

# 夜空のムコウを探る



東京大学 大学院理学系研究科

物理学専攻 須藤 靖

金沢大学 理工研究域数物科学系  
物理学教室セミナー 2009年8月28日

夜空のムコウ

この青空のムコウに何があるのだろうか



# アイザック・アシモフ著 「夜来る」



イラスト：羽馬有紗

- 2000年に一度しか夜が来ない“地球”の人たち
- 自分たちの“地球”と宇宙との関係は？

皆既日食 2009年 7月22日 硫黄島沖(ぱしふいっく びいなす 船上)にて

国立天文台ホームページより



撮影時刻:2009年7月22日, 11時31分 [JST] 地球照による月面の模様が見えている

口径10.1cm屈折望遠鏡 (BORG 101ED F6.3, f=640mm), 赤道儀:ビクセン GP

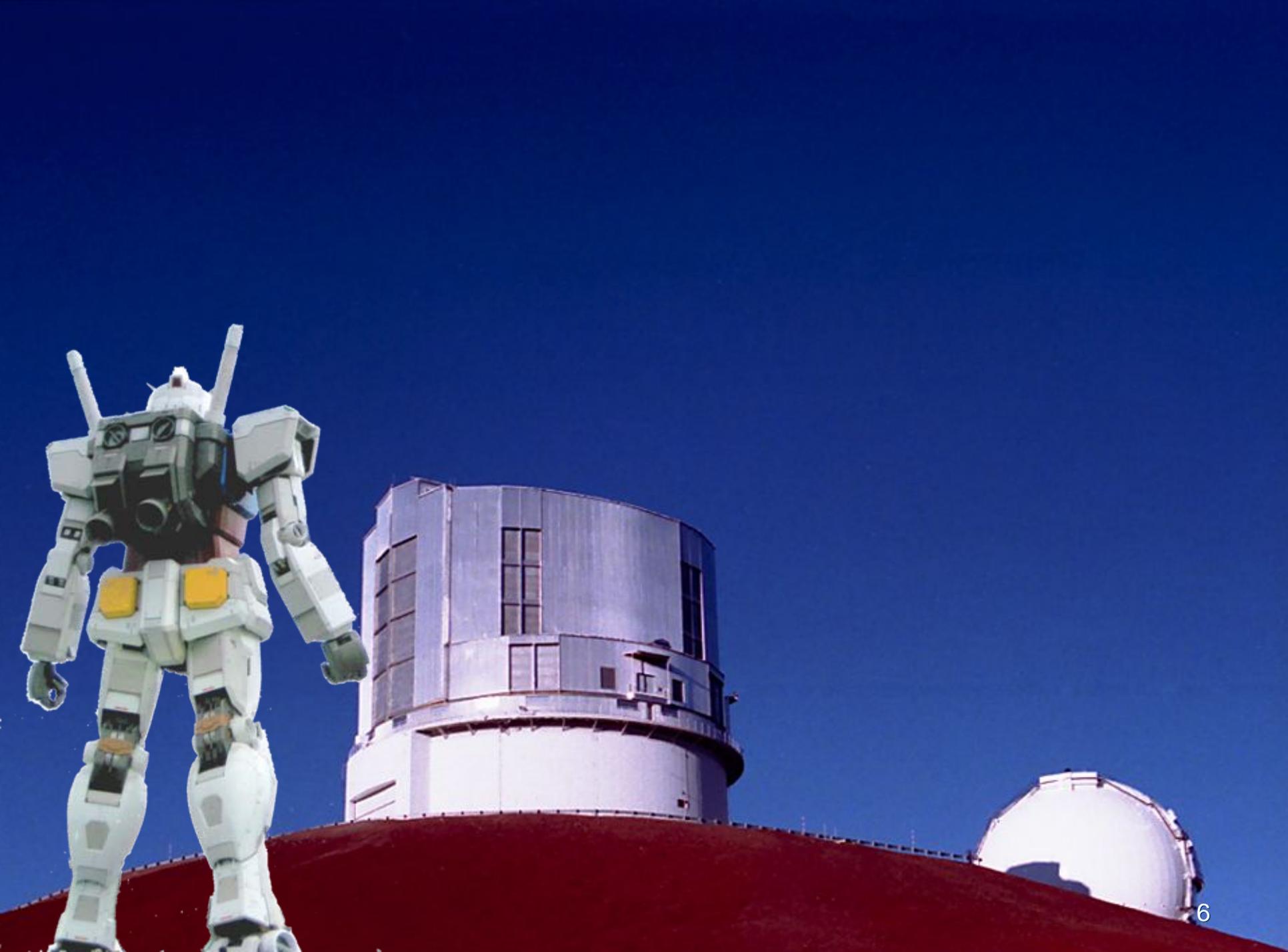
カメラ:ニコン D700 (ISO800), 露出時間:1/2000~1/8秒

画像処理:9フレームを加算合成, ローテーション・グラディエント処理, その他

撮影場所:硫黄島近海

撮影: 福島英雄, 宮地晃平, 片山真人 画像処理: 福島英雄

*Hideo Fukushima, A. Miyachi and M. Katayama*

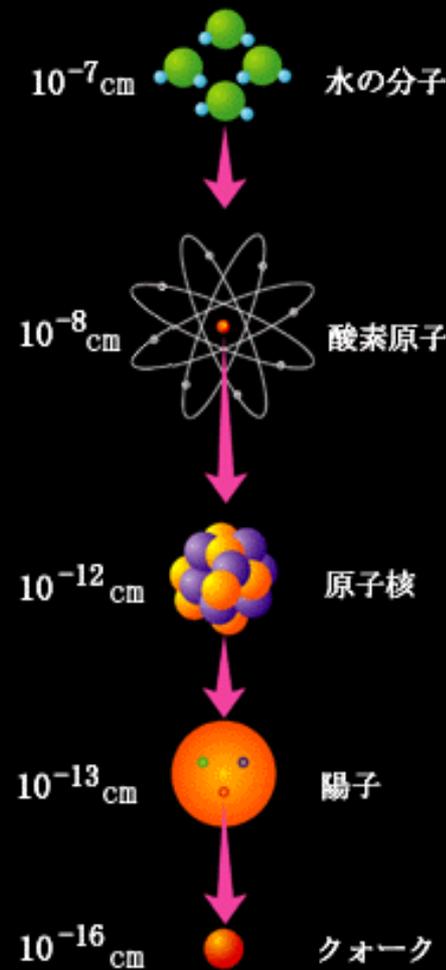
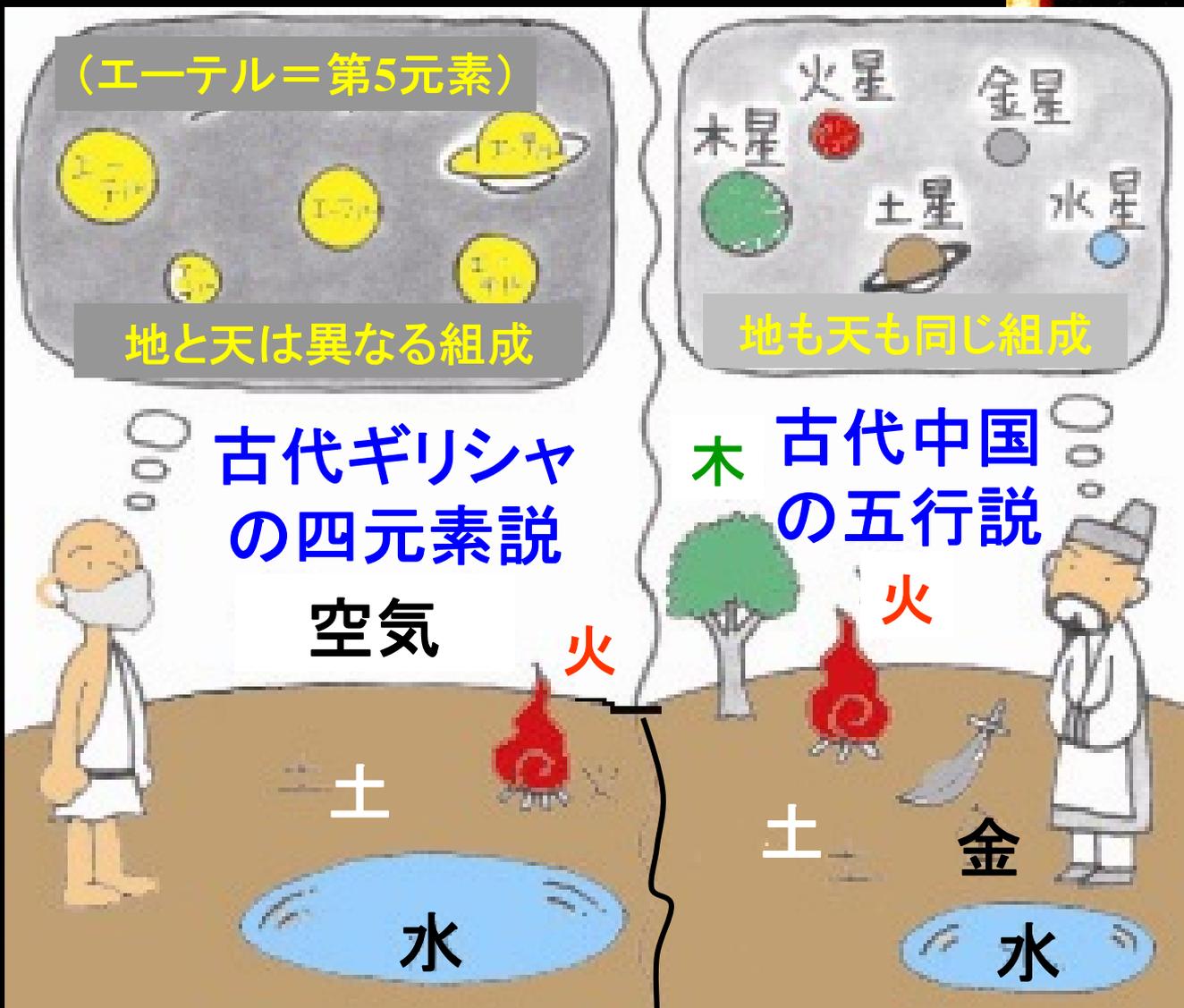
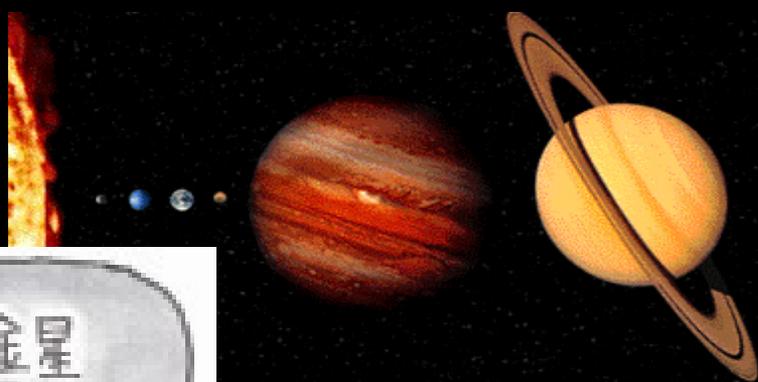


この銀河宇宙の果てに何があるのだろうか



Seldner, Siebers,  
Groth, and Peebles,  
1977, AJ, 82, 249.

# 自然界に思いをはせる



(いずれも 須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

# ギリシヤ、中国、現代物理学

## ■ 古代ギリシヤの4元説

- 空気、土、火、水

## ■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水)  
× (陽、陰)

- これが日本で用いられている惑星と曜日の名前の由来

## ■ 現代物理学

- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子)⇒素粒子(電子、ニュートリノ、クォーク・レプトン)



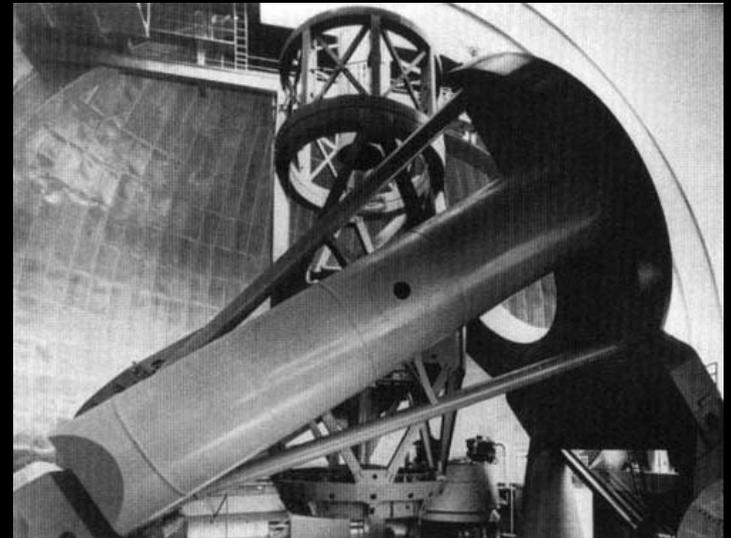
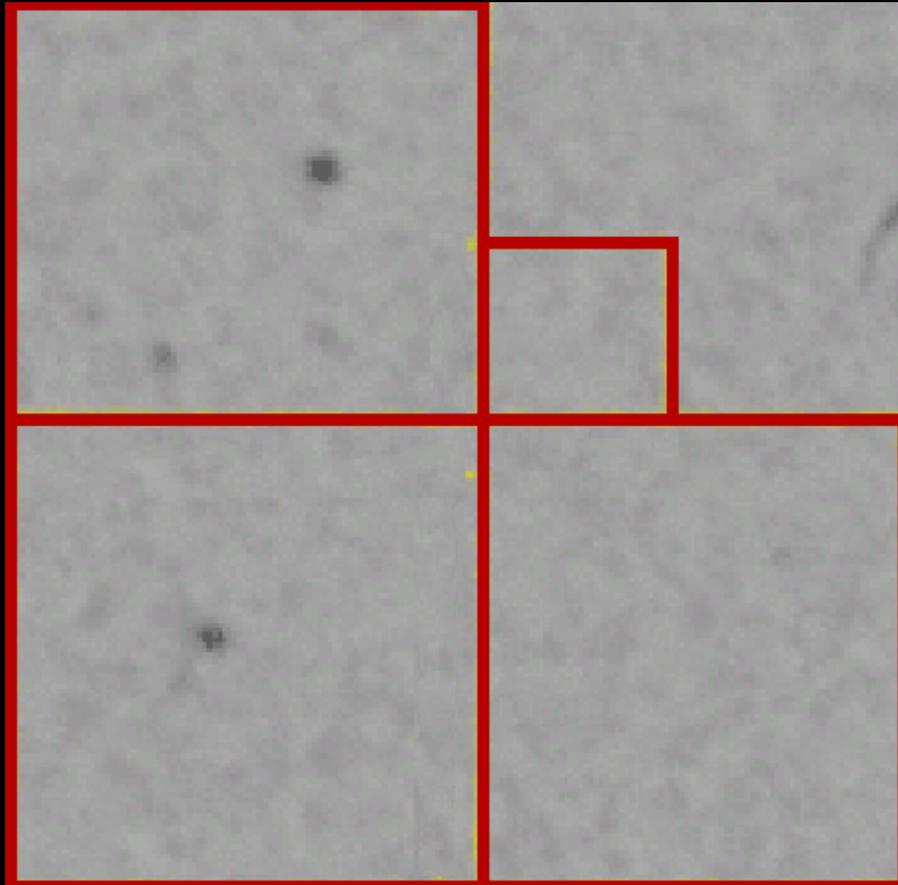
日月火水木金土

