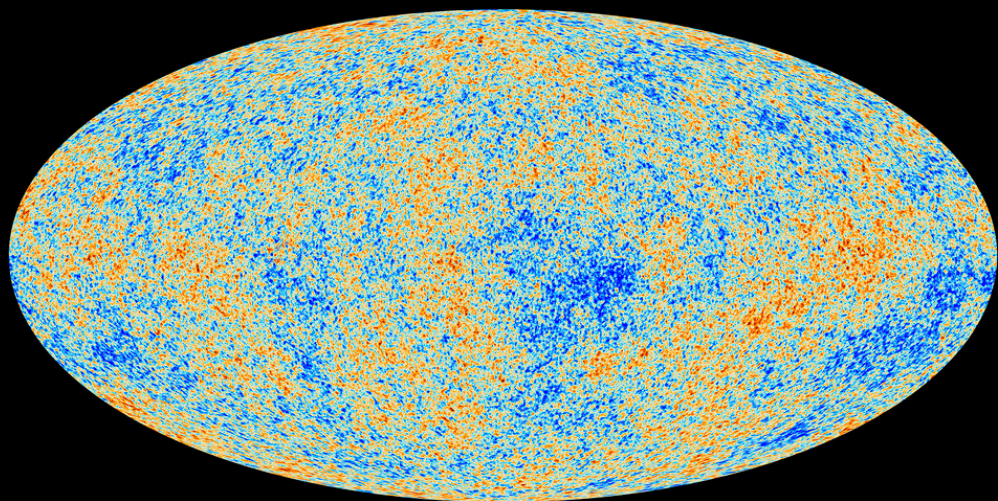


世界は法則に支配されているか



東京大学大学院理学系研究科
物理学専攻 須藤 靖

高知工科大学 セミナー

2014年11月12日 16:30-18:00

村上春樹

アフターダーク

美しい無人島に漂流した3人の兄弟

■ その夜、同じ夢を見る。その夢の中で神様が「明日の朝起きると、海岸にとてつもなく重く大きな岩が3つある。それを山の好きなところまで転がして行け、どこまで行くかは自由だ。高い場所に行けば行くほど遠くを見ることができる。止めたところがお前の住む場所だ」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：山の頂上：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。たとえ兄弟であってね。もうひとつは何かを本当に知りたかったら、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。」

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ったんだよ。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」

Mari offers her opinion:

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

- "True," Takahashi 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."

*(Haruki Murakami "After Dark"
English translation by Jay Rubin)*

*Nobody wants to go all
the way to Hawaii to stay
alive licking frost and
eating moss.*

Nobody

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



でも世界は見渡せる



青空と夜空ノムコウの世界

2010年6月25日@ロサンゼルス

空が青いわけ

- 自然な疑問
 - 青空は世界の果てなのか
 - この先に別の世界が広がっているのか
- 物理学の教え
 - 大気は粒子(気体分子)から成る
 - 分子のレイリー散乱 $\propto (\text{波長})^{-4}$



2011年12月10日22時13分@埼玉県上尾市

夜空が暗いわけ



- 夜空はなぜ暗い？ (オルバーズのパラドックス)
 - 宇宙は有限の過去から始まった
 - 光の速度は無限ではない
- さらなる疑問
 - 夜空ノムコウのどこまで宇宙は広がっているのか

アイザック アシモフ

夜来たる

Nightfall

アイザック・アシモフ 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？

Issac Asimov: Nightfall

A Fawcett Crest Book

M1486
95c

Thrilling, Terrifying
Tales from the
Master of Science Fiction

isaac asimov

NIGHTFALL

AND OTHER STORIES

- "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."

青空ノムコウに世界はあるのか



「我々は何も知らなかった」
でもこれですべて？

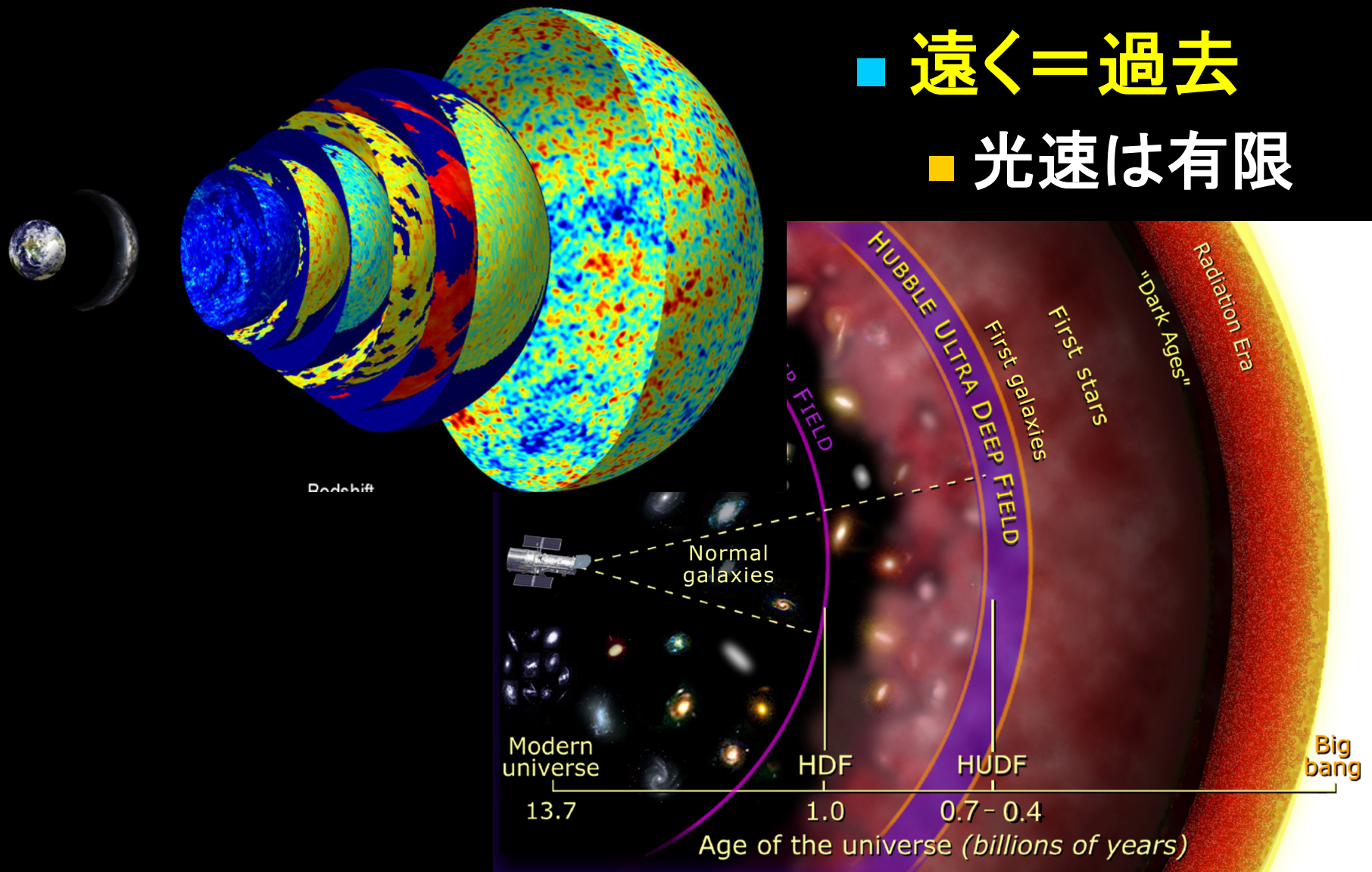
(すばる観測所、田中壱氏撮影)

