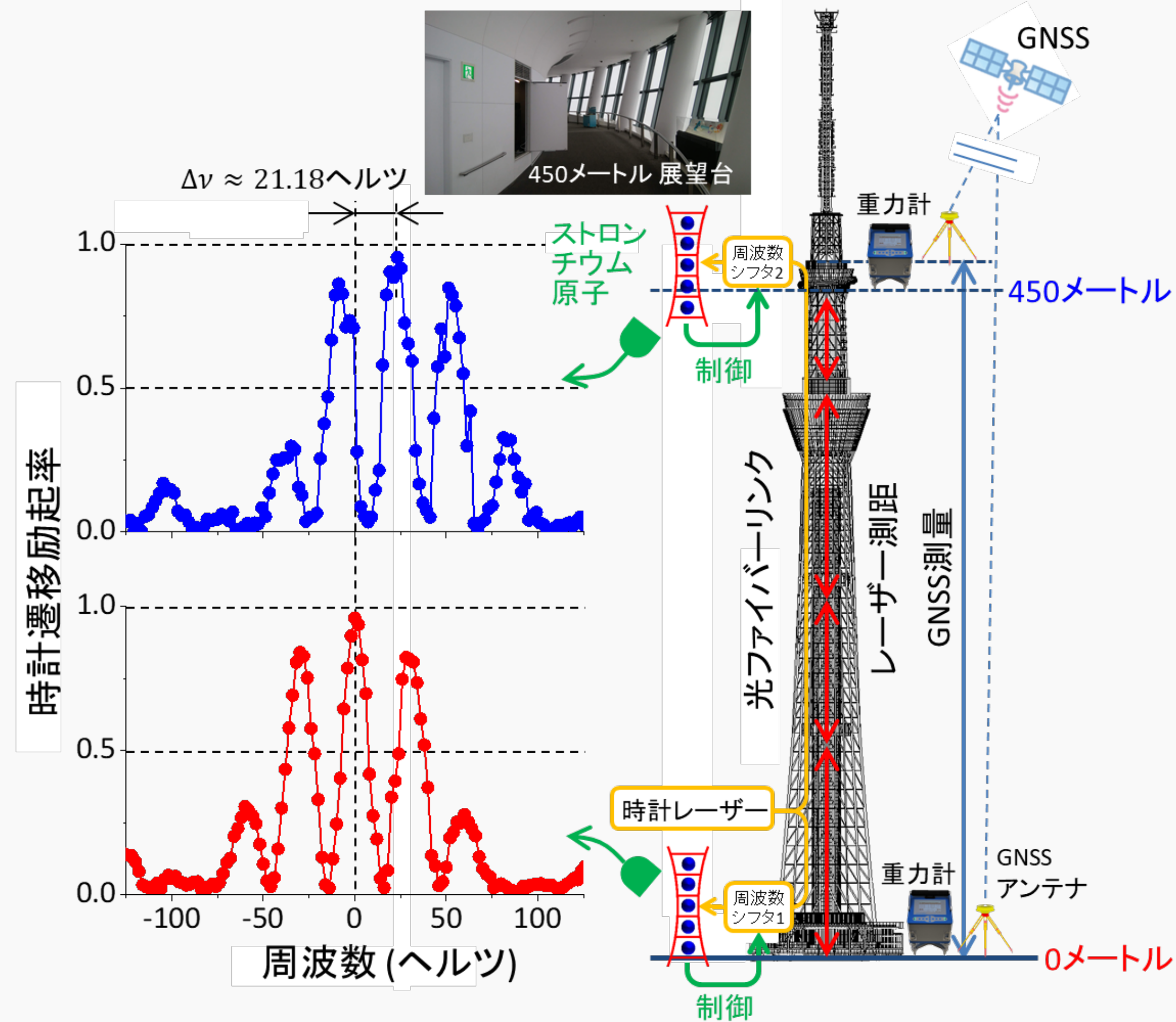
→ 重力的な時間の遅れ Δt_{grav}

幾何的な時間の遅れと重力的な時間の遅れ

幾何学的な時間の遅れ



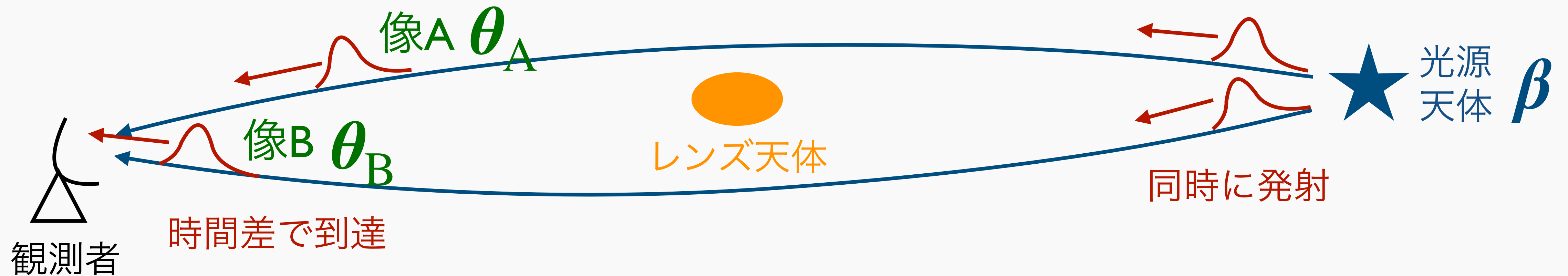
Takamoto+ Nature Photonics | 4(2020)4 | 1



重力的な時間の遅れ

観測可能な時間の遅れ

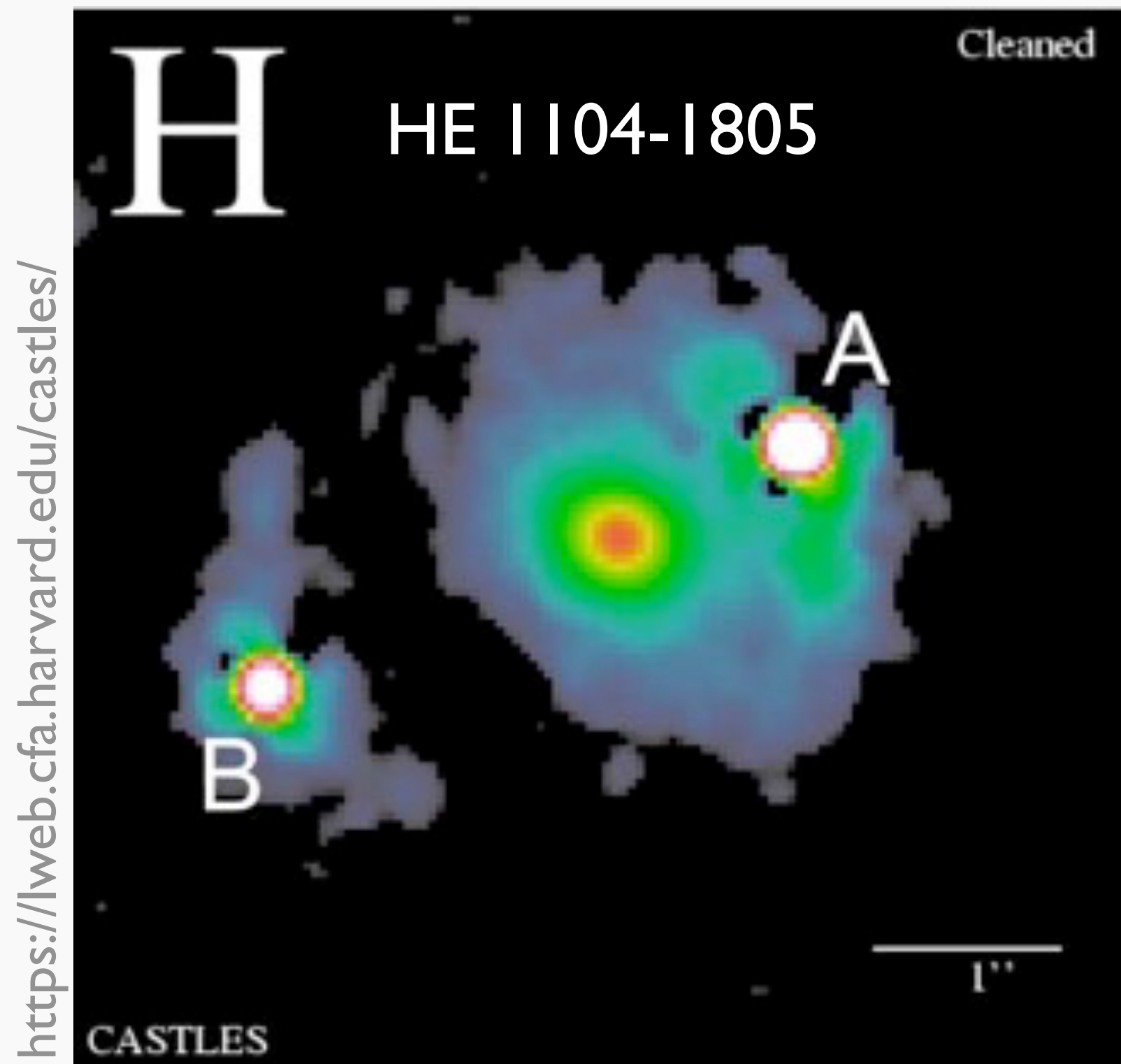
- 実際に観測可能なのは, 複数像間の時間の遅れの差
- 光源天体が**時間変動**する場合のみ観測可能



$$\Delta t_{AB} = \Delta t(\theta_A; \beta) - \Delta t(\theta_B; \beta)$$

- レンズ天体が銀河のとき~月, 銀河団のとき~年の遅れ

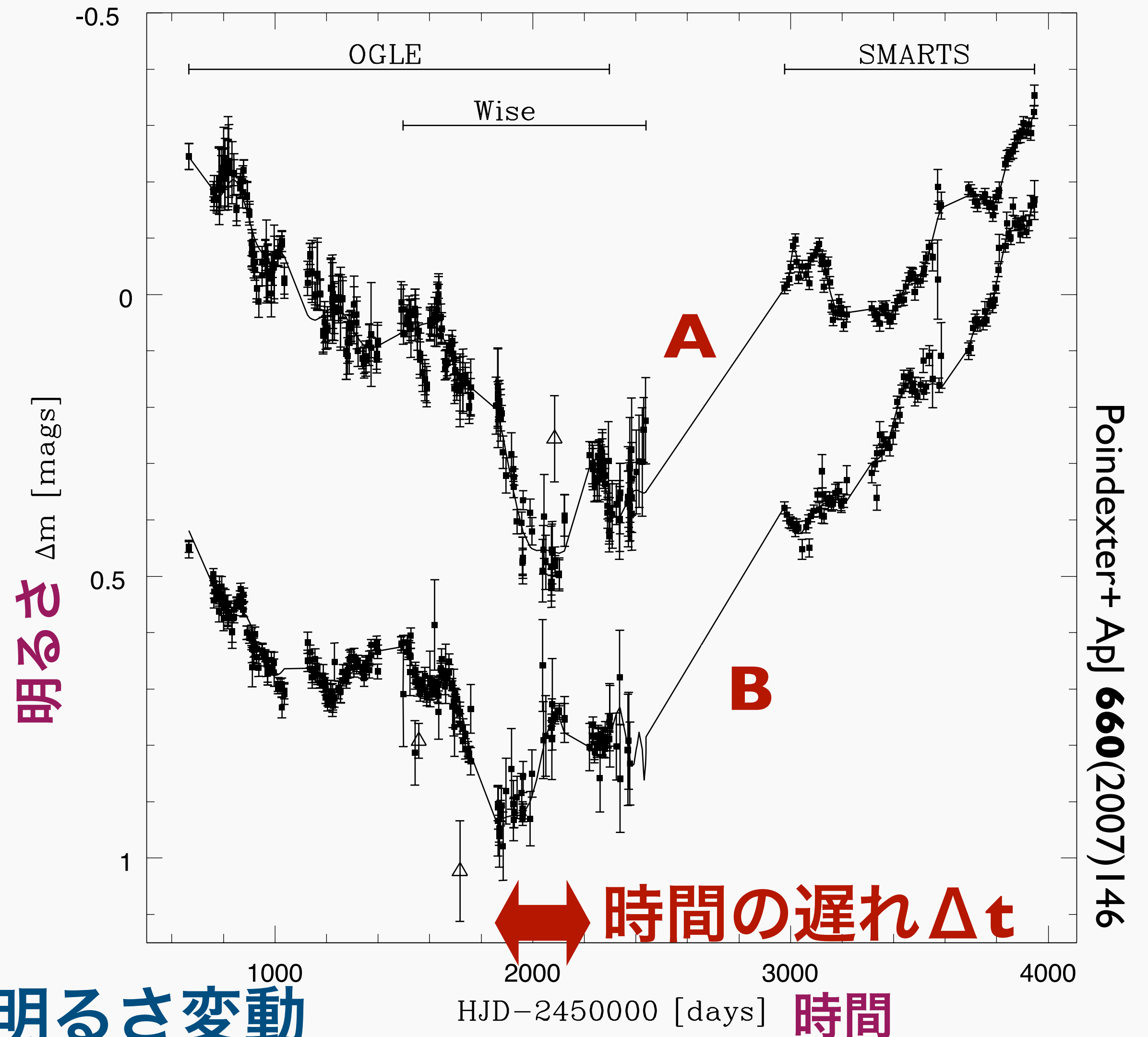
時間の遅れの測定例



<https://web.cfa.harvard.edu/castles/>

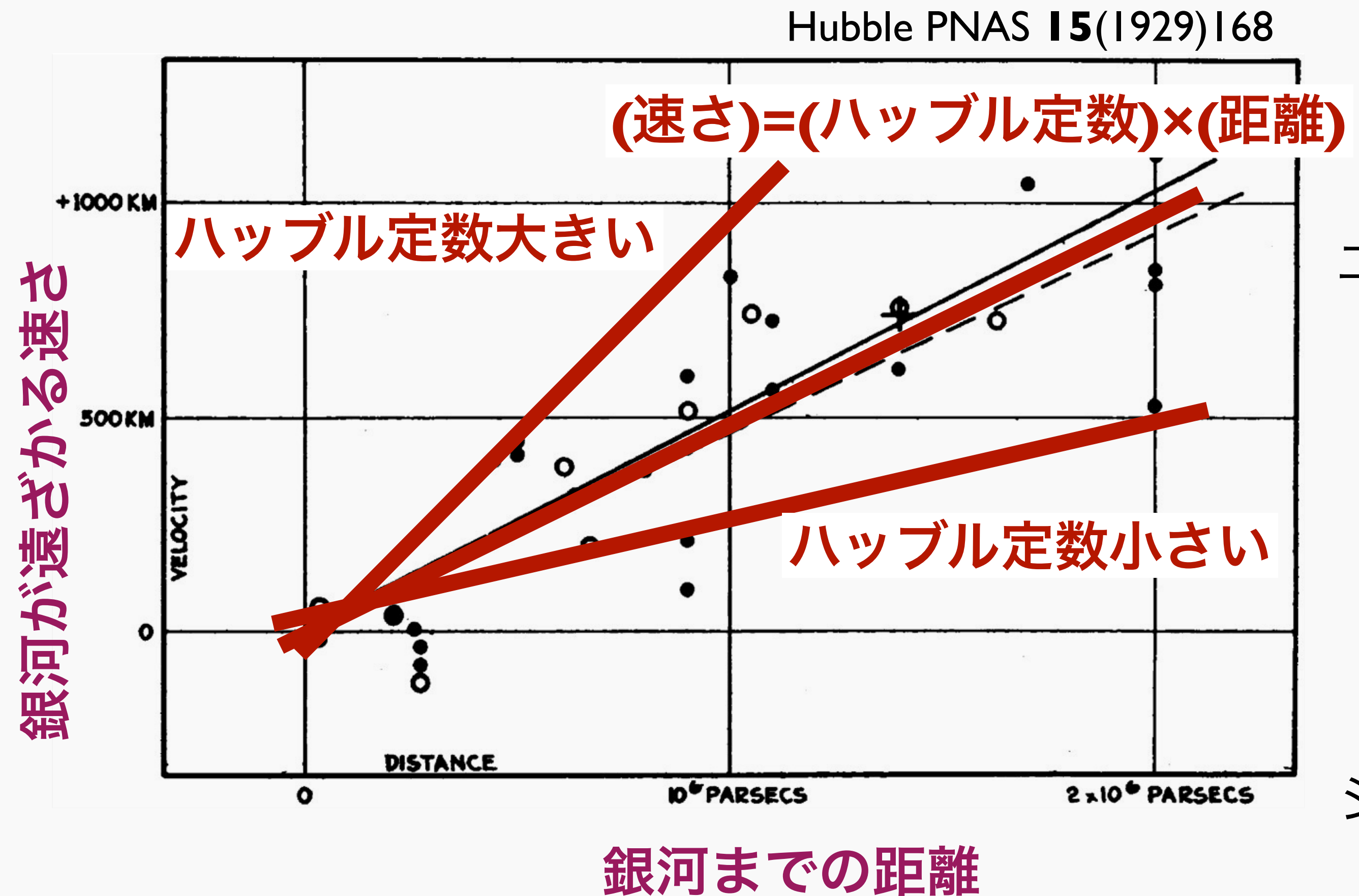
2つの複数像を持つクエーサー
重力レンズ

ガス降着時間変動で明るさ変動



時間の遅れの代表的な応用：ハッブル定数

- 宇宙膨張を示す
ハッブル-ルメートルの法則の係数
 $v = \underline{H_0}r$
- 宇宙の距離, 時間
スケールを規定
(距離) $\propto H_0^{-1}$
(時間) $\propto H_0^{-1}$



wikipedia

エドウィン・ハッブル

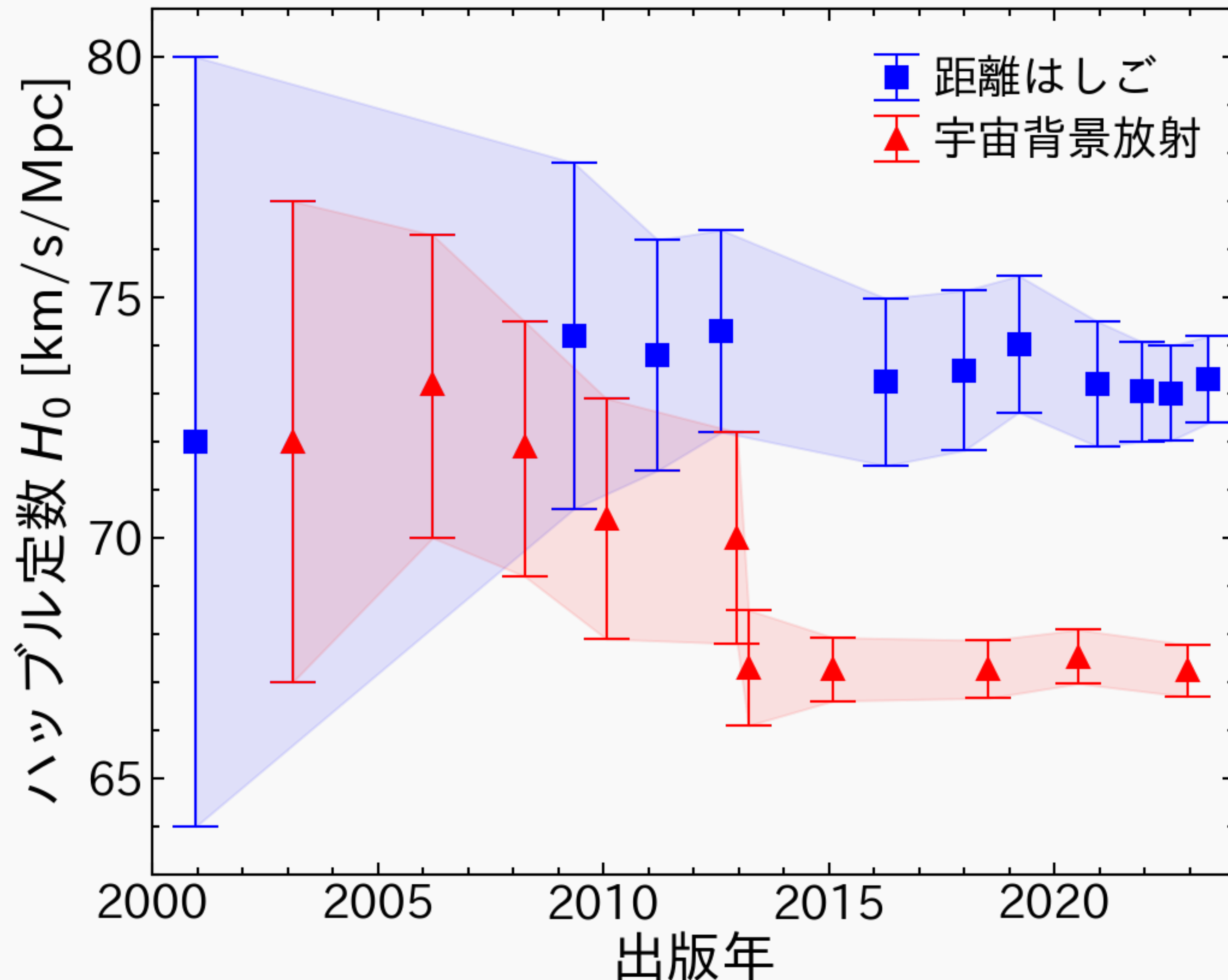


wikipedia

ジョルジュ・ルメートル

ハッブル定数の重要性

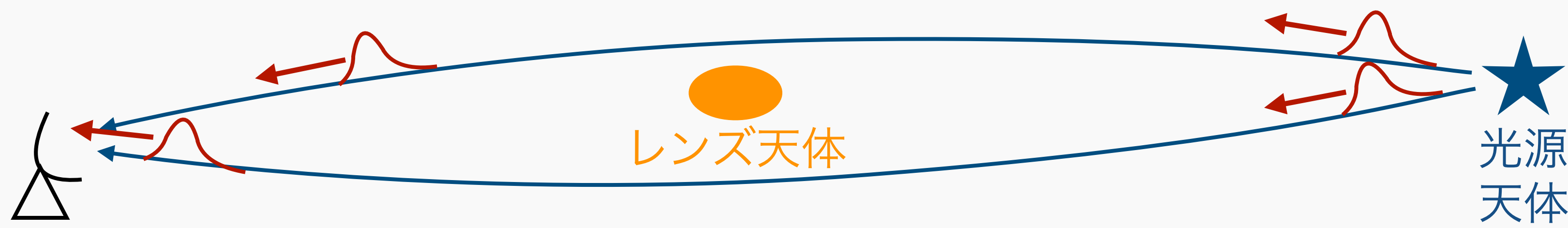
大栗 日本物理学会誌 **78**(2023)630



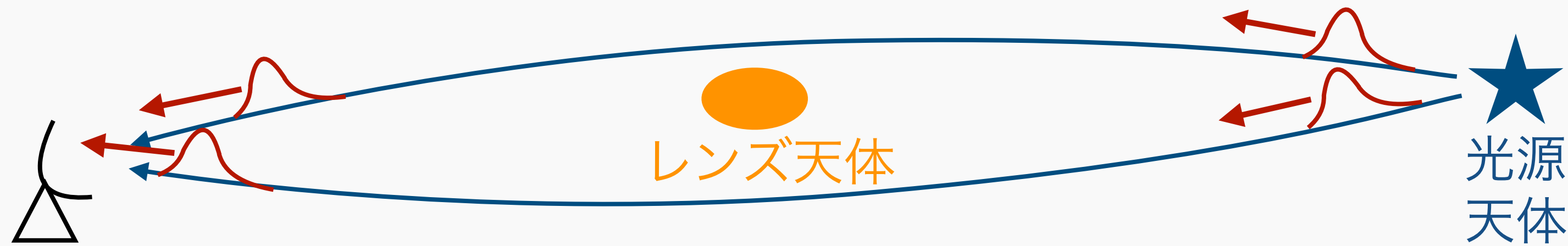
- 近傍宇宙 (距離はしご) と遠方宇宙 (宇宙背景放射) の測定結果の不一致
- 系統誤差? 新しい物理?
- 独立な測定の重要性
→ 重力レンズ時間の遅れ