	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

# 我々の世界をもっとよく知りたい

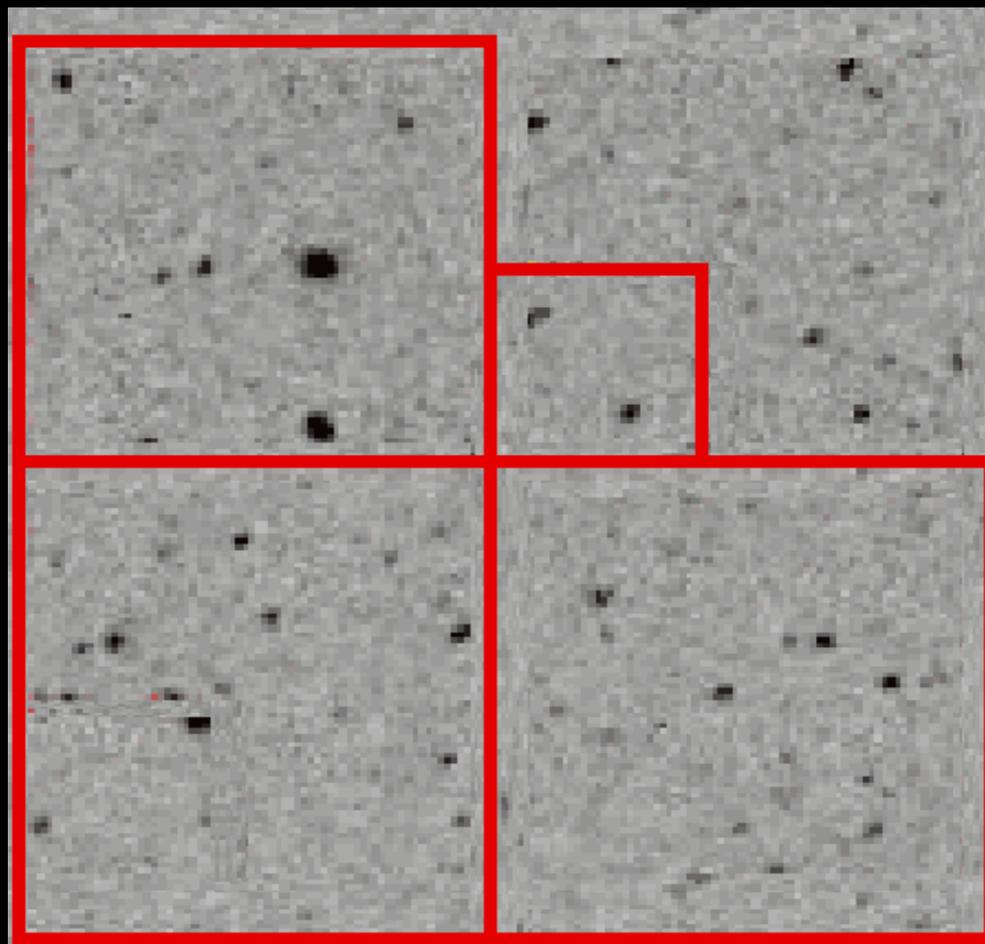
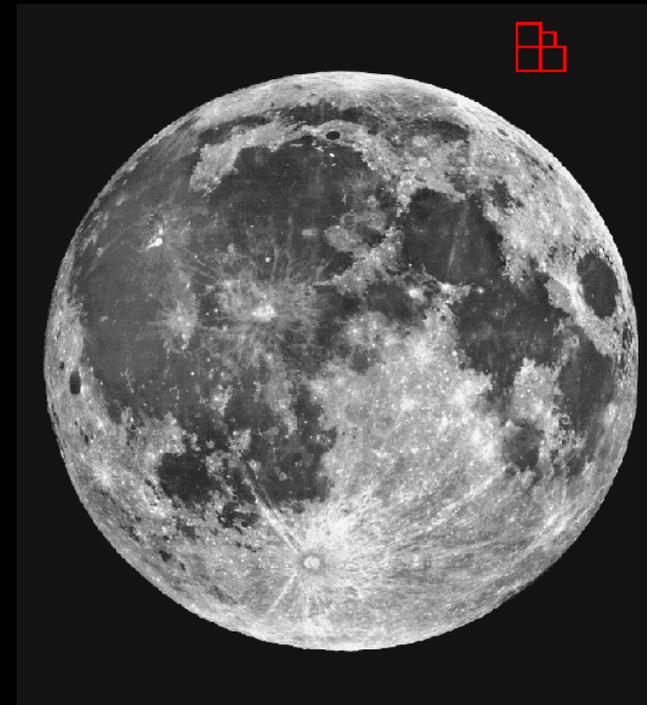
- **微視的世界**: 物質は何からできているのだろうか?
  - 分子⇒原子⇒原子核⇒素粒子(クォーク・レプトン)
  - これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか?
- **巨視的世界**: 宇宙の果てには何があるのだろうか?
  - 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙
  - 宇宙の大きさ(=年齢)はどのくらいだろう
  - さらに遠く(=過去)の宇宙はどうなっているのだろうか
  - 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

# 宇宙を見る目の進歩 (1)



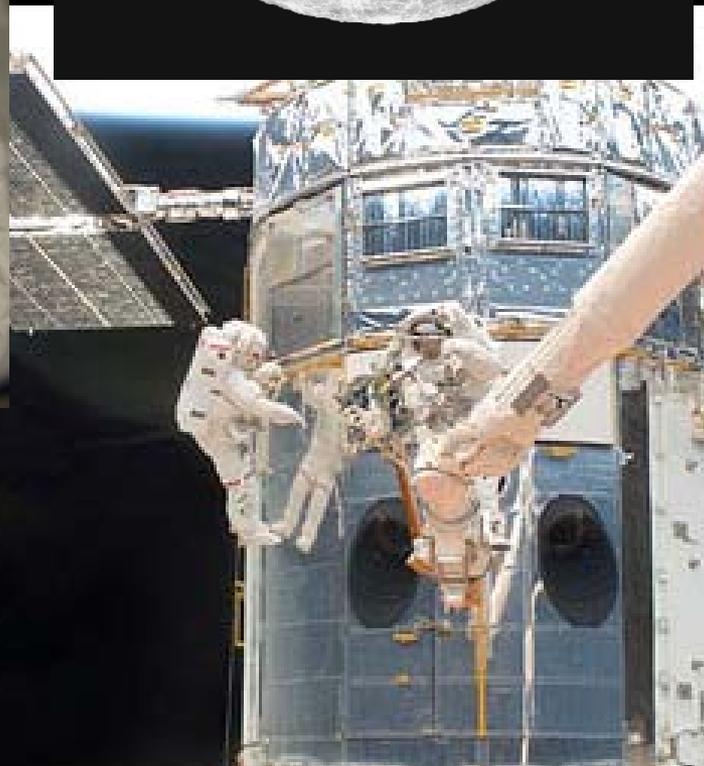
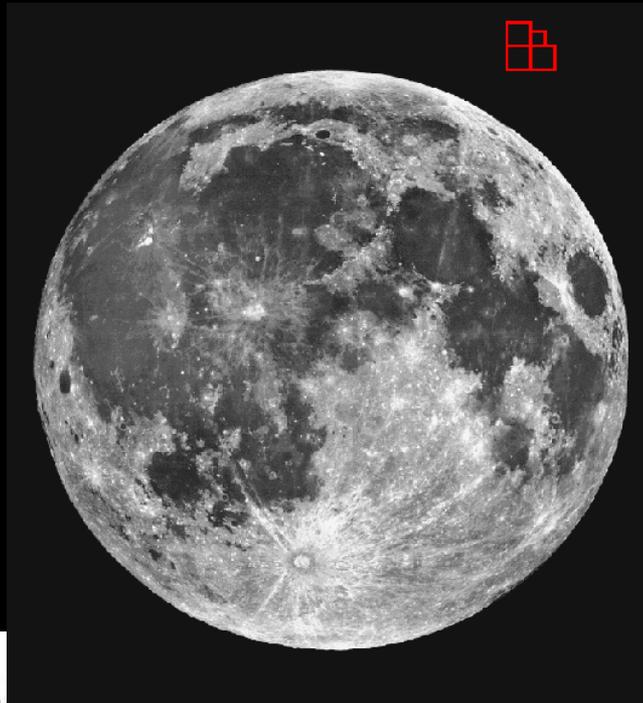
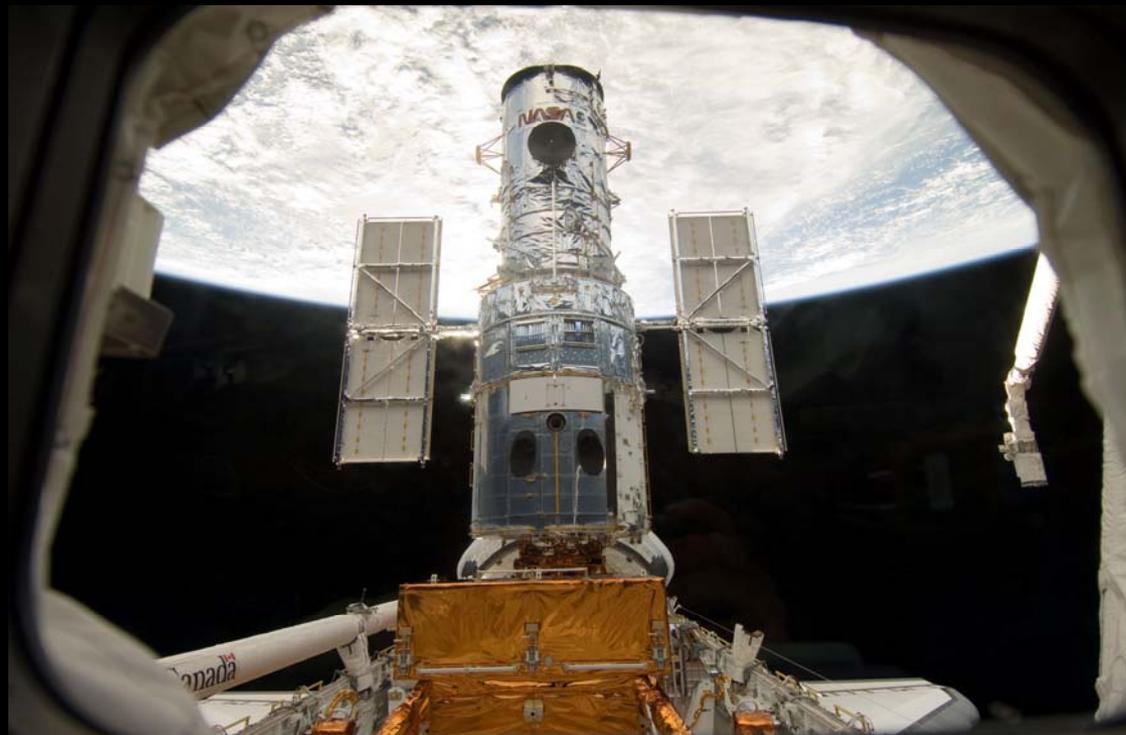
地上5m望遠鏡+写真乾板  
100万×人間の眼