夜空ノムコウの
宇宙マイクロ波背景輻射

宇宙の初期条件@ $t=38$ 万年

宇宙観測は天球上で行われる

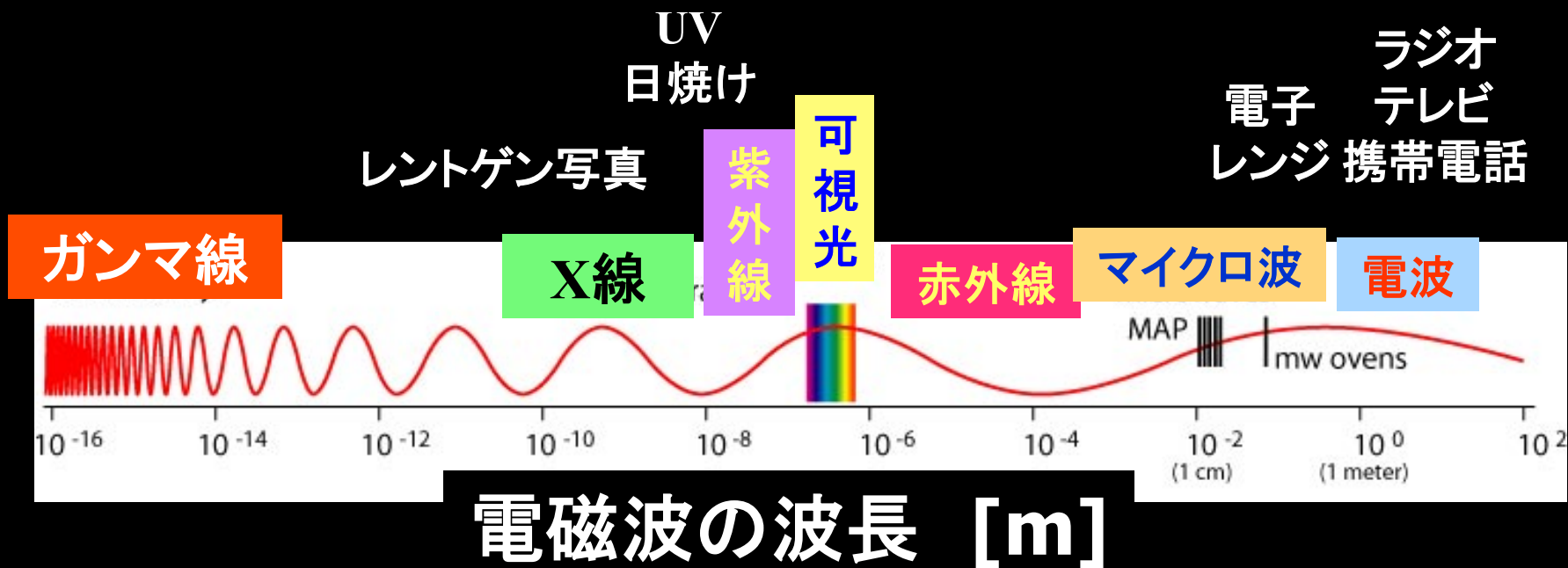
- 遠く=過去
- 光速は有限



マイクロ波

「光」は、電磁波と呼ばれる波の一種である。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代天文学はこれらすべての波長を駆使した観測を行っている。

マイクロ波は、波長1mm(300GHz)から1m(300MHz)で、電波望遠鏡は主としてこの波長域を利用する。



宇宙の中性化と晴れ上がり

■ 電子と陽子の再結合(宇宙の中性化)

- 完全に電離していた宇宙は、温度が約3000K以下(宇宙誕生後約38万年)になると電子と陽子が結合して水素原子となり、中性化する

■ 宇宙の晴れ上がり

- その結果、電磁波(光)の直進を妨げていた自由電子が無くなり、宇宙は電磁波に対して透明となる
- 電磁波を用いる限り、それより過去の宇宙を観測する事は不可能

CMB: Cosmic Microwave Background

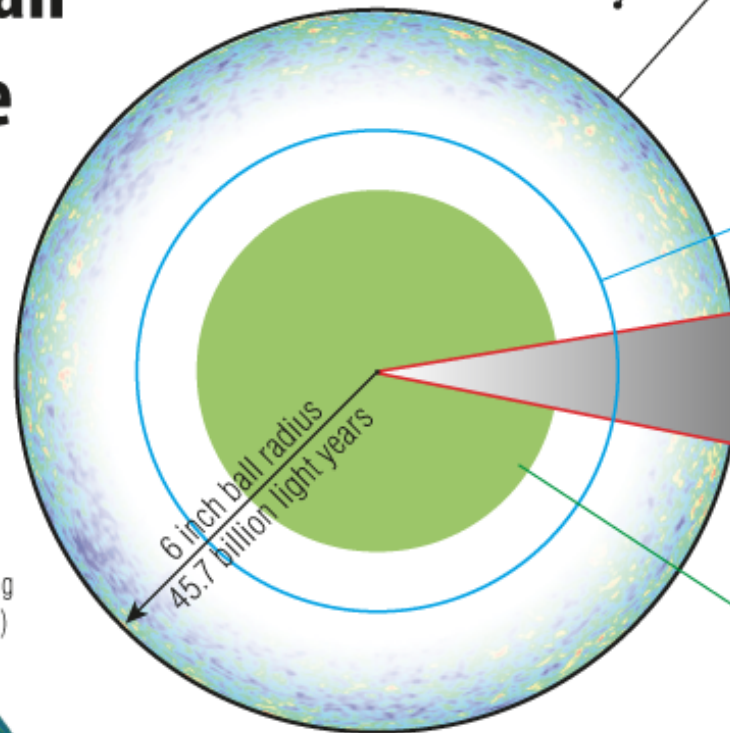
- **現在の宇宙を満たす等方的な電磁波の熱輻射分布**
 - 熱い火の玉宇宙の名残
 - ペンジアスとウィルソンが1964年に発見
 - ビッグバンモデルが認められるきっかけとなった
- **現在の宇宙の温度 = 2.728 ± 0.002 K**
- **CMB温度揺らぎ全天地図は、宇宙論パラメータを知るためのもっとも重要な情報源**

宇宙マイクロ波背景輻射

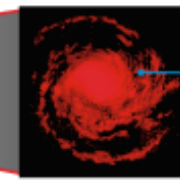
The 12 Inch Beach Ball Universe

Light from outside the sphere has not yet reached us, and light from inside the sphere has already passed us.

Cosmic Microwave Background (CMB)
= 45.7 billion light years in radius
= 13.7 billion years in time
(These numbers are not equal because the universe is expanding at the same time light is traveling.)



