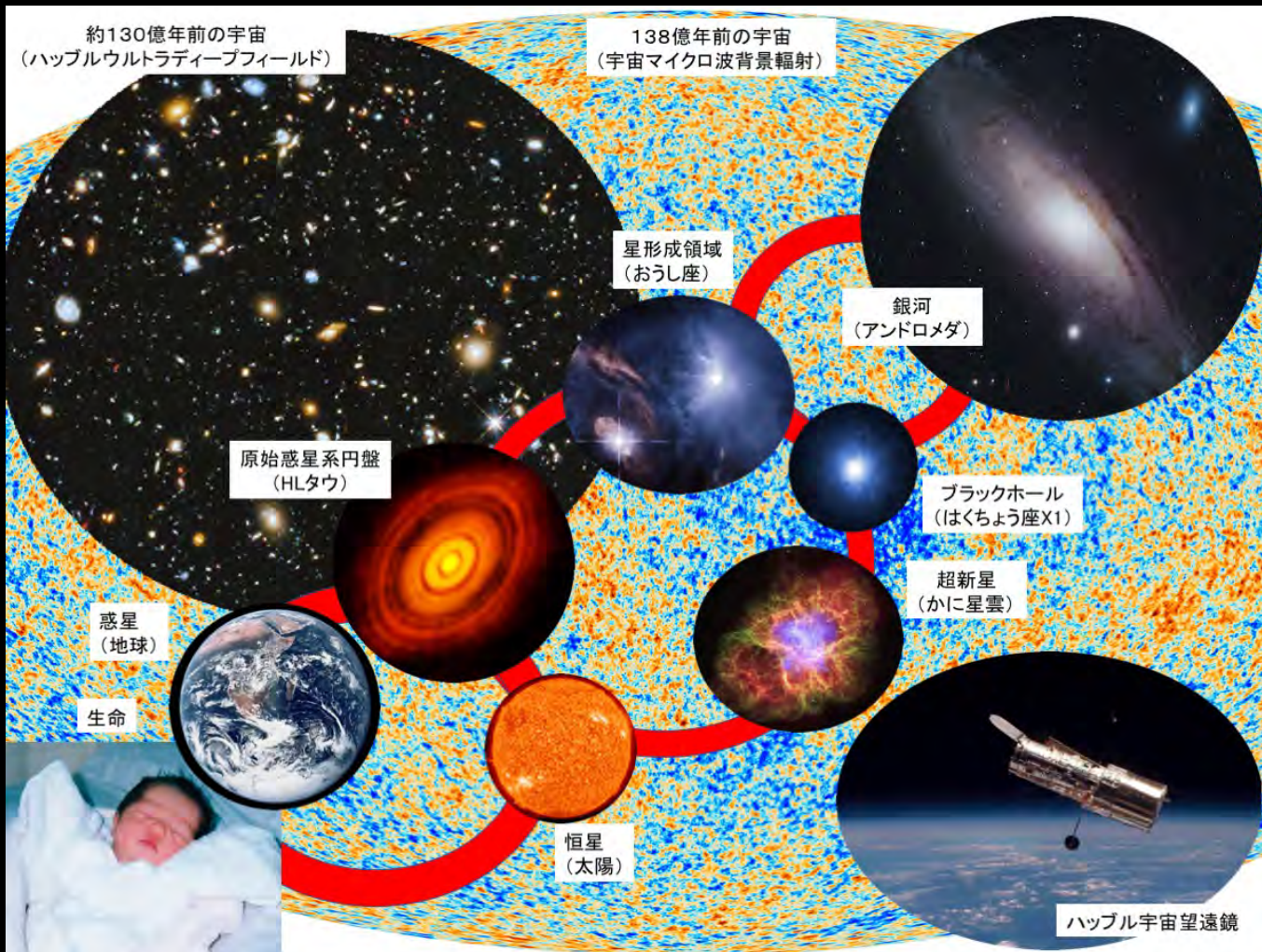


宇宙物理学 序



須藤 靖

2019年4月5日10:25-12:10

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2019j

講義に関して

- 日程（須藤6回＋馬場7回＋期末試験）
 - 4/5, 4/12(東大の記念日で休み), 4/19, 4/26
 - 5/10, 5/24 (ガイダンスで休み), 5/31,6/4
 - 以降は馬場先生の予定だが、一部変更があるかも
- 講義のwebサイトとTA
 - 林利憲: hayashi@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp
 - <http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~hayashi/ap19>
- 中間レポート
 - 事前にレポート課題を上記講義webサイト上にアップしておくので、その解答を5月10日の講義の際に回収する(何問回答しても良いが、最終成績に加算されるのは最大20点まで)。
 - 講義中に提出しなかった場合は、当日提出したものは10点減点、以降一日あたり10点減点するので、 \times 切は厳守

試験と参考文献

■ 試験と成績

- 期末試験は、馬場先生の担当分と合わせて7月26日に行う予定。須藤の担当分に関しては、何問解答しても最終成績に加算されるのは最大30点まで(残りの20点はレポート分)。馬場先生の担当分と合計して100点満点で最終成績とする。50点未満は不可とし、必要であれば追レポートを課す
- 期末試験は関数電卓持参のこと。手書き(自筆に限る)のノートは持ち込み可(ただし自分ののものであってもコピーは不可)
- レポートと期末試験の解答例、追レポート対象者と追レポート問題はすべて上述のTAのwebを通じて連絡する