# 宇宙を見る目の進歩 (2)

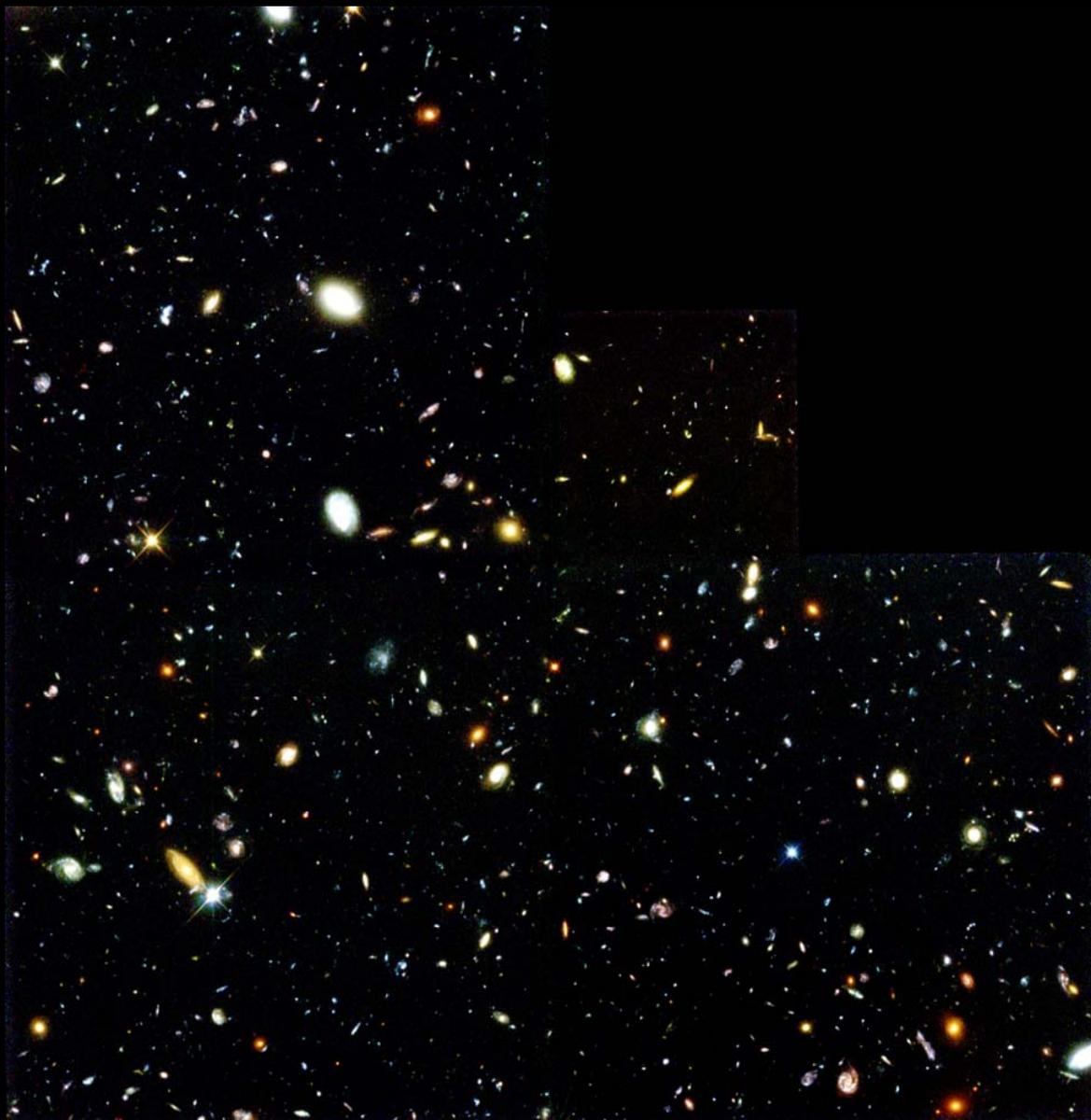


地上4m望遠鏡+CCD:  
100×写真乾板

# 宇宙を見る目の進歩 (3)



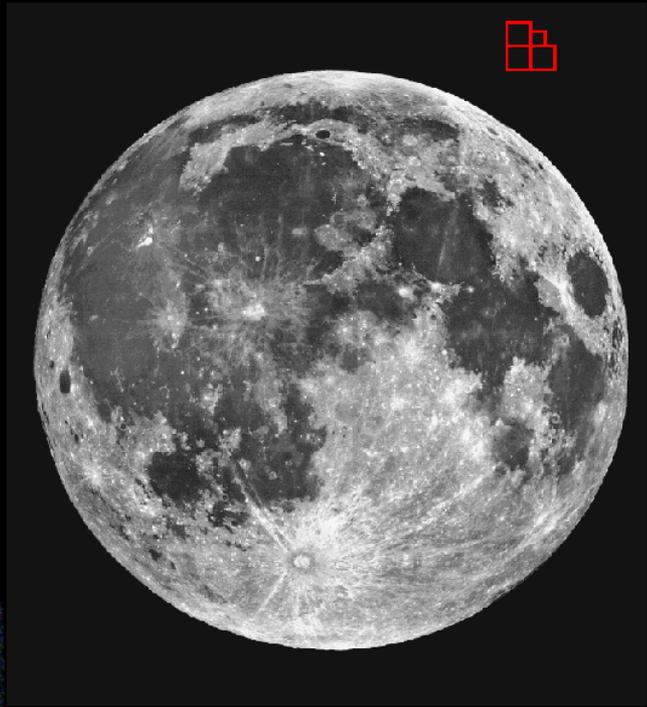
ハッブル宇宙望遠鏡



Hubble Deep Field

ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2



ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:  
1000×地上望遠鏡

# 穴あきアルミ板から夜空のムコウを見る



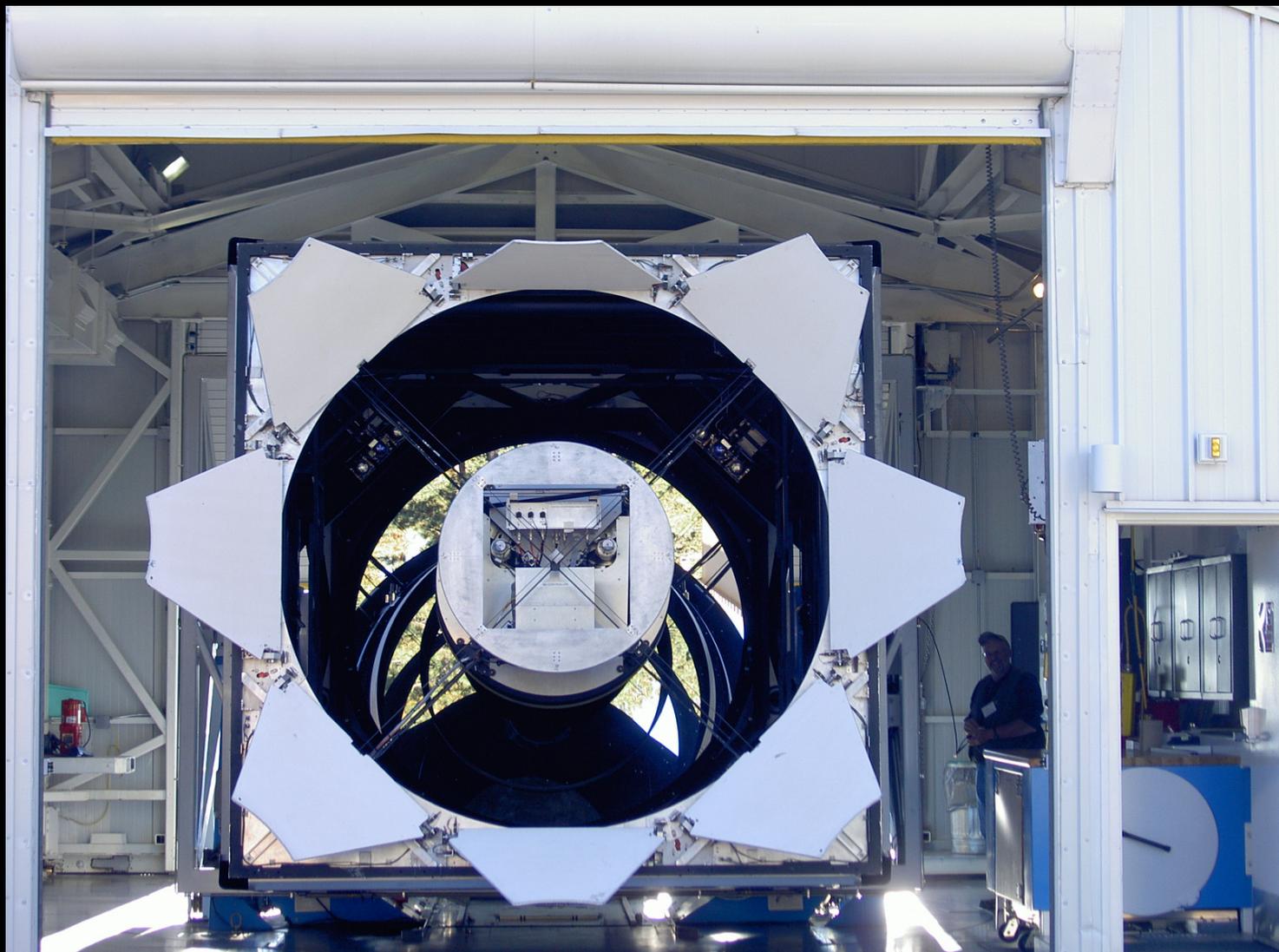
# 穴あきアルミ板とアパッチポイント天文台



# 穴あきアルミ板とアパッチポイント天文台



# 穴あきアルミ板とアパッチポイント天文台

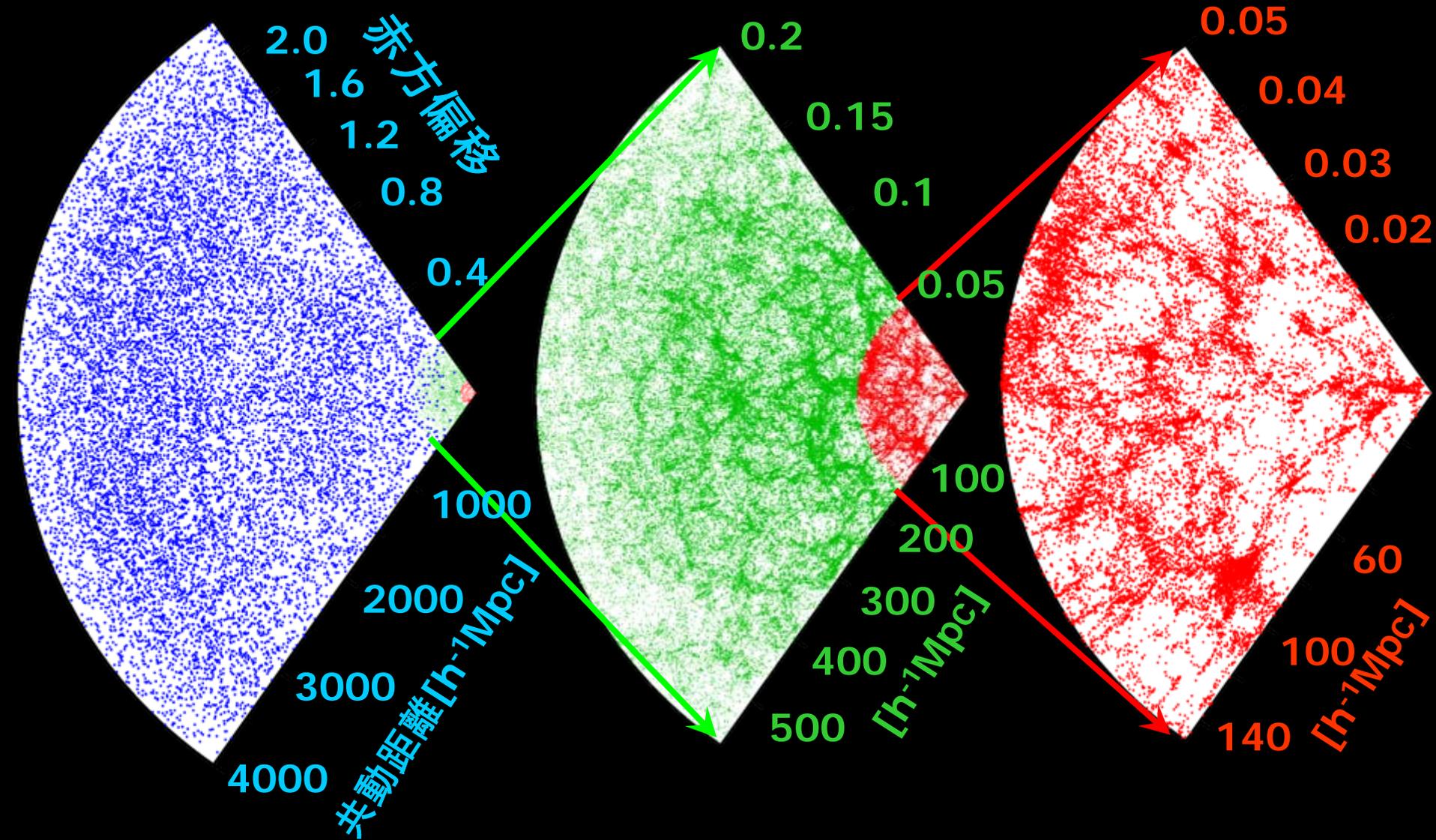


# 望遠鏡で遠くの銀河を見る アパッチポイント天文台@アメリカ



NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映

# SDSSクエーサーと銀河の宇宙地図



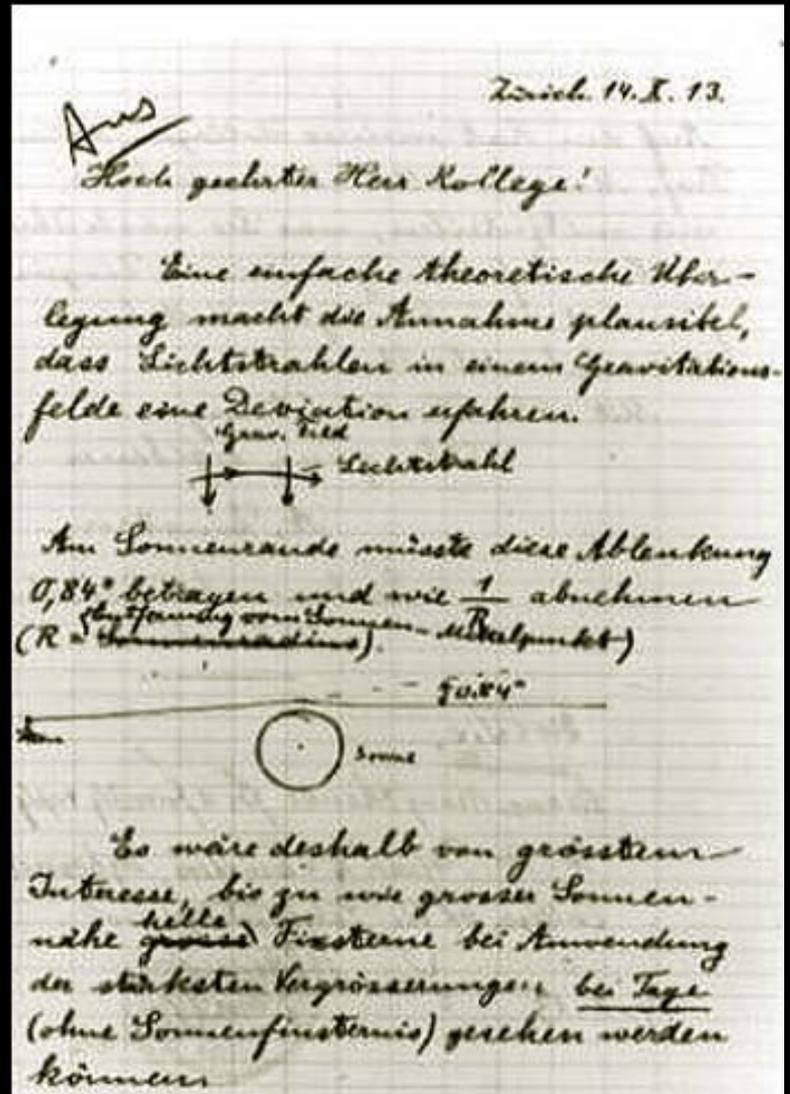
宇宙を満たしていながら  
見えないもの  
準主役

ダークマター

# 宇宙のダークマター

- 実は、光り輝く天体の周りには光ることのないダークマターが満ちている
- **ダークマターの存在は、その周囲を通過する光の軌道を変化させる**
  - アインシュタインの一般相対論にもとづく重力レンズ効果によって実証されている
- その正体は、未発見の素粒子であると考えられている(天文学による微視的世界の発見)

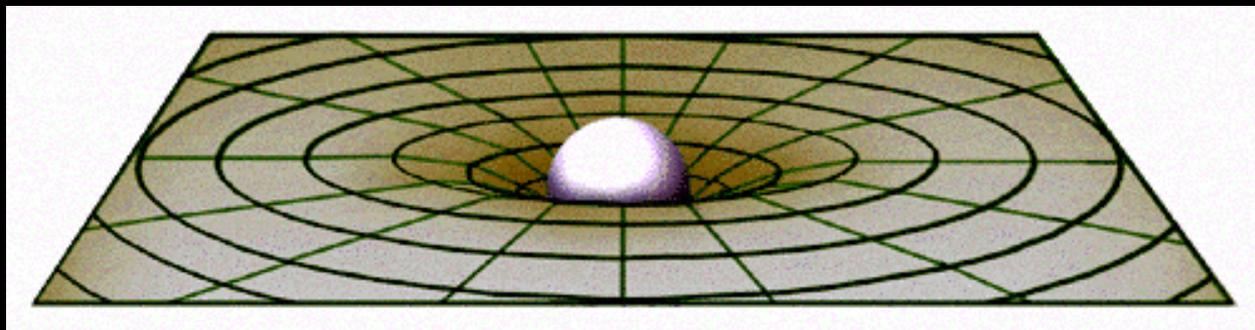
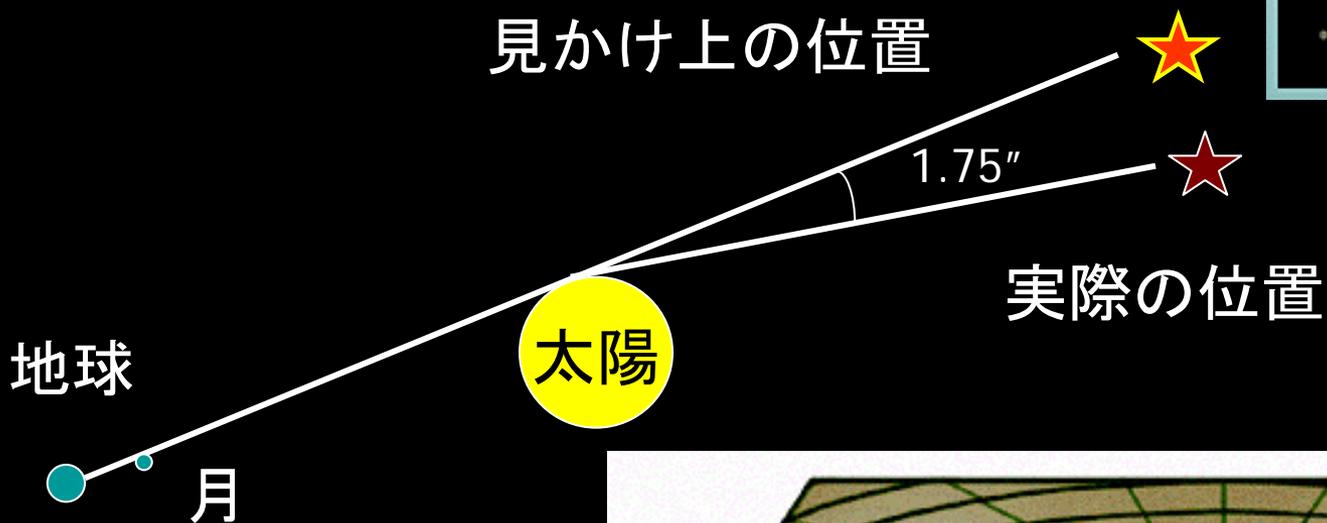
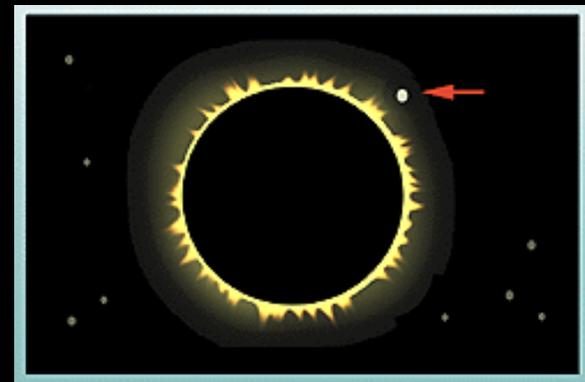
# 重カレンズ



