

# 重力レンズ天文学

大栗 真宗

千葉大学 先進科学センター

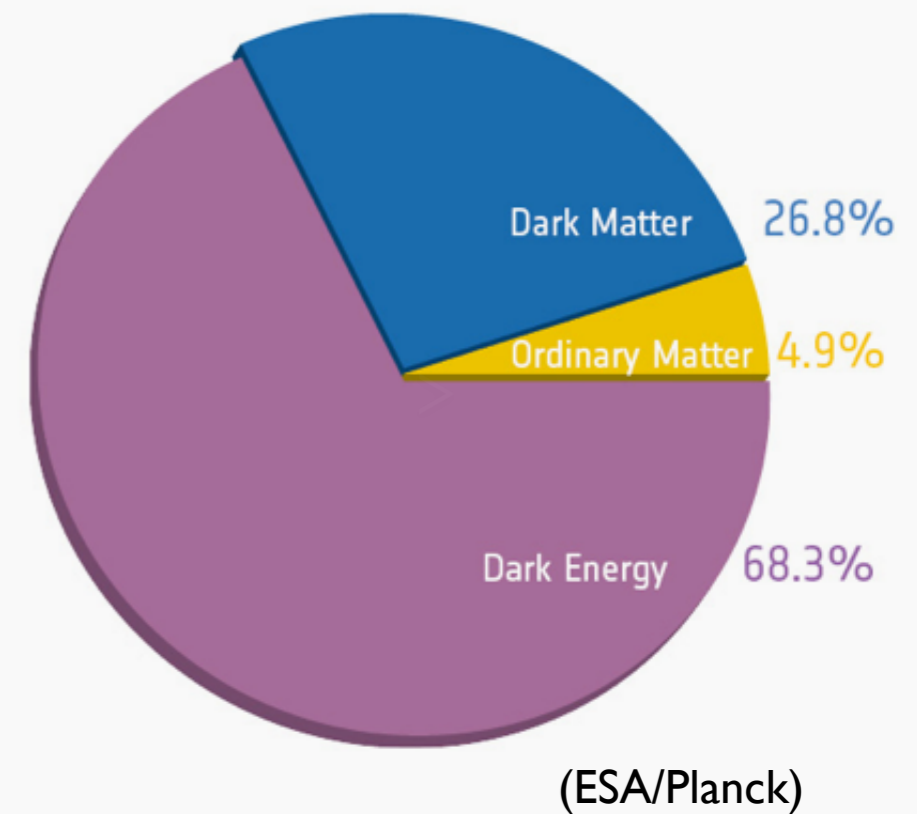
# この講義について

- 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) :

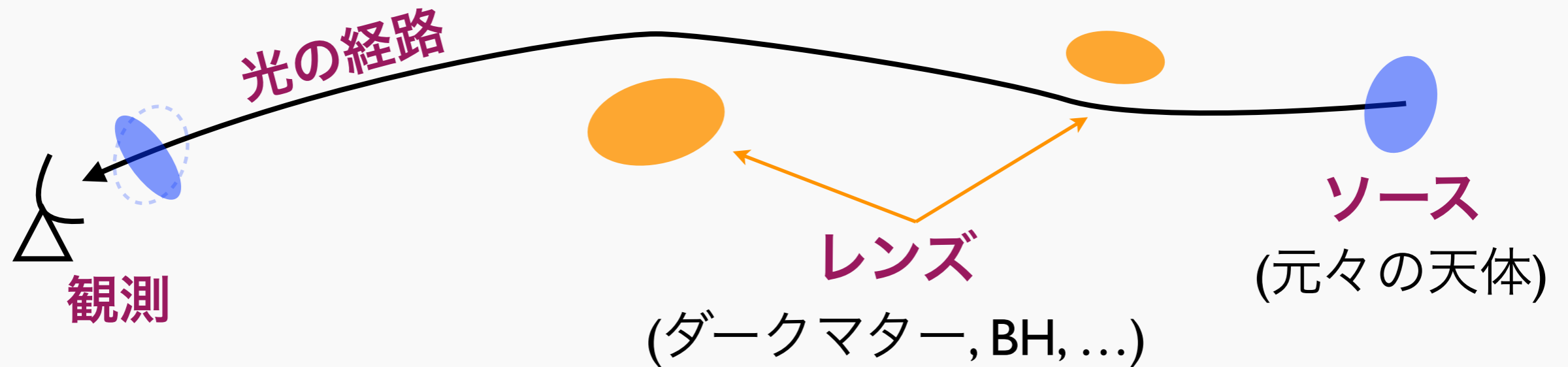
<https://oguri.github.io/lectures/2024kyoto.html>

# 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
  - 銀河クラスターリング
  - **重力レンズ**
  - ....

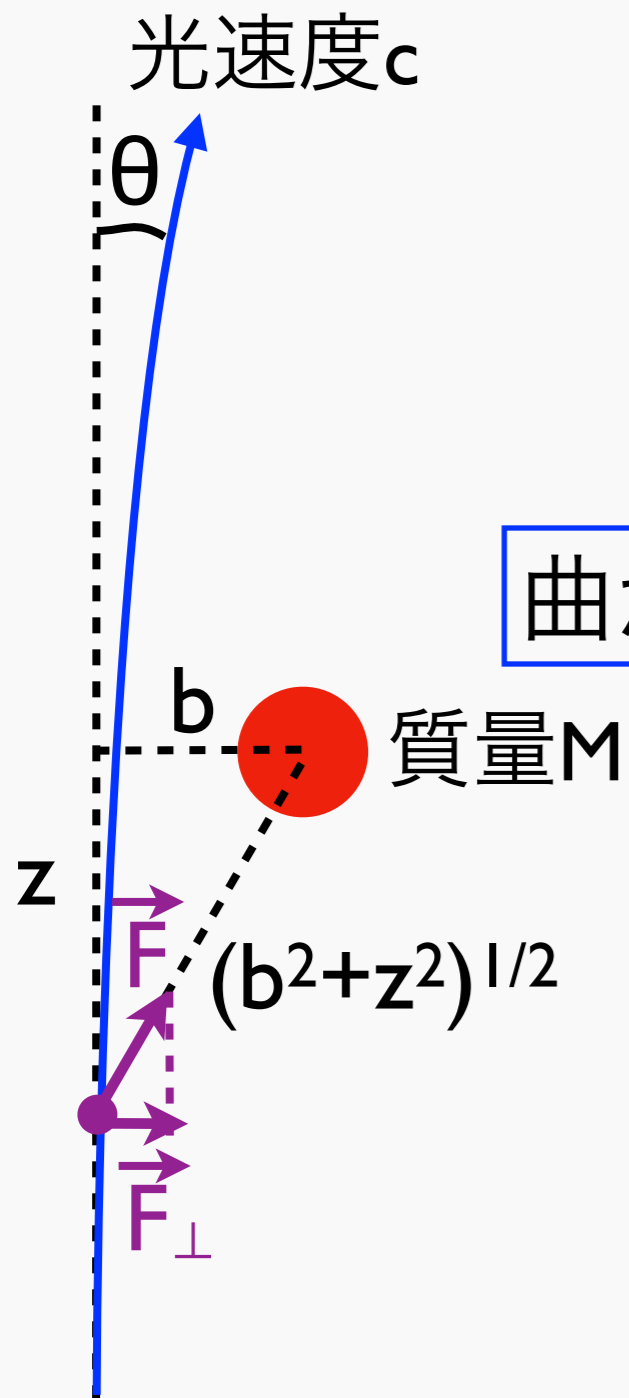


# 重力レンズとは



- 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、天体の形状のゆがみや増光など

# ニュートン力学と重力レンズ



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

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

曲がり角

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

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

- 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

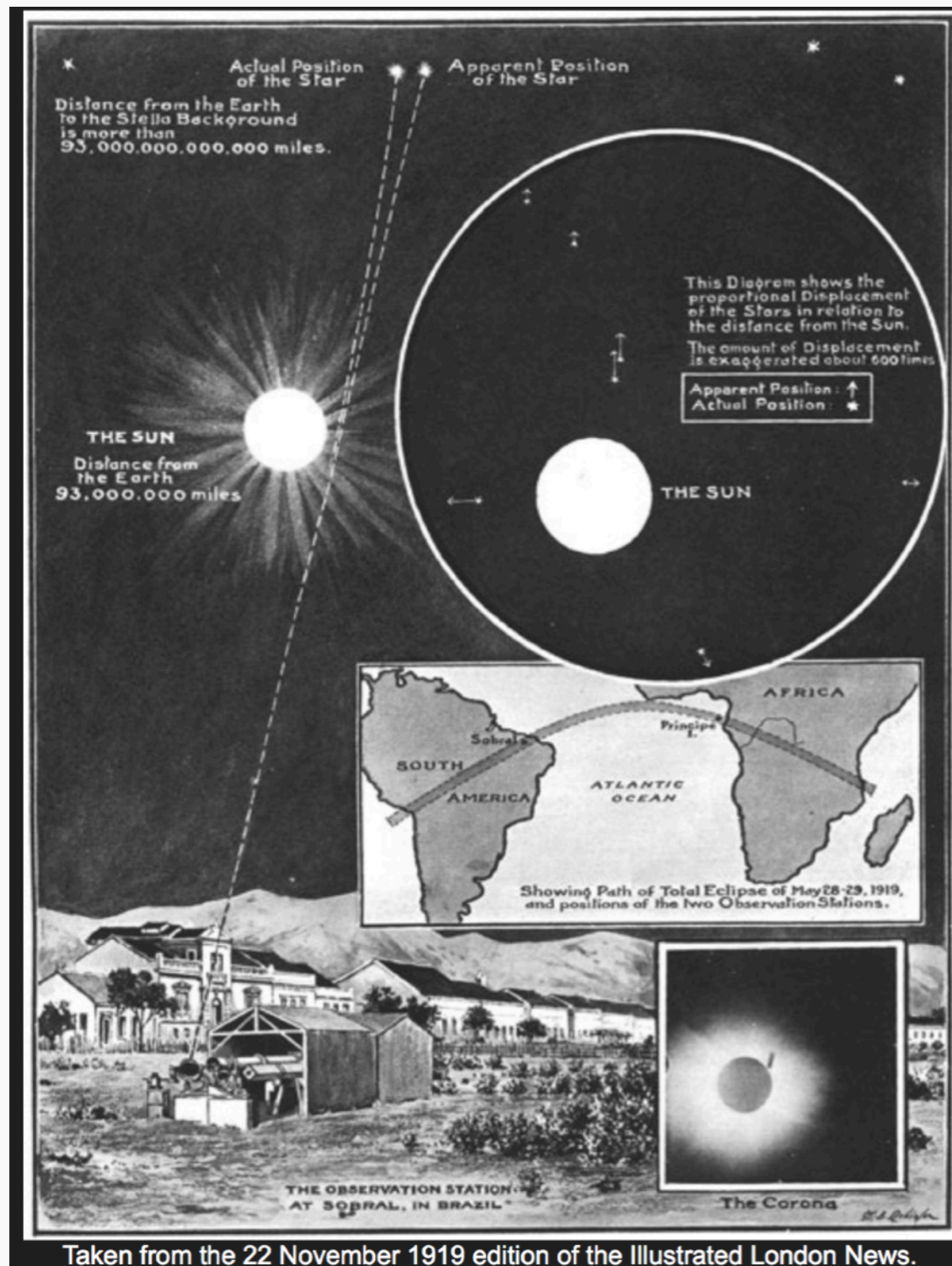
$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{d\lambda} \frac{dx^\beta}{d\lambda} = 0$$

- 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



Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.



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  
 $1.61'' \pm 0.40''$  @Principe  
 $1.98'' \pm 0.16''$  @Sobal

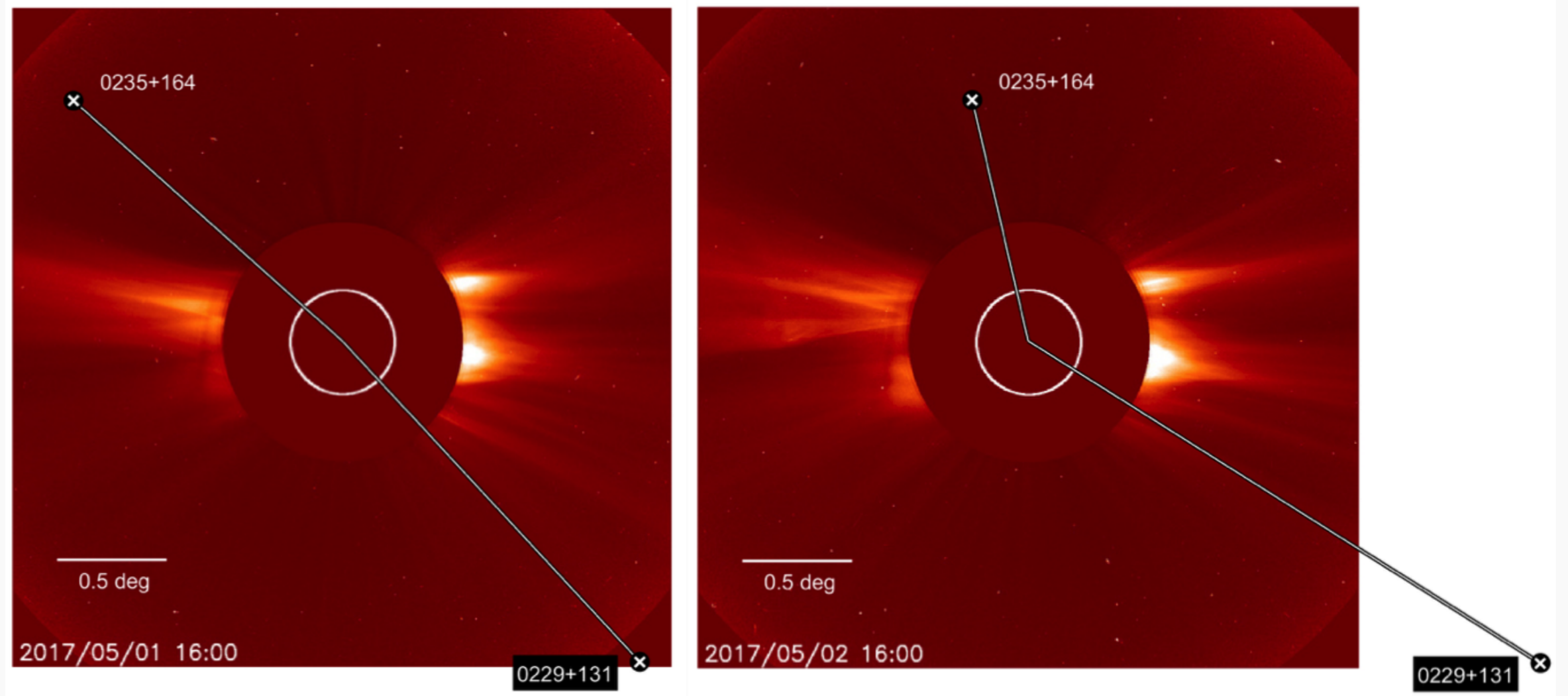
→ **一般相対論は正しい!**

# 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
- Principe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)

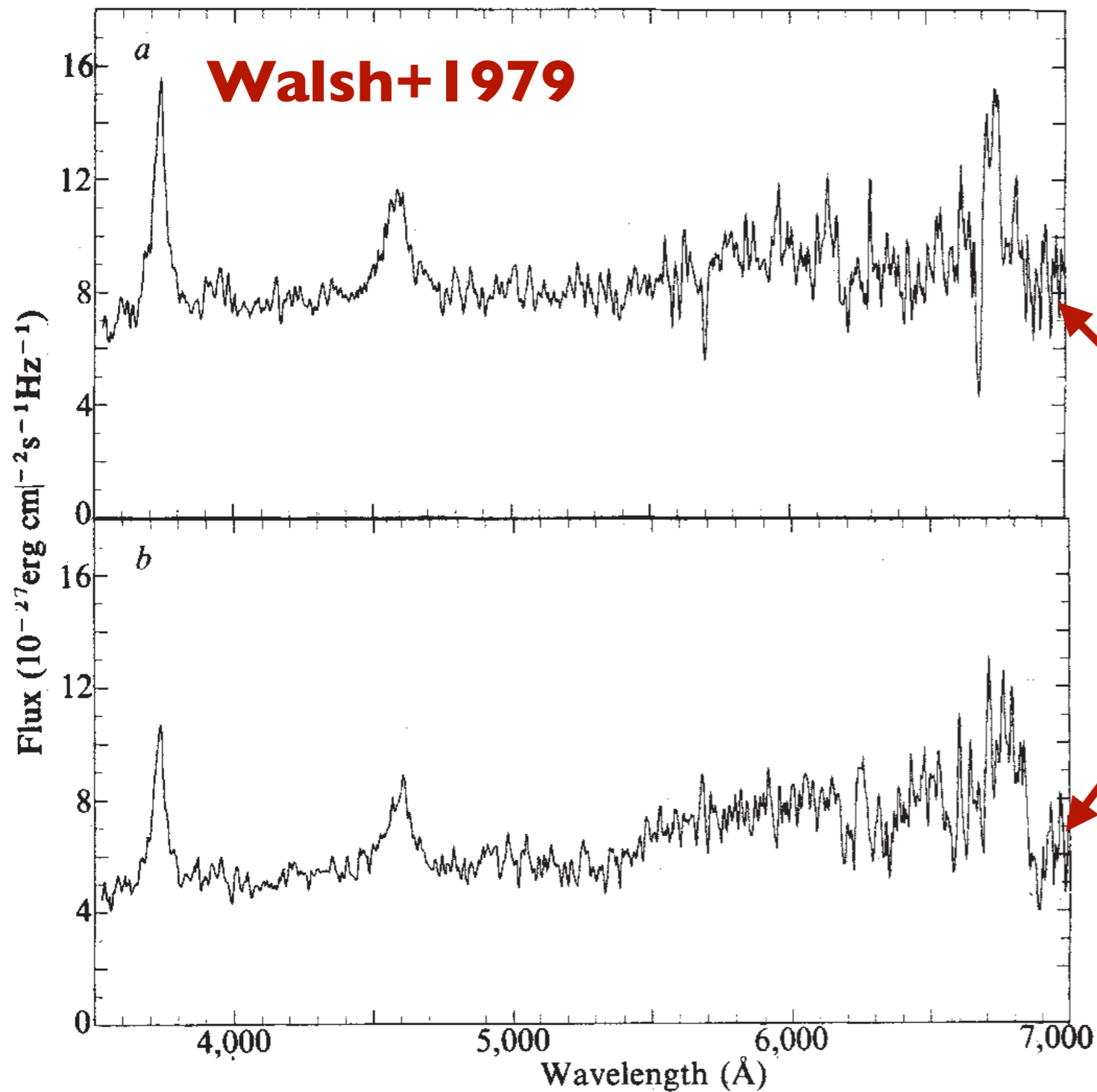
## Q0957+561

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)

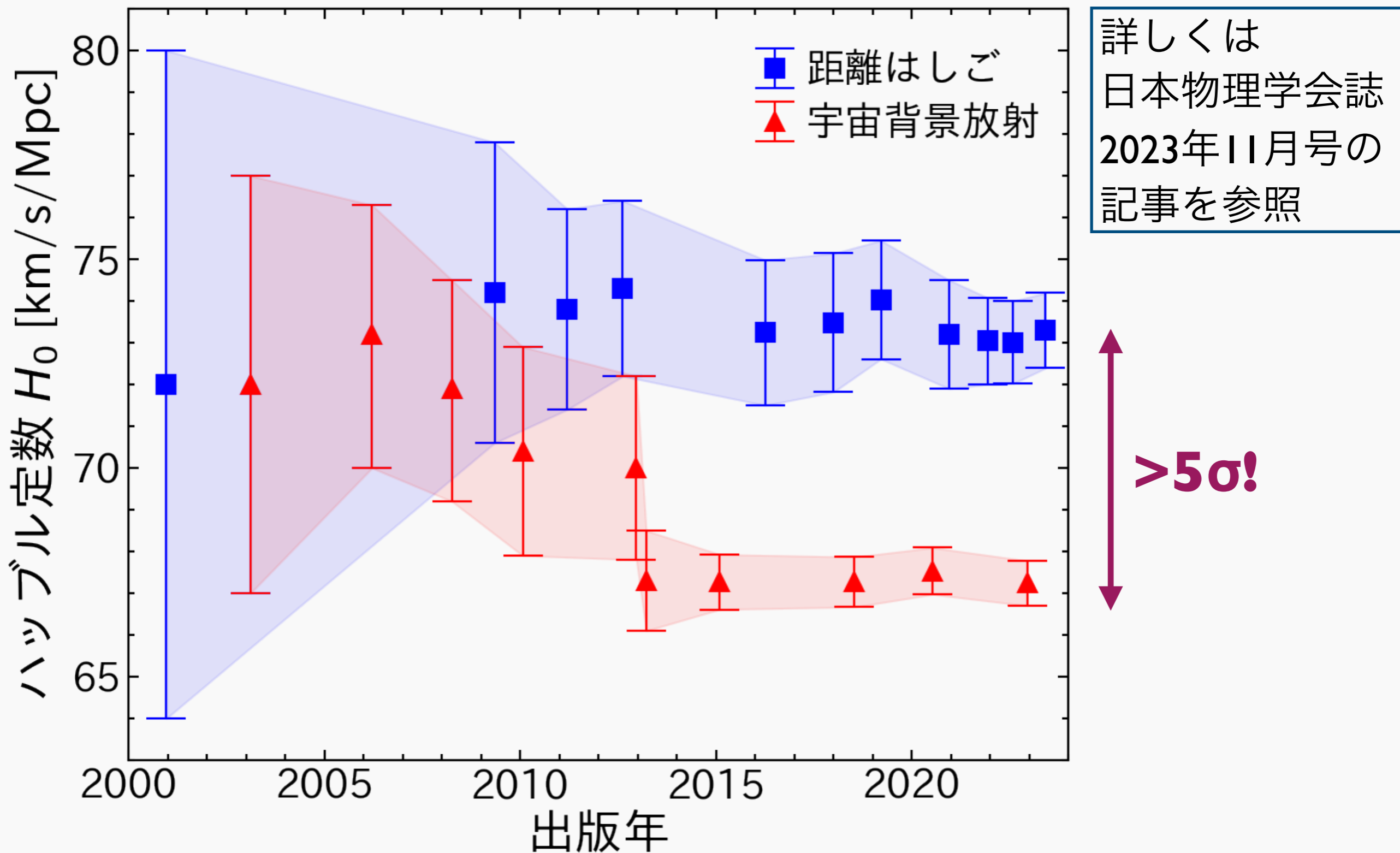
銀河団背後の多数の  
重力レンズアーク



# 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



# 時間の遅れ

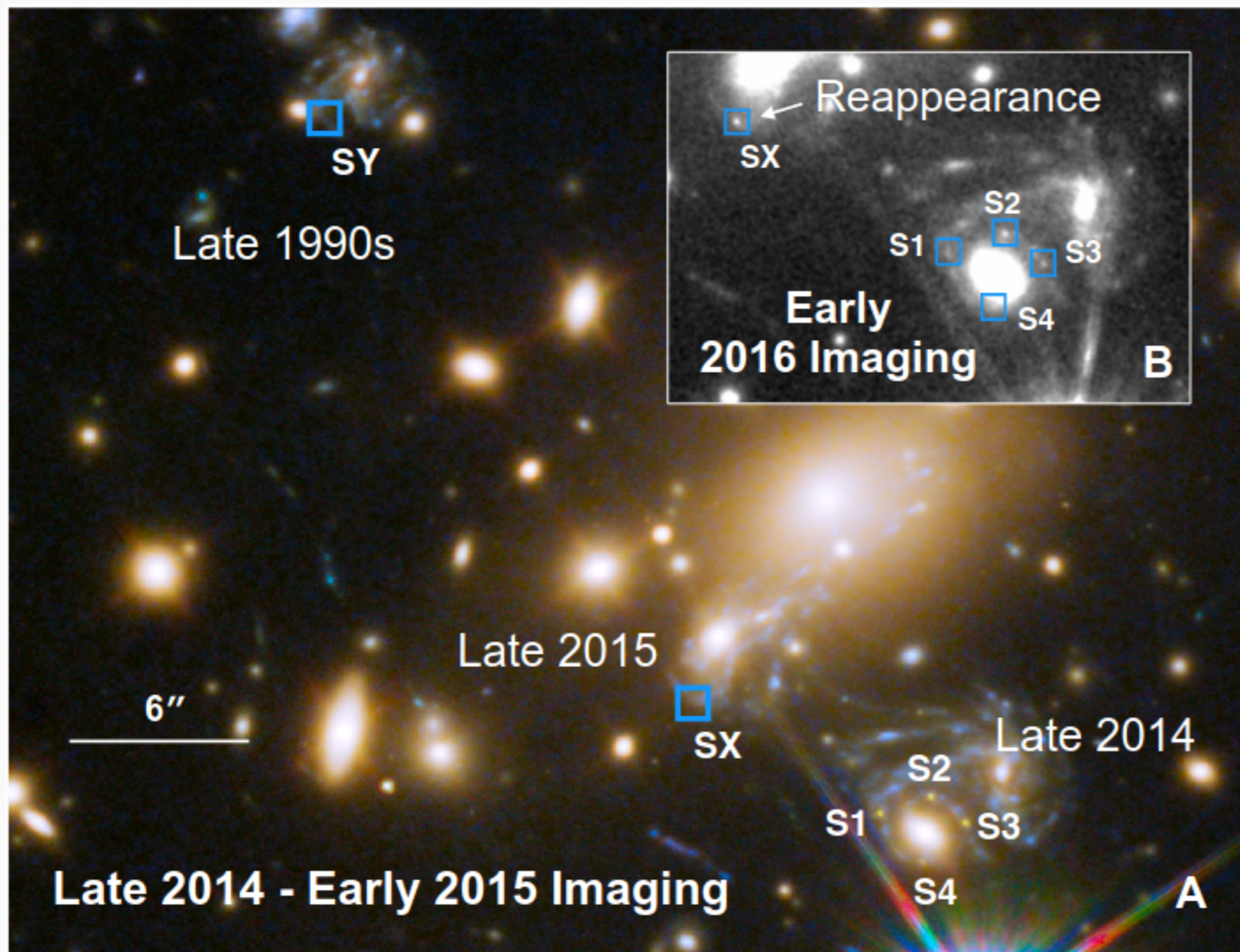
- 複数像の到達時刻が異なる (月~年)
- ソース天体がクエーサーや超新星など時間変動する天体の場合に観測される



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

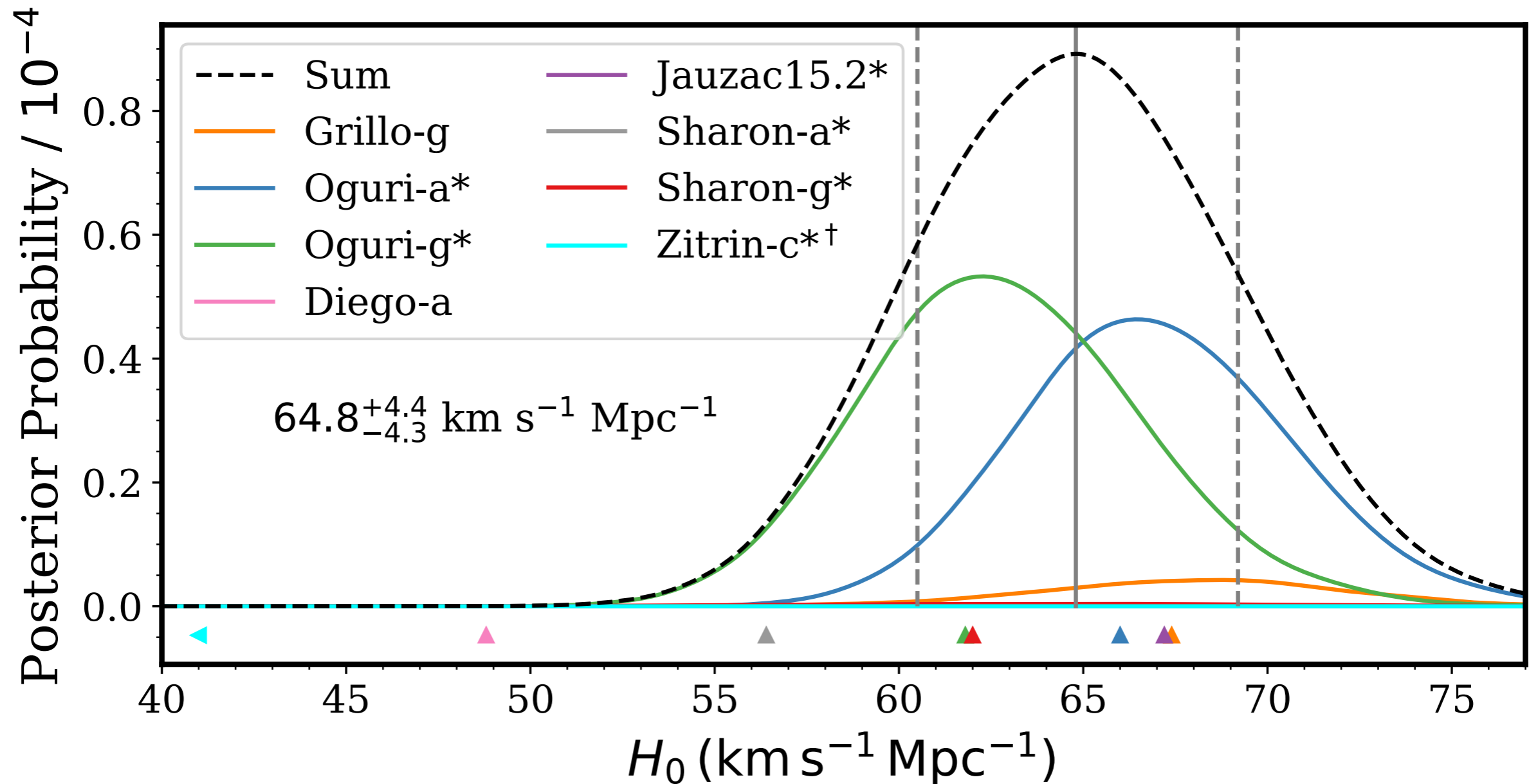


2014年に  
四重像の  
発見 (S1-S4)

