

重力レンズ天文学

大栗 真宗

千葉大学 先進科学センター



CHIBA
UNIVERSITY



Center for
Frontier
Science

2024/10/29-31 集中講義@京都大学

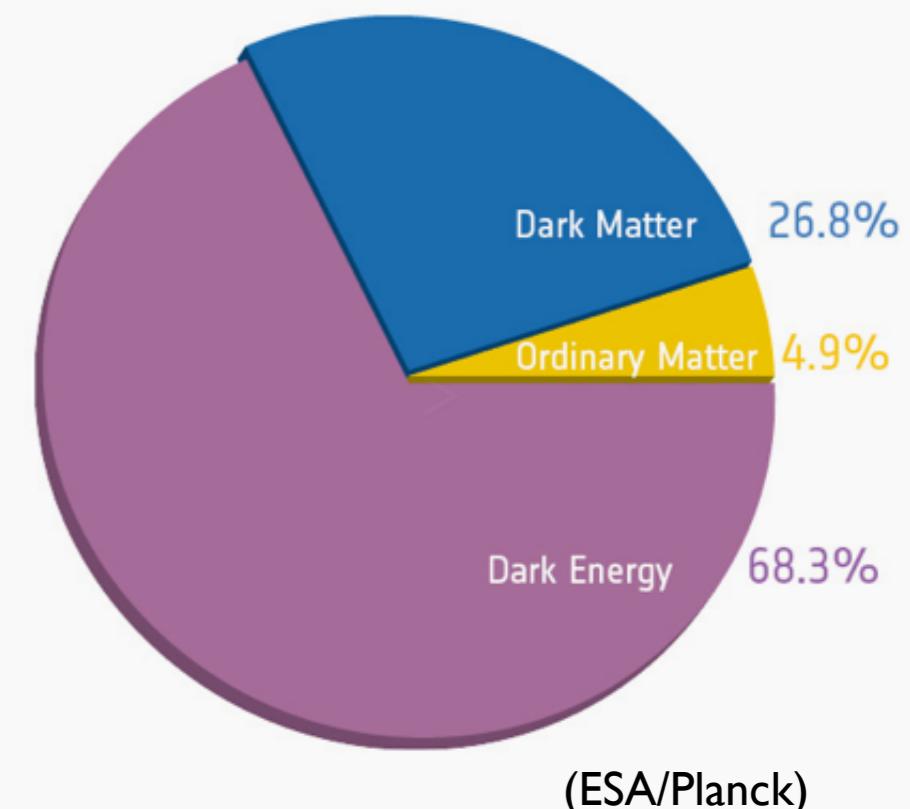
この講義について

- 基本は板書で、スライドを補助的に使います
- 資料置き場 (PandAにもリンクあり) :

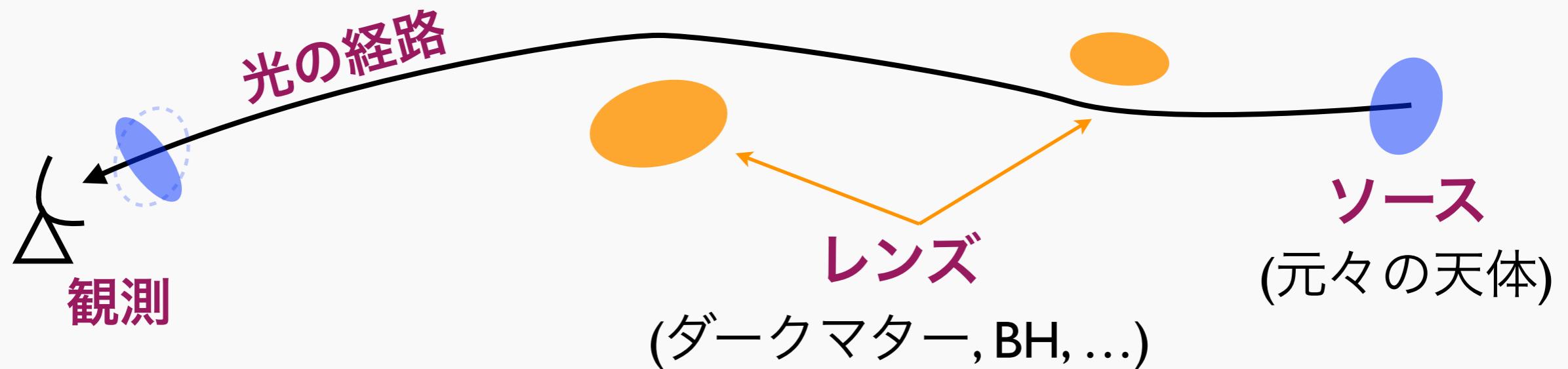
<https://oguri.github.io/lectures/2024kyoto.html>

標準宇宙論

- ダークマター、ダークエネルギーを主な構成要素とする標準宇宙論は多くの観測を**統一的に説明**
 - 宇宙背景放射
 - Ia型超新星爆発
 - 銀河クラスタリング
 - 重力レンズ
 -

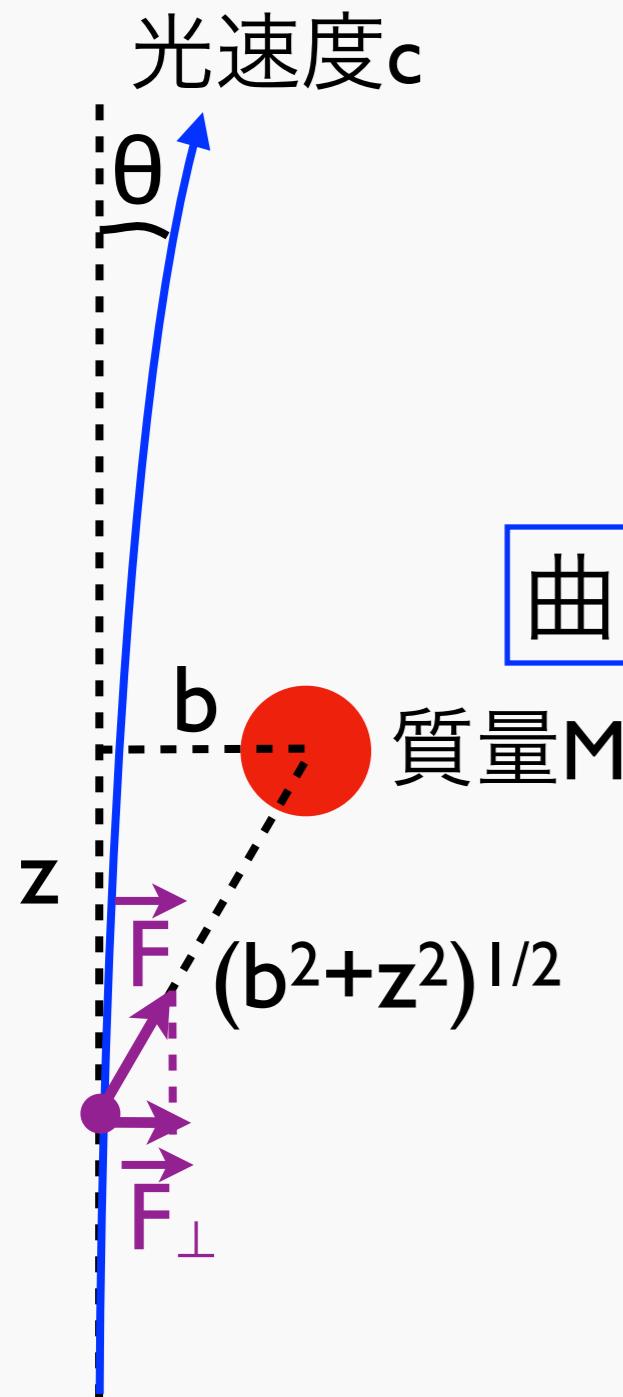


重力レンズとは



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

ニュートン力学と重力レンズ



$$m\vec{a} = \vec{F} \quad \boxed{\text{運動方程式}}$$

$$F_\perp = \frac{GMmb}{(b^2 + z^2)^{3/2}} \quad \boxed{\text{進行方向と垂直な力}}$$

曲がり角

$$\theta \simeq \frac{v_\perp}{c} \simeq \frac{1}{c^2} \int_{-\infty}^{\infty} a_\perp dz$$

$$= \frac{GMb}{c^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(b^2 + z^2)^{3/2}} dz = \frac{2GM}{c^2 b}$$

- そもそも本当に曲がるのか?
($m=0$ なら $F=0$?)

一般相対論と重力レンズ

- 一般相対論の測地線方程式からあいまいさなく計算できる

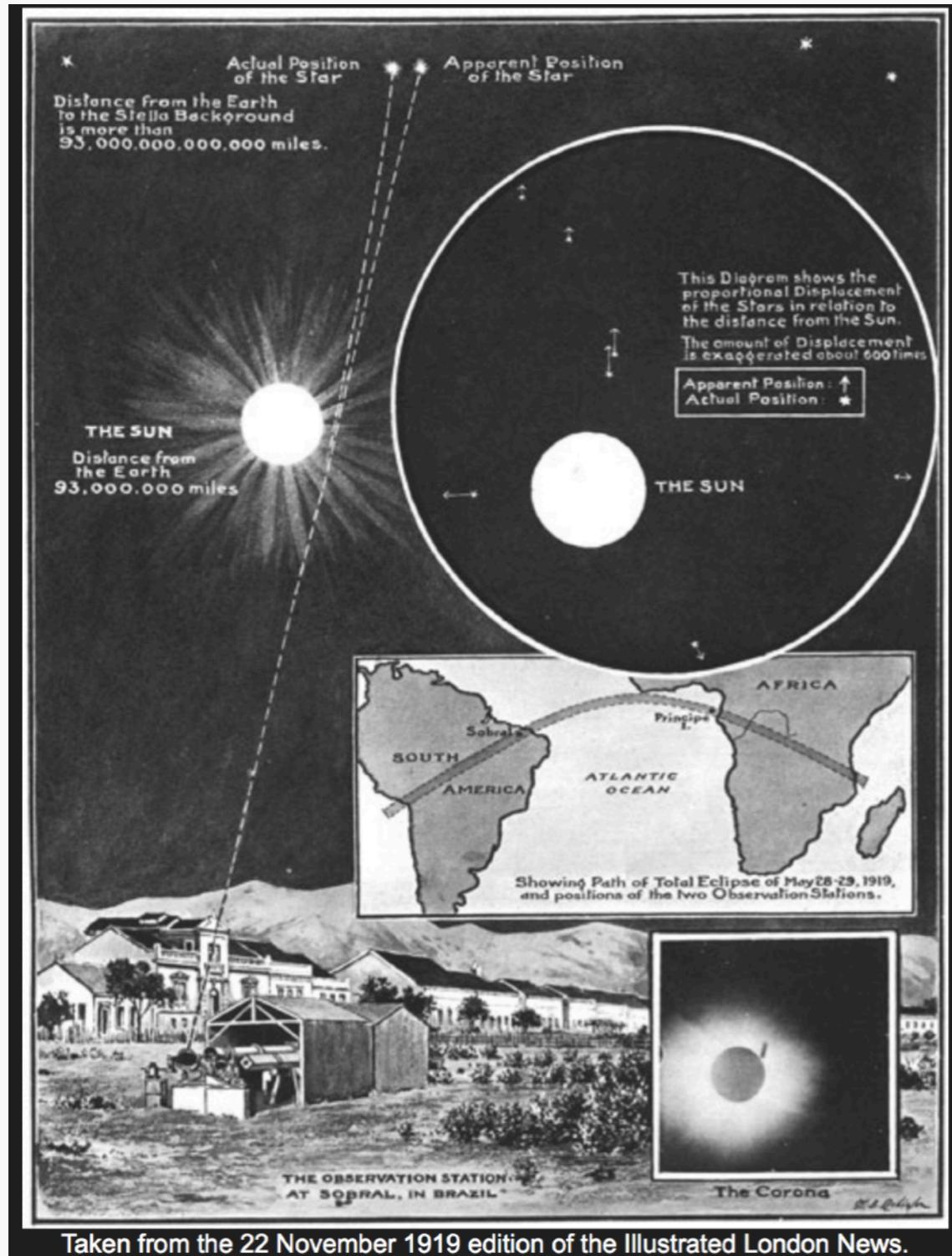
$$\frac{d^2x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{d\lambda} \frac{dx^\beta}{d\lambda} = 0$$