Light from the first stars
4 inch radius

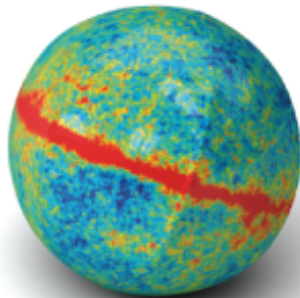


Earth is here

The Milky Way Galaxy
0.000008 inch diameter

Galaxies seen by the Hubble Telescope
approx. 3 inch radius

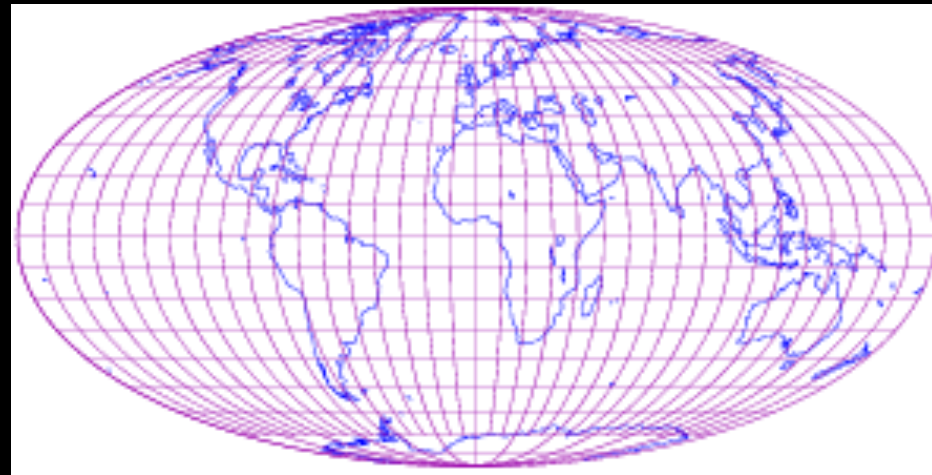
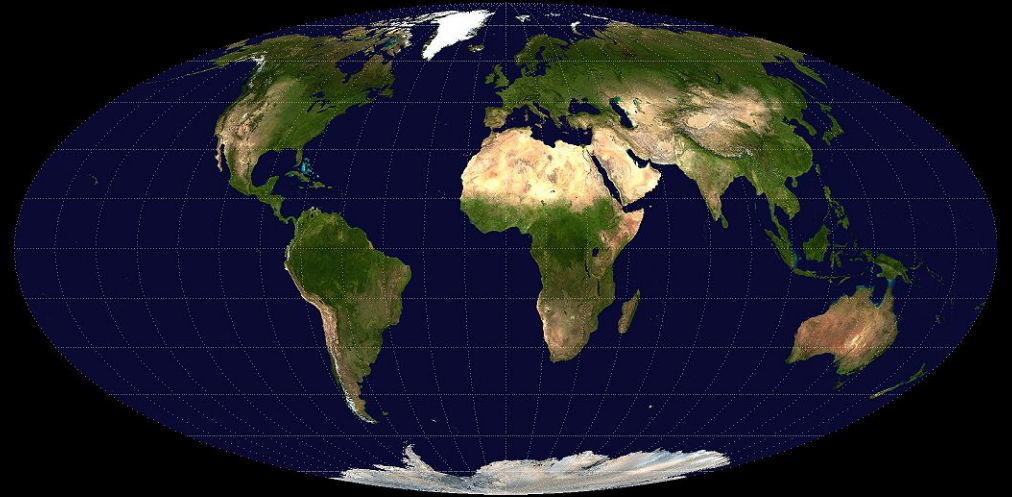
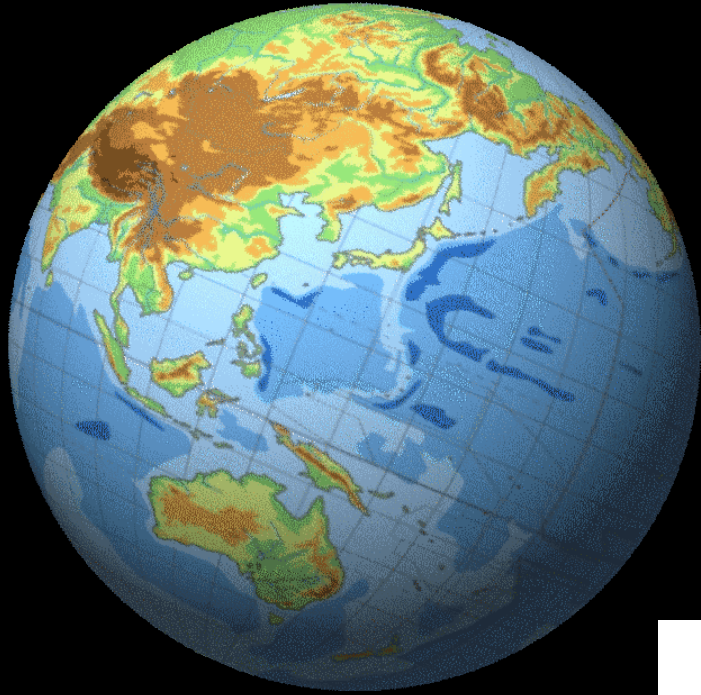
(The red band around the ball is our own Milky Way Galaxy blocking the view of the CMB light.)



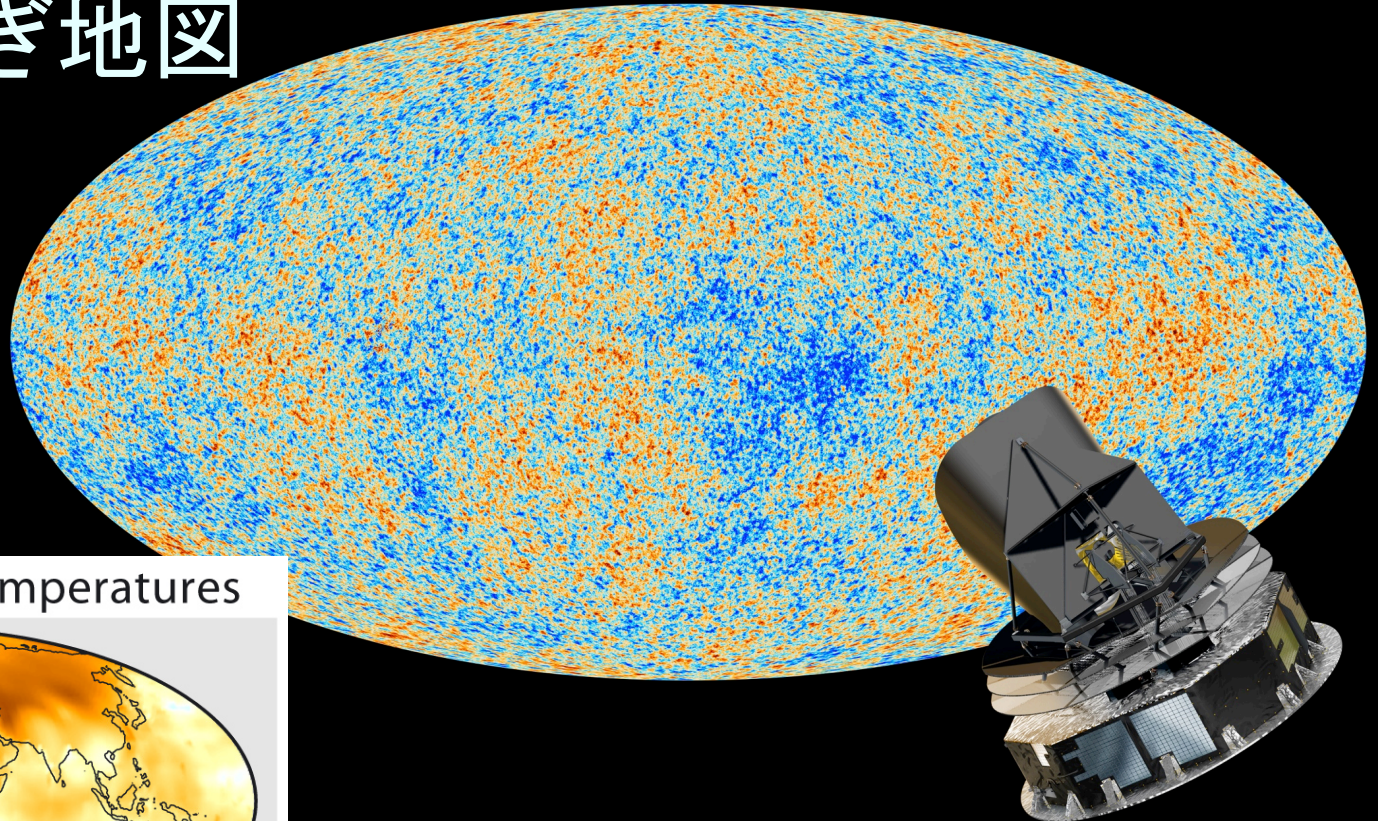
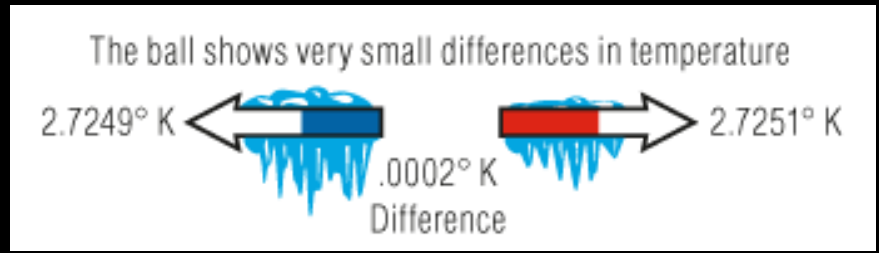
The ball shows very small differences in temperature
2.7249° K ← .0002° K Difference → 2.7251° K

