

138億年の宇宙史における 天体・地球・生命の共進化

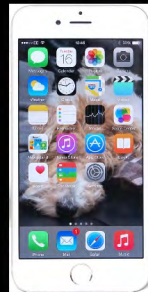
宇宙の構造



銀河



惑星系



技術と社会



生命と知性



地球と月

かわさき市民アカデミー-2022年度前期

新しい科学の世界 I 『宇宙の誕生から日本列島まで』 第2回

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2022年4月19日 10:30-12:00 @川崎市生涯学習プラザ

目次

1. 科学に残された3つの究極の謎
2. 宇宙を知り、世界を問う
3. 法則に支配された宇宙の必然
4. 宇宙における生命の必然と偶然
5. まとめ

1 科学に残された 3つの究極の謎

科学が解明すべき 3つの究極の謎

■ 宇宙の起源

- 宇宙はなぜ誕生したのか
- 宇宙は一つだけなのか

■ 生命の起源

- 生命はなぜ誕生した
- 地球外にも生命は普遍的に存在するのか

■ 意識（知性）の起源

- 意識はなぜ誕生した
- 生命は必然的に意識をもつ方向に進化するのか
- 地球外に知的文明は存在するのか
- 知性はどこまで進化可能なのか

現在、未解明なだけでなく、そもそも答えが存在するのか、仮にあるにせよ我々地球人ごときの知性で答えを得る(理解する)ことができるかすらわからないほどの魅力的な問い

必然と偶然の狭間

■ 私が必然だと信じていること

- 誕生した宇宙は物理法則に支配されて進化する
- 宇宙のなかの物質は多様な元素と分子を合成し、やがて生命に至る
- 誕生した生物は進化しやがて知性（意識）をもつ

■ 私が必然だとは信じきれないこと

- この宇宙が誕生したこと
- この宇宙を支配する物理法則の存在
- この地球における生命の誕生
- この地球における知的生命体の存在

宇宙・物質史（物理法則による必然）

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	138億年前	宇宙の誕生
$\sim 10^{-36}$ 秒	138億年前	宇宙の指数関数的膨張（インフレーション）と、それになう宇宙の熱化（ビッグバン宇宙）
10^{-6} 秒	138億年前	陽子と反陽子の対消滅
1秒	138億年前	電子と陽電子の対消滅
3分	138億年前	ヘリウムの合成（ビッグバン軽元素合成）
38万年	138億年前	宇宙の中性化（陽子と電子が結合して荷電中性の水素原子になる）、宇宙の晴れ上がり
~ 4 億年?	~ 134 億年前?	最初の星の誕生、それ以降で星の中心で重元素が合成され、最期に空間にばら撒かれる（元素循環）
10億年	128億年前	知られている最古の銀河、中性化した宇宙が再び電離
70億年	168億年前	ダークエネルギーが宇宙を支配し、それ以降、宇宙膨張が減速から加速に転ずる

地球・生命史 (かなり偶然に左右される)

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
82億年	46億年前	地球および月の誕生
96億年	42億年前	海の形成
98億年	40億年前	原始生命 (プロゲノート) の誕生
100億年	38億年前	最古の光合成の痕跡?
115億年?	23億年前?	全球凍結
117億年	21億年前	大気中酸素の急激な増加
122億年	6億年前	カンブリア紀大爆発 (生物種の爆発的多様化)
134億年	2.5億年前	生物大量絶滅 (P/T境界事件: ペルム紀-三畳紀)
136億年	2.3億年前	恐竜の出現
137億年	6500万年前	恐竜絶滅 (K/T境界事件: 白亜紀-第三紀)
138億年	20万年前	新人型ホモサピエンスの出現

宇宙生物学入門-惑星・生命・文明の起源-(2008)より

自然界における必然と偶然

- 生命の誕生・進化を議論する場合、必然と偶性（物理法則と初期条件あるいは外的要因と言い換えても良い）はある程度分離できる
 - 星内部での元素合成と超新星爆発による元素循環
 - それを材料とし化学進化から生命の材料物質が生成
 - これらから（具体的な過程は不明だが）生命が誕生
 - 深海熱水噴出孔？地球外宇宙塵上？
 - 自然淘汰・適者生存
 - 地球の存在、小天体大衝突、気候変動
- ただし、宇宙そのものの誕生に関しては、偶然と必然の関係が分離しがたい
 - 何が初期条件で何が物理法則？

↑
必然

偶然
↓

2 宇宙を知り、世界を問う

世界観の変革 = ホライズンの拡大 ～宇宙を知り、世界を問う～

- 宇宙=space-time (淮南子)
 - 宇=天地四方上下 (三次元空間全体)
 - 宙=往古来今 (過去・現在・未来の時間全体)
- 世界=時空 (サンスクリット ⇒ 漢語)
 - 世=過去・現在・未来の三世 (時間)
 - 界=東西南北上下 (空間)

(広義の)世界



(狭義の)世界



50年前の私にとっての「世界」 @高知県安芸市

「子供の頃、海を見て育っちょらん人間は
信用できん」 (西原理恵子)

- この水平線は世界の果てなのか？
- その先に別の世界があるのか？
- もしあるならばそこに広がる風景は？

遠くを見ることで、高知県の先にも世界が広がっていたことを知る



@ホノルル、ハワイ

@モナコ



世界の相対化：日本を俯瞰する



国際宇宙ステーション

<https://www.flickr.com/people/nasa2explore/>

世界の相対化：月からみる地球



世界の相対化：地球からみる天の川

国際宇宙ステーション

<https://www.flickr.com/people/nasa2explore/>

この星空の先には
別の世界が広がっているのか？



3 法則に支配された宇宙の必然

宇宙膨張と物質世界の進化

- 宇宙は膨張しながら密度と温度を下げる
 - 光に満ちた単純な宇宙から、複雑で多様な天体世界へ
- $t \doteq 3$ 分: 軽元素(ヘリウム)合成
- $t \doteq 38$ 万年: 電離した宇宙が中性化 (陽子+電子 から 水素原子)
- $t \doteq$ 数億年: 第一世代天体の誕生
- $t \doteq$ 数億年 ~ 138億年: 星形成(重元素合成)、銀河・銀河団形成+生命

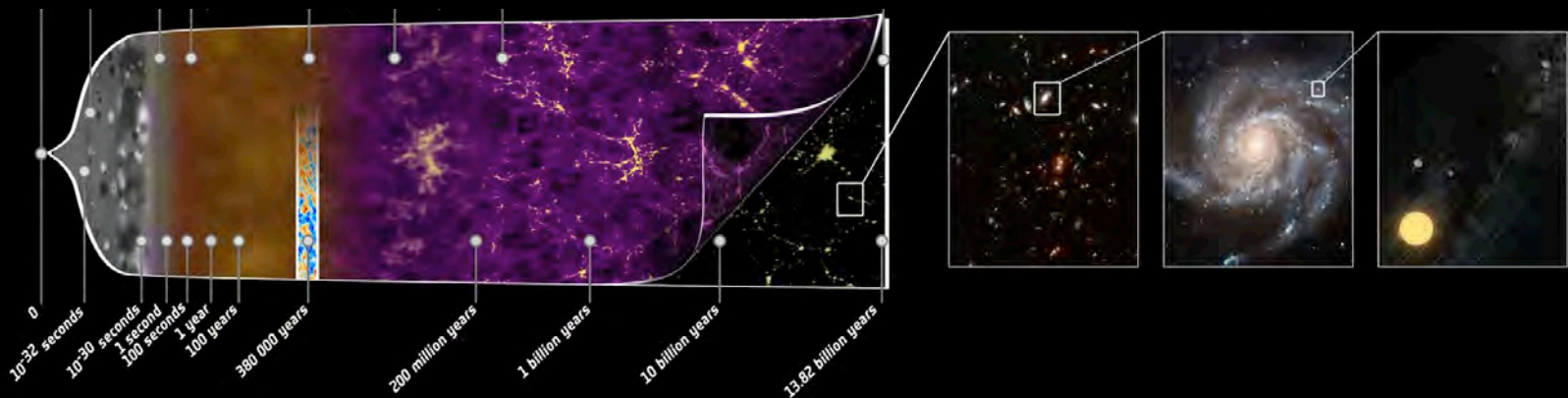
宇宙の中性化: その時の宇宙の光の化石が、現在の宇宙を満たしている宇宙マイクロ波背景放射

