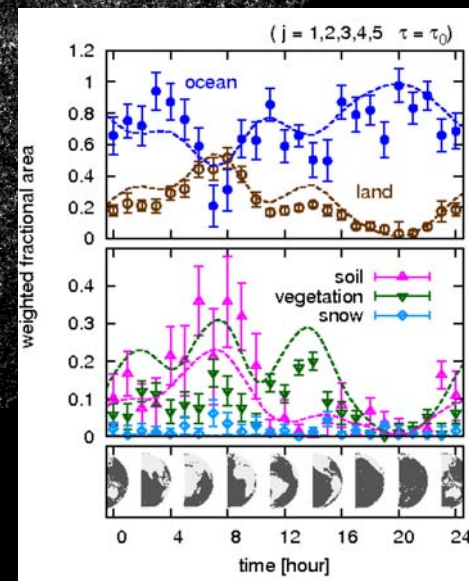
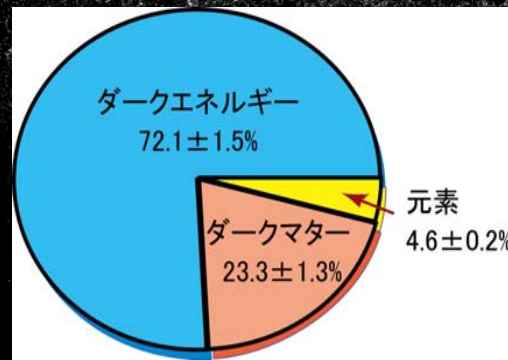


夜空のムコウの 世界を探る



大学院修士課程入学
志望者ガイダンス
2010年6月2日
14:30~15:00

樽家篤史、須藤 靖
東京大学大学院
理学系研究科
物理学専攻
宇宙理論研究室



天文学・宇宙物理学研究テーマと方法論： とにかく多種多様

■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、コンパクト天体、銀河系(天の川)、銀河、活動銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明

■ 波長別：「YY」天文学

- 「YY」 = 電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波

■ 手法別：

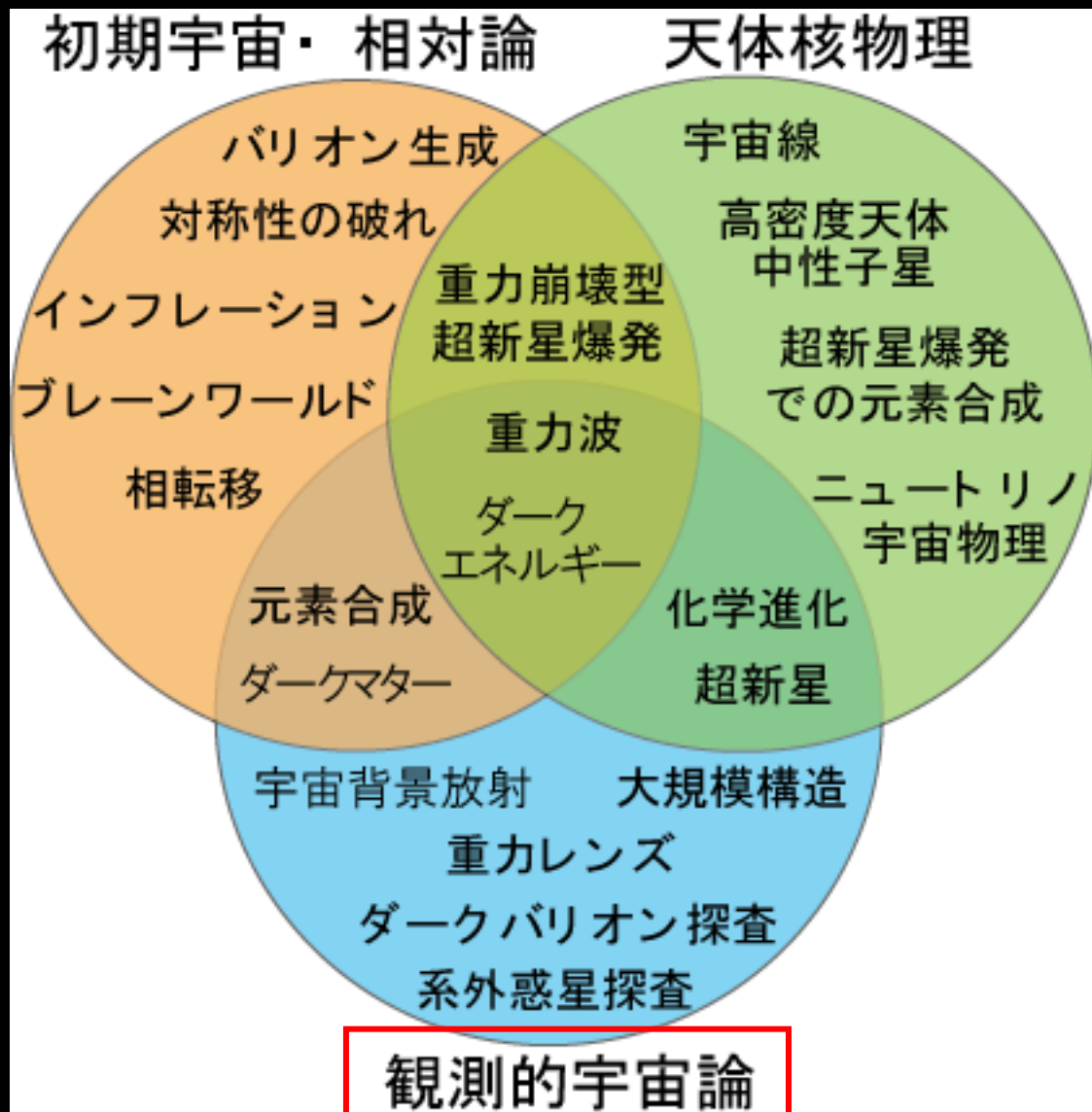
- 理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、実験、数値シミュレーション

