

もうひとつの地球の色： ペイルブルードットを超えて

大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

東京大学基金講演会

東京大学基金
The University of Tokyo Foundation

2013年7月10日16:45-17:30@伊藤謝恩ホール

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2013j.html

My naïve perspective for science

牧歌的科学觀

働き者と怠け者の会話

- 「お前はなぜ毎日ごろごろと怠けてばかりで、真面目に働こうとしないのか？」
- 「むしろ君こそ、なぜあくせく働いているの？」
- 「それはたくさんお金を稼ぎたいからだ」
- 「お金を手に入れてどうする？」
- 「いい家に住み、おいしい物を食べ、好きな物を買い、、、」
- 「それから？」
- 「残りの人生をゆっくり楽しむつもりだ」
- 「だろ？俺は今まさにそうしているのさ」

社会人と天文学者の会話

- 「お前はなぜ毎晩星を眺めているばかりで、真面目に働こうとしないのか？」
- 「むしろ君こそ、なぜあくせく働いているの？」
- 「それはたくさんお金を稼ぎたいからだ」
- 「お金を手に入れてどうする？」
- 「いい家に住み、おいしい物を食べ、好きな物を買い、、、」
- 「それから？」
- 「星でも眺めながら人生をゆっくり楽しむつもりだ」
- 「だろ？俺は今まさにそうしているのさ」

invaluable > valuable

- 「役に立たない」≠「価値がない」
 - 芸術、音楽、文学、恋愛は役に立つのか？
 - でもそれらは生きる意味を与えてくれる
 - **valuable** は、「価値を判断できる」ほど大切、意義深いという意味
 - **Invaluable** は、「もはや価値を判断する事すらできない」ほど重要であるという意味
 - 科学にも**useful**ではなく**useless**だが**invaluable**で**priceless**な分野があって良い
 - ⇒ 天文学はその典型例

私の牧歌的科学観

- 謎を解明する(問題に答える)よりも、**新たな謎を発見(世の中の不思議さに感嘆)**するほうが大事
 - **勉強**(つとめはげむ)から **学問**(学びて問う)へ
- **競争のための競争は無意味**: 勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない(なぜトップだけを目指す?)
- **ただし、このような私の価値観は、科学者の間ですらあまり共感をもたれていないかも、、、**
 - 「役に立たない」学問を、その波及効果あるいは「100年後に役に立つ」事を生み出すという理由を前面に出して正当化する論調には賛同しかねる

Intellectual curiosity

知的好奇心

天文学という文学

- 「文学部か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

私は《文学部しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。

北村薫『六の宮の姫君』(東京創元社)



村上春樹『アフターダーク』より

- 果物がたわわに実り、真ん中には高い山がそびえるハワイのある美しい島に流れ着いた3人の兄弟。夢にでた神様が「とてつもなく重く大きな岩が3つあるはず。それを好きなところまで転がして行け、どこまで行くかはお前達の自由である。高い場所に行けば行くほど遠くを見ることができる」と告げる。
 - 三男：海岸の近く：とても美しいし、魚も捕れる
 - 次男：山の中腹：果物が豊富に実っている
 - 長男：山のとっぺん：霜をなめ苔を食べることで水分と栄養をとるしかない、でも世界は見渡せる

マリは質問する

- 「その話には教訓みたいなものはあるの？」
- 「教訓はたぶんふたつある。ひとつは」と彼は指を一本立てる。
- 「人はそれぞれに違うということ。たとえ兄弟であってもね。もうひとつは」と二本目の指を立てる。「何かを本当に知りたいと思ったら、人はそれに応じた代価を支払わなくてはならないということ。」

Mari offers her opinion:

"To me, the lives chosen by the two younger brothers make the most sense."

- "True," he concedes. "**Nobody** wants to go all the way to Hawaii to stay alive licking frost and eating moss. That's for sure. But the eldest brother was curious to see as much of the world as possible, and he couldn't suppress that curiosity, no matter how big the price was he had to pay"

- *"Intellectual curiosity."*

- "Exactly."

*English translation by Jay Rubin
(distorted by Yasushi Suto)*

Indeed, we are *the Nobody* !



すばる望遠鏡

ハワイ島マウナケア山頂上の
3つの大きな岩

(以下のハワイの写真はすべて
柏木俊哉氏撮影)





三男@ハワイ島ヒロ(海拔0m)

次男@中間宿泊所ハレポハク (海拔2,800m)



長男@すばる望遠鏡(海拔4,200m)



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



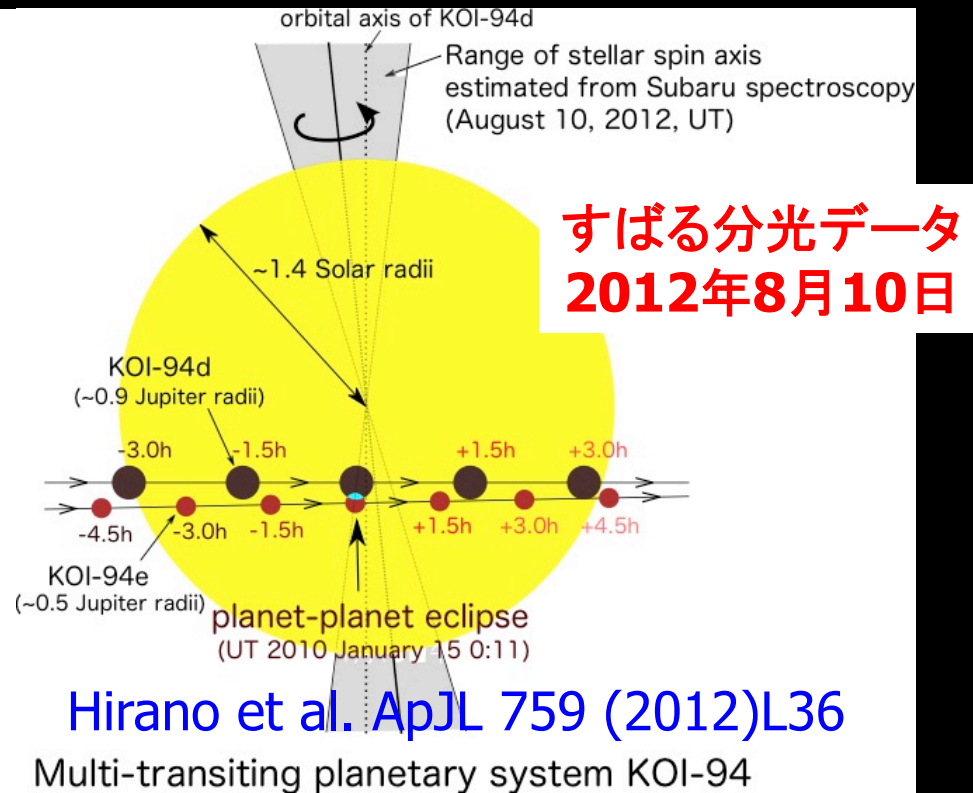
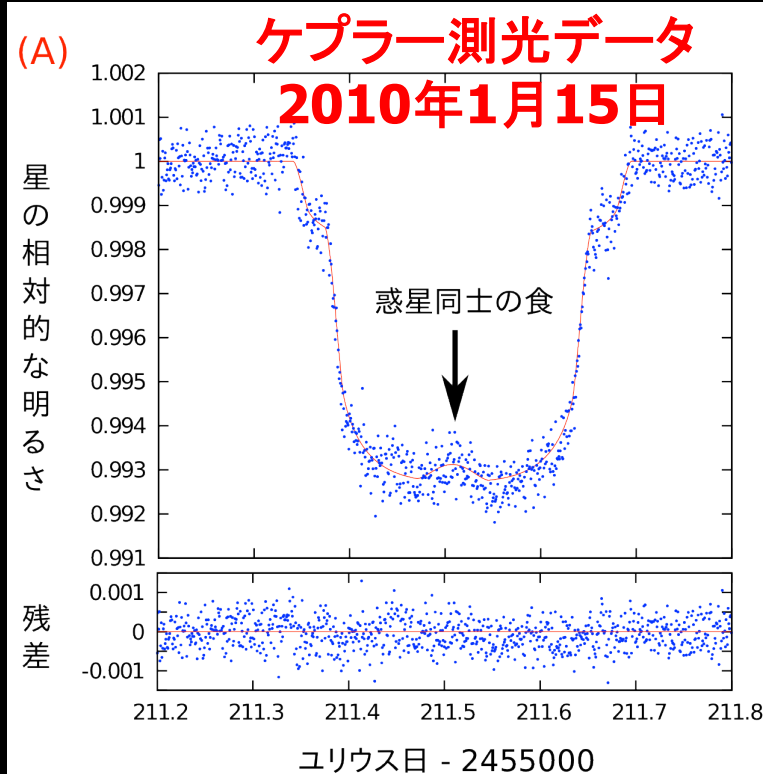
でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる

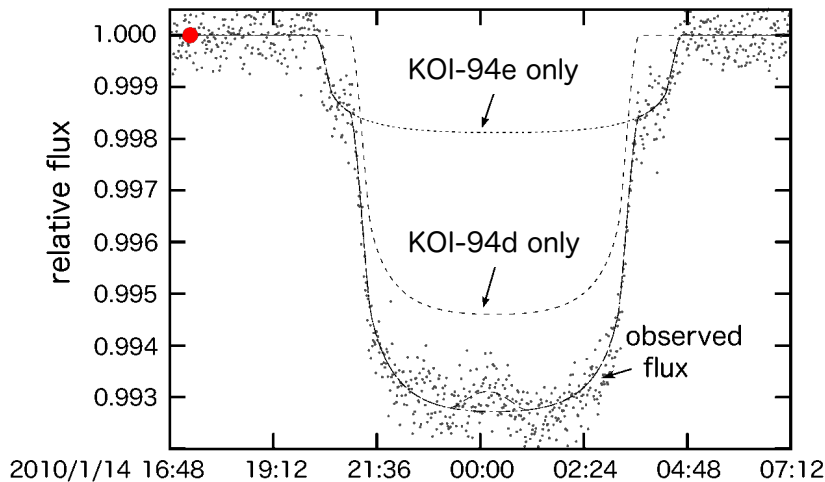


ハワイから外の世界を見渡した結果： 太陽系外4重惑星系の惑星食の発見

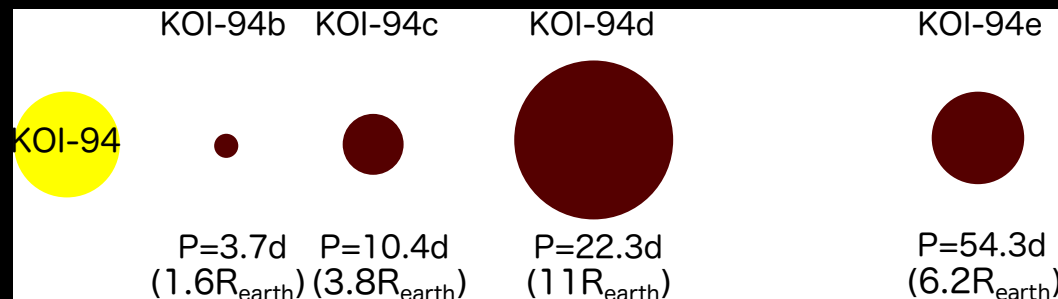
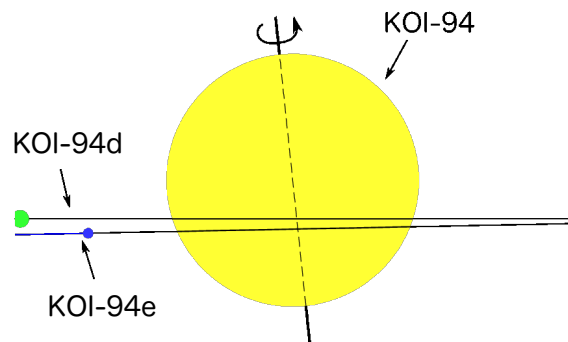


- 惑星食の確率は極めて低いため、これが最初で最後の例かも？
- 地球からみて金星と水星が同時に太陽面を通過する(トランジット)のは、西暦69163年7月26日と西暦224508年3月27日だけらしい。しかもこれは単なる同時トランジットで、惑星食ではない。

多重トランジット惑星系KOI-94: 惑星食の初検出



2010/1/14 17:16:48



- すばる観測前にケプラー衛星測光データを確認中、初めての惑星食を偶然発見
- すばる望遠鏡のロシター効果観測で、主星自転軸と惑星公転軸がほぼ揃っている事を発見
- 従来の惑星移動モデルでは説明不可！

What controls our world ?

世界を流れる理由を知りたい

Langton's ant

- 極めて単純な決定論的規則でありながら、予想不可能な複雑なパターンを示す：世界の多様性の起源？
 - 検索あるいはウィキペディアを参照のこと

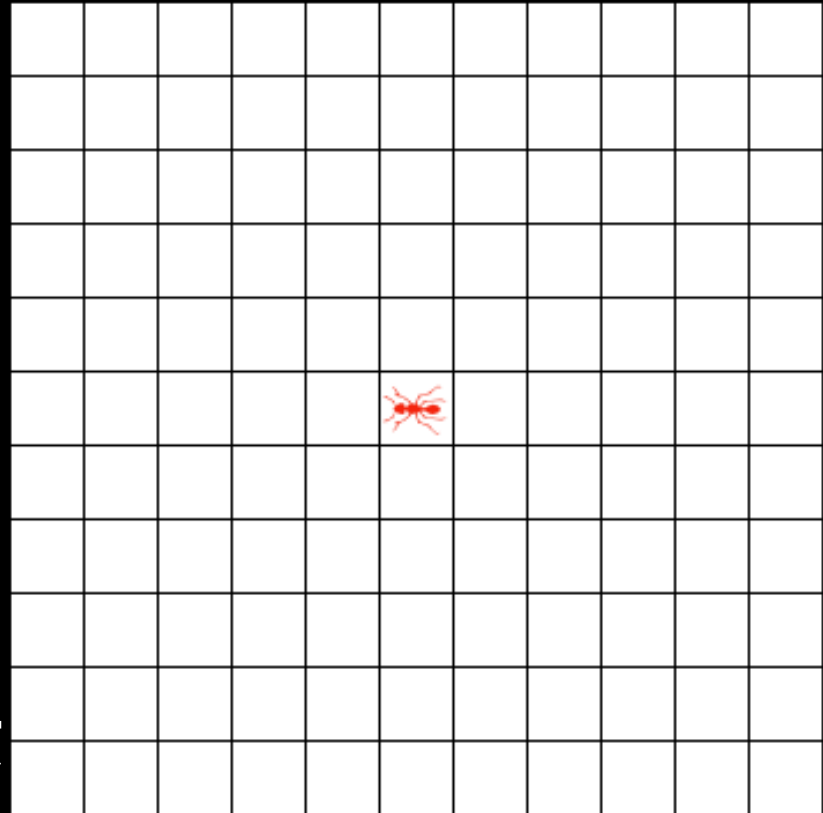


Step: 199

ウィキペディアより

複雑な世界に隠された単純な摂理

- 黒と白の2色からなる2次元タイルをアリが以下の単純な規則にしたがって動く
 - 黒いマスにアリがいた場合、 90° 右に方向転換し、そのマスに色をつけ、1マス前進する
 - 白いマスにアリがいた場合、 90° 左に方向転換し、そのマスの色を黒にして、1マス前進する
- 最初の黒と白のタイルの配置によって複雑なパターンが生まれる



単純な法則から生まれる複雑な世界



Step: 199

- 物理学における二つの大きな目標
 - 一見複雑そうな現象からその背後にある単純な法則を見抜く
 - 単純な法則からなぜこのような多様性が生まれるかを理解する
 - 対象が何であるかは問わない(物質のみならず、生命、社会現象、心理現象、脳などまさに森羅万象)

ウィキペディアより

**All truths are easy to understand
once they are discovered;
the point is to discover them.**

Hale Telescope at the Palomar Observatory

Photograph of 200-inch Hale telescope and dome.

