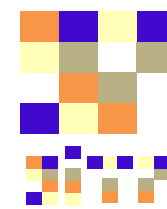


2019年11月15日

第92回 知の拠点セミナー



YITP
YUKAWA INSTITUTE FOR
THEORETICAL PHYSICS

最新観測がもたらす 宇宙論の変革

たるや あつし

樽家 篤史

基礎物理学研究所

基礎物理学研究所

Yukawa Institute for Theoretical Physics

京都大学に設置された理論物理学研究の共同利用研究拠点

1949年 湯川秀樹博士がノーベル物理学賞を受賞

1952年 湯川記念館を設置

1953年 共同利用施設として基礎物理学研究所が発足

2008年 益川敏英博士がノーベル物理学賞を受賞

現在、

素粒子・原子核・宇宙・物性・量子情報

の5分野からなる



湯川秀樹博士 (1949年)

基礎物理学研究所

共同利用研究拠点として

理論物理学研究者のさまざまな研究活動をサポート：

国内・国際研究会の開催

地域スクール・ゼミ講師派遣

アトム型研究員制度、短期滞在制度

スパコンの共同利用

など

さらに、理論物理学研究の推進（現在、研究スタッフ25名）

ミクロな素粒子からマクロな宇宙まで

自然界に隠れた物理法則を探求



基礎物理学研究所での宇宙研究

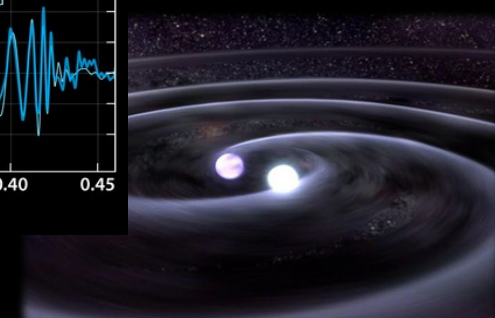
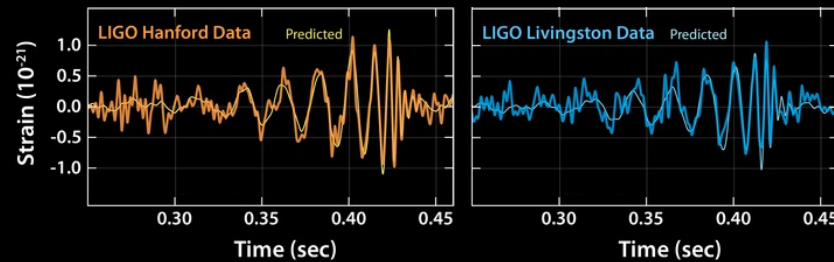
星から宇宙まで様々な階層で起こる物理現象の理論的解明

(スタッフ7名)

重力理論・一般相対論

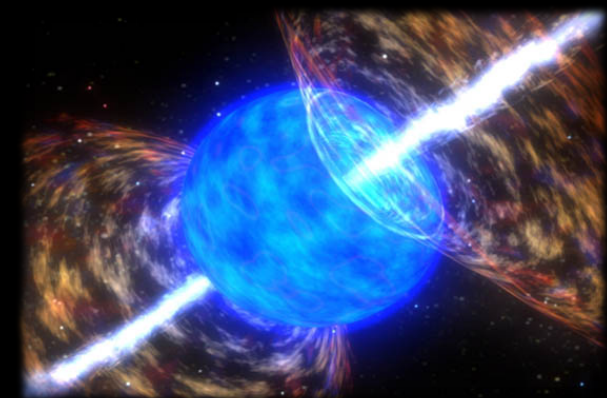
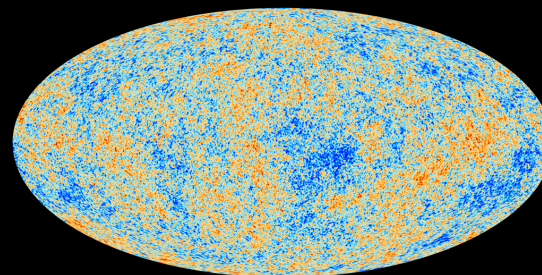
$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

重力波物理学



高エネルギー天体物理学

宇宙論



今日の講演内容

宇宙の成り立ち・進化を探る宇宙論の研究

宇宙に広がる原始宇宙からの「こだま」

宇宙の「こだま」発見とノーベル物理学賞

宇宙のこだまの最新観測から宇宙の謎を解き明かす

キーワード

宇宙マイクロ波背景放射

宇宙の大規模構造

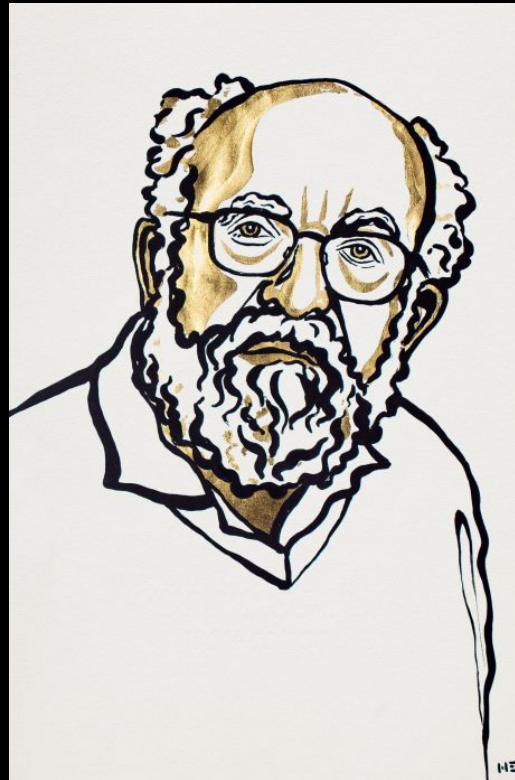
バリオン音響振動



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

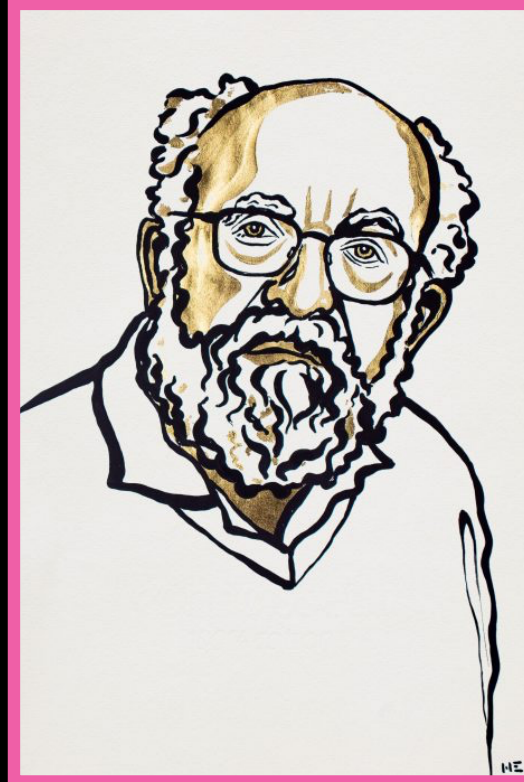


ディディエ・ケロー
Didier Queloz

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

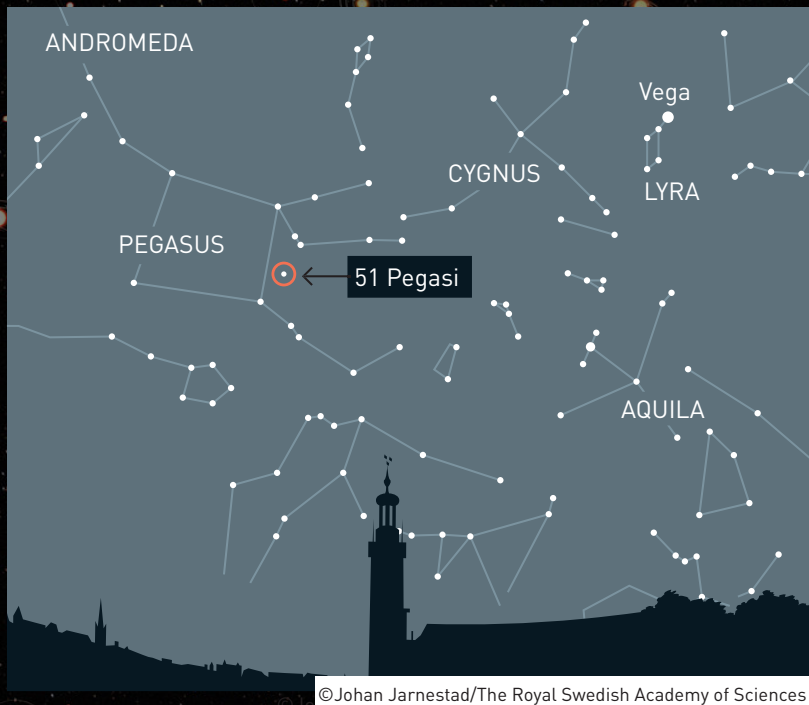


ディディエ・ケロー
Didier Queloz

太陽系外惑星の発見

太陽系外惑星の発見

1995年、ペガサス座51番星に惑星の存在を初めて発見

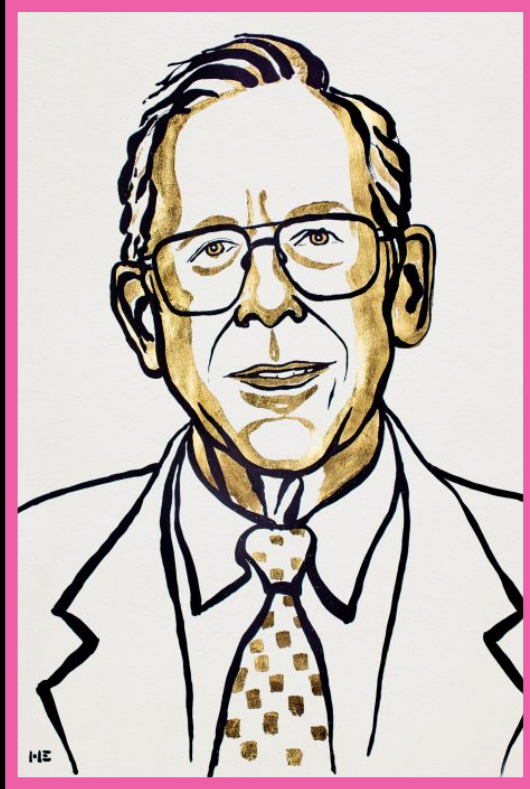


主星の周期的なふらつき
から伴星の存在を確認

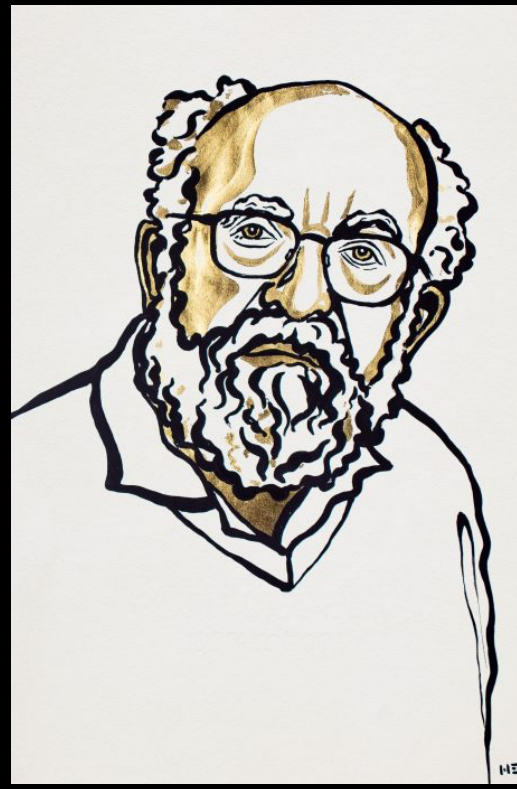


以後の観測の進展で、太陽系外で発見された惑星の数は爆発的に増えた (~4000個)