- 計算される曲がり角がニュートン力学の**ちょうど2倍**になる

$$\theta = \frac{4GM}{c^2 b} = 1.74'' \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \left(\frac{b}{R_\odot} \right)^{-1}$$

太陽のそばをかすめた場合

一般相対論と重力レンズ



Arthur Eddington
(Wikipedia)

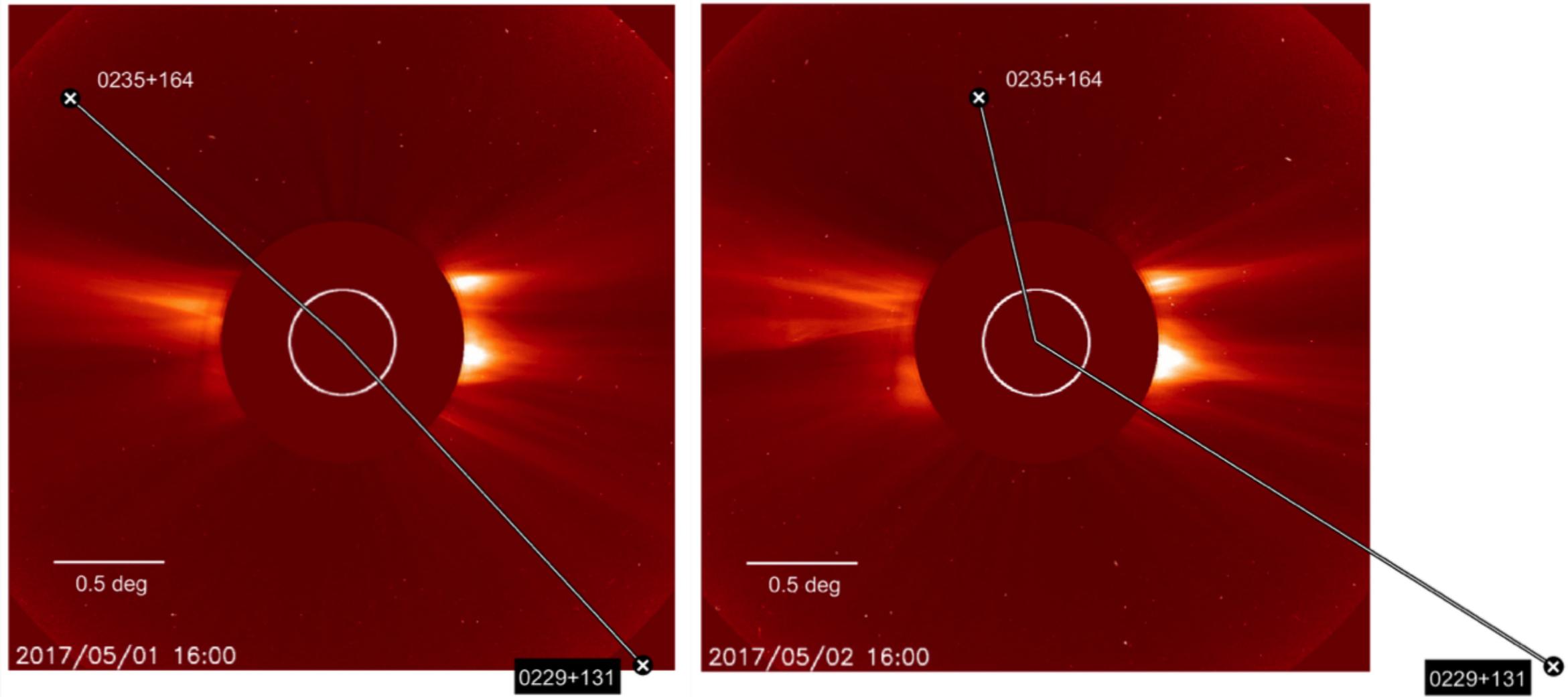
- 1919年エディントンの日食を利用した曲がり角の観測
 - 1.61"±0.40" @Principe
 - 1.98"±0.16" @Sobal

→ 一般相対論は正しい!

不都合な真実？

- Sobalのデータはメインの10インチがぼやけたため予備の4インチのデータを使用
- メインの10インチのデータを使うと $0.93''$ とむしろニュートン重力での値に近い
- Principleのデータは天候が悪くあまり精度はよくない
- 明確な結論を得られるデータだったかどうかあやしい部分も多く依然批判がある

最近の測定



Titov et al. (2018)

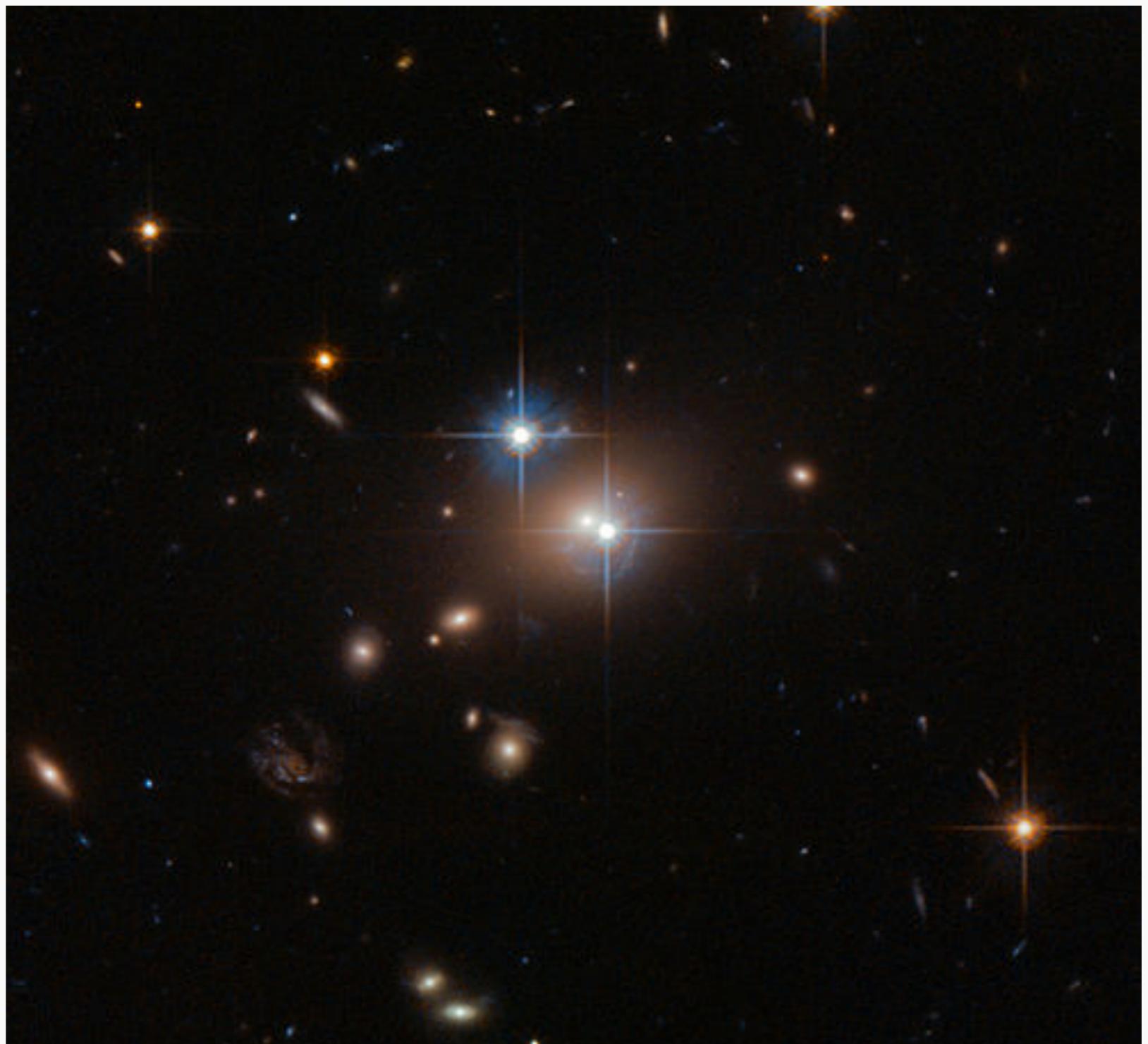
- 遠方の電波ソースが天球面上で太陽に近づいたときの位置の測定により **10⁻⁴** の精度で検証

重力レンズの例 (I)