Learn more: <http://map.gsfc.nasa.gov/resources/edactivity1.html>

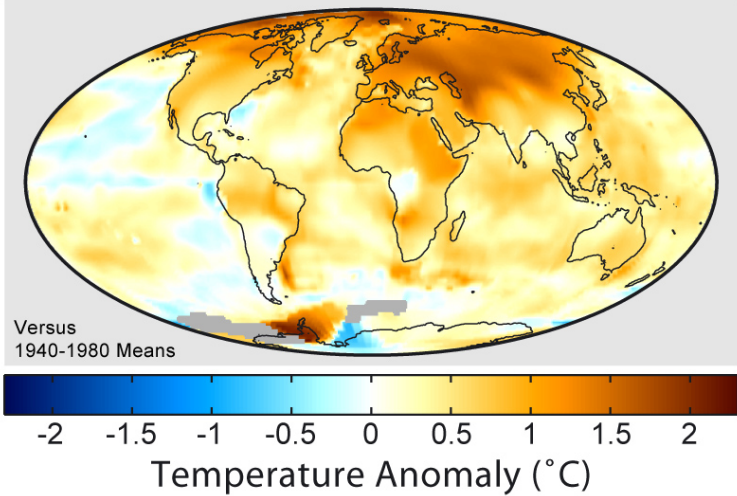
地球儀と世界地図



宇宙マイクロ波 背景放射 温度ゆらぎ地図



1999-2008 Mean Temperatures

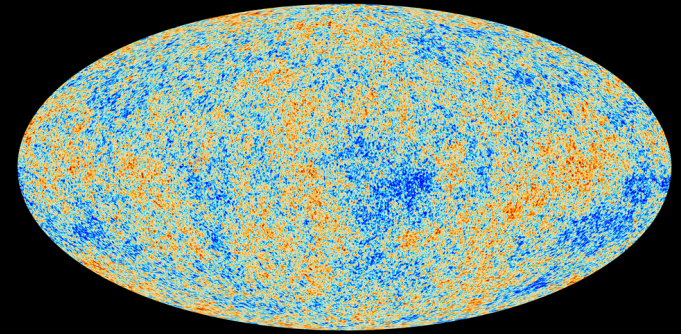


[http://www.esa.int/spaceinimages/
Images/2013/03/
Planck_and_the_cosmic_microwave_back
ground](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_and_the_cosmic_microwave_background)

138億年前の古文書の解読方法

■ 暗号化された状態の古文書

- 宇宙マイクロ波全天温度地図



■ 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

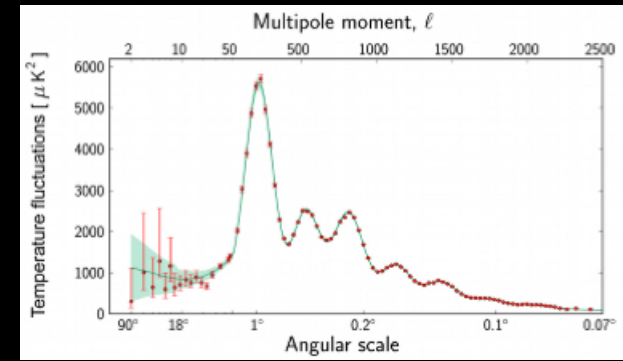
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ 古文書を理解するための文法

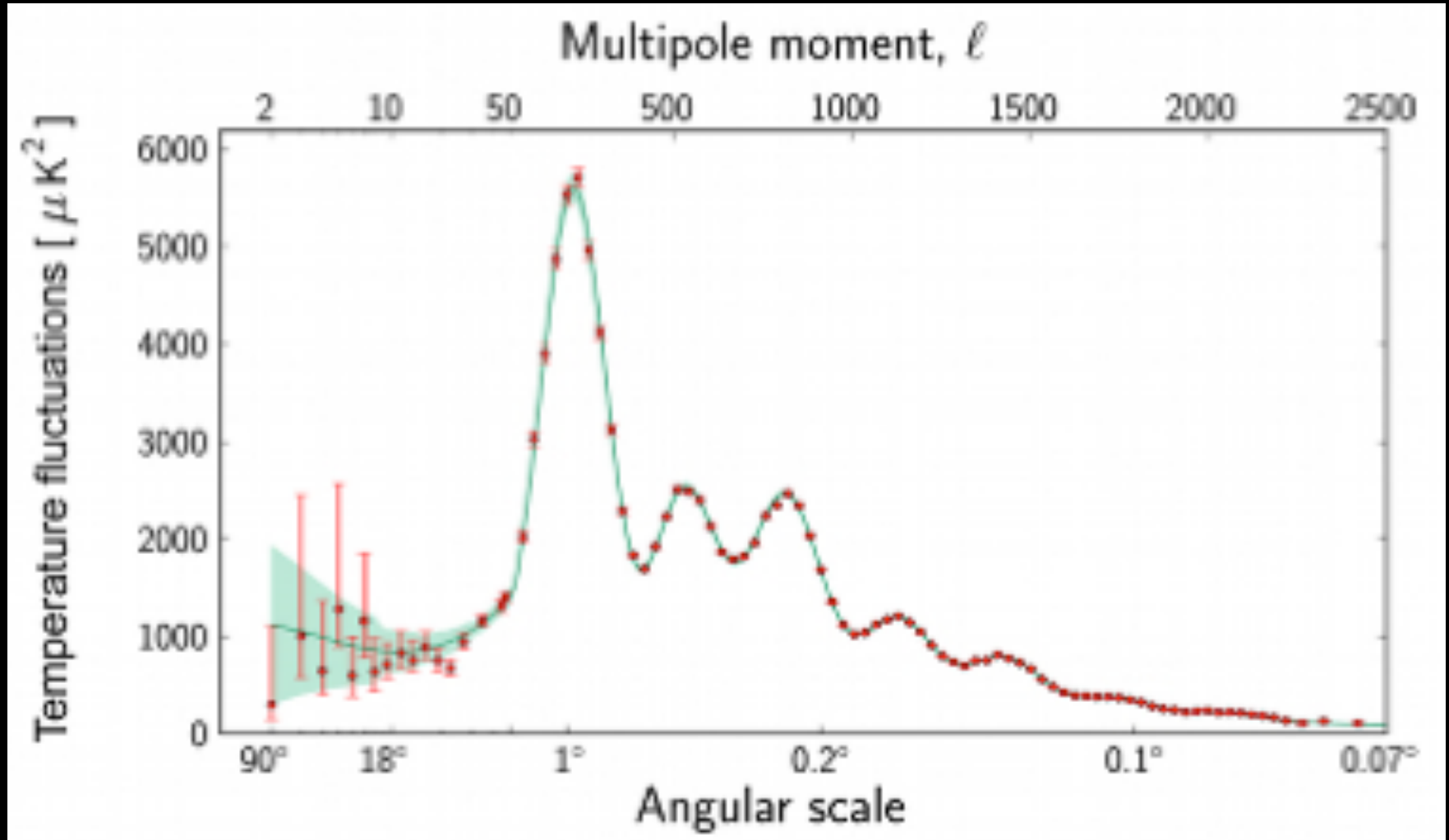
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