時間の遅れを用いたハッブル定数測定



ハッブル定数小
 → 宇宙大
 → 到達時間差大



ハッブル定数大
 → 宇宙小
 → 到達時間差小

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)

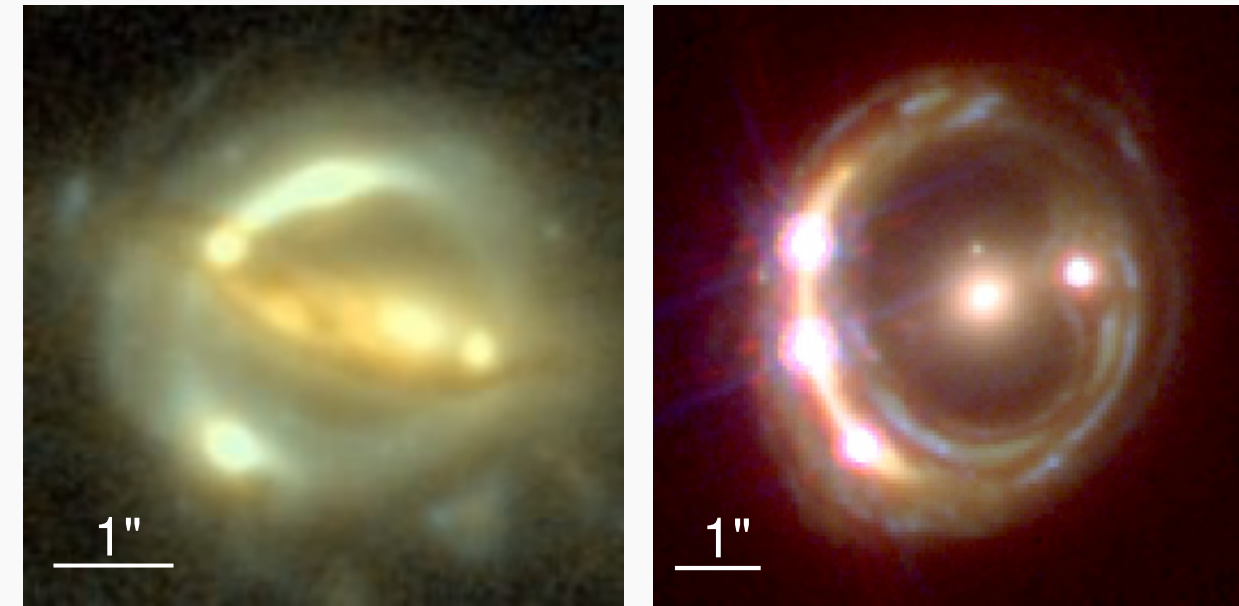
Summary

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

1964年(!)の理論論文では
 光源としてクエーサーでなく
 超新星が考えられていた

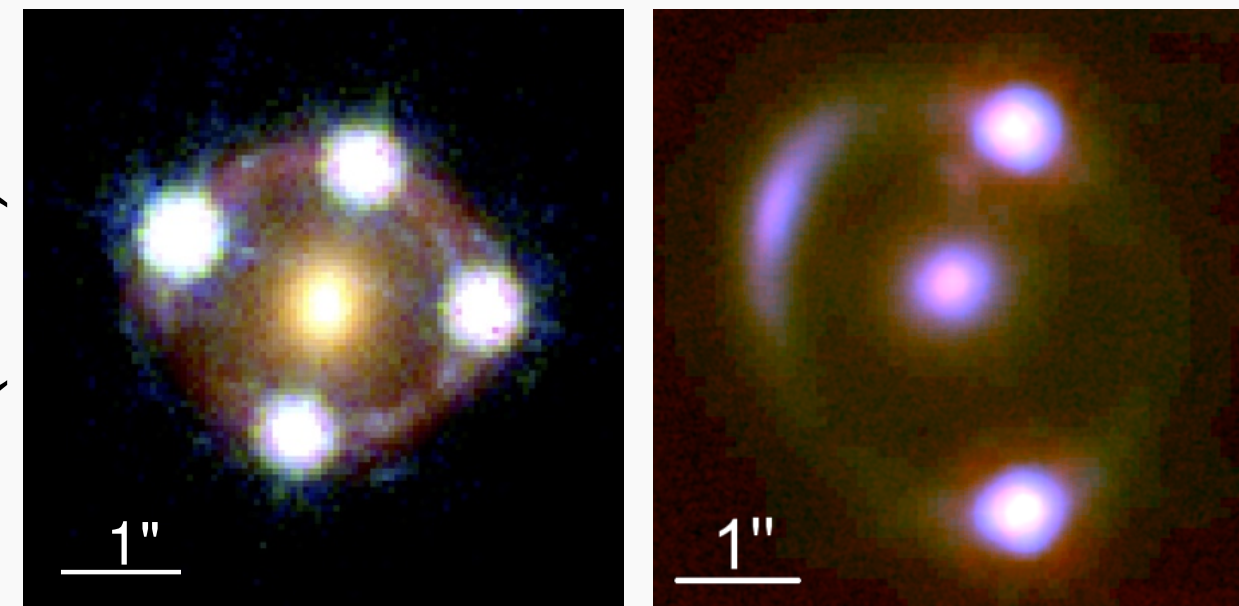
これまでの解析の困難

- 主に**銀河によるクエーサー重力レンズ**解析
- レンズ天体の質量分布の不定性が卓越



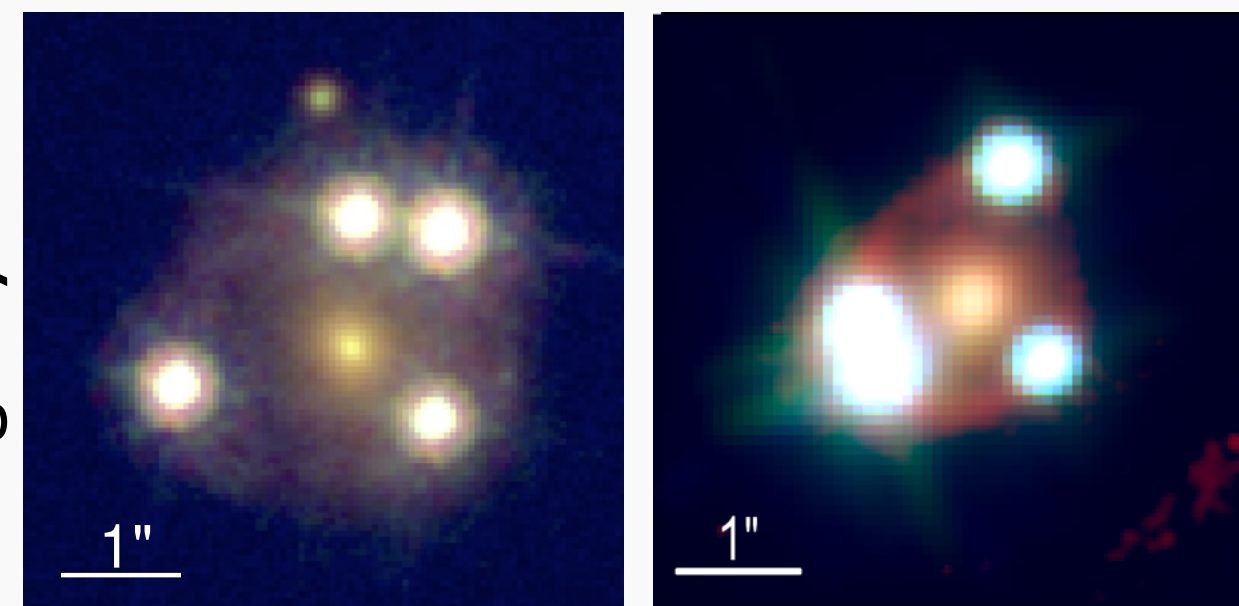
(a) B1608+656

(b) RXJ1131-1231



(c) HE 0435-1223

(d) SDSS 1206+4332



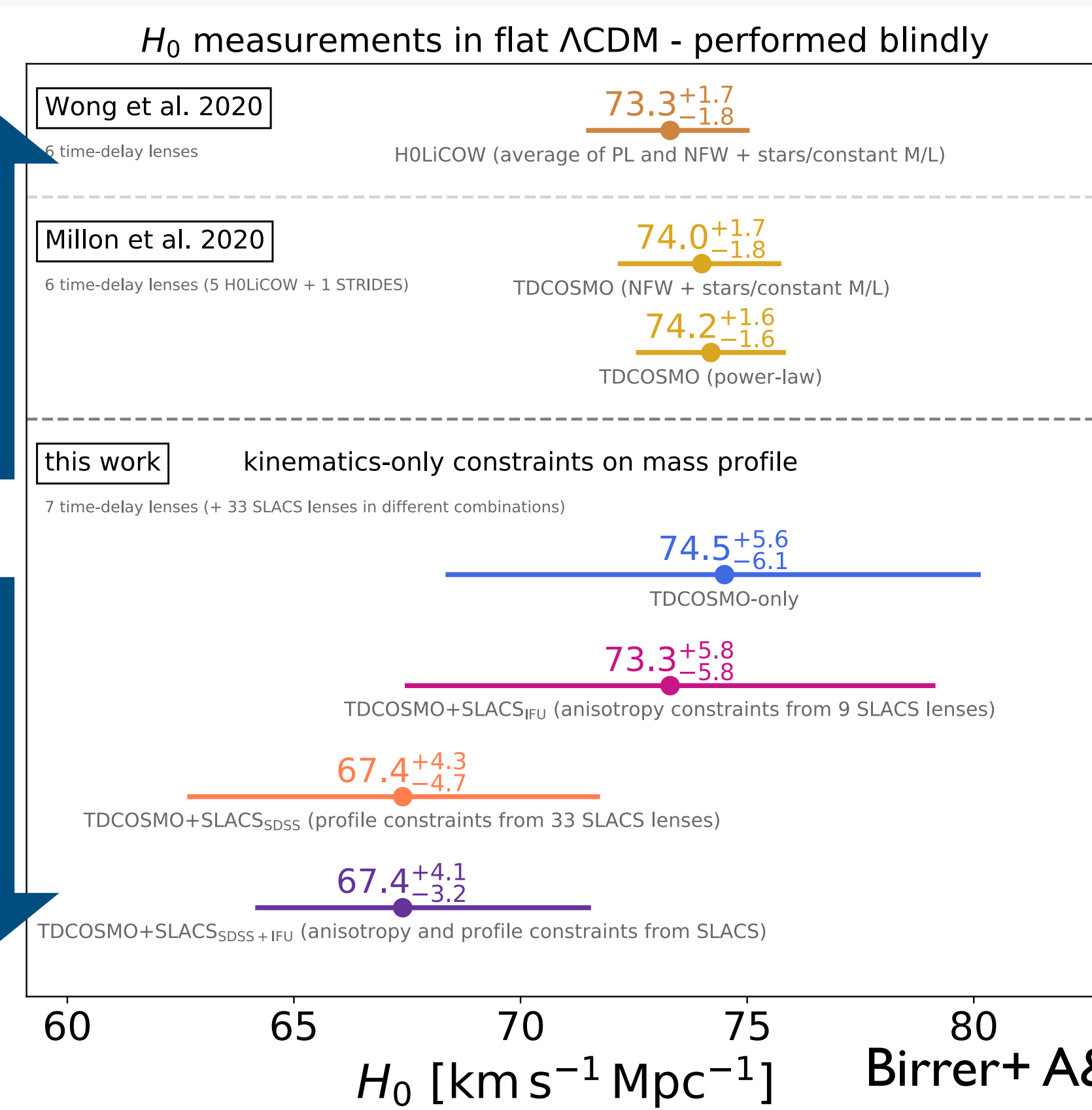
(e) WFI2033-4723

(f) PG 1115+080

Wong, Suyu+ MNRAS 498(2020)1420

質量分布の
より強い
事前情報

より強い
速度分散の
事前情報

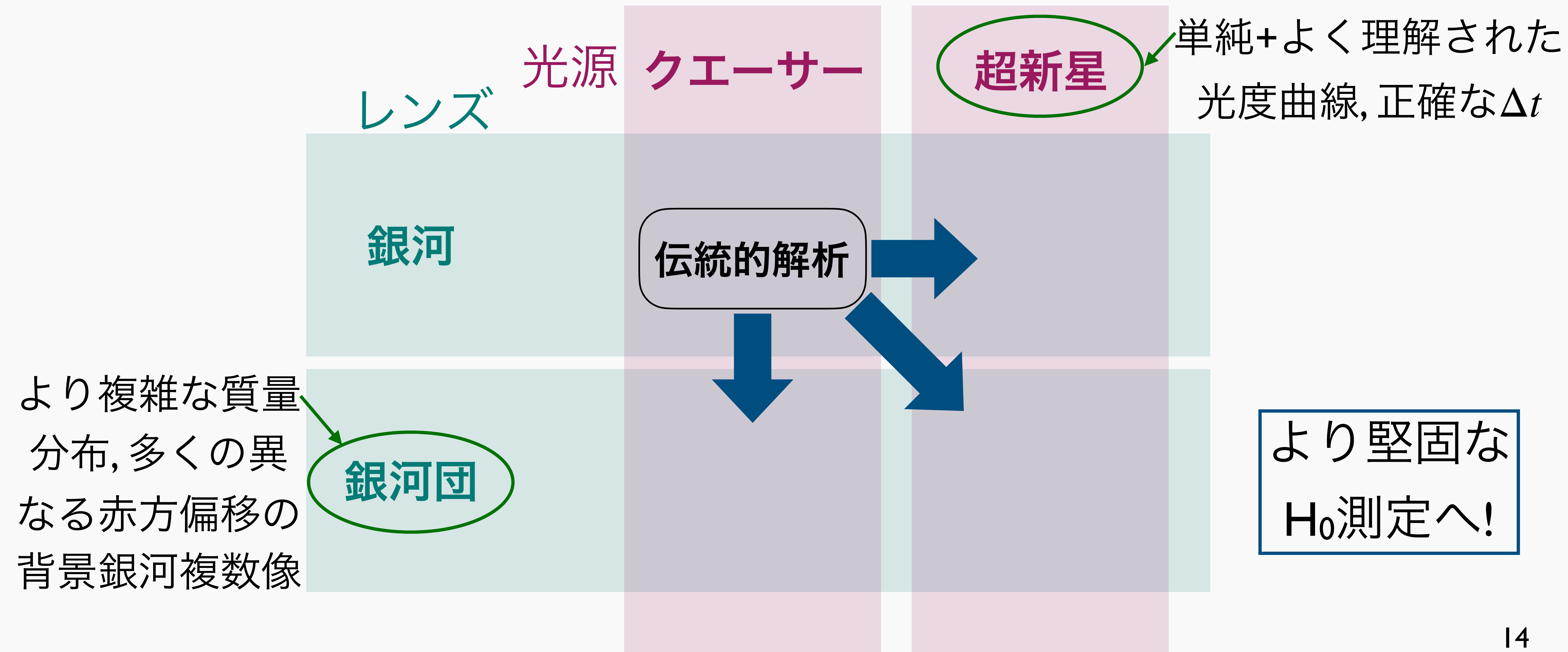


断定的

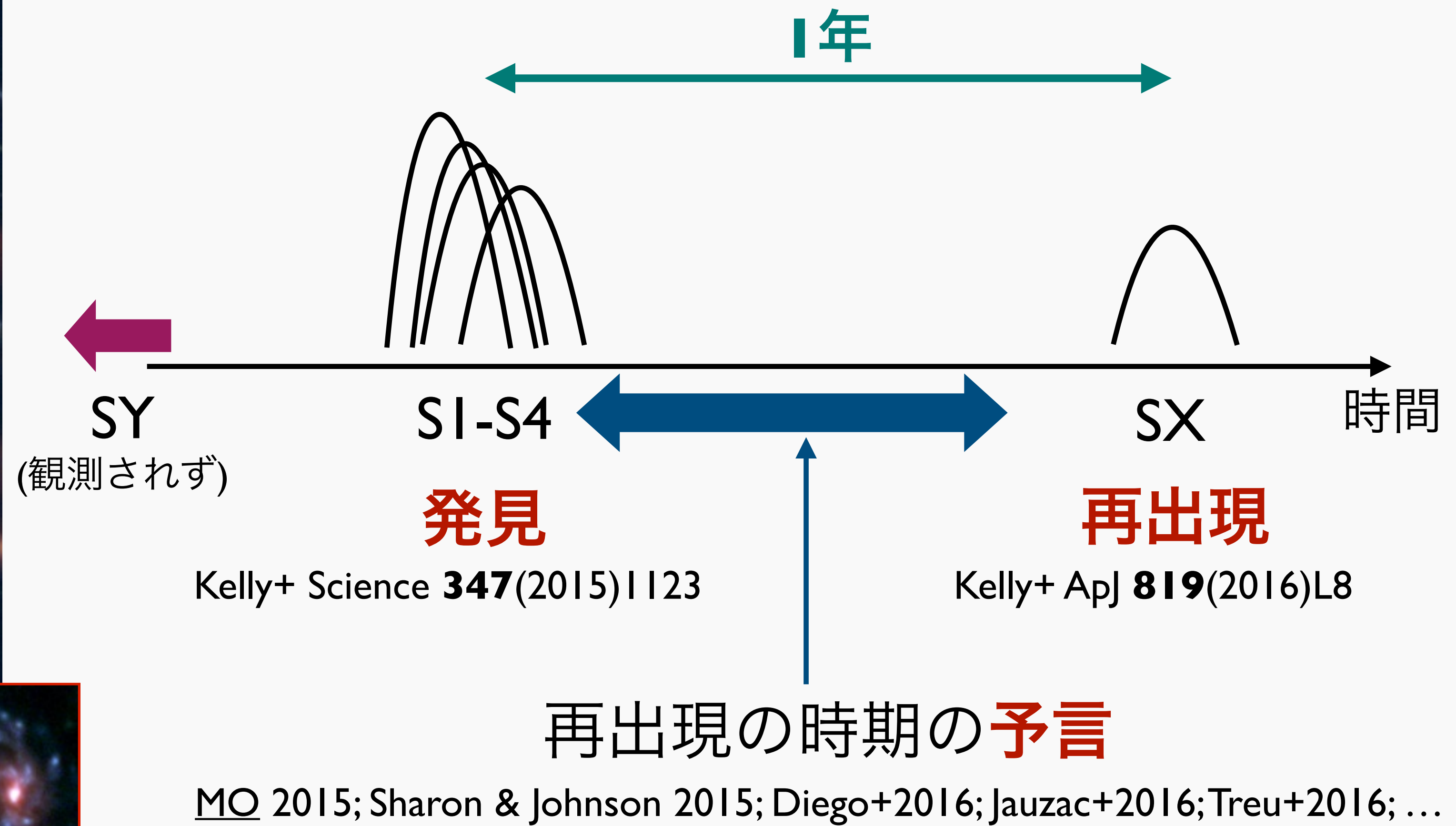
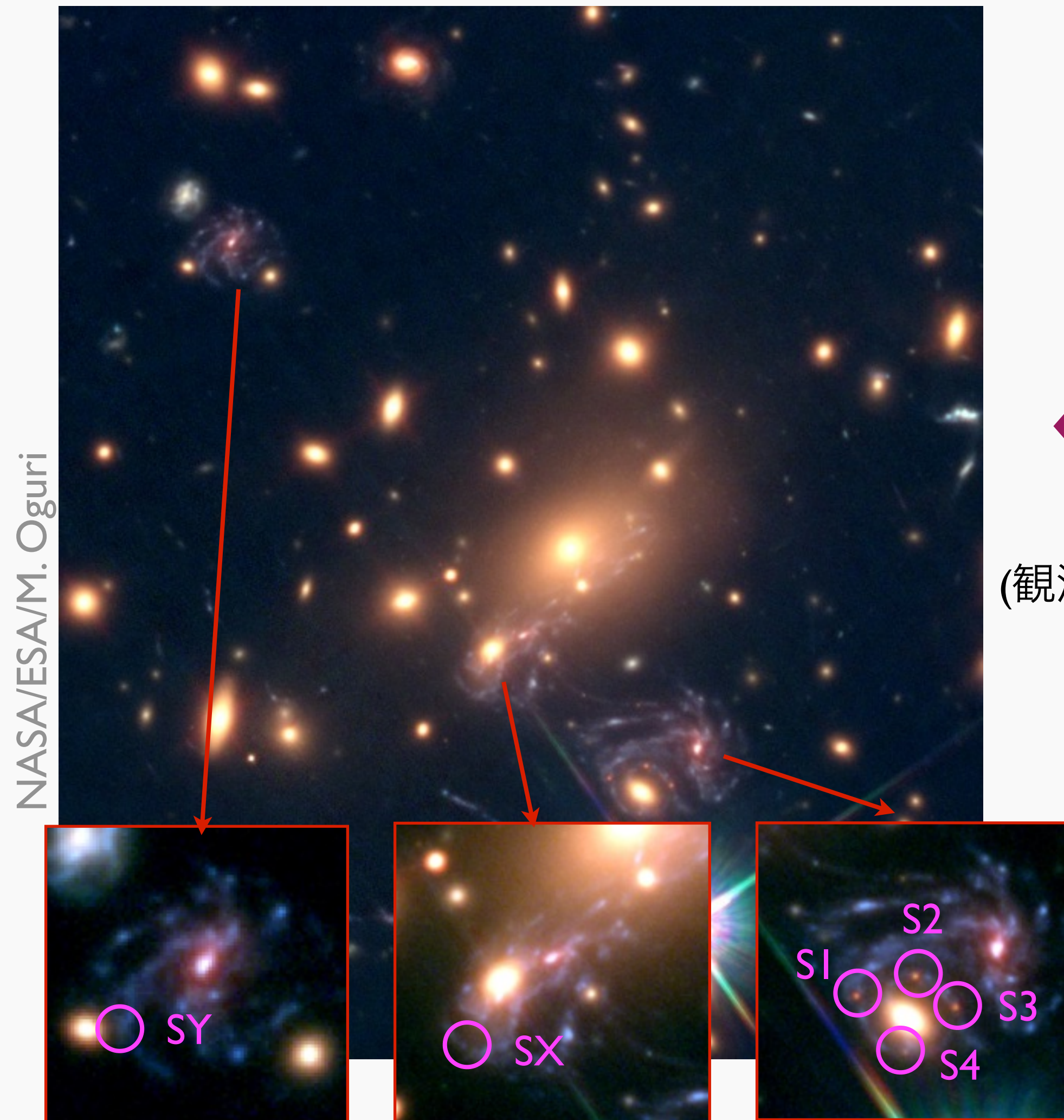
保守的

