

大切なものは目にはみえない

講演1 宇宙のダークエネルギー
講演2 太陽系外惑星



*L'essentiel est invisible
pour les yeux*

*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

高知工科大学 平成21年度連続講演
「物理学の現在:ミクロからマクロまで」 第二回

2009年7月3日 16:30-18:30 @高知工科大学 大講堂

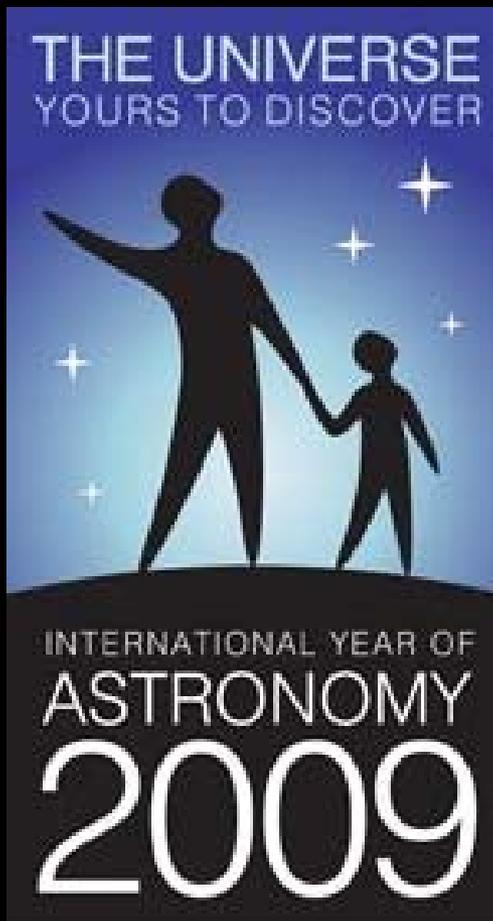
講演1

宇宙のダークエネルギー

大切なものは目に見えない



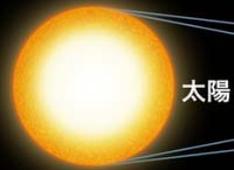
<http://www.astronomy2009.jp/>



- ガリレオが、望遠鏡で宇宙を初めて見てから今年ちょうど400年。それを記念して、2009年は、
世界天文年
(International Year of Astronomy)
- 公式スローガン(標語)
 - **The Universe, Yours to Discover**
(宇宙...解き明かすのはあなた)

皆既日食 部分日食

2009年7月22日



太陽

月

地球

皆既日食が見られる

部分日食が見られる

国立天文台 天文情報センター

皆既日食が 見られる地域

屋久

食の始め	09時37分06秒
皆既の始め	10時56分10秒
食の最大	10時58分07秒
皆既の終り	11時00分05秒
食の終り	12時22分37秒

悪石島

食の始め	09時35分25秒
皆既の始め	10時53分16秒
食の最大	10時56分28秒
皆既の終り	10時59分41秒
食の終り	12時21分26秒

奄美

食の始め	09時35分21秒
皆既の始め	10時55分58秒
食の最大	10時56分53秒
皆既の終り	10時57分48秒
食の終り	12時22分26秒

仙台

食の始め	09時59分09秒
食の最大	11時12分52秒
食の終り	12時26分24秒

東京

食の始め	09時55分33秒
食の最大	11時12分58秒
食の終り	12時30分20秒

那覇

食の始め	09時32分50秒
食の最大	10時54分07秒
食の終り	12時20分19秒

福岡

食の始め	09時37分39秒
食の最大	10時56分05秒
食の終り	12時17分48秒

皆既日食が見られる

屋久

悪石島

奄美

部分日食の間、木漏れ日が三日月型になる

2008年8月1日 皆既日食@中国酒泉 柴田一成氏撮影
(京都大学、世界天文年全国同時七夕講演会実行委員会委員長)



金星

水星

2008年8月1日
皆既日食@中国酒泉
柴田一成氏撮影
(京都大学、世界天文年
全国同時七夕講演会実行
委員会委員長)

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

- 6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに、二千年に一度の夜が訪れる

「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、田中壺氏撮影)

大切なものは目に見えない

Adieu, dit le renard. Voici mon secret. Il est très simple : on ne voit bien qu'avec le coeur. L'essentiel est invisible pour les yeux.

*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*



天文学・宇宙物理学共通の目標：

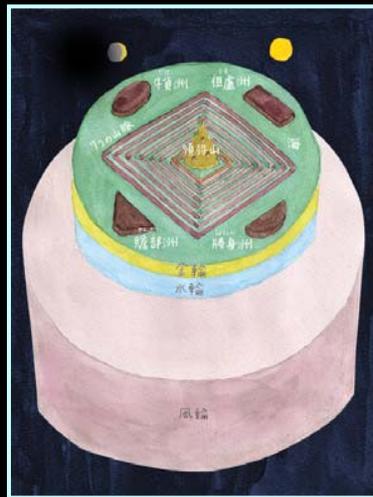
夜空のムコウの世界を探る

- 我々の世界はどうなっているかを解き明かす

古代エジプト



仏教



古代インド



イラスト：羽馬有紗

- 直接役に立つわけではなくとも人生を豊かにしてくれる本質的な疑問に挑戦する

- 宇宙は何からできているか？（宇宙論）
- もう一つの地球はあるか？（太陽系外惑星）

小説と科学

- 人生は一度しかない、だから小説がある（某作家）
- 自分が経験できる世界は限られている、だから科学がある

答えを知るより、疑問に思う心が大切

眼は、いつでも思った時にすぐ閉じることができるようになっている。

しかし、耳のほうは、自分では自分を閉じることができないようになっている。

なぜだろう。

寺田寅彦 1878年11月28日～1935年12月31日

高知県出身

東京帝国大学物理学教授

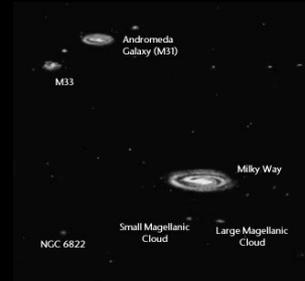
(大正十年三月、渋柿)

遠方銀河をみる

宇宙を構成しているもの

宇宙の大構造

銀河群



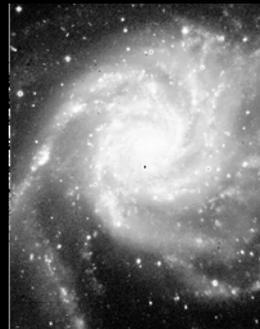
矮小銀河



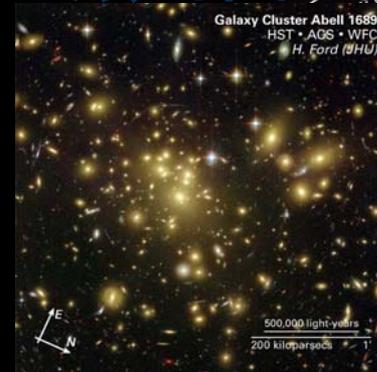
太陽系



銀河



銀河団



星団



天体諸階層の典型的大きさ [光年]

SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台



NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映



史上最大の銀河の3次元地図作り： 国際共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

<http://www.sdss.org/dr1/>

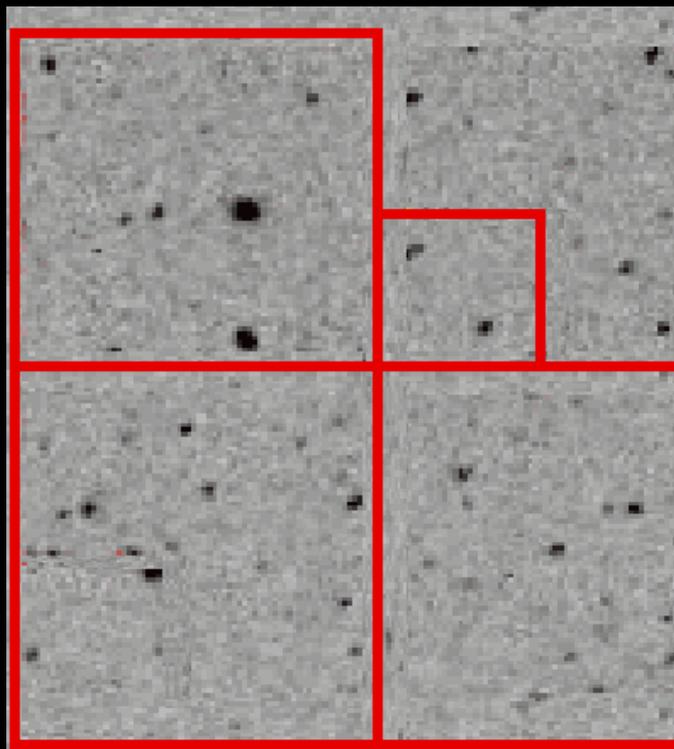


文部科学省

Ministry of Education, Culture,
Sports, Science and Technology

NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

宇宙を見る目 の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板



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

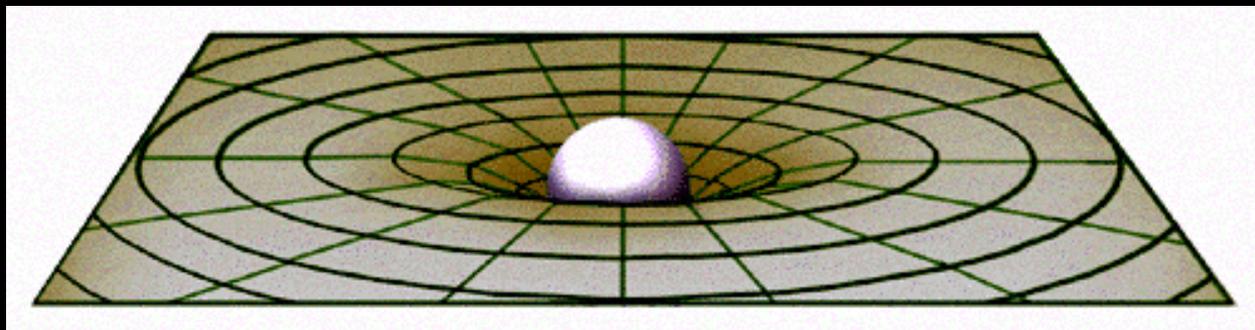
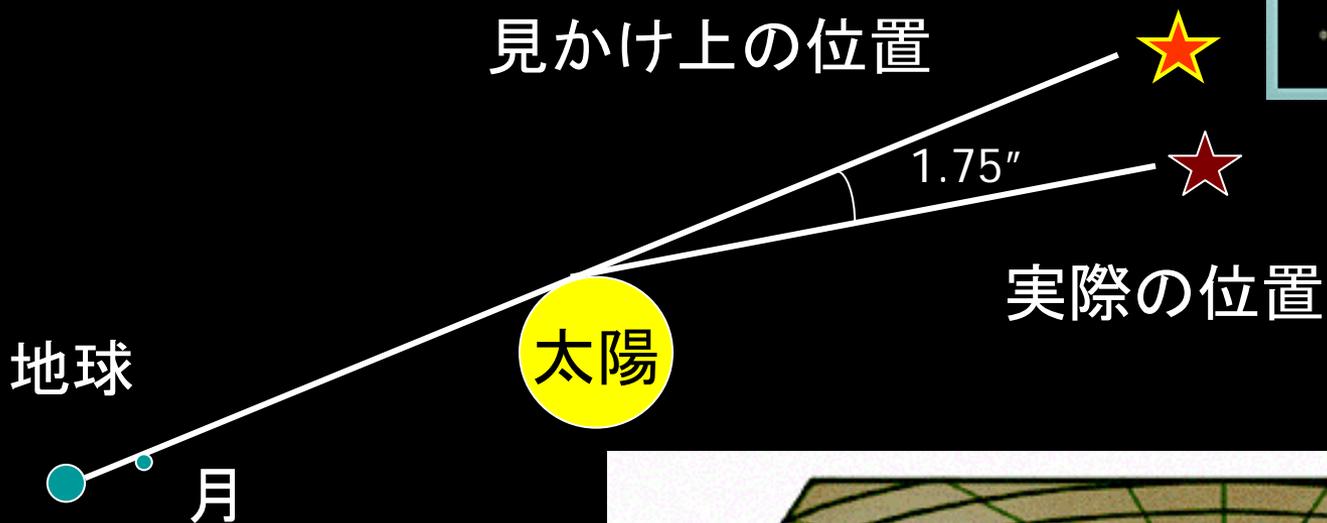
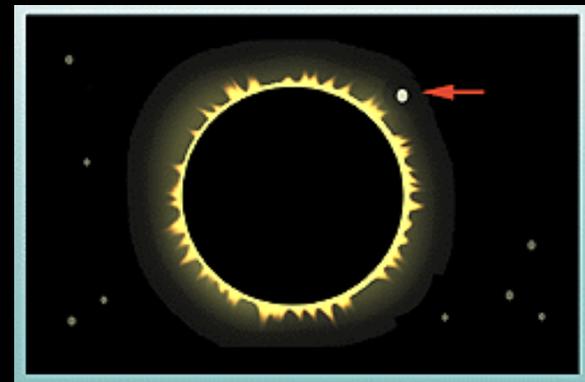
宇宙を満たしていながら
見えないもの
準主役

ダークマター

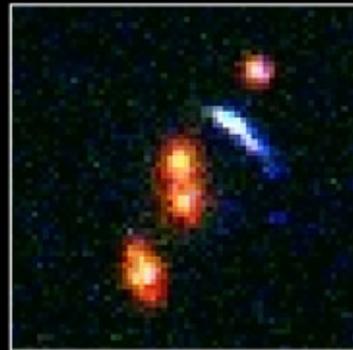
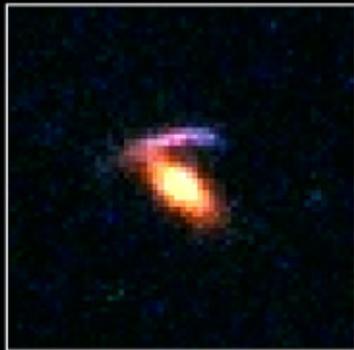
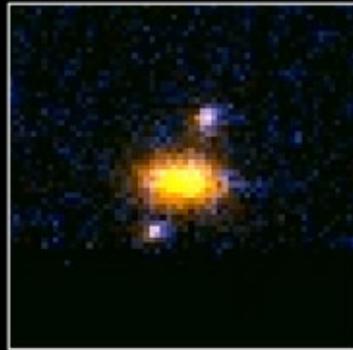
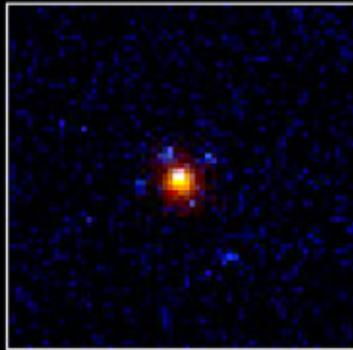
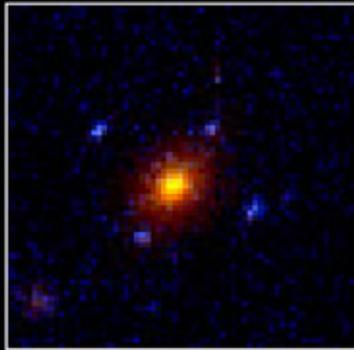
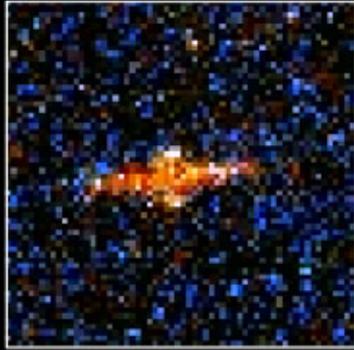
重力＝時空の曲がり

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

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



重カレンズの観測例 (HST)



Gallery of Gravitational Lenses

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

HST •

Gravitational Lens G2237+0305

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

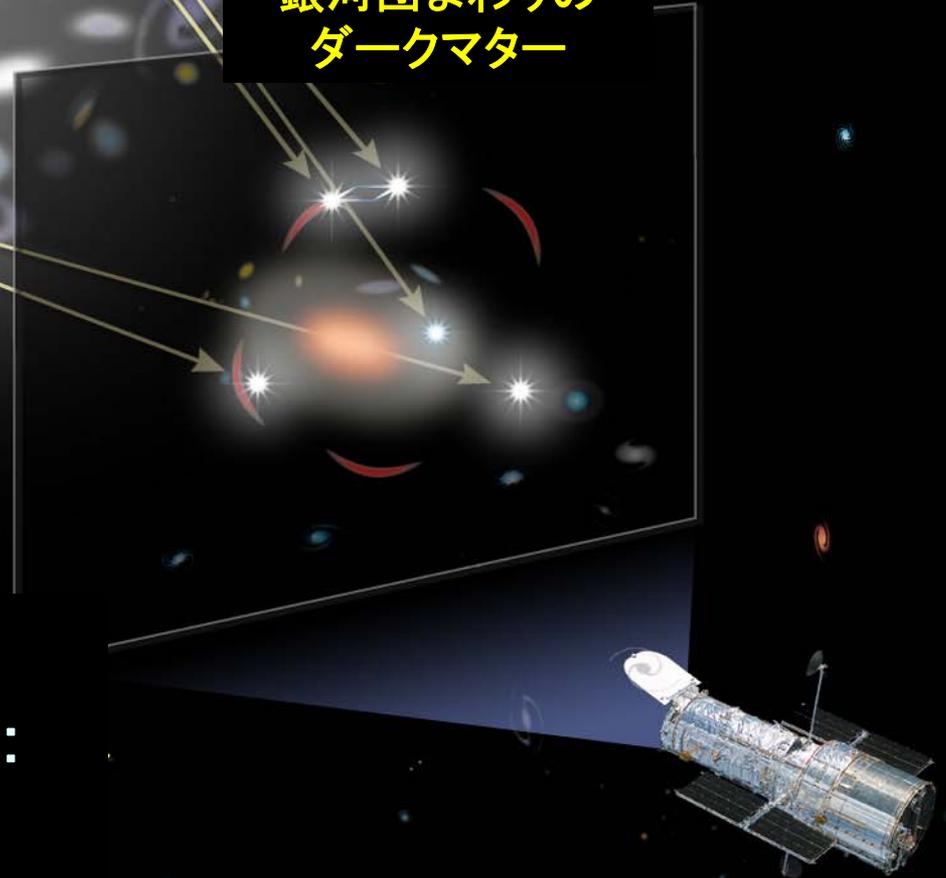
銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、
みかけ上5つの異なる天体をつくる
(ダークマターの存在)

98億光年先にある
クエーサー(中心に
ブラックホール)

