見えない宇宙の彼方を探る
～ダークマター・ダークエネルギー～

東京大学　大学院理学系研究科
物理学専攻　須藤　靖

現代天文学の最前線
「シリーズ現代の天文学」刊行記念シンポジウム
2009年12月20日＠東京大学小柴ホール

青空しか知らないとこの世界だけが
唯一の存在のように思ってしまう

（すばる観測所、田中壱氏撮影）

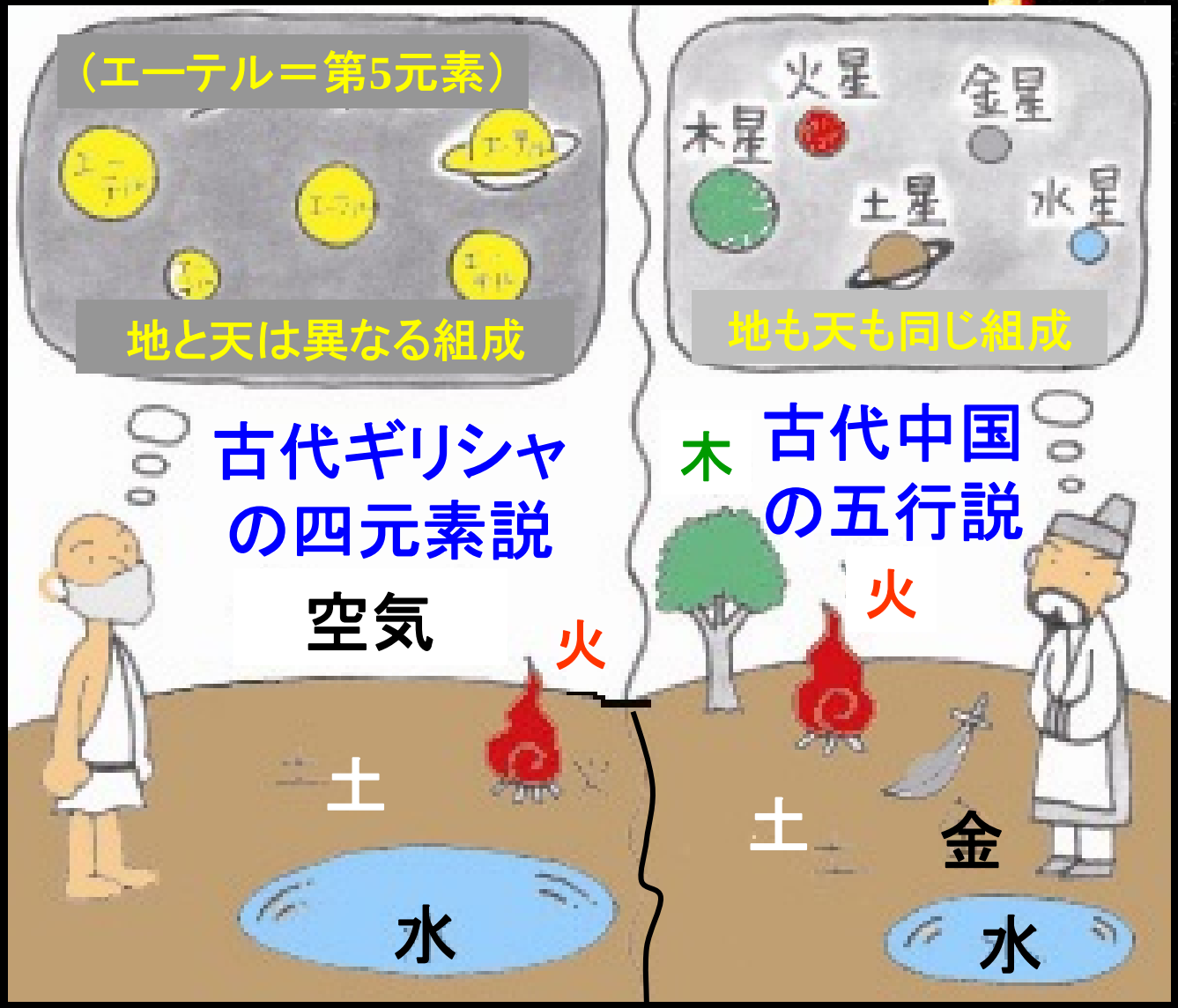
アイザック・アシモフ著 「夜来る」

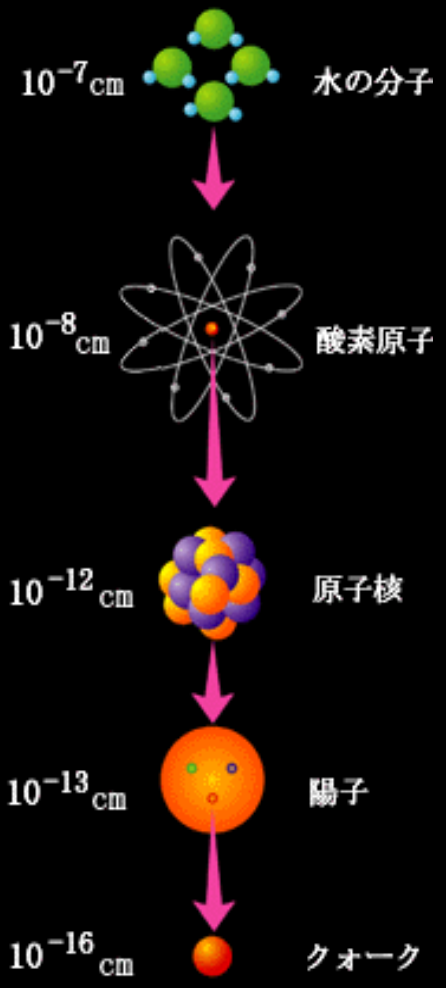
イラスト： 羽馬有紗

- 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？

「我々は何も知らなかった」
満天の星空を見上げれば、
我々以外の世界がないほうが不自然
（すばる観測所、田中壱氏撮影）

自然界に思いをはせる

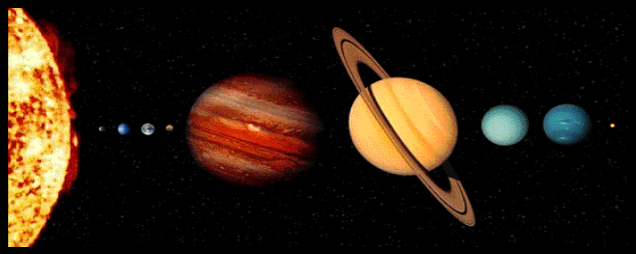




（いずもり よう:須藤靖「ものの大きさ」図1.1より）

ギリシャ、中国、現代物理学

- 古代ギリシャの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）



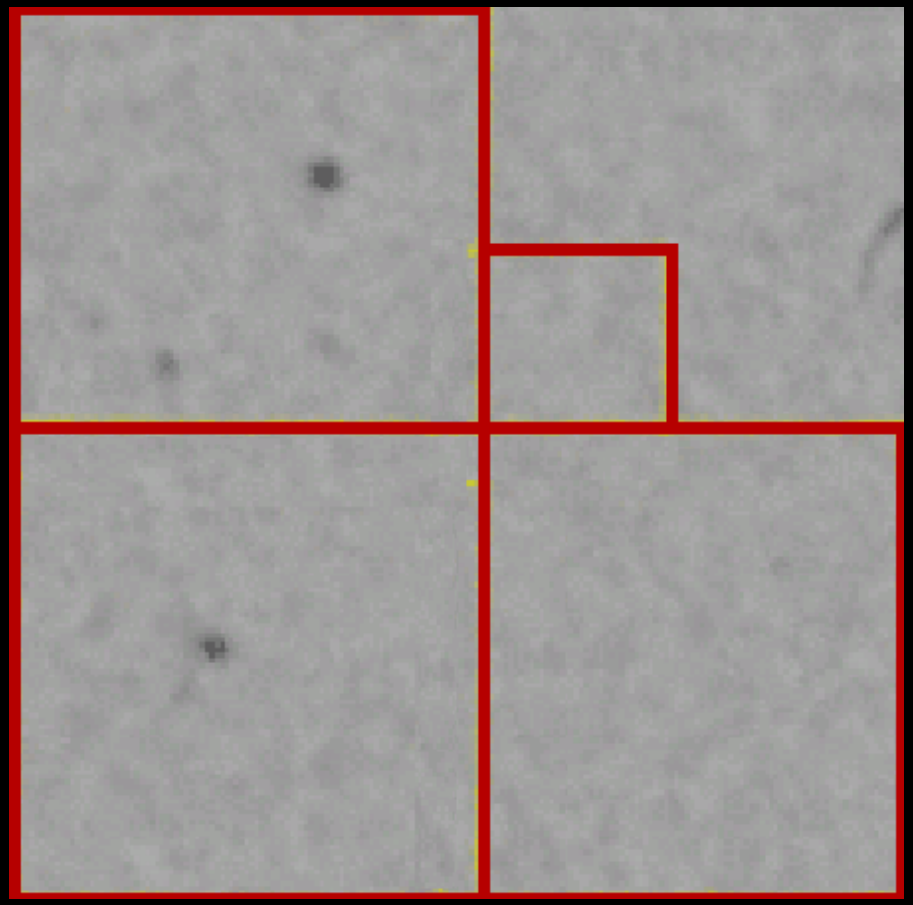
日月火水木金土

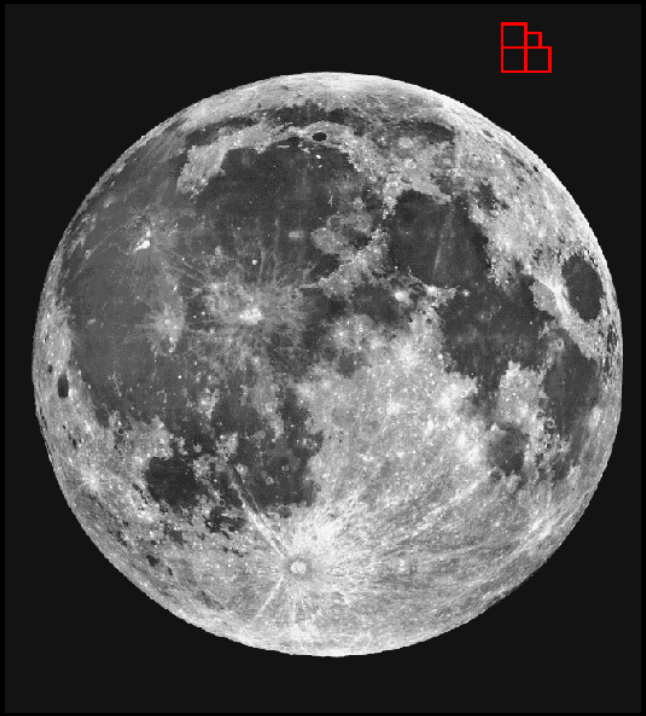
	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