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

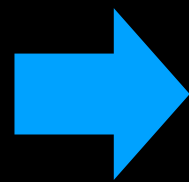


ディディエ・ケロー
Didier Queloz

物理学的宇宙論における数々の理論的発見

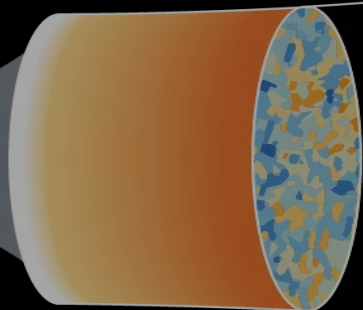
ピーブルス博士の功績

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

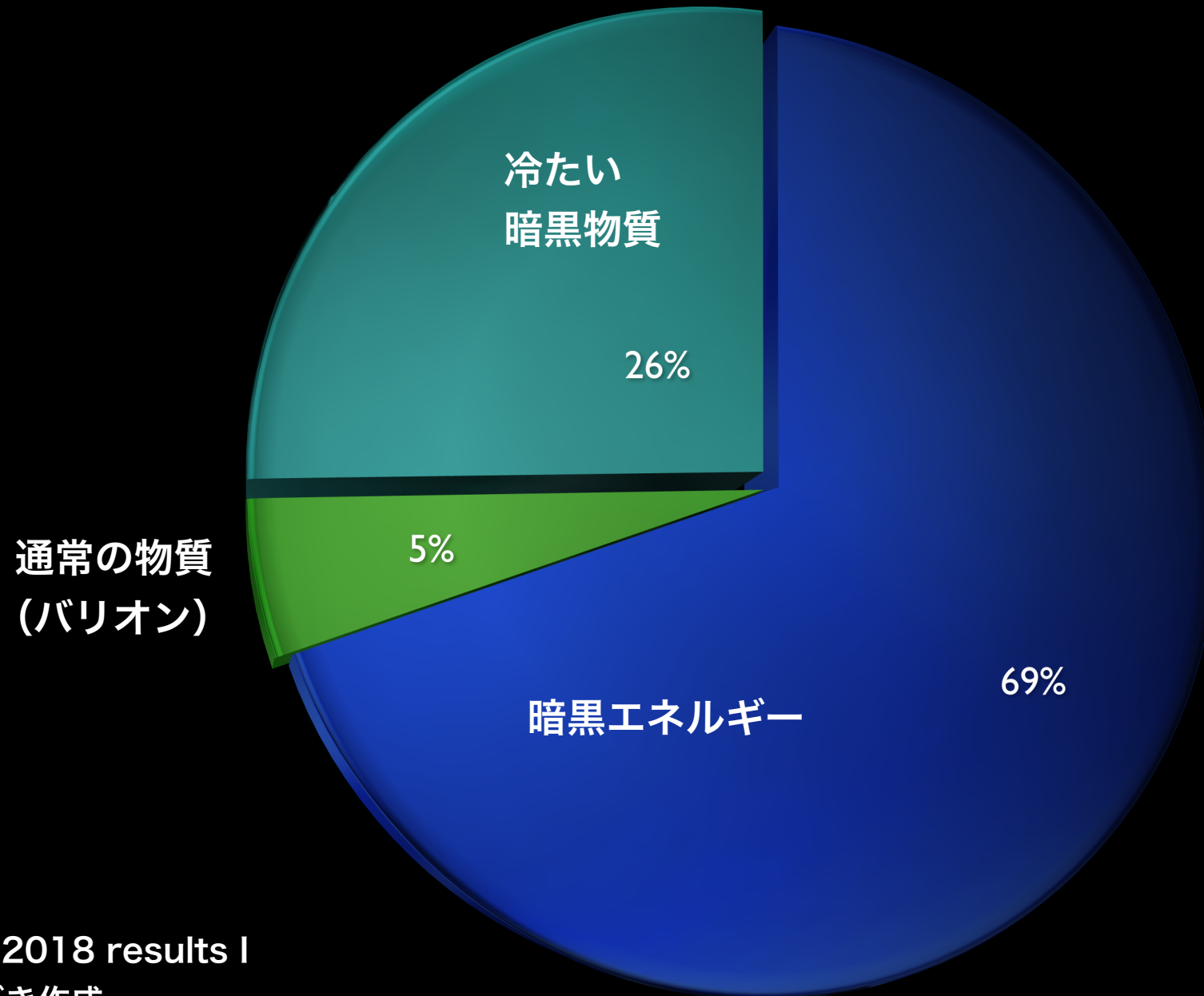
宇宙のこだまに対する理論的予言
（1970年）

宇宙の大きさ

140億年

時間

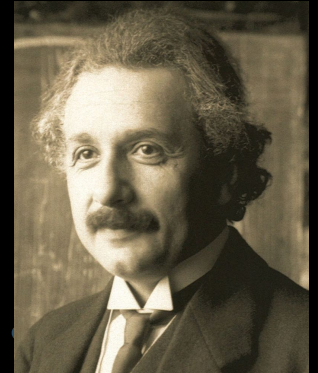
宇宙の構成要素



黎明期の宇宙論研究

1915~1916年

アインシュタインが一般相対性理論を提唱



アインシュタイン

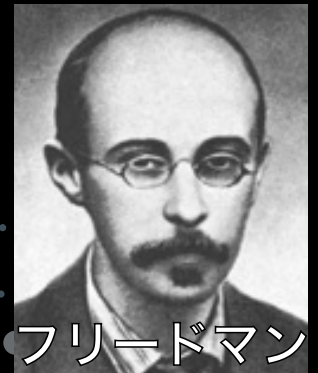
1922, 1924年

フリードマンの膨張宇宙モデル

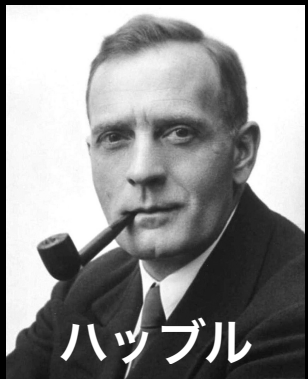


1927, 1929年

ハッブル、ルメートルによる宇宙膨張の発見



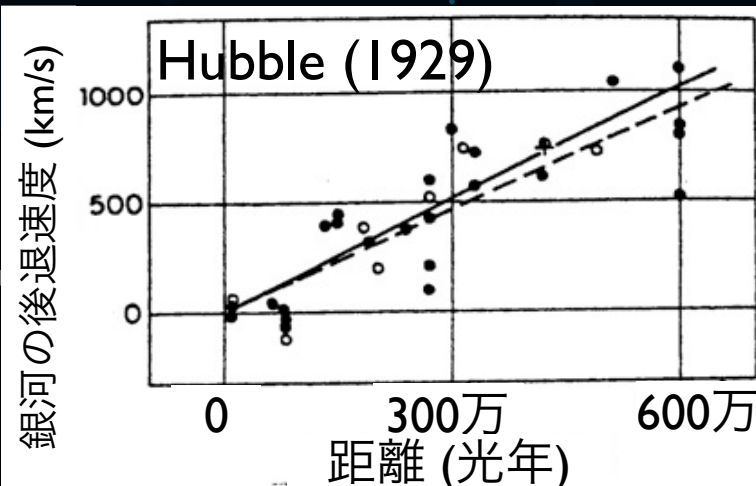
フリードマン



ハッブル



ルメートル



遠い銀河ほど
速く遠ざかる

(ハッブル=ルメートル則)

黎明期の宇宙論研究

ガモフらのビッグバン宇宙論 (1948年)

宇宙は熱い火の玉から始まった

(熱い火の玉から我々の体を形作る元素が生まれた)



ガモフ

ホイルらの定常宇宙論 (1949年)

宇宙は物質が絶えず生成されて時間的に変化しない



ホイル

どうすれば決着がつくか？

ビッグバンの残光

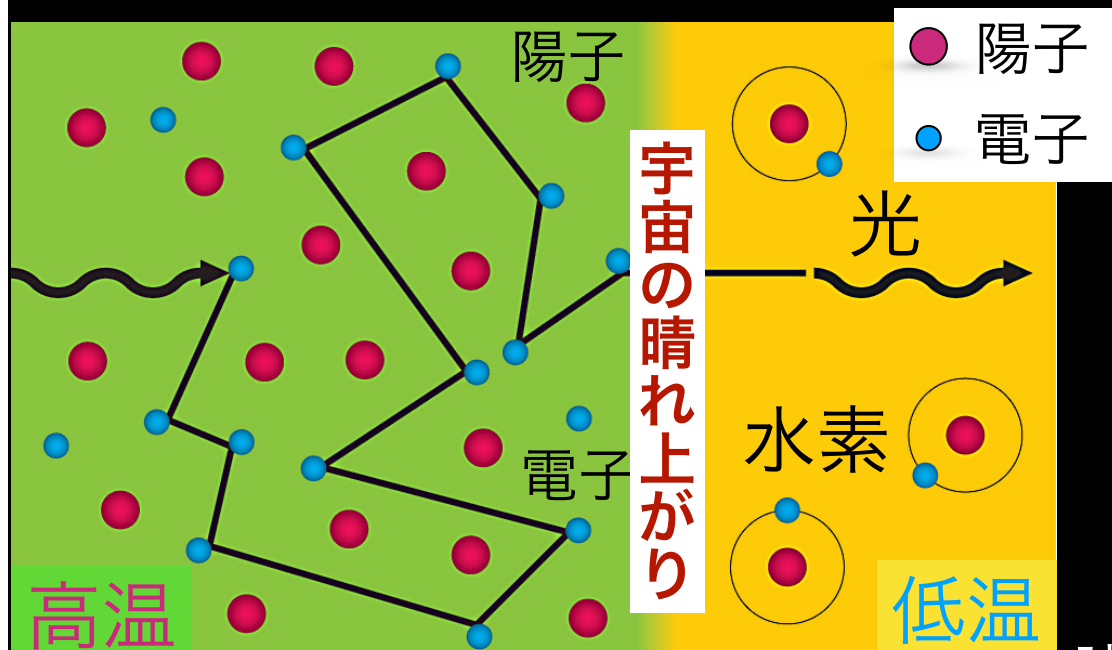
ガモフらが正しければ

火の玉宇宙の残光が見えるかもしれない

(Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson '65)

ビッグバン直後の

高温プラズマ中では光は散乱されてまっすぐ進めない



宇宙が冷えると

プラズマが中性化し、光は
まっすぐ進めるようになる

(宇宙の晴れ上がり)

→ “残光” として宇宙に漂う

時間

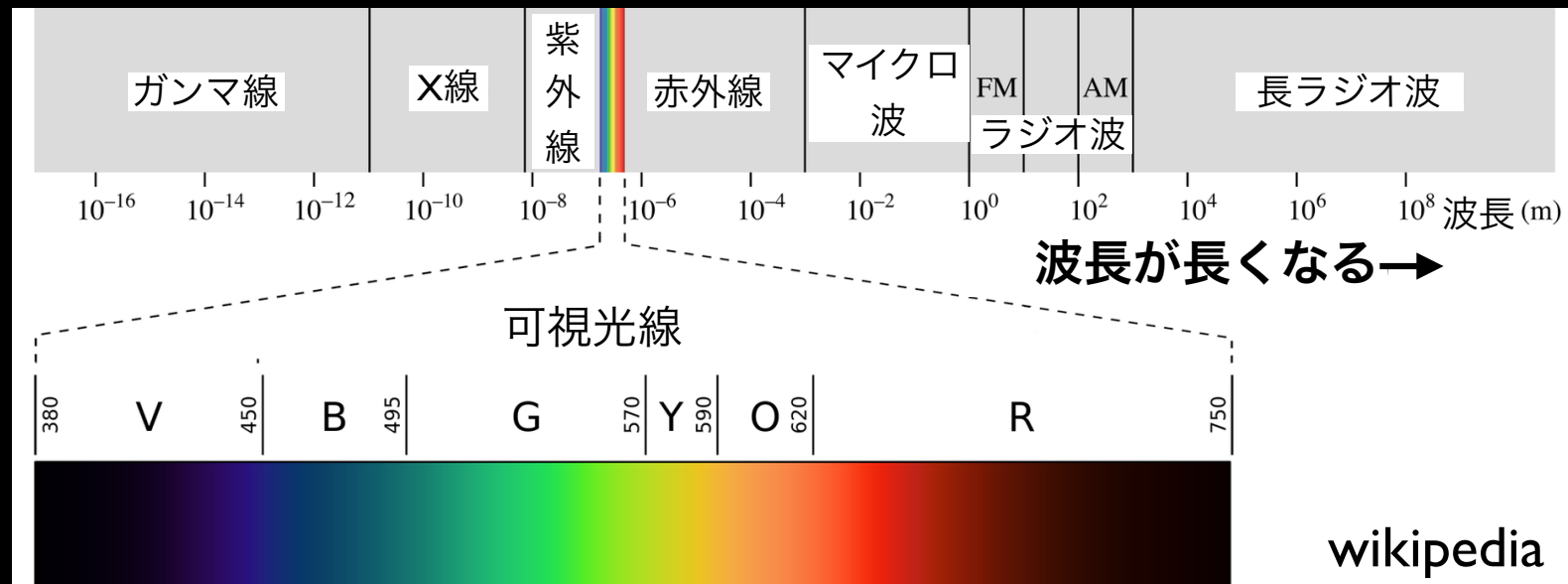
ビッグバンの残光

ガモフらが正しければ

火の玉宇宙の残光が見えるかもしれない

(Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson '65)