■ 参考文献

- 須藤靖『ものの大きさ』(東大出版会、2006)
- 松原隆彦『現代宇宙論』(東大出版会、2010)
- 須藤靖『不自然な宇宙』(講談社ブルーバックス、2019)
- マックス・テグマーク『数学的な宇宙』(講談社、2016)

天文学・宇宙物理学研究テーマの分類

■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、超新星、銀河、活動銀河核(ブラックホール)、銀河団、宇宙、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)、実験、数値シミュレーション

宇宙物理学の諸分野とキーワード

天文学

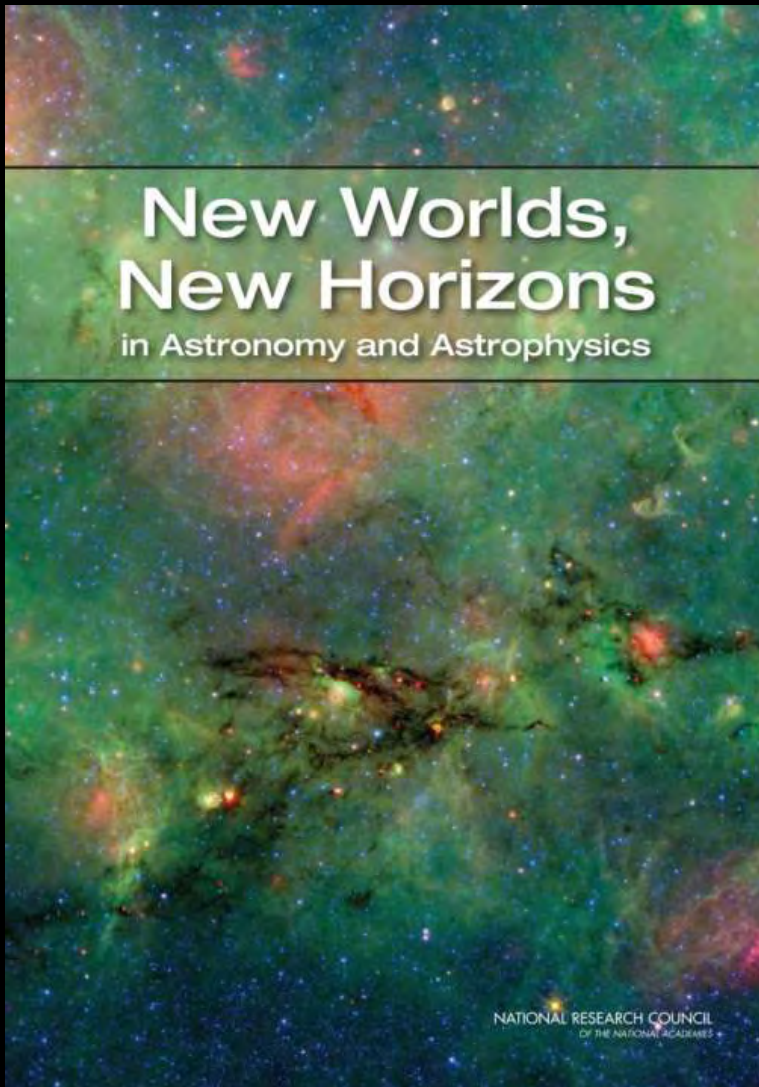
惑星形成 太陽 天体力学 重力多体系
系外惑星 星間物質 構造形成
星形成 元素合成・循環 銀河団プラズマ
降着円盤 銀河進化 宇宙線加速・伝播
第一世代天体 輻射輸送 重力波 相対論
中性子星 超新星爆発 余剰次元
ブラックホール ガンマ線バースト ダークマター
活動銀河核 インフレーション ダークエネルギー
宇宙の起源

物理学

2010年8月13日に公表された米国
decadal survey (10年スケールで
の宇宙物理学の方向性を検討し、
大型計画を評価)の抜粋4ページ

まもなくastro2020が公開予定

Astro2010: decadal survey



- ***Cosmic Dawn***
- ***New Worlds***
- ***Physics of the Universe***

August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

The Science Frontier: **discovery areas** and principal questions (1)

■ **Discovery areas**

- Identification and characterization of nearby habitable exoplanets 第二の地球
- Gravitational wave astronomy 重力波天文学
- Time-domain astronomy 突発・激変天体
近地球接近天体
- Astrometry 銀河系・宇宙の精密測量
- The epoch of reionization 宇宙の再電離

The Science Frontier:

discovery areas and principal questions (2)

■ **Questions:**

- How did the universe begin?
- What were the first objects to light up the universe and when did they do it?
- How do cosmic structures form and evolve?
- What are the connections between dark and luminous matter?
- What is the fossil record of galaxy assembly and evolution from the first stars to the present?
- How do stars and black holes form?
- How do circumstellar disks evolve and form planetary systems?
- How do baryons cycle in and out of galaxies and what do they do while they are there?
- What are the flows of matter and energy in the circumgalactic medium?

