

重力レンズ越しにみる夜空： 宇宙の果てから系外惑星まで

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

日本物理学会2015年度科学セミナー

「物理学と光～光の基礎と最先端研究～」

2015年8月21日 10:00-

国際光年(IYL2015)+一般相対論100年

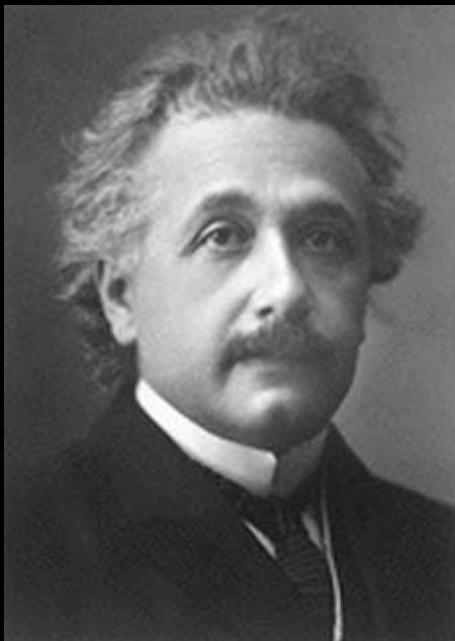
- 過去を振り返れば1015年のイブン・アル・ハイサムによる光に関する研究、1815年のフレネルにより提案された波動説、1865年にマクスウェルにより提案された光伝播についての電磁理論、1905年の光電効果および**1915年の一般相対性理論**についてのアインシュタインの理論、1965年のペンジアスとウィルソンの宇宙マイクロ波背景放射の発見および光ファイバー通信に関するカオの業績など、2015年が光科学の歴史における一連の重要な画期的な発見・発明の記念年であることが考慮されています。

IYL2015ホームページよりコピペ

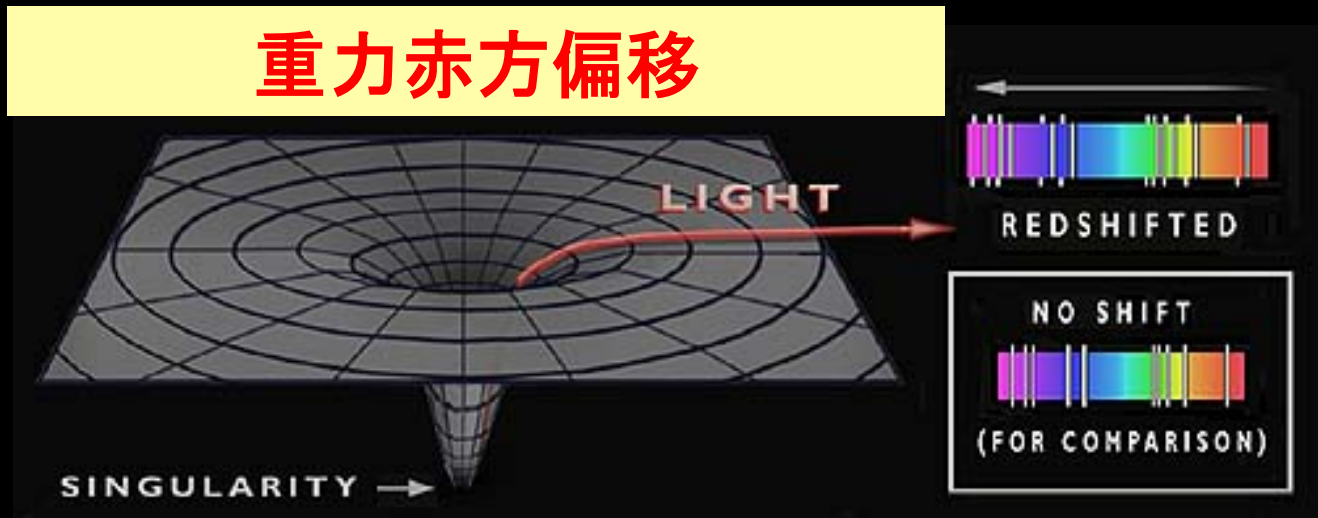
本日の話の内容

- 一般相対論によるとなぜ光の進路は曲がる？
- エディントンは日食観測で相対論を検証したのか？
- アインシュタインはなぜ重力レンズ論文を書いた？
- すぐに役に立たなかった重力レンズが、今やとてつもなく役に立つようになった！
 - どんなに小さい効果でもやがては観測できる
 - 自分の目を信じてはいけない
 - ダークマターの直接的証拠
 - 系外惑星探査

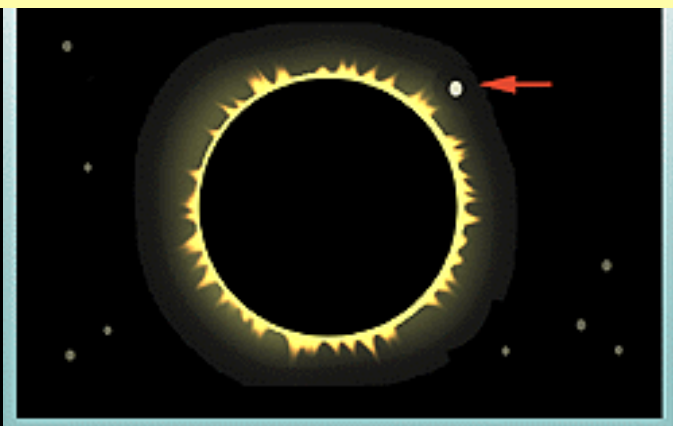
一般相対論の古典的検証



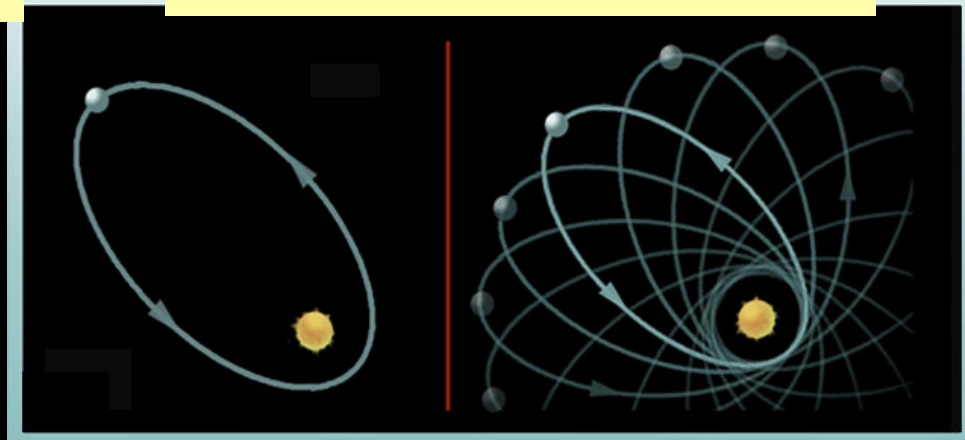
重力赤方偏移



太陽の周りの光線の湾曲



水星の近日点移動



一般相対論：アインシュタイン方程式 時空の曲がり＝物質による重力場

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

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

地球

月

太陽

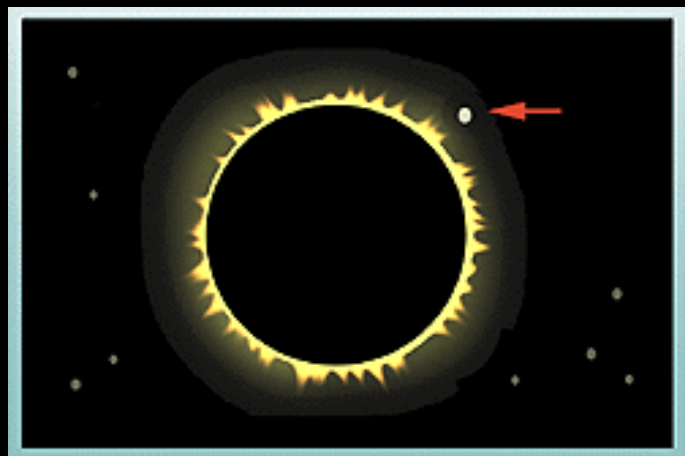


見かけ上の位置



実際の位置

1.75"

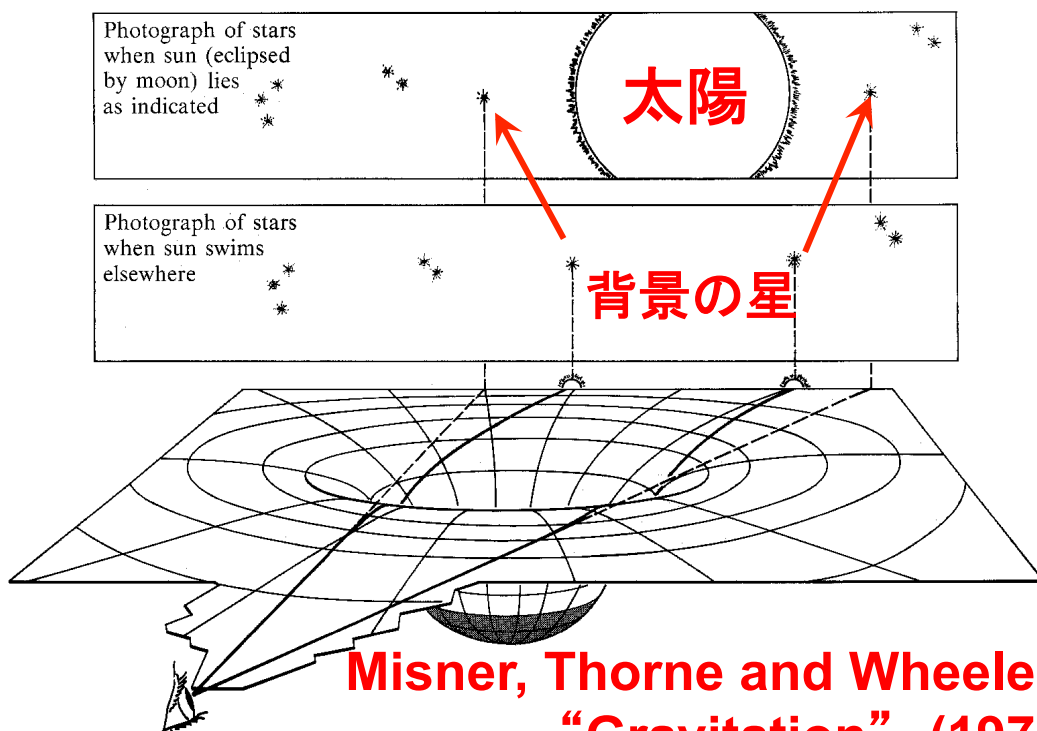


Photograph of stars when sun (eclipsed by moon) lies as indicated

Photograph of stars when sun swims elsewhere

太陽

背景の星



Misner, Thorne and Wheeler:
"Gravitation" (1972)

なぜ光は重力場のもとで曲がる？

- 一般相対論によると、**光もまた重力を感じるため**
 - 直観的にわかった気にさせられるが怪しい説明
- 一般相対論によると**重力のために空間が曲がる**。そこを「直進」する光をはるか遠方の観測者が測定すれば、その経路は曲がって見える
 - これは半分だけ正しい(これだけでは光と質点の軌道の曲がり方が異なることを説明できない)
- 一般相対論によると**重力が強い場所では時間の進みが遅い**。したがって、遠方の観測者にとっての単位時間あたりで考えれば、強い重力場を通過する光の移動距離、すなわち見かけ上の光速が小さくなるため
 - これも半分だけ正しい

ちょっとだけ数式を使います

■ 弱い重力場近似での計量

$$ds^2 = -(1 + 2\phi_N)c^2 dt^2 + (1 - 2\phi_N)d\ell^2$$

時間の遅れ

空間の曲がり

■ ニュートン理論での重力ポテンシャル@r

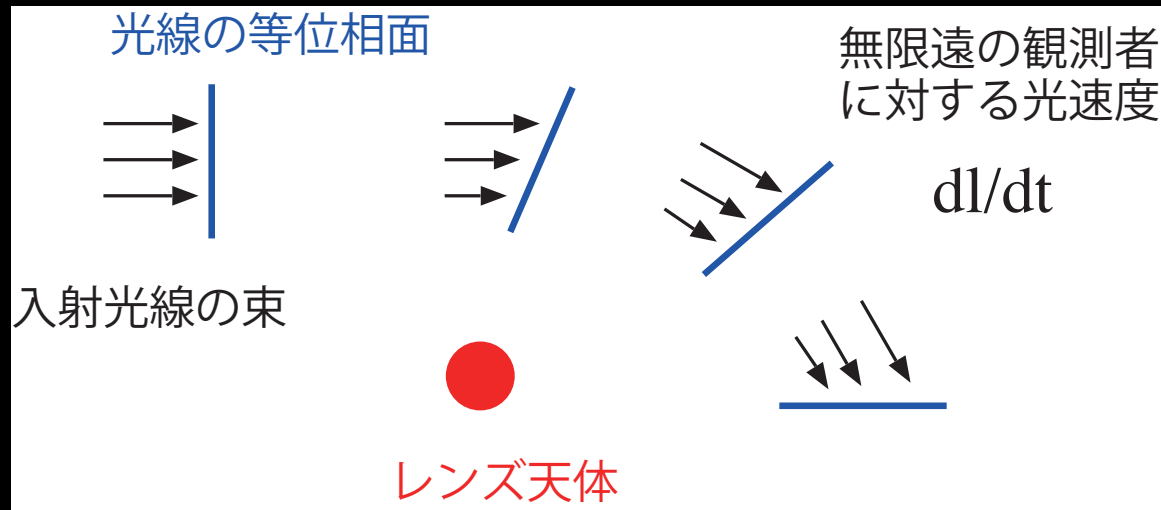
- 原点に質量Mの質点がある場合 $\phi_N = -GM / r$

■ 無限遠の観測者が測定する光速@r

$$ds^2 = 0 \Rightarrow c' = \frac{d\ell}{dt} = \sqrt{\frac{1 + 2\phi_N}{1 - 2\phi_N}}c \approx (1 + 2\phi_N)c < c$$

- 時間の遅れと空間の曲がりが半分ずつ寄与

天体の近くの光速は小さい→曲がる



■ 重力による空間の曲がりと時間遅れが半分ずつ寄与して、見かけの光速が小さくなる。その結果、上図のように等位相面が傾くので光が曲がる。

- 光が重力を感じて曲げられるという説明には、つい納得してしまいがちだが怪しい(というか厳密には間違い)
- 単位質量あたりのエネルギー $E/m=c^2/2$ をもつ質点として計算すると一般相対論が予言する曲がり角の $1/2$ になる (Soldner 1801; 通常ニュートン理論の予言と呼ばれるがこの名称は変)

アーサー・エディントン

- 1913年、30歳にしてイギリスで最高の権威であるケンブリッジ大学ブルーム天文学・実験哲学教授に就任
 - 理論天文学に関して多くの業績
 - チャンドラセカールの先生だが、彼をいじめたことでも有名
 - 当時敵国でもあり知られていなかったドイツの学者が発表した一般相対論に注目しその宣伝につとめた
 - 1917年に光線の湾曲の検証の重要性を強調
 - ダイソンが1919年5月29日の日食が最適であると提案
- 敬虔なクエーカー教徒として、兵役を拒否
 - ダイソンを始めケンブリッジ大学の科学者達は、エディントンが戦争で死ぬのは科学にとって偉大な損失だと訴える
 - もし戦争が1919年5月29日までに終結していた場合、日食観測隊を率いることを条件に兵役延期が認められた

日食観測による光線の湾曲の検証?

■ 1919年11月の王立天文協会会合での発表

- エディントン隊@西アフリカのプリンシペ島: 1.61 ± 0.41 秒
- クロメリン隊@ブラジルのソブラル: 1.98 ± 0.16 秒
- 相対論の予言1.74秒 (ニュートン理論はその半分の0.87秒を予言)
- そもそもこの観測データの取扱とその誤差には多くの批判がある、、、

**It is not that the public want to know
- they want not to know but to believe
(P.Coles; arXiv:astro-ph/0102462)**



いづれにせよアインシュタインは一躍有名に

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

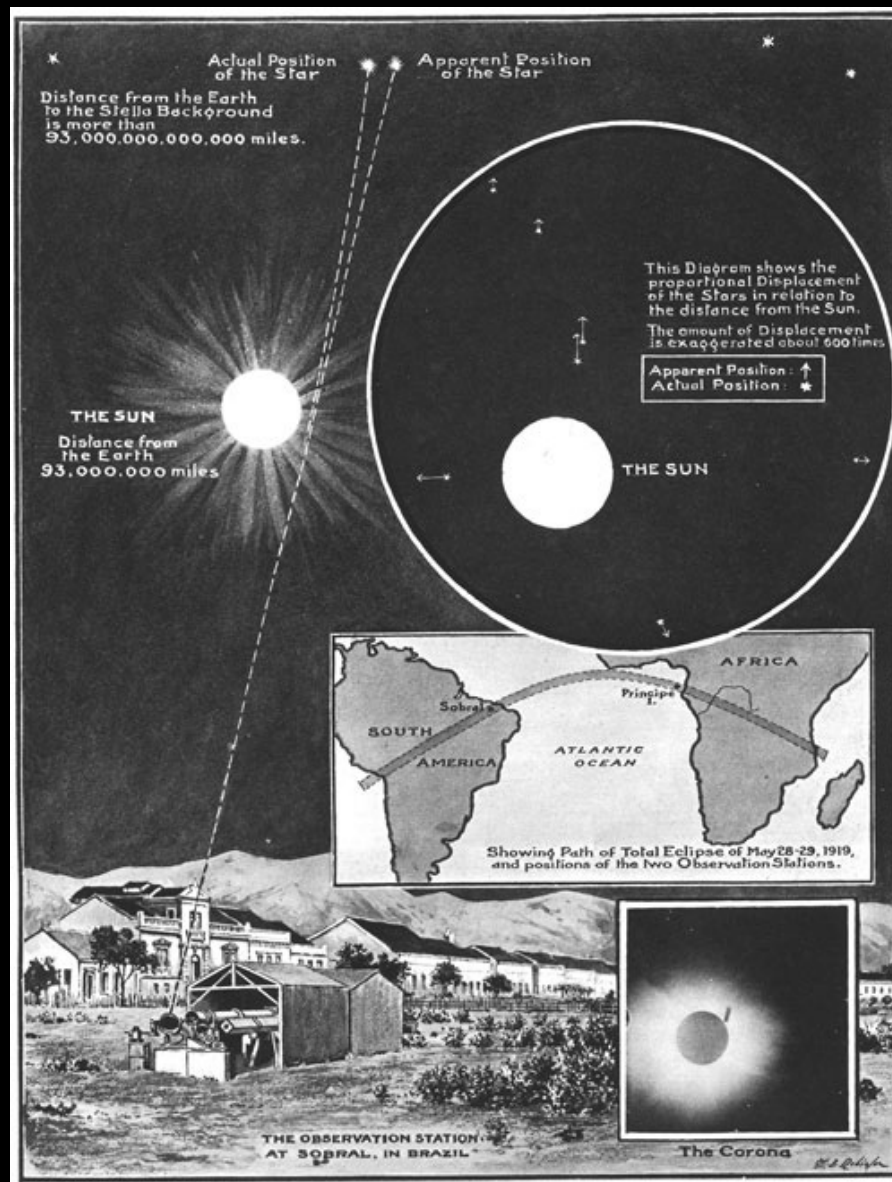
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

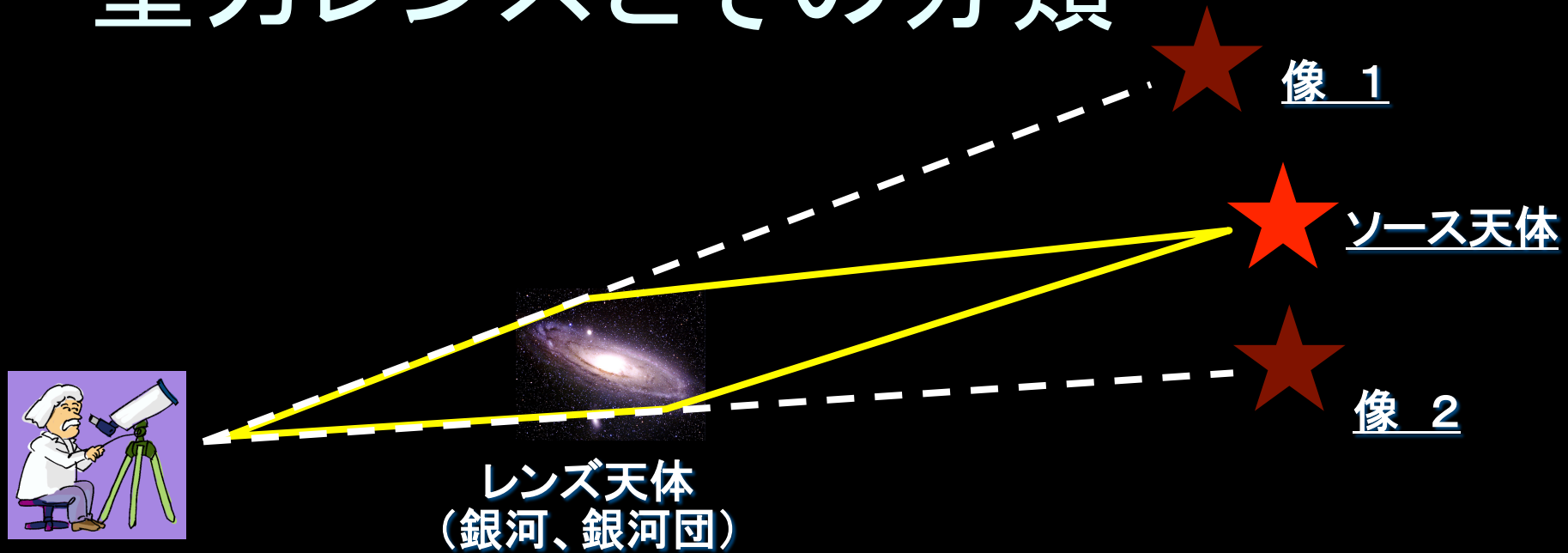
Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.



重力レンズとその分類



- 光の進路は重力場中では曲がる
 - 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)

アインシュタインによる 歴史的な重力レンズ論文

A. Einstein, Science (1936)
vol. 84, pp. 506-507

LENS-LIKE ACTION OF A STAR BY THE DEVIATION OF LIGHT IN THE GRAVITATIONAL FIELD

SOME time ago, R. W. Mandl paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request. This note complies with his wish.

$$q = \frac{l}{x} \cdot \frac{1 + \frac{x^2}{2l^2}}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{4l^2}}}$$

$$l = \sqrt{\alpha_0 D R_0}$$

質点重力レンズによる遠方天体の増光率

x : 遠方天体と質点との天球上での距離(R_s)

l : アインシュタイン半径($R_E = (4GMD)^{1/2}$)

α_0 : 質点による光線の曲がり角($4GM/R_0$)

D : 質点と観測者の距離

R_0 : インパクトパラメータ

Mandl氏とは誰？

Dear Prof. Einstein:

Last spring an apparently sincere layman in science, Rudi Mandl, came into our offices here in the building of the National Academy of Sciences and discussed a proposed test for the relativity theory based on observations during eclipses of the stars.

We supplied Mr. Mandl with a small sum of money to enable him to visit you at Princeton and discuss it with you. On his return he showed us what were apparently authentic letters from you to him regarding his suggestion.

Mr. Mandl has since moved to New York City (108-11 Roosevelt Ave., Corona, L.I.) but before he left he told us that you had agreed to publish his ideas, or at least incorporate some of them in a technical paper to be prepared by you for some scientific journal.

A letter has today come from Mr. Mandl asking us if this paper has yet been published.

Could you tell us what is the status of the Mandl proposal from your point of view, with the promise that anything you would write would be completely confidential?

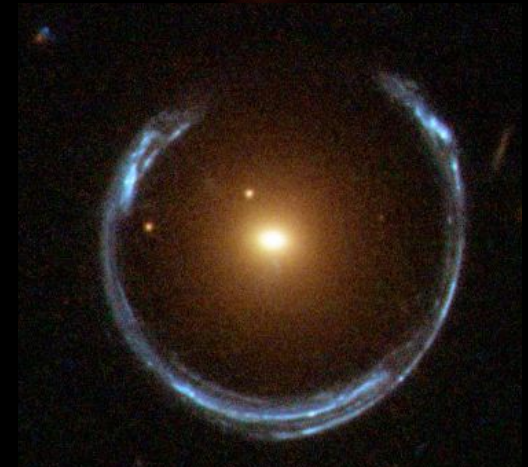
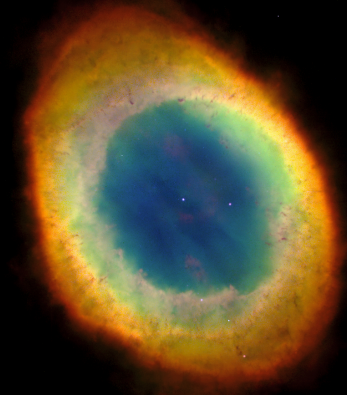
Mandl氏をめぐるエピソード

- チェコ出身のアマチュア科学者
 - 重力レンズのアイデアを、コンプトンやミリカンを始めとする大科学者に説明するも、あまり真剣に取り合ってもらえない
- 1936年に、ワシントンの米国アカデミーの広報部のような部署を直接訪ねて助言をもらう
 - なぜか、プリンストンにいるアインシュタインに直接意見を聞くように勧められ旅費のサポートまで受ける
- 1936年4月17日、プリンストンのアインシュタインを訪問
 - アインシュタインは極めて丁寧に議論につき合う
 - Mandl氏は非常に感激。自ら論文にまとめるも結局出版できないまま。一方、アインシュタインに出版を勧め、アインシュタインが渋々書いたのが前出の論文

Mandl氏のアイデア

- 天体の重力は、背後の別の天体からの光を曲げかつ収束させるレンズとして働く
 - 完全に正しい
- リング状星雲こそ、重力レンズを受けた遠方天体の像の例であり、重力レンズ現象はすでに観測されている
 - この解釈は全くの間違いだ、遠方銀河の重力レンズ像としてのいわゆるアインシュタインリングは今や数多く観測されている
- 遠方天体からの光が一時的に重力レンズ効果で増光した結果、地球上の生物の大量絶滅(例えば恐竜絶滅)を引き起こし、その後のダーウィン進化をもたらした
 - 極めて独創的だが、残念ながらトンデモ。。。。
 - ただし、一時的な天体の増光は系外惑星発見の基本原則としてとても重要

こと座のリング星雲
(中心の白色矮星からの紫外線に照らされてで光るガス雲)



SDSS J1148+1930
 $z=2.379$ (背景銀河)
 $z=0.446$ (レンズ銀河)

アインシュタインの本音

Therefore, there is no great chance of observing this phenomenon, even if dazzling by the light of the much nearer star *B* is disregarded.

A.Einstein, Science (1936) vol.84, pp.506-507


■ Scienceの編集者にあてた手紙

- Let me also thank you for your cooperation with the little publication, which Mr.Mandl squeezed out of me. It is of little value, but it makes the poor guy happy.

初めて発見された重力レンズ二重像

QSO 0957+561 A, B@ $z=1.41$ (87億年前)

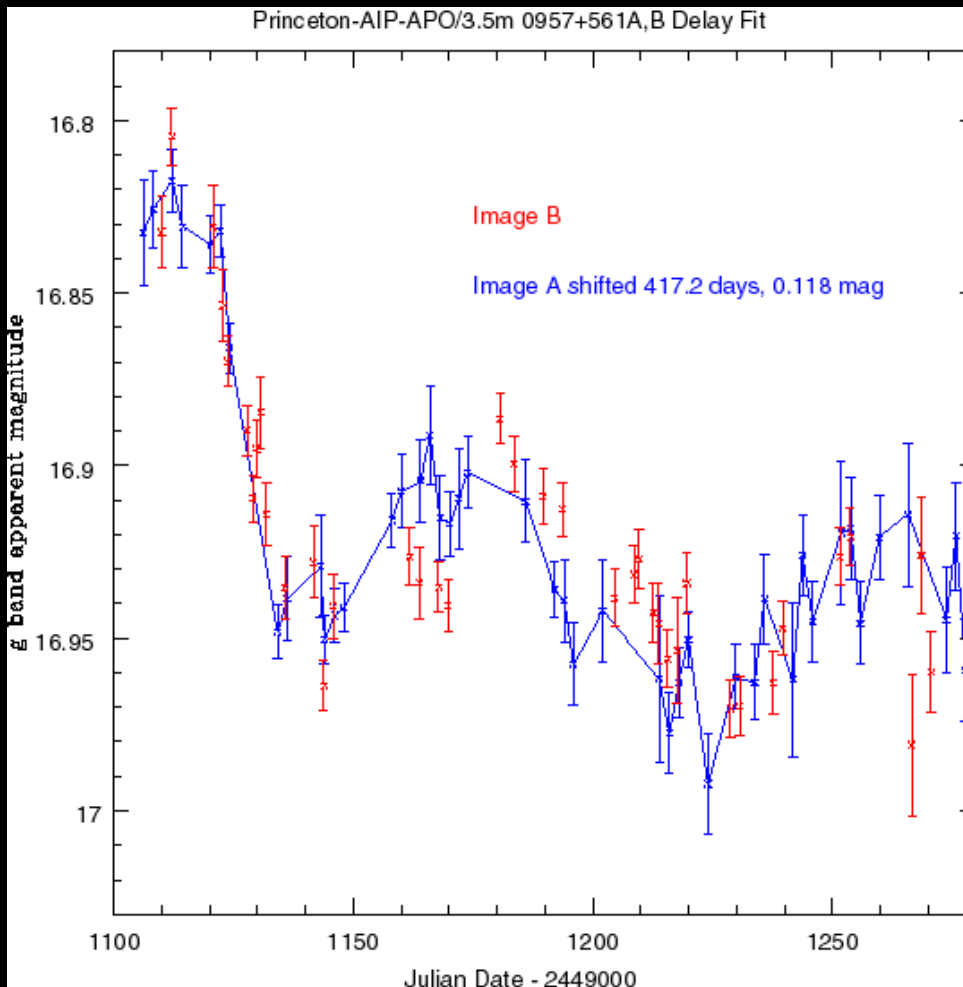
A
B

The image shows a field of stars and galaxies. In the center, there are two bright, cyan-colored spots labeled 'A' and 'B' in yellow. These spots are separated by a small distance and are slightly offset from each other, illustrating the gravitational lensing effect. The background is a dark blue/black space filled with numerous smaller, fainter stars and galaxies of various colors.

レンズ銀河@ $z=0.353$ (37億年前)

Walsh, Carswell and Weymann (1979)

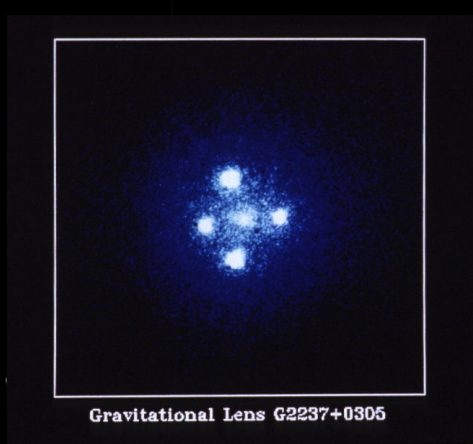
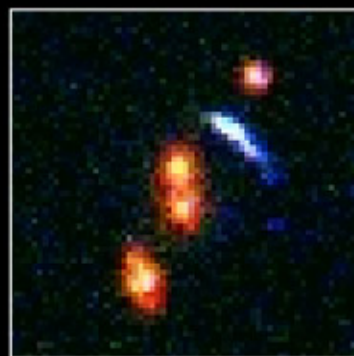
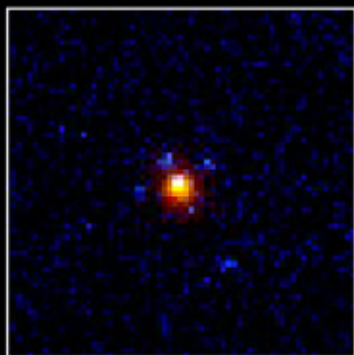
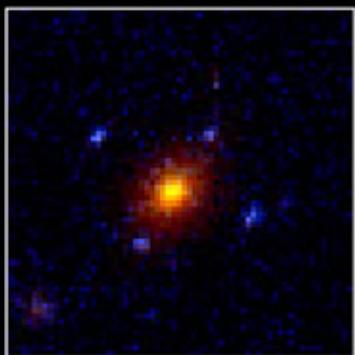
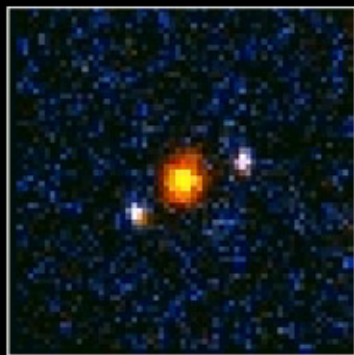
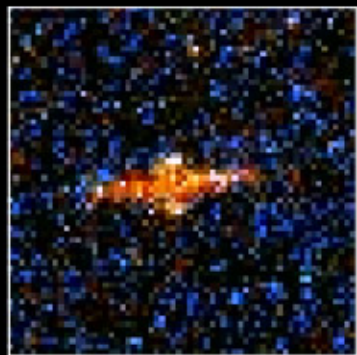
0957+561 A, Bの光度曲線と時間差



- 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
 - 2つのスペクトルがおなじであることと合わせて、異なる2つのクエーサーがたまたま近くにいるのではないことを示す
- 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

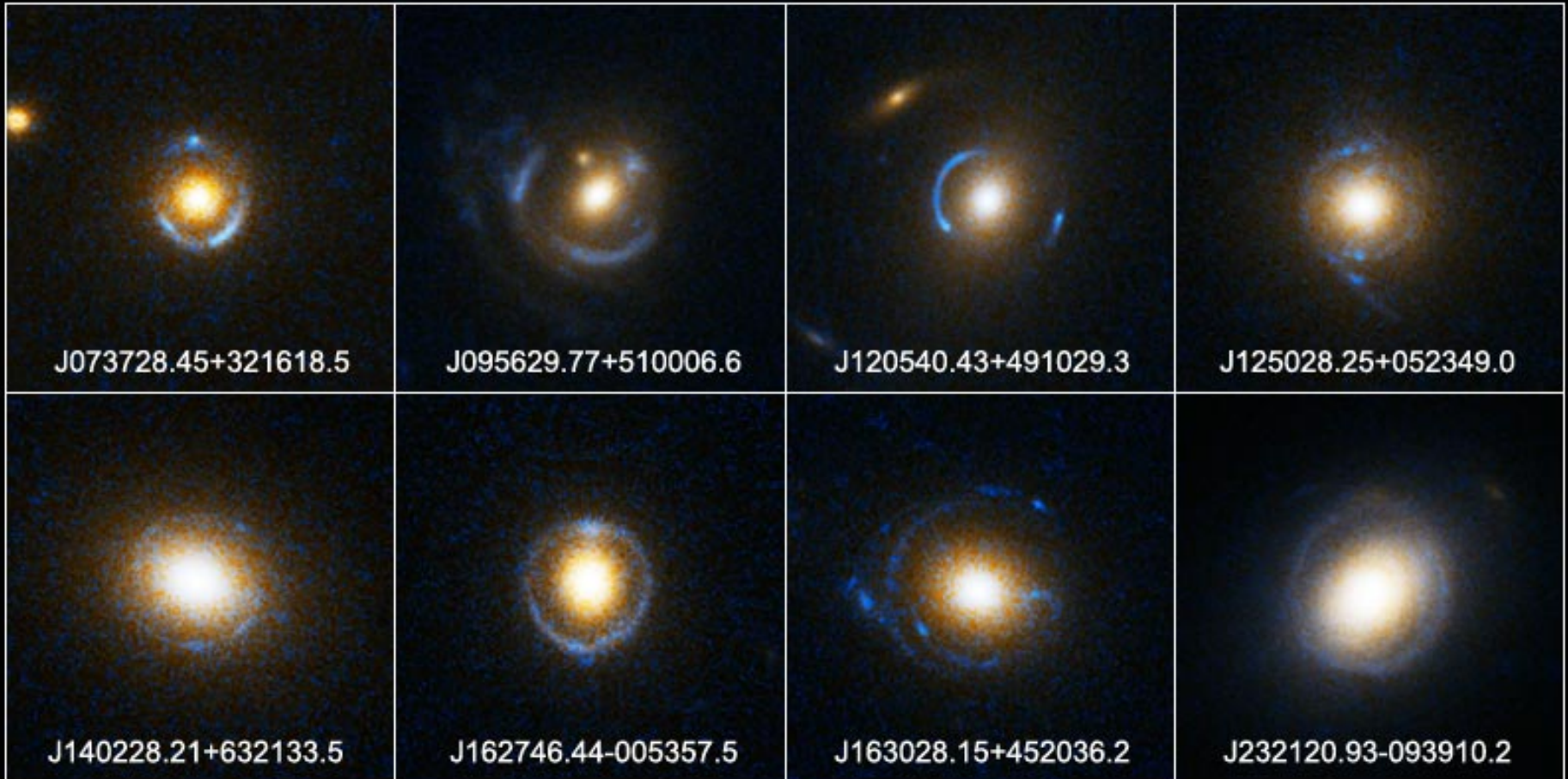
HST •

Gravitational Lens G2237+0305

アインシュタインリング (HST)

Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope ■ ACS



重カレンズで「見る」ダークマター



98億光年先にある
クエーサー(中心に
ブラックホール)

62億光年先にある銀河団のダーク
マターによる重力が、クエーサーから
の光を曲げる

5つの異なる
クエーサー像
が見える



重力レンズ天体
SDSS J1004+4112 :
一般相対論的蜃気楼



ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重カレンズ SDSS J1004+4112

稲田直久、大栗真宗
が2003年に発見

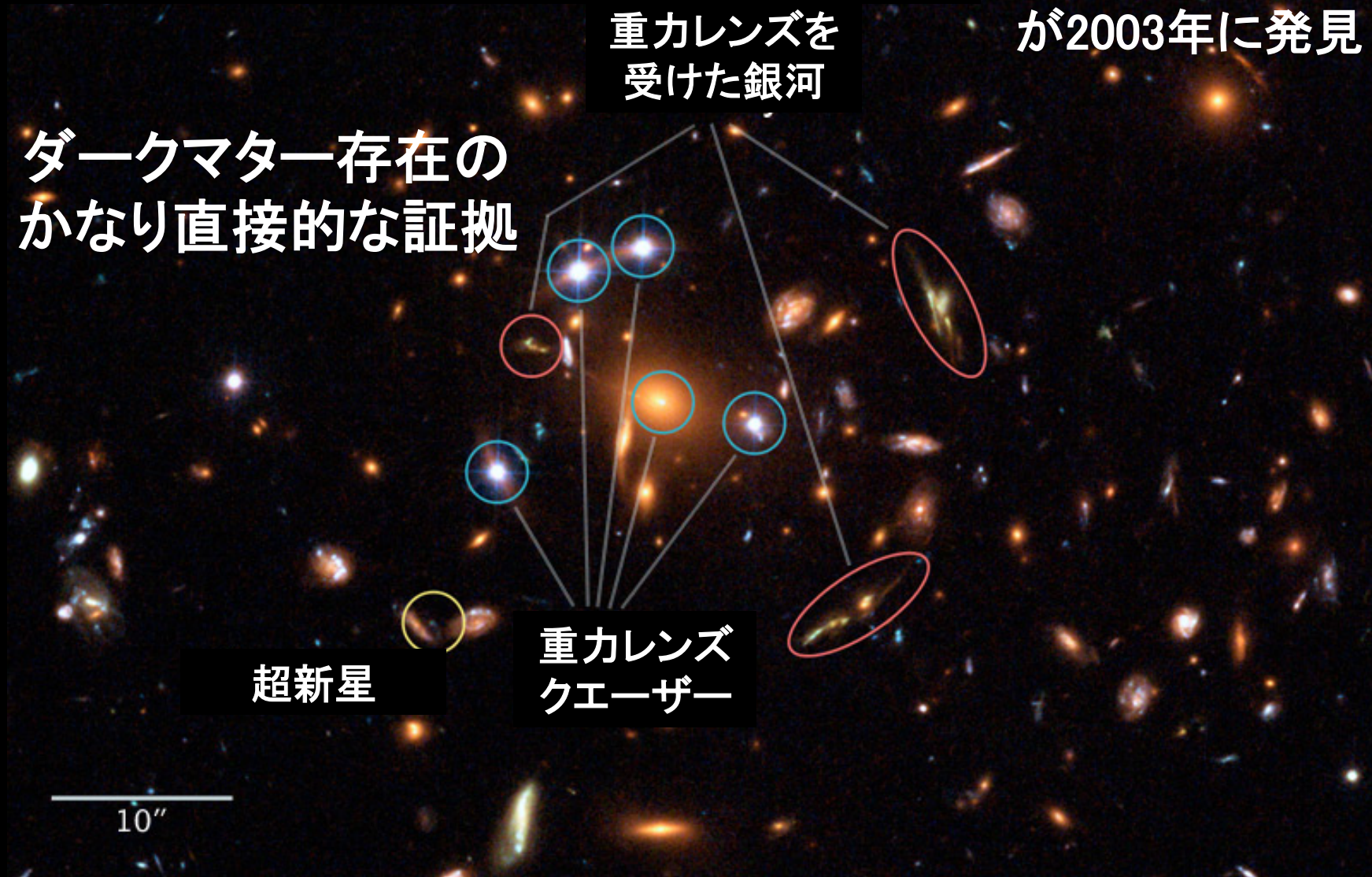
ダークマター存在の
かなり直接的な証拠

重カレンズを
受けた銀河

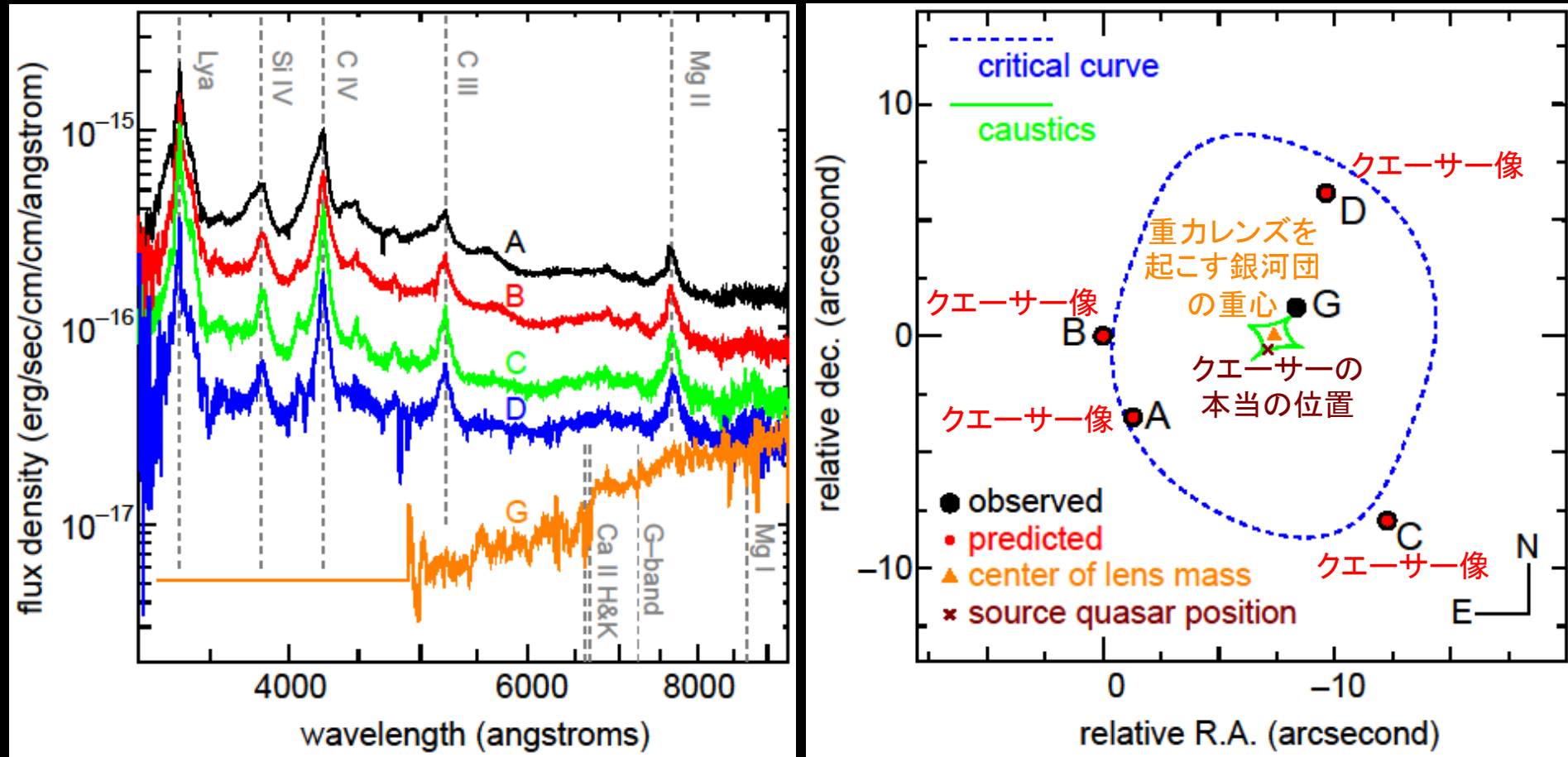
超新星

重カレンズ
クエーザー

10''



重レンズされた4重像クエーサー SDSSJ1004+4112のスペクトルと 重レンズモデルとの一致

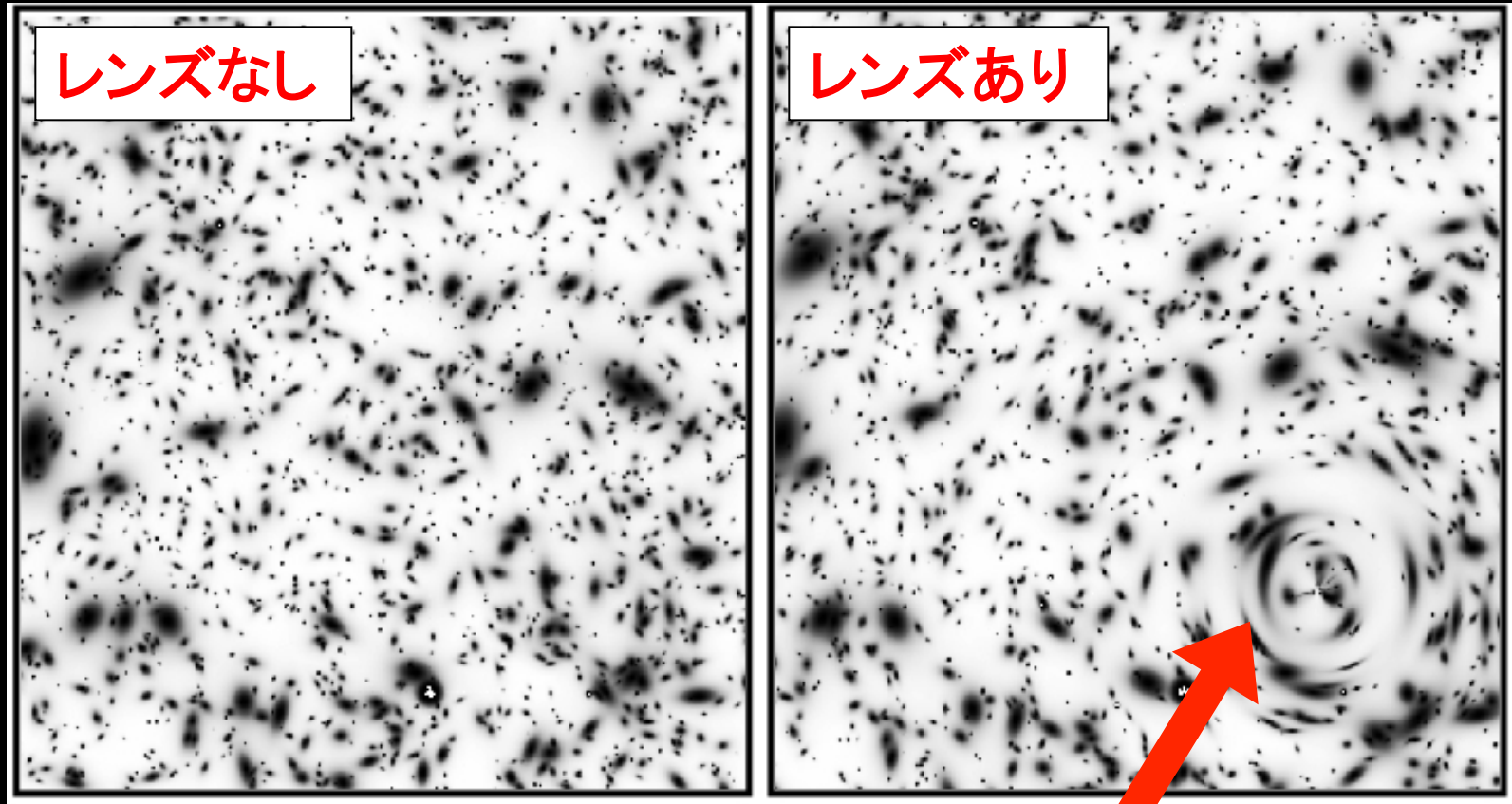


宇宙の蜃気楼

いくら直接見えていようとそれが真実とは限らない

私もかつて月が4つに見えたことがある、、、

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

相互作用しないダークマターの存在証拠： 2つの銀河団の衝突後の痕跡

Bullet Cluster@ $z=0.3$ (37億年前) Markevitch et al. (2003)

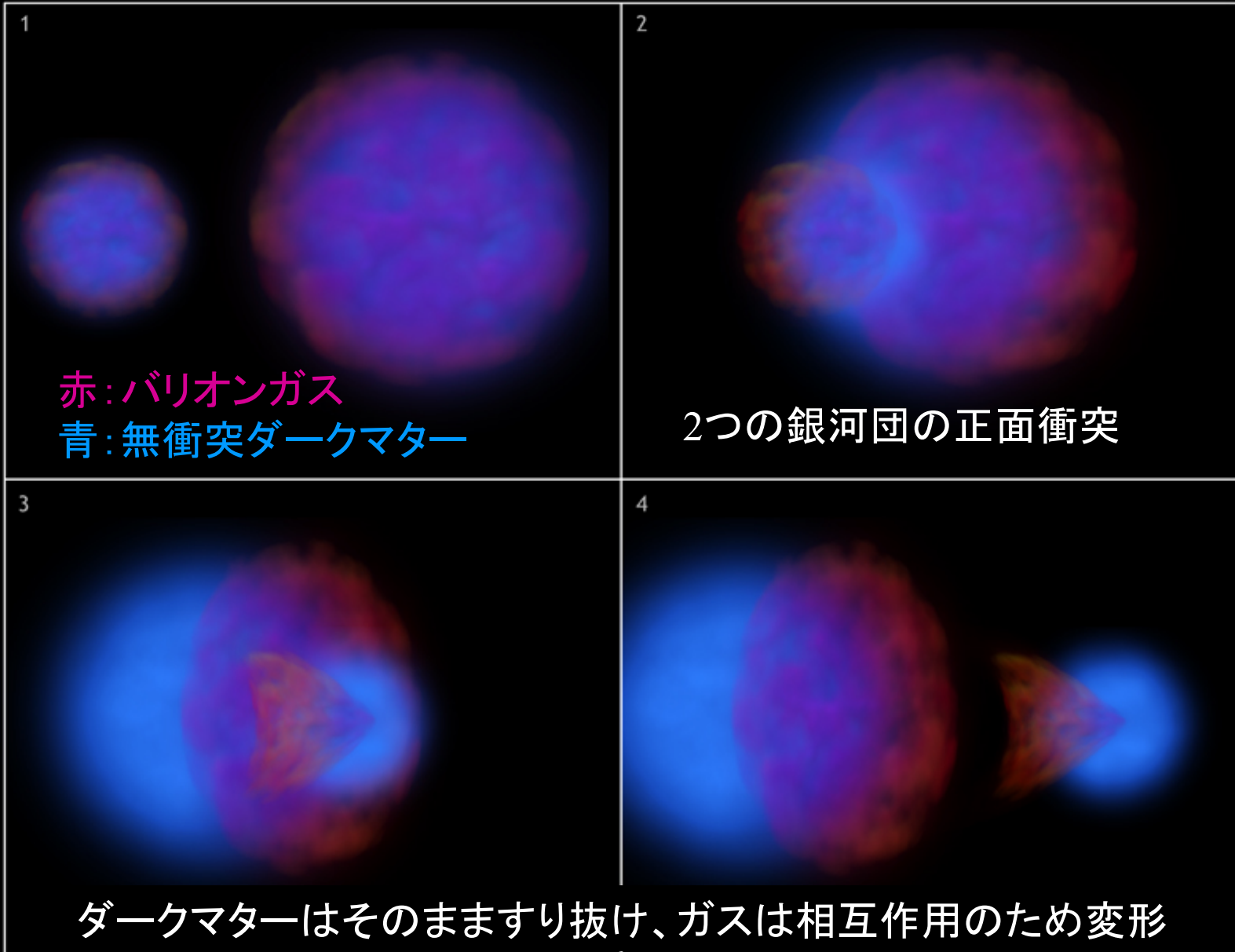
青：弱い重力レンズ効果から推測した質量分布
赤：X線輝度分布



1.5'

無衝突ダークマター存在の証拠

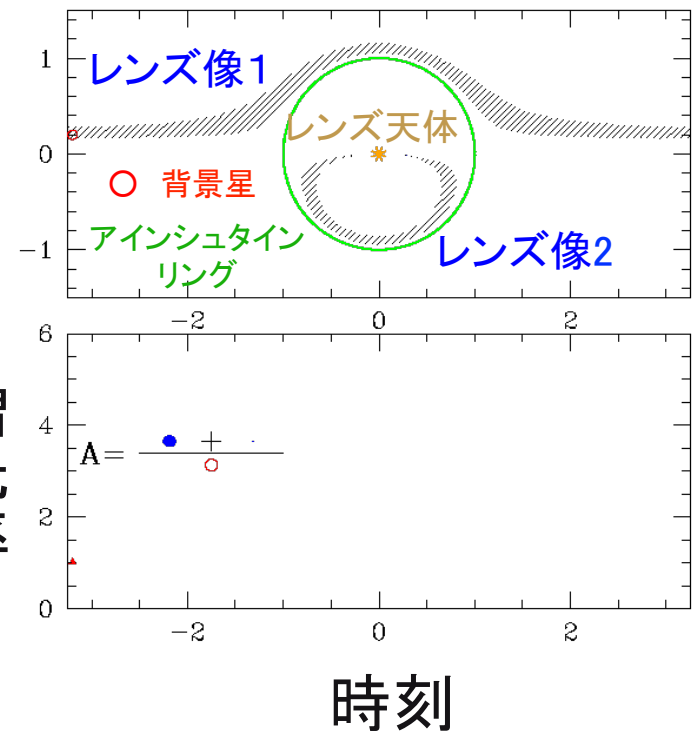
数値シミュレーションの例



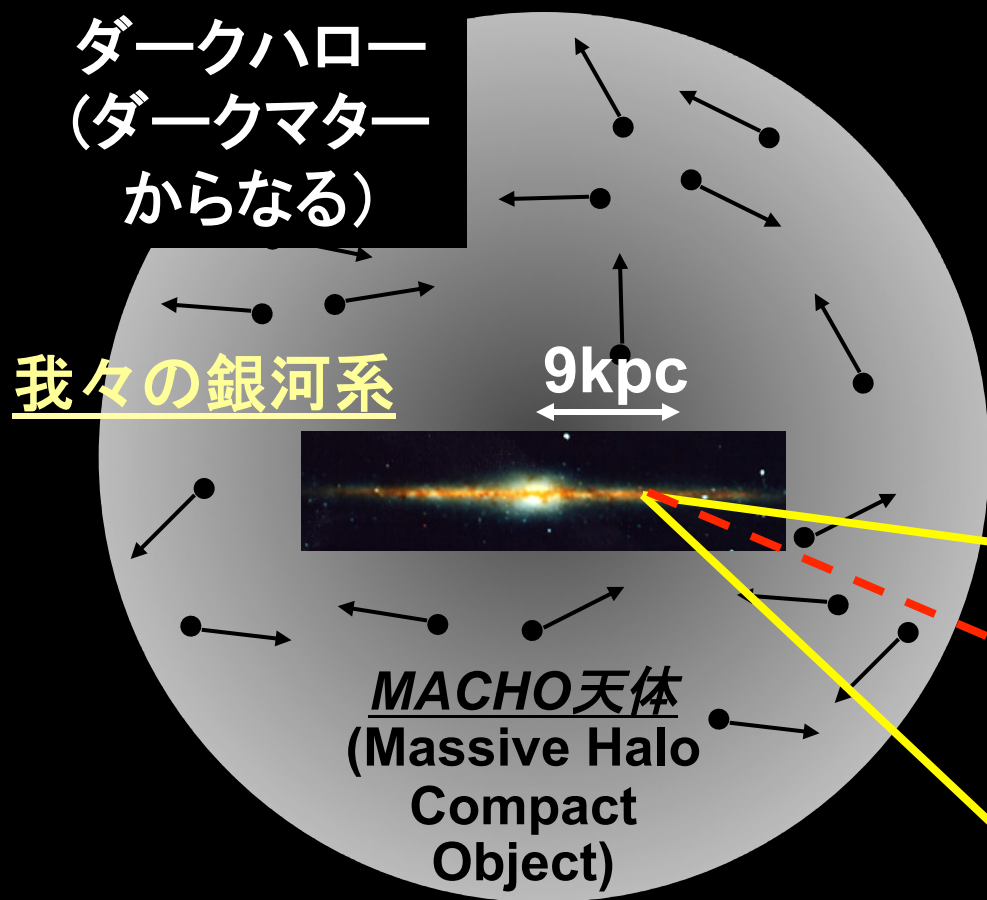
重力マイクロレンズによる増光

- (直接見えない) レンズ天体の背後を通過する星が、重力レンズ効果によって数週間程度、数倍から数十倍明るくなる
 - レンズ天体が太陽質量程度であれば離角はマイクロ秒角程度
 - 2つの像を分離することは不可能だが、それらの増光は観測可能 (アインシュタインの1936年論文の式！)
- この効果を利用すれば銀河系の中に存在するかもしれない ($10^{-6} \sim 10^2$) 太陽質量の暗い天体を検出できるはず

実際には天球上で背景星は静止しており、手前のレンズ天体が運動しているのだが、レンズ天体を中心に選んでいることに注意

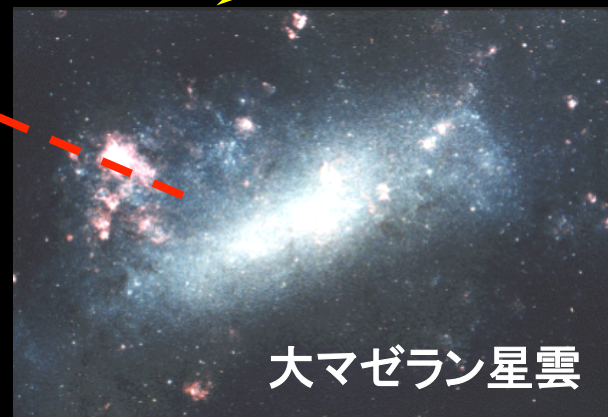


重カマイクロレンズによるMACHO探査

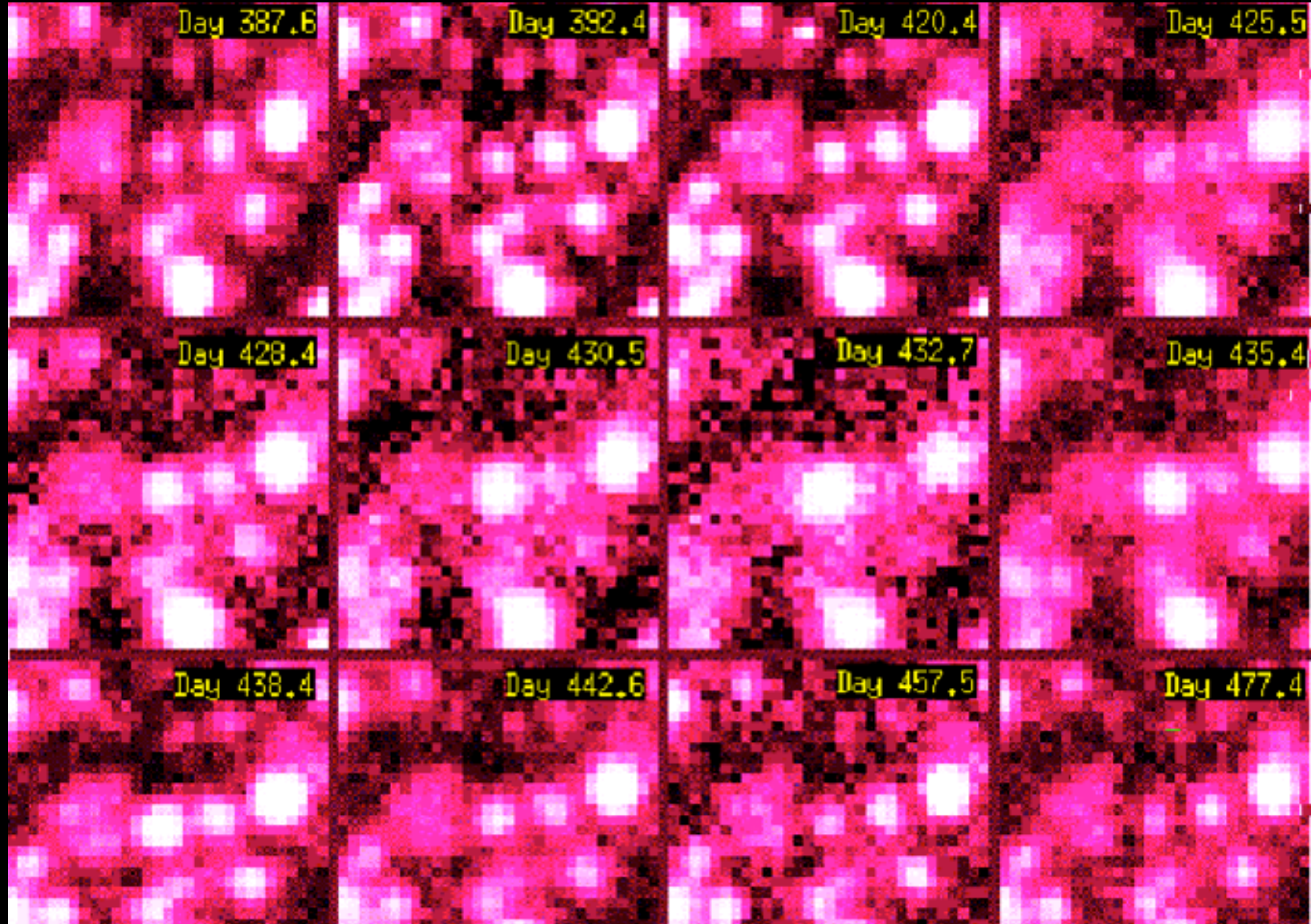


- 銀河系ダークハローのMACHO天体による重カマイクロレンズ現象で大マゼラン星雲の星が増光する兆候を探す

50kpc

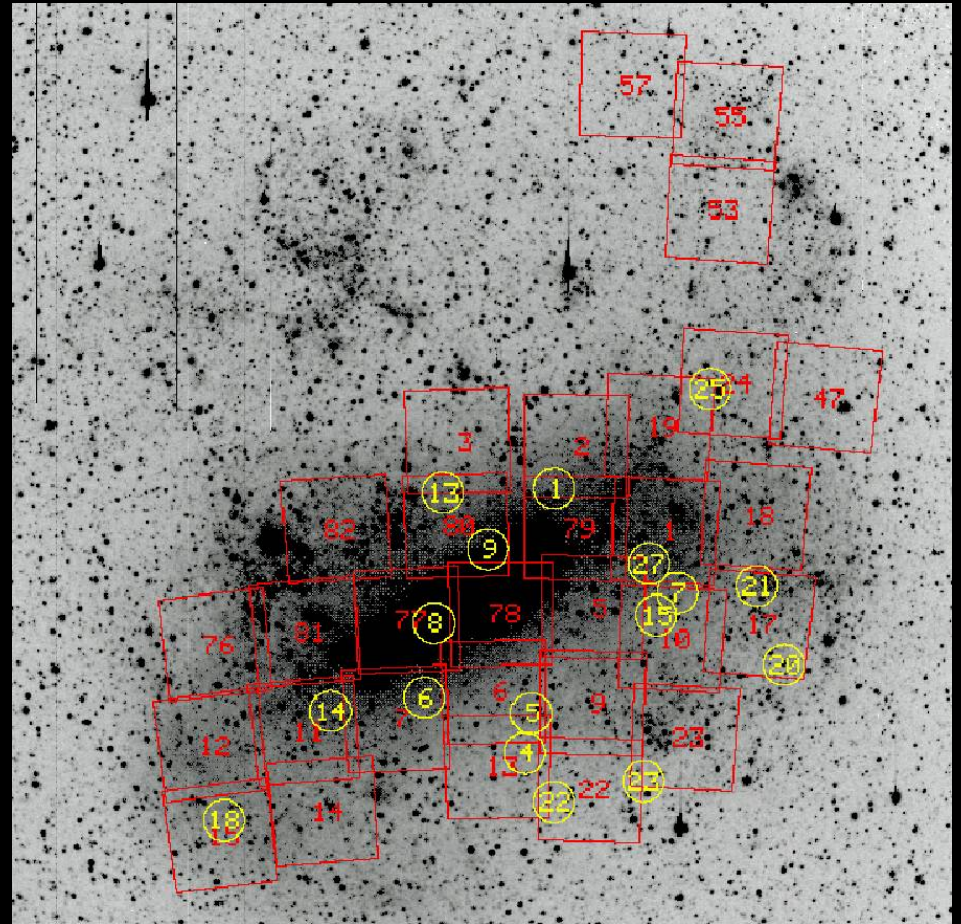
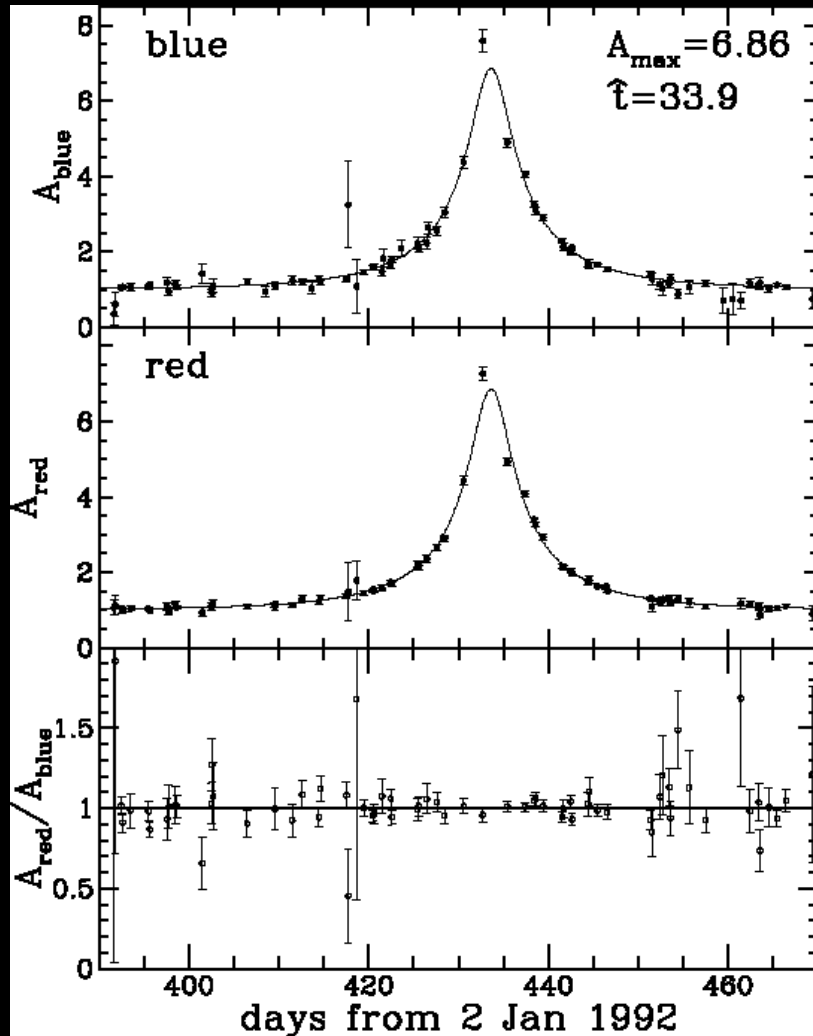


Massive Compact Halo Objectの発見

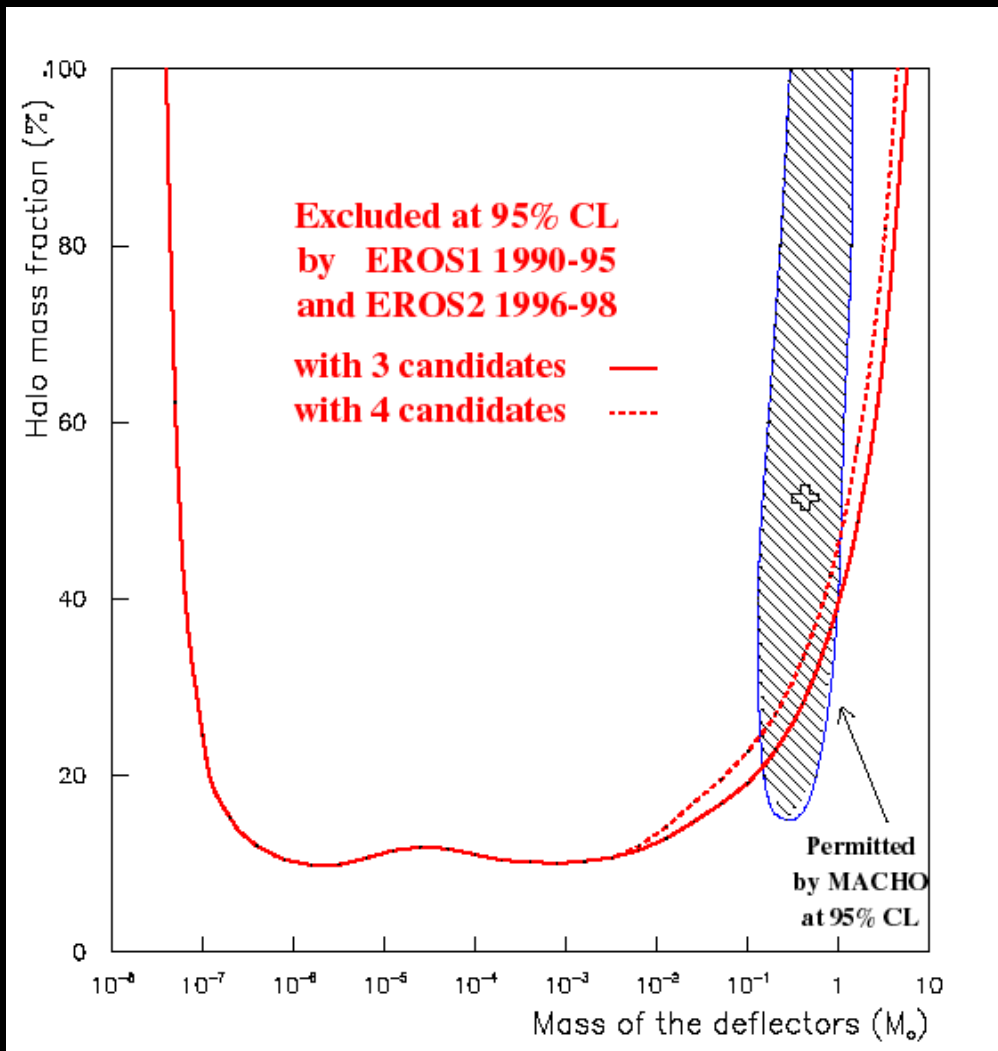


最初に発見された重カマイクロレンズ現象 (Alcock et al. 1993)

MACHOイベントの光度曲線



銀河系ダークマターの組成



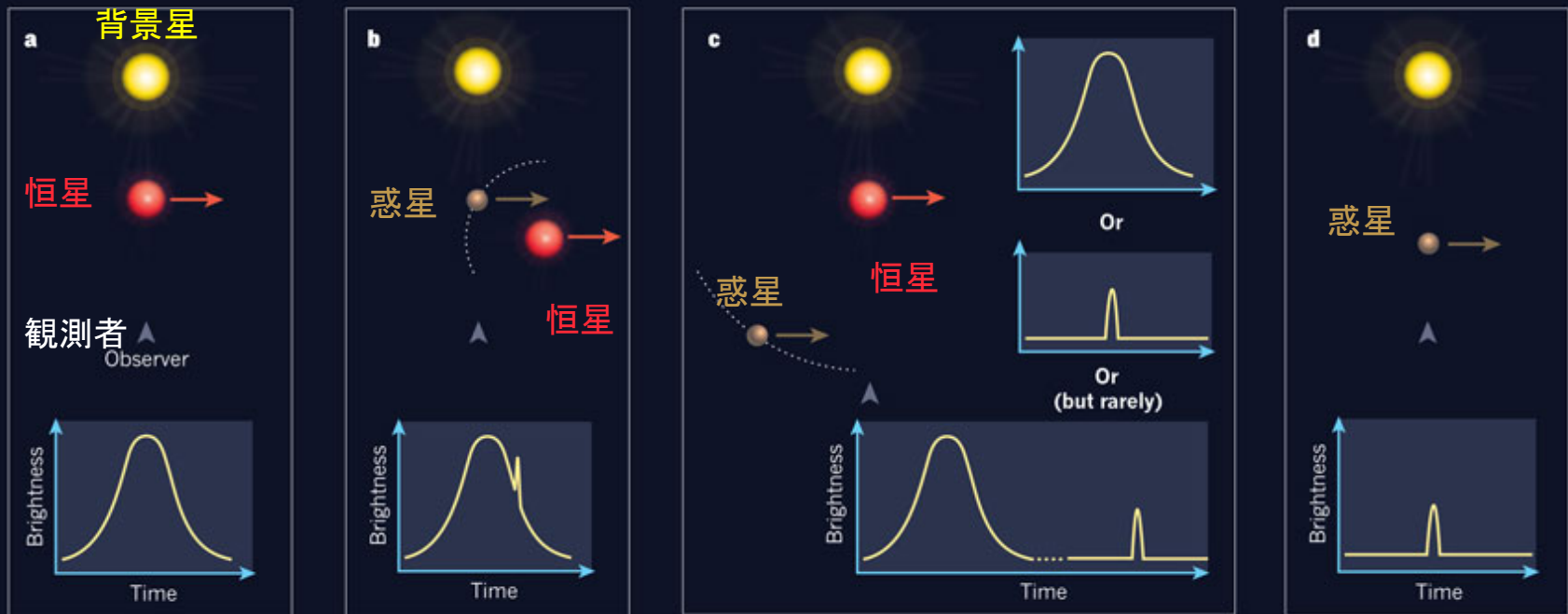
- 銀河系ハローには確かにMACHOが存在する
- 質量は太陽の0.1から1倍程度
- ハロー全体に占める質量は2割以下(つまり、それ以外のダークマターも存在する)

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

重力マイクロレンズを用いた系外惑星探査

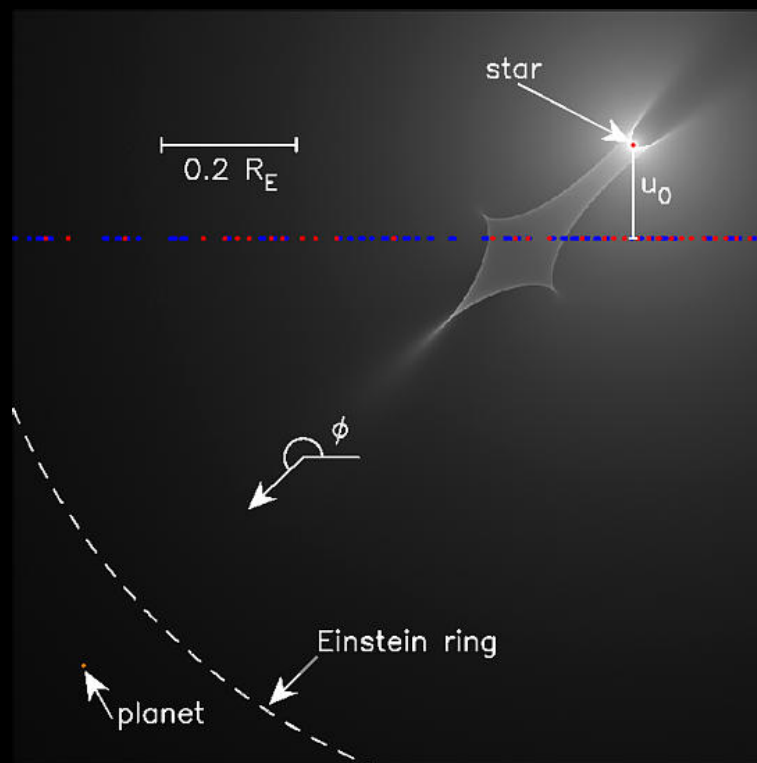
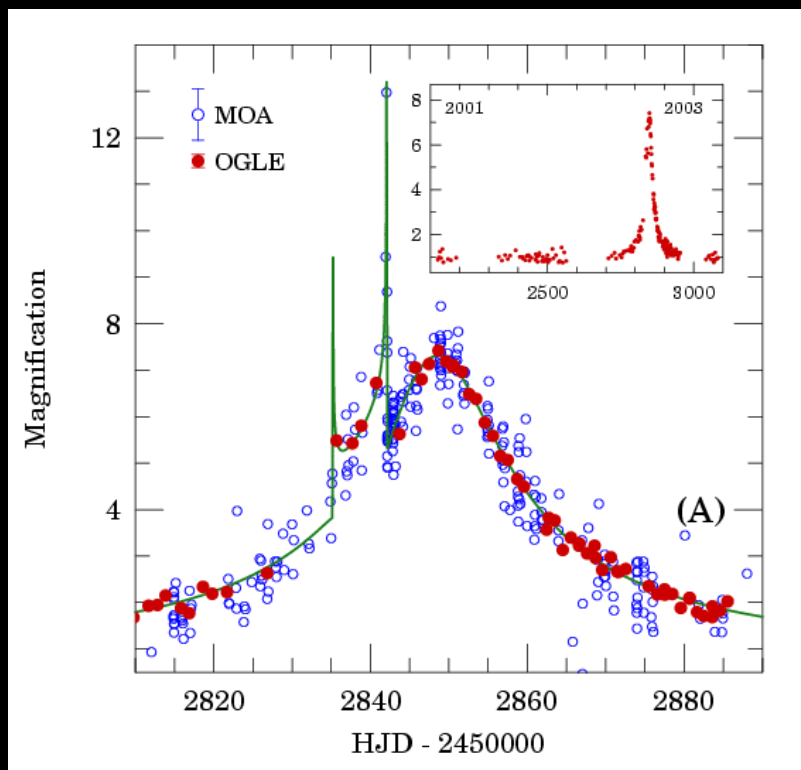
Mao & Paczynski: Astrophysical Journal 374(1991)L37

- レンズ天体が惑星を伴った星だったら何が起こるか？
 - うまい配置をしていれば、増光曲線に鋭いピークが出現する
- この兆候を探査すれば系外惑星の検出が可能になるはず！
 - 最初の重力マイクロレンズ現象の検出(1993)
 - 最初の系外惑星の発見(1995)



マイクロレンズで発見された最初の系外惑星

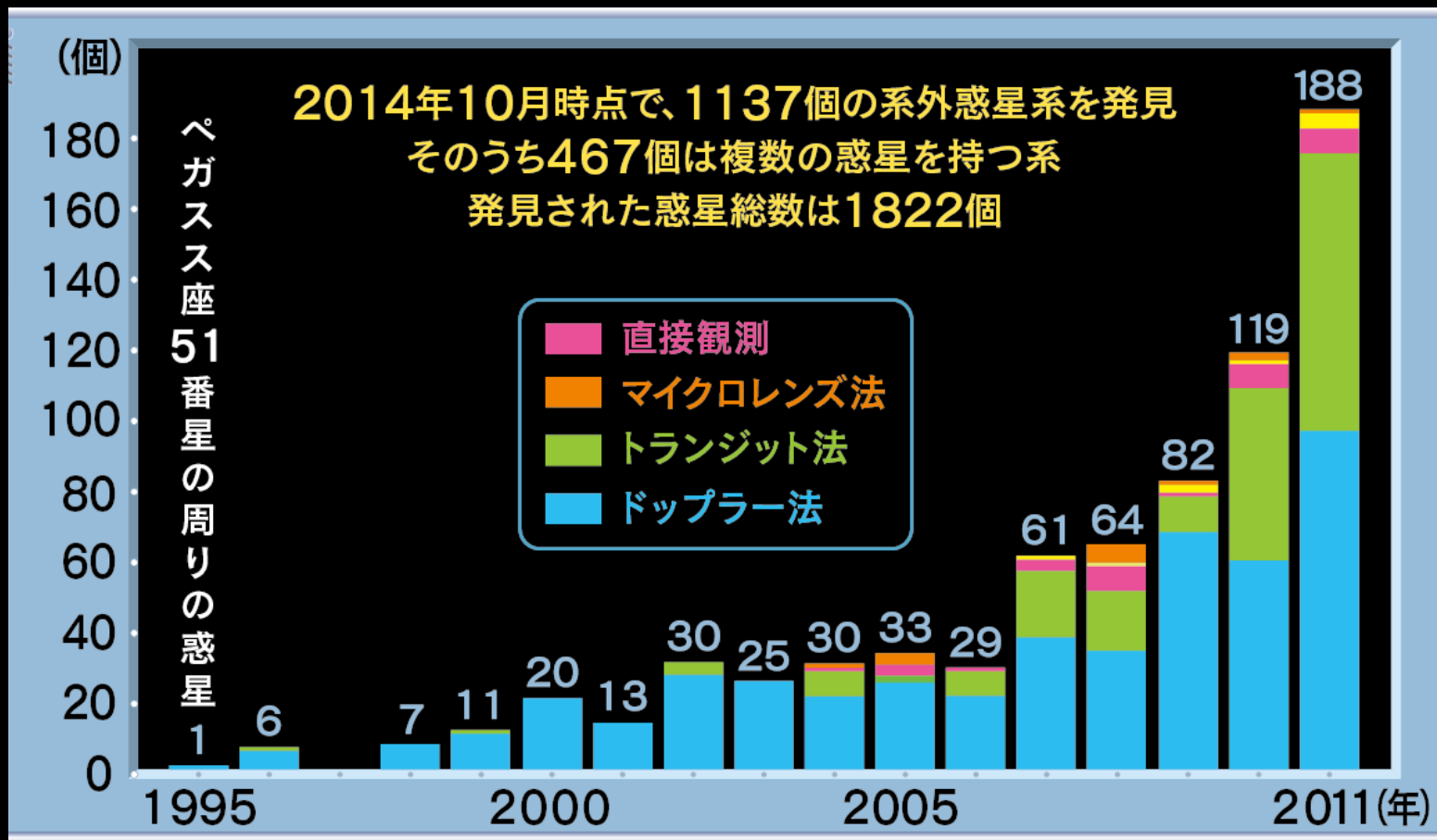
OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53



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日に発見
現在までに20個程度見つかっている (大阪大学 住貴宏氏)

宇宙は惑星系で満ち溢れている



2015年5月時点では
 8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:2、6重惑星系:2、5重惑星系:15、
 4重惑星系:49、3重惑星系:98、2重惑星系 300個以上

米国系外惑星探査ミッション計画

WFIRST: マイクロレンズ
での惑星探査が主目的
の一つ

Exoplanet Missions



重力レンズ越しにみる夜空

- かつては不可能だと考えられていた現象も、科学・技術の飛躍的進展のおかげで観測可能となる例は多い。のみならず、それが今や新たな科学を開拓する手法として確立することもある。
- 重力レンズ現象はまさにその典型例
 - 重力理論の検証
 - 通常は暗くて見えない遠方天体の探査
 - ダークマターの検出とその性質の制限
 - 太陽系外惑星の検出
- 目に見える姿が必ずしも真実とは限らない