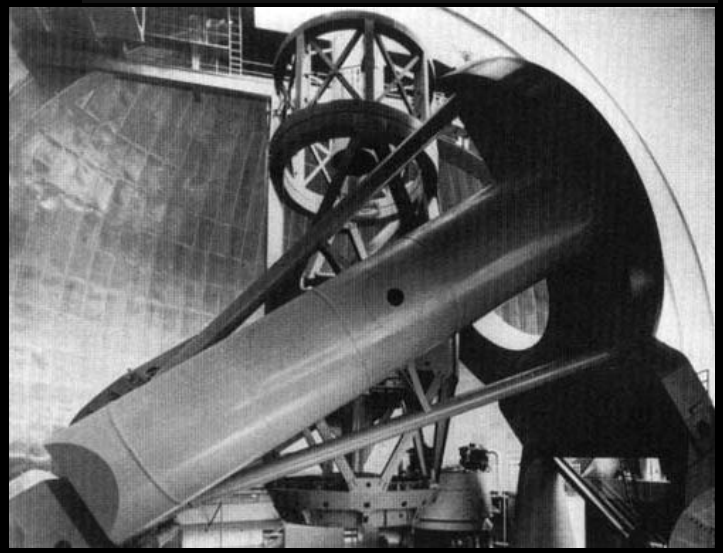
我々の世界をもっとよく知りたい

- 微視的世界：物質は何からできているのだろう？
  - 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？
  - 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
  - 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)

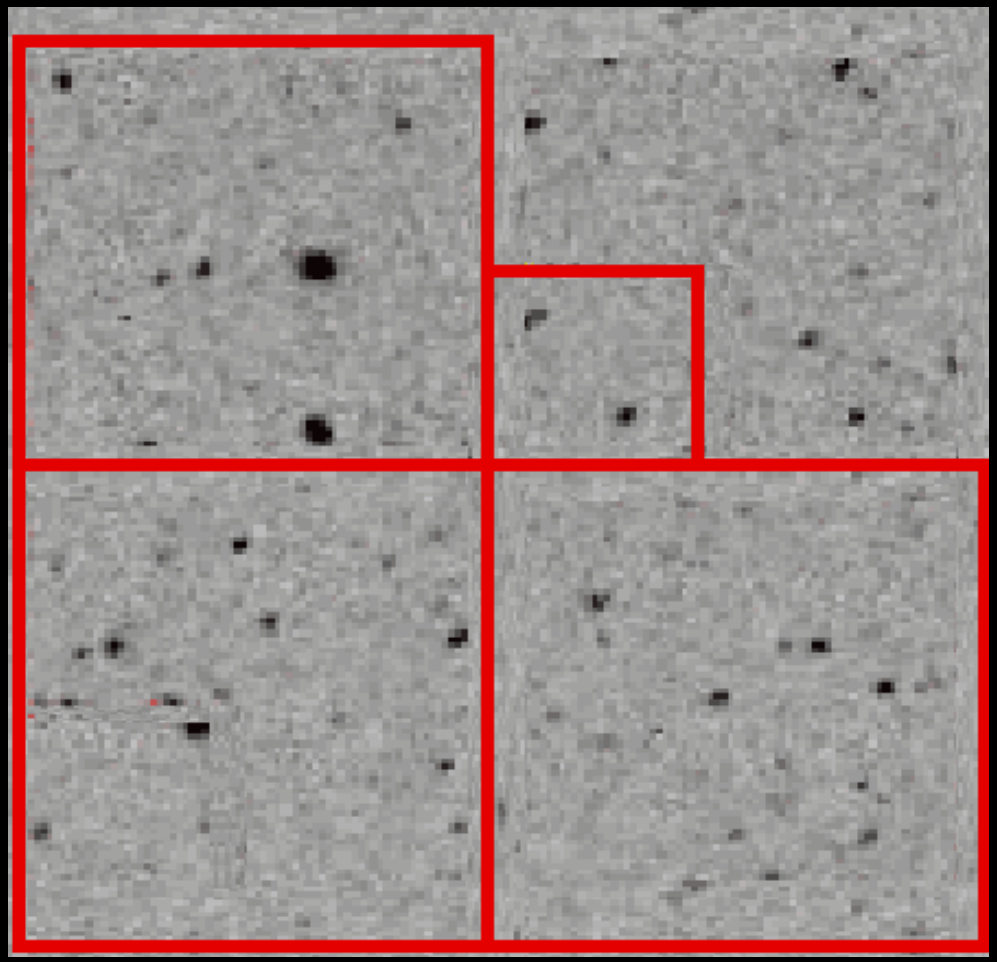


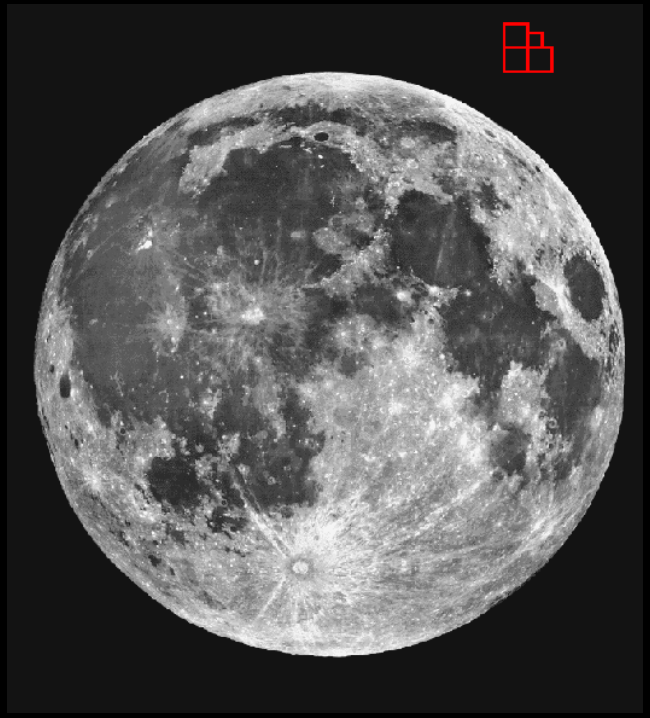




地上5m望遠鏡＋写真乾板
100万×人間の眼

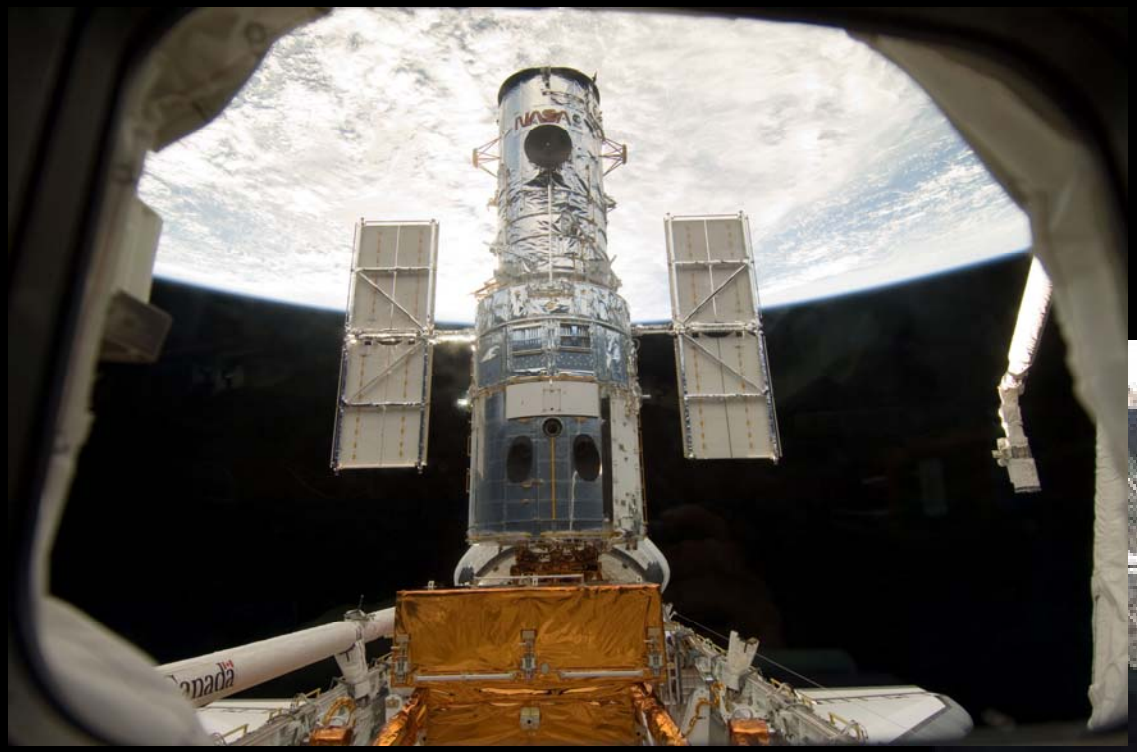
宇宙を見る目の進歩 (2)

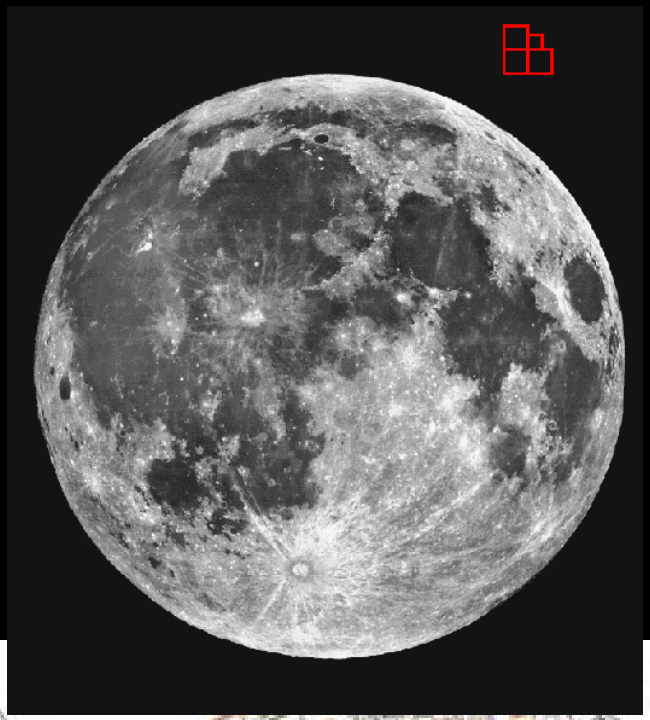


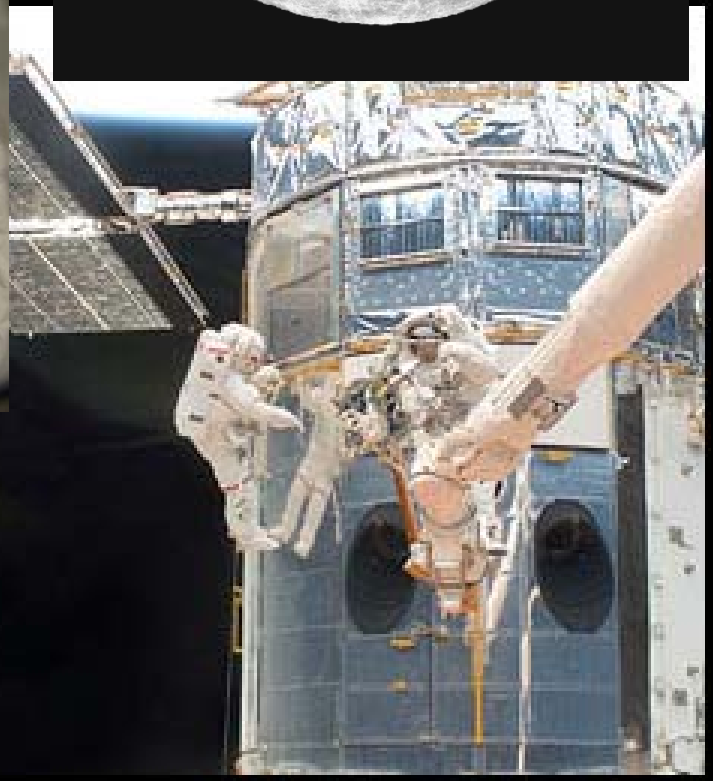


地上4m望遠鏡＋CCD：
100×写真乾板

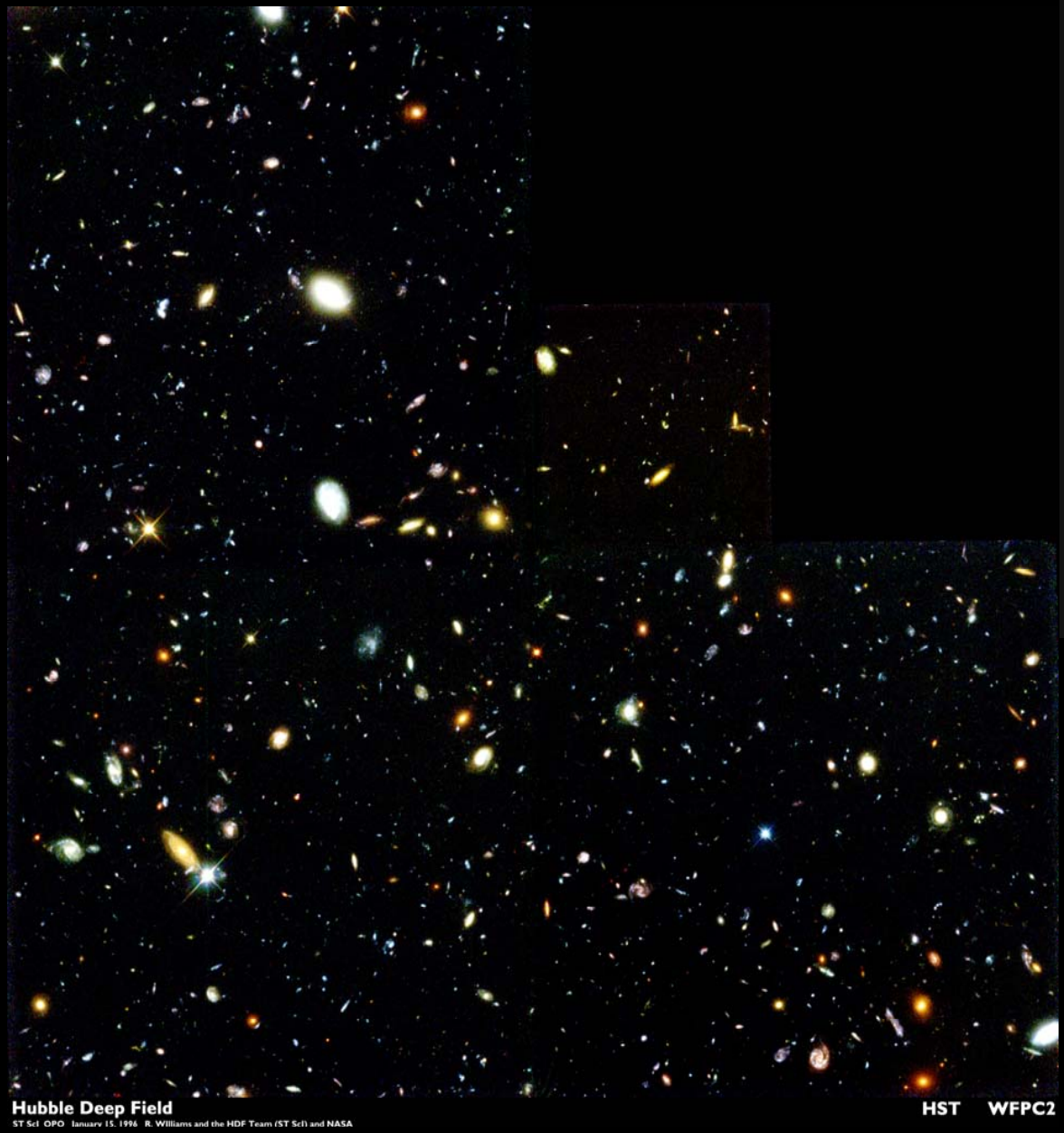
宇宙を見る目の進歩 (3)

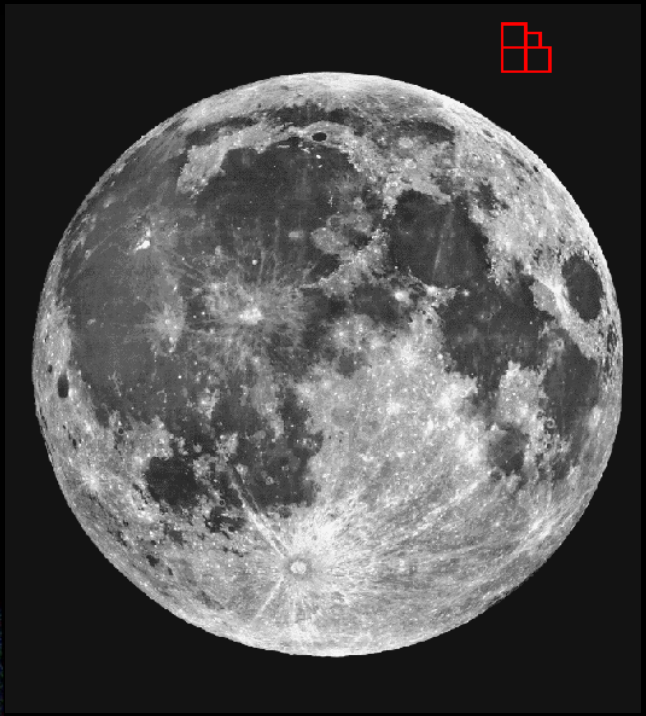


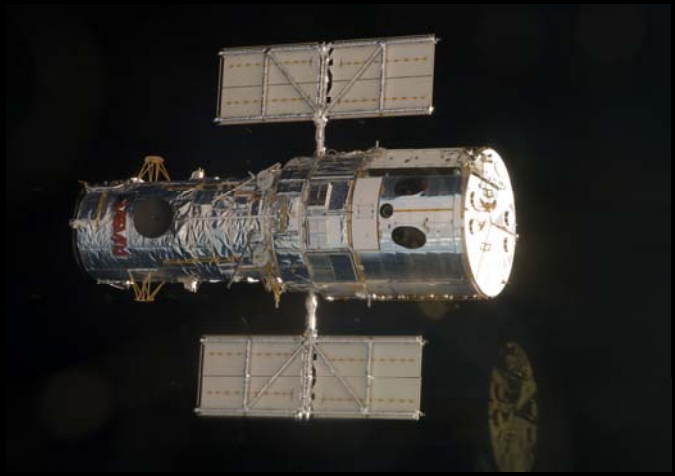




ハッブル宇宙望遠鏡





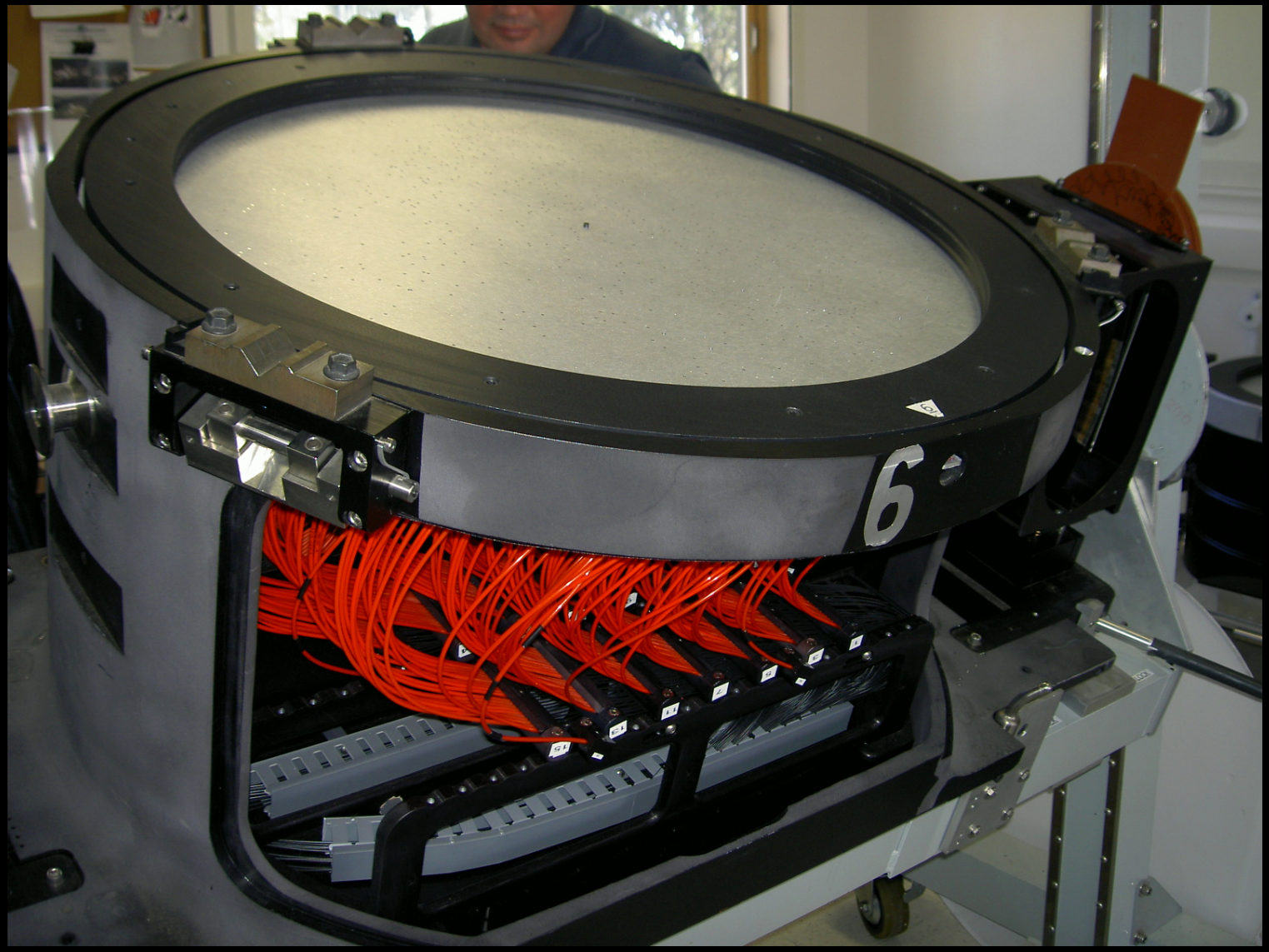


ハッブル宇宙望遠鏡＋CCD：
1000×地上望遠鏡

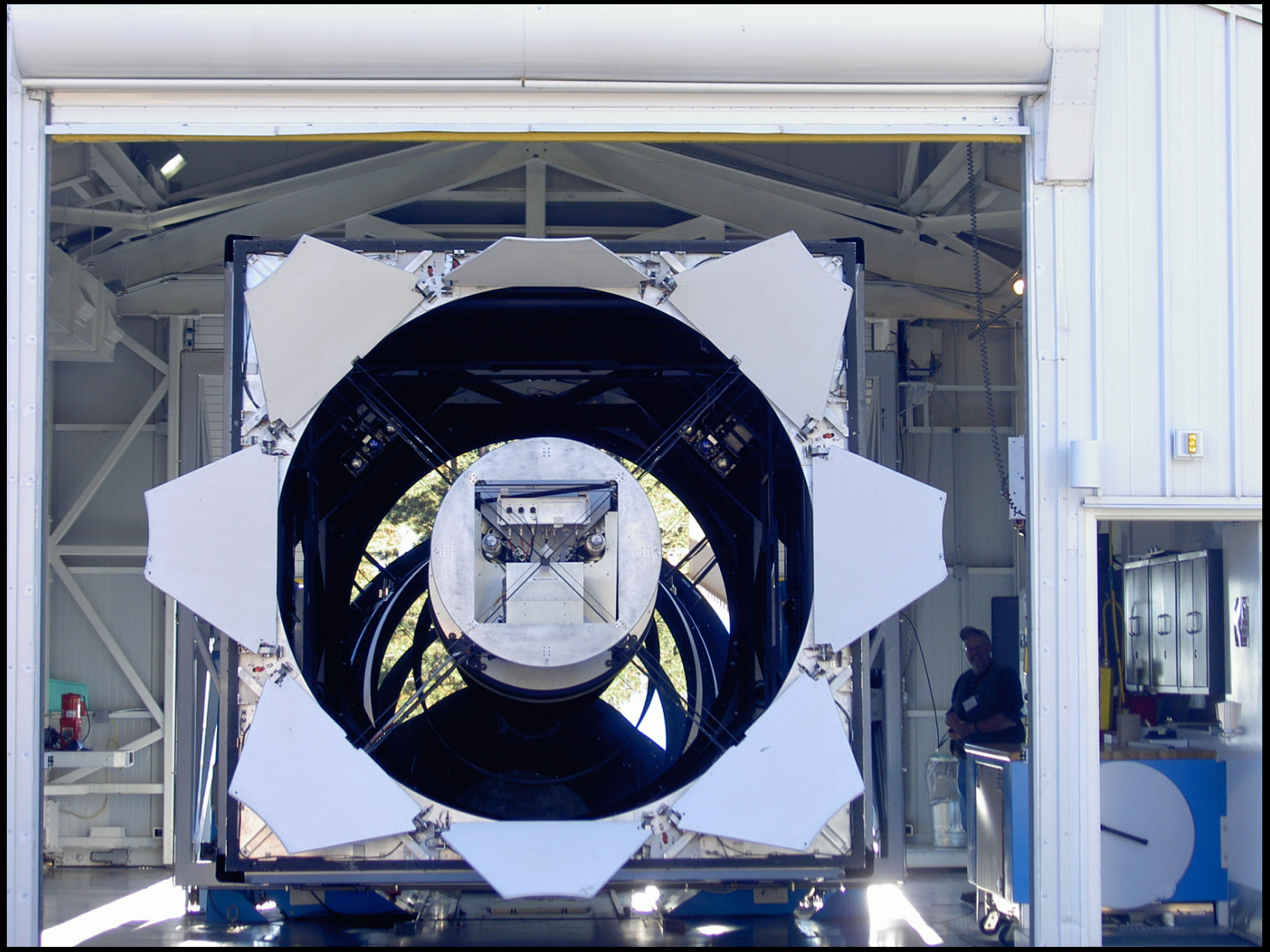
穴あきアルミ板から夜空のムコウを見る

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

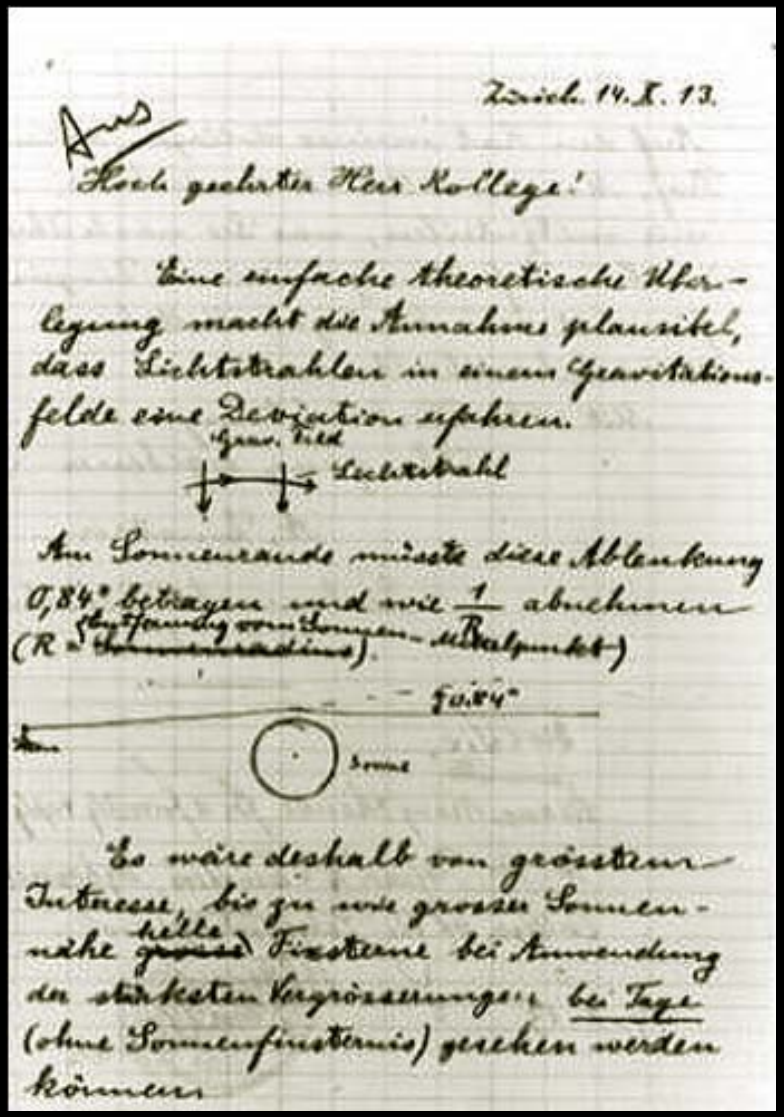
宇宙を満たしていながら
見えないもの
準主役

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）

重力レンズ



Zürich, 14. X. 13.

Ans

Sehr geehrter Herr Kollege!

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

Grav. Feld

Lichtstrahl

Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung 0,84" betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (R = Entfernung vom Sonnenmittelpunkt)

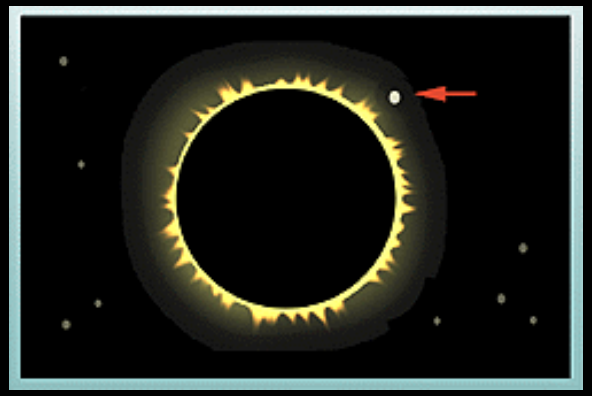
0,84"

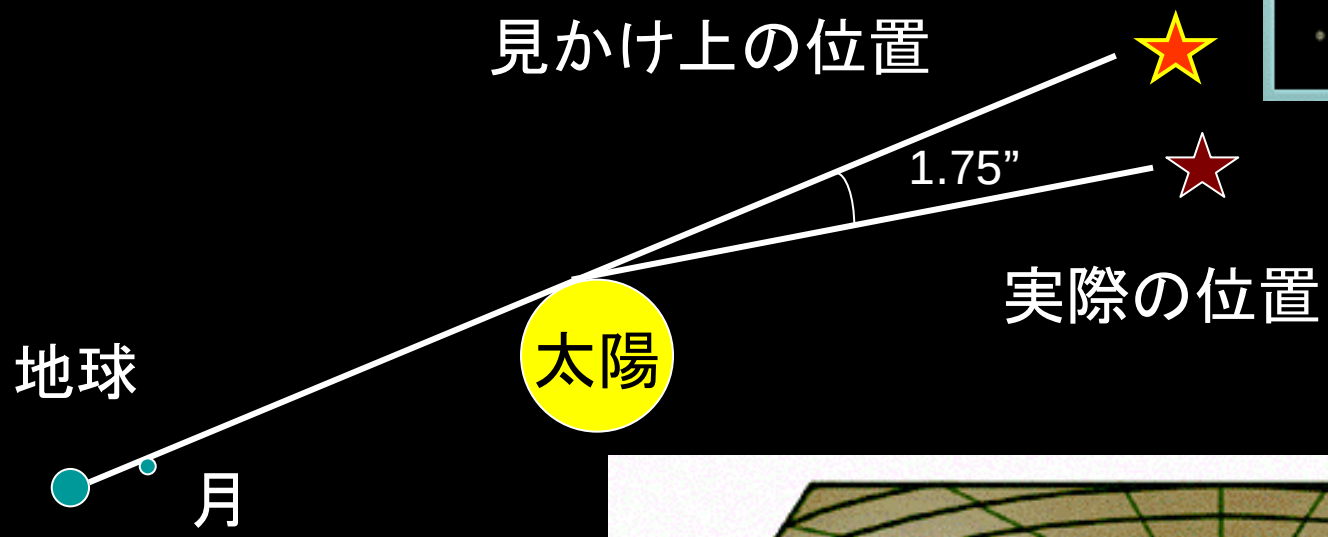
Sonne

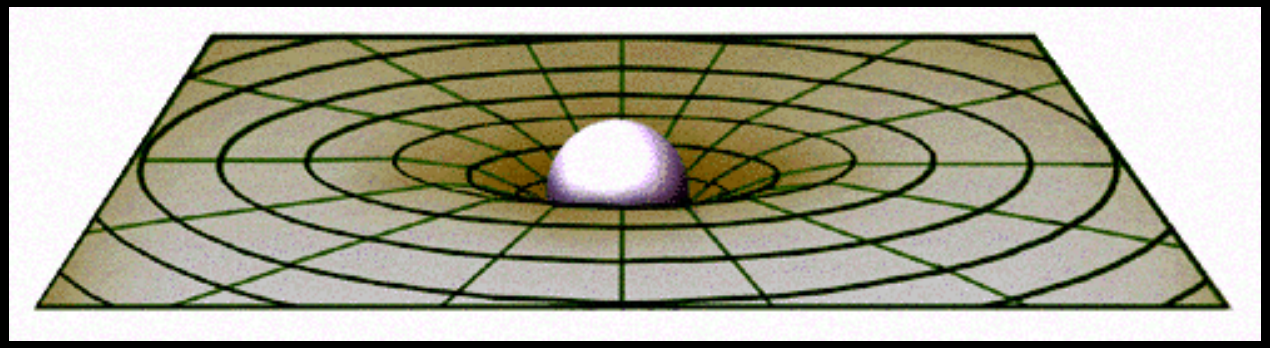
Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grossen Sonnennähe ~~grosse~~ helle Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

重力＝時空の曲がり

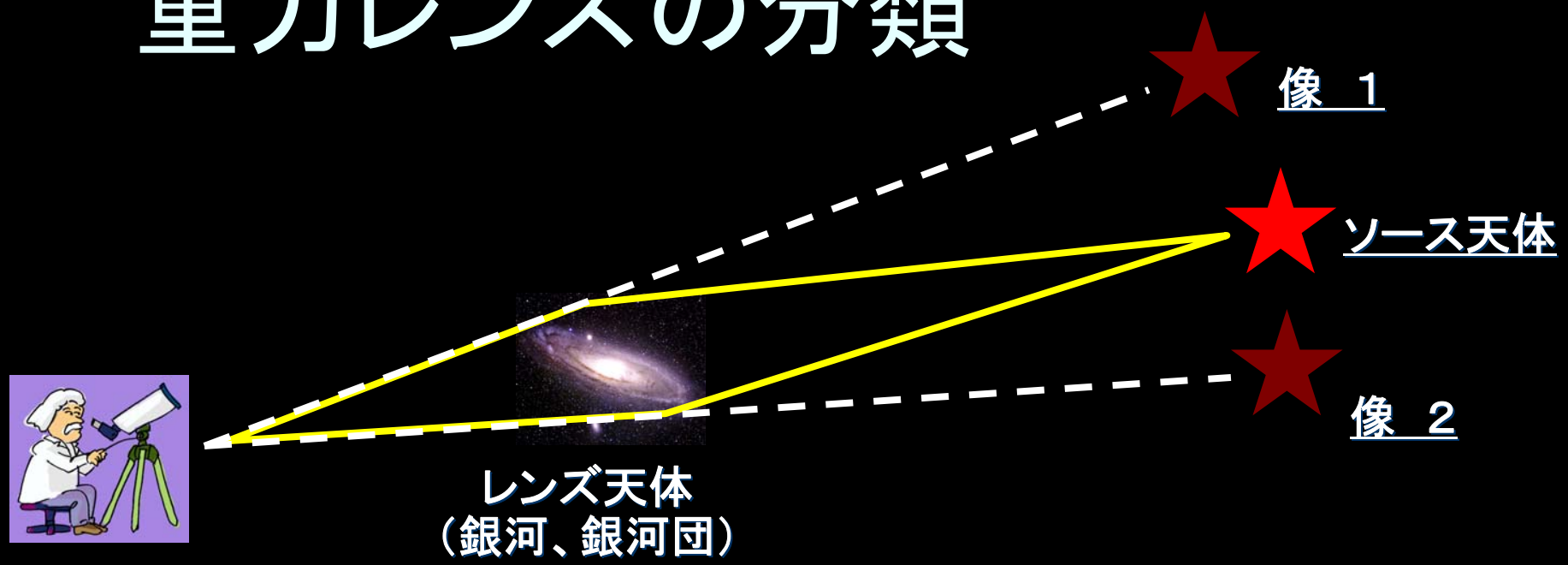
THE EINSTEIN FIELD EQUATION
$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$




見かけ上の位置
1.75”
実際の位置
太陽
地球
月

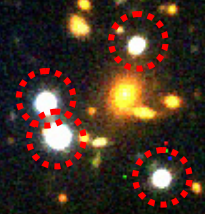


重力レンズの分類



- 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）

100億光年先からの一般相対論的蜃気楼 (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

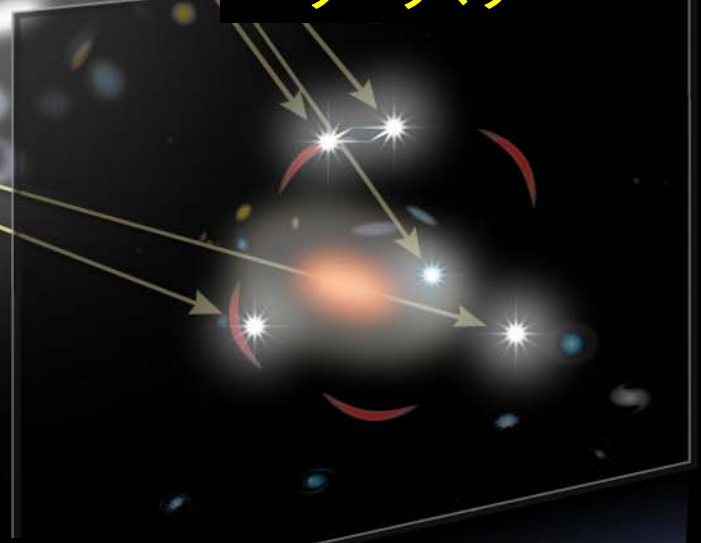
Inada et al. Nature 426(2003)810

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

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）

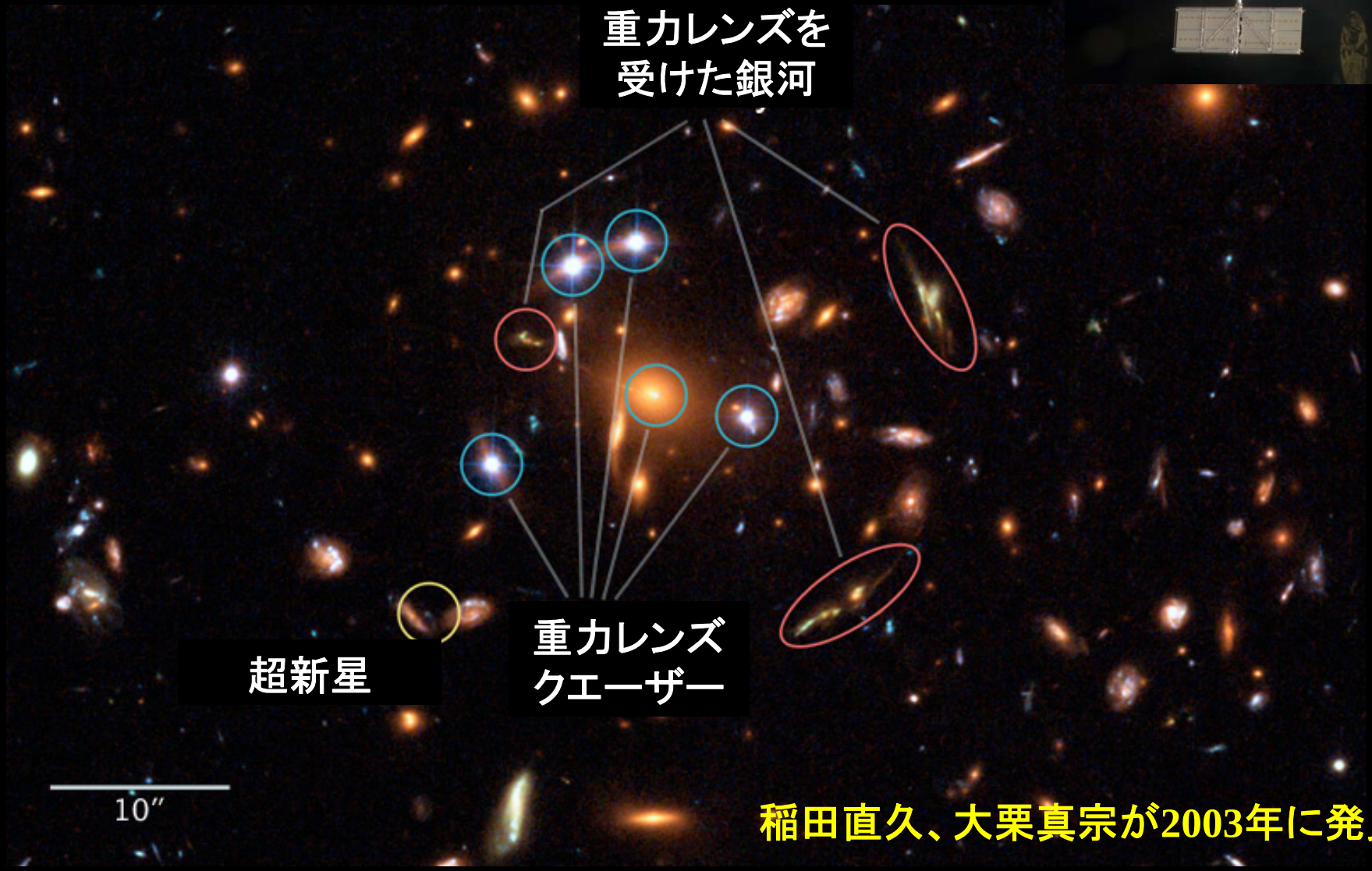
98億光年先にある
クエーサー（中心に
ブラックホール）

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

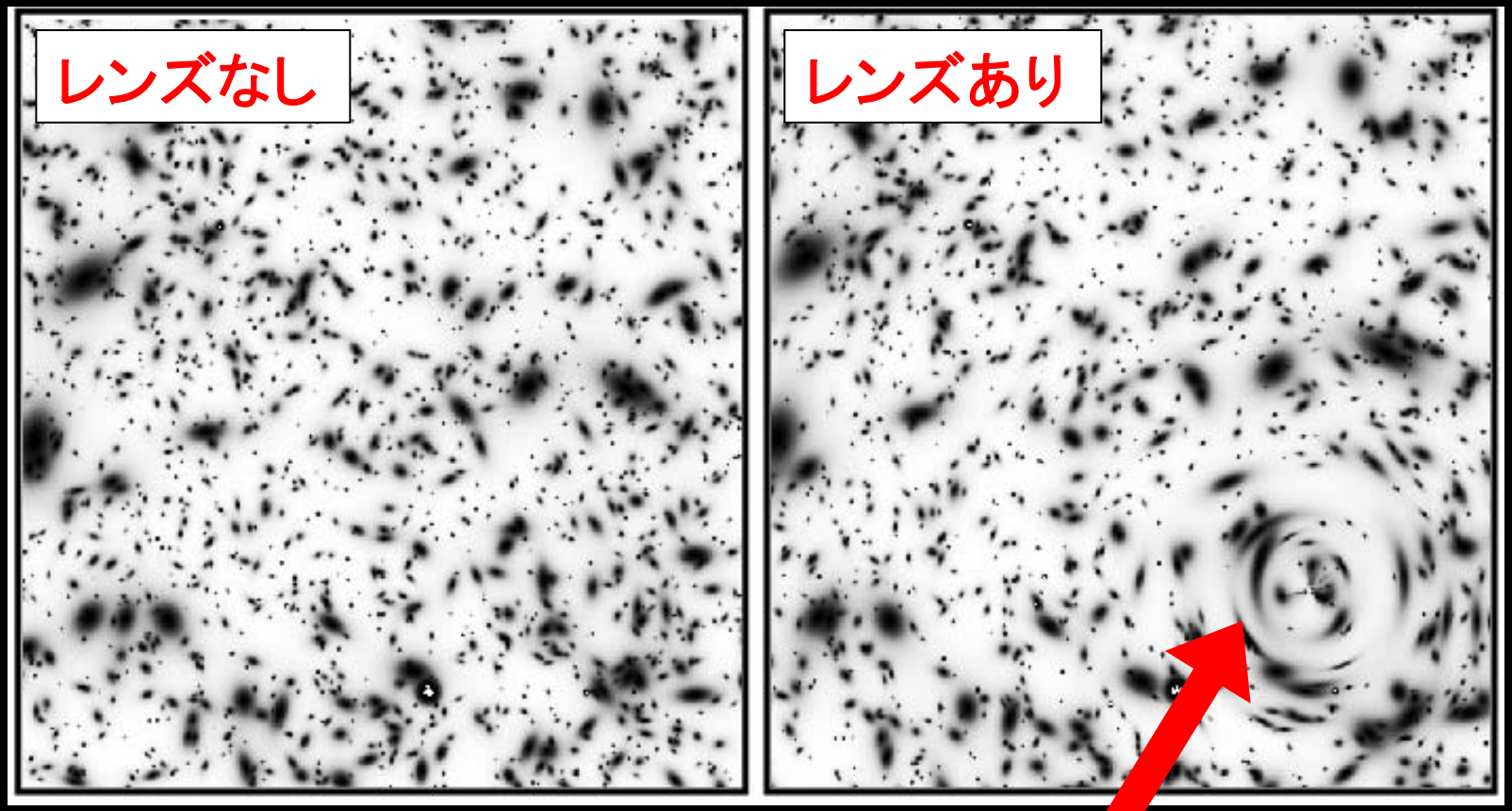
ハッブル宇宙望遠鏡で観測した SDSS J1004+4112



稲田直久、大栗真宗が2003年に発見

夜空はダークマターで満たされていた

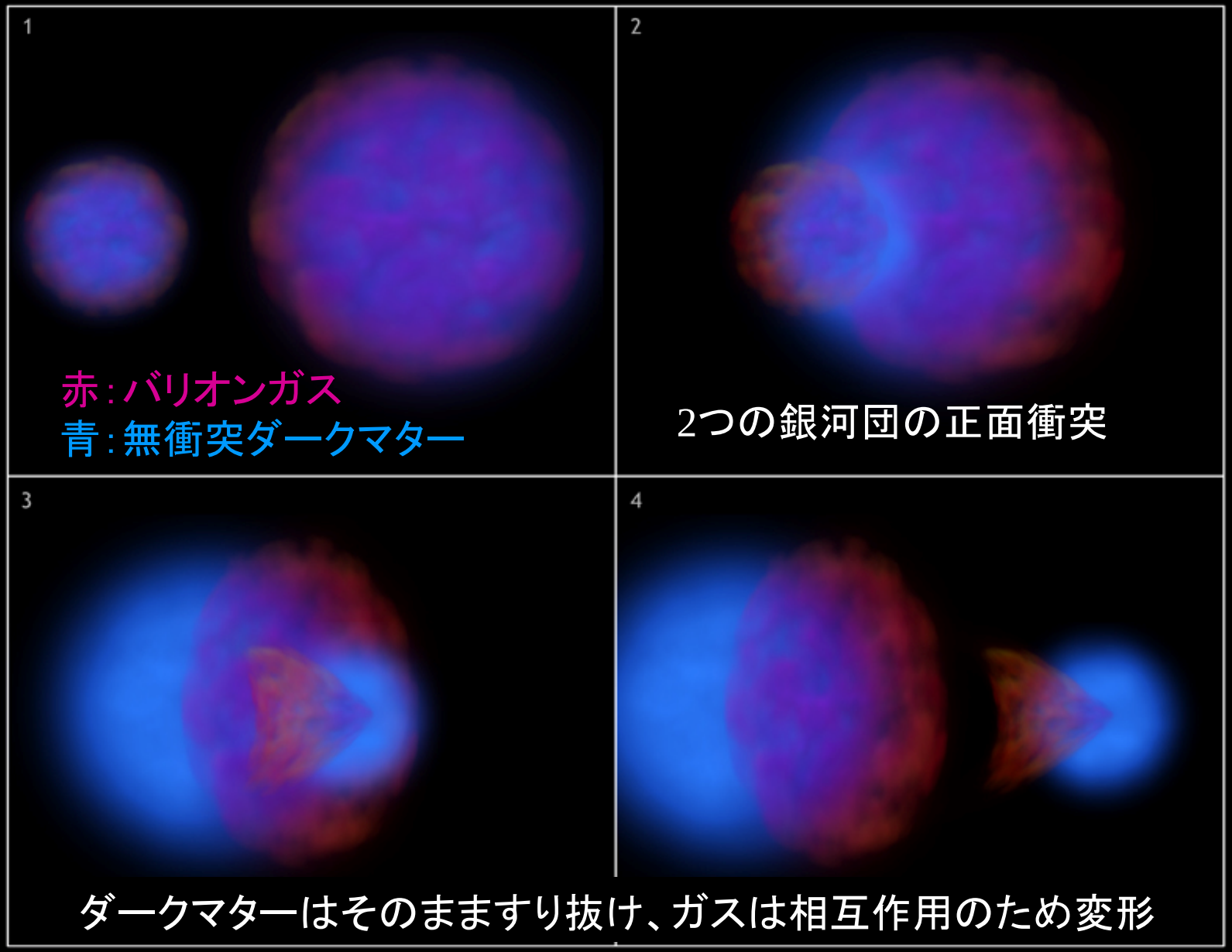
弱い重力レンズ



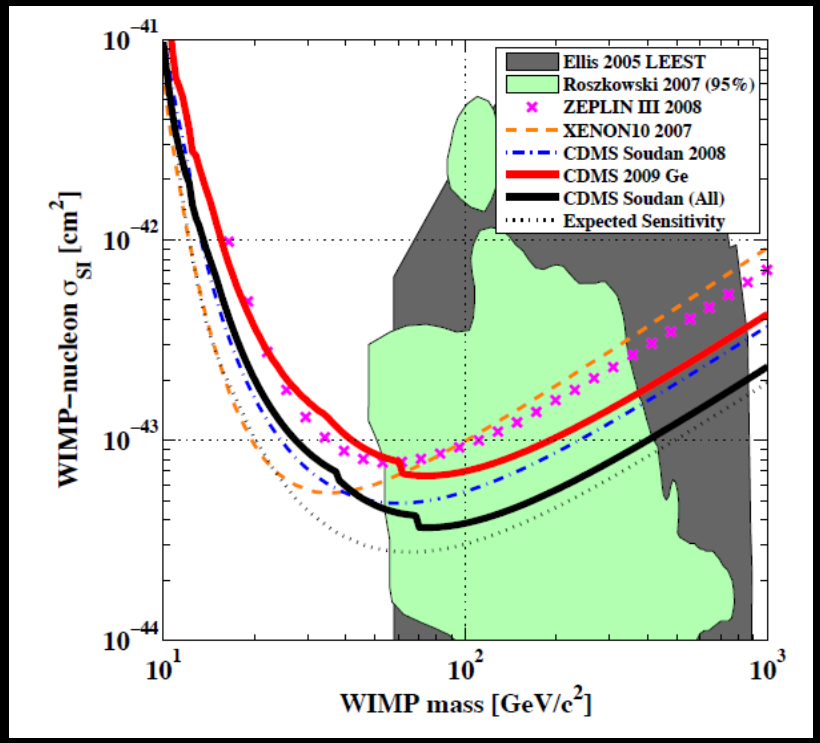
z=0.3に10^{14}太陽質量の重力レンズ天体がある場合に予想されるイメージ

衝突銀河団

ダークマター存在の証拠



ダークマター粒子が直接検出された？



- 2009年12月18日発表
- CDMS II 実験
  - Cryogenic Dark Matter Search
  - 主に米国の研究グループ
  - ミネソタ州スーダン地下実験施設
  - 2007年7月から2008年9月までのデータの中に2つの候補イベント
  - バックグラウンド（本当の信号でない）の確率は23%
  - 彼らは検出を主張はしていない

Z.Ahmed et al. arXiv:0912.3592

「暗黒物質」らしき粒子、観測　米の研究チーム発表（asahi.com　勝田敏彦 記者）

- 暗黒物質は、光を出したり反射したりしないが質量は持つ謎の物質で、１９８０年代に銀河回転の観測から存在が仮定されてきた
- 観測は難しいが、まれに通常の物質に衝突する可能性があり、研究チームはそうした現象を探すため、ミネソタ州北部の地下約７００メートルにある施設CDMS2に検出装置を設置した
- 　発表によると、２００７～０８年、暗黒物質の粒子が装置の中のゲルマニウム原子核に衝突して起こしたらしいわずかな温度上昇が2件観測された。ただ、似た別の現象を誤ってとらえた可能性もあり、チームは「発見したとまではいえない」としている
- 　「間違いなく見つかった」と判断されるには5件以上の現象の検出が必要とされ、チームは今後、検出装置の改良などを行う
- 　暗黒物質は07年、５０億光年離れた銀河団に存在している様子が観測されている

CDM（シー・ディー・エム）: Wikipedia

- Clean Development Mechanism
  - クリーン開発メカニズム: 先進国が開発途上国において技術・資金等の支援を行い、温室効果ガス排出量の削減または吸収量を増加する事業を実施した結果、削減できた排出量の一定量を支援元の国の温室効果ガス排出量の削減分の一部に充当することができる制度
- Code Division Multiplex
  - 符号分割多重化
- Cold Dark Matter
  - 冷たい暗黒物質
- Cryogenic Dark Matter Search
  - 低温暗黒物質探索

ダークマターだけなのか？

- 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たとし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
本当の主役

ダークエネルギー

ダークエネルギー

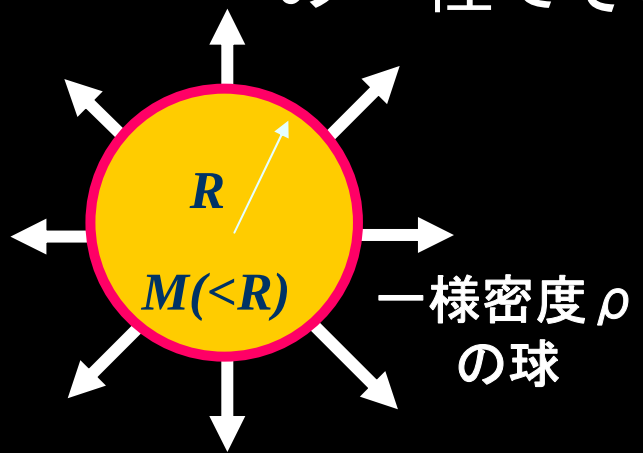
- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たしているものは存在するか
  - 仮にあるとしてもそのようなものは観測可能か
  - 「真空」には本当に何もないのか
  - 相対的でない測定はあり得るか
- ダークエネルギーは、空間的には一様分布していてもその密度は時々刻々変化する
  - 宇宙膨張は宇宙の密度の絶対的な値（何かとの差ではなく）によって決まる
  - 宇宙膨張の時間依存性を測定する
  - 時間軸に沿った相対的な測定は可能

宇宙膨張の方程式

- ニュートン力学による運動方程式

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

- 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ρ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」(Λ：ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