38万年

数億年

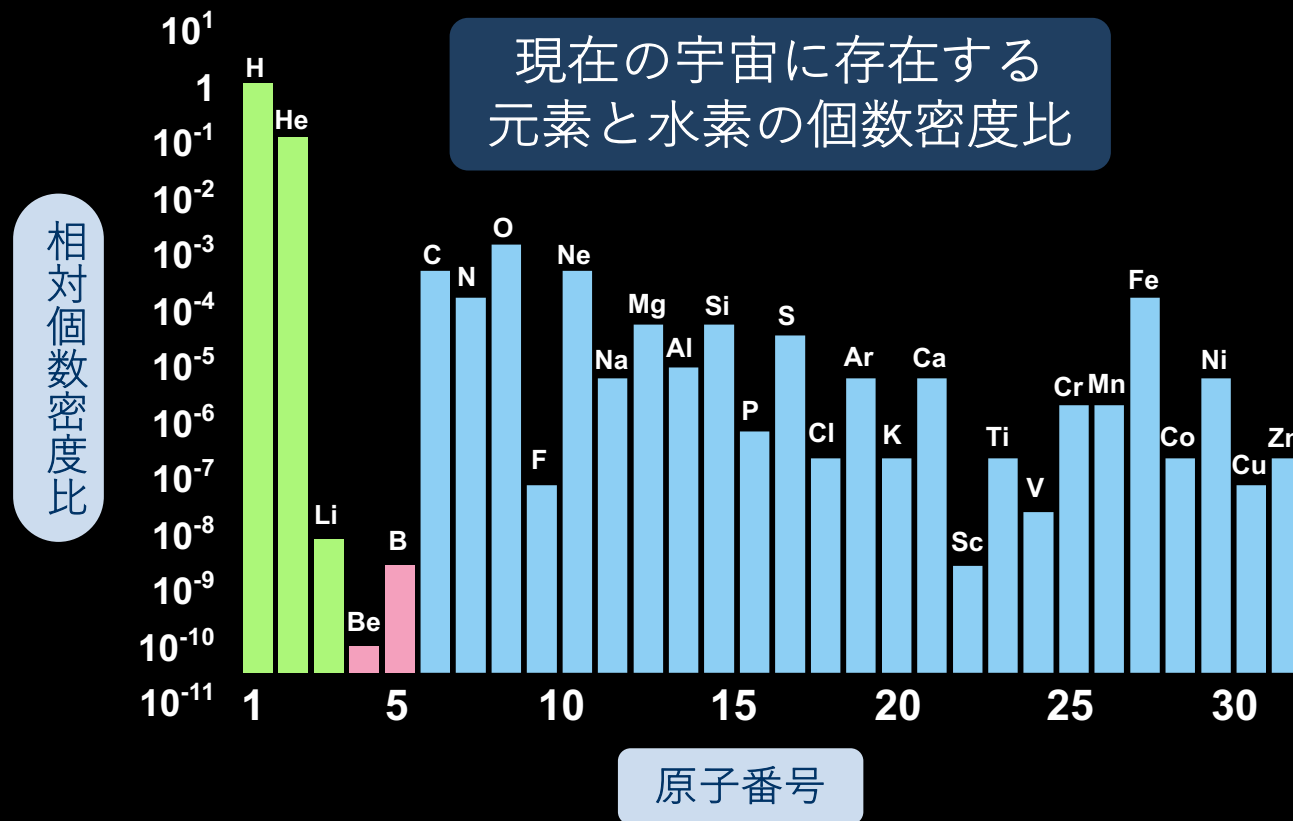
138億年

宇宙の誕生



現在

元素の起源とビッグバン元素合成

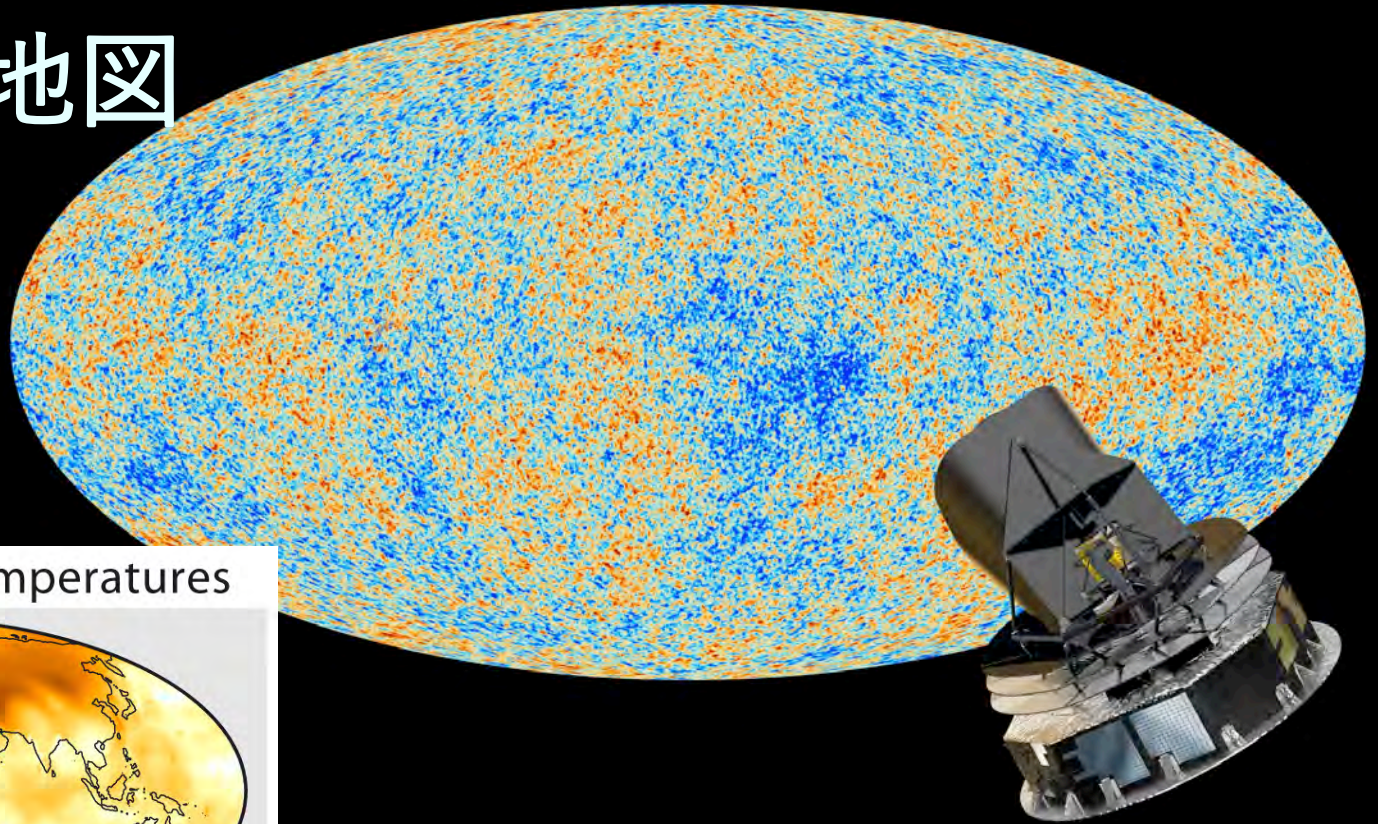


- 現在の宇宙の元素は71%の水素、27%のヘリウムとそれ以外の重元素からなる（質量比）
- このヘリウムは宇宙誕生3分間で形成された
- ガモフがビッグバンモデルを提案した動機

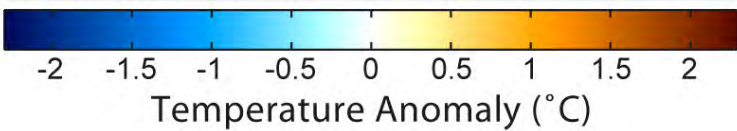
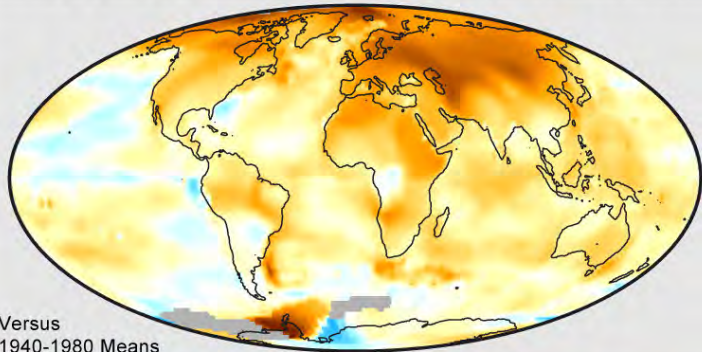
宇宙の中性化と宇宙の晴れ上がり

- 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

宇宙マイクロ波 背景輻射 温度地図



1999-2008 Mean Temperatures



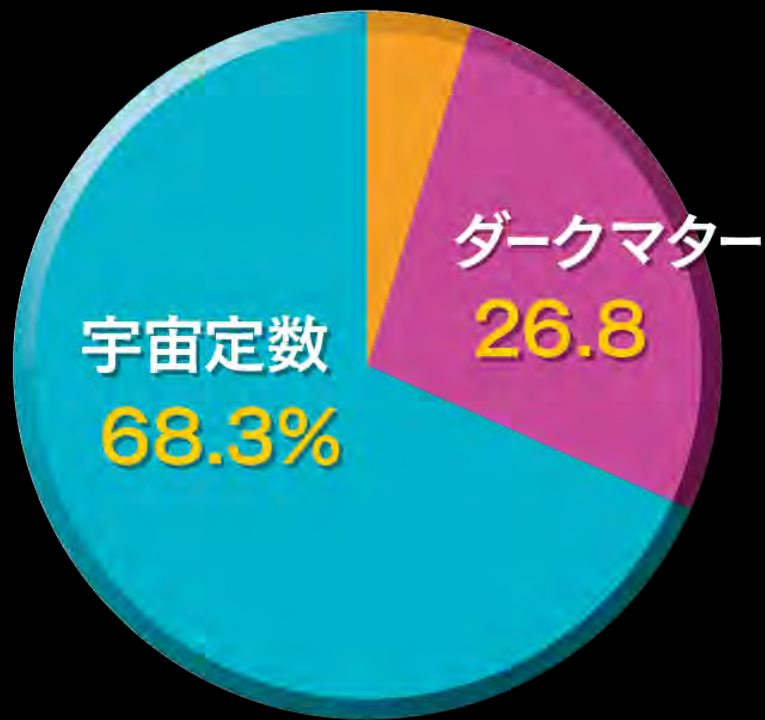
プランク衛星の観測データ(2013)