■ 夜空のムコウに隠されている情報

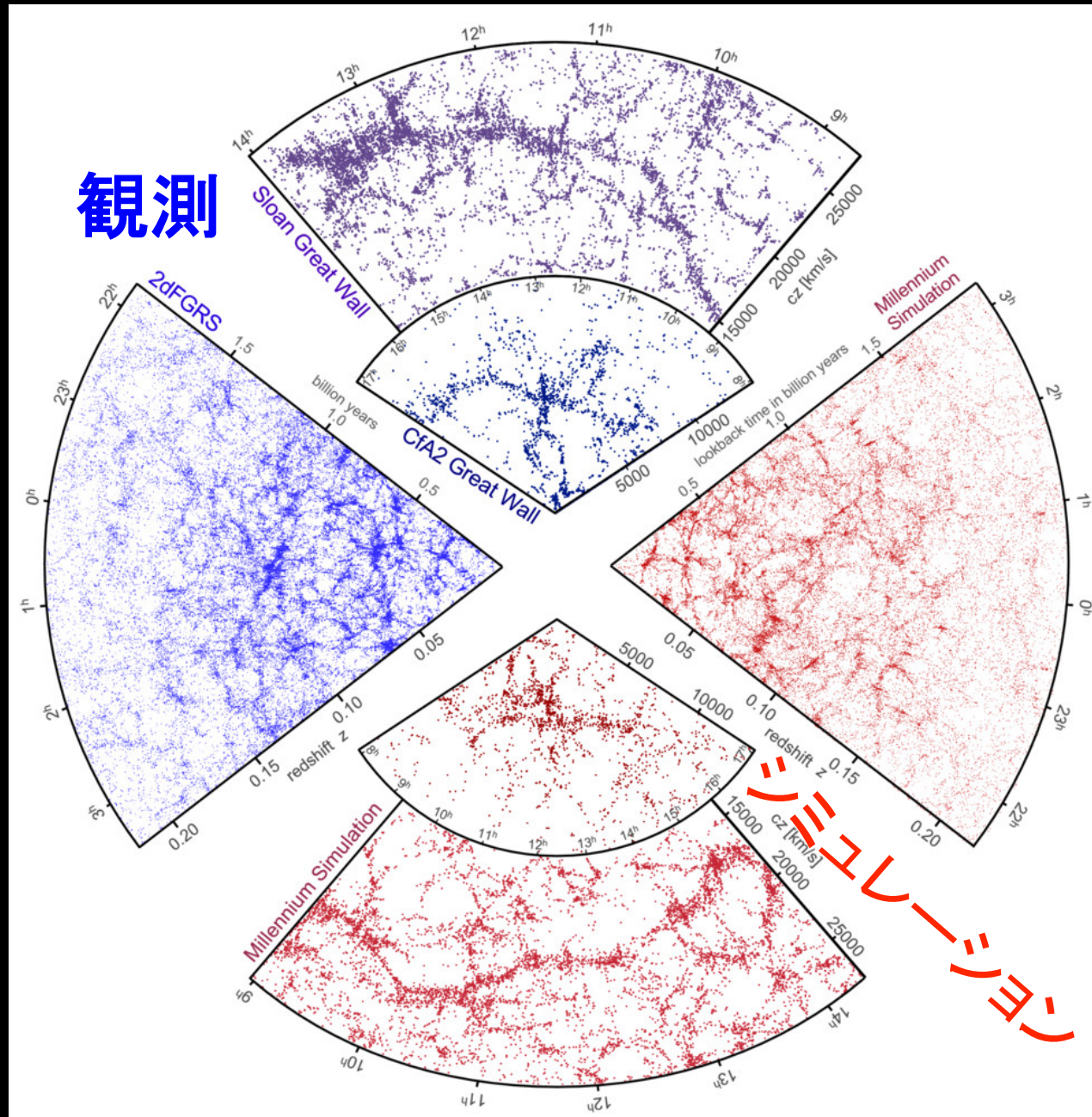
- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



理論予言
(数値計算)
と観測と
の比較:
銀河の3
次元分布





標準宇宙モデル

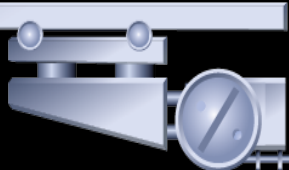
標準宇宙モデルの特徴

- ほぼ平坦な宇宙 (空間曲率が0のユークリッド空間) : $K \approx 0$
- 元素 (バリオンと呼ばれることが多い) : ρ_b
- ダークマター : ρ_d
- 宇宙定数 (より一般的にはダークエネルギー) : Λ

フリードマン方程式

$$\begin{aligned} \text{時刻 } t \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 &= \frac{8\pi G}{3} = (\rho_b + \rho_d) - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} & \Rightarrow \quad \Omega_b &= \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{b0} & \quad \Omega_d &= \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{d0} \\ \text{現在 } t=t_0 \quad (a=a_0=1) \quad H_0^2 &= \frac{8\pi G}{3} = (\rho_{b0} + \rho_{d0}) - \frac{K}{a_0^2} + \frac{\Lambda}{3} & \Omega_K &= \frac{K}{a_0^2 H_0^2} & \quad \Omega_\Lambda &= \frac{\Lambda}{3H_0^2} \end{aligned}$$

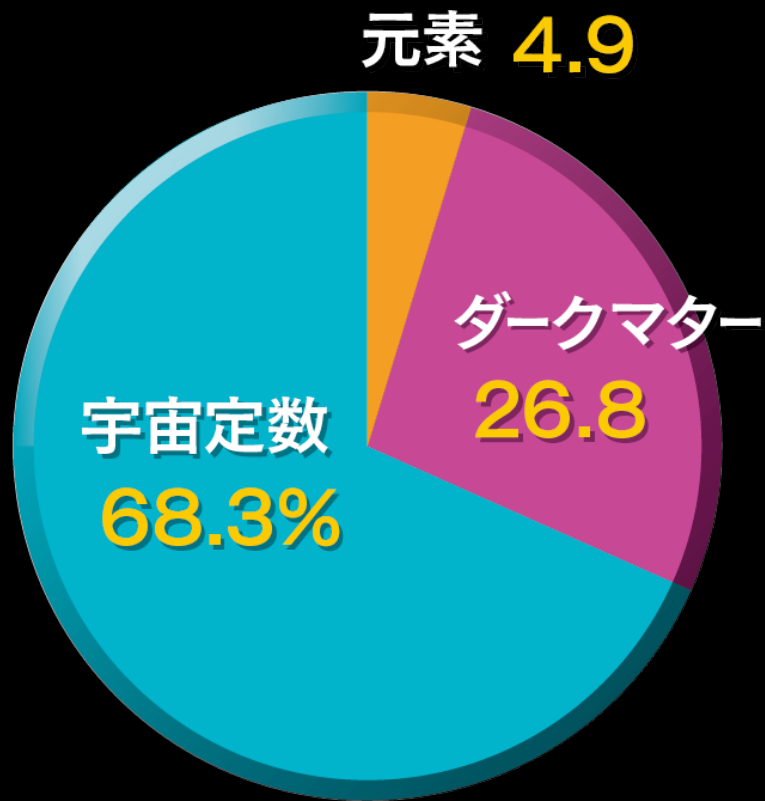
$$1 + \Omega_K = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda$$



宇宙論パラメータの推定値

| 記号 | 名前 | 推定値 |
|------------------|----------------|---|
| H_0 | ハッブル定数 | $(67.4 \pm 1.4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ |
| Ω_b | バリオン密度パラメータ | $(0.048884 \pm 0.00073) (h/0.674)^{-2}$ |
| Ω_d | ダークマター密度パラメータ | $(0.2633 \pm 0.0068) (h/0.674)^{-2}$ |
| Ω_Λ | (無次元化された) 宇宙定数 | $0.685^{+0.018}_{-0.016}$ |
| Ω_K | 宇宙の曲率パラメータ | $(-4.2^{+4.3}_{-4.8}) \times 10^{-2}$ |
| w | 状態方程式パラメータ | $-1.13^{+0.23}_{-0.25}$ |
| t_0 | 宇宙年齢 | $(138.13 \pm 0.58) \text{ 億年}$ |