残された課題と謎

- **宇宙の起源**
 - 素粒子物理学・量子重力理論の進展に依存
- **ダークマターの直接検出**
 - 天文学から高エネルギー物理学実験へ
- **ダークエネルギーの性質の解明**
 - 宇宙の加速膨張の起源
- **重力波の直接検出**
 - 一般相対論の検証から新しい天文学の窓へ
- **高エネルギー宇宙線の起源**
 - 粒子加速機構の解明、粒子線天文学の開拓
- **超新星爆発・ガンマ線バーストのメカニズム**
 - 大質量星進化の最終段階の理解
- **第一世代天体の発見**
 - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星の起源**
 - 星・惑星の形成
- **地球型系外惑星の発見**
 - 第二の地球、生命・文明の起源、宇宙生物学へ

東大宇宙理論研究室の研究内容

ビッグバンセンターの横山順一先生のグループと連携して相補的に広い宇宙物理学分野をカバーし、理論研究を行っている



(天文学)研究スタイルの必然的進化:

太陽系外惑星探査を例として

今はどの時期なのかの見極めが本質

ブレイク
スルー

1995年
系外惑星発見

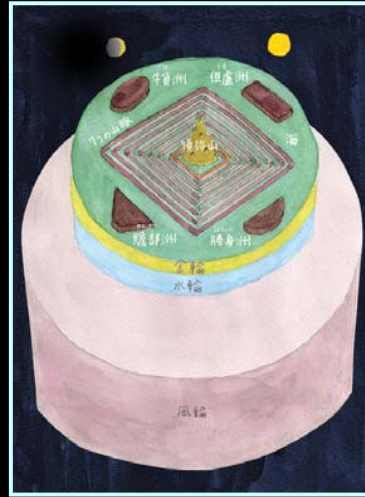
2009年
系外惑星専用
衛星打ち上げ

20XX年
ハビタブル惑星
発見???

	地上からの系外惑星探査	スペースからの系外惑星探査	系外惑星上の生命探査
紀元前 ~1995年	山師、先駆者 ハイリスク ・ノーリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン	論外:危ない人々、 十分成功して失う ものがない人
1995年 ~2009年	ゴールドラッシュ ハイリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン
2009年 ~ 20xx年	定着 ローリスク ・ハイリターン	実現 ローリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン
20xx年~	統計を稼ぐ ローリスク ・ローリターン	定着 ローリスク ・ローリターン	実現? ローリスク ・ハイリターン?

天文学共通の目標： 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



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？（太陽系外惑星研究）
 - 生命はいかにして誕生したのか？（宇宙生物学）

宇宙理論研究室における研究テーマ

I. 宇宙のダークエネルギー

<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/myresearch/kouenkai080510.pdf>

II. 銀河団と銀河間物質

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/myresearch/texas_dios05.pdf

III. 太陽系外惑星

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/myresearch/phys-colloquium07_Oct12.pdf

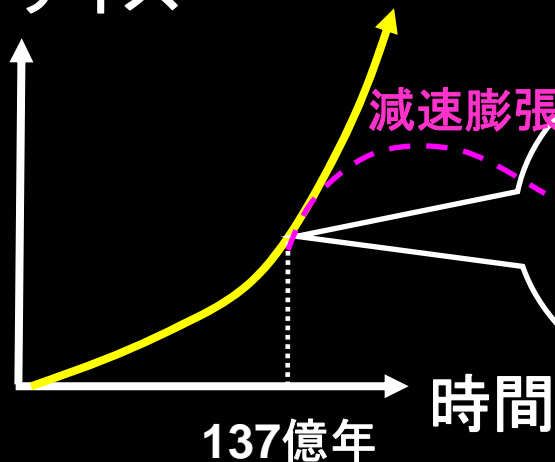
I 宇宙のダークエネルギー

- 理論構築、シミュレーション、観測データ解析
- すばる望遠鏡に搭載する撮像、分光装置を用いた観測プロジェクトの立案
 - 東大数物連携機構、東大相原研、国立天文台、東北大学、名古屋大学、広島大学、プリンストン大学、カリフォルニア工科大学、エジンバラ大学、ポーツマス大学などとの共同研究