The Science Frontier: discovery areas and **principal questions (3)**

■ **Questions:**

- What controls the mass-energy-chemical cycles within galaxies?
- How do black holes work and influence their surroundings?
- How do rotation and magnetic fields affect stars?
- How do massive stars end their lives?
- What are the progenitors of Type Ia supernovae and how do they explode?
- How diverse are planetary systems and can we identify the telltale signs of life on an exoplanet?
- Why is the universe accelerating?
- What is dark matter?
- What are the properties of the neutrinos?
- What controls the masses, spins and radii of compact stellar remnants?

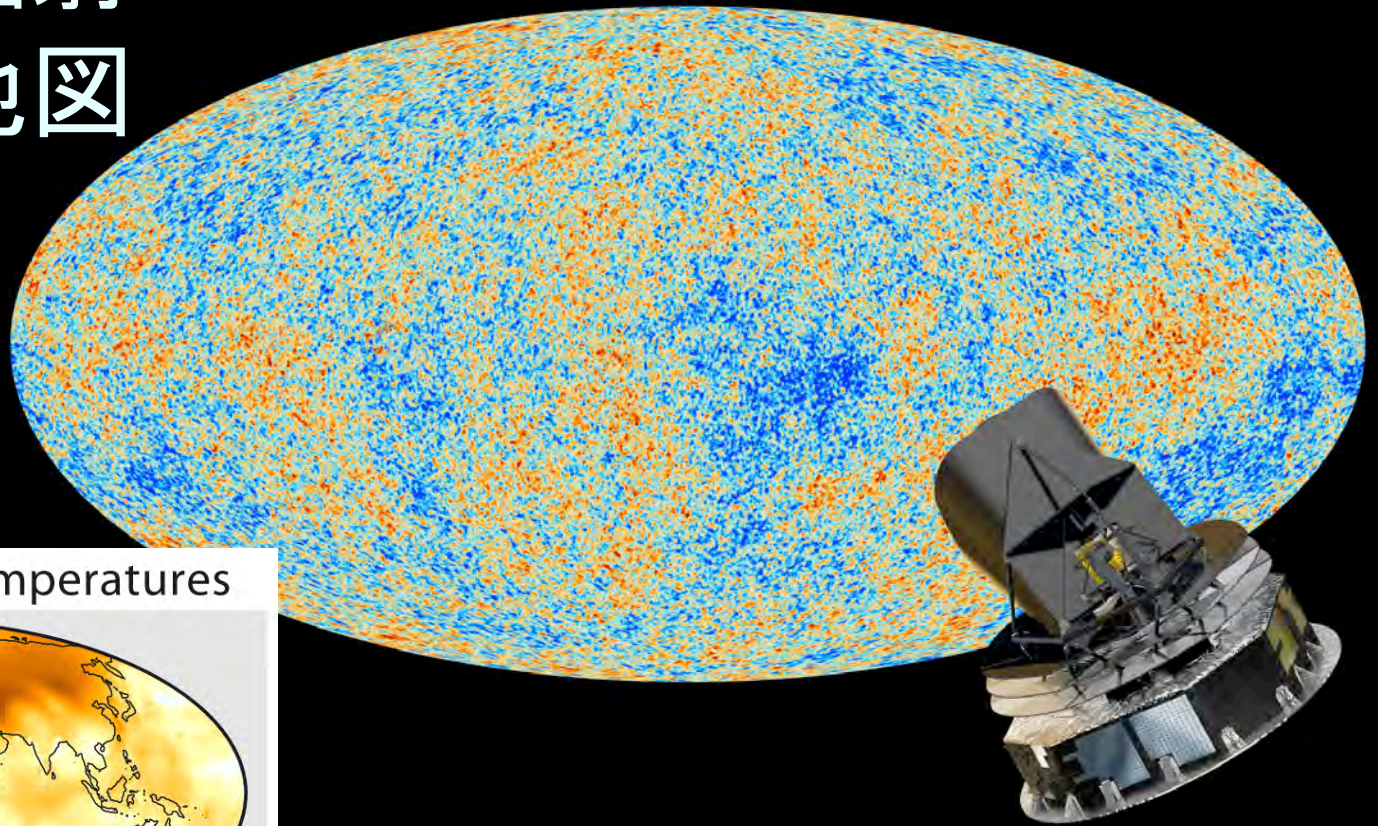
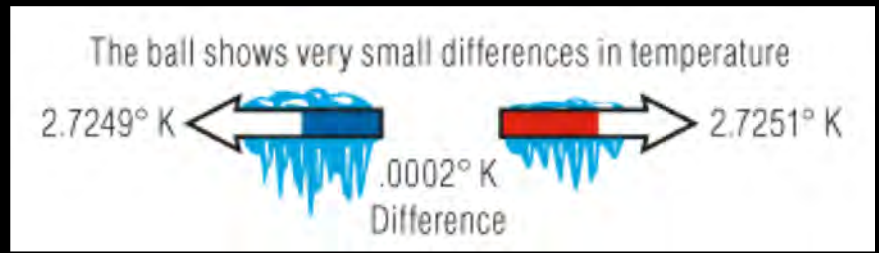
残された課題と謎