断定的

新しい方向性

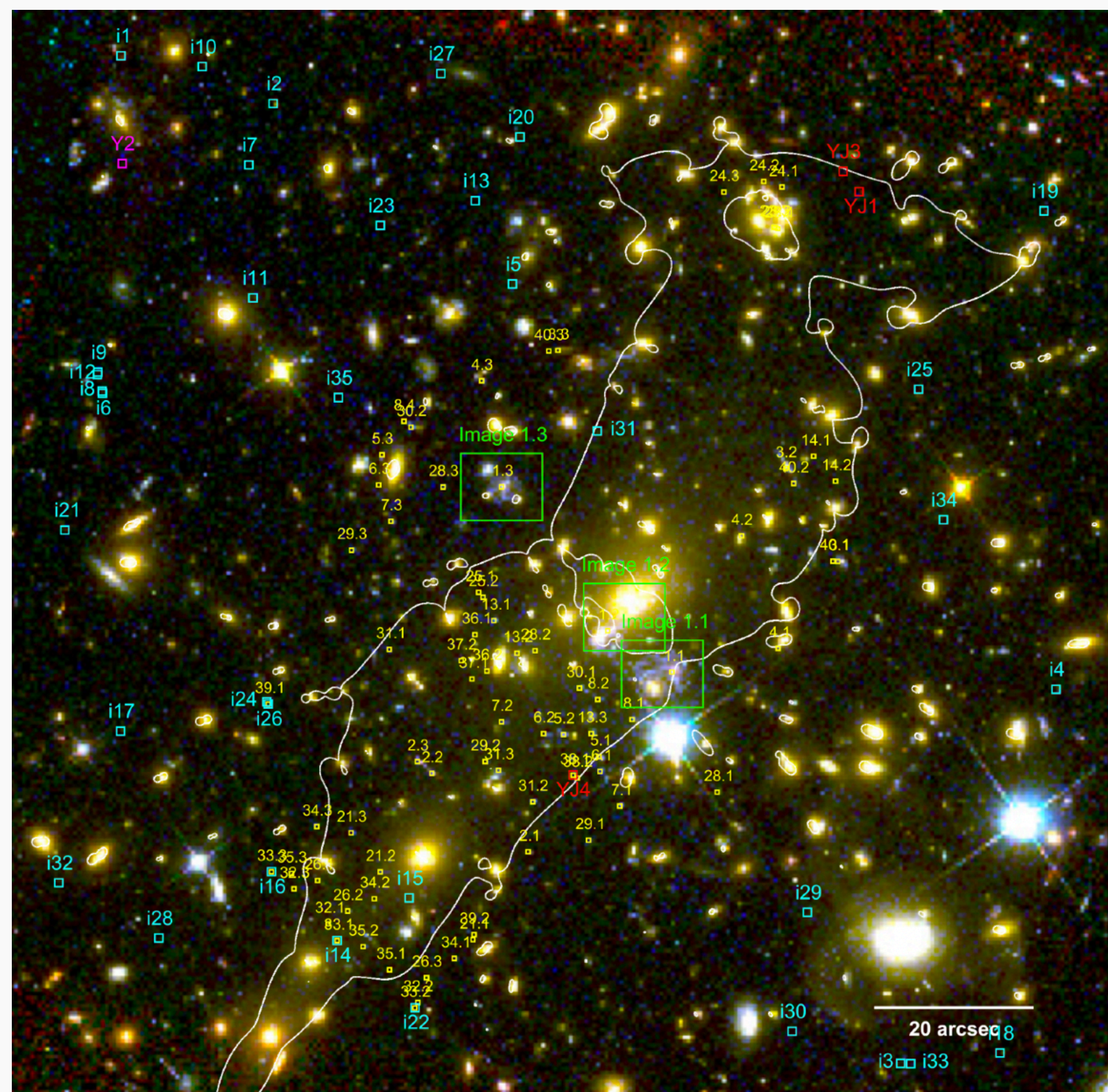


MACS J1149+2223の超新星Refsdal

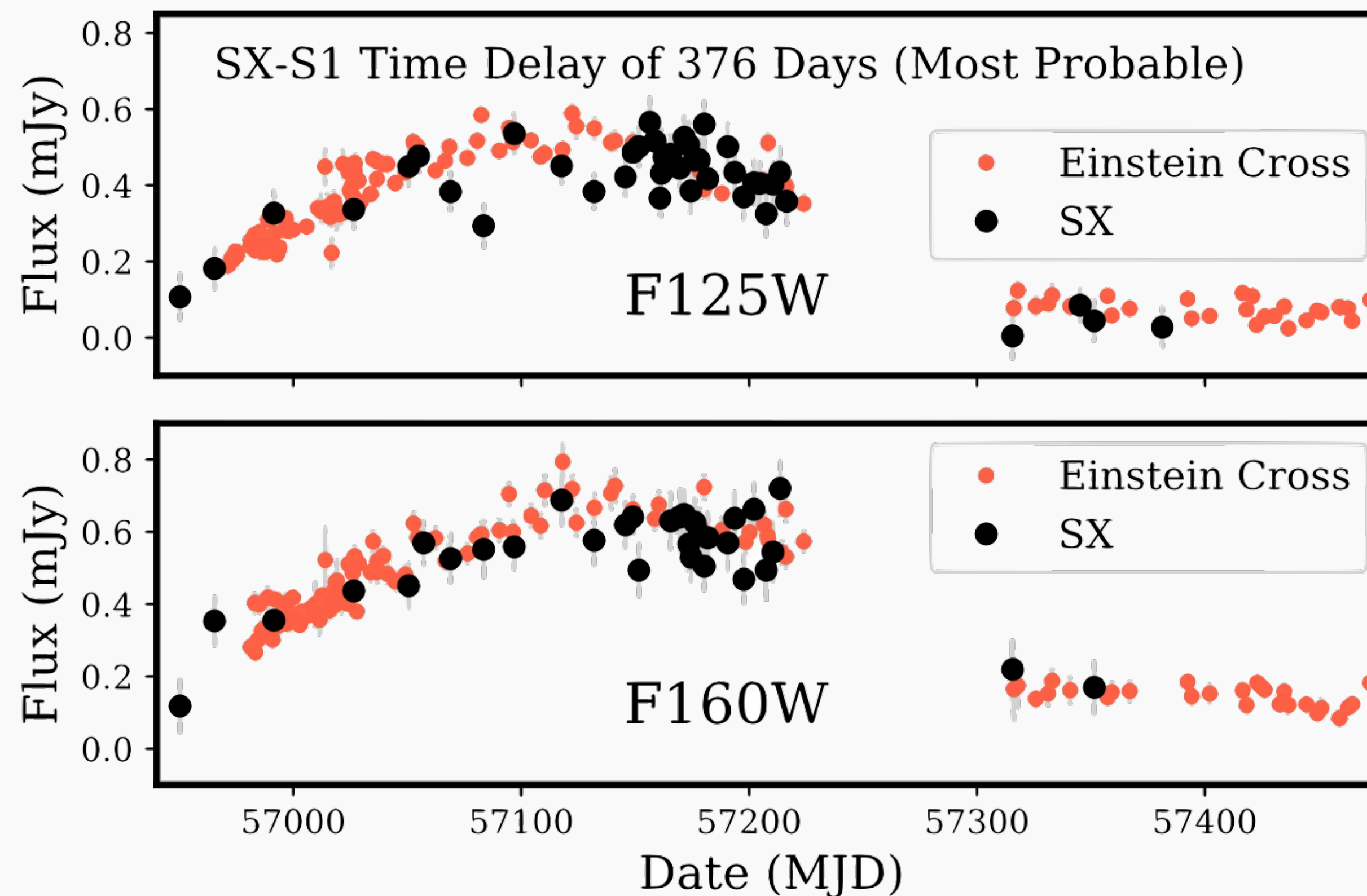


詳細な解析

Kawamata, MO+ ApJ **819**(2016)114



100個以上の複数像を用いた
質量密度分布再構築



モニタ観測による時間の遅れの
正確な測定

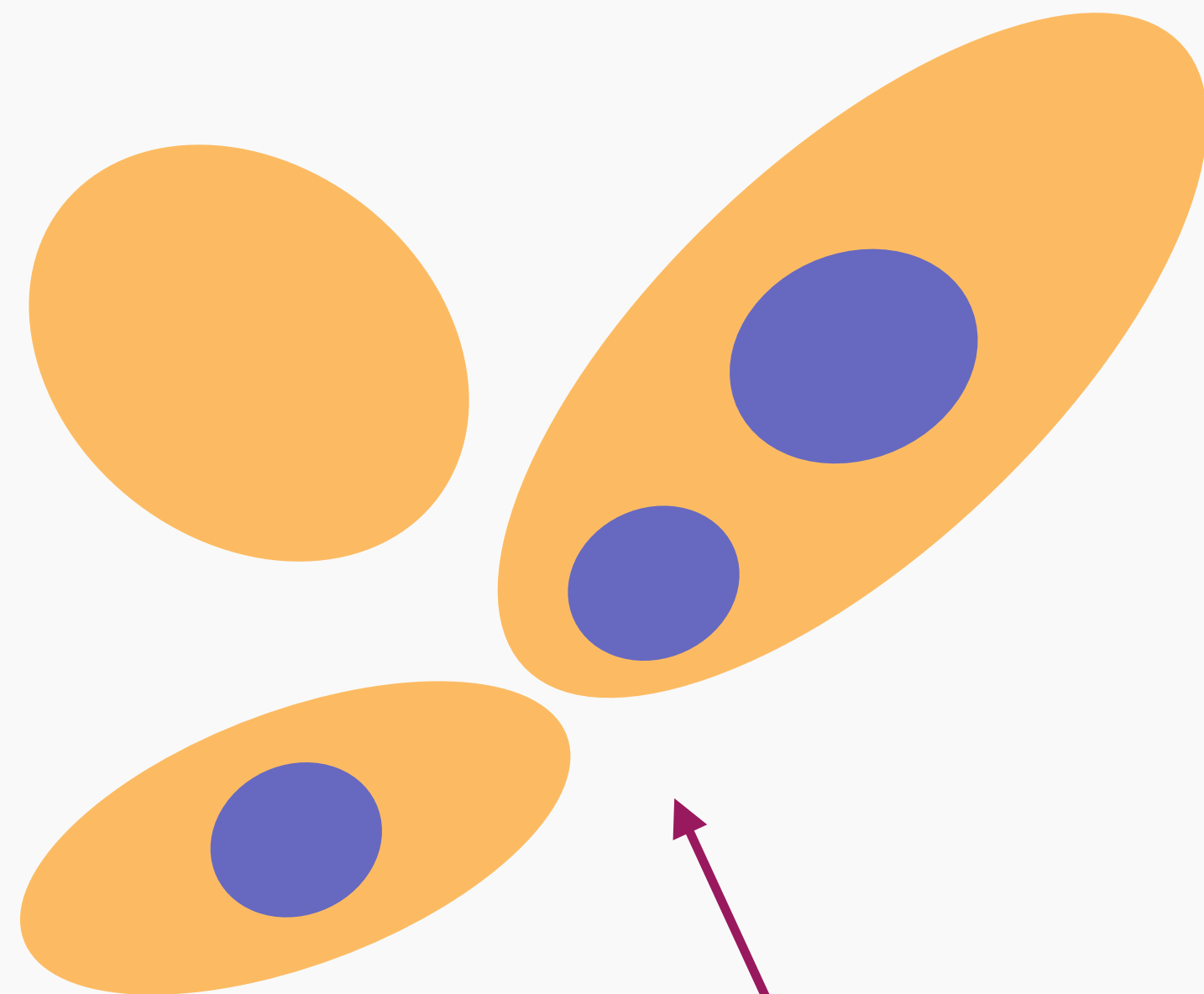
Kelly+ (incl. MO) ApJ **948**(2023)93

銀河団質量密度分布再構築の手法

- レンズ天体の質量分布のパラメータを, 観測された複数像の位置を再現するように決める

simple parametric

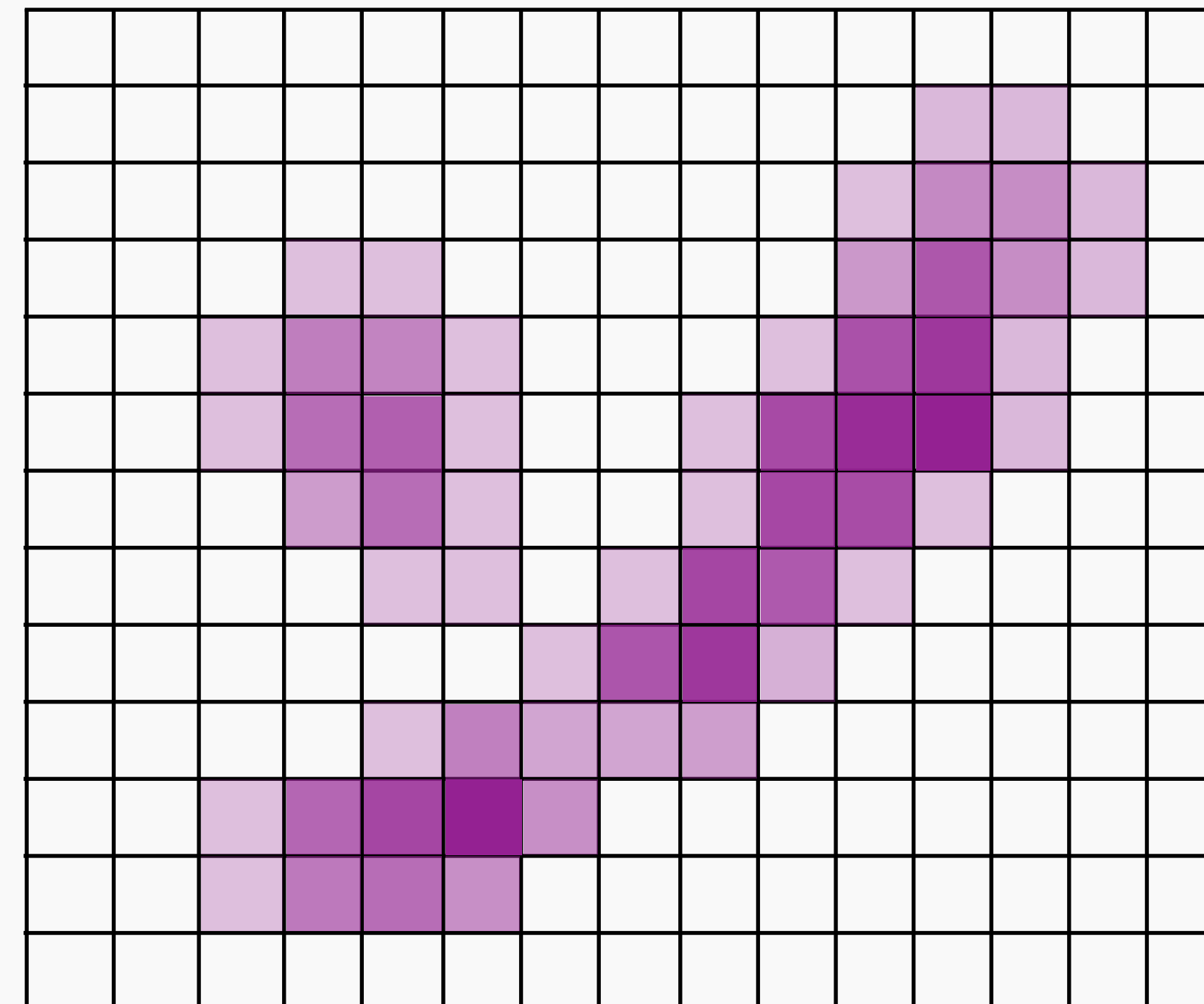
少ない数の
パラメータ
強い仮定



私 (glafic) の手法

free-form

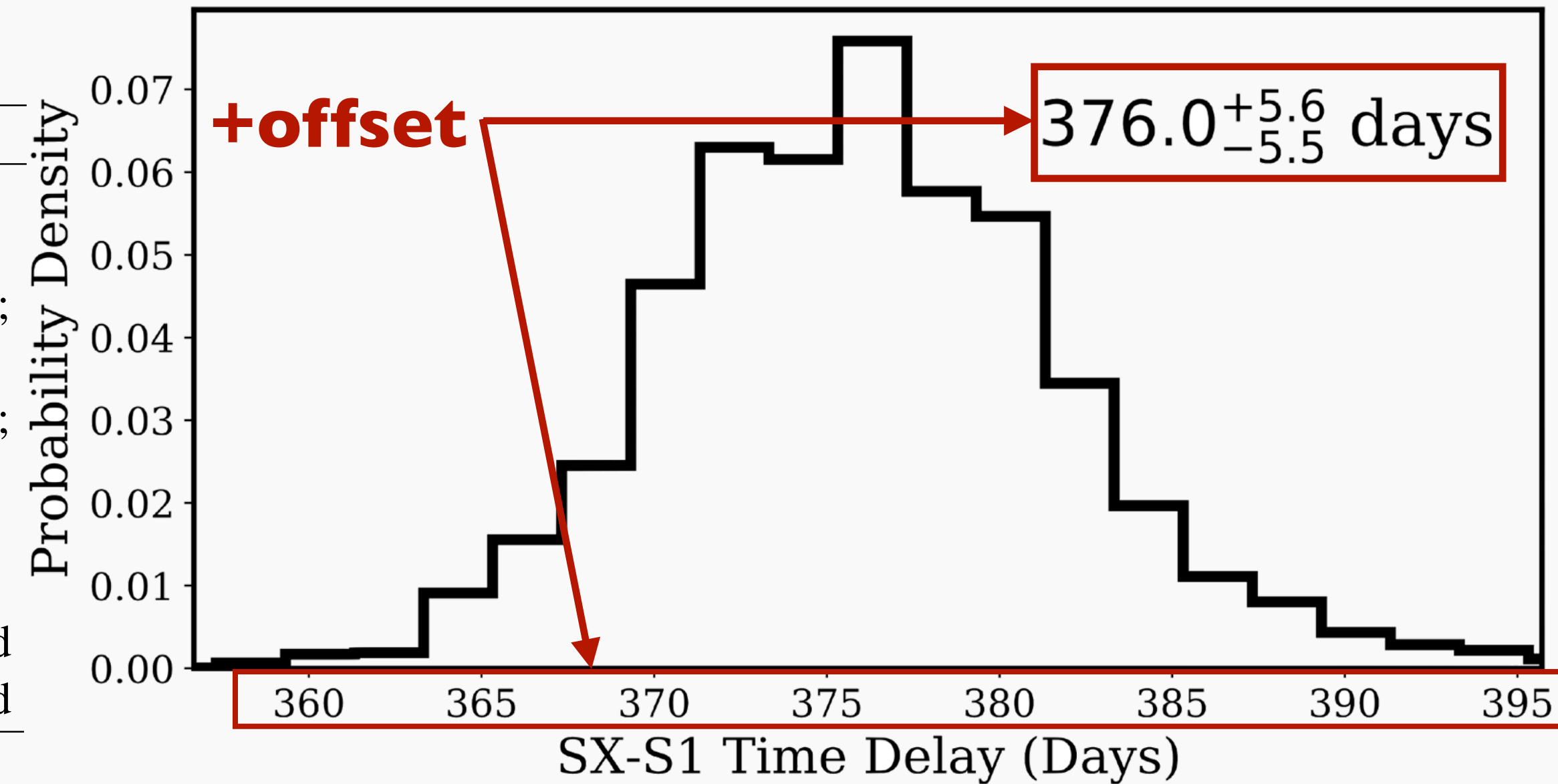
多い数の
パラメータ
弱い仮定





H₀のブラインド解析

Used for <i>H</i> ₀ Inference	Model	Group	Method	SX Prediction	Post-Reappearance
HFF Lens Models with Published Predictions					
Yes	Diego-a	WSLAP+	FF	(28)	...
Yes	Grillo-g	GLEE	SP	(28)	...
Yes	Oguri-g*	GLAFIC	SP	(28)	This Paper; SX Position Added; Blind to Shift's Direction
Yes	Oguri-a*	GLAFIC	SP	(28)	This Paper; SX Position Added; Blind to Shift's Direction
Yes	Zitrin-c*	LTM	LTM	...	(28)
Yes	Jauzac15.2*	CATS	SP	...	(29); Delays Recalculated
Yes	Sharon-a*	Lenstool	SP	(28)	This Paper; Delays Recalculated
Yes	Sharon-g*	Lenstool	SP	(28)	This Paper; Delays Recalculated



