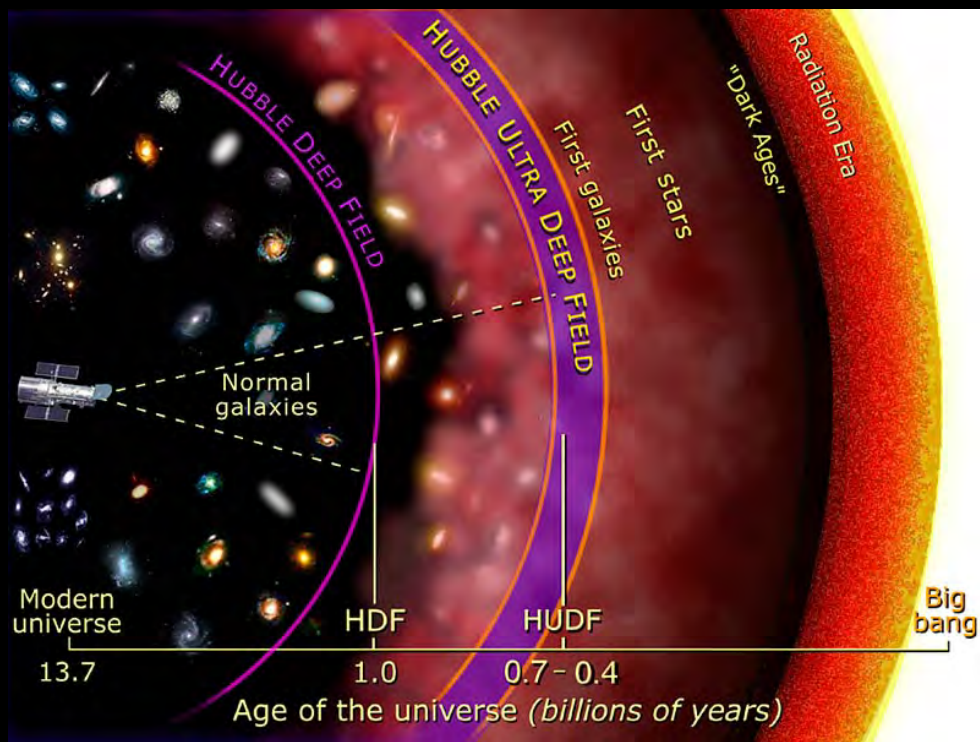


# 宇宙の境界、地球の境界



大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

2014年2月3日16:40-18:20 朝日講座 知の冒険

もっともっと考えたい 世界は謎に満ちている

「境界線をめぐる旅」 @東大法文2号館2階一番大教室

# 本日の目次

- 1 役に立たない天文学を通じて世界を知る
  - 天文学と文学の接点
- 2 観測されている宇宙を科学的に知る
  - 天体の階層と宇宙の大きさ
- 3 観測できない宇宙を哲学的に想像する
  - ユニバースからマルチバースへ
- 4 やがて観測されるだろう第二の地球を予想する
  - 太陽系外惑星と宇宙生物学

# 1 世界を知るための天文学

# まず注意：「宇宙」 < 「世界」

- 今回の話では「宇宙」とは天文学が直接観測できる具体的な対象、「世界」はその宇宙がしたがっている摂理や法則というより抽象的な存在、という意味で使い分ける
  - 人によってはこの二つを区別せず用いていることもあるだろうし、逆に宇宙は世界を含むより広い概念だとすることもあある(多分そっちが普通)
- でも私は「宇宙」の研究をしているため、宇宙のほうがより身近で具体的な対象のような気がする。そのため、以下では「宇宙」<「世界」として使い分けることにする

# 文学と天文学の接点

- 「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)**

# 草枕的的人生観と天文学

## 草 枕

山路を登りながら、かう考へた。

智に働けば角が立つ。情に棹させば流される。意地を通せば窮屈だ。兎角に人の世は住みにくい。

住みにくさが高じると、安い所へ引き越したくなる。どこへ越しても住みにくいと悟つた時、詩が生れて、畫が出来る。

人の世を作つたものは神でもなければ鬼にでもない。矢張り向う三軒兩隣りにちらちらする唯の人である。唯の人が作つた人の世が住みにくいからとて、越す國はあるまい。あれば人でなしの國へ行く計りだ。人でなしの國は人の世よりも猶住みにくからう。

越す事のならぬ世が住みにくければ、住みにくい所をどれほどか、寛容くわんりやうけて、束の間の命を、束の間でも住みよくせねばならぬ。こゝに詩人といふ天職が出来て、こゝに畫家といふ使命が降る。あらゆる藝術の士は人の世を長閑にし、人の心を豊かにするが故に尊い。

■ 住みにくさが高じると、空のムコウへ引き越したくなる。どこへ越しても住みにくいと悟った時、学者が生れて、学問が出来る。

■ 越す事のならぬ世が住みにくければ、住みにくい所をどれほどか、寛容で、束の間の命を、束の間でも住みよくせねばならぬ。ここに天文学者という天職が出来て、ここに天文学という使命が降る。あらゆる役に立たない学問の士は人の世を長閑にし、人の心を豊かにするが故に尊い。

# 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。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だ。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

# マリとタカハシの会話

- マリ: その話には教訓みたいなものはあるの？
- タカハシ: 教訓はたぶんふたつある。ひとつは、人はそれぞれに違うということ。たとえば兄弟であつてもね。もうひとつは何かを本当に知りたいたいと思つたら、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。



# 知的好奇心

- タカハシ: ハワイにまで来て、霜をなめて苔を食べて暮らしたいとは誰も思わないよな。でも長男には、世界を少しでも遠くまで見たいという好奇心があったし、それを押さえることができなかつたんだよ。そのために支払わなくちゃいけないものがどんなに大きかったとしてもさ。
- マリ: *知的好奇心*
- タカハシ: まさに

# Nobody... *really* ?

- ハワイにまで来て、霜をなめて、苔を食べて暮らしたいとは誰も思わないよな  
(村上春樹:『アフターダーク』)
- *Nobody wants to go all the way to Hawaii to stay alive licking frost and eating moss*  
(*English translation by Jay Rubin*)
- ***Nobody***
- *except astronomers...*

# 天文学者 = Nobody !



すばる望遠鏡

ハワイ島マウナケア山頂上  
にそびえる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





# アイザック・アシモフ著 「Nightfall (夜来たる)」

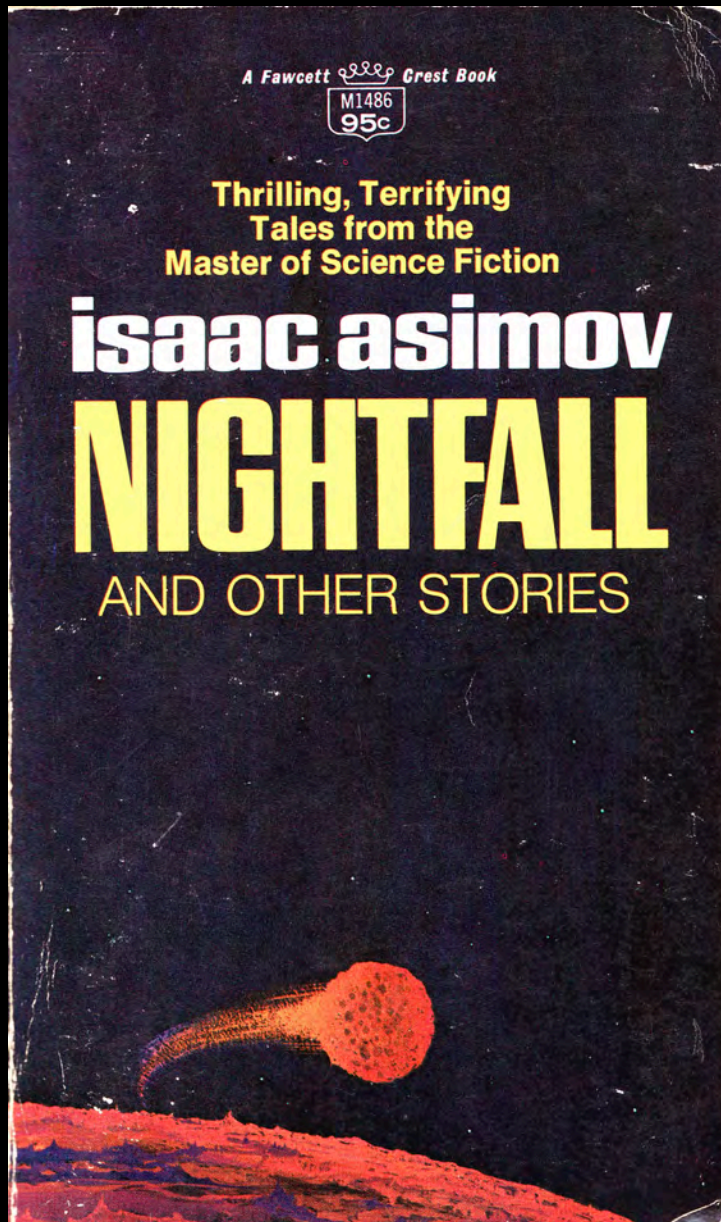


イラスト：羽馬有紗

- 2049年に一度しか夜が来ない“地球”の世界観
- この“地球”の外に「見えない世界」はあるのか？



# アイザック アシモフ: Nightfall (夜来たる)



- “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.”*

この青空は宇宙の境界なのか





「我々は何も知らなかった」  
でも本当にこれですべて？

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

## 2 現在知られている宇宙

### 天体の階層

# あらゆる世界には階層がある

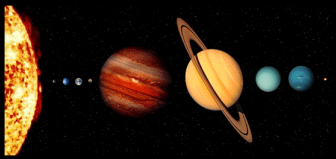
- 生物—器官—細胞—DNA—塩基—分子—原子
- 物質—原子—原子核—陽子・中性子—クォーク
- 宇宙—銀河団—銀河—惑星系—地球
- 会長—社長—副社長—専務—部長—課長—  
係長—社員—派遣—アルバイト
- 教授—准教授—助教—博士研究員—大学院  
生—学部生
- 士農工商（今の教科書では、そのような階  
層は存在しなかったと教えられるらしいが、、、）