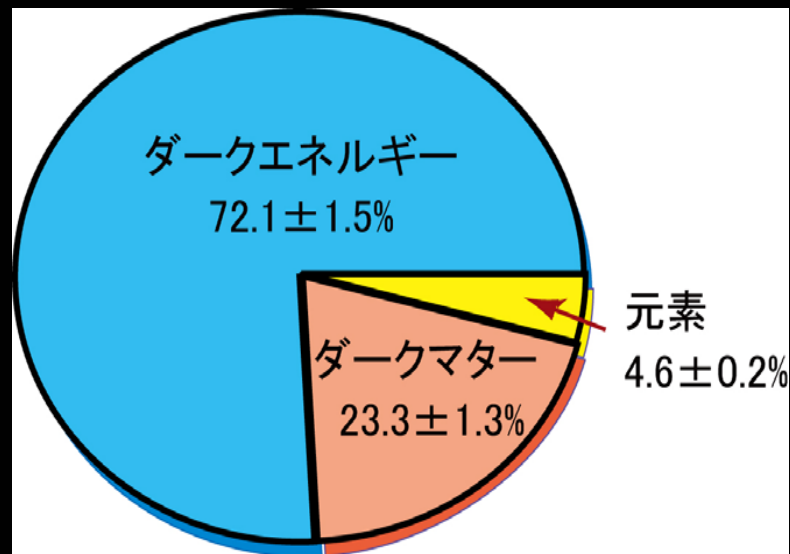
ダークエネルギーと21世紀の物理

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



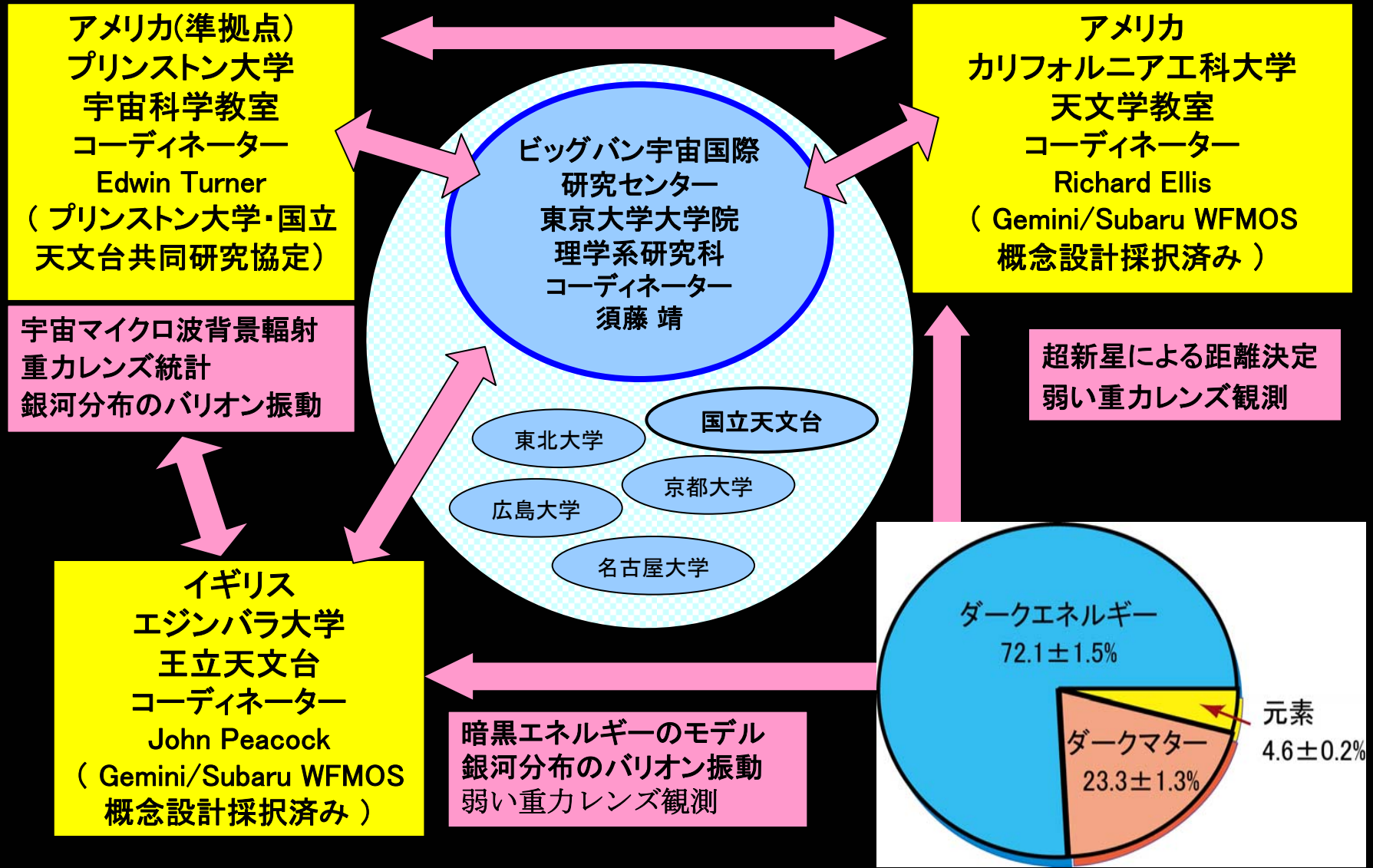
万有斥力?
宇宙定数?
ダークエネルギー?
一般相対論の破綻?



- **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世紀の物理学を切り拓く鍵**

暗黒エネルギー研究国際ネットワーク

全体コーディネーター: 須藤 靖



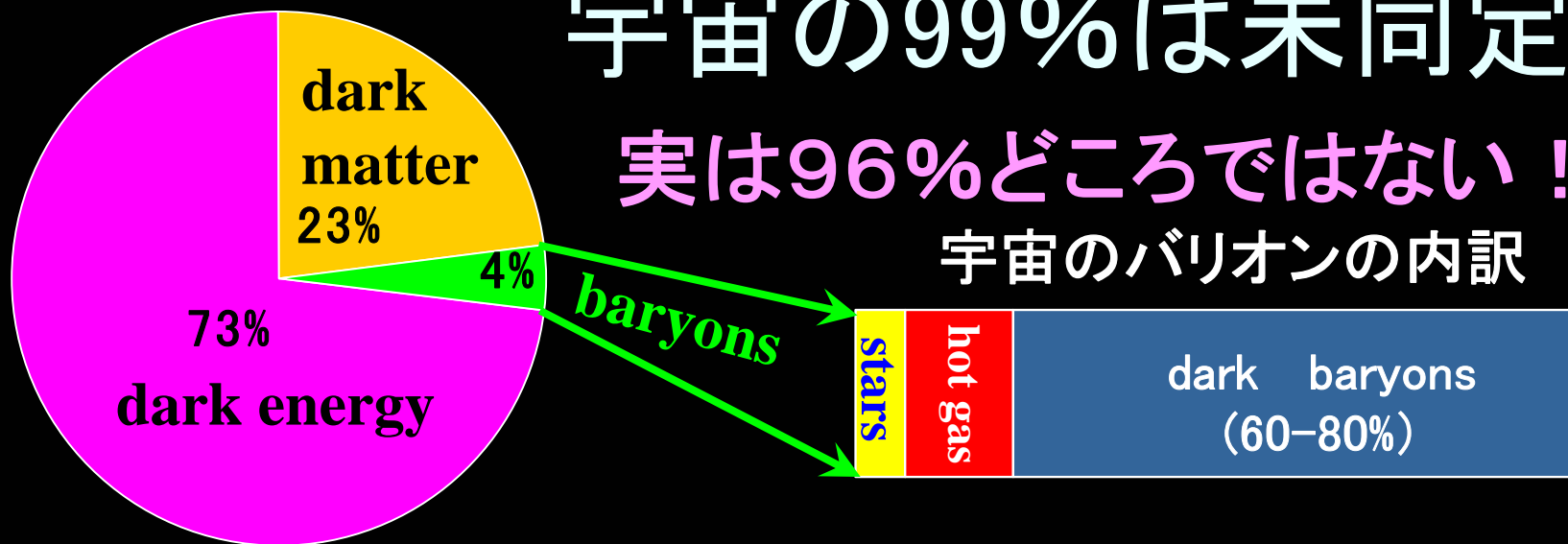
II 銀河団と銀河間物質

- 銀河団の理論モデル構築
- 銀河間に存在する宇宙のダークバリオンのシミュレーション
- ダークバリオン探査専用衛星の提案
 - 首都大学東京、宇宙研、筑波大、金沢大、ローマ大、ボローニャ大、オランダSRONなどとの共同研究