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)

この宇宙マイクロ波背景輻射地図と 物理法則からわかったこと： 現在の宇宙の組成

元素 4.9



- 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

天体の形成：重力とダークマター



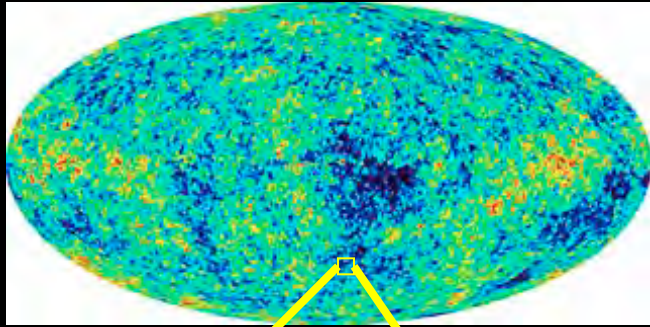
宇宙の構造
形成シミュ
レーション

(吉川 耕司
樽家 篤史
景 益鵬
須藤 靖)

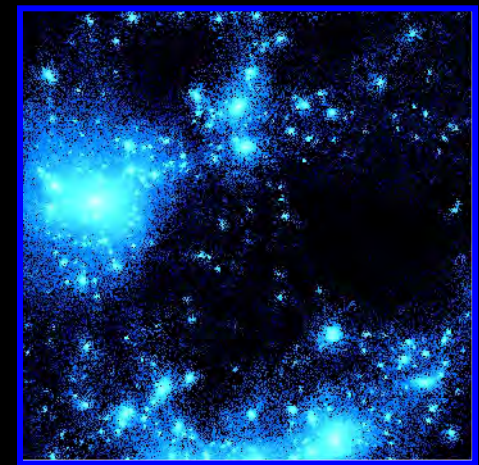
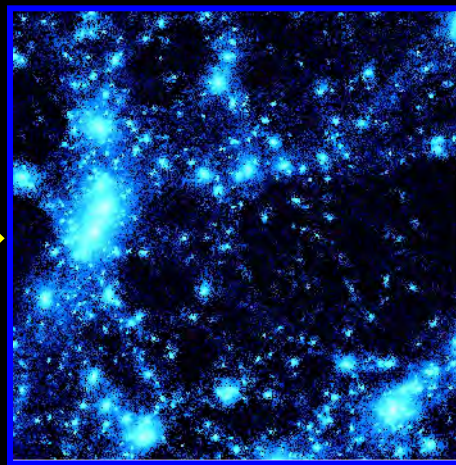
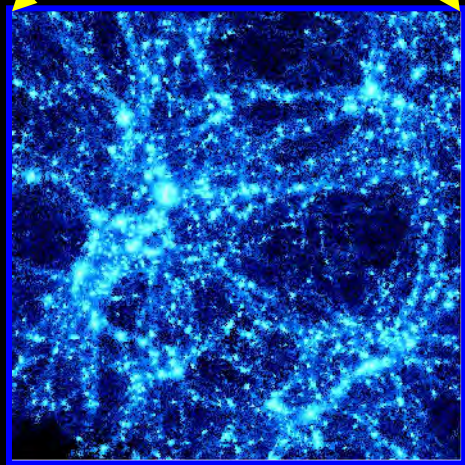
- (宇宙のインフレーション時に生成された) 空間的密度のゆらぎが、宇宙の膨張とともに成長し現在の宇宙の天体諸階層を誕生させた
- 天体は重力によって成長、重力を支配するのはダークマター