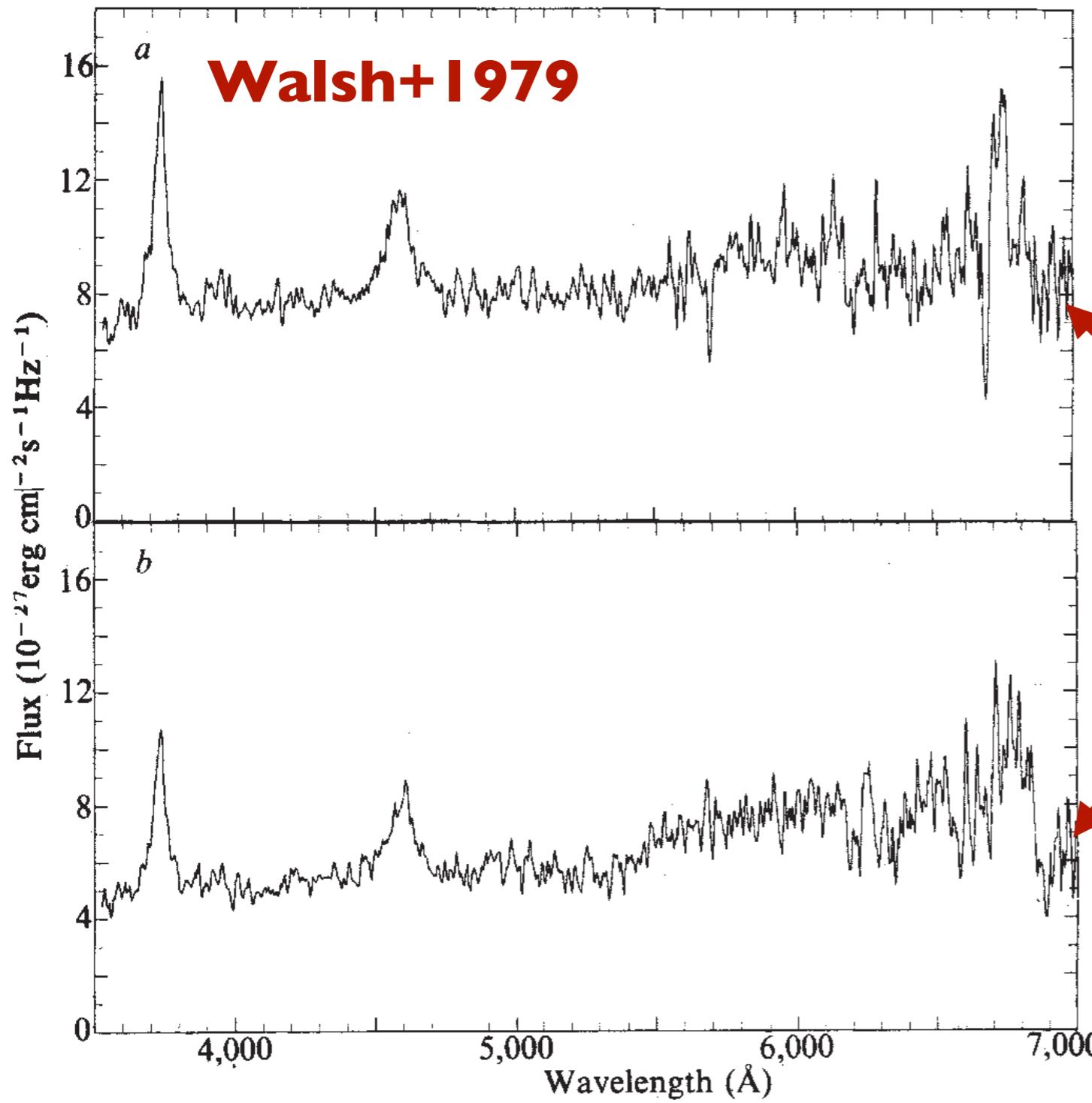
Q0957+561

1979年に発見が
報告された初の
強い重力レンズ

クエーサーの
二重像



重力レンズの例 (I)

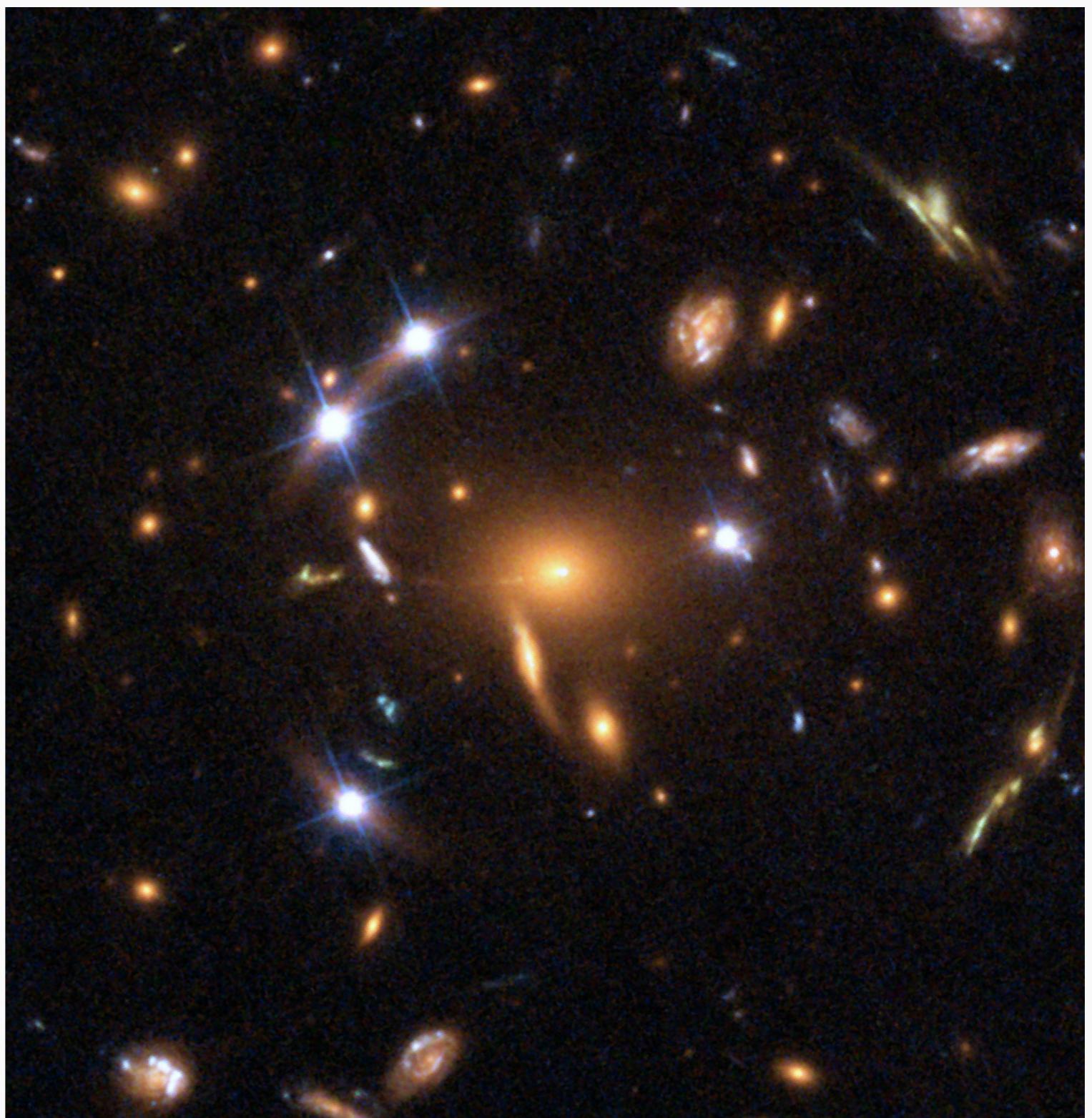


重力レンズの例 (2)

SDSS J1004

2003年に発見が
報告された
五重像重力レンズ
クエーサー

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



重力レンズの例 (3)

SMACS J0723

ジェームズウェッブ
宇宙望遠鏡観測の
最初のターゲット
の一つ (2022年公開)

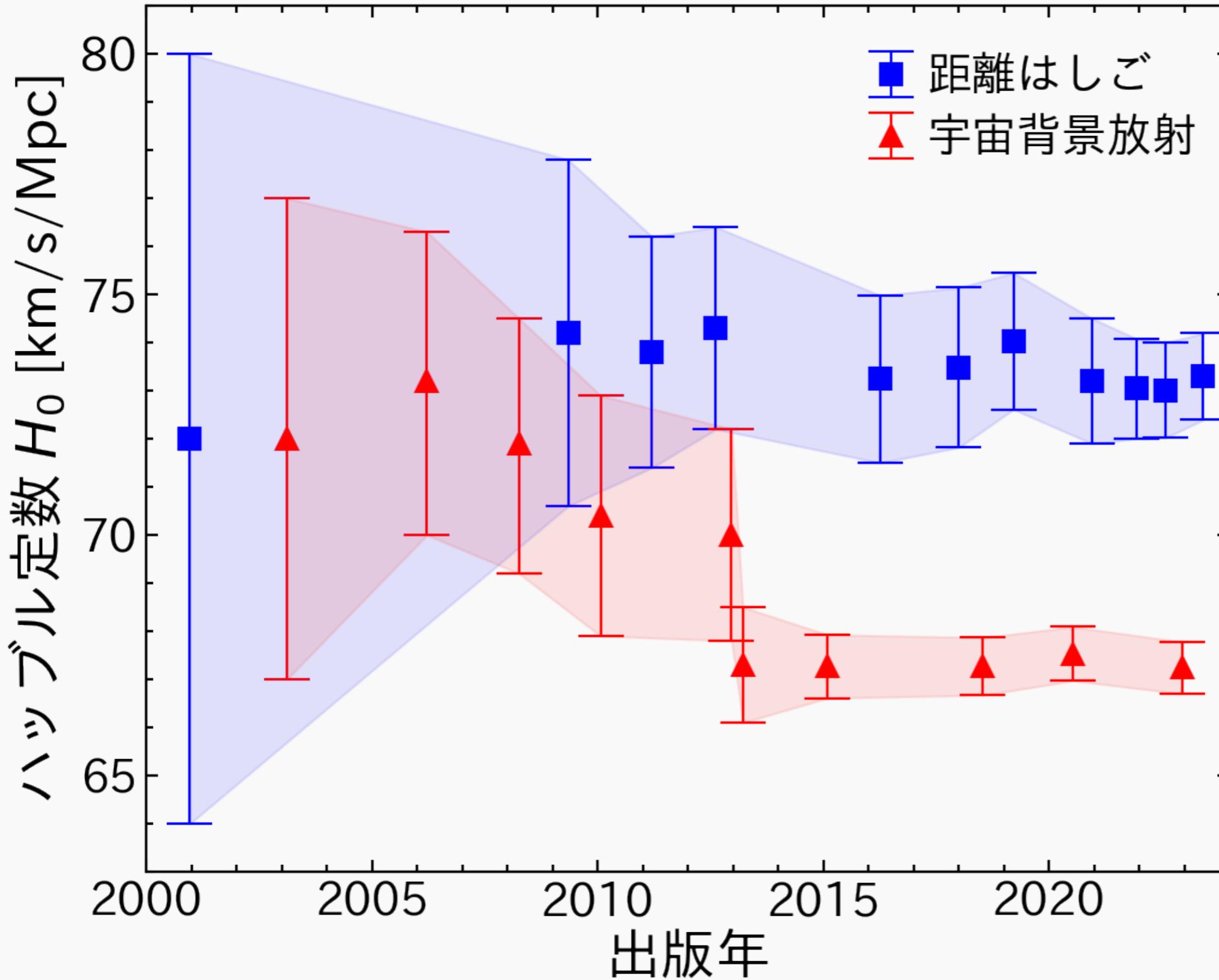
銀河団背後の多数の
重力レンズアーク



強い重力レンズの応用

- 強い重力レンズの特徴は、**複数像**および強い**増光**
- 代表的な応用
 - 時間の遅れを利用したハッブル定数の測定
 - 複数像間のフラックス比、像の形状などを利用した小スケールダークマター分布測定
 - 増光を利用した遠方天体探査

ハッブル定数 (H_0) 問題



詳しくは
日本物理学会誌
2023年11月号の
記事を参照

>5σ!

