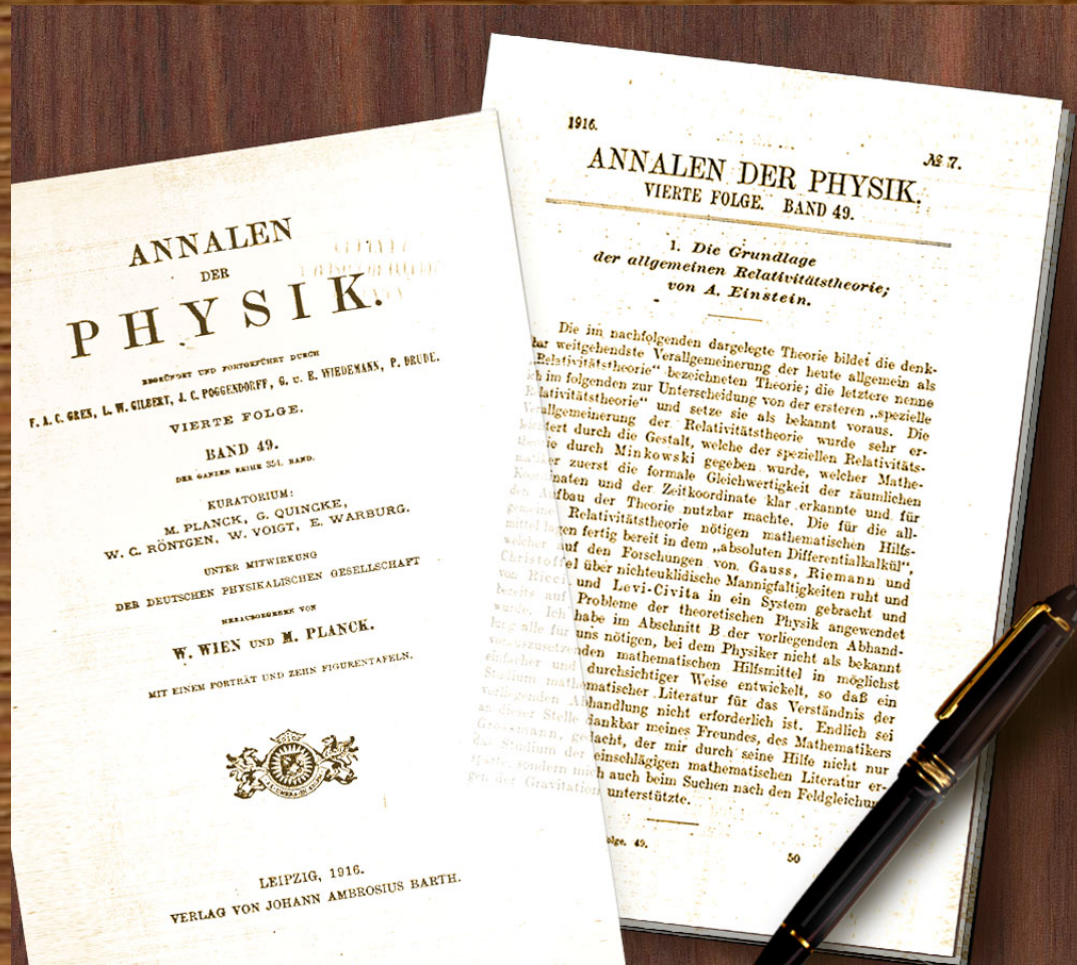
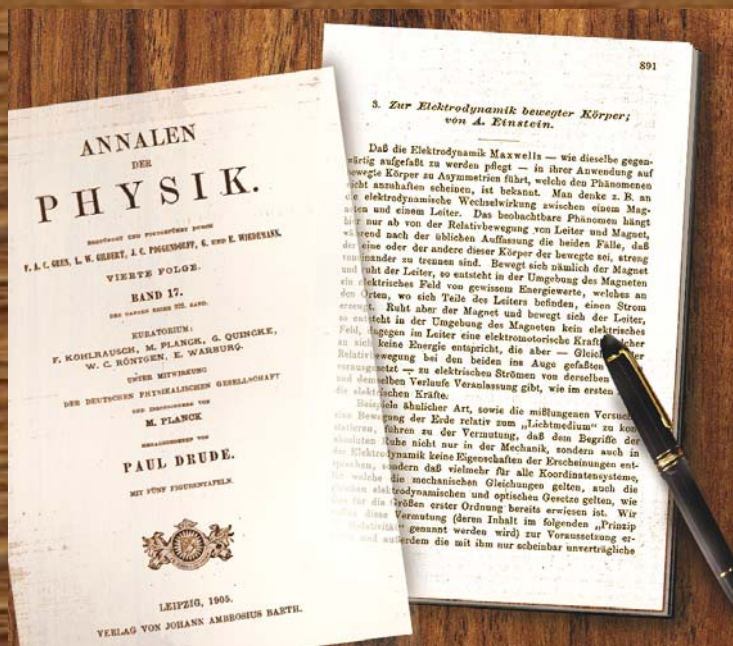


重力レンズ天文学

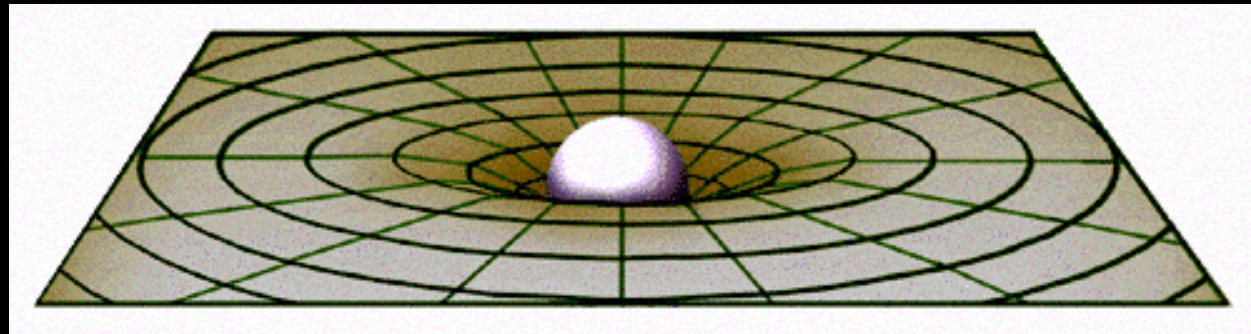
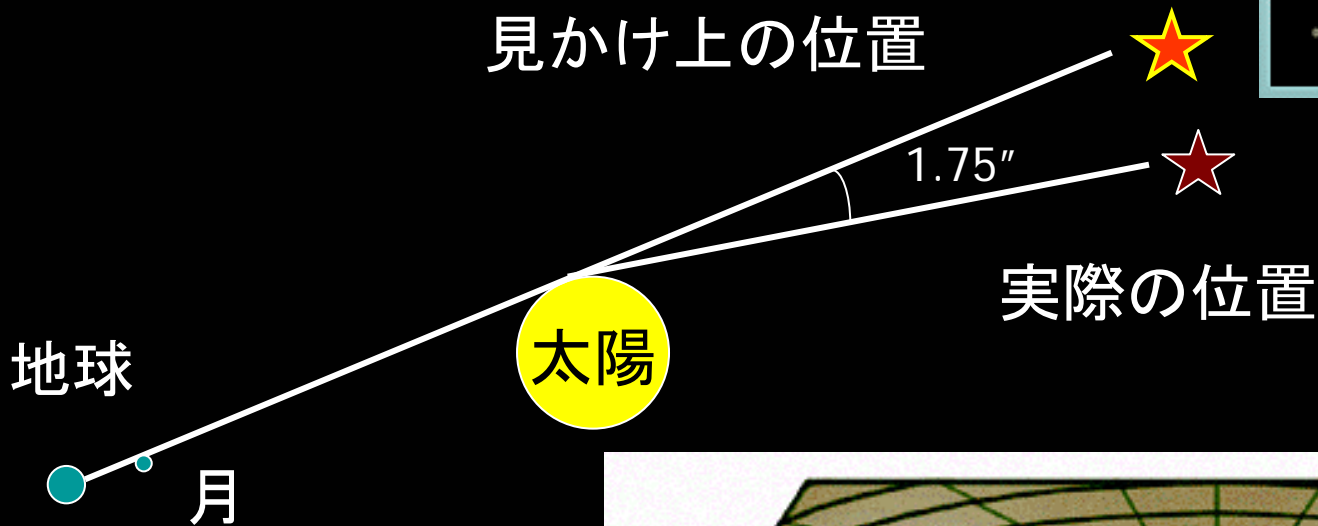
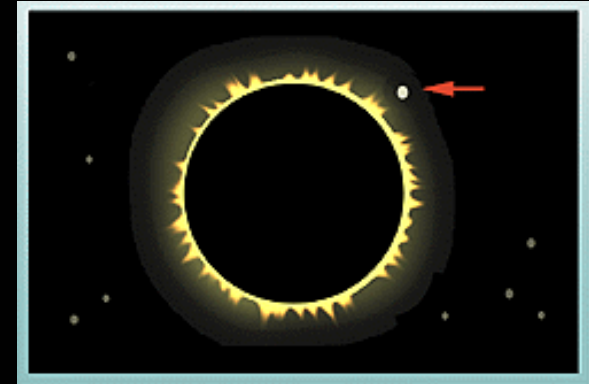


東京大学 理学部
一般相対論講義 第12回
2008年7月15日
須藤 靖

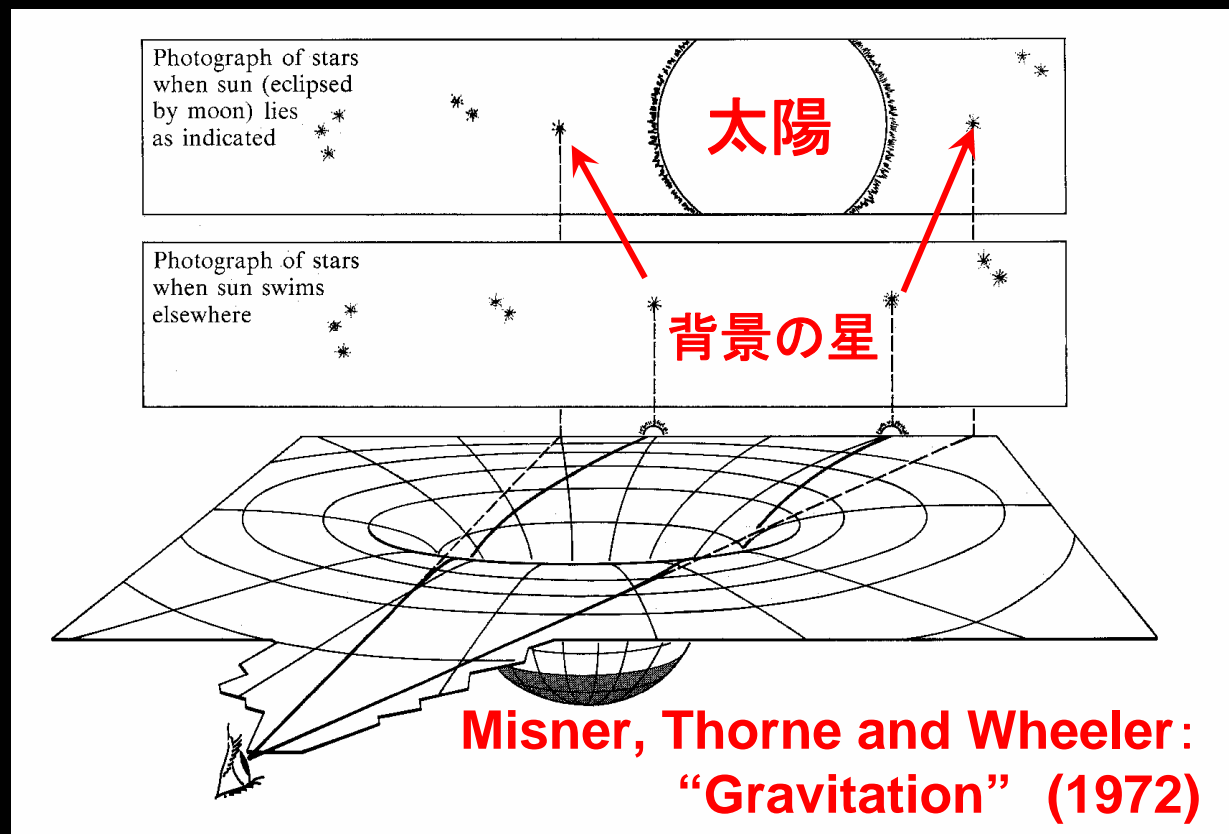
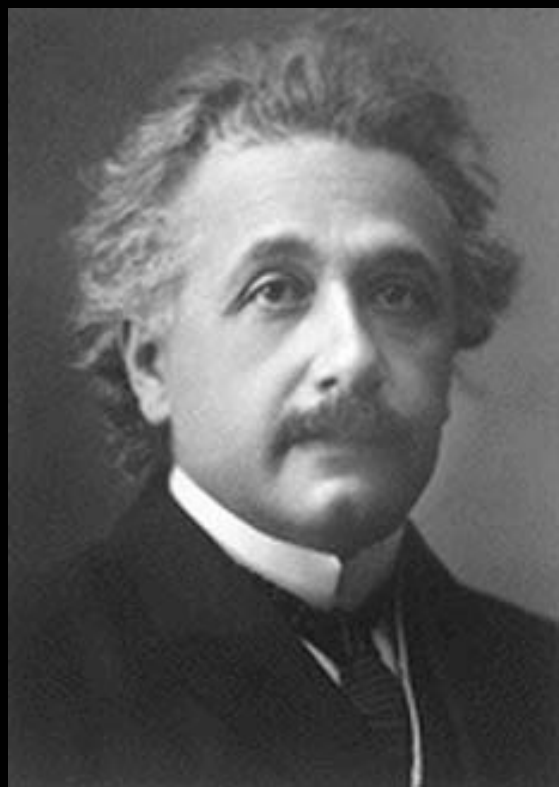
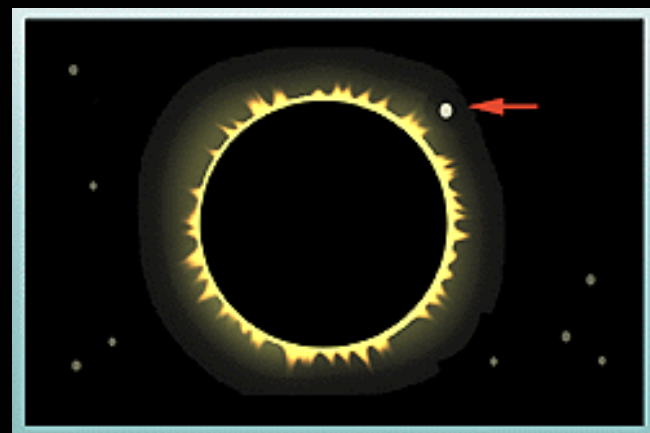
重力＝時空の曲がり