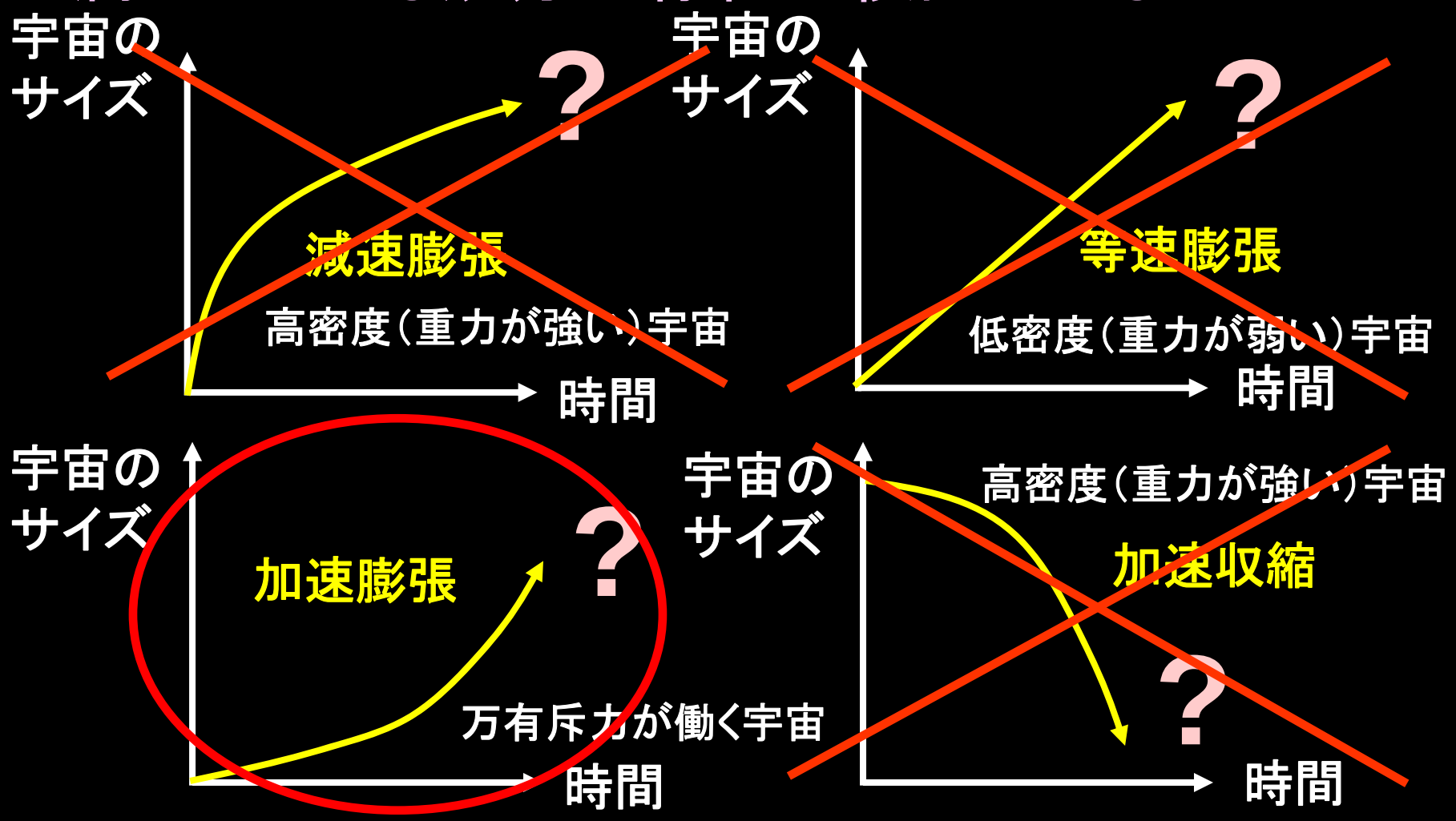


$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \boxed{3p} - \frac{\boxed{\Lambda}}{4\pi G}\right)R$$

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

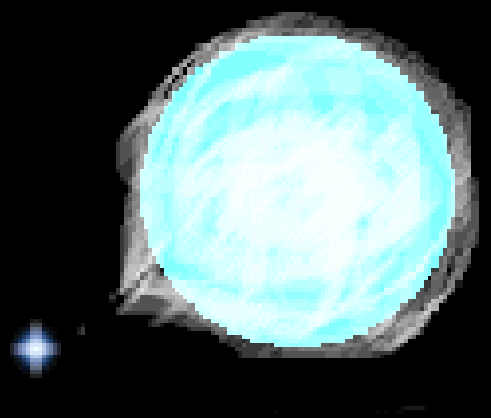
かに星雲

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**

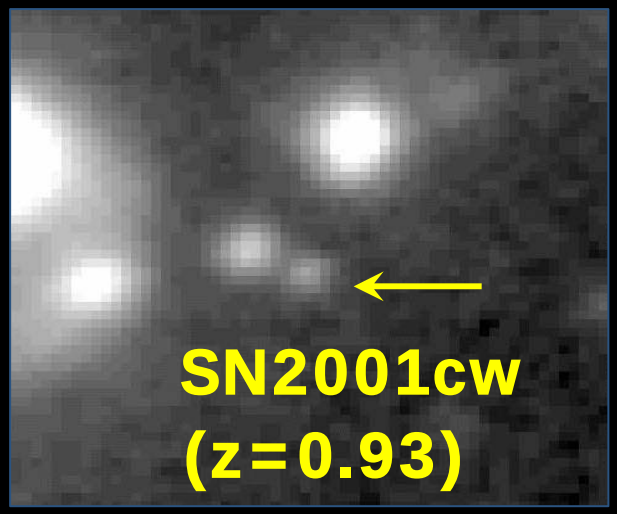


- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ
  - 白色矮星（電子の縮退圧で自己重力を支える）には、安定に存在できる最大質量がある
  - チャンドラセカール質量（約1.4太陽質量）
  - これを越えると不安定となり爆発を起こす

標準光源: Ia型超新星

見かけの明るさ: F

真の明るさ: L

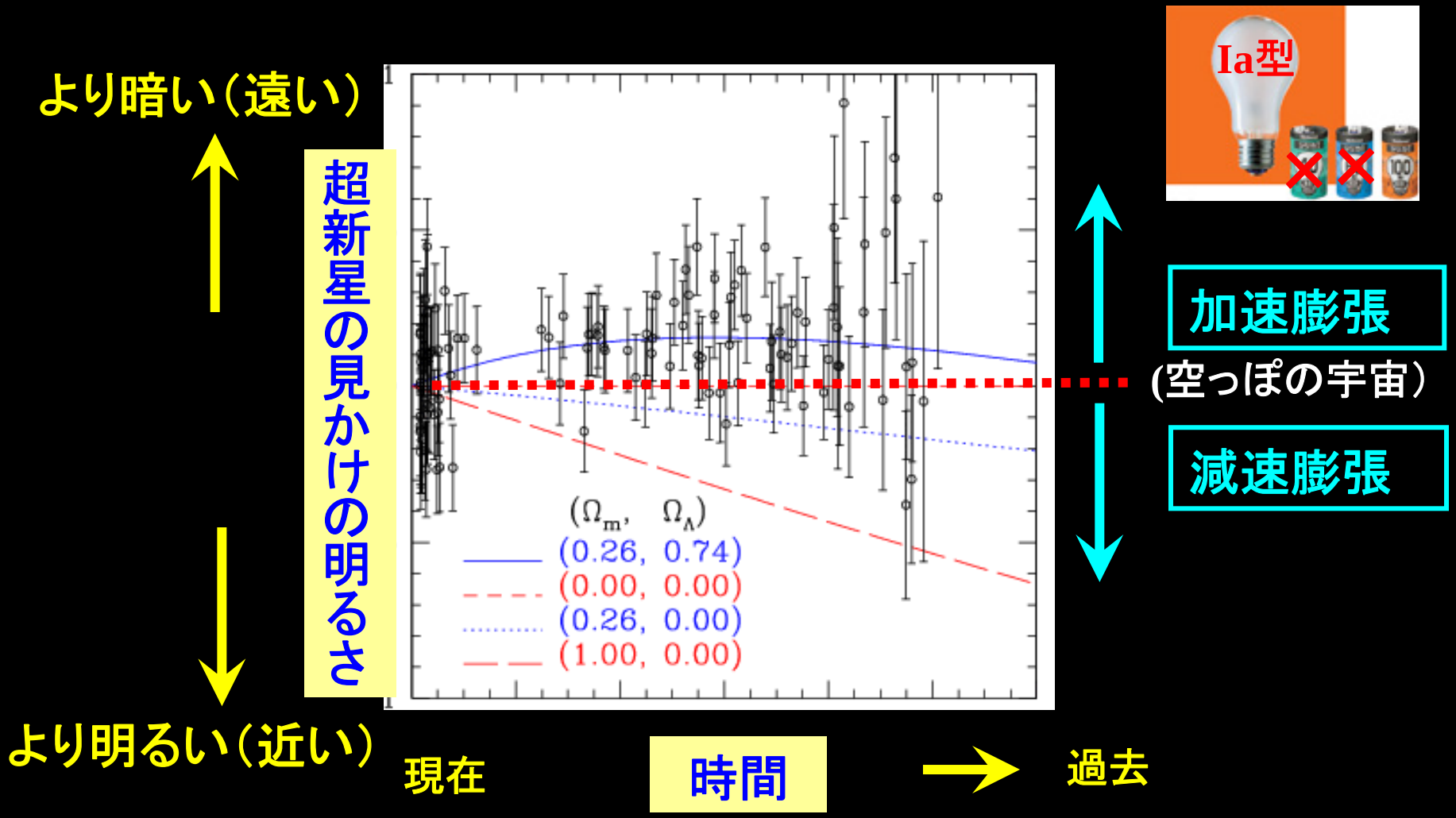


距離: D

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

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

超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



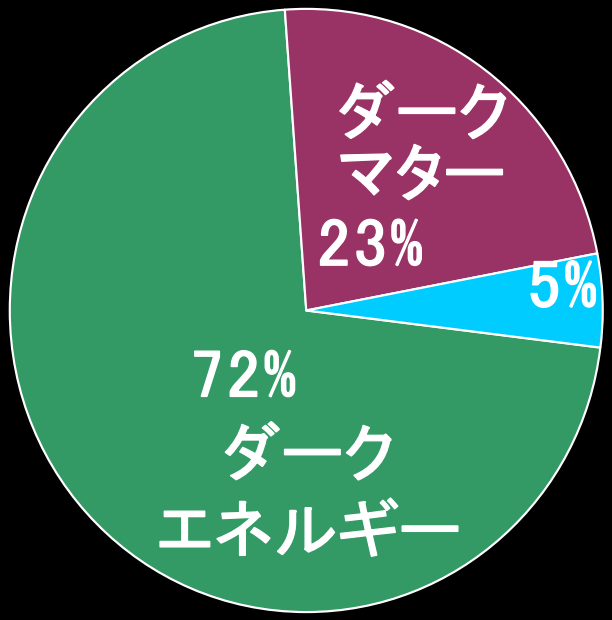
- 宇宙は加速膨張をしていた！(1998年)