Image Credits: Peter Sorel and Charles H. Cahill

- Galileo Galilei

2010年10月7日@カリフォルニア工科大学天文学教室講堂

From
After Dark
to
Beyond Dark

アイザック・アシモフ著 「Nightfall (夜来たる)」

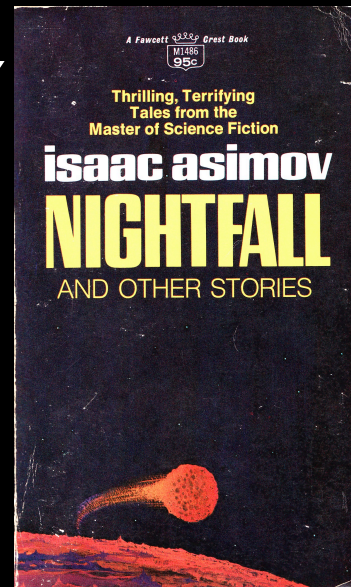


イラスト：羽馬有紗

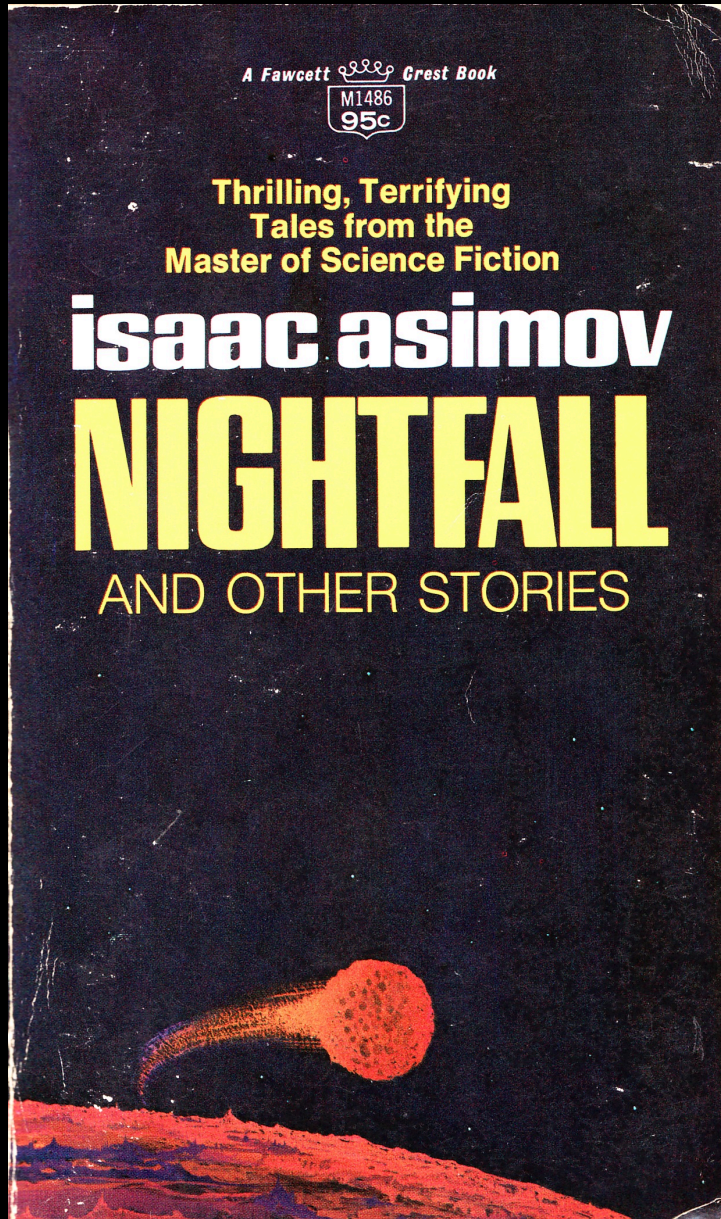
- 2049年に一度しか夜が来ない“地球”の世界観
- 自分たちの“地球”以外に宇宙はあるか？

アイザック アシモフ: Nightfall

- *The Cultists said that every two thousand and fifty years Lagash entered a huge cave, so that all the suns disappeared, and there came total darkness all over the world! And then, they say, things called **Stars** appeared, which robbed men of their souls and left them unreasoning brutes, so that they destroyed the civilization they themselves had built up.*



夜空を観て世界を知る: Nightfall



- “Light !” he screamed. Aton, somewhere, was crying, whimpering horribly like a terribly frightened child.
- *“Stars -- all the Stars -- we didn't know at all. We didn't know anything.”*

「我々は何も知らなかった」
でもこれですべて？

(すばる観測所、田中壱氏撮影)

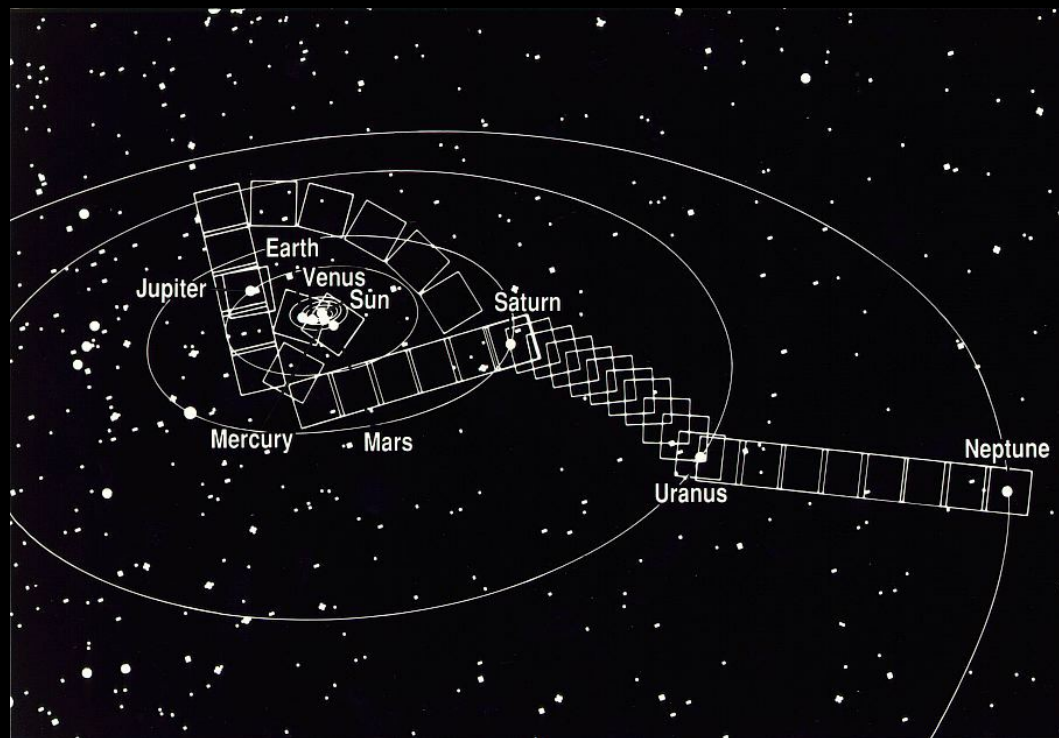
Another world outside the earth?

地球の外に「世界」はあるのか？

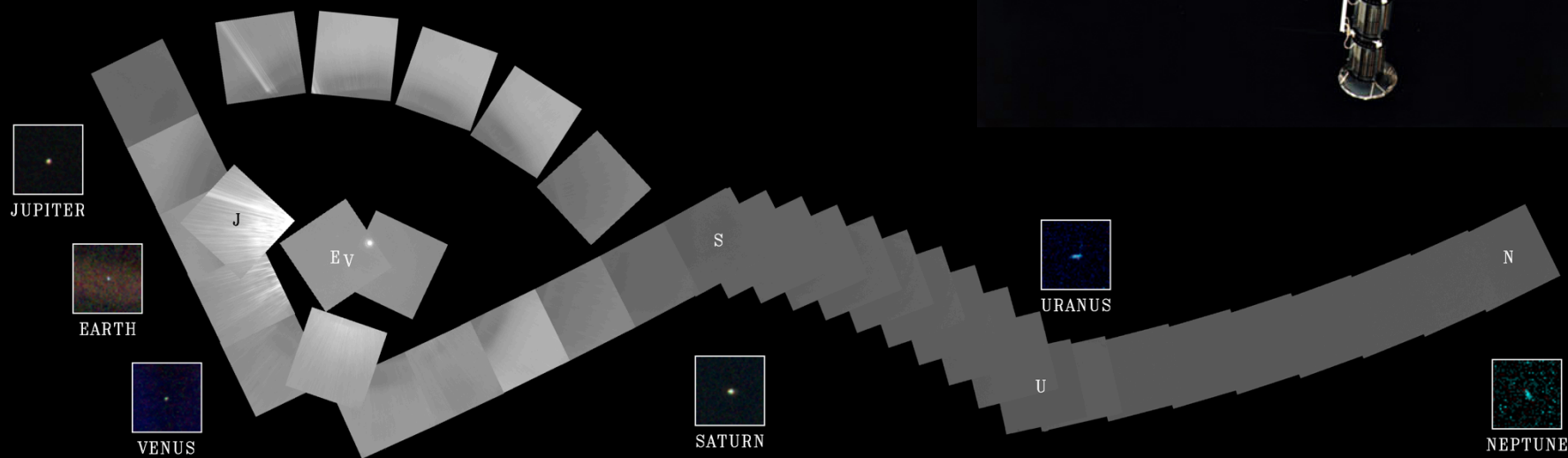
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 1990年2月14日
@40AU