宇宙の99%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^a

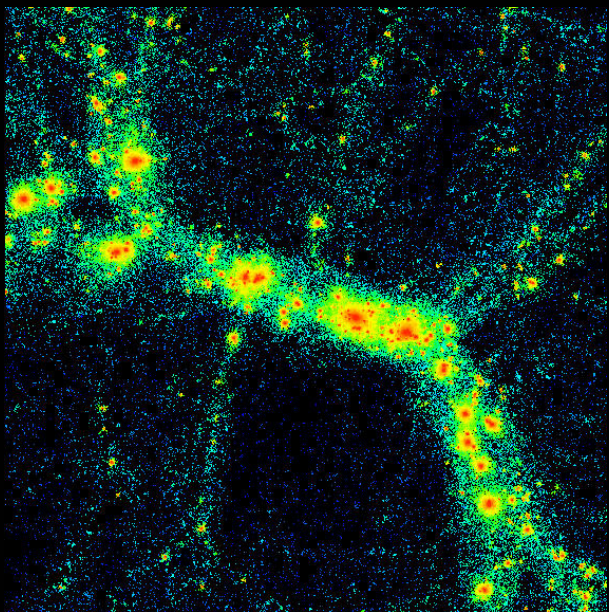
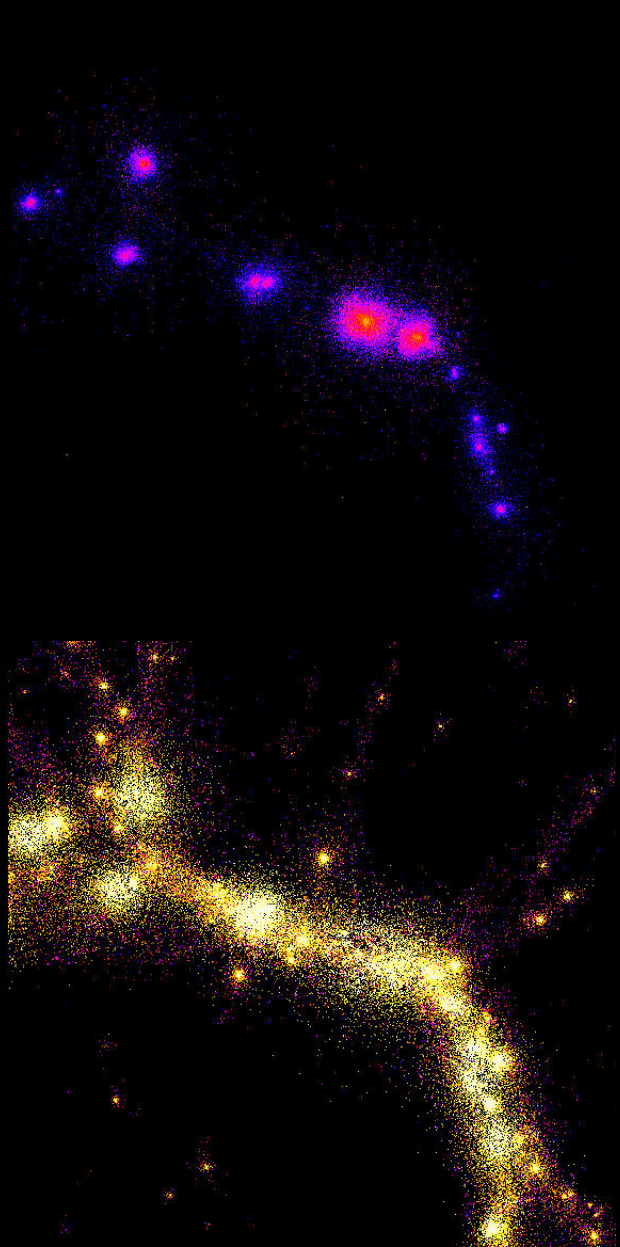
Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518

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



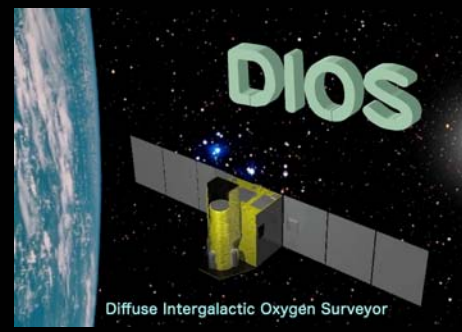
ダークマター

銀河

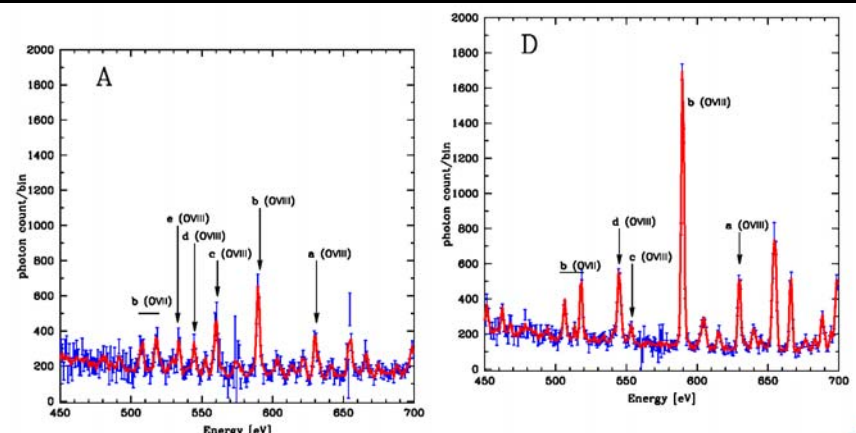


Yoshikawa et al. (2001)