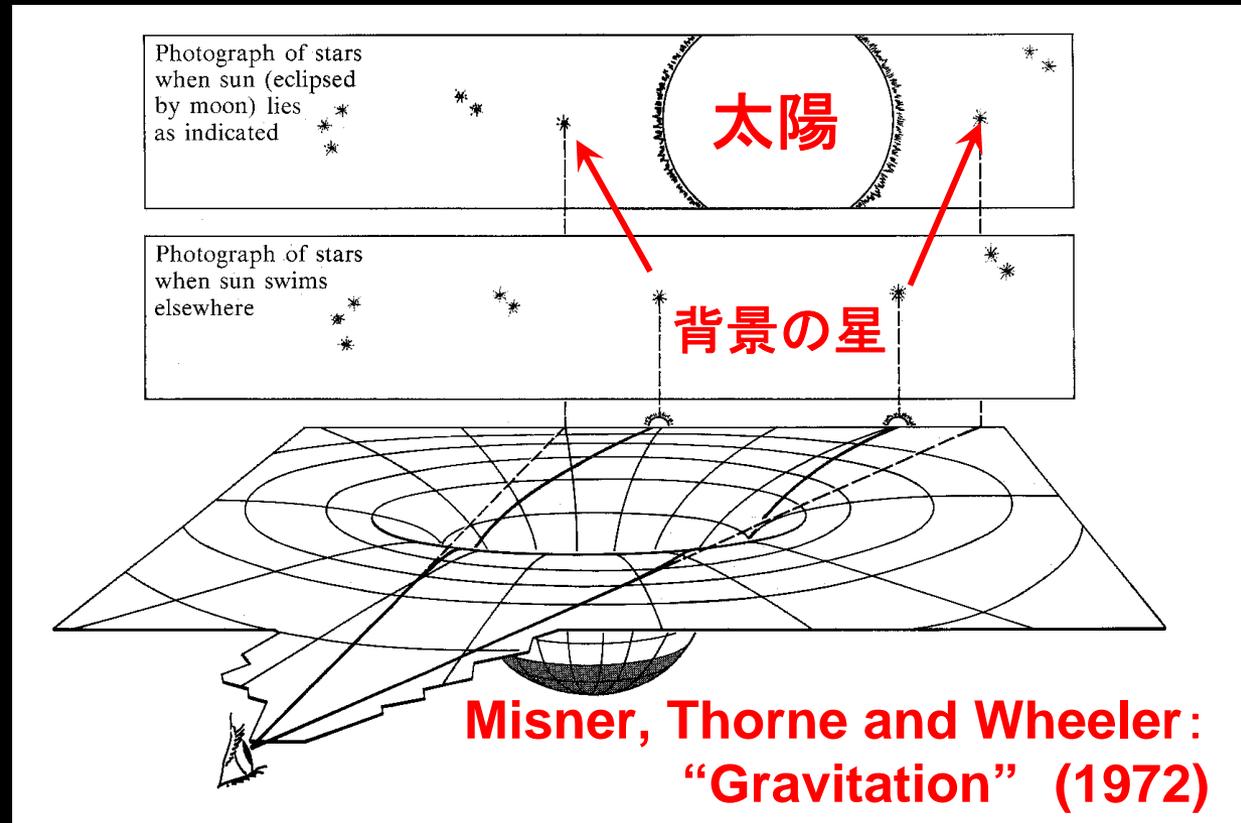
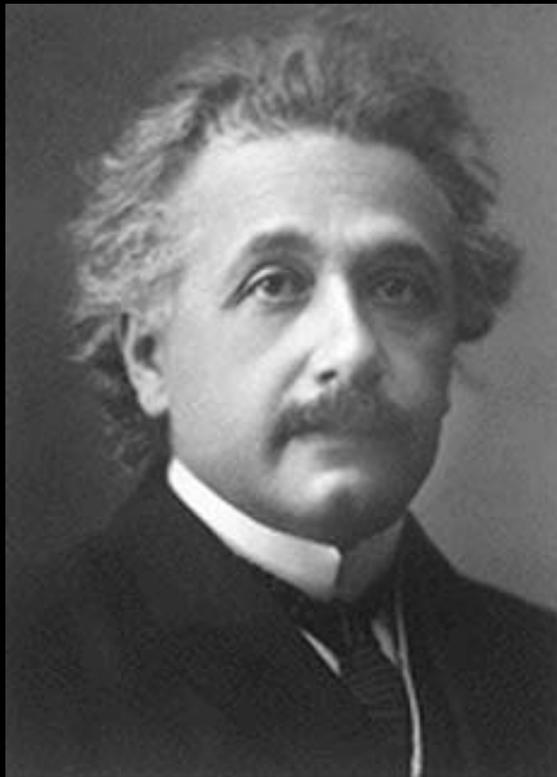
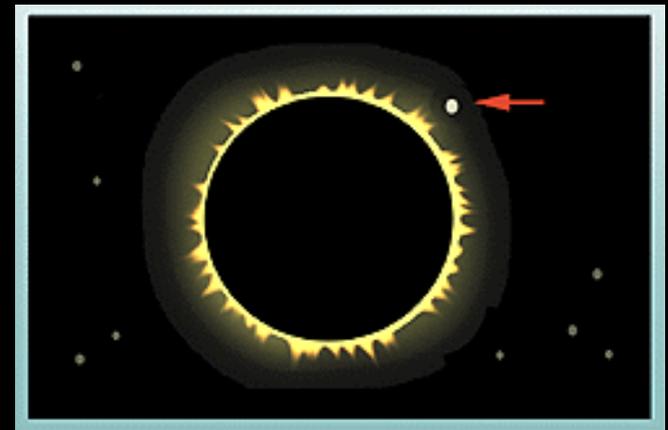
# 重力＝時空の曲がり

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

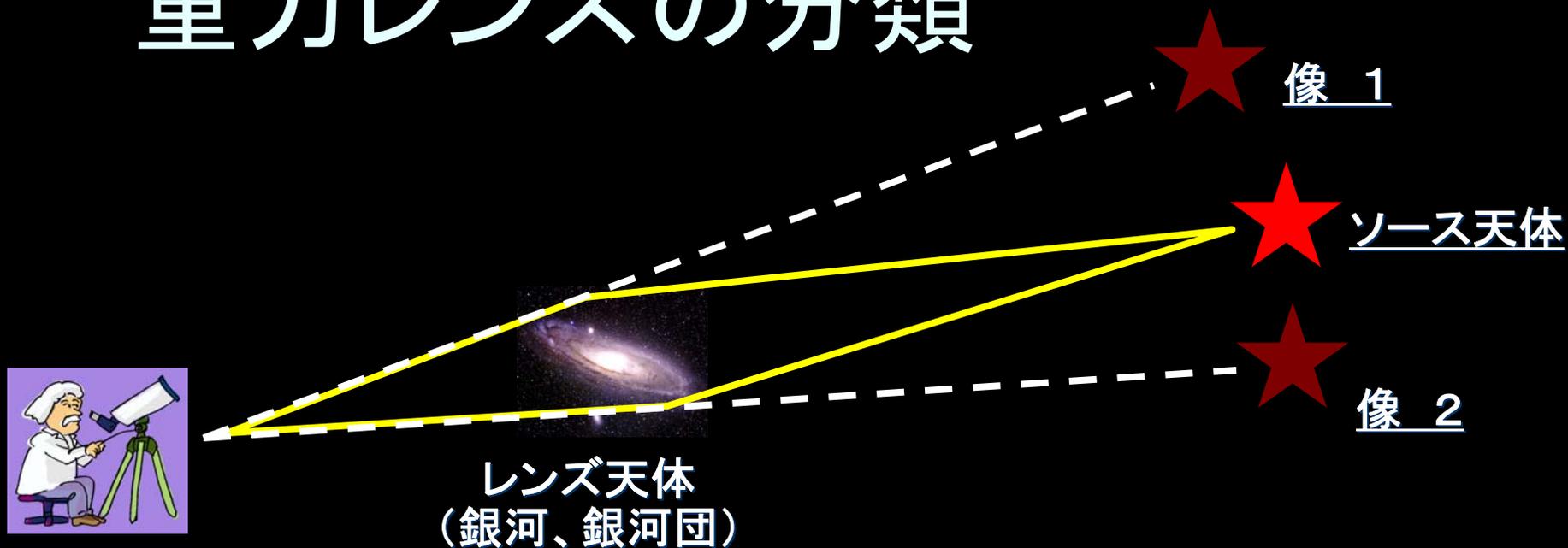
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$



# 重力による時空の 曲がり



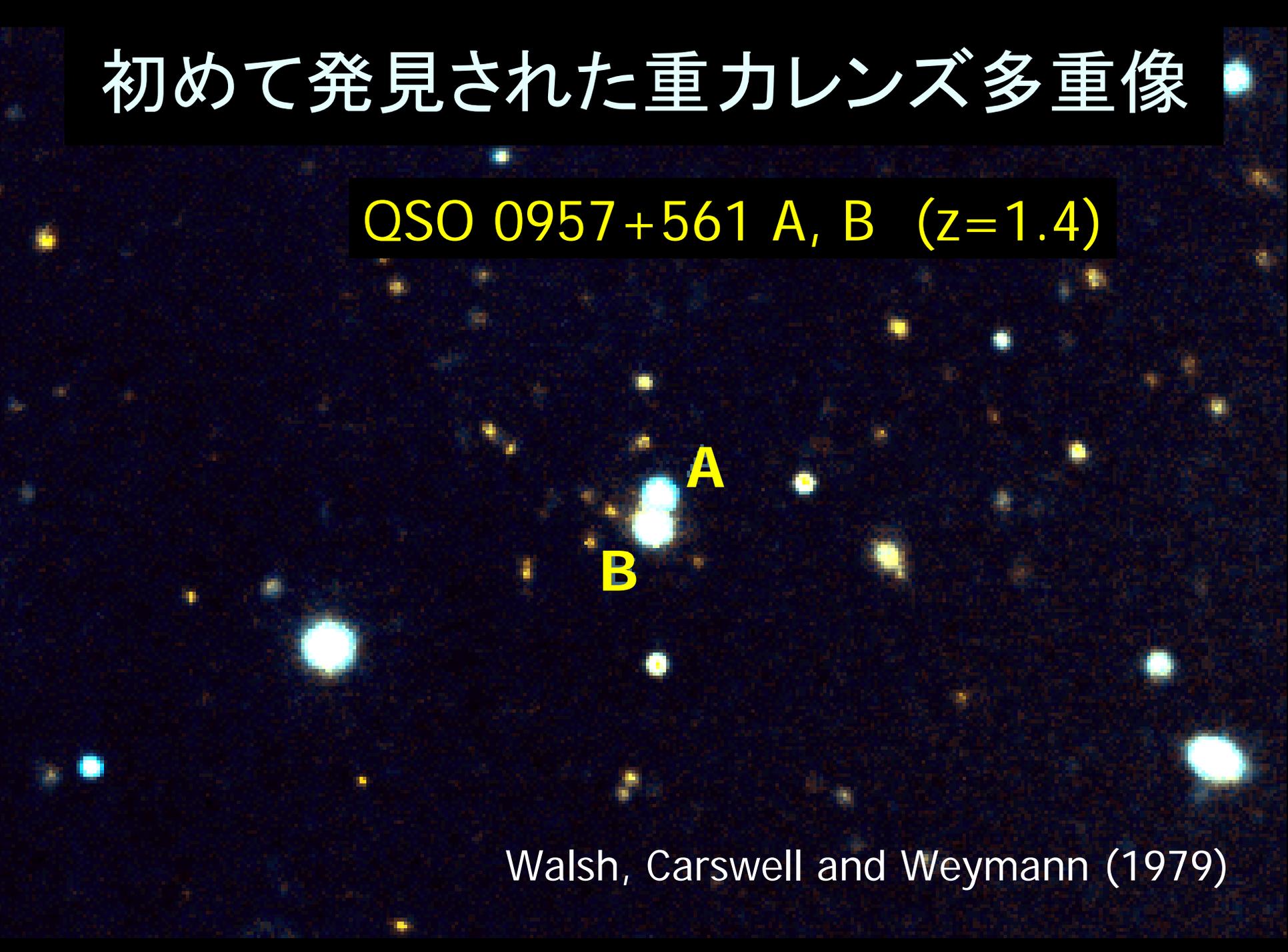
# 重力レンズの分類



- 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 ( $z=1.4$ )

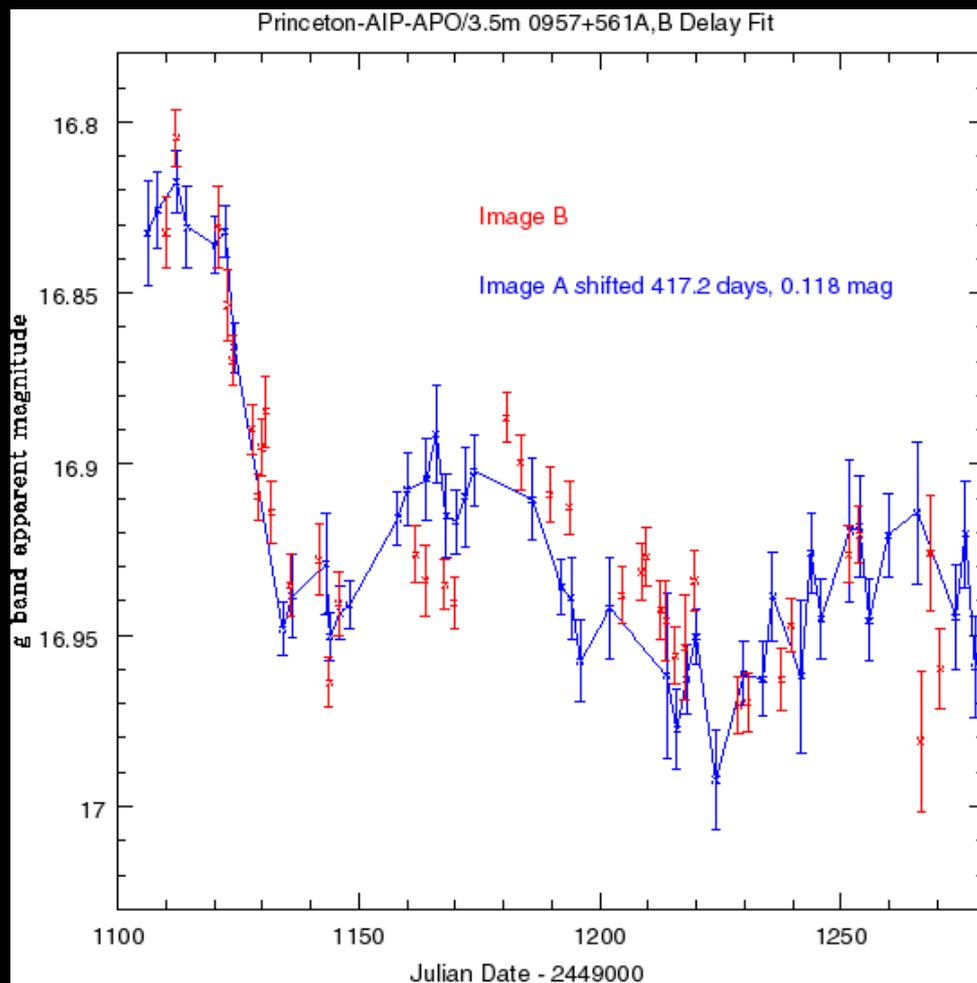
The image shows a field of stars and galaxies. Two specific points of light are highlighted with yellow labels 'A' and 'B'. Image A is located at approximately [463, 530, 510, 560] and image B is at [570, 460, 620, 490]. Both images appear as bright, slightly blurred spots of light. The background is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

A

B

Walsh, Carswell and Weymann (1979)

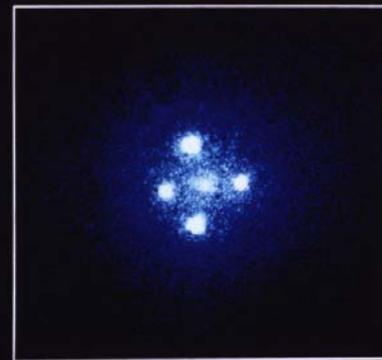
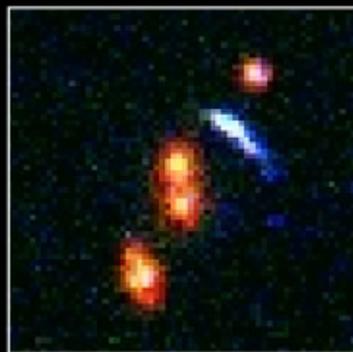
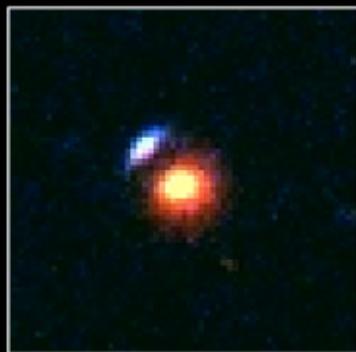
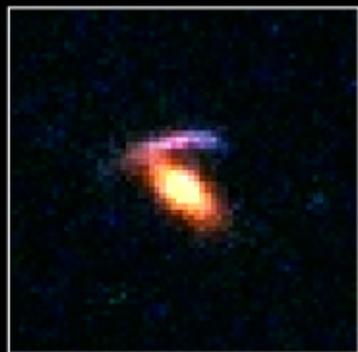
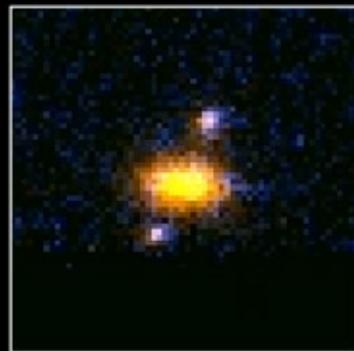
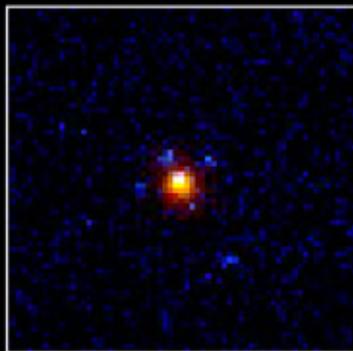
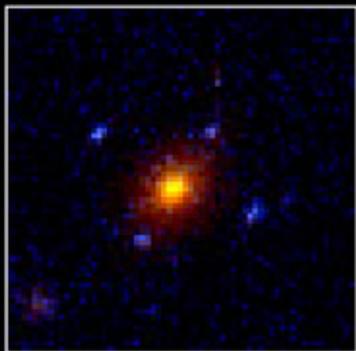
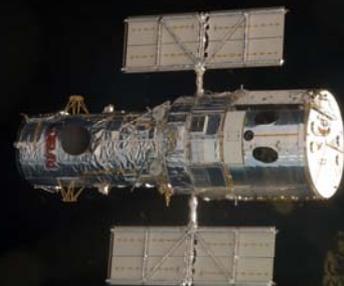
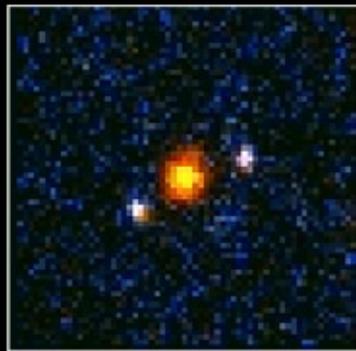
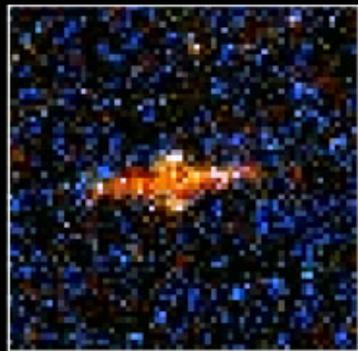
# 0957+561 A, Bの光度曲線と時間差