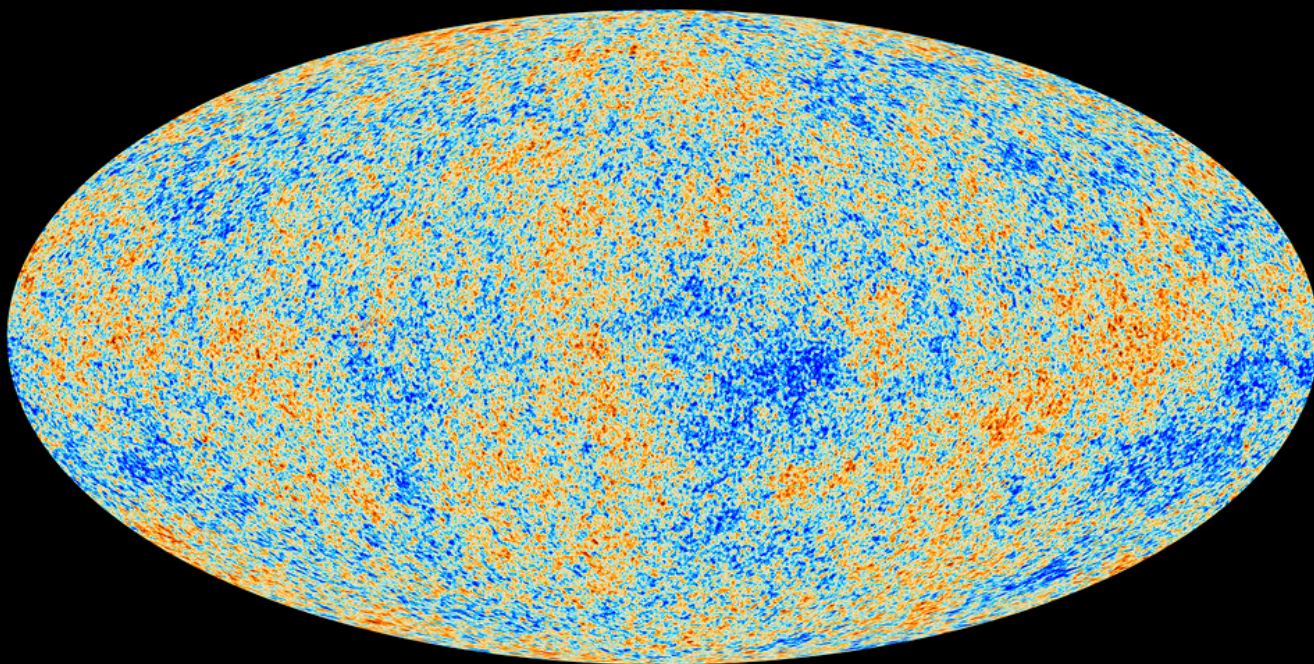
現在の宇宙の組成



- 宇宙の主成分は宇宙定数で約7割を占める
- その次は約3割を占めるダークマター
- 我々の身の回りの世界を構成している元素はわずか5%程度でしかない
- 宇宙の約95%はその正体が未だ解明されていない

物理学的世界観と宇宙の進化

驚くべきことに、現在の宇宙に関するすべての情報は原理的にはここに刻まれている



■ 宇宙論の中心的教義

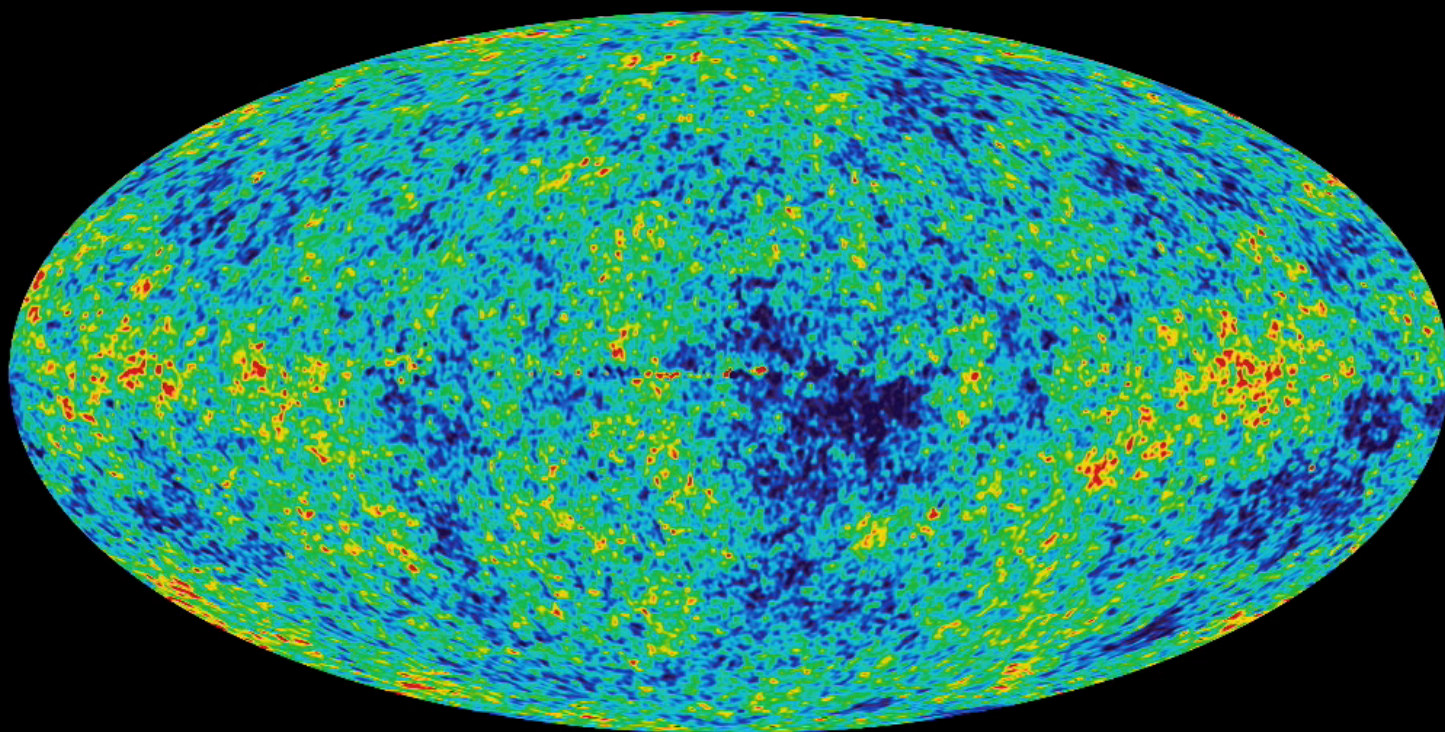
初期条件+既知の物理法則 = 現在の宇宙

物理法則と初期条件

■ 物理学的世界観

- この自然界を支配する**物理法則**がわかっているならば、**初期条件**さえ与えられれば世界の振る舞いはすべて説明できるはず
- 少なくとも無生物界の記述には大きな成功をおさめている
 - ただしミクロな世界では、量子論的不確定性が存在するのでこの限りではない

38万年から138億年へ



NASA/WMAP サイエンスチーム

138億年から38万年へ

スローンデジタルスカイサーベイ

単に宇宙の構造だけではない



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

View from Saturn (Cassini)
900 million miles away

宇宙と世界

■ 宇宙 > 世界？

それとも **世界 > 宇宙？**

■ **Universe = 宇宙 = Space + Time**

■ **World = 世界 = Time + Space**

■ 天文学者にとっては「宇宙」は観測できる具体的な対象であり、むしろ「世界」の方がより広い抽象的概念に思える？

必然と偶然

■ 科学が解明すべき究極の謎

- なぜ生命は誕生したのか
- なぜ意識が芽生えたのか
- なぜ宇宙は存在するのか

■ 必然と偶然の接点

- この宇宙のどこかで生命が誕生することは必然
- 進化した生物がやがては意識をもつのもまた必然
- しかし、宇宙の存在・誕生は偶然？
 - そもそも、宇宙誕生の前に物理法則はあったのか