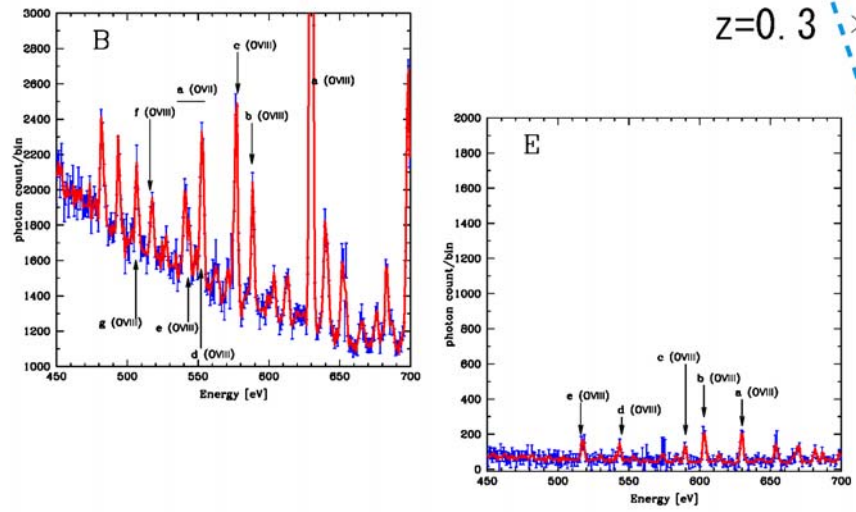
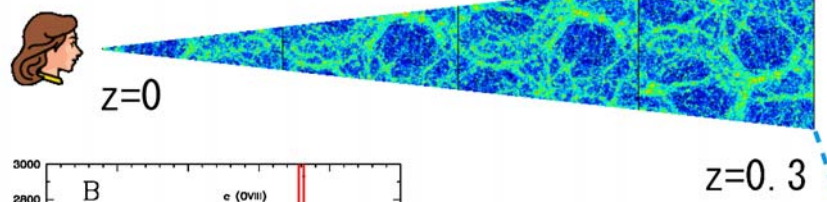
Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)



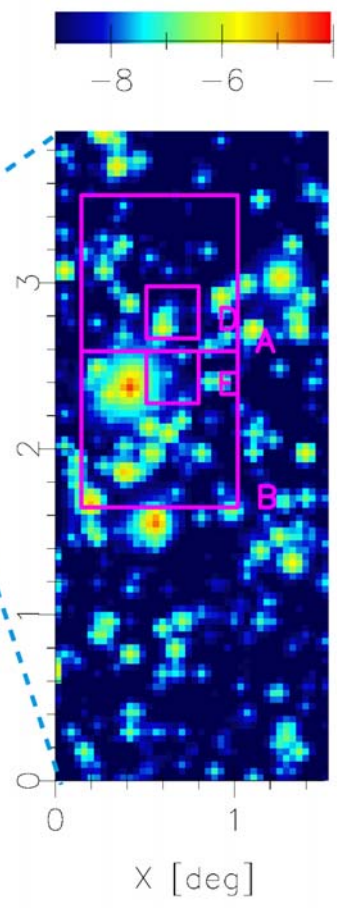
PASJ 55 (2003) 879
PASJ 56 (2004) 939



Mock simulations



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



Tokyo Metropolitan Univ.:

T. Ohashi

JAXA/ISAS:

N. Yamasaki

K. Mitsuda

Nagoya Univ.:

Y. Tawara

Univ of Tokyo:

K. Yoshikawa

Y. Suto

Ⅲ 太陽系外惑星

- 太陽系外トランジット惑星の観測・理論的研究
 - 系外惑星の角運動量の決定とその起源
 - 系外惑星の大気組成の決定
 - 系外惑星の反射光の検出
 - 系外惑星のリングと衛星の兆候
 - 地球型惑星の表面分布の決定
 - 国立天文台、プリンストン大学、マサチューセッツ工科大学、との共同研究

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

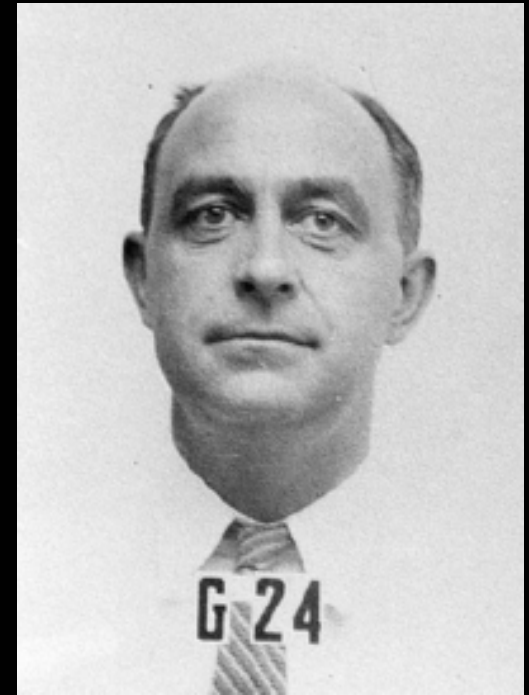


すでに学んだこと

- 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?

フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)

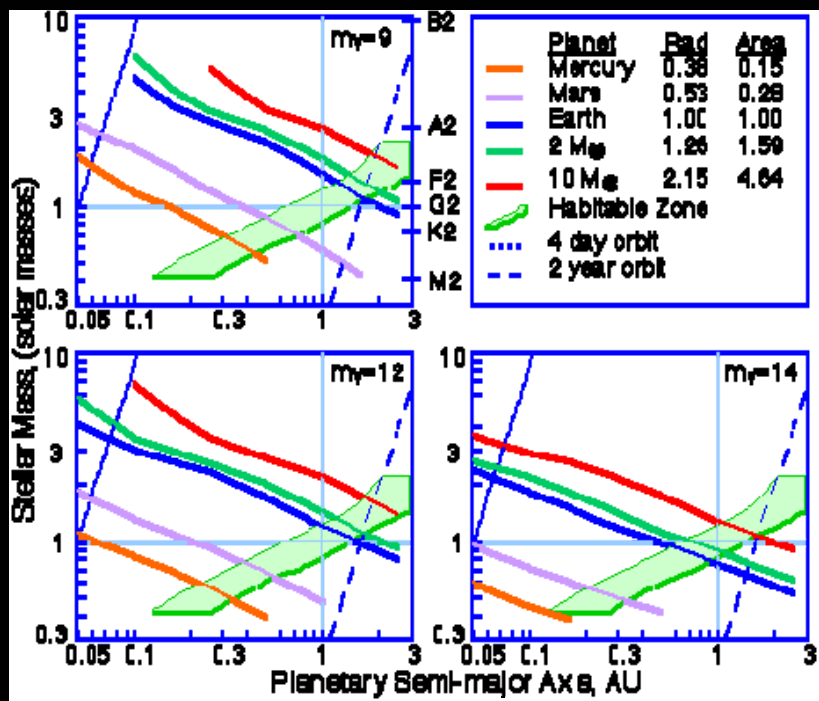


■ Where are *they*?