- 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)

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

# 重力レンズの観測例 (ハッブル望遠鏡)



Gallery of Gravitational Lenses

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

HST •

Gravitational Lens G2237+0305

# 100億光年先からの一般相対論的蟹気楼 (SDSS J1004+4112)



2003年に東京大学の稲田直久と大栗真宗がSDSSで発見、すばるで確認  
Inada et al. Nature 426(2003)810

銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、  
みかけ上5つの異なる天体をつくる  
(ダークマターの存在)

98億光年先にある  
クエーサー(中心に  
ブラックホール)

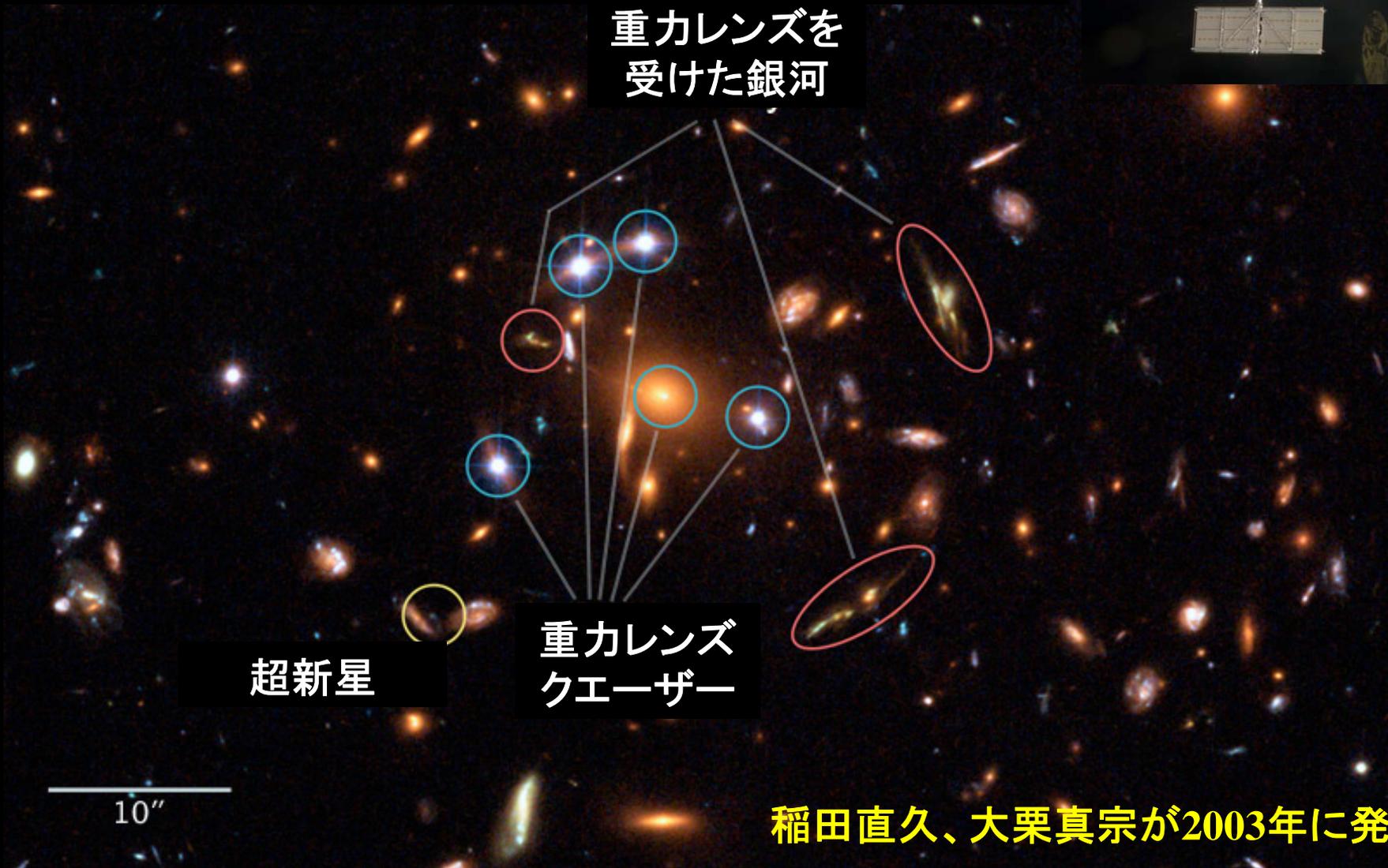
62億光年先にある  
銀河団まわりの  
ダークマター



重レンズ天体  
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 SDSS J1004+4112



重カレンズを  
受けた銀河

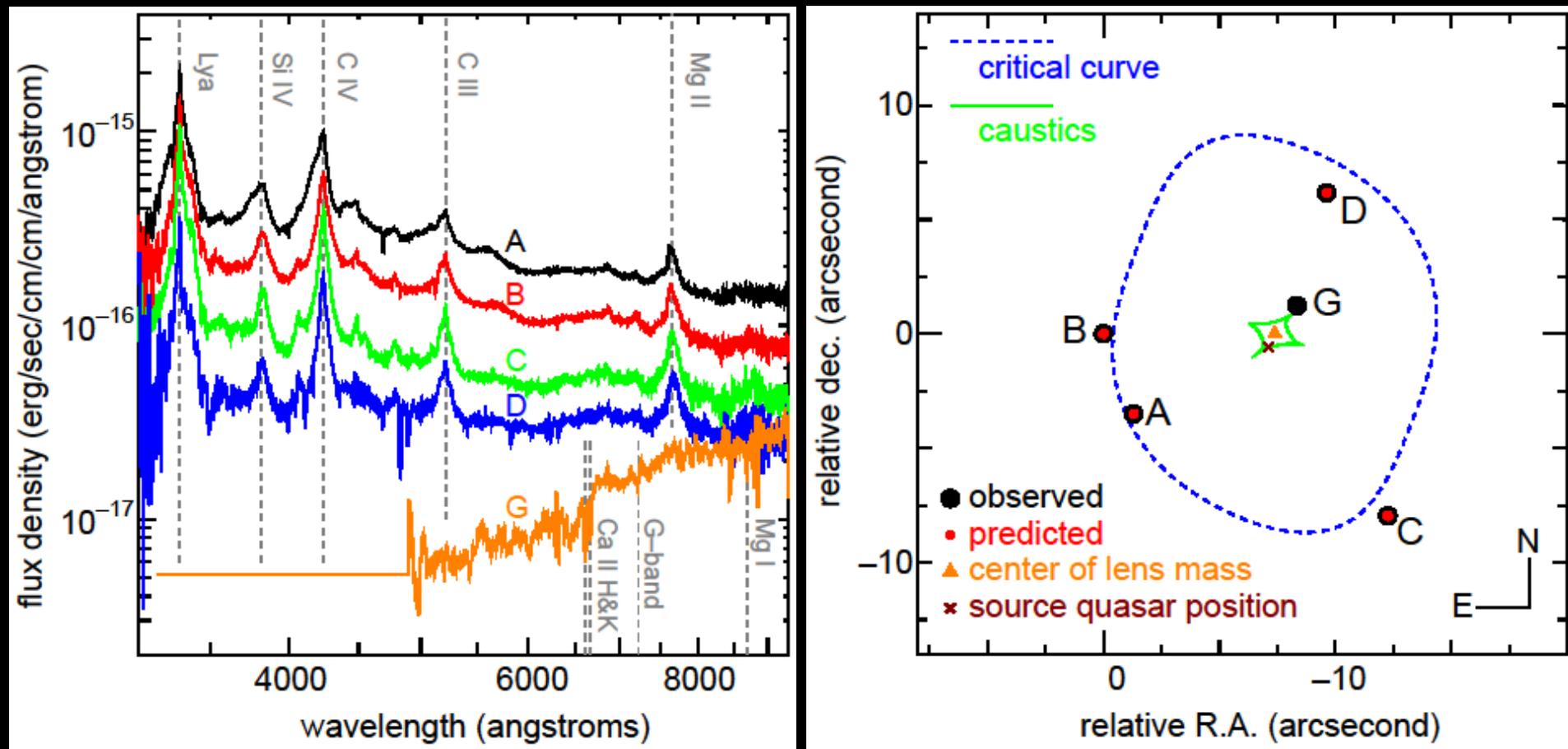
重カレンズ  
クエーザー

超新星

10''

稲田直久、大栗真宗が2003年に発見

# SDSSJ1004: スペクトルとレンズモデル

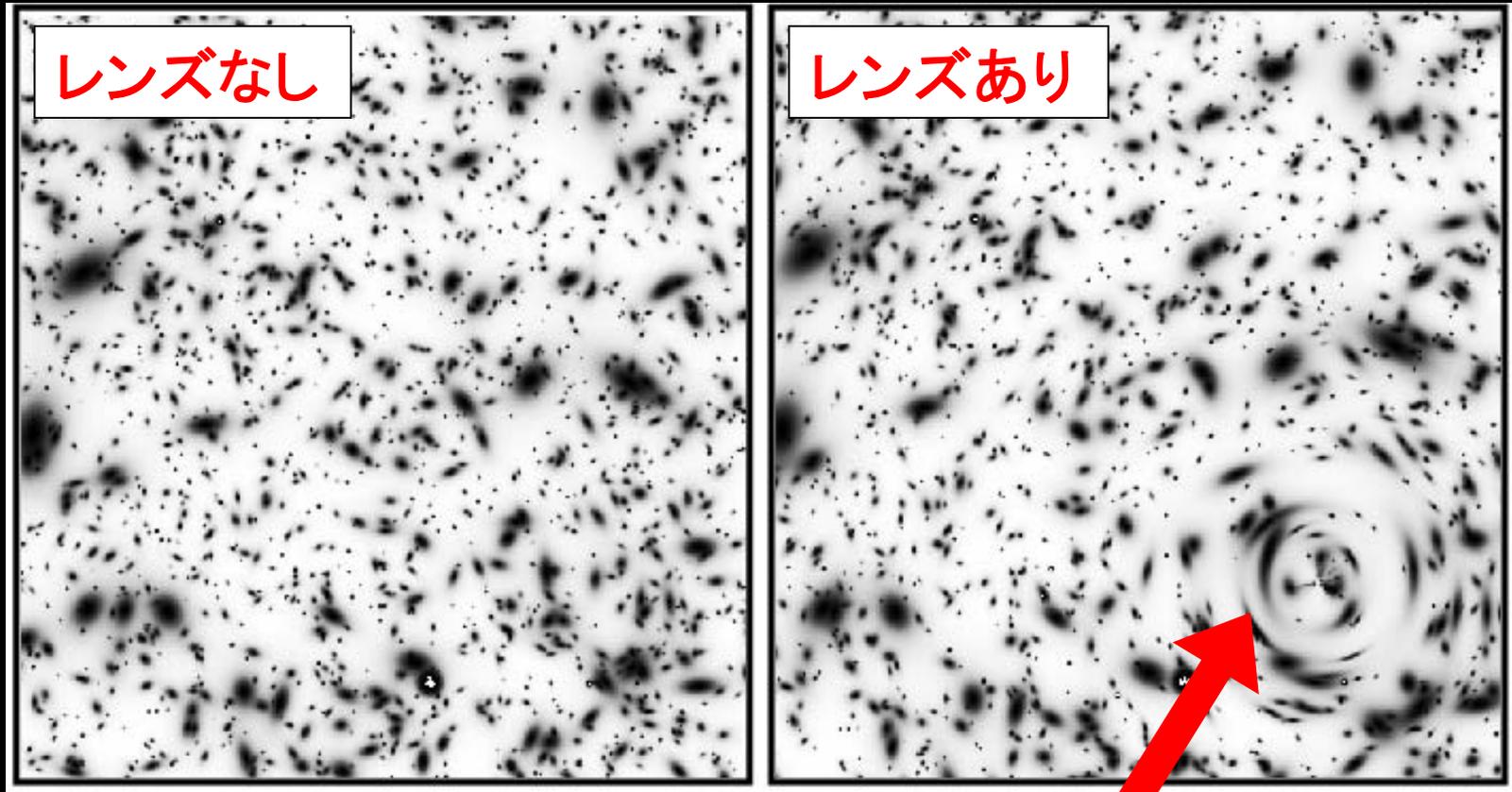


Inada et al. Nature 426 (2003) 810

夜空はダークマターで満たされていた



# 弱い重力レンズ

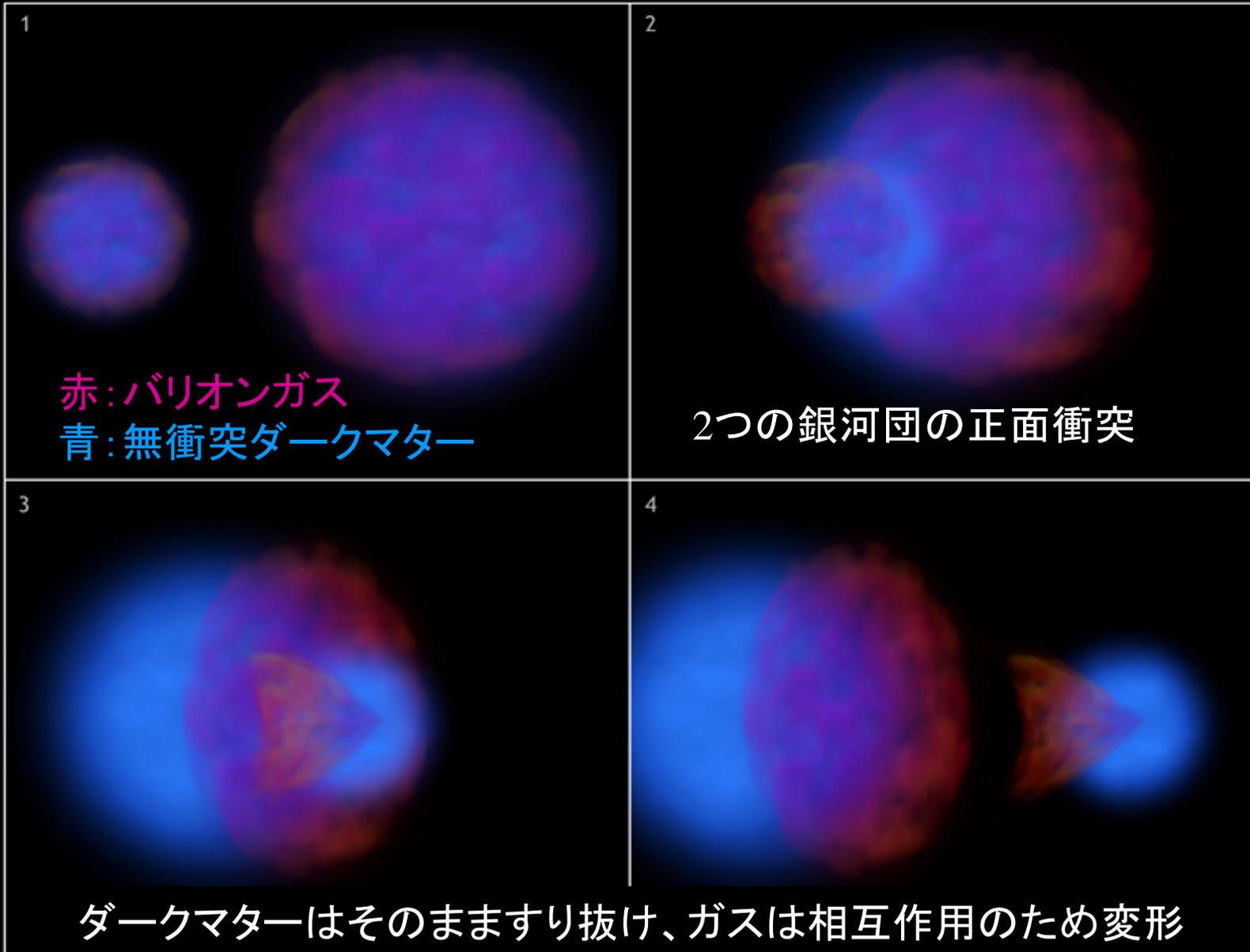


$z=0.3$ に $10^{14}$ 太陽質量の重力レンズ天体がある  
場合に予想されるイメージ

# 衝突銀河団



# ダークマター存在の証拠



# 宇宙を満たしているもの

- ダークマターは、光は出さないが互いに万有引力を及ぼすので空間的には凸凹分布
  - 銀河や銀河団はそのようなダークマターの塊の中心部に誕生
- ダークマターの存在は、光っているものだけが世界のすべてではないことを教えてくれる
- では、宇宙空間を完全に一様に満たすような成分(ダークエネルギー)は存在しないのか？
  - そもそもそのようなものがあっても観測できるのか？