宇宙の進化という必然

- 誕生後38万年での初期条件(CMB温度地図)
 - + 物理法則 = 現在の宇宙に関する観測事実
 - ビッグバン元素合成、宇宙の中性化、天体の誕生、元素循環と天体の形成・進化、宇宙の加速膨張
- 生命の誕生、知的生命への進化ですら、(未だ具体的な説明には成功していないものの)物理法則にしたがった必然的帰結

物理法則と宇宙の存在もまた必然か

- 初期条件と物理法則によって、その後の振る舞いは説明できるはず(物理学的世界観)だが、、、
- 初期条件は何によって決まったのか
 - 最終的には宇宙のはじまりの問題
- 宇宙はなぜ存在しているのか
- 物理法則は、いつから、どのように、なぜ存在しているのか
 - これらは通常の科学が扱える範囲ではないが、問題の存在は認識しておくべき

宇宙を知り世界を知る

物事には必ず理由があるのか

■ 例題

- 地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と±10%程度の狭い範囲内におさまっていないとまらない(ハビタブルゾーンと呼ばれる)。これから何かわかることはあるか？

偶然に意味を見い出す

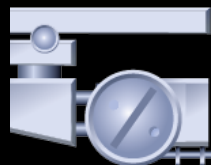
■ 回答例 1: 無意味な質問である

- 地球と太陽の距離は単に偶然決まっただけ。偶然には意味はない。

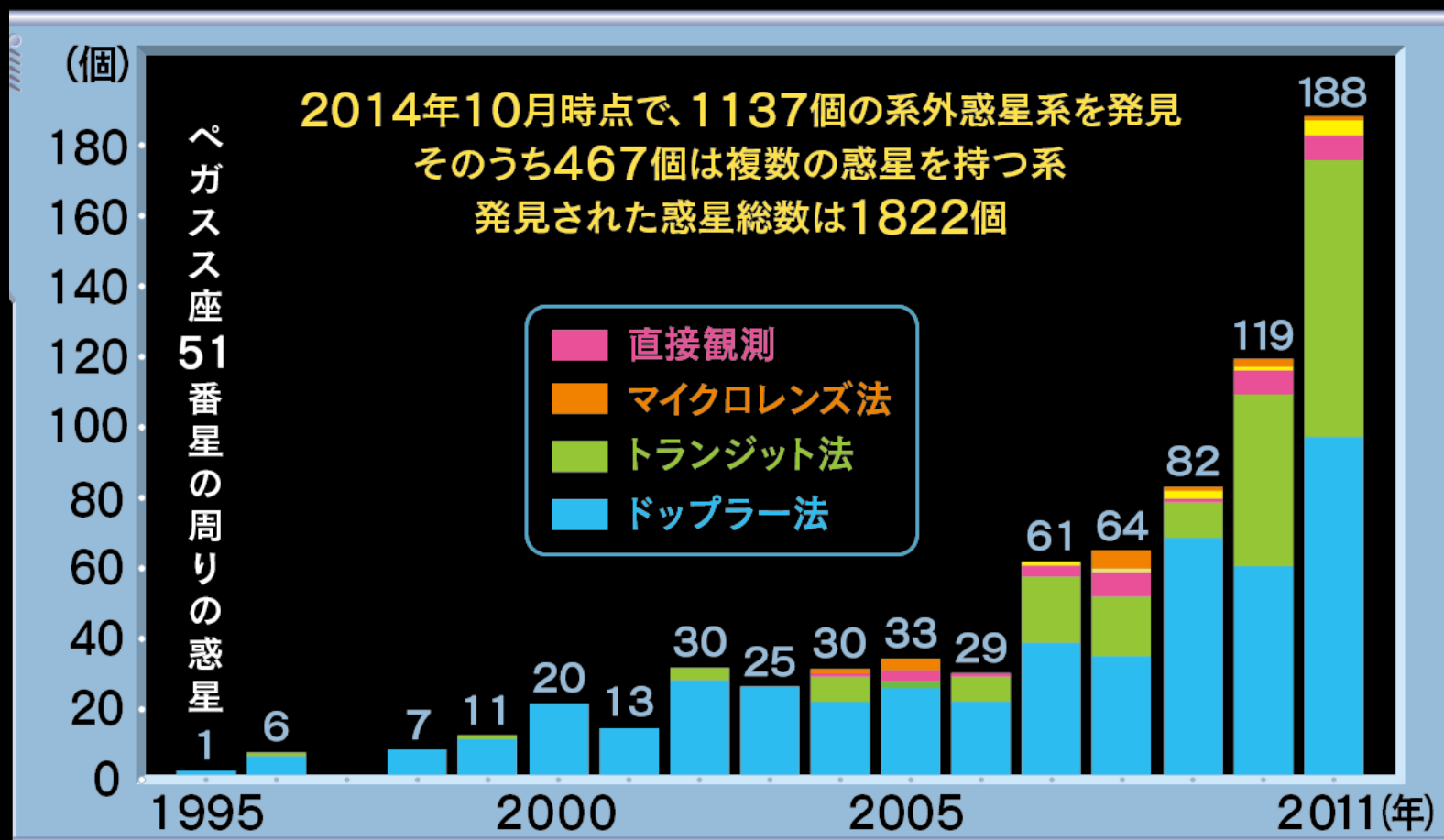
■ 回答例 2: 実は深い意味を持つ

- 偶然そのような微調整された系が実在するためには、地球が唯一ではなく、中心星と異なる距離にある無数の惑星が存在すると考える方が自然。つまり、この地球が微調整された(不自然な)性質を持っているのならば、それ以外の無数の惑星が存在していることを示唆する