2015年の  
像SX出現  
予言

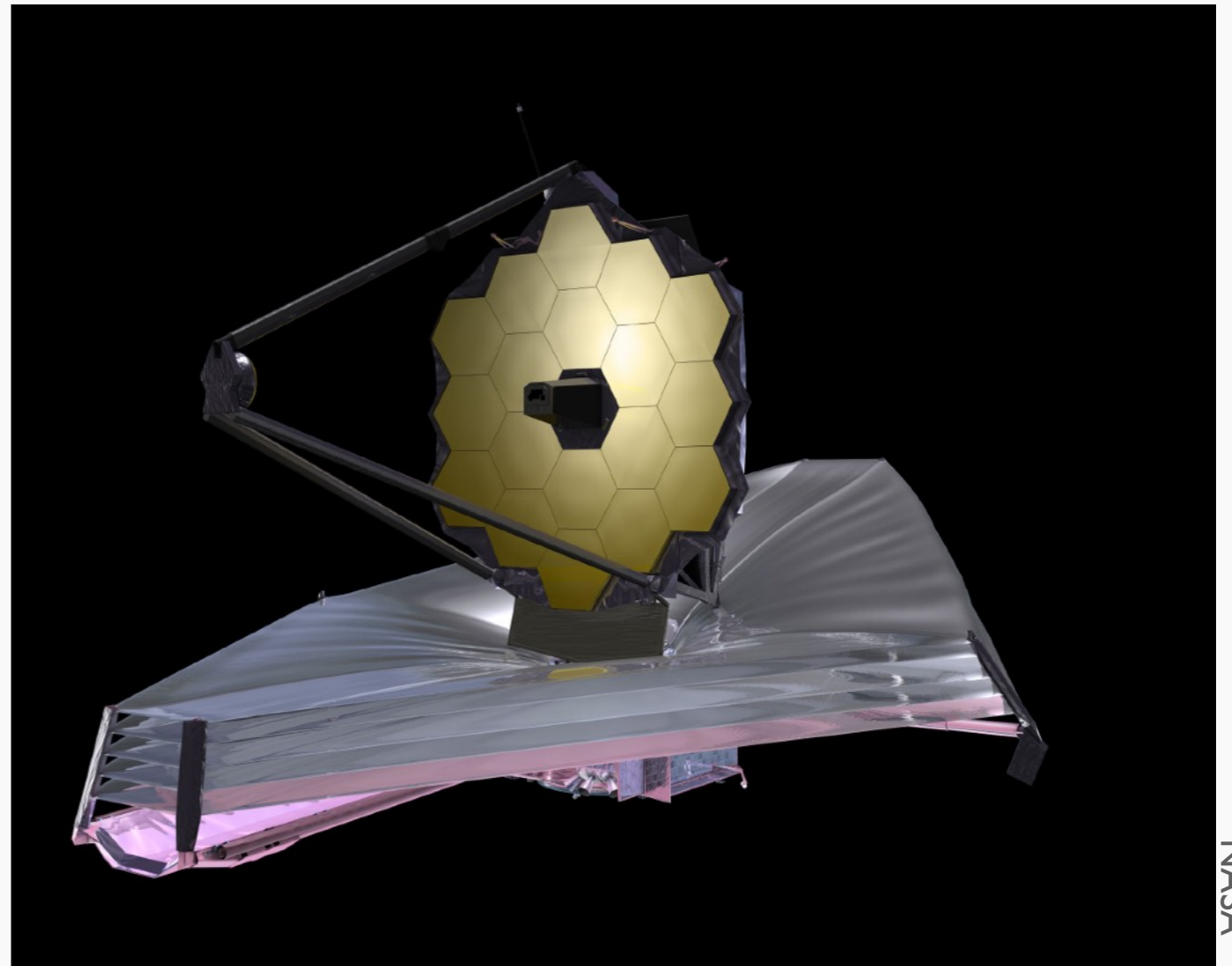
予言通り  
SXが発見

# Refsdalによるハッブル定数測定



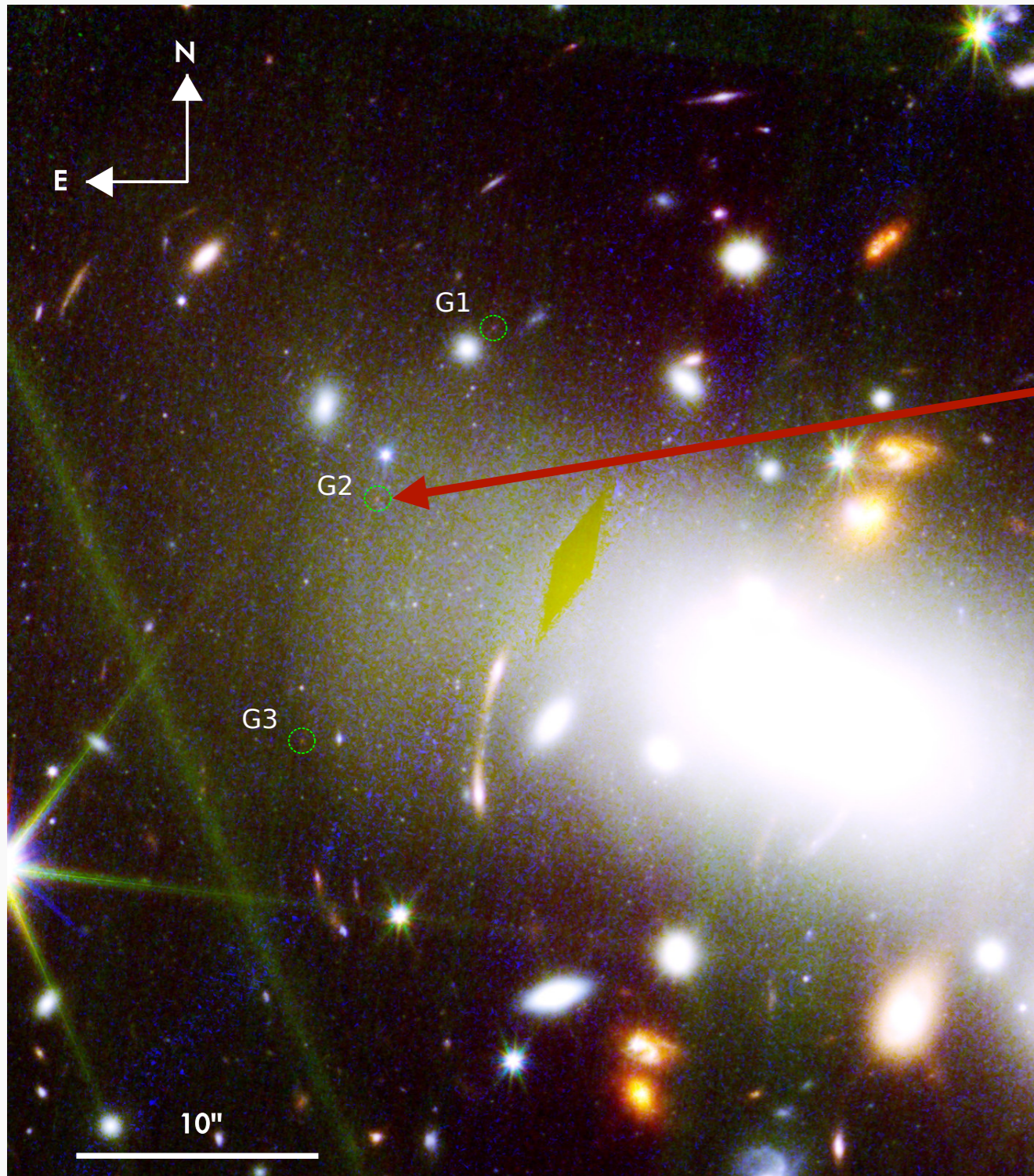
Kelly, Rodney, Treu, MO+ Science, **380**, abh1322 (2023)

# 増光を利用した遠方天体探査

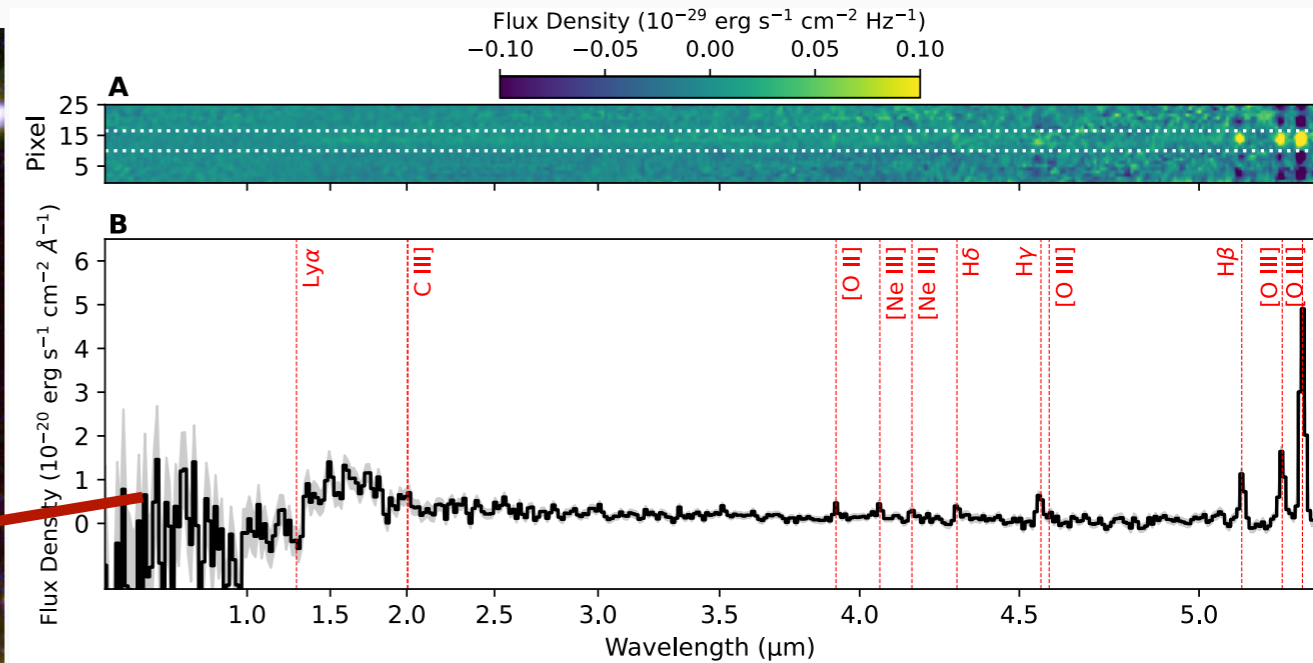


- 2021年12月に打ち上げられたジェームズウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) により大きな進展

# JWST観測の初期成果

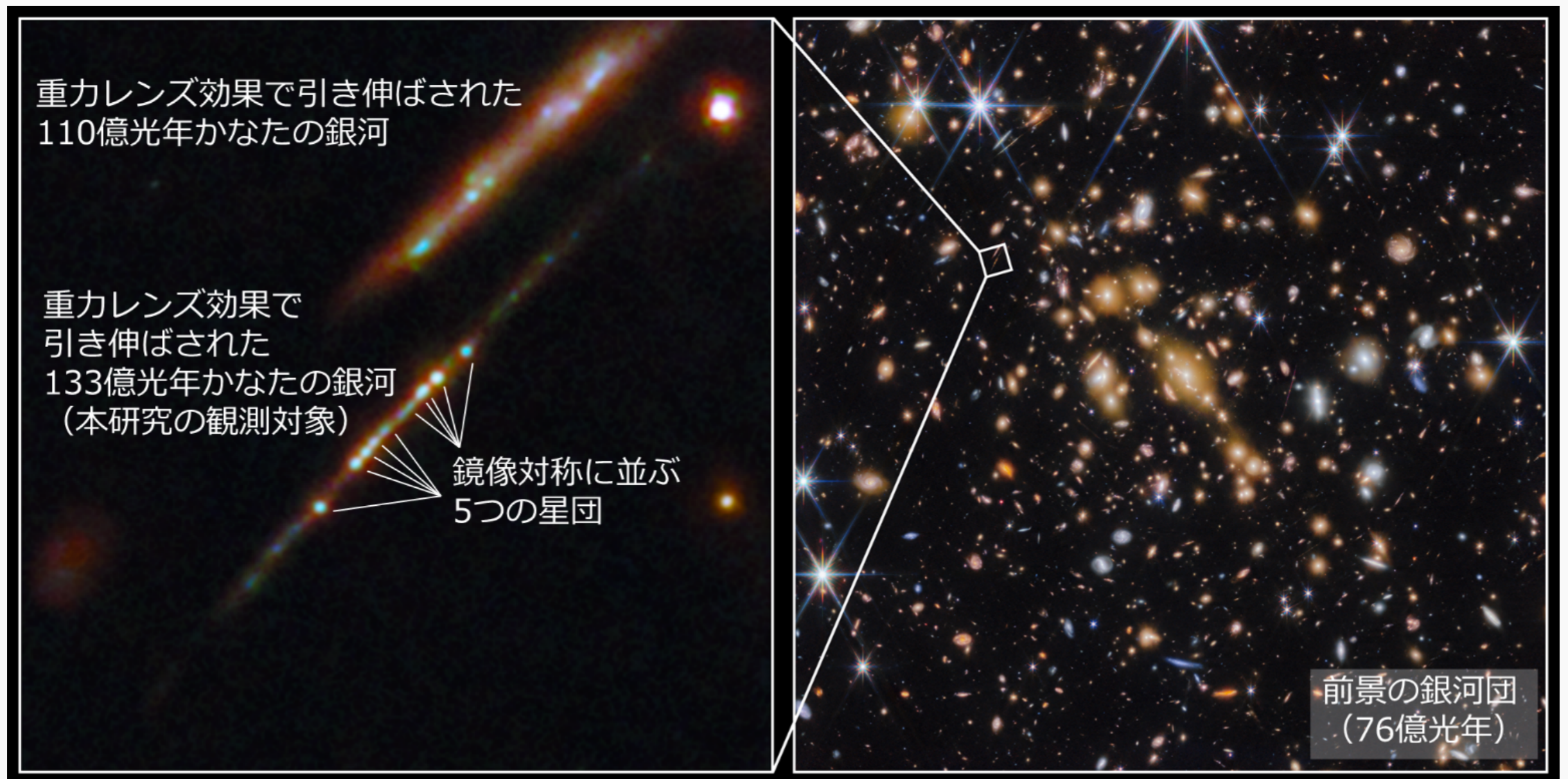


Williams+ (incl. MO) Science, **380**, 416 (2023)



- $z=9.51$  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

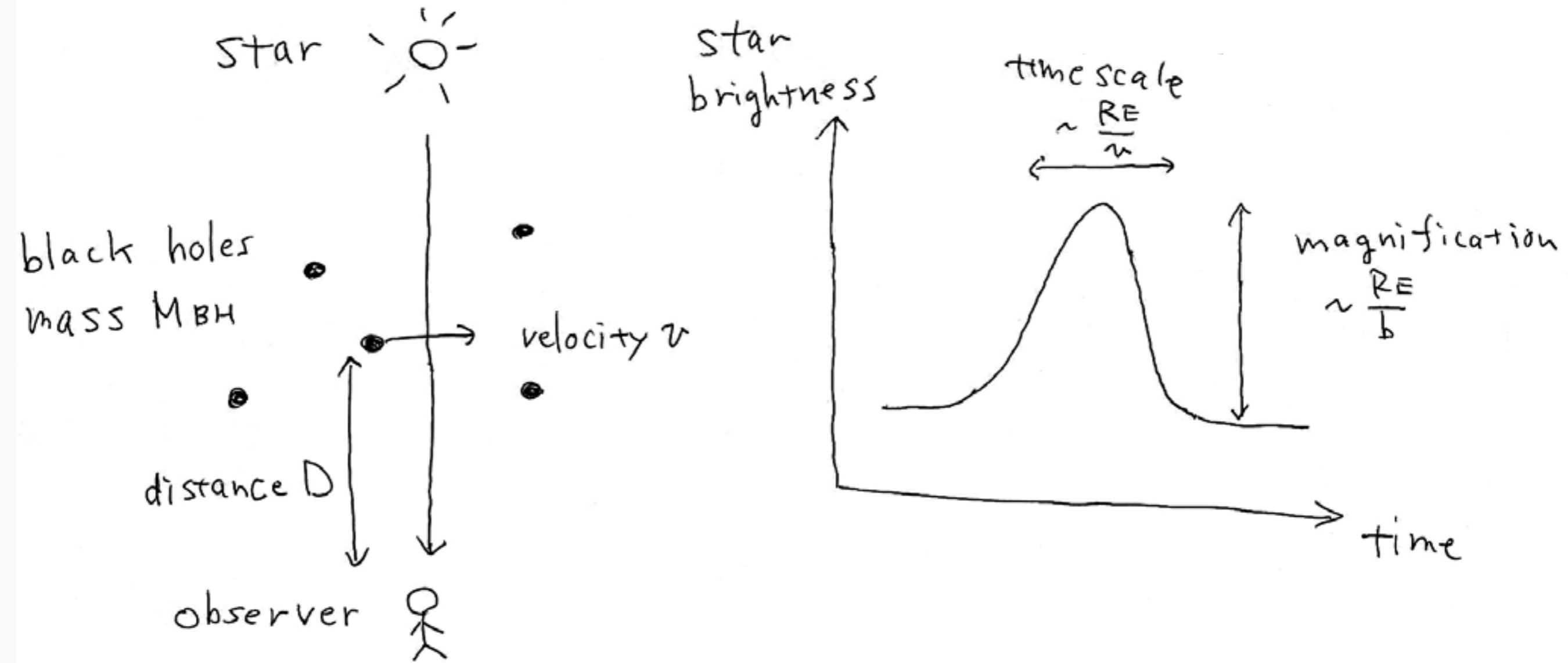
# 星団の発見



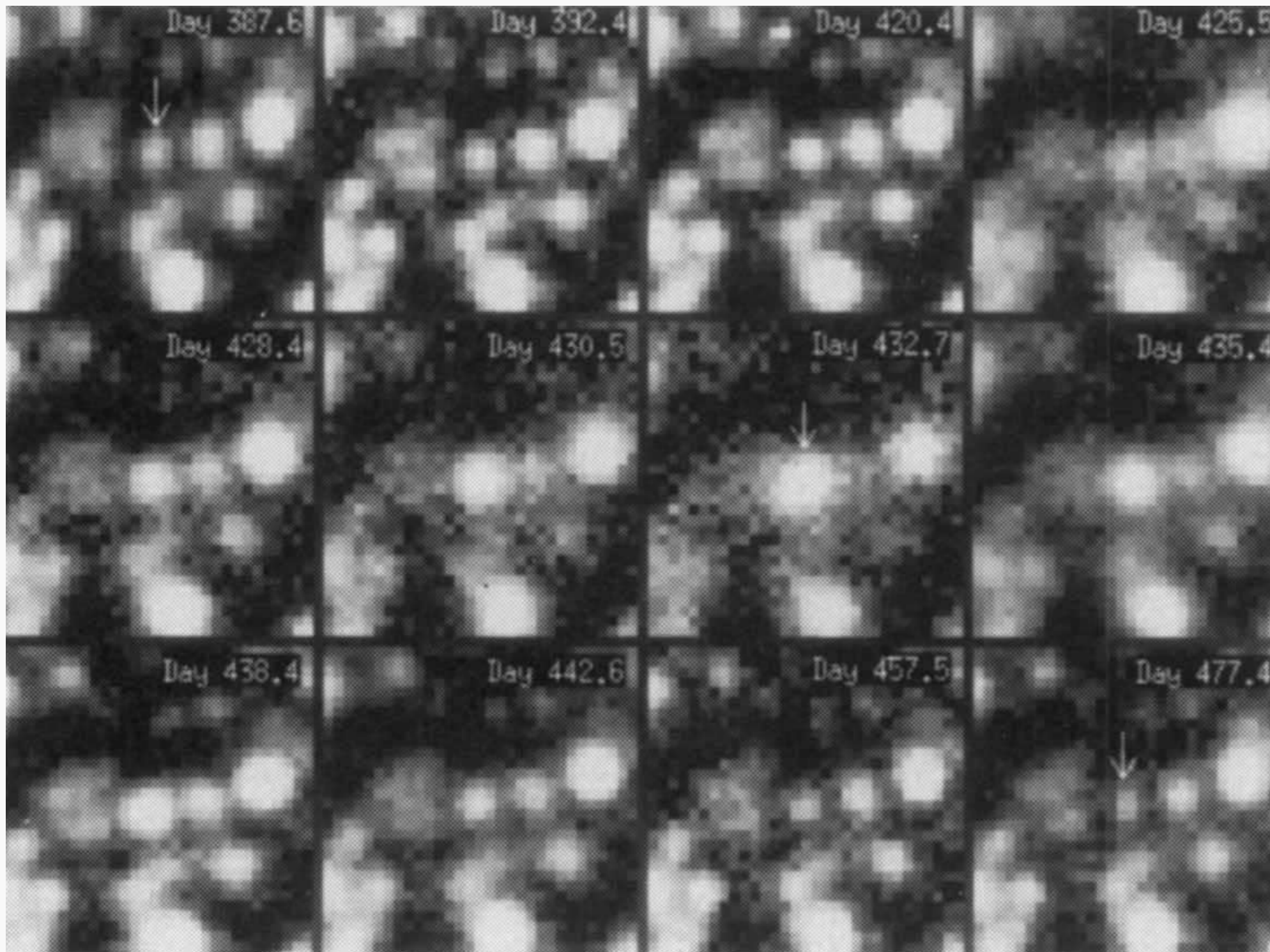
Adamo+ (incl. MO) Nature **632**(2024)513

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



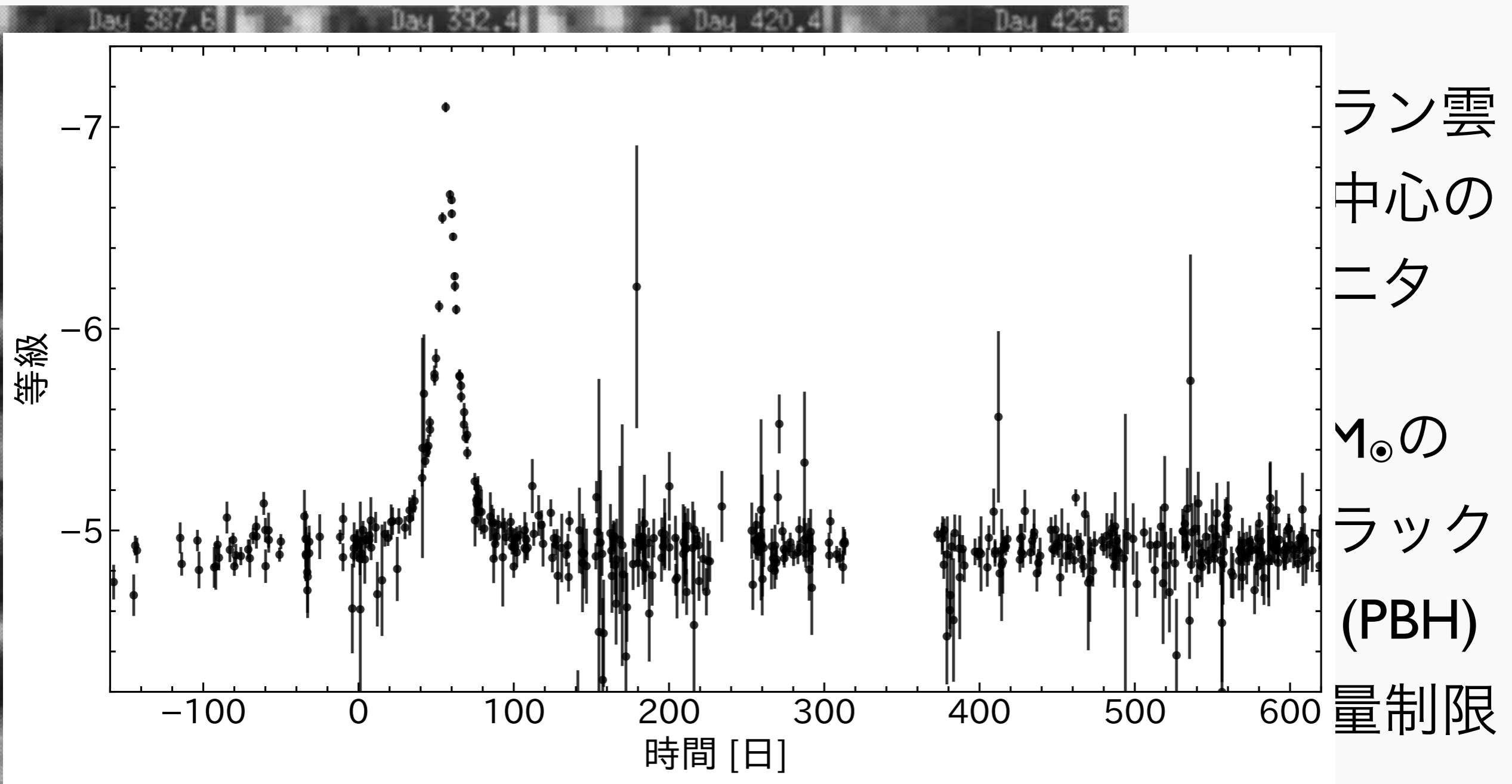
# MACHO探査



大マゼラン雲  
や銀河中心の  
星のモニタ

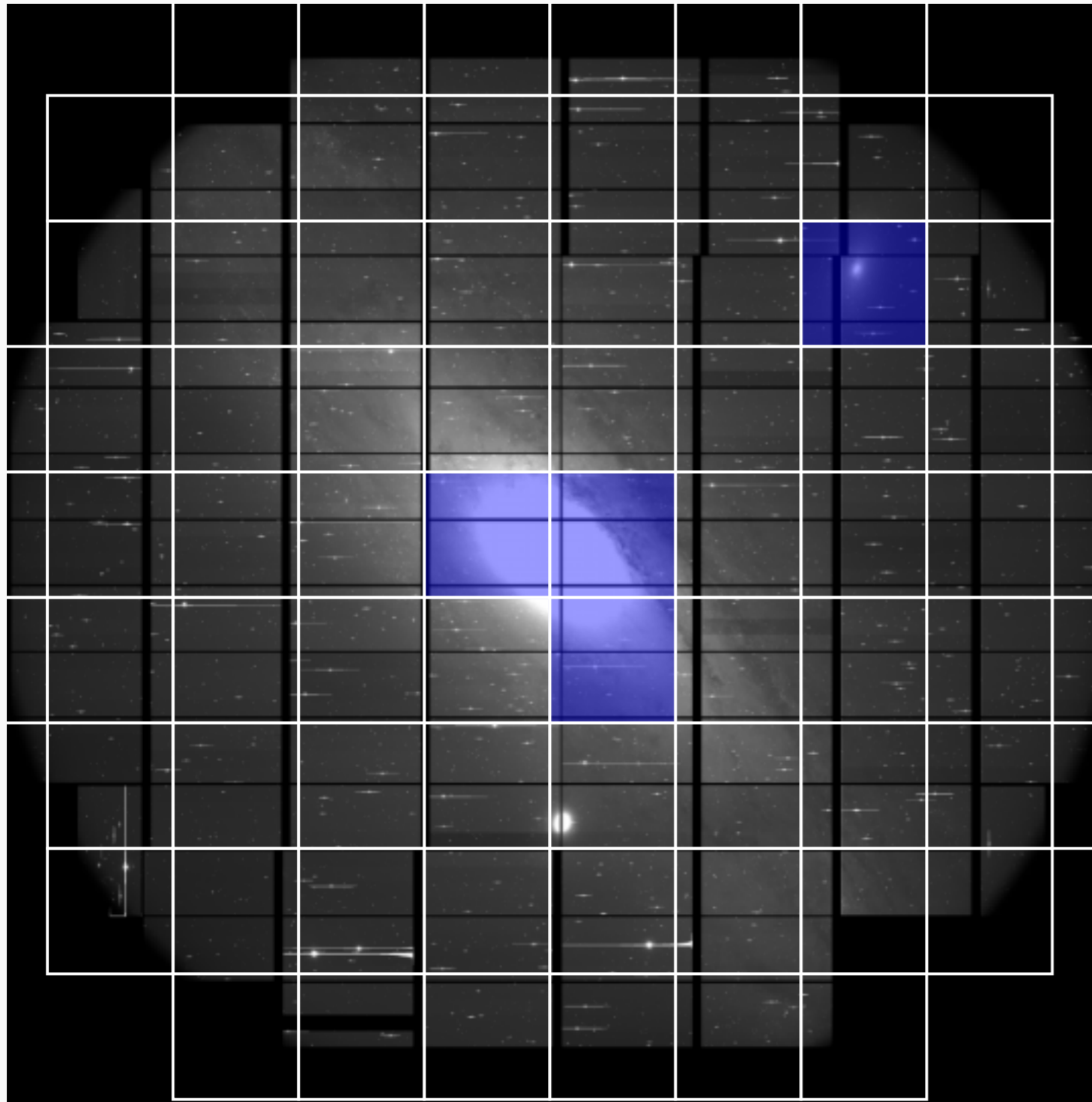
$\sim 10^{-5} M_{\odot}$ の  
原始ブラック  
ホール (PBH)  
の存在量制限

# MACHO探査





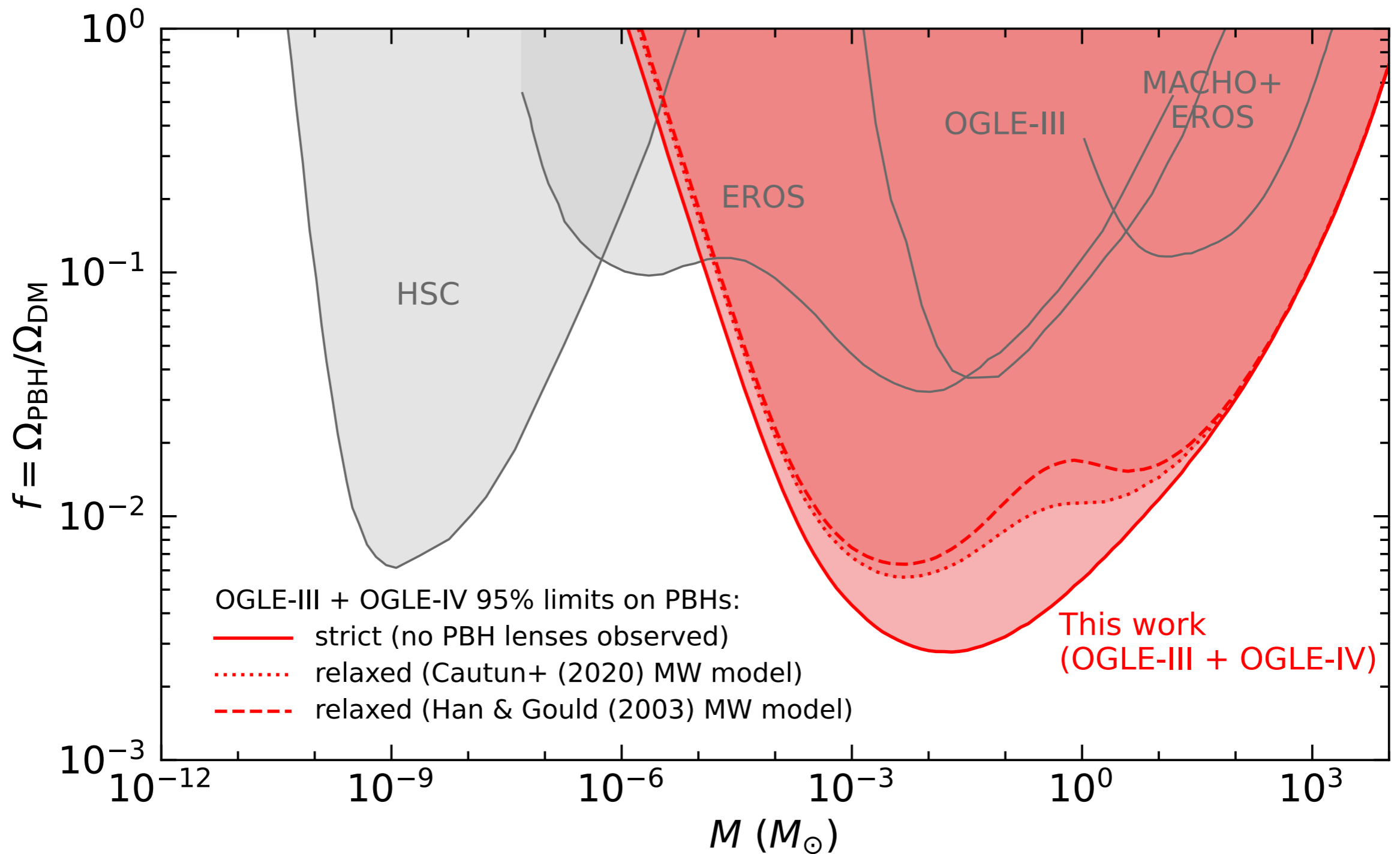
# すばるHSCマイクロレンズ探査



M31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

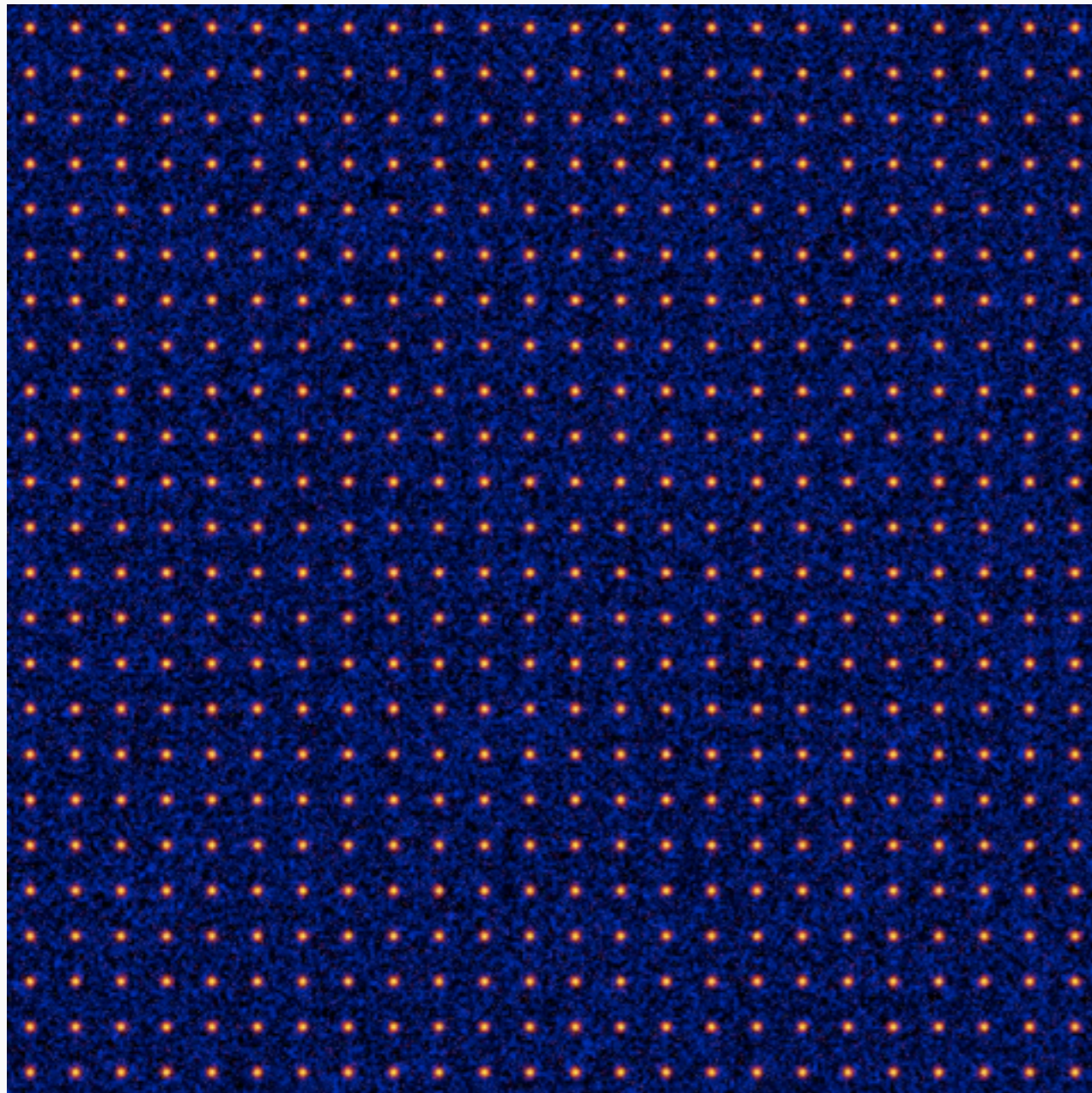


# 弱い重力レンズ

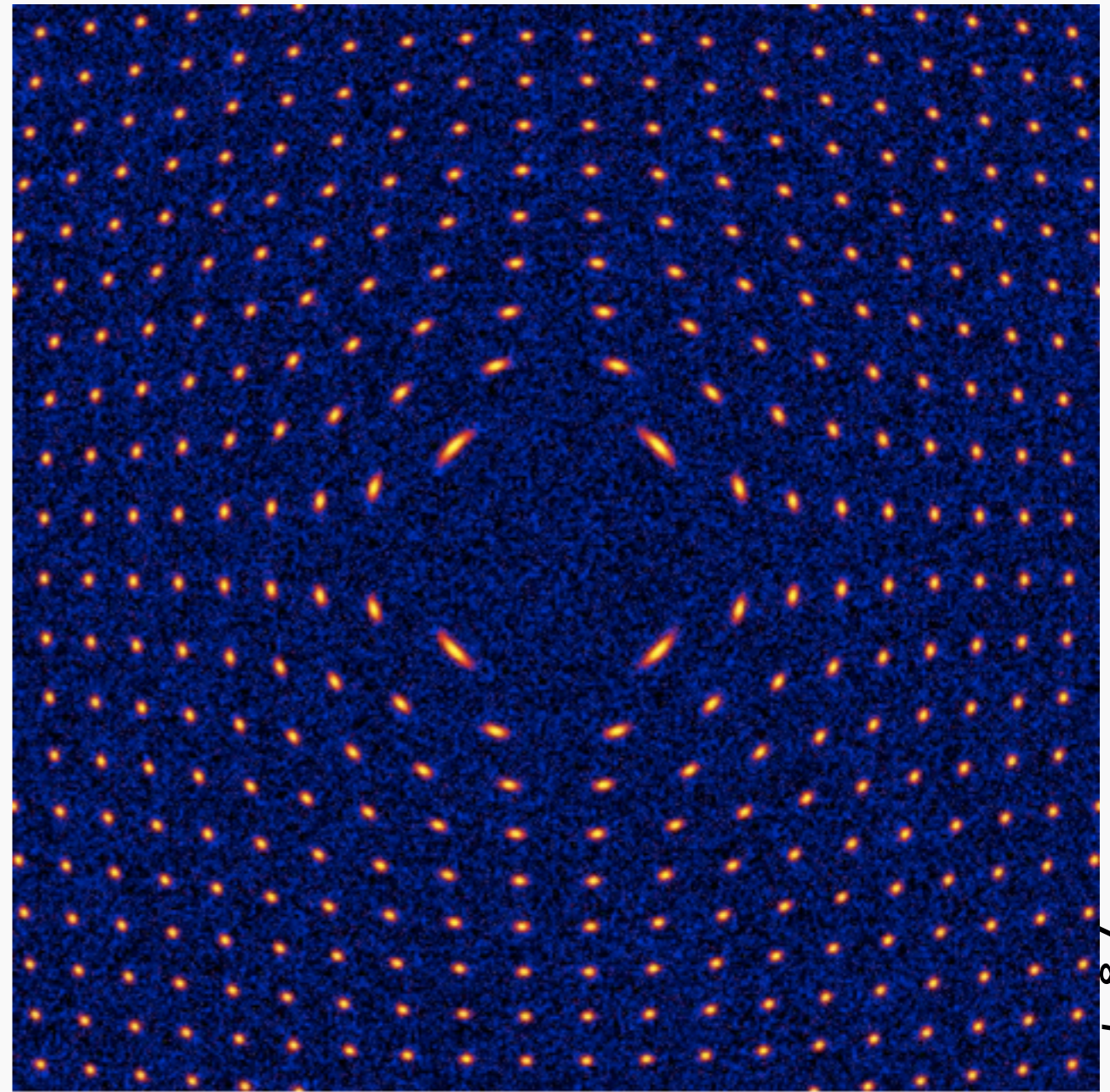