- 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

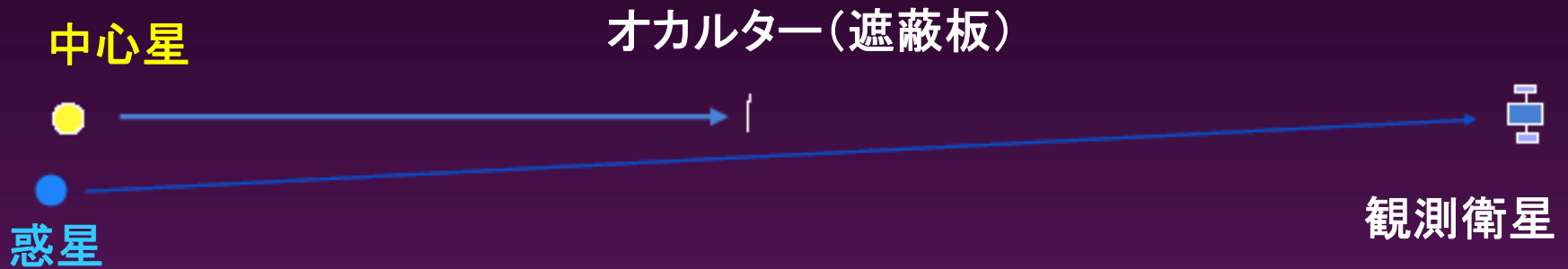
ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

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/>

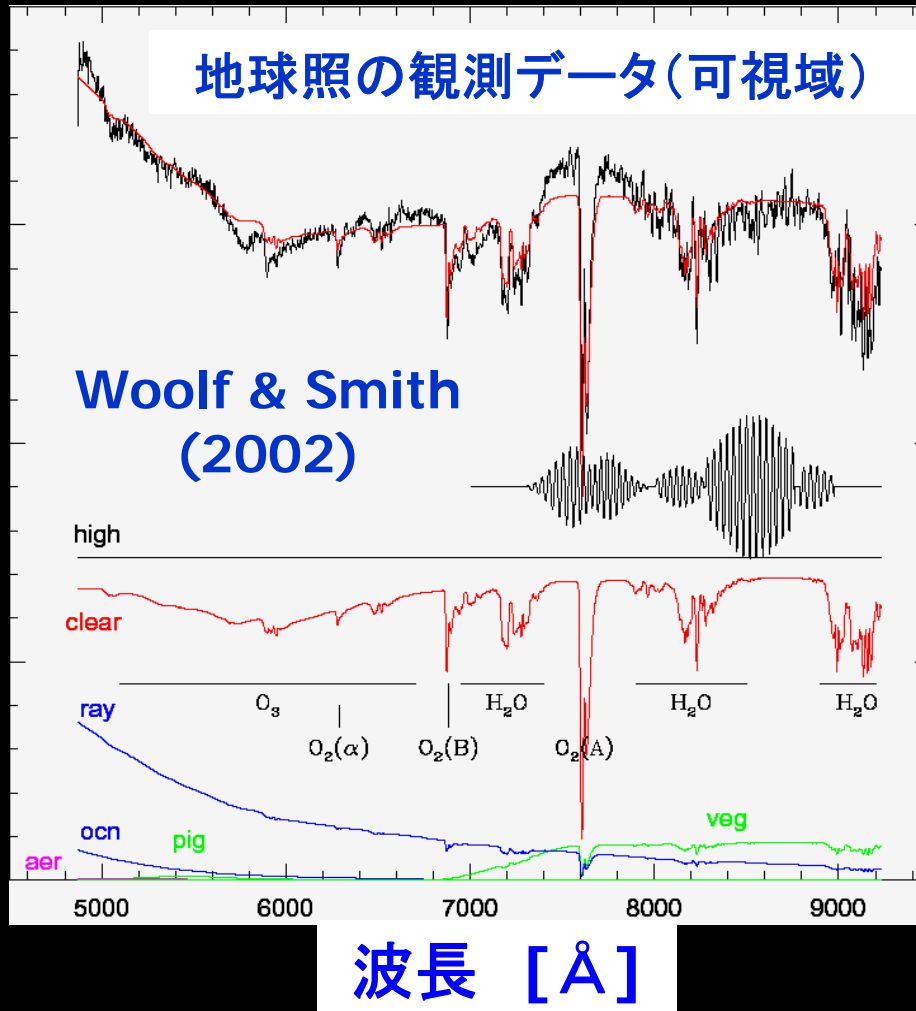
地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



<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)

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

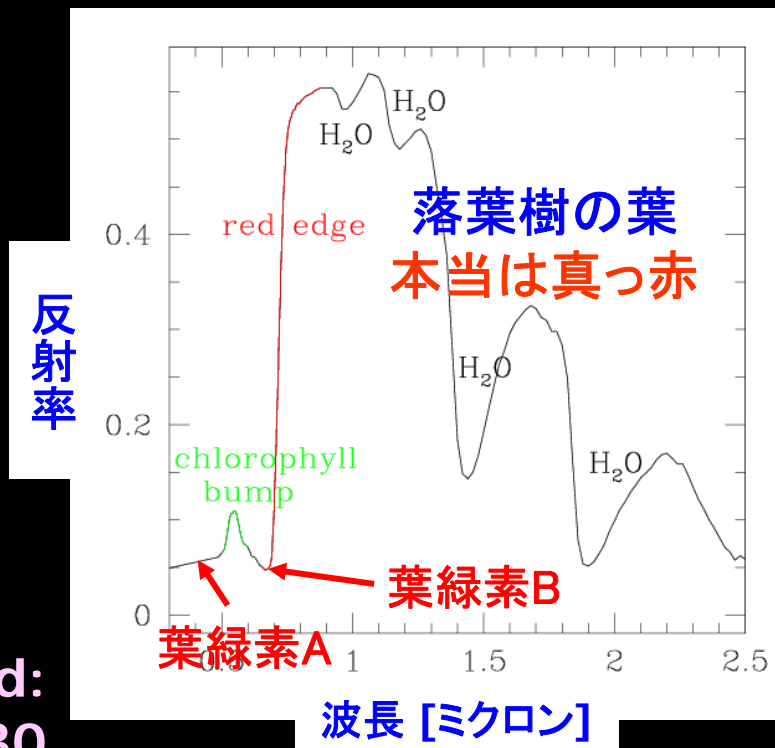
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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