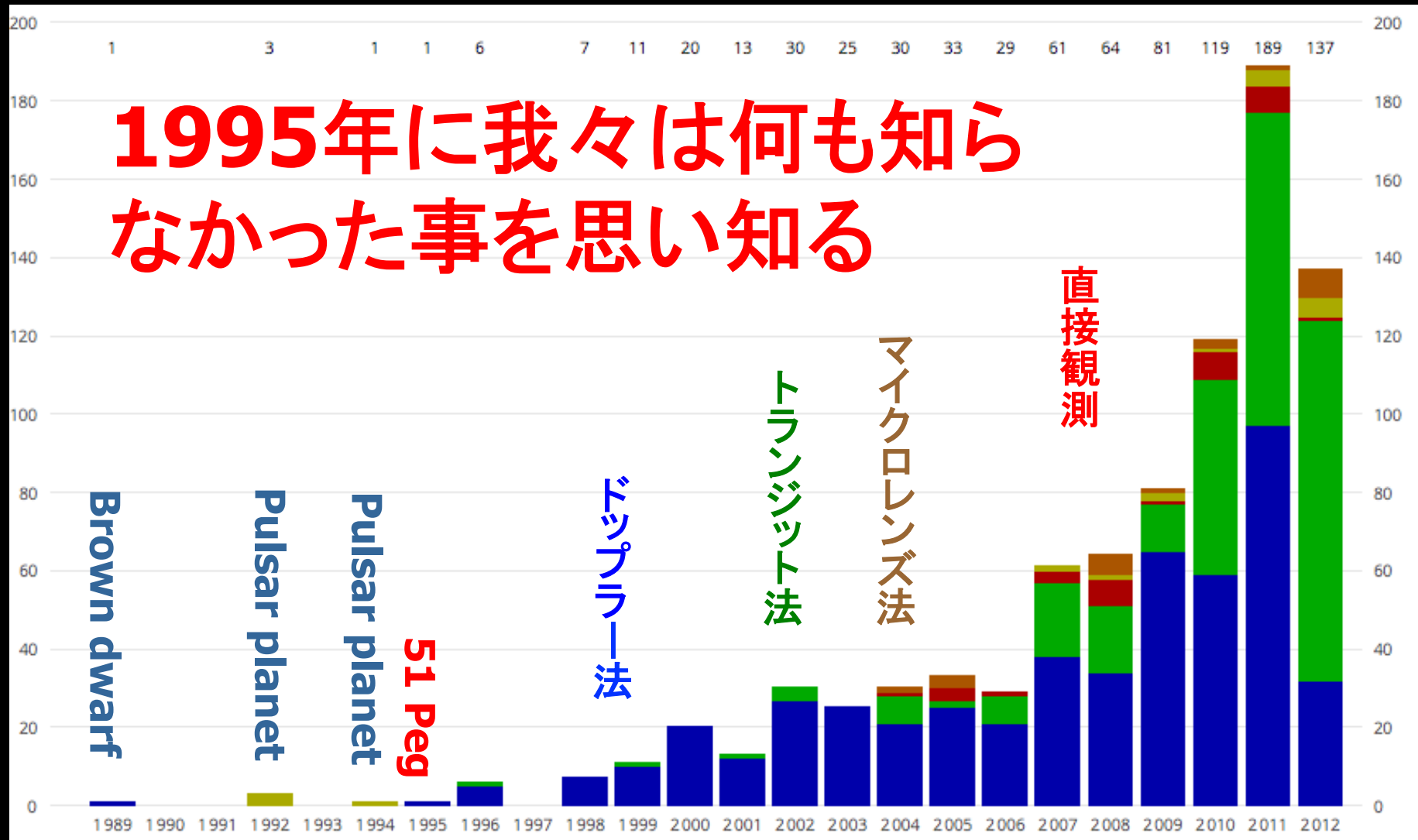
■ カールセーガンが
地球の画像を
Pale Blue Dot
と命名



ペイル・ブルー・ドット

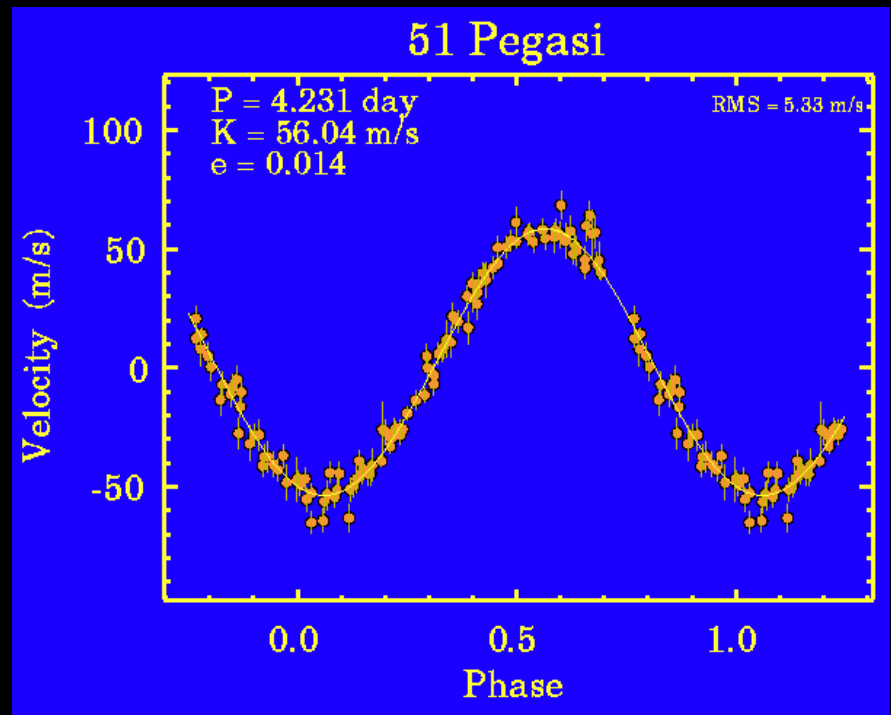
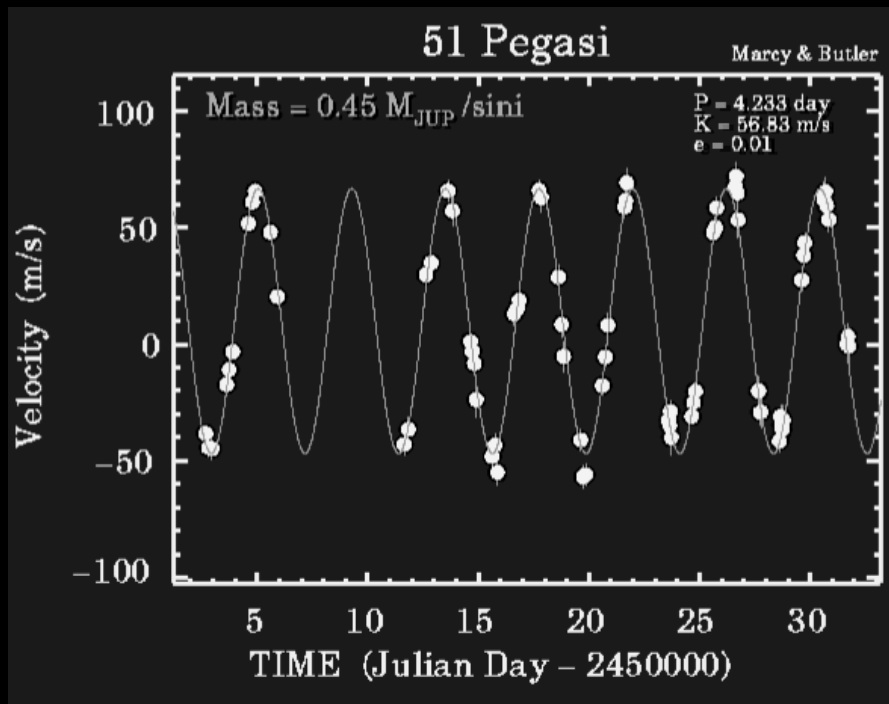


