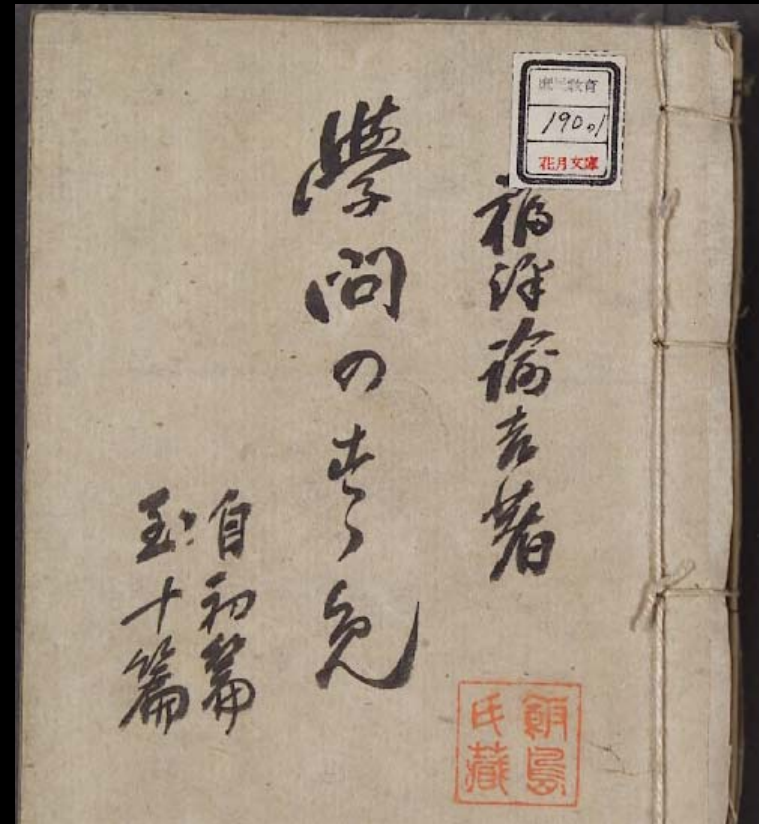
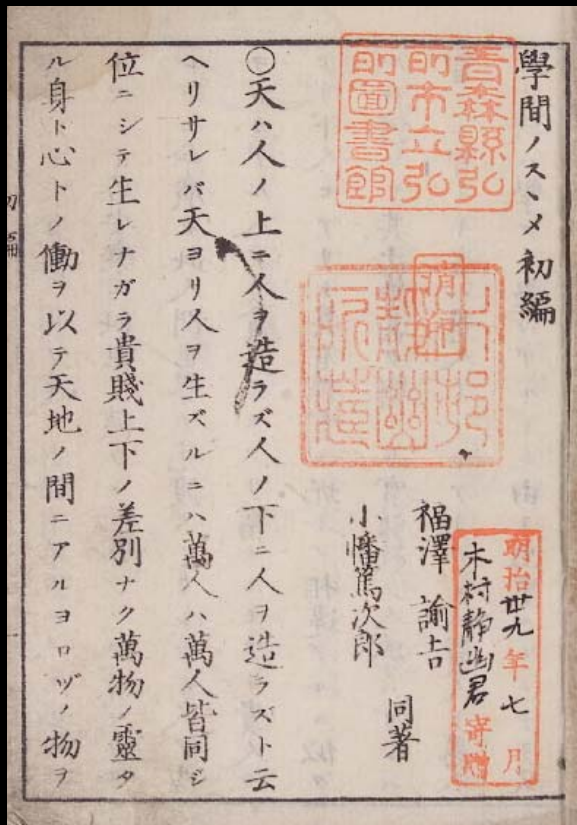


学問ノススメ



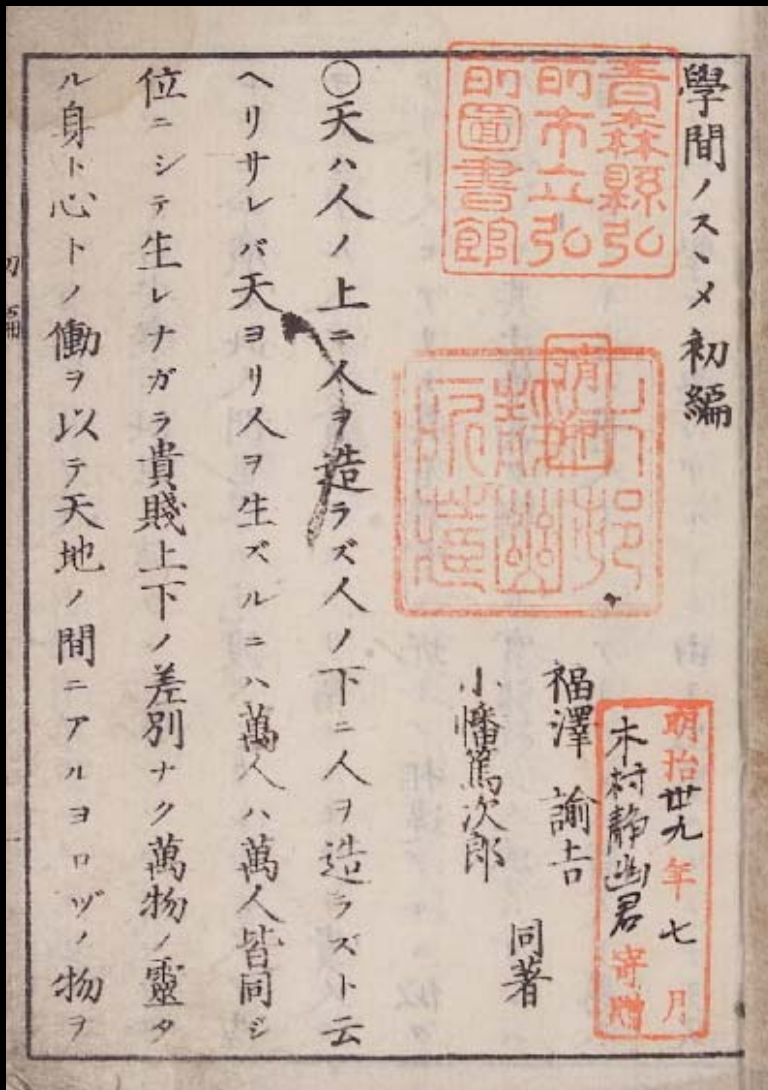
東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

大阪大学理学部 理学への招待 第5回 2010年6月10日 14:40-16:10

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2010j.html

福沢諭吉：学問ノススメ初編

- 「天は人の上に人を造らず人の下に人を造らず」と言えり
- されども今広くこの人間世界を見渡すに、かしこき人あり、おろかなる人あり、貧しきもあり、富めるものあり、貴人もあり、下人もありて、**その有様雲と泥との相違あるに似たるは何ぞや**
- その次第甚だ明らかなり。「実語教」に、「人学ばざれば智なし、智なき者は愚人なり」とあり。**されば賢人と愚人との別は、学ぶと学ばざるとに由って出来るものなり**



究理学（福沢諭吉：学問ノススメ初編）

- されば今かかる実なき学問は先ず次にし、専ら勤むべきは人間普通日用に近き実学なり
- 譬えば、いろは四十七文字を習い、手紙の文言、帳合の仕方、算盤の稽古、天秤の取扱い等を心得、なおまた進んで学ぶべき箇条は甚だ多し
- 究理学とは天地万物の性質を見てその働きを知る学問なり

證據ナリサレバ今斯ル實ナキ學問ハ先ヅ次ニシ専ラ
勤ムベキハ人間普通日用ニ近キ實學ナリ譬ヘバイロ
ハ四十七文字ヲ習ヒ手紙ノ文言帳合ノ仕方算盤ノ稽
古天秤ノ取扱等ヲ心得尚又進テ學ブベキ箇条ハ甚多
シ地理學トハ日本國中ハ勿論世界萬國ノ風土道案内
ナリ究理學トハ天地萬物ノ性質ヲ見テ其働ヲ知ル學

究理学と物理学

■ 究理学 = natural philosophy

- 17世紀頃の英国で、思弁的な哲学と区別して人々が教養として身につけるべき「実験的な自然の哲学」を意味した
- Philosophiae naturalis principia mathematica
- 究理学 = 物理学 + 心理学 ≠ 理学

■ 物理学 = physics

- 19世紀末頃から実用的な知識の重要性を認識し、natural philosophyがphysicsに置き換わる
- 自然学(広義のphysics)
= 自然法則の究明 (natural philosophy)
+ 断片的な事実の集積 (狭義のphysics)

高校までの「勉強」と大学(院)での「学問」

■ 高校まで

- 学習(学んでくりかえす)、勉強(つとめはげむ)

■ 大学(特に大学院)では

- 学問(学びて問う)
- 受身のままずっと待っていても何も来ない
- 高校までの先生とは違い、大学の教員は親切ではない！
- 自分の適性を知る
- すべてを一人だけでやるのではなく、教員、友人、先輩、後輩と共に学び議論し研究する

典型的な研究者タイプと思われがちであるにもかかわらず実は研究者に向いていない人

- 他人とコミュニケーションがうまくとれない
 - 結果の批判を通じてさらなる発展が期待できない
- 本を読んで勉強することだけが好き
 - これでは新たな学問・研究にならない
- 難しい分野・問題・テーマだけが好き
 - 優れた学者と同じ道を歩んでいることで自分も優れた研究者であると勘違いする
- 語学力・文章力・表現力が低い
 - 実は私の日常のほとんどの時間は、日本語か英語での議論あるいは文章書きに費やしている
 - 実は理系でも(こそ)重要

試験が得意な人 ≠ 研究者に向いている人

- **大学入学までに行う試験での評価基準**
 - 正解が存在することがわかっている問題を
 - 決められた時間内に
 - 一人だけで何も見ず
 - すべての科目を万遍なく
- **これらは研究の現場とはすべて「矛盾する」**
 - 試験での秀才が必ずしも優れた研究者にはなっていない
- **人間の才能は1次元に数値化できるものではなく、多次元空間で表現すべきもの**
 - 必ずしも(とびぬけて)優秀である必要はない
 - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- **何よりも研究が好き・楽しめることが大前提**

なぜ科学する？

(自然)科学を学ぶ意味

- テストで良い点を取るためではない
- 楽しみながら、すこしでもより自然を理解する
- 世の中の不思議さを認識する
- 当たり前とされていることでも一度は疑ってみる
 - みんなが言っているからではなく自分で納得する
- 正しいことと間違っていることを見極める
 - 変な人(詐欺師、政治家、官僚、教員)に騙されない
 - 真実を合理的に理解し納得する
 - 善悪を区別する
- 科学を学んで良かったなあ、と思ってほしい

研究する楽しさ

- (どんなにつまらないことでも)世界で初めて発見する喜び
 - 自分がいち早く知り得たことの興奮
 - 成果を発表して共感してもらえることのうれしさ
- 単に結論を知識として受け入れるのではなく、自分の頭で理解する喜び
 - 「宇宙がビッグバンで始まったなどという知識は二束三文の価値もない。重要なのは、なぜそう考えられるかである。」 佐藤文隆(京大名誉教授宇宙物理)
- 自分一人では実現できないことを共同研究を通じて一緒に可能にしていく喜び
 - 自分の存在感の確認

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。

(大正十年三月、渋柿)

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

Henri Poincaré

(Science et méthode, 1908)

- *Le savant n'étudie pas la nature parce que c'est utile, il l'étudie parce qu'il y prend plaisir et il y prend plaisir parce qu'elle est belle. Si la nature n'était pas belle elle ne vaudrait pas la peine d'être connue, la vie ne vaudrait pas la peine d'être vécue.* (The scientist does not study nature because it is useful to do so. He studies it because he takes pleasure in it, and he takes pleasure in it because it is beautiful. If nature were not beautiful it would not be worth knowing, and life would not be worth living.)