宇宙の構造形成標準理論

宇宙初期の空間ゆらぎ



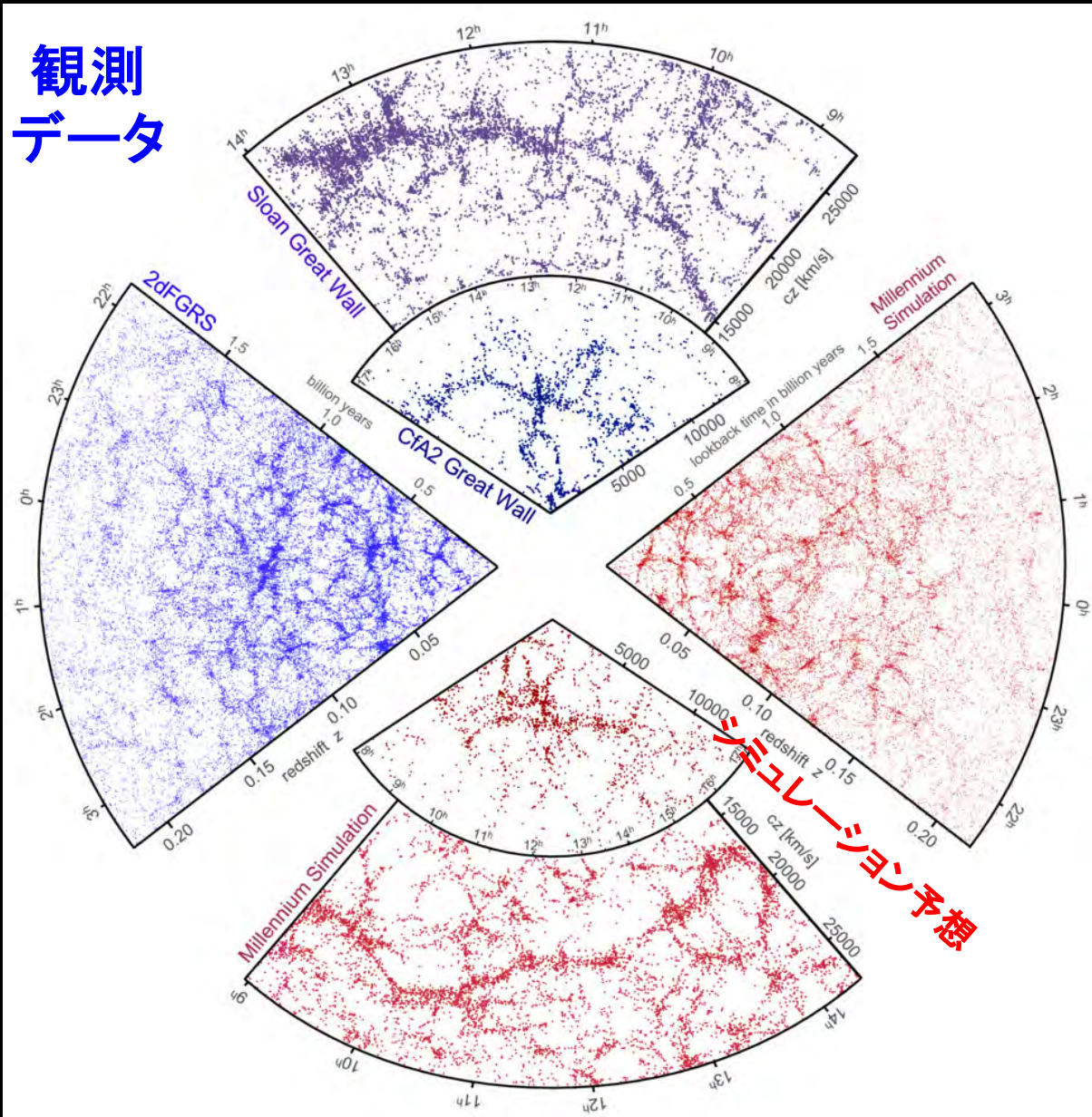
- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



万有引力(重力)によってでこぼこ度合いがどんどん成長する

数値計算の予言 と観測データの の比較： 銀河の 3次元分布

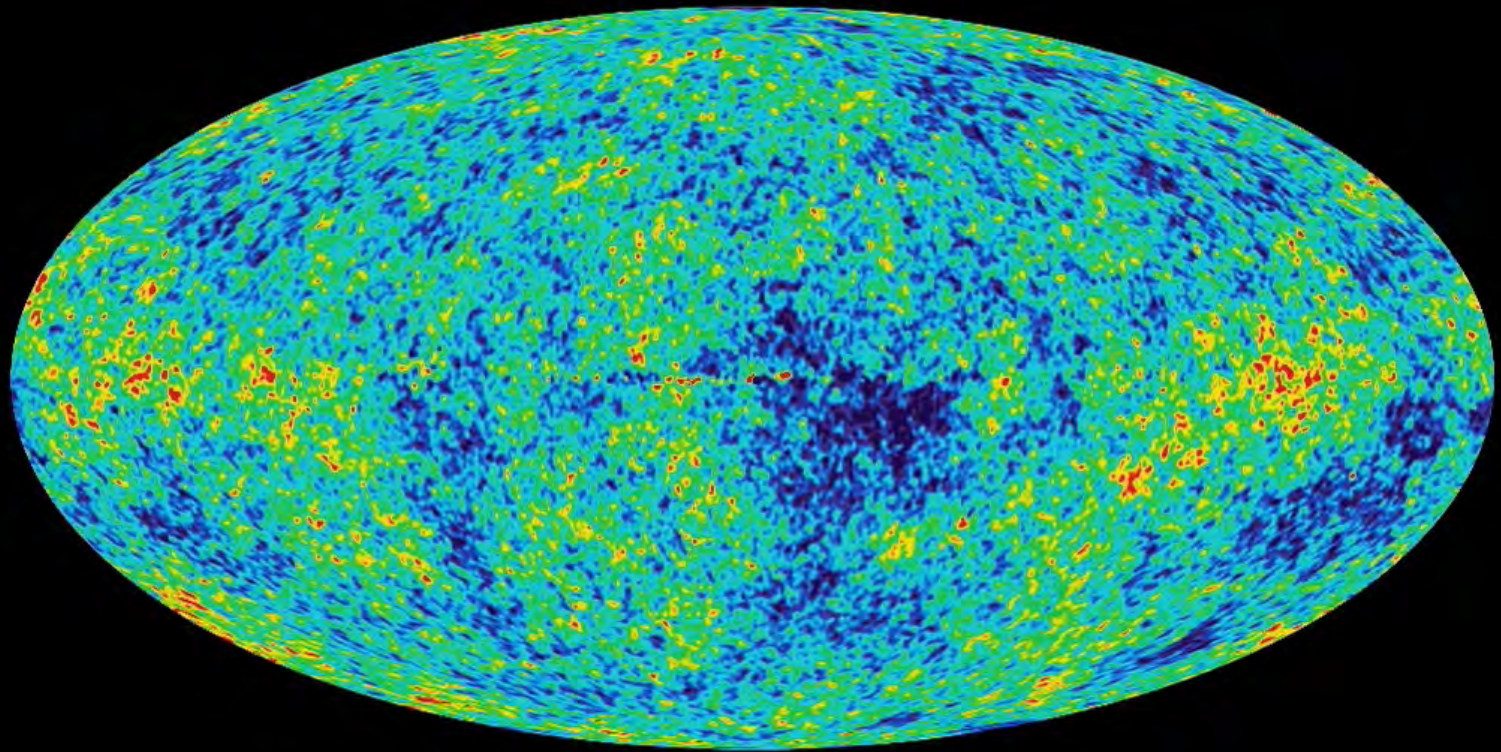
- 宇宙モデルを決める少数のパラメータを与えるだけで、近傍宇宙における銀河の分布が見事に再現できる
- 宇宙は法則に従っている



現在の銀河宇宙からマイクロ波背景輻射へ： 138億歳の現在から38万歳の過去へ



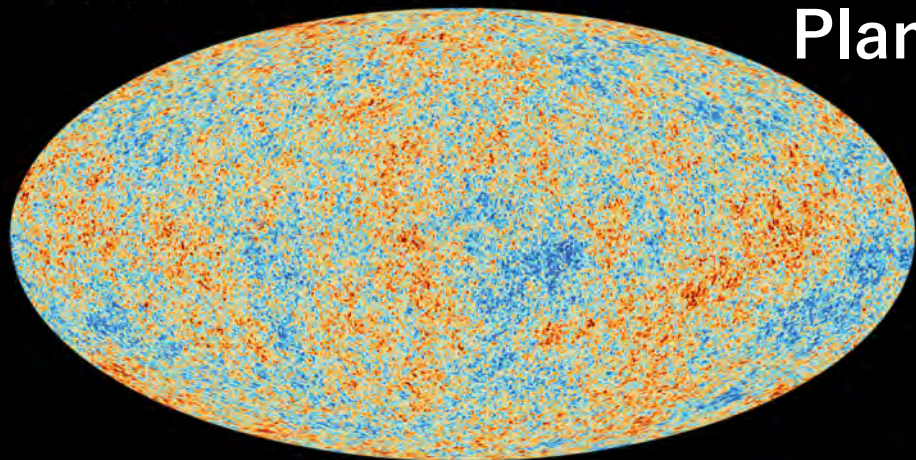
宇宙マイクロ波背景輻射から銀河宇宙へ： 宇宙誕生後38万年から138億年までの進化



NASA/WMAP Science Team -David Spergel

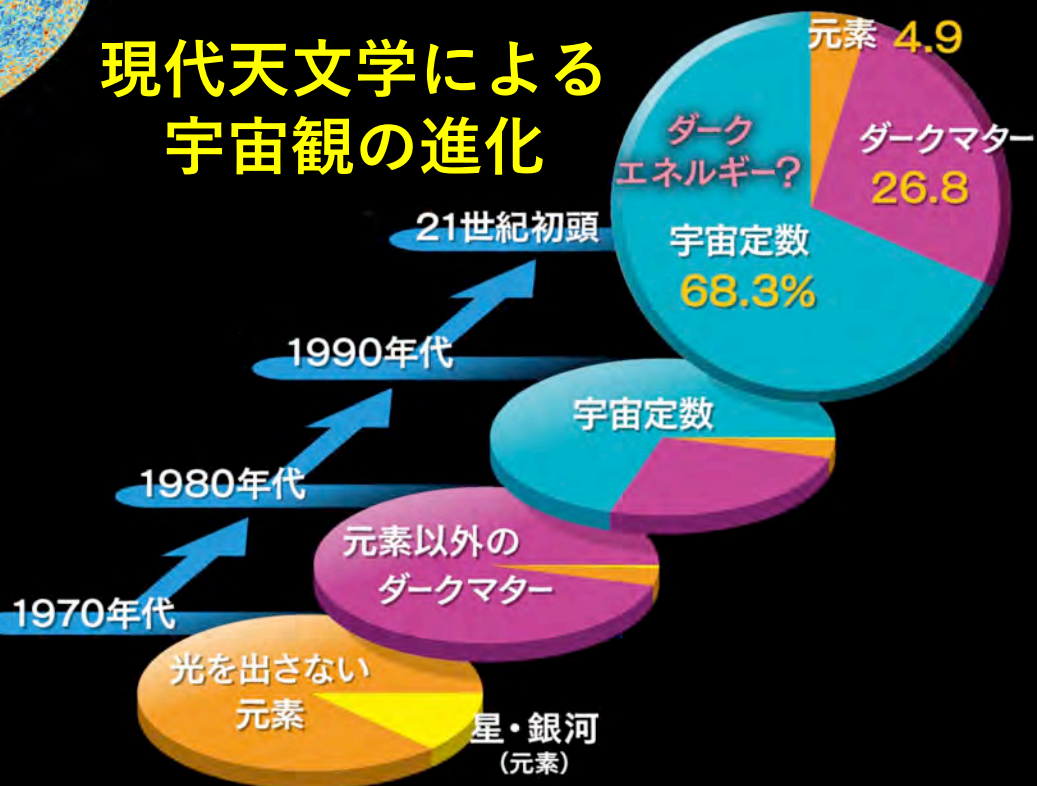
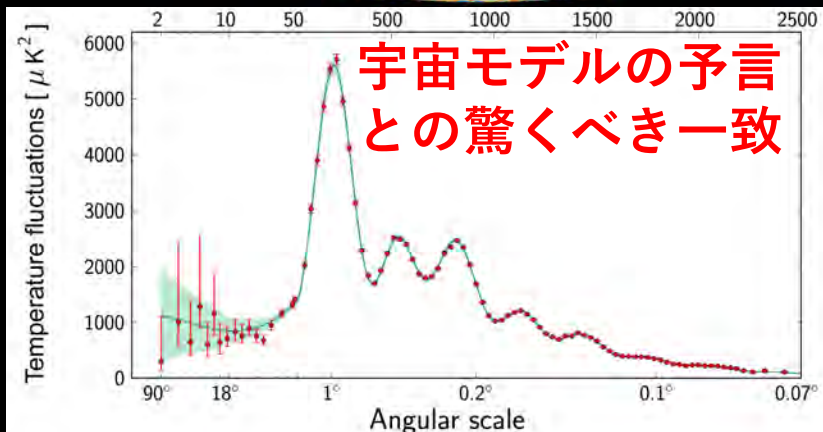
宇宙物理学が明らかにした最も重要な事実 宇宙はその果てまで物理法則に従っている

→ THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND
Planck Legacy Release 2018



Planck衛星 (2013)