再出現前に作成された (マイナーな修正)

8つの質量密度分布モデル

時間の遅れ測定時の光度曲線の

のランダムなoffset

H₀の値のブラインド測定



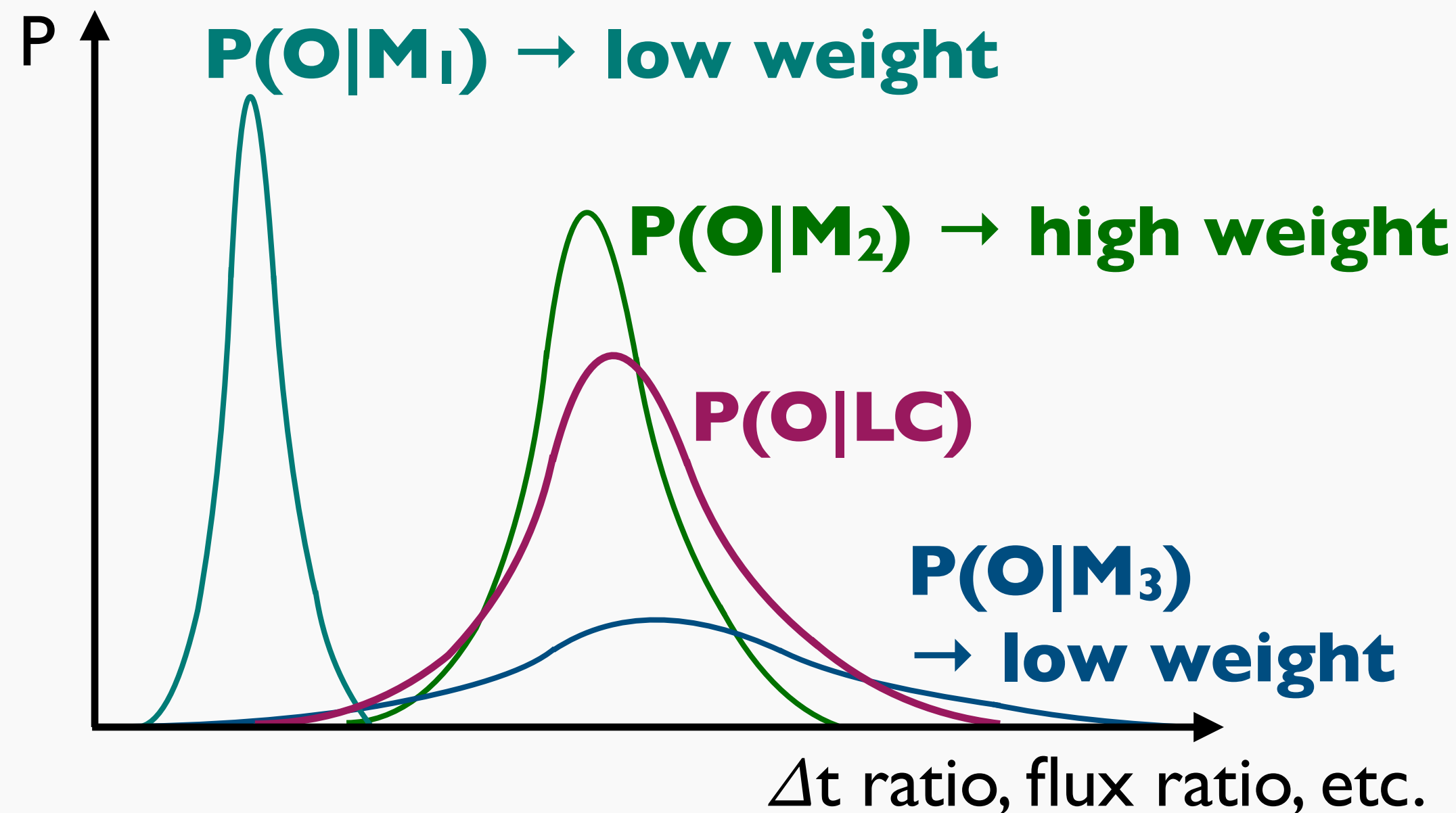
異なる質量密度モデルの重みづけ

$$P(H_0 | \underbrace{LC}_{\text{観測された光度曲線}}) \propto P(H_0) \sum_l \underbrace{P(M_l)}_{\text{質量密度モデル}} \int \underbrace{P(\mathcal{O} | M_l; H_0)}_{\text{観測量}} P(\mathcal{O} | LC) d\mathcal{O}_1 \dots d\mathcal{O}_n$$

{ SI-SX間の時間の遅れ
 フラックス比
 SXの位置

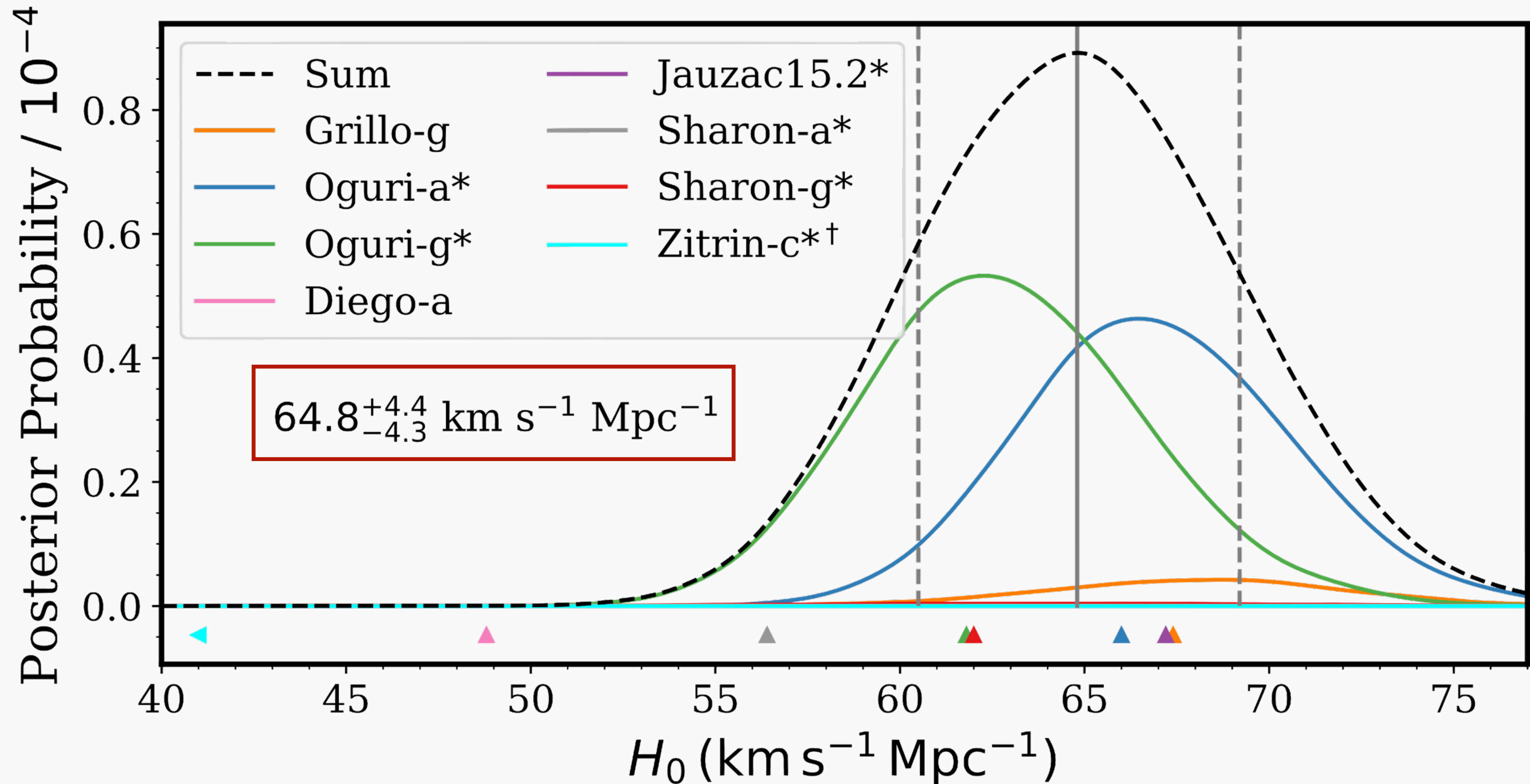


異なるモデルを, H_0 とは独立な観測量の予言精度で重みづけ



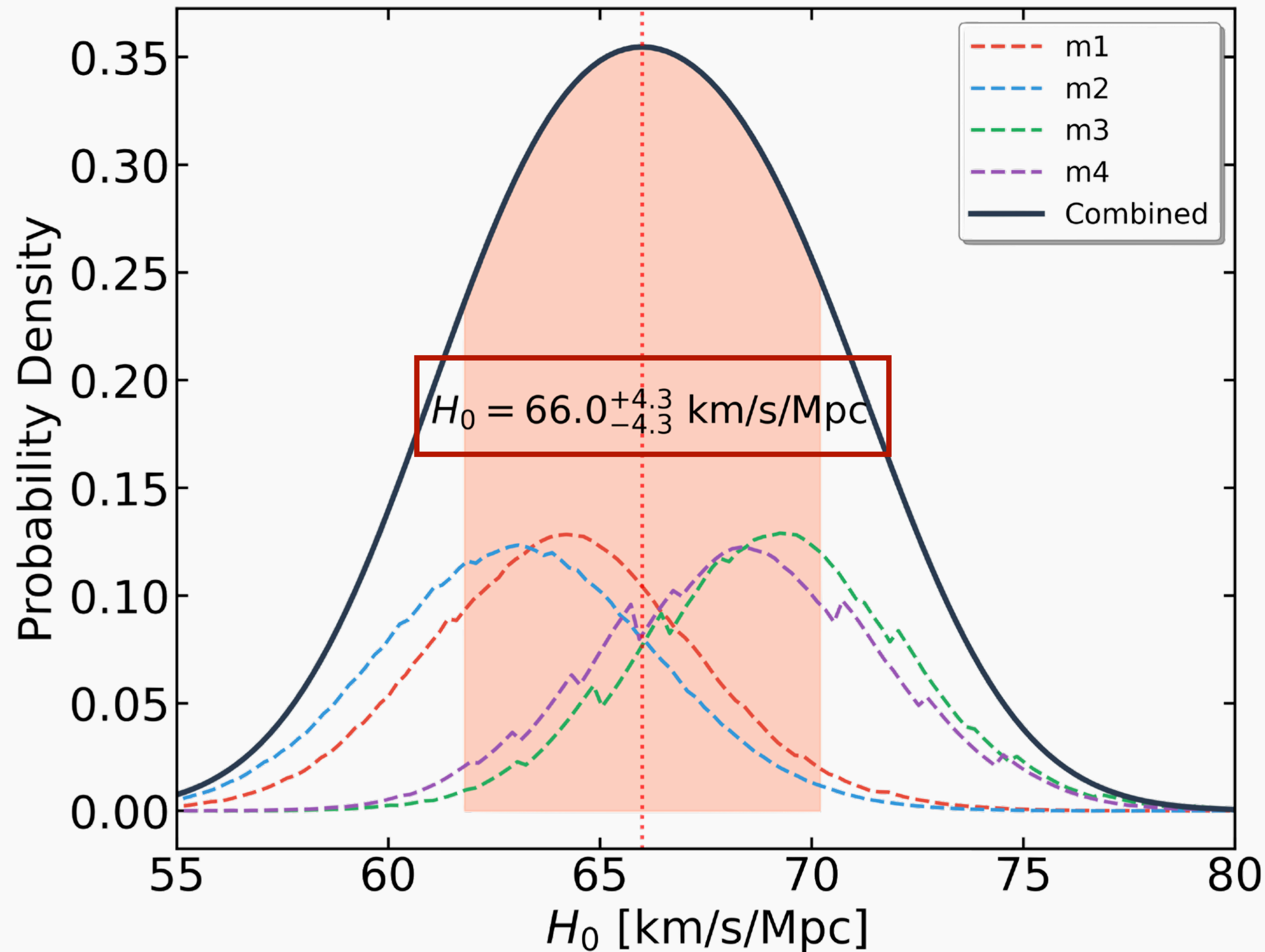


超新星重力レンズを用いた初の H_0 測定



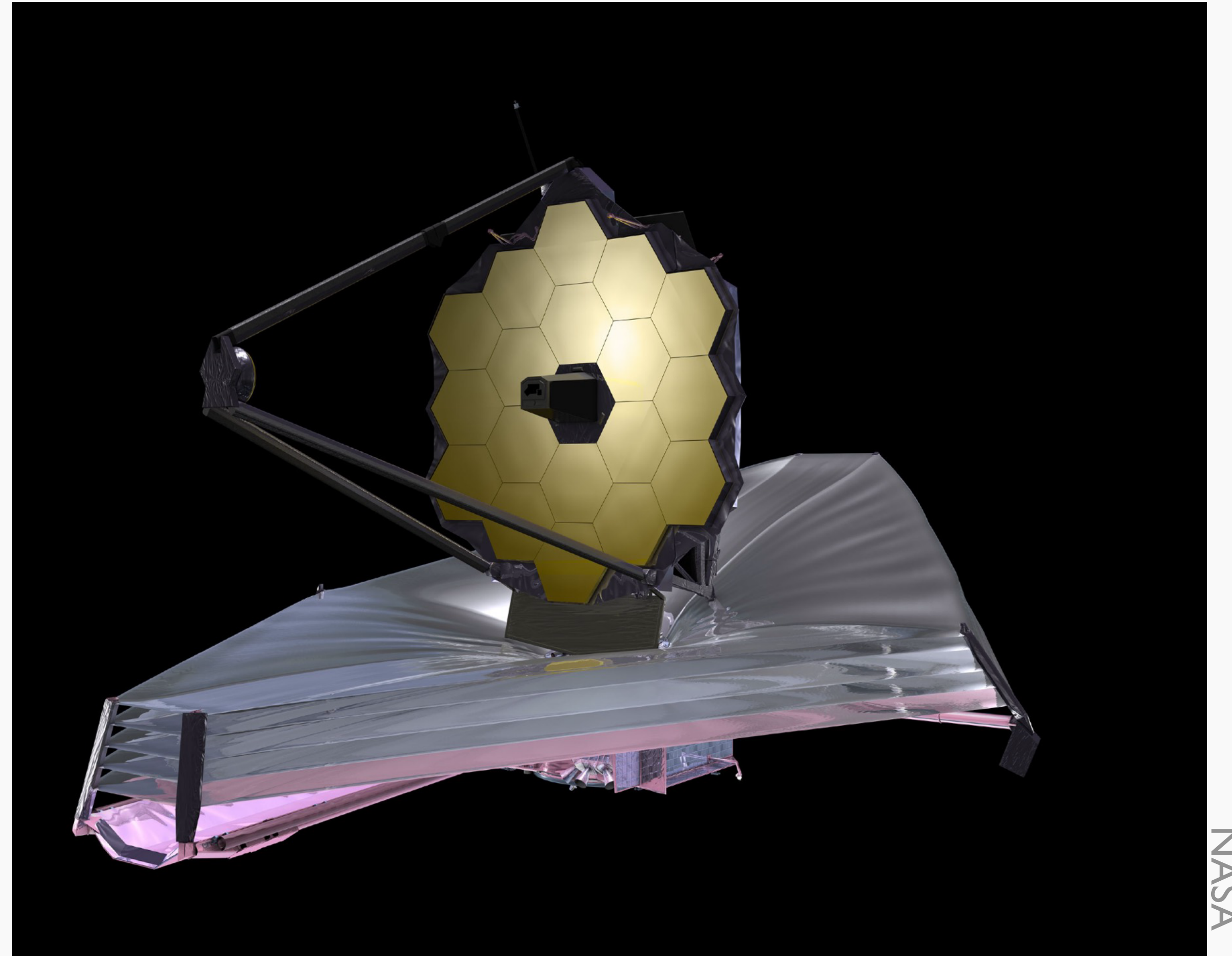


超新星Refsdalによる H_0 制限の改善



- MUSE, JWSTによる背景銀河複数像の分光赤方偏移追加 (37個の銀河の114個の複数像, 37個中27個の銀河の分光赤方偏移)
- 4つの異なる仮定の質量密度モデル (e.g., NFW vs. pseudo-Jaffe halo)
- H_0 の値はほとんど変化なし

観測の進展: ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

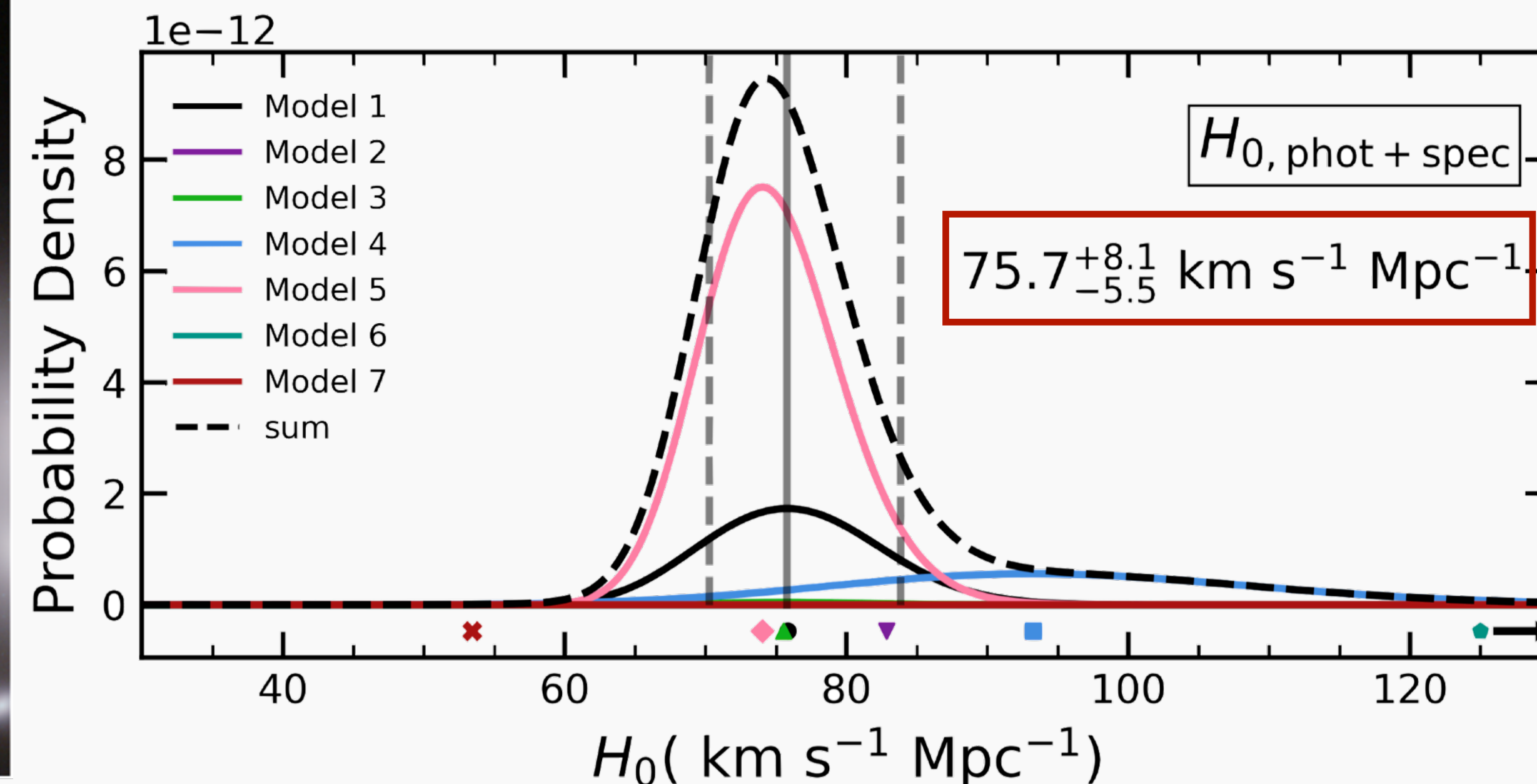
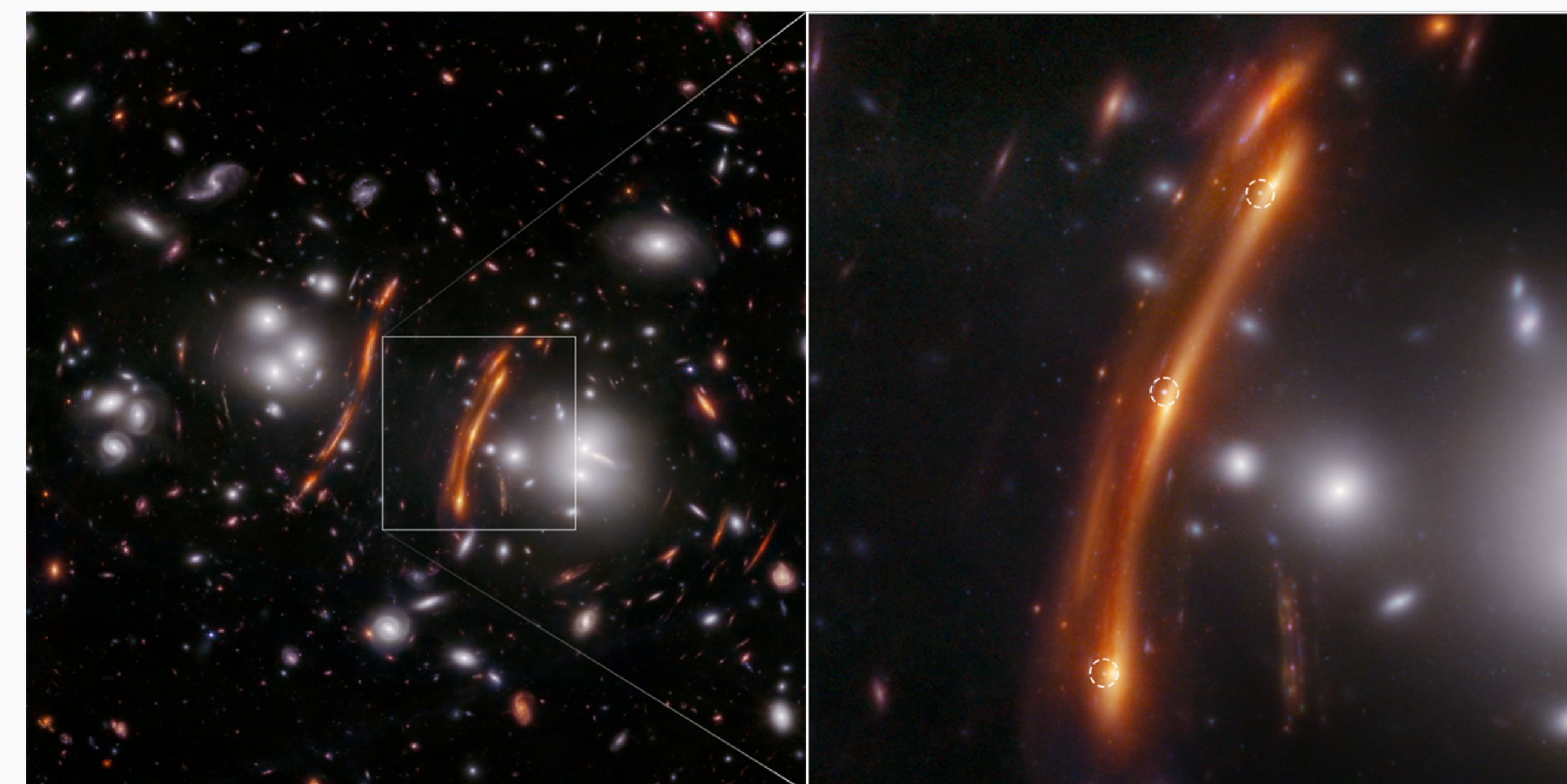


