

2020年12月12日

西宮湯川記念科学セミナー

広がる宇宙・つながる世界

原始宇宙のこだまが明らかにした宇宙進化史
と系外惑星の世界

樽家 篤史 (基礎物理学研究所)

はじめに

コロナ禍で鬱々とした日々を過ごしがちかもしれません

少しの間、日常を忘れて

宇宙について思いを馳せることにしましょう

今日の話聞いて

日々の生活を少しでもリフレッシュできれば幸いです

今日、お話しすること

講演の概要

宇宙に関する様々な発見から得られた知見

大きな
スケール

膨張する宇宙の歴史と浮かび上がった大きな謎

小さな
スケール

太陽系外に存在する多様な惑星世界

10桁以上もの異なるスケールの発見・知見が

我々の宇宙観・世界観を変えた

2019年 ノーベル物理学賞



ジェームズ・ピーブルス
James Peebles

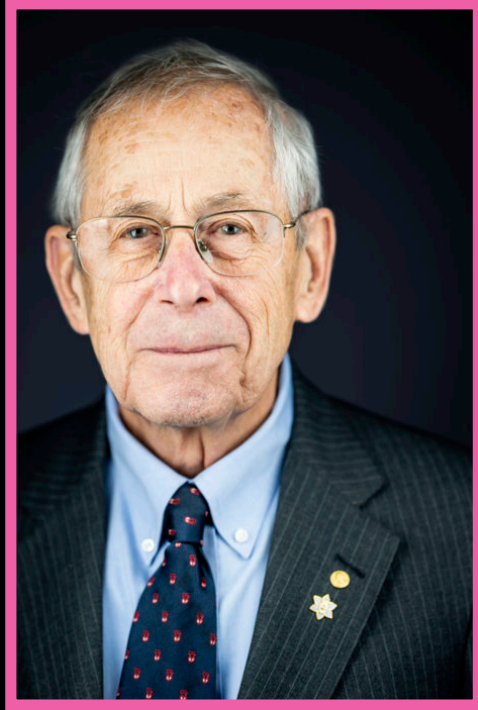


ミシェル・マイヨール
Michel Mayor



ディディエ・ケロー
Didier Queloz

2019年 ノーベル物理学賞



ジェームズ・ピーブルス
James Peebles



ミシェル・マイヨール
Michel Mayor



ディディエ・ケロー
Didier Queloz

物理学的宇宙論における数々の理論的発見

2019年 ノーベル物理学賞



ジェームズ・ピーブルス
James Peebles



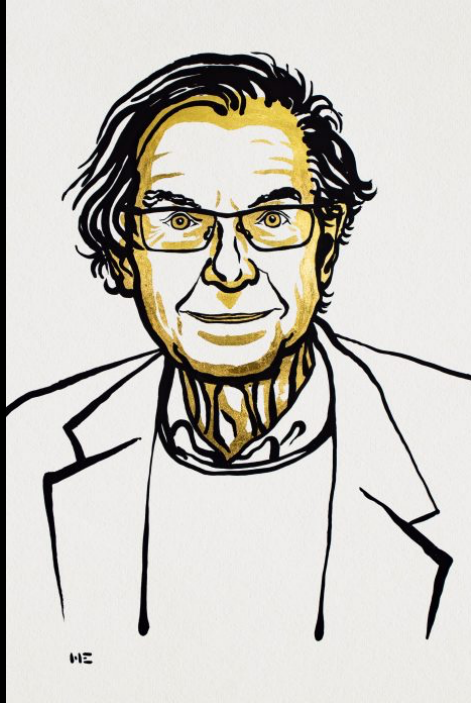
ミシェル・マイヨール
Michel Mayor



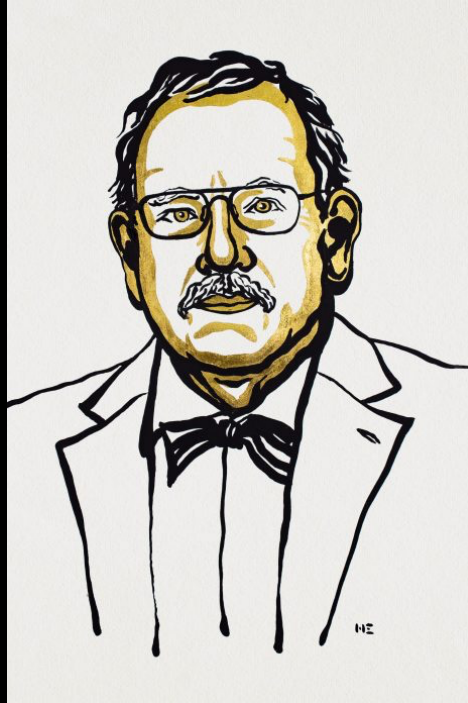
ディディエ・ケロー
Didier Queloz

太陽系外惑星の発見

2020年 ノーベル物理学賞



ロジャー・ペンローズ
Roger Penrose



ラインハルト・ゲンツェル
Reinhard Genzel



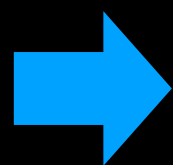
アンドレア・ゲズ
Andrea Ghez

ブラックホールに関する数々の発見でこれまた宇宙で受賞！
こちらはまたの機会に...

第I部

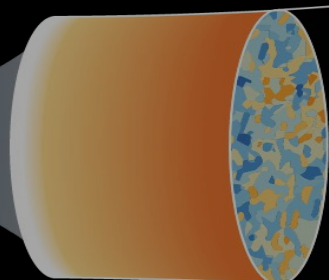
ピーブルス博士の功績

現代的視点にもとづき、ビッグバン（宇宙の始まり）から現在まで、宇宙を理解する理論的枠組みを作り上げた（1960年代～1980年代）



物理学的宇宙論
Physical cosmology

ビッグバン



冷たい暗黒物質、暗黒エネルギーの存在を予言（1980年代）

→標準モデルの確立

宇宙のこだまに対する理論的予言
（1970年）

140億年

時間

宇宙の大きさ

宇宙の謎を紐解く鍵

2つの観測

宇宙マイクロ波背景放射

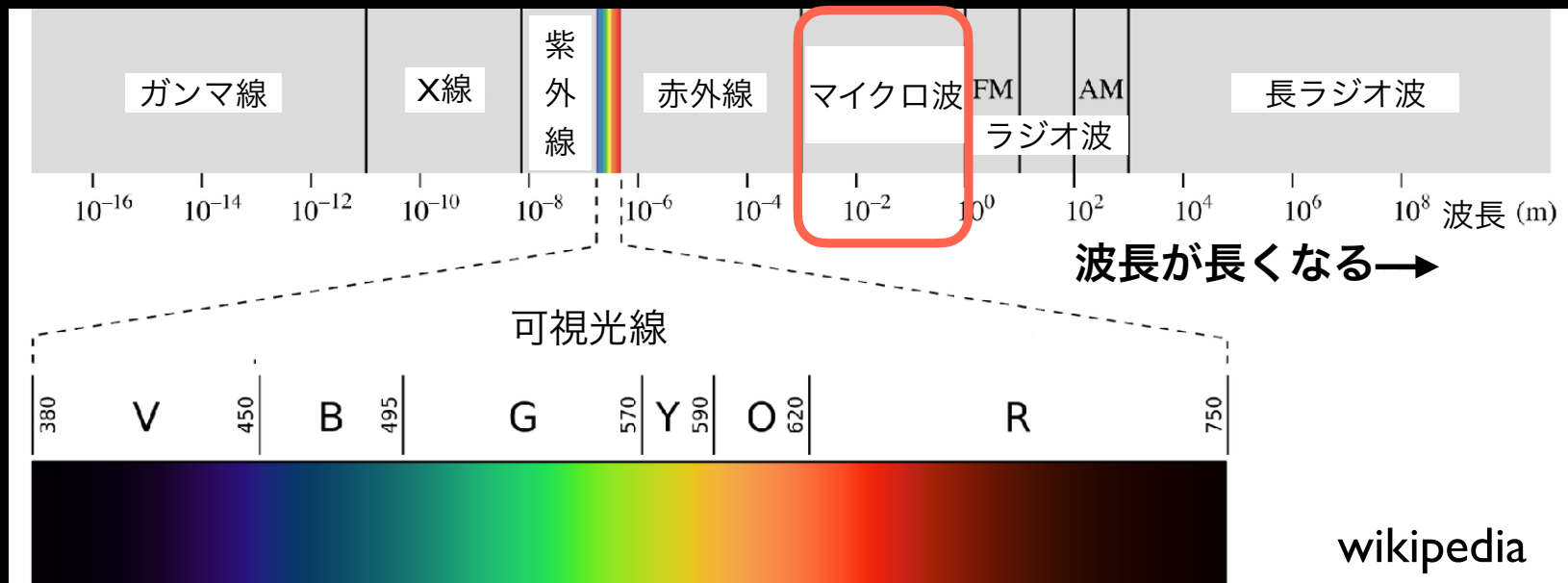
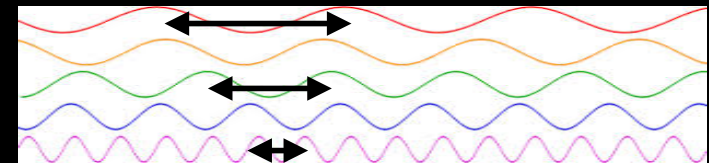
宇宙の大規模構造

宇宙マイクロ波背景放射

マイクロ波とは？ 電磁波の一種

電磁波 = 波の性質を持った「光」のこと

波長で呼び名が変わる



宇宙マイクロ波背景放射

宇宙マイクロ波背景放射とは？

波長 2 mm の電磁波（光）が全天に満ち満ちている様子

宇宙マイクロ波背景放射

宇宙マイクロ波背景放射とは？

波長 2 mm の電磁波（光）が全天に満ち満ちている様子

1965年、ペンジアスとウィルソンにより発見



1978年、ペンジアスとウィルソンに
ノーベル物理学賞

<https://www.extremetech.com/extreme/>

宇宙マイクロ波背景放射

宇宙マイクロ波背景放射とは？

波長 2 mm の電磁波（光）が全天に満ち満ちている様子

1965年、ペンジアスとウィルソンにより発見

非常に小さい「ゆらぎ」があることが知られている

（1992年に発見）

ゆらぎの大きさ（振幅）は、

わずか 10 万分の 1 !



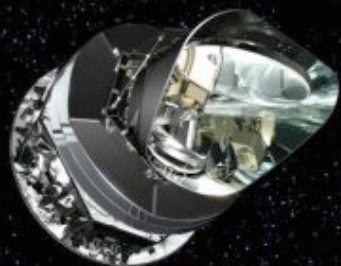
スムート



マザー

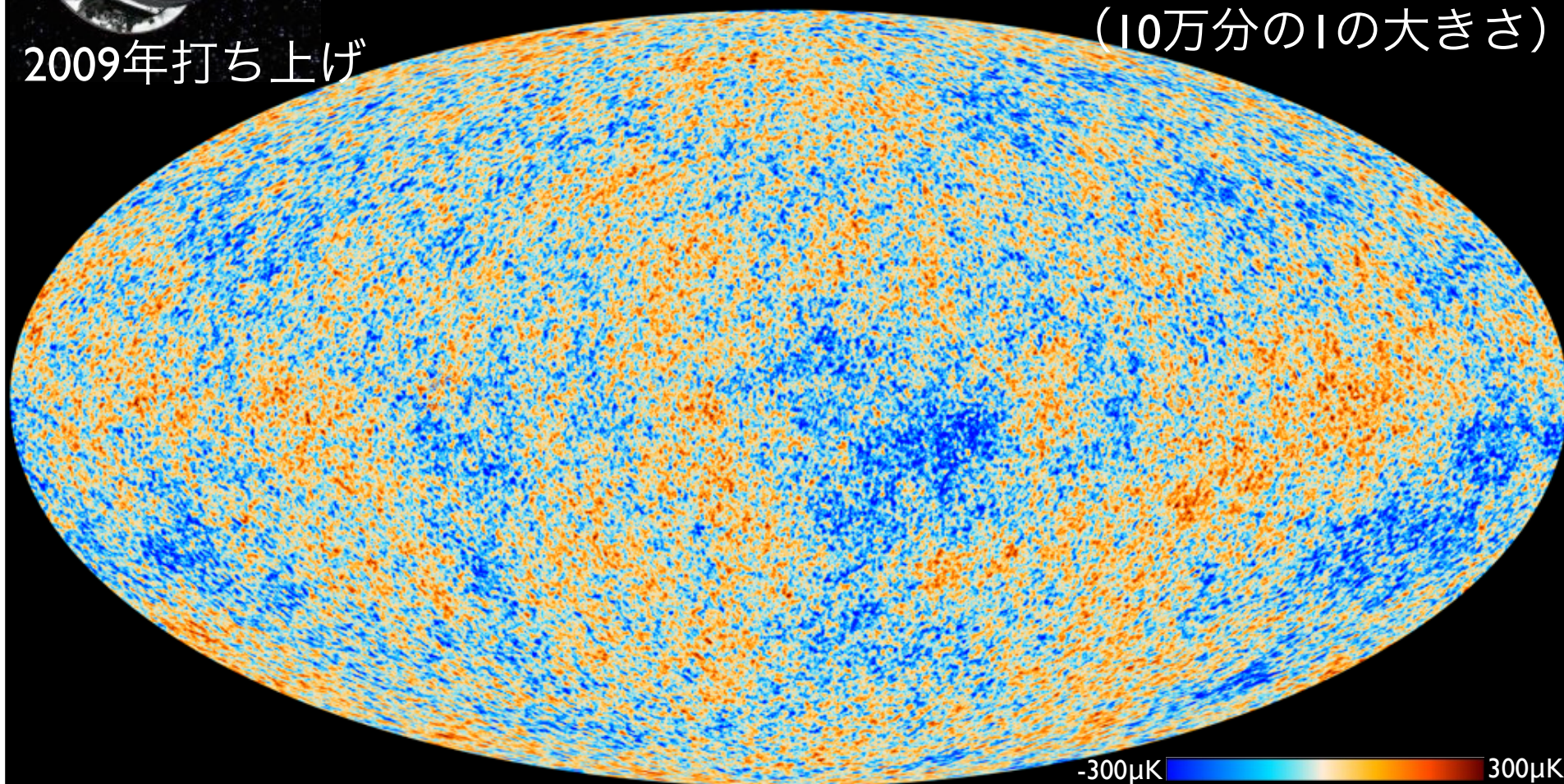
2006年ノーベル物理学賞受賞

Planck 衛星による高精細観測



2009年打ち上げ

無数の小さなスポット
からなる構造
(10万分の1の大きさ)



宇宙の大規模構造

宇宙の大規模構造とは？

銀河サーベイを通じて観測される

無数の銀河が織りなす巨大な空間パターン

銀河サーベイ：遠方の銀河1つ1つをくまなく探索

→ **銀河の3次元地図**を作成

ハワイ島マウナケア山頂の望遠鏡群



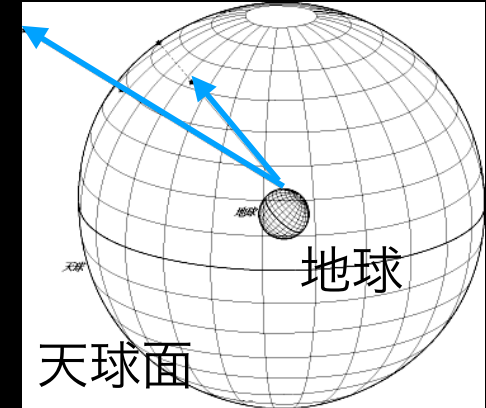
すばる望遠鏡

<https://subarutelescope.org/jp/gallery/facility/1998/11/24/785.html>

宇宙の大規模構造

銀河の3次元地図の作成方法

- 天球面上の位置
- 奥行き： **赤方偏移**

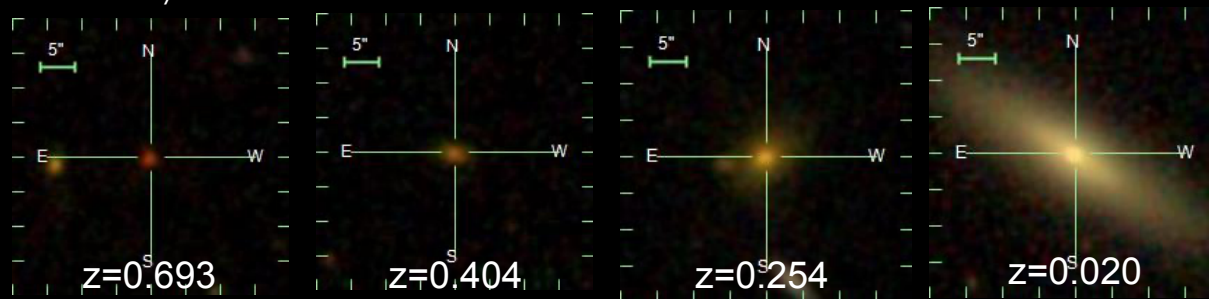


<https://www.astroarts.co.jp/alacarte/kiso/kiso02-j.shtml>

遠い天体ほど赤く見える (ハッブル=ルメートルの法則)

宇宙が膨張している証拠

SDSS SkyServerより



遠い



近い



ハッブル

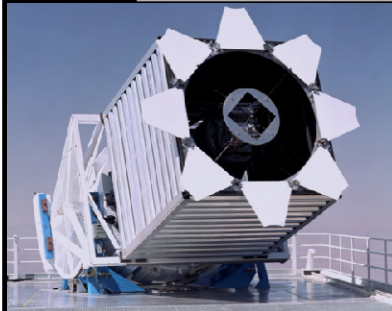
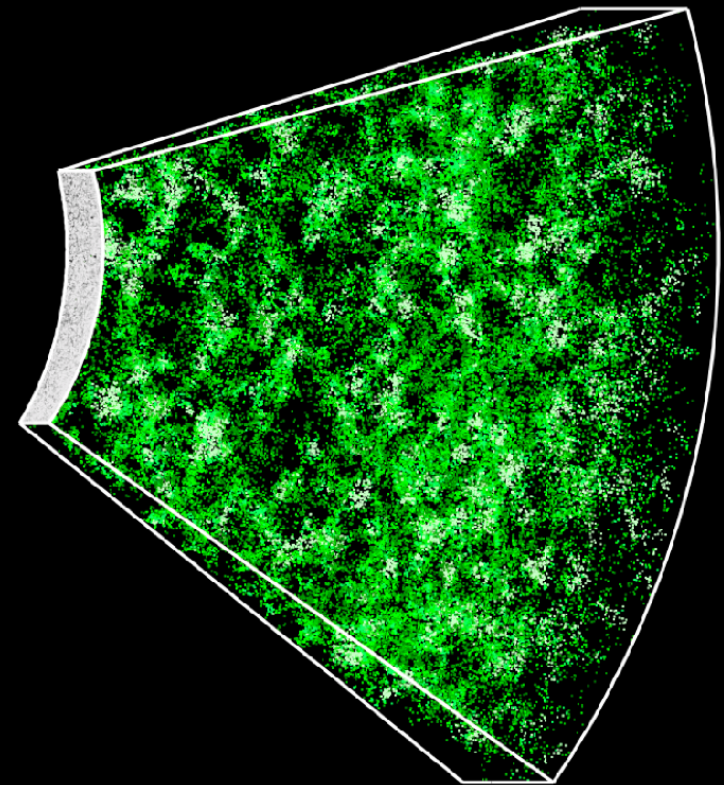
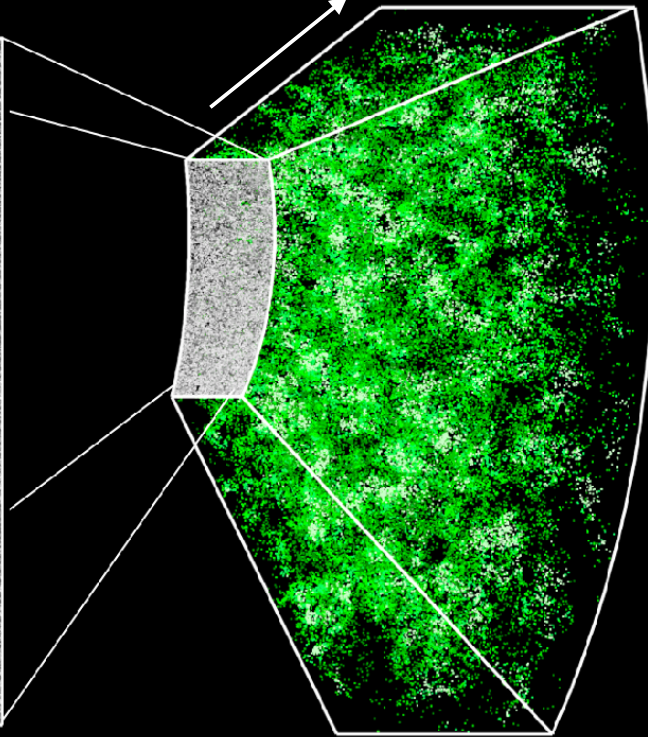
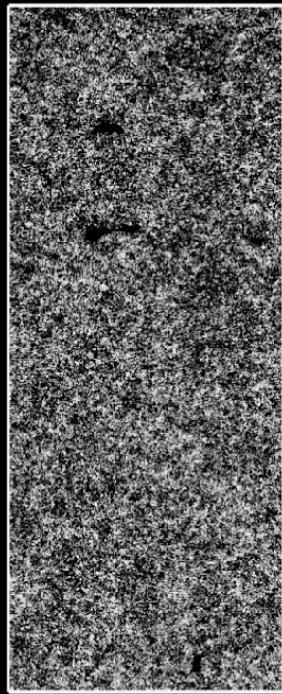


ルメートル

宇宙の大規模構造

天球面上の銀河
(120,000個)

赤方偏移



光学望遠鏡

銀河の分布が3次元的に

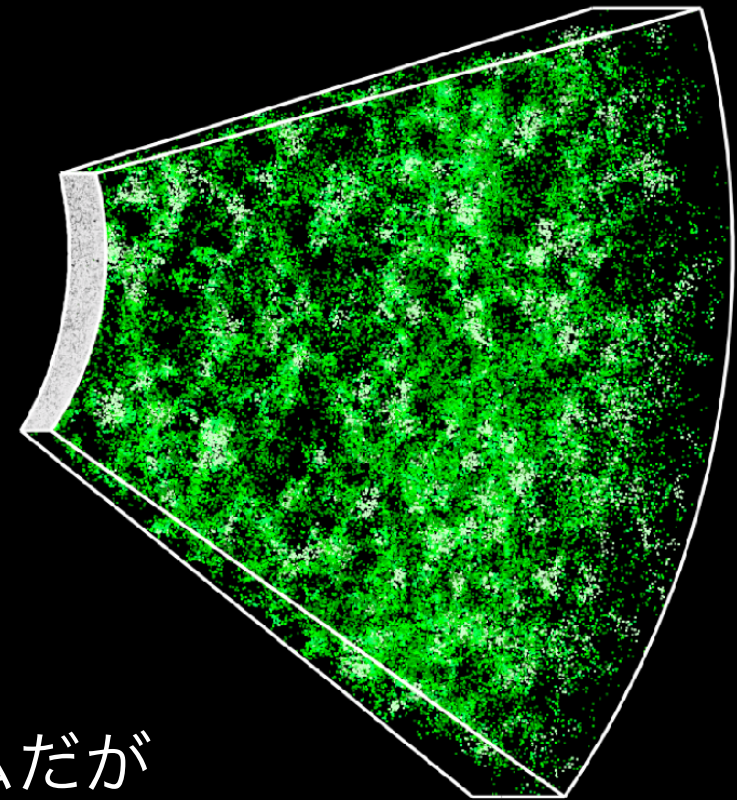
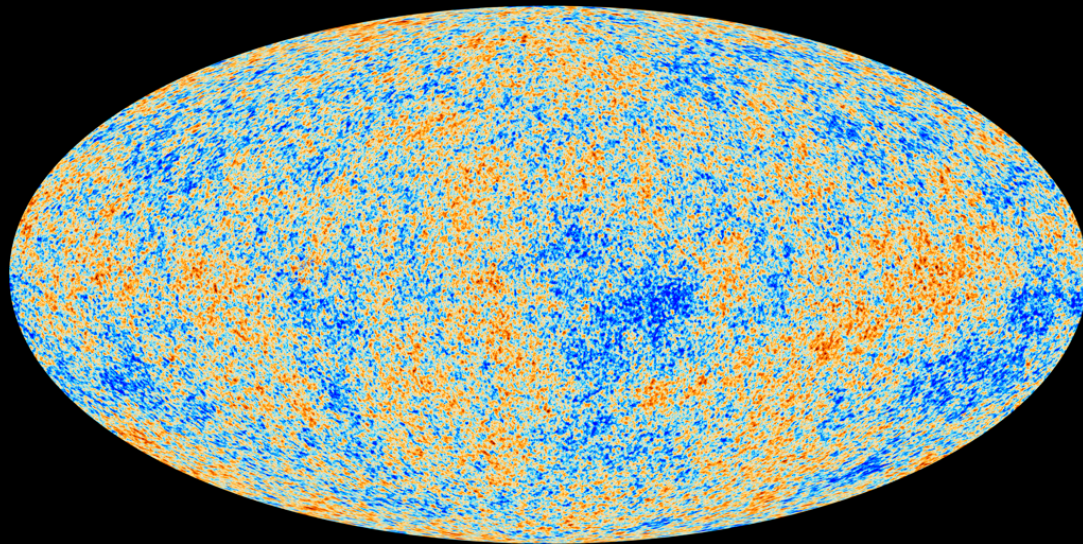
宇宙の大規模構造

スローンデジタルスカイサーベイ eBOSS が見た宇宙

比較すると...

宇宙マイクロ波背景放射

宇宙の大規模構造



どちらも「ゆらぎ」はランダムだが

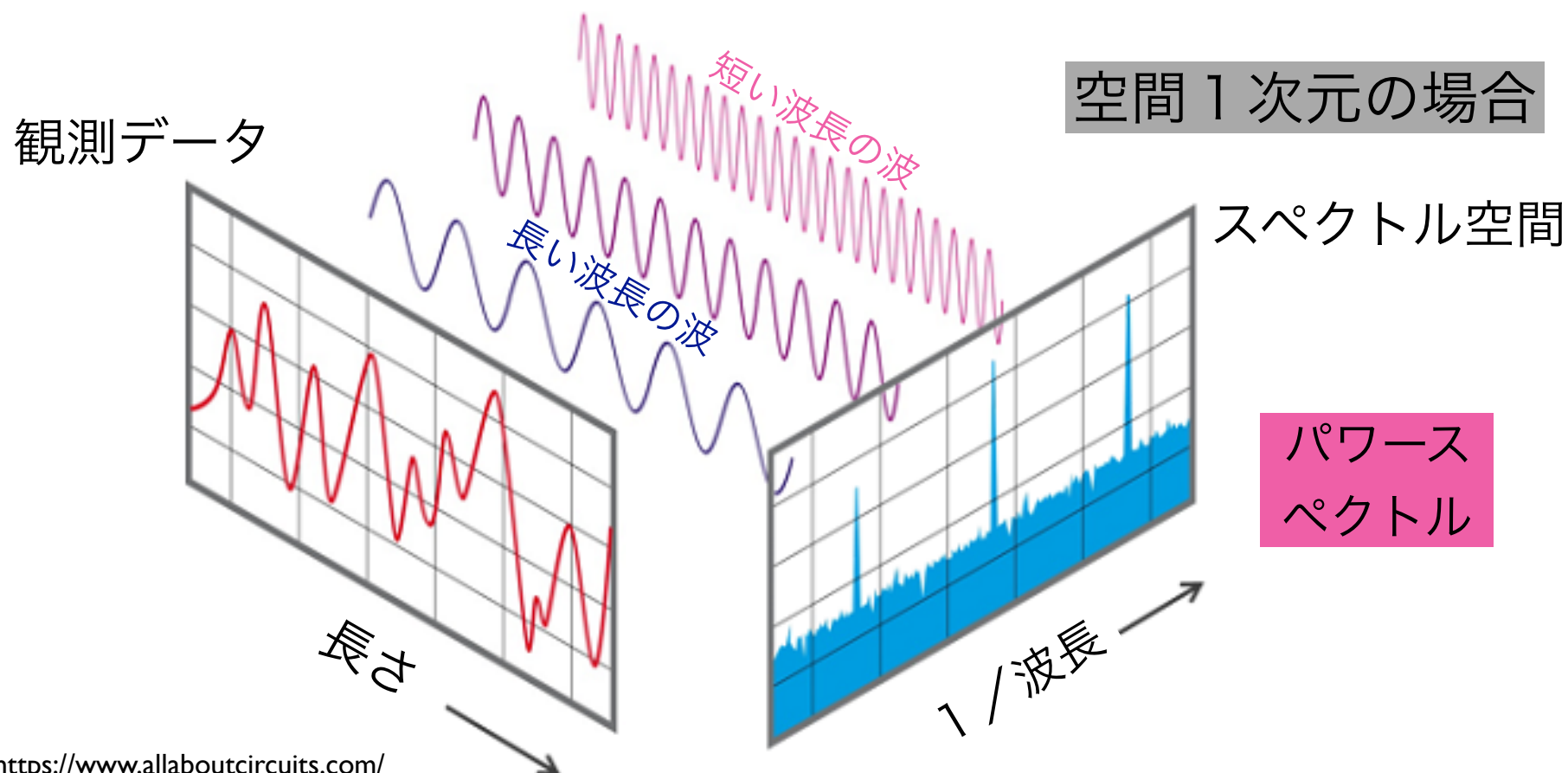
一見するとお互い異なる分布に見える

スペクトル解析

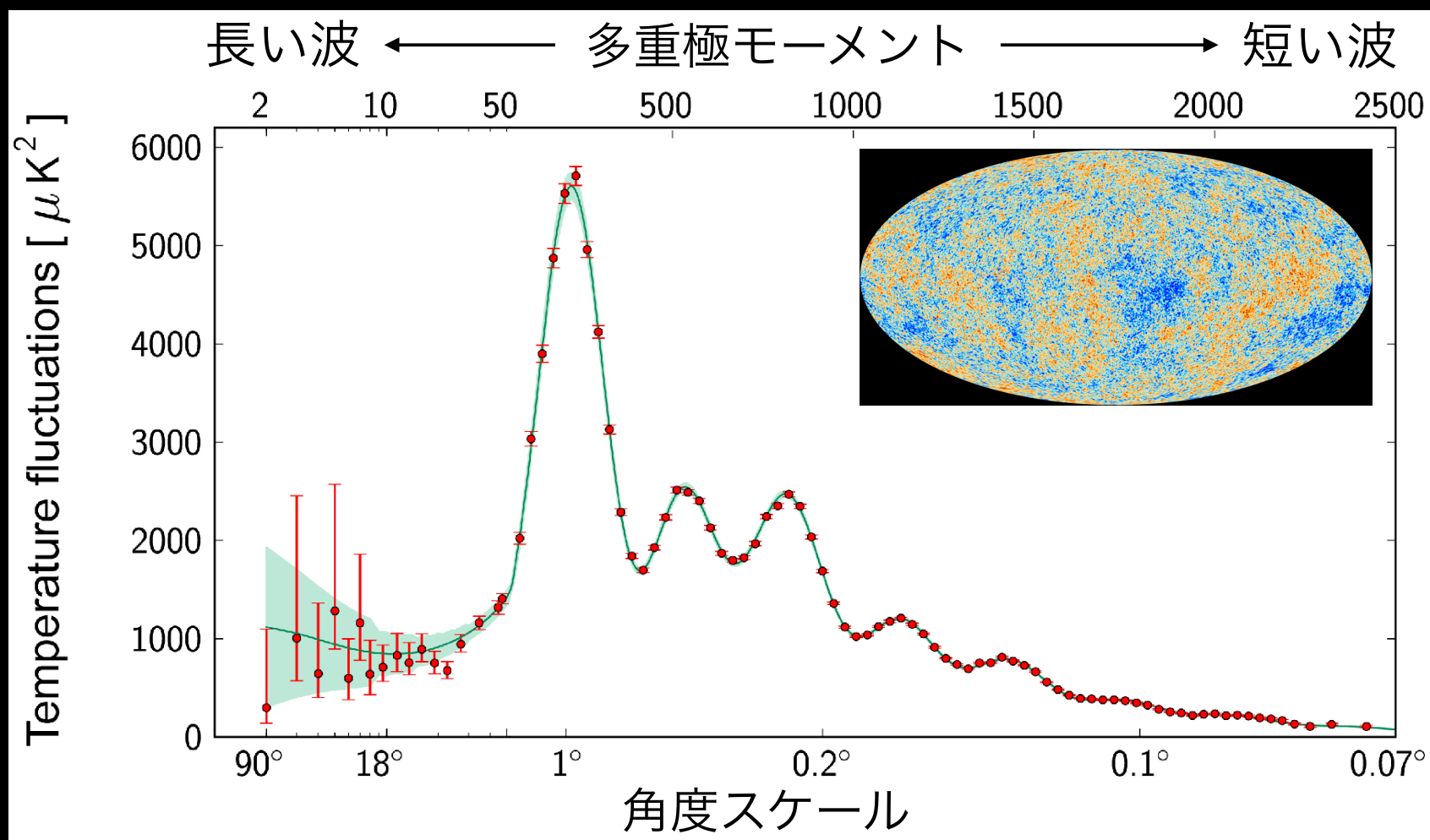


ランダム分布の性質を探る強力な手法

観測データをいろんな波長の波の集まりで表現

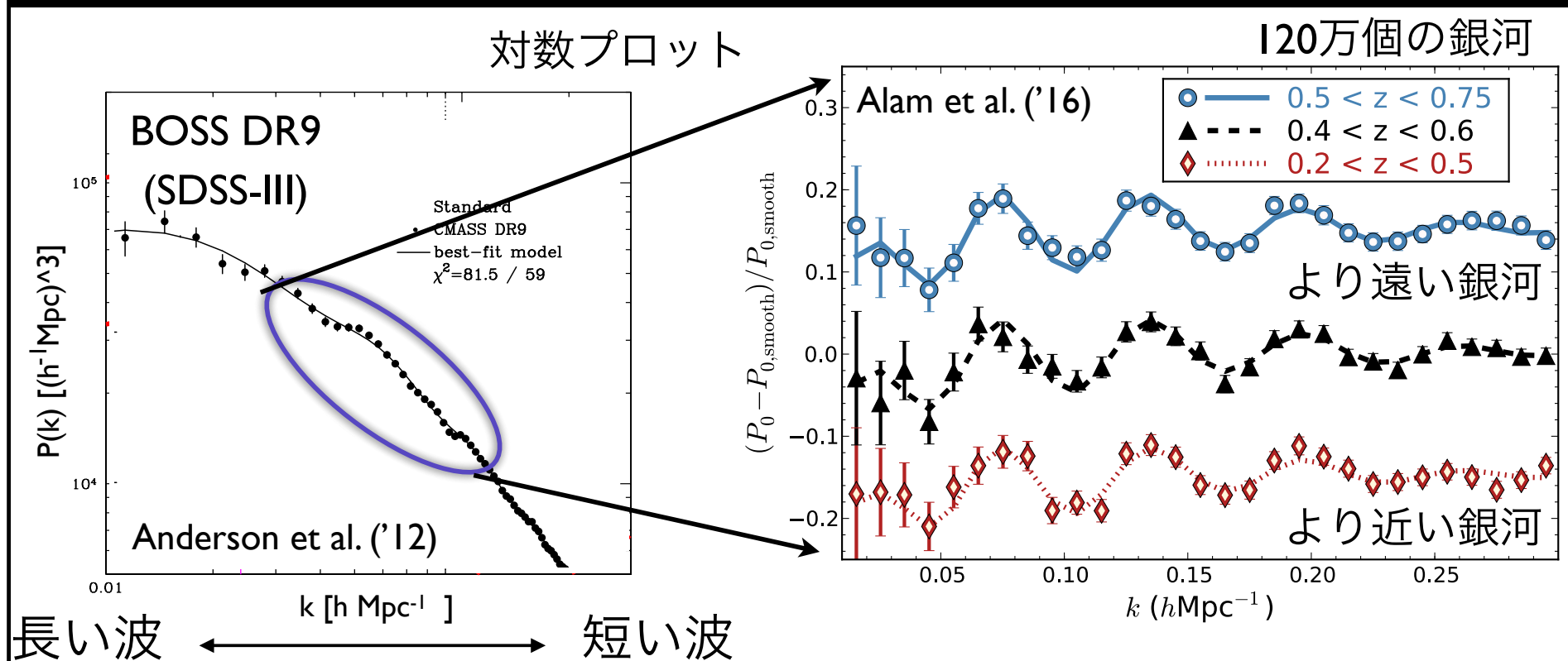


宇宙マイクロ波背景放射の 角度パワースペクトル



銀河分布のパワースペクトル

最新の銀河カタログから
スペクトル分解した密度ムラの強度分布



異なる3つの時刻（赤方偏移）から得られたスペクトル

うねうねの起源

どちらの観測も

スペクトル分解すると「うねうね」した振動パターンが見える
(パワースペクトル)

その正体・起源は？

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 162:815-836, December 1970
© 1970 The University of Chicago All rights reserved Printed in U.S.A.

「膨張宇宙の中の原始断熱的ゆらぎ」

PRIMEVAL ADIABATIC PERTURBATION
IN AN EXPANDING UNIVERSE*

P. J. E. PEEBLES†
Joseph Henry Laboratories, Princeton University

AND

J. T. YU‡
Goddard Institute for Space Studies, NASA, New York

Received 1970 January 5; revised 1970 April 1

ABSTRACT

The general qualitative behavior of linear, first-order density perturbations in a Friedmann-Lemaître cosmological model with radiation and matter has been known for some time in the various limiting situations. An exact quantitative calculation which traces the entire history of the density fluctuations is lacking because the usual approximations of a very short photon mean free path before plasma recombination, and a very long mean free path after, are inadequate. We present here results of the direct integration of the collision equation of the photon distribution function, which enable us to treat in detail the complicated regime of plasma recombination. Starting from an assumed initial power spectrum well

実は、

50年前にピーブルス博士
が予言していた！

Peebles & Yu

Astrophysical Journal (1970)

ピーブルス博士の予言

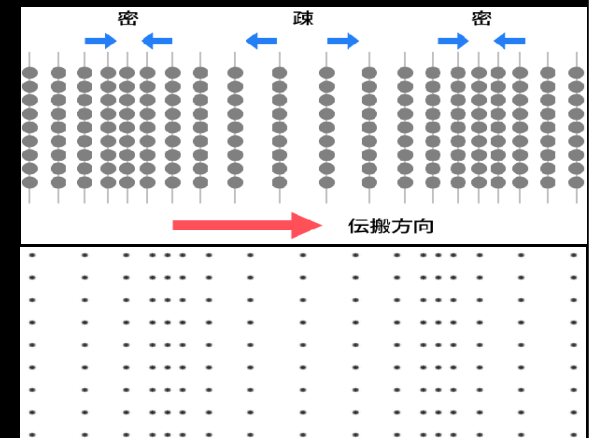
ピーブルス博士によると、うねうねの起源は、

「音波（音響振動）」

そみつは
疎密波と呼ばれるもの

例・空気を伝わる音

空気中の分子どうしがぶつかる様が波の
ように伝搬する → 鼓膜にぶつかって音に



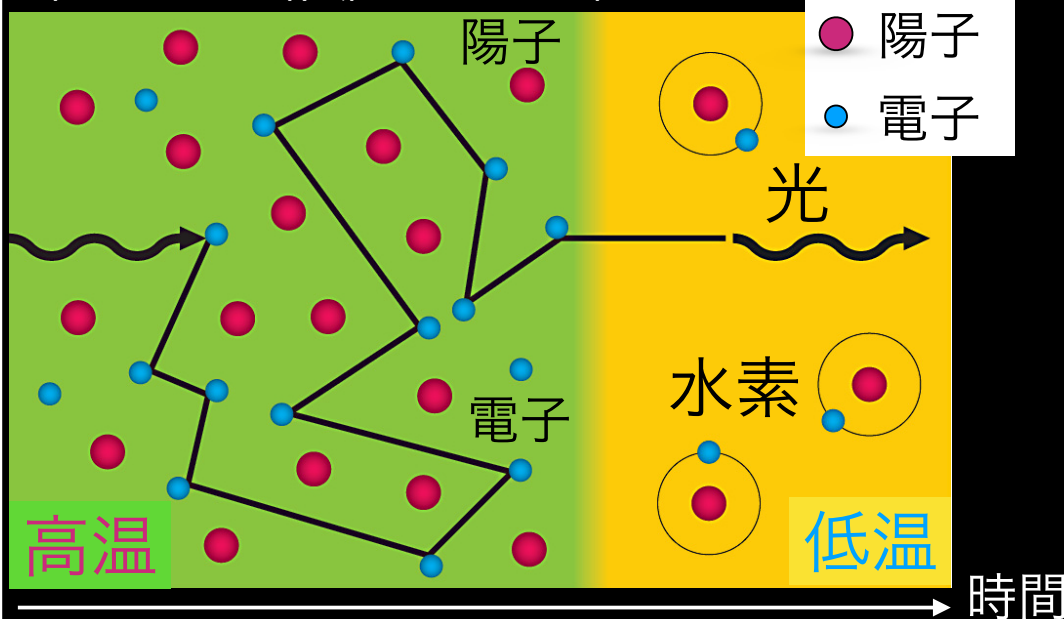
<http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/>
<https://www.ipros.jp/technote/>

原始宇宙からのこだま

宇宙が高密度・高温だった頃の
音を伝える
媒質
光と高温プラズマのスープ
(電子、陽子)

高温プラズマ中では光は散乱されてまっすぐ進めなかった

https://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_009.html



ただし、
スープの波は伝わる



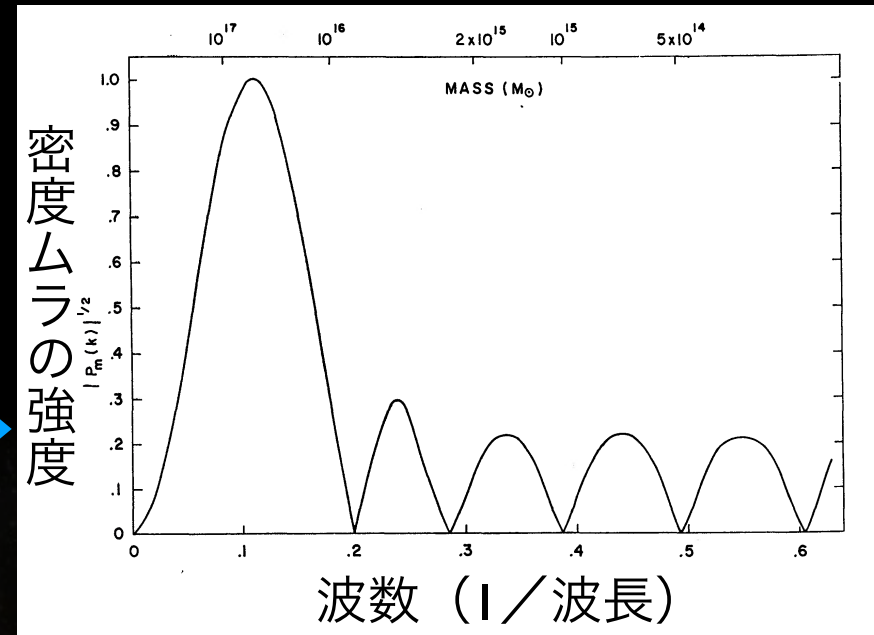
原始宇宙からのこだま



Peebles & Yu (1970)

論文の図5より

光と高温プラズマのスープが波立つ様子を具体的に数値計算



その様子が痕跡として残ることを予言：

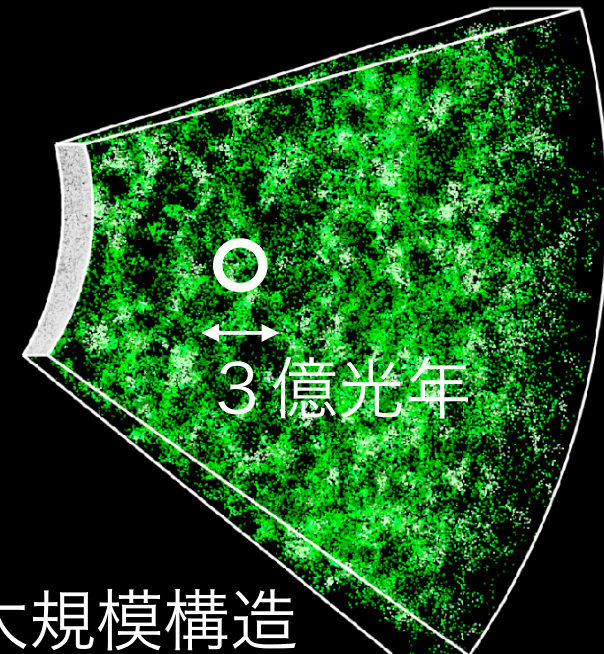
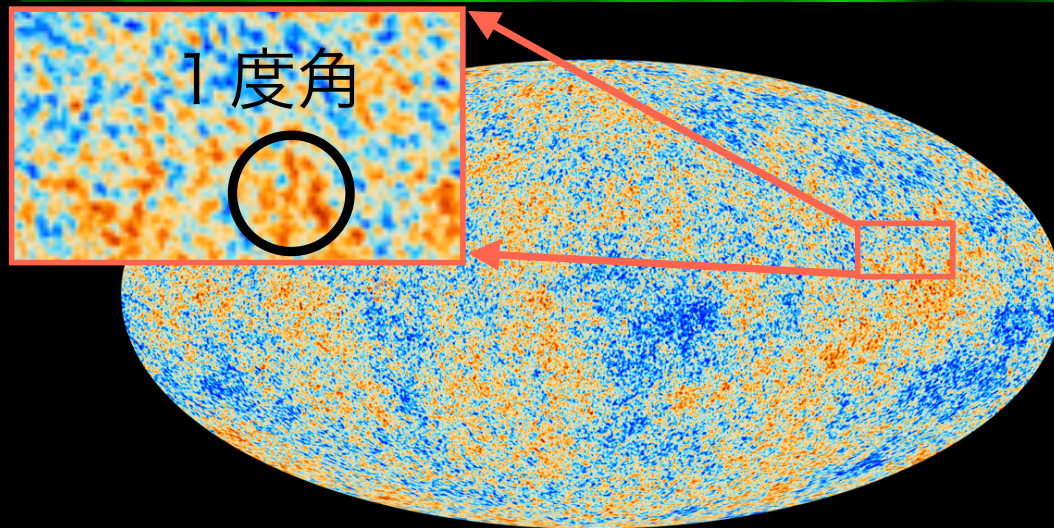
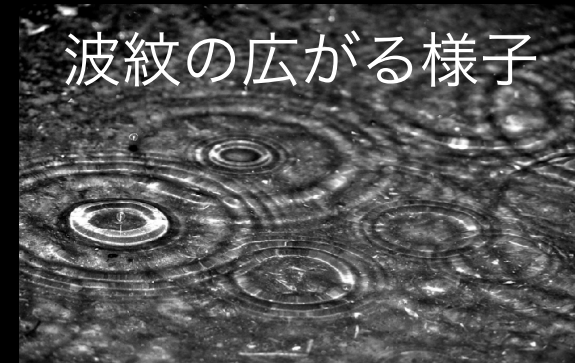
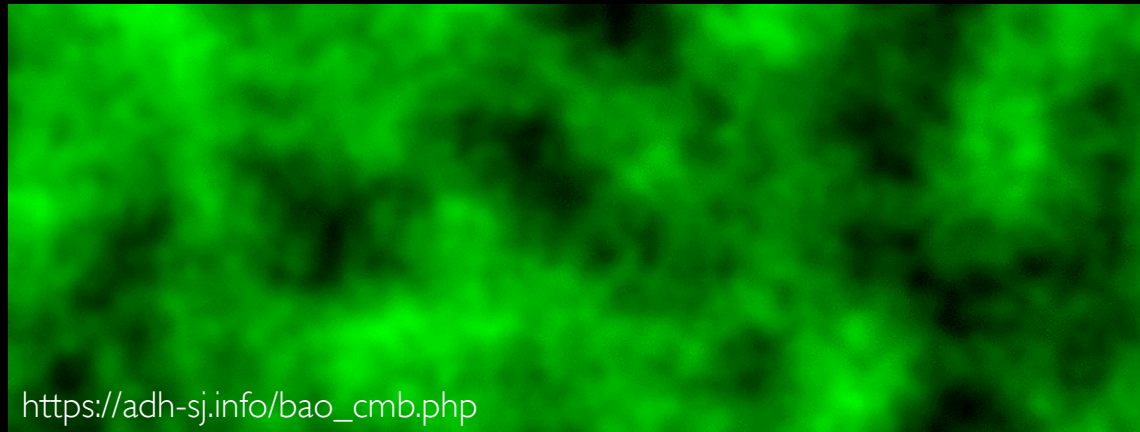
圧力と重力の
バランス

光 (電磁波) \longrightarrow 宇宙マイクロ波背景放射

高温プラズマ \longrightarrow 中性化して、天体 (星、銀河) を形成
(電子と陽子) (原子)

宇宙に広がる波紋

パワースペクトルの振動は波紋が広がる様子を表している



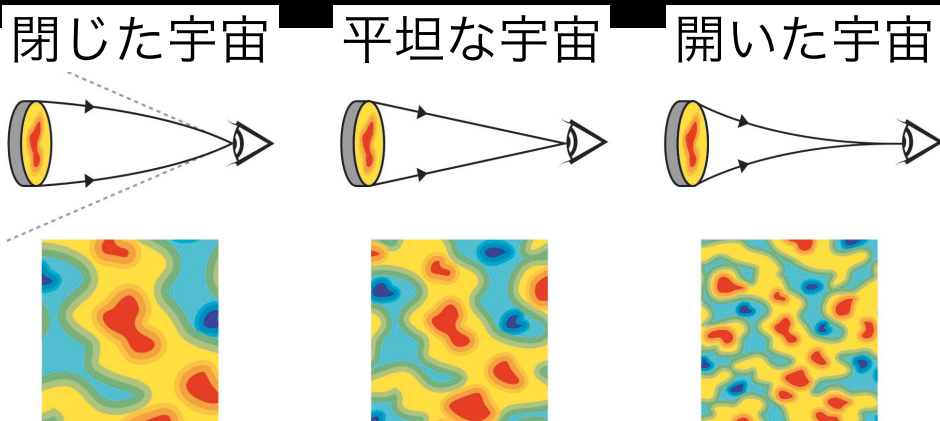
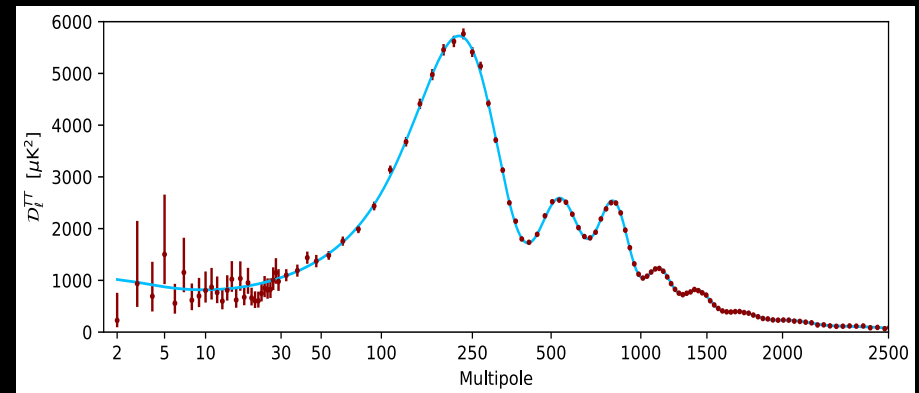
宇宙マイクロ波背景放射

宇宙の大規模構造

宇宙マイクロ波背景放射に隠された情報

スペクトルの形状・パターンには様々な情報を含んでいる

- スープの材質（宇宙の組成）
- 宇宙の幾何学
- 宇宙極初期を探るヒント



宇宙論の宝庫！

1990年代に解読方法が確立
(宇宙の構造形成理論)
日本人研究者の貢献も多数

西宮湯川記念賞受賞者も

宇宙マイクロ波背景放射
ゆらぎの研究

第16回
2001年



杉山直さん
名古屋大学副総長

宇宙マイクロ波背景輻射を
用いた初期宇宙理論の検証

第25回
2010年



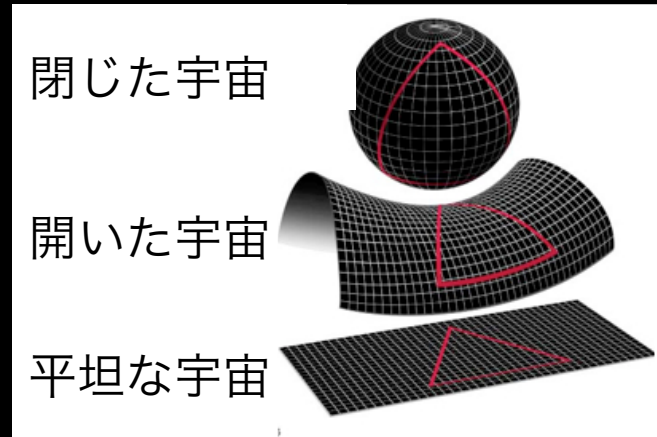
小松英一郎さん
マックス・プランク宇宙
物理学研究所 (所長)

解読結果

たかだか6個のパラメーターでたくさんのデータ点を説明

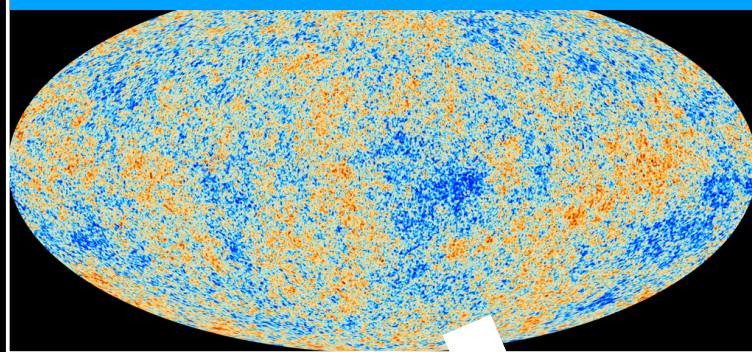
➡ 宇宙の標準モデルが確立 (2000年代後半)

- 宇宙の年齢は**138億年**
- 宇宙は高精度で**平坦**だった
- 宇宙極初期の**インフレーション**を強く示唆
- 宇宙の物質・エネルギー組成が**確定**

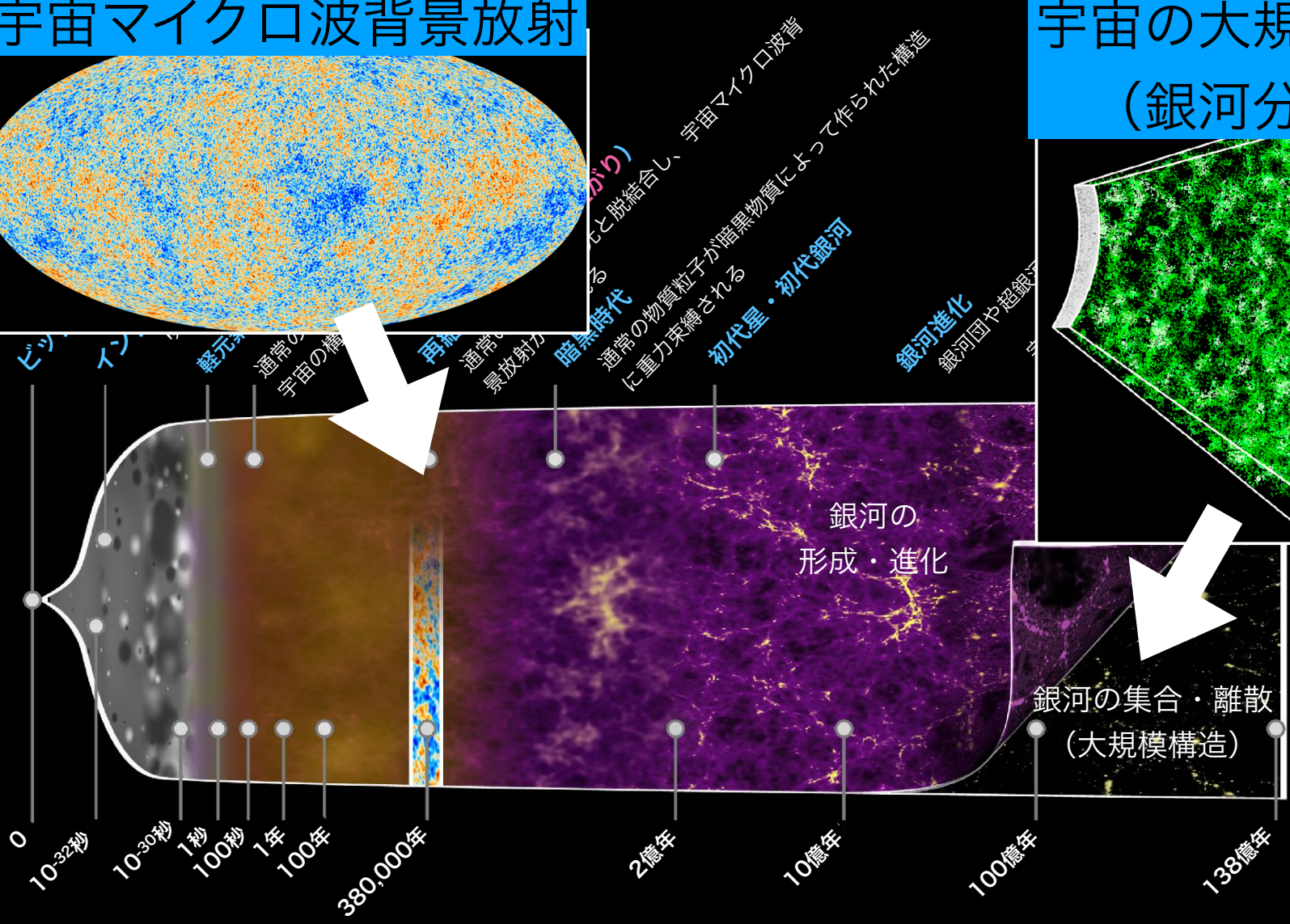
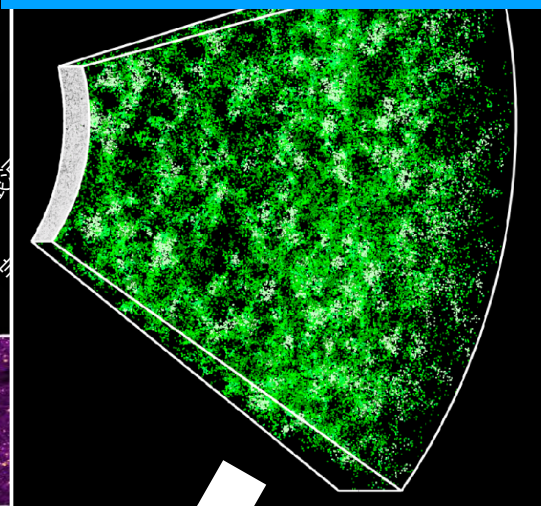


宇宙の標準モデルにもとづく宇宙の進化史

宇宙マイクロ波背景放射



宇宙の大規模構造 (銀河分布)



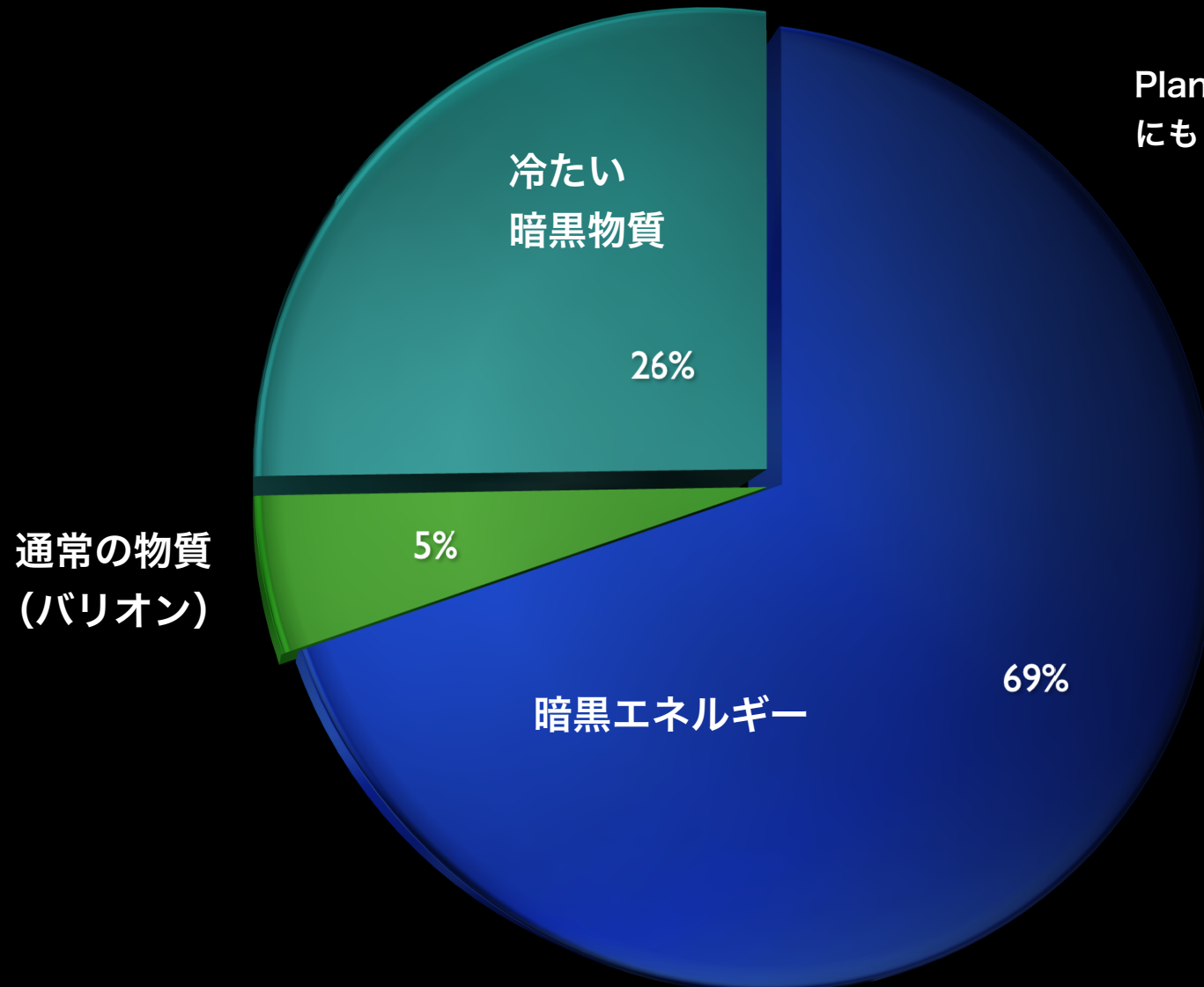
ビッグバン、インフレーション、再暴走、通常の物質粒子が暗黒物質によって束縛される、暗黒時代、通常放射が、通常放射と脱結合し、宇宙マイクロ波背景放射として観測される、初代星・初代銀河、銀河進化、銀河団や超銀河団

銀河の形成・進化

銀河の集合・分散 (大規模構造)

宇宙の構成要素

Planck 2018 results I
にもとづき作成



宇宙の95%は正体のわからないもので埋め尽くされている

浮かび上がった謎

ピーブルス博士が1980年代に予言した通りの結果だが...

宇宙の95%はわからないもので満たされている！

しばしば、わからないものに「暗黒」と名付けてわかったつもりになる...

冷たい暗黒物質

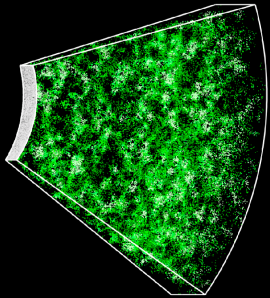
地上の加速器実験等で未発見の未知の素粒子

暗黒エネルギー

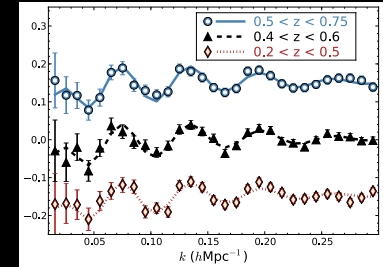
負の圧力を伴う未知のエネルギー体、宇宙膨張に影響、膨張を加速させている

アインシュタインが導入した宇宙定数？

我々は宇宙についてちっともわかっていない！？



音響振動の効能

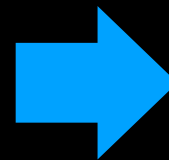
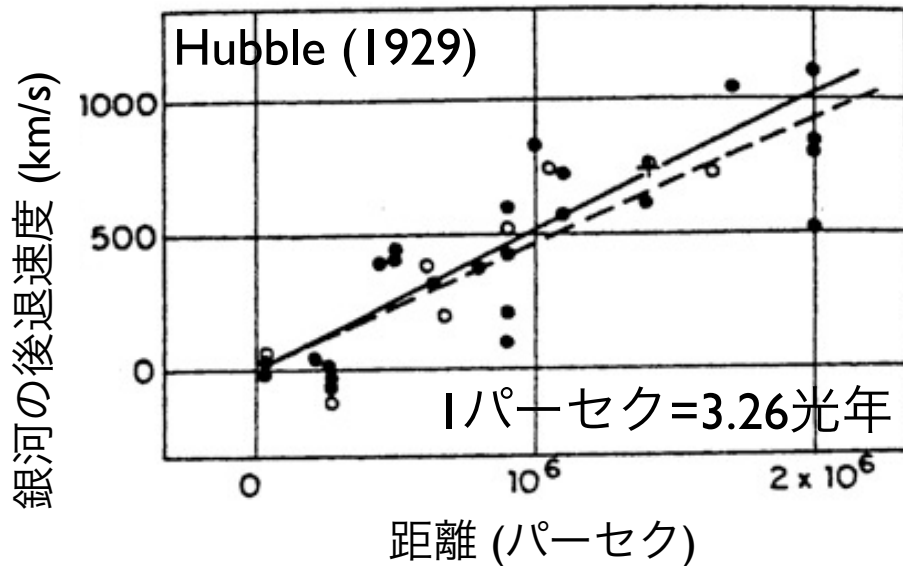


宇宙の大規模構造の音響振動（バリオン音響振動）は、暗黒エネルギーの謎を解明する手がかりを与える

ハッブルとルメートルは

銀河が遠ざかる速度（後退速度）と距離の関係から

宇宙膨張を発見



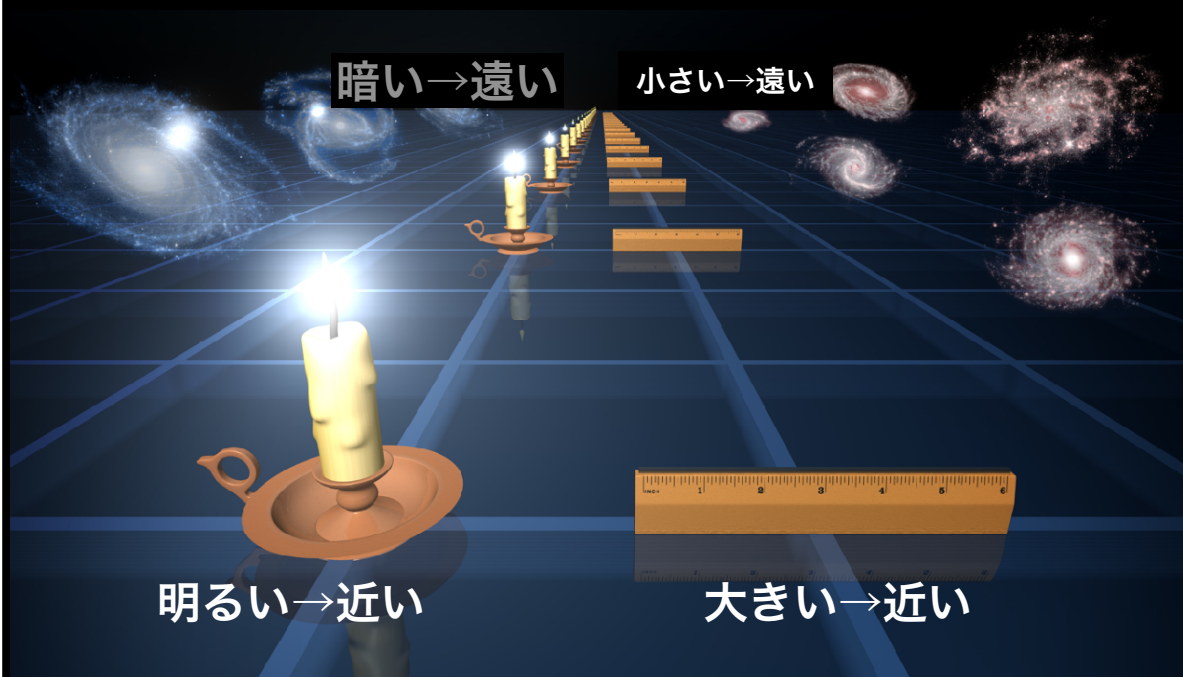
もっと正確にしたい！

（加速膨張の精密診断）

音響振動の効能

後退速度： 遠方天体ほど赤く見えることから測定可能
(赤方偏移)

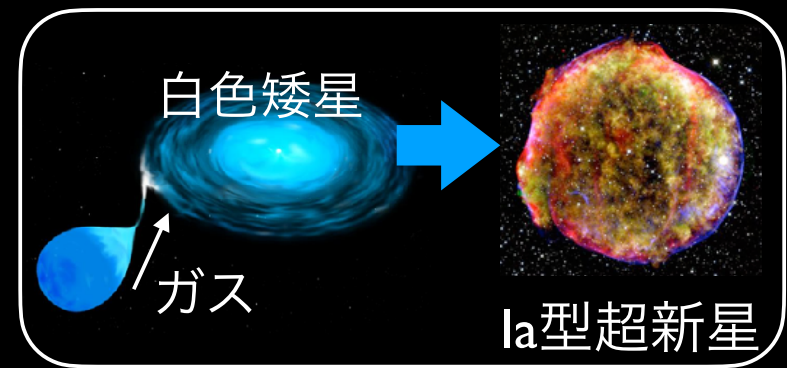
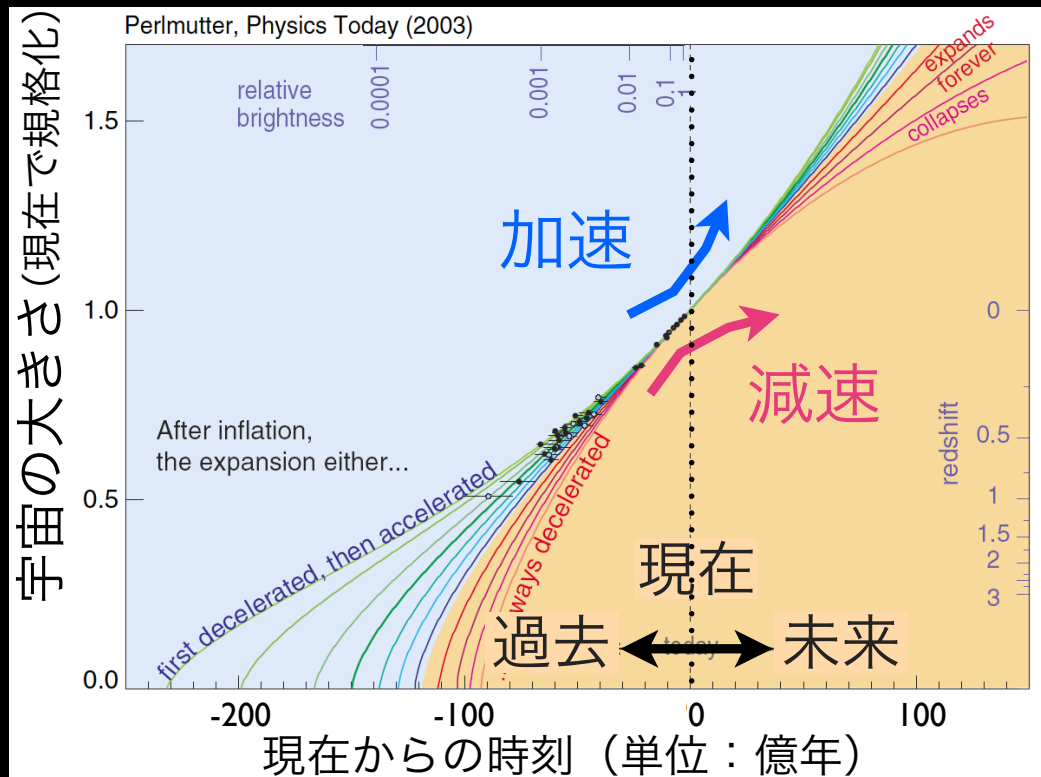
距離： 明るさ / サイズが既知なら
遠方天体の見かけの明るさ / サイズから測定可能



バリオン音響振動の
スケールはサイズが
既知の標準ものさし
(ピーブルス博士の功績)

宇宙膨張は加速している

Ia型超新星の明るさを既知として使うことで（標準光源）、
遠方宇宙の距離の測定に成功 → 宇宙の加速膨張を発見！

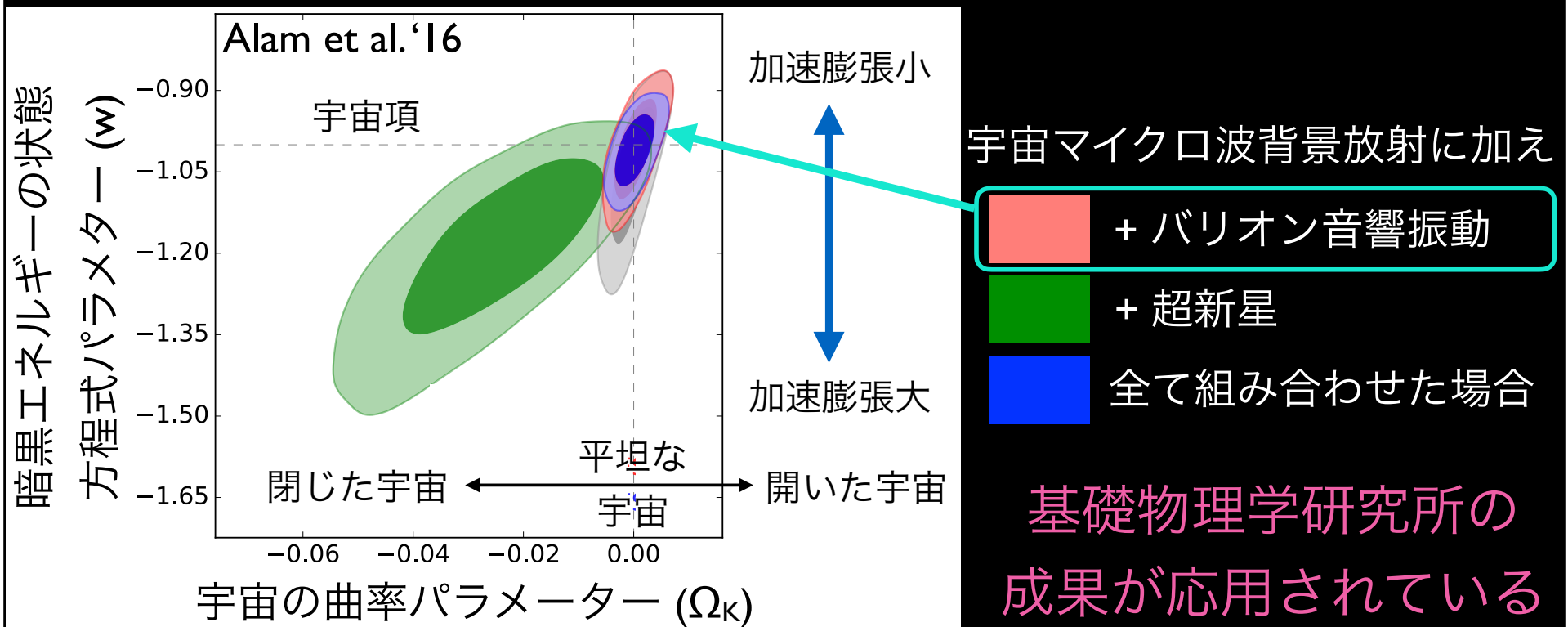


2011年ノーベル物理学賞

バリオン音響振動を使えばもっと正確に加速膨張が測れる

暗黒エネルギーへの挑戦

いろいろな銀河サーベイから得られた
バリオン音響振動の測定結果をもとに



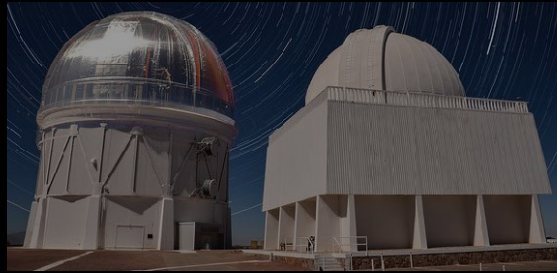
今のところ、

アインシュタインが導入した宇宙項と無矛盾 (誤差5%程度)

大規模銀河サーベイ観測

世界規模で進む地上・スペース観測プロジェクト

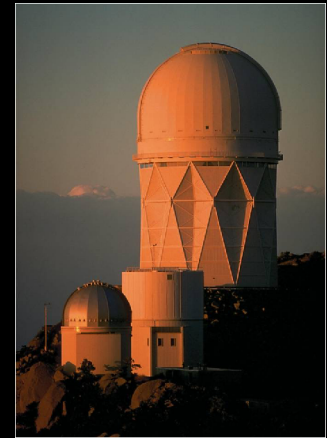
DES (欧米) (2013~2019)



HETDEX (米) (2018~)

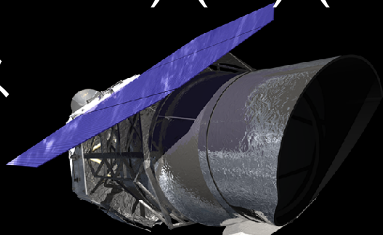


DESI (米) (2020)



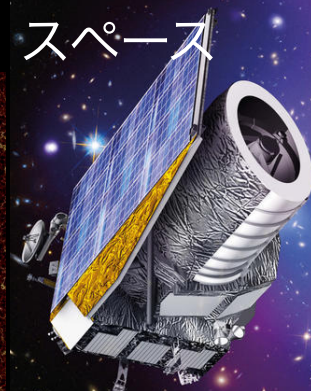
RST (WFIRST) (米) (2025+)

スペース

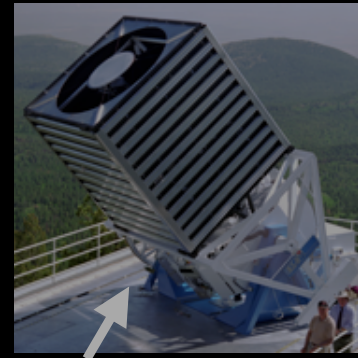


Euclid (欧) (2023+)

スペース



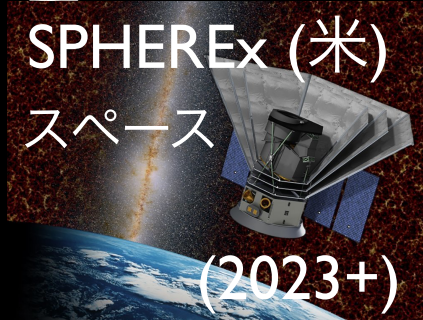
eBOSS (米欧) (2014~2019)



VRO (LSST)
(米)
(2023+)



SPHEREx (米)
スペース
(2023+)



SuMIRe (日)
(2014~)

広視野カメラと
多天体分光器



すばる望遠鏡

第2部

この宇宙の片隅に

暗黒エネルギーが支配する現在の宇宙は、138億年
もの長大な時間をかけて出来上がった

その広さは計り知れない（果てがない）

我々と似たような世界もどこかに広がっているのでは？

惑星世界

wikipedia

我々の太陽系は宇宙の片隅に棲む稀な存在だろうか？

2019年 ノーベル物理学賞



ジェームズ・ピーブルス
James Peebles



ミシェル・マイヨール
Michel Mayor



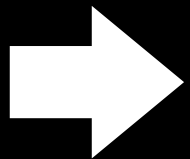
ディディエ・ケロー
Didier Queloz

太陽系外惑星の発見

惑星の探し方

- 惑星は小さい 恒星の半径の $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{10}$
- 惑星は暗い 恒星の明るさの $\frac{1}{1\text{千万}}$

惑星自体を直接「見る」ことは至難の技！



恒星の観測から惑星が存在する兆候を探す

代表的
手法

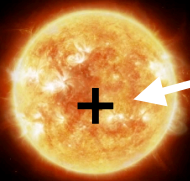
視線速度観測

トランジット観測

視線速度観測

惑星の公転運動による恒星の「ふらつき」を観測する方法

重力により、恒星と惑星は
共通重心周りで運動する



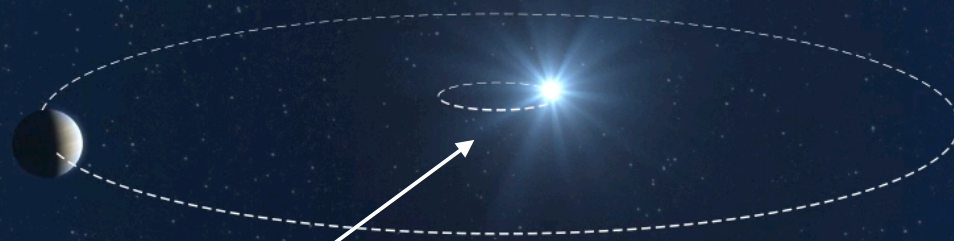
恒星が視線方向にふらつくと

光のドップラー効果を通じて

恒星のスペクトルが変動する

視線速度法

光のドップラー効果



恒星のスペクトル



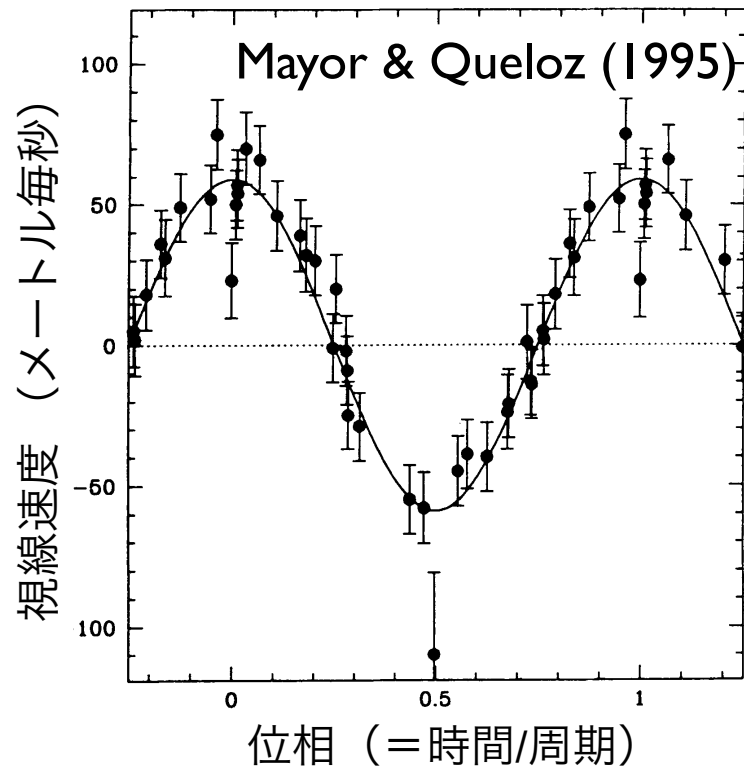
近づくと青く、遠ざかると赤くなる



発見

マイヨール、ケロー両博士による
ペガサス座 51 番星の視線速度観測

周期的ふらつきを発見！



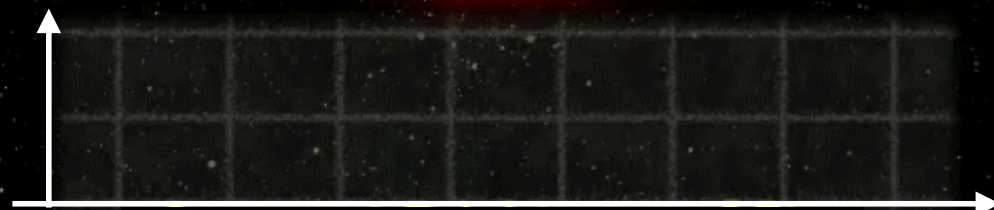
その大きさから

木星の半分くらいの質量の天体
が周っている → 惑星！！

公転周期はたった 4.2日！！

トランジット観測

恒星から届く光の量



時間

初めてのトランジット観測

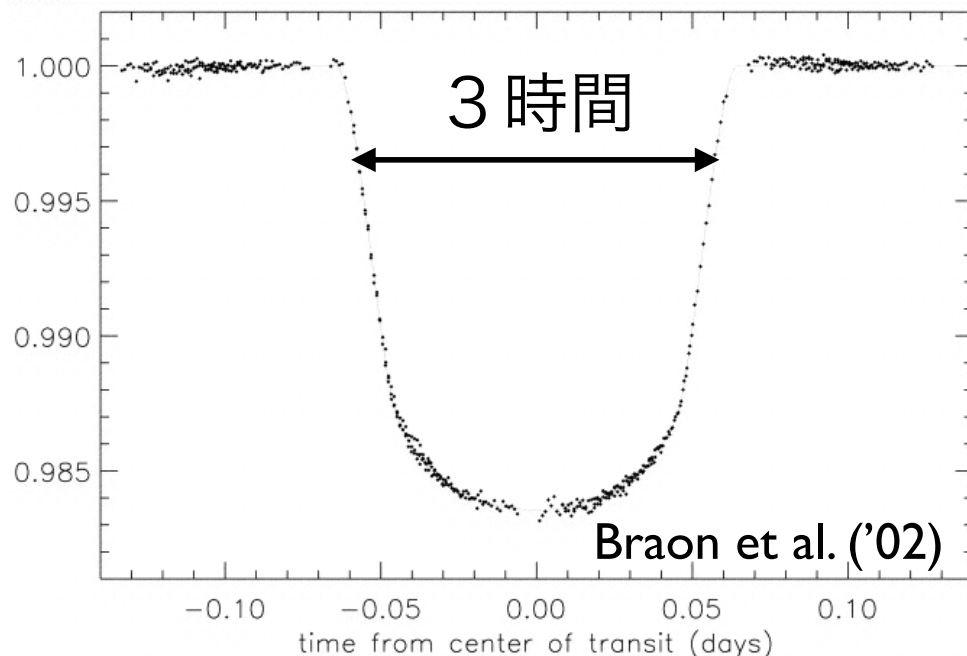
マイヨール博士らのチームが、視線速度法で見つけた
ペガスス座V376星の惑星を追観測して発見

HD209458b (オシリス)

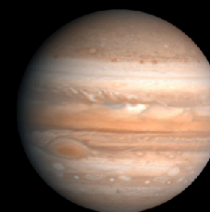
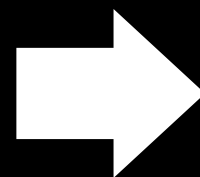
公転周期3.5日

ハッブル宇宙望遠鏡による観測

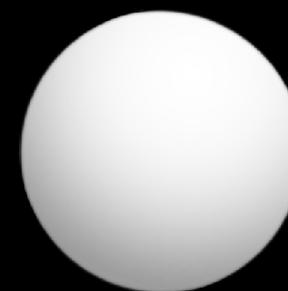
恒星の相対的明るさ



サイズが
わかる



木星



HD209458b

“ホットジュピター”

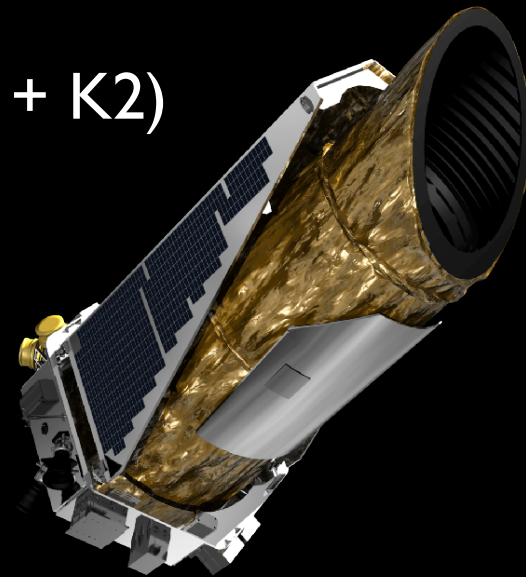
ケプラー宇宙望遠鏡

NASAが打ち上げたトランジット観測の専門衛星

(2009~2018年)

53万個の恒星をモニター観測 (はくちょう座の方角)

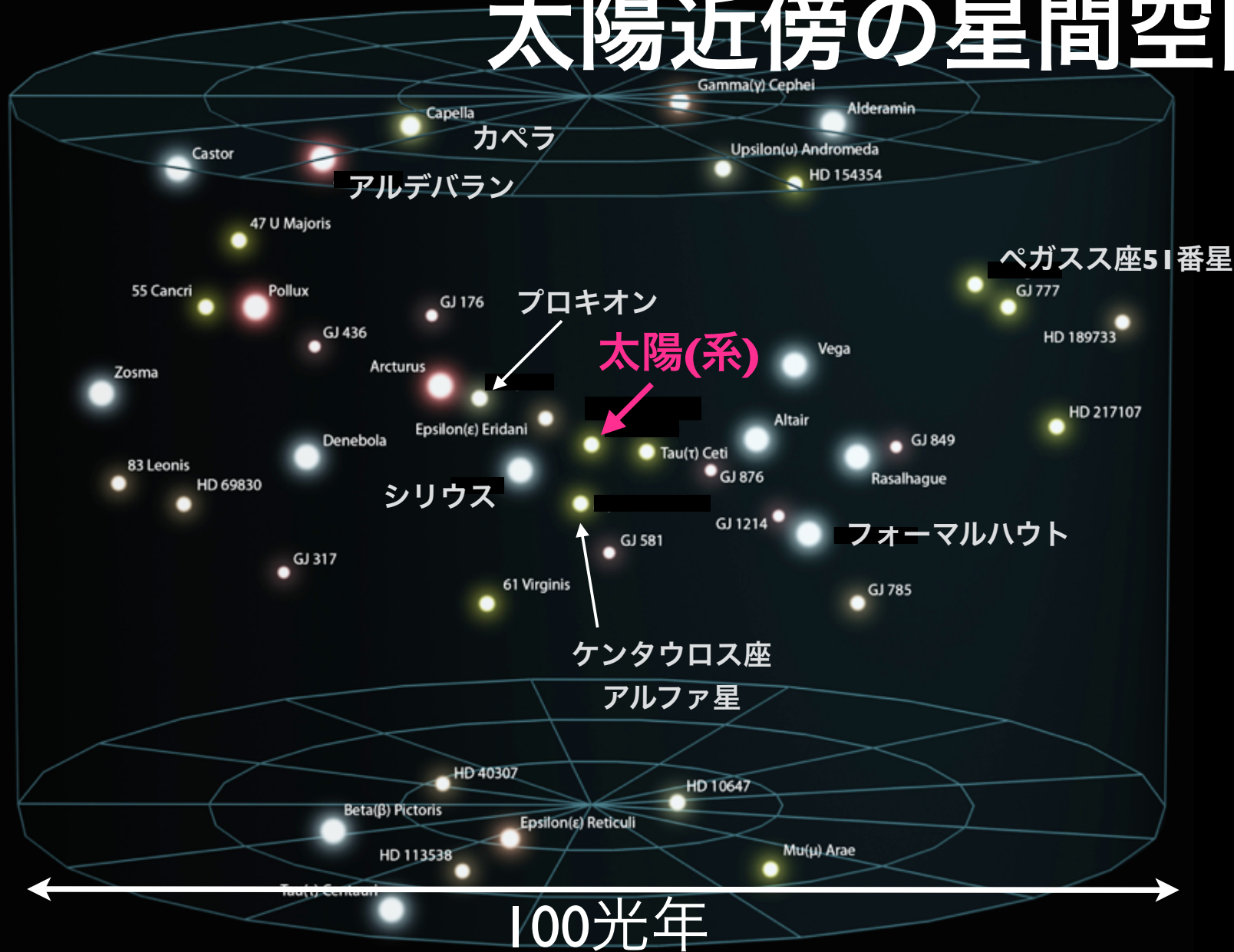
3,000個近くの惑星を発見 (Kepler + K2)



系外惑星は、もはや
ありふれた存在に！

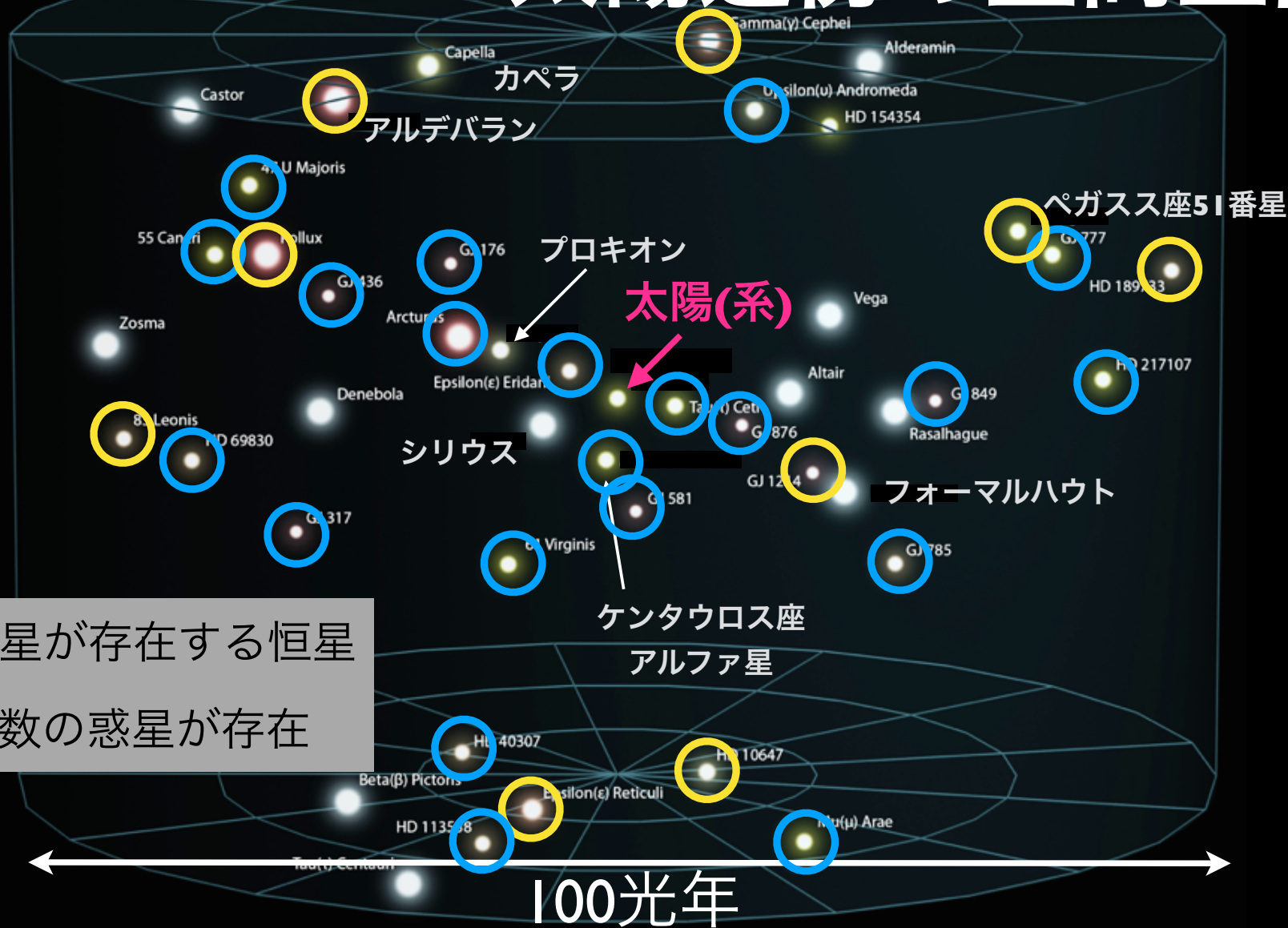
https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

太陽近傍の星間空間



1 光年 (光が 1 年間に進む距離) = 10 兆 km

太陽近傍の星間空間



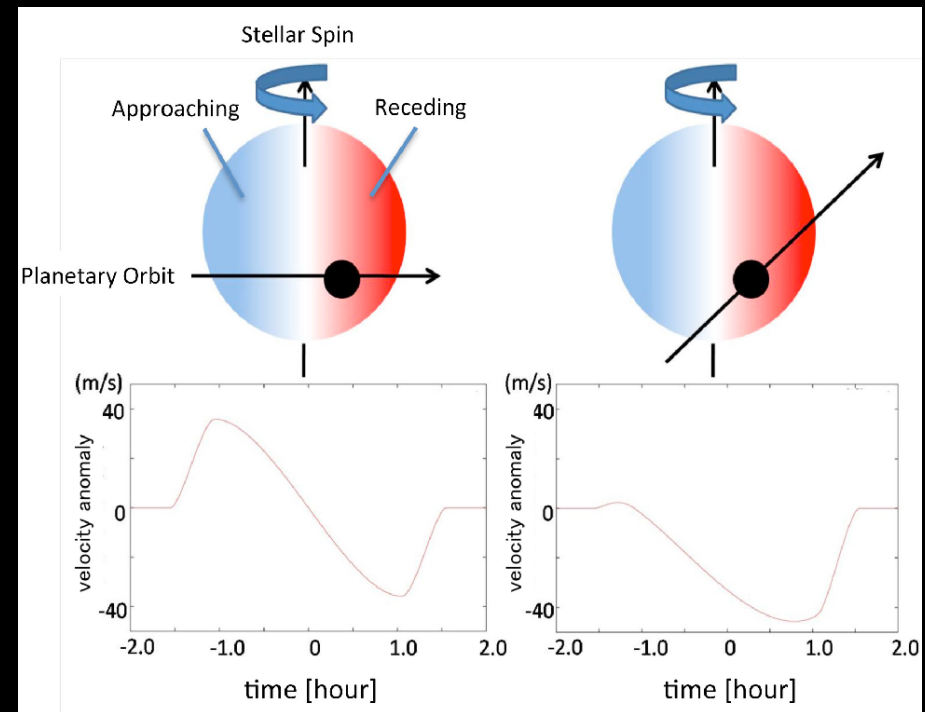
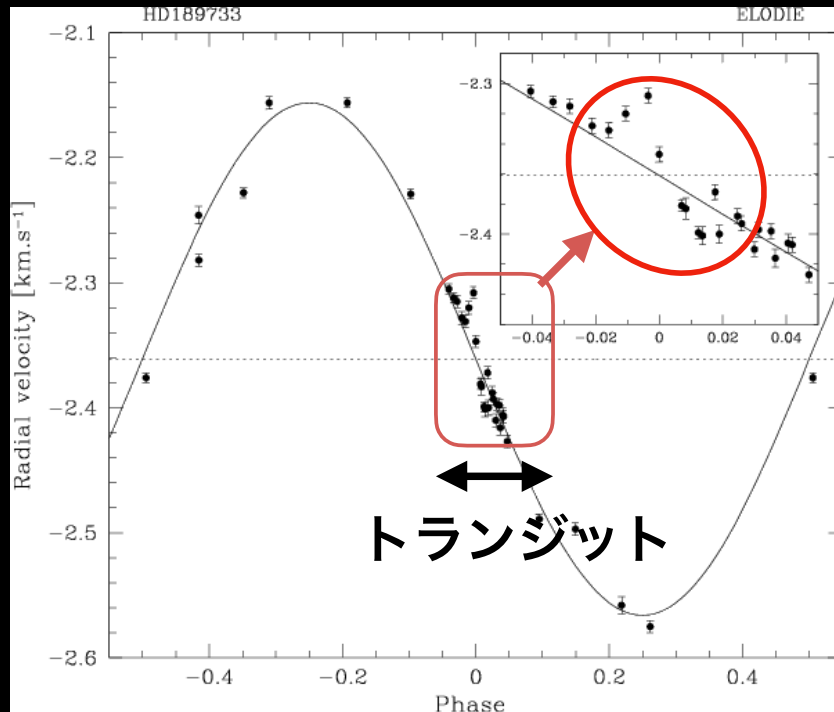
1 光年 (光が1年間に進む距離) = 10兆 km

ロシター効果

トランジットする惑星系の視線速度観測に現れる**“異常”**
(トランジット = 惑星が恒星面を前面通過する現象)

➡ 恒星の自転軸と惑星の公転面の傾きに由来する効果

視線速度



ロシター効果 (Wikipedia)

ロシター効果

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

ロシター効果または**ロシター・マクローリン効果**(英: Rossiter-McLaughlin effect)とは、**食連星**の伴星や**太陽系外惑星**が**恒星面通過** (食) を起こす際に、主恒星の光の**ドップラーシフト**に一時的な変化が起きる現象のことである。

天文学者ロシター ([Richard Alfred Rossiter](#)) およびマクローリン ([Dean Benjamin McLaughlin](#)) に由来した名称の効果である。

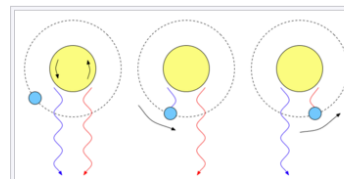
[目次](#) [\[表示\]](#)

原理 [\[編集\]](#)

恒星が**自転**をしている場合、観測される恒星面の半分は手前に近づいてくるように見え、残り半分は奥に逃げて行くように見える。この動きによってそれぞれの面が発する光は相異なる方向 (**青方**と**赤方**) に**ドップラーシフト**を起こす。通常は、地球から遠く離れた恒星のそれぞれの半球を個別に観測することはできないため、このドップラーシフトは**スペクトル**中の**吸収線**や**輝線**が本来より幅広くなるという形で観測される。

順行軌道の伴星が主星の恒星面を通過する場合は、まず手前に近づいてくる側の半円の一部分が覆い隠される。これは青方偏移を起こした恒星の光のみが選択的にブロックされることを意味する。その結果、ドップラーシフトの平均としては赤方寄りに偏移することになる。伴星が恒星面の中央に近づくにつれこの効果は次第に弱まるが、偏移が0になった後は、同様のメカニズムによって次第に青方偏移が見られるようになる。そして、通過が完全に終了すると恒星のドップラーシフトは平常に戻る。

ロシター効果を観測することで主星の赤道面と伴星の公転面のなす角度を推定することができる。また、惑星が**逆行軌道**を持つ場合は、上の説明とは逆の青方→赤方というパターンの偏移が起きる。これを利用し、太陽系外惑星の**WASP-17b**や**HAT-P-7b**のように、逆行公転している惑星が発見されている^{[1][2]}。ロシター効果の測定から、**ホット・ジュピター**のうちの有効温度の高い恒星を公転しているものは、主星の赤道面と惑星の公転面の角度が大きくなる傾向があることが判明している。そのため、ロシター効果はホット・ジュピターのような惑星の形成機構を探る上でも重要である。



恒星の自転により、恒星からの光は異なったドップラーシフトを持つ光を合成したものになっている。そのため、伴星によって光が一部分だけが遮られると、ドップラーシフトの平均値には変化が生じる。なお、上図では観測者は下方から恒星を眺めており、伴星の軌道は順行軌道を仮定している。

関連項目 [\[編集\]](#)

- [ドップラー効果](#)

脚注 [\[編集\]](#)

- [↑] Anderson, D. R. *et al.* (2009). "WASP-17b: an ultra-low density planet in a probable retrograde orbit"[📄]. *The Astrophysical Journal* **Submitted**.
- [↑] Narita, N. *et al.* (2009). "First Evidence of a Retrograde Orbit of a Transiting Exoplanet HAT-P-7b"[📄]. *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (5): L35-L40.

外部リンク [\[編集\]](#)

- [Ohta, Y.; Taruya, A. & Suto, Y. \(2005\). "The Rossiter-McLaughlin Effect and Analytic Radial Velocity Curves for Transiting Extrasolar Planetary Systems". *The Astrophysical Journal* **622** \(1\): 1118-1135. \[arXiv:astro-ph/0410499\]\(#\). \[Bibcode: 2005ApJ...622.1118O\]\(#\)[📄]. \[doi:10.1086/428344\]\(#\)[📄].](#)

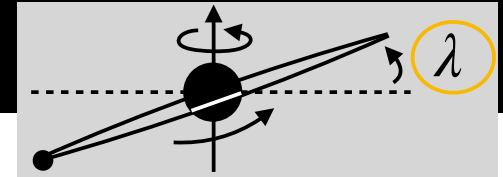
- [平野照幸、太陽系外惑星探査：見えてきた多様性とその起源](#)[📄] *日本物理学会誌* 2017年 72巻 2号 p.105-110, [doi:10.11316/butsuri.72.2_105](#)[📄]

私たちが書いた論文

ロシター効果の観測から
惑星の自転・公転面の傾
きがどう決まるかを計算

(観測が進むきっかけに)

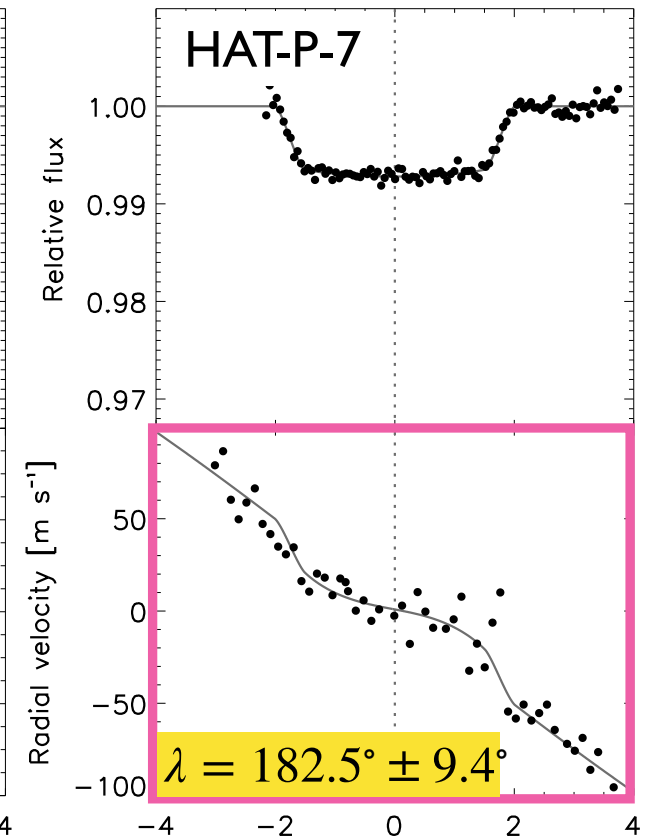
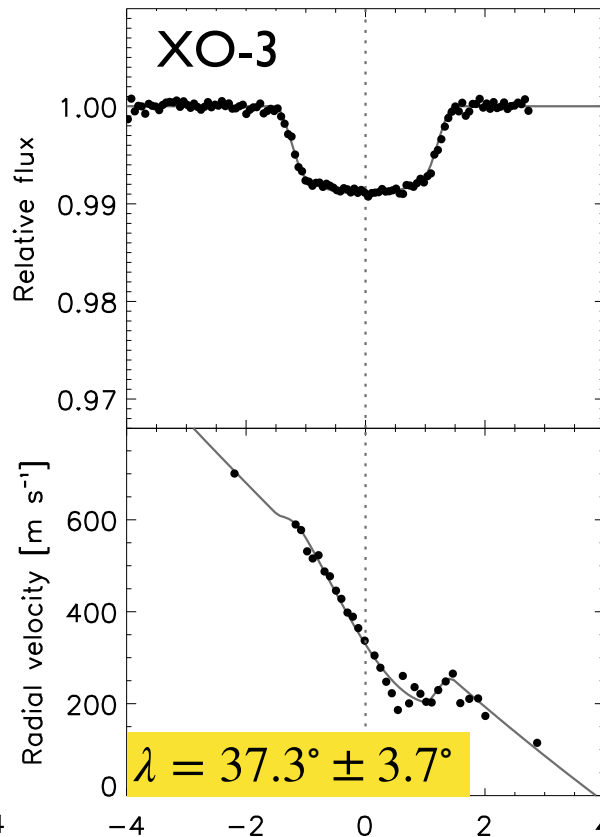
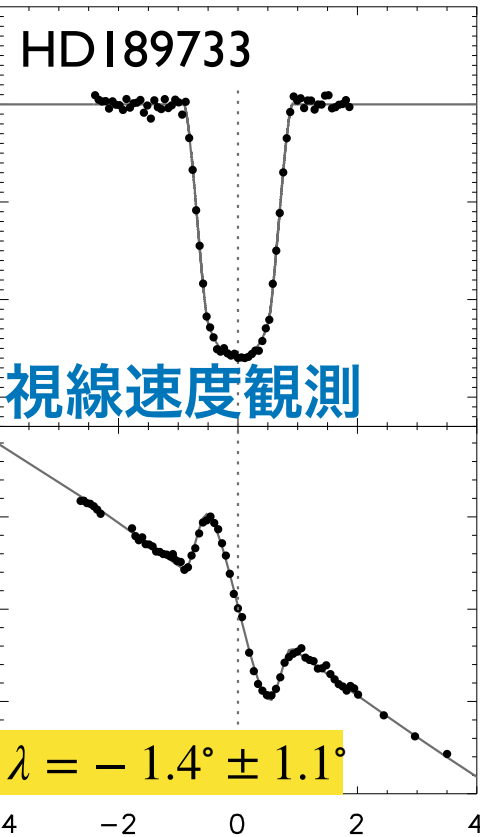
ロシター効果の観測例



トランジット観測

恒星の相対的明るさ

視線速度観測



逆行惑星

HAT-P-7と似たよう
な逆行惑星

恒星の自転

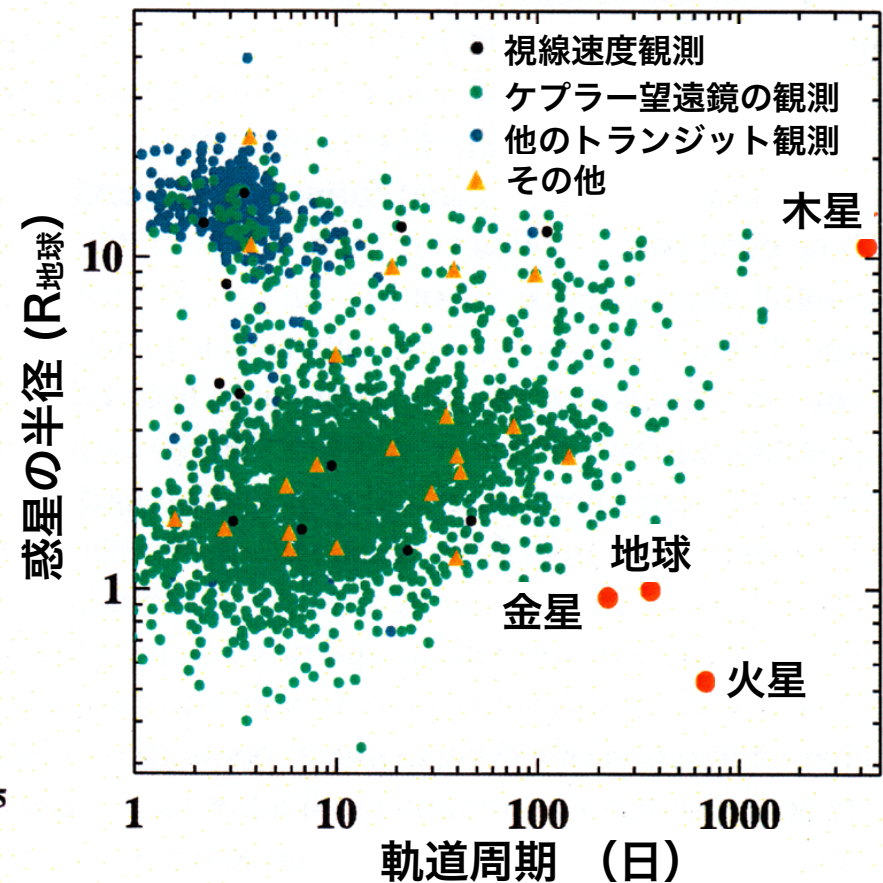
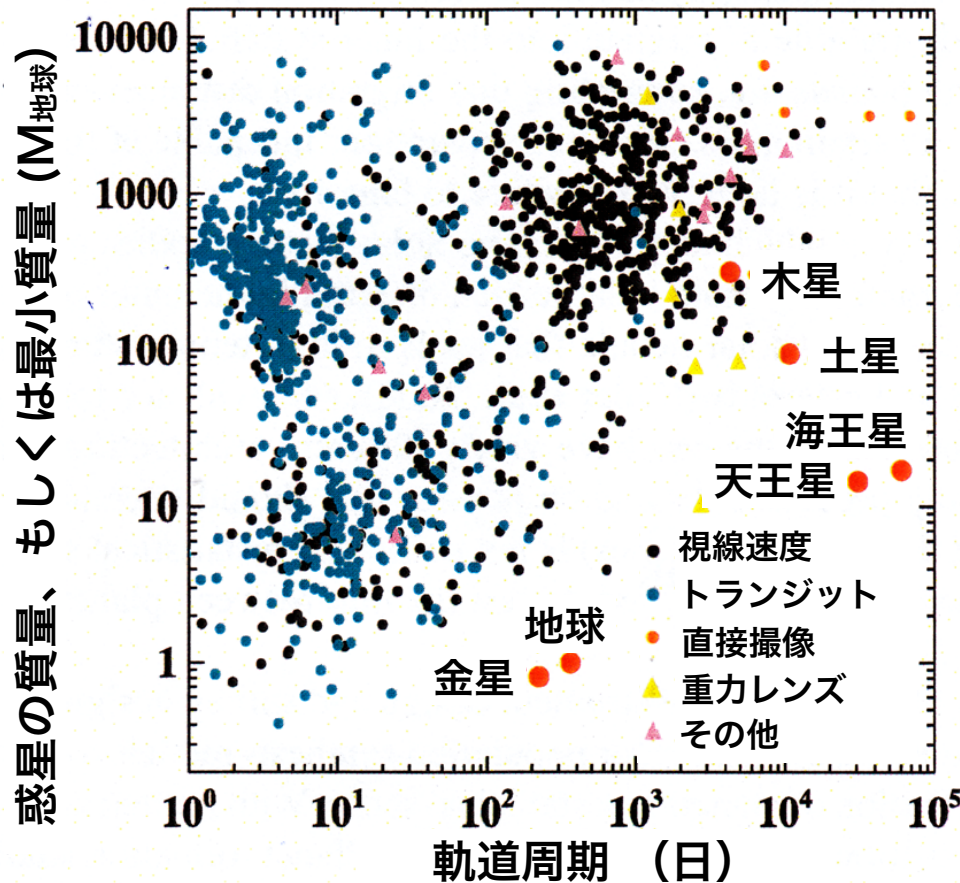
WASP 8b

惑星の公転

想像図

系外惑星系の 多様な世界

<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA22088>



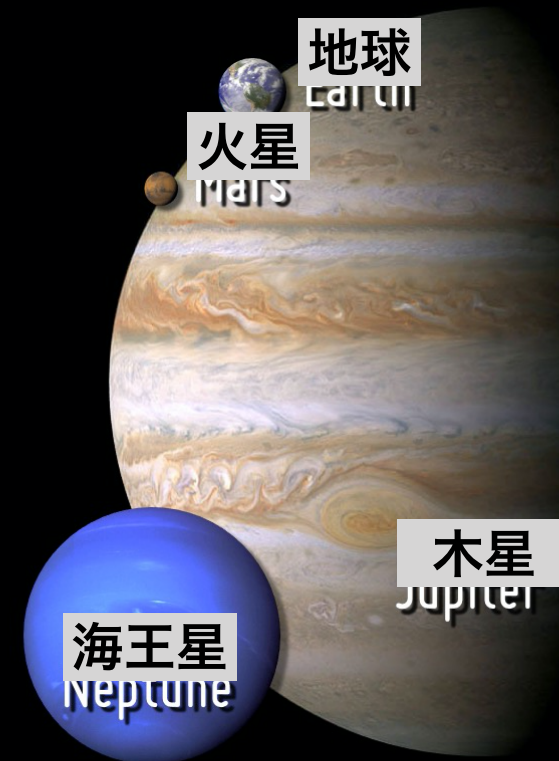
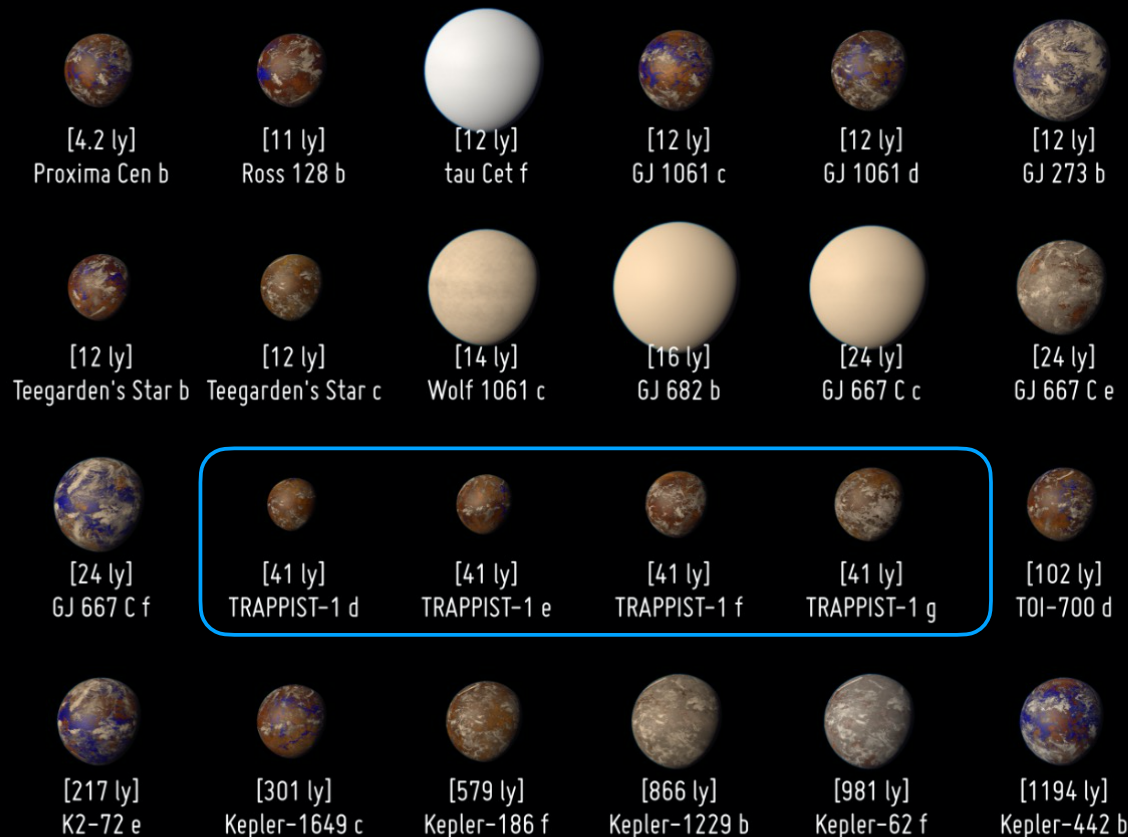
生命居住可能な系外惑星候補

惑星表面が摂氏0~100度

(水が液体として存在できる条件)

生命居住可能

=ハビタブル



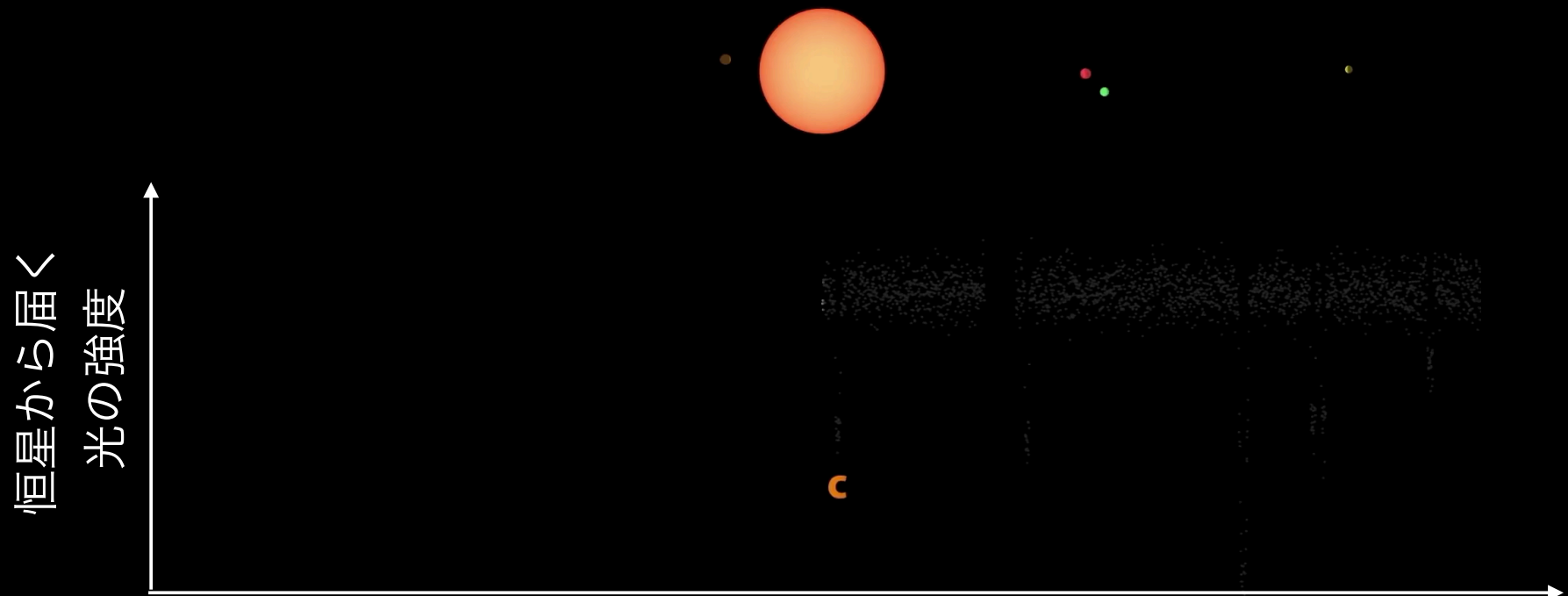
Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Oct 5, 2020

トラピスト

Trappist-1

ケプラー望遠鏡によるトランジット観測で発見された
みずがめ座の40.5光年先の惑星系



地球型惑星を7個の含む複数惑星系！

wikipedia

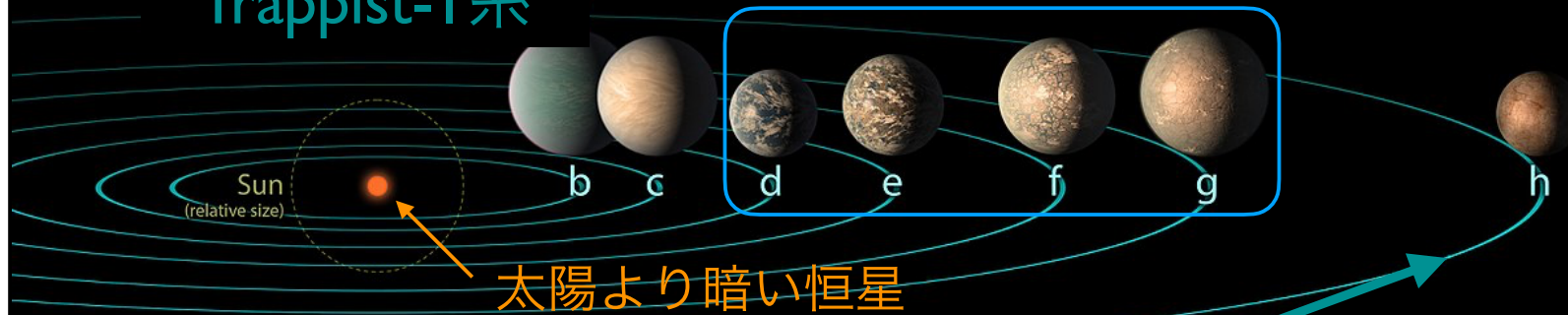
トラピスト Trappist-1

木星とガリレイ衛星



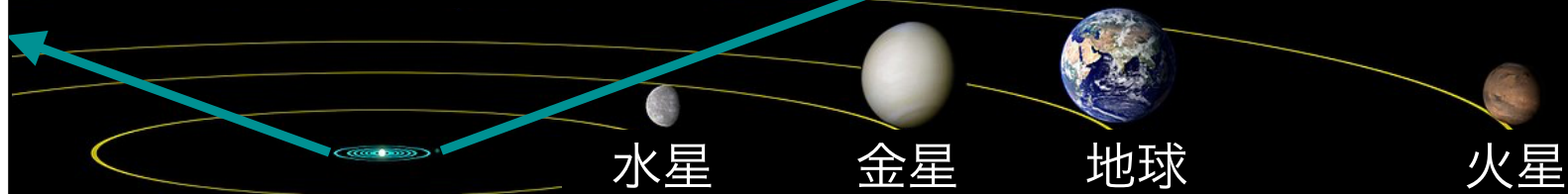
Trappist-1系

ハビタブル惑星候補



太陽系内縁

25倍に拡大



太陽系外惑星の発見：まとめ

マイヨール、ケロー博士らの発見以降に得られた観測事実

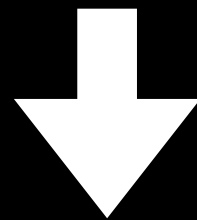
ほとんどの恒星に惑星が存在していた！

系外惑星の世界はきわめて多様

(ホットジュピター、スーパーアース、逆行惑星、...)

地球とよく似た生命居住可能な惑星も存在している

(ハビタブル惑星)



宇宙にも我々のような知的生命体がいるかもしれない



ドレーク方程式

地球外生命を探るための基礎方程式 (1961年)

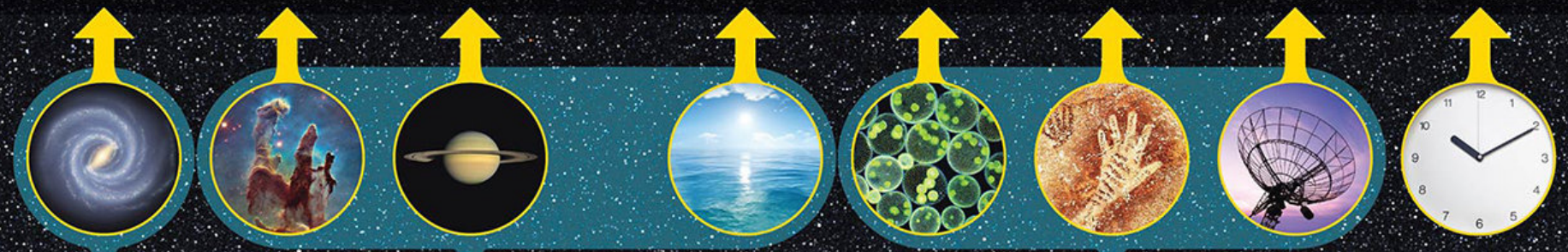
(天の川銀河で)

(恒星 1 個あたり)

交信を行う

交信を行う 地球外文明 の総数	銀河内の 星形成率	惑星系を有 する割合	生命に適し た環境をも つ惑星の数	生命が実際 に生まれる 割合	知的生命体 が生まれる 割合	交信を行う ほどの文明 を発達させ る割合	知的生命 体の文明 の寿命
-----------------------	--------------	---------------	-------------------------	----------------------	----------------------	--------------------------------	---------------------

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$



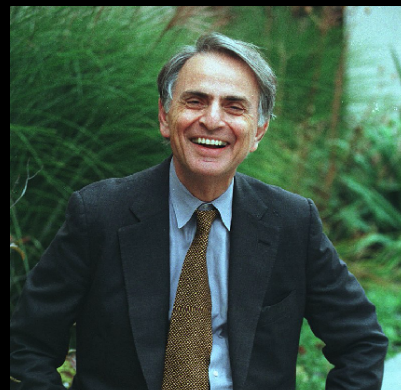
先人たちの見積もり

(天の川銀河で)			(恒星1個あたり)					
交信を行う地球外文明の総数	銀河内の星形成率	惑星系を有する割合	生命に適した環境をもつ惑星の数	生命が実際に生まれる割合	知的生命体が生まれる割合	交信を行うほどの文明を発達させる割合	知的生命体の文明の寿命	

$$N = R_{*} \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

100万個 (1963年)	10 (個/年)	1	1	1	0.1	0.1	1,000万 (年)
------------------	-------------	---	---	---	-----	-----	---------------

カール・セーガン
(天文学・惑星科学者)



「コスモス」「惑星へ」「コンタクト」
など著書多数



先人たちの見積もり

(天の川銀河で) 交信を行う地球外文明の総数

銀河内の星形成率

惑星系を有する割合

(恒星1個あたり) 生命に適した環境をもつ惑星の数

生命が実際に生まれる割合

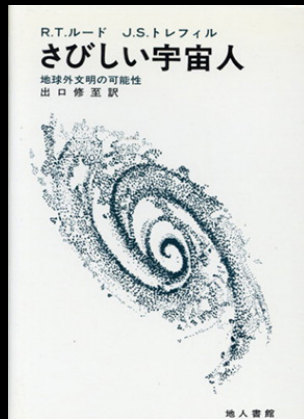
知的生命体が生まれる割合

交信を行うほどの文明を発達させる割合

知的生命体の文明の寿命

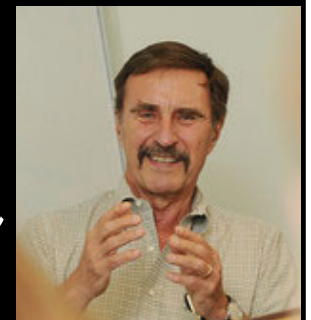
$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

0.003個 (1981年) 0.05 (個/年) 0.1 0.05 0.01 0.5 0.25 1万 (年)



ロバート・ルード
(電波天文学者)

ジェームズ・トレフィル
(物理学者)



https://rahist.nrao.edu/rood_bio-memoir.shtml
<https://robinsonprofessors.gmu.edu/about/james-trefil/>

先人たちの見積もり

(天の川銀河で)			(恒星1個あたり)					
交信を行う地球外文明の総数	銀河内の星形成率	惑星系を有する割合	生命に適した環境をもつ惑星の数	生命が実際に生まれる割合	知的生命体が生まれる割合	交信を行うほどの文明を発達させる割合	知的生命体の文明の寿命	

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

100万個 (1963年)	10 (個/年)	1	1	1	0.1	0.1	1,000万 (年)
-------------------------	-------------	---	---	---	-----	-----	---------------

0.003個 (1981年)	0.05 (個/年)	0.1	0.05	0.01	0.5	0.25	1万 (年)
--------------------------	---------------	-----	------	------	-----	------	-----------

えらく楽観的か（多すぎる！？）、悲観的すぎる個数

先人たちの見積もり

(天の川銀河で)			(恒星1個あたり)					
交信を行う地球外文明の総数	銀河内の星形成率	惑星系を有する割合	生命に適した環境をもつ惑星の数	生命が実際に生まれる割合	知的生命体が生まれる割合	交信を行うほどの文明を発達させる割合	知的生命体の文明の寿命	

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

100万個 (1963年)	10 (個/年)	1	1	1	0.1	0.1	1,000万 (年)
0.003個 (1981年)	0.05 (個/年)	0.1	0.05	0.01	0.5	0.25	1万 (年)

近年の観測から明らかになってきた

先人たちの見積もり：修正版

(天の川銀河で)			(恒星1個あたり)					
交信を行う地球外文明の総数	銀河内の星形成率	惑星系を有する割合	生命に適した環境をもつ惑星の数	生命が実際に生まれる割合	知的生命体が生まれる割合	交信を行うほどの文明を発達させる割合	知的生命体の文明の寿命	

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

100万個 (1963年)	1.5~3 (個/年)	0.1~0.2	1	0.1	0.1	1,000万 (年)
0.003個 (1981年)			0.01	0.5	0.25	1万 (年)
	Robitaille & Whitney (2010)	Kunimoto & Matthews (2020)				

先人たちの見積もり：修正版

(天の川銀河で)			(恒星1個あたり)					
交信を行う地球外文明の総数	銀河内の星形成率	惑星系を有する割合	生命に適した環境をもつ惑星の数	生命が実際に生まれる割合	知的生命体が生まれる割合	交信を行うほどの文明を発達させる割合	知的生命体の文明の寿命	

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

1.5~6万個

(1963年)

1.5~3

(個/年)

0.1~0.2

1

0.1

0.1

1,000万

(年)

2~8個

(1981年)

0.01

0.5

0.25

1万

(年)

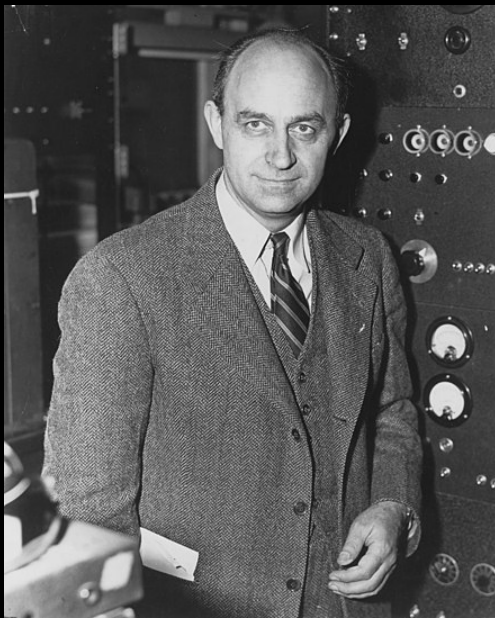
悲観的に見積もっても地球外文明の存在はありえる！？

別の見積もりで、厳しい条件で36個以上との報告 (Westby & Conselice '20)

フェルミのパラドックス

「宇宙には沢山の生命体が存在し、知的生命体も多数あると考えられるのに、なぜ地球に飛来した痕跡が無いのか」

1950年



エンリコ・フェルミ

Where are they ?

銀河開拓シミュレーション

光の速さの0.1%で開拓が進んだ場合

寿命10万年

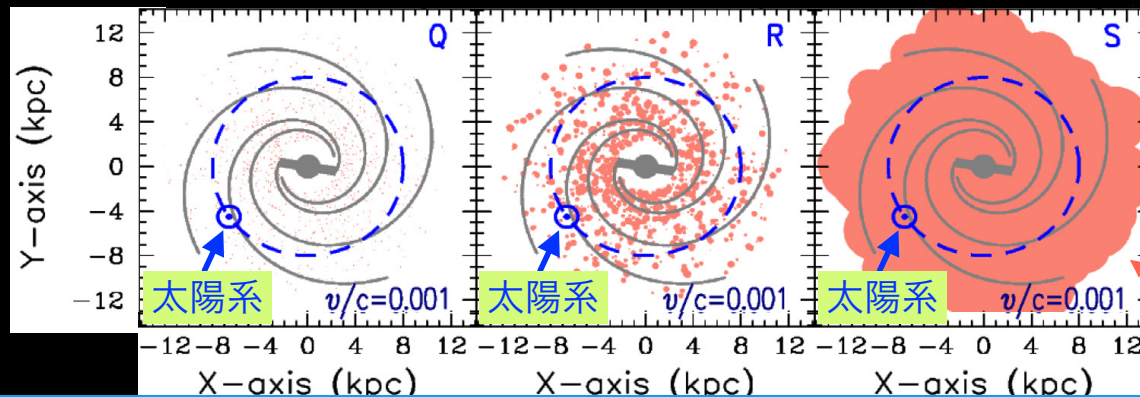
100万年

1000万年



エンタープライズ号
「スタートレック」

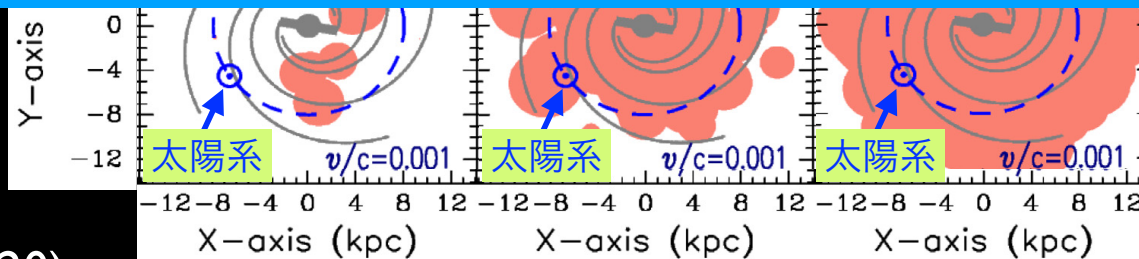
文明の数が1,000の場合



文明の寿命がどれだけ長くなるか、全く未知
ドレイク方程式にもまだ多くの不定性がある
(今後の観測で解明が進むか?)

各文明の領域

文明の数が1,000万年の場合



長寿命の文明があれば遭遇率は上がる

Parantzios (2020)

まとめのまとめ

ノーベル物理学受賞者が切り拓き、その後の研究で明らかになった様々なスケールでみた宇宙の発見

大きな
スケール

宇宙のこだまから（音波）解明された宇宙の
進化と浮かび上がった謎・暗黒エネルギー

小さな
スケール

太陽系外に広がる新しい世界・系外惑星の
発見と多様性、生命誕生の可能性

我々の宇宙観・世界観が大きく変貌した

最後に



残された謎

暗黒エネルギーの正体とこの宇宙の運命

系外惑星の多様性の起源と普遍性、生命探査

今後の研究で説明が進めば

私たちの世界観、さらに生命観も、大きく変化するかも

10桁以上離れたスケールの2つの謎がつながる？