Richard Feynman

(The Feynman lectures on physics, volume III,
Feynman's Epilogue: “purpose of my teaching”)

- I wanted most to give you some appreciation of the wonderful world and the physicist's way of looking at it, which, I believe, is a major part of the true culture of modern times. *(There are probably professors of other subjects who would object, but I believe that they are completely wrong.)*
- Perhaps you will not only have some appreciation of this culture; it is even possible that you may want to join in the greatest adventure that the human mind has ever begun.

夜空のムコウ



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



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とは思えない



(すばる観測所、田中壺氏撮影)

世界は何からできているのか？

■ 古代ギリシャの4元説

- 空気、土、火、水

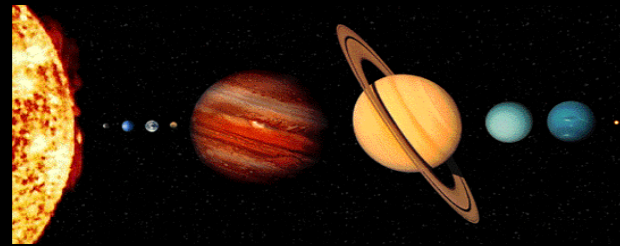
■ 中国の五行説

- (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

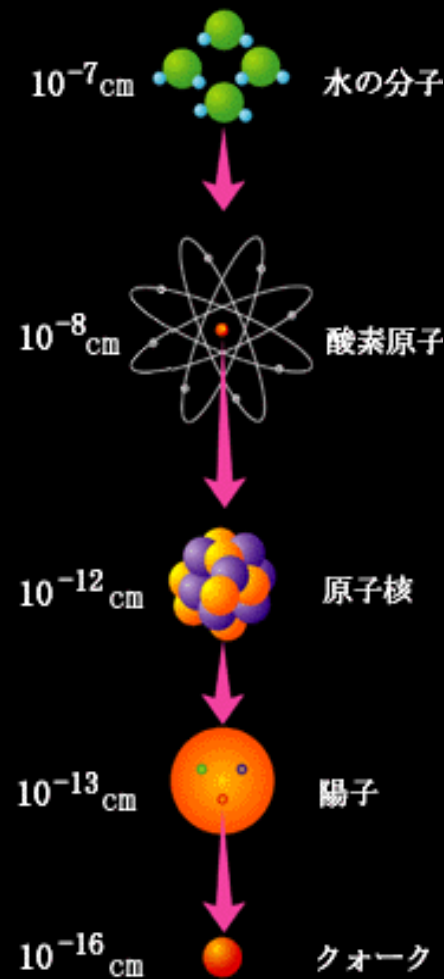
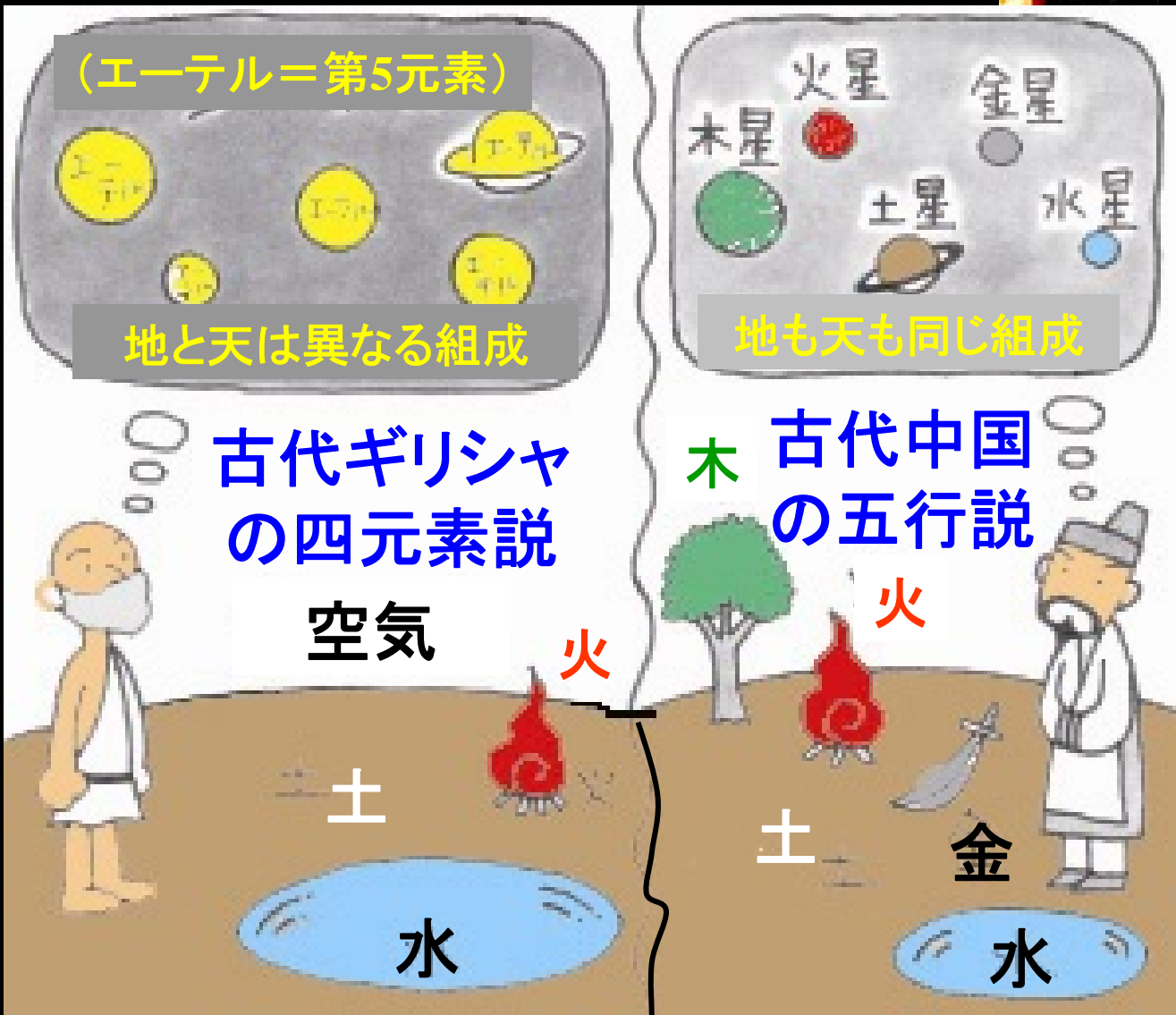
- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子)⇒素粒子(電子、ニュートリノ、クォーク・レプトン)



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

自然界に思いをはせる

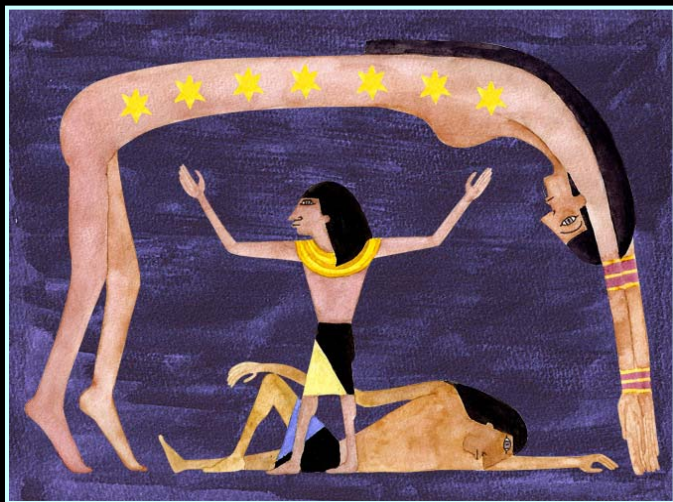


(いずれも 須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

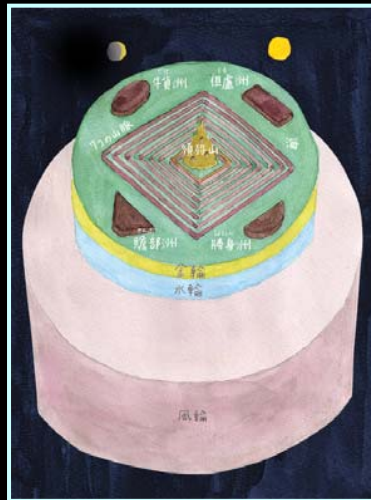
夜空のむこうの世界を探る

■ 見えない先はどうなっているのか

古代エジプト



仏教



古代インド



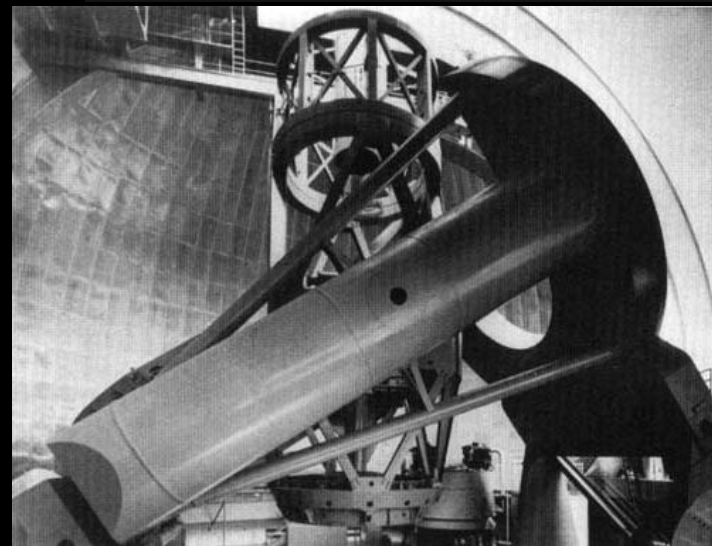
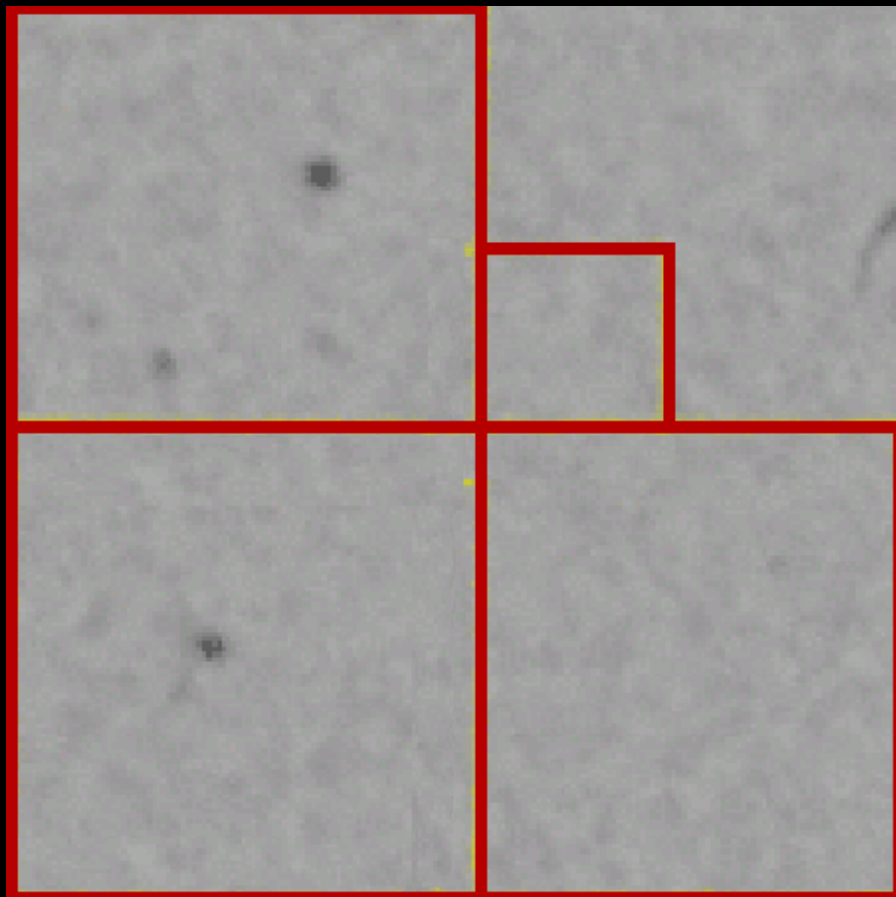
イラスト：羽馬有紗

■ みんな知りたいのに答えが(まだ)ない謎

- 宇宙は何からできているか？
- もう一つの地球はあるか？
- 生物はどうやって生まれたのか？

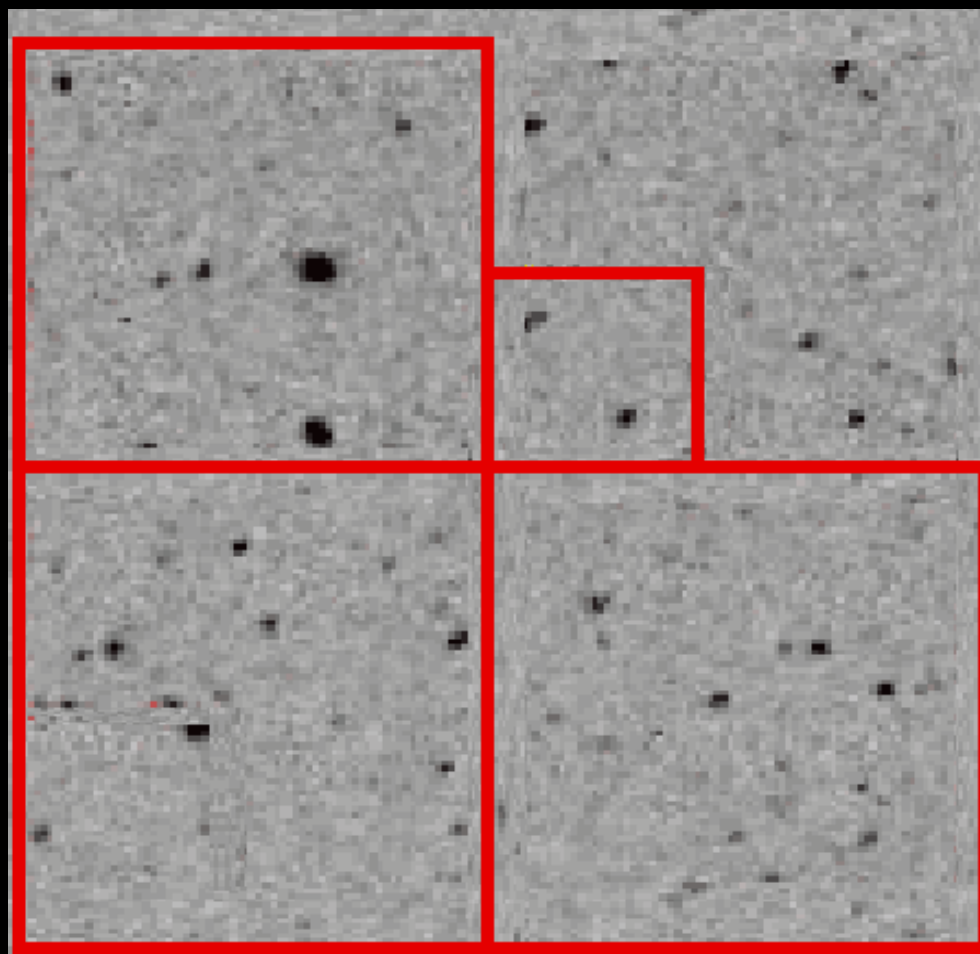
宇宙の果てを見る

宇宙を見る目の進歩 (1)



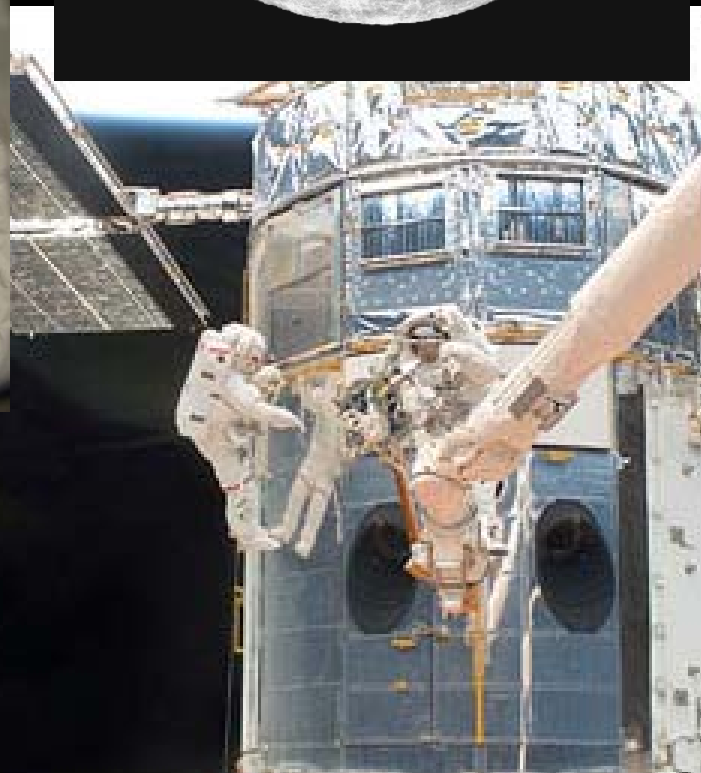
地上5m望遠鏡+写真乾板
100万×人間の眼

宇宙を見る目の進歩 (2)

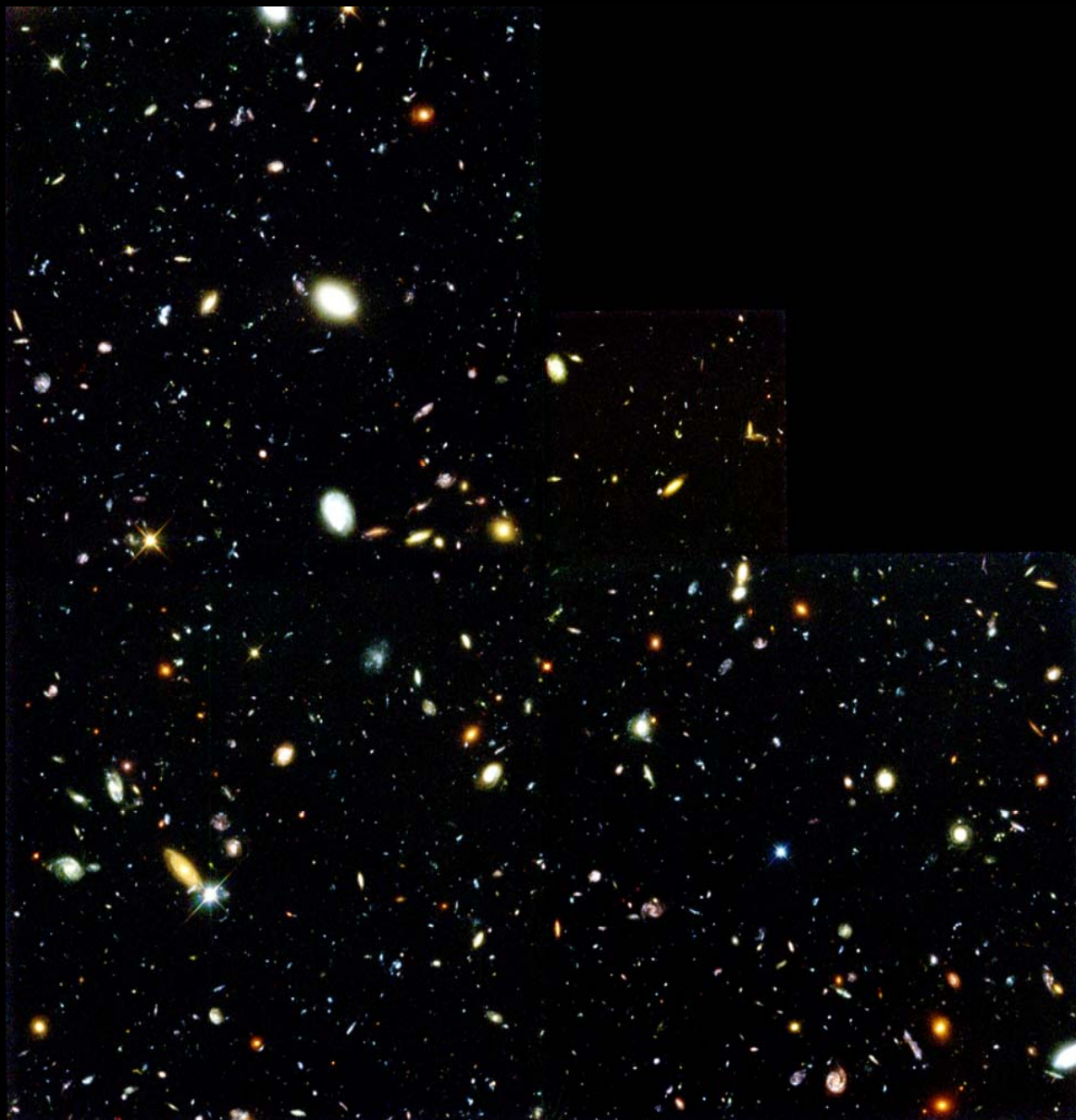


地上4m望遠鏡+CCD:
100×写真乾板

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

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

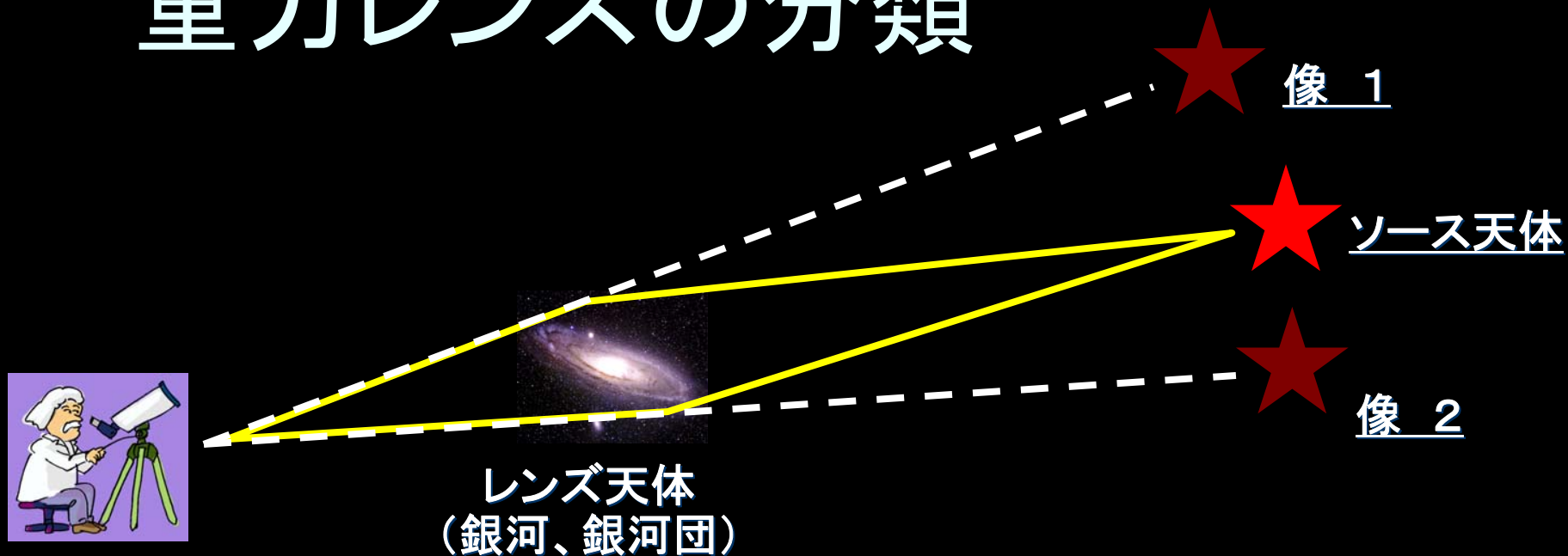
Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung $0,84^\circ$ betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (R = Sonnenradius - Mittelpunkt)

$\sim 50.84^\circ$

Sonne

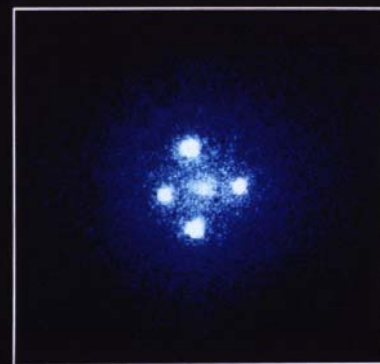
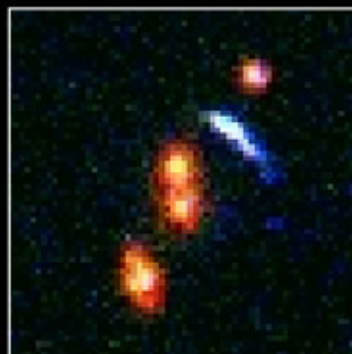
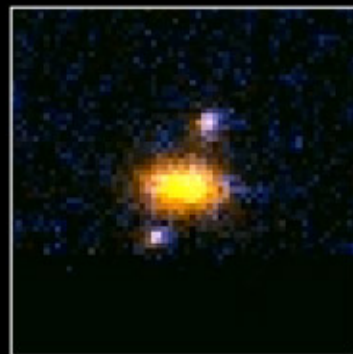
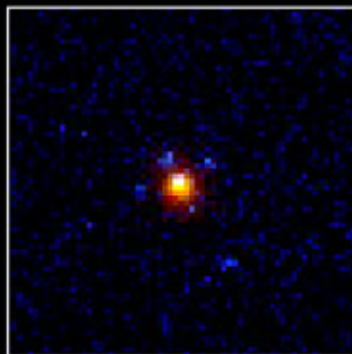
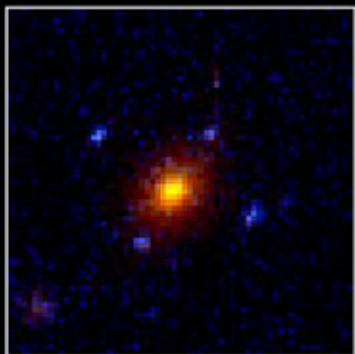
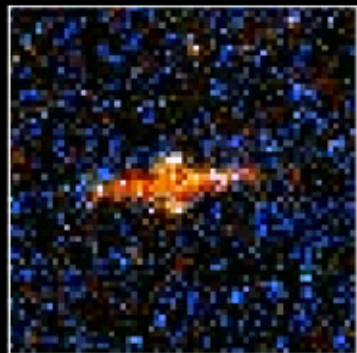
Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnen-nähe gewisse Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

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)

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)

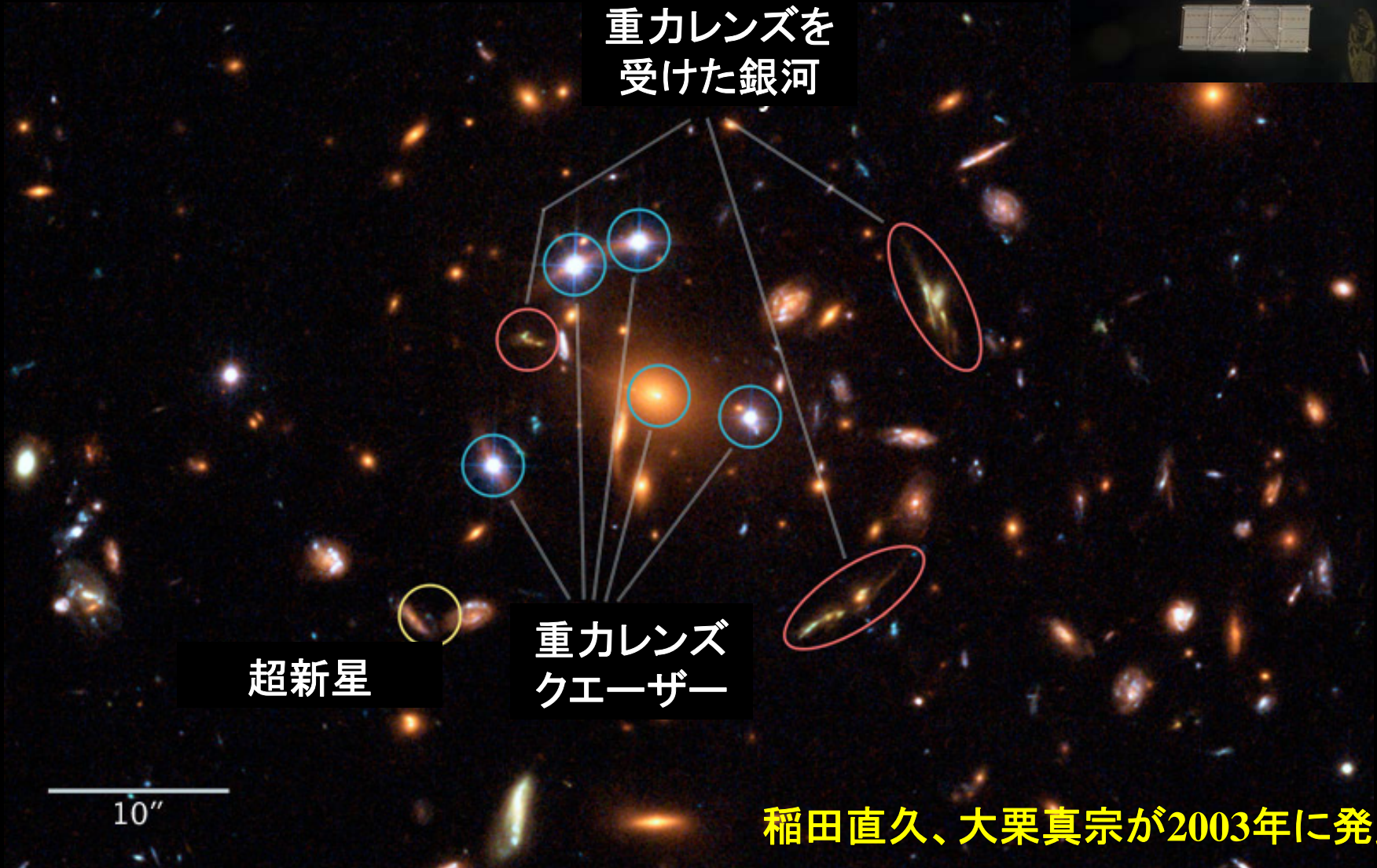
62億光年先にある
銀河団まわりの
ダークマター



重カレンズ天体
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

夜空はダークマターで満たされていた



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

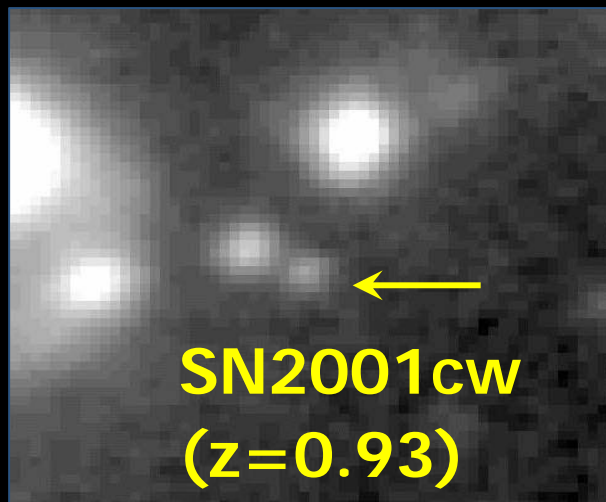
- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たしているものは存在するか
 - 仮にあるとしてもそのようなものは観測可能か
 - 「真空」には本当に何も無いのか
- ダークエネルギーは、空間的には一様分布していてもその密度は時々刻々変化する
 - 宇宙膨張は宇宙の密度の絶対的な値（何かとの差ではなく）によって決まる
 - 宇宙膨張の時間依存性を測定する
 - 時間軸に沿った違いを見る

遠方宇宙の距離指標: 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

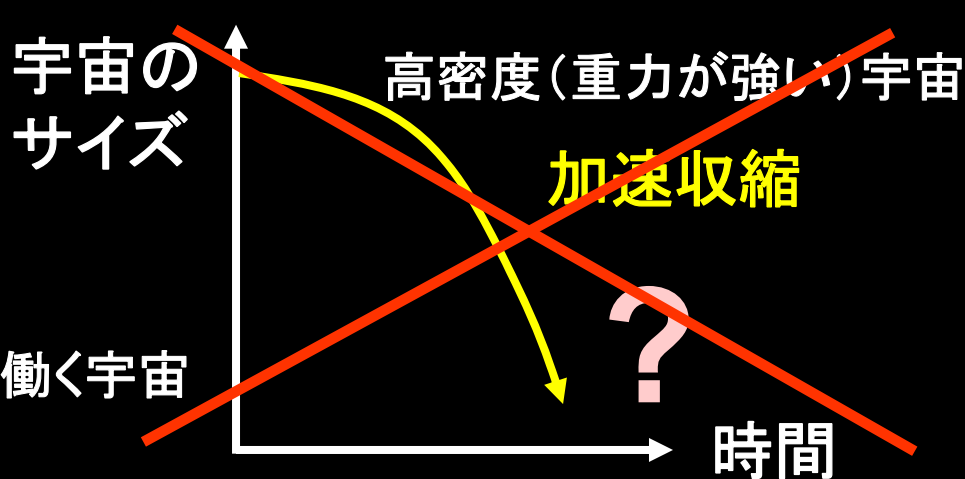
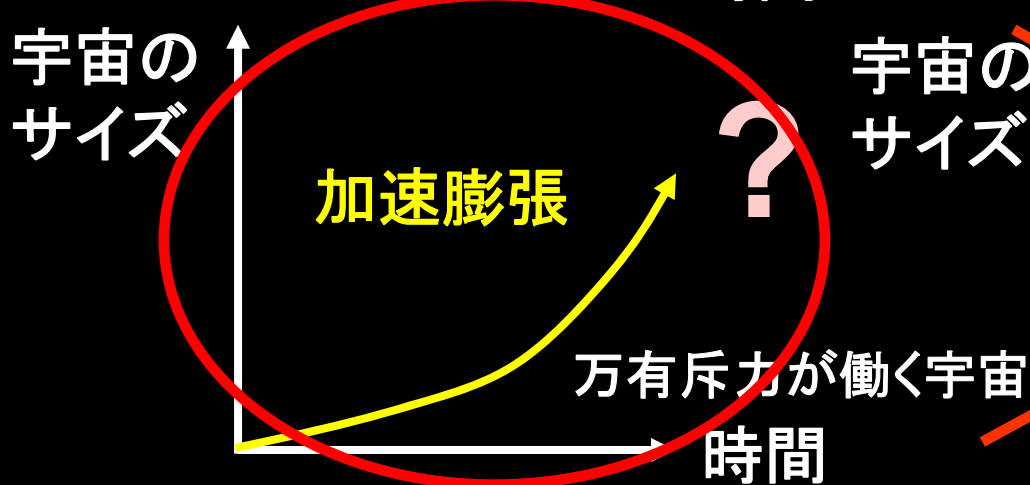
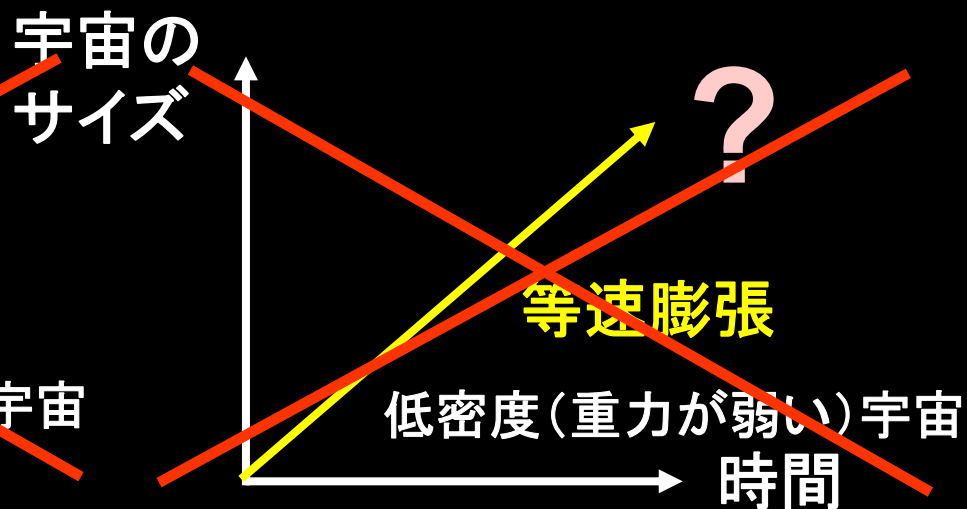
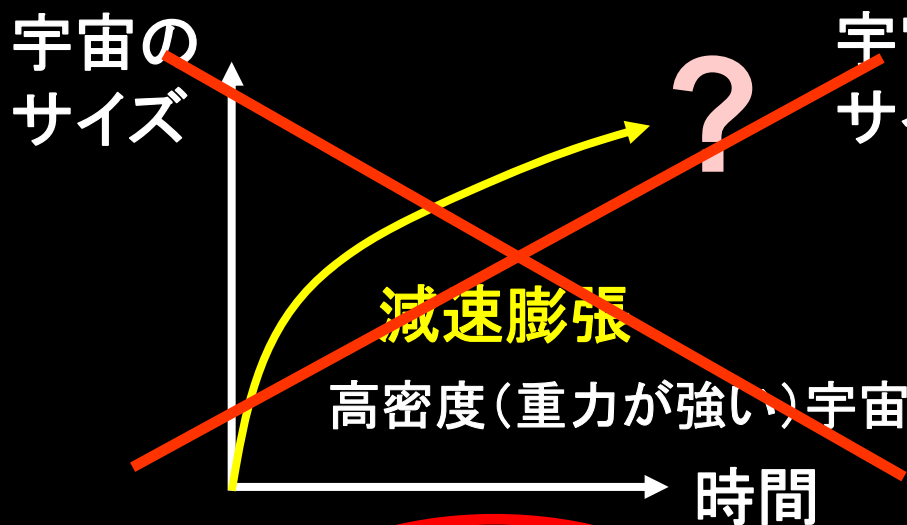
超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

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



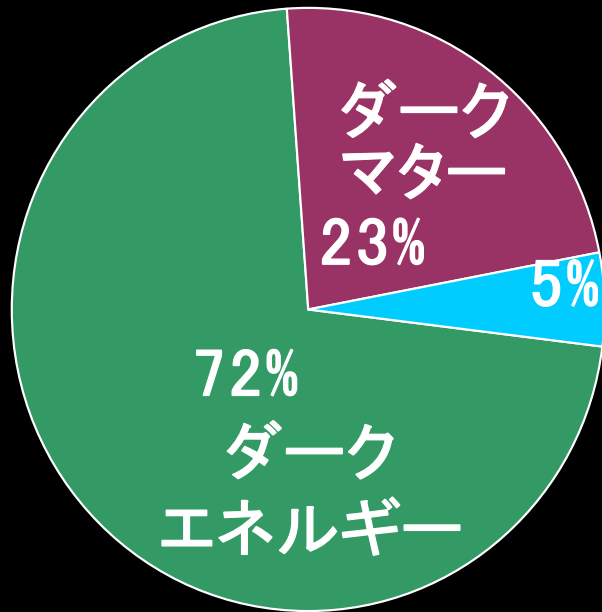
宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 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)

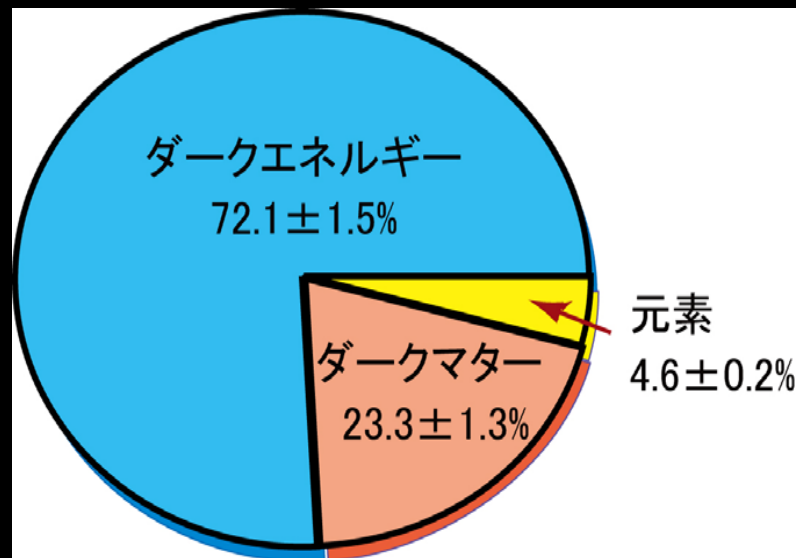
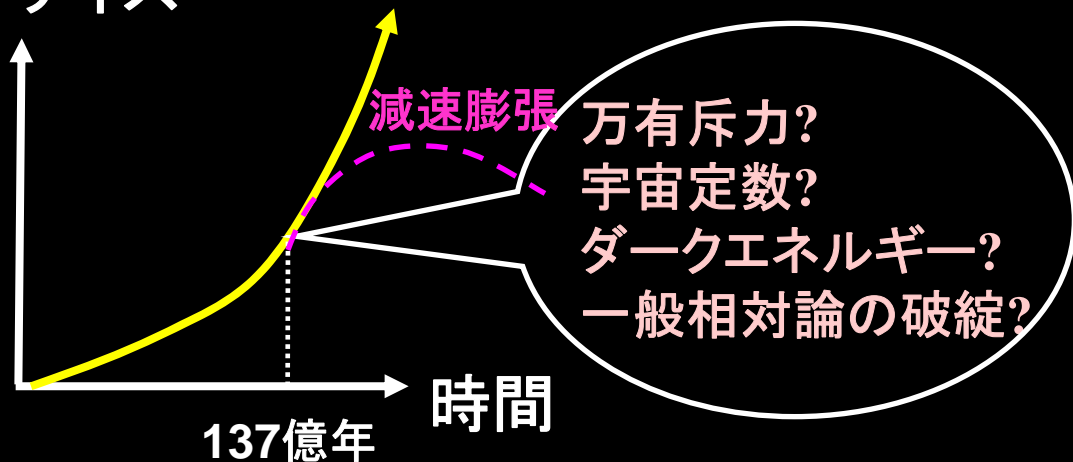
- 現時点で知られている物質は実質的にはすべて元素(陽子と中性子)からなる

- 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95%以上が正体不明

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

■ 我々は何も知らなかった

我々以外の世界はあるのか？
太陽系外惑星

太陽系外惑星とは何？

- 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）

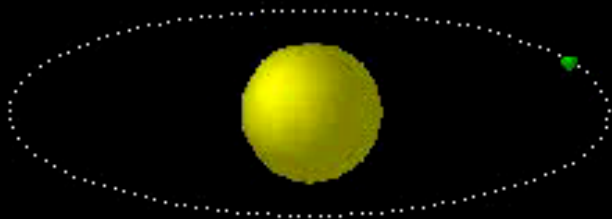
太陽系外惑星（候補）の発見年表

1995年：「我々は何も知らなかった」ことを思い知る



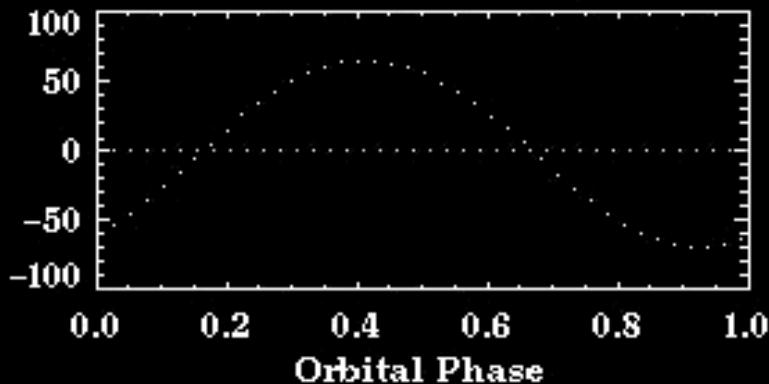
どうやって見つけたのか？

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

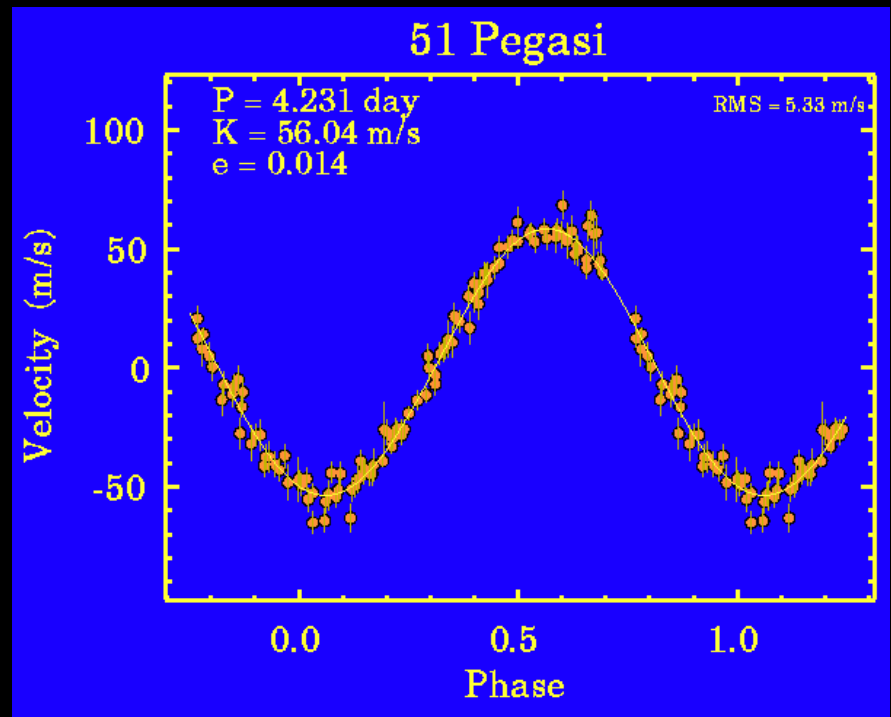
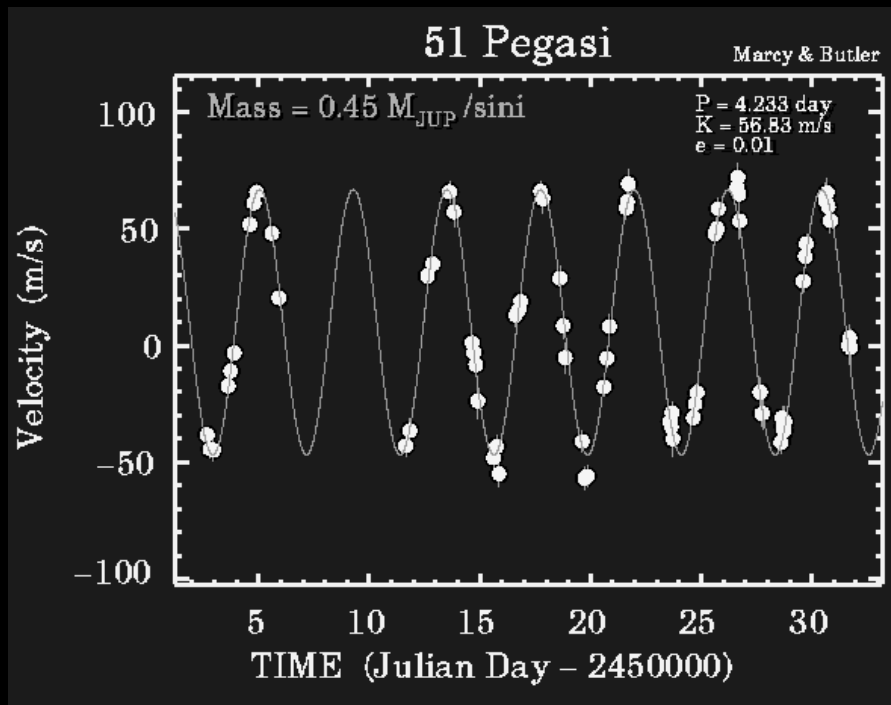
- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ 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によって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

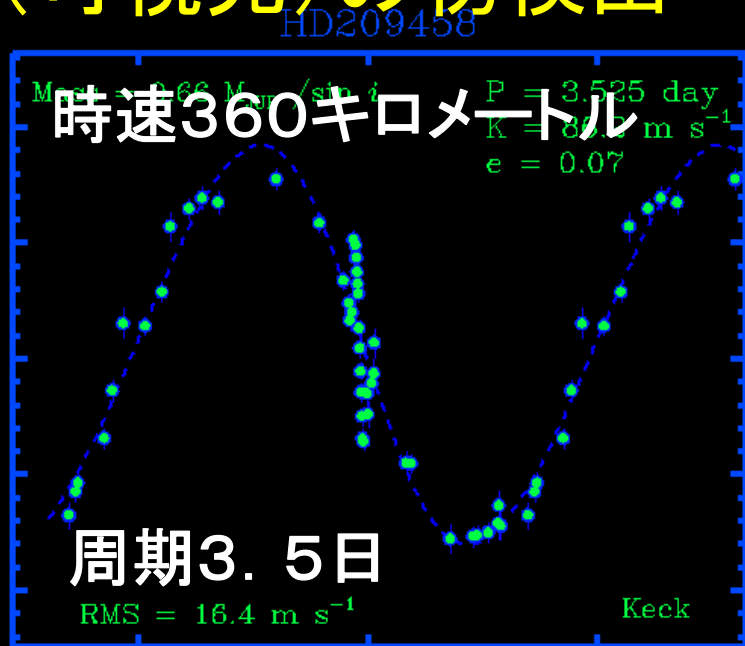
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



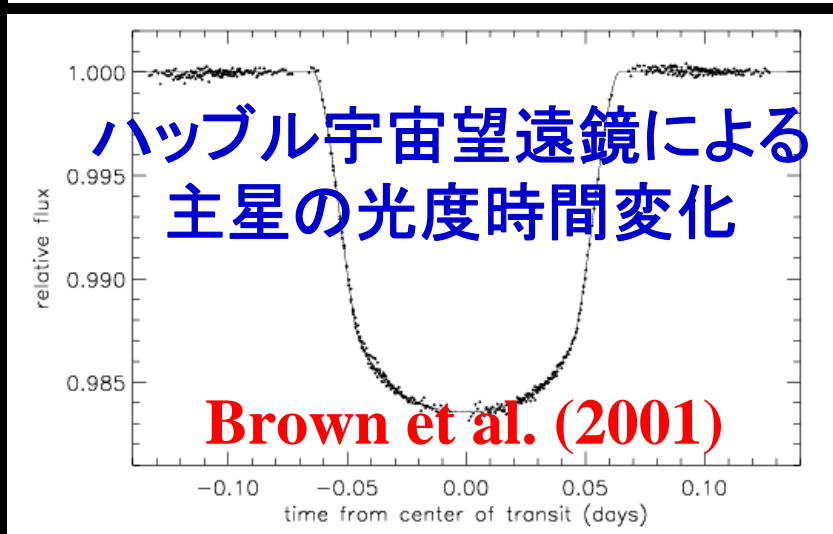
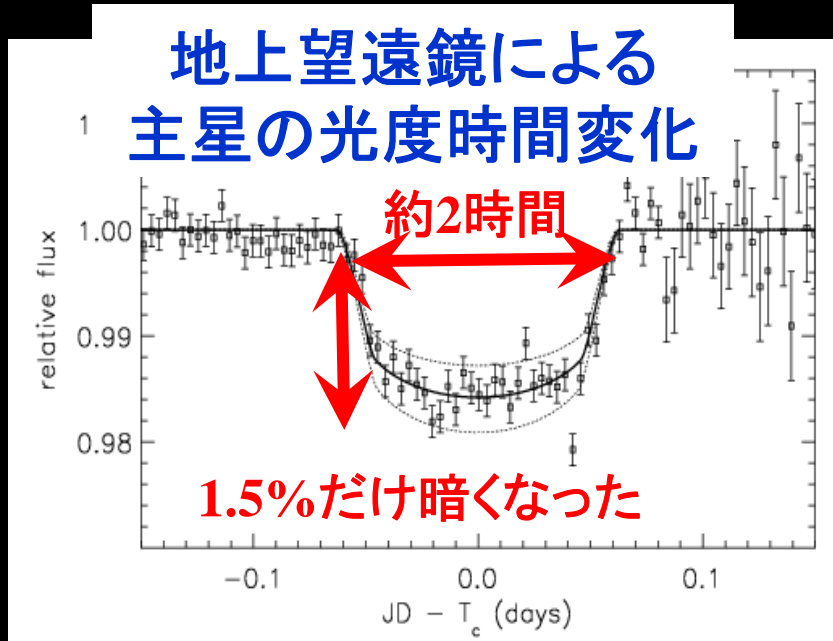
初めてのトランジット惑星HD209458b

- 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)



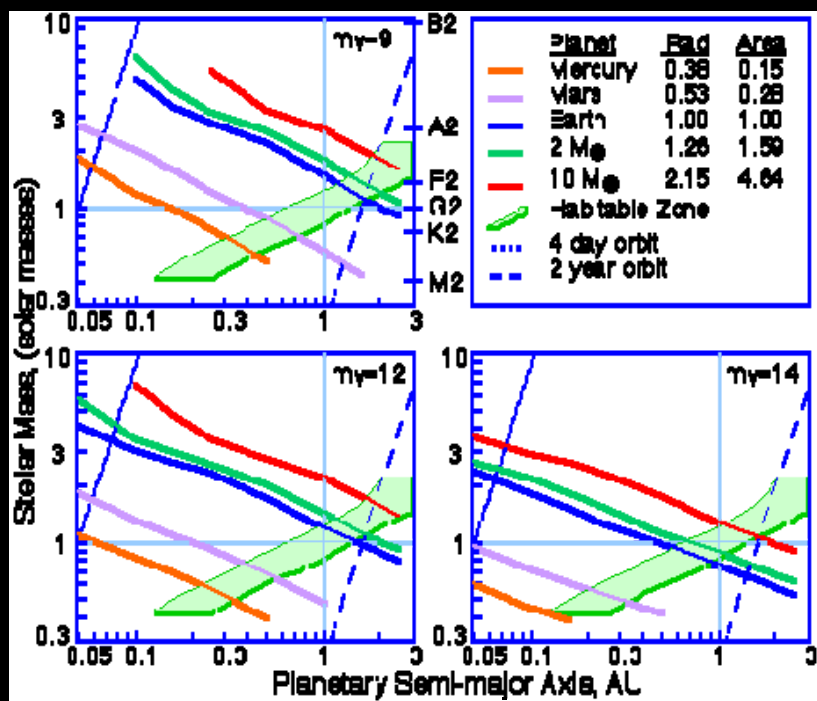
すでに学んだこと

- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的存在
 - 太陽に似た恒星の10パーセント程度は惑星を持つ
- 惑星系の性質は多種多様
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
 - 惑星大気の発見
 - 惑星反射光の検出
 - 主星自転軸と惑星軌道軸とのずれ: 逆行惑星
- 様々な観測手法での相補的アプローチ
 - ドップラー法(精密分光)、トランジット法(精密測光)、重カレンズ(高時間分解能測光)、直接撮像

では次はどうする?

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/>

第二の地球はあるか？



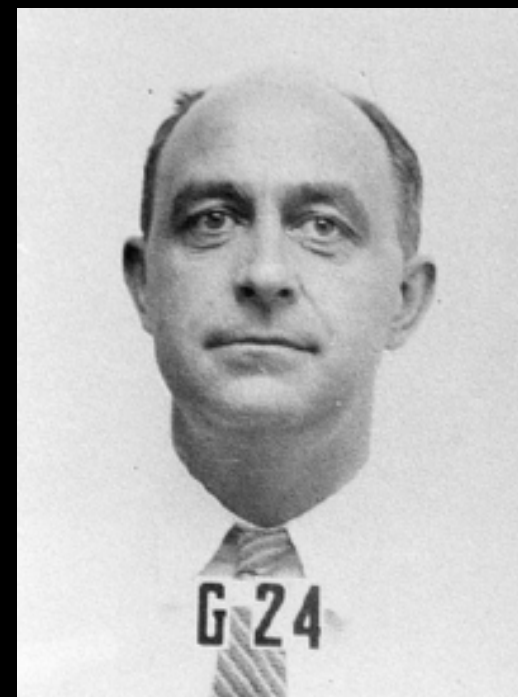
- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(ハビタブル:居住可能性条件)
 - +偶然?
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

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

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

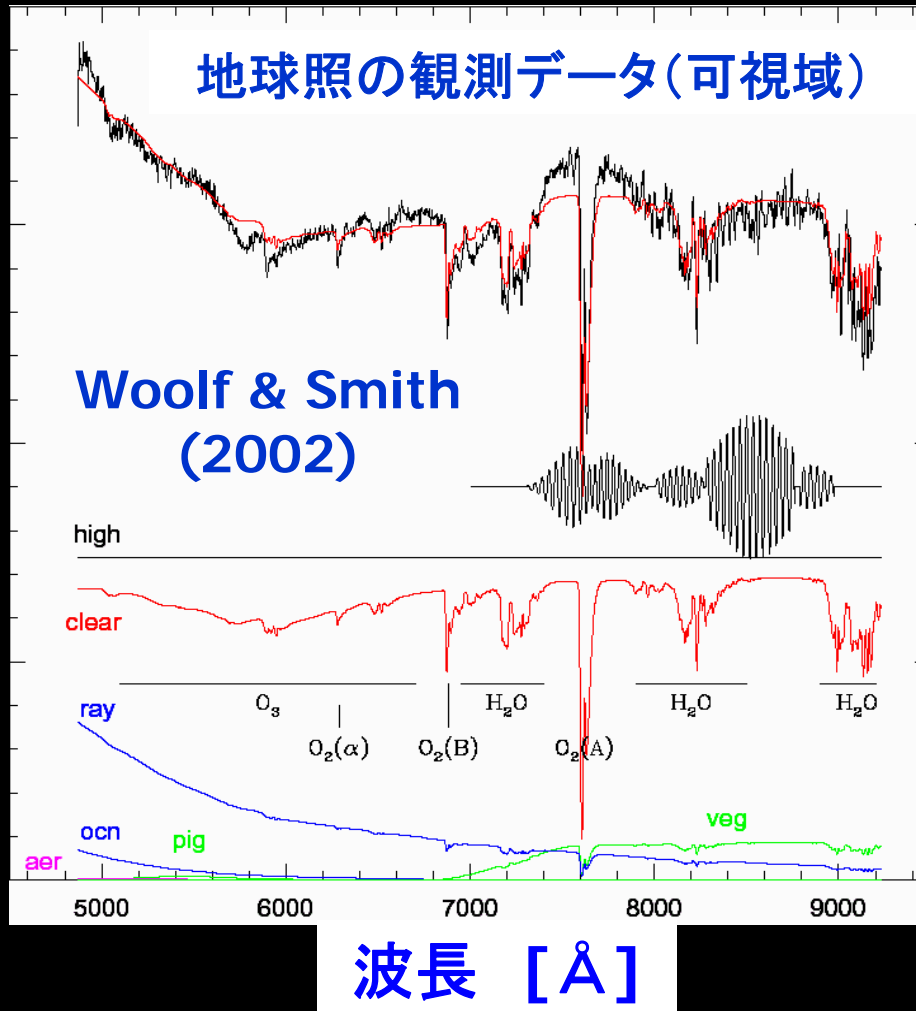
フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)



■ Where are *they*?

- 1950年、ロスアラモス研究所の昼食時にエンリコ・フェルミが問いかけたとされている

常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

- Aバンド@ $0.76 \mu\text{m}$
- Bバンド@ $0.69 \mu\text{m}$

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu\text{m}$

■ オゾン

- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

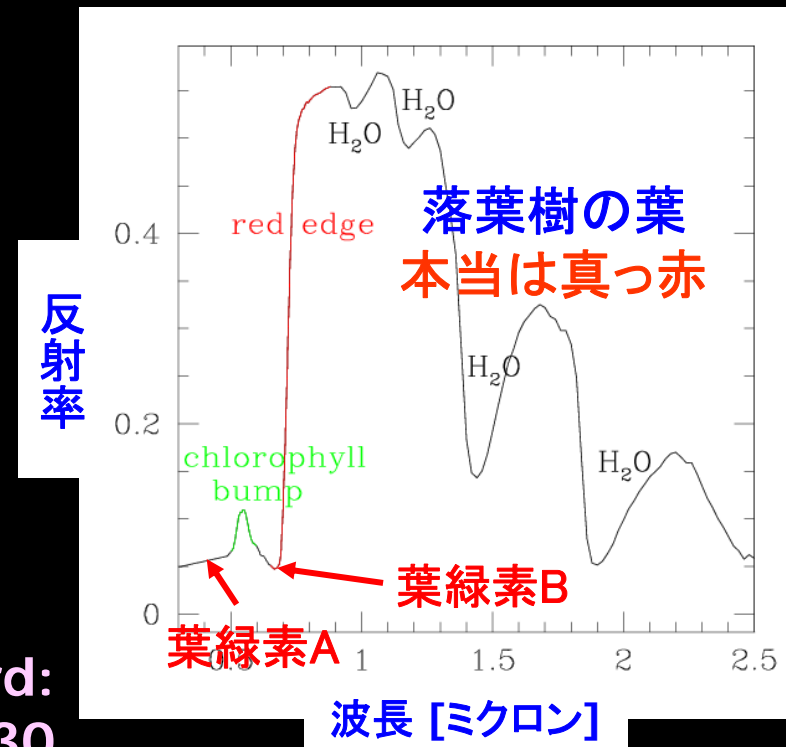
Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激(保守的?)なバイオマーカー Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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**
 - 地球のリモートセンシング
ではすでに確立

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



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与

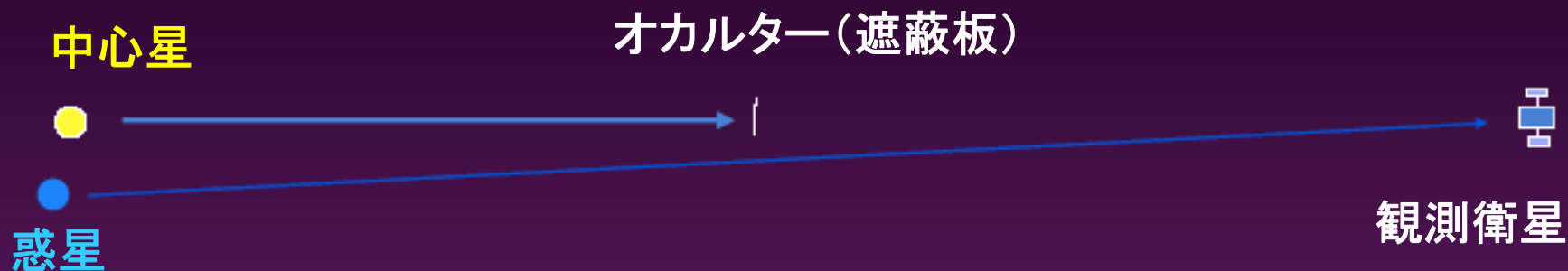
“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars”

PASP 36(1924)261



reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



<http://newworlds.colorado.edu/>

- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

第二の地球の色から、海、陸、植生の占める面積の割合を推定する

- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 - 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤 靖
- 東京大学気候システム研究センター
 - 福田悟、中島映至
- プリンストン大学
 - Edwin Turner

Fujii et al. *Astrophys. J* 715(2010)866, arXiv:0911.5621

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

A pale blue dot

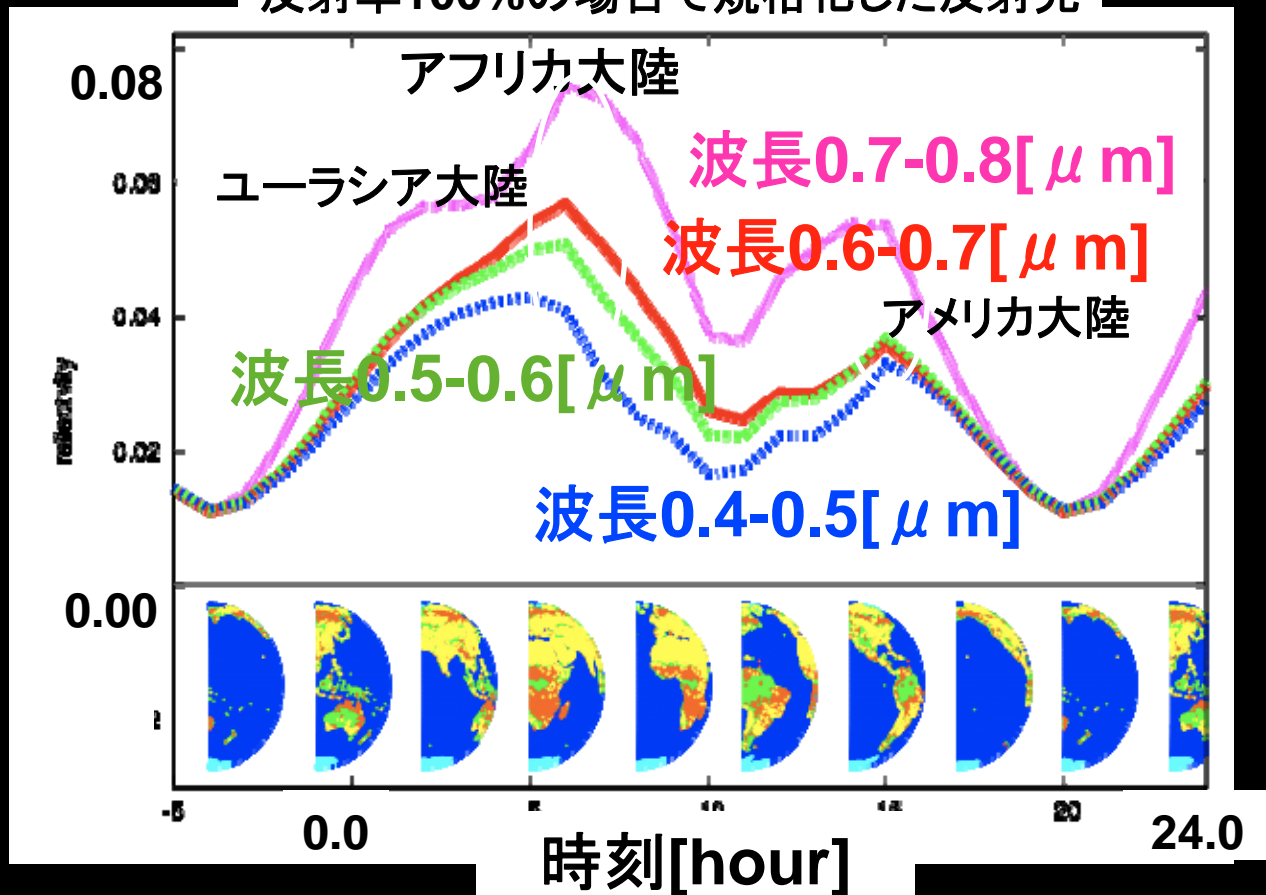
地球は青かった？



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

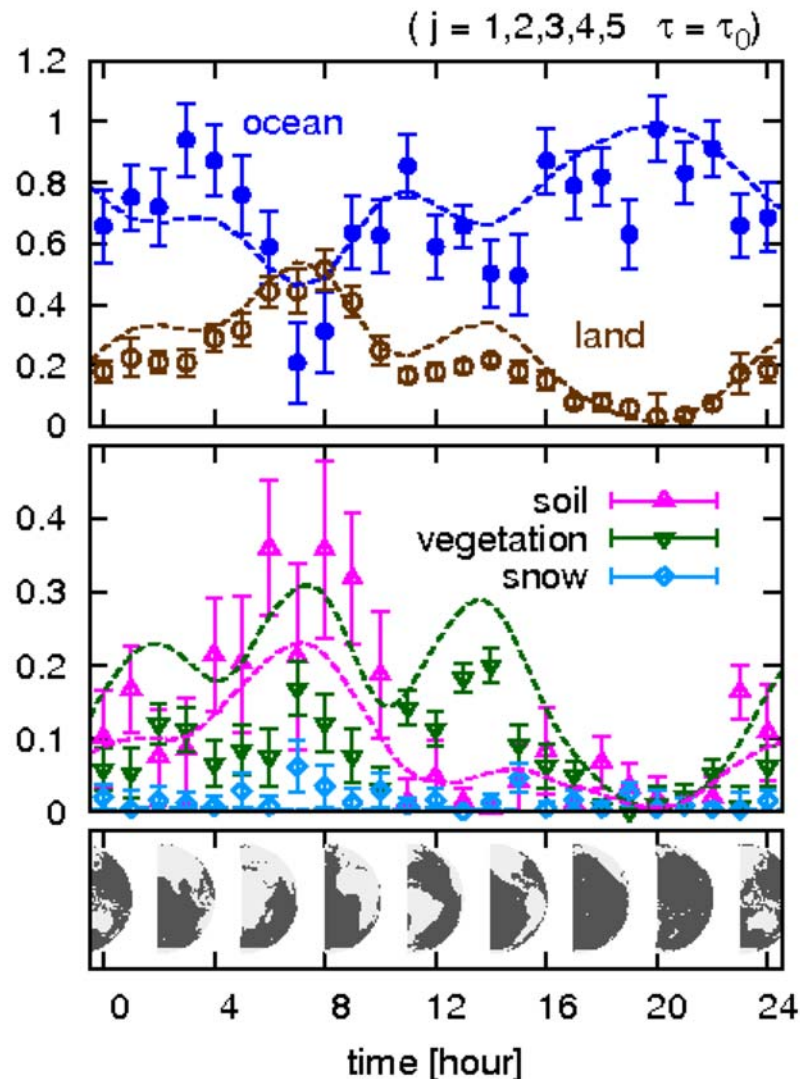
反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