- **宇宙の起源**
 - 素粒子物理学・量子重力理論とのシナジー
- **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
- **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・起源・進化**
 - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星・ブラックホールの起源**
 - 星・惑星・コンパクト天体の形成と進化
- **地球型系外惑星の発見から宇宙生物学へ**
 - 第二の地球、生命・文明の起源、生物の普遍性

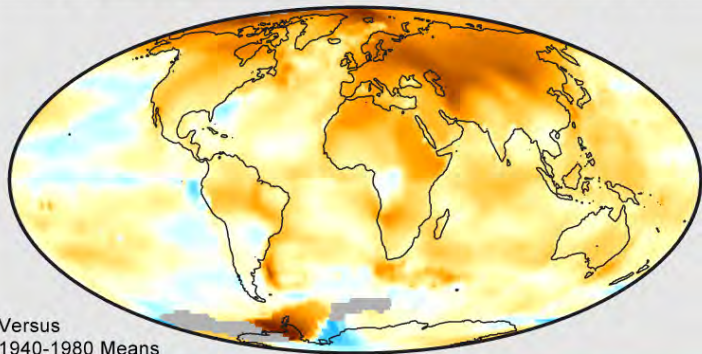
宇宙 > 世界？ or 世界 > 宇宙？

- 個人的には「世界 > 宇宙」派なので、その意味をこめて**世界観**という単語を多用する(ただし一般的な使用法ではない)
 - Universe = 宇宙 = Space + Time
 - World = 世界 = Time + Space
 - 天文学者(少なくとも私)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