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

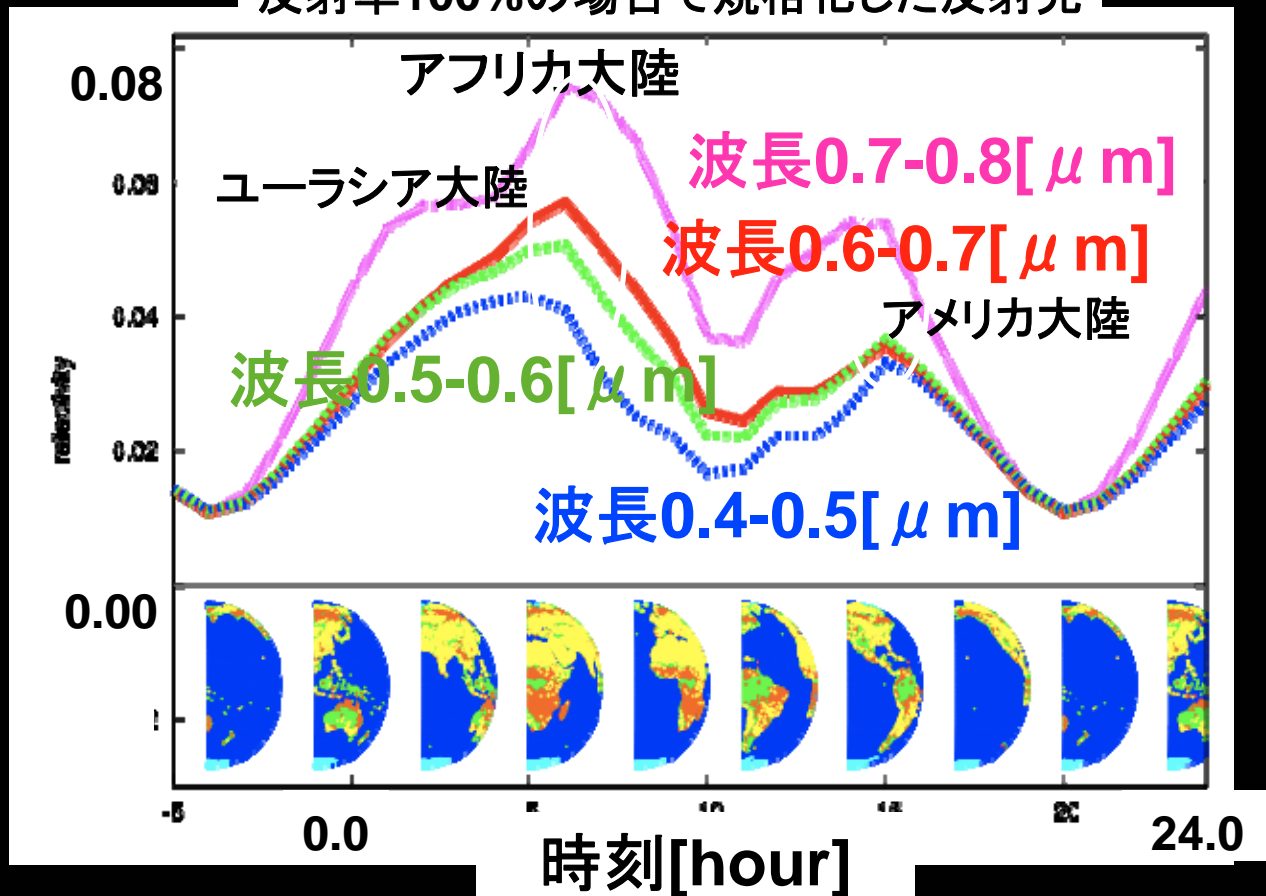
地球は青かった？



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

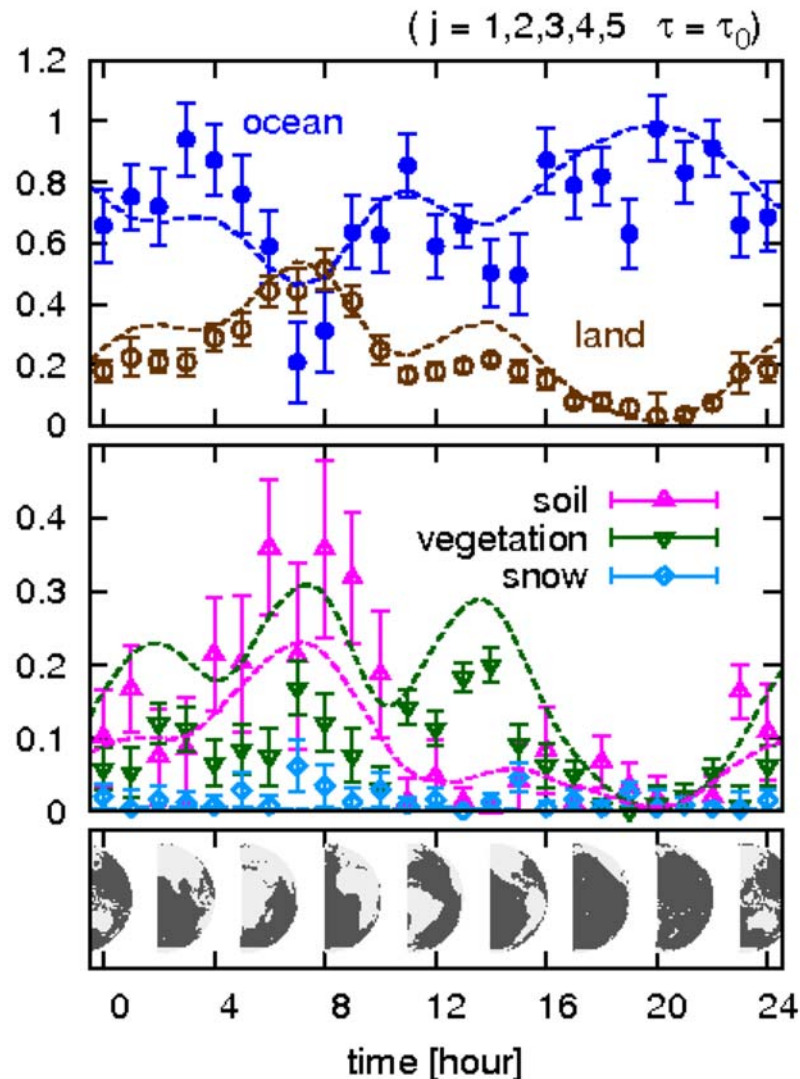
反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

第二の地球の色から表面積を推定

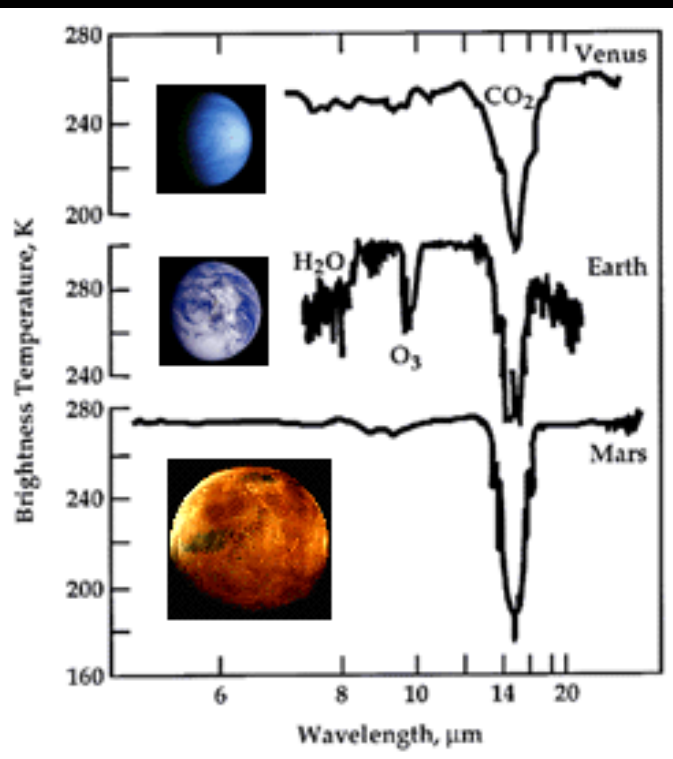
(重みつき)表面積比



- 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： そのさきにあるもの “天文学から宇宙生物学へ”



- 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、、
- 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？

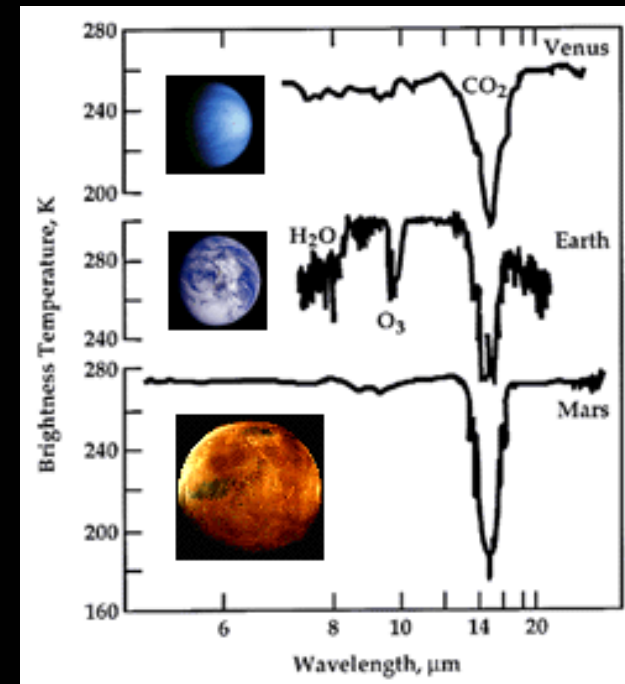
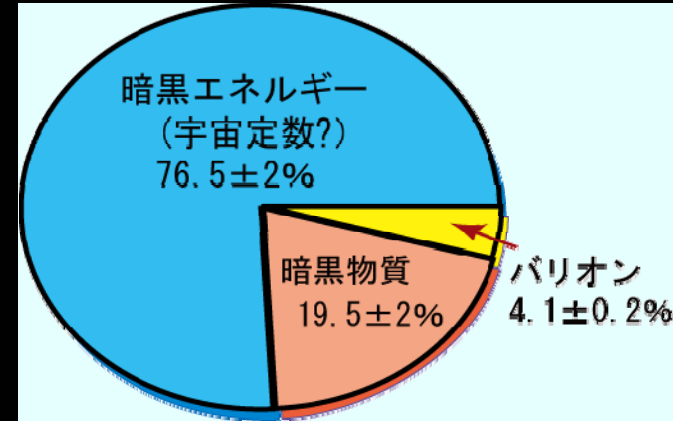
「夜空のムコウ」を探ることで、従来全く予想されていなかった新しい科学が発展しつつある

■ 宇宙の果ての観測から微視的世界の新しい階層が発見された

- 宇宙の96%の正体は理解されていない
- 暗黒物質と暗黒エネルギーの解明は新しい自然法則を探る本質的な鍵

■ 天文学から宇宙生物学へ

- 1995年初めての系外惑星発見
- 地球型居住可能(水が液体として存在する)惑星の発見へ
- 遠くの惑星に生物の兆候を探る天文学的試み



大学院での研究について

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

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**

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.

最後に大切なアドバイス

- 大学院の研究室文化は千差万別
- 教員の性格、研究室の雰囲気、教育方針、研究方針、自分との相性、などなどをあらかじめ確認しておくことは大切
- 必ず一度は志望研究室を訪問し、教員や大学院生と直接話をしてみた上で、本当に自分がやりたいことができる環境なのかを確認しておくこと