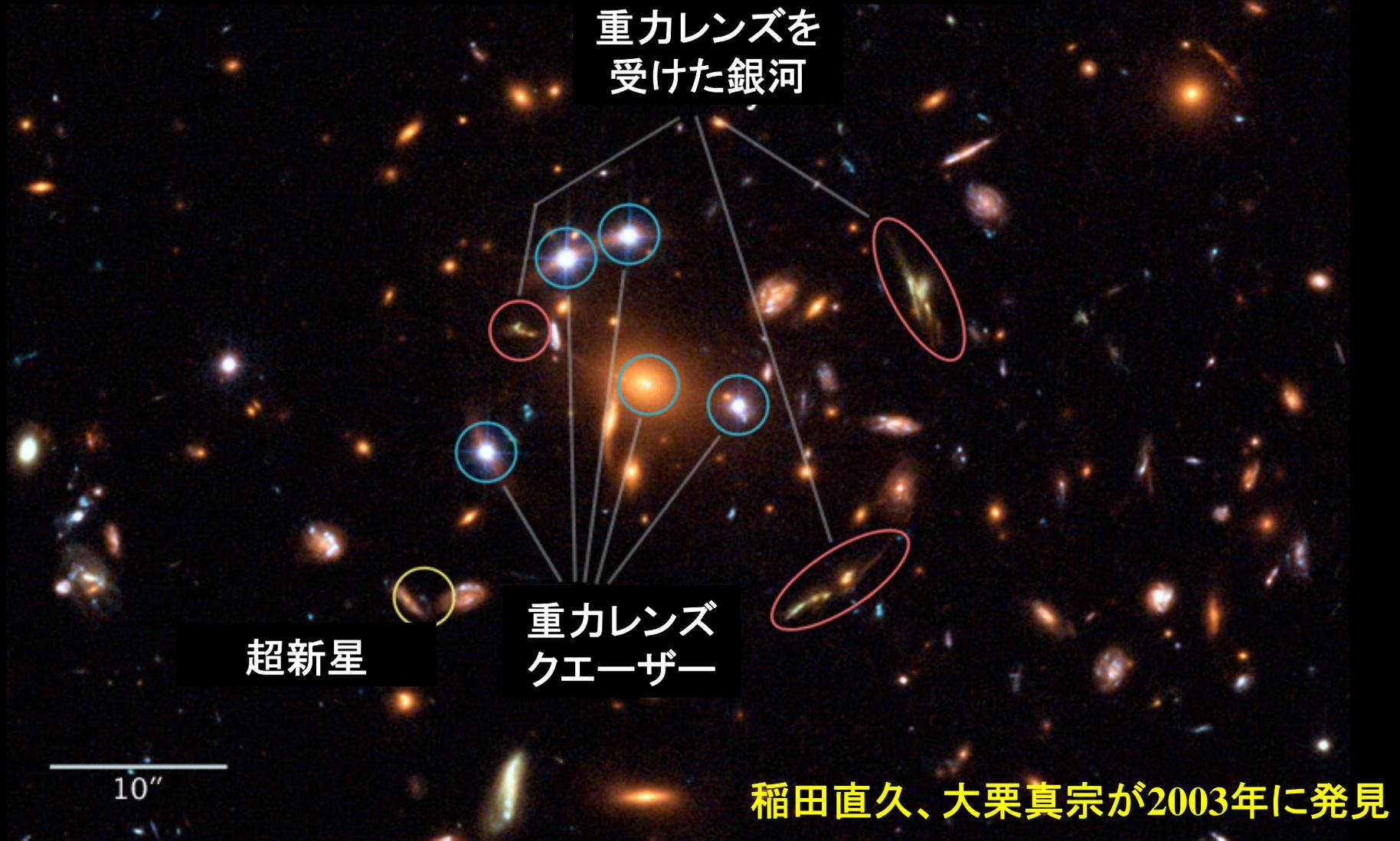
62億光年先にある
銀河団まわりの
ダークマター



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



夜空はダークマターで満たされていた
でもこれで本当にすべてなの？



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

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？

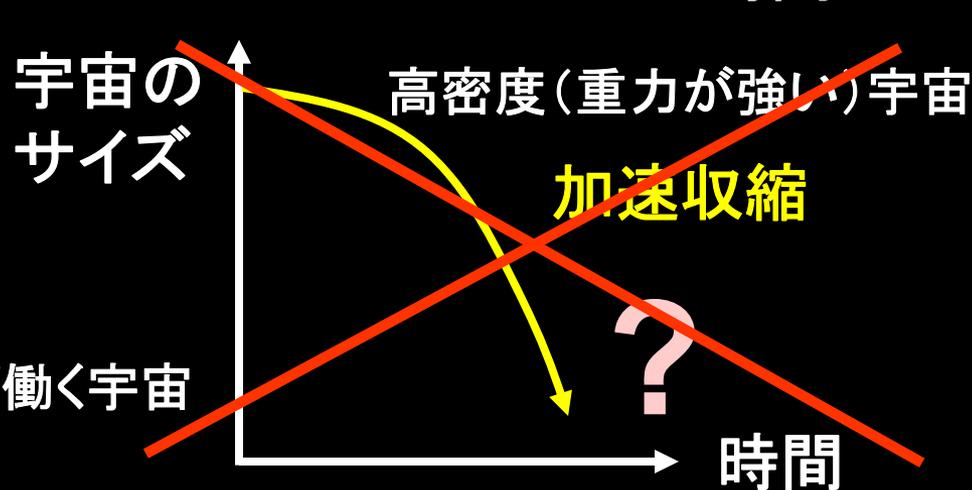
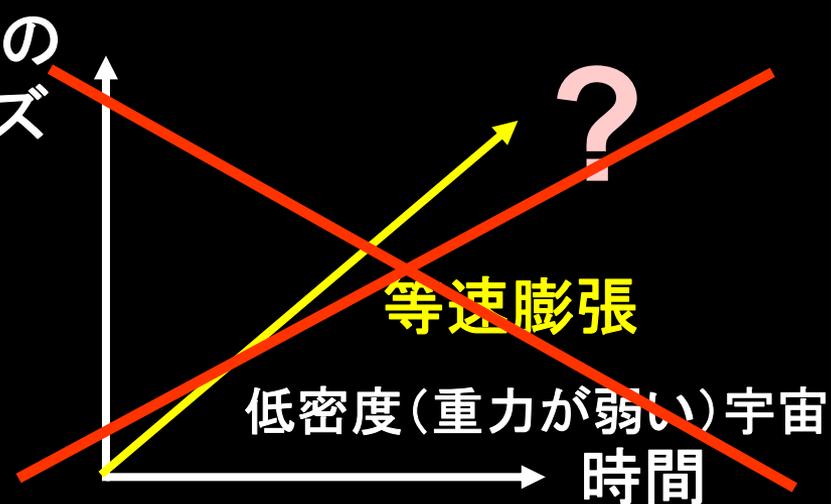
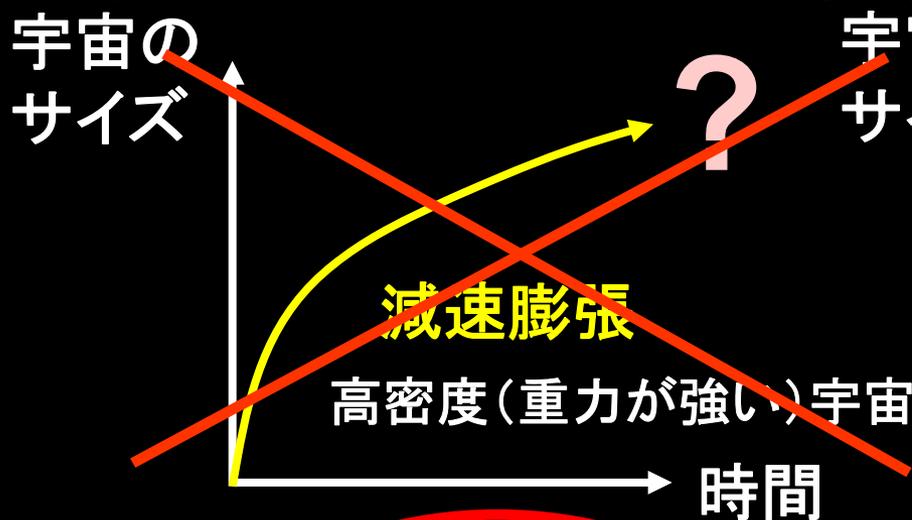
- 宇宙は膨張している(ハッブルの法則、1929年)
- さらに時間軸に沿った精密な観測をすることで膨張の加速度の符号がわかる
- 重力は常に引力なので当然減速するはず？
- しかし宇宙は「加速膨張」していた！(1998年)

■ 引力である重力を打ち消すことが必要

- 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な結果
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体(ダークエネルギー)??

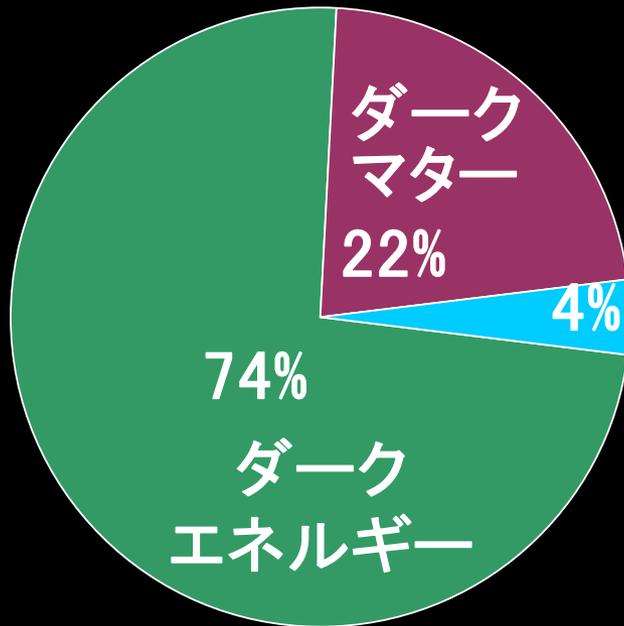
宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 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



宇宙は何からできている？

宇宙の組成



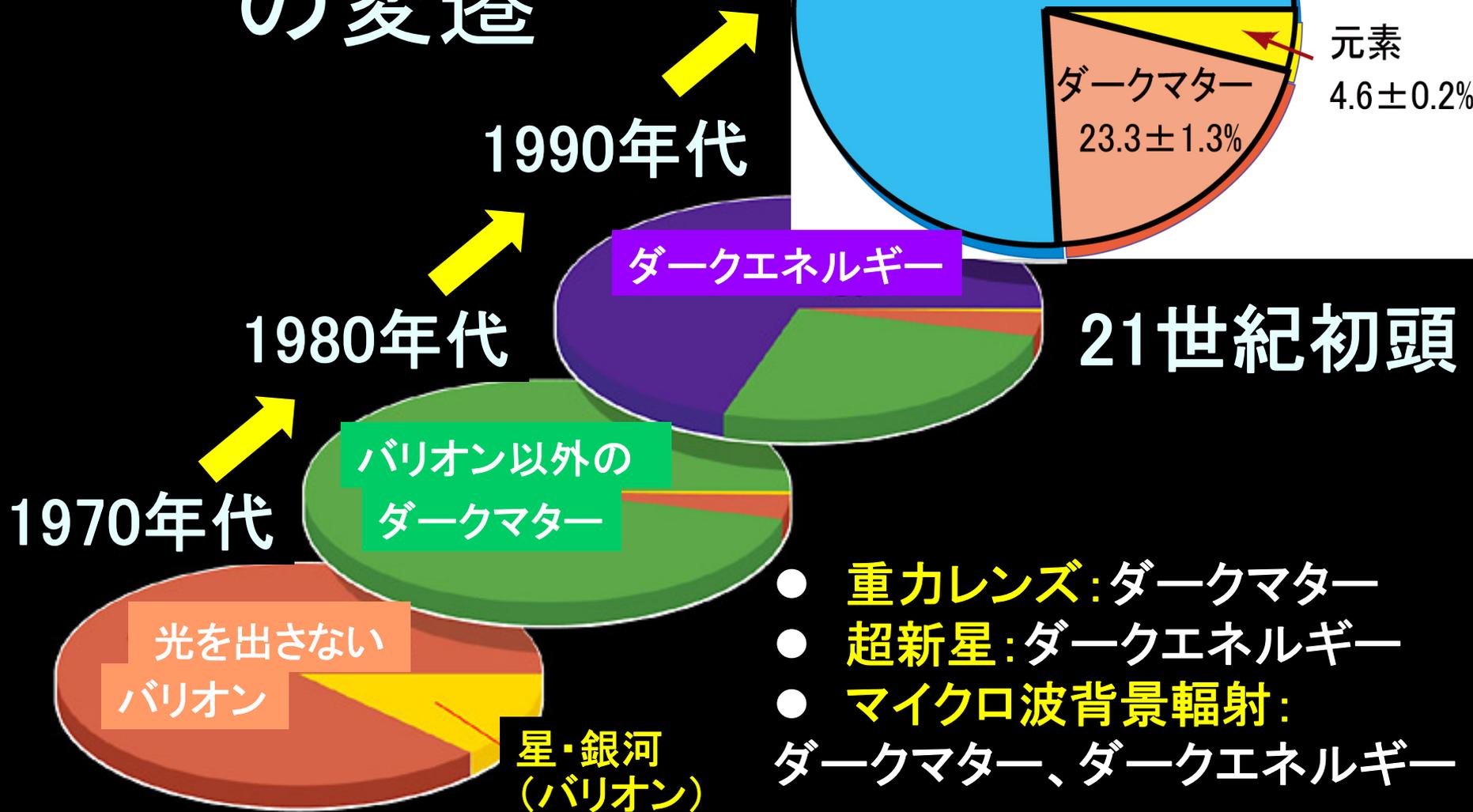
- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量
- 未知の素粒子が正体？

通常物質(元素)