# 宇宙の階層

## 宇宙の大構造

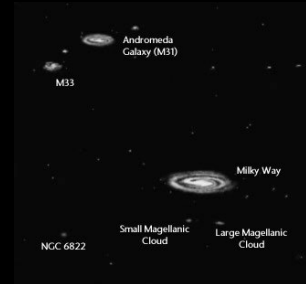
### 太陽系



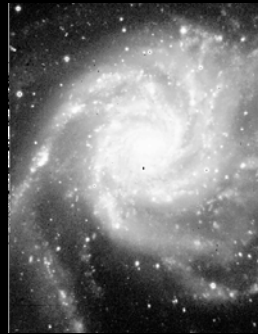
### 矮小銀河



### 銀河群



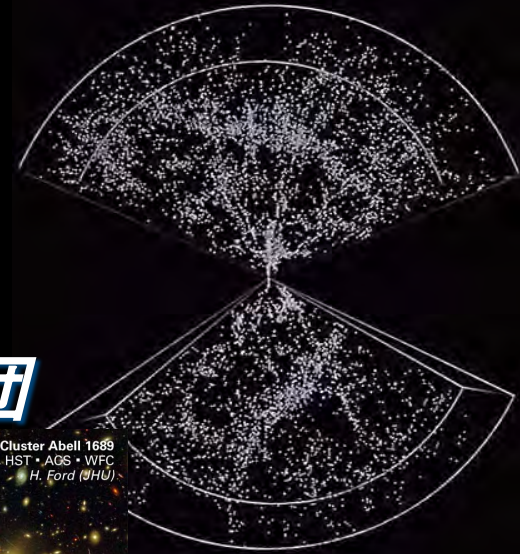
### 銀河



### 銀河団



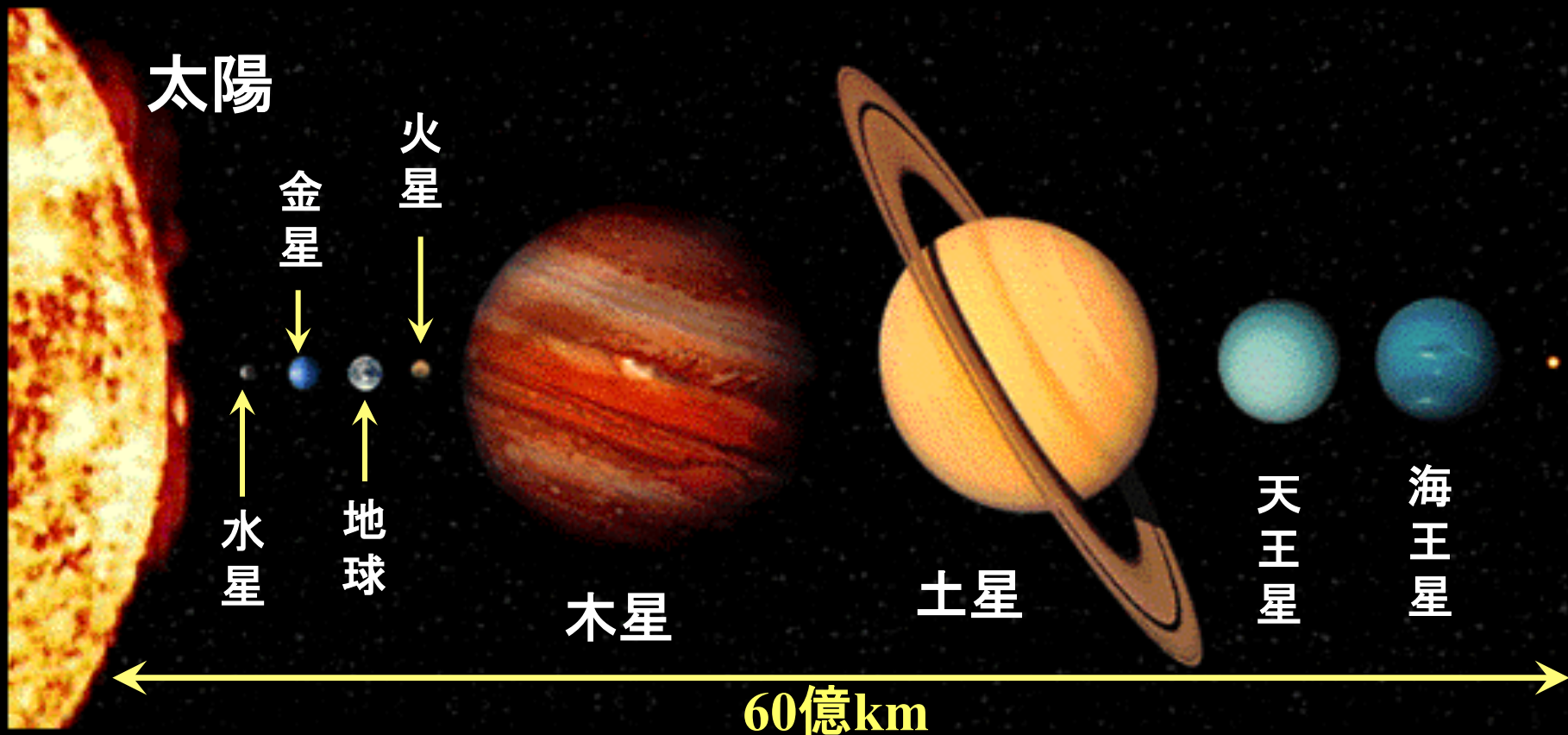
### 星団



$10^0$   $10^1$   $10^2$   $10^3$   $10^4$   $10^5$   $10^6$   $10^7$   $10^8$

典型的な大きさ [パーセク(〜3.1光年)]

# 八つの惑星：我が太陽系



(太陽からの距離は別として、惑星の相対的な大きさはほぼ実際の比の通り)

<http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm> © Calvin J. Hamilton

# アンドロメダ銀河 (M31): 隣の銀河



13万光年

すばる望遠鏡  
ハイパースープリームカム  
試験観測イメージ  
宮崎聡他(2013年7月)



# 銀河の形：ハッブル分類

Sa



Sb



Sc



Sd



楕円銀河

渦巻銀河

S0

レンズ状銀河



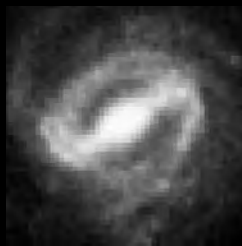
E0



E6



棒渦巻銀河



SBa



SBb



SBc



SBd

<http://skyserver.pha.jhu.edu/jp/>

# 銀河団： 宇宙で最大の自己重力系



- 100～1000個の銀河が、直径1千万光年程度の領域に重力で集団化したもの

銀河団エイベル1689  
(距離:22億光年)  
ハッブル宇宙望遠鏡

[http://hubblesite.org/gallery/album/the\\_universe](http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe)

人類が地上から見た最も遠い(=過去)宇宙(境界)

ハッブル  
ウルトラ  
ディープ  
フィールド  
(HUDF)