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

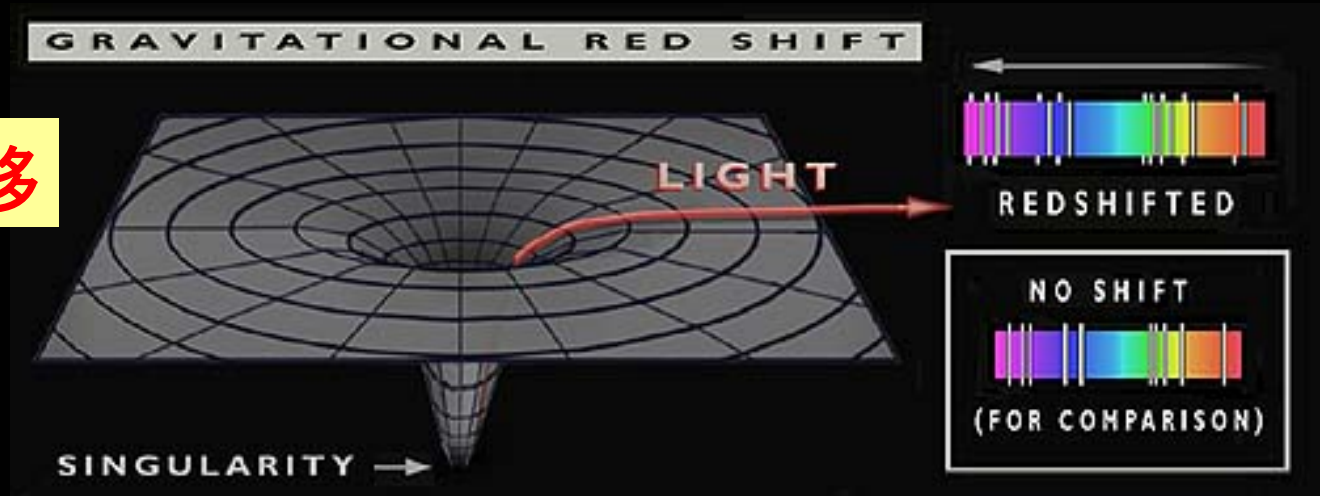


重力による時空の 曲がり

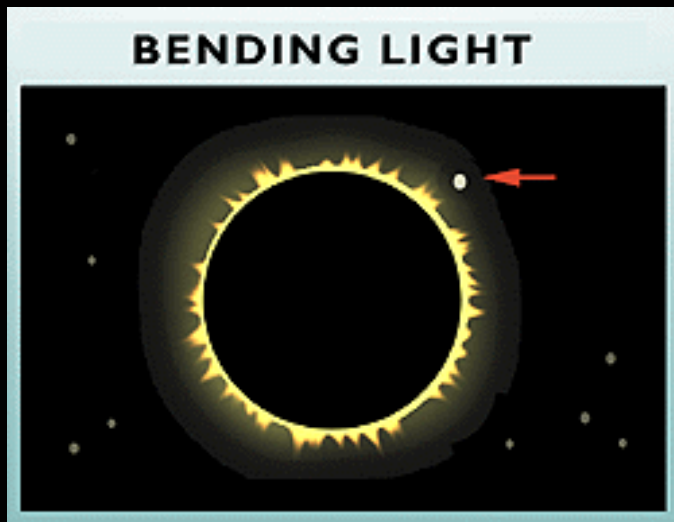


一般相対論の検証

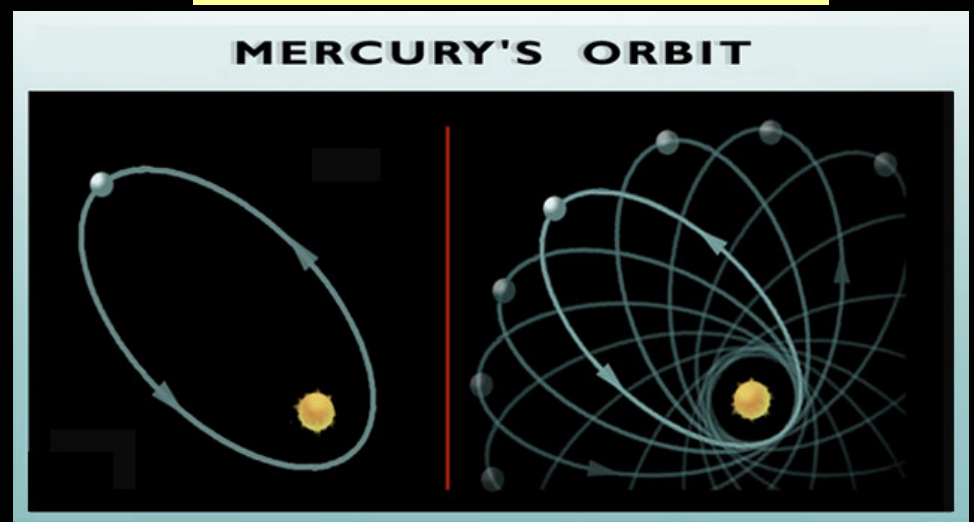
重力赤方偏移



太陽の周りの光線の湾曲



水星の近日点移動



重カレンズ



Zürich. 14. I. 13.

Aus
Hoch geehrtes Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.

\downarrow \rightarrow Lichtstrahl
grav. Feld

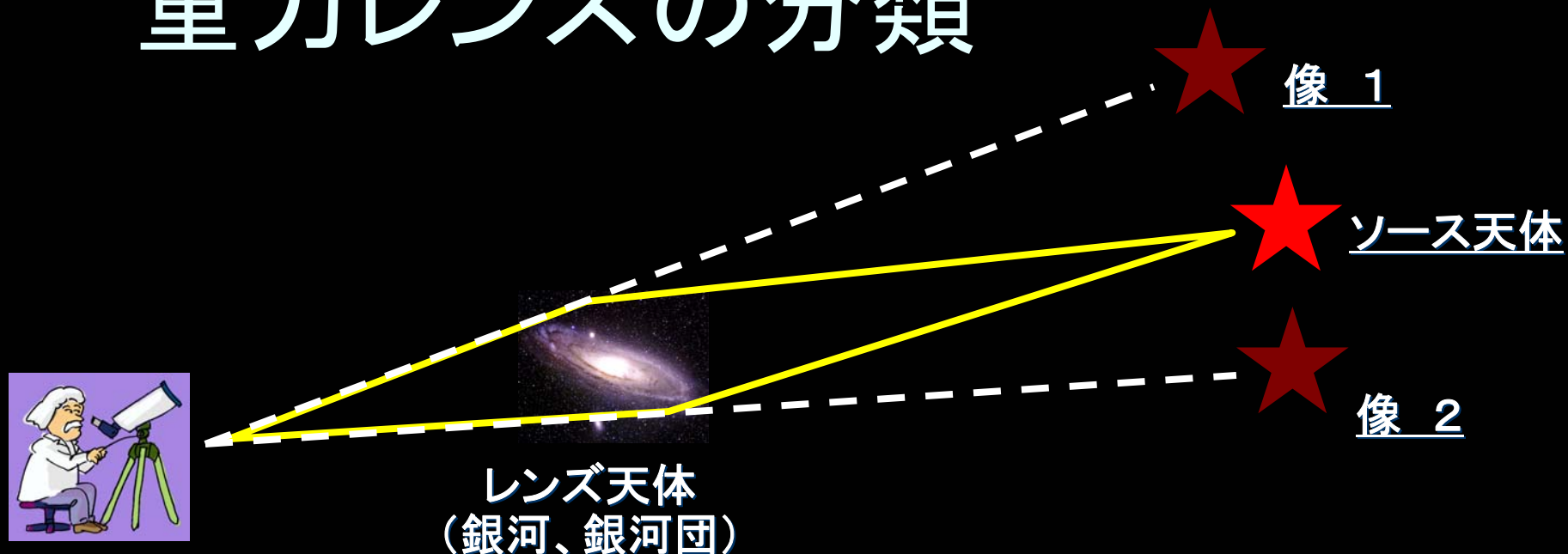
Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung $0,84^\circ$ betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen ($R = \text{Sonnenradius}$ - Mittelpunkt)

$\sim 50.84^\circ$

Sonne

Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnen-
nähe ^{helle} ~~grosse~~ Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

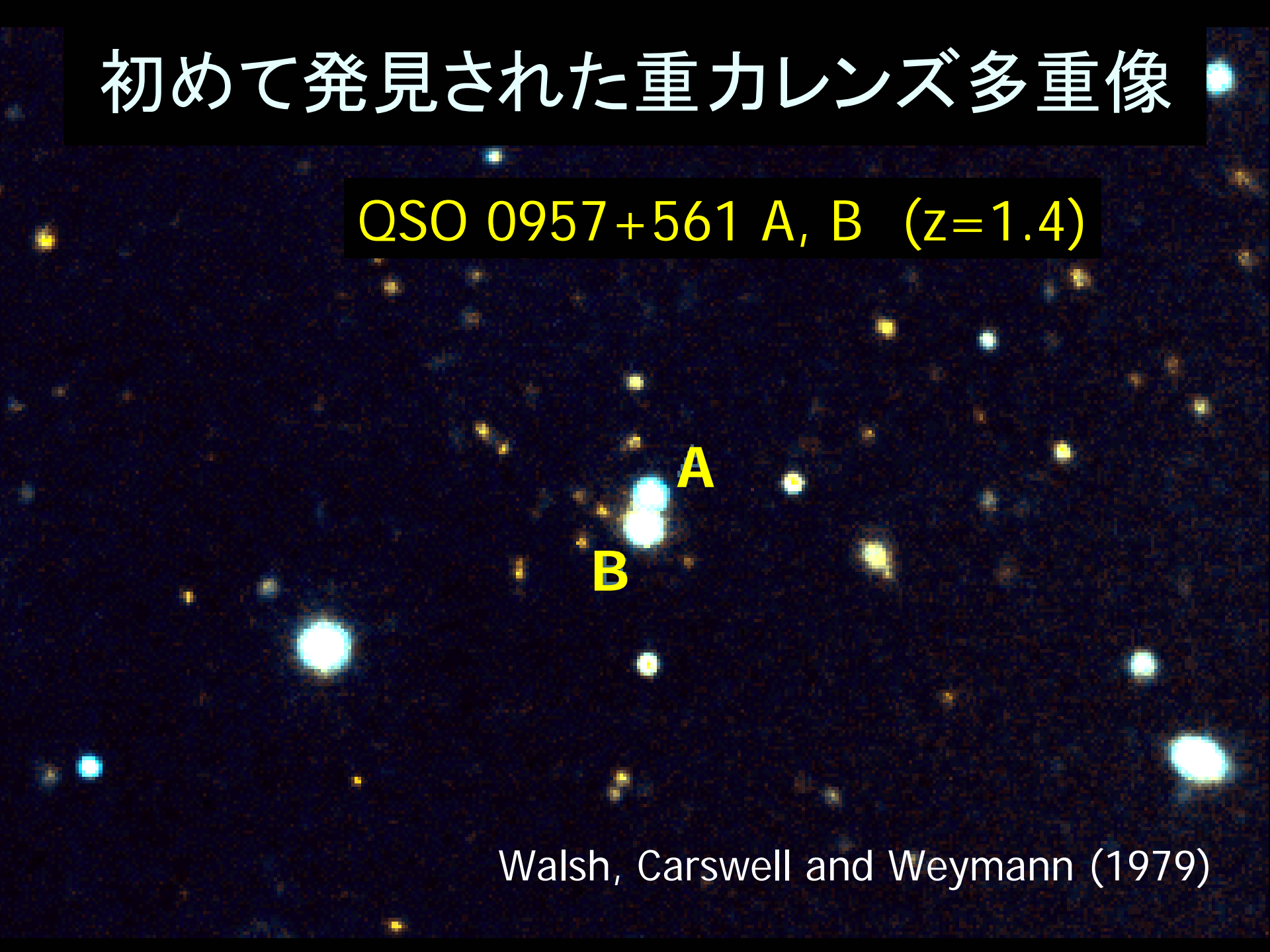
重力レンズの分類



- 光線は重力場によって曲げられる
 - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
 - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
 - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

初めて発見された重力レンズ多重像

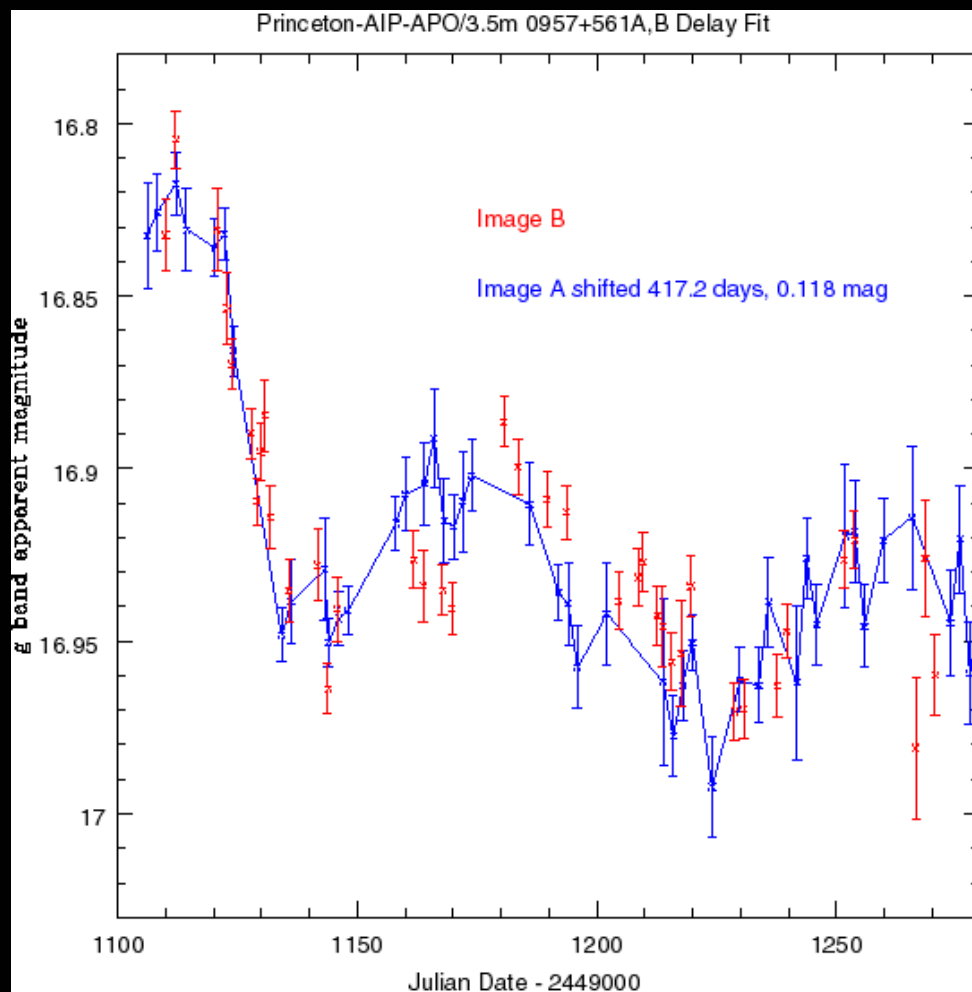
QSO 0957+561 A, B ($z=1.4$)

The image shows a field of stars and galaxies. Two specific images of a quasar are highlighted with yellow labels 'A' and 'B'. Image A is located at approximately [463, 530, 510, 560] and image B is at [570, 460, 620, 490]. Both images appear as bright, slightly blurred spots of light. The background is a dark field filled with numerous other stars and galaxies of varying brightness and colors, including some blue and red objects.

A
B

Walsh, Carswell and Weymann (1979)

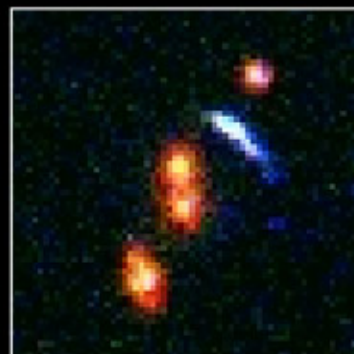
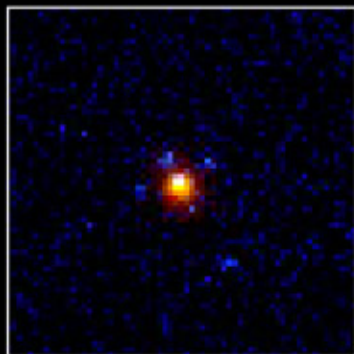
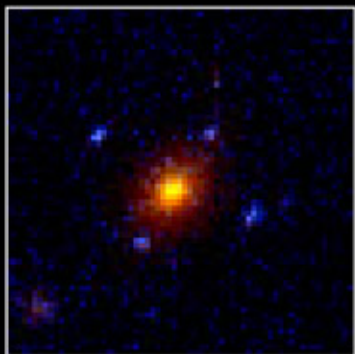
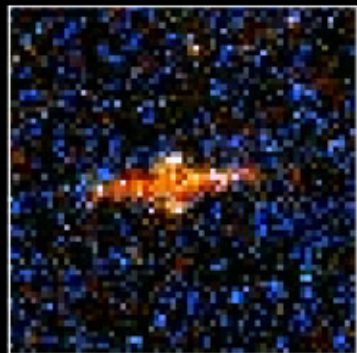
0957+561 A, Bの光度曲線と時間差



- QSOの明るさの時間変化より、Bイメージが約一年遅れていることがわかる
- 理論モデルとの比較より、ハッブル定数が推定できる (Kundic et al. 1997)

$$H_0 = 64 \pm 13 \text{ km/s/Mpc}$$

強い重力レンズの観測例 (HST)



Gallery of Gravitational Lenses

PRC99-18 • STScI OPO • K. Ratnatunga (Carnegie Mellon University) and NASA

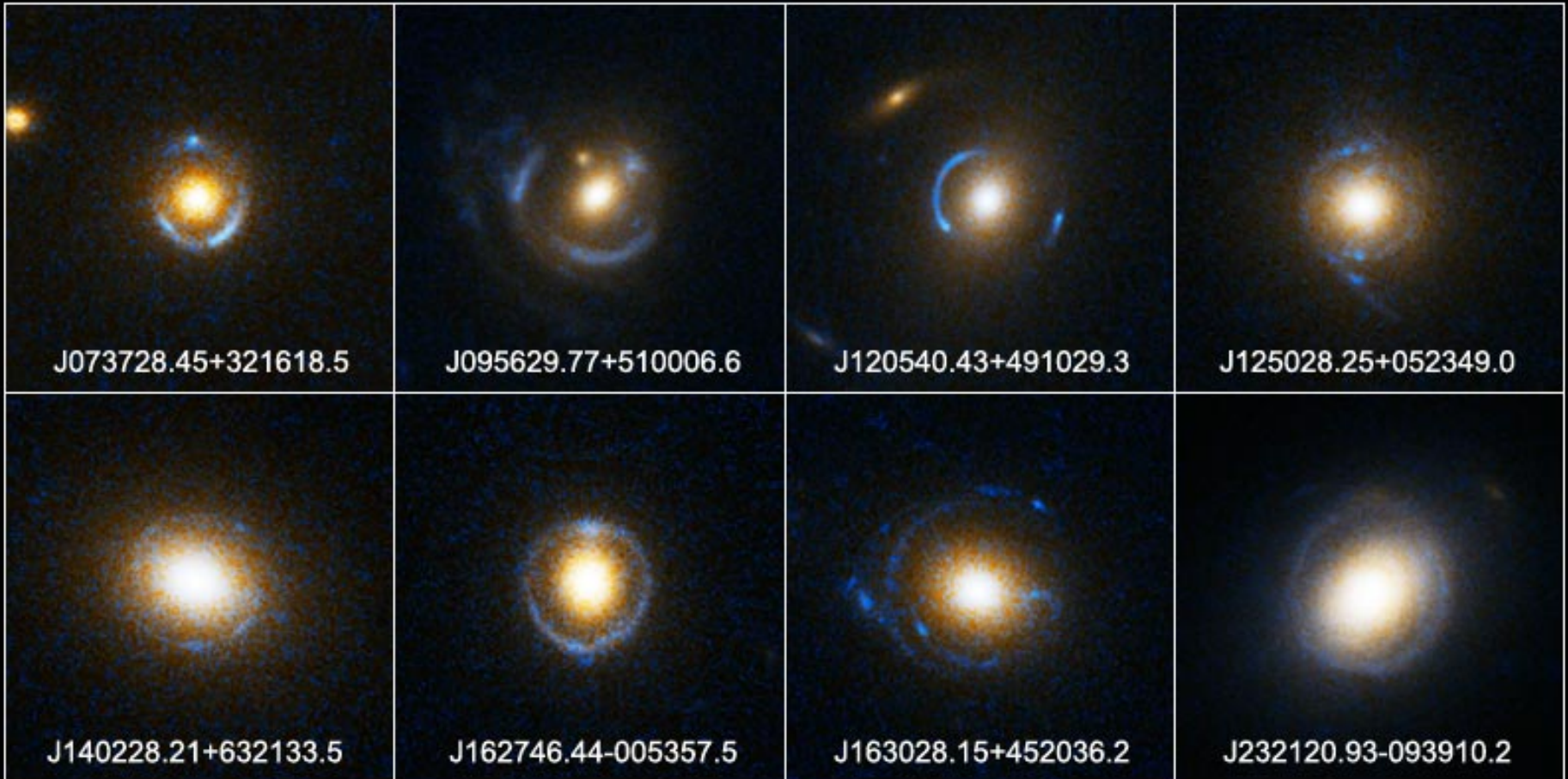
HST •

Gravitational Lens G2237+0305

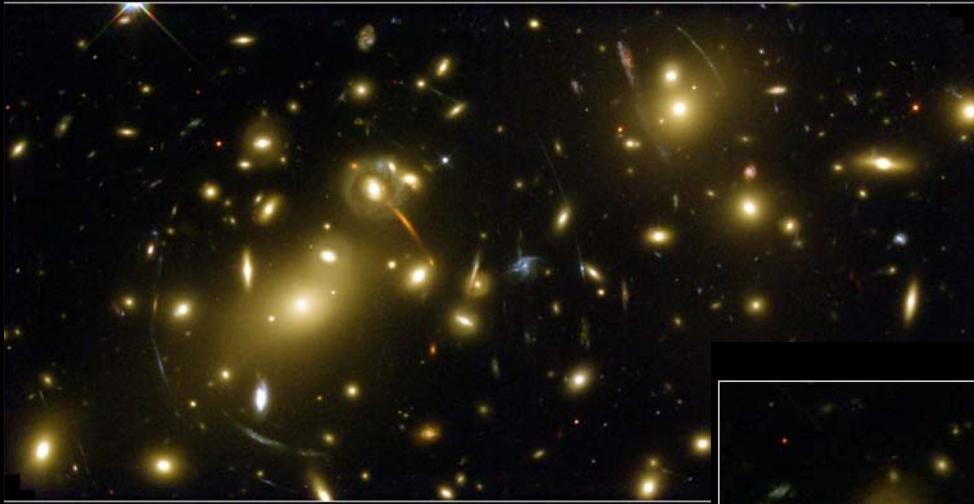
アイシュタインリング

Einstein Ring Gravitational Lenses

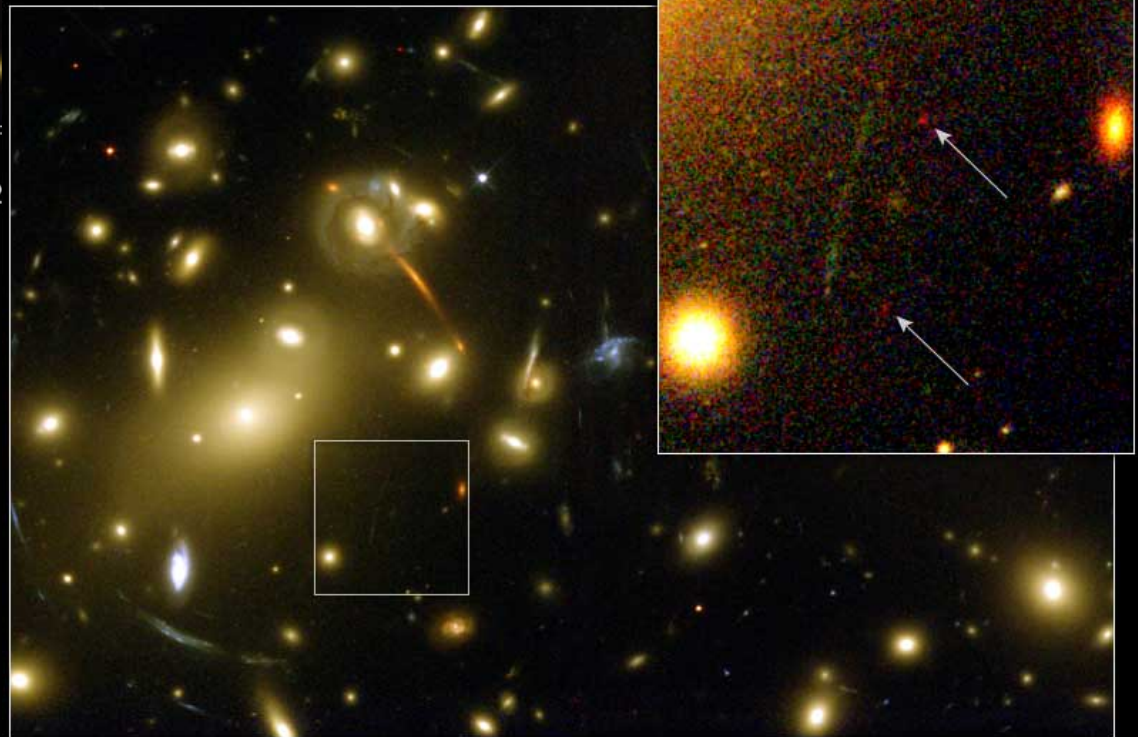
Hubble Space Telescope ■ ACS



銀河団 Abell 2188



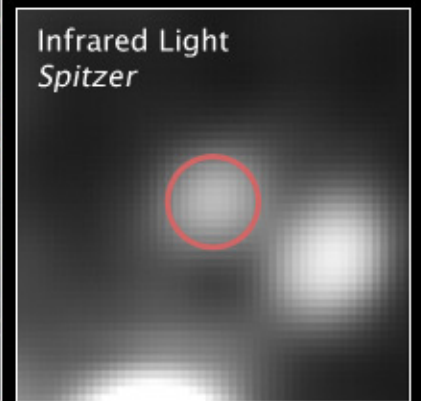
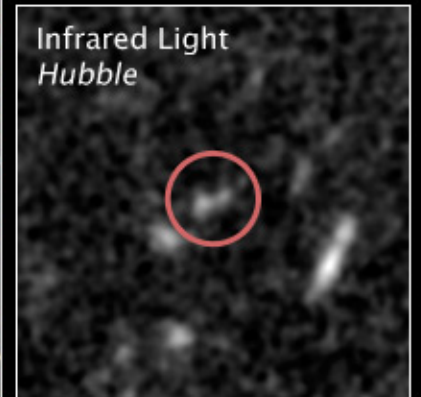
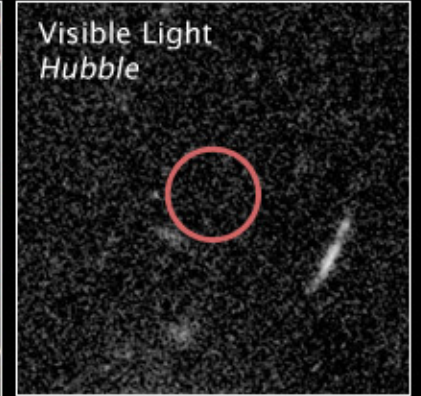
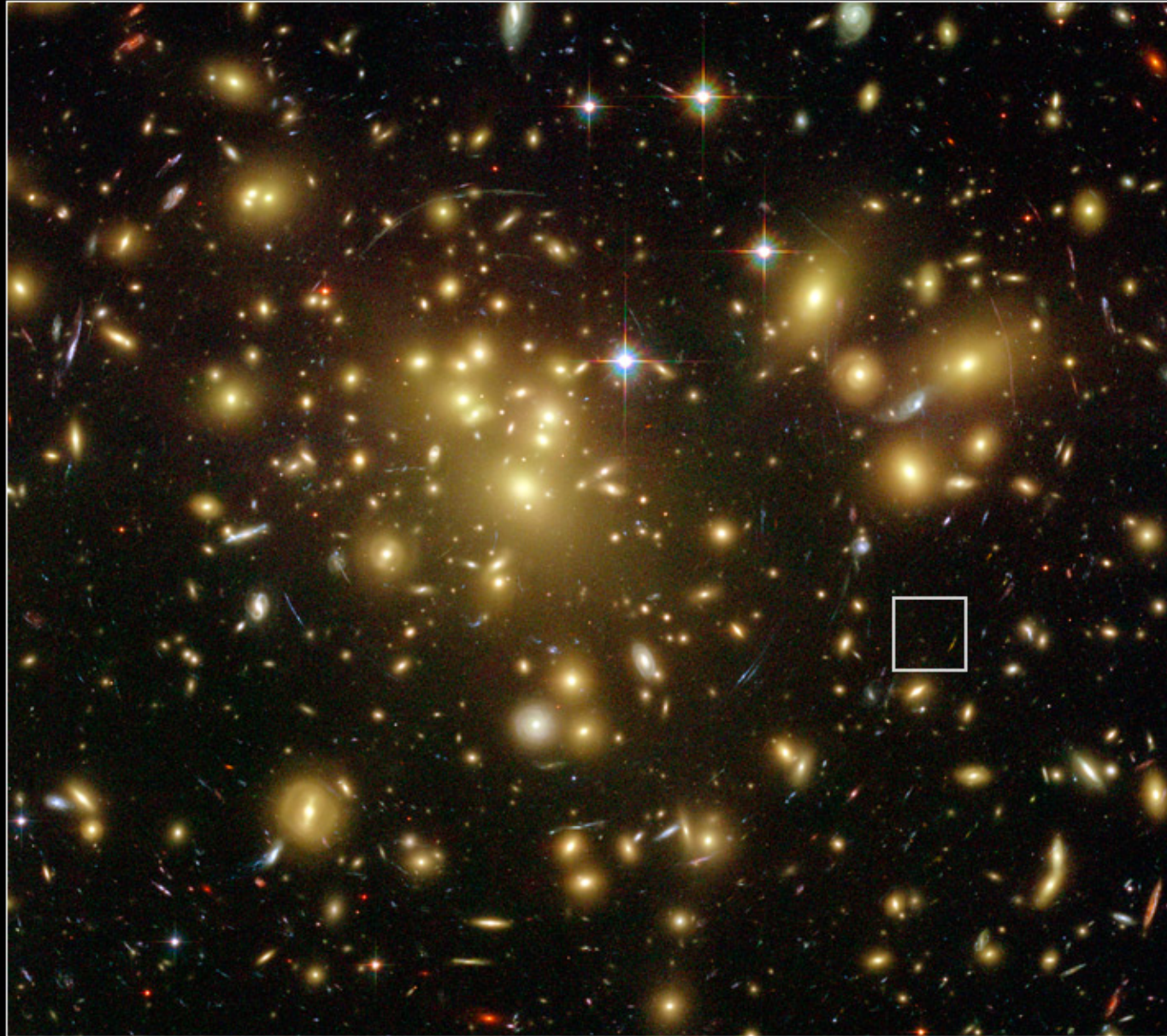
Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2



Distant Object Gravitationally Lensed by Galaxy Cluster Abell 2218 HST • WFPC2
NASA, ESA, R. Ellis (Caltech) and J.-P. Kneib (Observatoire Midi-Pyrenees) • STScI-PRC01-32

Distant Gravitationally Lensed Galaxy
Galaxy Cluster Abell 1689

Hubble Space Telescope
ACS/WFC NICMOS

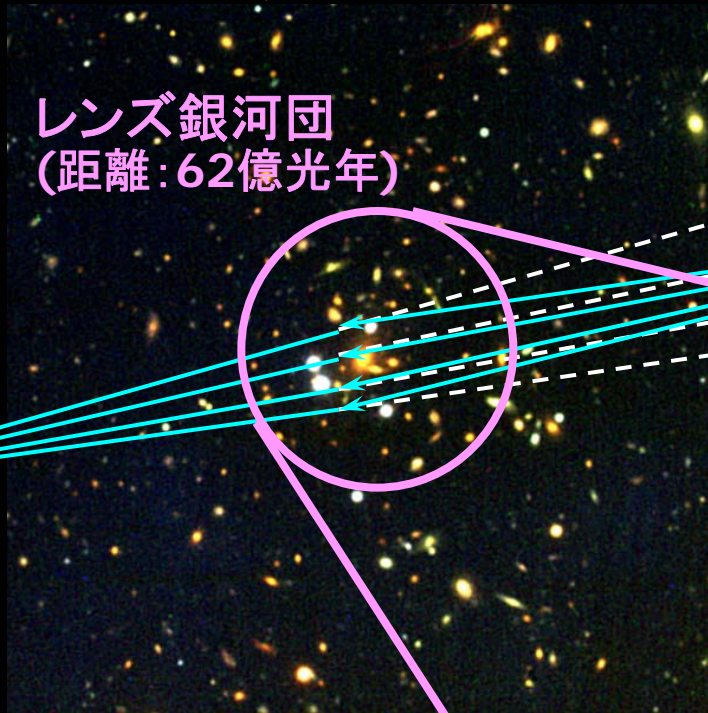


すばるが見た最大のクエーサー重力レンズ

すばる 8.2m
望遠鏡



すばる望遠鏡の画像



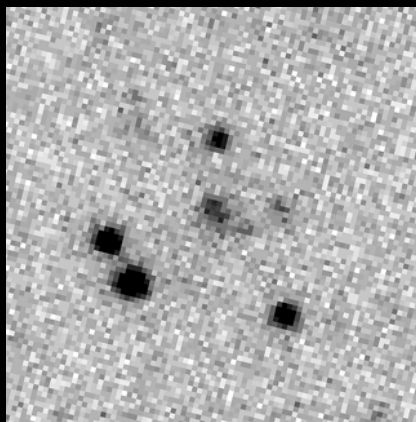
レンズ銀河団
(距離: 62億光年)

稲田、大栗ほかSDSSグループ
Nature 426 (2003) 810

クエーサー
SDSS J1004
(98億光年)

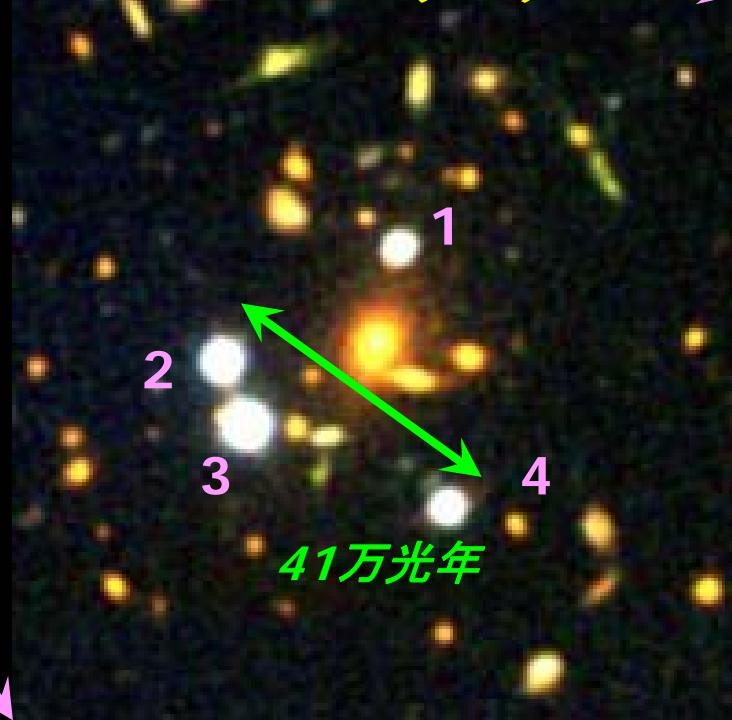


SDSS専用
2.5m望遠鏡



SDSSの画像

すばる望遠鏡の画像(拡大)

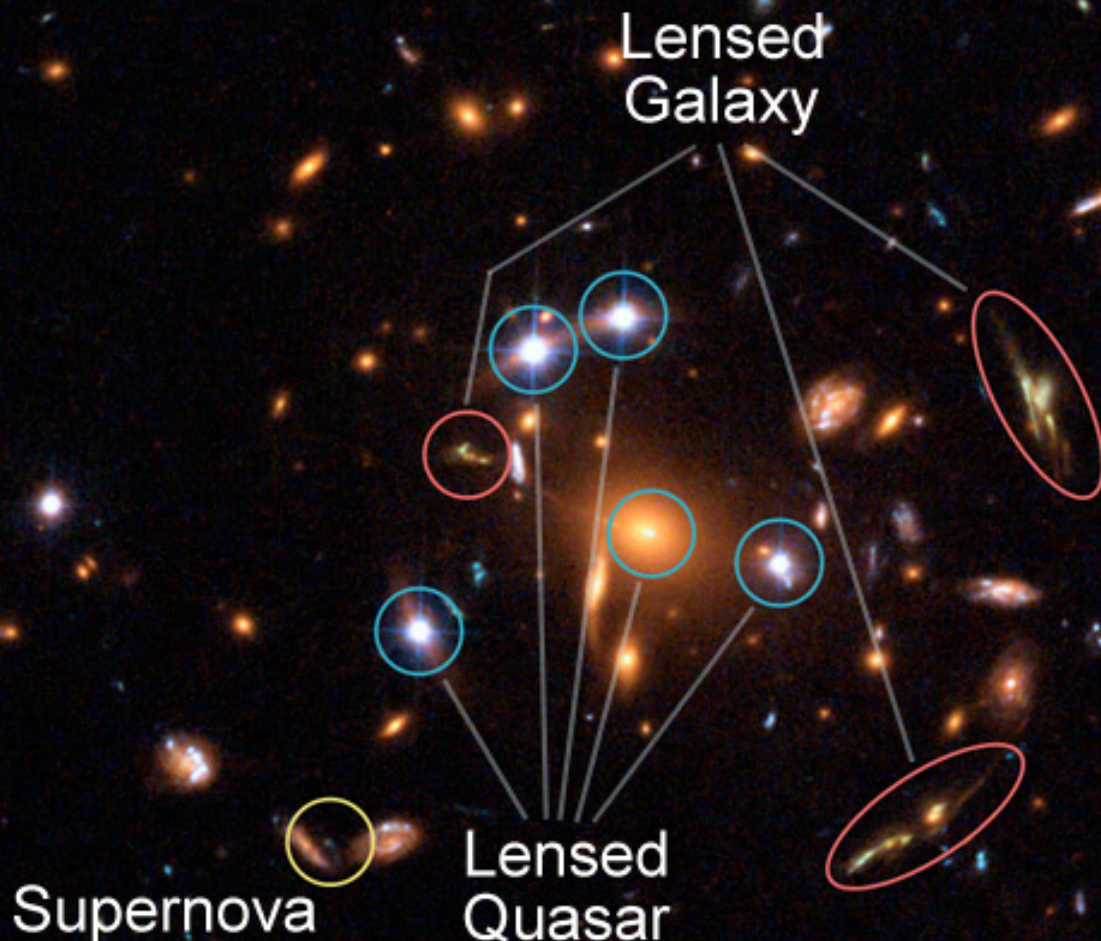


41万光年

Galaxy Cluster SDSS J1004+4112

HST ACS/WFC

ハッブル望遠鏡で見たSDSS J1004+4112

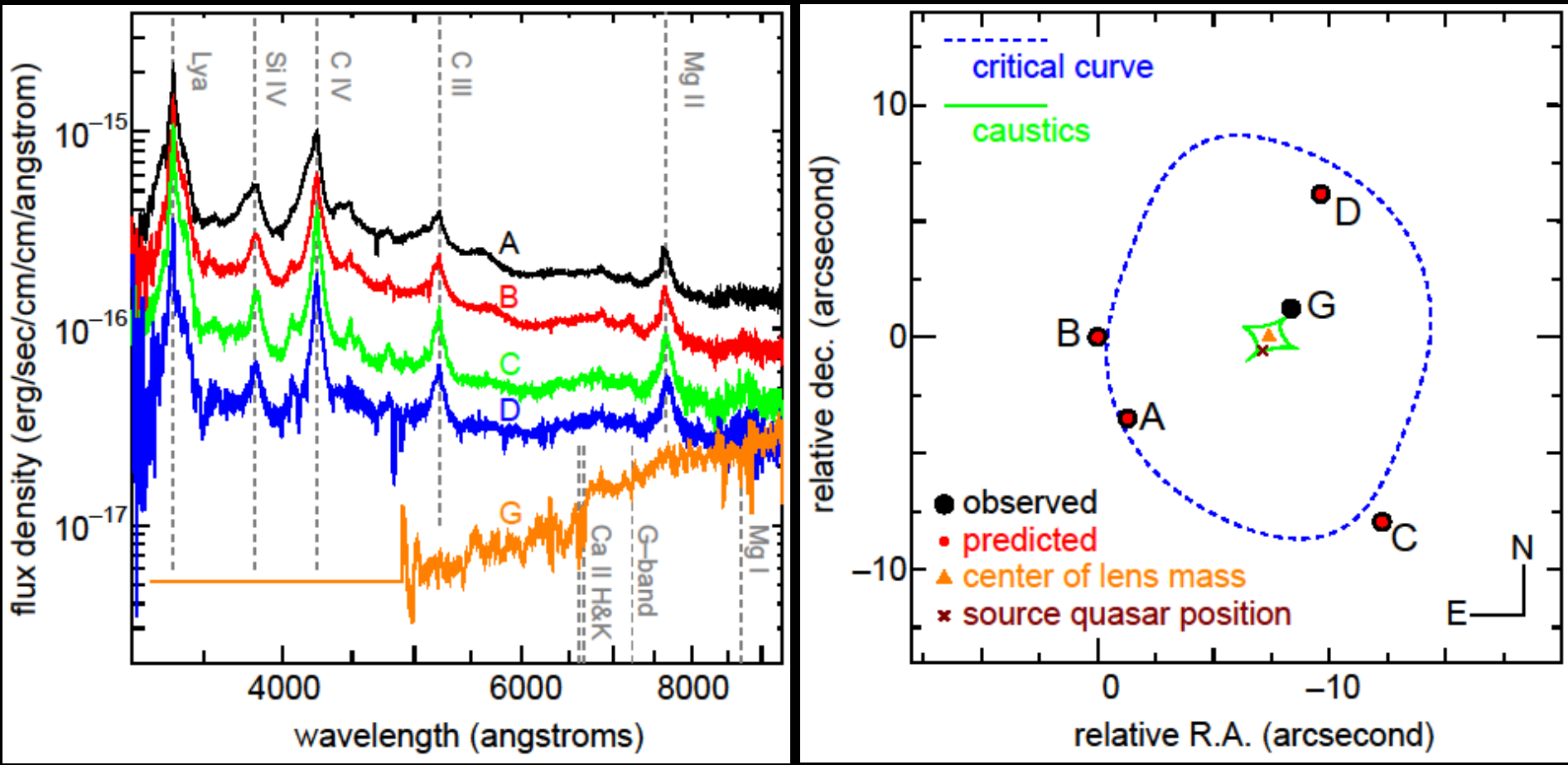


2006年5月23日 ハッブル望遠鏡 写真公開

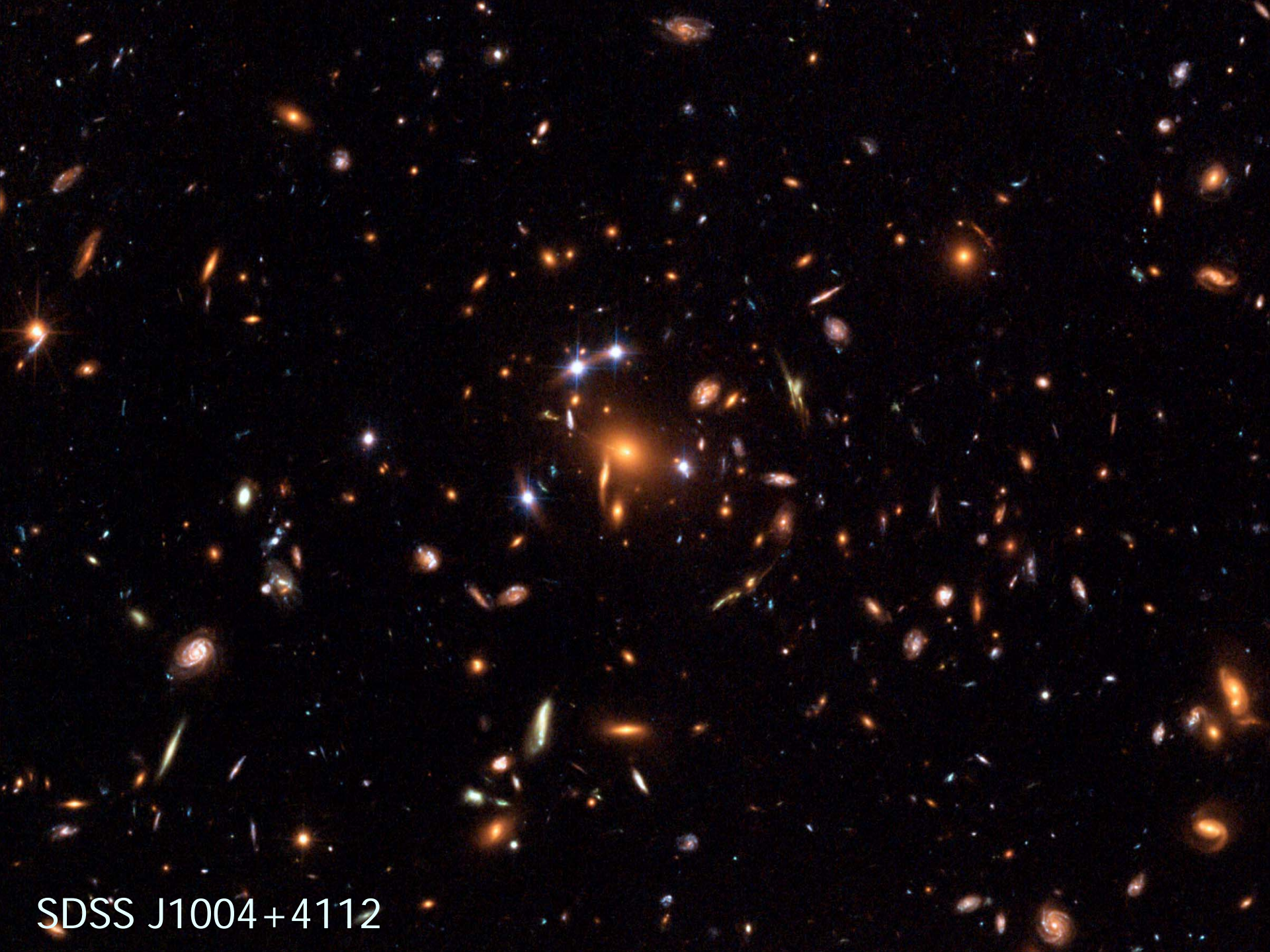
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/23/>

10''

SDSSJ1004+4112のスペクトルとレンズモデル

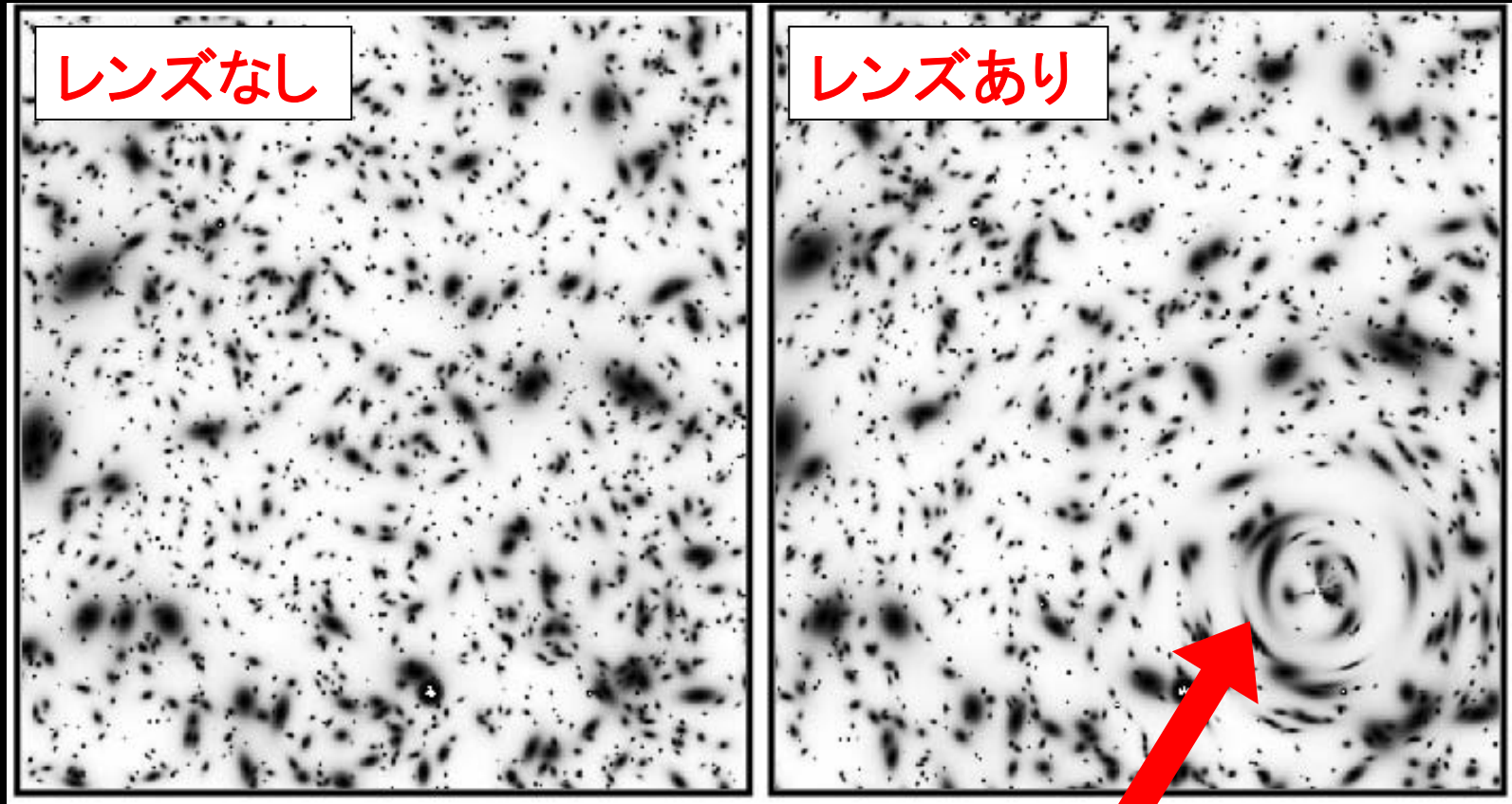


Inada et al. Nature 426 (2003) 810



SDSS J1004+4112

弱い重力レンズ



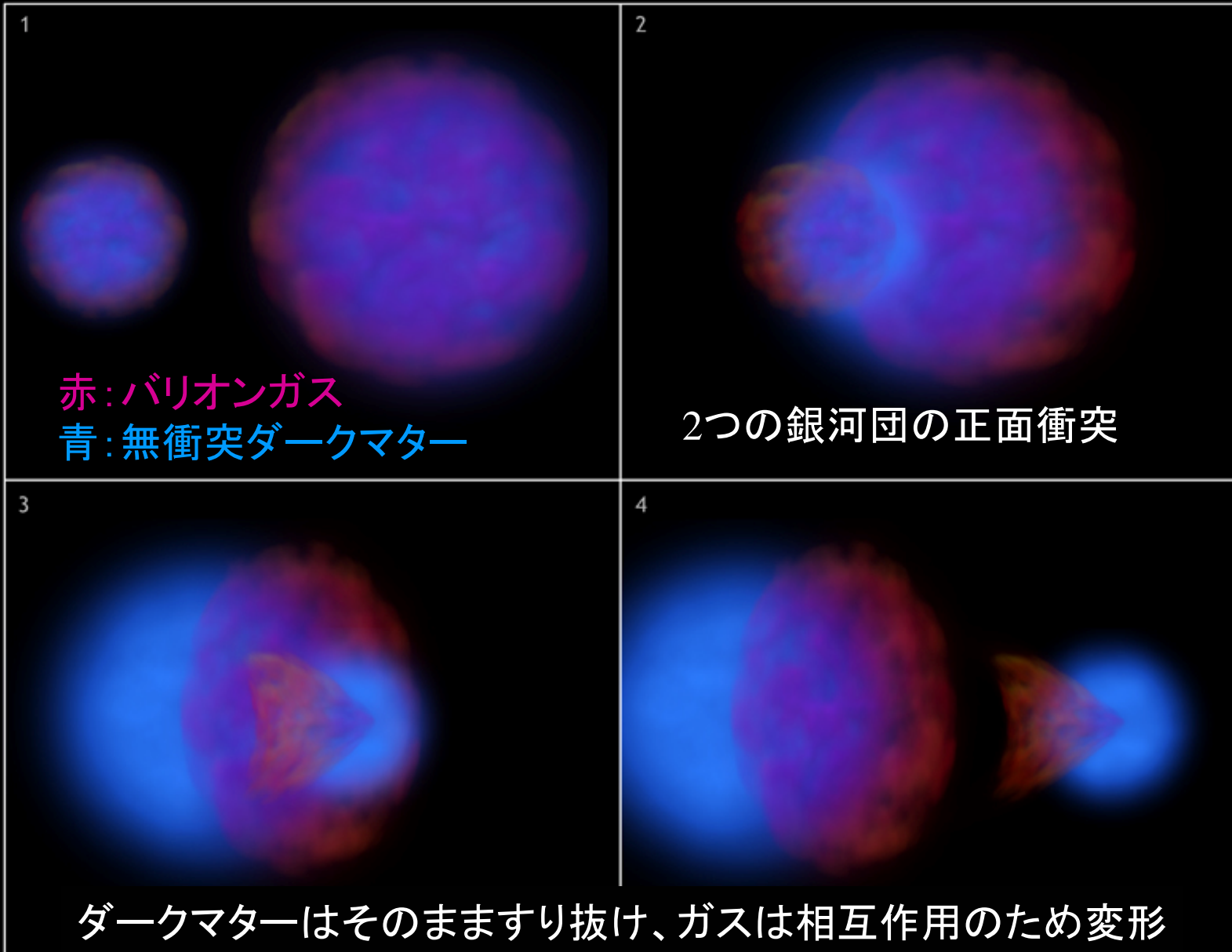
$z=0.3$ に 10^{14} 太陽質量の重力レンズ天体がある
場合に予想されるイメージ

衝突銀河団

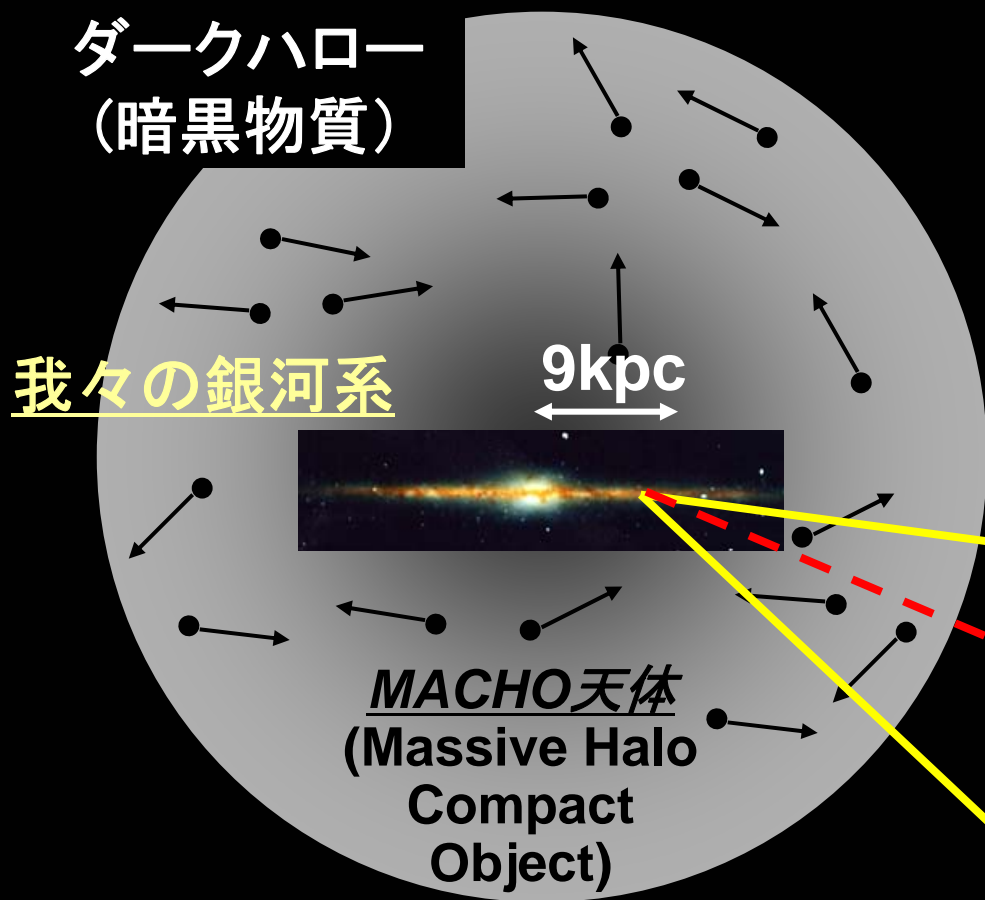


1.5'

ダークマター存在の証拠

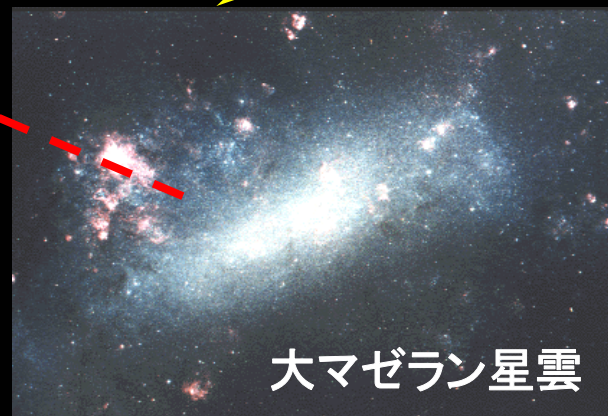


重カマイクロレンズによるMACHO探査

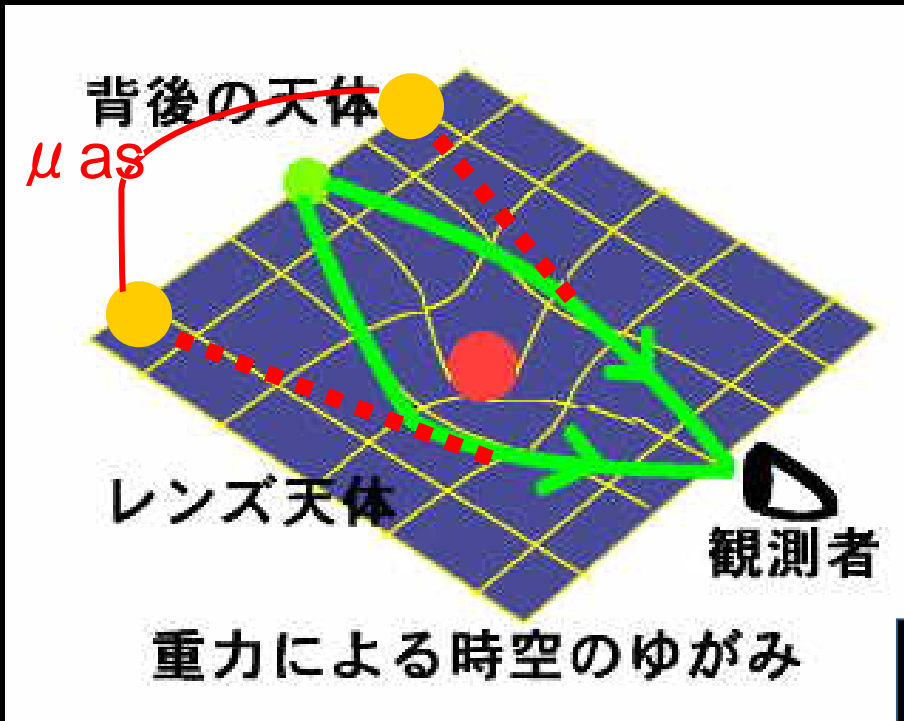


- 銀河系ハローのMACHO天体による重カマイクロレンズ現象で大マゼラン星雲の星が増光する兆候を探す

50kpc



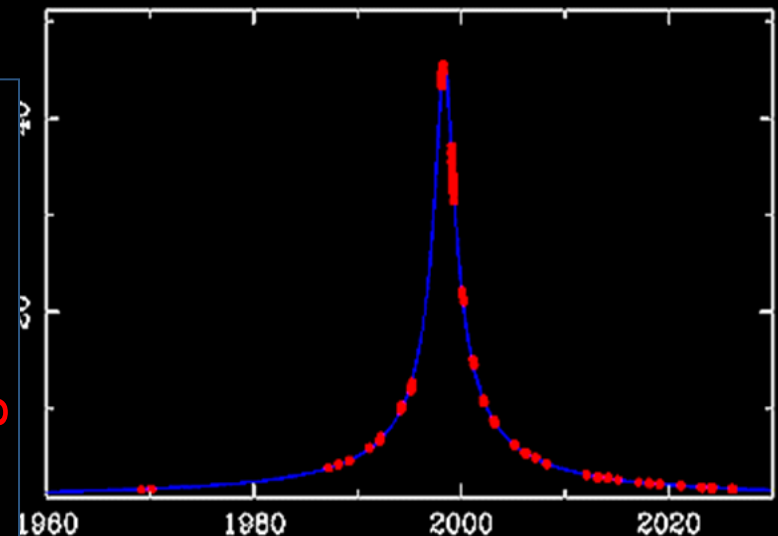
重力マイクロレンズによる増光



- $M_{lens} \sim M_{\odot} \rightarrow$ 離角 $\sim \mu arcsec$
- 増光だけ見える

MOA-2001-BLG-2 = ngb1-3-2868

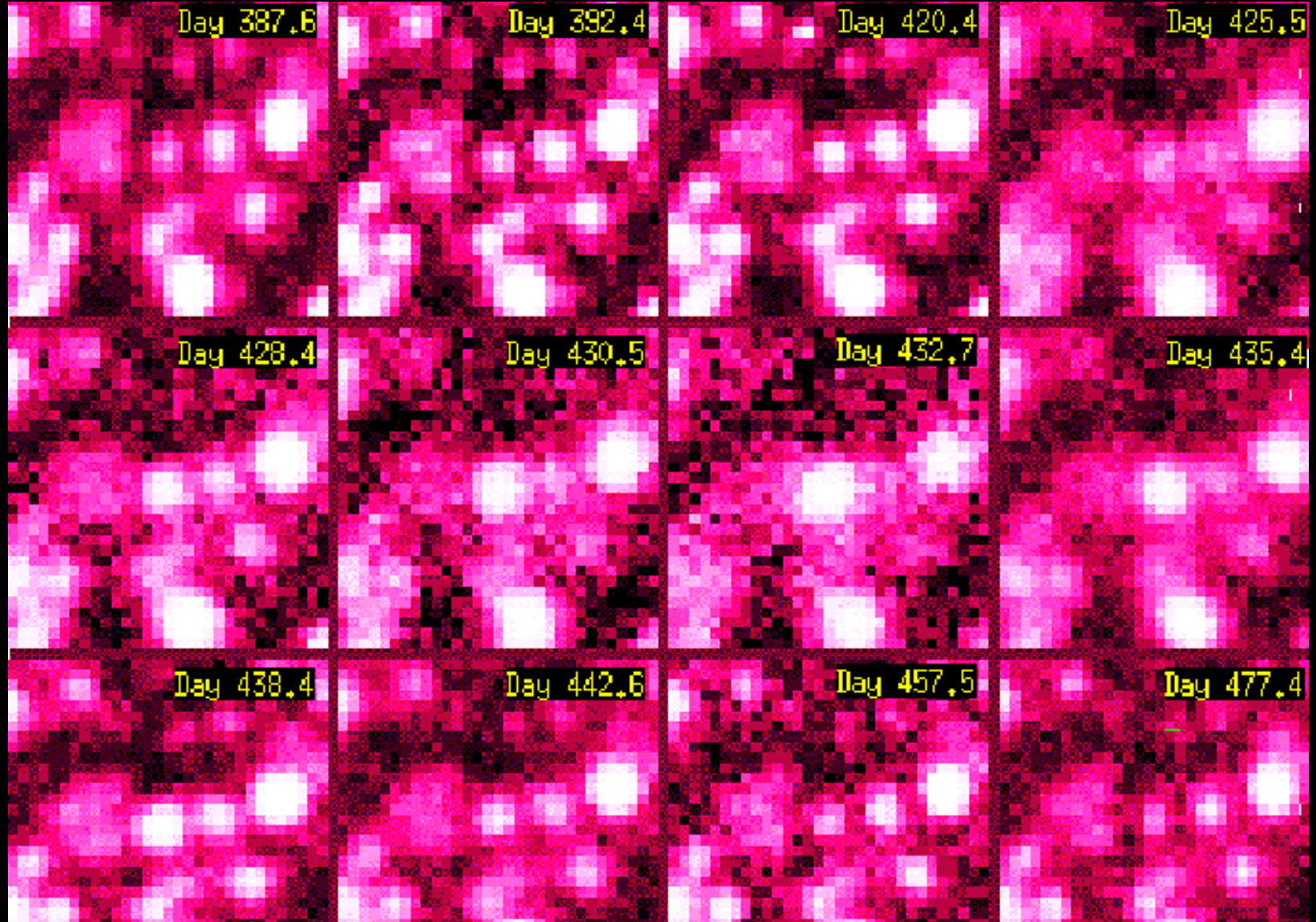
Magnification



(名古屋大学 住貴宏氏)

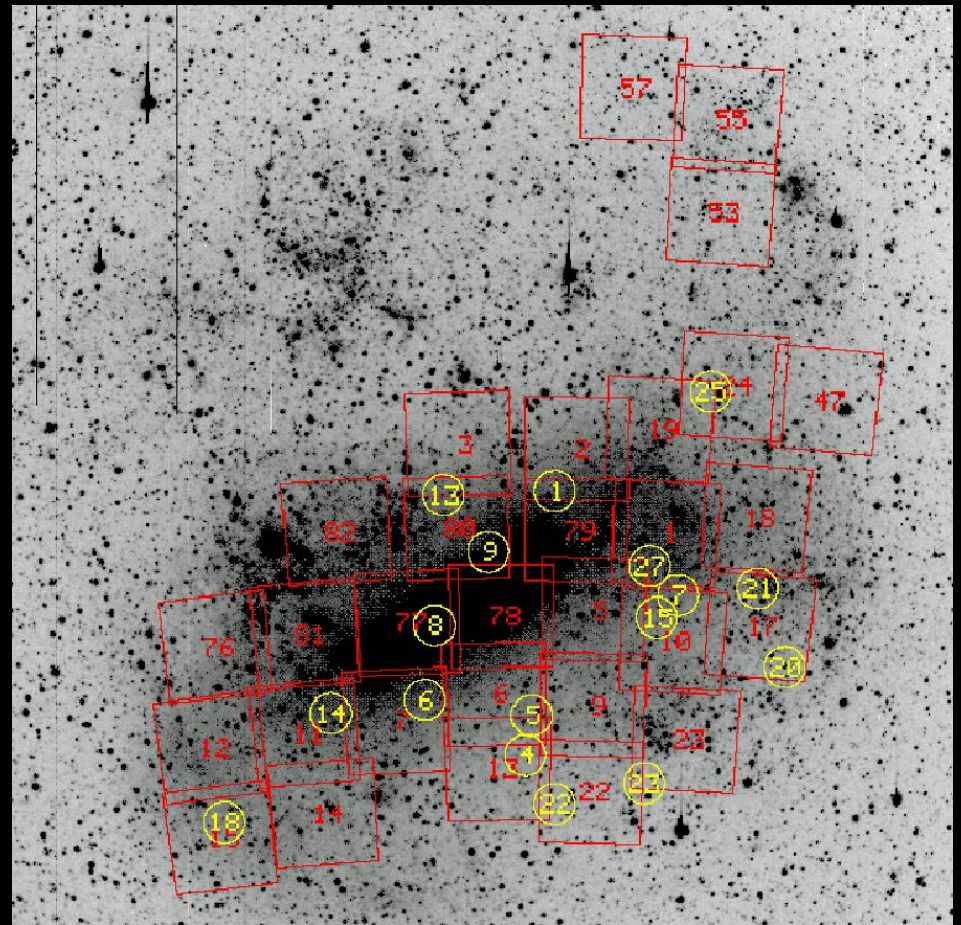
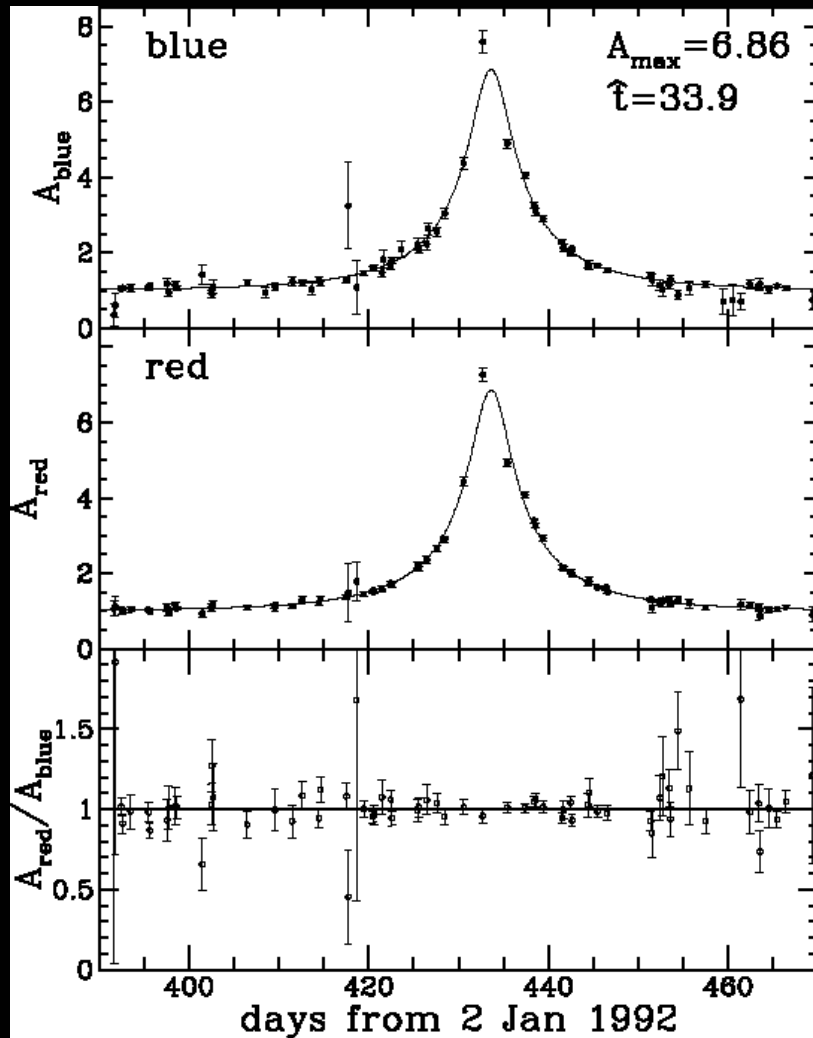
time (day)

Massive Compact Halo Objectの発見

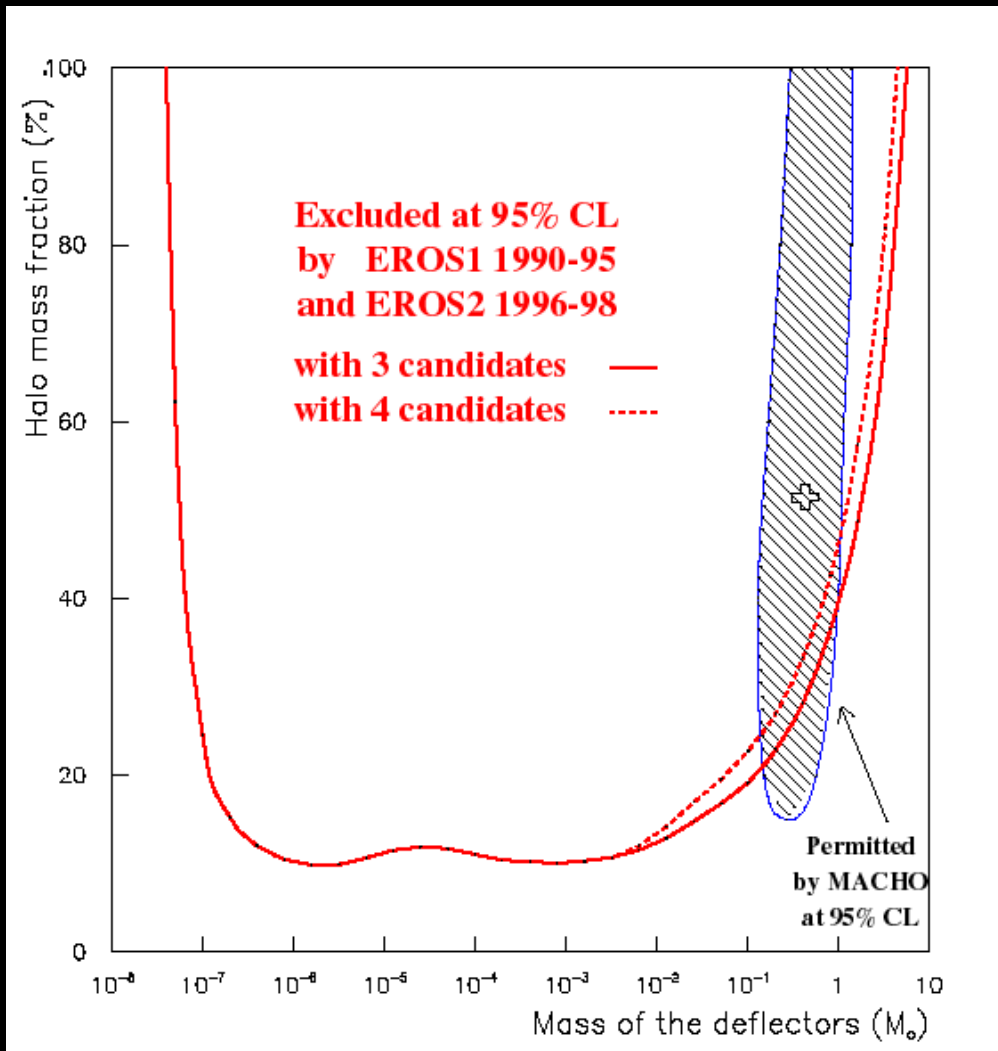


最初に発見された重カマイクロレンズ現象 (Alcock et al. 1993)