現代天文学による 宇宙観の進化



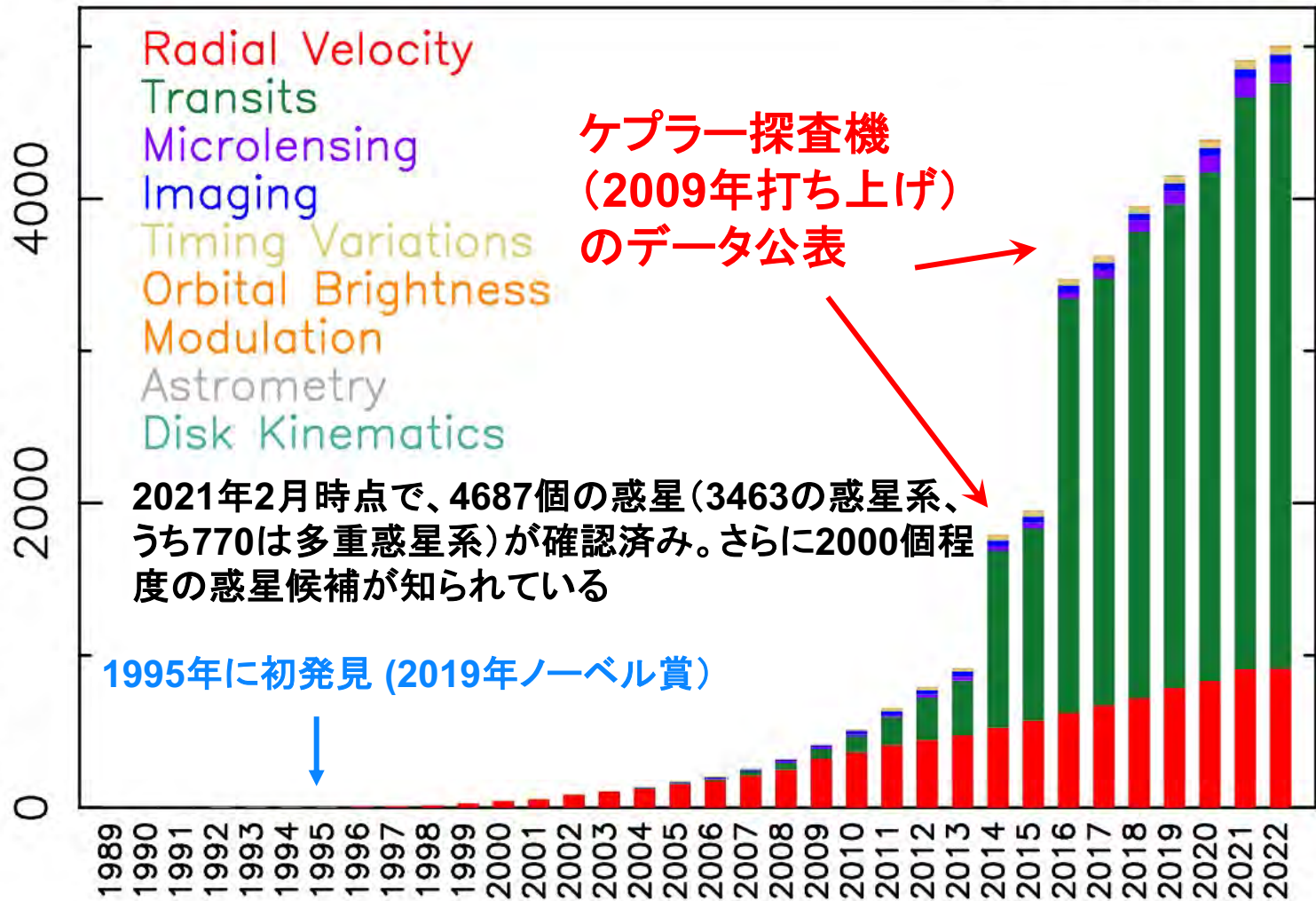
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/07/Planck_s_view_of_the_cosmic_microwave_background2

4 宇宙における生命の必然と偶然

太陽系外惑星の発見年表

22 Mar 2022
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



西暦

生命がいるかもしれない惑星候補



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（千億個）
 - その1割の 10^{10} 個が太陽と似た恒星
 - さらに太陽に似た恒星の1割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（1垓個）
 - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
 - 本当に生命が生まれるための条件は知られていない（適度な割合の海と陸＋数多くの偶然？）
 - しかしこれほど膨大な数の惑星がある以上、この地球だけに生命がある考えるのはかなり不自然では？

宇宙における生命探査

- 30年前まではSFでしかなかった
 - 科学者以外の一般人がむしろ強い興味をもつ
- 今では科学の一分野として認められつつある
 - サンプルリターン（小天体、火星、木星の衛星に直接探査機を送る）
 - リモートセンシング（遠方の太陽系外惑星を望遠鏡で観測）
 - SETI（地球外知的文明からの信号を検出）
- 人類の究極の科学目標であることは確実
 - ただし少なくとも今後10年から100年は必要

地球外知的文明はあるか？： ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

今、銀河系内
にある交信可
能な知的文明
の数

銀河系内の（生命に適した）恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

その文明の継続時間

Nの値は良くわかっていない。0.003個（つまり、我々の地球以外には存在し得ない！）と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。



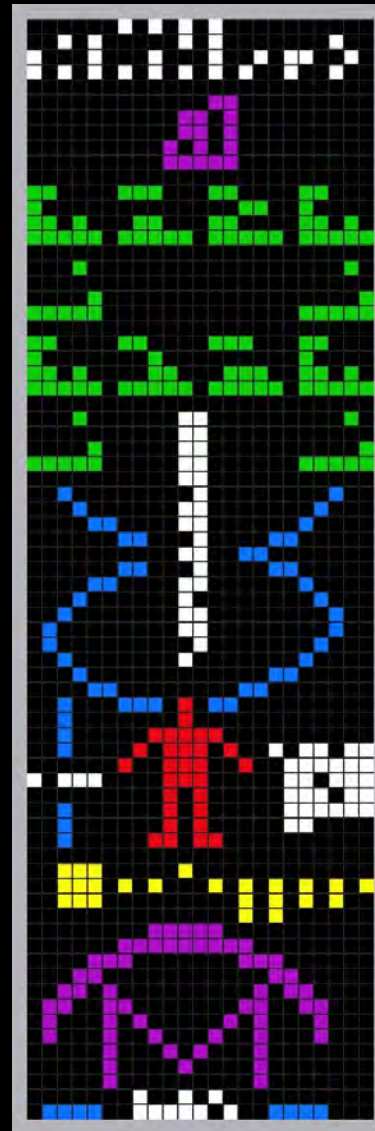
SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- 生命が存在する最も決定的な証拠は知的文明からの電磁波信号
- オズマ計画 (1960)
 - フランク・ドレイクは、4ヶ月間にわたり毎日6時間、口径26mの電波望遠鏡を、くじら座タウ星とエリダヌス座イプシロン星の方向に向け、中性水素の放射する波長21cm(周波数1.42GHz)帯に、文明の証拠となりうる規則的な電波信号の探査を試みた



アレシボ・メッセージ

- ドレイクは、1974年11月16日にプエルトリコにあるアレシボ電波望遠鏡から、約2万5千光年離れた球状星団M13に向けて電波信号を送った
- それを解読して並べたとすれば0と1の信号列が右図のようになる



1から10までの数(2進法)

DNAを構成する水素、炭素、窒素、酸素、リンの原子番号(2進法)

DNAのヌクレオチドに含まれる糖と塩基、計12種の化学式

DNAの二重螺旋

人間

太陽系(左端が太陽で、一行上になっているのが地球)