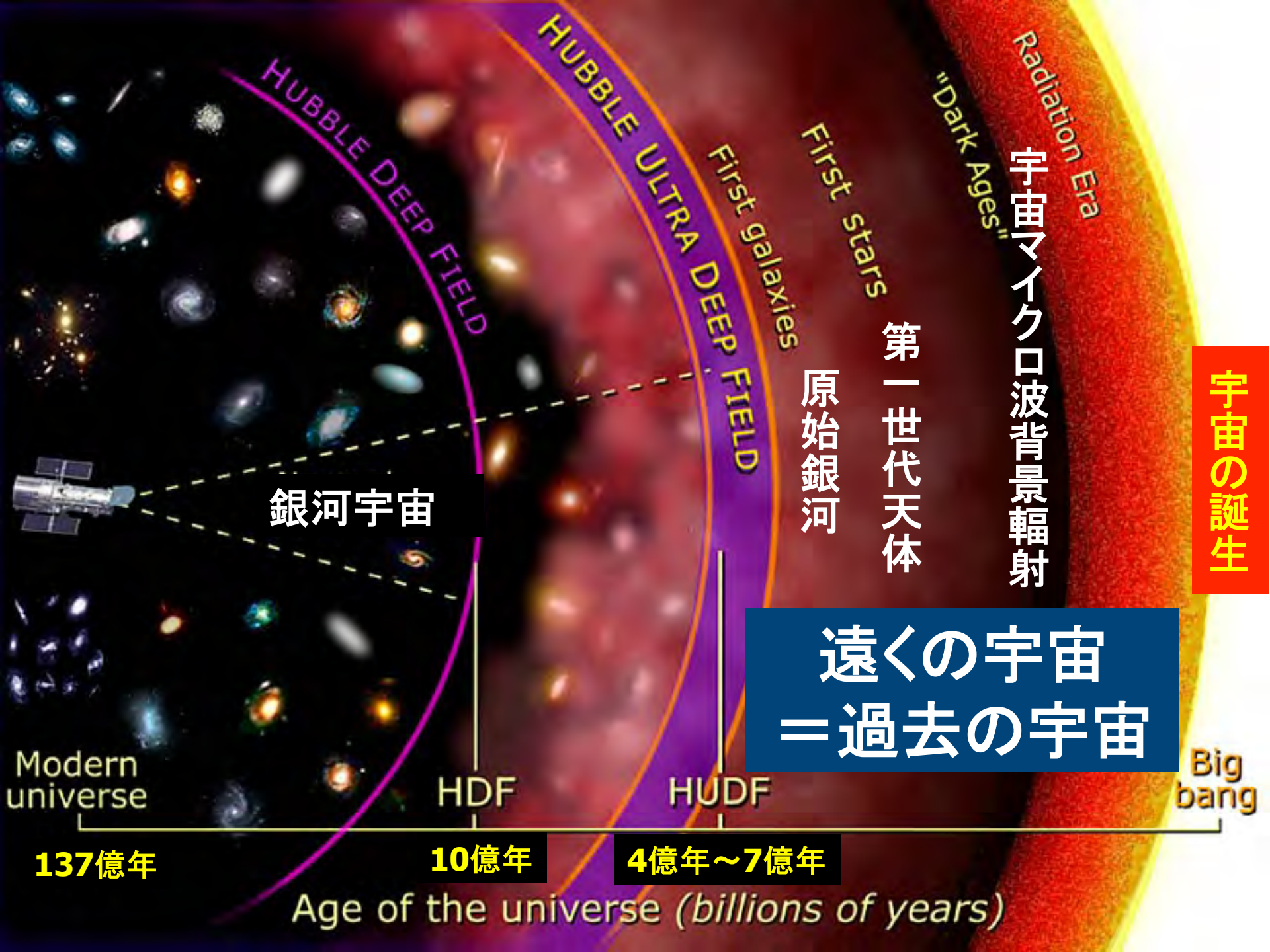
[http://hubblesite.org/gallery/album/the\\_universe](http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe)



# 夜空ノムコウのHUDF



[http://hubblesite.org/gallery/album/the\\_universe](http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe)



宇宙の誕生

宇宙マイクロ波背景放射

Radiation Era  
"Dark Ages"

第一世代天体

First stars

原始銀河

First galaxies

遠くの宇宙  
= 過去の宇宙

HUBBLE ULTRA DEEP FIELD

HUDF

4億年~7億年

HUBBLE DEEP FIELD

HDF

10億年

銀河宇宙

Modern universe

137億年

Age of the universe (billions of years)

Big bang

# 「宇宙」の大きさ

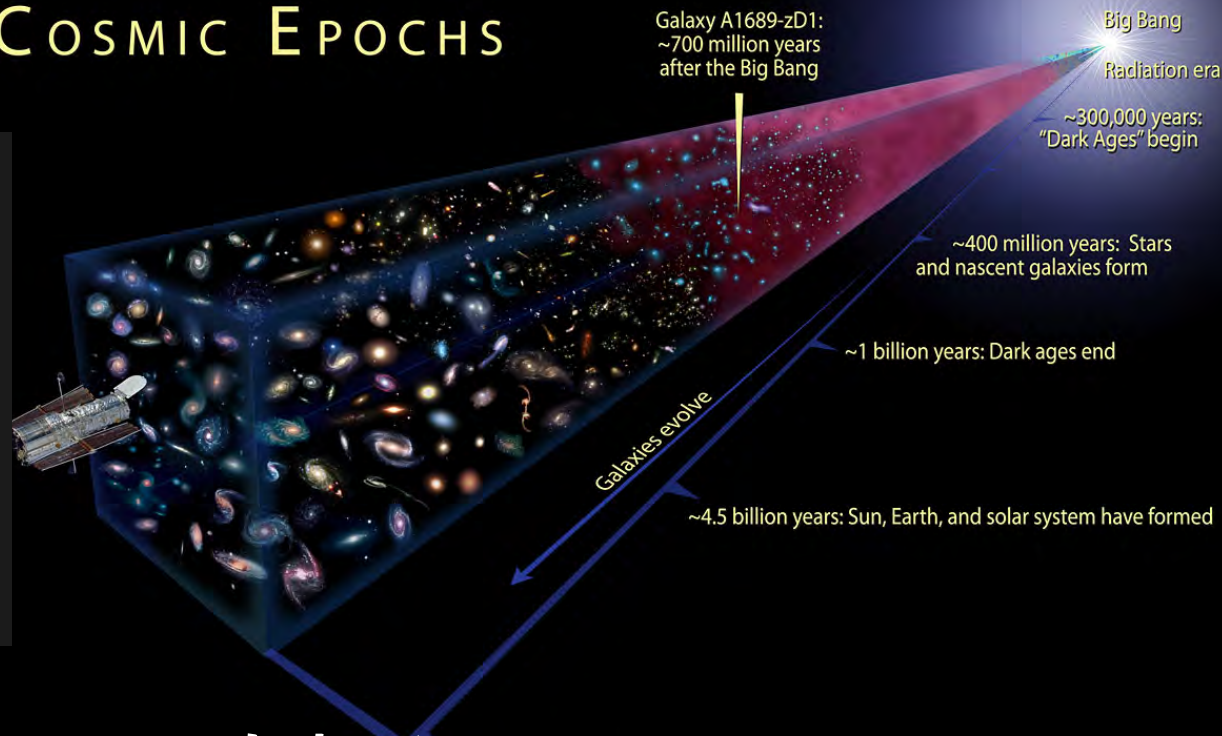
- 「宇宙には境界はなく無限に広がっている」というのが標準宇宙モデル
  - この「宇宙」は、理論モデルの対象たる観測できない「全宇宙」の意味
- ビッグバンモデルによれば「宇宙の大きさは約137億光年であり、その領域は今から137億年前に(実質的には大きさのない)点から始まった」という説明を良く聞く
  - この「宇宙」は、「現在観測できる範囲の宇宙」という意味
- 専門家は区別が分かっているが面倒なので説明していない
  - 二つが正しく区別できていない一般解説本も存在する

# 観測できる宇宙の大きさ

- 観測できる宇宙は、ある時間内に光が伝わる距離で決まる
  - 宇宙誕生以来、「観測できる宇宙」の大きさは時々刻々拡大している
  - その大きさは、厳密には「宇宙年齢×光速度」ではないが、数倍の違いを除けば近似的には正しい（これが良く用いられる137億光年）。
  - 現在観測できる宇宙の大きさは有限なので、現在の宇宙膨張を宇宙誕生まで逆にさかのぼれば、実質的には「点」だと考えて良い
- これを標語的に言えば「宇宙は点から始まった」

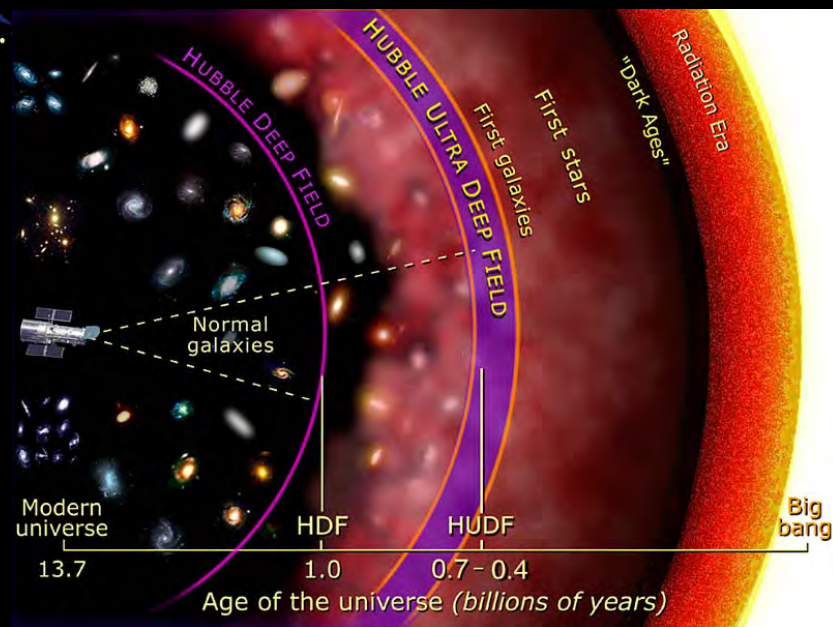


# COSMIC EPOCHS



## 誤解を与えやすい図の例

- 上の図では、いかにもある1点からビッグバンが起こり、現在の宇宙には境界があるという印象を与える
- 分かりにくいかもしれない下図のほうがより適切





# 全宇宙の大きさ

- 現在観測できる空間領域の外にも宇宙は広がっていることは確か
- 標準宇宙モデルではもっとも単純に、空間的には無限に広がっていると考える
  - むろん科学的には、これ以上大きくないと矛盾する、という下限値が与えられるだけではある
  - 現在観測できる宇宙の大きさの10倍以上であれば、仮に有限であってもほとんど矛盾はない
- 全宇宙が無限大の大きさなら、宇宙誕生までさかのぼってもサイズは0にはならない
  - 全宇宙は「点」から始まっていないどころか、誕生時の宇宙の大きさはやはり無限大だったと考えるべき