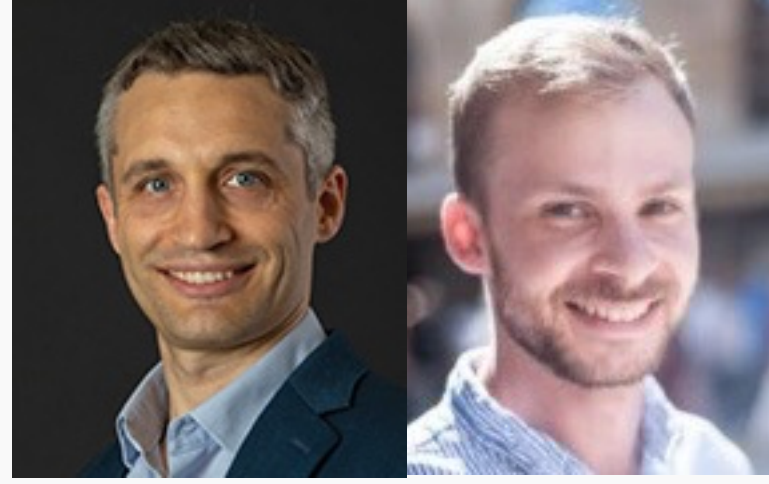
- 2021年12月に打ち上げ, 様々な分野で大きな進展



さらなる発見 (I) H_0 pe

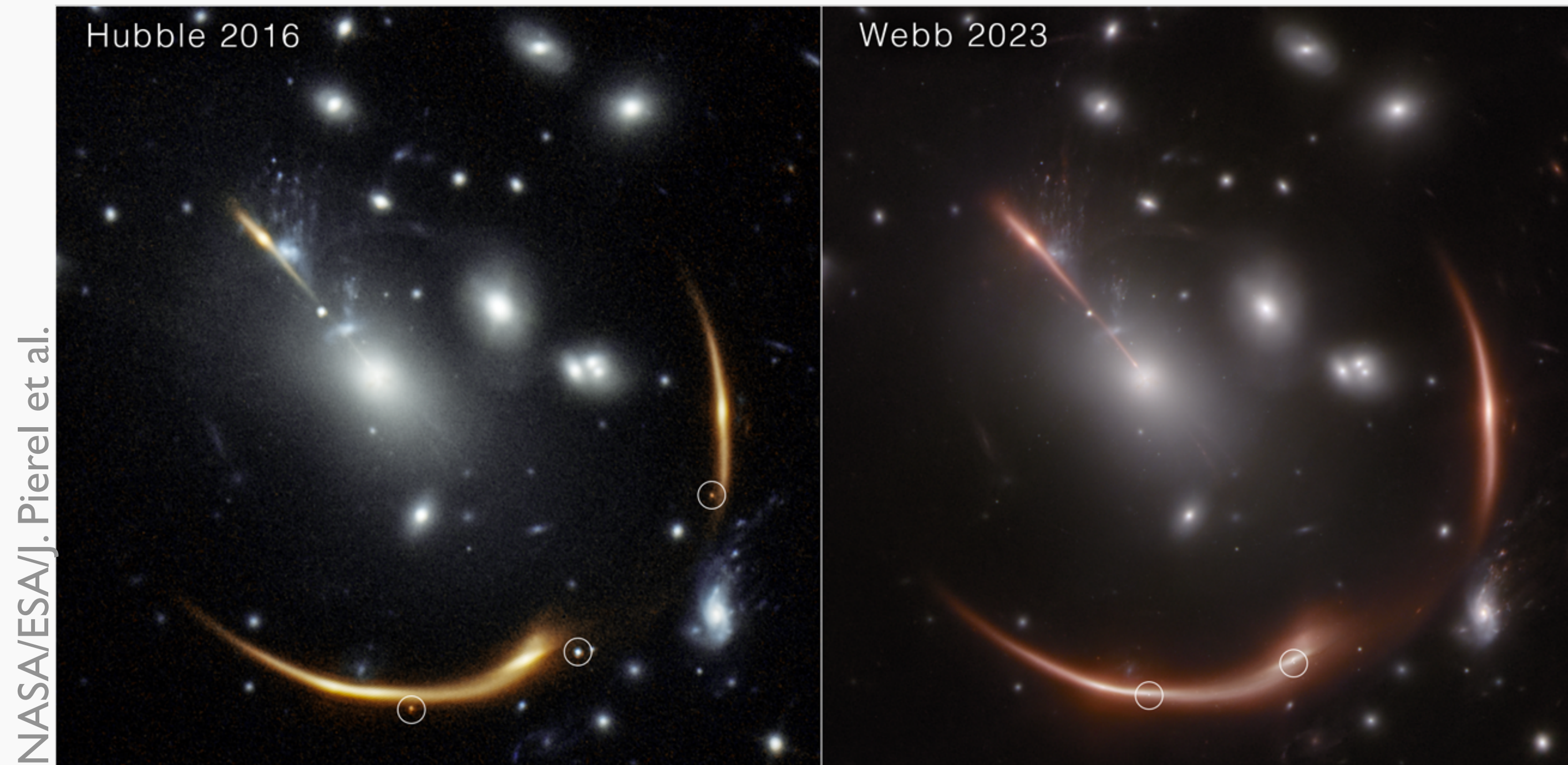
- 重力レンズされたIa型超新星 → 標準光源の性質により質量密度分布の縮退をやぶることができる MO & Kawano MNRAS **338**(2003)L25
- Δt の測定精度のため、 H_0 の誤差は比較的大きい





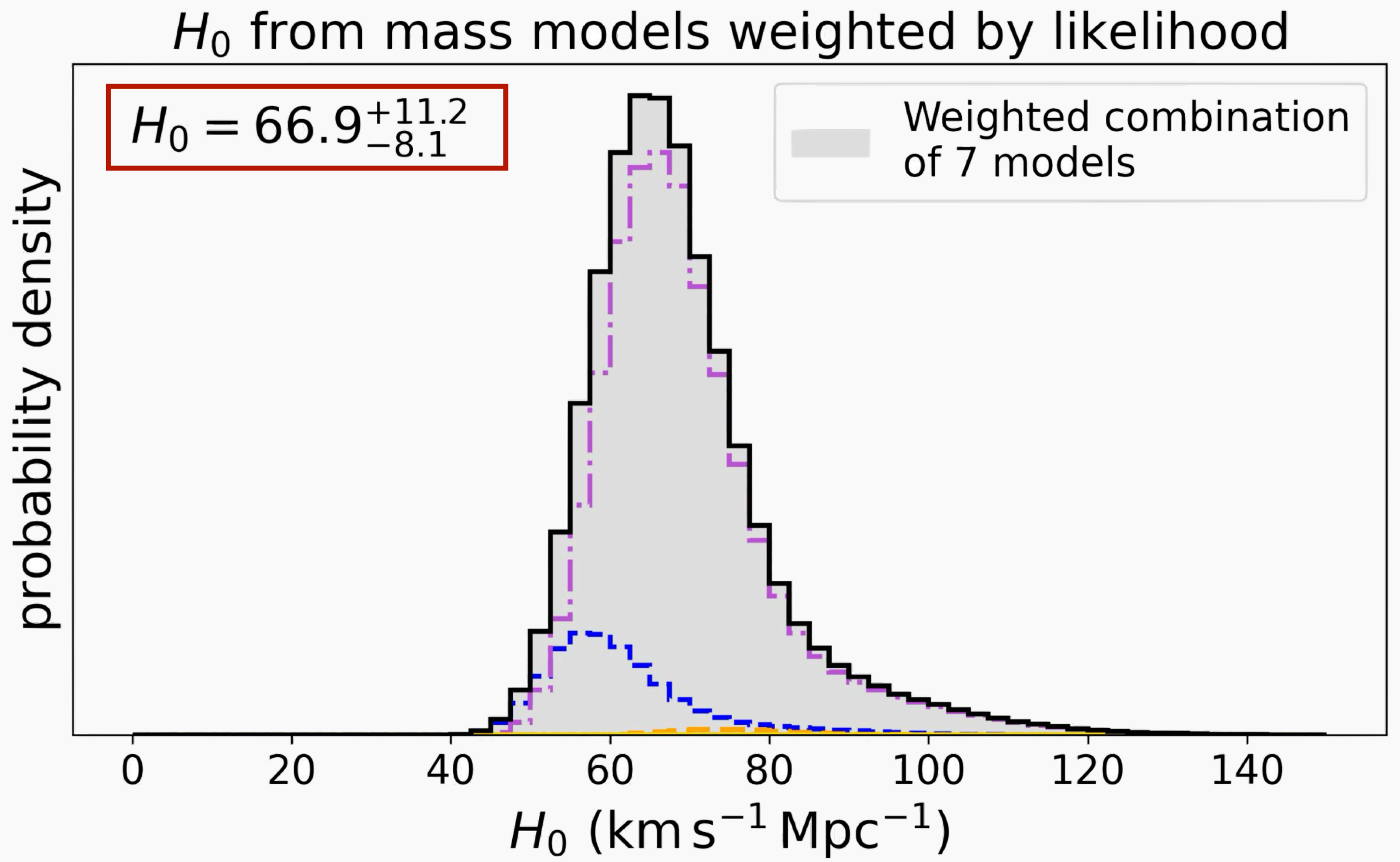
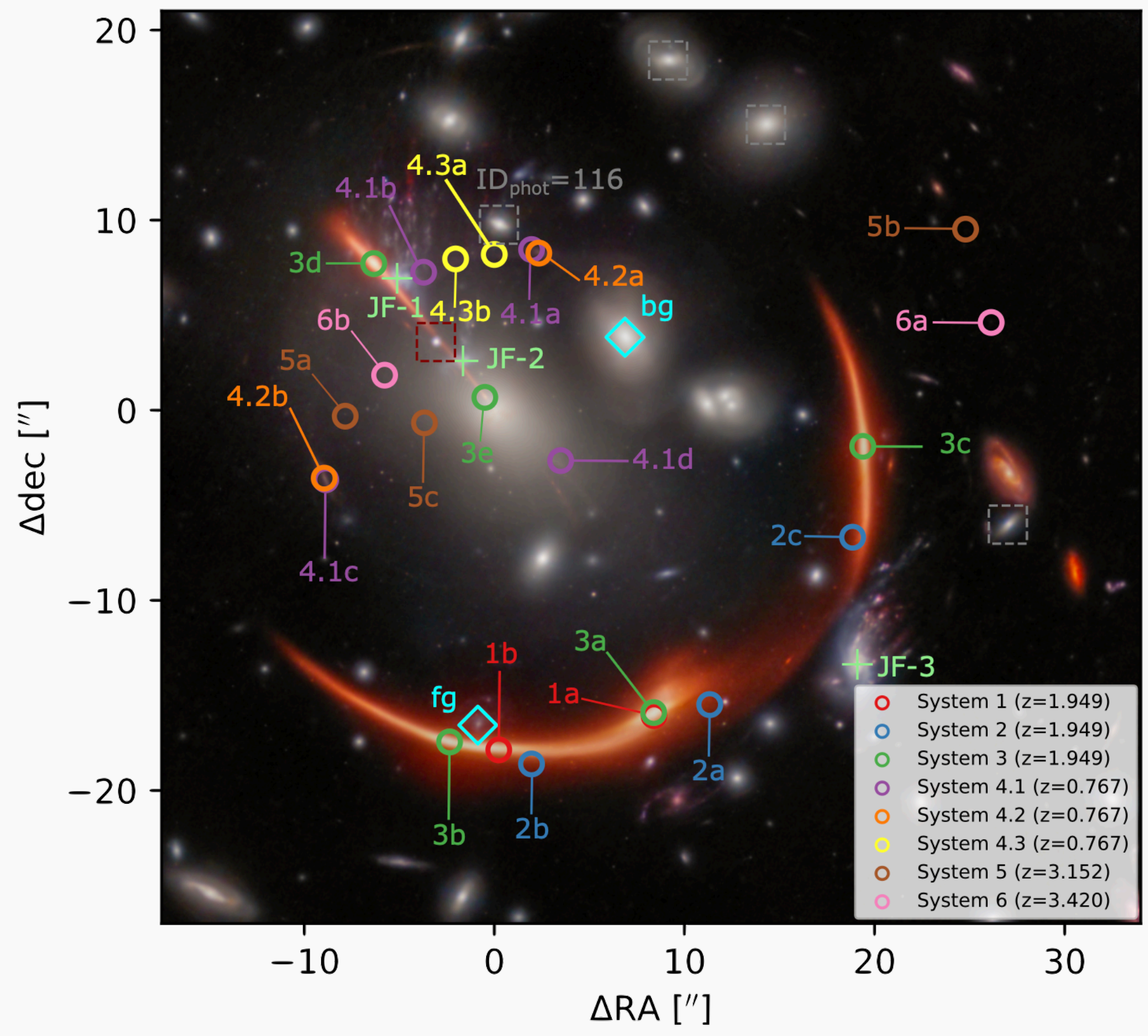
さらなる発見 (II) Requiem & Encore

- Ia型超新星重力レンズRequiemの発見, Δt の測定なし
Rodney+ Nature Astronomy **5**(2021)1118
- JWSTでもう一つのIa型超新星重力レンズEncoreの発見
Pierel+ ApJ **967**(2024)L37





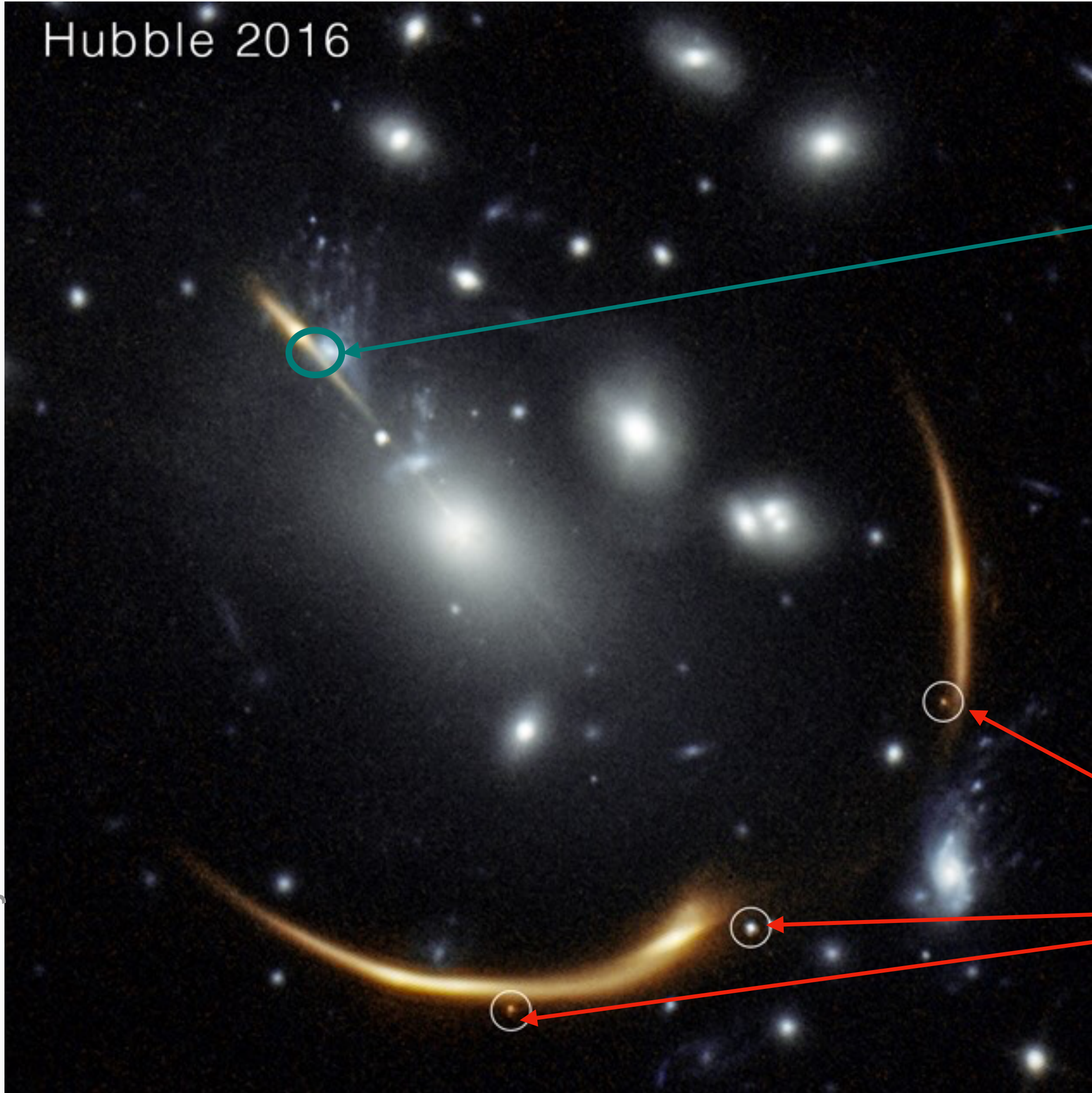
超新星重力レンズEncoreによるH₀測定



- Δ*t*の測定誤差を反映し比較的大きなH₀の誤差, しかし...



Requiemの再出現



最新の質量密度モデルで2026-2027年の複数像の出現が予言

➡ <3%の精度の H_0 測定

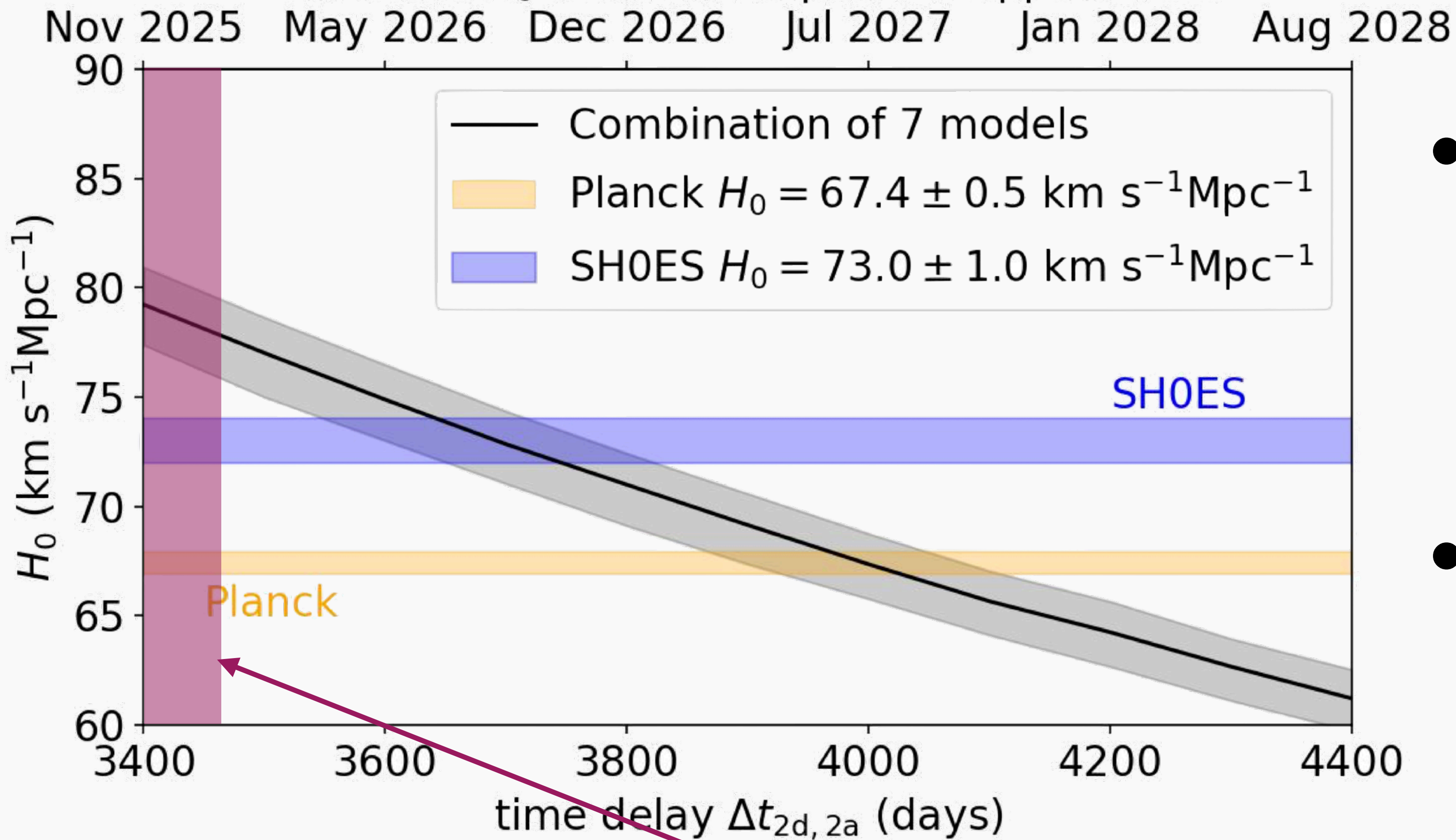
2016年に観測された3つの複数像

Rodney+ Nature Astronomy **5**(2021)1118

NASA/ESA/J. Pierel et al.