太陽系外惑星発見の歴史年表

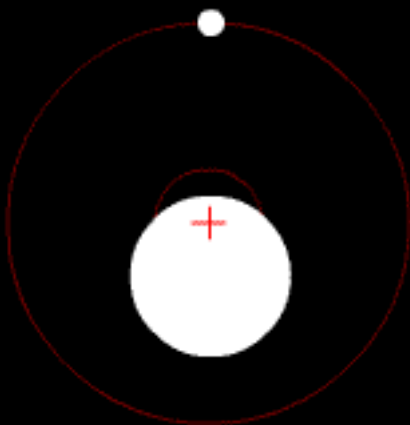


ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



どうやって見つけたのか？

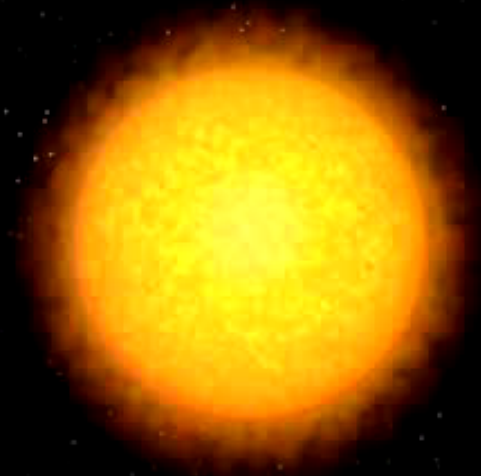


■ ドップラー法

- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

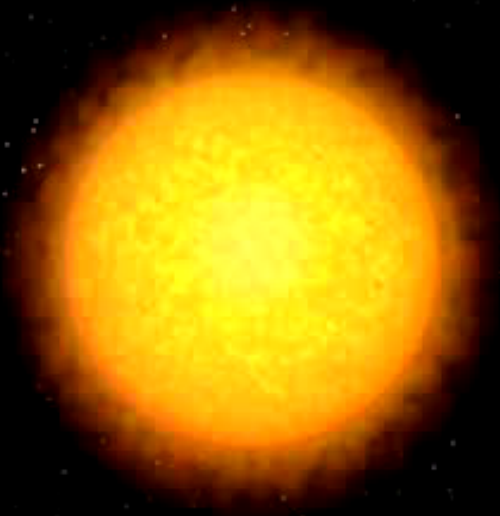
■ トランジット法

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



初めてのトランジット惑星HD209458b

- 速度変動のデータに同期した惑星による中心星の掩蔽の初検出
周期3.5日のホットジュピター

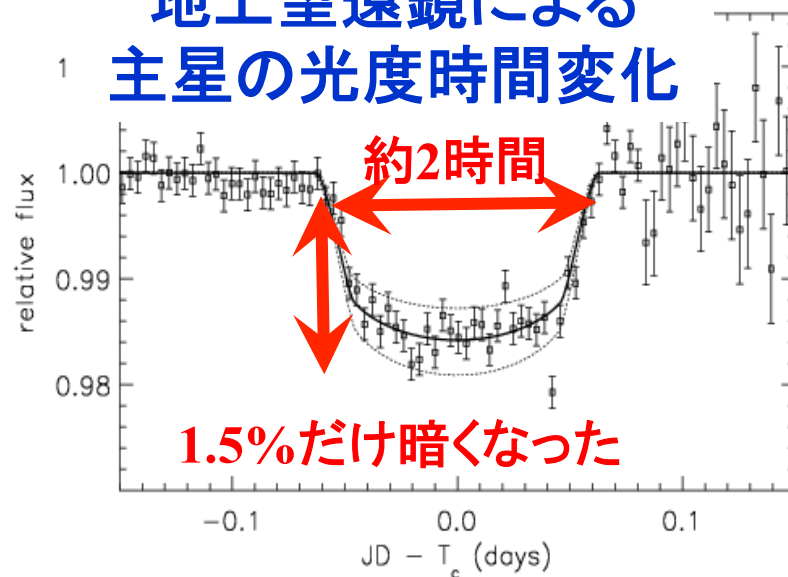


想像図

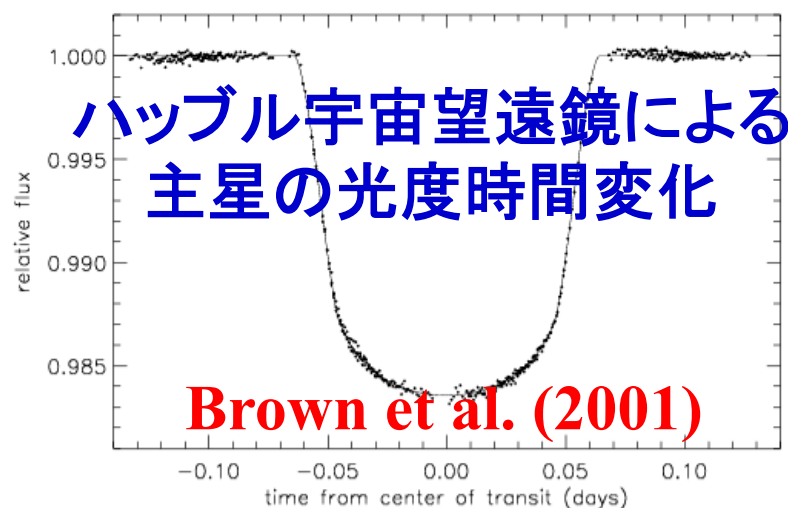
Henry et al. (1999)

Charbonneau et al (2000)

地上望遠鏡による
主星の光度時間変化



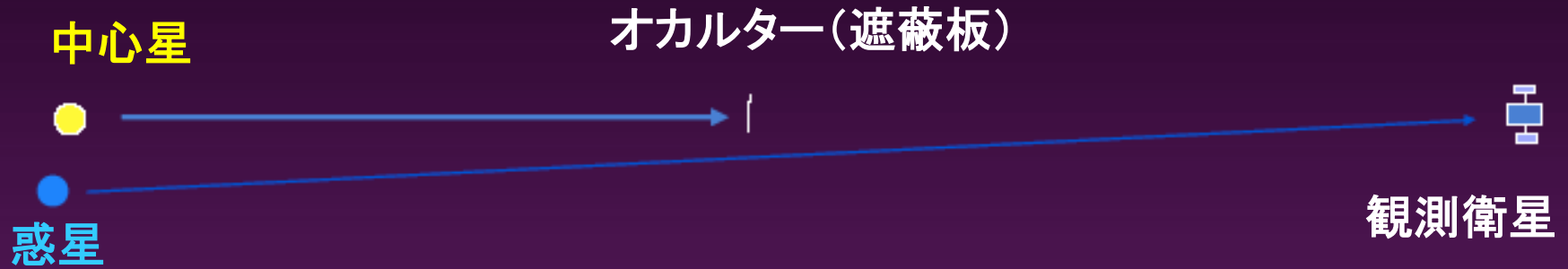
ハッブル宇宙望遠鏡による
主星の光度時間変化



すでに学んだこと: 惑星いろいろ

- 惑星(系)は稀なものでなく普遍的
 - 太陽と似た恒星の34%(以上)が惑星を持ち、17%(以上)は複数の惑星を持つ
- 太陽系と良く似た系もかけ離れた系も存在
 - 太陽の周りを数日で公転する木星型惑星が大量に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
 - 太陽系とは違い円軌道というよりもかなりゆがんだ楕円軌道の惑星も多い
 - 地球の2倍程度の質量の惑星候補も複数報告
 - 水が液体として存在する摂氏0度から100度の温度の惑星(ハビタブル惑星)候補も報告
- 我々の地球以外に生命が存在するか？

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)

バイオマーカー

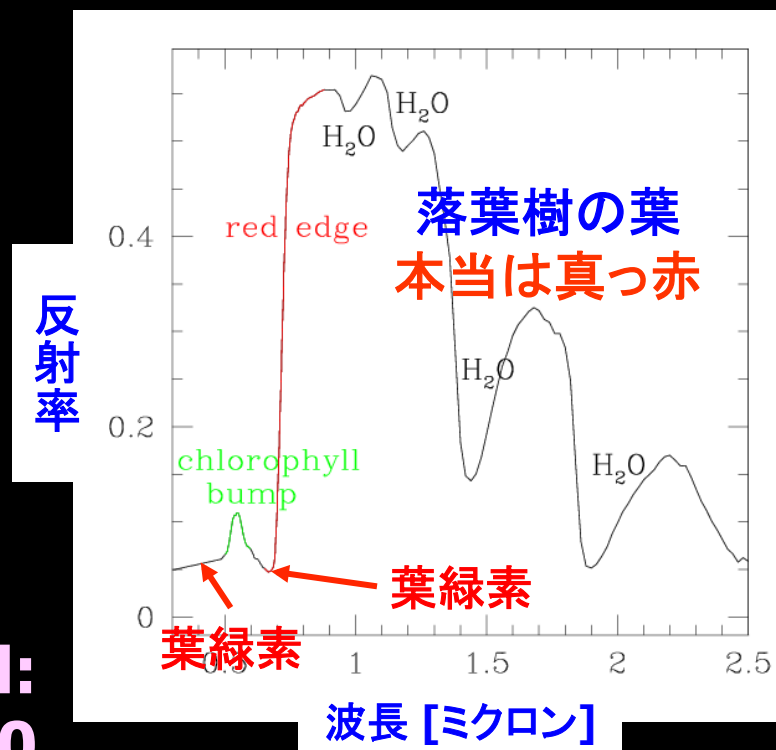
- 何をもってバイオマーカーとするのかは曖昧
 - 生物由来と考えられる大気成分（酸素、オゾン、メタン）の分光観測
 - 植物のレッドエッジの測光観測
 - 知的生命体からの信号の電波観測
 - 地球外での生命を生み出す環境とそれに対応した生物の多様性をどこまで認めるか
- いずれにせよ、検出は天文学観測しかない
 - 天文学で検出可能な限界は何か
 - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか

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



もうひとつの地球の色の变化から、海・雲・植生の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
Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

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

地球は青かった？

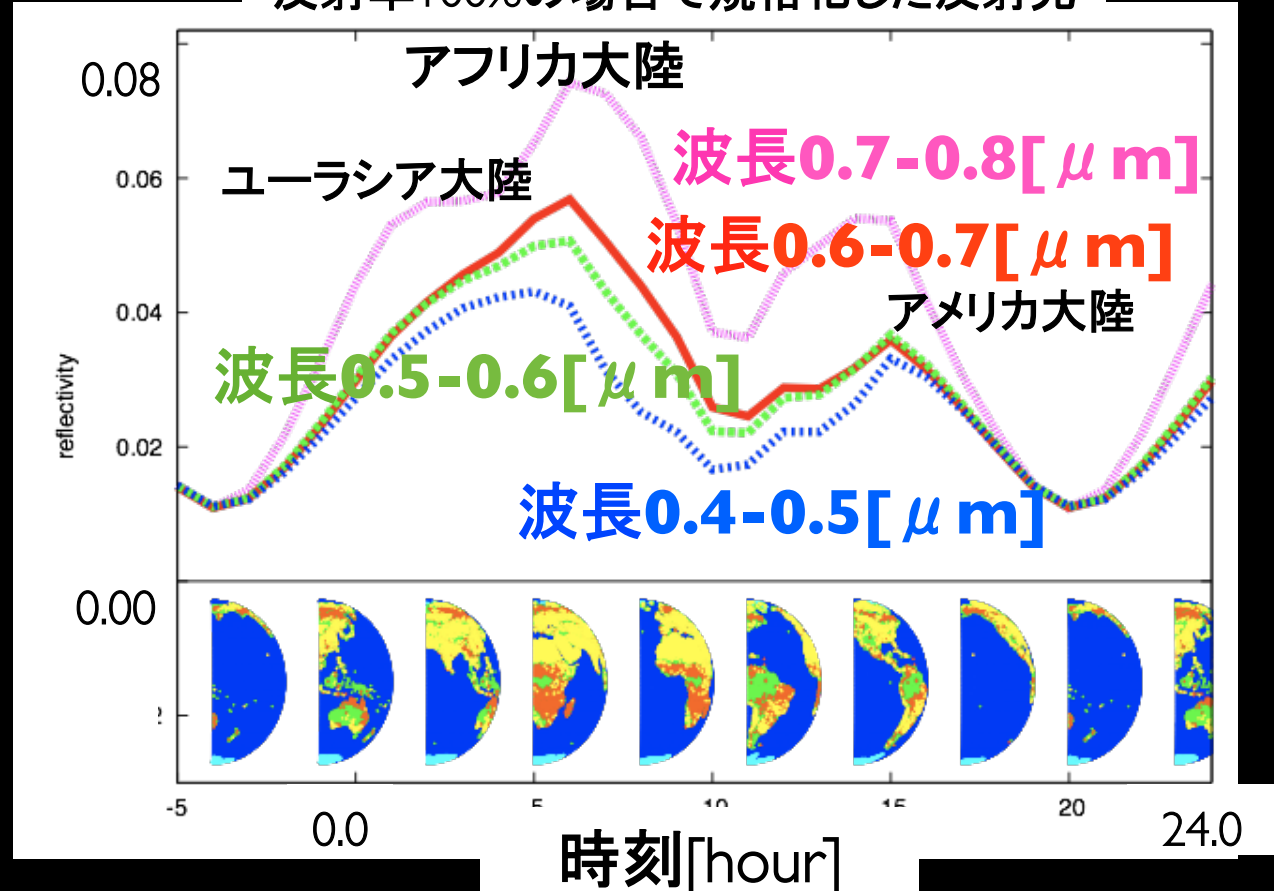
ペイルブルードット



自転に伴う反射光の色の
時間変動シミュレーション

- 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

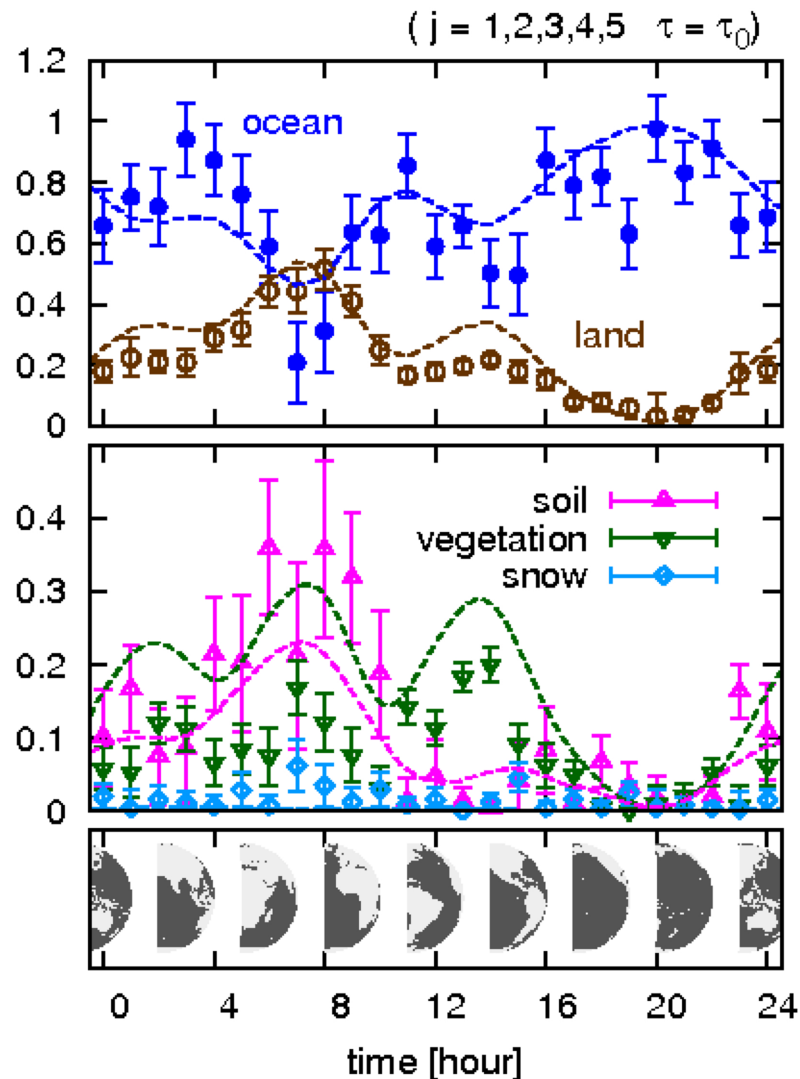
反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

もうひとつの地球の色から表面積を推定

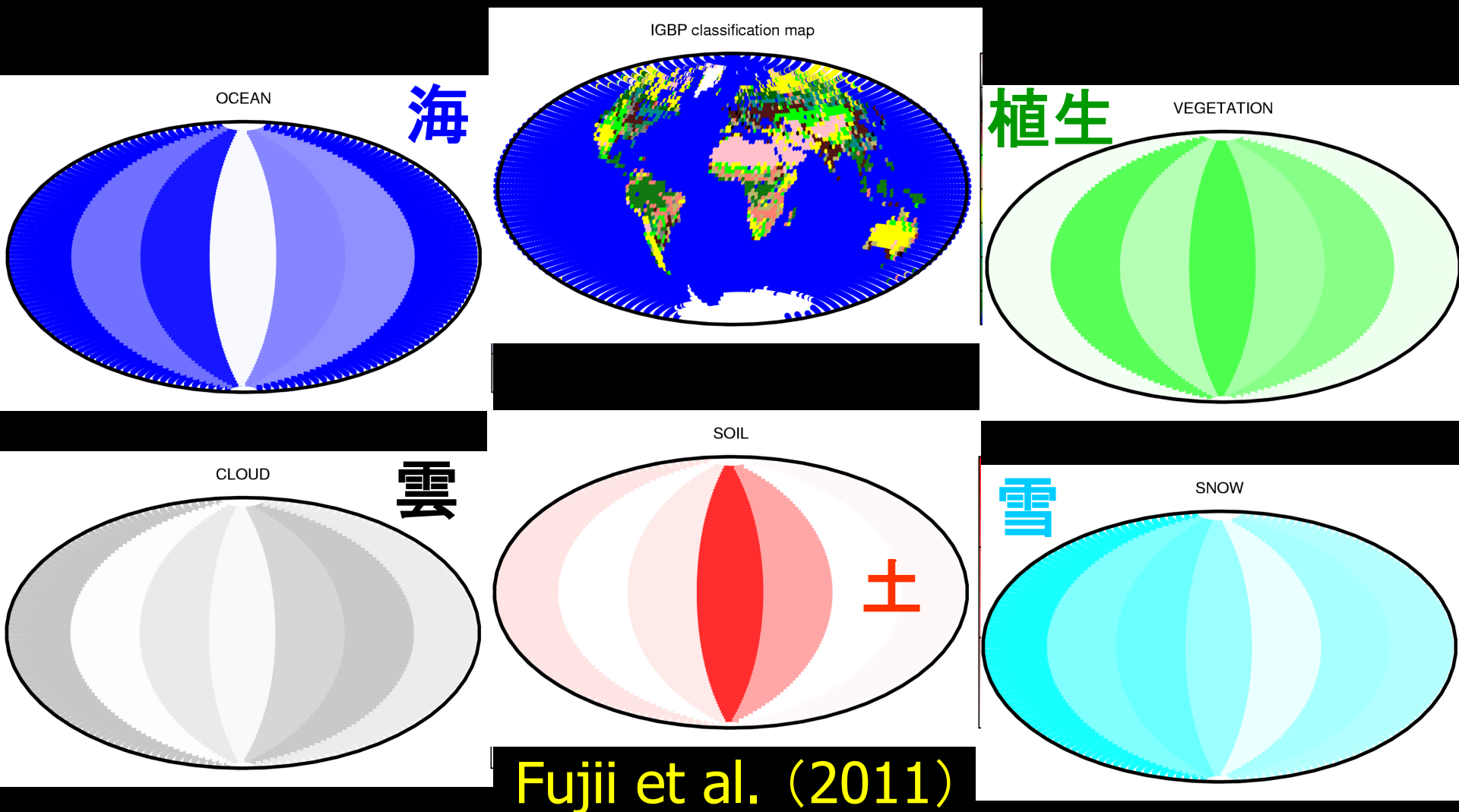
(重みつき)表面積比



- 10pc先の地球を口径4 mの宇宙望遠鏡で1週間観測したと仮定
 - 雲が存在せず、かつ中心星の光が完全にブロックできたとする
- 微妙な色の変化から、表面の海・土・植物・雪の4成分の面積の割合が推定できる
 - 地球は単なるペイルブルードットではない

Fujii et al. (2010)

実際の地球観測データから推定された 地表面成分の経度分布地図



太陽系外惑星の世界

- 1995年に天文学が「世界観」を大きく広げた
 - 今や惑星系は固有名詞ではなく、普通名詞
- 惑星系の存在は普遍的だが、性質は多種多様
 - 太陽に似た恒星の30パーセント以上は惑星を持つ
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
- 宇宙における生命の起源とその普遍性という究極の問いに、科学的立場から答えられる日が来る可能性もある
 - 「もうひとつの地球」の発見をめざして、数多くの観測が実行中・計画中

予想もできない展開が待っているはず

- 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

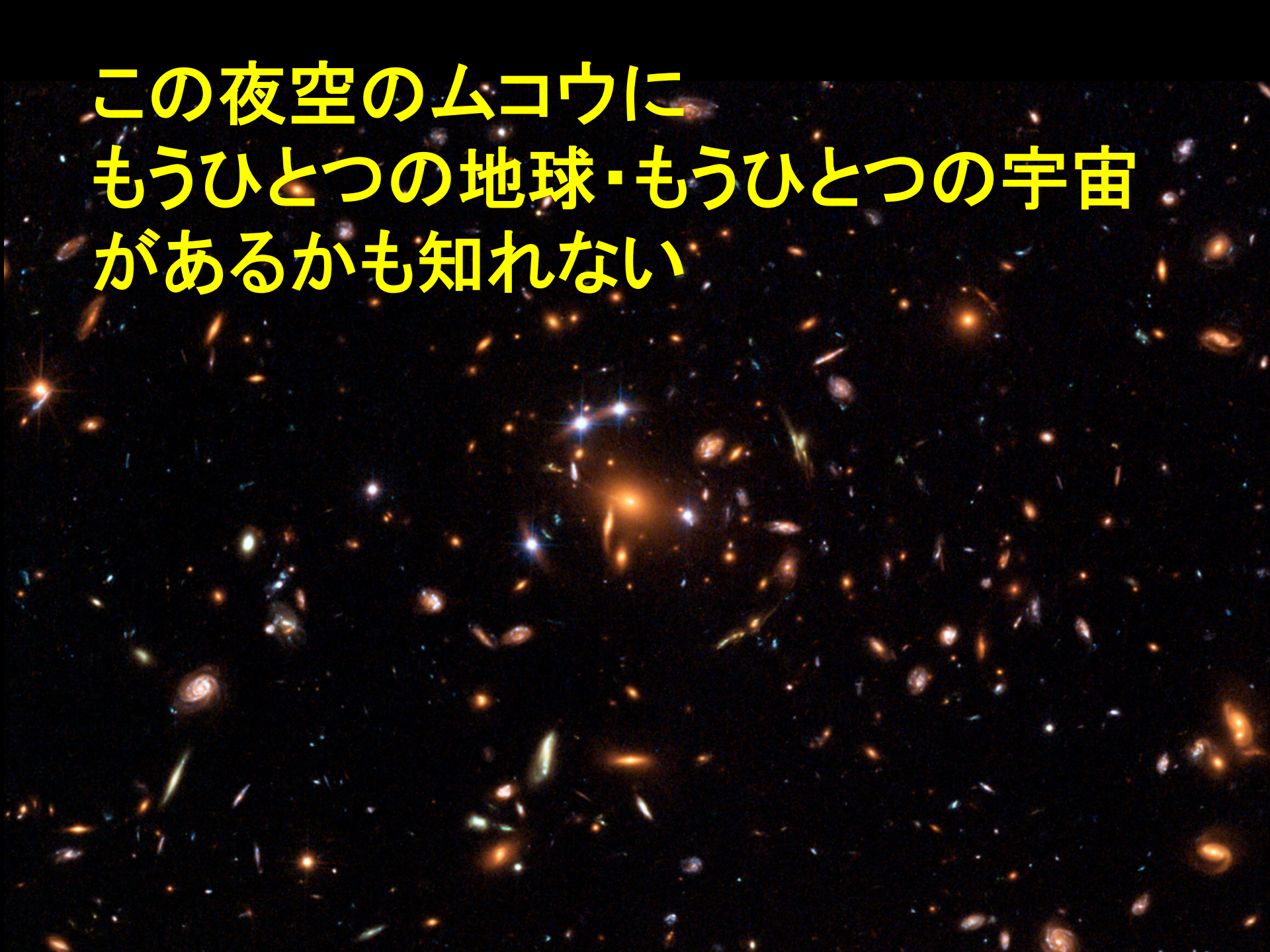
この青空の向こうに何かがあるはず



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
もうひとつの地球・もうひとつの宇宙
があるかも知れない



From
the *Pale Blue Dot*
to
Beyond a Pale Blue Dot



補足

愛いっぱいの「天文学者の生活と意見」

東大の物理の先生(専門

だった。

は宇宙論) って、どんな人だろうと想像してみる。身なりにかまわずオタク的。いわゆるカタブツで、冗談がつうじない。

わたしの思えばくそんな貧しいイメージは、この一冊でこなごなになった。

それどころか、激しい共感に胸がゆさぶられた。東大の物理の先生は詩人とおんなじだ。世間から「雰囲気だけは立派だけど、それってなにかの役に立つの?」とうさんくさそうに見られ、それでも自分の信念をつらぬき、ちまちまと安い仕事をこなして生活しているの