宇宙を満たしていながら  
見えないものの  
本当の主役

ダークエネルギー

# ダークエネルギー

- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たしているものは存在するか
  - 仮にあるとしてもそのようなものは観測可能か
  - 「真空」には本当に何も無いのか
  - 相対的でない測定はあり得るか
- ダークエネルギーは、空間的には一様分布していてもその密度は時々刻々変化する
  - 宇宙膨張は宇宙の密度の絶対的な値（何かとの差ではなく）によって決まる
  - 宇宙膨張の時間依存性を測定する
  - 時間軸に沿った相対的な測定は可能

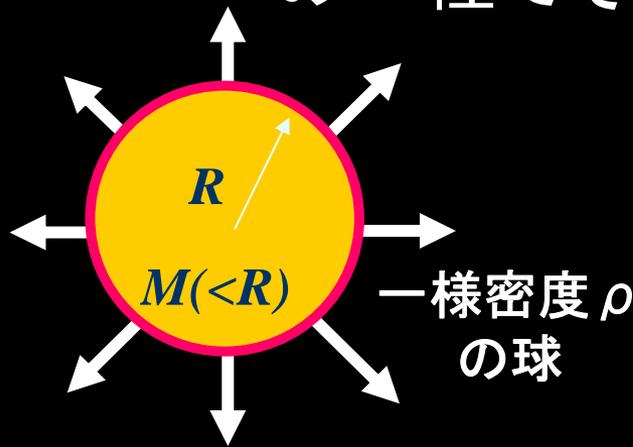
# 宇宙膨張の方程式

## ■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(< R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left( \frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

## ■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度  $\rho$  のみならず圧力  $p$  もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」( $\Lambda$ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

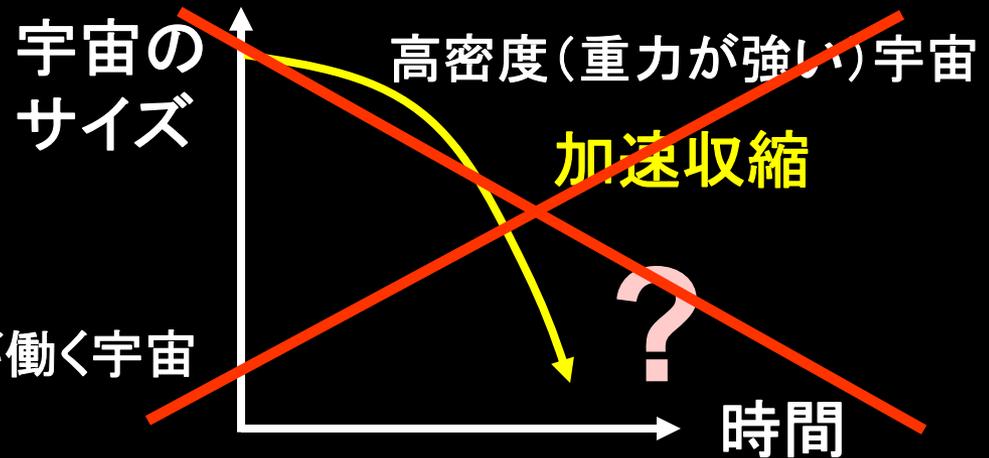
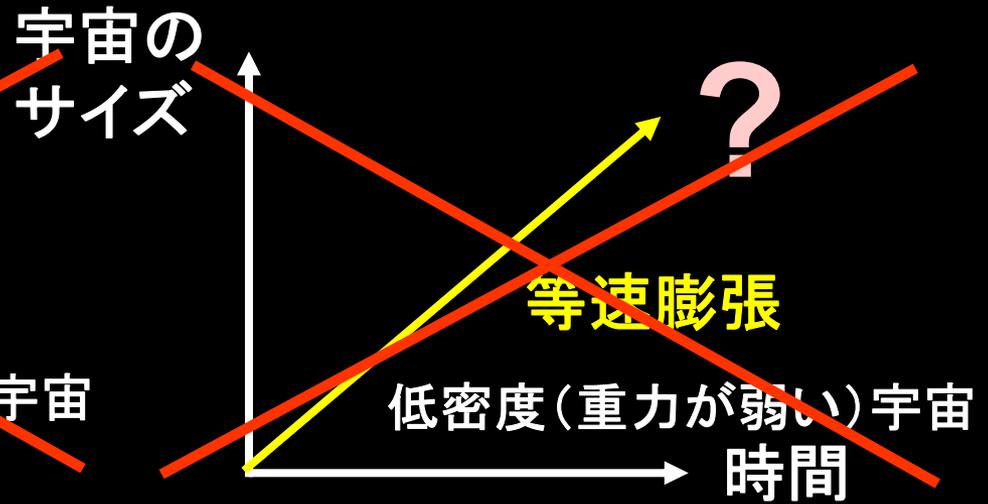
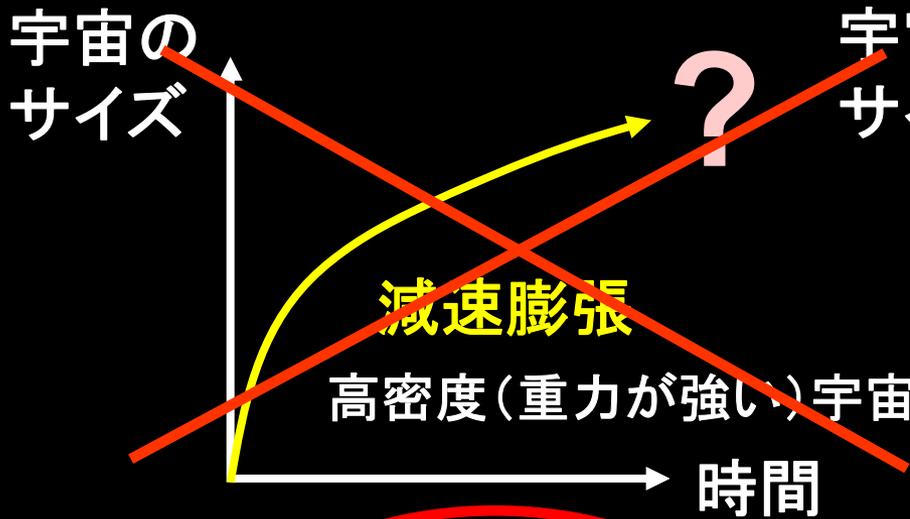


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

# 宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙膨張の進化の観測を通じて、宇宙を一様に満たしている成分の存在が検出できる



# 超新星： 星の進化の最終段階での爆発



かに星雲

1054年に起こったⅡ型超新星爆発の残骸

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/2005/37/image/b/>

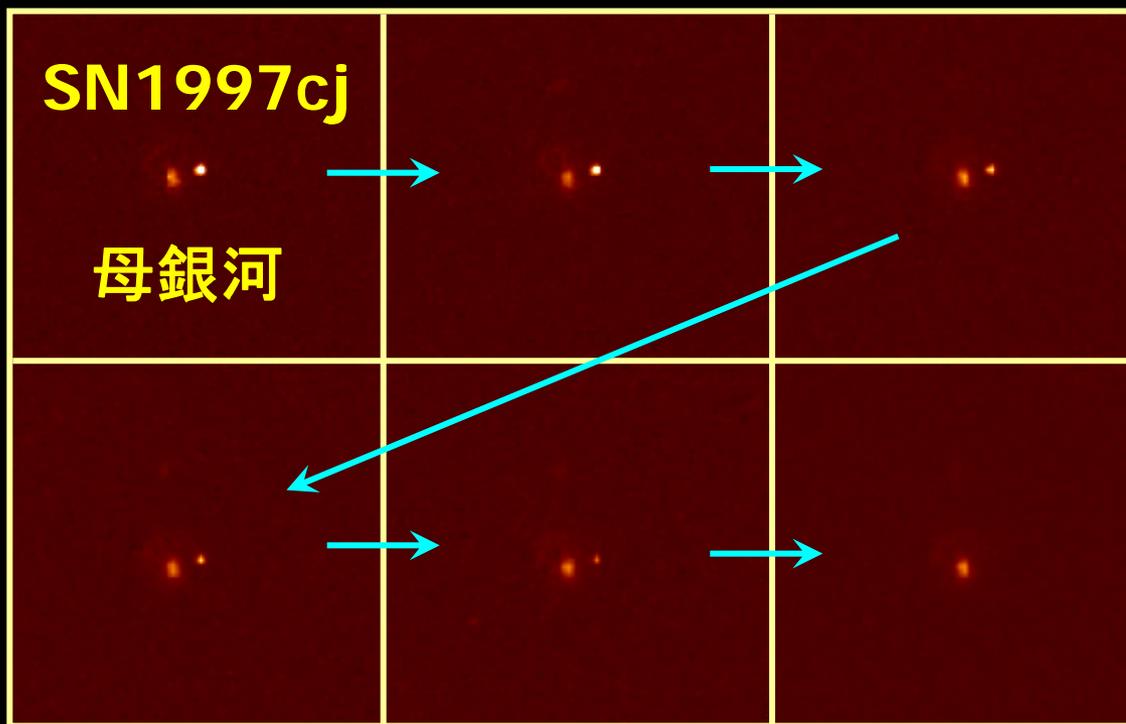
# Ia型超新星

- 白色矮星と、核燃料を使い尽くしつつある星とからなる**連星系**の**進化の最終段階**
- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ
  - 白色矮星(電子の縮退圧で自己重力を支える)には、安定に存在できる最大質量がある
  - チャンドラセカル質量(約1.4太陽質量)
  - これを越えると不安定となり爆発を起こす