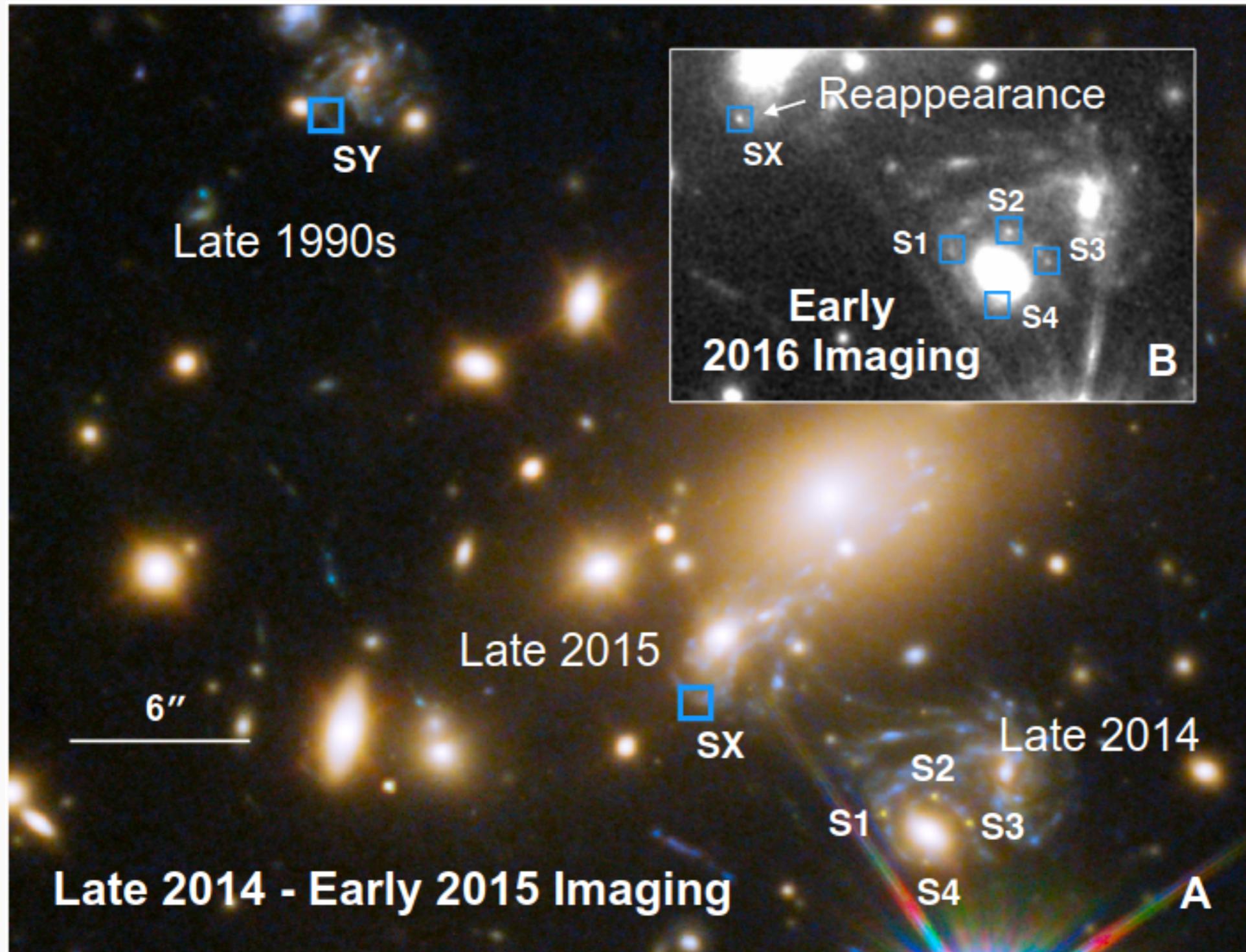
時間の遅れ

- 複数像の到達時刻が異なる(月~年)
- ソース天体がクエーサーや超新星など時間変動する天体の場合に観測される



ハッブル定数小 → 宇宙大 → 到達時間差大

重力レンズ超新星Refsdal

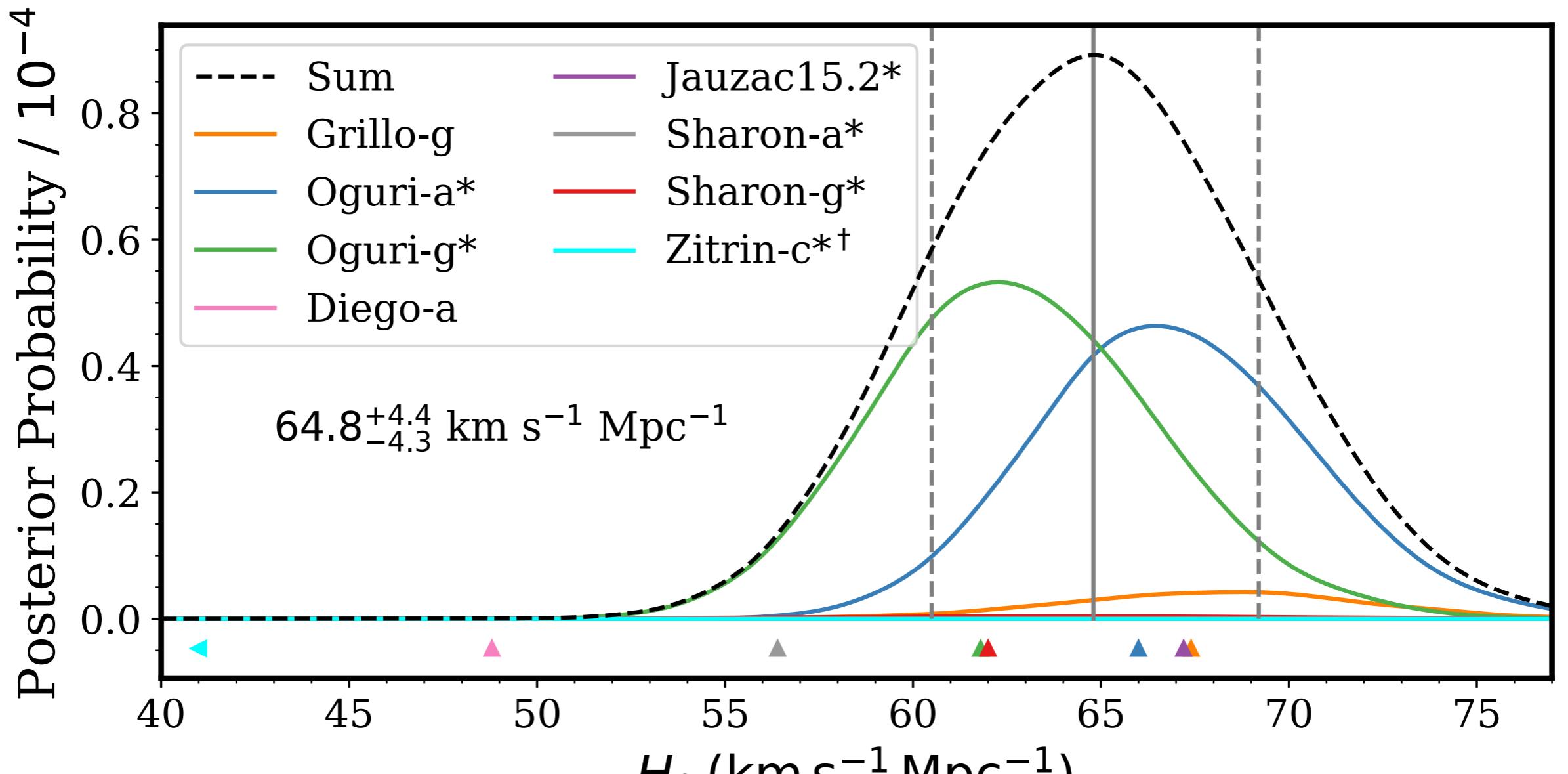


2014年に
四重像の
発見 (S1-S4)