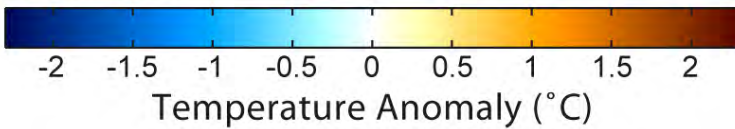
宇宙マイクロ波 背景放射 温度地図



1999-2008 Mean Temperatures



Versus
1940-1980 Means

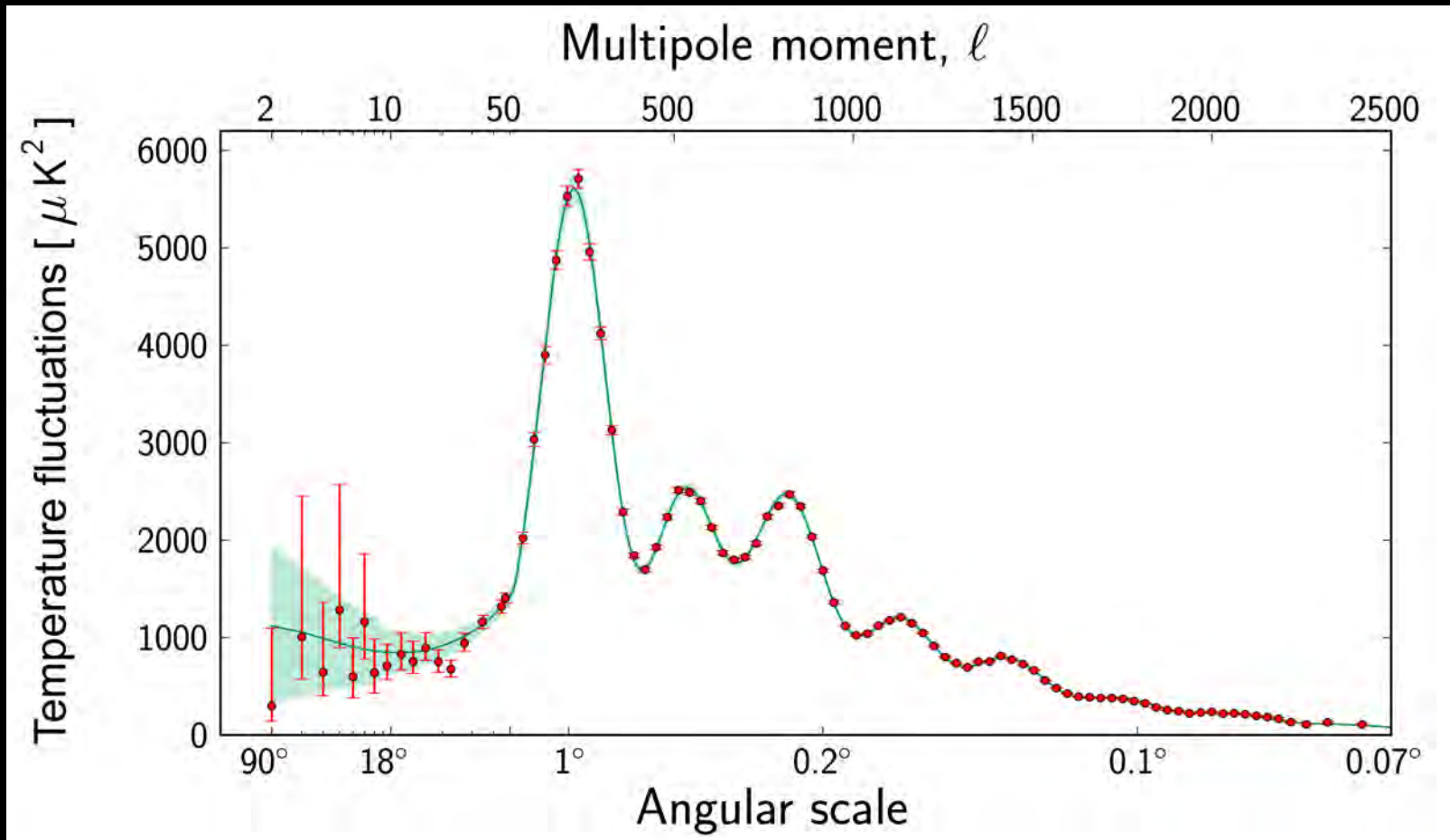


プランク衛星の観測データ(2013)

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_and_the_cosmic_microwave_background

参考:地球の温暖化を表す地図(ウィキペディア)

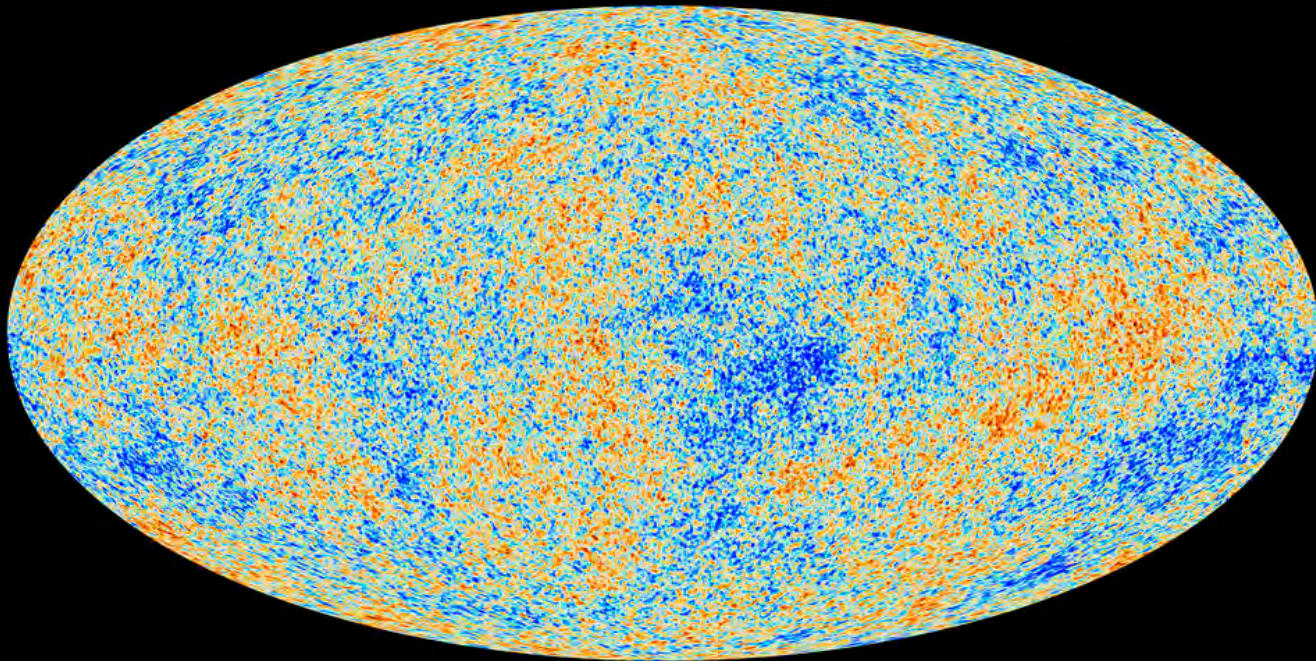
標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