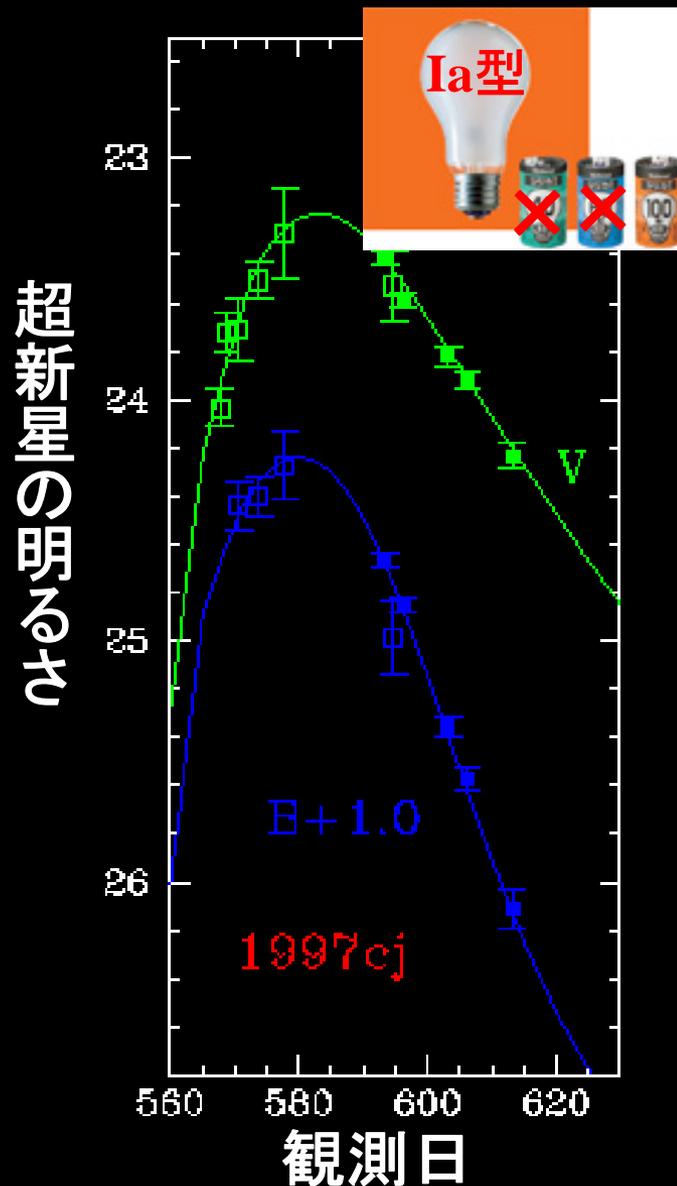


# Ia型超新星の光度曲線の測定

- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



ハッブル宇宙望遠鏡による観測

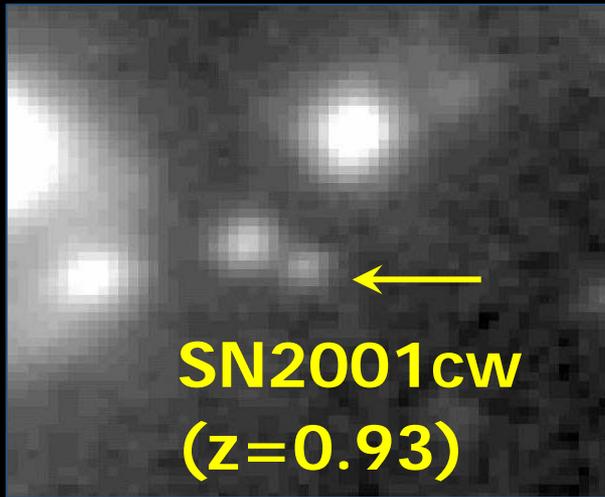


# 標準光源: Ia型超新星

見かけの明るさ:  $F$

真の明るさ:  $L$

Ia型超新星



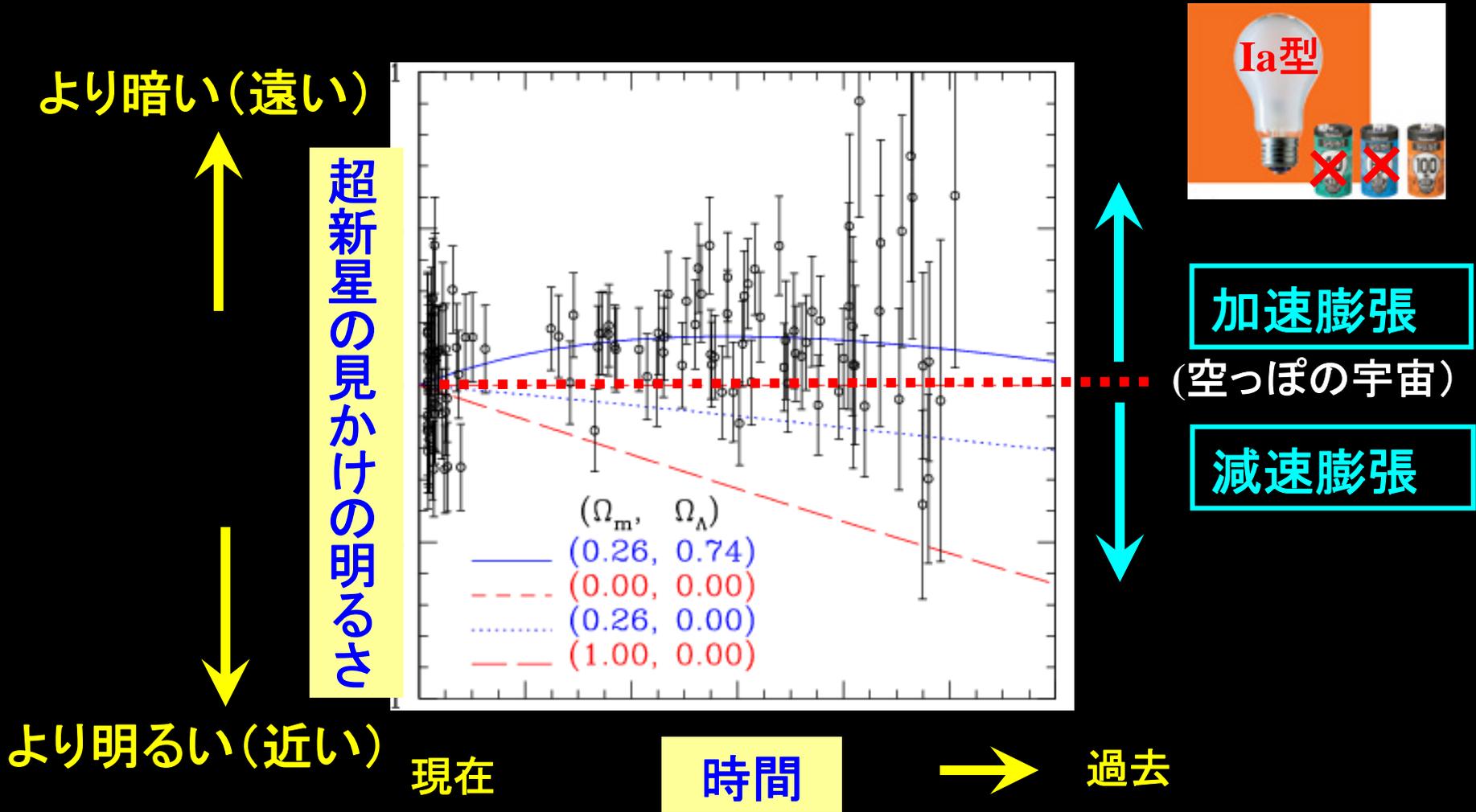
距離:  $D$

超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



# 超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 宇宙は加速膨張をしていた！(1998年)

# 宇宙の加速膨張とダークエネルギー

## ■ 宇宙の将来はどうか？

- 宇宙は膨張している（ハッブルの法則、1929年）
- さらに膨張の加速度の符号を決める必要

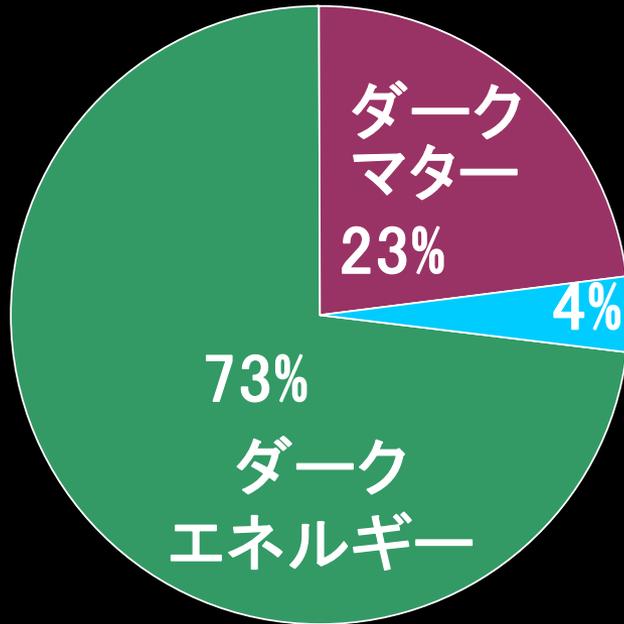
## ■ 重力は常に引力なので当然減速するはず？

## ■ 超新星は宇宙が加速膨張していることを示した

- 引力である重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な結果
- にもかかわらず観測的に証明されてしまった
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体（ダークエネルギー）??

# 宇宙は何からできている？

## 宇宙の組成



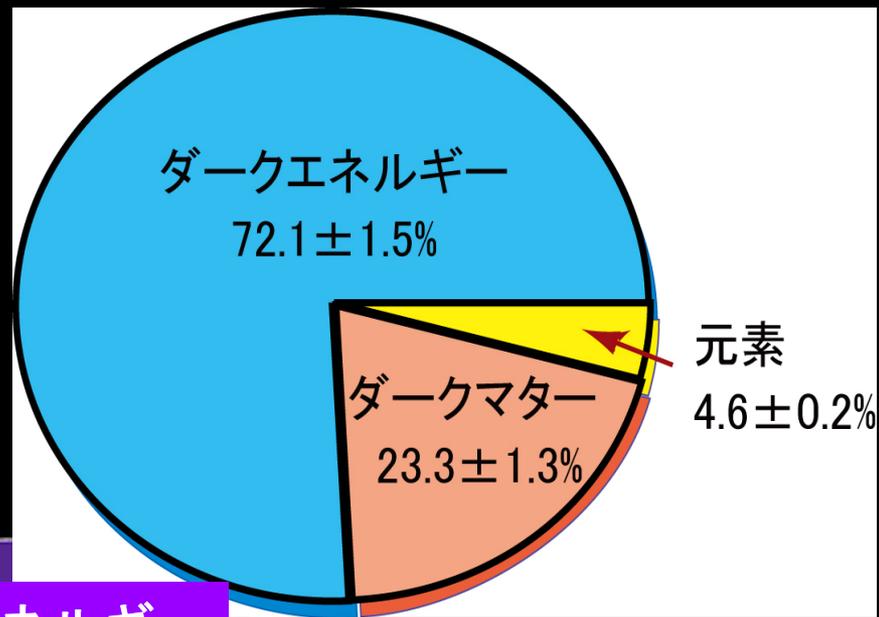
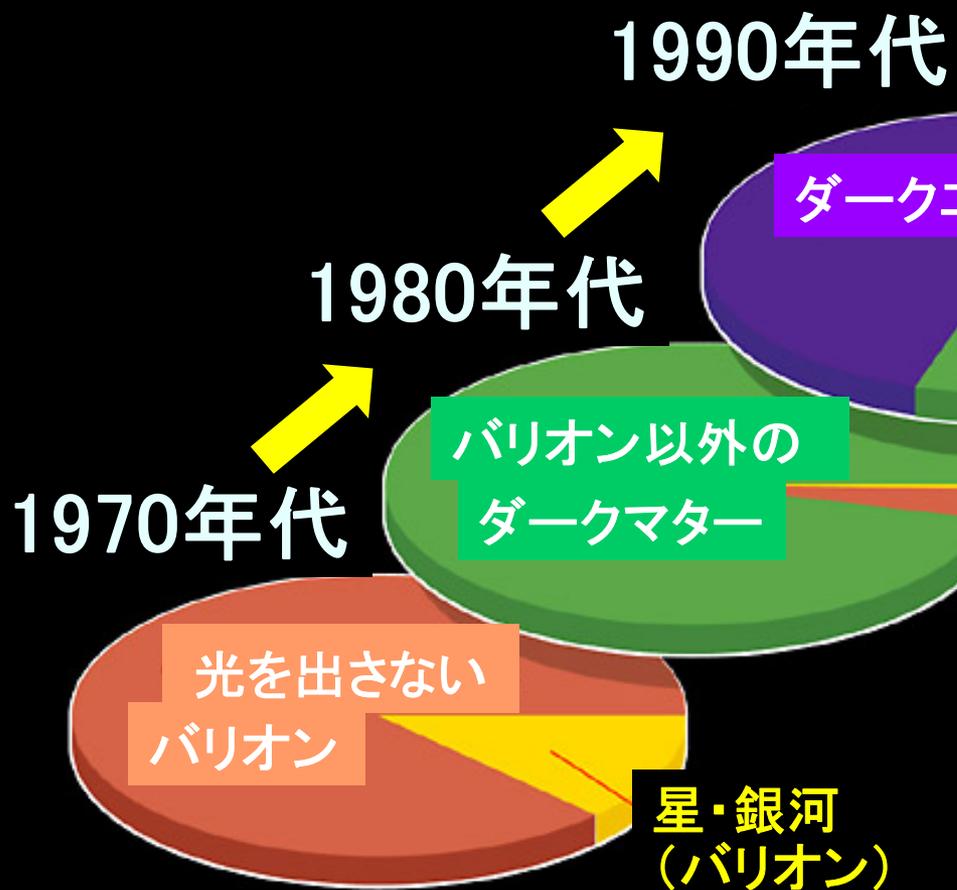
- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量
- 未知の素粒子が正体？

## 通常物質(元素)

- 現時点で知られている物質は実質的にはすべて元素(陽子と中性子)からなる

- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？
- 宇宙空間を一様に満たしている
- ダークマターとは異なり空間的に局在しないが、宇宙の主成分