2015年の
像SX出現
予言

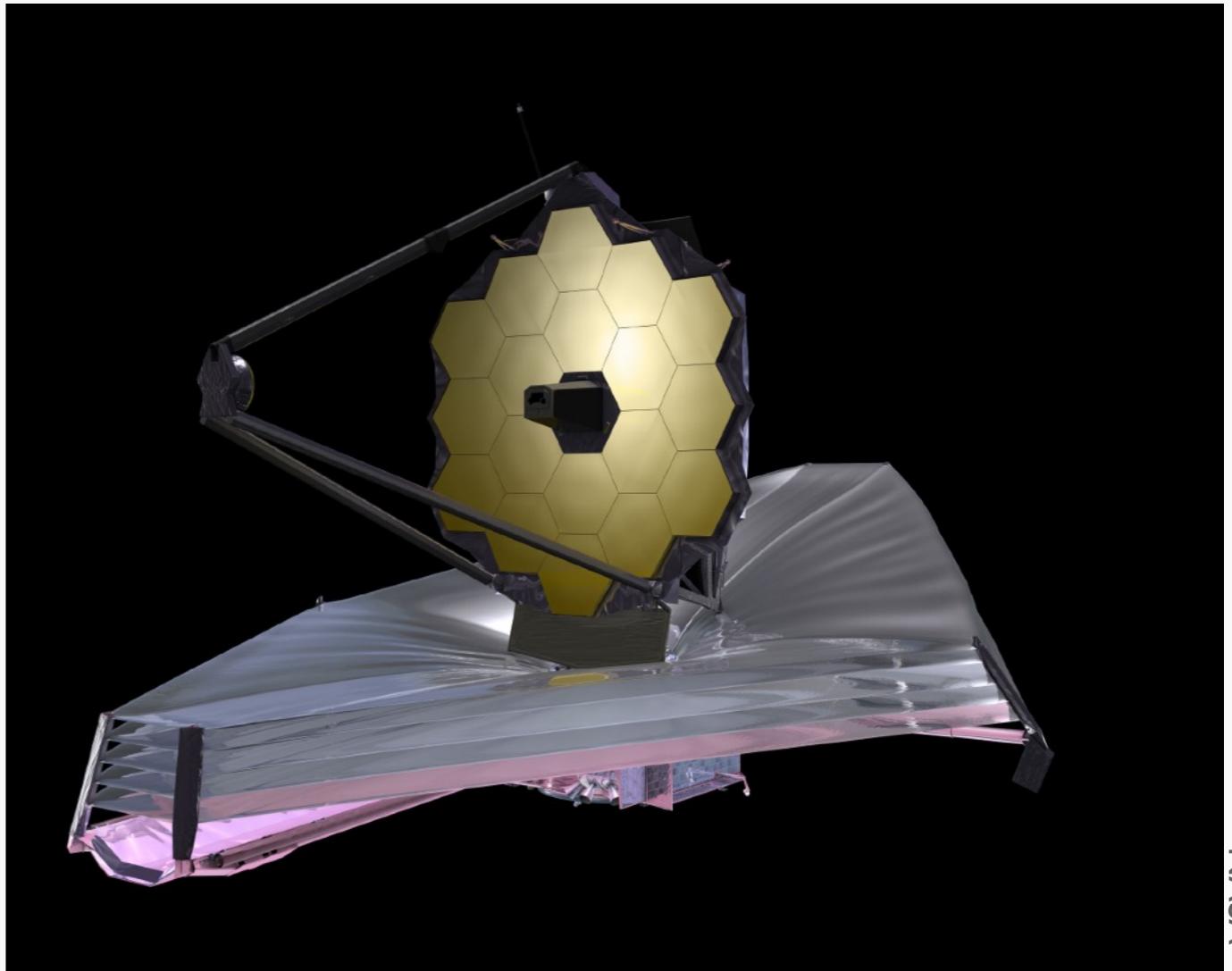
予言通り
SXが発見

Refsdalによるハッブル定数測定



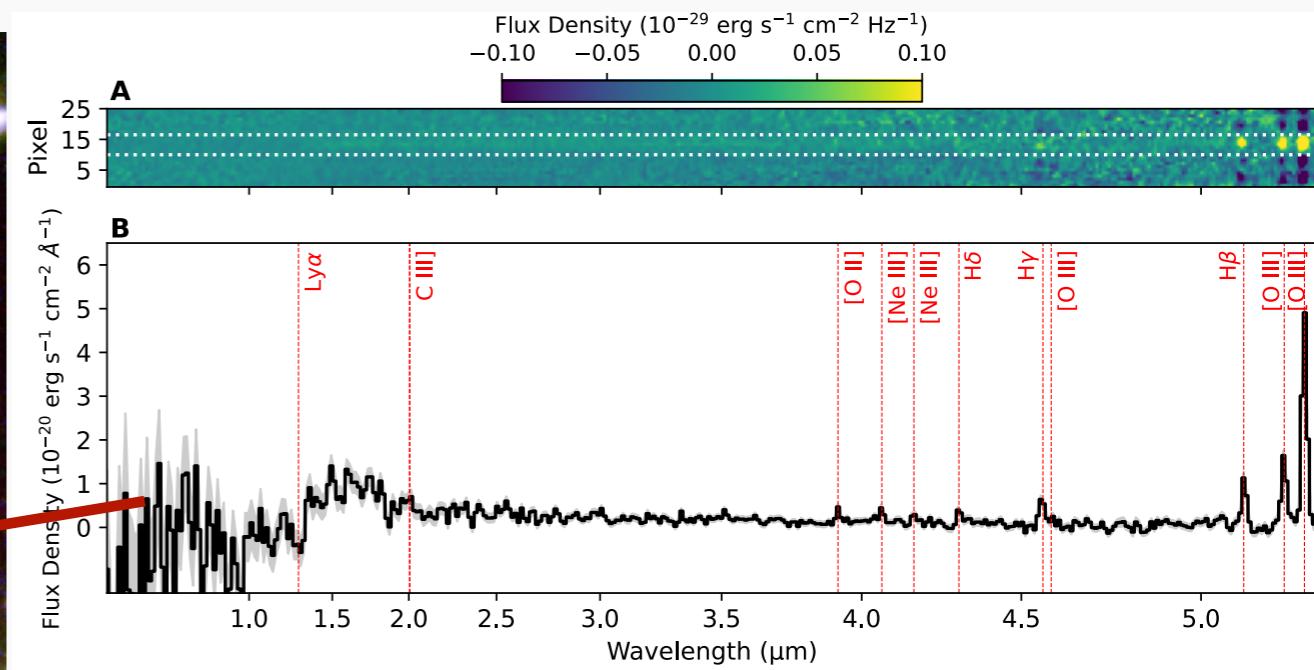
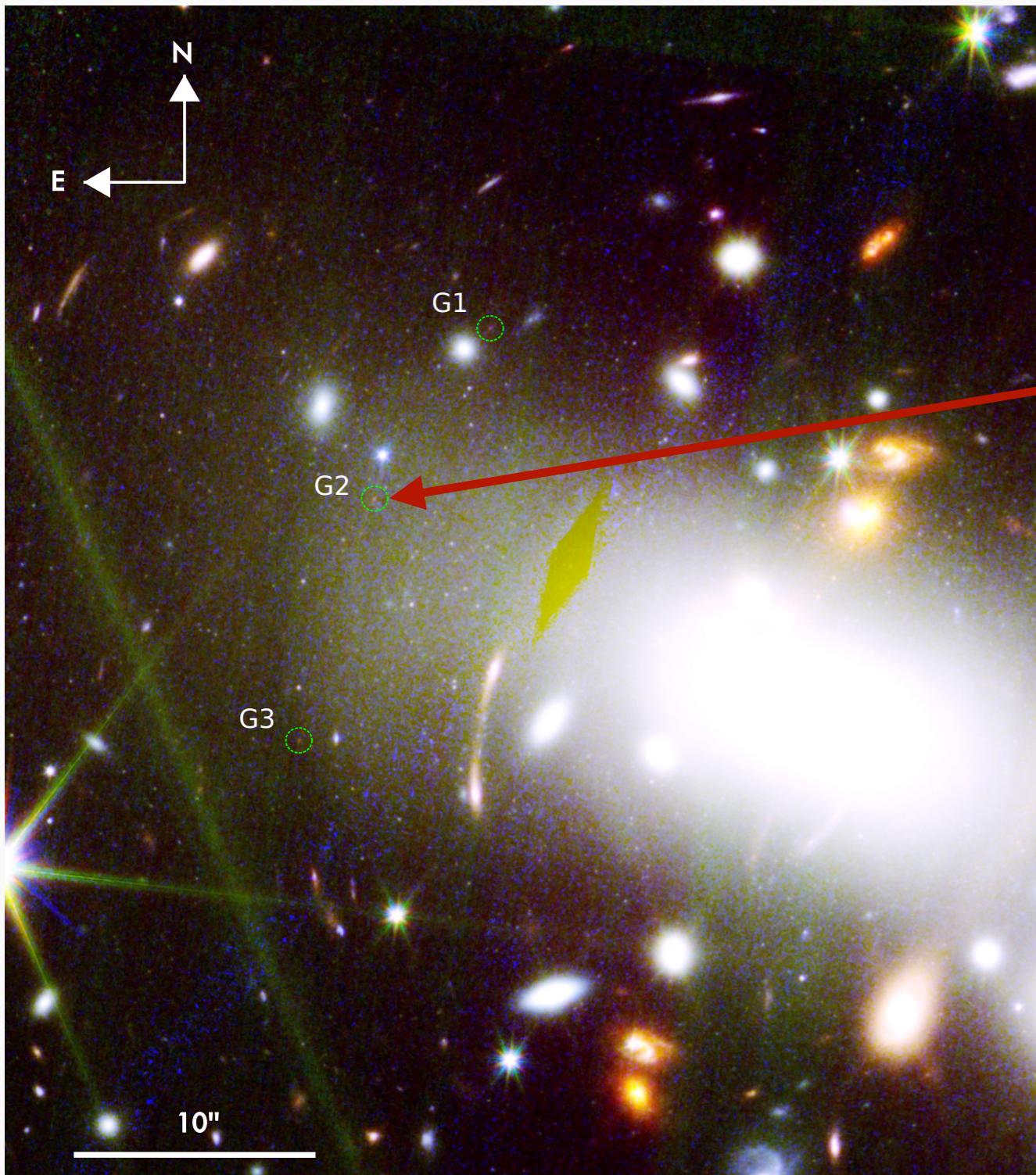
Kelly, Rodney, Treu, MO+ Science, **380**, abh1322 (2023)

増光を利用した遠方天体探査



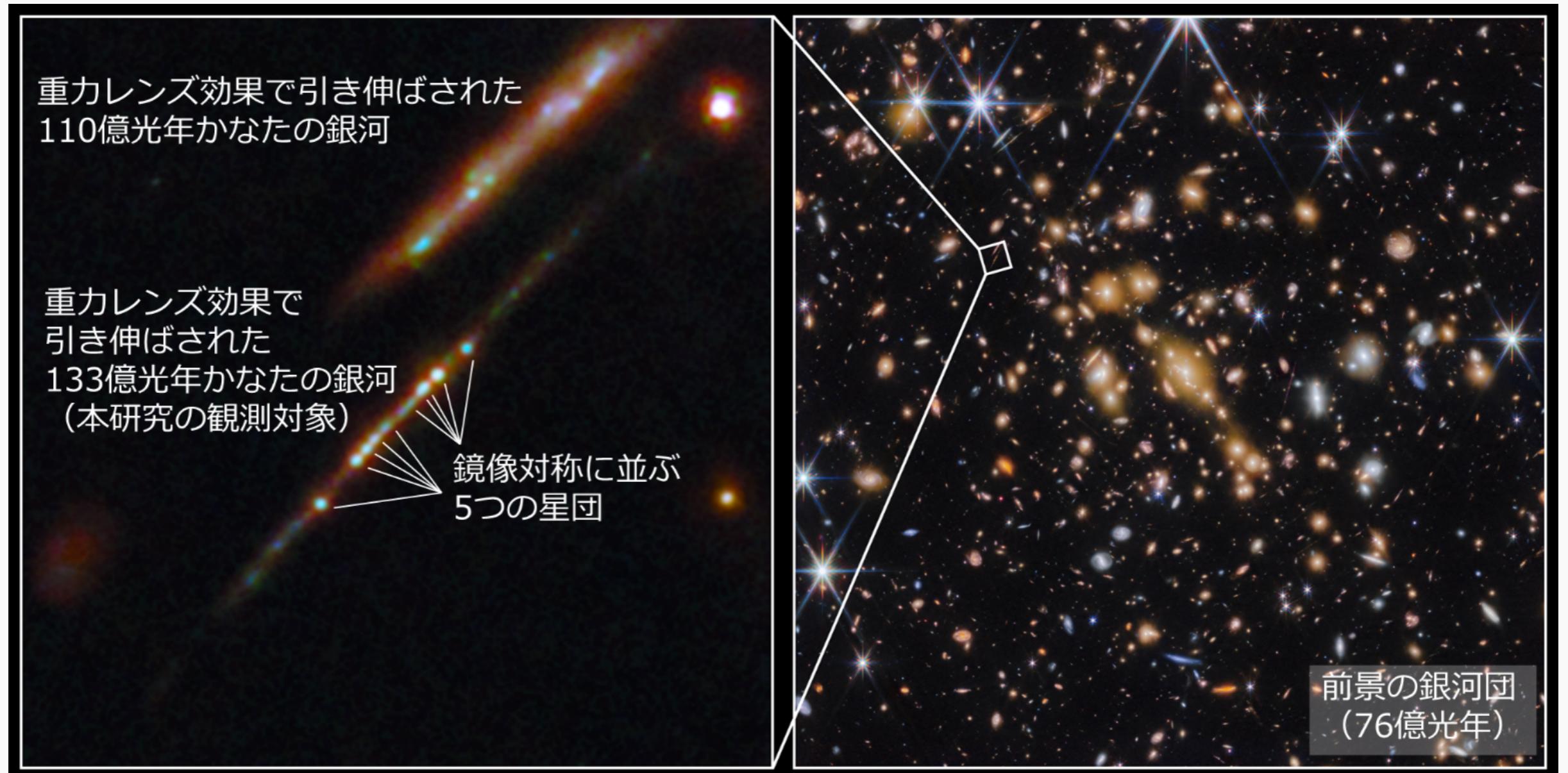
- 2021年12月に打ち上げられたジェームズウェット
宇宙望遠鏡 (JWST) により大きな進展

