



# 地球を相対化して 世界を知る

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤靖

「われわれはどこから来て、どこへ行くのか」そのストーリーと新たな博物館の可能性  
@国立科学博物館 2023年10月9日 13:40-14:10

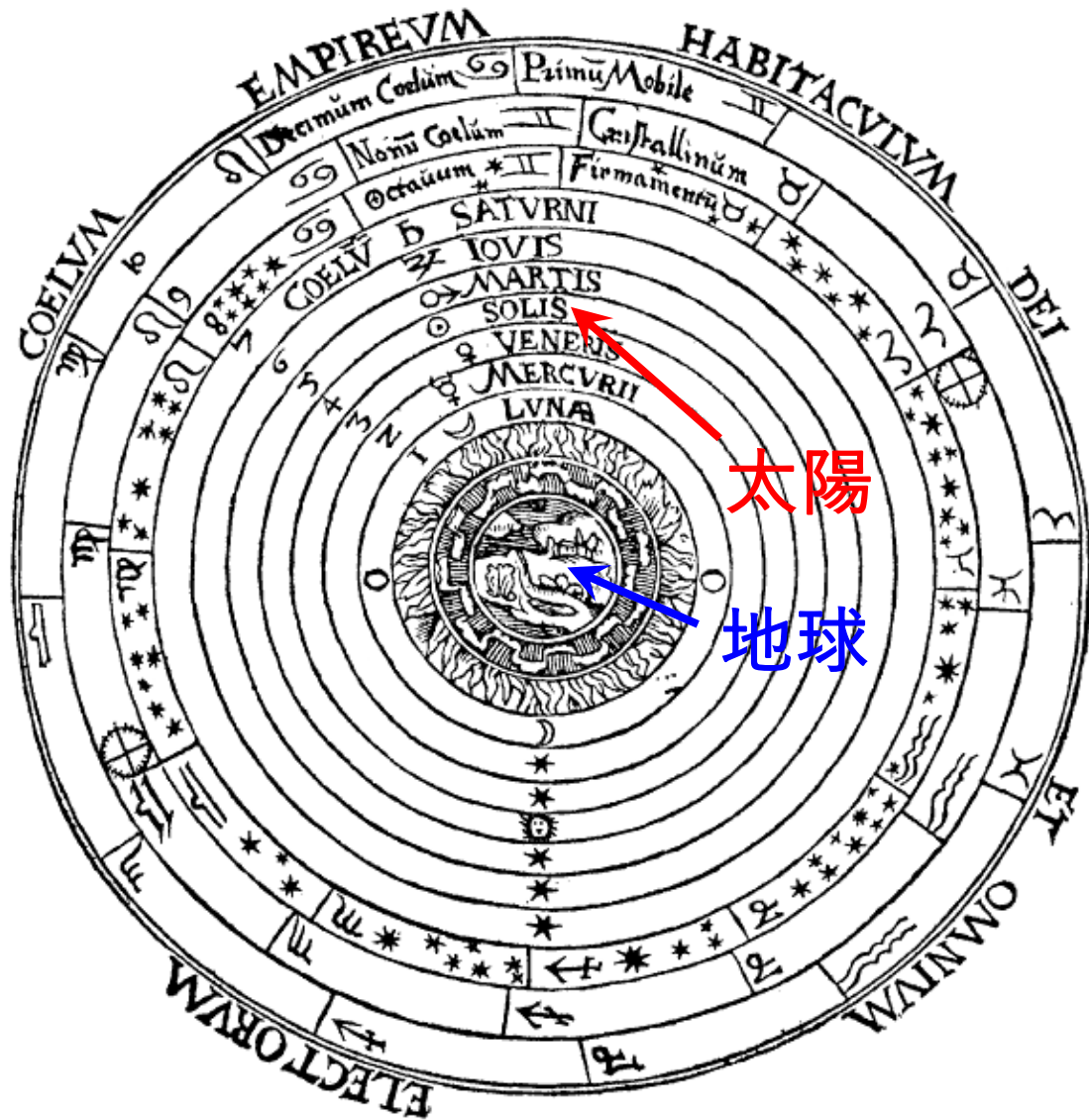
# 今日の話の内容

- 1 地球から見る宇宙・宇宙から見る地球
- 2 宇宙と天体と生命の共進化
- 3 見える宇宙のその先にある世界
- 4 我々は宇宙をどこまで理解できるのだろうか

# 1 地球から見る宇宙

宇宙から見る地球

# 地球こそ世界の中心である



## ■ プトレマイオス 「アルマゲスト」

(紀元150年頃)

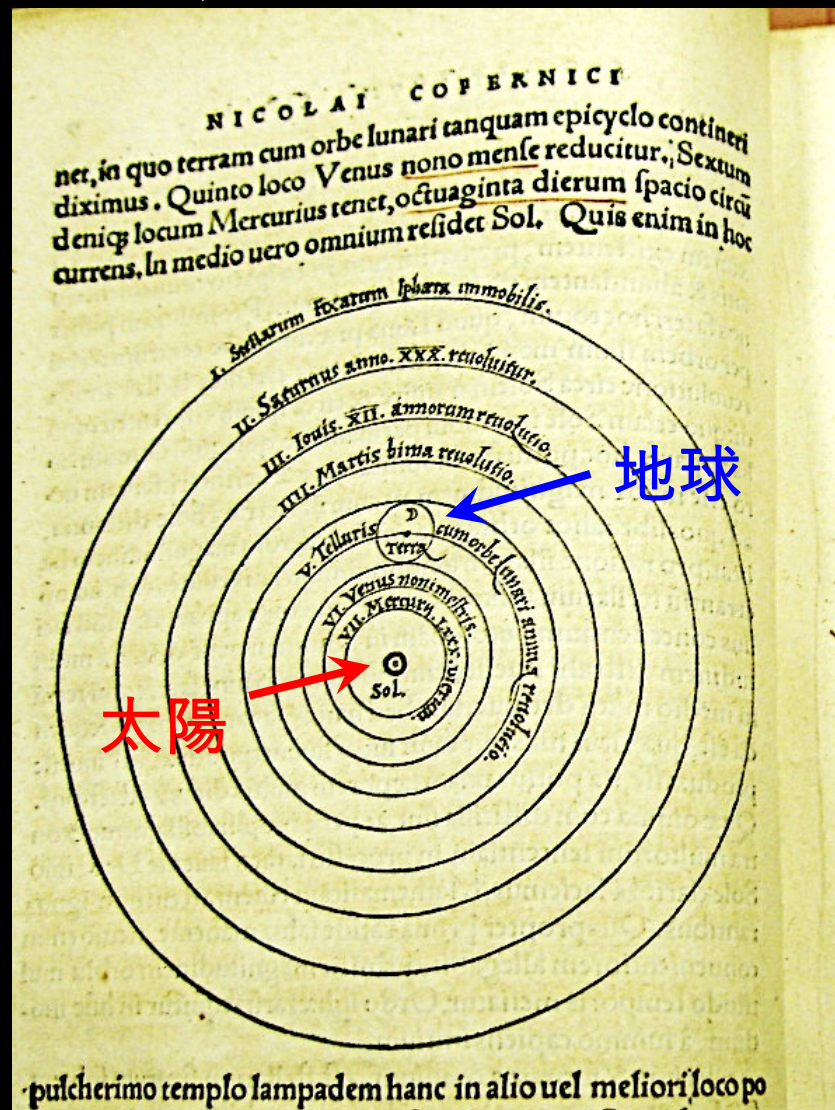
- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- 天動説
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

ペトルス・アピアヌス Cosmographia (1539年)  
Wikipediaより

# 地球は世界の中心ではない! (1543年)



コペルニクス(1473-1543)



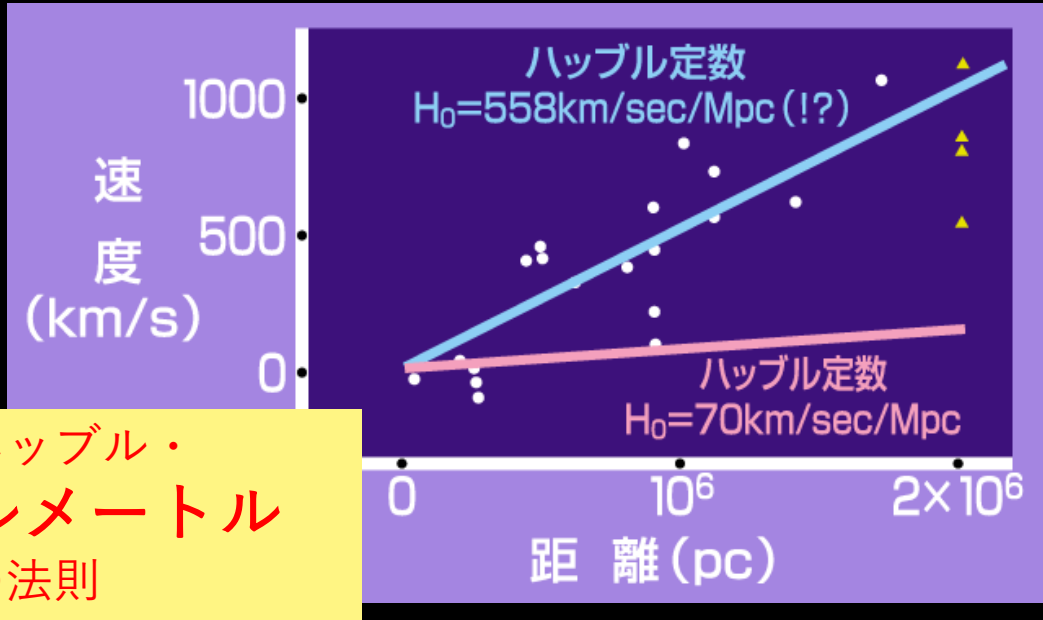
天球の回転について (1543)



コペルニクス像@トルン

# 宇宙原理（宇宙論的コペルニクス原理）

## 宇宙には中心がない＝あらゆる場所が中心である



ハッブル・ルメートルの法則

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

By EDWIN HUBBLE PNAS 15(1929)168

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-galactic nebulae have involved a  $K$  term of several hundred kilometers which appears to be variable. Explanations of this paradox have been sought in a correlation between apparent radial velocities and distances, but so far the results have not been convincing. The present paper is a ion of the question, based on only those nebular distances believed to be fairly reliable.

UN UNIVERS HOMOGENE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT, RENDANT COMPTE DE LA VITESSE RADIALE DES NEBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

1. GÉNÉRALITÉS.

Annales Soc. Sci. Bruxelles A47(1927)49

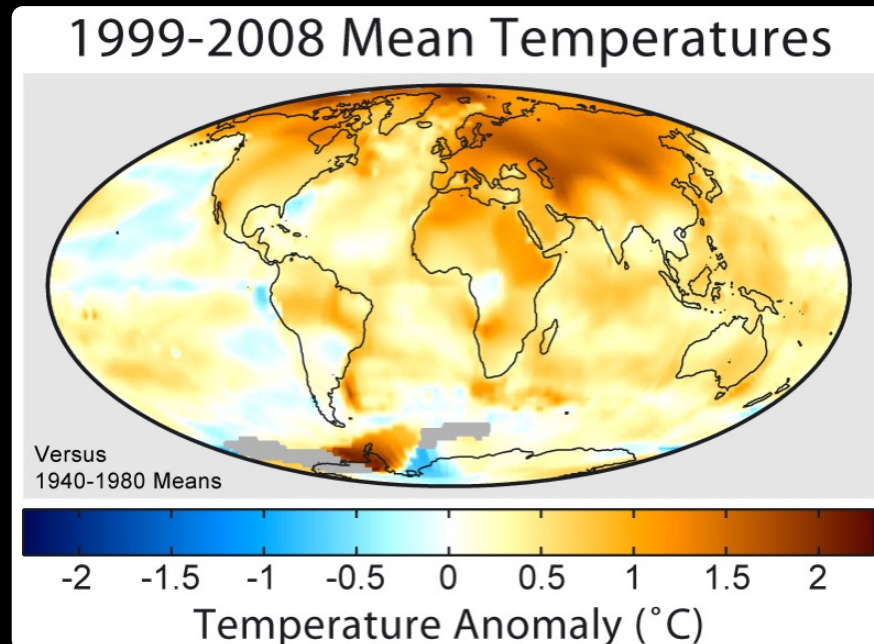
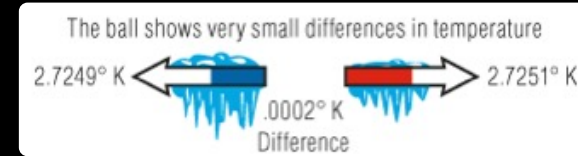
La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon  $R$  de l'espace est constant, l'espace est elliptique de

- ハッブルは、1929年に宇宙に対する太陽系の運動を決めようとした（自分の発見の意味をよく理解していない！）
- ルメートルは、1927年のフランス語論文で一般相対論的膨張宇宙の文脈で遠方天体の速度距離関係を発見し発表済み

# 宇宙を満たすビッグバンの残光（光の化石）

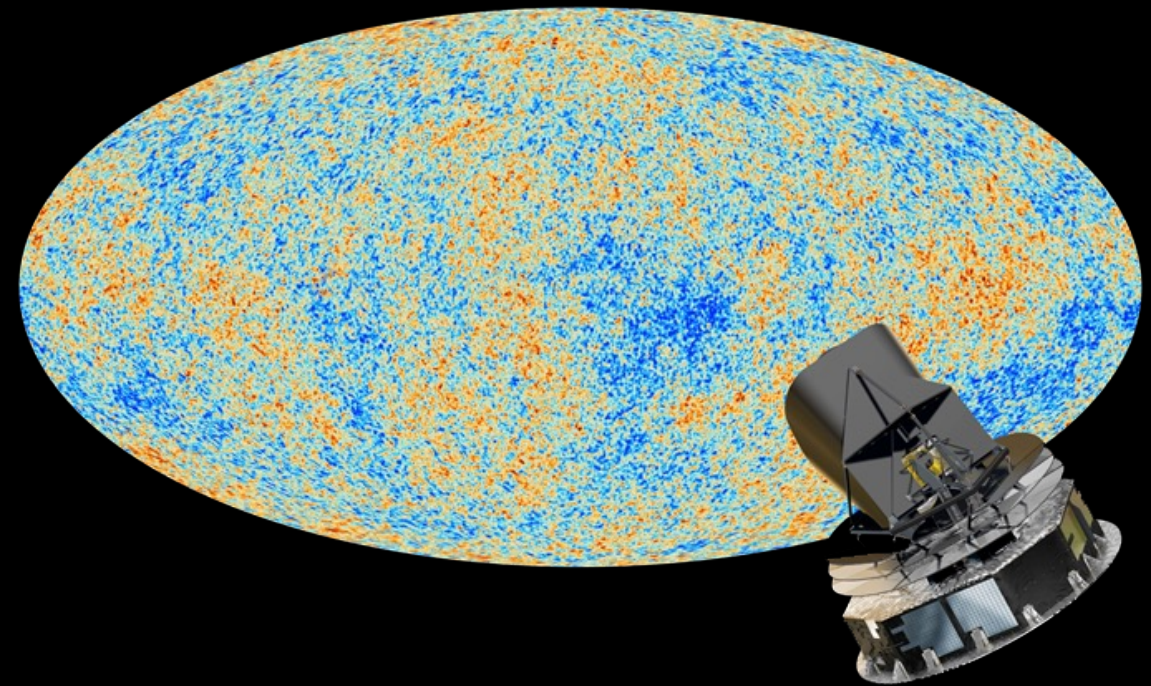
## 宇宙マイクロ波背景輻射温度地図

宇宙は高い精度で一様かつ等方である



Robert A. Rohde

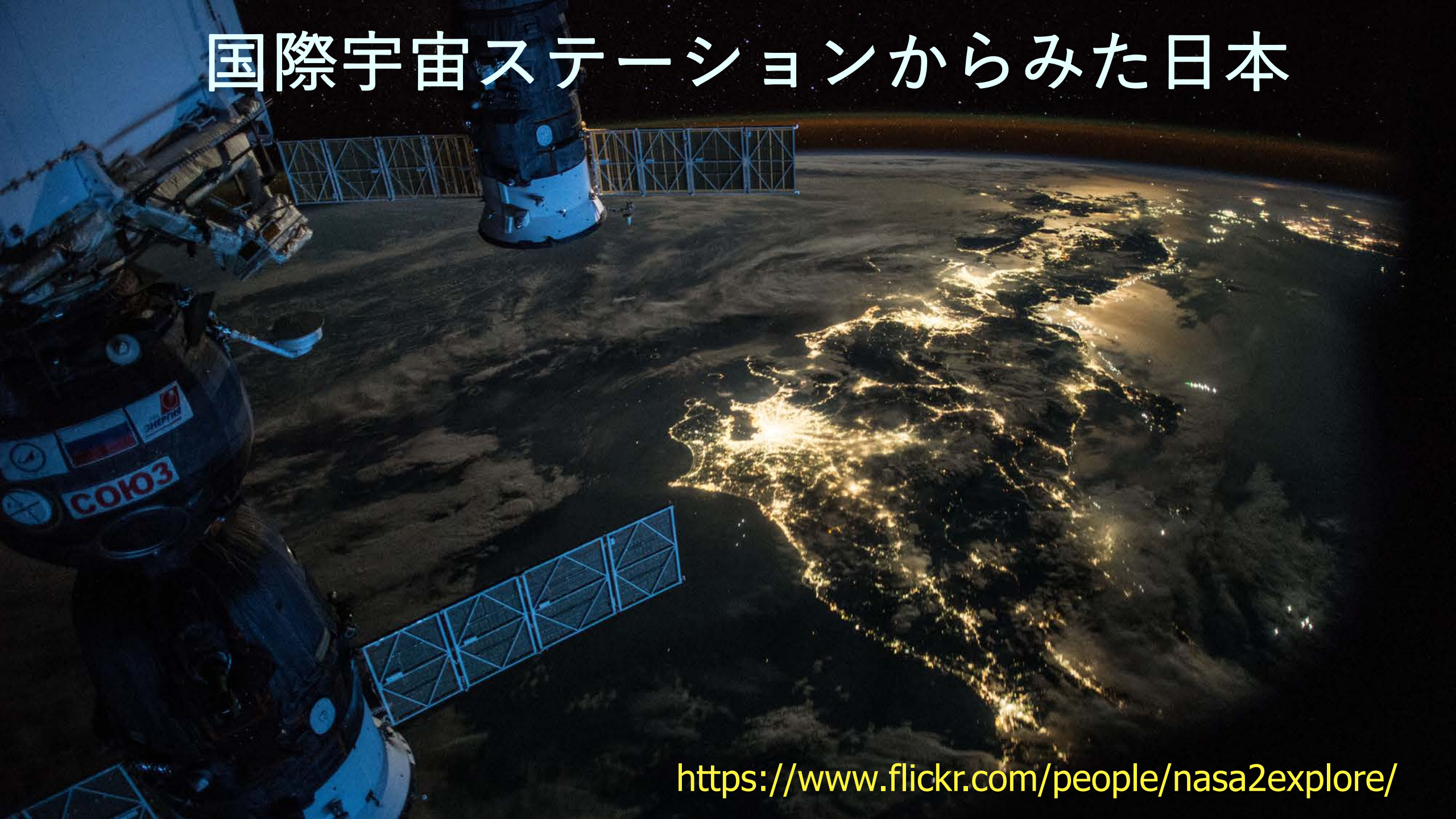
地球の温暖化を表す温度地図



ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros

プランク衛星のデータ(2013)

# 国際宇宙ステーションからみた日本



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



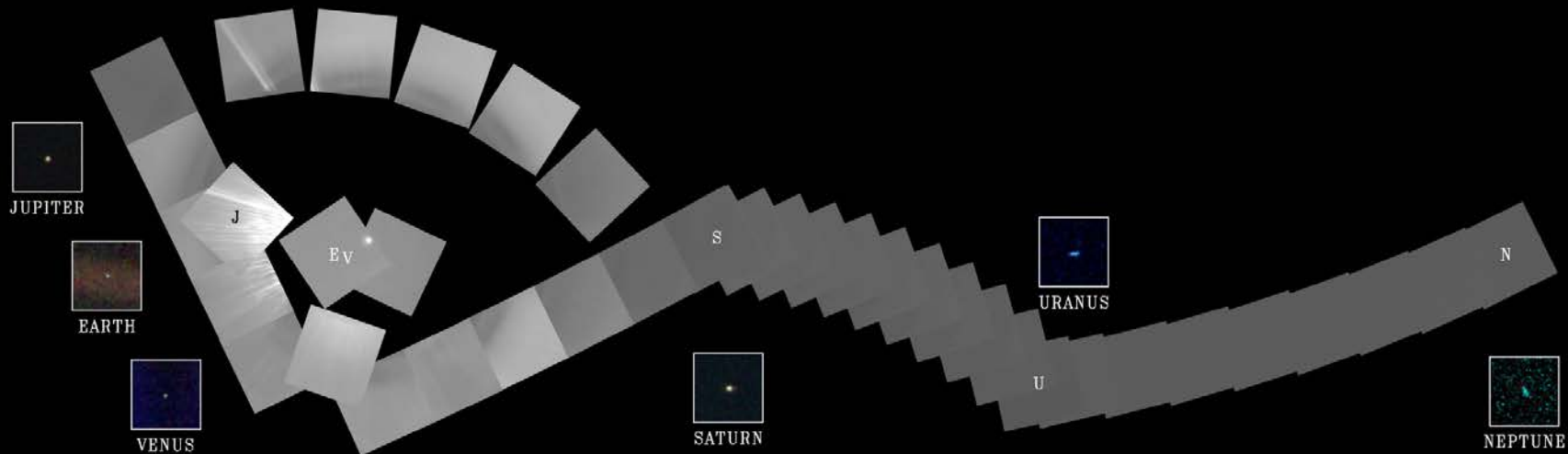
# 国際宇宙ステーションから見た地球と天の川

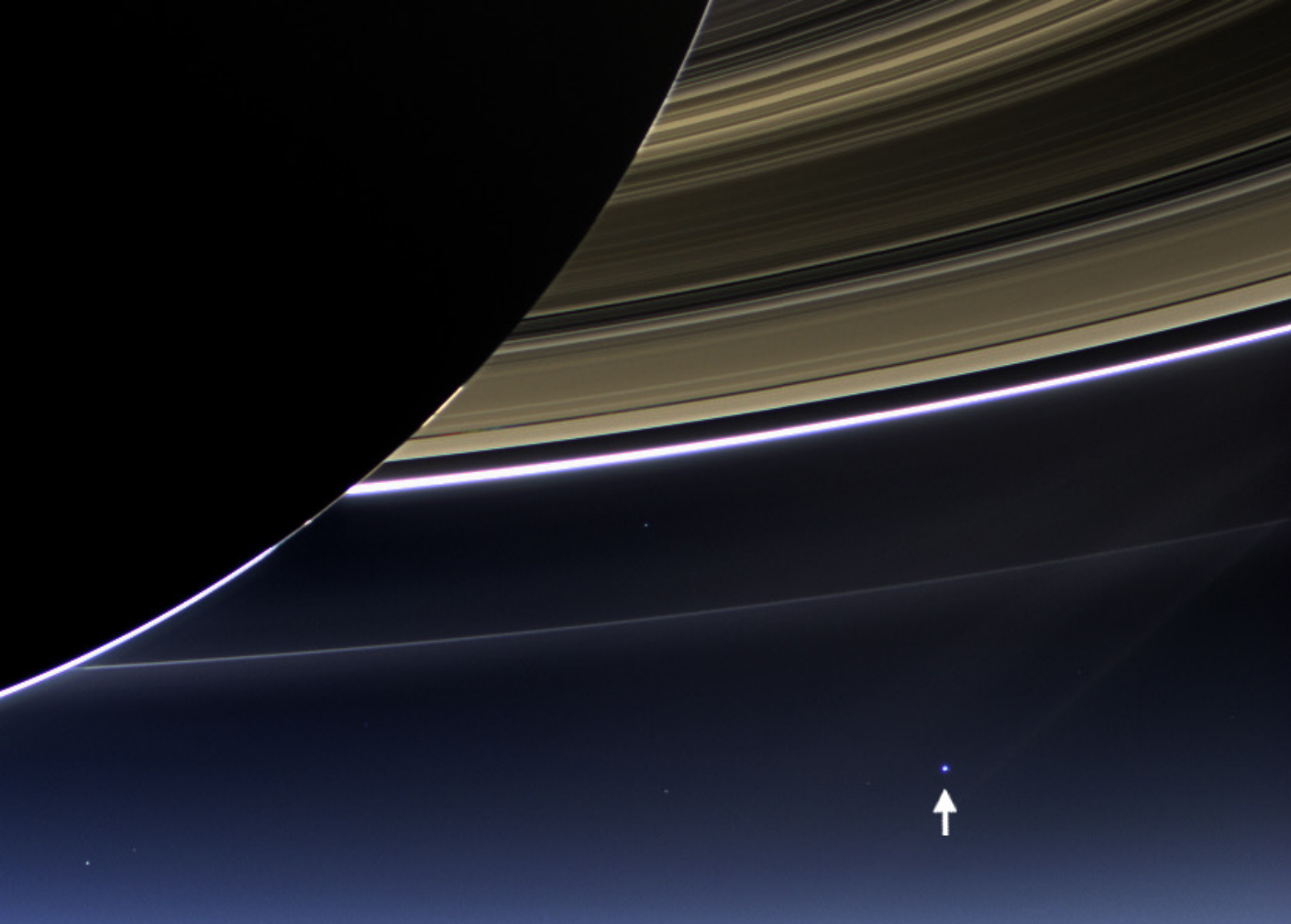


<https://www.flickr.com/people/nasa2explore/>

# ボイジャーから見た地球 ペイル・ブルー・ドット

カール・セーガンの依頼で1990年に太陽系の外縁部、約60億kmのかなたから、ボイジャー1号によって撮影された地球



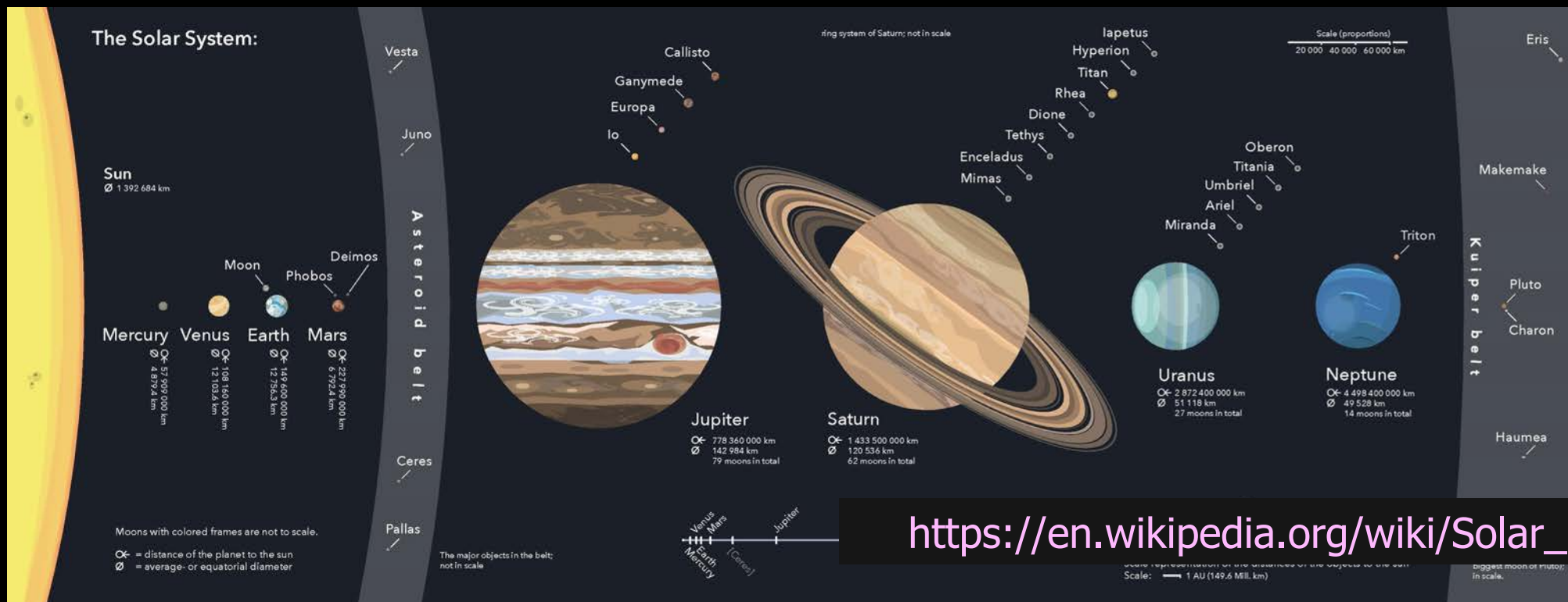


## 土星から見た地球

- 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）：2万人の米国人がこちらに手を振っている



# この太陽系は平凡なのか、あるいは特別なのか



- 恒星の周りの惑星（1995年初発見）の存在は普遍的であることが確立
- 生命を宿す惑星は未だ地球以外には知られていないが、、、

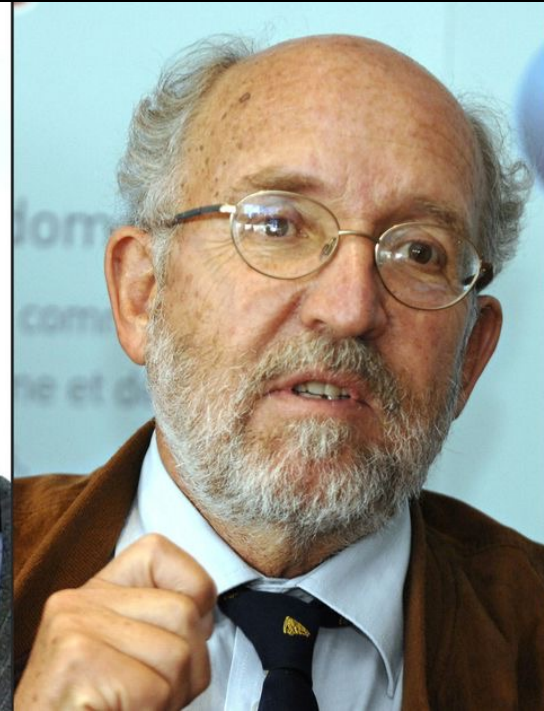
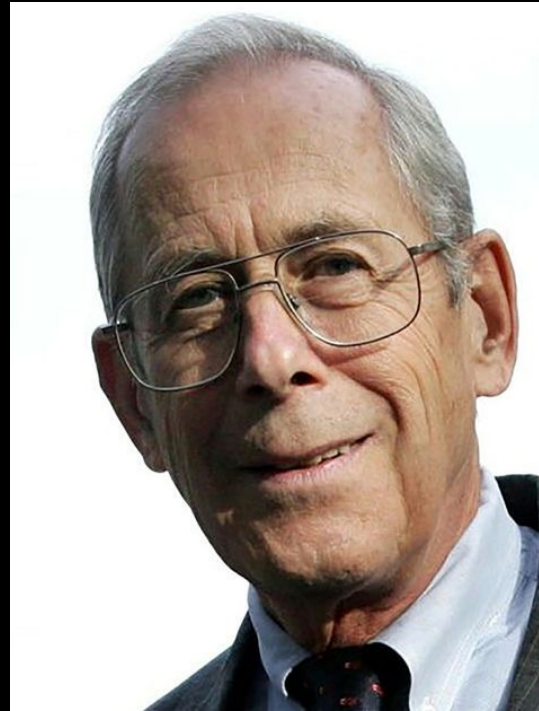
# 天文学の発展

= 宇宙における地球と人類の存在を相対化する歴史

2019年

ノーベル物理学賞

宇宙の進化と、宇宙におけるこの地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献



ジェームズ・ピーブルズ ミシェル・マイヨール ディディエ・ケロー

- 地球も太陽も天の川銀河も宇宙の中心ではない
  - 宇宙ではあらゆる存在・場所が特別な位置を占めていない
- ⇒ とすれば、この宇宙で地球以外に生命が存在しないのは不自然では？

## 2 宇宙と天体と生命の共進化

# 138億年の宇宙の進化史

## ■ t~3分: ビッグバン元素合成

- 陽子と中性子からヘリウムの原子核が合成される

## ■ t=38万年: 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
- その当時の光が現在観測されている宇宙マイクロ波背景放射

## ■ t=数億年: 第一世代天体（ファーストスター）の誕生

- 誕生した星の中心で重元素が合成され、それらが星の進化とともに宇宙空間に撒き散らされる。この過程を何度も繰り返すことで宇宙に元素が蓄積される（宇宙の元素循環）

## ■ t=138億年: 惑星・恒星・銀河からなる階層的構造の宇宙

# 宇宙は物理法則にしたがって進化する

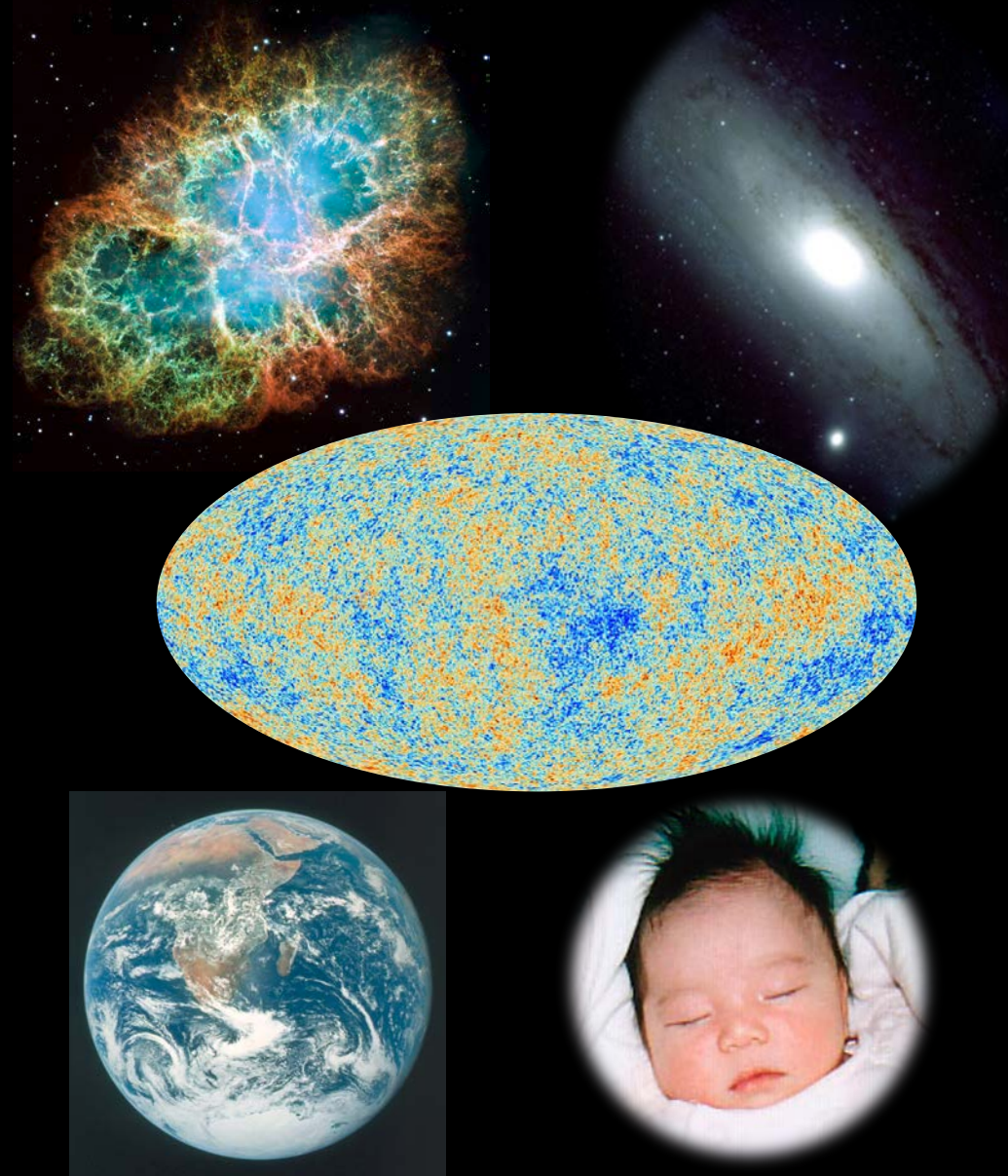
物理法則



初期条件

高温高密度(ビッグバン)

ミクロの世界とマクロの世界をつなぐ

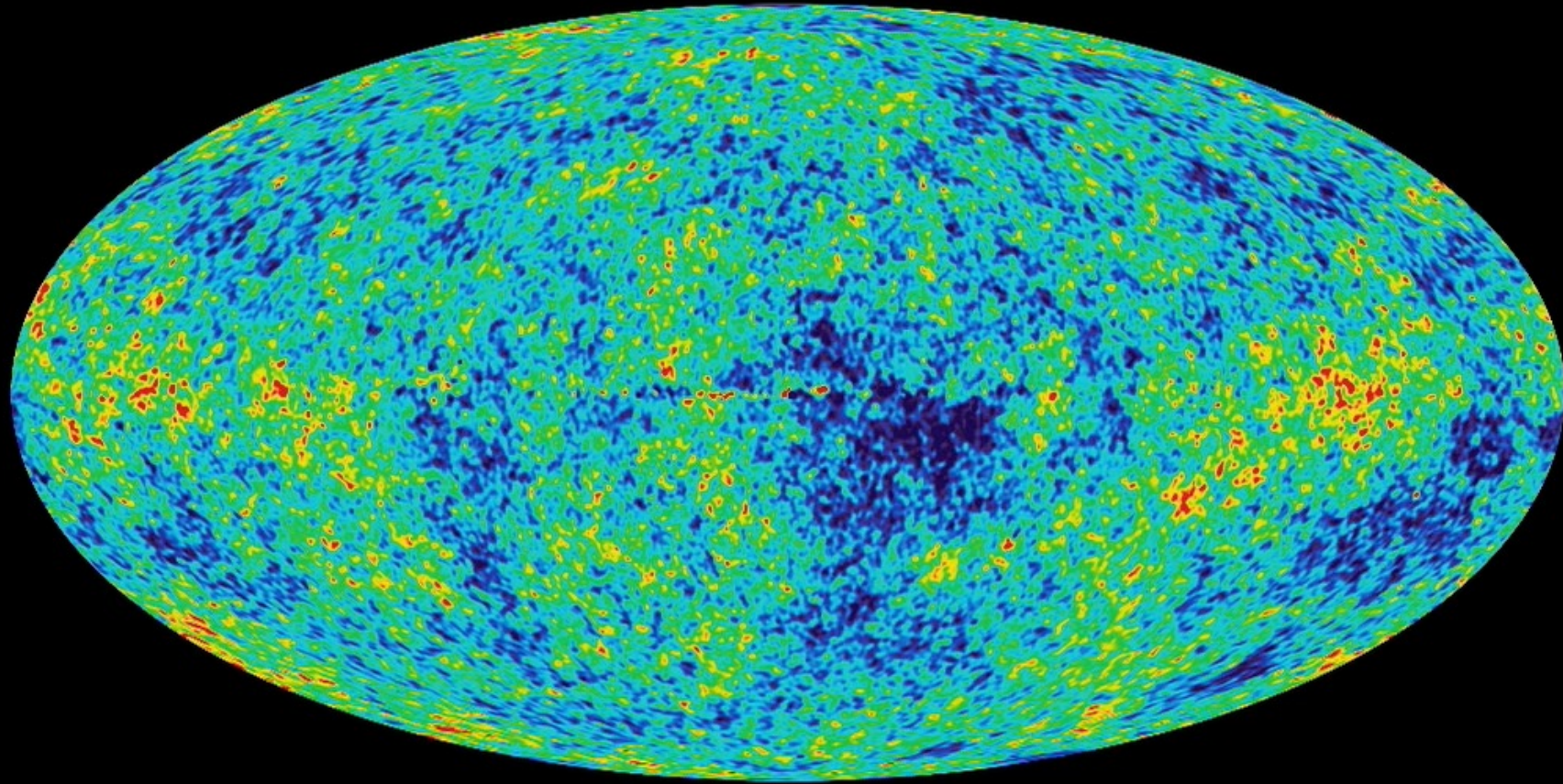




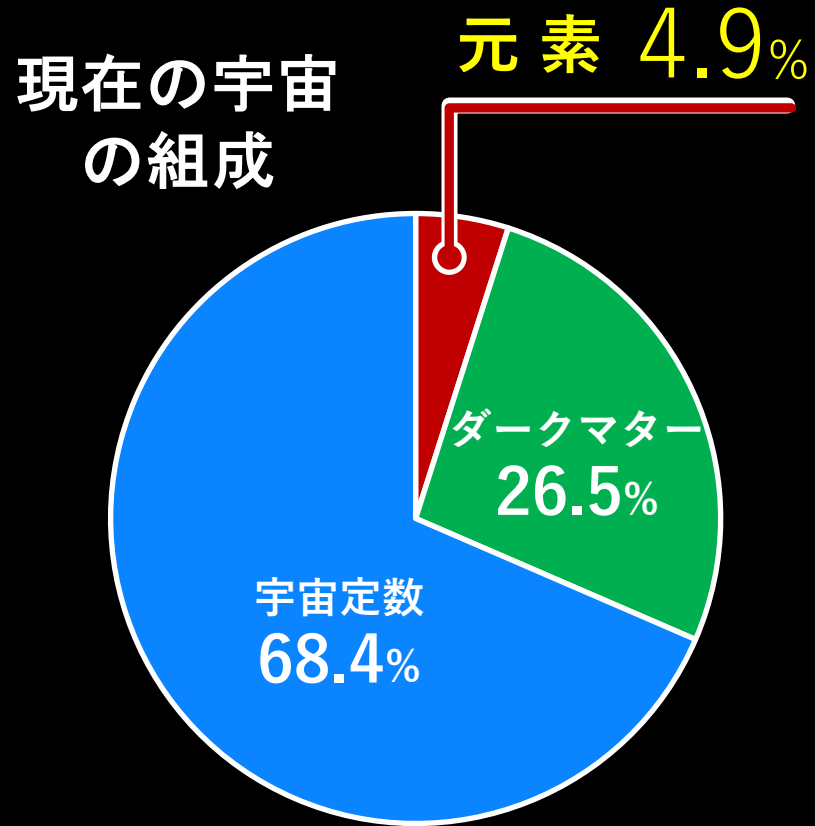
# 自然界の4つの力と宇宙の元素合成

- **宇宙初期は極めて高温かつ高密度（ビッグバン）**
    - 1000億度以上の高エネルギー状態では、陽子と中性子はばらばらのままで元素（原子核）を合成できない
    - 宇宙の温度が一億度以下になると、陽子2個と中性子2個からなるヘリウムの原子核が合成される（宇宙誕生最初の3分間）
    - それから数億年後以降、星の中心部での原子核反応の結果、徐々に重い元素が形成され、星の最期に宇宙空間に撒き散らされる（元素循環）
  - **元素合成過程の本質は基礎物理学**
    - 陽子と中性子間の引力：強い力
    - 陽子同士の反発力：電磁気力
    - 中性子と陽子の相互変換：弱い力
    - 重元素が合成される場所は大質量星の中心部：重力
- 自然界の4つの力がすべて関与  
⇒ 宇宙の元素合成と元素循環は  
物理法則による必然的帰結

# 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138億年への構造進化

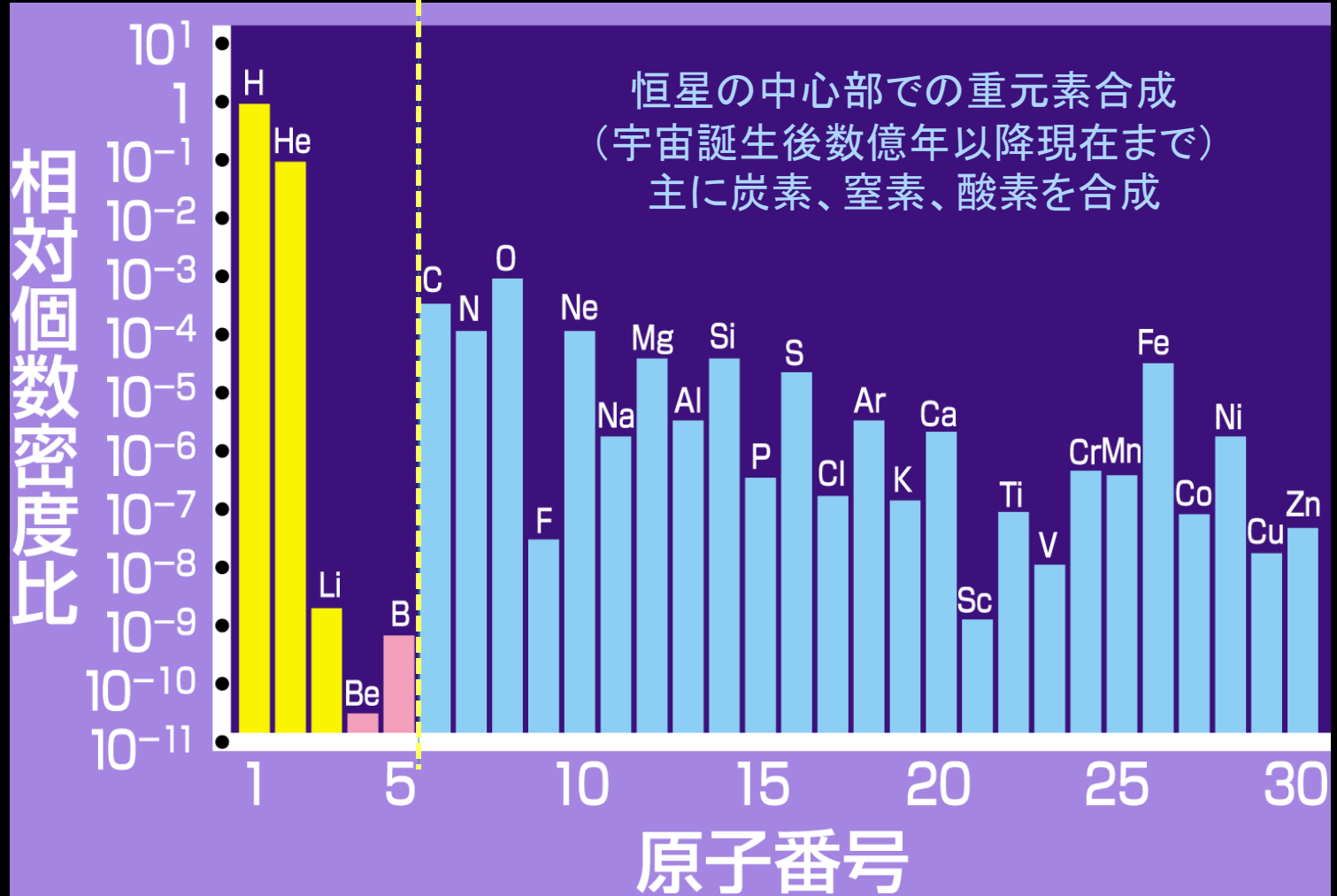


# 宇宙の組成と元素の組成



宇宙の力学進化は、主成分である宇宙定数(ダークエネルギー)とダークマターで決まる。一方、その中の天体(そして生命)の普遍性と多様性は残りわずか5%の元素で決まっている

ビッグバン元素合成  
(宇宙誕生後約3分間)  
主にヘリウムを合成



# ヒトを構成する元素と宇宙のかかわり

太陽	%	海水	%	ヒト	%
水素	70.7	酸素	85.8	酸素	65
ヘリウム	27.4	水素	10.8	炭素	18
酸素	0.96	塩素	1.9	水素	10
炭素	0.31	ナトリウム	1.1	窒素	3
ネオン	0.17	マグネシウム	0.13	カルシウム	1.5
鉄	0.14	硫黄	0.09	リン	1.0
窒素	0.11	カルシウム	0.04	イオウ	0.25
ケイ素	0.07	カリウム	0.04	カリウム	0.20
マグネシウム	0.07	臭素	0.007	塩素	0.15
イオウ	0.04	炭素	0.003	ナトリウム	0.15

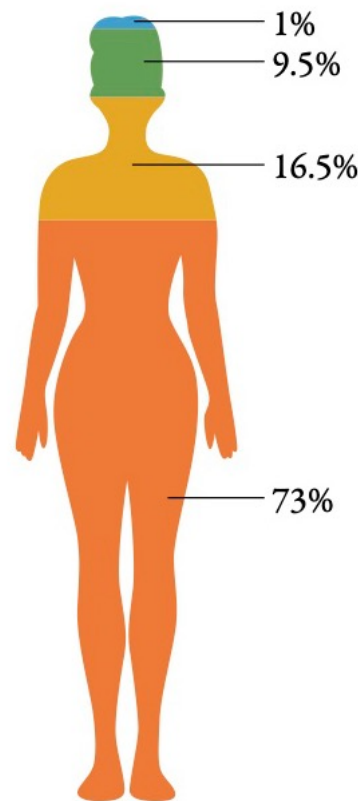
太陽、海水、およびヒトを構成する元素の質量組成

- ヒトの質量の約6割は水
  - 生命における水の重要性
  - 水を構成する水素と酸素は宇宙に大量に存在する元素
- 生命は有機化合物からなる
  - 炭素原子は4つの結合手を持ち、多様かつ安定な分子を形成できる
  - 炭素もまた、宇宙に大量に存在する元素の一つ
- 星の中心部で形成された酸素や炭素、窒素が、我々の体の主な原材料

# 宇宙 ⇒ 星 ⇒ 元素 ⇒ 人間 (=星の子供)

H 水素																			
Li リチウム	Be ベリリウム																		
Na ナトリウム	Mg マグネシウム																		
K カリウム	Ca カルシウム	Sc スカンジウム	Ti チタン	V バナジウム	Cr クロム	Mn マンガン	Fe 鉄	Co コバルト											
Rb ルビジウム	Sr ストロンチウム	Y イットリウム	Zr ジルコニウム	Nb ニオブ	Mo モリブデン	Tc テクネチウム	Ru ルテチウム	Rh ロジウム											
Cs セシウム	Ba バリウム	ランタノイド	Hf ハフニウム	Ta タンタル	W タングステン	Re レニウム	Os オスミウム	Ir イリジウム											
Fr フランシウム	Ra ラジウム	アクチノイド																	
ランタノイド		La ランタン	Ce セリウム	Pr プラセオジム	Nd ネオジム	Pm プロメチウム	Sm サマリウム	Eu ユウロピウム											
アクチノイド		Ac アクチニウム	Th トリウム	Pa プロトアクチニウム	U ウラン														

- ビッグバン  
元素合成
- 低質量星の  
質量放出
- 大質量星の  
超新星爆発
- 宇宙線  
破碎反応
- 中性子連星  
合体
- 白色矮星の  
超新星爆発



										He ヘリウム					
										B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素	F フッ素	Ne ネオン
										Al アルミニウム	Si ケイ素	P リン	S 硫黄	Cl 塩素	Ar アルゴン
Ni ニッケル	Cu 銅	Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As ヒ素	Se セレン	Br 臭素	Kr クリプトン							
Pd パラジウム	Ag 銀	Cd カドミウム	In インジウム	Sn スズ	Sb アンチモン	Te テルル	I ヨウ素	Xe キセノン							
Pt 白金	Au 金	Hg 水銀	Tl タラウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム	At アスタチン	Rn ラドン							
Gd ガドリウム	Tb テルビウム	Dy ジスプロシウム	Ho ホルミウム	Er エルビウム	Tm ツリウム	Yb イタリビウム	Lu ルテチウム								

我々のDNA中の窒素、歯をつくるカルシウム、血液中の鉄、アップルパイに含まれる炭素。これはすべて星の内部で合成された。つまり我々は星の成分からできているのだ。

カール・セーガン 『コスモス』

### 3 見える宇宙のその先にある世界

- 「我々は何も知らなかった」を知る-

# 50年前の私にとっての「世界」の果て = 高知県安芸市から眺める太平洋の水平線

- この水平線は本当に世界の果てなのか？
- その先に別の世界があるのか？
- もしあるならそこに広がる風景はこの世界と同じなのか？

この青空はこの世界の果てなのか？  
その先にも、別の世界が広がっているのか？





この星空の先に  
さらに別の世界が広がっているのか？





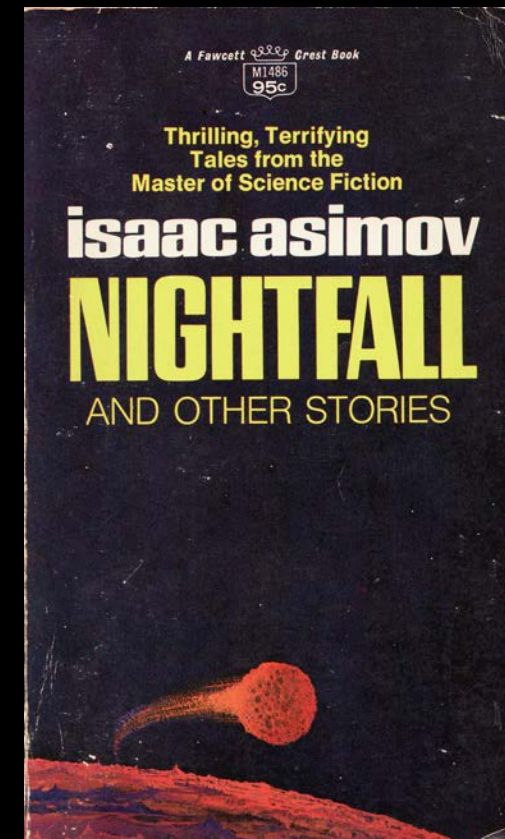
現在観測できる宇宙  
(地平線球)の先にも  
観測できない別の世界が  
広がっているのか？

JWST First Deep Field  
SMACS 0723

<https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/nasa-s-webb-delivers-deepest-infrared-image-of-universe-yet>

# アイザック・アシモフの短編SF小説 「Nightfall (夜来たる)」

- 6つの太陽を持ち「夜」のない惑星ラガッシュ
  - 空に複数の太陽が昇っているためいつも「昼」
- 古来からの伝説によると、約2000年に一度だけラガッシュに「夜」が訪れるという
  - これは、たまたま空に一つしか太陽が昇っていない時に、ラガッシュの内側の惑星が起こす皆既日食
  - 物語はこれから数時間で「夜」が訪れる時から始まる
  - 初めて「夜」を見た瞬間、ラガッシュの住民は何を知ったのか



「我々は何も知らなかった」 (We didn't know anything) ことに気づくことこそが科学の本質



無  
知  
の  
知

- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- 見えない宇宙の先にある「世界」を知る=科学の目的

イラスト： 羽馬有紗

# 4 我々は世界をどこまで理解できるのだろうか



*D'ou Venons Nous / Que Sommes Nous / Où Allons Nous*

# 現代科学に残された3つの究極の謎

## ■ 宇宙の起源

- 宇宙はなぜ誕生したのか
- 宇宙は我々の宇宙だけなのか
- あるいはそれ以外にも多様な宇宙が存在するのか

現在未解明なだけでなく、そもそも答えがある問いかどうかすら不明

## ■ 生命の起源

- 生命はなぜ誕生したのか
- 地球外にも生命は普遍的に存在するのか
- もしそうなら生命はいかなる多様性を持つのか

仮に正解があるとしても、地球人ごときちっぽけな存在がたどり着ける（理解できる）かすらわからないほど魅力的な問い

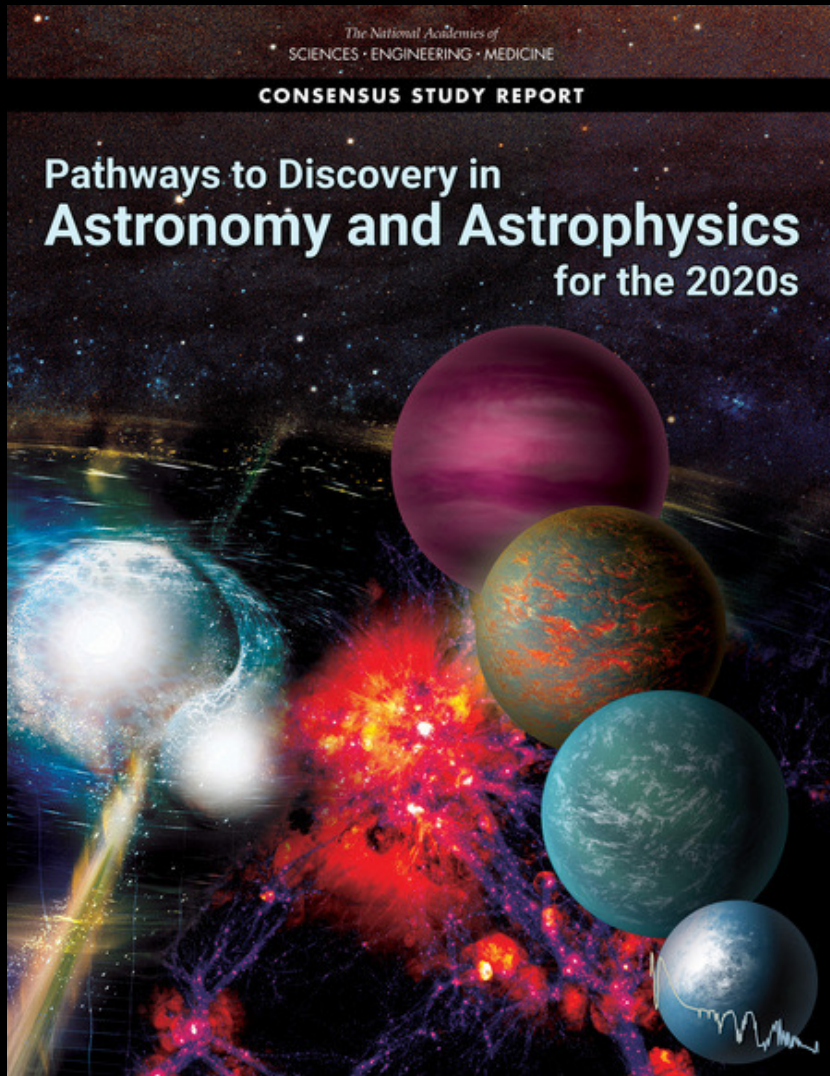
## ■ 意識（知性）の起源

- 意識はなぜ誕生したのか
- 生命(機械) は必然的に意識を獲得するのか
- 地球外に知的文明は存在するのか

# 宇宙において生命は普遍的に存在するか

- 自然法則に支配された宇宙の必然的進化
  - 標準ビッグバン宇宙論の成功
  - 宇宙膨張、元素合成、宇宙マイクロ波背景輻射、宇宙の階層構造、など、あらゆる観測事実と無矛盾
- 天体の形成・進化 = 宇宙の元素合成・循環史
  - 天体の中心部で合成された元素が宇宙全体に放出され、次世代の天体の原材料として輪廻転生を繰り返す
- 宇宙進化史 = 生命進化史？
  - このような宇宙では生命もやはり必然的に生まれる？
  - 哲学的な議論にとどまらず、直接検証可能な時代に！

# 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

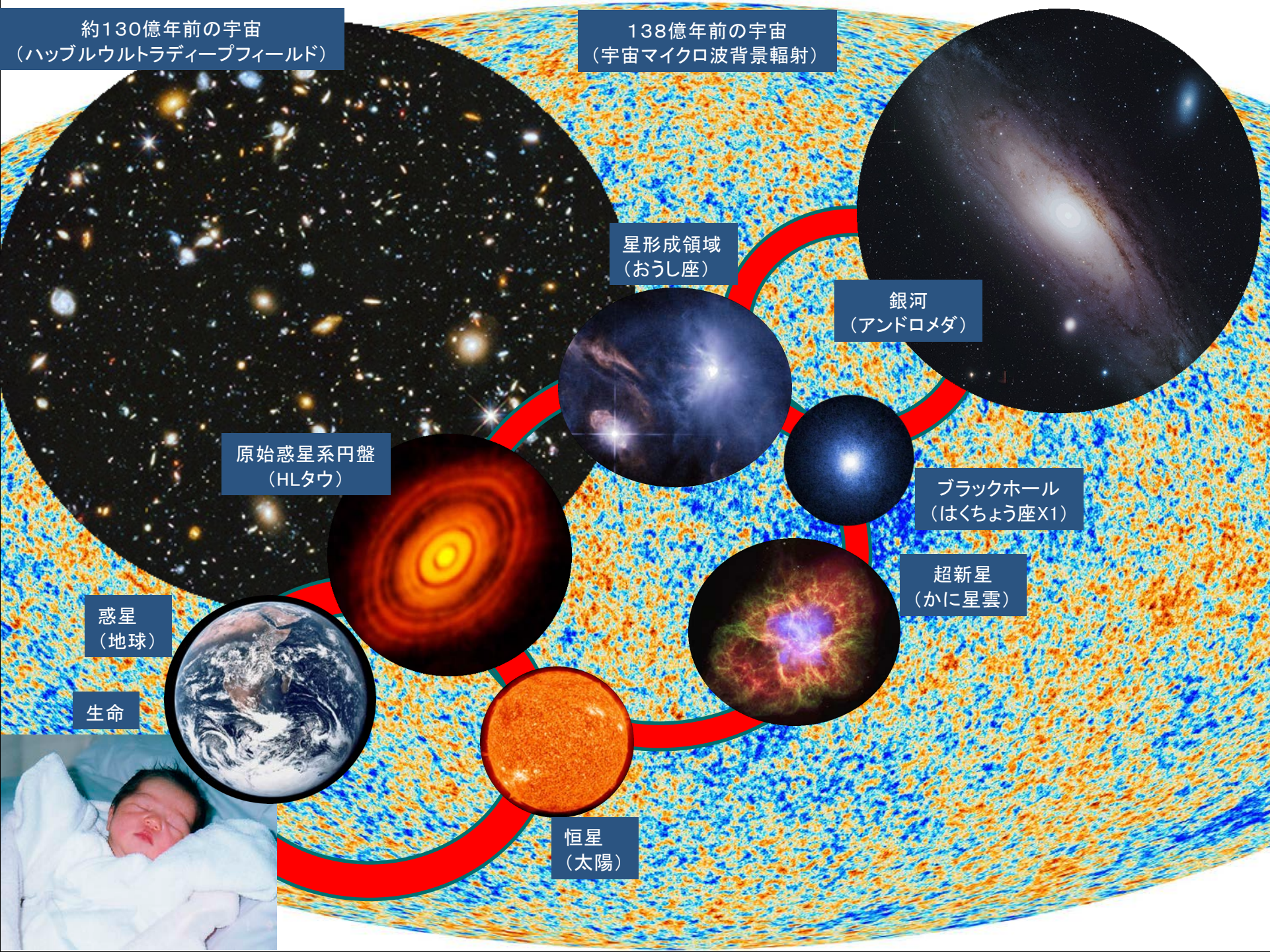
- **Recommendation:** After a successful mission and technology maturation program, NASA should embark on a program to realize a mission to **search for biosignatures from a robust number of about ~25 habitable zone planets** and to be a transformative facility for general astrophysics. If mission and 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**

# 米国の惑星科学者 故カール・セーガンの言葉

- 自然法則で禁止されていないことはすべて必然である
- 地球人だけじゃこの広い宇宙がもったいない
- 誰も成功を保証できない。でももっと大切な疑問があるだろうか？ もし誰かが我々に信号を送り続けているにもかかわらず地球上の誰一人それを聞こうとしていないなんて、なんと馬鹿げたことだろう
- この広い宇宙のどこかで、誰も予想もできないほどすごい何かが、発見されるのをずっと待ち続けている

『コンタクト』 (1986)

138億年の宇宙史における天体の進化



宇宙の元素循環と生命の誕生・進化