宇宙の加速膨張とダークエネルギー

- **宇宙の将来はどうなるか?**
  - 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



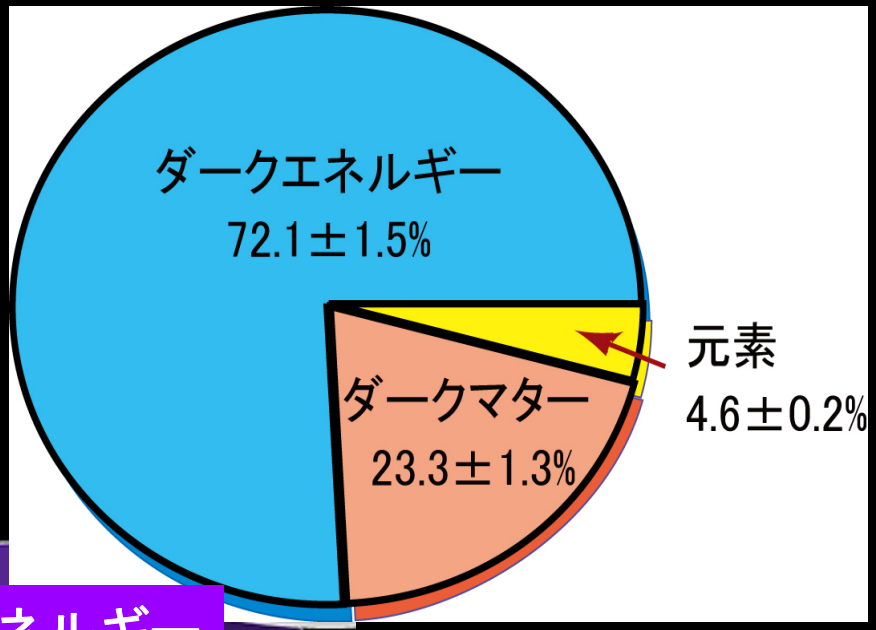
■ 銀河･銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量
■ 未知の素粒子が正体？

通常の物質（元素）

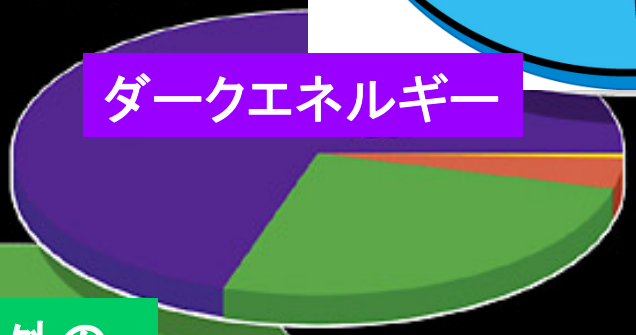
■ 現時点で知られている物質は実質的にはすべて元素（陽子と中性子）からなる

■ 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

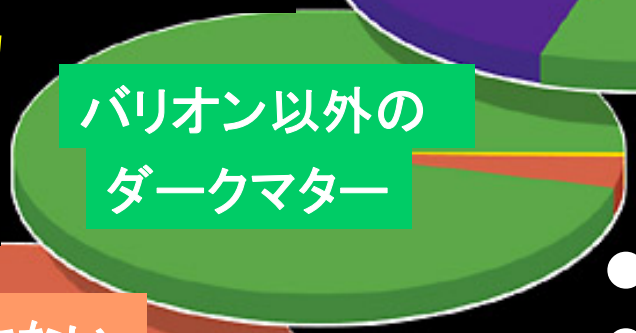


1990年代



21世紀初頭

1980年代



1970年代

- **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

アメリカを代表する哲学者かつ詩人:
ドナルド・ラムズフェルド第21代国防長官

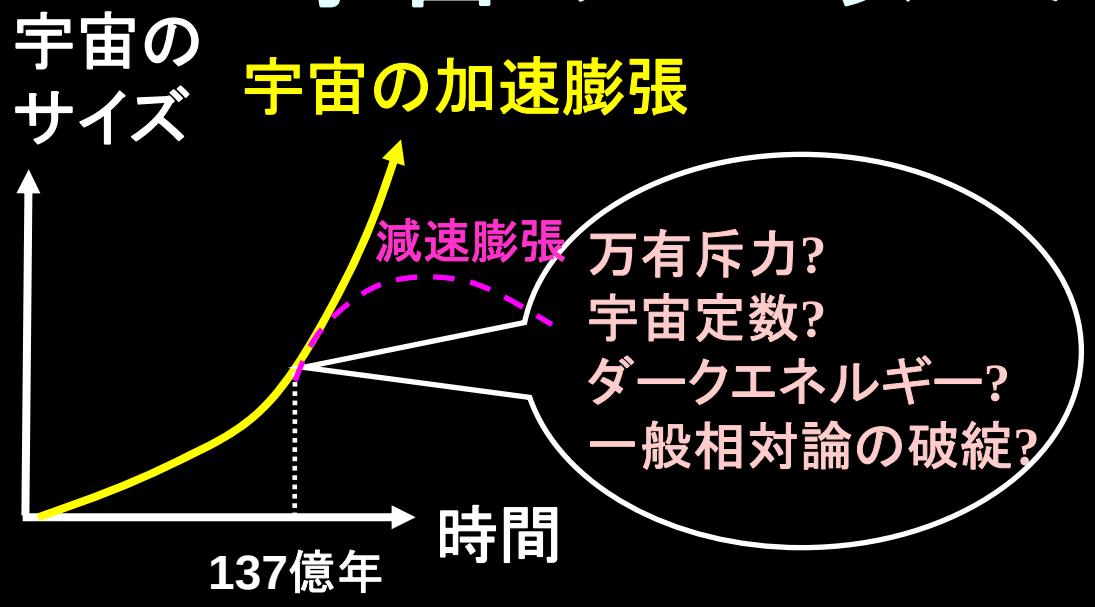
The Unknown

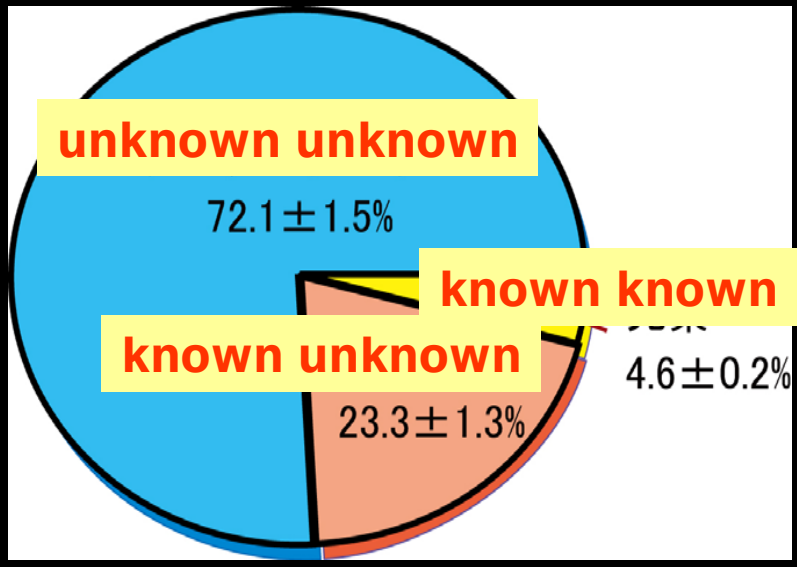
As we know,
There are known knowns.
There are things we know we know.
We also know
There are known unknowns.
That is to say
We know there are some things
We do not know.
But there are also unknown un-knowns,
The ones we don't know
We don't know.

—Feb. 12, 2002, Department of Defense news briefing

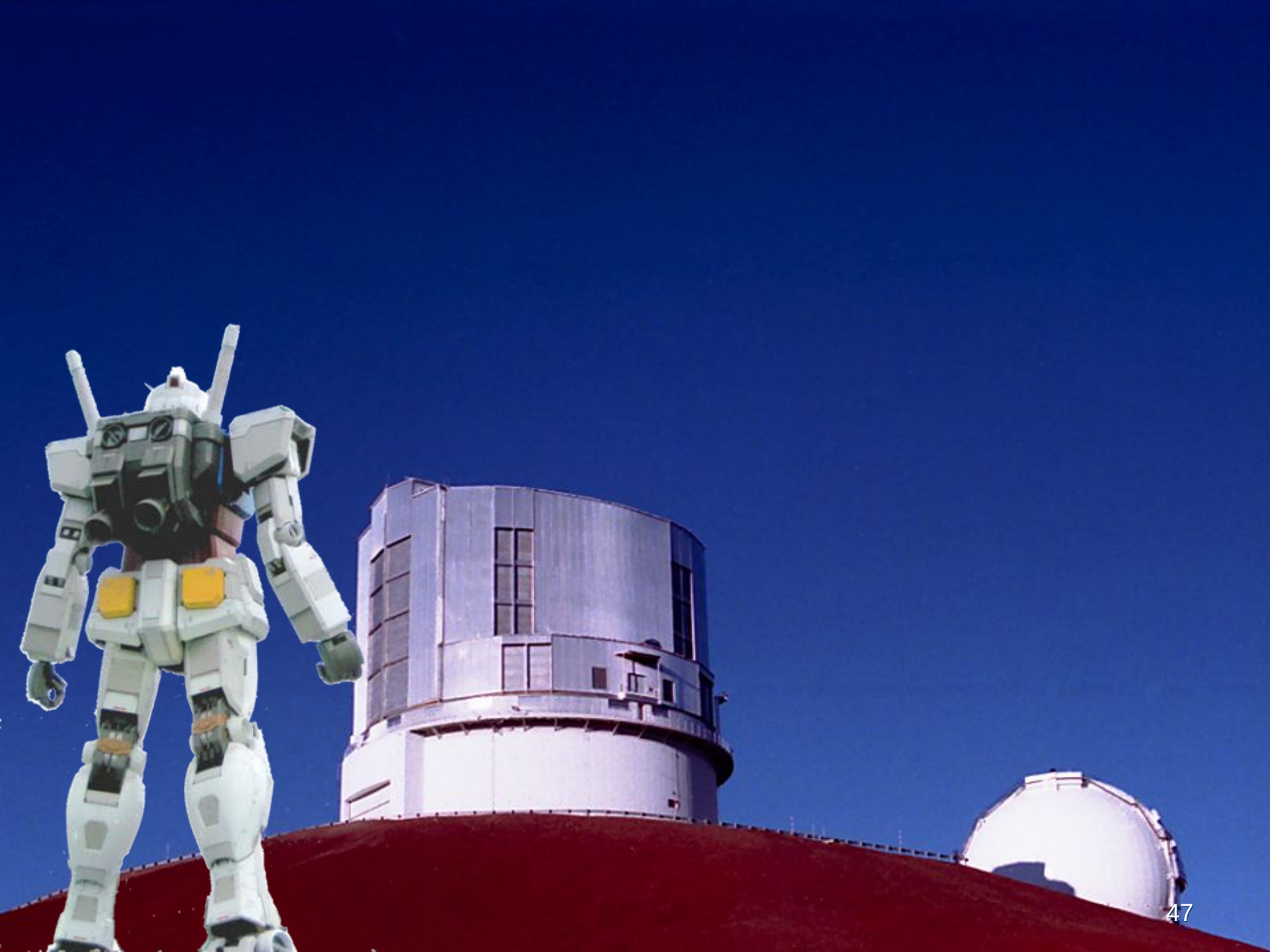
2003年『やさしい英語普及運動』から、『関係代名詞や従属節を多用し、なおかつ接続詞の乱用による長いセンテンスを使用した、わかりにくい英語の演説、発言』をすることを顕彰して『フット・イン・マウス(意味不明な迷言)賞』受賞

宇宙の95%以上が正体不明





- 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

わかったこと

- 20世紀の物理学は、世の中の物質がクォークとレプトンという素粒子の階層によってほぼ説明できると思い込んでいた。
- しかし、天文学はそれは間違いであるどころか、宇宙の大半は未知の物質からなることを示した
- 「我々は何も知らなかった」ことがわかった
- 科学にとっては、答えをみつけると同等、あるいはそれ以上に重要な謎を見つけることが大切
- まさに宇宙の現状は学問