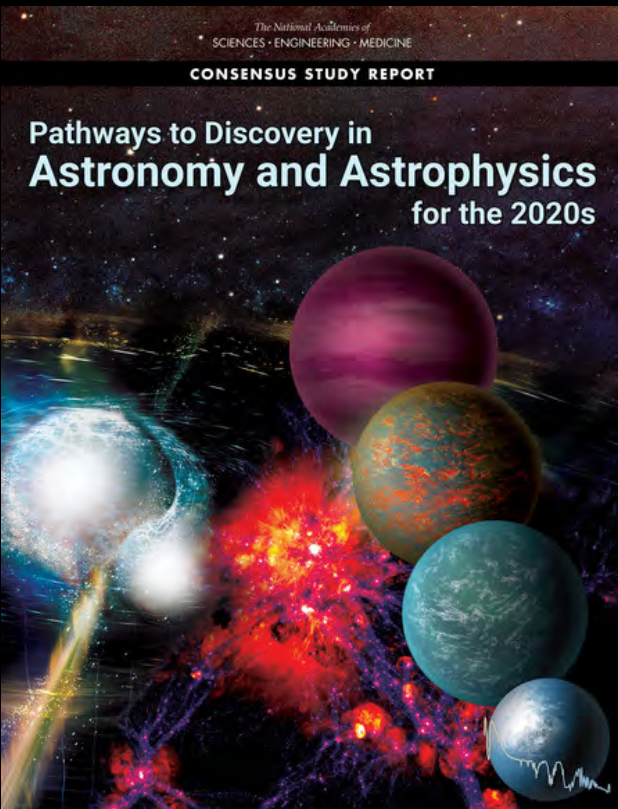
アレシボ電波望遠鏡

地球文明の存在を知った三体人

- 高度知的文明は友好的か排他的か
- 光速の1%で航行する宇宙艦隊を地球に派遣
- 400年後に3体艦隊が来ることを知った地球人はどうするか



Astro2020: Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s



- **Worlds and Suns in Context**
 - Pathways to Habitable Worlds
- **New Messengers and New Physics**
 - New Windows on the Dynamic Universe
- **Cosmic Ecosystems**
 - Unveiling the Drivers of Galaxy Growth

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

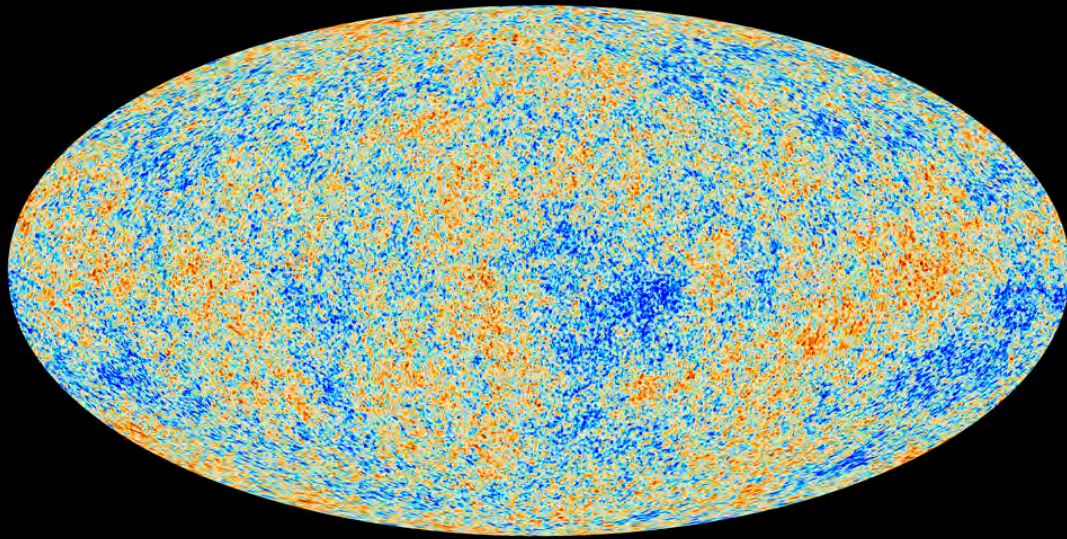
Highest Priority: an IR/Optical/UV space telescope optimized for observing habitable exoplanets and general astrophysics

- **Recommendation:** After a successful mission and technology maturation program, NASA should embark on a program to realize a mission to **search for biosignatures from a robust number of about ~25 habitable zone planets** and to be a transformative facility for general astrophysics. If mission and technology maturation are successful, as determined by an independent review, implementation should start in the latter part of the decade, **with a target launch in the first half of the 2040's**

5 まとめ

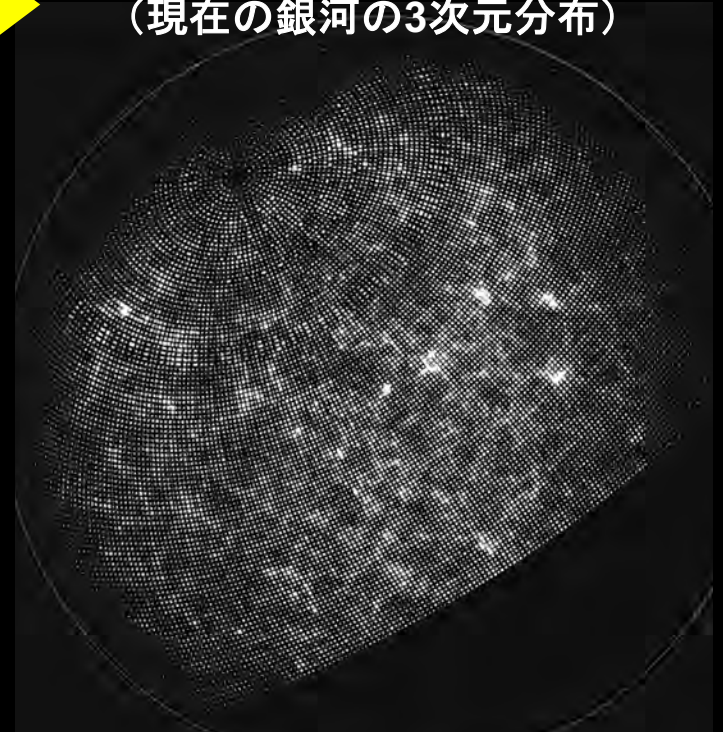
現在の宇宙(世界)に関する全情報が 原理的にはここに刻み尽くされている

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)



物理法則

宇宙の構造形成進化史
(現在の銀河の3次元分布)