JWST観測の初期成果



- $z=9.51$ の銀河の三重像
- ~20倍増光で容易に分光
- 強い酸素輝線
- 非常にコンパクト

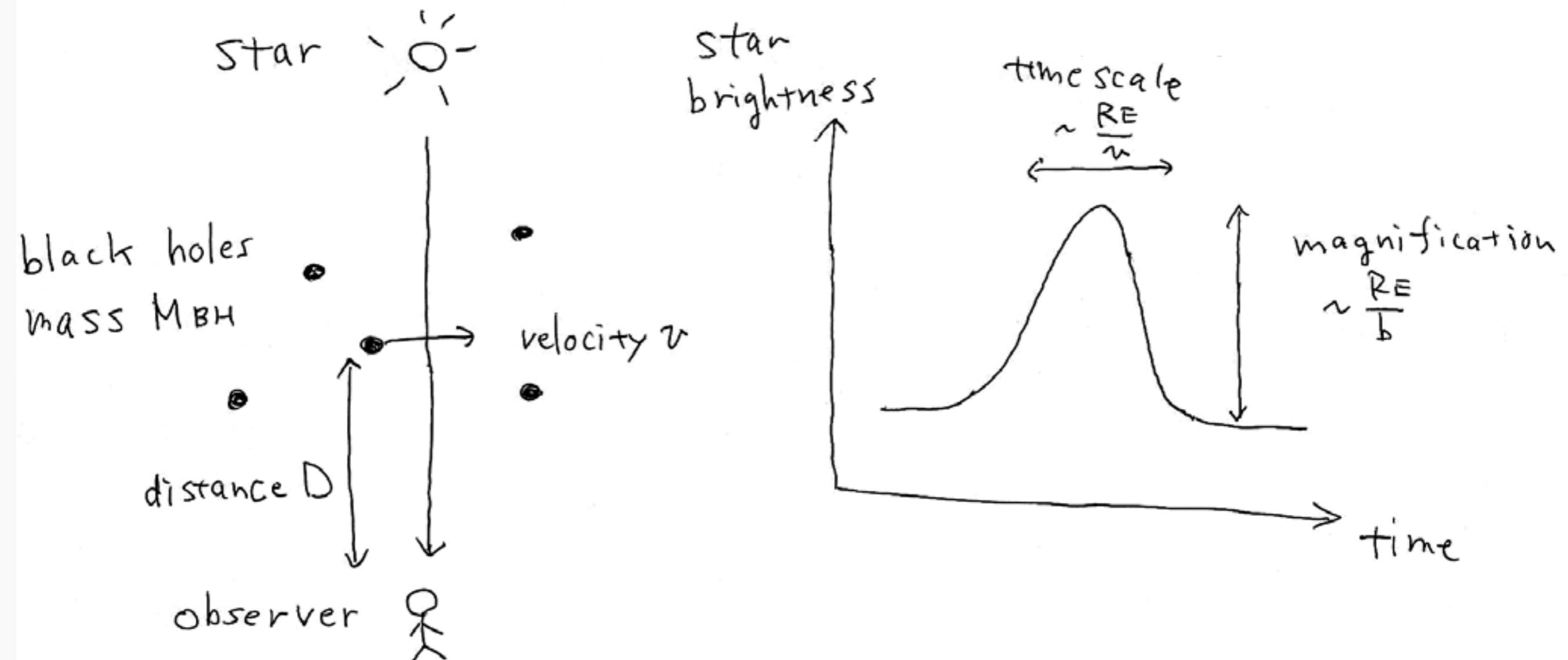
星団の発見



Adamo+ (incl. MO) Nature **632**(2024)513

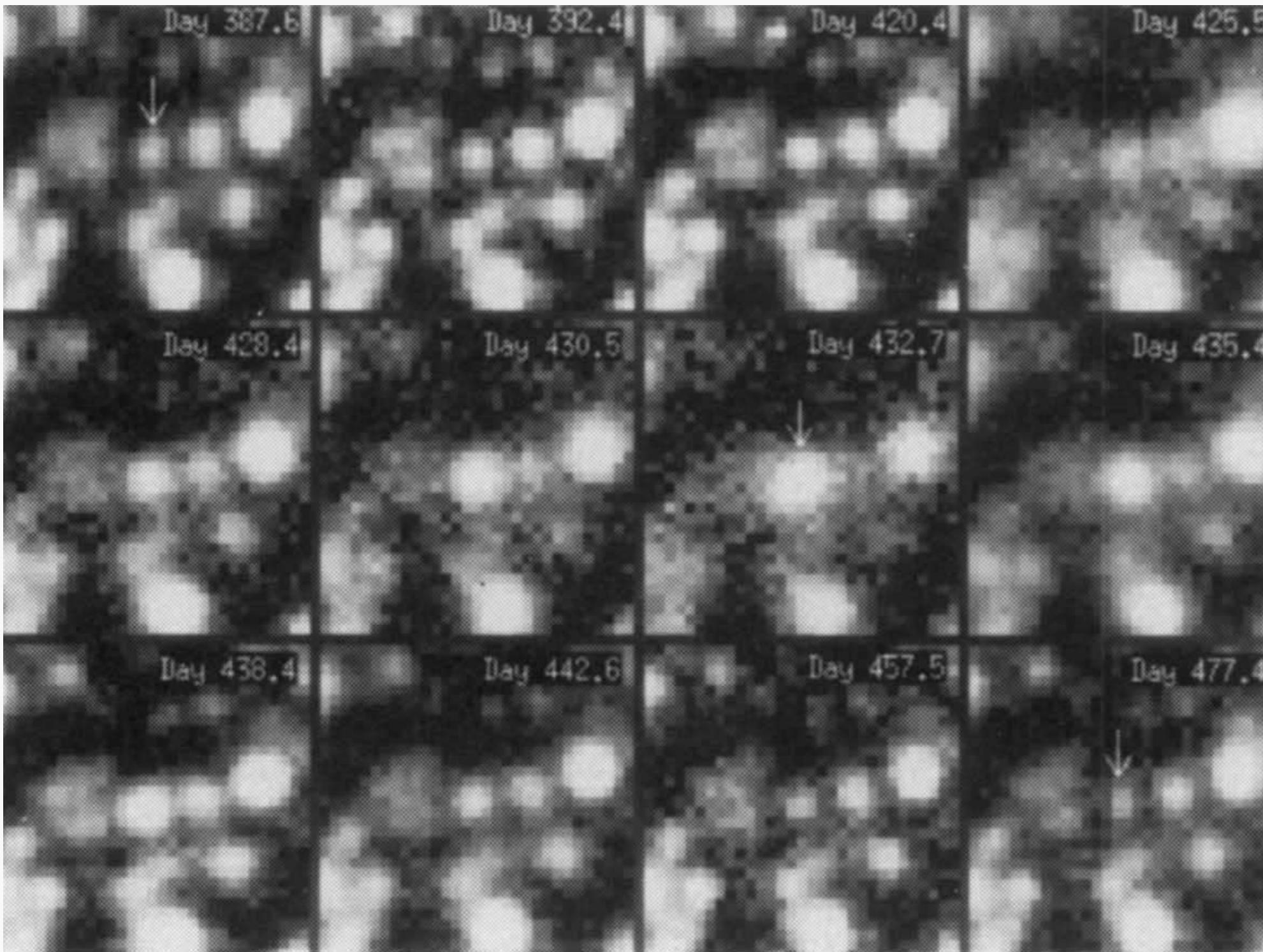
重力レンズで**約100倍**に拡大 → 星団の発見

重力マイクロレンズ



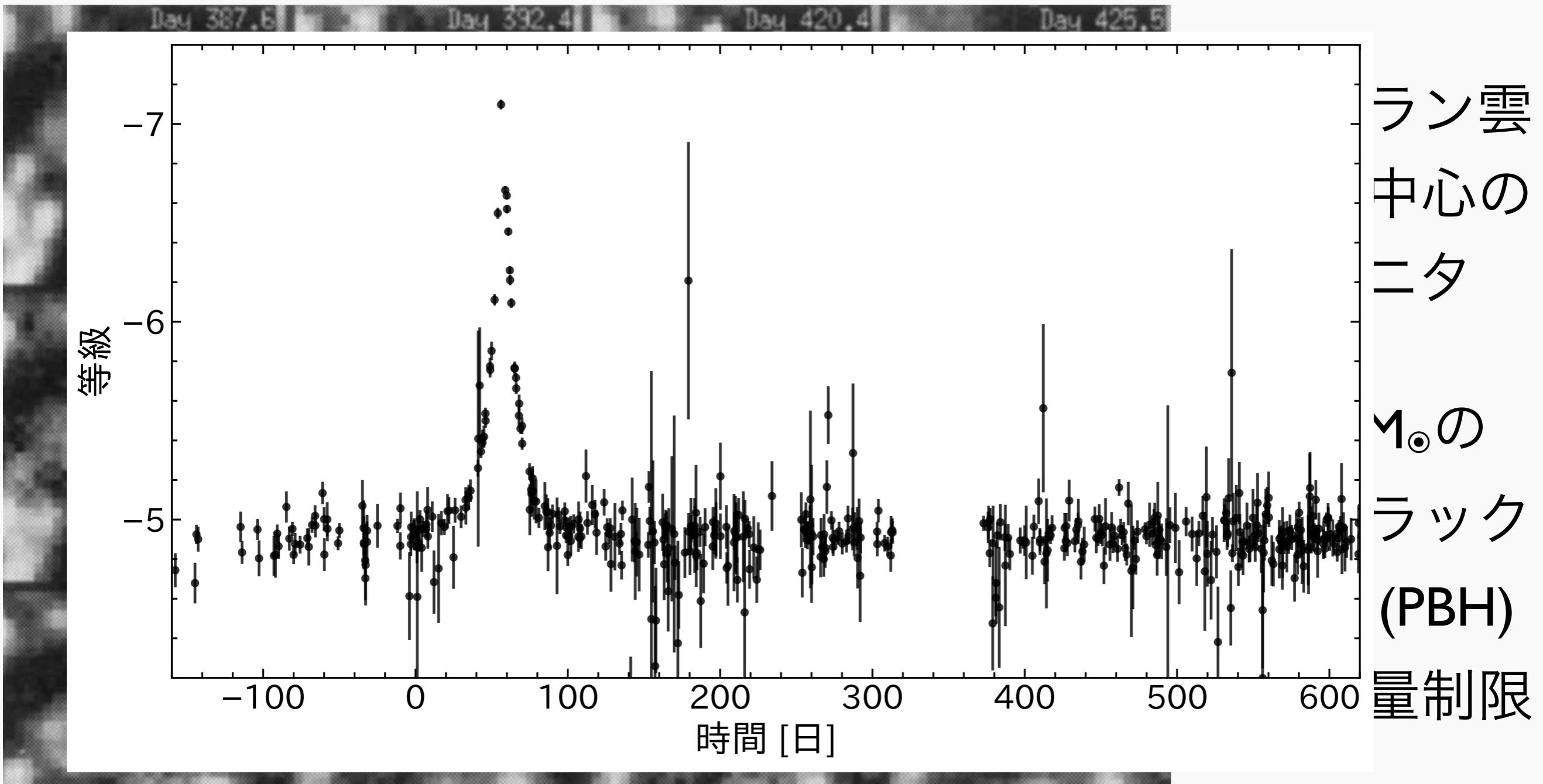
MO, Kavli IPMU news No. 38

MACHO探査

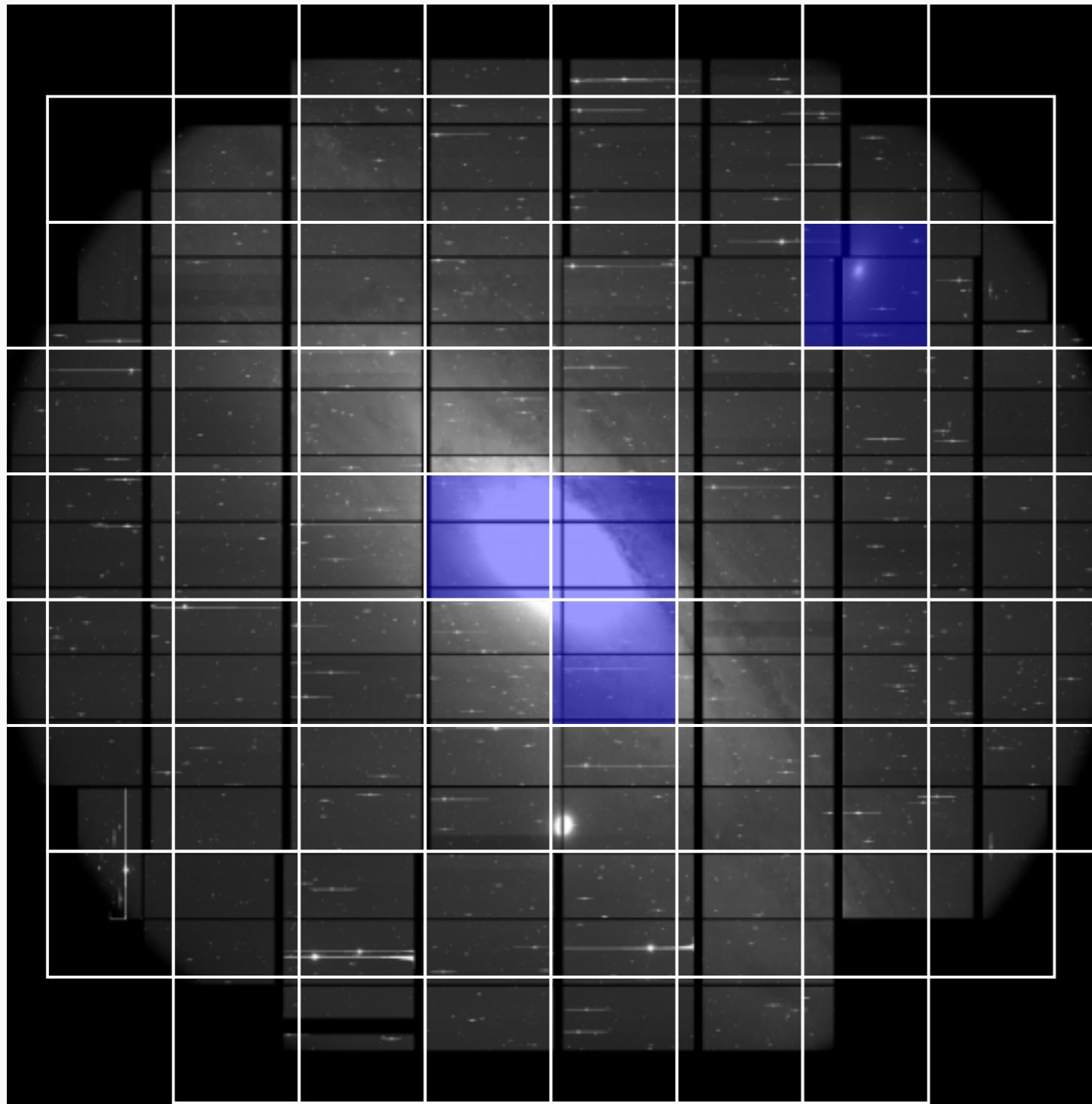


大マゼラン雲
や銀河中心の
星のモニタ
 $\sim 10^{-5} - 1 M_{\odot}$ の
原始ブラック
ホール (PBH)
の存在量制限

MACHO探査



すばるHSCマイクロレンズ探査

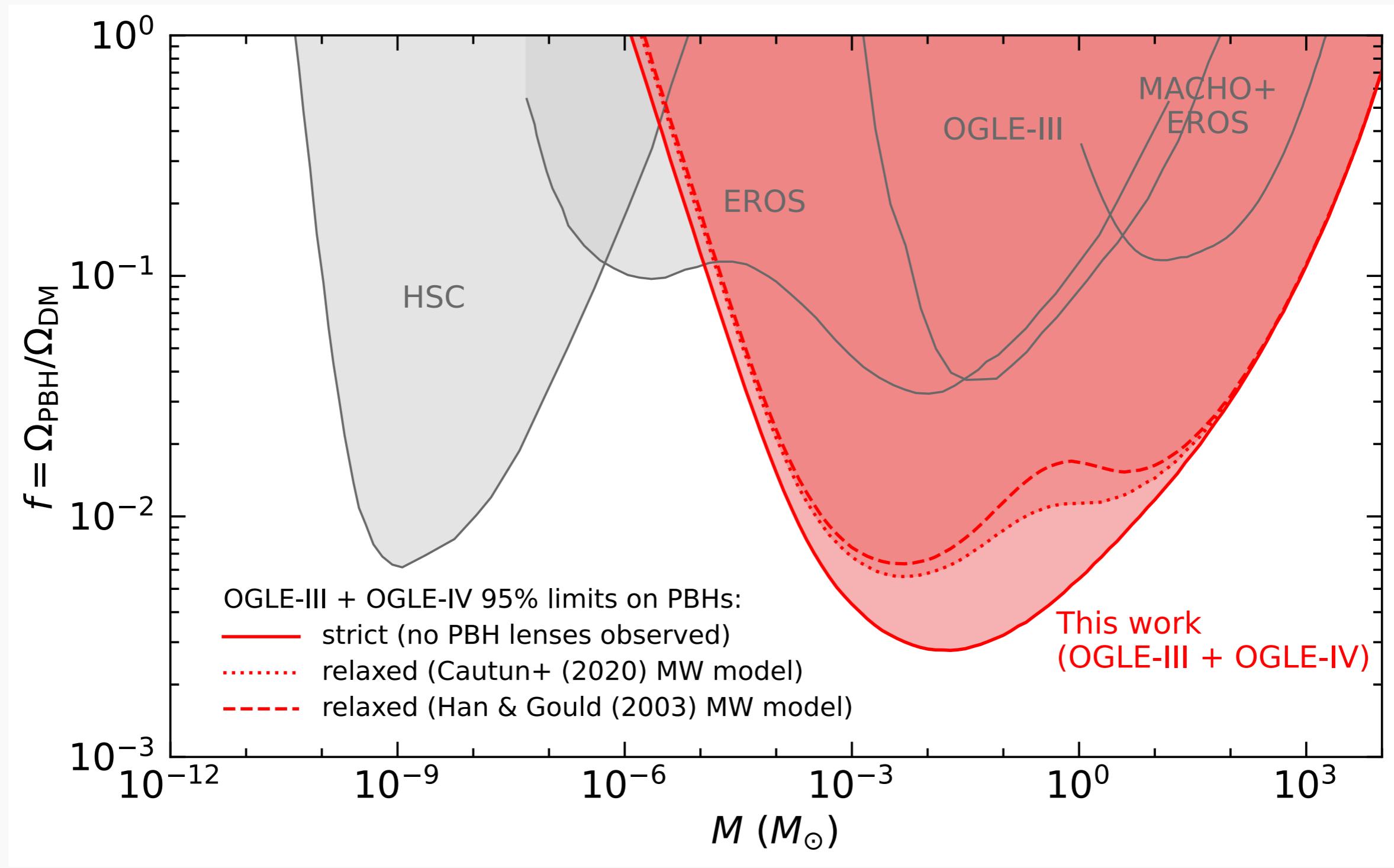


Niikura, Takada+ (incl. MO) Nat. Ast. 3, 524 (2019)