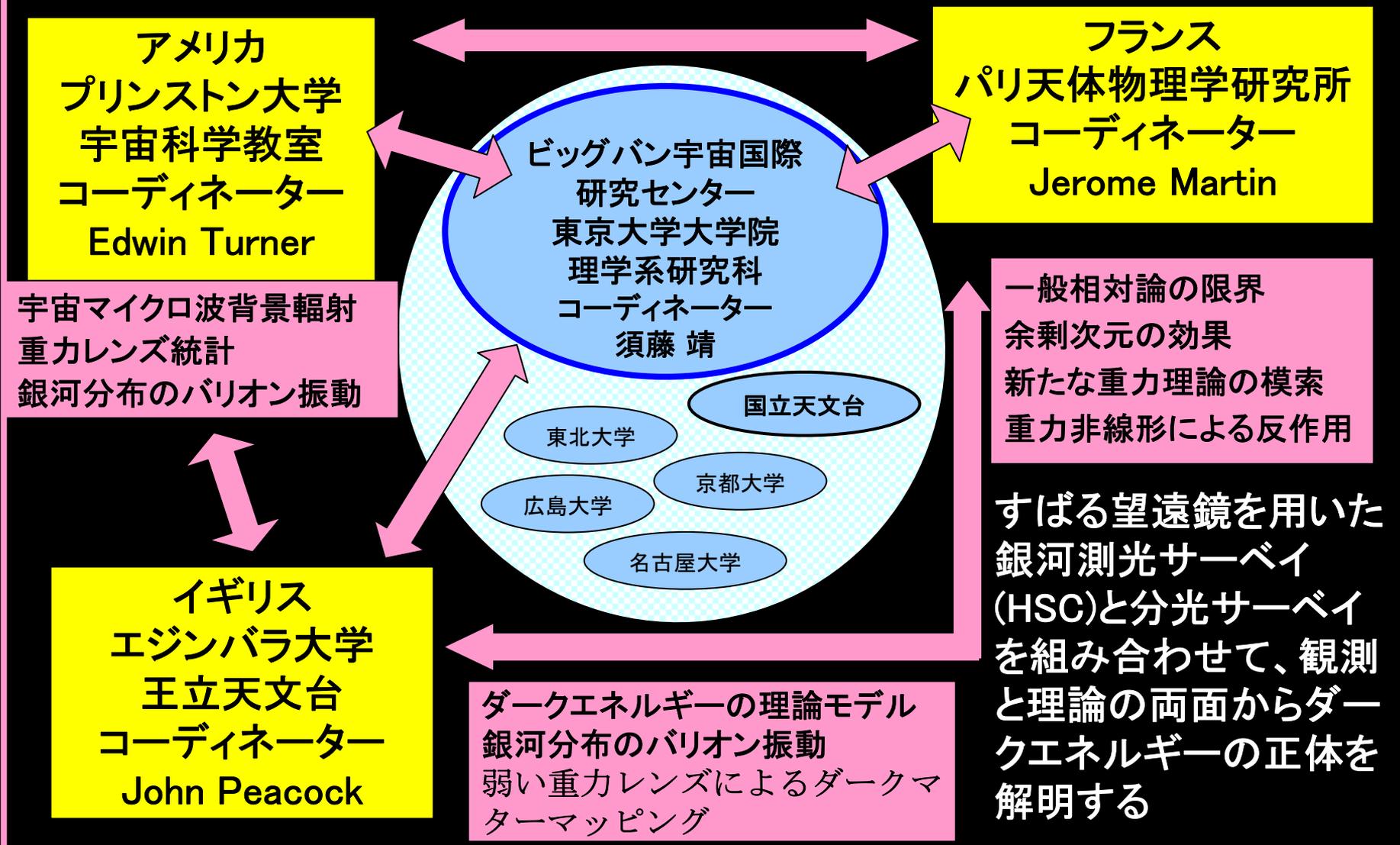
- 現時点で知られている物質は実質的にはすべて元素(陽子と中性子)からなる

- 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



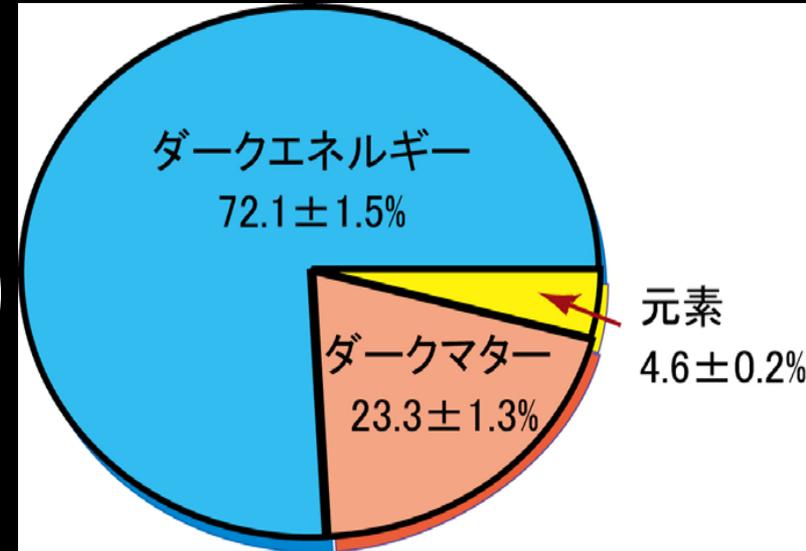
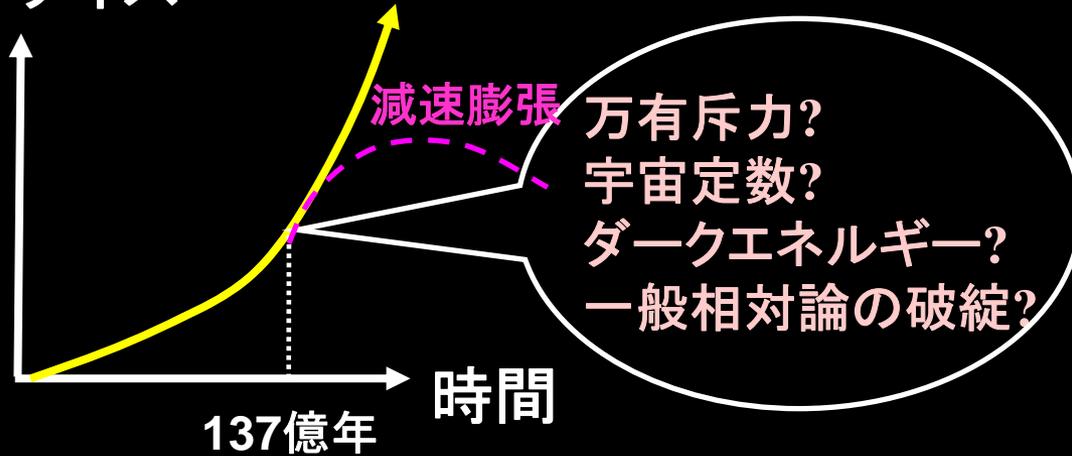
ダークエネルギー研究国際ネットワーク



宇宙の96%は正体不明

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



■ 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

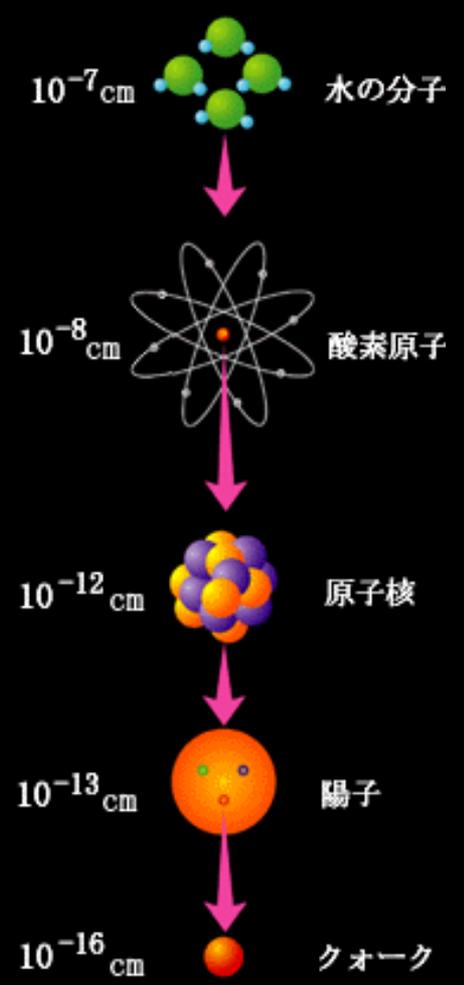
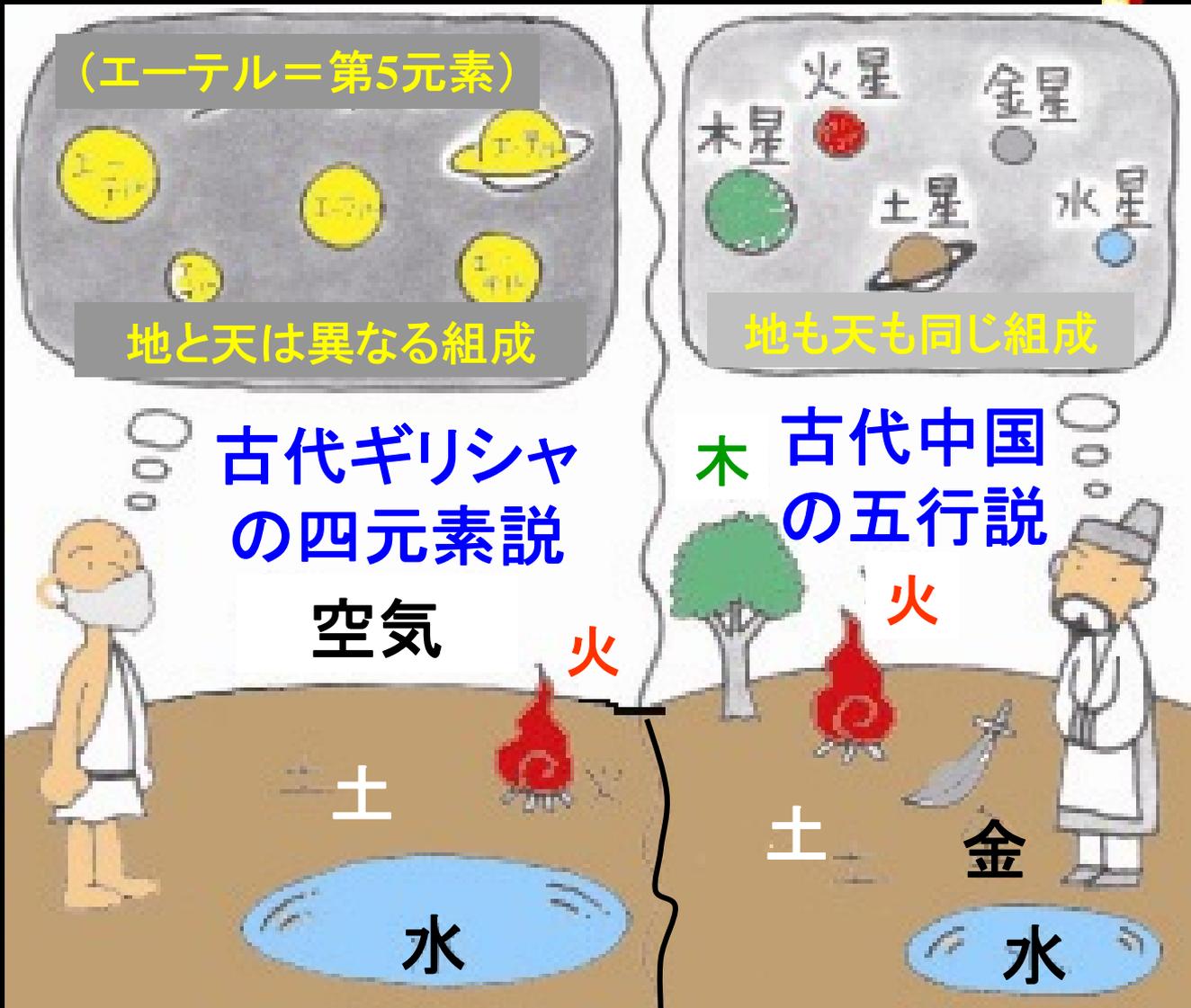
■ いずれであろうと21世紀の科学を切り拓く鍵