# 宇宙の境界： $0 \times \infty \neq 0$

- 観測できる宇宙には空間的境界はあるが、それは日々拡大しているし、全宇宙は無限に広がっていて空間的境界はないと考えるのがより適切
  - 有限 $\times 0$ は必ず0だが、 $0 \times \infty$ は、0にも、ある有限値にも、 $\infty$ にも成りうる
- 宇宙には時間的境界が半分ある
  - 宇宙には始まりがある(有限の過去)
  - 標準モデルでは、宇宙の未来は無限に続くと考えられているので、未来側の境界はない

### 3 夜空のムコウと宇宙の境界

ユニバースからマルチバースへ

# むくむくと湧き上がる疑念

- 「点」や「無限大」は数学的概念に過ぎず、それらが現実に存在するとは思えない
  - ごもつとも。「点」は量子論の効果を考慮するともつとボーっとするかもしれない。「無限大」も、ある値以上でなくてはならないという意味だと解釈するほうがより科学的
- 我々の住む「この宇宙」が世界のすべてで、それ以外には何もない、と考える根拠はあるのか
  - ごもつとも。我々が直接観測できるものだけがすべてではないかも(でも哲学的過ぎて危ない気が、、、)

# 多宇宙 (マルチバース)

- 天文学・宇宙論の歴史は、我々の存在が唯一絶対なものではなく普遍的・自然な存在であることを証明する方向に進んできた
- とすれば、我々の宇宙が唯一無二のものであるという考え方は、時代に逆行しているのではないか？
  - 我々が存在する宇宙は決して唯一絶対的なものではなく無限に存在するもののなかの一例にしか過ぎないかも？ (究極の民主主義)
  - universeからmultiverseへ

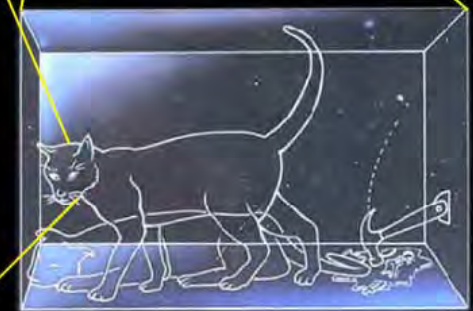
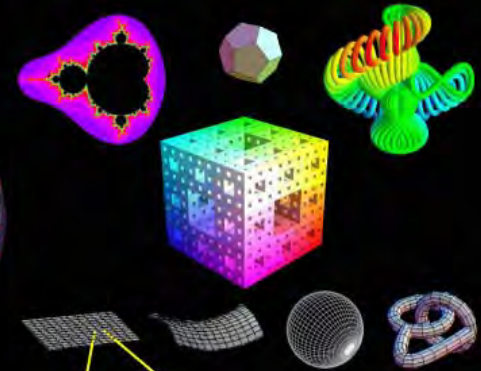
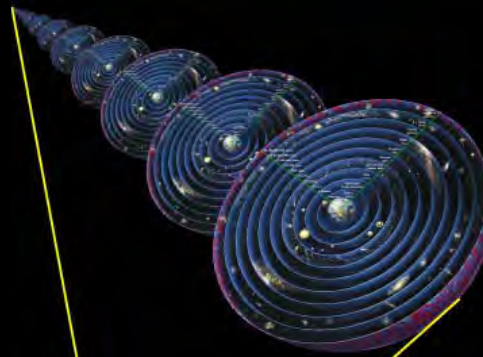
# 4つの マルチバース

Max Tegmark: Parallel Universes  
in Scientific American, May 2003  
and in astro-ph/0302131

- **レベル1**: 我々が観測可能な地平線の外の領域に存在
- **レベル2**: 無限の宇宙の中に島宇宙的にポツリポツリと存在(インフレーション的)
- **レベル3**: 量子力学の多世界解釈による宇宙(エベレット)
- **レベル4**: 数学的論理構造そのものが宇宙の形態として存在(プラトンの)

**Level 1: Regions beyond our cosmic horizon**  
Features: Same laws of physics, different initial conditions  
Assumptions: Infinite space, ergodic matter distribution  
Evidence: - Microwave background measurements point to flat, infinite space, large-scale smoothness  
- Simplest model

**Level 4: Other mathematical structures**  
Features: Different fundamental equations of physics  
Assumption: Mathematical existence = physical existence  
Evidence: - Unreasonable effectiveness of math in physics  
- Answers Wheeler/Hawking question: "why these equations, not others"



**Level 2: Other post-inflation bubbles**  
Features: Same fundamental equations of physics, but perhaps different constants, particles and dimensionality  
Assumption: Chaotic inflation occurred  
Evidence: - Inflation theory explains flat space, scale-invariant fluctuations, solves horizon problem and monopole problems and can naturally explain such bubbles  
- Explains fine-tuned parameters

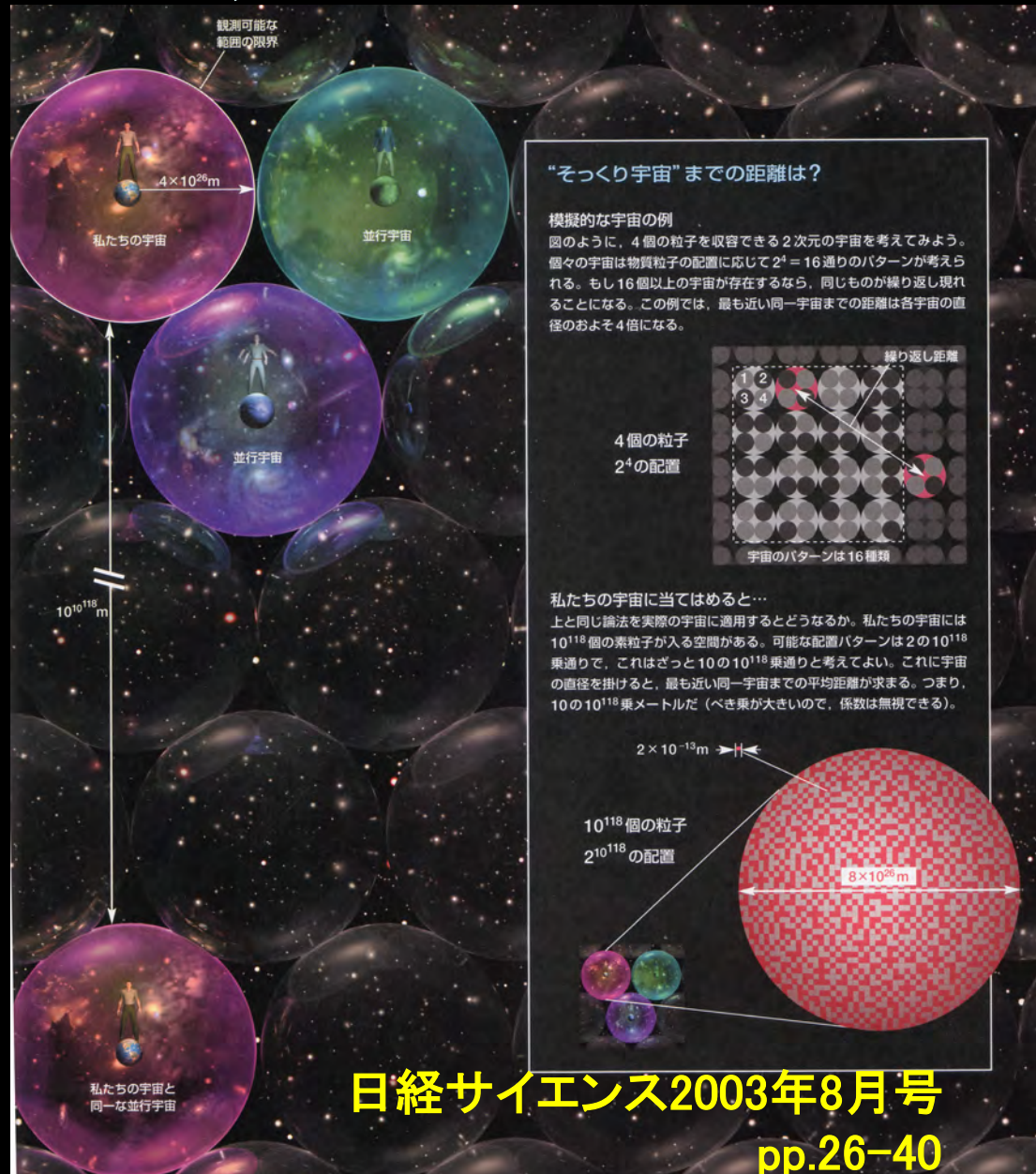
**Level 3: The Many Worlds of Quantum Physics**  
Features: Same as level 2  
Assumption: Physics unitary  
Evidence: - Experimental support for unitary physics  
- AdS/CFT correspondence suggests that even quantum gravity is unitary  
- Decoherence experimentally verified  
- Mathematically simplest model