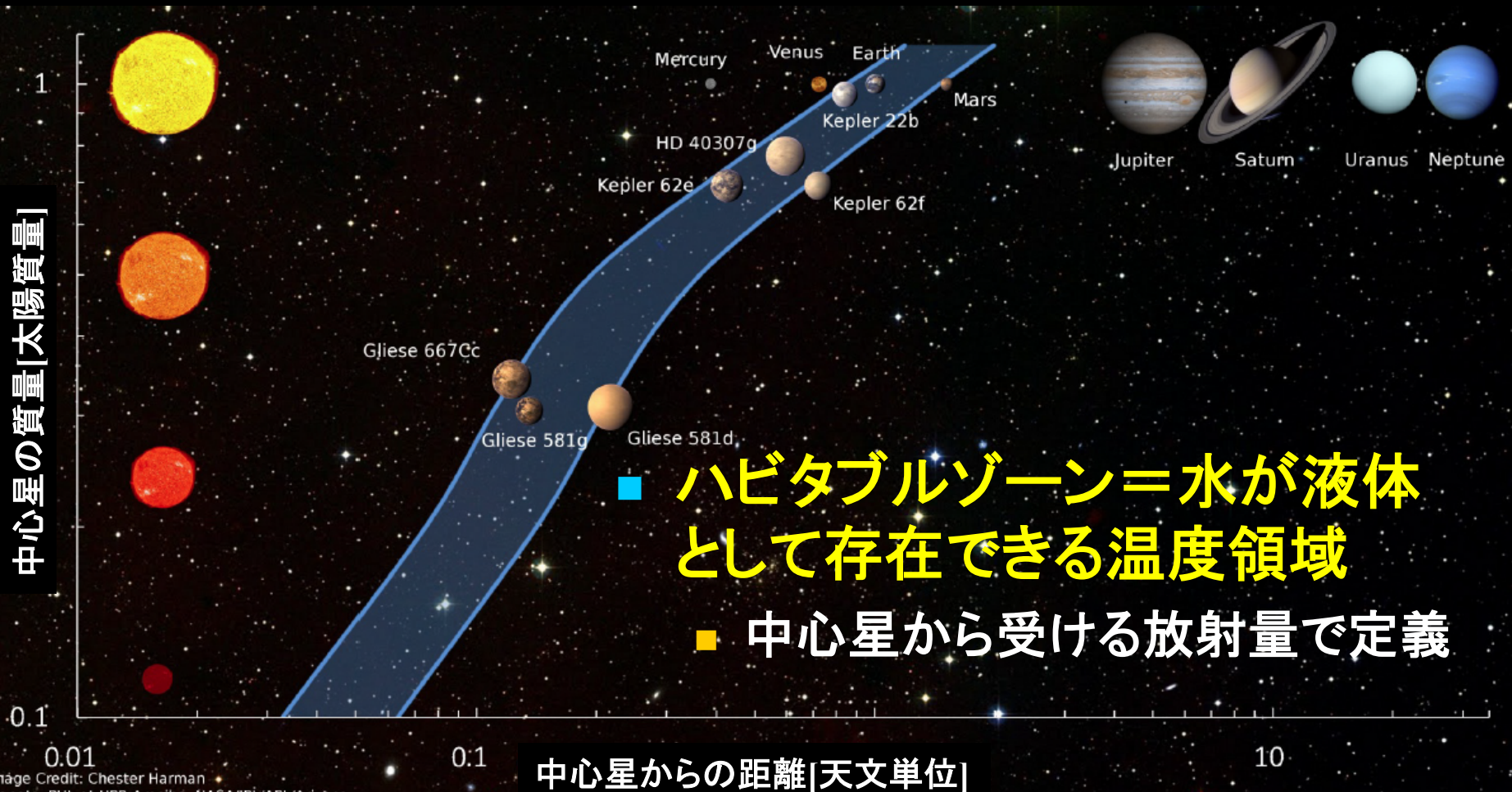
この問いの正解は不明だが、太陽系以外に無数の惑星系が存在していることは事実



系外惑星発見数の年次推移



ハビタブル惑星候補



Kasting, Kopparapu, Ramirez & Harman (2013)

物事には必ず理由があるのか

■ 応用問題

- この宇宙には我々人間という知的生命が存在するが、そのためには宇宙の初期条件と物理法則に微調整が必要だとされている。これから何かわかることはあるか？

ユニバースからマルチバースへ

■ 回答例 1: 無意味な質問である

- 知的生命の起源を未だ解明できて、あるいはそれは偶然に支配されているだけのいずれかである。それ以上の意味はない

■ 回答例 2: 実は深い意味を持つ

- 知的生命を誕生させる確率が極めて小さいならば、それを相殺するだけの数の宇宙が存在しなければ、知的生命をもつ宇宙は実存し得ない。つまり、宇宙は我々の宇宙以外にも多数存在しているはず。

人間原理とマルチバース

自然界の絶妙なバランス

■ 地球大気の透過率

- 太陽エネルギーのピーク付近で地球大気は透明
- DNAを破壊する紫外線には不透明(酸素⇒オゾン)

■ 水の密度

- 液体のほうが密度が高く、氷が表面を覆う

■ 生物を構成する有機物(炭素)の起源

- 自然界には質量数5と8の安定元素がないので、炭素の合成は困難(トリプルアルファ反応の存在)

■ 4つの相互作用の強さを決める定数

- これらが少しずれると、物質階層の安定性が崩れて、安定な生体高分子ができない

人間原理と物理法則

- 我々の宇宙が唯一無二である必然的理由はない
 - (少なくとも) 10^{500} 個以上の因果的に切り離された宇宙が存在する可能性が超弦理論では議論されている
- これらの宇宙では物理法則が異なっているかもしれない
 - 物理定数(重力定数、光速、素電荷、プランク定数)さらには宇宙定数の値が違っているかもしれない
- それらのなかで、たまたま人間を生むような偶然が可能となる宇宙が我々の宇宙
 - 大多数の「普通」の宇宙では人間は誕生しないから、「これが普通」と指摘してくれるような「人間」は存在し得ない
 - 「例外的に珍しい」宇宙でのみ人間が誕生でき、そこにこそ「なぜこの宇宙はこのように不思議なのか」と思い悩む人間が存在する。とすれば割合からは確かに「珍しい」宇宙になる
 - 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本来ない

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)が成り立つ場合の条件付確率として理解する？
- $P(\text{不思議なこと}) \ll 1$ 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なこと)

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実現し得る

- 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と結論すべきではないか？
 - 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事実に説明がつく

世界が従っている
摂理・法則とは何か

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

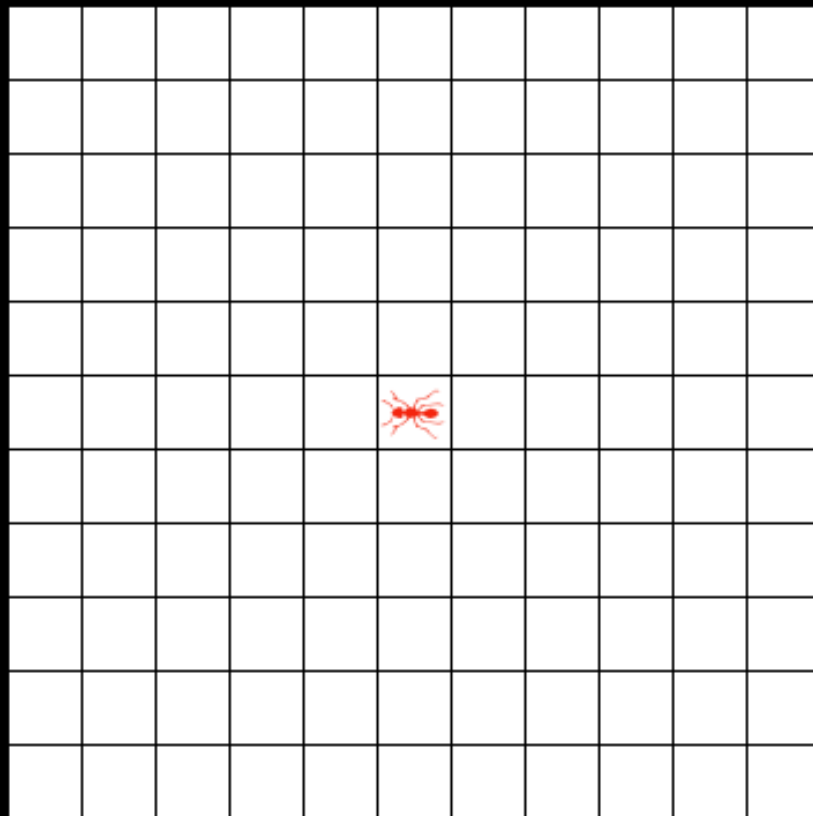


Step: 199

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

ウィキペディアより

- 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)

**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

世界はどこまで理解できるか

- 世界はなぜ摂理や法則にしたがうのか
 - なぜ法則には再現性があるのか？
- 世界をたかが我々のような人間が部分的にでも理解できていることはさらに不思議
 - ネアンデルタール人がそのようなことを成し遂げられるとは思えない
 - 世界を理解するための最低限の知性は何か
 - 我々人間はどこまで世界を理解可能な知性のレベルなのか

宇宙を見て世界を知る

■ 一を聞いて十を知る

- 宇宙はとてつもなく広い。しかし、「観測できる宇宙」はそのほんの一部分にしか過ぎない
- その一部分から全体を再現する作業が宇宙物理学

■ 知れば知るほど、「我々は何も知らなかった」ことを一層思い知る

- この果てしなき繰り返しを経て科学は徐々に進歩して行く

■ 我々が知り得る世界に限界はあるのか

高知県人やなせたかしの教え： アンパンマン オープニングテーマ



- 作詞：やなせたかし
なんのために生まれて
なにをして生きるのか
こたえられないなんて
そんなのは いやだ！



宇宙観から世界観へ

- 天文学・宇宙物理学の進歩
⇔ **新たな世界観の構築**
 - 宇宙・世界の始まりと終わり
 - 宇宙・世界は何からできているか
 - 宇宙と生命