simulated by *glafic*



# 背景銀河への重力レンズ効果



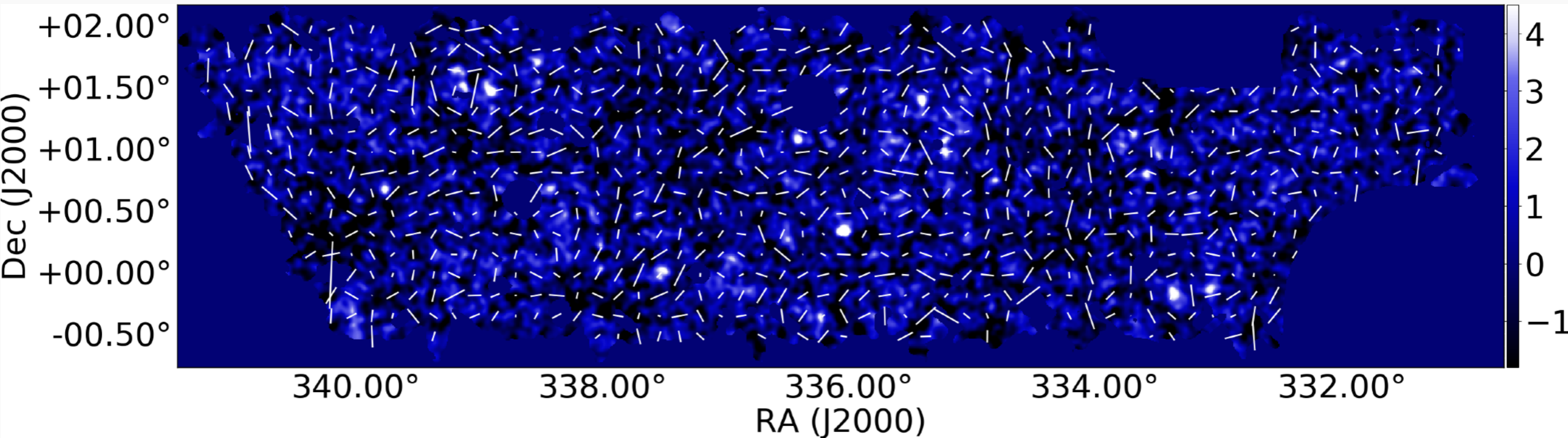
重力レンズなし



中心にレンズ天体

simulated by glafic

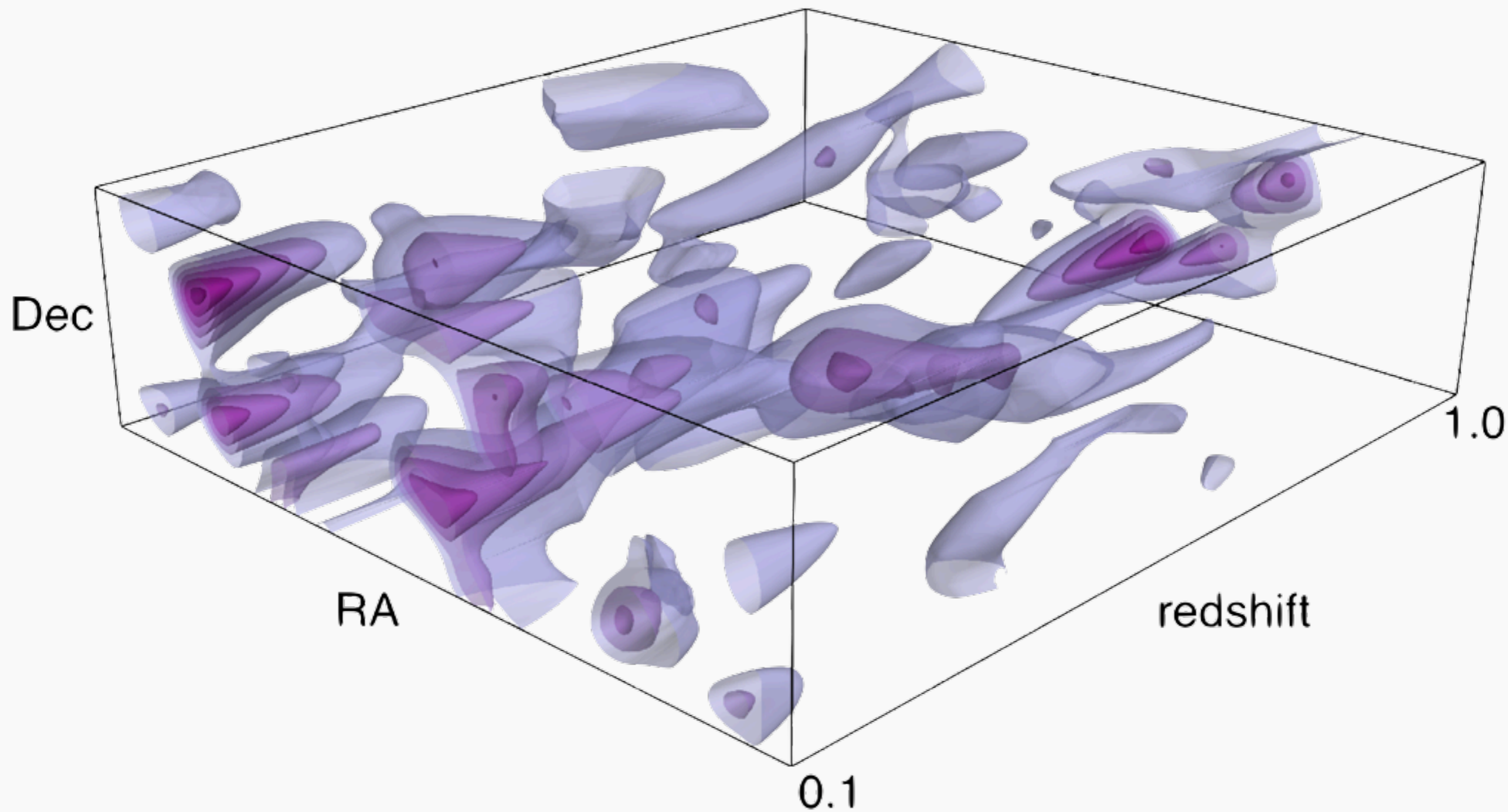
# 質量分布の再構築



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