<http://www.hep.upenn.edu/~max/multiverse.html>

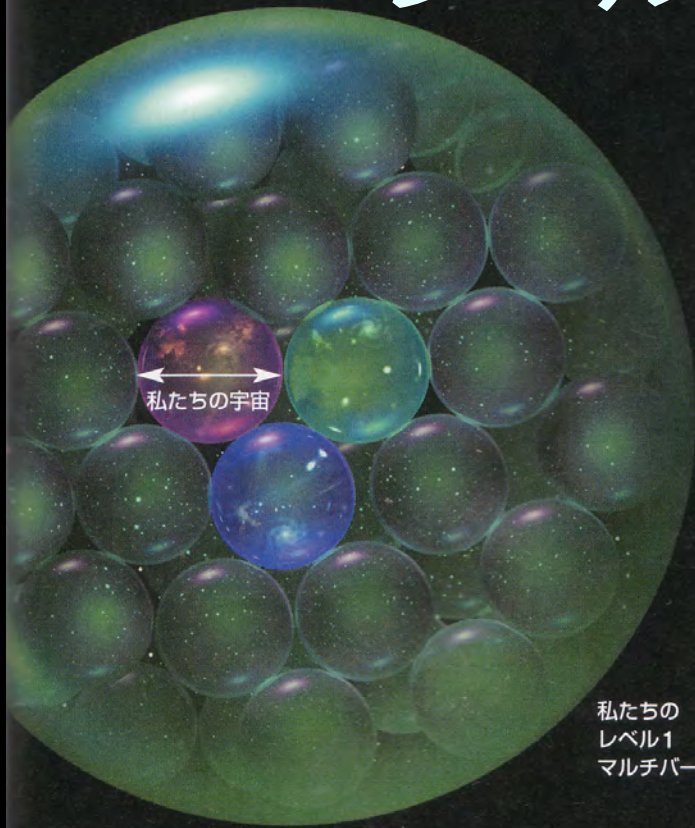


# レベル1 マルチバース

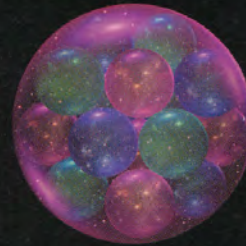
- 我々が観測できる領域の外側にも宇宙はずっと広がっている
- これらの集合体が全体としてレベル1 マルチバースに対応(別の宇宙というべきではないかも)
- それぞれの宇宙の物理法則は同じ



# レベル2 マルチバース

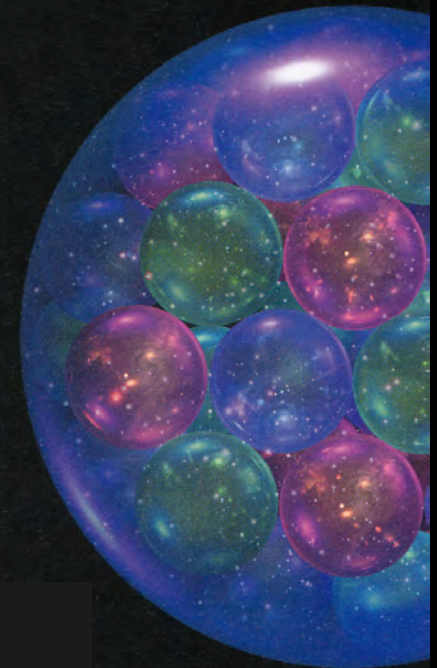


私たちの  
レベル1  
マルチバース



並行して存在する  
レベル1  
マルチバース

何もない空間  
(膨張している)



並行して存在する  
レベル1  
マルチバース

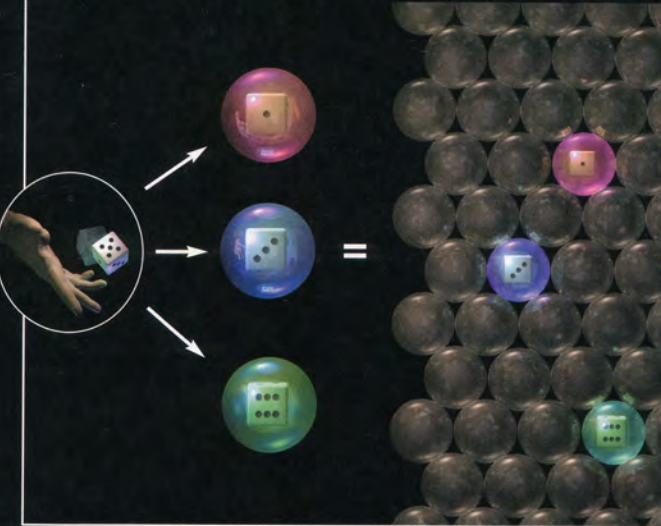
たがいに因果関係がないほど途方もなく  
隔たった異なるレベル1マルチバースが  
あり、そこでは物理法則も異なっているかも



# レベル3 マルチバース

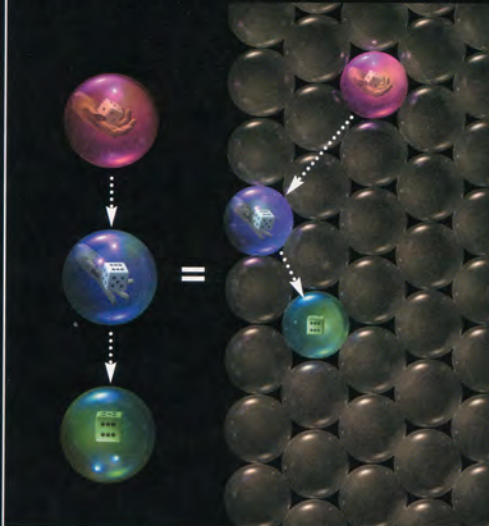
## エルゴード性

エルゴード性の原理によると、量子並行宇宙はもっと平凡なタイプの並行宇宙と等価だ。1つの量子宇宙はやがて状態が確定した複数の宇宙に分岐する（左）。しかし、こうして新たに生まれた宇宙は、どこか別の空間（右、図ではレベル1マルチバース）にもとから存在していた並行宇宙と変わらない。さまざまな事象がどんな順序で起きるのかを体現したものが並行宇宙だと考えるのがポイントだ。この考え方はどんなタイプの並行宇宙にも当てはまる。

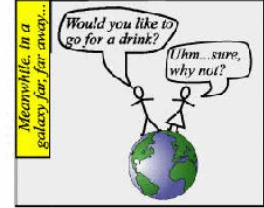


## 時間の本質

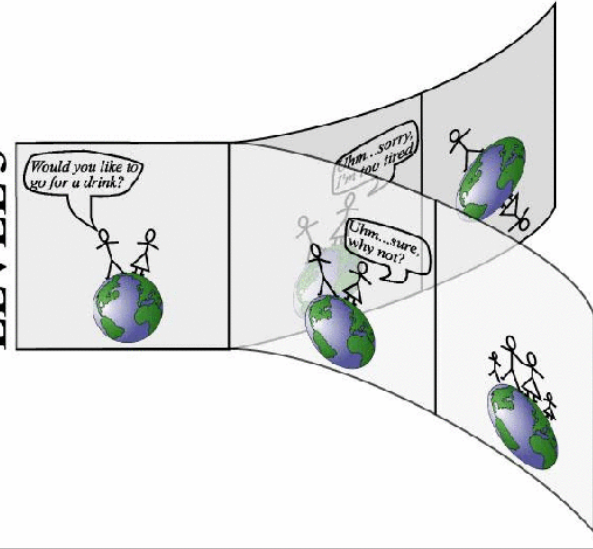
普通、時間は変化を記述するための手段と考えられることが多い。物質はある瞬間にある配置を取り、次の瞬間には別の配置になるという具合だ（左）。しかし、並行宇宙の概念では別の見方ができる。考える物質配列が一連の並行宇宙の中にすべて含まれているなら（右）、時間とはこれらの宇宙に順番をつけるやり方にすぎない。個々の宇宙は静的なもので、変化は幻想ということになる。もっとも、この幻想は興味深いものではあるが。



LEVEL 1



LEVEL 3



日経サイエンス2003年8月号 pp.26-40

- エベレットによる量子力学の多世界解釈に基づく並行宇宙
- いかにもSF的で突拍子もない考えのようであるが、物理学者にも支持する人は多い



# レベル4 マルチバース

## レベル4 マルチバース

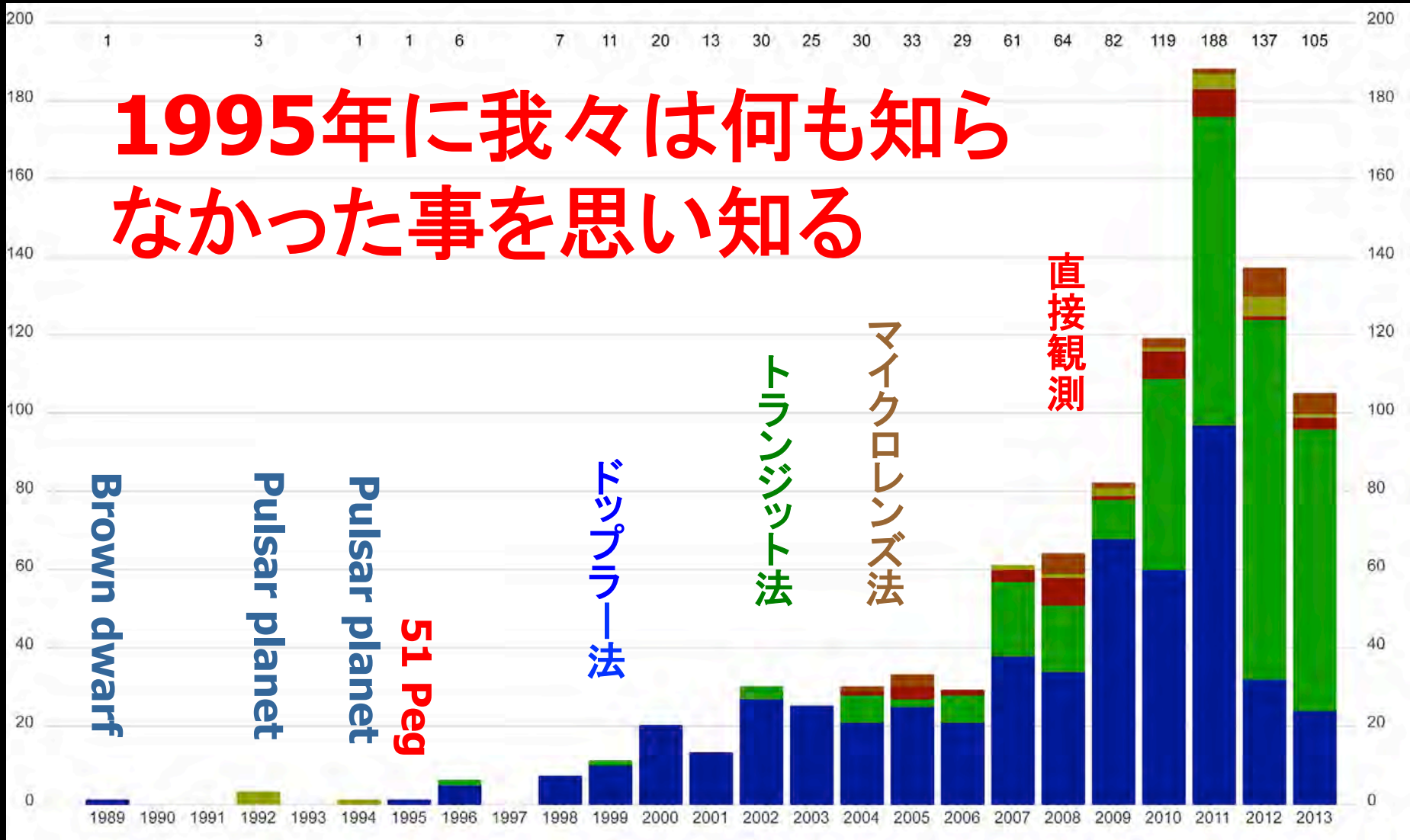
究極の並行宇宙はあらゆる可能性を含む。その位置や宇宙論的な特性、量子状態が異なるだけでなく、物理法則まで異なる宇宙の存在が考えられる。これらの宇宙は空間と時間を超えたところにあるので、目に見えるように描くのはまず不可能だ。最良の方法は、抽象的に思い描くこと。宇宙とは、それを支配する物理

法則の数学的構造を表現した「彫刻」のようなものといえる。例えば1つの単純な宇宙を考えよう。地球と月、太陽があり、ニュートン力学に従っているとす。客観的立場の観測者からは、この宇宙は組み紐で覆われた丸い輪のように見える（丸い輪は地球の軌跡、それを覆う組み紐は地球を周回する月の軌跡）。物理法則が異なれば、宇宙の形も異なってくる（a～d）。この考え方に立つと、物理学の根本にかかわるさまざまな問題が解決する。



# 4 もうひとつの地球に 生命の兆候を検出したい

# 太陽系外惑星発見の歴史年表



<http://exoplanet.eu/>



# 現在は系外惑星研究の革命期

- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的
  - 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(ホットジュピター)が大量に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
  - ゆがんだ楕円軌道も多い
  - 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？

# もうひとつの地球？



- 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

Terra衛星のMODIS検出器のデータ **型惑星を探せ！**

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

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

# ハビタブル候補惑星

中心星の明るさ



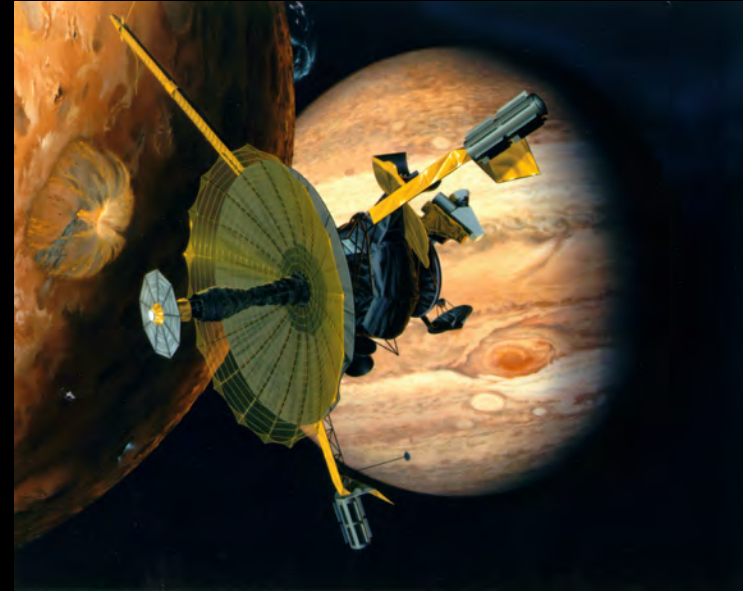
Image Credit: Chester Harman  
Planets: PHL at UPR, Arecibo, NASA/IPPL/APL/Arizona

Kasting, Kopparapu, Ramirez & Harman: arXiv:1312.1328

# 温故知新:

## ガリレオ探査機による地球上の生命探査

- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
  - 大量の酸素
  - 植物の特徴的反射スペクトル
  - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在
  - 人工電波信号



Sagan, Thompson,  
Carlson, Gurnett & Hord:  
Nature 365(1993)715



# 生命存在の観測的指標: バイオマーカー

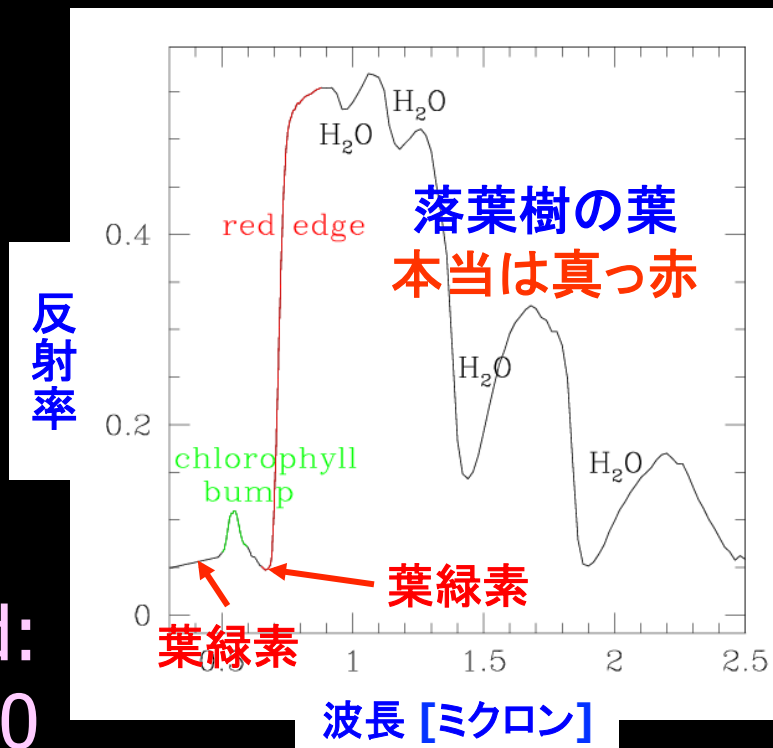
## Extrasolar plants on extrasolar planets

- ハビタブル惑星の定義は、生命存在の十分条件とはほど遠い(必要条件ですらないかも)

### ■ バイオマーカーを探す

- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物のレッドエッジ
- 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

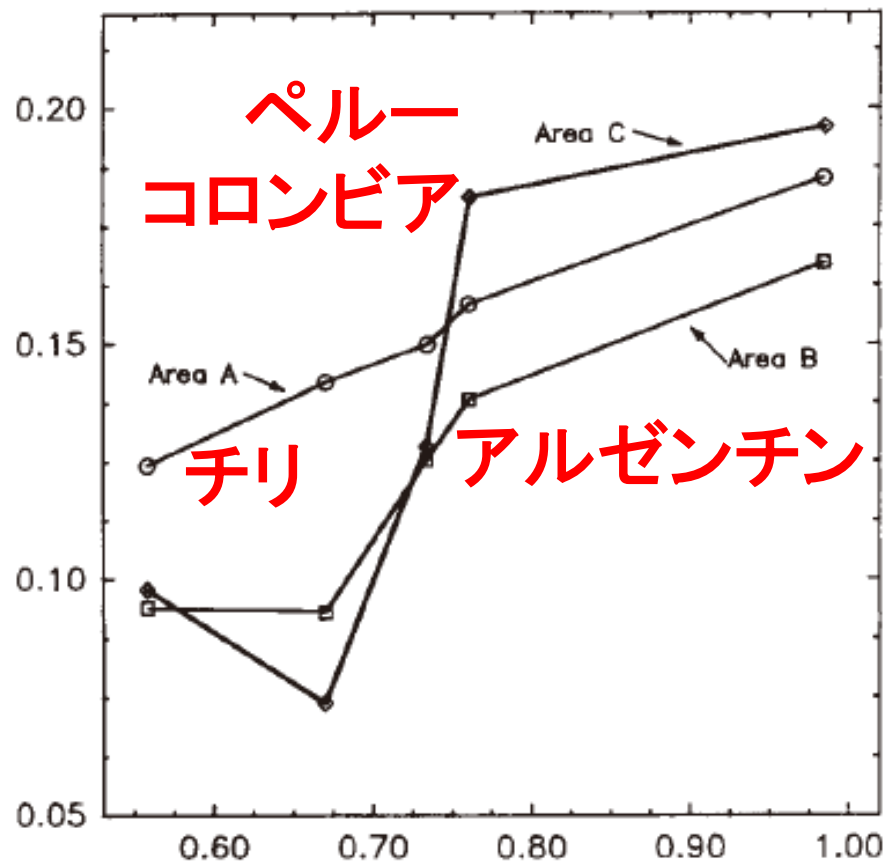


# Sagan et al. (1993): 撮像

## ガリレオ探査機が観測した地球のレッドエッジ



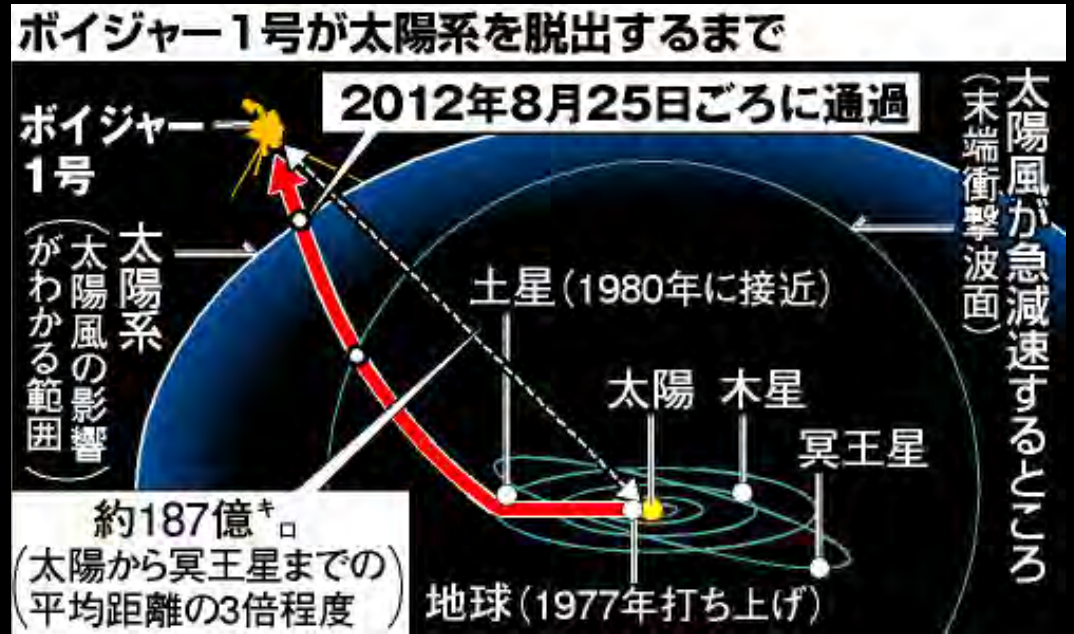
表面反射率



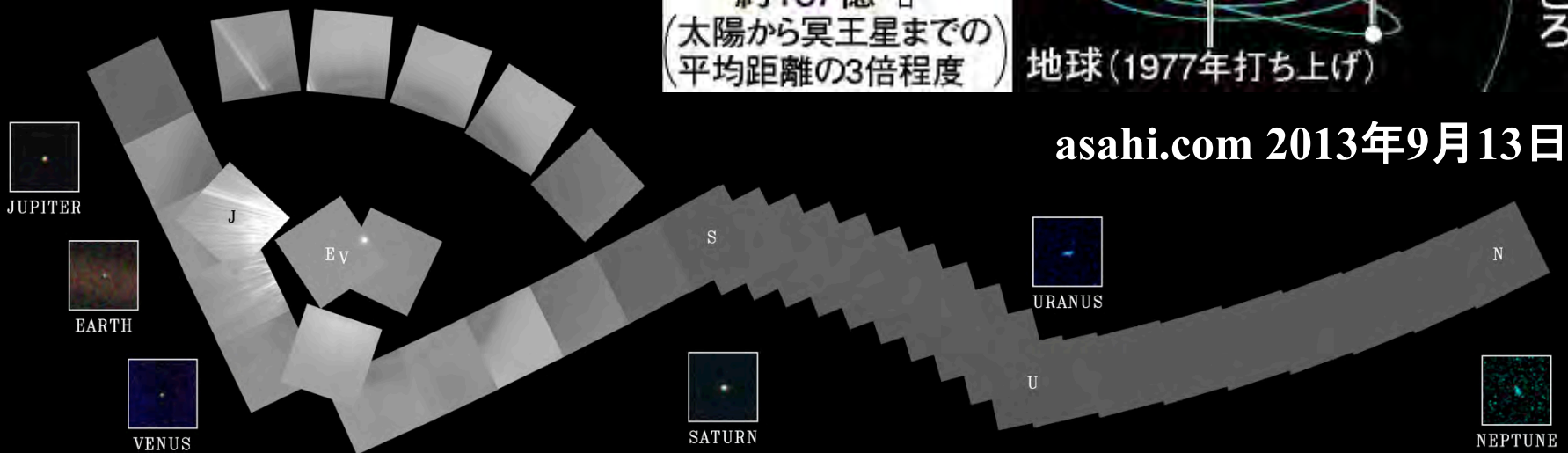
観測した光の波長(ミクロン)

# ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

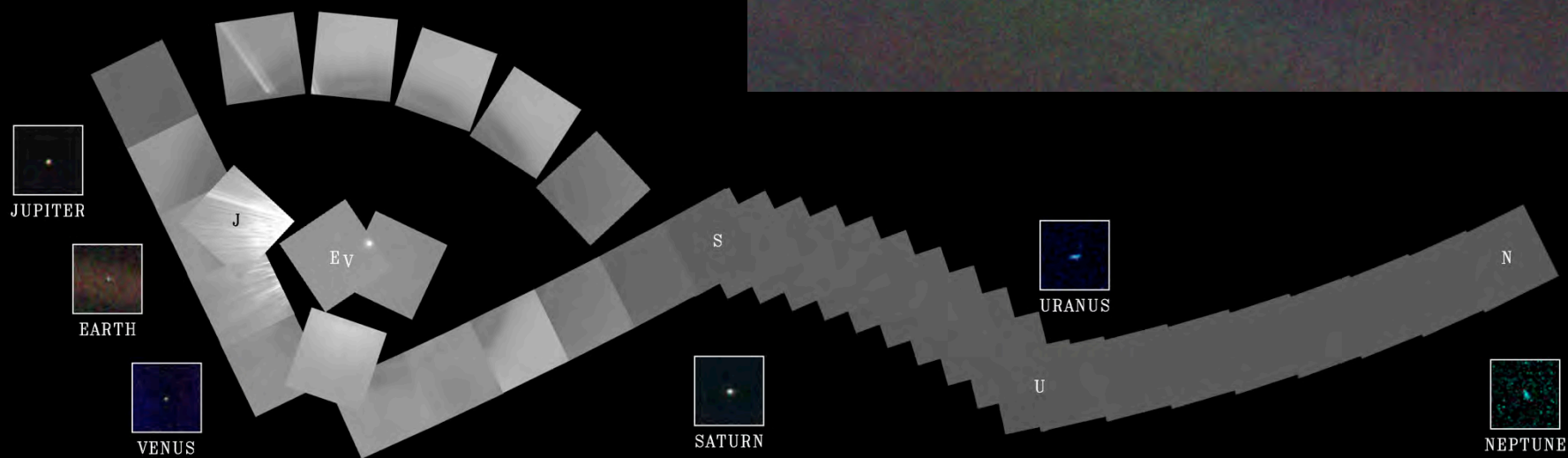
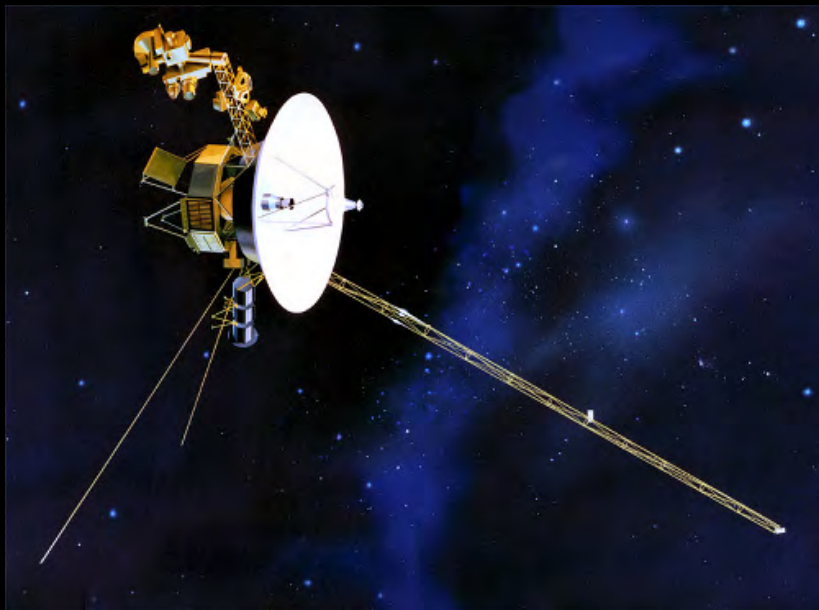
- 1990年2月14日 @40天文単位
  - カールセーガンが地球の画像を **Pale Blue Dot** と命名




asahi.com 2013年9月13日



# ペイル・ブルー・ドット







# 土星越しに見る地球

- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月

- 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

# 第二の地球の色から、海、雲、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  
*Astrophys. J.* 738(2011)184, arXiv:1102.3625

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

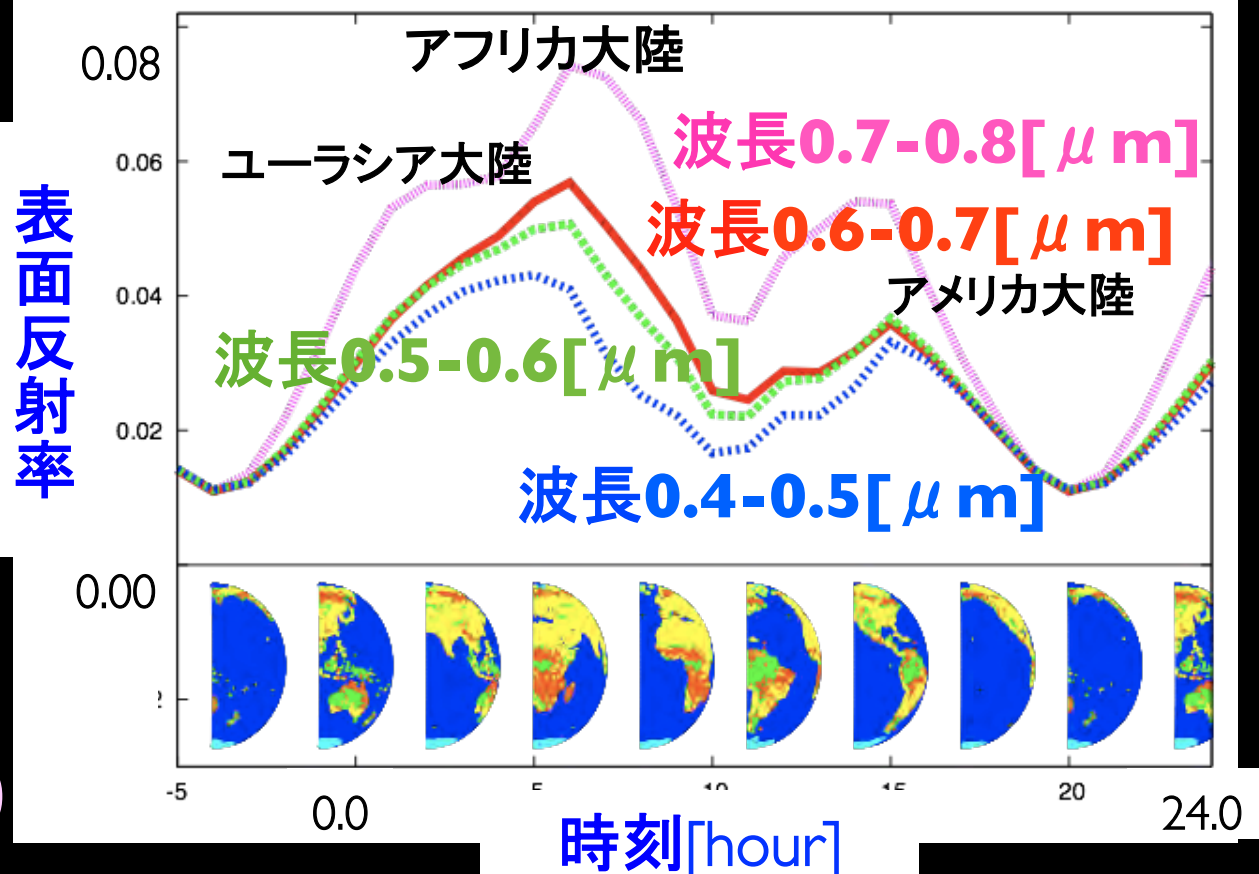
# Beyond a Pale Blue Dot: 地球は青かった？



自転に伴う反射光の色の  
時間変動のシミュレーション

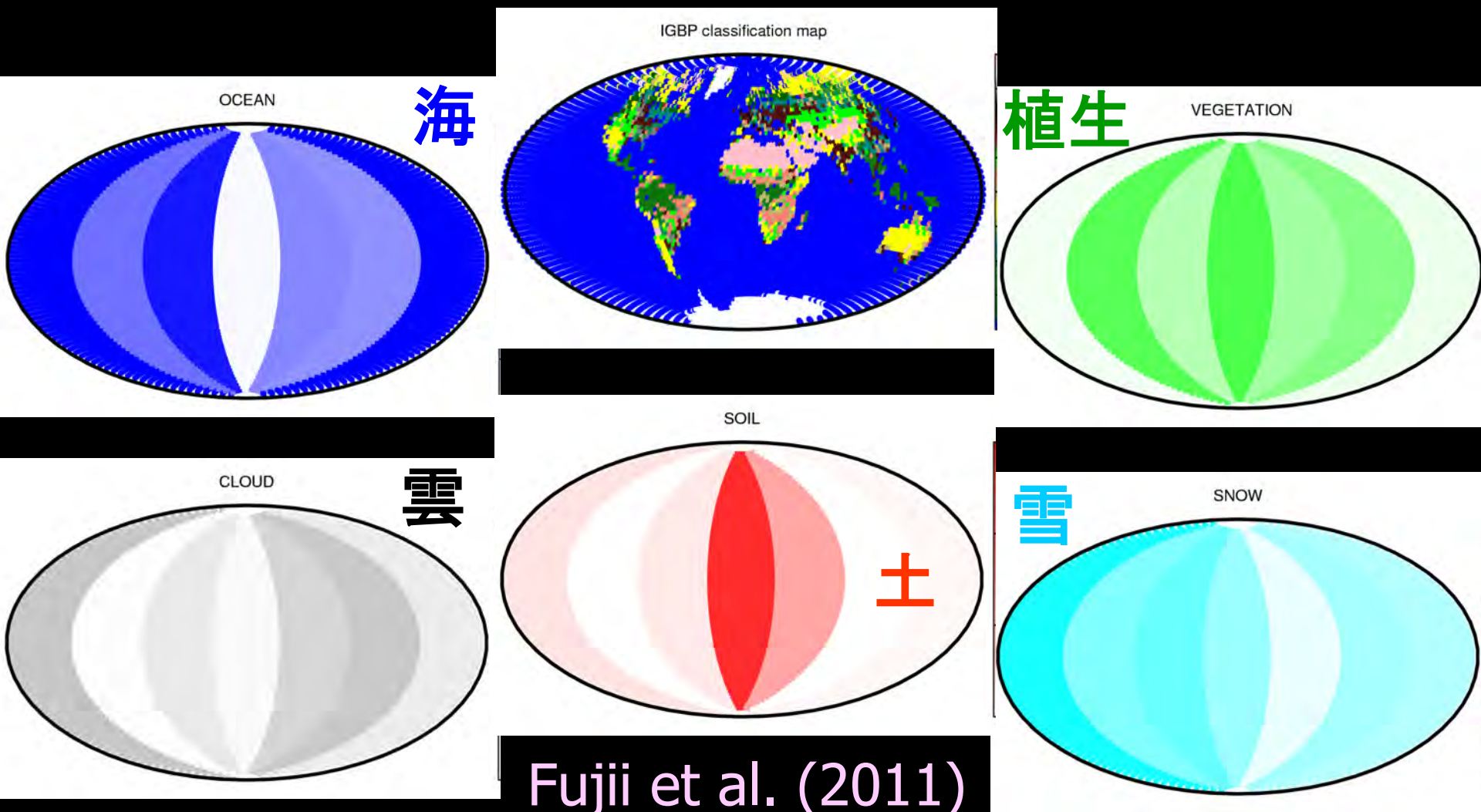
Fujii et al. (2010)

反射率100%の場合で規格化した反射光



- 実際の地球観測衛星のデータを用いた、将来の第2の地球観測のための模擬実験

# 地球測光観測データから推定された 地表面成分の経度分布地図



Fujii et al. (2011)



まとめ

# 宇宙を見て世界を知る

- 「宇宙」に境界はない
  - 宇宙はとてつもなく広い。しかし、「観測できる宇宙」はそのほんの一部にしか過ぎない
  - その一部から全体を再現する作業が天文学
- 知れば知るほど「我々は何も知らなかった」をまざまざと思い知らされる
  - この果てしなき繰り返しを経ながら、科学は徐々にしかし確実に進歩し続ける
- 我々が知り得る「世界」に境界はあるのか？

# 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、テロ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と等しい

# グループワーク課題

- 地球外文明と交信が可能になったとして、相手にぜひ聞いてみたい質問、逆に相手にぜひ知ってもらいたい地球の文化を、それぞれ一つ挙げて理由とともに説明せよ
- 第2の地球の存在は、むしろ我々自身の特殊性(地球の境界)と普遍性(世界の境界)を教えてくれる
  - 何が当たり前で何が不思議なのか
  - 数学、物理学、審美眼、倫理観の普遍性