M3Iの短時間観測の
繰り返し

$\sim 10^{-11} - 10^{-6} M_{\odot}$ の PBH の
存在量を制限

現在のPBH存在量の制限

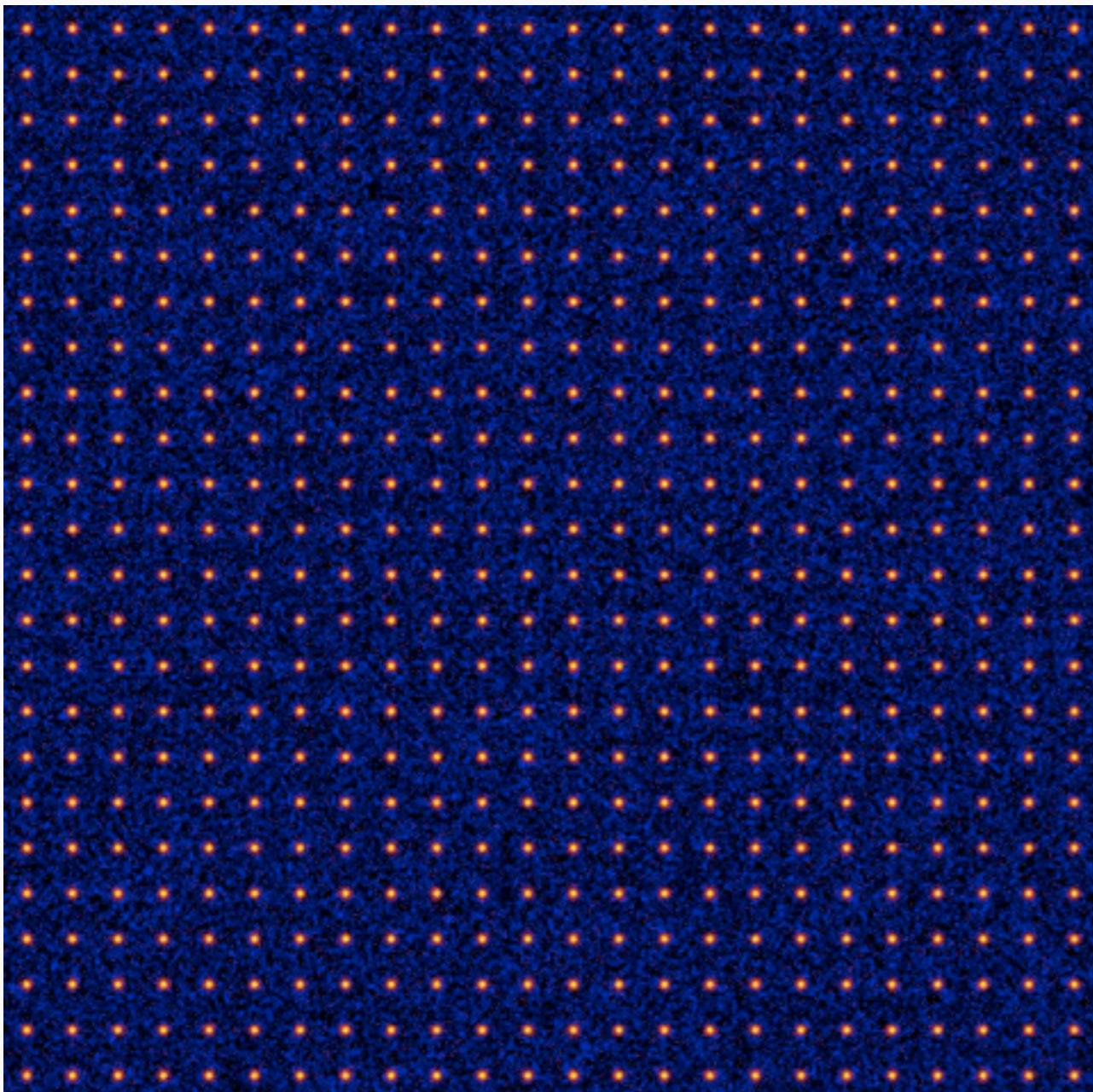


弱い重力レンズ

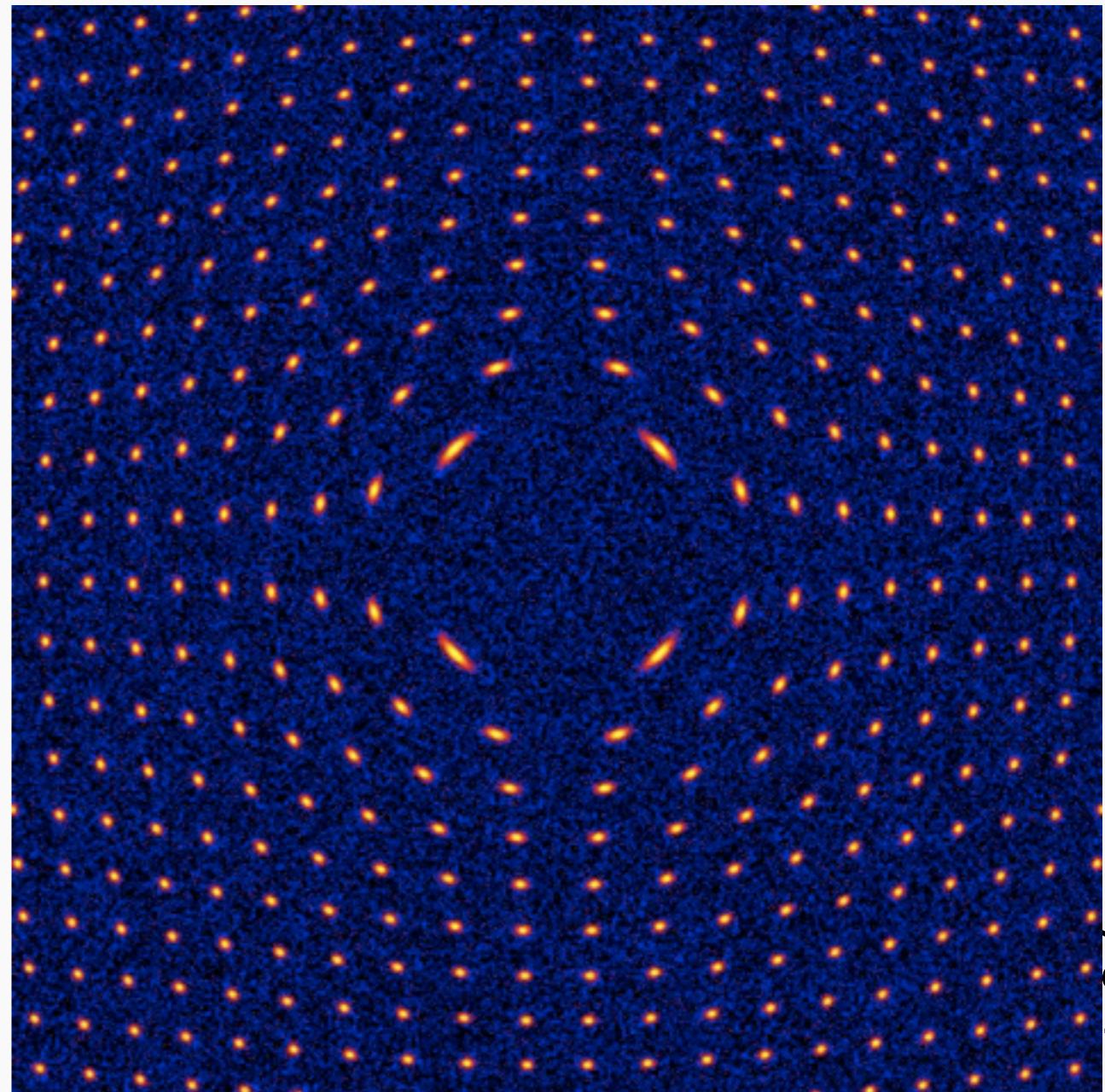


simulated by *glafic*

背景銀河への重力レンズ効果



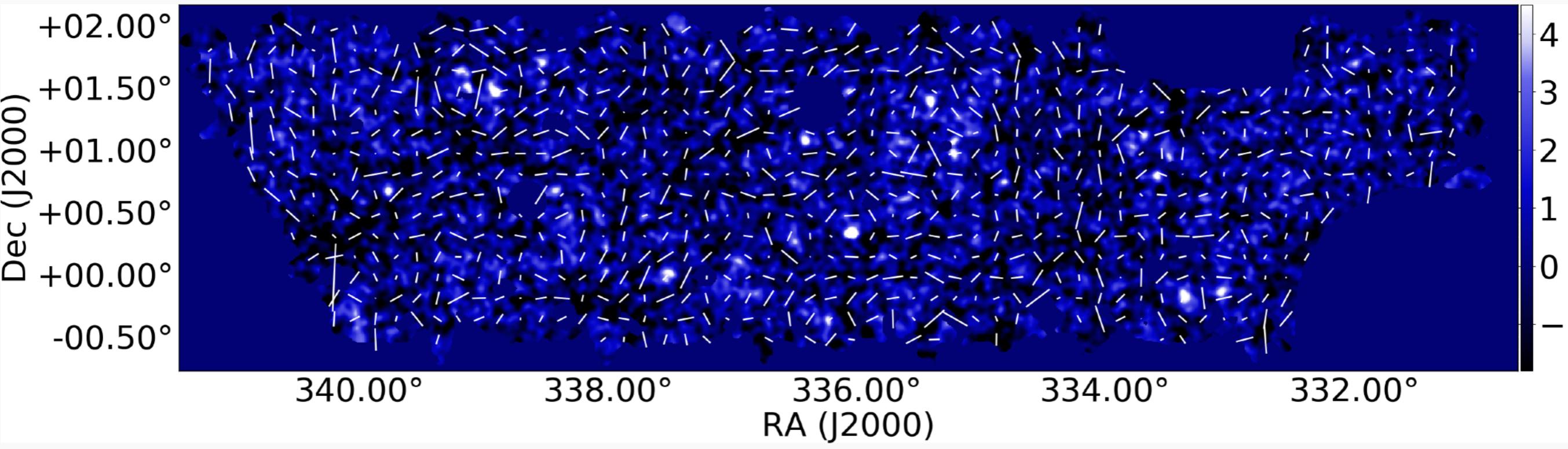
重力レンズなし



中心にレンズ天体

simulated by glafic

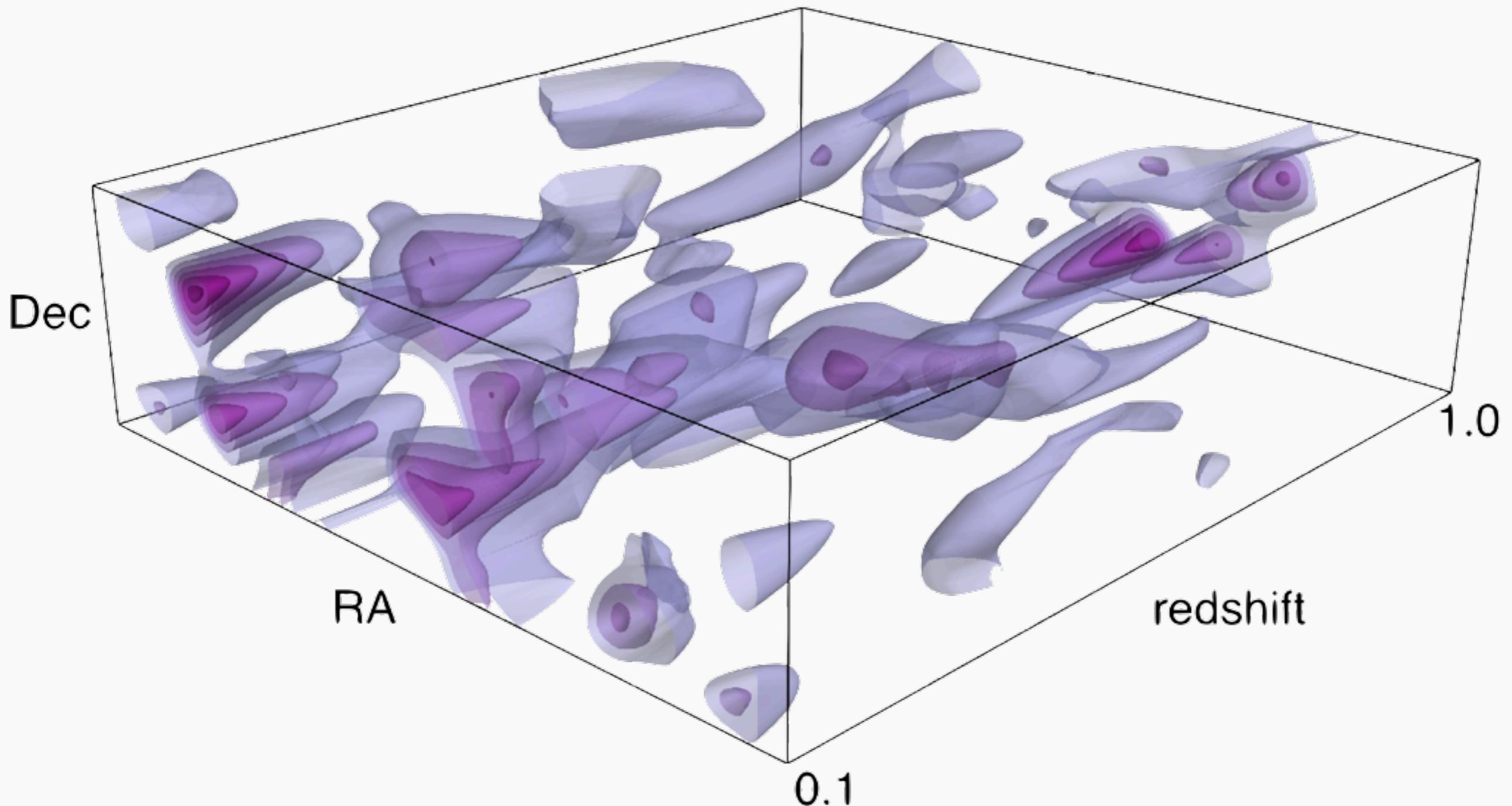
質量分布の再構築



MO, Miyazaki+ PASJ **70**, S26 (2018)

- 円周方向の系統的な銀河の形状の歪みから質量分布を再構築できる
- ダークマター質量にもとづく銀河団探査が可能

三次元ダークマター地図



まとめ

- 重力レンズは宇宙を観測する上での重要なツールとなっている
- ハッブル定数測定やダークマターなど、幅広く応用されている