■ 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

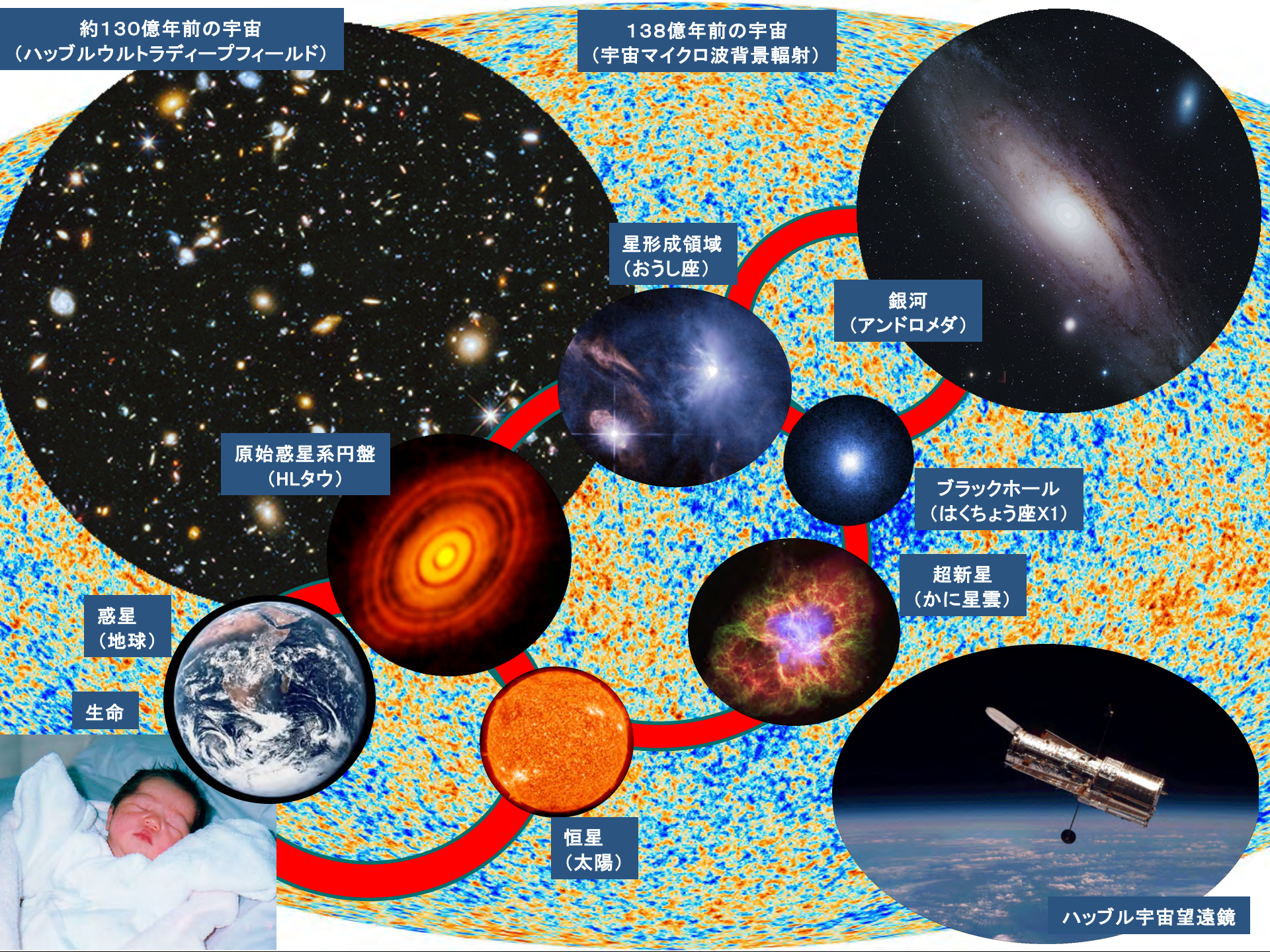
天体・地球・生命の共進化

必然による普遍性と偶然が生む多様性

- 生命を含むこの壮大な宇宙史の流れは、マイクロ波背景輻射に代表される宇宙の初期条件に加えて、物理法則に従う必然的なもの
 - 宇宙における天体の誕生と進化は必然
 - 星の内部で合成された元素は宇宙空間に放出され、それを材料として次世代の天体が誕生する
 - この天体の進化と元素循環のある時点でこの地球が誕生
 - この地球と似たような環境の惑星は無数に存在し、そのうちのある割合が何らかの偶然によって生命を生み出す
 - いったん生まれた生命は、時間をかけて進化しやがては知的生命体が誕生する（生命は必然でもその多様性は偶然）
 - この地球がその一例であることは単なる偶然であるが、宇宙のどこかで知的生命体をもつ惑星の存在は必然のはず

約130億年前の宇宙
(ハッブルウルトラディープフィールド)

138億年前の宇宙
(宇宙マイクロ波背景輻射)



星形成領域
(おうし座)

銀河
(アンドロメダ)

原始惑星系円盤
(HLタウ)

ブラックホール
(はくちょう座X1)

超新星
(かに星雲)

惑星
(地球)

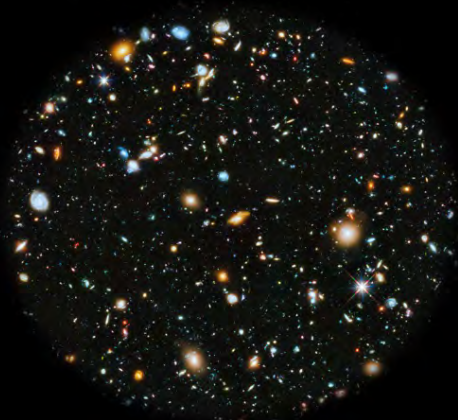
生命

恒星
(太陽)

ハッブル宇宙望遠鏡

宇宙 = 天体 + 生命 + 技術 + 社会...

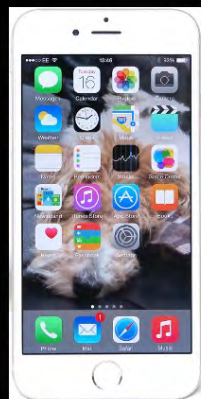
宇宙の構造



銀河



惑星系



技術と社会



生命と知性



地球と月

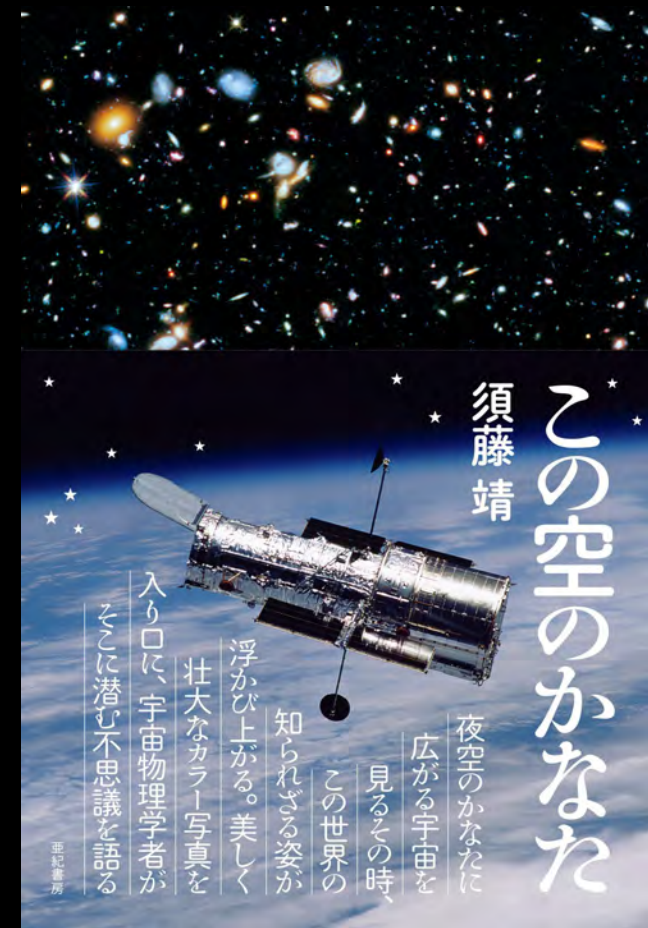
参考文献



朝日新書
2022年



講談社ブルーバックス
2019年



亜紀書房
2018年