第二の地球の色から表面積を推定

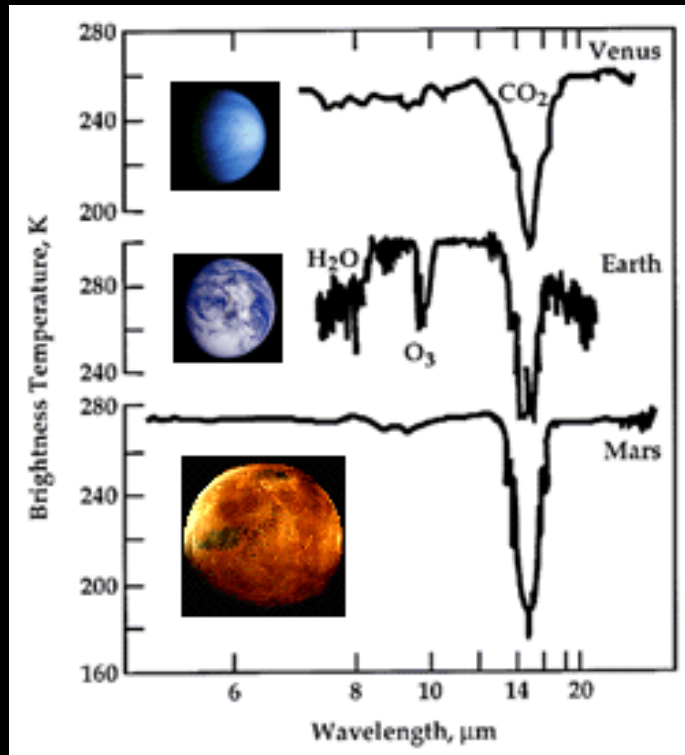
(重みつき)表面積比



- 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4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- レイリー散乱の一次近似
 - 我が地球、悲しからずや空の青、海のをあをにも染まずただよふ
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

Fujii et al. (2010)

太陽系外惑星から宇宙生物学へ: (トンデモ・SFから真面目な科学へ)



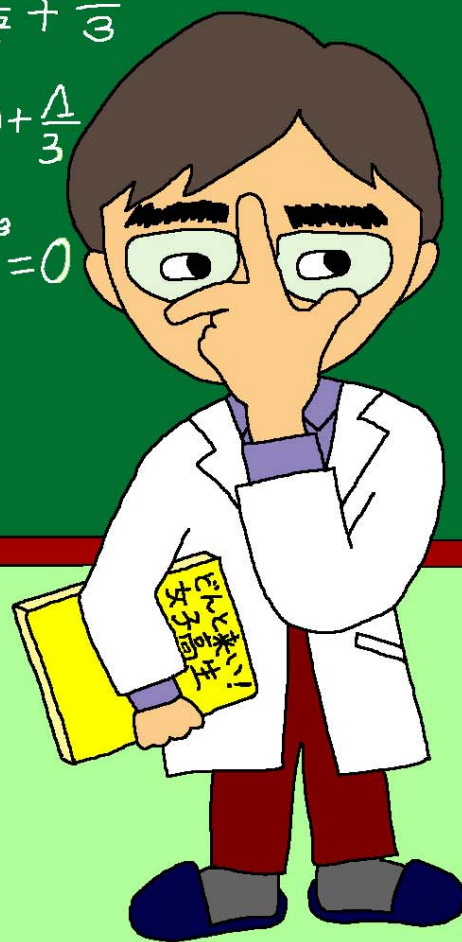
- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、核爆発、植物、、
- 超精密測光・分光観測が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する
- もはやトンデモでもSFでもない!

今まで知らなかった世界をやがて発見してしまうのか？
「やはり我々は何も知らなかった」とつぶやくことになるか？

まとめ：学問ノススメ

$$\begin{cases} \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{cases}$$

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$



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
- 太陽系の外に数多くの惑星が存在する
- 「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
- まさに宇宙物理研究の現状は**学問**

見えなくとも「夜空のムコウ」にあるもの

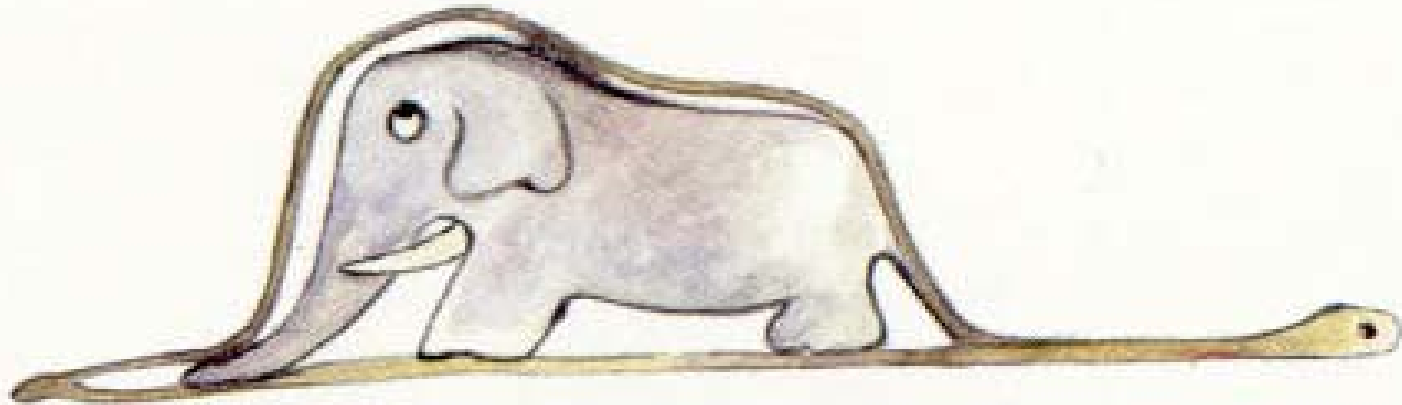
- 宇宙の果てを観測する
 - 宇宙論
- 宇宙を満たしている物質を探る
 - 素粒子論
- 第二の地球を探す
 - 惑星形成論、宇宙生物学
- 地球外文明はあるか
 - 人間原理、宇宙社会学、宇宙比較文化論

みえているものだけがすべてではない



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

大切なものは目に見えない



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



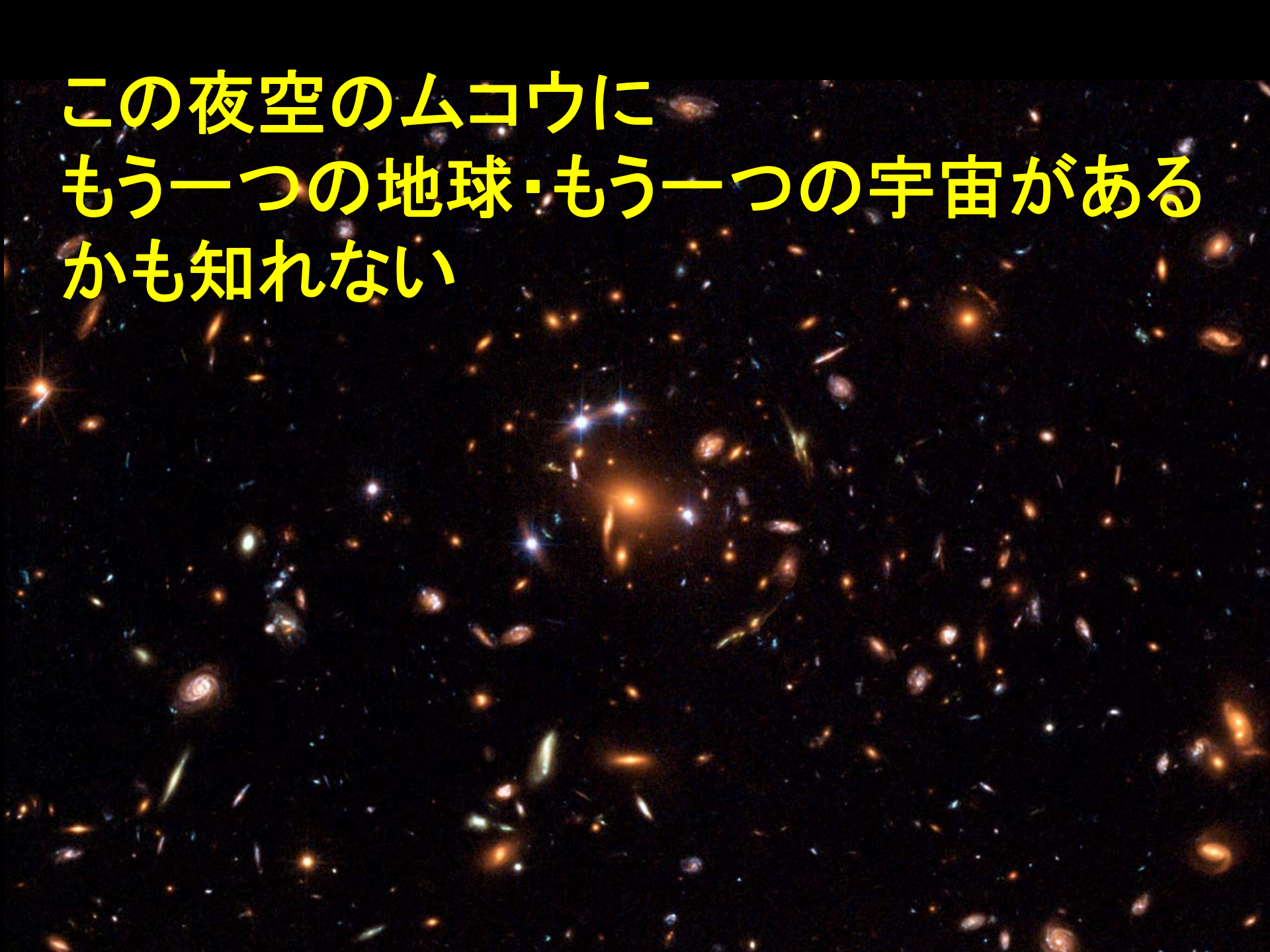
この青空の向こうに何かがあるはず



この星空の向こうにも何かがあるはず



この夜空のムコウに
もう一つの地球・もう一つの宇宙がある
かも知れない



「我々は何も知らなかった」
ということを発見したい！



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