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

現在の宇宙(世界)に関する全情報が 原理的にはここに刻み尽くされている

誕生後38万年の宇宙の「初期条件」=宇宙マイクロ波背景放射

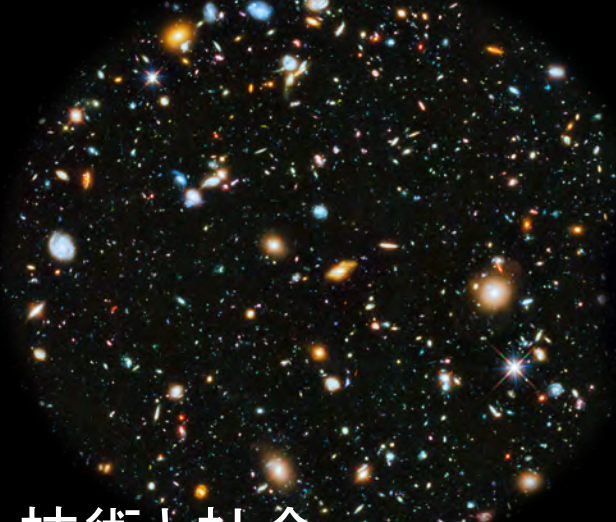


■ 宇宙論の中心的教義

初期条件+(既知の)物理法則 = 現在の宇宙

宇宙 = 天体 + 生命 + 技術 + 社会

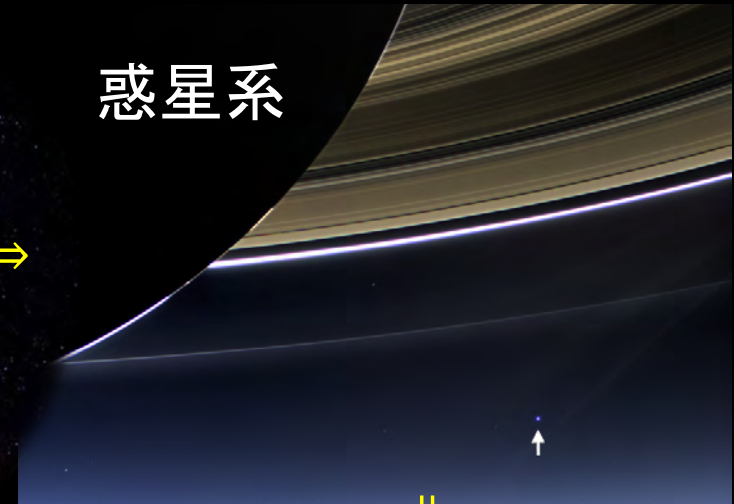
宇宙の構造



銀河



惑星系



地球と月



生命と知性

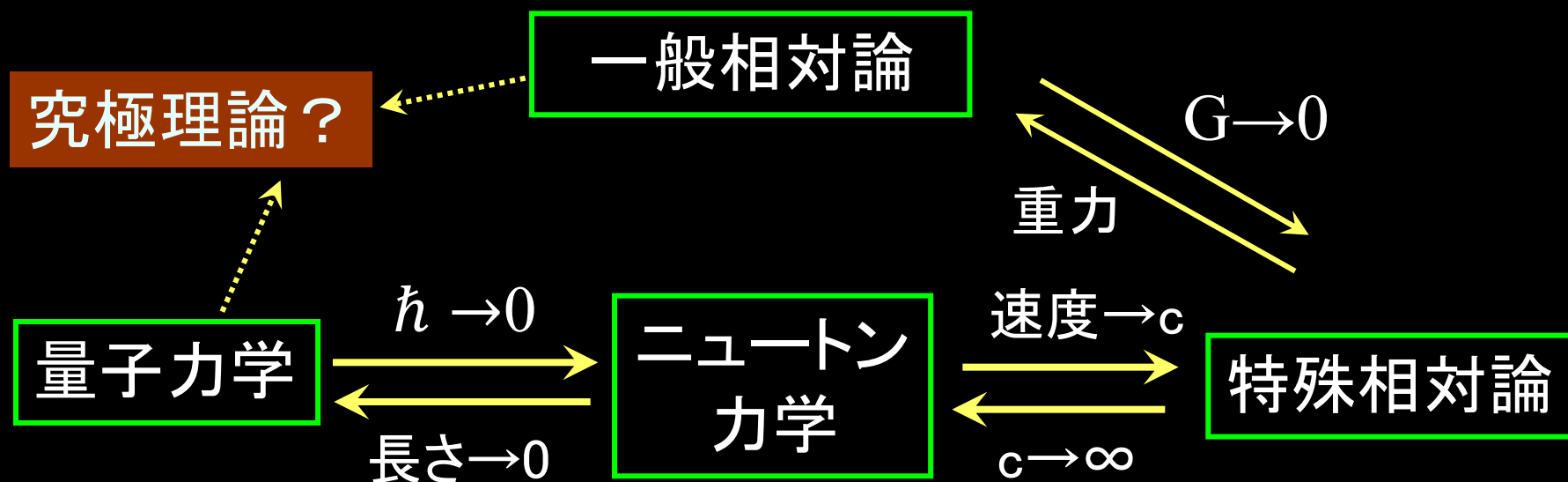


技術と社会



この世界を支配する基本原理と物理定数

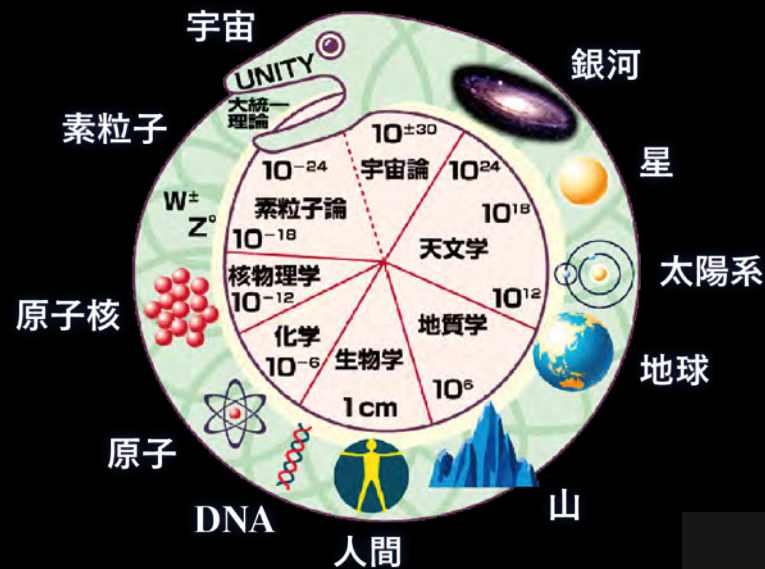
- 自然界のスケールは基本物理定数の値で決まる
 - ニュートンの重力定数 G : 重力の強さ
 - 光速 c : 情報が伝わる速度の上限
 - プランク定数 \hbar : 作用の最小単位
- これらの値が異なる世界は、我々の世界とは全く異なる振る舞いをする(より根源的な法則の存在?)