# 宇宙の組成観 の変遷

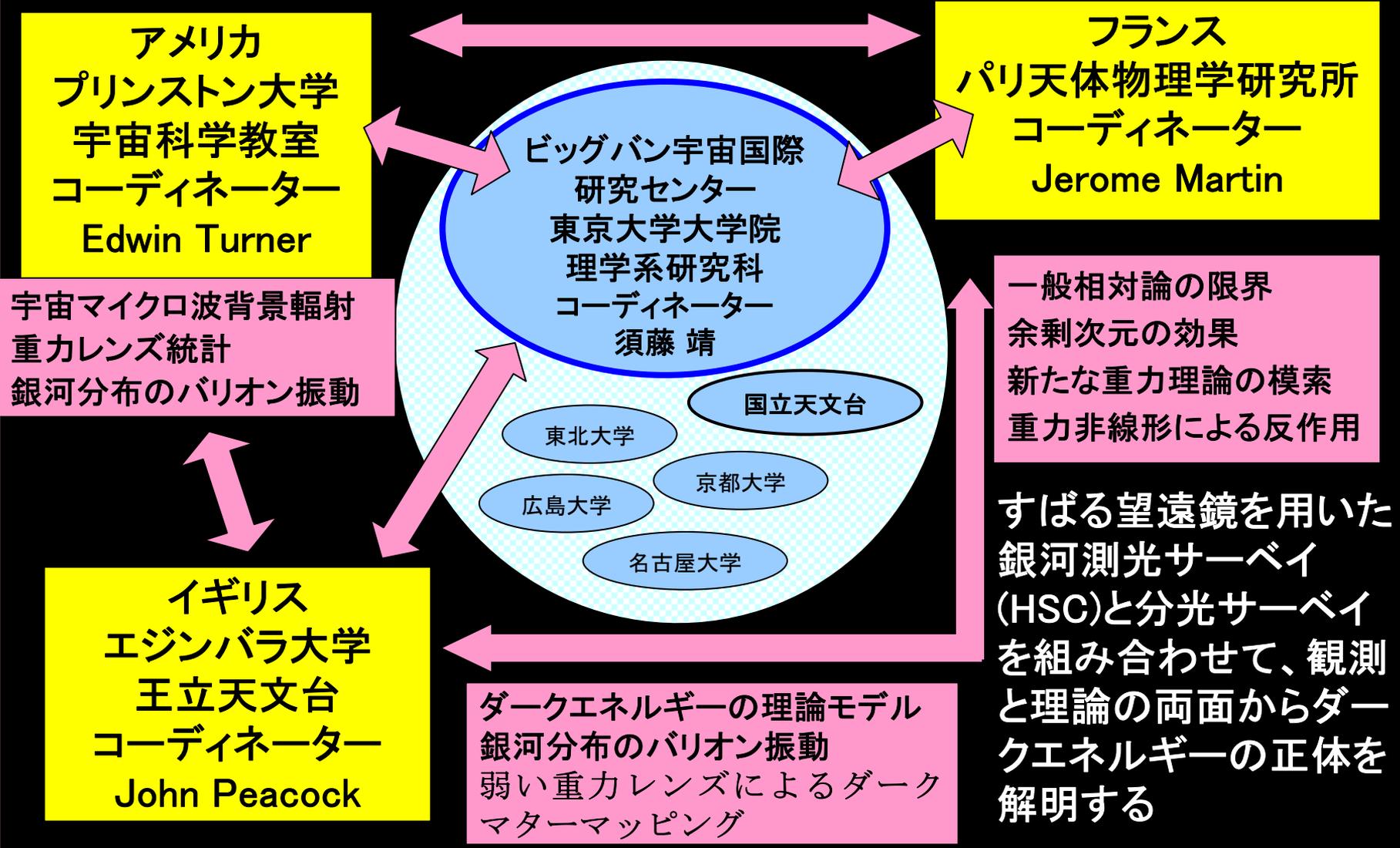


21世紀初頭

- **重力レンズ**:ダークマター
- **超新星**:ダークエネルギー
- **マイクロ波背景輻射**:  
ダークマター、ダークエネルギー

# ダークエネルギー研究国際ネットワーク

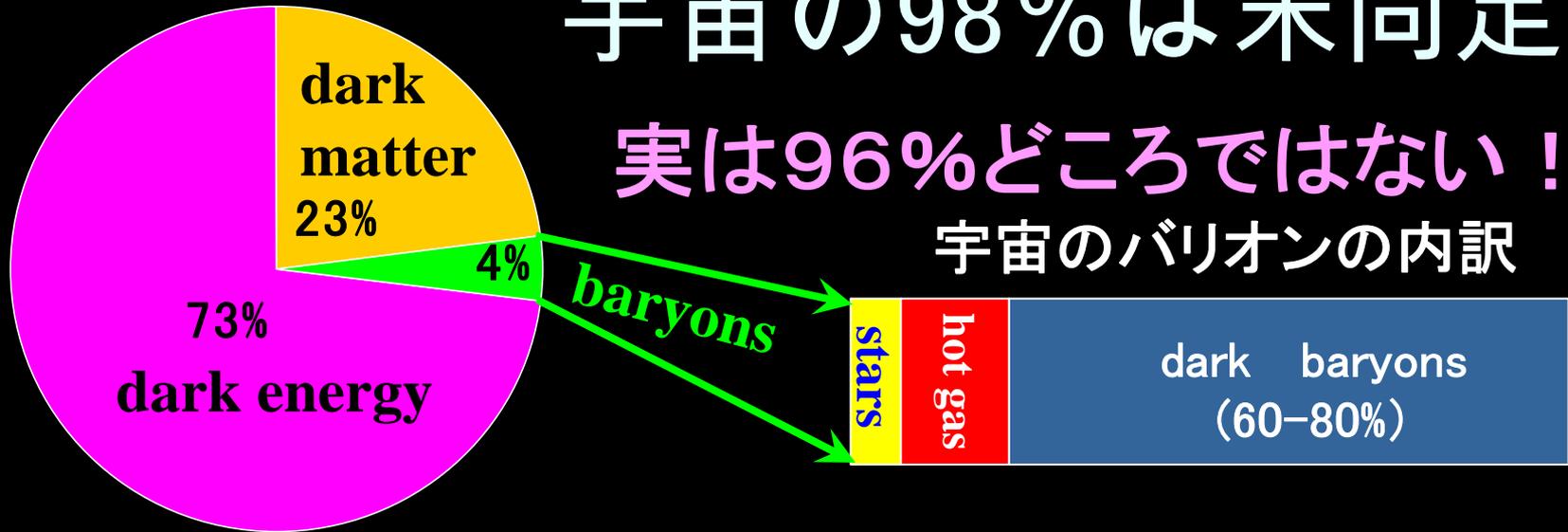
日本学術振興会先端拠点形成事業 2007-2011



# 宇宙の98%は未同定

実は96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



Component

Central

Maximum

Minimum

Grade<sup>a</sup>

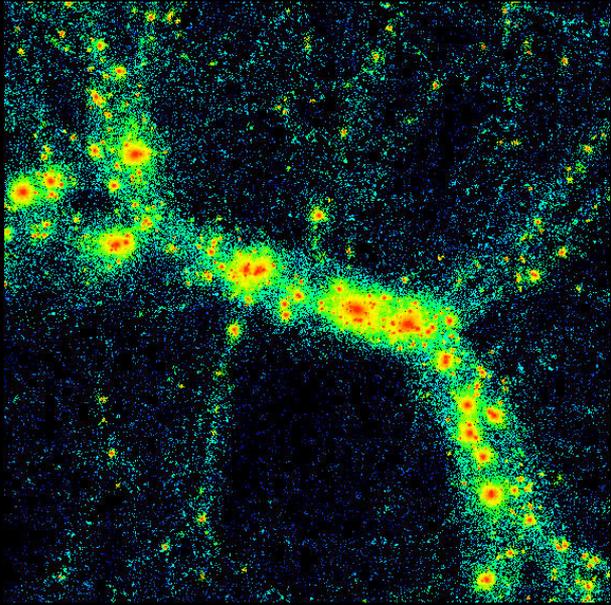
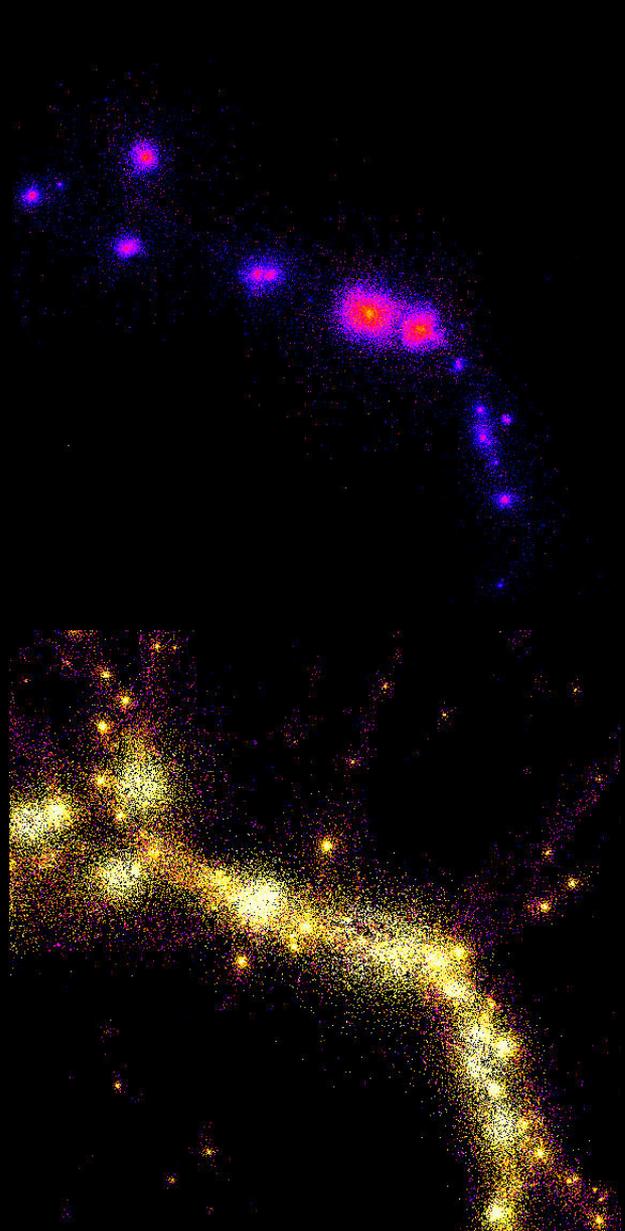
## Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518

1. Stars in spheroids .....	0.0026 $h_{70}^{-1}$	0.0043 $h_{70}^{-1}$	0.0014 $h_{70}^{-1}$	A
2. Stars in disks .....	0.00086 $h_{70}^{-1}$	0.00129 $h_{70}^{-1}$	0.00051 $h_{70}^{-1}$	A-
3. Stars in irregulars .....	0.000069 $h_{70}^{-1}$	0.000116 $h_{70}^{-1}$	0.000033 $h_{70}^{-1}$	B
4. Neutral atomic gas .....	0.00033 $h_{70}^{-1}$	0.00041 $h_{70}^{-1}$	0.00025 $h_{70}^{-1}$	A
5. Molecular gas .....	0.00030 $h_{70}^{-1}$	0.00037 $h_{70}^{-1}$	0.00023 $h_{70}^{-1}$	A-
6. Plasma in clusters .....	0.0026 $h_{70}^{-1.5}$	0.0044 $h_{70}^{-1.5}$	0.0014 $h_{70}^{-1.5}$	A
7a. Warm plasma in groups .....	0.0056 $h_{70}^{-1.5}$	0.0115 $h_{70}^{-1.5}$	0.0029 $h_{70}^{-1.5}$	B
7b. Cool plasma .....	0.002 $h_{70}^{-1}$	0.003 $h_{70}^{-1}$	0.0007 $h_{70}^{-1}$	C
7'. Plasma in groups .....	0.014 $h_{70}^{-1}$	0.030 $h_{70}^{-1}$	0.0072 $h_{70}^{-1}$	B
8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$ ).....	0.021	0.041	0.007	...

# 宇宙の物質分布 (SPH simulation)

銀河団高温ガス

ダークバリオン



ダークマター

銀河

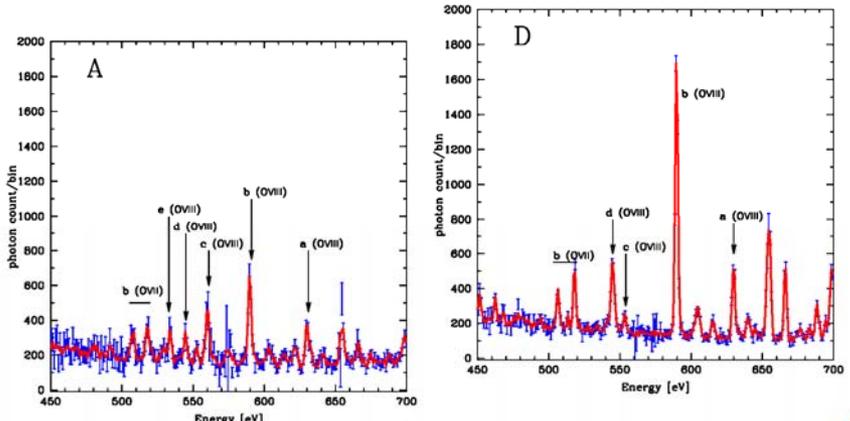


Yoshikawa et al. (2001)

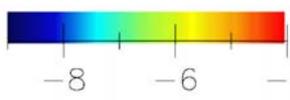
# Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)



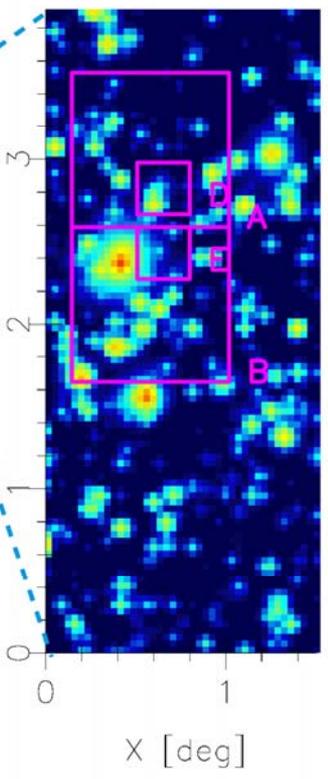
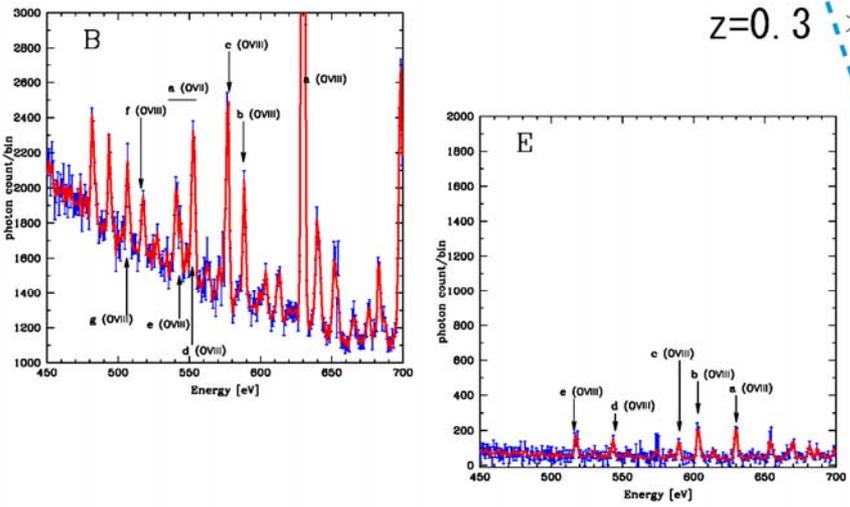
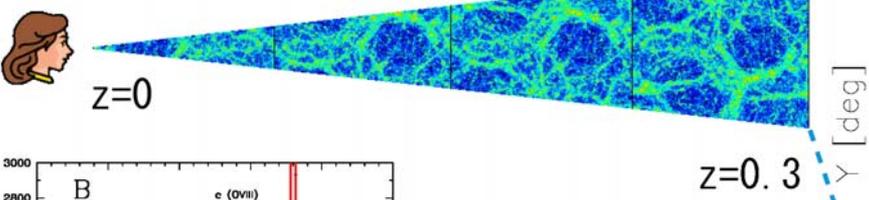
**PASJ 55 (2003) 879**  
**PASJ 56 (2004) 939**



$\text{Log } S_x \text{ [erg/s/cm}^2\text{]}$



**Mock simulations**



*Tokyo Metropolitan Univ.*  
*T. Ohashi, S.Sasaki*  
*JAXA/ISAS*  
*N. Yamasaki, K. Mitsuda*  
*Nagoya Univ.*  
*Y. Tawara*  
*Univ. of Tokyo*  
*Y. Suto, H. Kawahara*  
*Tsukuba Univ.*  
*K. Yoshikawa*  
*Kanazawa Univ.*  
*R.Fujimoto*

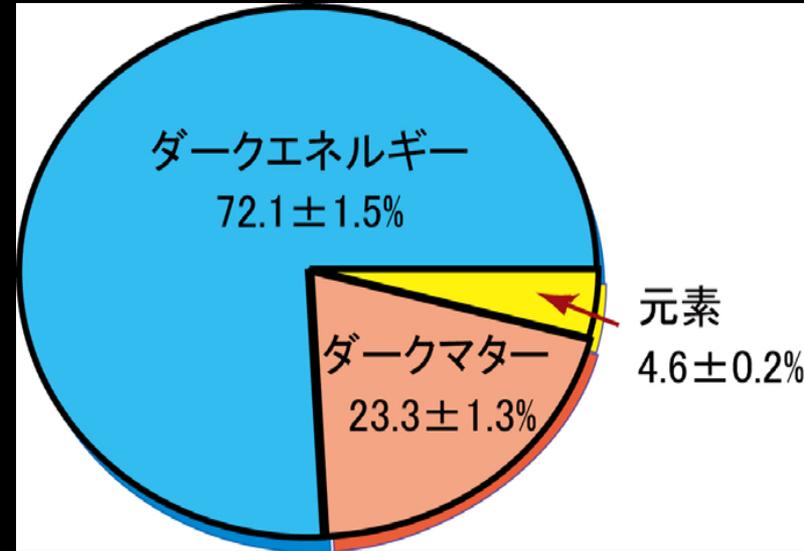
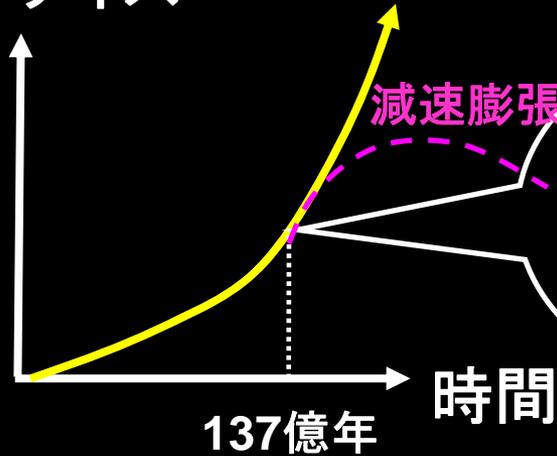
# 宇宙のダークバリオン探査の重要性

- **ダークマターやダークエネルギーの探査・研究と極めて相補的**
  - バリオンは宇宙の物質階層の中でもっとも重要な成分
  - その存在形態を突き止めるためには未知の物理学を必要としない
  - 天文・宇宙物理学を適切に組み合わせることで必ず答えが出る確実なテーマ
  - その検出手段を確定すれば新たな宇宙観測の窓を開拓することになる
- **計画の準備状況(観測可能性と科学的意義の検討、衛星の具体的仕様)において、現時点では日本が世界のトップの位置にいる**
  - 日本独自あるいは他の国も参加するスタイルで国際協力を主導できるプロジェクト

# 宇宙の~~96%~~は正体不明

宇宙の加速膨張 **98**

宇宙の  
サイズ



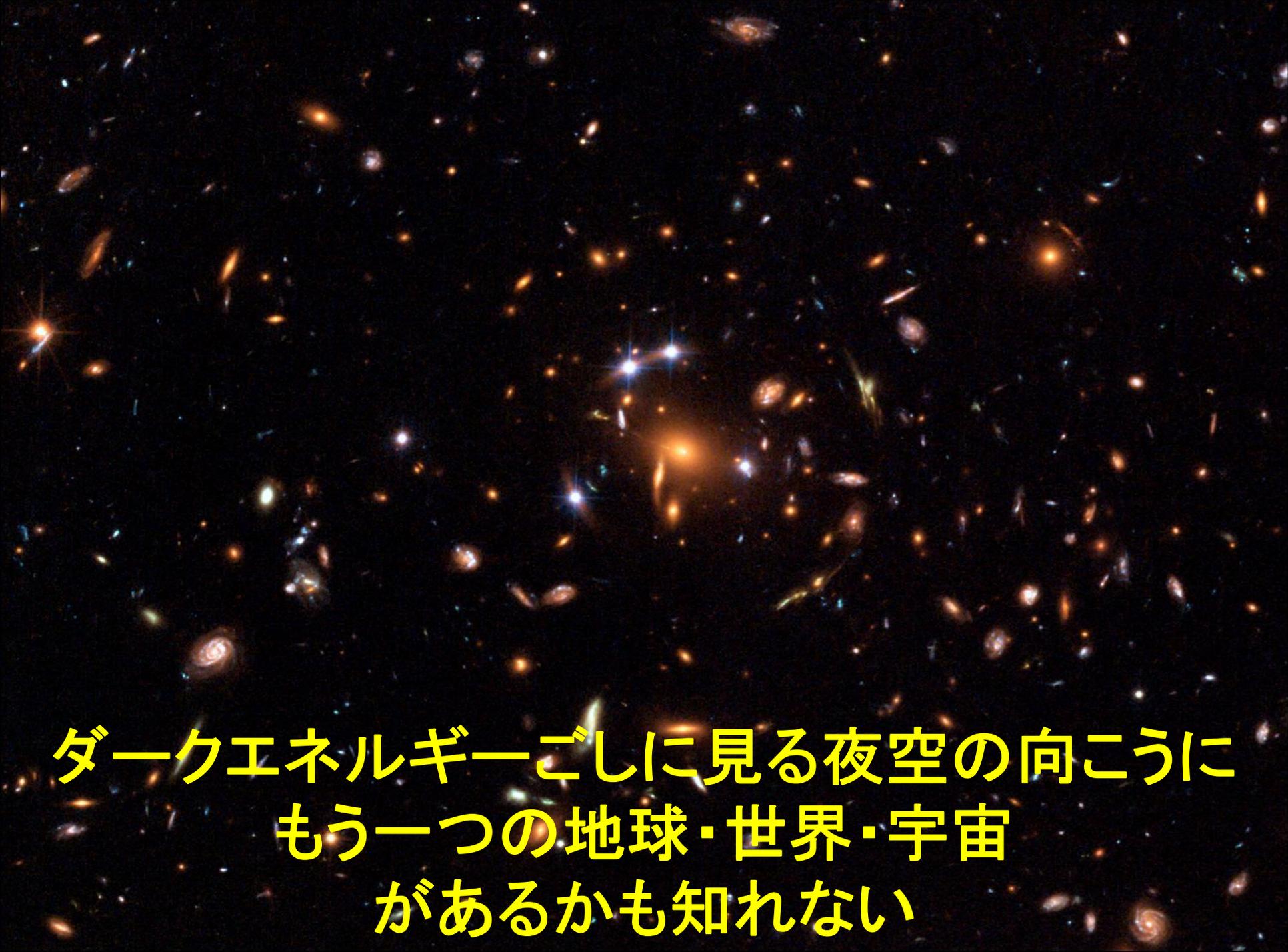
- **ダークエネルギーの正体は何か?**
  - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
    - アインシュタインの宇宙定数 (1917年)?
    - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
  - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- **いずれであろうと21世紀の科学を切り拓く鍵**

この青空の向こうには  
無数の星々  
がきらめいている



この銀河宇宙には  
ダークマターとダークエネルギー  
が満ちている





ダークエネルギーごしに見る夜空の向こうに  
もう一つの地球・世界・宇宙  
があるかも知れない