MACHOイベントの光度曲線



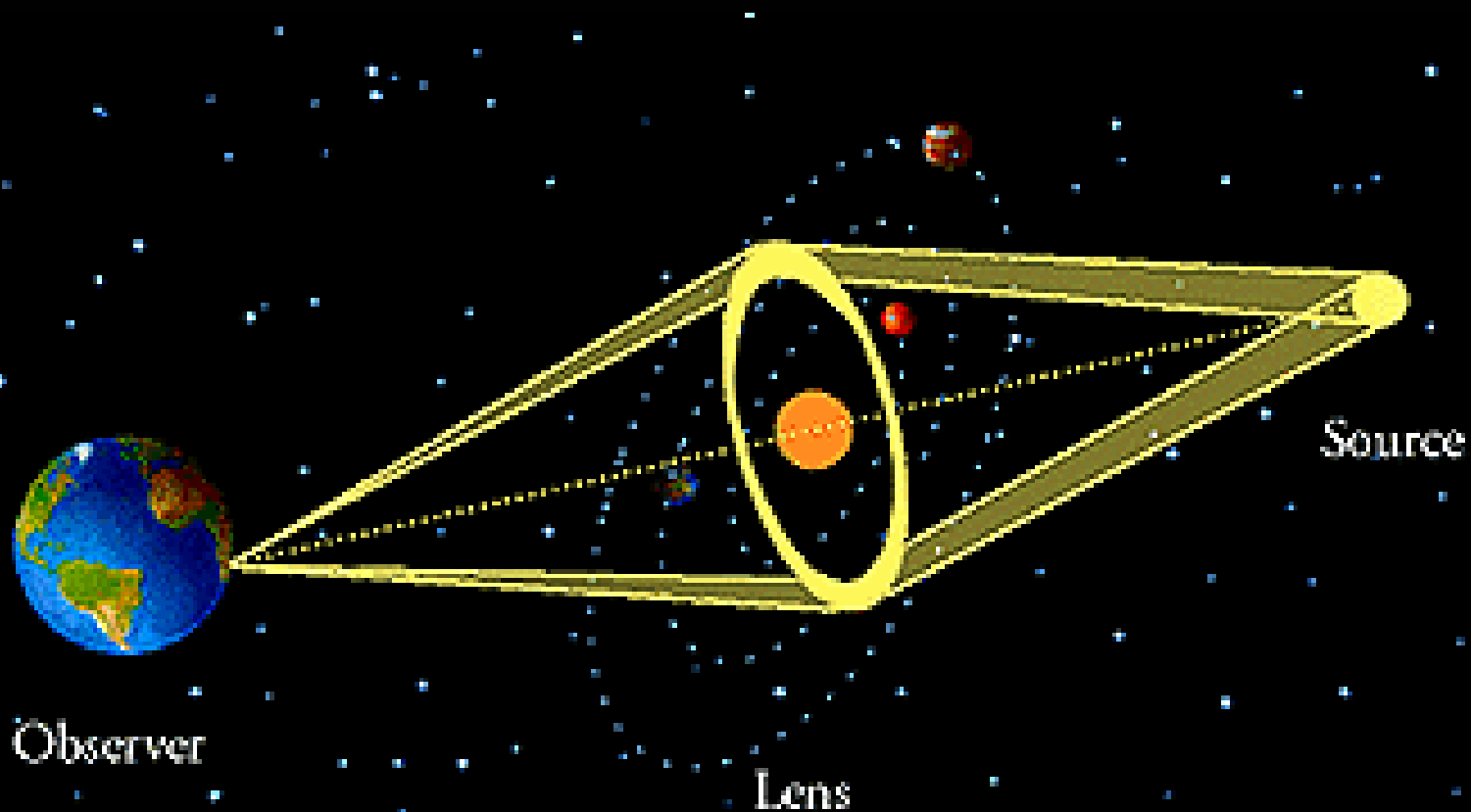
銀河系ダークマターの組成



- 銀河系ハローには確かにMACHOが存在する
- 質量は太陽の0.1から1倍程度
- ハロー全体に占める質量は2割程度(つまり、それ以外のダークマターも存在する)

MACHO mass fraction
Lasserre et al. (2000):
EROS collaboration

マイクロレンズを用いた系外惑星探査

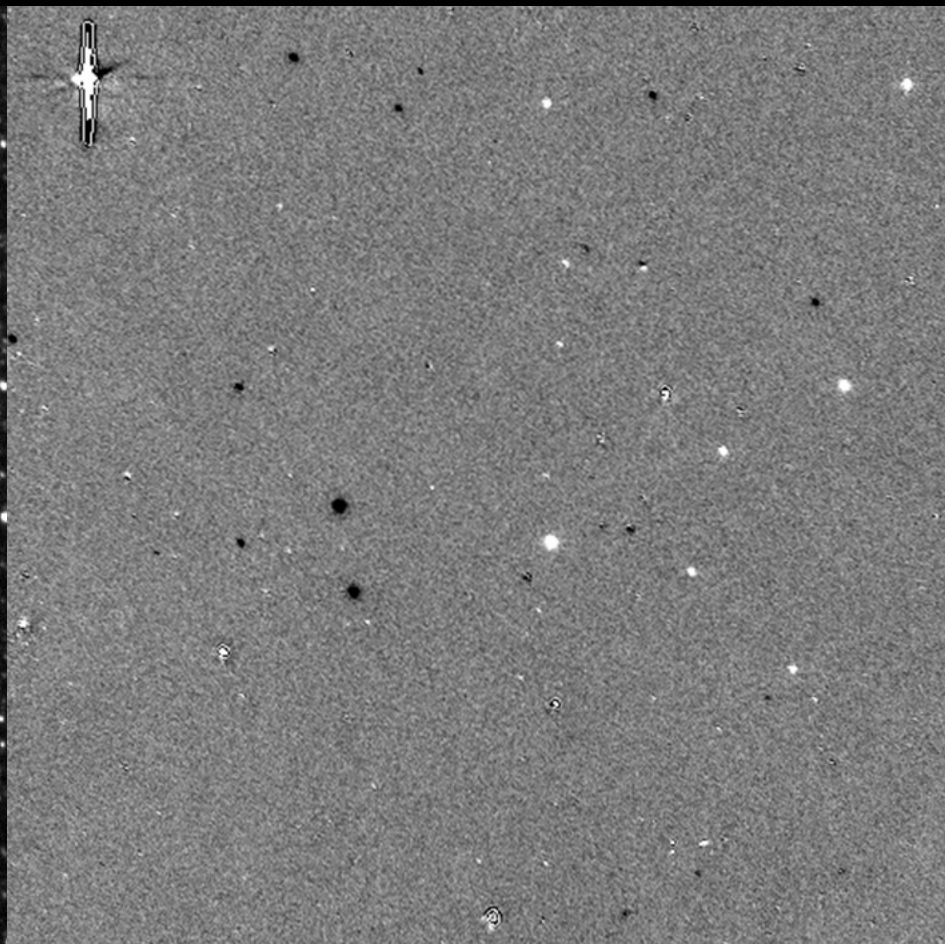


(名古屋大学 住貴宏氏)

差分イメージ解析

観測

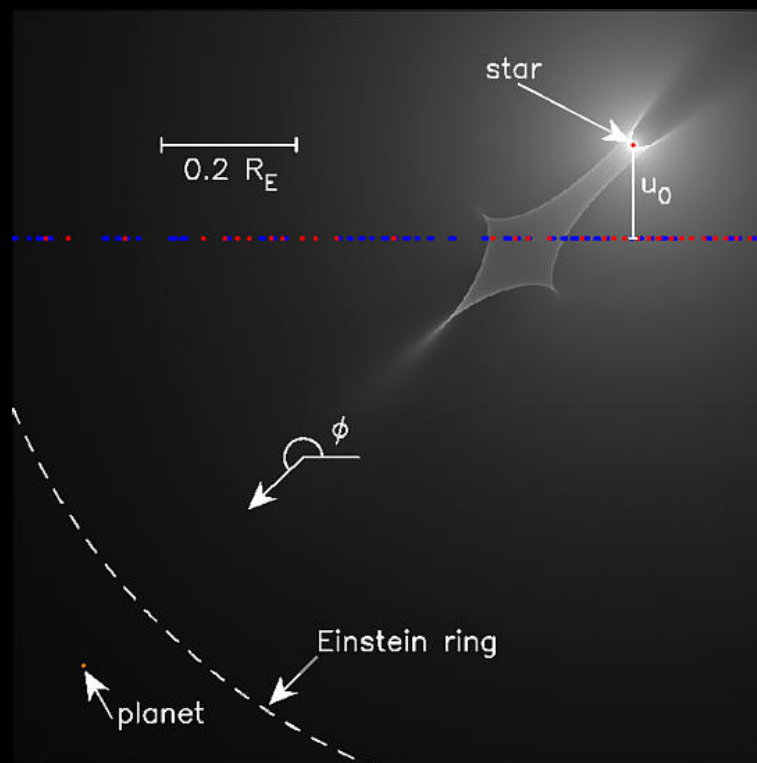
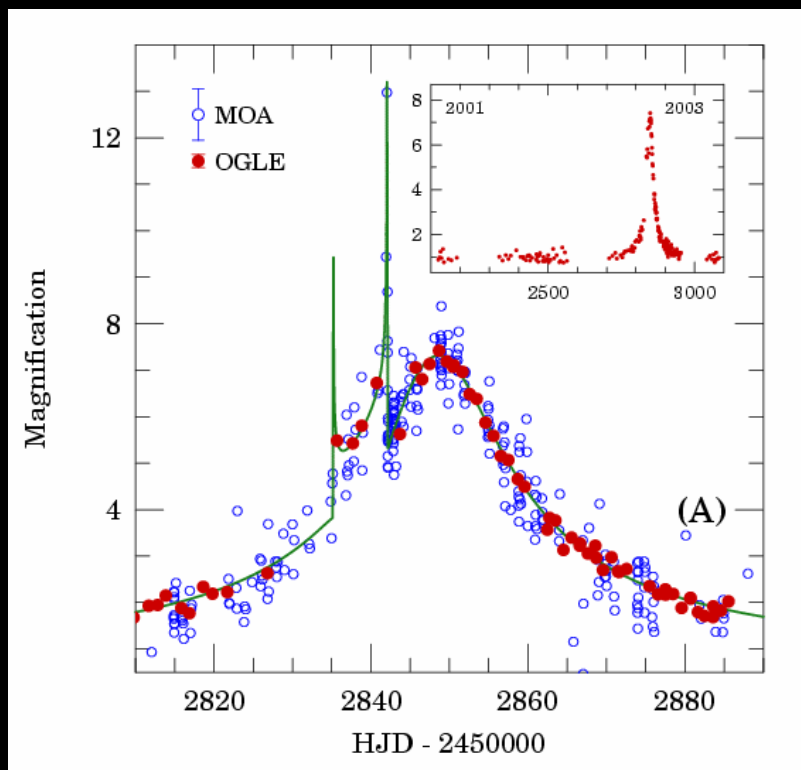
差分



(名古屋大学 住貴宏氏)

マイクロレンズで発見された最初の系外惑星

OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53



惑星質量: $\sim M_{\text{木星}}$ 公転半径: $\sim 3\text{AU}$

OGLEが2003年6月22日に、MOAが2003年7月21日に観測

(名古屋大学 住貴宏氏)

重力レンズのまとめ

- 一般相対論的現象にもかかわらず、目で見えるため直感的で面白い
- 宇宙の光っていない成分を探れるユニークな手段を提供する
 - ダークマター
 - 暗くて見えない遠方天体
 - 系外惑星