自然界に内在する特徴的スケール

■ 自然界に存在する物質階層の特徴的スケール

- 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
- 我々が観測できる宇宙(地平線球): 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(それに対応する基本物理定数の値)で決まっている

自然界を支配する物理定数（次元を持つ）

■ 光速度（相対論）

- c ($\doteq 3 \times 10^{10}$ cm/s)

- すべてのものはこの速さを超えて情報を伝えることはできないという因果律を保証。光の速度はいかなる座標系でも同じ。

■ ニュートンの万有引力定数（古典力学）

- G ($\doteq 6.67 \times 10^{-8}$ cm³/g/s²)

- 重力の逆二乗則: $F = GmM/r^2$

■ プランク定数（量子力学）

- \hbar ($= h/2\pi \doteq 1.05 \times 10^{-27}$ erg·s)

- 角周波数 ω の光のもつエネルギー: $E = \hbar\omega$

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 を組み合わせてできる長さ、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、この宇宙に存在する階層の安定性を保証する

須藤靖:『ものの大きさ』(東大出版会、2006)

この自然界の相互作用の強さの比は どう考えても不自然そのもの

- 電磁気力の強さ: 微細構造定数 (無次元数)

$$\alpha_E = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

e は陽子の電荷
陽子同士に働くクーロン力 e^2
を無次元化した数値

- 重力の強さ: 重力微細構造定数 (無次元数)

$$\alpha_G = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 6 \times 10^{-39}$$

m_p は陽子の質量
陽子同士に働く重力 Gm_p^2
を無次元化した数値

- 電磁気力と重力の強さの比 $\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \approx 10^{36}$

この比はとてつもなく大きな数値なので不自然(理論的に説明が困難)。しかし、だからこそ少々地面に落とそうが原子は決して壊れない。つまり、この不自然な値が世界の安定性を保証している。

相互作用の強さの比が、物質世界の階層の安定性を決めているらしい

- 天体の質量の大雑把な理論的推定 (『ものの大きさ』第4章)

$$\frac{\text{惑星の質量}}{\text{陽子の質量}} = \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^{3/2} \approx 10^{54}$$

$$\frac{\text{恒星の質量}}{\text{陽子の質量}} = \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{3/4} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^{3/2} \approx 10^{57}$$

$$\frac{\text{銀河の質量}}{\text{陽子の質量}} = \alpha_E^3 \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^2 \approx 10^{67}$$

$$\frac{\text{銀河の質量}}{\text{恒星の質量}} = \alpha_E^3 \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{-1/4} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^{1/2} \approx 10^{10}$$

$$\frac{\text{恒星の質量}}{\text{惑星の質量}} = \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{3/4} \approx 10^3$$

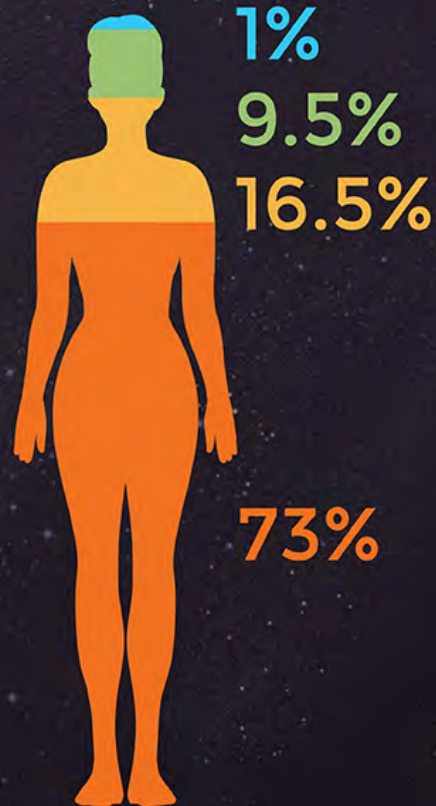
- 自明ではない重要な結論

- 巨視的世界(天体)もまた物理法則に支配されている
- $\alpha_E/\alpha_G \approx 10^{36}$ が巨視的世界と微視的世界をつなぐと同時に、かつそのスケールの隔たりの原因