Requiemの再出現観測キャンペーン

Forecast: H_0 from SN Requiem reappearance

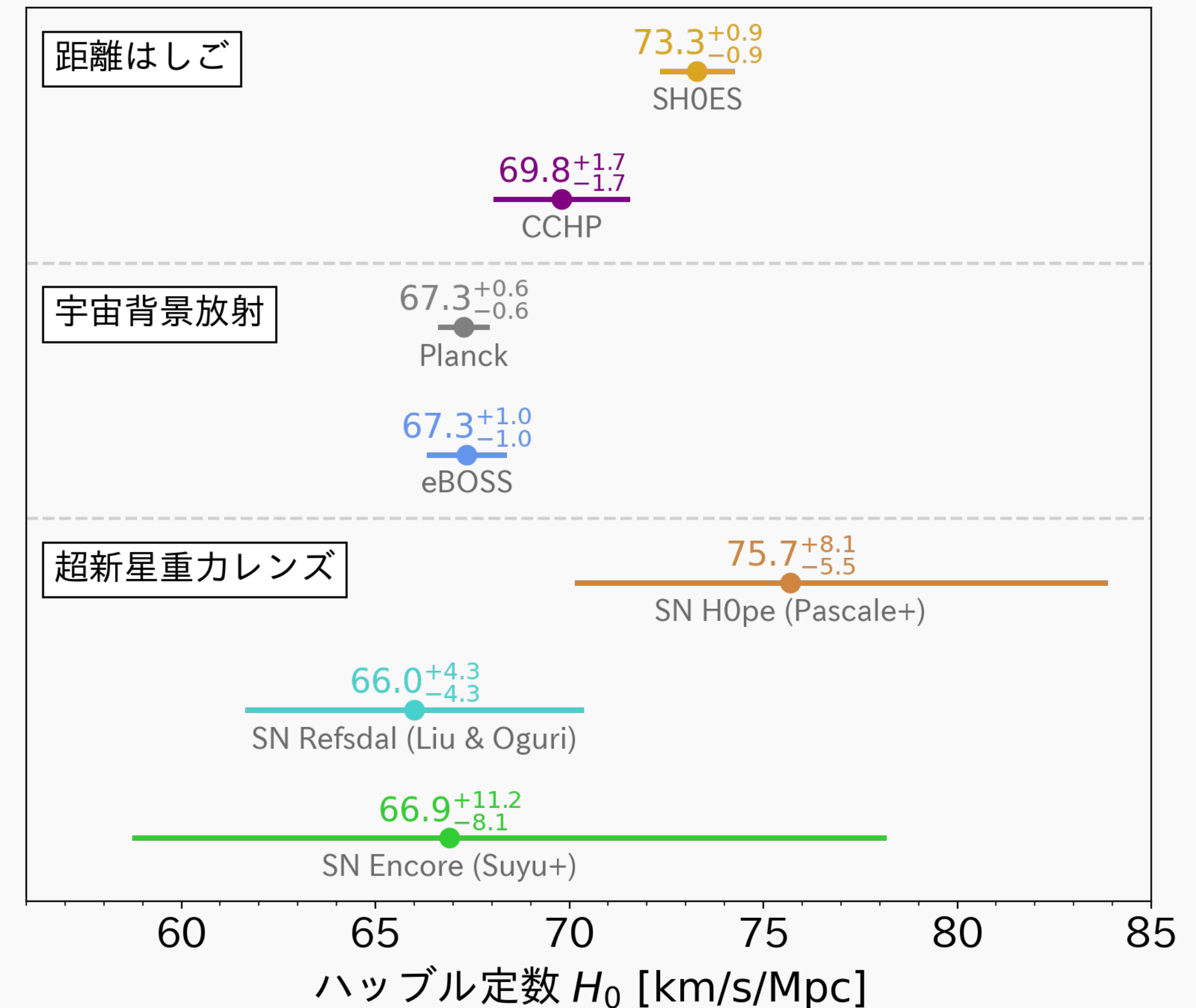


- JWST+ハッブル望遠鏡で再出現をとらえるモニタ観測中 (GO-9330, PI: Pierel)
- 乞うご期待!

Suyu+ (incl. MO) A&A **708**(2026)A291 2026年1月までの観測での未発見により排除

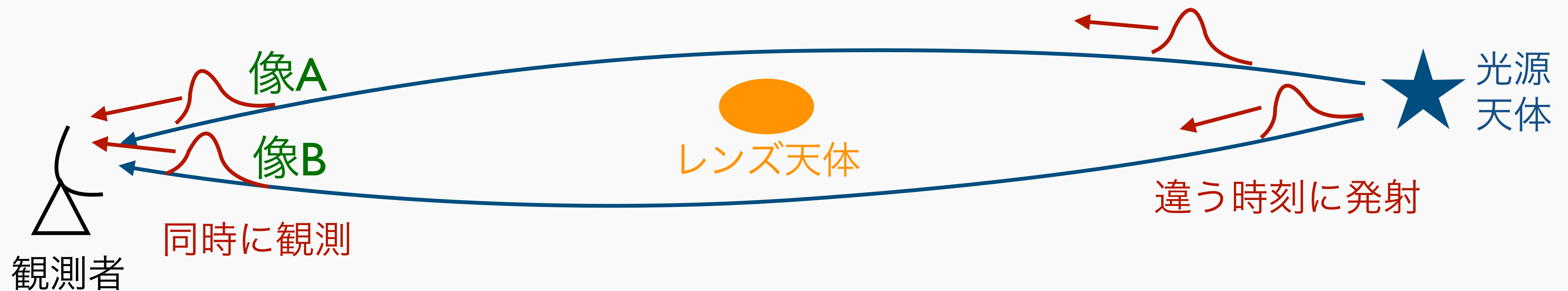
時間の遅れによる H_0 測定：まとめ

- 重力レンズ超新星が有力な H_0 測定手法として急速に注目されている
- 現状3つの系での測定
- 次の重大イベント：Requiem再出現の観測



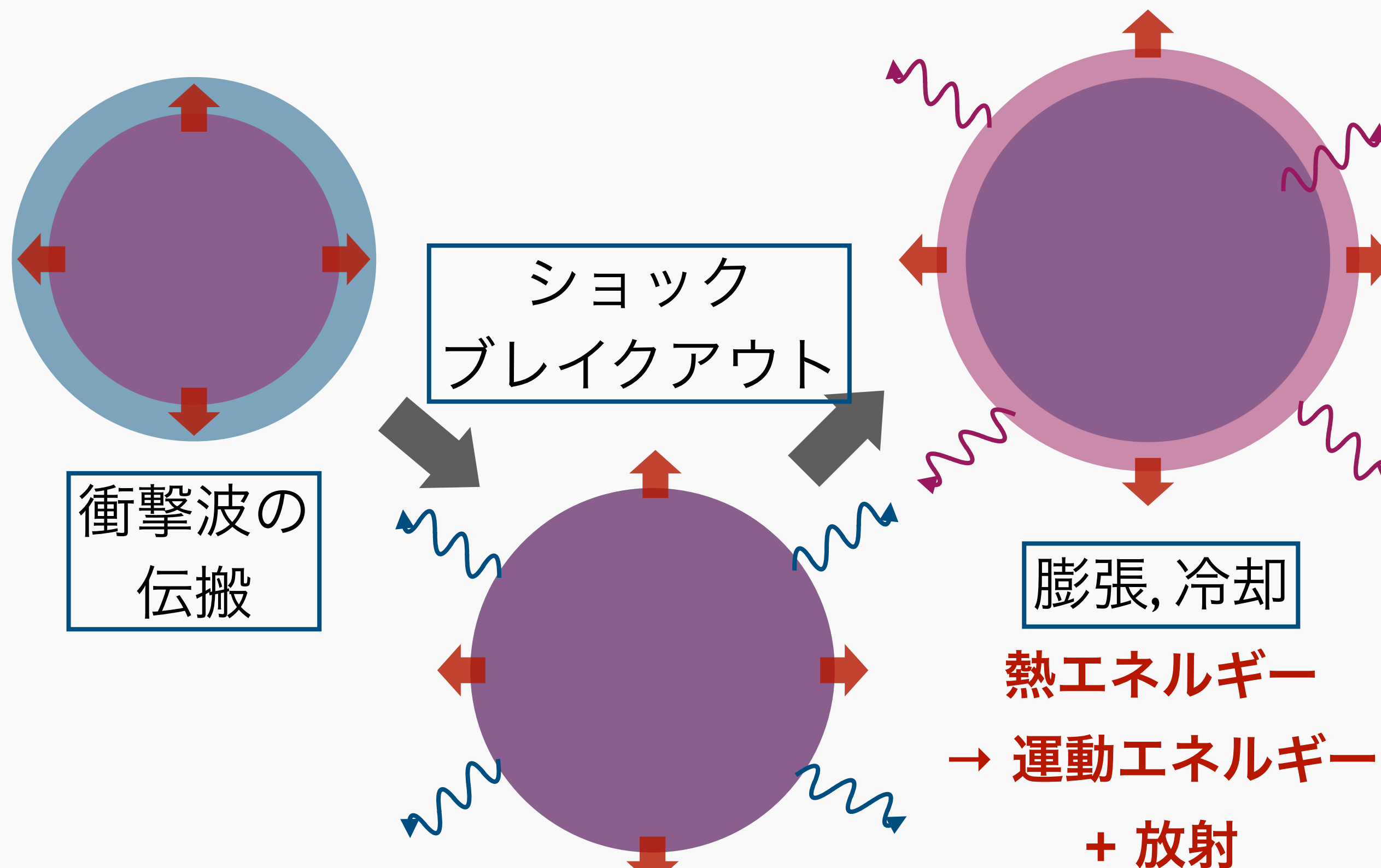
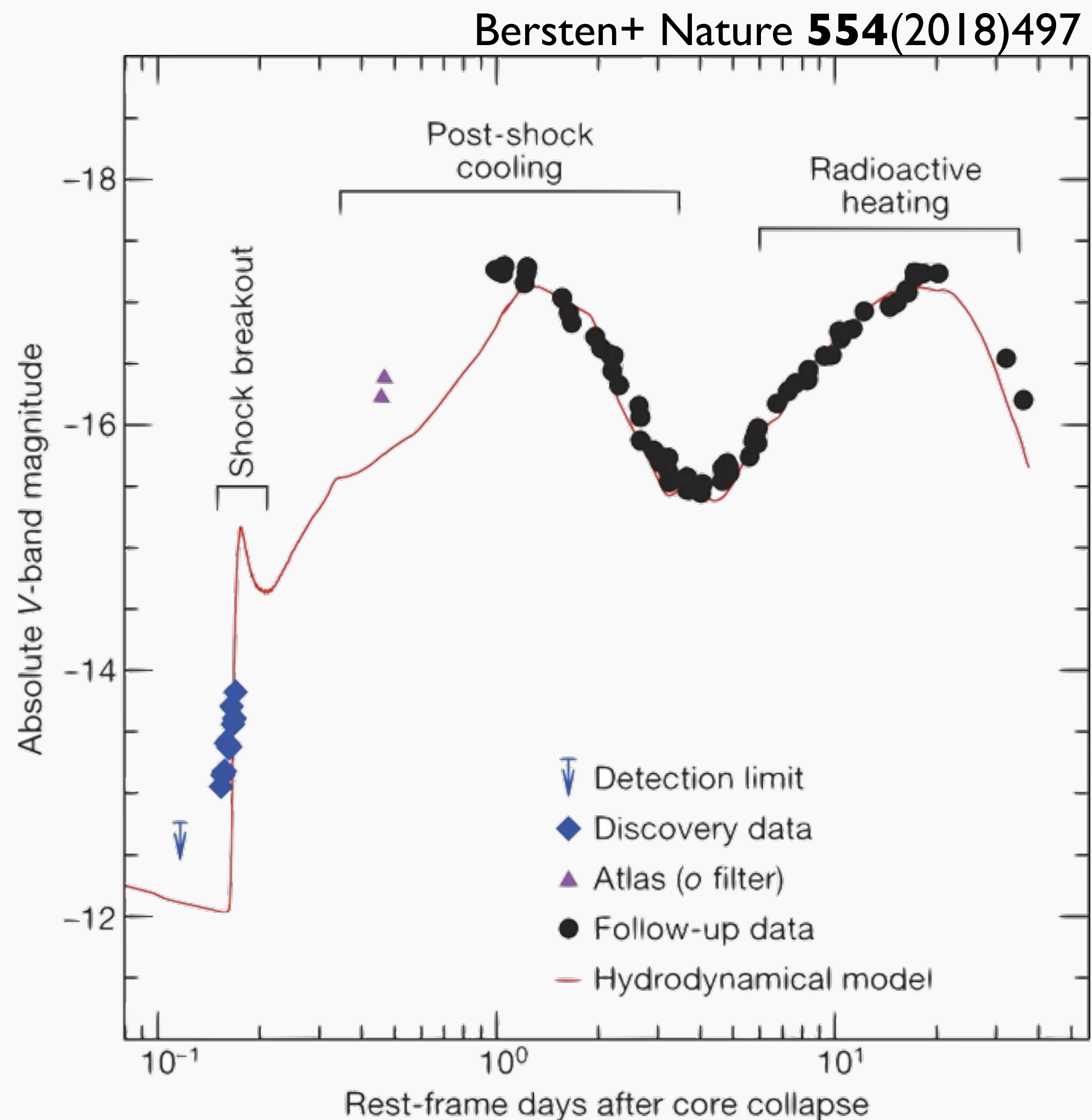
時間の遅れで調べる光源天体の時間変動

- ある時刻に観測される複数像は, それぞれ**違う時刻**に光源から発射された光を観測している



- 光源の時間変動によって観測される像は異なって見える

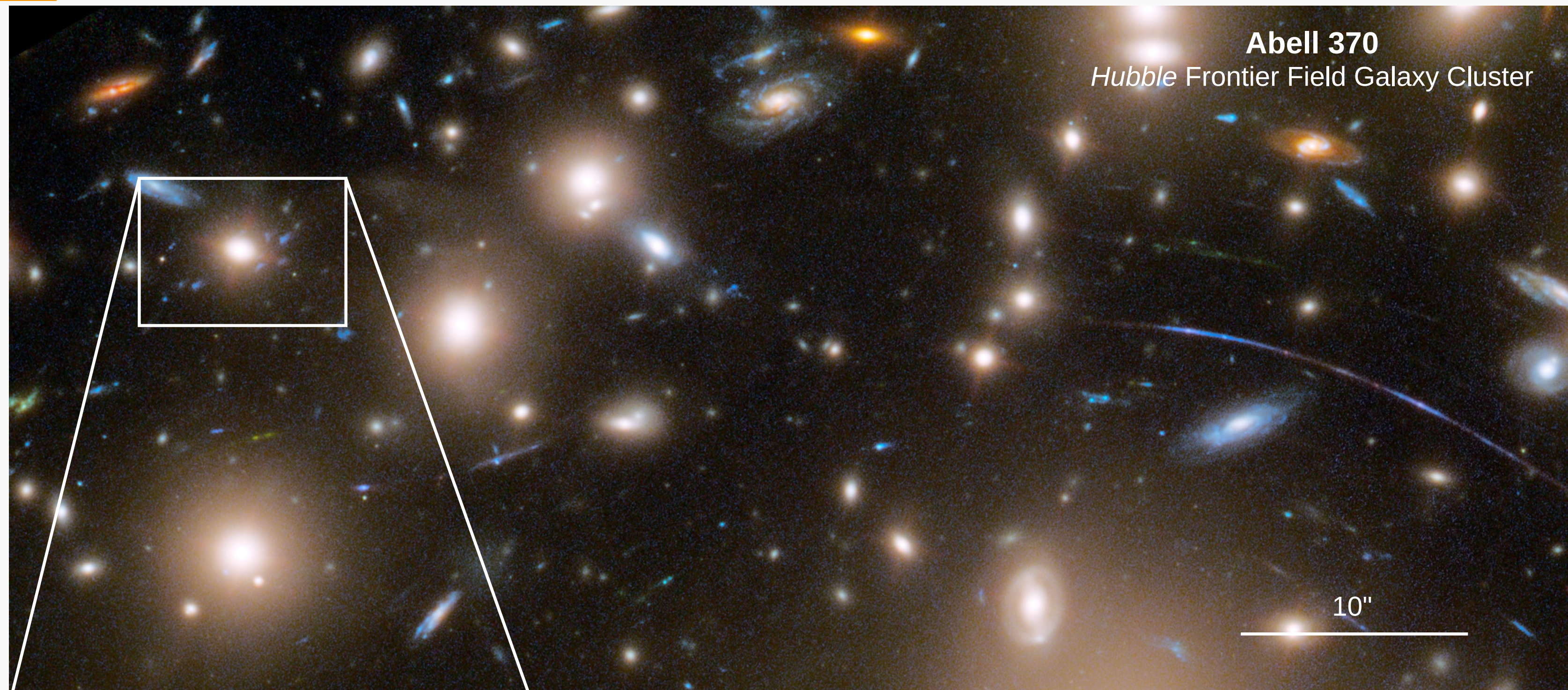
超新星の初期光度曲線



親星の大きさの情報を含んでいる



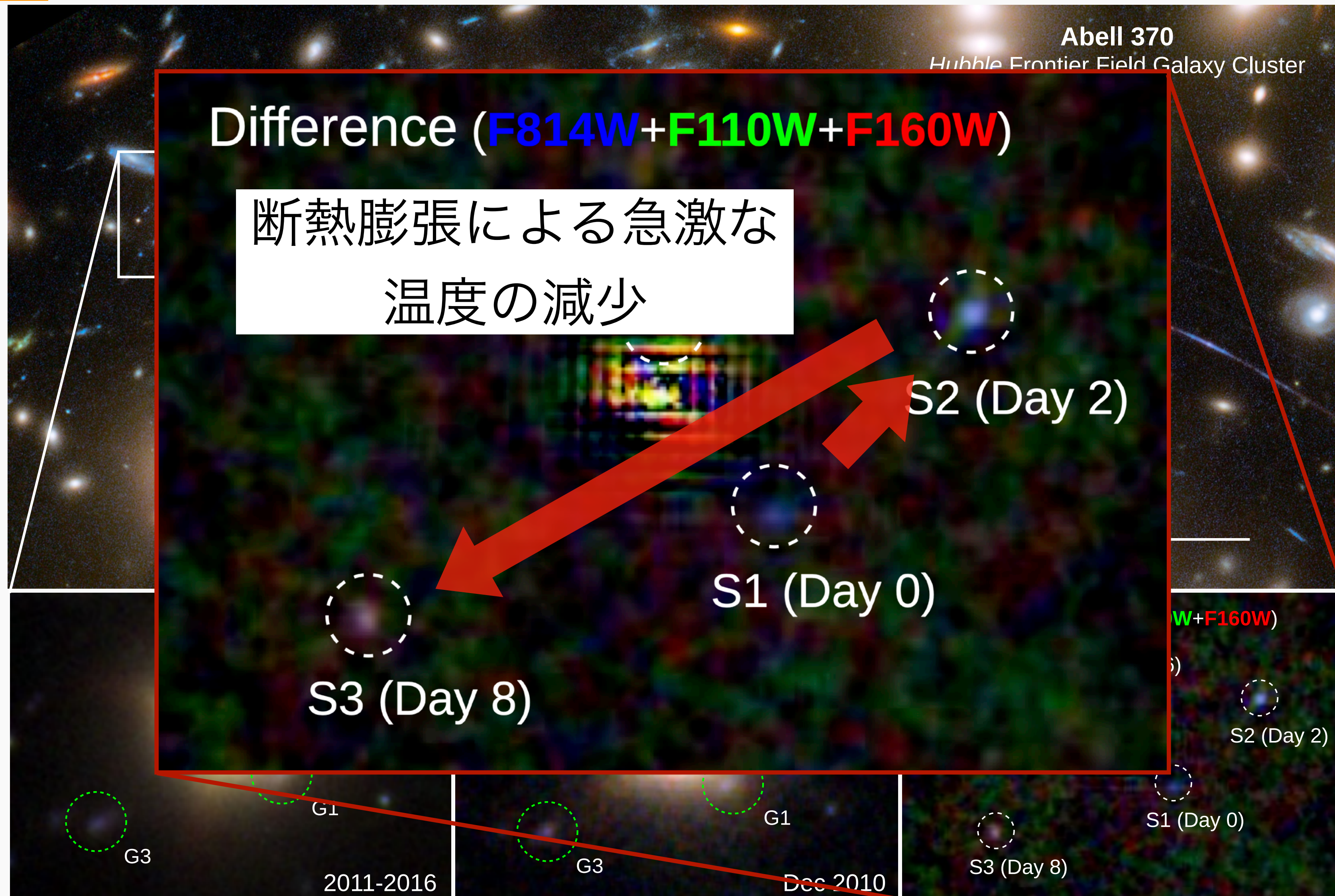
重力レンズで調べる超新星の初期光度曲線



- ハッブル望遠鏡アーカイブ画像で発見した赤方偏移3の三重像重力レンズ
- 複数像間の色の違いが顕著にみられる



重力レンズで調べる超新星の初期光度曲線

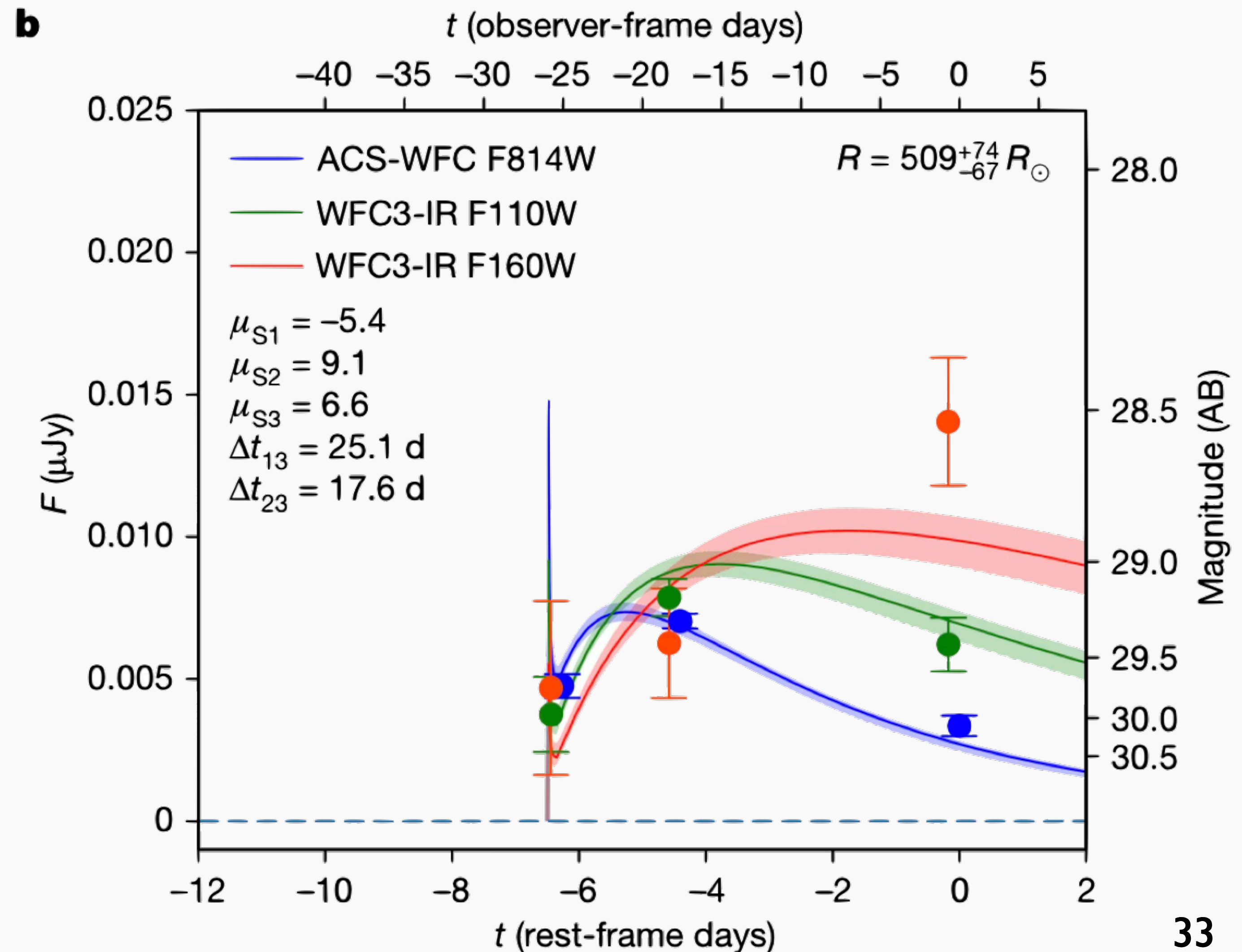


- ハッブル望遠鏡アーカイブ画像で発見した赤方偏移3の三重像重力レンズ
- 複数像間の色の違いが顕著にみられる



光度曲線の再構築

- 質量密度モデルから計算された時間の遅れと増光率を使い**単一時刻の観測データ**から光度曲線を再構築できる
- 理論モデルとの比較から親星は赤色超巨星でその半径の制限を得た



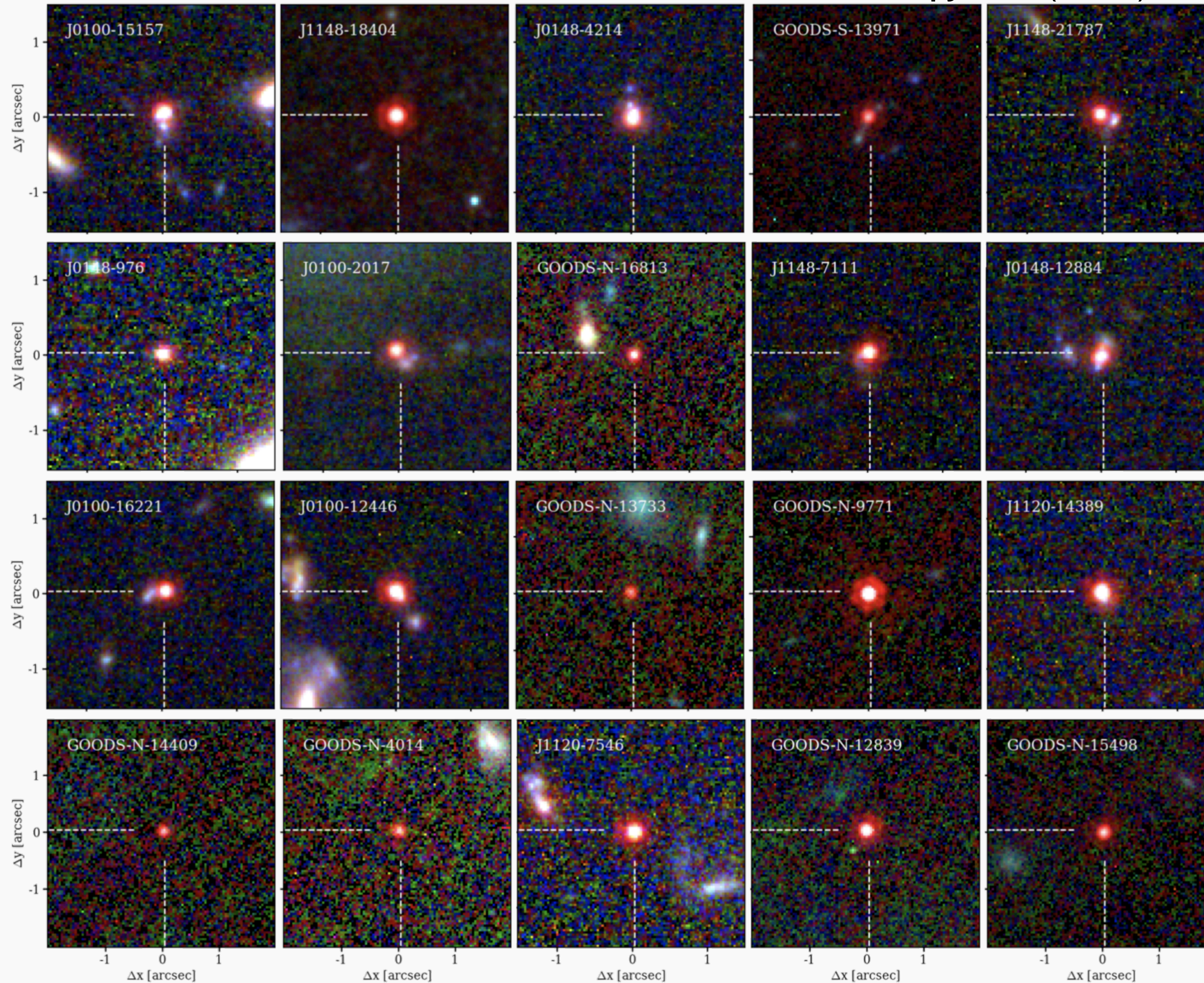
追観測による超新星の初期放射検出

- 質量密度モデルから新しい複数像の出現場所, 出現時期が
予言できる
- H_0 の文脈ではRefsdal, Requiemで既に行われている
- 出現時期を狙った詳細追観測で超新星の初期放射を詳しく
調べることもできるだろう

(e.g., Oguri+2003; Suwa 2018; Foxley-Marrable+2020; ...)

Little red dot (LRD)

Matthee+ ApJ **963**(2024) 129



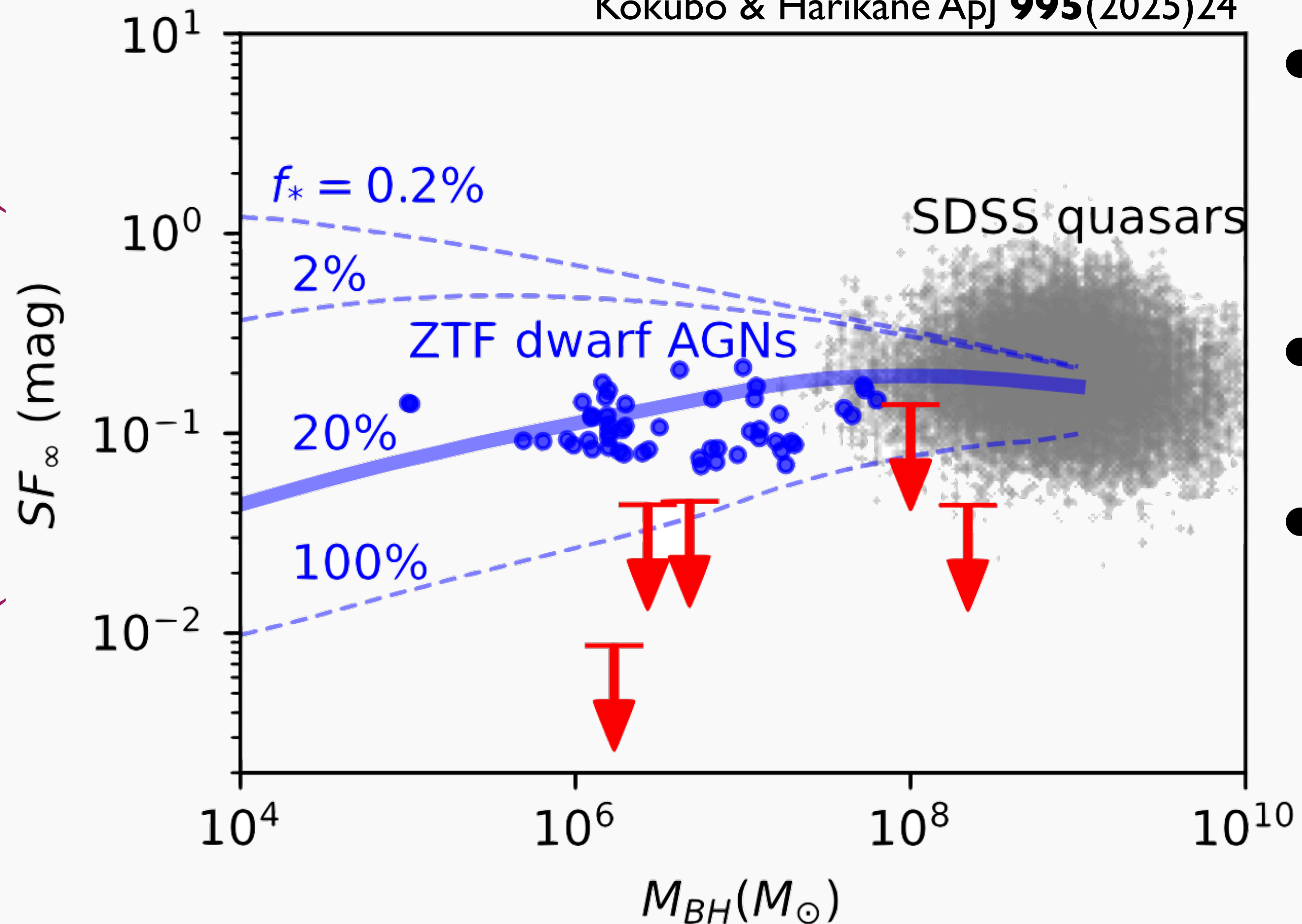
- 高赤方偏移低光度クエーサーのようなものがJWSTで多数発見される
- 赤い, コンパクト, 広輝線
- 超大質量ブラックホール??

(e.g., Kocevski+2023; Harikane+2023; Maiolino+2023; Greene+2024; Matthee+2024; ...)

LRDの時間変動？

構造関数 (structure function) の大きさ

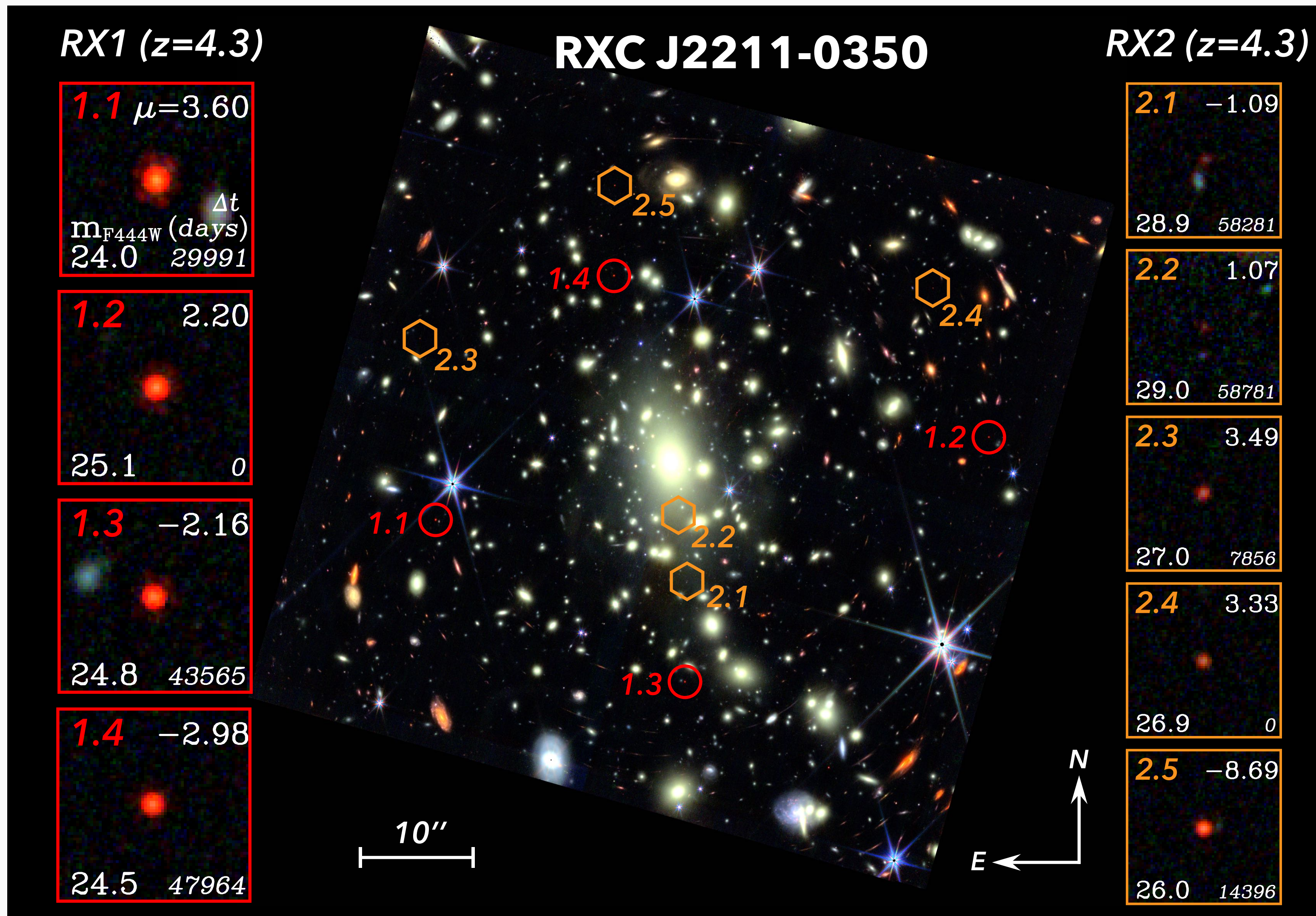
Kokubo & Harikane ApJ **995**(2025)24



- クエーサーと異なり有意な時間変動は観測されない
- X線, 電波, 遠赤外も弱い
- 時間変動の検出がその理解に重要



重力レンズLRDの発見



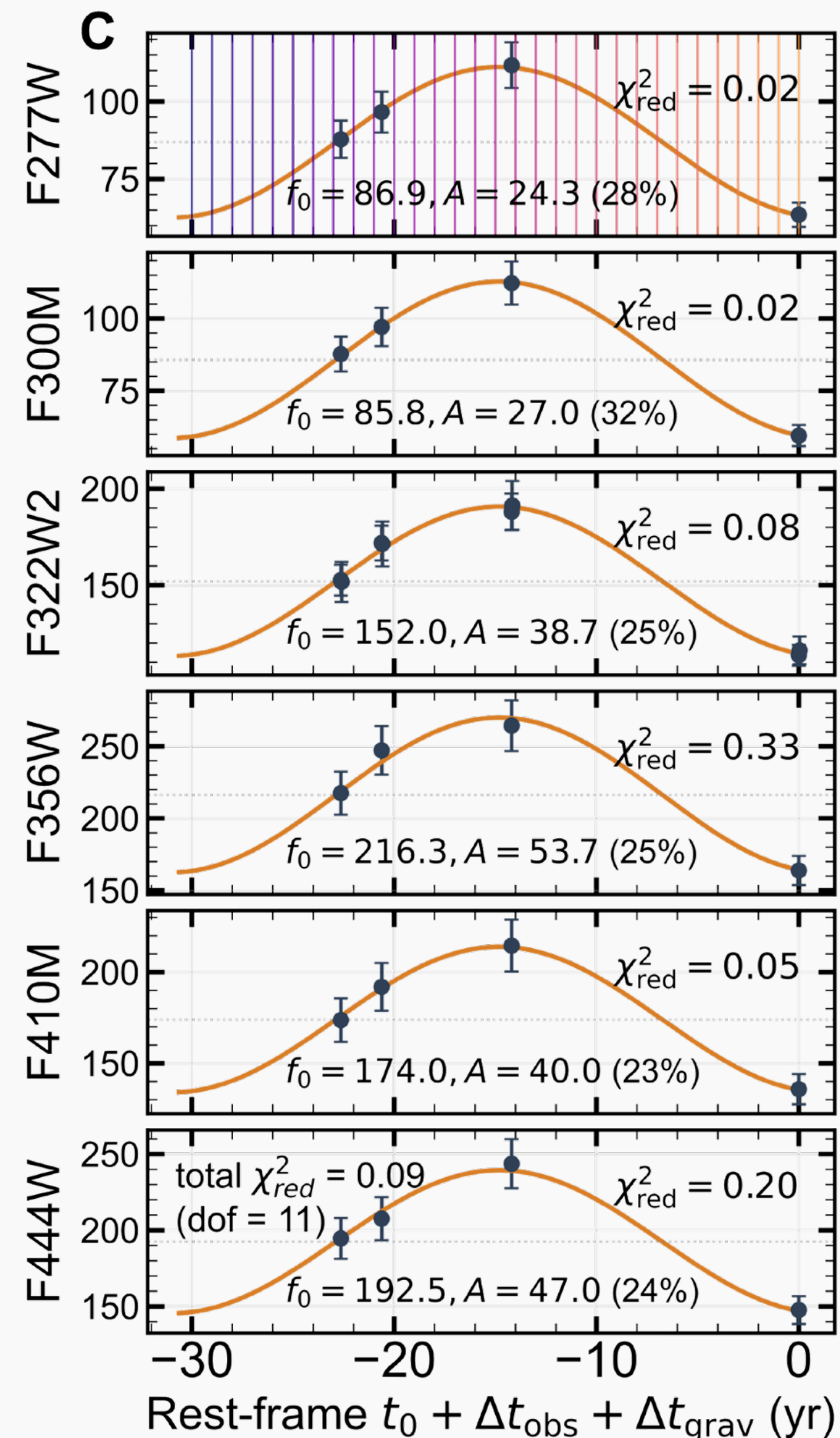
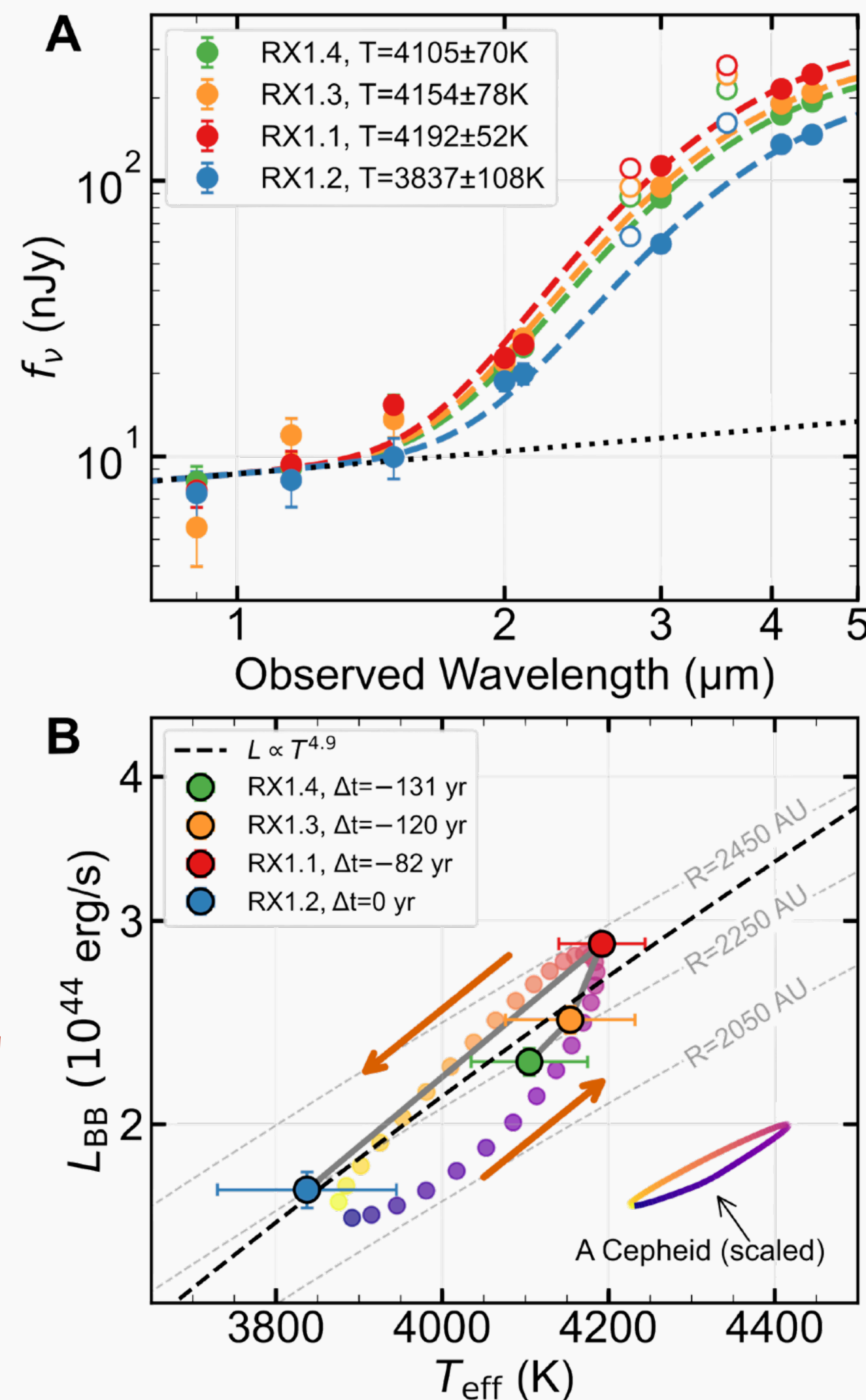
- 赤方偏移4.3の四重像と五重像LRDをJWST観測で発見
- 銀河団重力レンズ
- 時間の遅れは~100年



時間変動の検出

光度と色が
両方時間変動

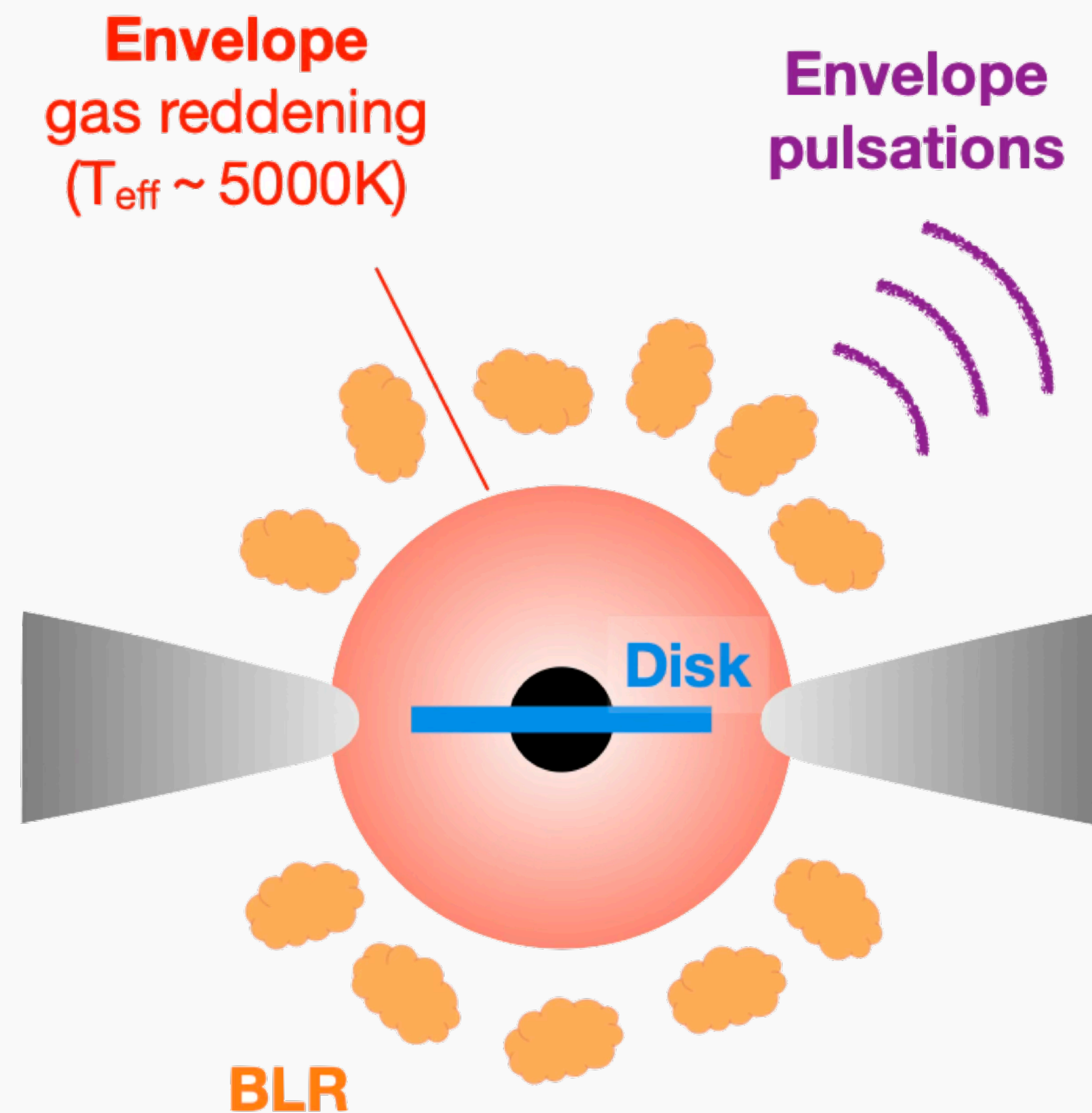
星の脈動と
同様の時間変動



LRD静止系で
~23年の
光度曲線

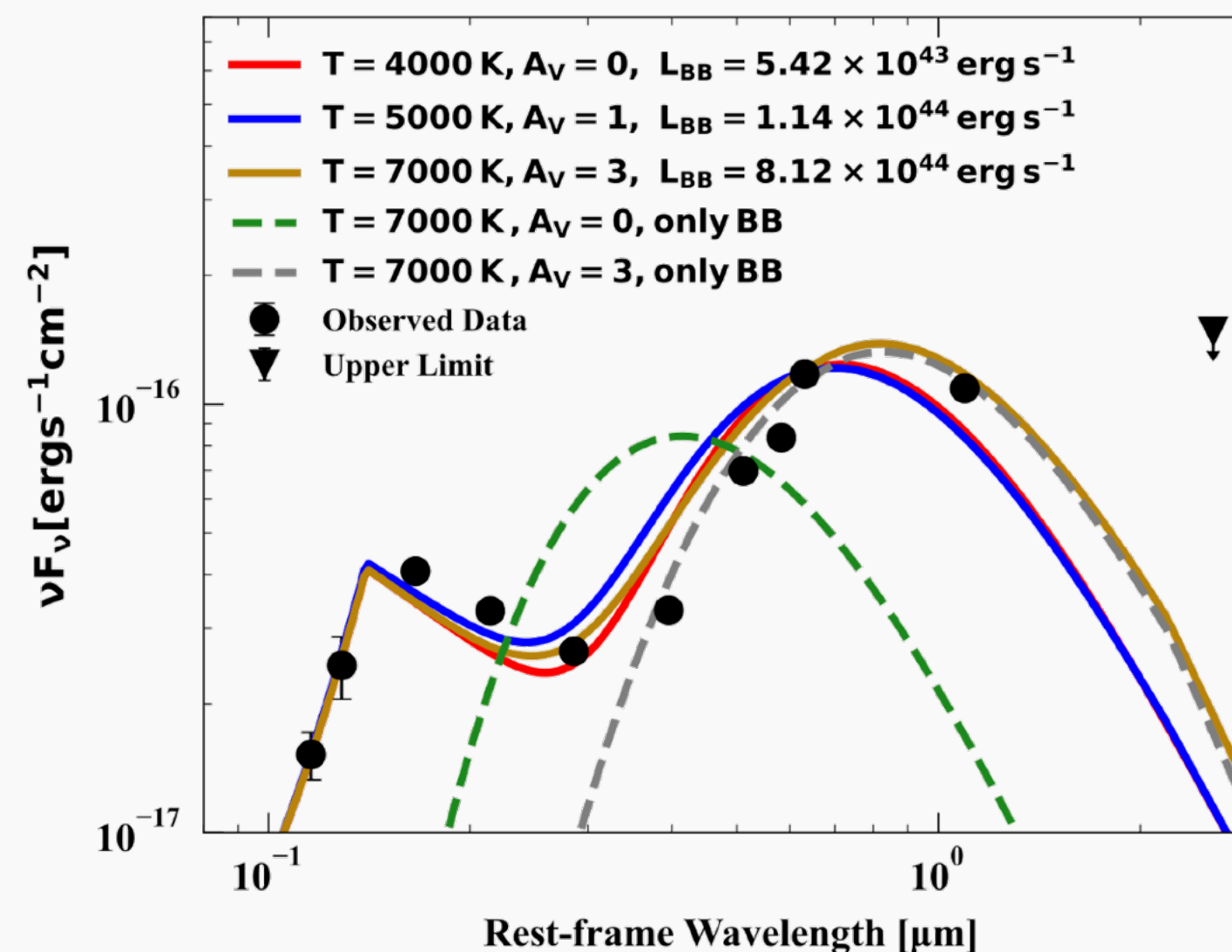
Black-hole envelope?

Gas-enshrouded BH



(K. Inayoshi)

- 時間変動はブラックホール+エンベロープモデルと無矛盾
(e.g., Kido+2025; Begelman & Dexter 2026; ...)
- LRDの赤い放射は黒体放射 (T~5000K)



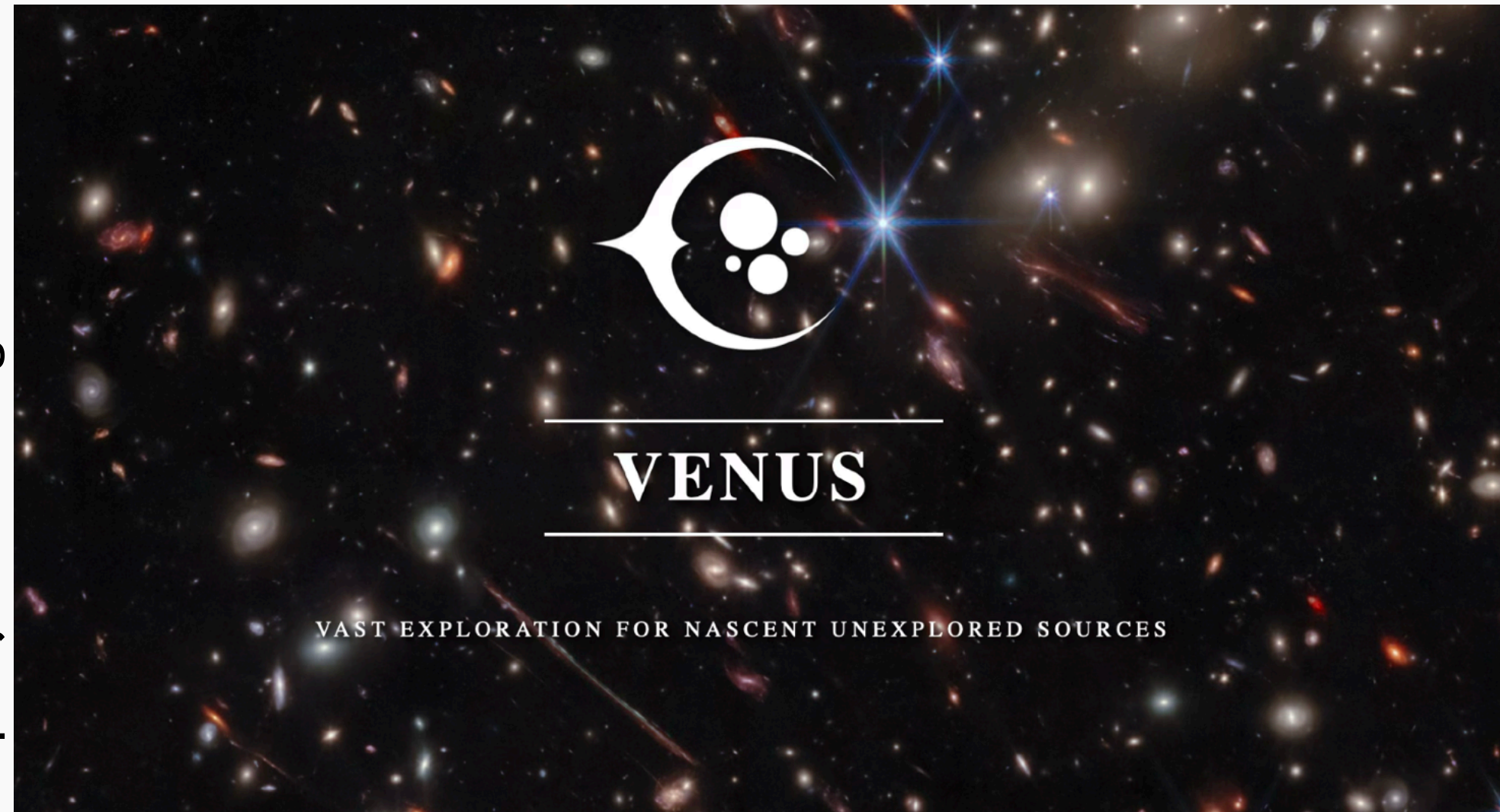
Kido+ MNRAS **544**(2025)3407

時間の遅れを用いた宇宙物理学：まとめ

- 時間の遅れを用いて光源天体の時間変動を調べられる
- 単一時刻観測から光度曲線の再構築が可能
- 非常に長い時間スケールの時間変動を調べることが可能

将来の展望 (I) JWST

<https://jwst-venus.github.io/>



Fudamoto+ (incl. MO)
Nature Astronomy 9(2025)428



JWST-VENUS (PI: S. Fujimoto)
60個の銀河団の詳細観測

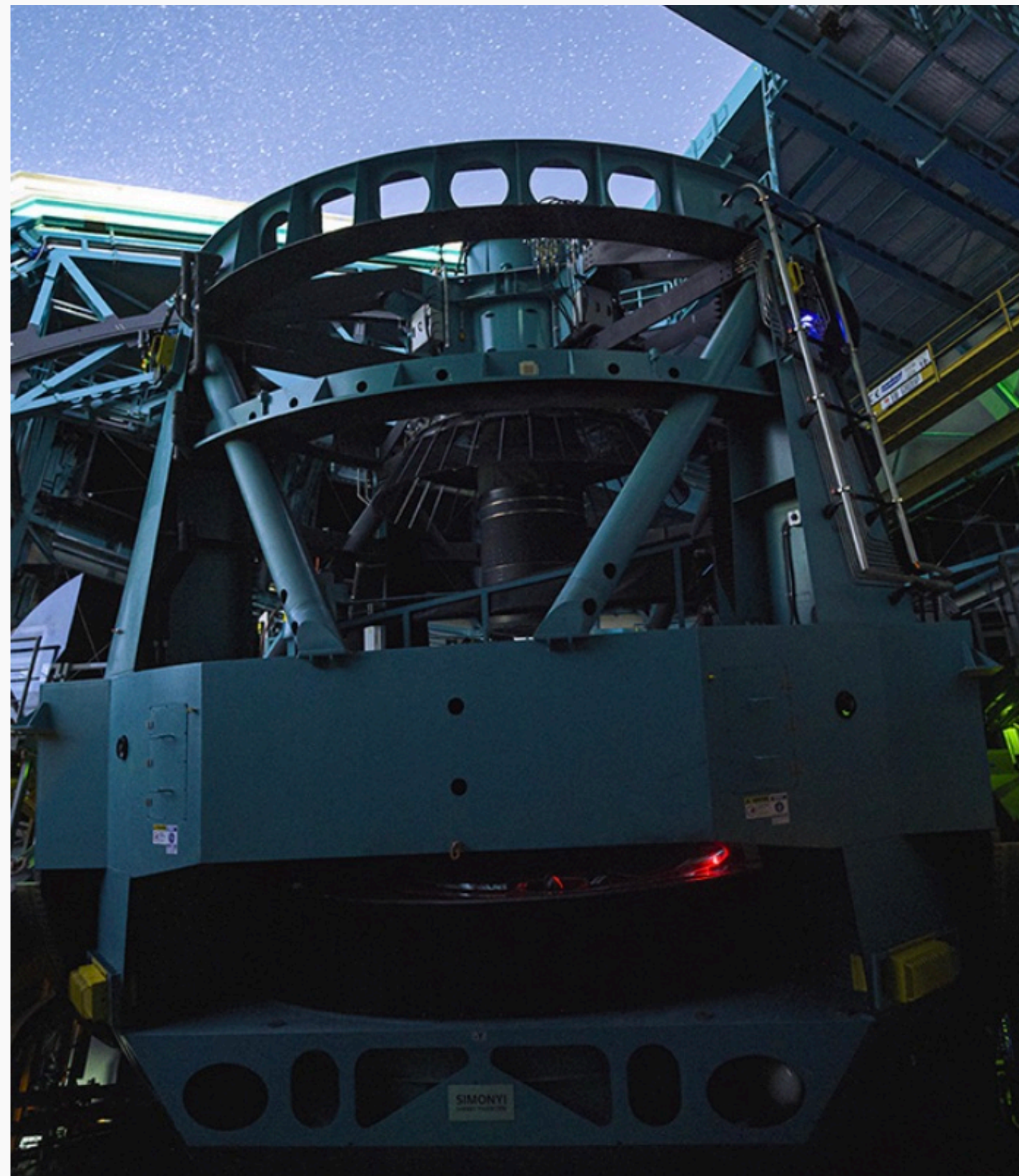


Dragon Survey (PI: Y. Fudamoto)
Abell 370のモニタ観測

今後さらなる時間変動重力レンズの発見が期待される!

将来の展望 (II) Rubin天文台/LSST

- 2026年にメインサーベイ観測開始
- 観測可能な全ての空を数日おきに観測
- 時間の遅れの応用研究にも革新



RubinObs/NSF/DOE/NOIRLab/
SLAC/AURA/Hernan Stockebrand

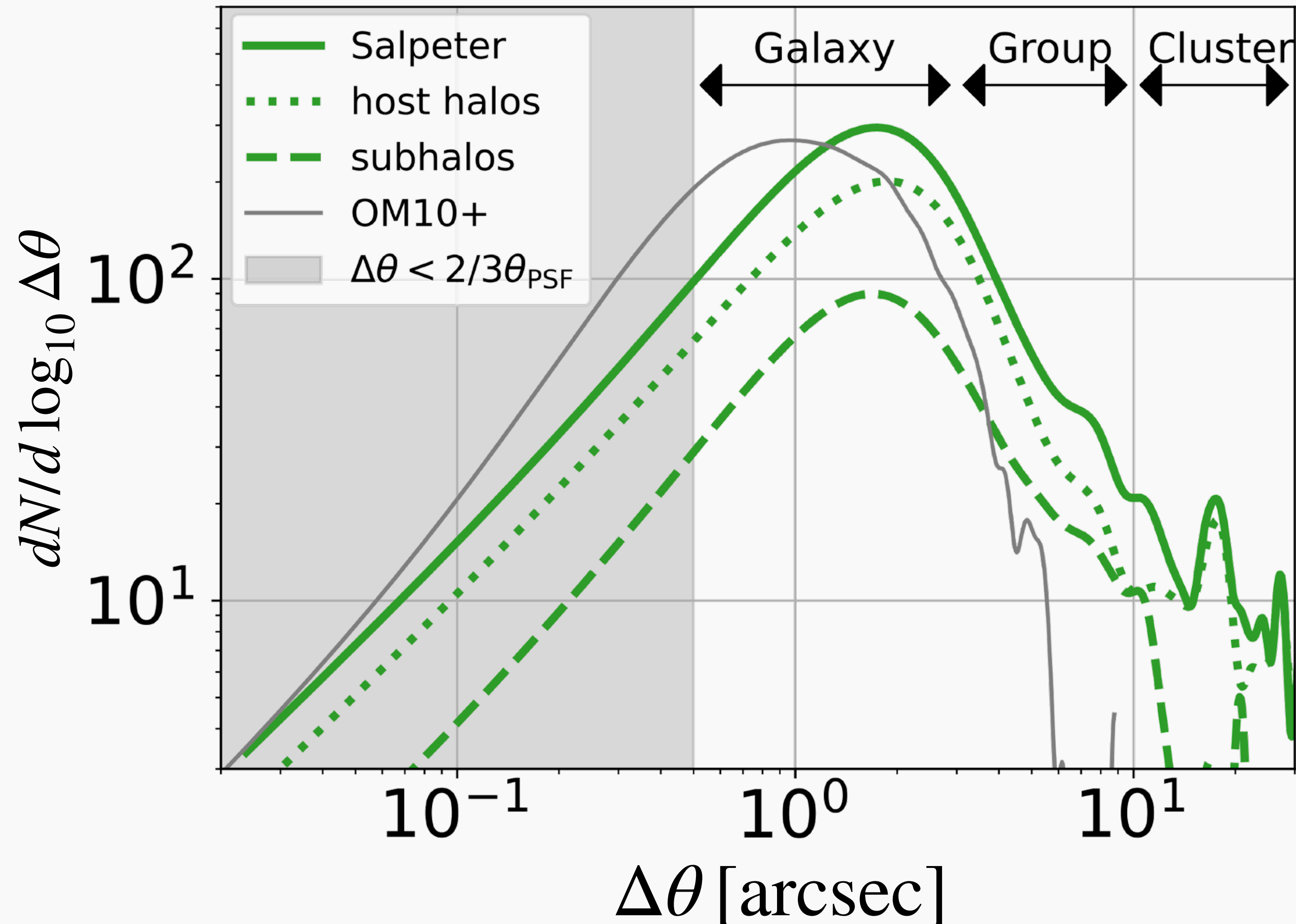
チリの8.4m望遠鏡



NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory



LSST重カレンズの模擬カタログ



- ハロー, サブハロー, 銀河を考慮した計算
- 銀河スケールから銀河団スケールまでの統一的な計算
- 重力レンズクエーサーと超新星の詳細予言

まとめ

- 銀河団で重力レンズされた超新星はハッブル定数測定の有力な手法の一つに急速になりつつある
- 時間の遅れをうまく利用することで超新星やLRDなどの光源天体の時間変動を調べることができる
- 今後時間変動重力レンズの観測数は大幅に増えるだろう

教科書を書きました
興味があればどうぞ →