講演2

太陽系外惑星

もう一つの夜空のムコウ

森羅万象の起源：天と地と



(いずもりよう:須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

ものは何からできているのだろうか？

■ 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

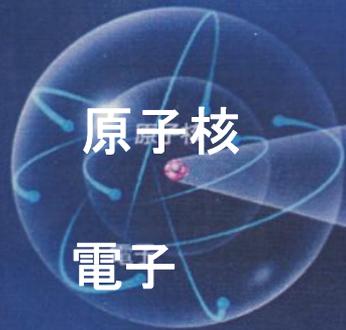
- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子)⇒素粒子(電子、ニュートリノ、クォーク・レプトン)



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

物質を構成しているもの



原子

原子核

中性子

陽子

中性子

陽子



クォーク

	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	電子ニュートリノ	ミュー・ニュートリノ	タウ・ニュートリノ
	電子	ミュー粒子	タウ粒子
クォーク	ダウン	ストレンジ	ボトム
	アップ	チャーム	トップ

原子核の周囲を電子がまわって原子をつくる。原子核は陽子と中性子から、陽子と中性子はアップ・クォークとダウン・クォークから構成されている。第2世代と第3世代のクォークとレプトンは、粒子加速器を用いるなどして、高エネルギー状態にならないとあらわれない。われわれの世界の物質は第1世代のクォークとレプトンからできているといえる。

宇宙を構成しているもの

宇宙の大構造

銀河群



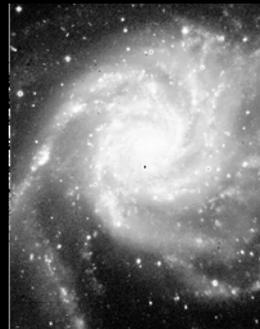
矮小銀河



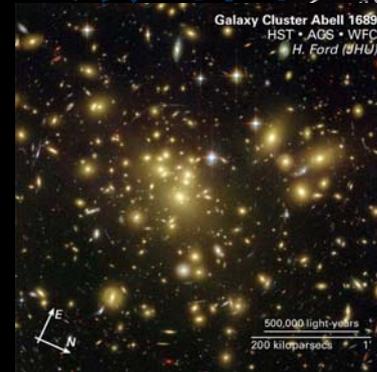
太陽系



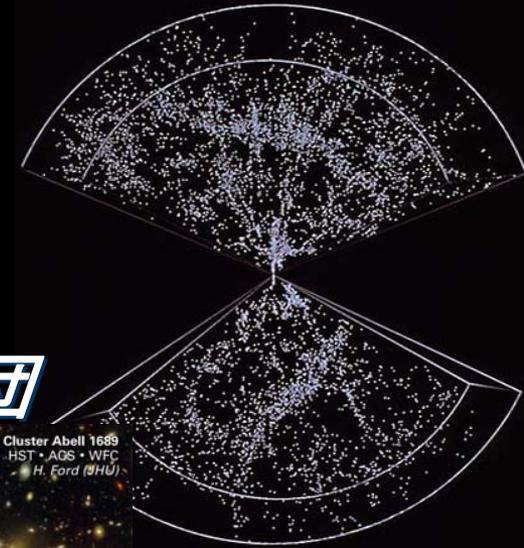
銀河



銀河団

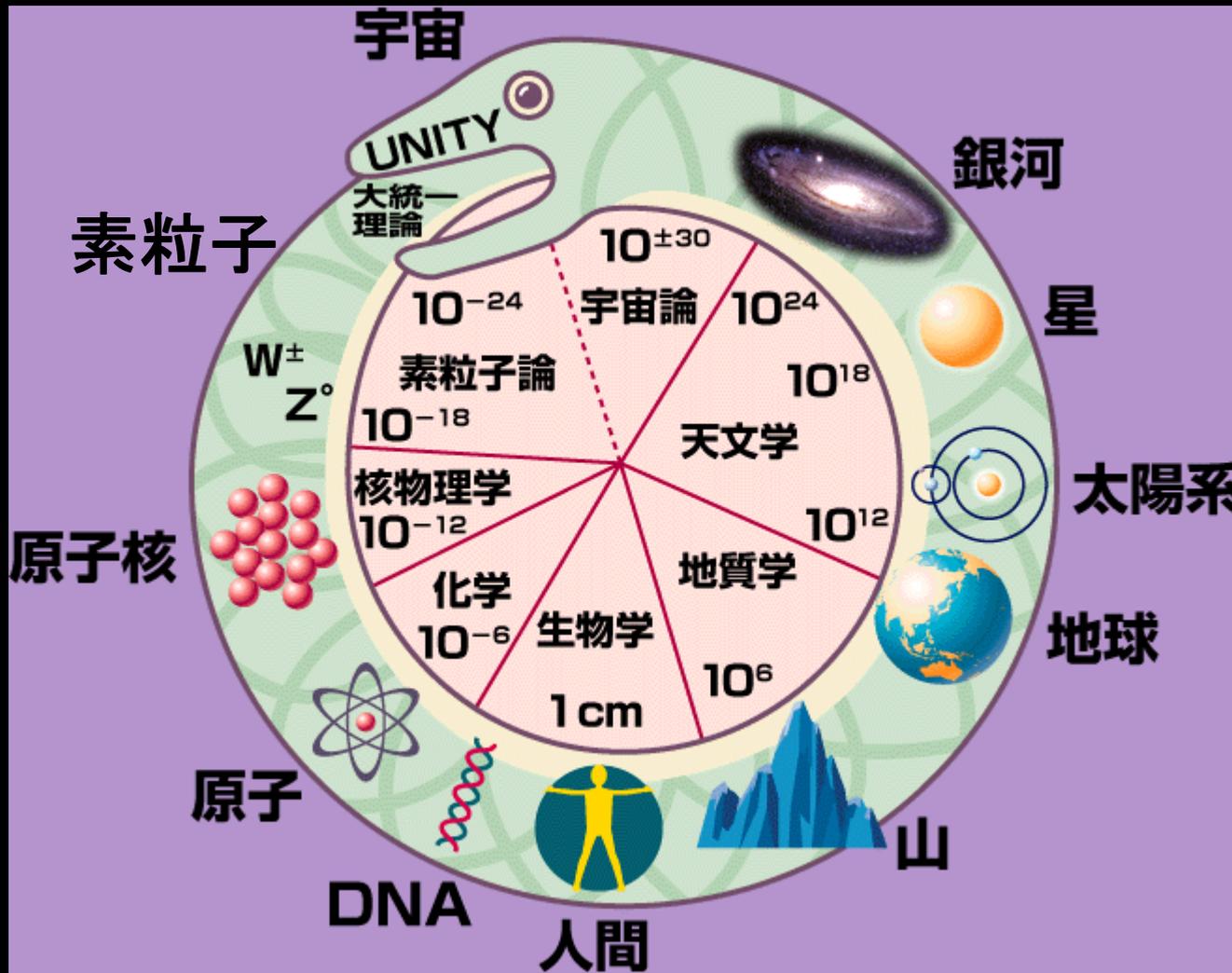


星団



天体諸階層の典型的大きさ [光年]

自然界の成り立ち



- 宇宙の大きさは約 10^{27} cm , すべての物質を形づくる素粒子の大きさは約 10^{-24} cm
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とは宇宙の進化を通じて結びついている

シェルドン グラシヨー 著 “Interaction”のなかの図をもとに作成

もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

■ 宇宙の果てと太陽系外惑星

■ 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる

- 本当は明るいのだが遠く
にあり暗く見える天体

⇒ 宇宙の果てにある銀河

- すぐ近くにあるのだが本
当に暗い天体

⇒ 銀河内にある系外惑星



太陽系外惑星とはどんなものか

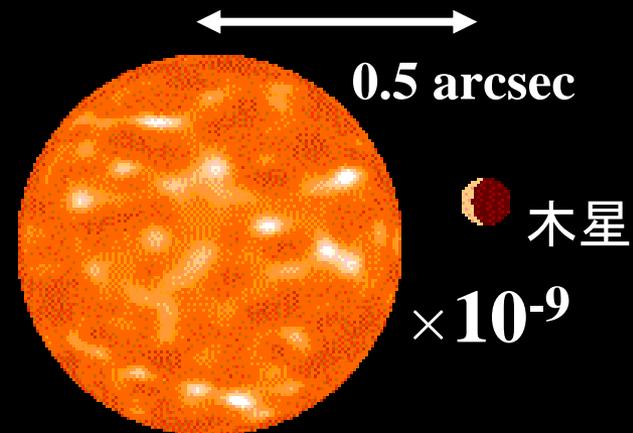
- 水金地火木土(天海冥)のその先？
- わが太陽系の拡大
 - 1781年:天王星の発見
 - 1846年:海王星の発見
 - 1930年:冥王星の発見
- 1995年:初めての太陽系外惑星の発見
- 哲学から科学へ
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在する
 - エピキュラス(紀元前341年~270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
 - アリストテレス(紀元前384年~322年)

惑星は直接見えるか？

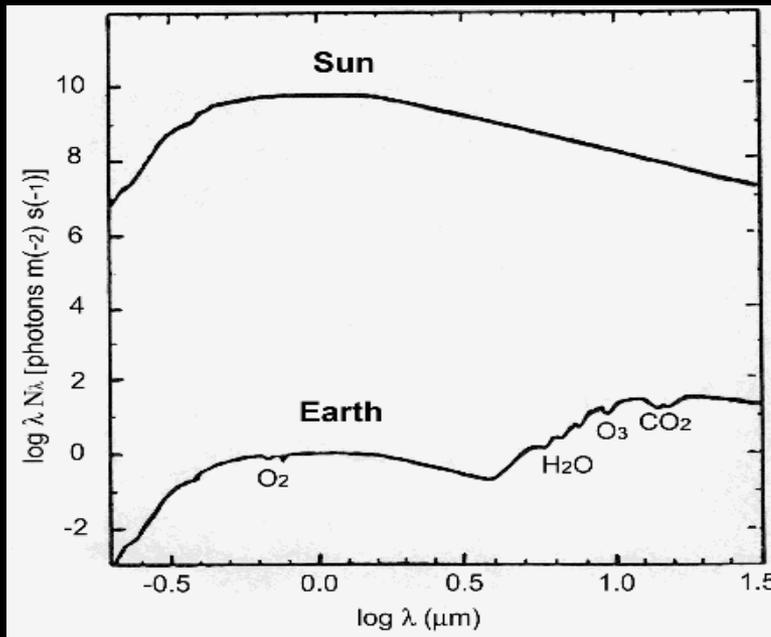
30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級 (可視域)

主星との角距離: 0.5秒角



太陽



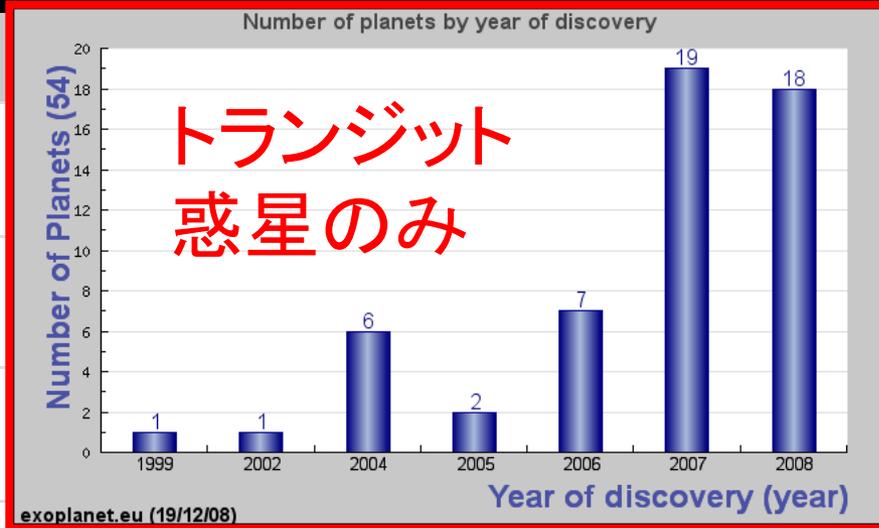
地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能！

太陽系外惑星発見の歴史

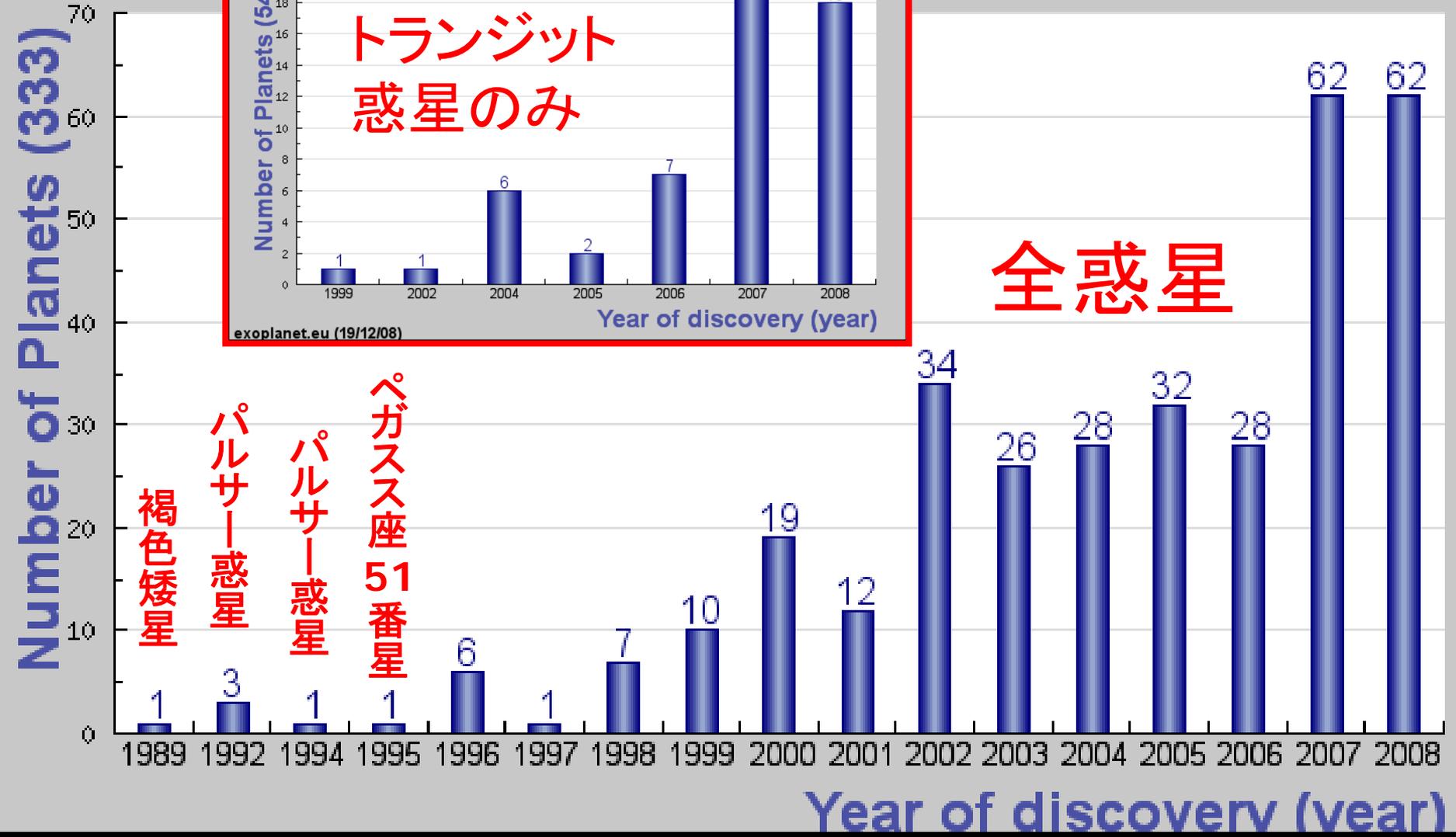
- 1995年：初めての太陽系外惑星
- 1999年：トランジット惑星（影：可視光）
- 2001年：惑星大気初の検出（ナトリウム）
- 2005年：トランジット惑星（光：赤外線）
- 2005年：惑星公転軸の傾きの発見
- 2009年7月1日時点で343個の系外惑星
（複数の惑星を持つ系が31個）

太陽系外惑星(候補)の発見年表



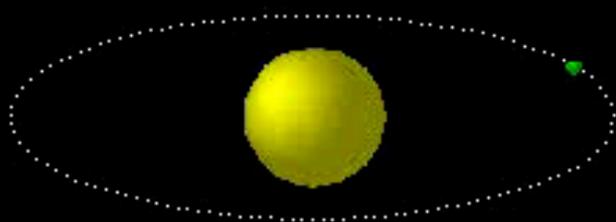
discovery

全惑星



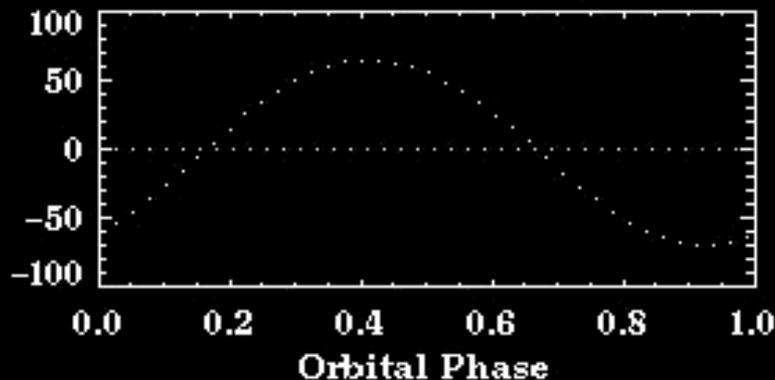
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



$$K = 67.4 \text{ m/s} \quad e = 0.03$$
$$\omega = 210.0 \text{ deg.} \quad \sin(i) = 0.3 \text{ (*)}$$

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



■ ドップラー法

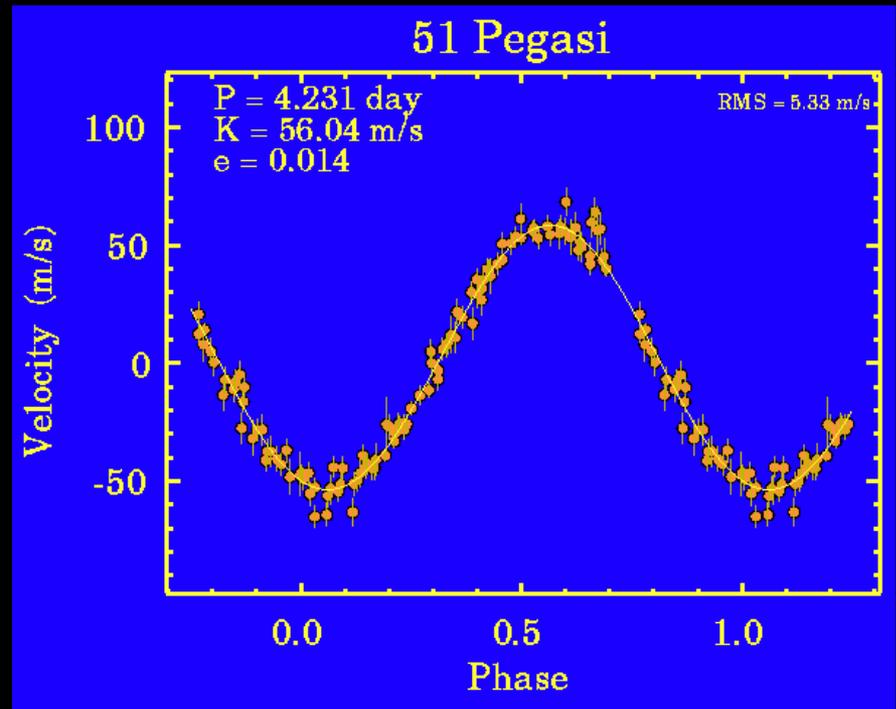
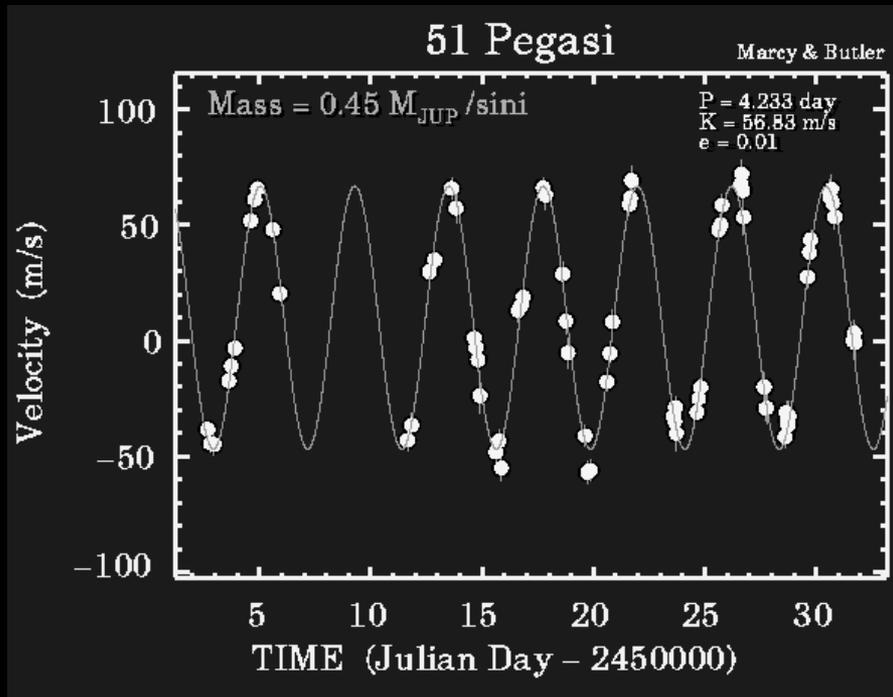
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ トランジット法

- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることで星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

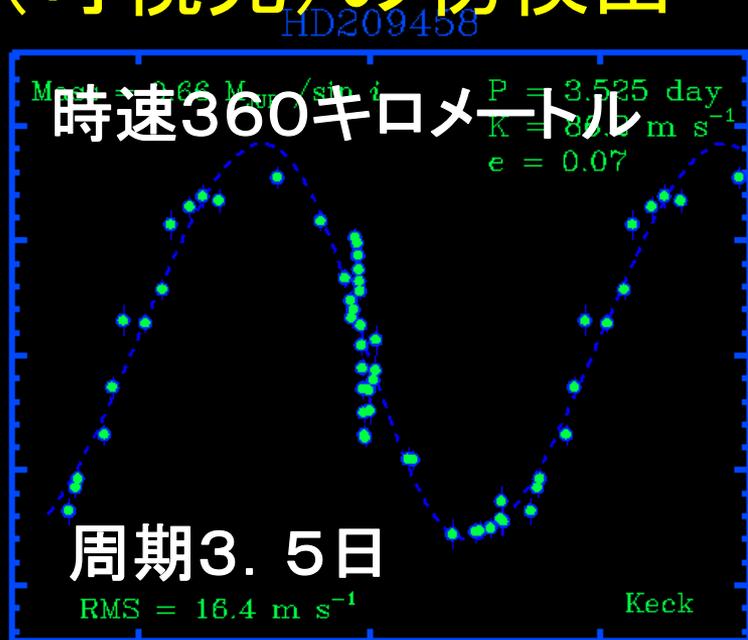
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



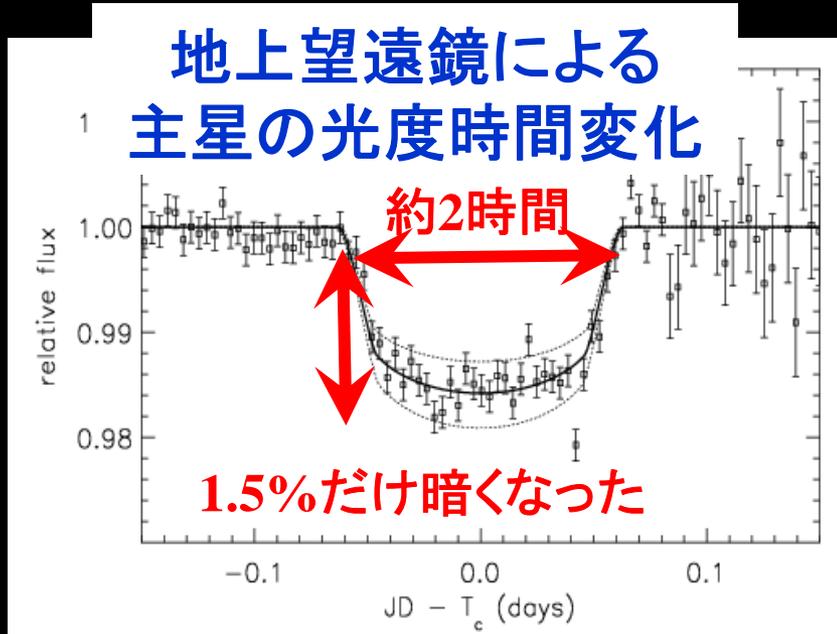
初めてのトランジット惑星HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出



地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

Henry et al. (1999), Charbonneau et al (2000)





金星

水星

2008年8月1日

皆既日食@中国酒泉

柴田一成氏撮影

(京都大学、世界天文年
全国同時七夕講演会実行
委員会委員長)

今後の系外惑星研究ロードマップ

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の実見 (2002)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

- 系外惑星リング、衛星の実見
- 地球型惑星、居住可能惑星の実見
- 惑星の直接検出(測光&分光)
- バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定
- 地球外生命の実見



第二の地球はあるか？



- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(居住可能)
 - +偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

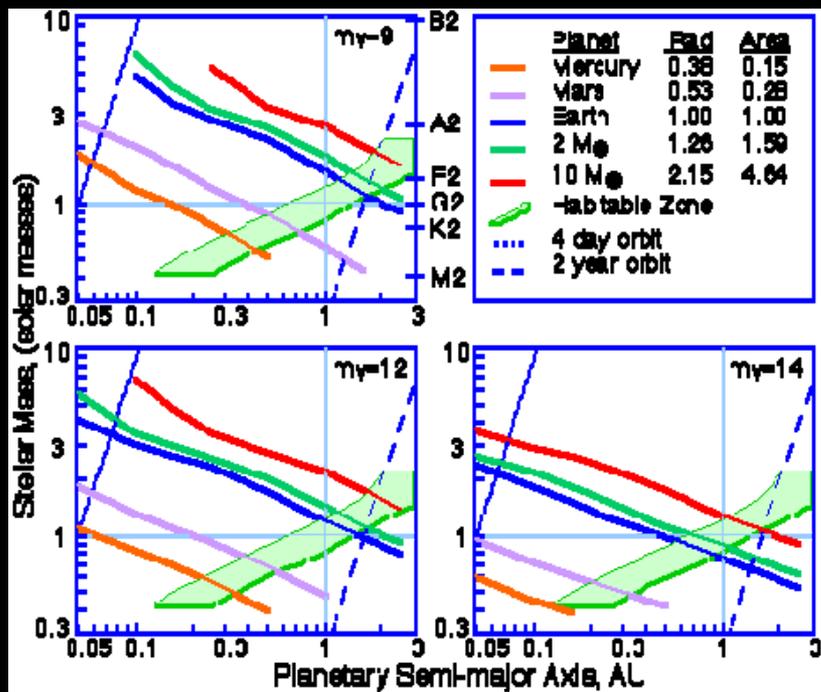
Terra衛星のMODIS検出器のデータ

<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.nasa.gov/home/index.html>

ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星の測光サーベイ:
地球型(±ハビタブル)惑星の発見をめざす