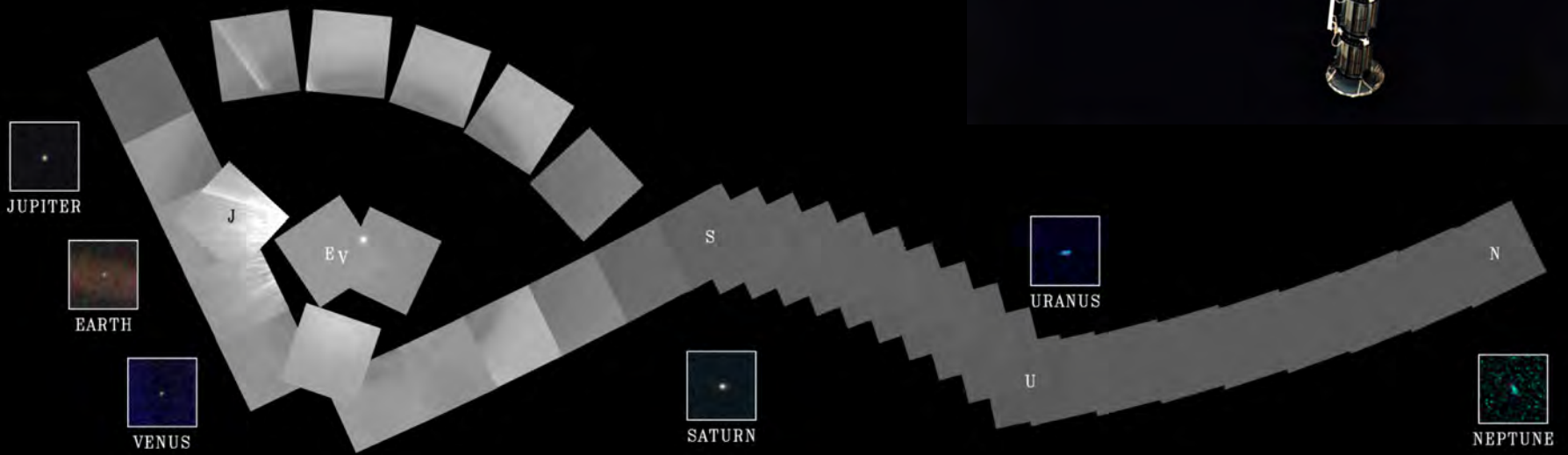
- これらは観測データとそれなりに良く一致している

人間の体の起源 = 宇宙の元素

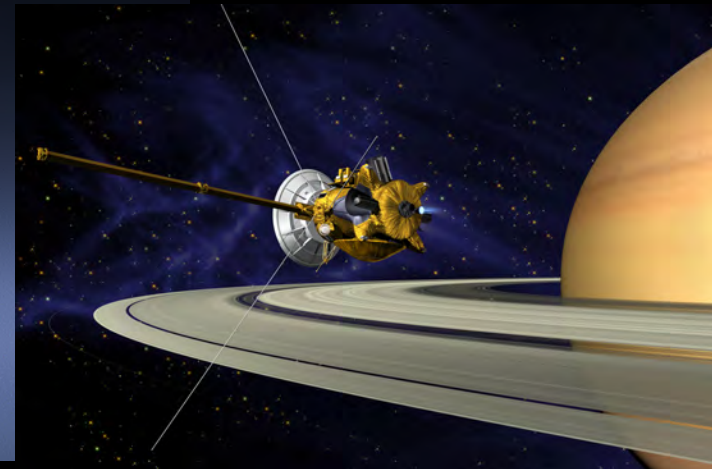
太陽系の元素の起源



ペイル・ブルー・ドット



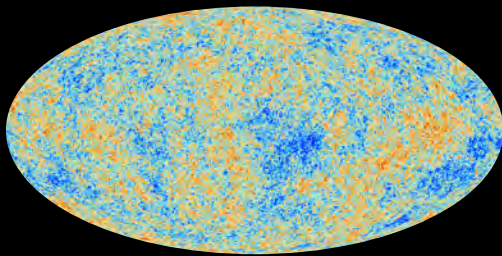
土星から 見た地球



- 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

宇宙を知り世界を問う = 学問

- 天文学・宇宙物理学の進歩 ⇔ 新たな世界観
 - 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



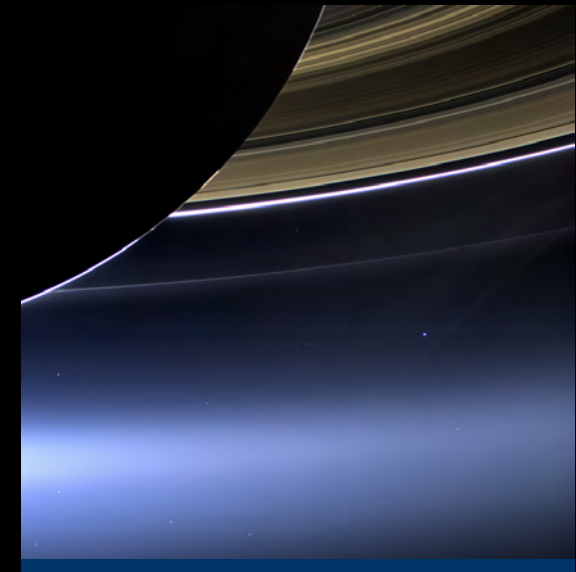
プランク探査機による
宇宙マイクロ波背景輻射全天温度地図

ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros



ボイジャー1号が撮影した地球
(ペイル・ブルー・ドット)

NASA/JPL



カッシーニ探査機が撮影した地球

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute