



MAINICHI
MEDIA
CAFÉ

イベント情報

2018/10/26(金)18:30-20:00

元村有希子のScience café

宇宙のギモン、なんでも答えます

どうして宇宙は真っ暗なの？ ダークマターって正体不明にもかかわらず全宇宙に占める割合まで分かっているのはどうして？ 「ビッグバン」って、誰が火をつけたの？

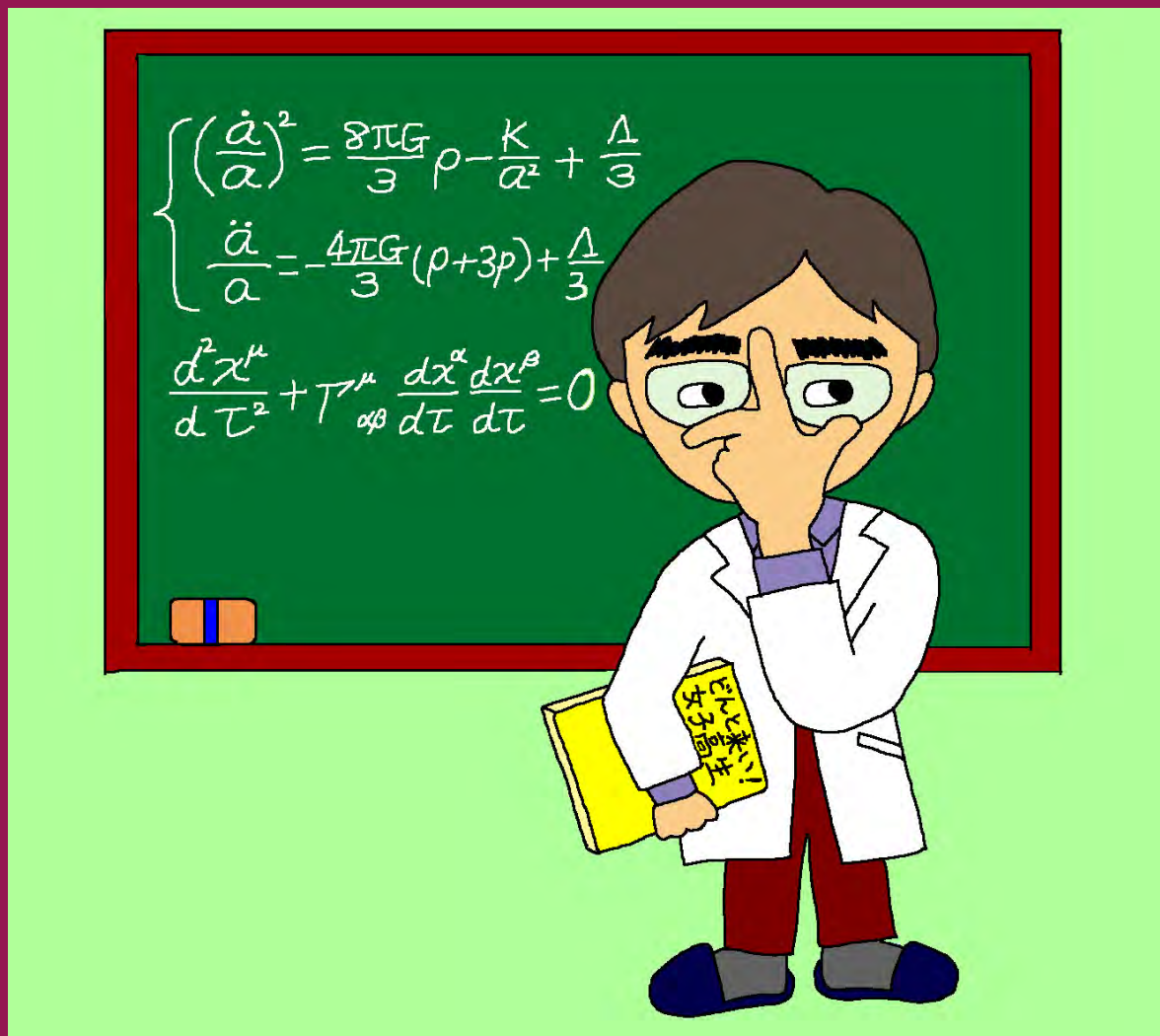
宇宙は、考えれば考えるほど謎だらけ。しかも研究者たちはごく限られた分野を追いかけているので全体像が見えづらいのです。研究の傍ら、楽しい読み物を多く著している宇宙物理学者の須藤靖・東京大教授に、「今さら聞けない宇宙の疑問」をぶつけてみませんか(どんな質問にもお答えします。でも正解かどうかは保証の限りではありませんby須藤教授)。みなさんからの質問を事前に募集します。

進行役は元村有希子・科学環境部長が務めます。



http://www.utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2018j

注：どんな質問にでも(悪意がない限り)答えるように努力しますが、(わからないも含めて)正解なのかどうかは保証致しません



系外惑星の検出法

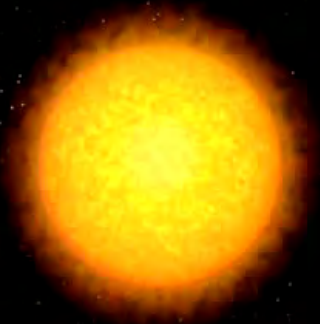
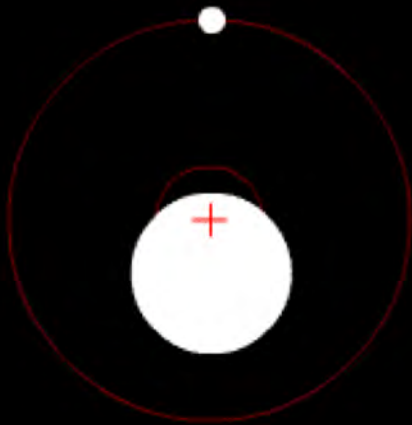


3.5 章 太陽系外惑星系
第二の地球を探して



14 章 もうひとつの地球
15 章 地球の探し方

系外惑星検出方法



■ ドップラー法

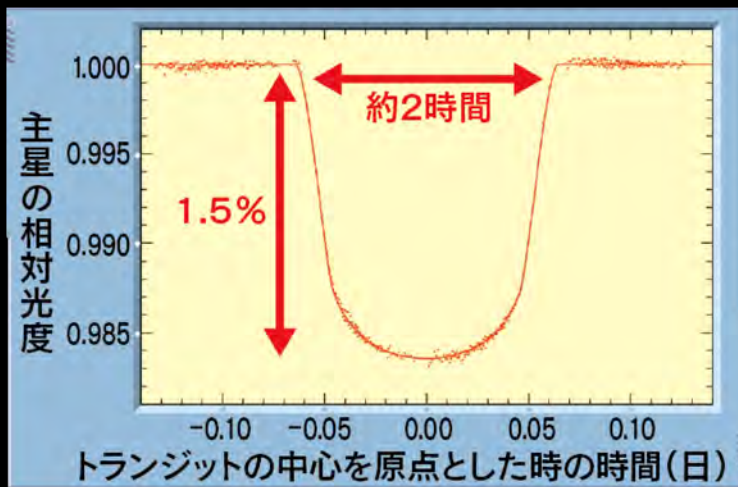
- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ トランジット法

- 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

■ 直接撮像

- 中心星の光を隠して惑星の光を分離



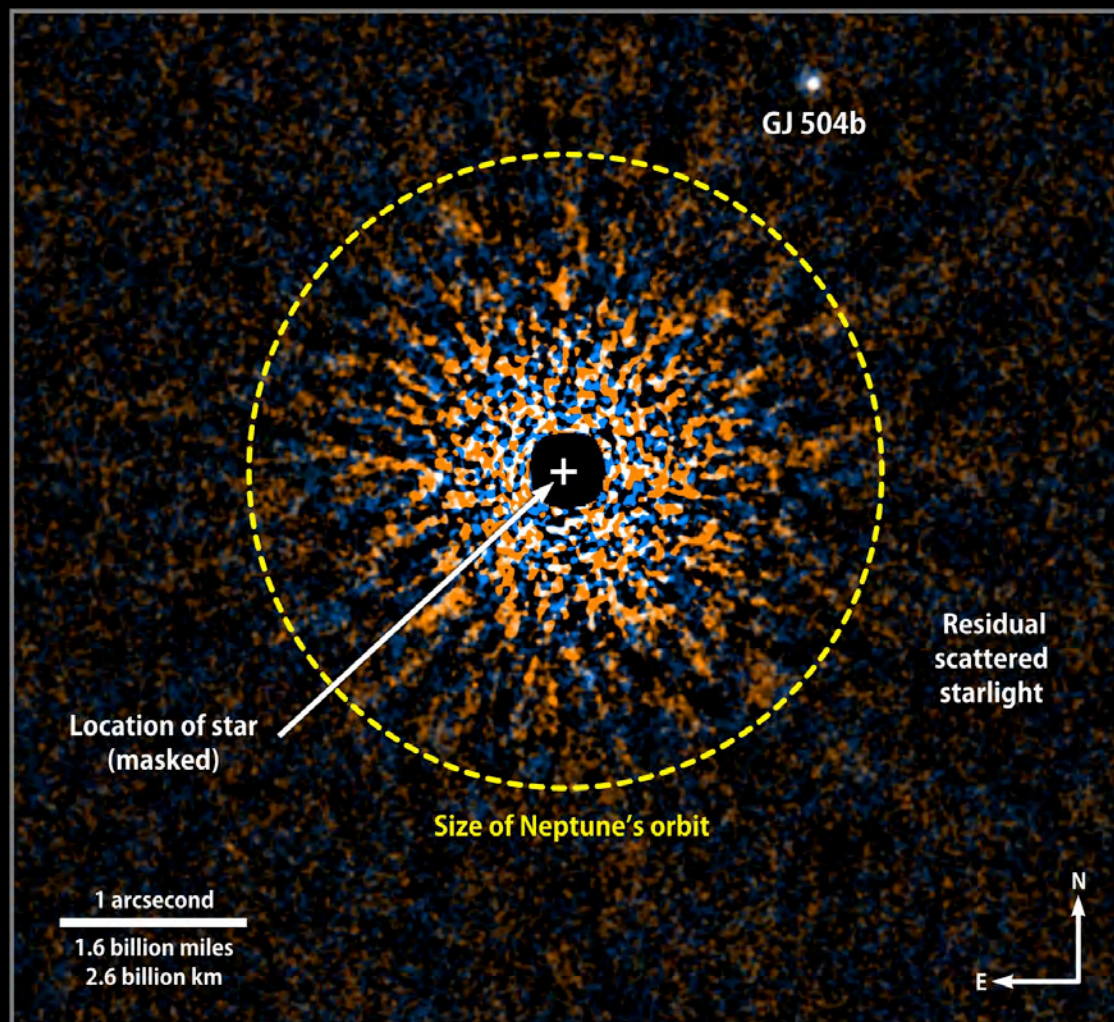
ケプラー探査機 (2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星専用測光モニター観測
地球型ハビタブル惑星を探す



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

すばる望遠鏡によるガス惑星GJ504bの 直接撮像：コロナグラフ技術の進歩

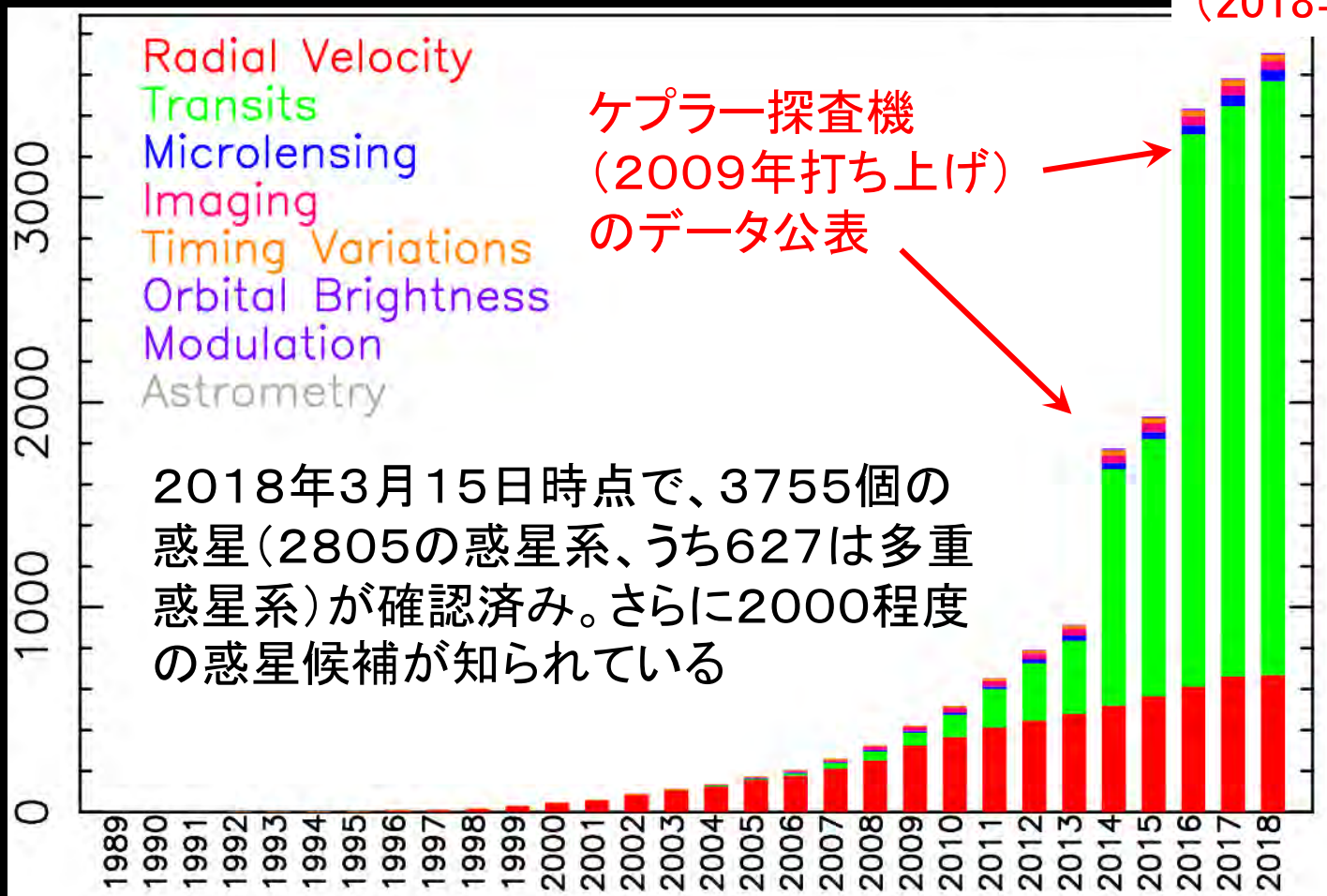


- 57光年先にある4木星質量の惑星の初直接撮像
- Kuzuhara et al. ApJ 774(2013)11
- すばる望遠鏡 SEEDSサーベイの成果
- 地球型惑星直接撮像への第一歩

太陽系外惑星発見年表

TESS探査機
打ち上げ
(2018年)

発見総数



2016年6月時点では

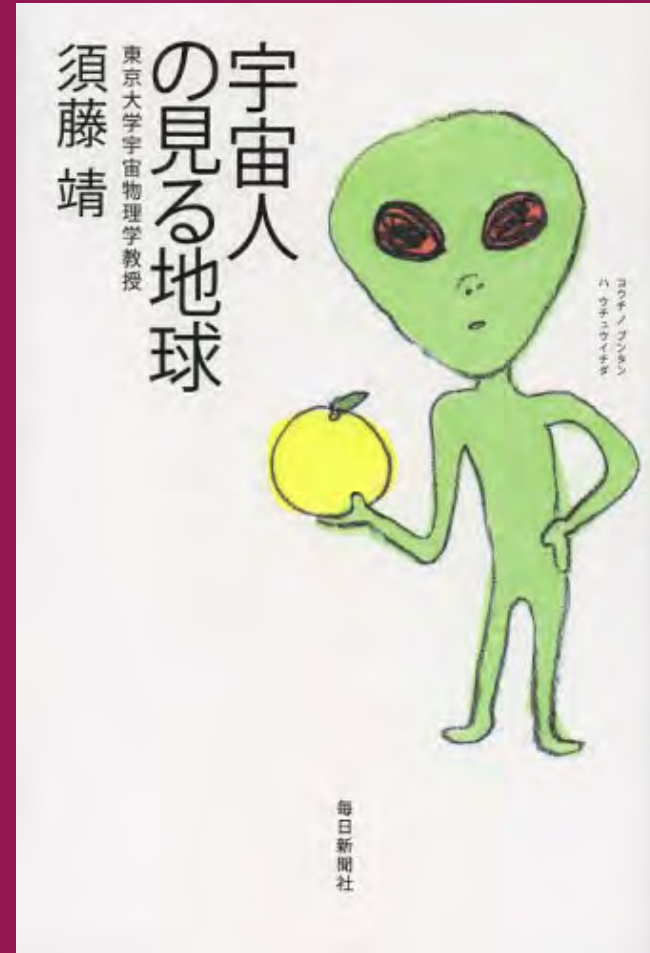
西暦

8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:3、6重惑星系:2、5重惑星系:15、
4重惑星系:49、3重惑星系:99、2重惑星系 300個以上

ビッグバンは「点」の「爆発」ではない

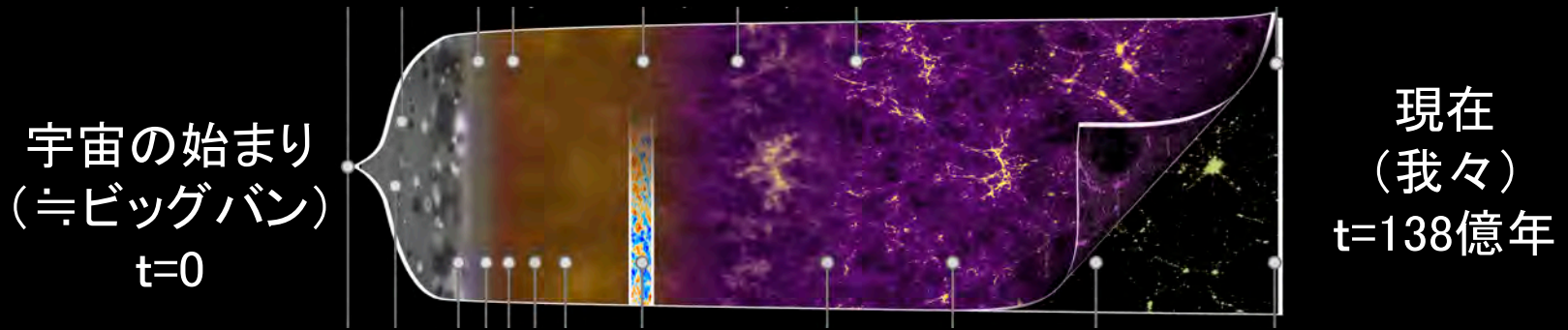


9 章 ただいま膨張中



$0 \times \text{無限大} \neq 0$

よく見かける宇宙史のイメージ図



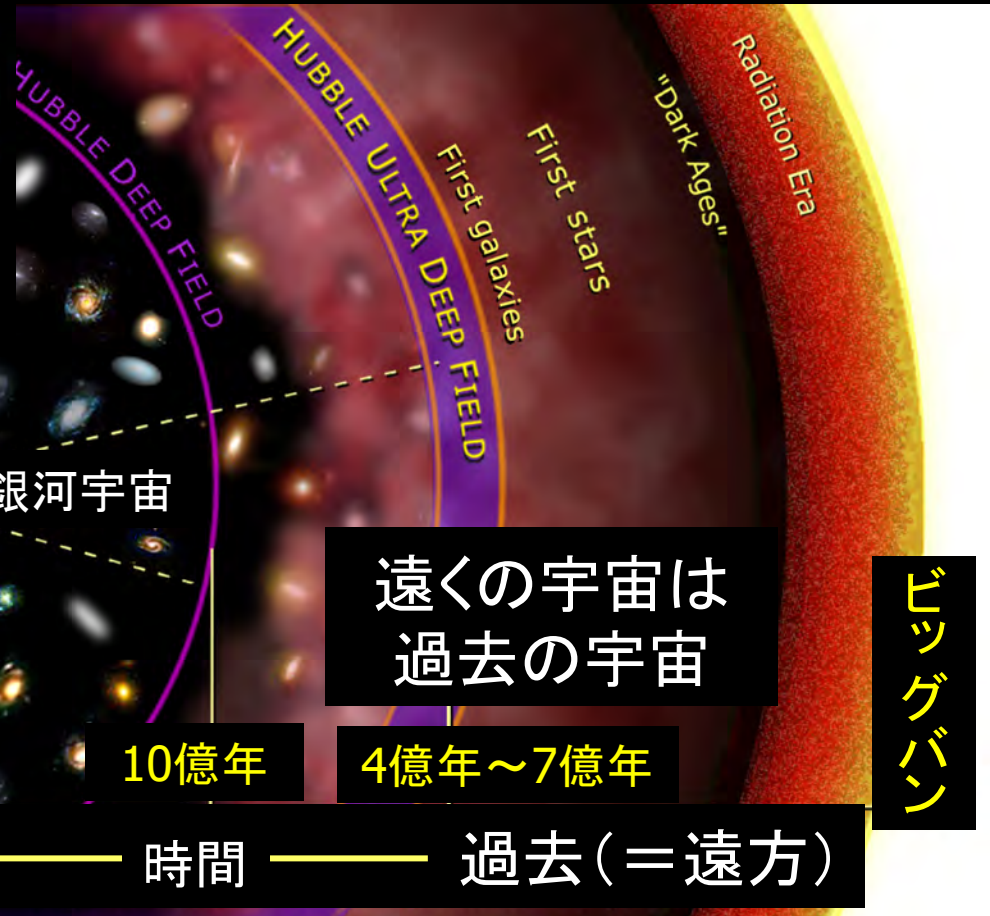
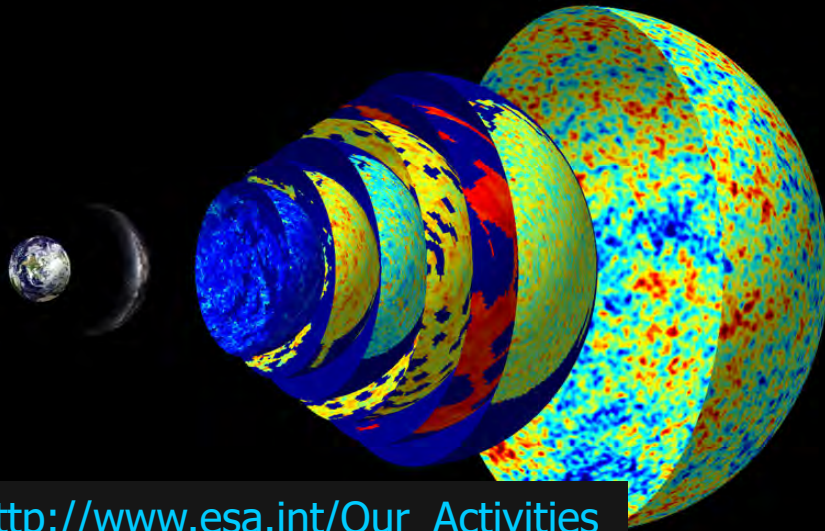
- もしもこの図をそのまま解釈(=誤解)したとすれば・・・
 - 「宇宙の始まり」に対応する爆発の光は、ある特別の方向から特定の時刻に一瞬だけ我々を通り過ぎて終わりのはず
- ところが実際には、
 - ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射は、あらゆる方向から常に我々に降り注いでいる
 - つまりこの図は「ビッグバンは点の爆発」を意味していない

ビッグバンは点の爆発ではない

- (定義だけの問題とも言えるが)宇宙論学者は**宇宙の始まりとビッグバンを区別**している
 - 宇宙が、なぜどのように始まったかはわからない
 - ただし、その後急激な膨張(インフレーション)をして、一旦、温度がほぼゼロに近づいてから、温度が再び上昇したと考えられている
 - この時期(≠場所)をビッグバンと呼んでいる
- 我々は**ビッグバンが起こった広大な空間領域の中に存在**している
 - だからこそ、四方八方から次々とビッグバンの名残の光が到達し続けている

より正確な宇宙の歴史のイメージ

- 光の速度は有限なので
遠くの宇宙＝過去の宇宙



http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck

http://www.nasa.gov/images/content/56534main_hubble_diagram.jpg

138億年

10億年

4億年~7億年

現在



時間

過去(=遠方)

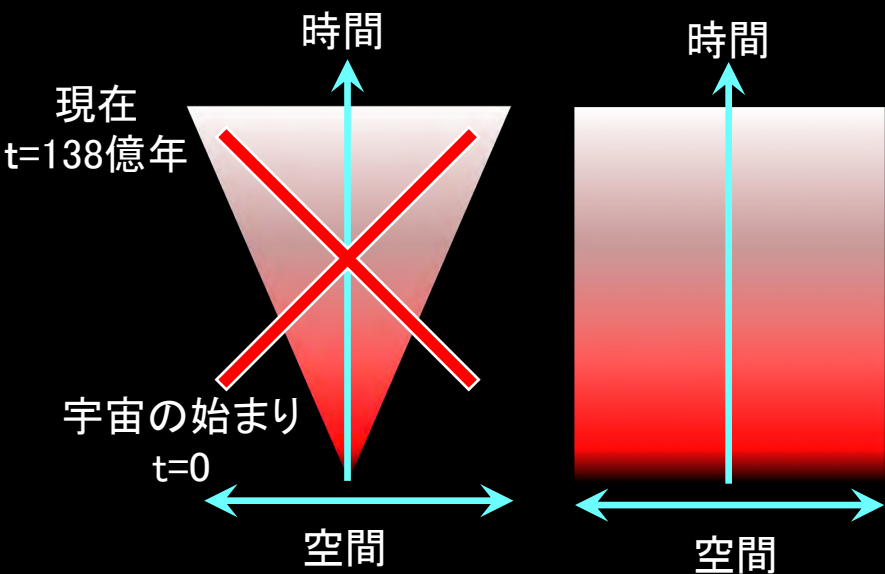
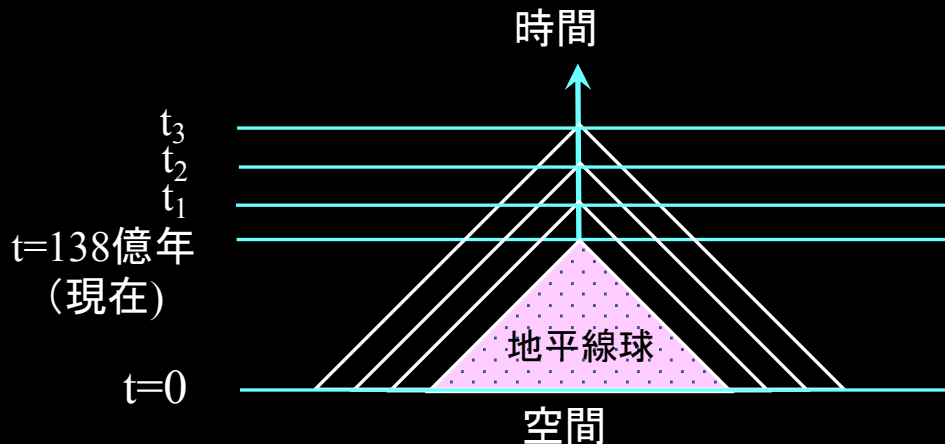
ビッグバン

宇宙の地平線球

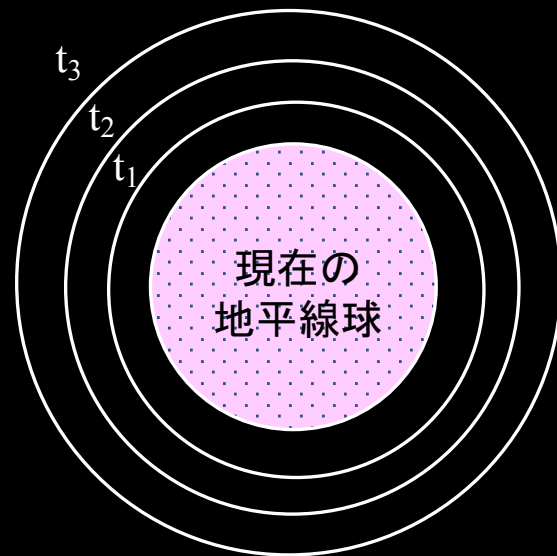
= 現在観測可能な範囲の宇宙

■ 宇宙の地平線

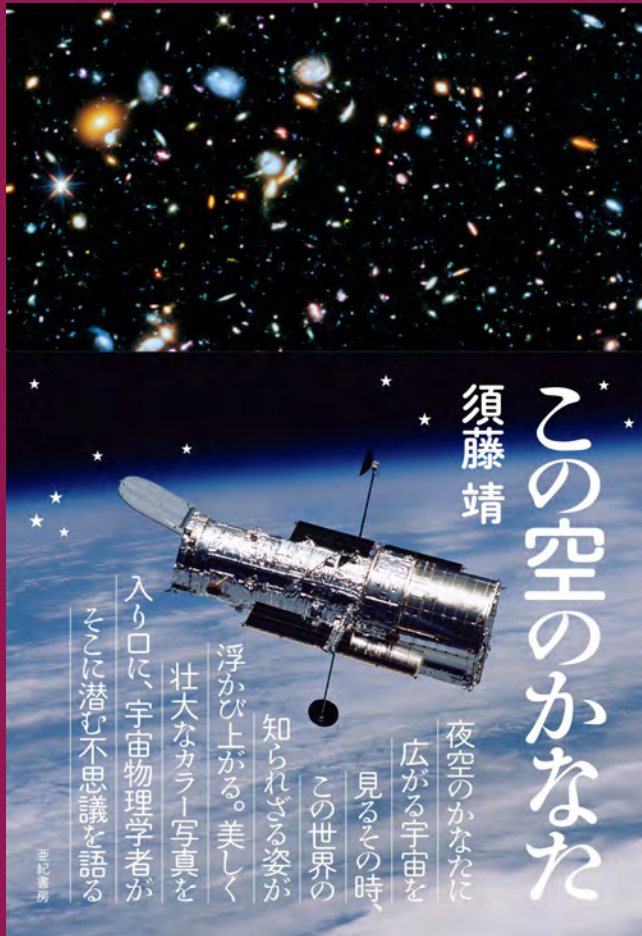
- 誕生直後の宇宙は点ではなく、むしろほぼ無限に広がっていると考えるべき



宇宙の地平線の半径は時間とともに増大する



宇宙に果てはあるのか



情けは地球のためならず
みんな大好き並行宇宙

宇宙に関する素朴な疑問の数々

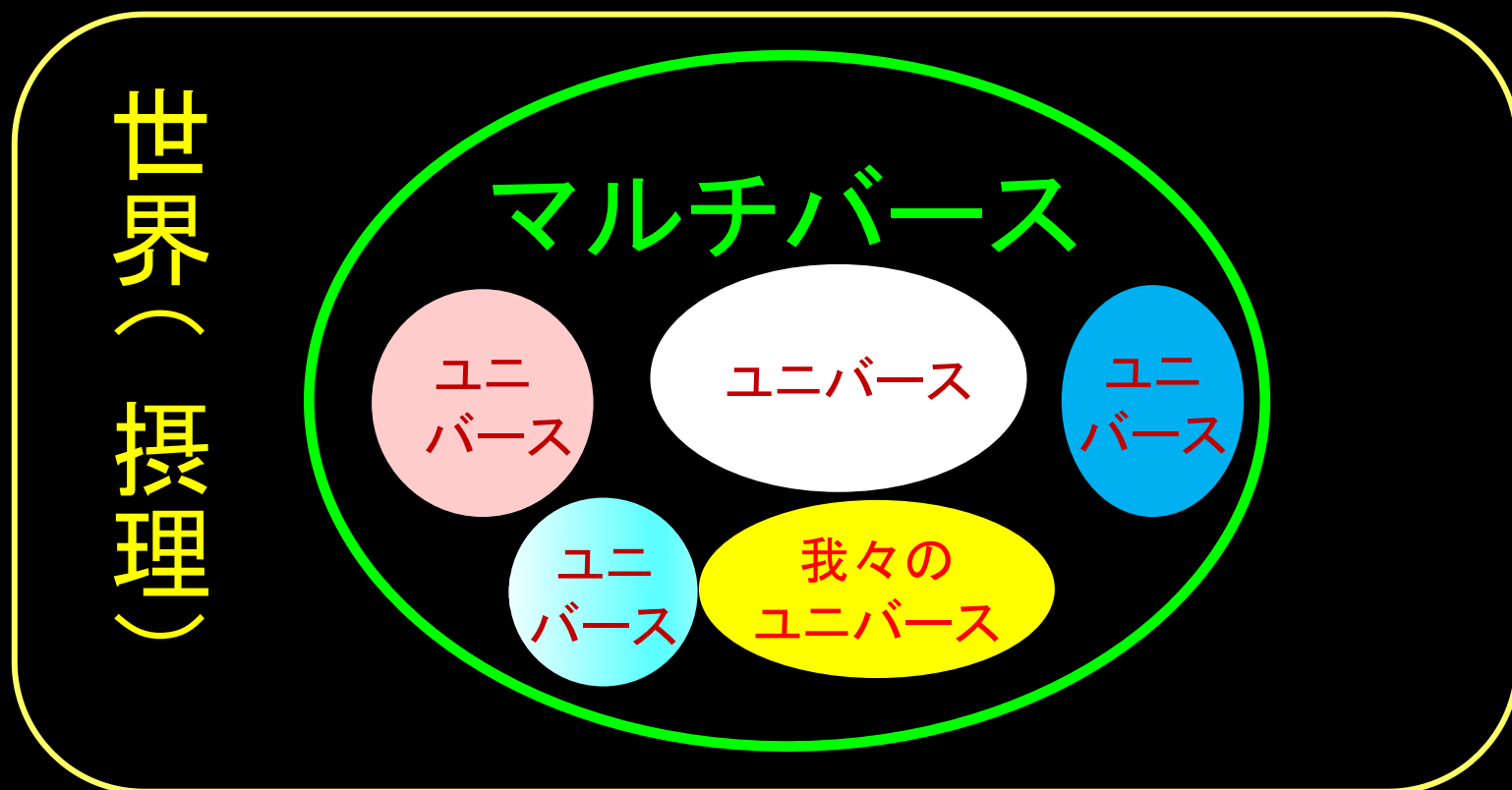
- 宇宙に果てはあるか（体積は有限か）
- 宇宙が始まる前の宇宙はあるか（時間は有限か）
- あの時あれが起こっていなかったら、現在の我々や宇宙の未来はどうなっていたのか
- 物理法則は宇宙のどこにあるのか
- 物理法則はなぜ数学で記述できるのか
- 物理定数はなぜある特別な値をとるのか
- 宇宙（法則）は唯一無二なのか、逆に複数存在し得るさらには実在しているのか

ユニバースの集合＝マルチバース

- 前述の疑問では、「宇宙」が異なる意味で使われている。例えば
 - 「宇宙」が始まる前の「宇宙」はあるのか
 - もしこの答えがイエスなら、一つ目と二つ目の「宇宙」は、異なる階層の概念のはず
 - そうでなければ、質問自体がナンセンス
- そこで実在するかどうかはさておき、個別の宇宙（ユニバース=universe）と、その集合の総称としての宇宙（マルチバース=multiverse）を区別して使い分ける

世界 > マルチバース > ユニバース

- ただしこれはあくまでも私の個人的な感覚にもとづく便宜的な包含関係に過ぎず一般的ではない



宇宙に果てはあるか

- 標準「宇宙」論によれば、我々が住む「このユニバース」には、空間的果てはなく(おそらく)無限大の体積
 - 太平洋の水平線の先には何もない可能性もあるが、そう考えるとそこを行き来する船が観測できることは奇妙である。
 - 同様に、宇宙の地平線(誕生後138億年の現在、我々が観測可能な空間領域で実は半径460億光年の球に対応)よりもずっと先までこのユニバースが広がっていることは観測的にも確か
 - しかし、標準宇宙モデルが予想する無限大の体積を持つかどうかまでは不明
 - 仮に無限大でなくとも、有限で果てがない繰り返しなら、その繰り返しの周期は現在の地平線よりはるかに大きい

宇宙に始まりはあるか

- 古典論である一般相対論を厳密に正しいと考えれば、我々が住む「このユニバース」には明確な時間の始まりがある
 - 今から138億年過去に遡れば、因果関係が破綻する初期特異点に行き着く(一般相対論の帰結)
 - ただし、量子論的効果を考慮すれば特異点は存在しないかもしれない(古典論の枠内でも、一般相対論が厳密には正しくないなら、特異点は存在しないかも)
 - 初期特異点の「前」にも「宇宙」があったのかも知れないが、その場合は「このユニバース」とは因果関係を持たない「別のユニバース」ということになる

宇宙に銀河は何個あるのか



A.3 章
大きい数の単位



情けは地球のためならず
みんな大好き並行宇宙

すばる望遠鏡ハイパーシュープリームカム で撮影したアンドロメダ銀河

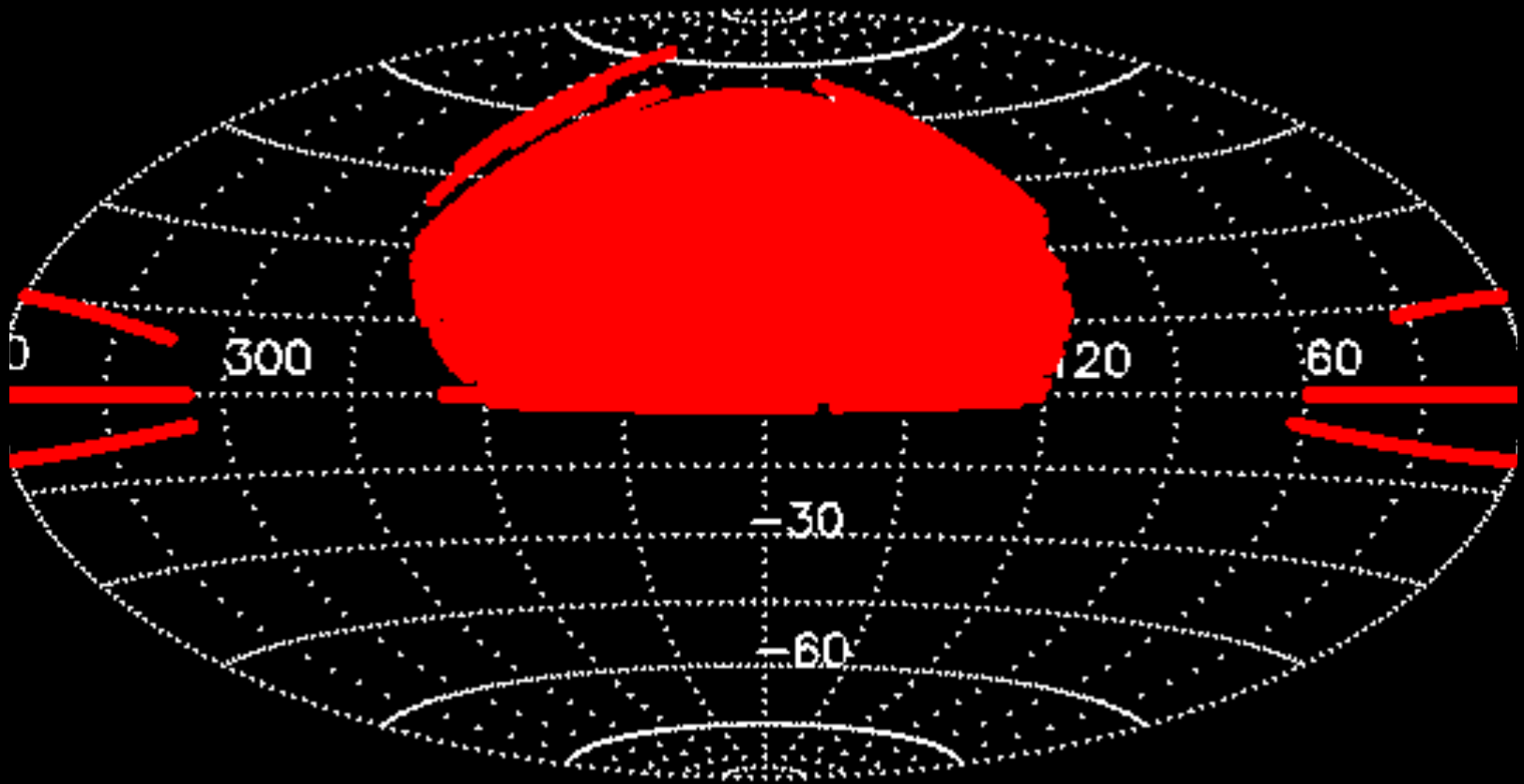


[http://www.eso.org/public
/images/potw1342a/](http://www.eso.org/public/images/potw1342a/)

[https://www.subarutelescope.org
/Topics/2014/09/08/fig1j.jpg](https://www.subarutelescope.org/Topics/2014/09/08/fig1j.jpg)

広い空の全天地図作成国際共同研究： SDSS(スローンデジタルスカイサーベイ)

赤い領域がアパッチポイント天文台から観測できる空

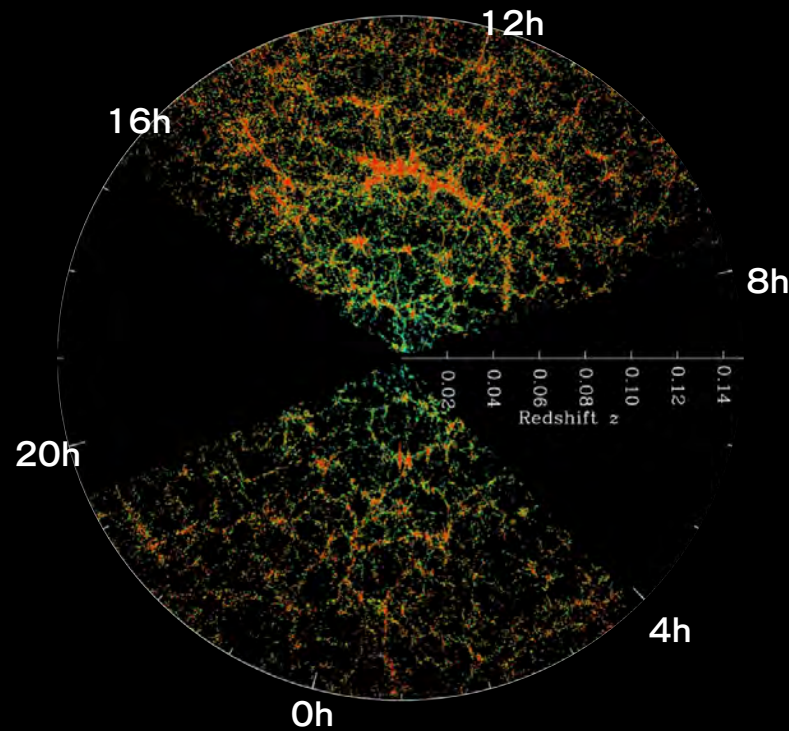


80万個の銀河の3次元地図



NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

SDSS: スローンデジタルスカイサーベイ



M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey



宇宙は地球で満ちている？

- 天の川銀河系内の恒星の数= 10^{11} 個
 - その10%の 10^{10} 個が太陽と似た恒星(G型星)
 - G型星の10%がハビタブル惑星を持つ
- 天の川銀河系内のハビタブル惑星の数= 10^9 個
 - 観測できる範囲の宇宙内の銀河の数= 10^{11} 個
- 宇宙内のハビタブル惑星の数= 10^{20} 個
 - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
 - 本当に生命を宿すための条件は未だ知られていない(適度な割合の海と陸+偶然?)
 - しかしこのなかで地球だけが生命をもつと考える方がはるかに不自然では？

ミクロの世界とマクロの世界



4章 微視的世界と
巨視的世界をつなぐ
付録 大きな数と小さな数



7 章 大きな世界と小さな世界

大きな数の単位

百万		メガ	10^6	1,000,000
億	おく	100メガ	10^8	100,000,000
十億		ギガ	10^9	1,000,000,000
兆	ちょう	テラ	10^{12}	1,000,000,000,000
千兆		ペタ	10^{15}	1,000,000,000,000,000
京	けい	10ペタ	10^{16}	10,000,000,000,000,000
百京		エクサ	10^{18}	1,000,000,000,000,000,000
垓	がい	100エクサ	10^{20}	100,000,000,000,000,000,000
	し		10^{24}	以降、枠に入りきらないので断念
穰	じょう		10^{28}	
溝	こう		10^{32}	
澗	かん		10^{36}	
正	せい		10^{40}	
載	さい		10^{44}	
極	ごく		10^{48}	
恒河沙	こうがしゃ		10^{52}	
阿僧祇	あそうぎ		10^{56}	
那由他	なゆた		10^{60}	
不可思議	ふかしぎ		10^{64}	
無量大数	むりょうたいすう		10^{68}	

小さな数の単位

分	ぶ	デシ	10^{-1}	0.1
厘	りん	センチ	10^{-2}	0.01
毫(毛)	ごう(もう)	ミリ	10^{-3}	0.001
絲(糸)	し		10^{-4}	0.0001
忽	こつ		10^{-5}	0.00001
微	び	マイクロ	10^{-6}	0.000001
纖	せん		10^{-7}	0.0000001
沙	しゃ		10^{-8}	0.00000001
塵	じん	ナノ	10^{-9}	0.000000001
埃	あい		10^{-10}	0.0000000001
渺	びょう		10^{-11}	0.00000000001
漠	ばく	ピコ	10^{-12}	0.000000000001
模糊	もこ		10^{-13}	0.0000000000001
逡巡	しゅんじゅん		10^{-14}	0.00000000000001
須臾	しゅゆ	フェムト	10^{-15}	0.000000000000001
瞬息	しゅんそく		10^{-16}	0.0000000000000001
彈指	だんし		10^{-17}	0.00000000000000001
刹那	せつな	アト	10^{-18}	0.000000000000000001
六徳	りっとく		10^{-19}	0.0000000000000000001
虚空	こくう		10^{-20}	0.00000000000000000001
清浄	せいじょう		10^{-21}	0.000000000000000000001
阿頼耶	あらや		10^{-22}	0.0000000000000000000001
阿摩羅	あまら		10^{-23}	0.00000000000000000000001
涅槃寂静	ねはんじゃくじょう		10^{-24}	0.000000000000000000000001

大きな数と小さな数

大きな数の名前

京	10^{16}
垓	10^{20}
秭	10^{24}
穰	10^{28}
溝	10^{32}
澗	10^{36}
正	10^{40}
載	10^{44}
極	10^{48}
恒河沙	10^{52}
阿僧祇	10^{56}
那由他	10^{60}
不可思議	10^{64}
無量大数	10^{68}
不可説不可説転	$10^{(7 \times 2^{122})}$

小さな数の名前

毫	10^{-3}
絲	10^{-4}
忽	10^{-5}
微	10^{-6}
纖	10^{-7}
沙	10^{-8}
塵	10^{-9}
埃	10^{-10}
渺	10^{-11}
漠	10^{-12}
糶糊	10^{-13}
逡巡	10^{-14}
須臾	10^{-15}
瞬息	10^{-16}
彈指	10^{-17}
刹那	10^{-18}
六德	10^{-19}
虚空	10^{-20}
清浄	10^{-21}

大方広仏華嚴經の巻第四十五、阿僧祇品第三十

俱胝(くてい)	10^7
阿庾多(あゆた)	$10^{7 \times 2} = 10^{14}$
那由他(なゆた)	$10^{7 \times 4} = 10^{28}$
頻波羅(びんばら)	$10^{7 \times 8} = 10^{56}$
矜羯羅(こんがら)	$10^{7 \times 16} = 10^{112}$
...	...
不動(ふどう)	$10^{(7 \times 2^{50})}$
極量(ごくりょう)	$10^{(7 \times 2^{51})}$
娑婆羅(しゃばら)	$10^{(7 \times 2^{86})}$
演説(えんぜつ)	$10^{(7 \times 2^{93})}$
無尽(むじん)	$10^{(7 \times 2^{94})}$
出生(しゅっしょう)	$10^{(7 \times 2^{95})}$
無我(むが)	$10^{(7 \times 2^{96})}$
...	...
阿僧祇(あそうぎ)	$10^{(7 \times 2^{103})}$
無量(むりょう)	$10^{(7 \times 2^{105})}$

無辺(むへん)	$10^{(7 \times 2^{107})}$
無辺転(むへんてん)	$10^{(7 \times 2^{108})}$
無等(むとう)	$10^{(7 \times 2^{109})}$
無等転(むとうてん)	$10^{(7 \times 2^{110})}$
不可数(ふかすう)	$10^{(7 \times 2^{111})}$
不可数転(ふかすうてん)	$10^{(7 \times 2^{112})}$
不可称(ふかしょう)	$10^{(7 \times 2^{113})}$
不可称転(ふかしょうてん)	$10^{(7 \times 2^{114})}$
不可思(ふかし)	$10^{(7 \times 2^{115})}$
不可思転(ふかしてん)	$10^{(7 \times 2^{116})}$
不可量(ふかりょう)	$10^{(7 \times 2^{117})}$
不可量転(ふかりょうてん)	$10^{(7 \times 2^{118})}$
不可説(ふかせつ)	$10^{(7 \times 2^{119})}$
不可説転(ふかせつてん)	$10^{(7 \times 2^{120})}$
不可説不可説(ふかせつふかせつ)	$10^{(7 \times 2^{121})}$
不可説不可説転(ふかせつふかせつてん)	$10^{(7 \times 2^{122})}$

具体的な数値

- 自然界には様々な特徴的なスケールが存在
 - 原子核: 10^{-15}m
 - 原子: 10^{-10}m
 - 細胞: 10^{-6}m
 - 人間: 1m
 - 星: 10^9m
 - 銀河: 10^{20}m
 - 宇宙: 10^{25}m
- なぜか？
 - 人間が1ミクロン、あるいは100kmでは困るのか
 - 自然界の相互作用の強さで決まっている
 - 物理法則に現れる定数の値がその鍵を握る

素粒子の世界を特徴付ける値

- ニュートリノの質量 m_ν
 - まだ正確にはわかっていないが、0.1eV程度だと予想されている
 - 質量を持つことが確認されている粒子の中でもっとも軽い
- 電子の質量 $m_e \simeq 0.5\text{MeV}$
- 陽子の質量 $m_p \simeq 1\text{ GeV}$
- 電子とニュートリノの質量比: $m_e / m_\nu \simeq 5000$
- 陽子と電子の質量比: $m_p / m_e \simeq 2000$

これらの値は、より深い原理によって説明できるものなのか、それとも我々の自然界が偶然持っている性質に過ぎないのか？

宇宙あるいは自然界が我々のものしかないならばこのような問いかけは無意味なのであろう。では宇宙は一つしかないのだろうか？

(我々の)宇宙を特徴付ける値

■ 現在の宇宙を特徴付ける値 (定数ではない、時間変化)

- 宇宙の年齢: 137億年
- 宇宙の温度: 3度 (摂氏マイナス270度)
- 宇宙の密度: 10^{-29} g/cm³
- 宇宙の組成比:

光:物質:ダークエネルギー = 10^{-5} : 0.3: 0.7

■ 宇宙を特徴付ける「定数」 (無次元数)

- 光子数/陽子数 = 10^9 (宇宙は光で満ちている)
- 重力の強さ/電磁気力の強さ = 10^{-40}
- 宇宙定数/プランク単位 = 10^{-120}

■ これらは偶然与えられたものなのか (説明不可能)、それとも必然的なものなのか (説明可能)?

物理定数の値で決まるプランクスケール

- 物理定数である c , G , \hbar を組み合わせることができる長さ、質量、時間の次元を持つ量は一意的に決まる

- **プランク長さ**

$$\ell_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 2 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

- **プランク質量**

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2 \times 10^{-5} \text{ g}$$

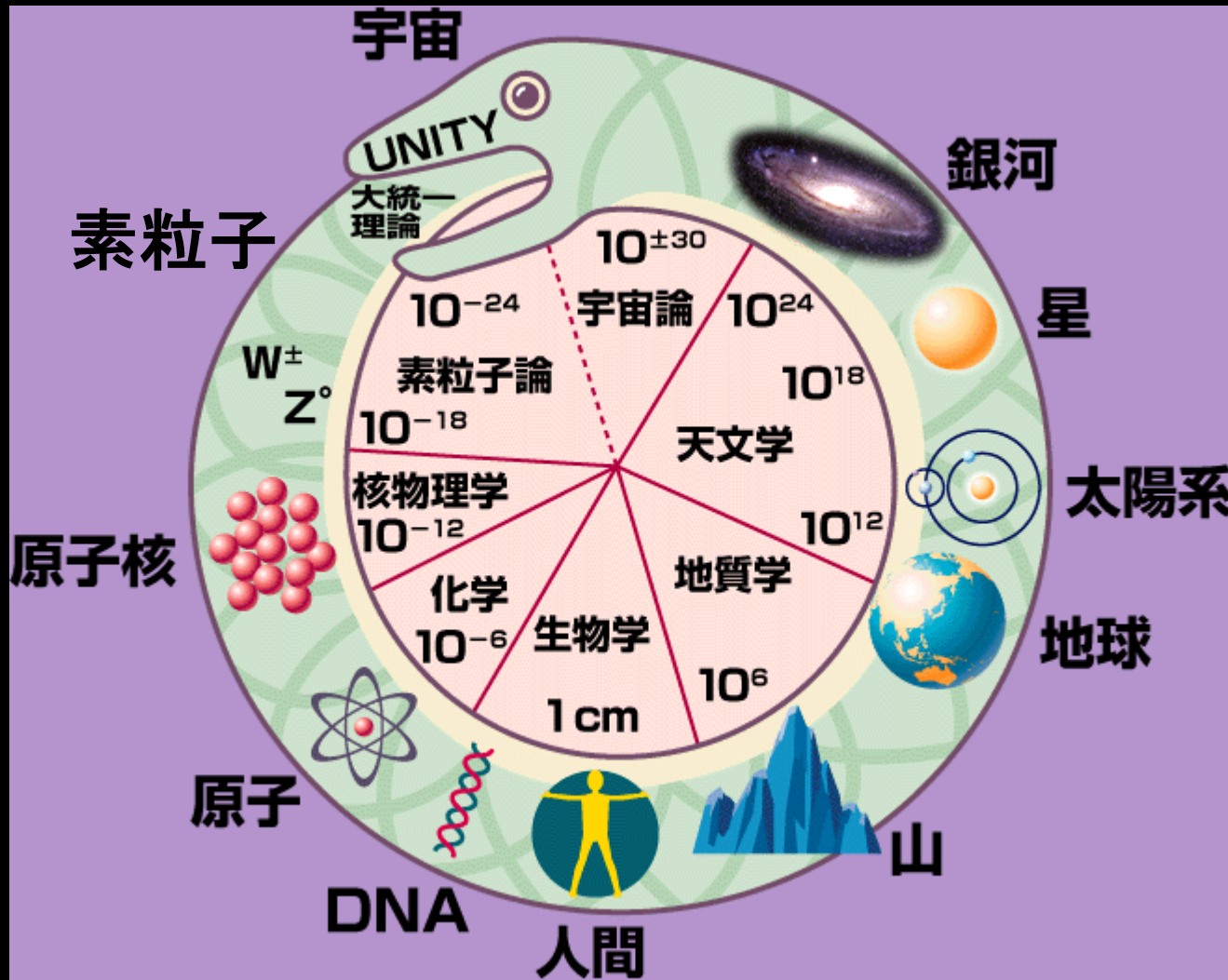
- **プランク時間**

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5 \times 10^{-44} \text{ sec}$$

- これらの値が自然界のどこかに埋め込まれている
- 逆にこれらが日常的現象のスケールからかけ離れていることが、我々の住むユニバースの安定性を保証する

須藤靖:『ものの大きさ』(東大出版会、2006)

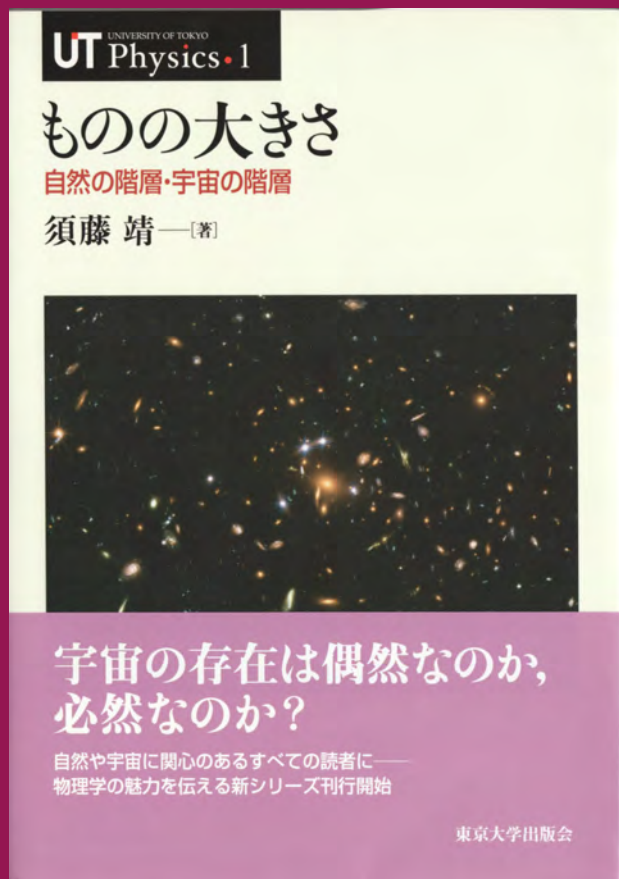
自然界の階層とスケール



- 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 グラショー 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成

物理「定数」は本当に定数なのか



6.7 章 物理定数は定数か？



17章 人間原理という宗教

19章 法則ってどこにある？

21章 夢か現か幻か

ディラックの大数仮説

- 我々の世界にはなぜか、 10^{40} あるいはその2乗といった、言語道断の桁を持つ(意味ありげな?)無次元量が存在する
- さらにそれらは、本来ミクロな物理法則だけで決まるものと、宇宙に関して初めて登場するものの2種類が存在

- 宇宙年齢と古典電子半径の通過時間

$$N_1 \equiv \frac{t_0}{e^2 / m_e c^3} \approx 6 \times 10^{39}$$

- 陽子電子間の電気力と重力の比

$$N_2 \equiv \frac{e^2}{G m_p m_e} \approx 2 \times 10^{39}$$

- これらが独立であるはずがない。つまり、たまたま現在成り立っているのではなく常に成立していると考えるのが自然 (P.Dirac 1937; Nature 137, 323)

$$G(t) \approx \frac{\alpha_E^2 \hbar^2}{m_p t} \propto \frac{1}{t}$$

(もし他の基本定数が時間変化しなければ)

基本物理「定数」は時間変化する？

- 「現在」が宇宙の歴史においてなんら特別な時期ではないとすれば(コペルニクスの)、物理「定数」は時間変化すると思うほうが自然
- 連星パルサーの観測から重力定数については厳しい上限が導かれている

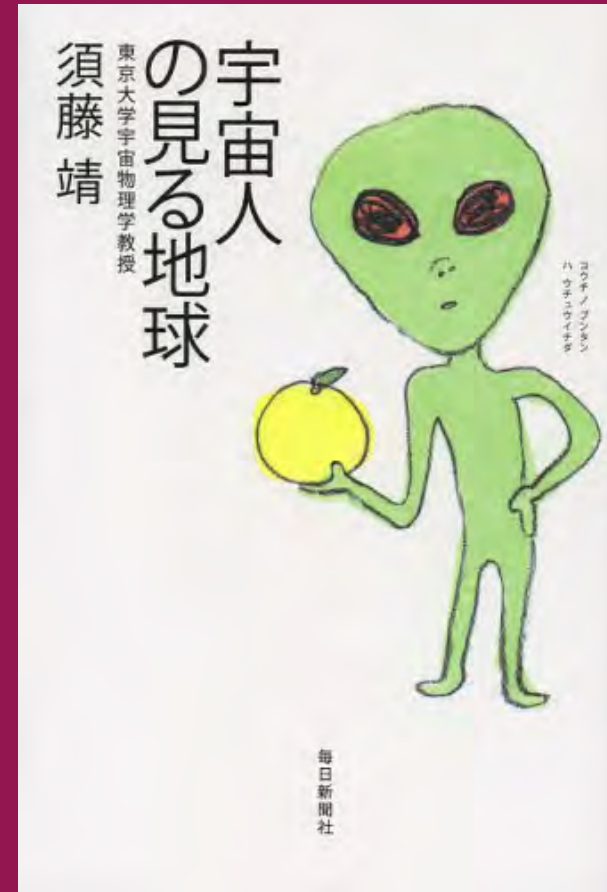
$$\dot{G}/G = (1.0 \pm 2.3) \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1} < 0.1/t_0$$

- 一方、微細構造定数については遠方クエーサーの吸収線の微細構造線の観測より有意な時間変化を主張するグループもある
 - Webb et al. PRL82(1999)884, PRL 87(2001)091301

$$\Delta\alpha_E / \alpha_E = (-0.72 \pm 0.18) \times 10^{-5} (0.5 < z < 3.5)$$

- 少なくとも、物理定数に対してすら「神聖にして侵すべからざるもの」というタブー視の風潮は弱まってきた

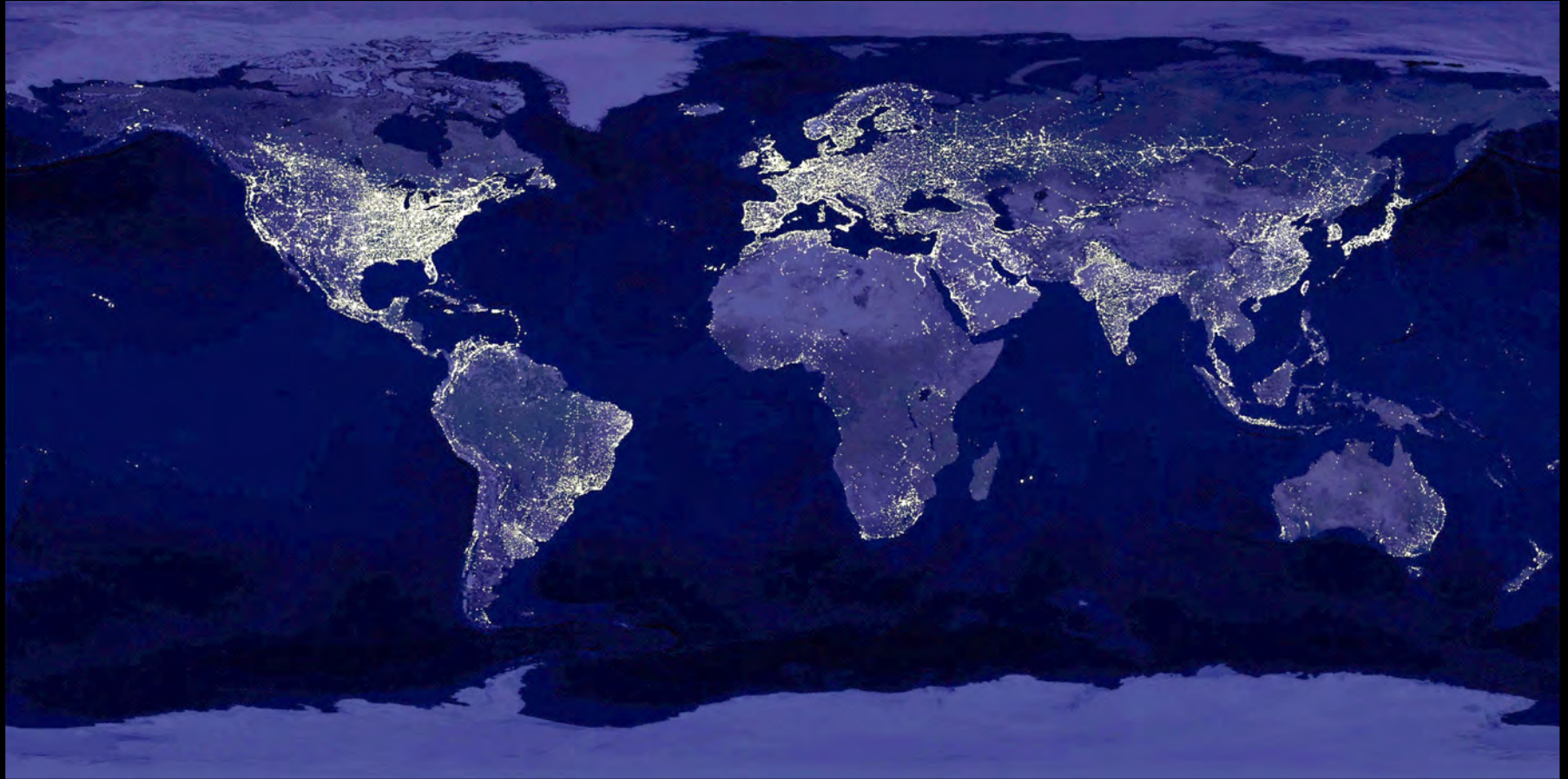
地球観測衛星はどれだけあるのか



1 世界を支配するダーク

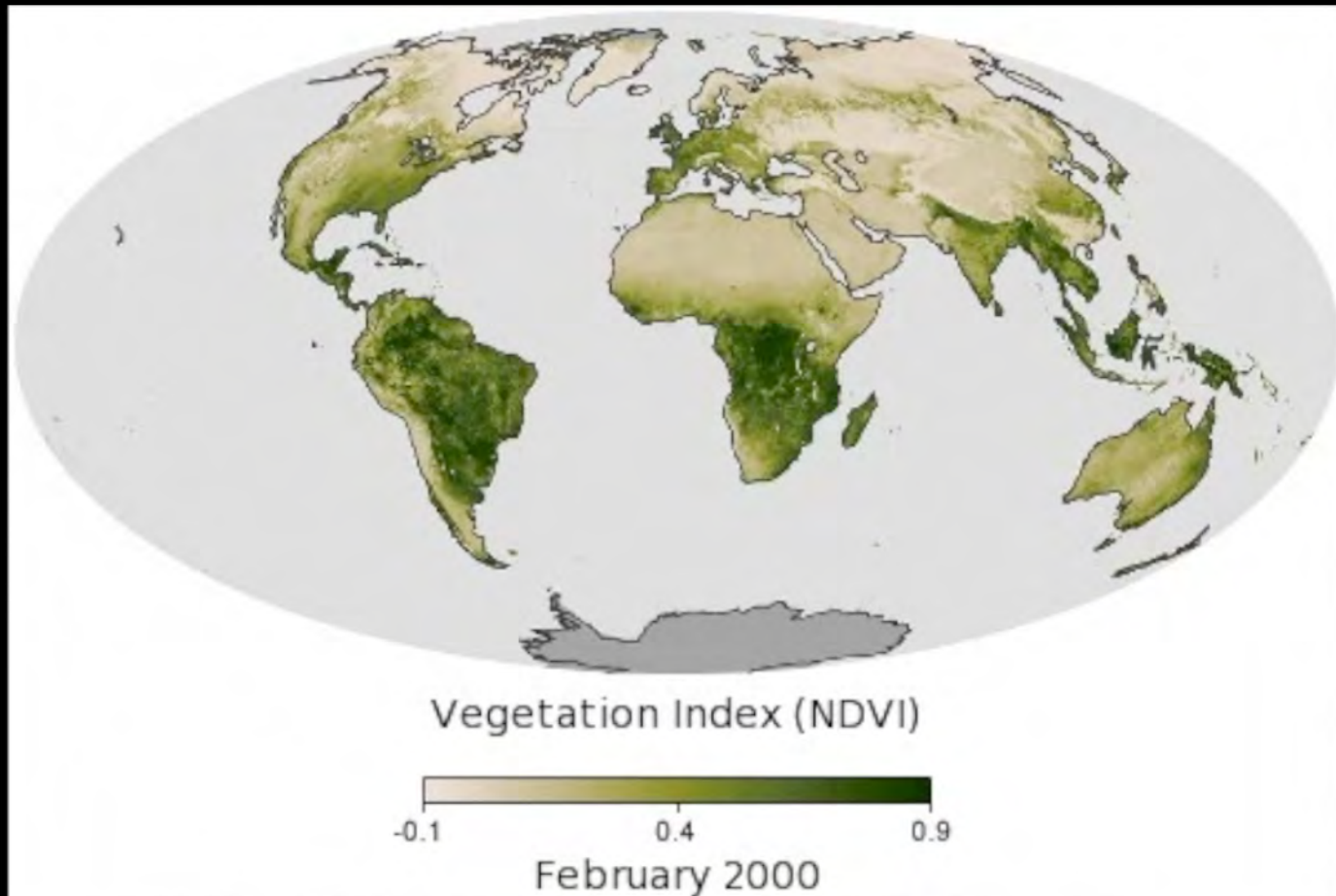
もう一つの地球から眺
めるわが地球

Earth at Night 2012



<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>

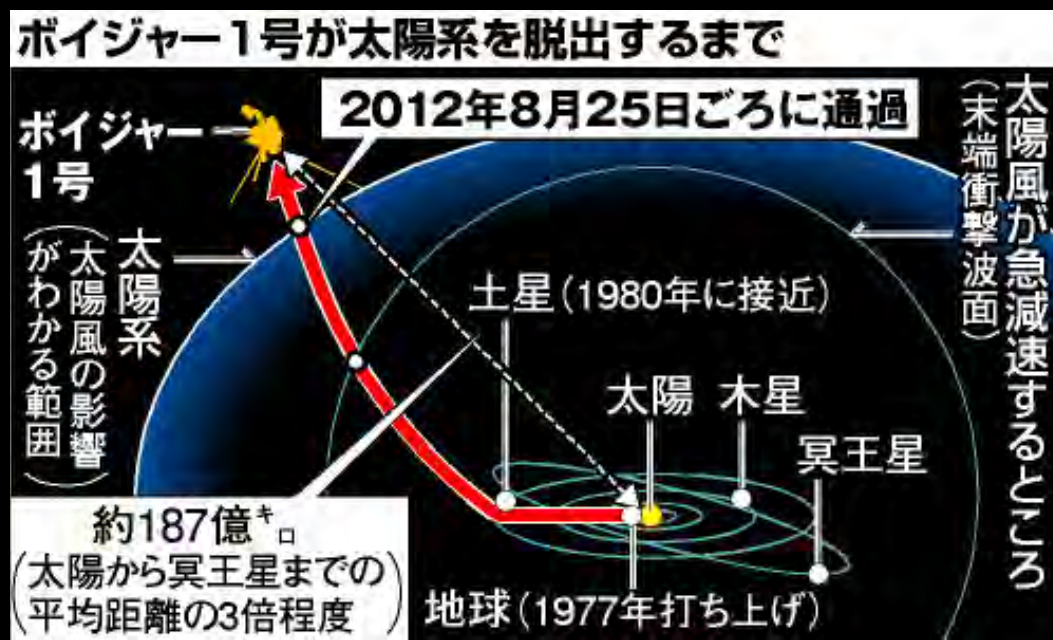
地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



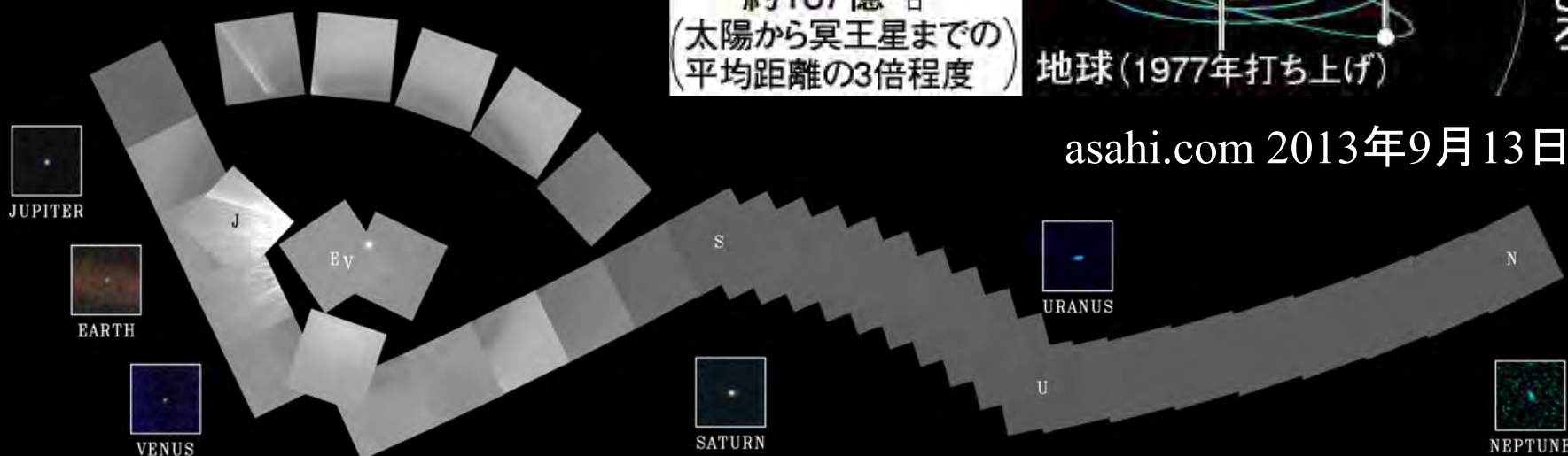
<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

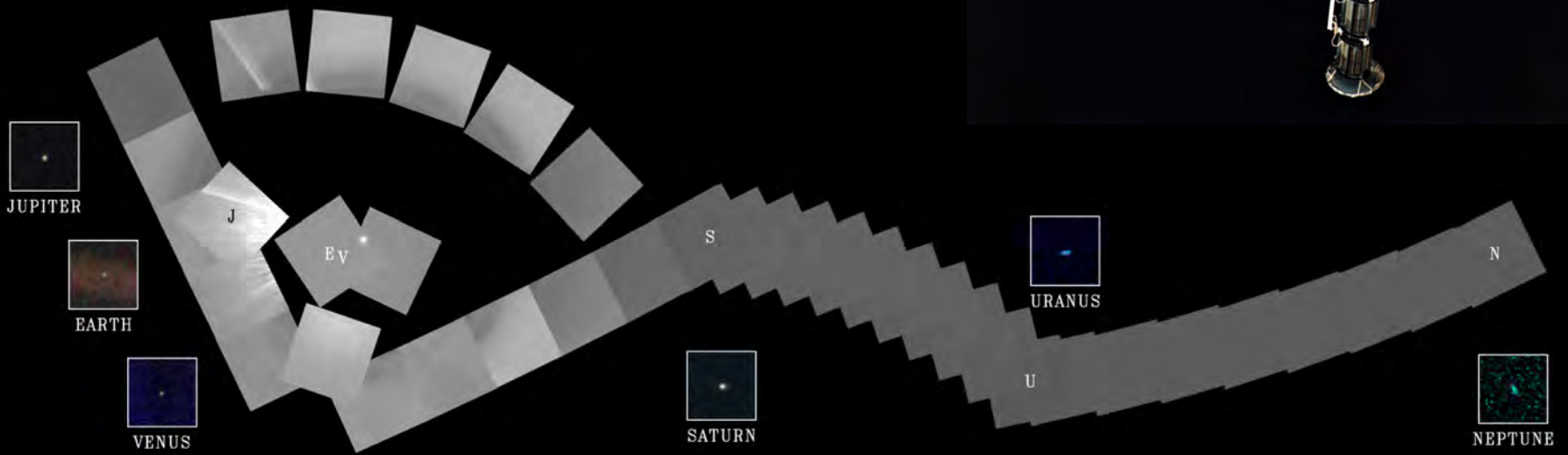
- 1990年2月14日 @40AU
 - カール・セーガンが地球の画像を **Pale Blue Dot** と命名



asahi.com 2013年9月13日



ペイル・ブルー・ドット



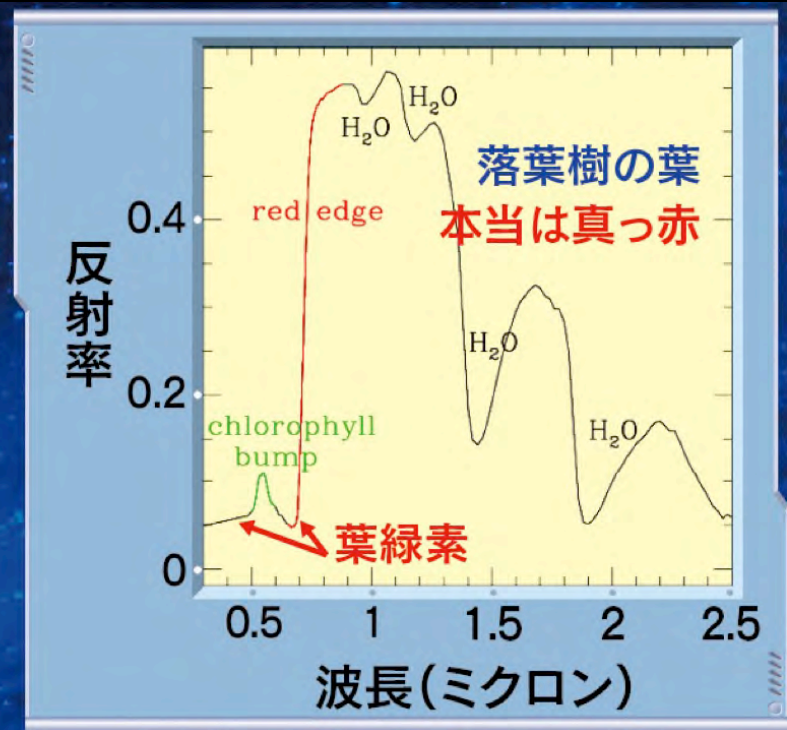
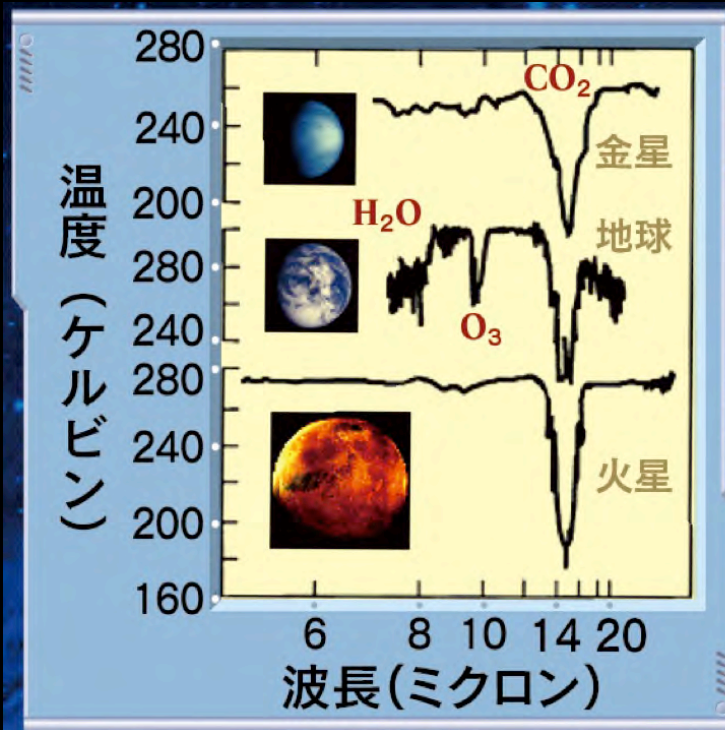


土星から 見た地球

- 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

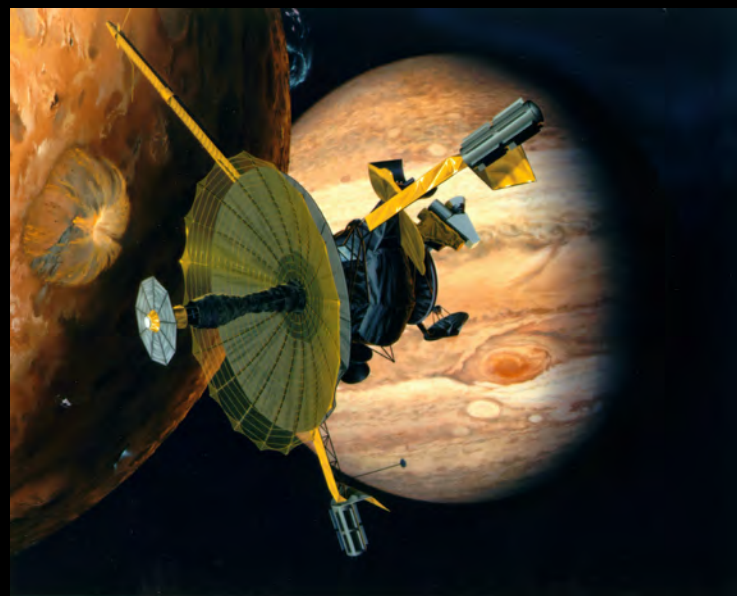
バイオシグニチャー: 生物が存在する兆候

- 何を見れば生命があると考えらるのか？
 - 生物由来の大気成分(酸素、オゾン、メタン)
 - 植物のレッドエッジ
 - 知的生命体からの電磁波
- いずれにせよ検出は天文学観測しかない



ガリレオ探査機による地球上の生命探査

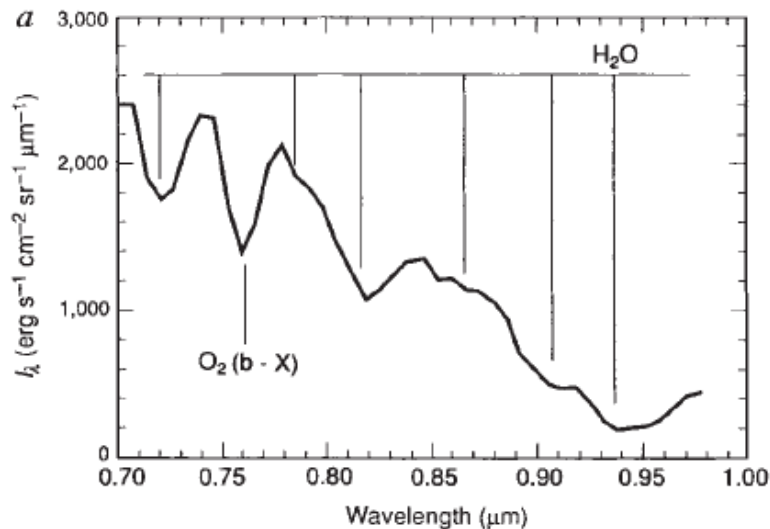
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



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

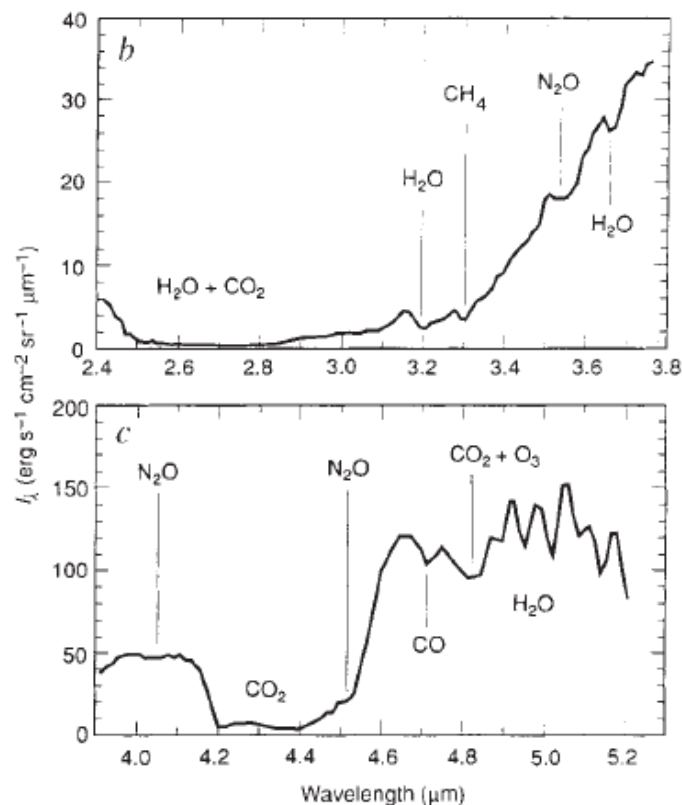
Sagan et al. (1993): 大気分光

ガリレオ探査機の観測した地球の可視光-近赤外スペクトル



酸素分子の吸収@Aバンド(0.76μm)

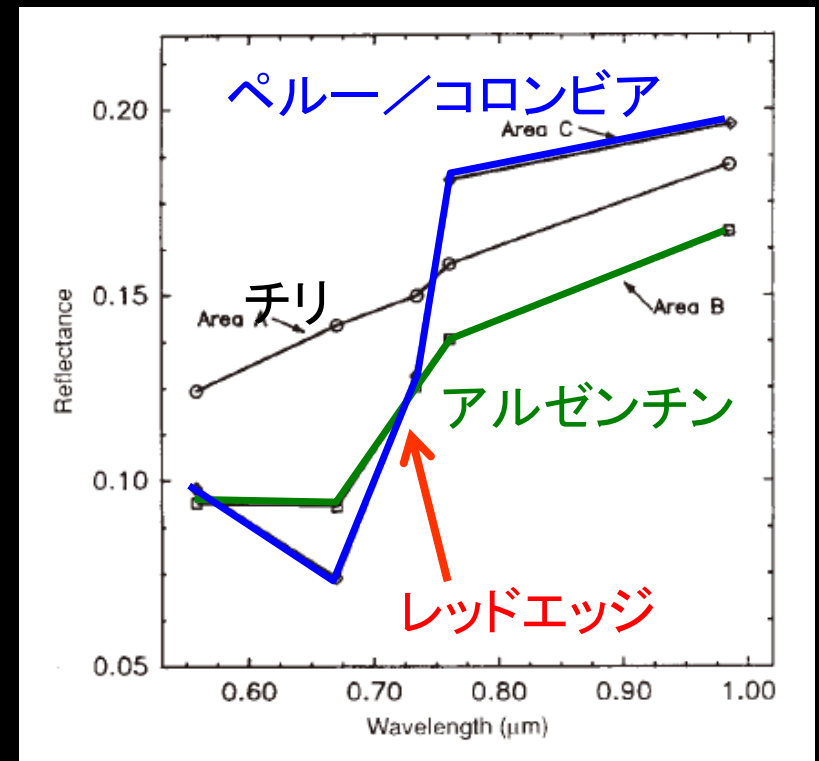
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$ 0-0 band of O_2 at $0.76 \mu\text{m}$ is evident, along with a number of H_2O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O_2 vertical column density of $1.5 \text{ km-amagat} \pm 25\%$. b and c, Infrared spectra of the Earth in the $2.4\text{--}5.2 \mu\text{m}$ region. The strong ν_3 CO_2 band is seen at the $4.3 \mu\text{m}$, and water vapour bands are found, but not indicated, in the $3.0 \mu\text{m}$ region. The ν_3 band of nitrous oxide, N_2O , is apparent at the edge of the CO_2 band near $4.5 \mu\text{m}$, and N_2O combination bands are also seen near $4.0 \mu\text{m}$. The



methane (0010) vibrational transition is evident at $3.31 \mu\text{m}$. A crude estimate¹⁰ of the CH_4 and N_2O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-amagat ($\equiv 1 \text{ cm path at STP}$).

Sagan et al. (1993): 撮像

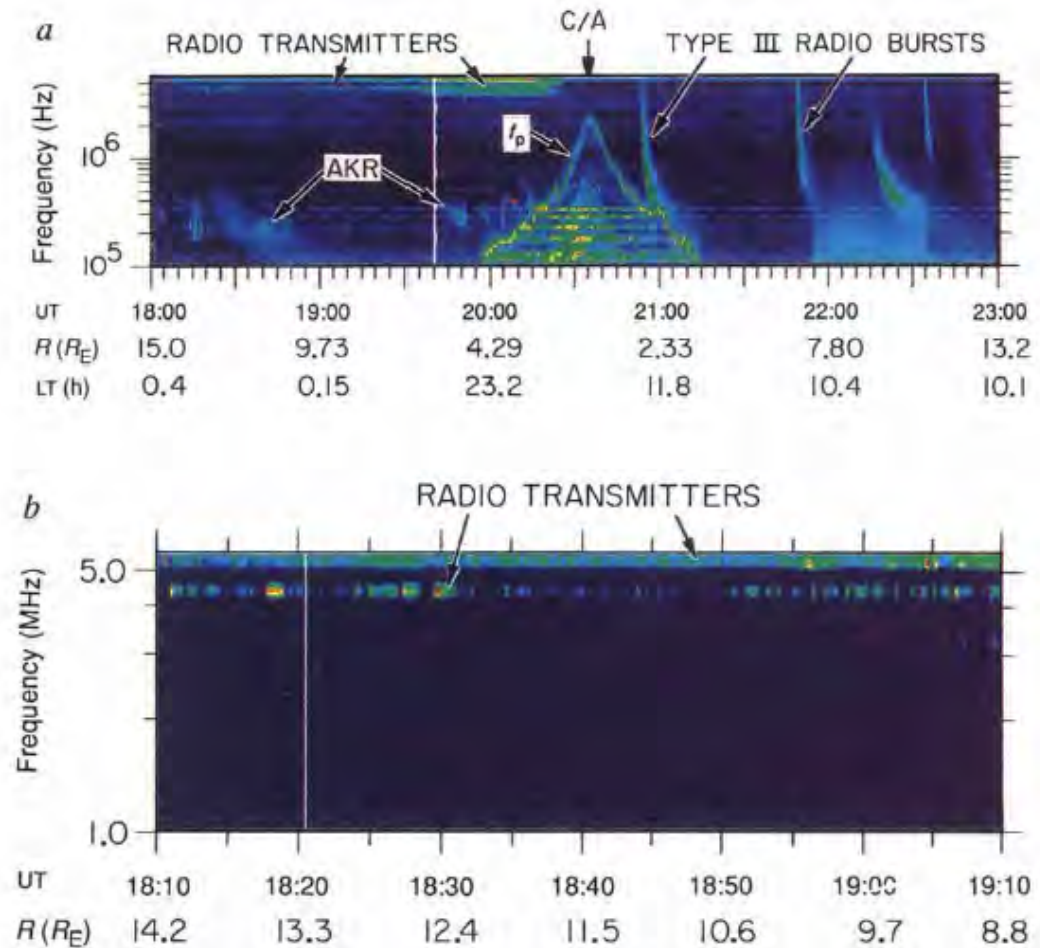
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



Sagan et al. (1993): 電波観測

ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green–yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in *a*, including auroral kilometric radiation (AKR). Modulated emission at $f > 4$ MHz is shown with an expanded time scale in *b*. Modulated patterns of this type are characteristic of the transmission of information, and would be highly unusual for a naturally occurring radio source. (UT, universal time; R is distance of Galileo from Earth in units of Earth's radius, R_E ; LT, local time.)

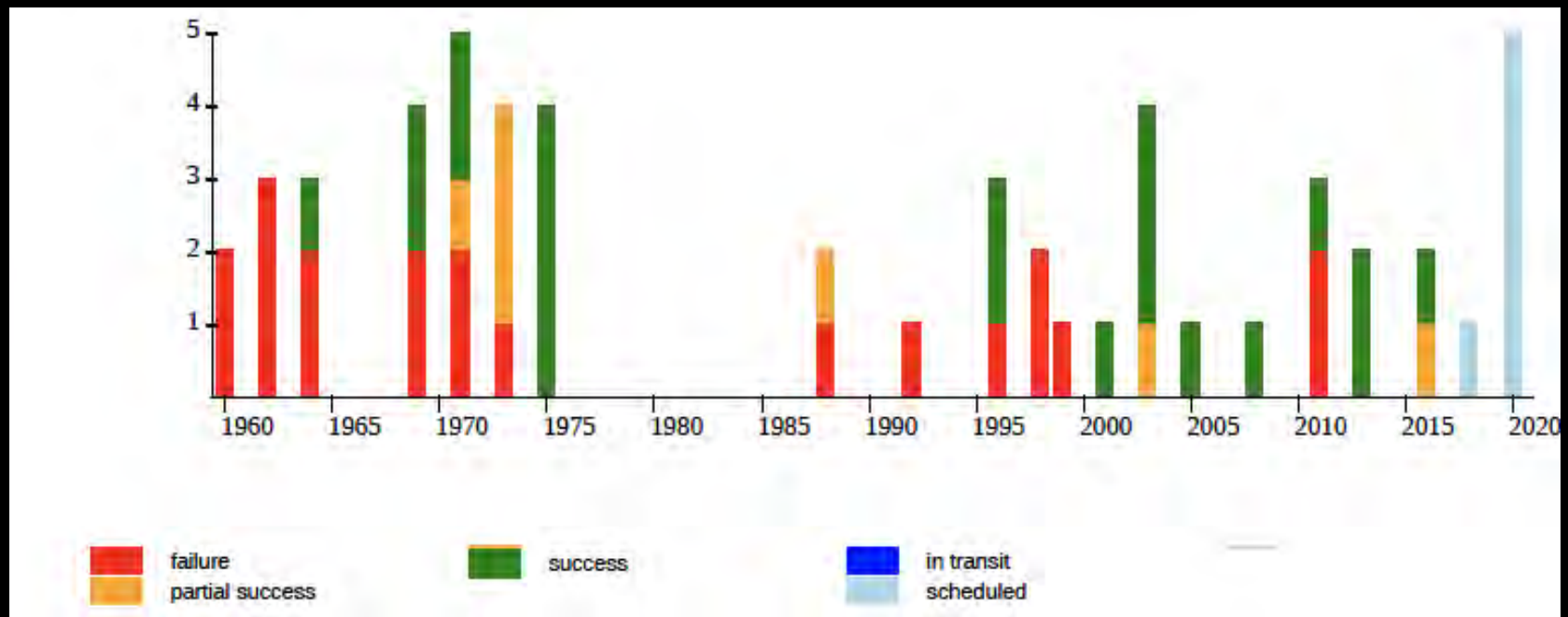


私に聞くより以下を参照すべき

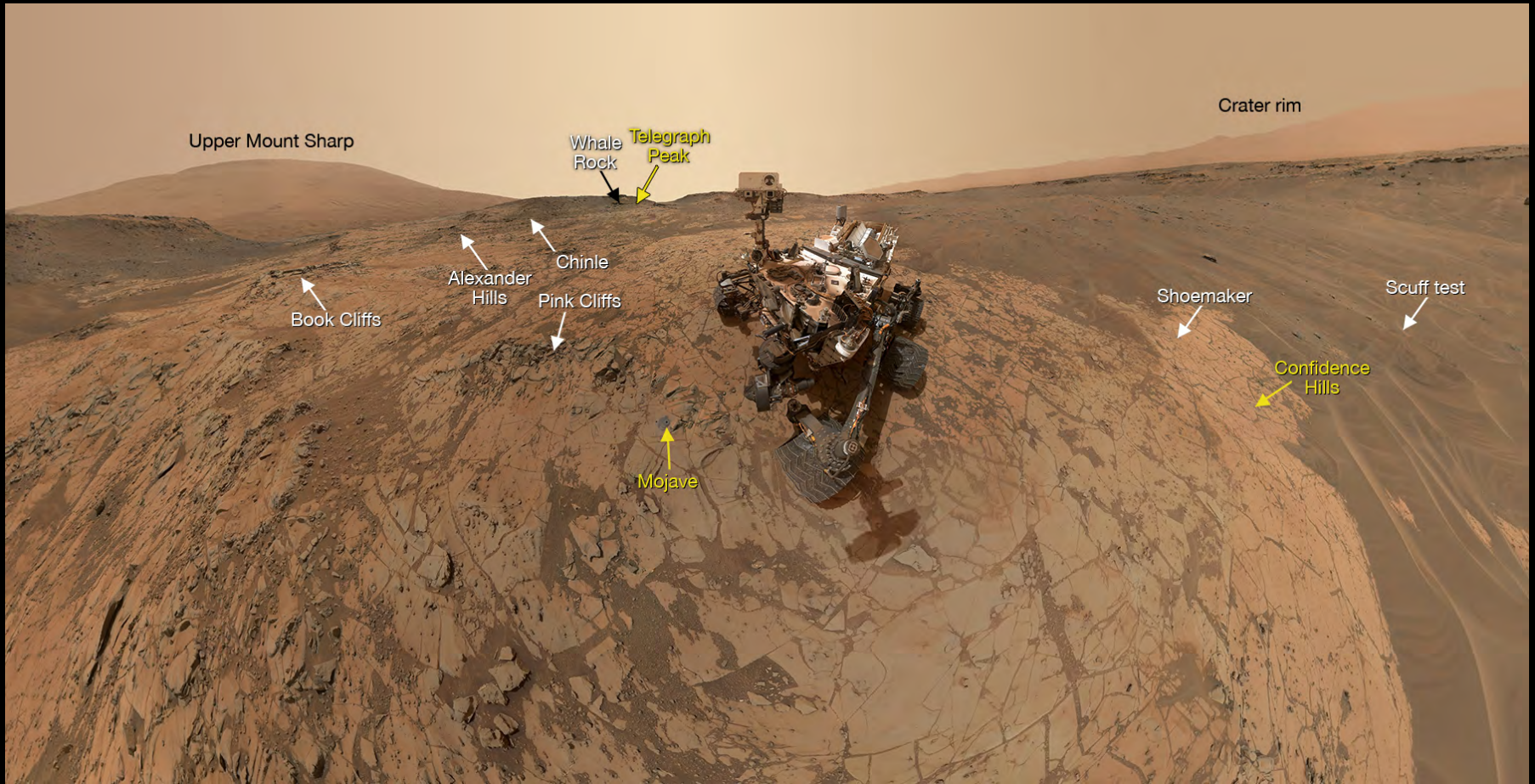


火星探査の歴史:火星の呪い

- 1960年代以降、多くの無人探査機が火星をめざした
- 約3分の2が任務完了後・開始前に何らかのトラブル
- 明確な原因が不明なまま失敗したり通信を絶ったものも多く、「火星の呪い」として知られている



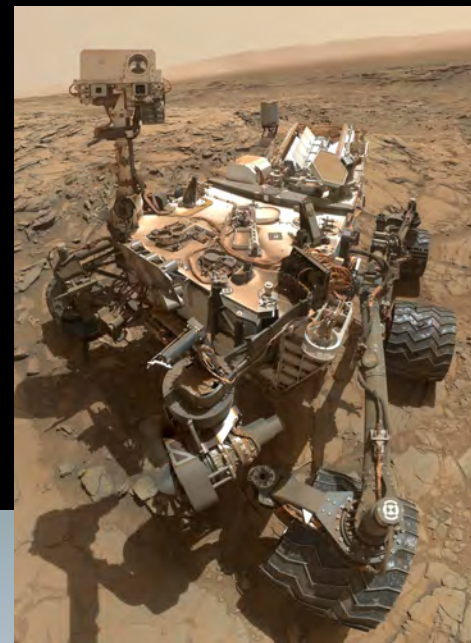
火星着陸探査機 キュリオシティ



Curiosity (Mars Science Laboratory) 2011年11月26日 打ち上げ、2012年8月6日 火星軟着陸
<https://mars.jpl.nasa.gov/msl/>

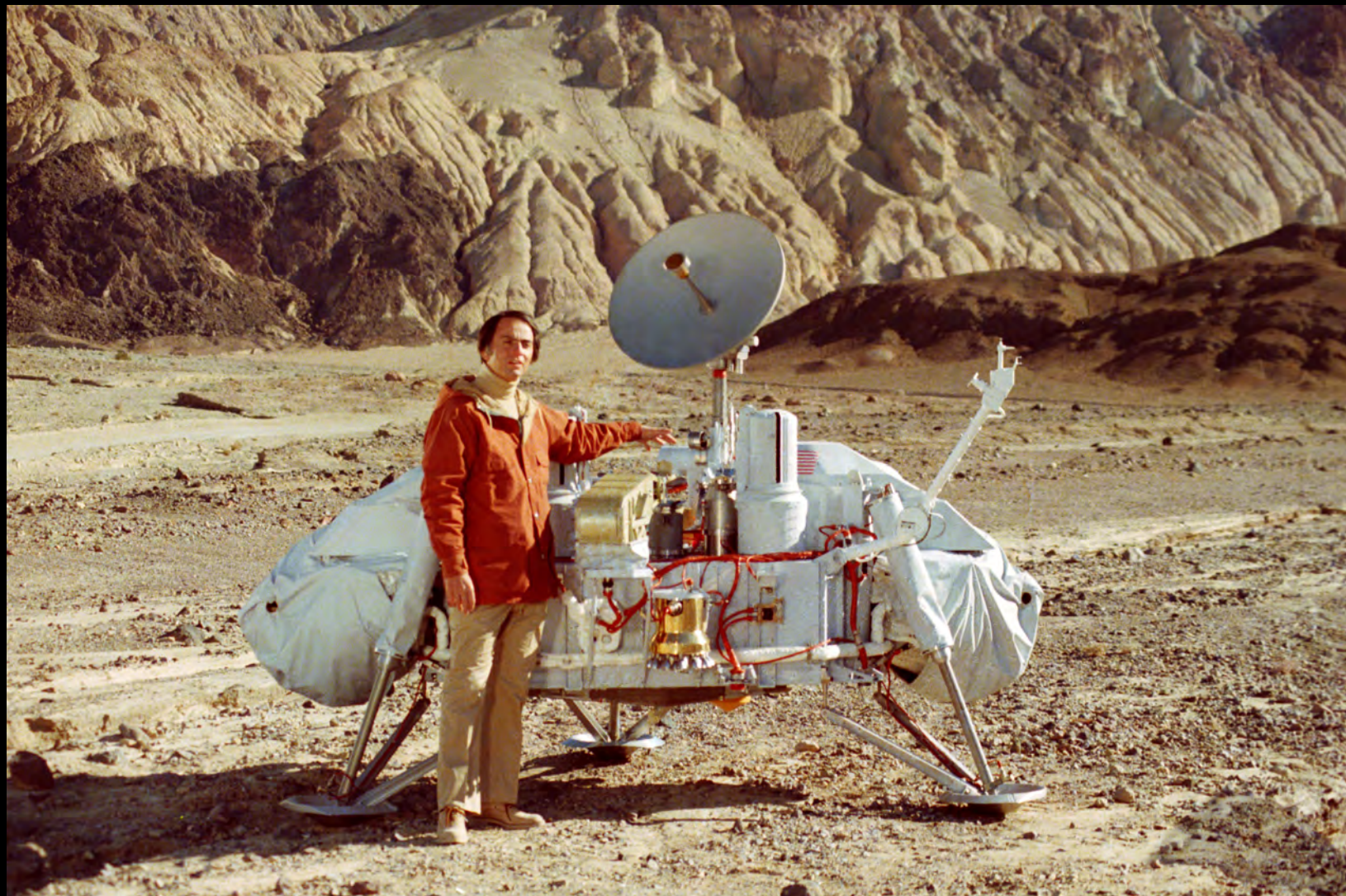
火星の表面

<https://eyes.nasa.gov/curiosity/>



カール・セーガンとバイキング1号のランダー模型

この写真を見ると、火星表面の写真もまた地球のどこかで撮影されたのではないかという疑惑を与えてしまうほど、火星は地球と似ている



別の恒星への旅は可能か



50年後の世界



9 一番近い星に生命が？

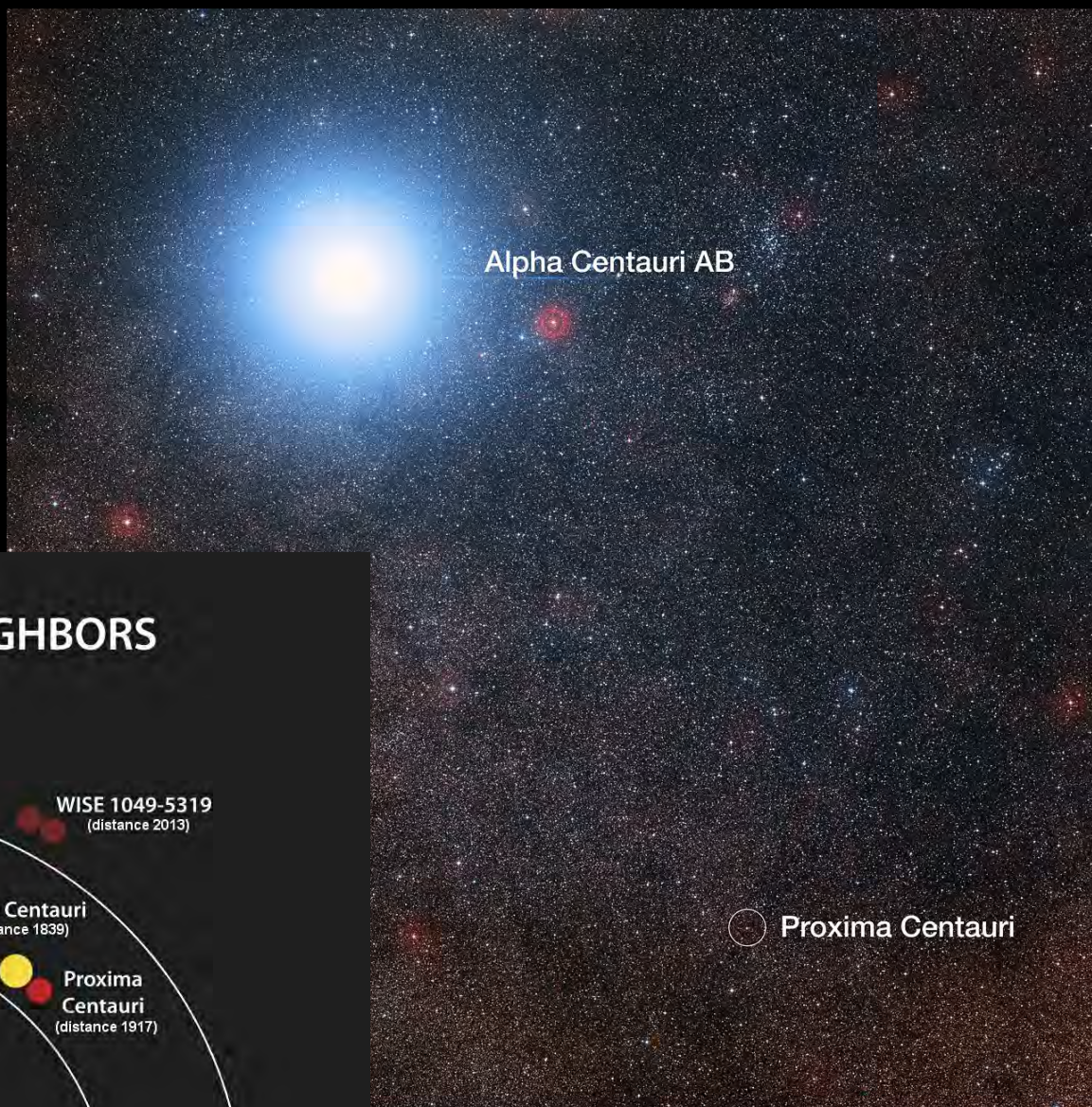
ガイア探査機による 天の川銀河地図



<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/home>

- 銀河系の精密3次元地図
 - 系外惑星系
 - ブラックホール

プロキシマ ケンタウリ



THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS



<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

プロキシマ ケンタウリb

- ケンタウルス座アルファ星は、太陽に最も近い3重連星系で、その一つがα Cen C =プロキシマ ケンタウリ(4光年先)
- その周りに、水が液体として存在できる可能性のある惑星(プロキシマ ケンタウリb)が発見された(2016年8月26日)
- そこへ直接超ミニ探査機を送るスターショット計画が検討されている

Alpha Centauri AB

Proxima Centauri

<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

ブレイクスルー イニシャティブ

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative>

- ロシア出身のIT投資家ユリ・ミルナー(素粒子理論で学位取得)が地球外知的生命を探查するために、2015年7月20日に立ち上げた
 - **ブレイクスルーリスン**: 地球外文明の電波あるいはレーザーによる信号を受信
 - **ブレイクスルーメッセージ**: 宇宙空間へ送るメッセージとして最適なものを提案するとともに、その行為の哲学的倫理的妥当性を検討
 - **ブレイクスルースターショット**: ケンタウルス座アルファ星へ探查機群を送るための概念設計検討

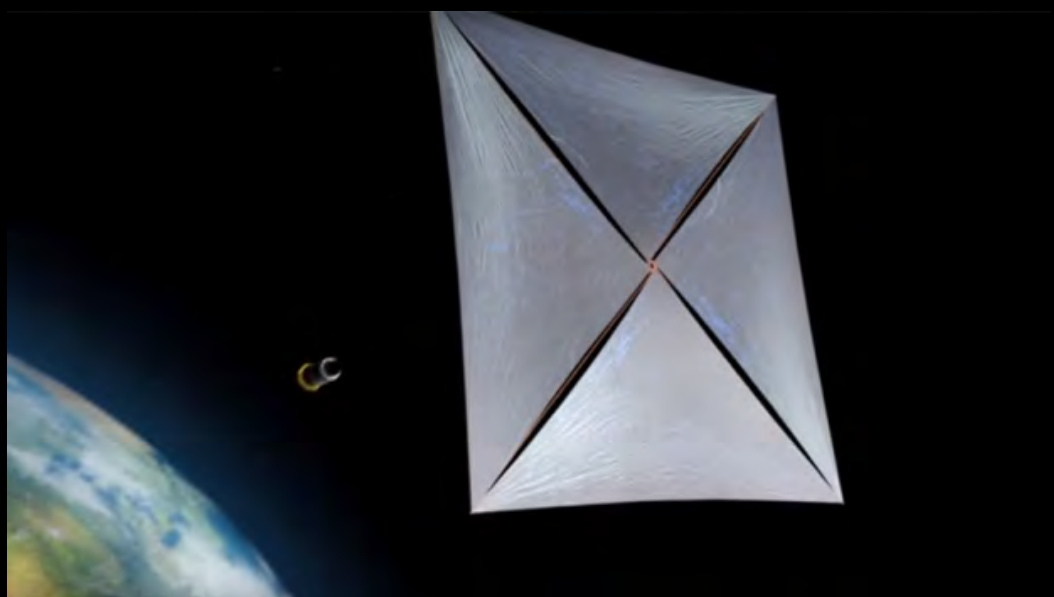
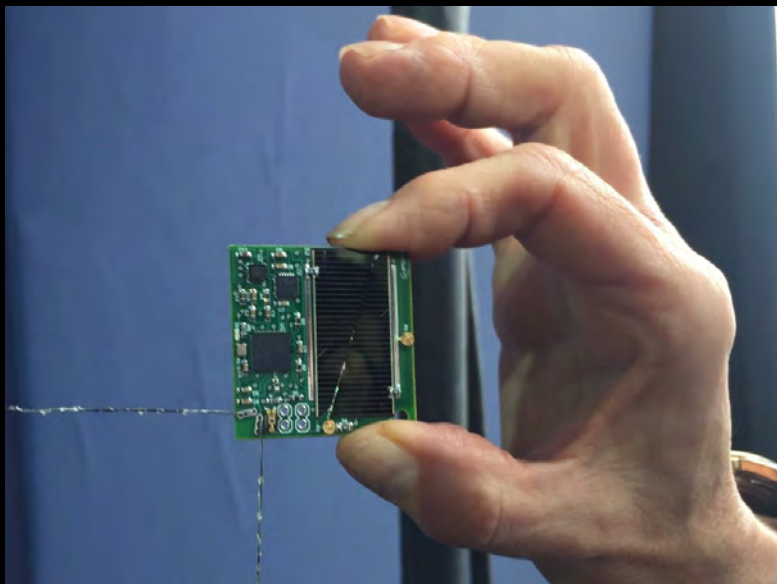
ブレイクスルースターショット

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

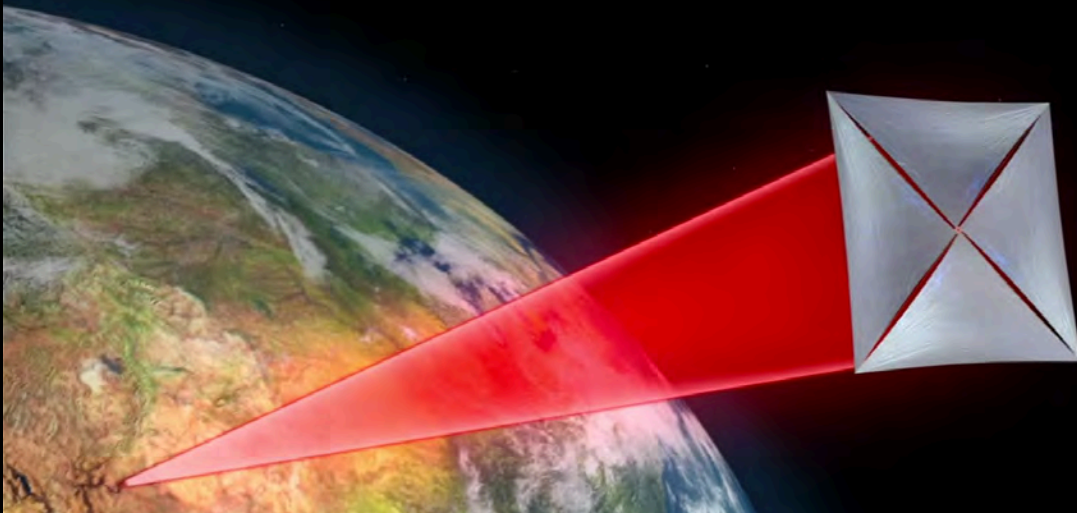
■ スターチップ

- 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
 - 4m x 4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される
- プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップを次々と飛ばす。約20年で到着する
- ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成までに今から20年の研究開発が必要

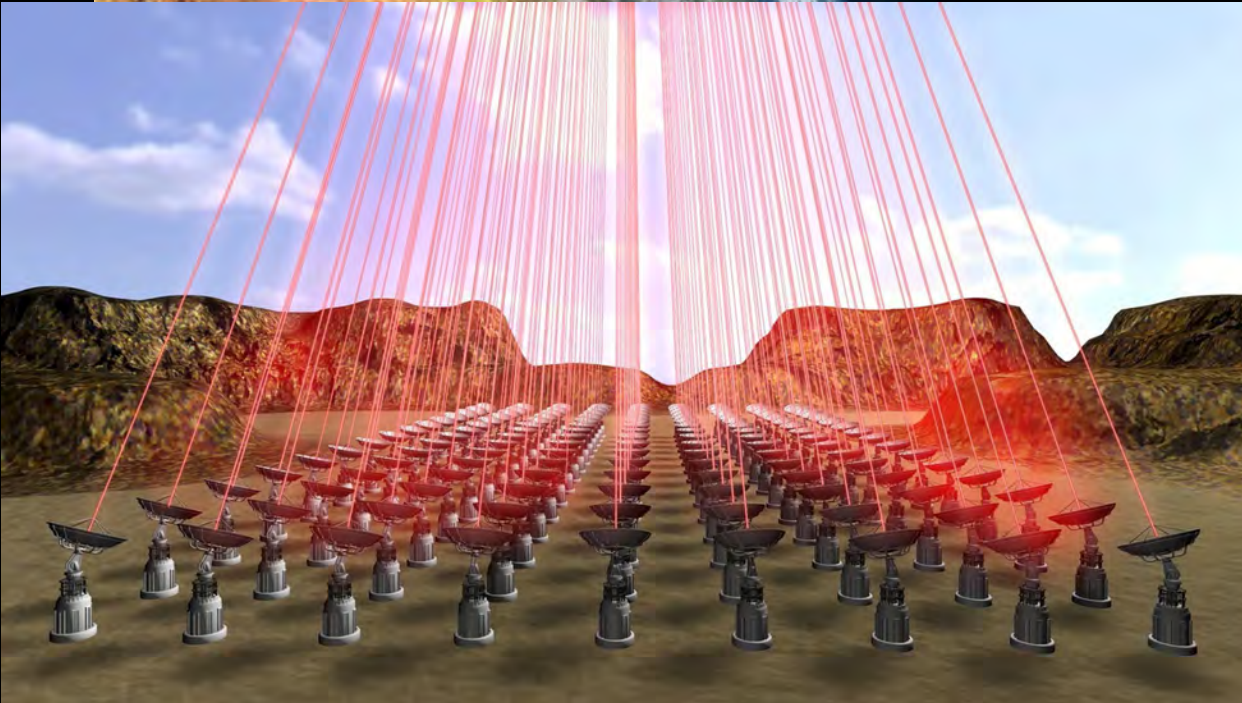
スターチップ



地上のレーザーで光速の20%に加速



- 今から20年後に打ち上げ、さらに20年かけてプロキシマケンタウリに到達しデータを取得。その4年後には地球にデータが届く。そこには何が写っているのか？



タイムトラベルは可能か



明日のことはわからない
50年後の世界



今から50年で起こること？

- 科学・技術は驚くべきスピードで世界を変える
 - 子供の頃には、スマホ、インターネット、ロボットペット、自動運転などはSFどころか、想像すらできなかった
- 今から50年後には、今の我々が決して予想できない世界が確実に実現する
 - 自動翻訳(外国語教育は不要)、労働の完全AI/機械化、天災の制圧、脳とコンピュータの完全接続、不老不死、地球外知的文明との遭遇
 - 地方消滅、核戦争やウイルスによる人類絶滅、ホモサピエンスに代わる新人類の台頭
- 現在の倫理観、価値観、世界観が一変する

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、自然災害、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

50年後
の世界?



科学と哲学、宗教は違うのか



6章 人間原理



無科学哲学ノススメ



第1章 科学者が抱く科学哲
学者への不信

第6章 答えの出ない問い
を考え続けることについて

森羅万象はどこまで理解できるのか

- 科学のゴールは、この世界(あるいは我々のユニバース)の振る舞いを少数の基本原理から説明し尽くすこと
 - それが本当に可能なかどうか、保証はない
 - だからこそ、ゴールとして掲げる意味がある
- では、科学の終着点は？
 - 究極理論 (Theory of Everything) を発見する
 - ある程度少数の基本法則にまで還元できるものの、なぜそれらが成り立つかは説明できず、偶然に帰せざるを得ない
- 究極理論の存在は証明できないが、その存在を信じる物理屋は多い
 - しかし究極理論のもとでこの宇宙を一意的に説明するには、初期条件まで決める原理が必要。これは不可能に思える

自然科学とえせ科学との違い

■ 自然科学の特徴

- 決して「厳密な」自然像構築のみを追求してはいない
- あくまで近似的描像を更新し続ける行為
- 論理自身は問題なくとも、実験が否定することもある

■ 「正しいのか間違っているのか区別できる」ことこそ自然科学の本質的定義

- 「科学＝正しいこと」ではなく、それに至る営みが科学であり、その試行錯誤の過程で「科学」が間違っていることは普通
- “falsifiable”(うそであることを示しうる): 反証主義
- 間違っているか判断できない命題(例えば、神が存在する)は、自然科学では(まだ)扱えない
- 「説明できない事実が存在する」は自然科学の限界ではなく、むしろ出発点

科学は蓄積的に進歩する

■ 失敗する(できる)からこそ進歩する

- 失敗したことが明確に認識でき、その**反省**がフィードバックされた結果としてやがて次の成功を生む
- 過去の文献はどんなに偉大な貢献をしたものであっても、やがて新しい結果にとって代わられる

■ 自然科学は決して万能ではないし、記述できることには限界がある

- 「自然」あるいは実験・観測事実と矛盾すれば、どれほど論理的にすばらしい美しい理論であってもそれは(自然が残念ながら採用しなかったという意味で)間違いであり、捨て去らざるを得ない

■ 科学における失敗や試行錯誤は、「世界」をより深く理解するために本質的かつ不可欠な作業

物理教の経典

- 世の中の「本質的なこと」はすべて物理法則によって「自然に」説明できるはずである
- むろん、実際にわかっていない現象も多いが
 - 自由度が多く、初期条件を精度よく推定できないために細かいことまではわからないだけ（複雑系）
 - まだ正しい物理法則の理解に至っていないだけ（すべての相互作用の統一⇒究極理論への道）
- つまり、単に我々がまだ未熟者であるだけで、もっと修行を積みればわかるようになるはず
 - 学者という職業の存在意義
- 「神様」を持ち出す必要はない



ポパーの反証主義

- 科学とは何か、という定義においてよく取り上げられるのが、カール・ポパーによる反証可能性 (falsifiability)
- 科学的仮説とは、何を説明できるかだけでなく、どうやればそれが誤りであることを示せる (falsifiable) かが明確でなくてはならない
 - 神が存在する⇒× (どの場合神の存在を否定できるかわからない)
 - 私が試験で不可をとらないように守ってくれる神が存在する⇒○ (不可をとればその神が存在しない証明となる。ただし神が存在する証明にはならない)

誰でも気になる根源的疑問

- **自分はなぜ今ここに生きているのか**
 - なぜ弥生時代に生まれなかったのか
 - なぜシリアに生まれなかったのか
 - なぜアメーバではないのか
 - なぜエリザベス女王の息子ではないのか
- **自分が生まれる前、あるいは死んだ後の、自分および世界はどうなっているのか**
- **これらは「自分」の意識とは無関係に、唯一無二の「世界」が実在することを前提とした疑問**

根源的疑問への回答例

1. そんな危ないことばかり考えても無意味である。もっと楽しく刹那的に生きる
2. 生まれる前あるいは死んだ後には「自分」の意識はない。世界で新たに誕生し続ける意識は、あくまで「他人」の独立したものであるから、なぜ今ここに、という質問自体がおかしい
3. 意識がなければ「世界」を認識することはできない。この意味で「自分」の意識と「世界」とは一対一に対応している。さらに過激に考えると、意識がなければ世界自体も存在しない。

人間原理の立場

- これらの「偶然」を、(未知の、本当にあるかさえもわからない)究極理論によって自然に説明することなどできるのだろうか？
- すべてのことに「自然」な説明が存在するはずである、というのは物理屋が陥りやすい一種の信仰に過ぎないのでは？
- むしろ、この偶然は「人類(知的文明)が誕生できた」ユニバースでのみ実現されているだけではないのだろうか？(人間原理)

人間原理と物理法則

- マルチバースの存在を認めよう
- そのなかのユニバースでは物理法則が異なっている
 - 少なくとも物理定数や宇宙定数の値は違っている
- それらのなかで、たまたま人間を生む偶然が積み重なったユニバースの一つが我々の住む宇宙
 - 大多数の「普通」のユニバースでは人間は誕生しないから、「これが普通」と納得する「人間」は存在しない
 - 「例外的に珍しい」ユニバースでのみ人間が誕生でき、だからこそそこには「なぜこのユニバースはこのように不自然なのか」と思い悩む人間が存在する
 - とすれば、人間が生まれるような奇跡・偶然がなぜ起こりえたのか不思議に思う必要はない

人間原理の算数

- 極度にありえない事象を、同等にありえない事象(人間の存在)と関係付ける
- $P(\text{不思議なこと}) \ll 1$ であるが、 $P(\text{人間の存在})$ もまた $\ll 1$ であるから、「不思議なこと」と「人間の存在」が相関していたならば、その条件付確率 $P(\text{不思議なこと} | \text{人間の存在})$ が ≈ 1 となることはあり得る

$$P(\text{不思議な事} | \text{人間の存在}) = \frac{P(\text{不思議な事、人間の存在})}{P(\text{人間の存在})} \gg P(\text{不思議な事})$$

- 不思議さが減り、何か心が安らぐような気がする(自然科学かどうかは別として精神面では大切)

人間が誕生する確率がどんなに少なくとも 宇宙が無数にあればどこかで実現する

- いかにか少ない確率であっても、試行回数が多ければその事象は(整数回)実現する
 - 宝くじで一億円当たる確率は100万分の1以下だが、当選する人は必ず存在
 - 100万本以上の数の宝くじが売れているならば当たり前
- 逆に、人間が存在する宇宙が極めて可能性が低いにもかかわらずまさに我々の宇宙がそのようなものならば、人間が存在しないような宇宙は実は無数にある(マルチバース)と結論すべきでは？
 - そうであって初めて、人間を誕生させる宇宙が存在しているという奇跡的な事実が納得できる

むろんマルチバースは仮説に過ぎない

- そもそも、科学的仮説と言えるか？
- 証明はおろか、反証もまた不可能である（量子自殺？）
- ダークエネルギーの値のように、奇跡的な微調整が必要としか思えない現象があるのは事実だが、より根源的な未知の究極理論で説明できる可能性も同等にある
- 禁止されていない出来事はすべて起こる、というのも単なる思想に過ぎない

マルチバースはあくまで一つの考え方

- 宇宙が無数に存在すると仮定することによって、多くの異なる不思議さ・不自然さを回避できることは事実
 - なぜ自分は、よりもよってこの宇宙のこの場所この時刻だけに存在しているのか？
- ただし、マルチバースの存在を科学的に証明することは不可能
 - もしそれができたとすればその宇宙は我々の宇宙・世界の一部に過ぎないことになってしまうはず
- マルチバースという考え方そのものは決してSFやとんでも系ではない一方で、検証可能性という立場から考えれば正統的な科学の枠にはない

マルチバースを考える意味

- すべての物事には理由・答えがある(究極理論的世界観)
- すべての物事が必然とは限らず偶然は不可避(それでも納得したい⇒人間原理的世界観)
- 人間原理:「人間が存在する」という条件付確率を考えることで、不思議さを減らすベイズ統計的世界観
 - 人間原理の実現には、多宇宙(マルチバース)が存在することが前提
 - 人間原理+マルチバースは観測的に実証することは不可能であろう。したがって、通常自然科学という範疇とは言えないかもしれないが、第一級の哲学としての価値は高い

法則は宇宙のどこに刻まれているのか

- 法律(law)は、いつどこで誰が決めたかわかっているし、文書として記録も残っている
 - にもかかわらず、法律違反は当たり前のように起こるし、違反かどうか判定する人間すら必要
- 法則(law)は、いつ誰がどころか、具体的な実態としてどこに存在するのかすら不明
 - にもかかわらず、法則違反はありえないし、どのような法則があるのかを探し続ける人間(科学者)すら存在する
- とすれば、宇宙そのものが法則と同一なのでは

現在見えない領域にも宇宙は広がっている

■ レベル1マルチバースの存在はほぼ自明

- (ほぼ)無限に広がる空間内で、我々の地平線球が特殊な位置にあるとは考えられない

上と同じ論法を実際の宇宙に適用するとどうなるか。私たちの宇宙には 10^{118} 個の素粒子が入る空間がある。可能な配置パターンは2の 10^{118} 乗通りで、これはざっと10の 10^{118} 乗通りと考えてよい。これに宇宙の直径を掛けると、最も近い同一宇宙までの平均距離が求まる。つまり、10の 10^{118} 乗メートルだ (べき乗が大きいため、係数は無視できる)。

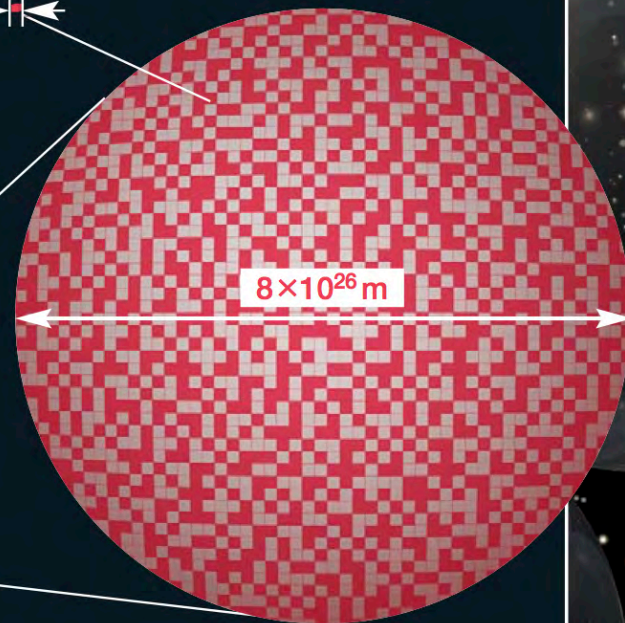
■ さらに我々のレベル1ユニバースと同一のレベル1ユニバースのクローンがどこかに存在する(?)

- 地平線球内の素粒子の数は有限。したがって、宇宙が無限の体積を持つとするならば、どこかで同じレベル1ユニバースが繰り返し登場するはず

$2 \times 10^{-13} \text{m}$

10^{118} 個の粒子
 $2^{10^{118}}$ の配置

$8 \times 10^{26} \text{m}$

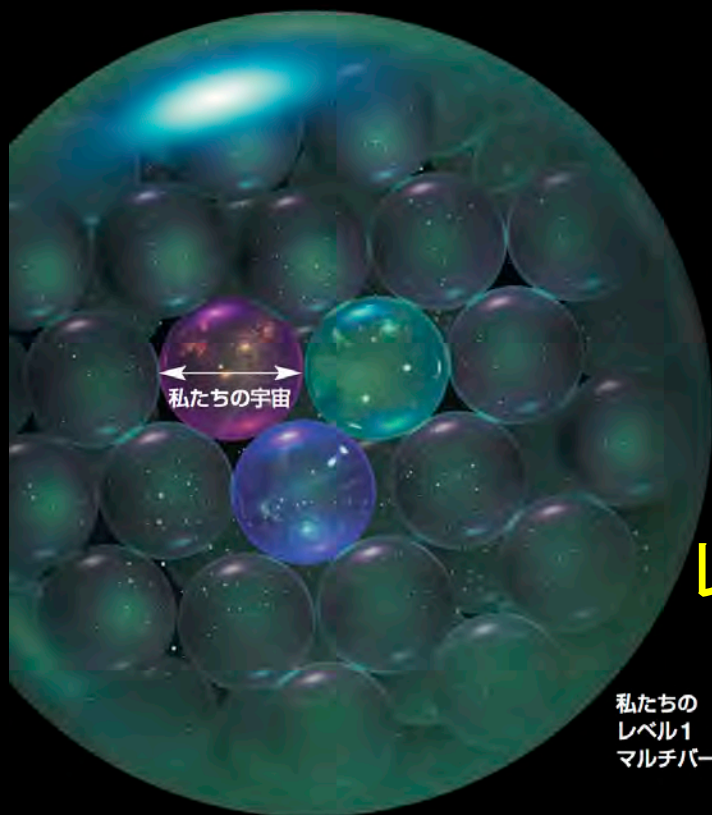


レベル2 マルチバース

- レベル1マルチバースはレベル1ユニバースを元とする集合
- レベル1マルチバースを元とする集合が、レベル2マルチバース

インフレーション理論からは、レベル1よりもやや精巧な別種の並行宇宙の存在が浮かび上がってくる。私たちのレベル1マルチバース（私たちの宇宙とそれに隣接する空間領域）は泡のようなもので、これがより大きなほとんど空っぽの空間に埋め込まれ

ているという考え方だ。空間の中には別の泡があり、私たちの泡とは切り離されている。雲の中の水滴のようなイメージだ。こうした核ができる際、それぞれの泡では量子場が異なるため、他の泡とは異なった特性が生まれる。



私たちの宇宙

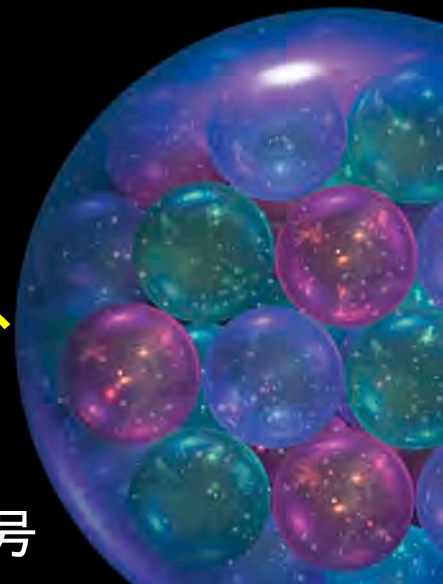
私たちの
レベル1
マルチバース



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)

レベル2マルチバース

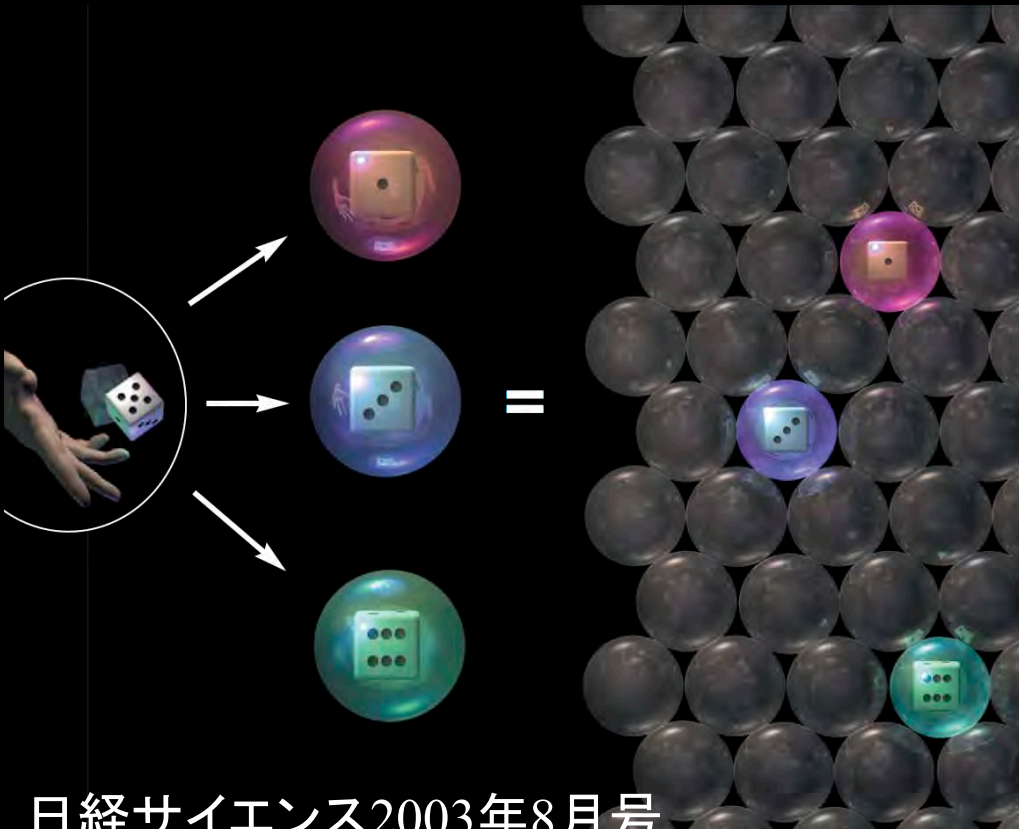


レベル3 マルチバース

エルゴード性

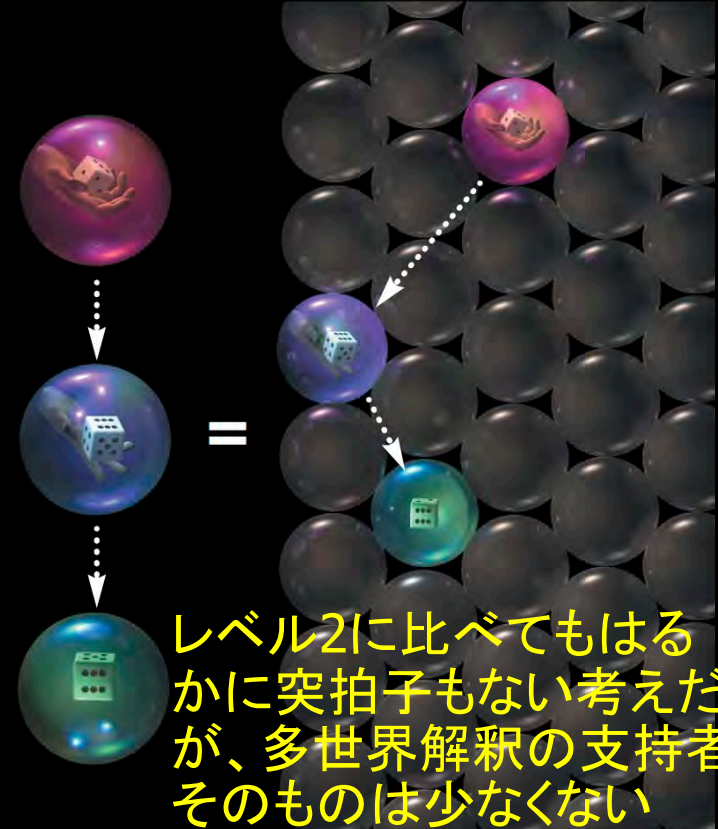
エルゴード性の原理によると、量子並行宇宙はもっと平凡なタイプの並行宇宙と等価だ。1つの量子宇宙はやがて状態が確定した複数の宇宙に分岐する（左）。しかし、こうして新たに生まれた宇宙は、どこか別の空間（右、図ではレベル1マルチバース）にもとから存在していた並行宇宙と変わらない。さまざまな事象がどんな順序で起きるのかを体現したものが並行宇宙だと考えるのがポイントだ。この考え方はどんなタイプの並行宇宙にも当てはまる。

■ 量子力学の多世界解釈に基づく



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。

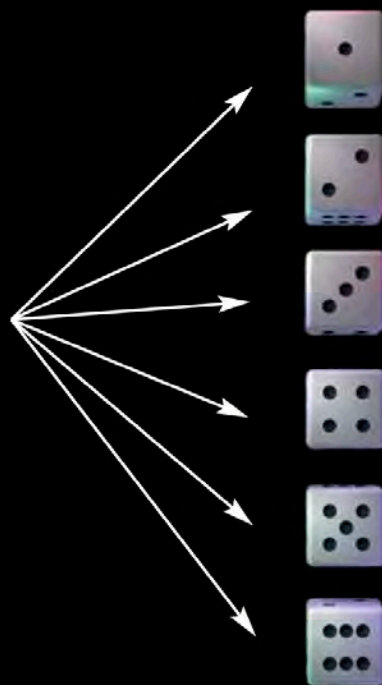


レベル2に比べてもはるかに突拍子もない考えだが、多世界解釈の支持者そのものは少なくない

一つのユニバース内に異なる可能性が同時に存在しているのではなく、異なる可能性ごとに違うユニバースが実在しているのでは？

量子力学の考え方によると、膨大な数の並行宇宙が存在する。ただし、「それがどこに存在するか」という点については、解釈を拡張する必要がある。私たちが実感できる通常の空間ではなく、考えうるすべての状態を含む抽象的な領域の中に存在すると考え

るのだ。世界が取りうるすべての状態（量子力学的な意味での状態）の1つひとつが、異なる宇宙に対応すると考えられるだろう。こうした並行宇宙の存在は、波動の干渉や量子計算といった実験を通じて垣間見ることができる。



量子のサイコロ

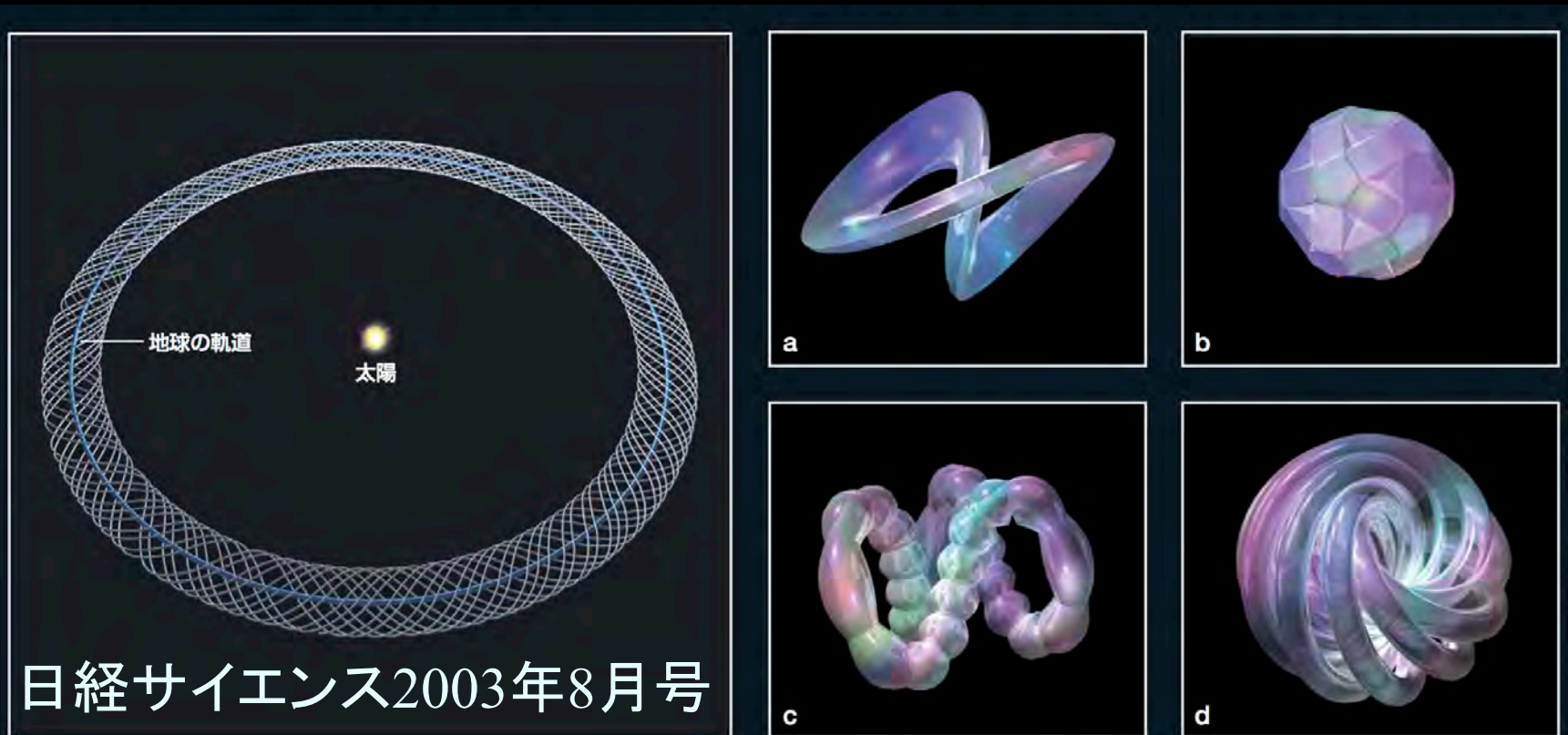
目の出方が完全に無秩序な「量子のサイコロ」を考える。これを振ると1から6までの目のいずれかに落ち着くが、その出方は無秩序だ。しかし量子力学の考え方では、振られたサイコロは1から6までの目を同時に示す。この矛盾した見方に折り合いをつけるには、サイコロが別の宇宙で別の目を出すと考えればよい。6つある宇宙の1つでは「1」、もう1つの宇宙では「2」を出すという具合だ。私たちはいずれかの宇宙の中にとらえられているので、量子世界の全体像のうちごく一部しか実感できない。

レベル3マルチバース実在の検証実験： シュレーディンガーの人間(量子自殺)

- 瞬時に死に至らしめる弾丸発射装置
 - ただし実際に発射するか空撃ちかは半々の確率でランダムに決まる
 - その装置の試し撃ちを外から見ていると、平均2回に一回、実弾が発射される
- 実際にその装置の前に自分の頭をおく
 - もしマルチバースがなければ、平均としては2、3回後にはほぼ確実に死んでしまう
 - もし並行宇宙が実在するなら、自分が死んだ宇宙は認識できないからそこで終わり。一方、空撃ちが起こった宇宙では自分を認識できる。つまり認識できる「自分」にとっては、無限に空撃ちが起こってしまう。
 - むろん、傍観している他人にとってはその選択効果はない

レベル4 マルチバース

- 世界とは抽象的な数学的構造そのものだと考える
 - とすれば法則が数学で記述できるのは当たり前
 - (無矛盾な) 数学的構造に対応した無数の宇宙が実在する



左図は、空間内での地球の軌道の構造だが、右図は抽象的空間を描いたイメージ

無矛盾な数学的構造は必ず実在する？

- 我々のユニバースでの実験とは一致しないが、論理的に無矛盾な物理法則(数学的体系)があったとする
 - 実験で否定される以上、その体系はこの世界と矛盾しており、それ以上考えても無意味(標準的思考)
 - 単にたまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する宇宙がどこかに実在しているだけ？
- 本当は異なる物理法則を持つ世界が無数に存在しているのではないか(世界=数学的構造=物理的実体=宇宙)
 - 物理法則とまで言わずとも、異なる物理定数の組みを持つ宇宙が無数に存在するとするのがレベル2マルチバース
 - レベル4はそれをさらに過激に推し進めたもの
- 観測者が存在しない宇宙の実在を認めるなら、それは結局論理的な構造の実在と同義ではないか？

Lonely World/Universe

- 無限に広がった時空に「ユニバース」があると
する。しかしそこには生物(少なくとも宇宙の
存在を認識できるだけの意識をもつ知的生命
体という意味での)は存在しない
- そのユニバースは、その物理法則にした
がって膨張し成長するだろうが、それを観測し
たり熟考したりする生物はいない
- そのようなユニバースは「実在」と呼んでいい
のか？もしそうなら、純粹に数学的な構造を
も実在と認めざるを得ないのでは？