<http://kepler.nasa.gov/>

バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

■（居住可能）地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

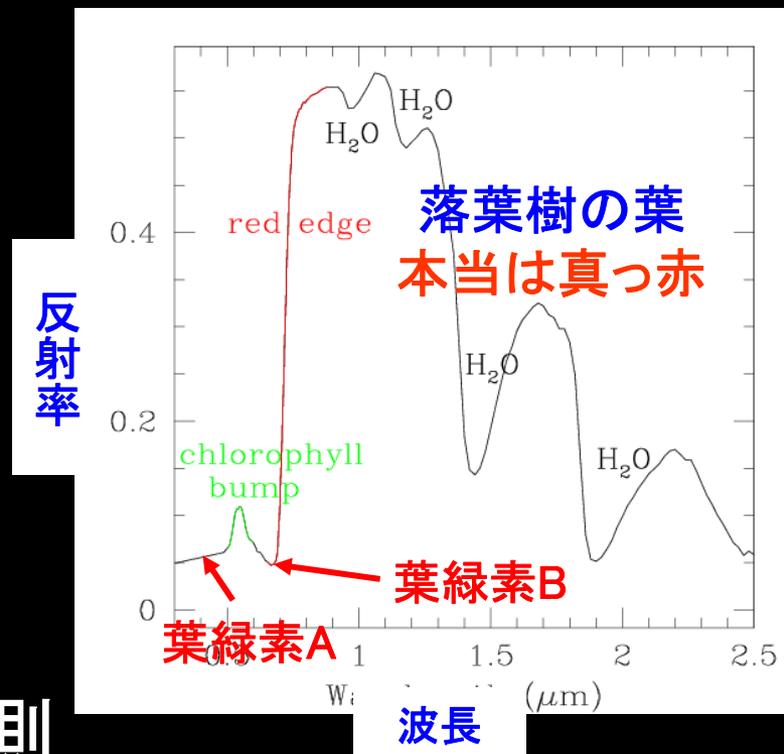
■ Biomarker の探求

■ 酸素、オゾン、水の吸収線

■ 植物の red edge

■ *Extrasolar planets from extrasolar plants*

■ とにかく精密測光・分光観測



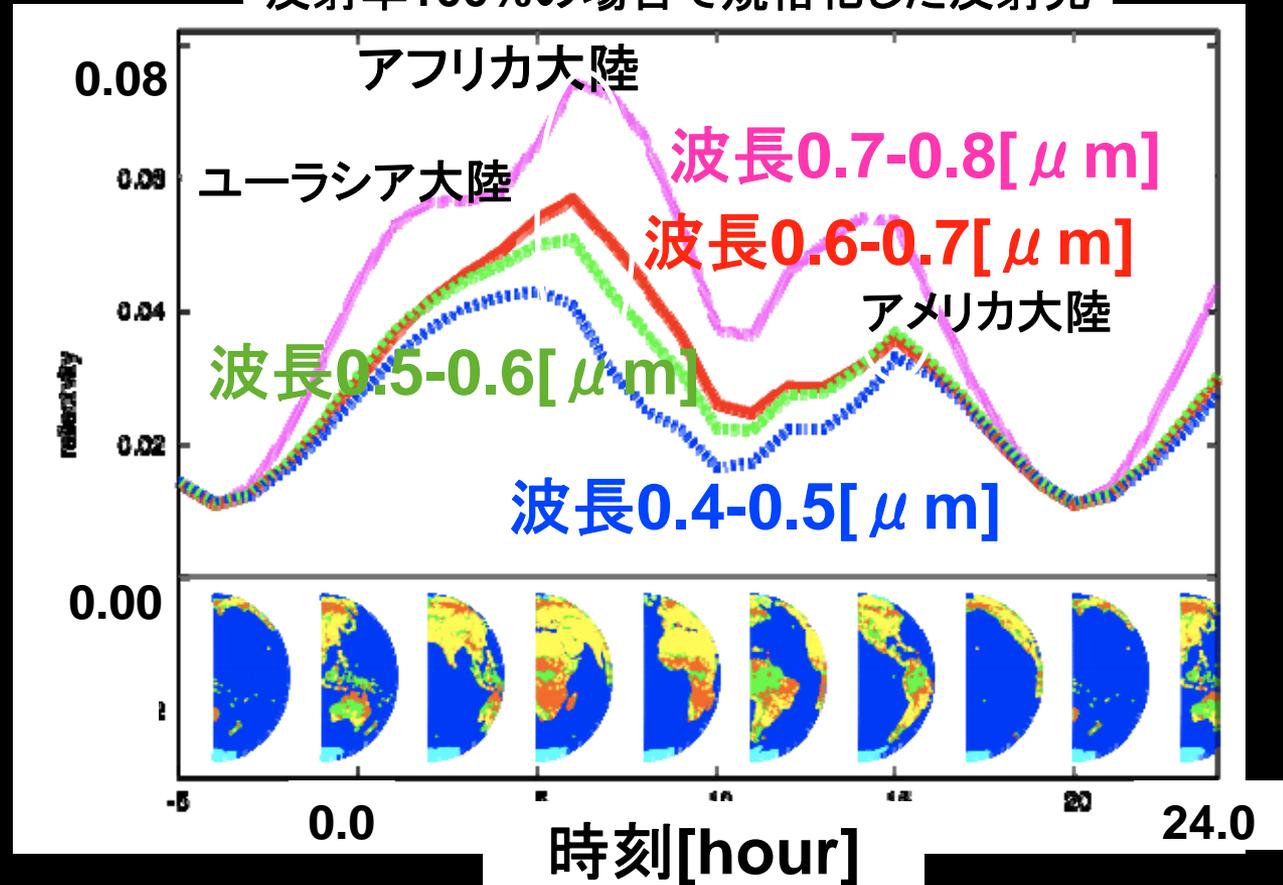
Seager, Turner, Schafer & Ford:
astro-ph/050330

地球は青かった？



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

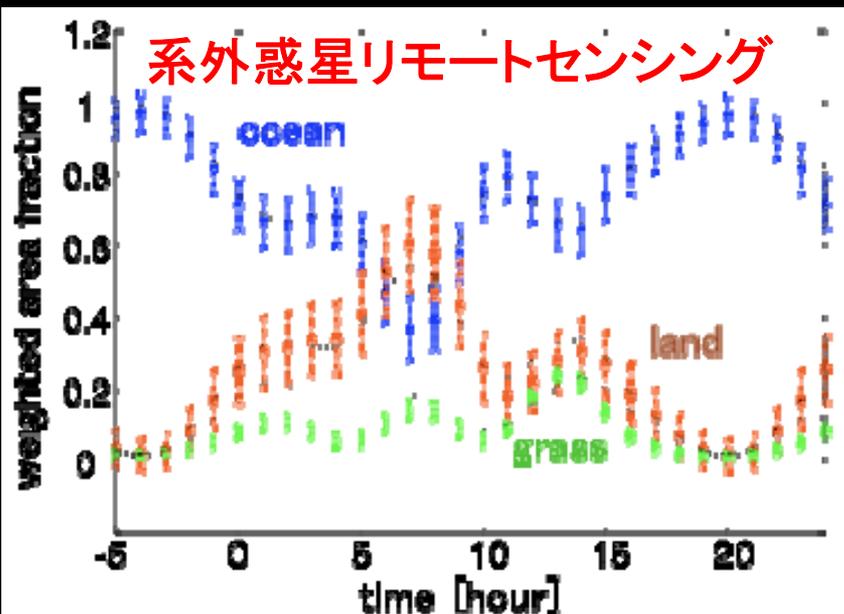
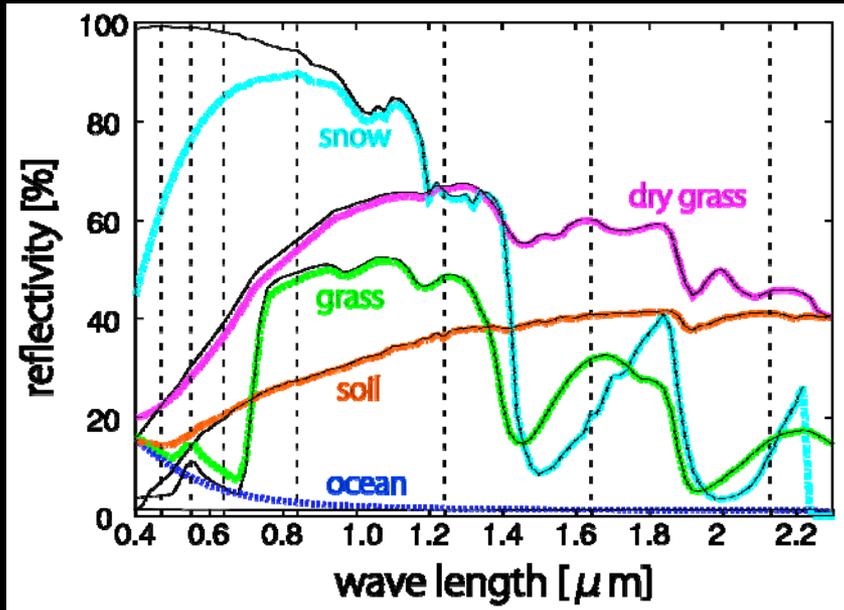
反射率100%の場合で規格化した反射光



- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

Fujii et al. in prep.

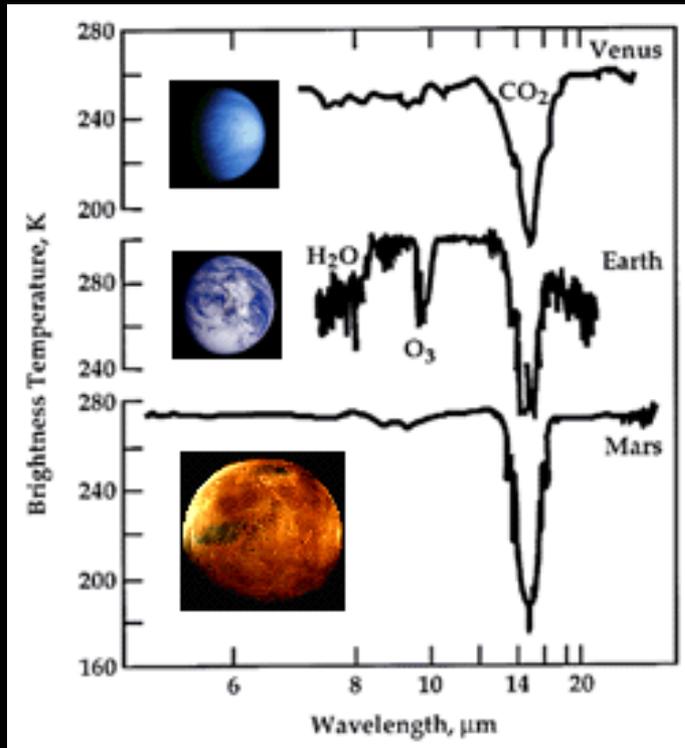
地球の色から表面情報を再構築する



Fujii et al. in prep.

- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径2mの宇宙望遠鏡で2週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮
- レイリー散乱の一次項近似
- 5つの成分 (ocean, soil, grass, dry grass, snow) で近似し、7つの測光バンドデータから再構築
- 結構イケテル!

系外惑星から宇宙生物学へ



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、核爆発、植物、、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に生物が存在するかどうかを天文観測だけで説得できるか？ Biomarker を特定できるか？

予想もできない展開が待っている

■ 最初に起こるのはどれだろう

- 地球外生物の痕跡の天文学的検出
- 実験室での人工生物の誕生
- 地球外文明からの交信の検出
- 地球文明の破滅（いったん発達した文明は、疫病、核戦争、資源の枯渇などの要因で不安定）

■ 交信できるレベルまで安定に持続した地球外文明の有無を知ることは、我々の未来を知ることに等しい

目に見えない ≠ 存在しない

何も見えないこの青空の向こうには
無数の星々が存在する



(国立天文台すばる観測所、田中壺氏撮影)

A night sky filled with stars, with a large telescope dome visible in the foreground. The text is overlaid on the top half of the image.

輝く星々を包む暗闇もまた我々が未だ
知らない存在によって満たされている

(国立天文台すばる観測所、田中壺氏撮影)

暗黒成分を通してみる夜空の向こうに
もう一つの地球・世界・宇宙があるので
はないか

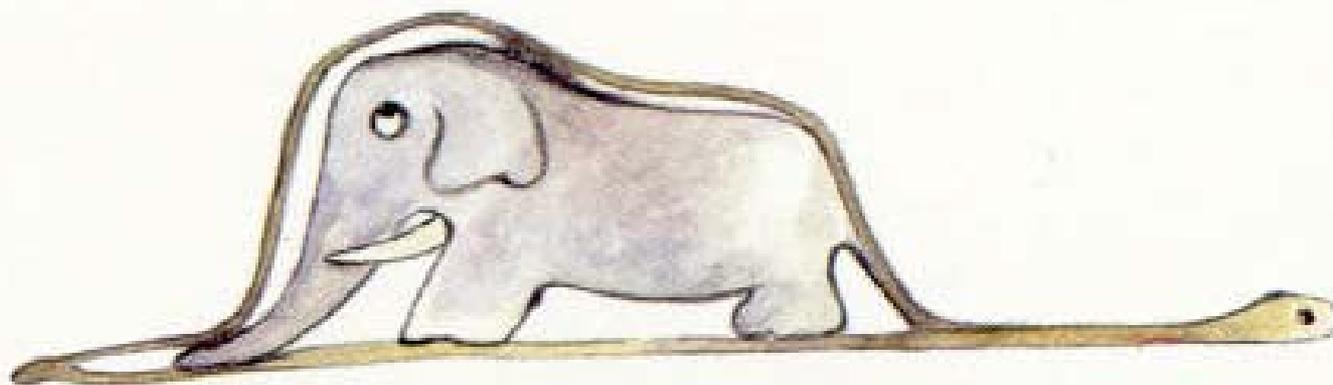
という疑問を持つことこそ本質

世の中の本当の姿を見抜く



*Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait
un serpent boa qui digérait un éléphant*

見えているものがすべてではない



*J'ai alors dessiné
l'intérieur du serpent boa, afin que les grandes personnes puissent
comprendre. Elles ont toujours besoin d'explications*



*L'essentiel est invisible
pour les yeux*

大切なものは目にはみえない



*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*