いてもたってもいられずに都内の大書店をめぐり、本書の状況を調査する。た

いがいは科学・理工のフロアにある「物理」の棚、そのなかでも「相対論」の場所に置かれている。でもそれは大間違いだ。書店のみなさん、この本は相対論のことなんかちっとも教えてくれません。版元の名前に「爆笑エッセイ」の棚に移してください。

「海底人の世界観」「外耳炎が誘う宇宙観の変遷」「物理とカラオケ」などの章タイトルを見れば、この本がいかに斬新な「天文学者の生活と意見」であるかがわか

究分野のことや教員生活について書いたエッセイは多いが、ここまで自分を遠くから(望遠鏡で。さすが天文学者) 冷徹に見ているものはなかなかない。笑い優先、自己愛はあとまわし。愛娘や学生の写真もふんだんに使った(周囲の人は気の毒だ)、リアルな生活感満載のエッセイなのだ。しかしす

っかり笑わされながらも、著者の研究対象が、宇宙のなかみの4分の3を占めているにもかかわらず得体の知れない「ダークエネルギー」だということもすんなり頭に入る。凄腕である。

自分の仕事をおもしろく書き、人に伝える。それは深い愛(仕事に対しても、読者に対しても)なくしては不可能なことだ。愛の人を発見してうれしい。

人生一般二相対論

須藤 靖

東京大学出版会

人生一般二相対論

●須藤 靖 東京大学出版会 / 2520円

芸能ネタものを社会学風に論じる本を出版する大学教員がいる。しかもそれが「へえー」と好感を持って受けとめられるのが現代社会らしい。

一方、本書のように直球の硬いタイトルでは「やっぱりね」と敬遠されてしまいそうだ。今や友人に人生とか倫理を問いかける中高生では、学校でいじめに遭いかねない。かくも屈折した現代に、あえて真正面から教養の大切さを切々と説く著者に拍手を送りたい。

日常的に大学（院）生に接している立場からも、学生の教養力低下はまさに実感するところ（私自身に関してはこの際不問とさせて欲しい）。狭い意味での専門知以外にはあまり興味がないようだ。しかし、一般社会においてはもちろん、狭くて深いことが最重要に思われがちな研究の現場においても、真の発見には幅広い教養が必須である。知識と教養は似て非なるものなのだ。

旧制高校で重んじられていたこの「教養」は徐々に軽視されるようになり、1991年の大学設置基準の改正により学部教育の自由度が拡大した各大学はこぞって教養学部を廃止した。その数少ない例外である東大教養学部において、「教養」を守るべく長年闘い続けてきた著者が、自らの英語教育経験から教養の理念と普遍的意義を熱く語る。

英文学にしばしば登場するイギリス的「センス・オブ・プロポーション」（バランス感覚とでも訳すべきだろうか）の理念に共鳴した著者は、新渡戸稲造がすでにその言葉を用いていた事実を知り、明治のエリートが共有していた教養としての英文学読解力の高さに感銘を受ける。実用性ばかりが過度に強調される現在の英語教育に対して、異文化を理解し文学作品に描かれた高邁な精神を学ぶ役割の指摘には目を開かされる。

アメリカに新入生を短期留学させることが教養教育だと勘違いしている一部の大学教育関係者こそぜひ一読し、真の教養とは何なのかじっくり考え直して頂きたい。



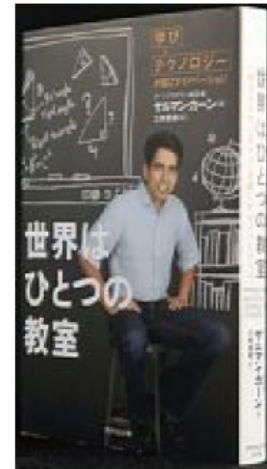
恥ずかしながら全く知らなかった。こんな素晴らしい活動がすでに実践され、広く受け入れられていたとは。気がつかなかった。こんな簡単なやり方が教育を根底から変革するとは。

カーン氏は、^{いとこ}2004年に従姉妹にインターネットで家庭教師をした経験を通じて、08年、オンライン教育サイトを立ち上げる。そこでは、年齢や学年、授業時間といった既成の枠は存在しない。いったんどこかでつまずくと、もはやそこに立ち返る事が困難な一斉教室授業スタイルの制約もない。誰もが自分のレベルと興味に応じて、無料でいつでも自由に学習できる。さらに、1単元10分程度にまとめたビデオ教材を完全に理解するまで反復して次の単元に進めるし、必要であればいつでも戻る事が可能。これらが単なるビデオ授業とは一線を画す点だ。

著者によれば、税金による公的義務教育は18世紀のプロイセンに端を発する。生徒を教室に集めて一方的に講義を聴かせるスタイルは、忠実で従順な市民を生み出す狙いで考案されたようだが、万人に教育を提供する効率的な方法だったのも事実。それが現在に至るまでそのまま継承され続けてきた事こそが問題である。

高知県の片田舎で育った私だが、地元の小中学校で優れた先生方に恵まれたおかげで、質の高い教育を享受できた。一方、高校では5割、大学に至っては7割程度の講義は、お世辞にも有益とは思えなかった。しかしこれはそもそも従来型の一斉教室授業スタイルの限界なのだ。

本書では、今や4000本以上のビデオが毎月5400万回以上閲覧されるまでに成長したカーンアカデミーの歴史と、その先にある教育の一つの姿が語られる。初等教育から大学の学部教育に至るまで、カーンアカデミーの思想と成功から学び、取り入れるべき要素は数知れない。ぜひとも実際にウェブサイトを訪問し、その素晴らしさと未来の教育の可能性への息吹を実体験して頂きたい。三木俊哉訳。



寺田寅彦、朝永振一郎、佐藤文隆は、私が大好きな文章を書く物理学者トップ3。

特に、東海林さだお風に意図された「当たり前のことと言わんケネ」的軽い表現とは裏腹に、深い思索の宝庫たる佐藤の著作にはしびれっぱなし。

フリー編集者である艸場よしみが「死と生の意味」を教えてもらおうと何故か宇宙物理学者佐藤に手紙を出す。それをきっかけとした京都の喫茶店での対話7回をまとめたのが本書。

科学者は危ない連中、根源なんてないんだよそんなもの、宇宙が出来る前なんてレベルの高い話は帰りに平安神宮にでも寄って考えろ、宇宙はロマンだなんてねぼけたこというな、自然をありのままに見ない修行をせよ、科学とは権威がこけていく物語、人間を問いたければ比叡山に行ったほうが良い。次々と飛び出す佐藤語録には、痛快さを通り越してただただあっけにとられるのみ。しまいには「僕はあなたから見ていちばん嫌いな男。ヤバイのつかまえちゃったと思ってるかもしれんね」とまで言い放つ（冷静な自覚は立派）。御 愁 傷 様です、艸場さん。

「生死」の意味は別として、天衣無縫な名発言の数々から、通常は語られない「宇宙はビッグバンからはじまったという知識は二束三文の値打ちもない。値打ちがあるのはなぜそう考えられるかだ」に代表される真の科学観が浮かび上がる。きれい事だけですませがちな職業的専門家ではなく、今や絶滅に瀕した本物の学者の姿を目の当たりにすればしびれるしかない。

我々に成り代わり、「感動しない」熱血頑固学者に叱られつつもめげずに質問をぶつける役をかってでてくれた艸場さんの勇気と無謀さに敬意を表したい。おかげで彼の従来の著作より、広い読者層にもわかりやすい記述となった。お礼にこっそり暴露しておく、根っからの愛妻家である佐藤先生は奥様には全く頭が上がらないらしい。自宅では逆に「また変なことばかり言って!」と叱られているに違いない、きっと。



関連文献

- http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2013j.html
- 北村薫『六の宮の姫君』（東京創元社）
- 村上春樹『アフターダーク』（講談社文庫）
- Isaac Asimov "*Nightfall*"
<http://www.polvoestelar.com.mx/babilonia/Libros/Isaac%20Asimov/English/Short%20Stories/Isaac%20Asimov%20-%20Nightfall%20and%20Other%20Stories.pdf>
- 斎藤兆史『教養の力 東大駒場で学ぶこと』（集英社新書）
- 山上浩二郎『検証大学改革 混迷の先を診る』（岩波書店）
- 佐藤文隆・艸場よしみ『科学にすぎるな!』（岩波書店）
- 須藤靖『ものの大きさ』、『解析力学・量子論』、
『人生一般二相対論』（東京大学出版会）
- 須藤靖『三日月とクロワッサン』、『主役はダーク』（毎日新聞社）
- 須藤靖・伊勢田哲治『科学を語るとはどういうことか』
(河出書房新社)