光 = 電磁波という波



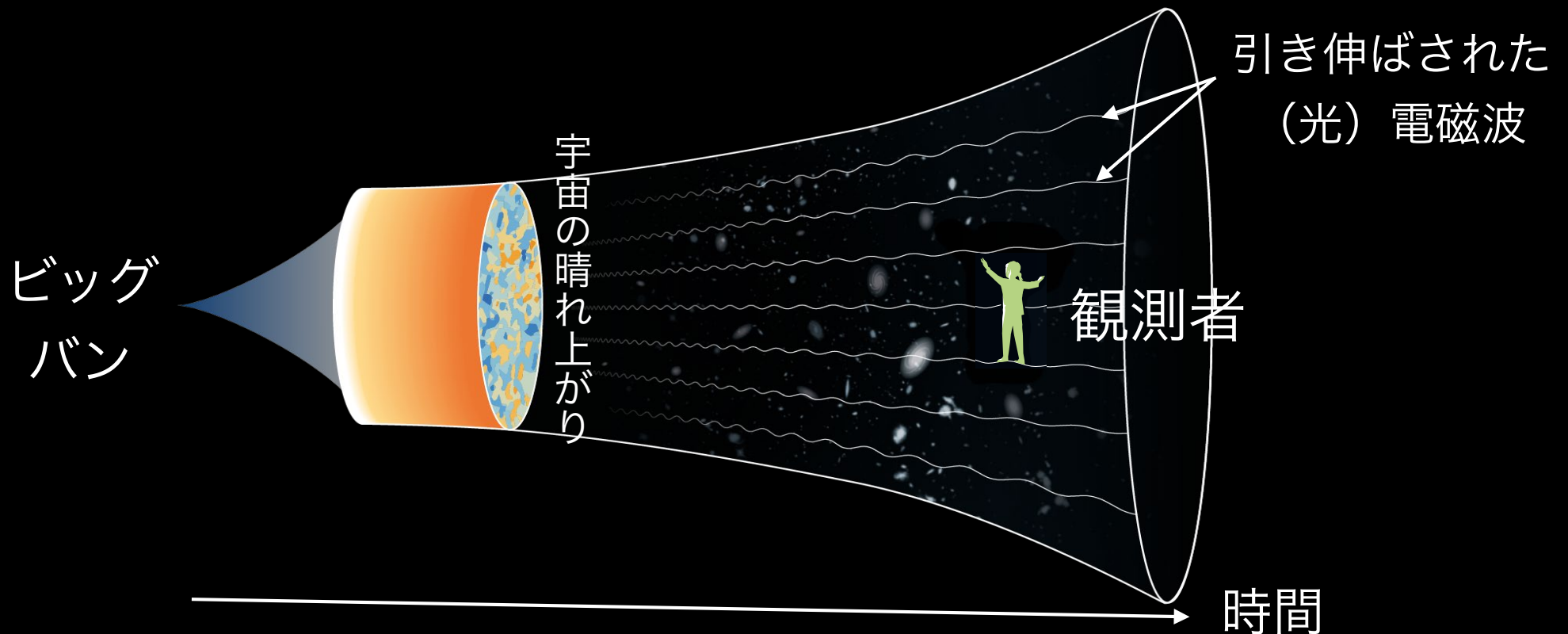
宇宙膨張によって光の波長は引き伸ばされる (赤方偏移)

ビッグバンの残光

ガモフらが正しければ

火の玉宇宙の残光が見えるかもしれない

(Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson '65)



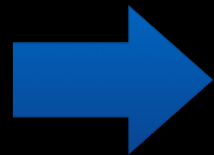
残光はマイクロ波として観測できる

宇宙マイクロ波背景放射

1965年、ペンジアスとウィルソンにより、宇宙のどの方角から
も同じ強度の電波（マイクロ波）が観測される

Penzias & Wilson ('65)

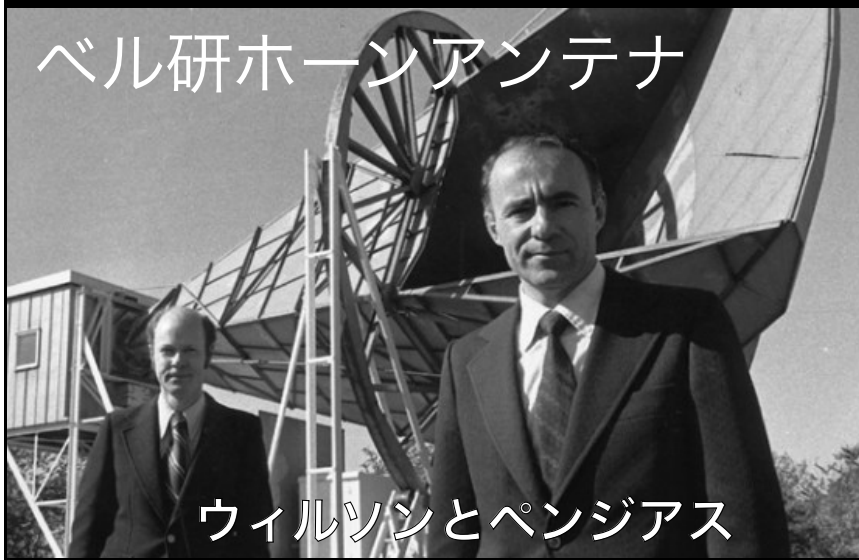
絶対温度



2.725°K の熱放射（摂氏マイナス270度）

（発見時の測定値は $3.5^\circ \pm 1.0^\circ \text{K}$ ）

ベル研ホーンアンテナ



ウィルソンとペンジアス

ビッグバン理論の決定的証拠

1978年、ペンジアスとウィルソンに
ノーベル物理学賞

宇宙の残光発見の顛末

ピーブルス博士らのチームは観測に向けて装置開発していたが
ペンジアスとウィルソンに先を越された

残光の予言も実は1949年になされていた Alpher & Herman ('49)
(予言値は5°Kと高めだった)

ただこれを機に、

宇宙マイクロ波背景放射に関連した一連の研究を発表

(Peebles '65, 66a, 66b, ...)

物理法則を宇宙全般に応用

一般相対論、流体力学、統計力学、
量子力学、素粒子物理学、...

物理学宇宙論
の誕生

宇宙のこだま

宇宙の残光から、宇宙の極初期に発せられたこだま
(音波) が聞こえるかもしれない

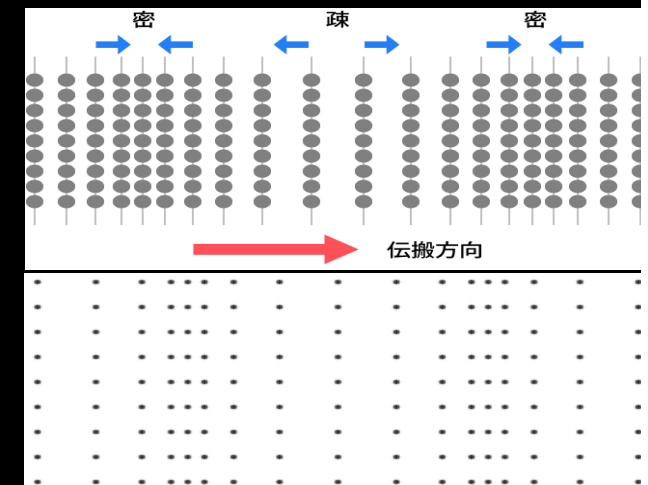
Peebles & Yu ('70)

宇宙が晴れ上がる前、

光と高温プラズマで満たされたスープ状態
(電子、陽子)

スープをゆらすと波が立つ
疎密波と呼ばれるもの

例・空気を伝わる音→音波



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

宇宙のこだま

宇宙の残光から、宇宙の極初期に発せられたこだま
(音波) が聞こえるかもしれない

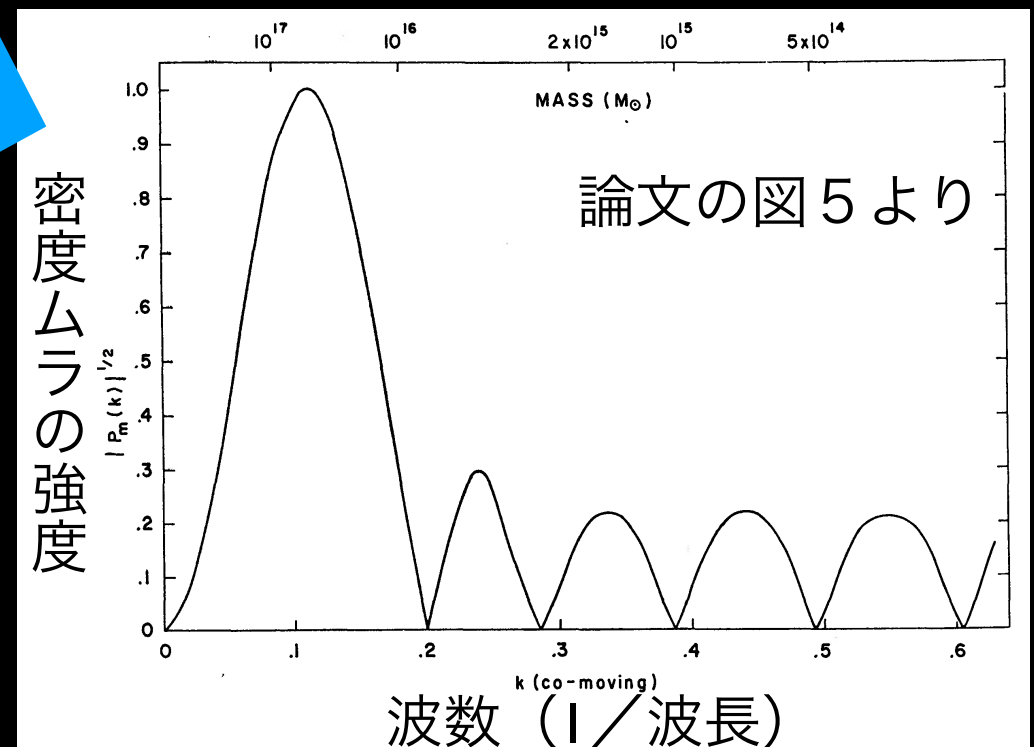
Peebles & Yu ('70)

光と高温プラズマのスープが
音響振動する様を具体的に
数値計算、その存在を予言

圧力と重力のバランス

ただし、
スープをゆらすタネが必要
(とても小さい)

本当に見つかるのか？



10万分の1のゆらぎ

1992年、宇宙マイクロ波背景放射に小さなゆらぎが見つかる！

- 球面上に角度7°程度の特徴的パターン
- ゆらぎの大きさ（振幅）は $\frac{1}{100,000}$



宇宙背景放射探査機

COBE



スムート



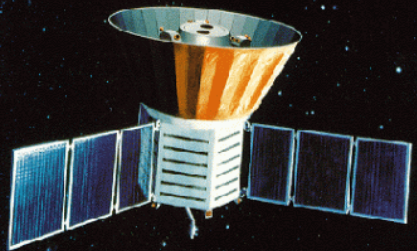
マザー

2006年ノーベル物理学賞受賞

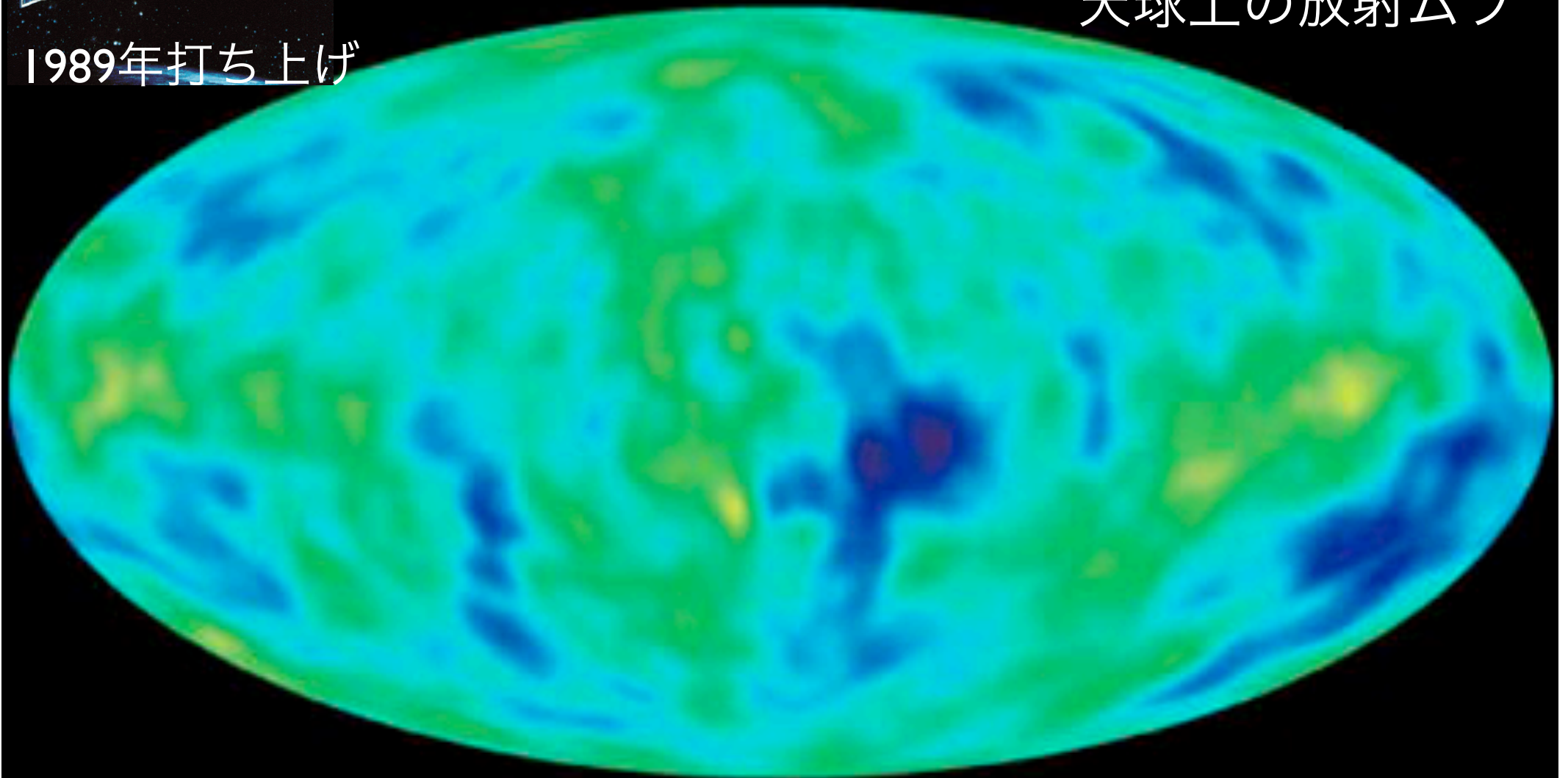
COBE 衛星による観測

(**CO**smic **B**ackground **E**xplorer)

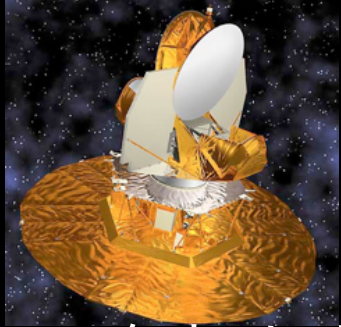
天球上の放射ムラ



1989年打ち上げ

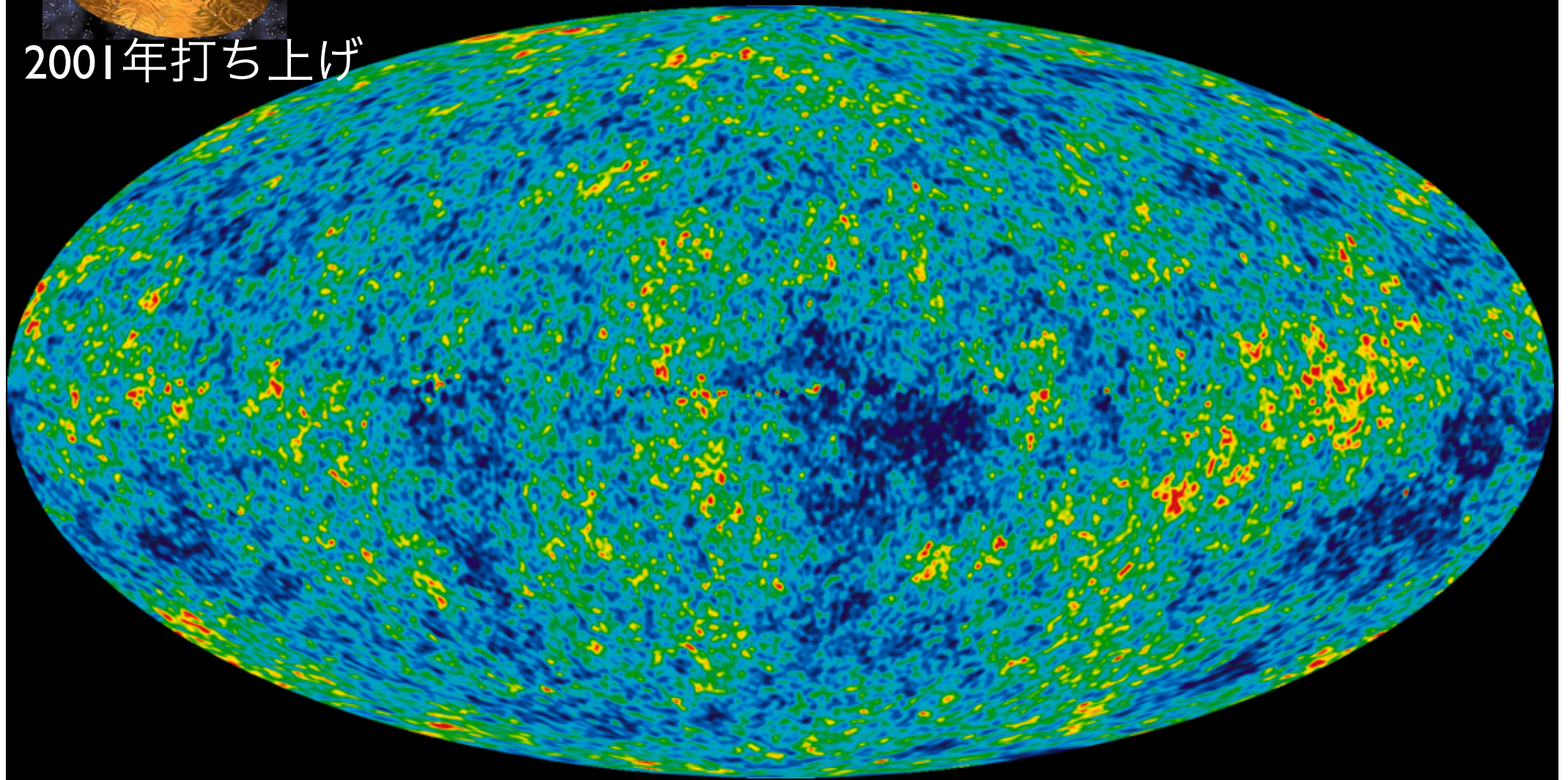


WMAP 衛星による精細観測

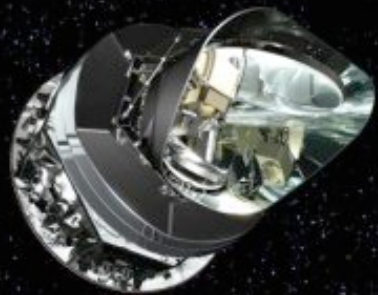


(**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe)

2001年打ち上げ

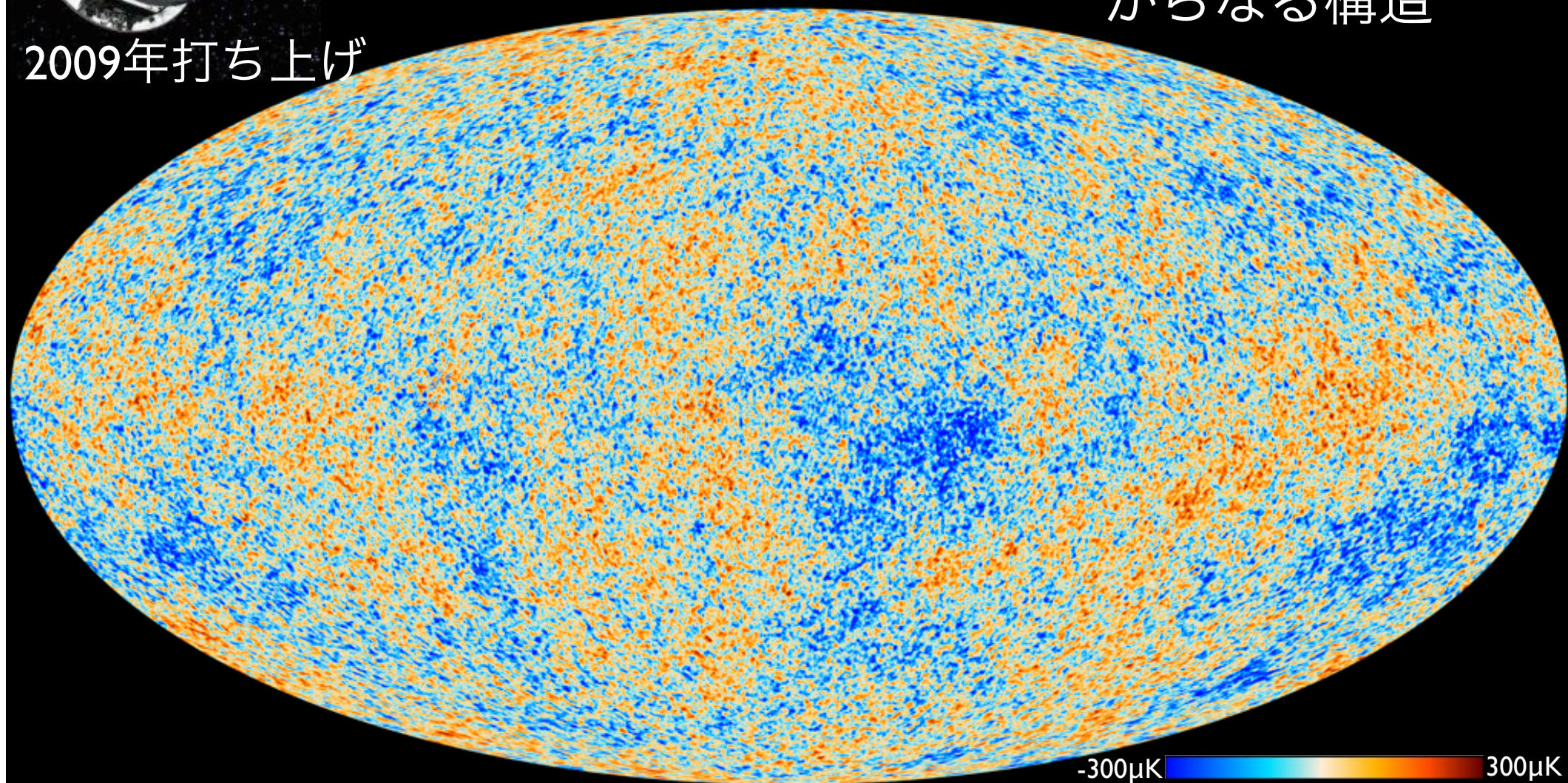


Planck 衛星による高精細観測

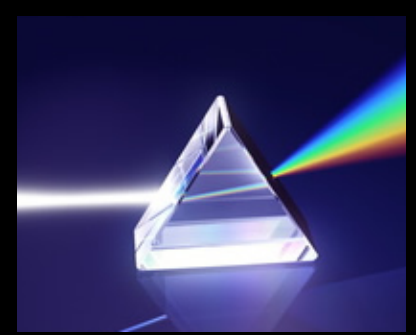


2009年打ち上げ

無数の小さなスポット
からなる構造



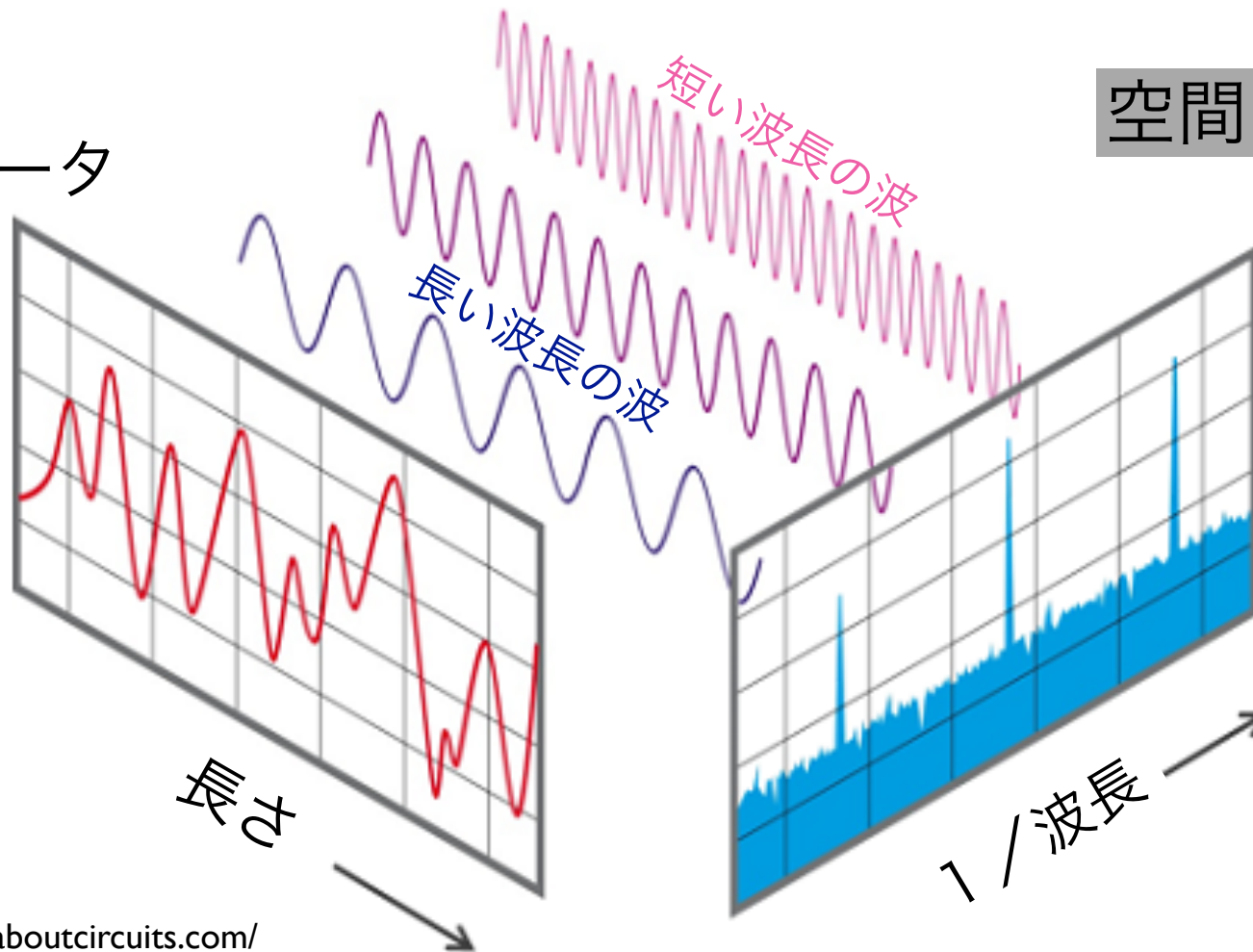
スペクトル解析



一見、ランダムなパターンだが...

観測データをいろんな波長の波の集まりで表現

観測データ



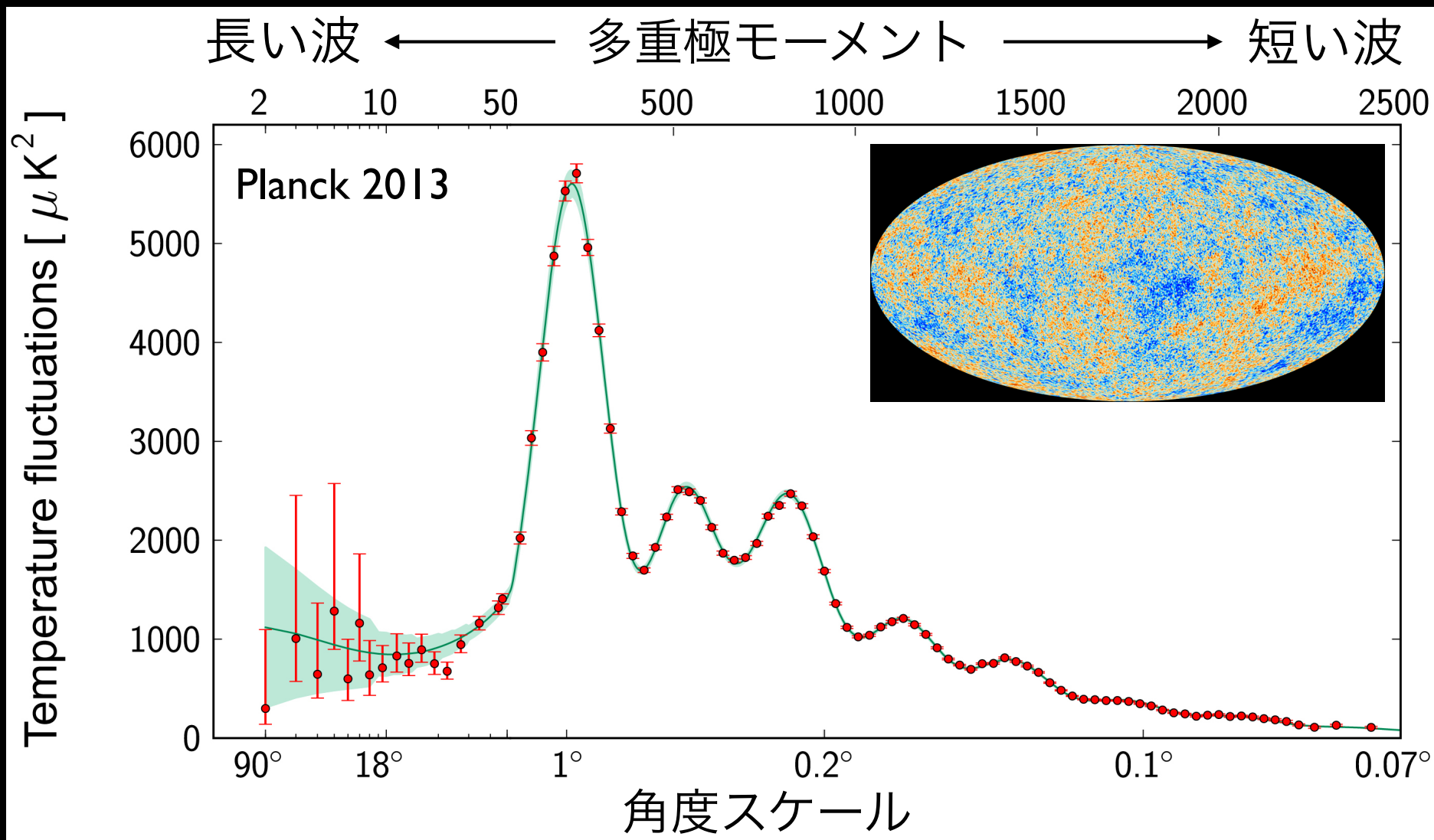
空間 1 次元の場合

スペクトル空間

パワース
ペクトル

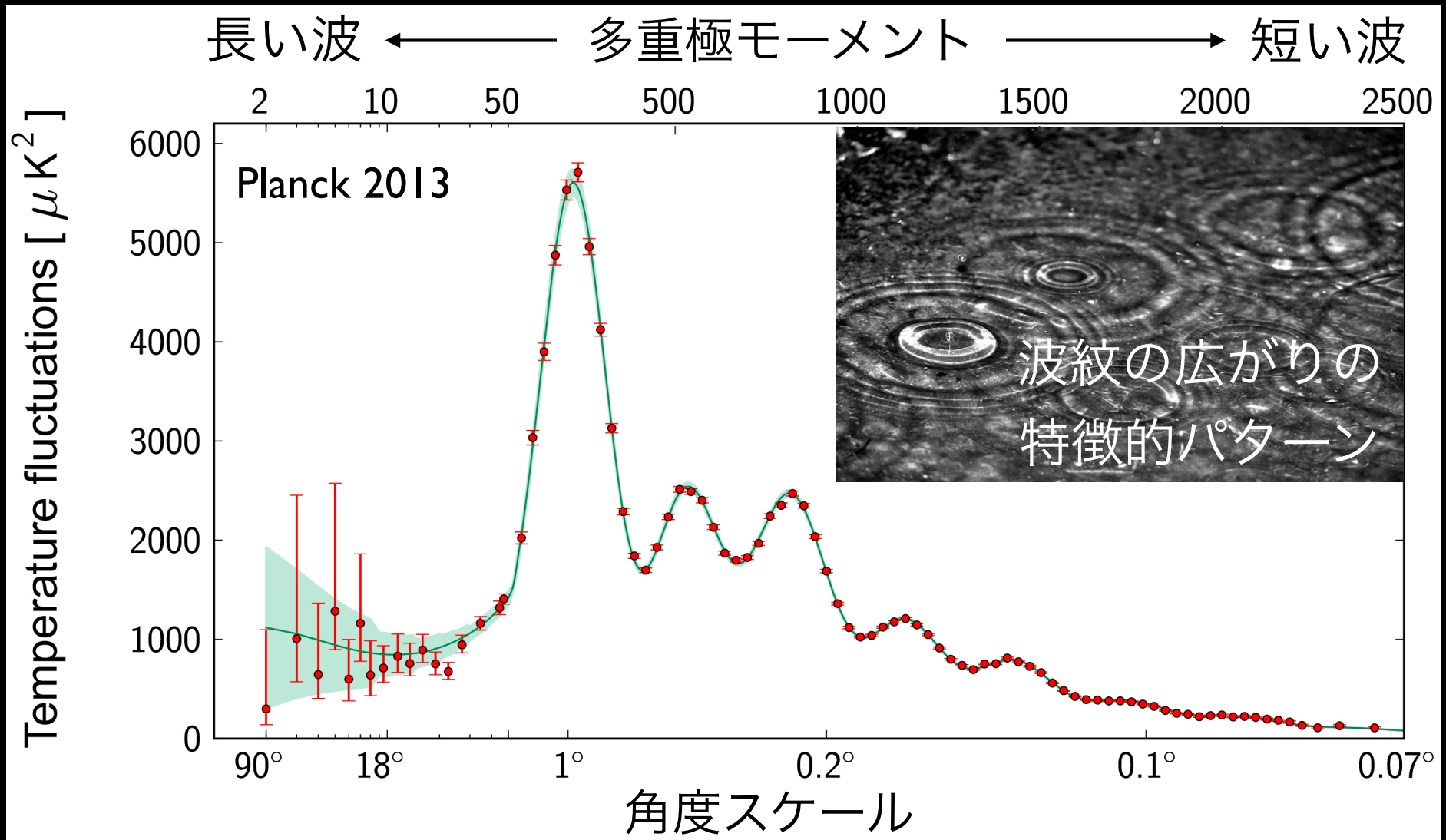
パワースペクトル

Planck衛星による観測結果



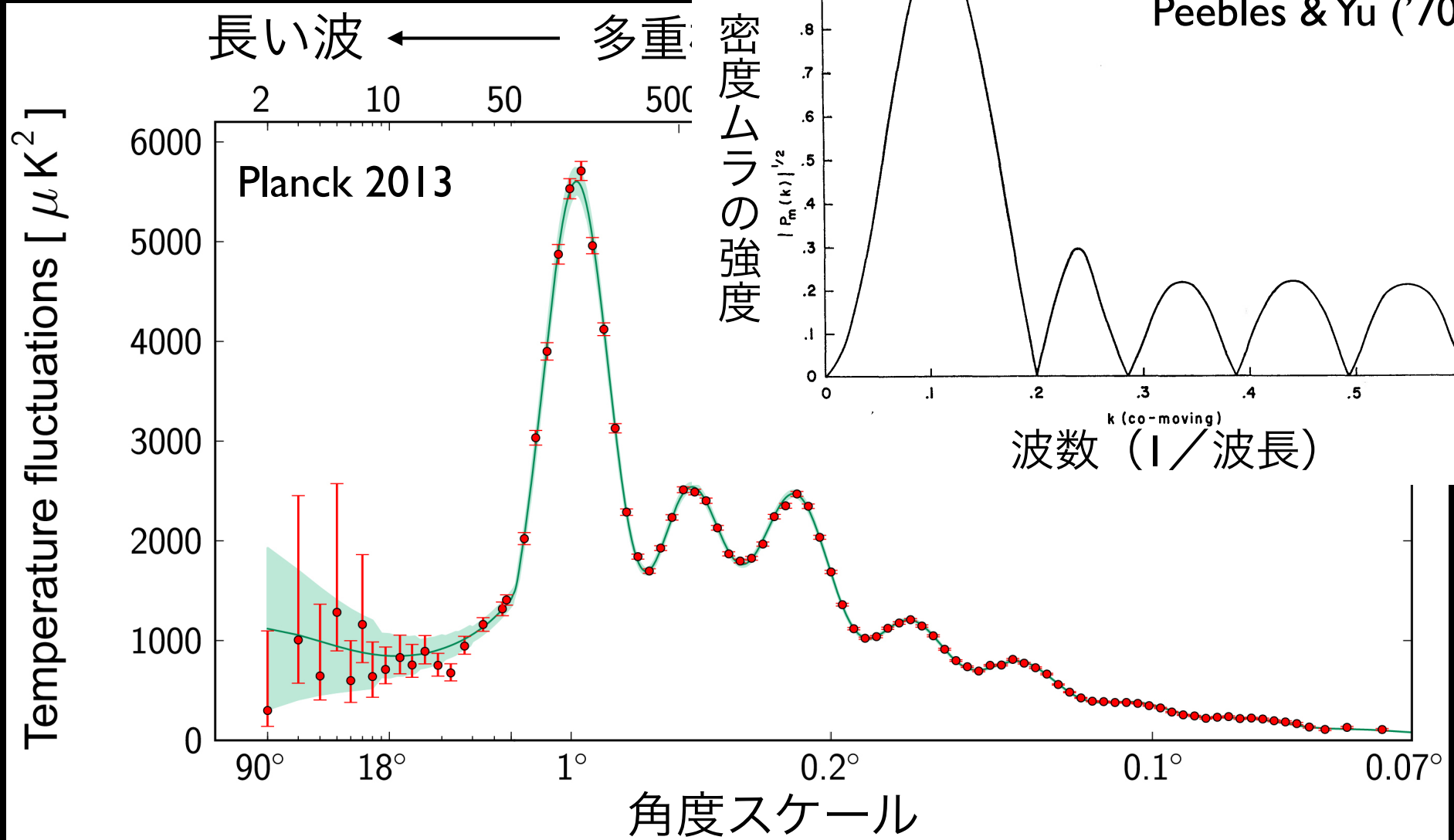
パワースペクトル

Planck衛星による観測結果



パワースペクトル

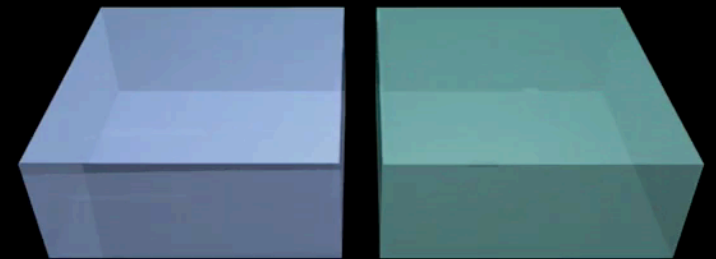
Planck衛星による観測結果



スペクトルに隠された情報

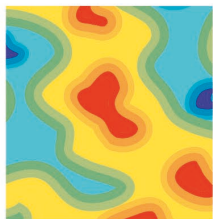
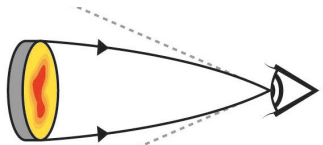
スペクトルの形状・パターンには様々な情報を含んでいる

- 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

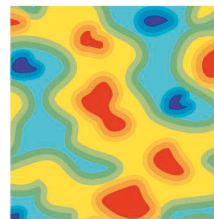
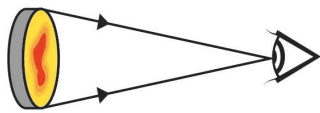


宇宙論の宝庫！

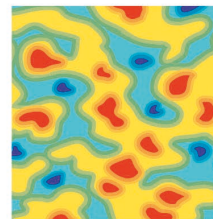
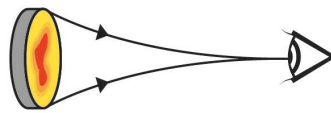
閉じた宇宙



平坦な宇宙



開いた宇宙



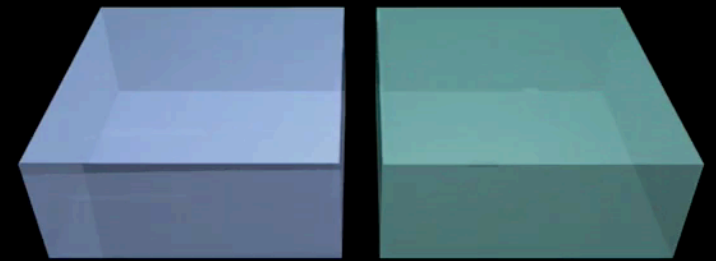
1990年代に解読方法が確立
(宇宙の構造形成理論)

基礎物理学研究所も含め
日本人研究者の貢献も多数

スペクトルに隠された情報

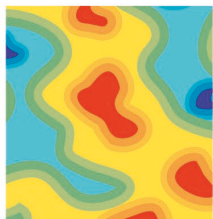
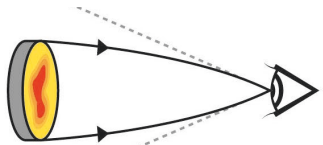
スペクトルの形状・パターンには様々な情報を含んでいる

- 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

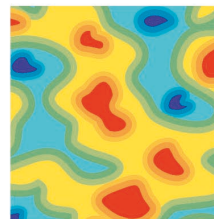
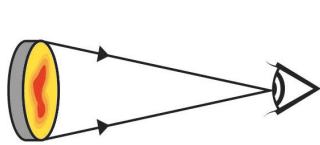


宇宙論の宝庫！

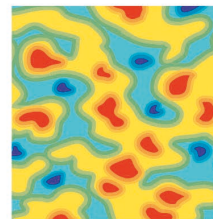
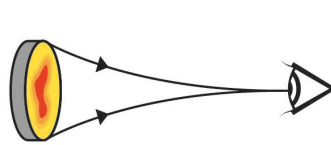
閉じた宇宙



平坦な宇宙



開いた宇宙



1990年代に解読方法が確立
(宇宙の構造形成理論)

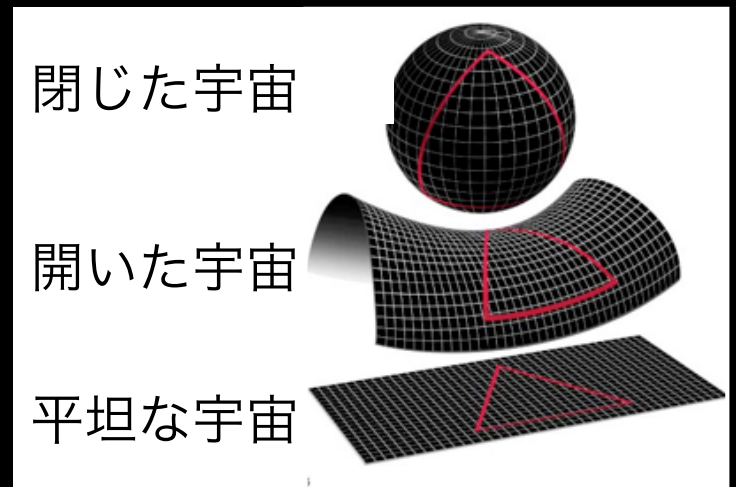
基礎物理学研究所も含め
日本人研究者の貢献も多数

解読結果

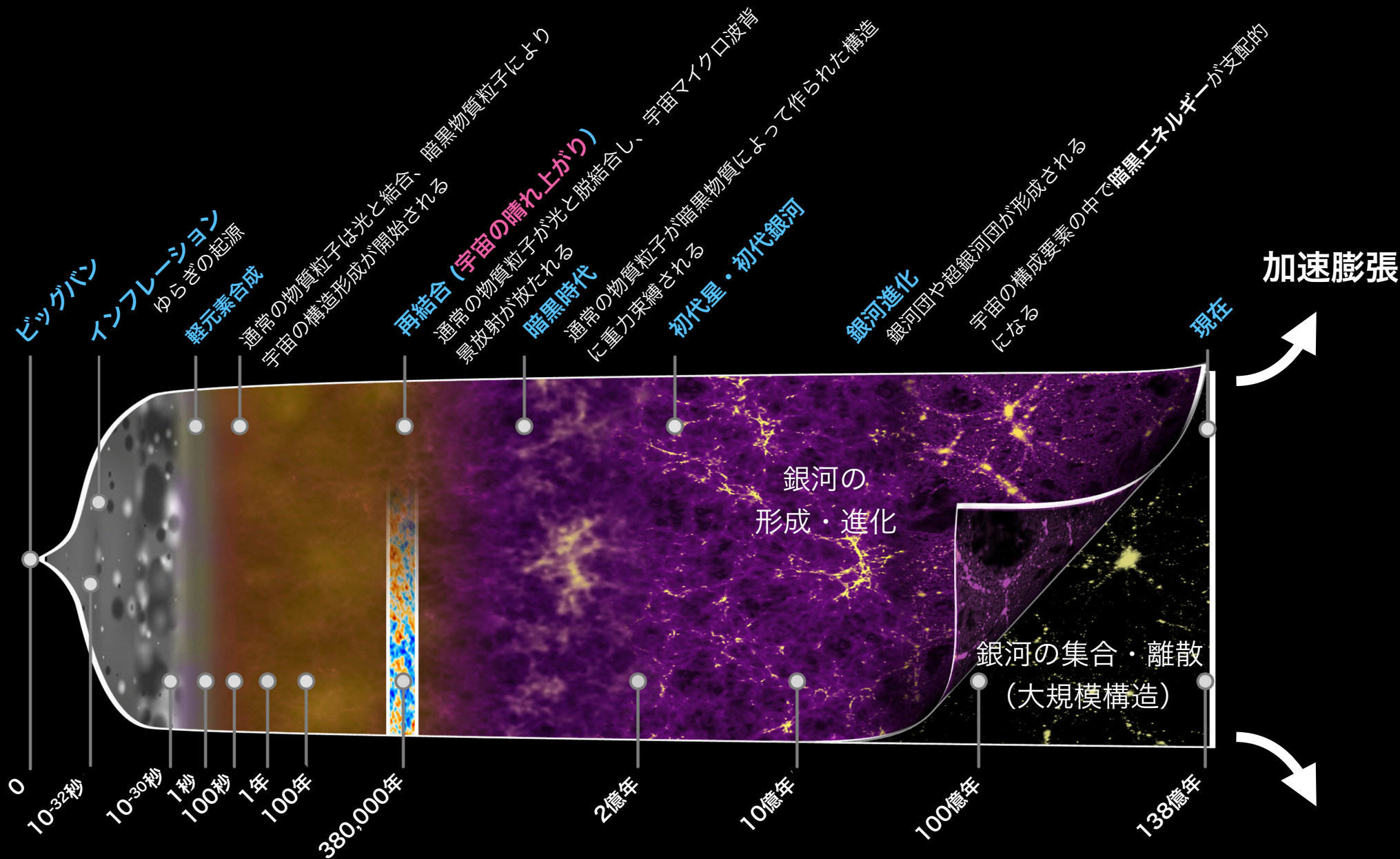
たかだか6個のパラメーターでたくさんのデータ点を説明

➡ **宇宙の標準モデルが確立 (2000年代後半)**

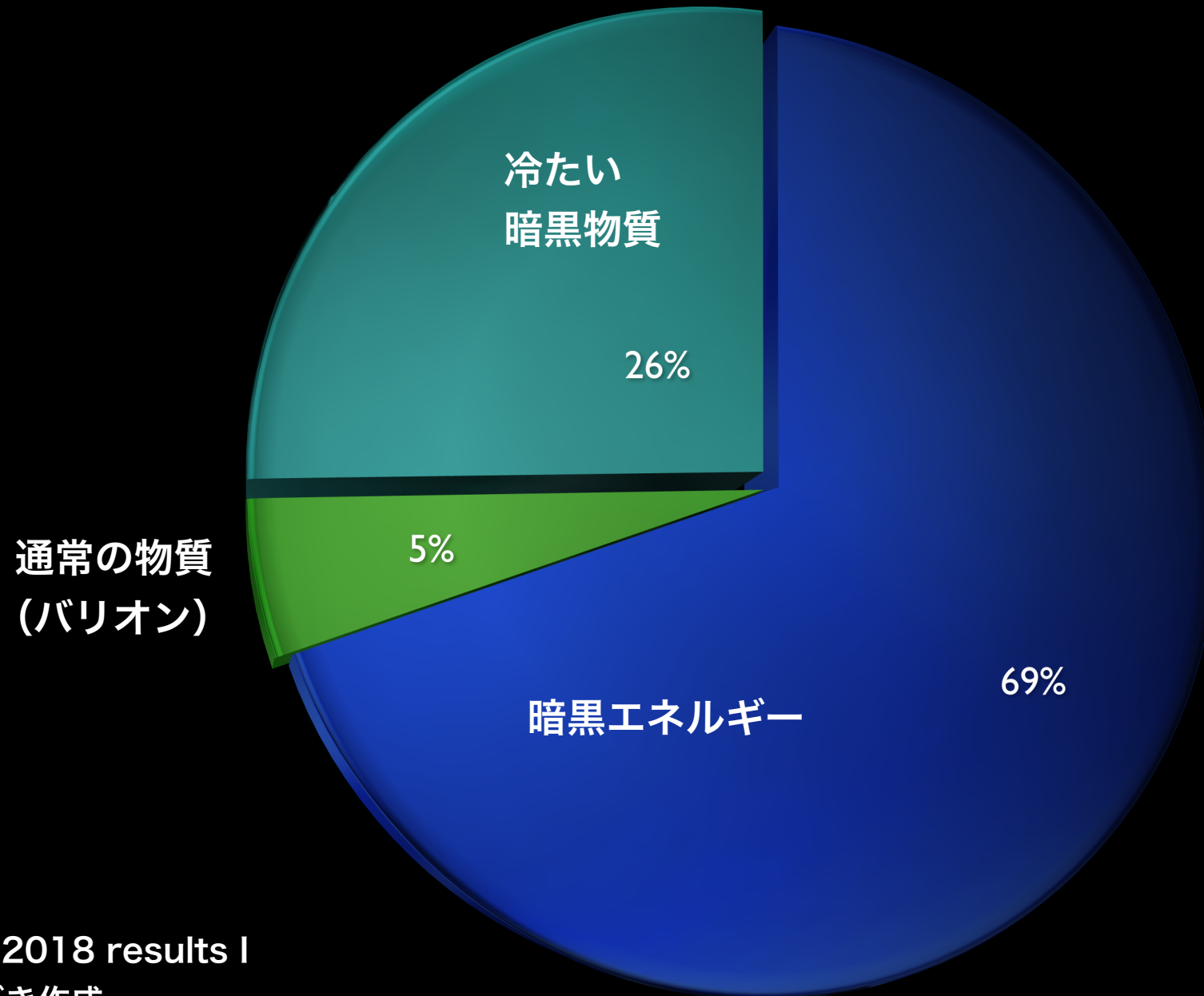
- 宇宙の年齢は**138億年**
- 宇宙は高精度で**平坦**だった
- 宇宙極初期の**インフレーション**を強く示唆
- 宇宙の物質・エネルギー組成が**確定**



宇宙の標準モデルにもとづく宇宙の進化史



宇宙の構成要素



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！？

もう一つの宇宙のこだま

ピーブルス博士が予言した「宇宙のこだま」：

光と**高温プラズマ**のスープ状態だった過去の宇宙から発せられた**音波**の痕跡が残っている



ピーブルス博士

光（電磁波） …… 宇宙マイクロ波背景放射

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

銀河の集まりにも「宇宙のこだま」
の痕跡が残っている？

銀河サーベイ

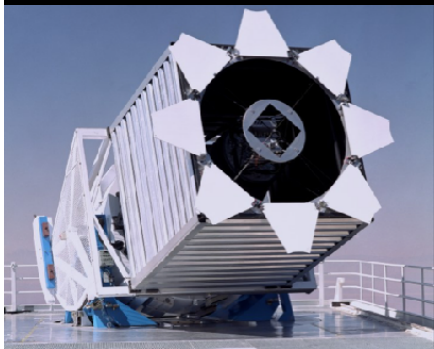
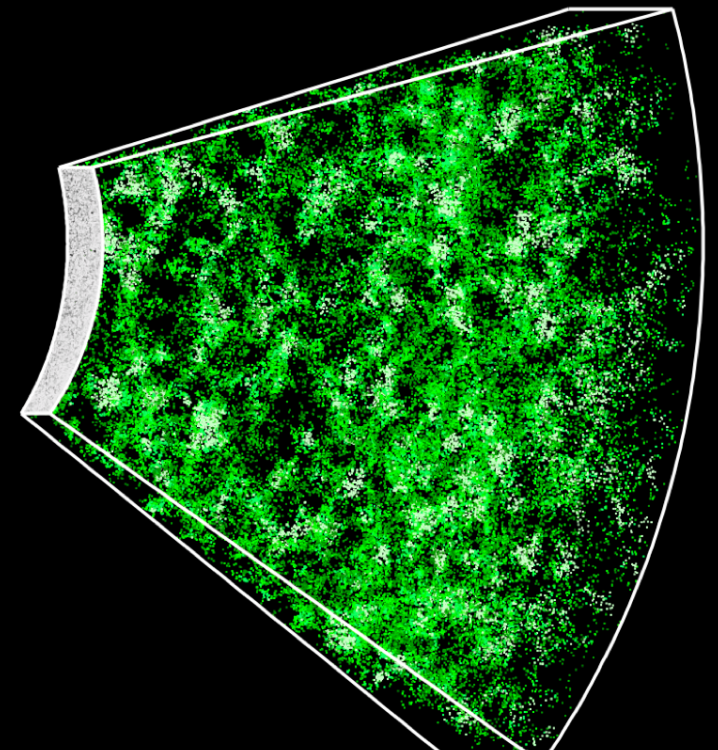
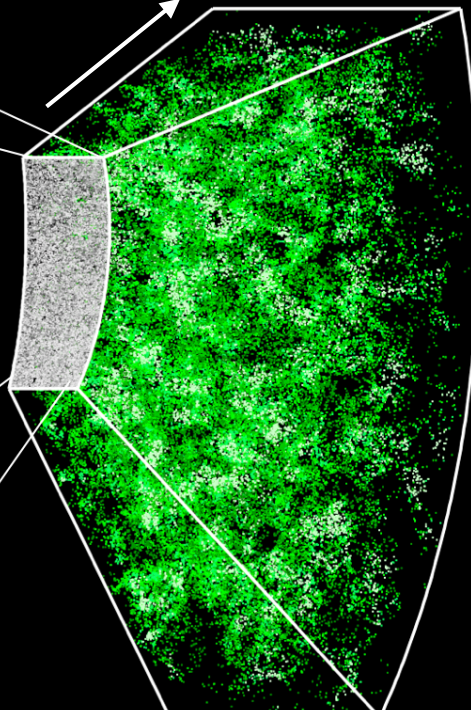
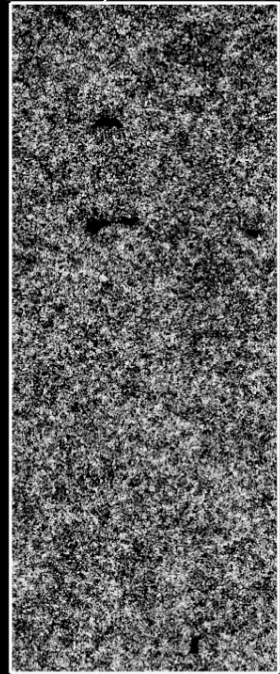
遠方の銀河1つ1つをくまなく探索 → 3次元地図を作成

- 天球面上の位置
- 奥行き：赤方偏移（遠い銀河ほど赤く見える）

ハッブル・ルメートル則

天球面上の銀河
(120,000個)

赤方偏移



光学望遠鏡

宇宙の大規模構造

遠方のたくさんの銀河を観測すると現れる巨大な構造



Sloan Digital Sky Survey

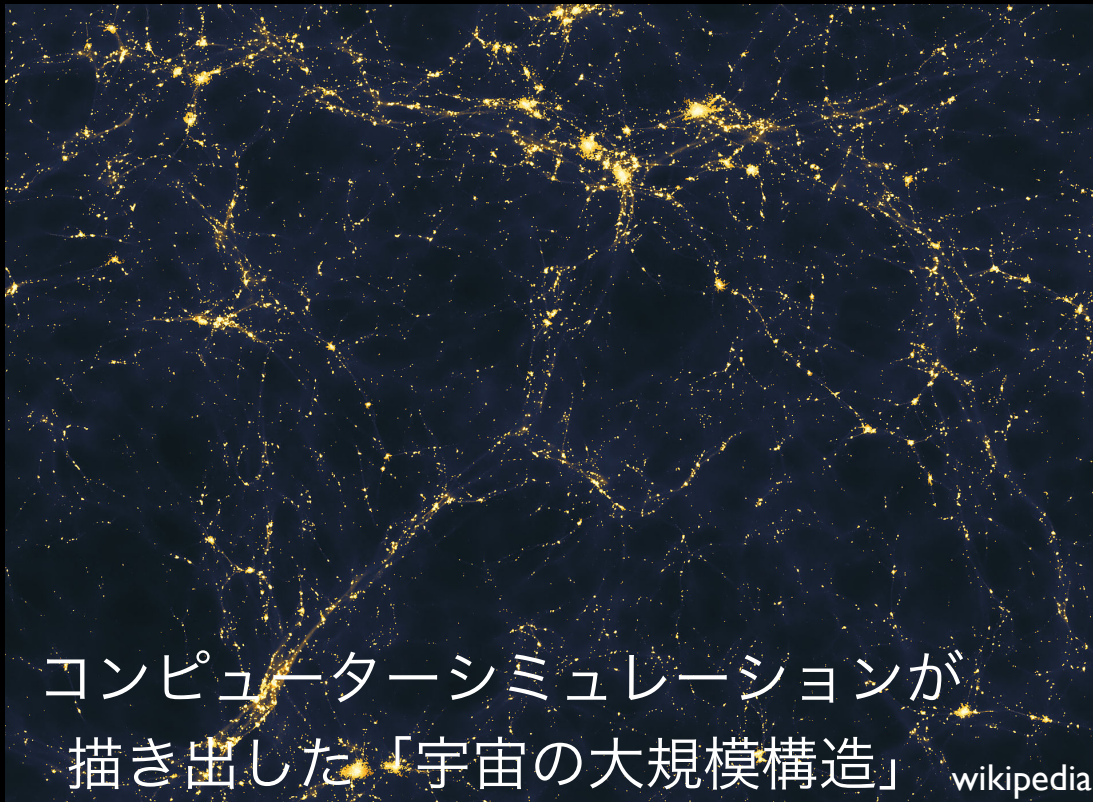
Miguel A Aragon (JHU), Mark Subbarao (Adler P.), Alex Szalay (JHU)

<https://www.sdss3.org/press/dr9.php>

スローンデジタルスカイサーベイから得られた銀河分布

宇宙の大規模構造

遠方のたくさんの銀河を観測すると現れる巨大な構造
(のっぺりと分布しているわけではない)



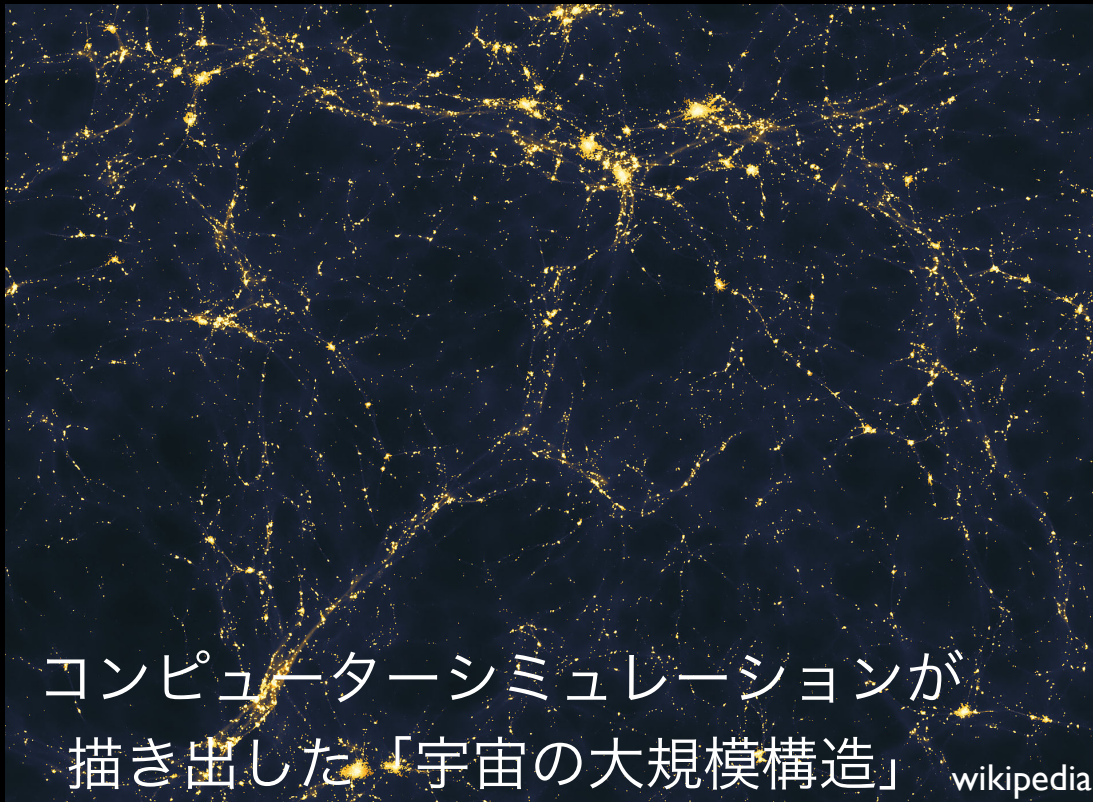
<https://earthobservatory.nasa.gov/>



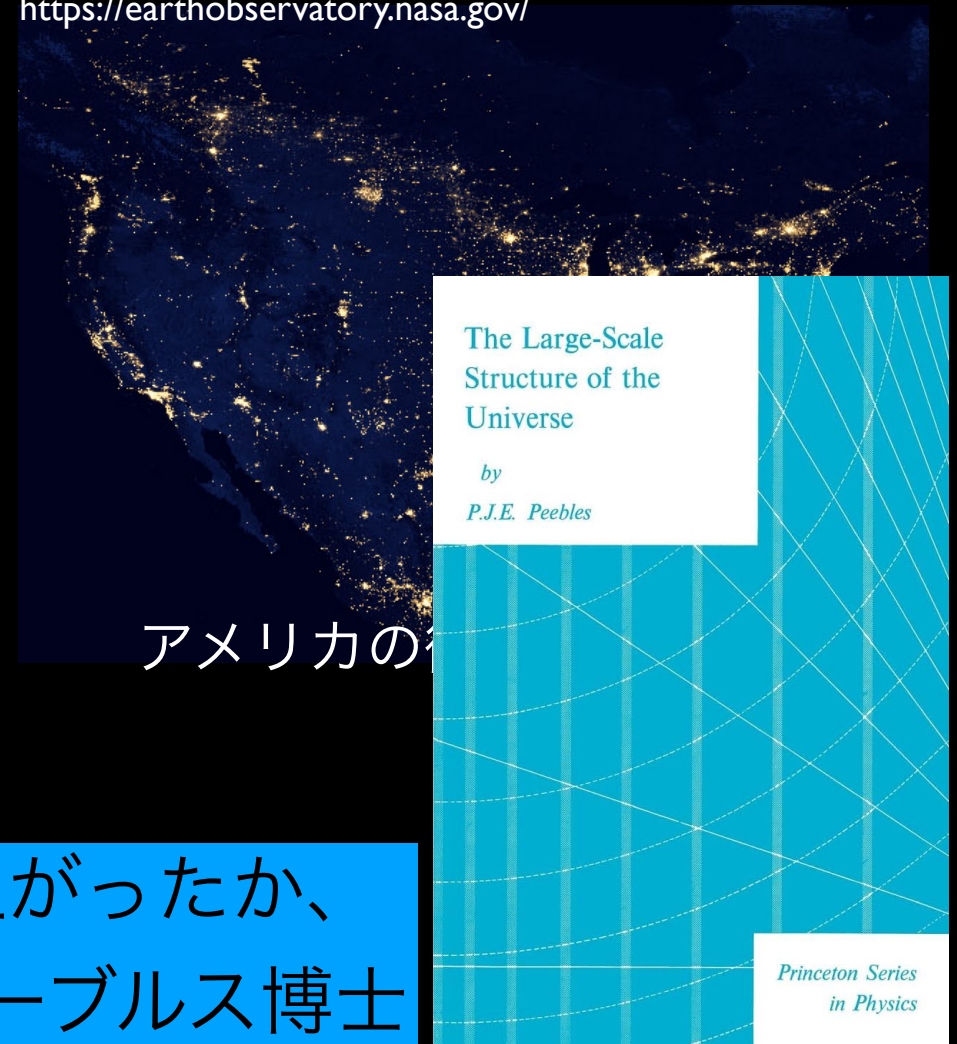
こうした構造がどうやって出来上がったか、
理論的枠組みを考え出したのもピーブルス博士

宇宙の大規模構造

遠方のたくさんの銀河を観測すると現れる巨大な構造
(のっぺりと分布しているわけではない)



<https://earthobservatory.nasa.gov/>



こうした構造がどうやって出来上がったか、
理論的枠組みを考え出したのもピーブルス博士

コンピューターの中の宇宙

31.25 Mpc/h

1億光年

ビッグバンから
2.1億年後

小さな密度ムラ

コンピューターの中の宇宙

31.25 Mpc/h

1億光年

ビッグバンから
10億年後

冷たい暗黒物質が支配する **重力**（万有引力）により、
密度ムラの高い領域に物質がかき集められ、構造が発達

コンピューターの中の宇宙

31.25 Mpc/h

1億光年

ビッグバンから
47億年後

冷たい暗黒物質が支配する **重力**（万有引力）により、
密度ムラの高い領域に物質がかき集められ、構造が発達

<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>

コンピューターの中の宇宙

31.25 Mpc/h

1億光年

ビッグバンから
138億年後
(現在)

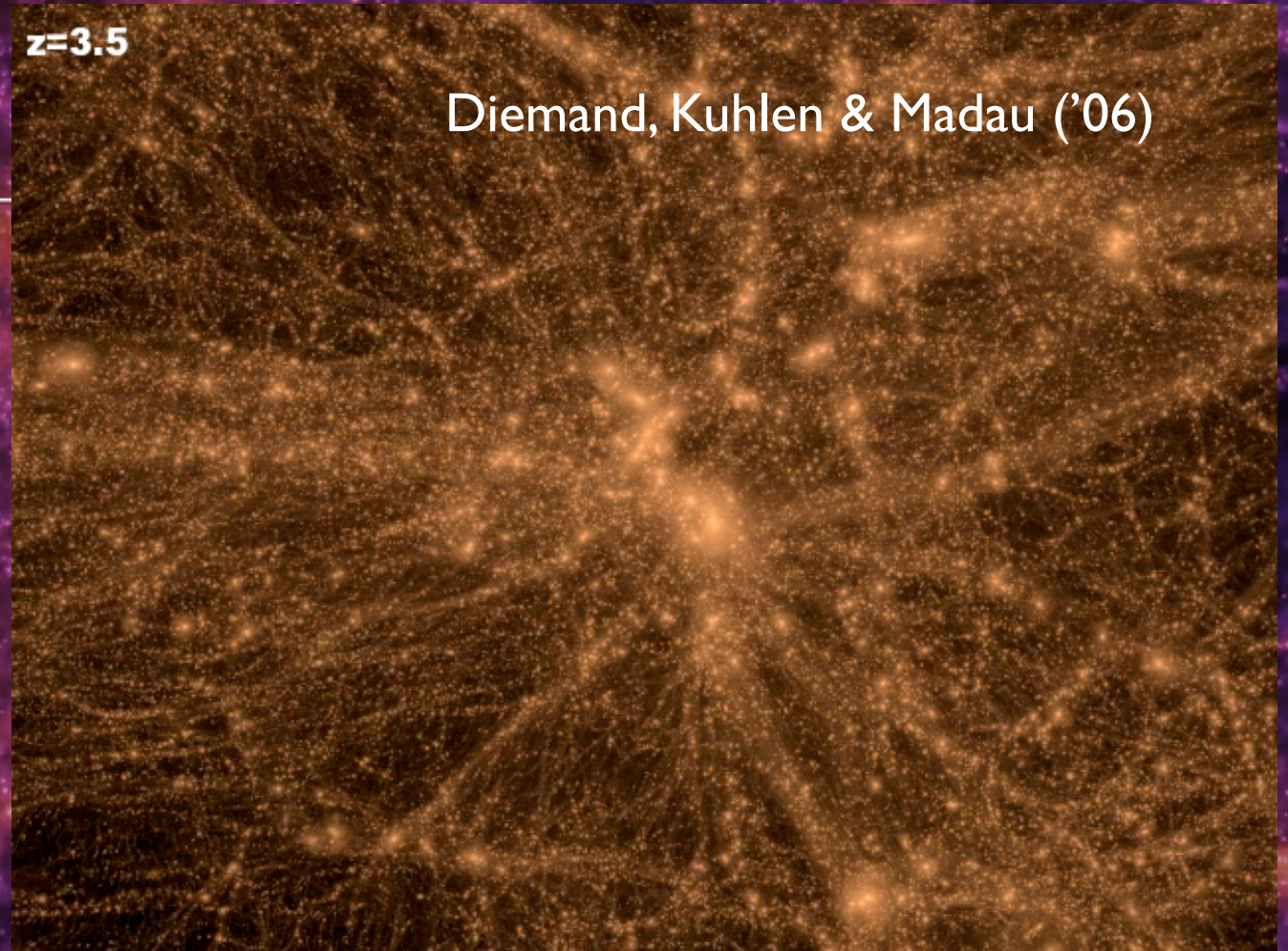
冷たい暗黒物質が支配する **重力**（万有引力）により、
密度ムラの高い領域に物質がかき集められ、構造が発達

コンピューターの中の宇宙

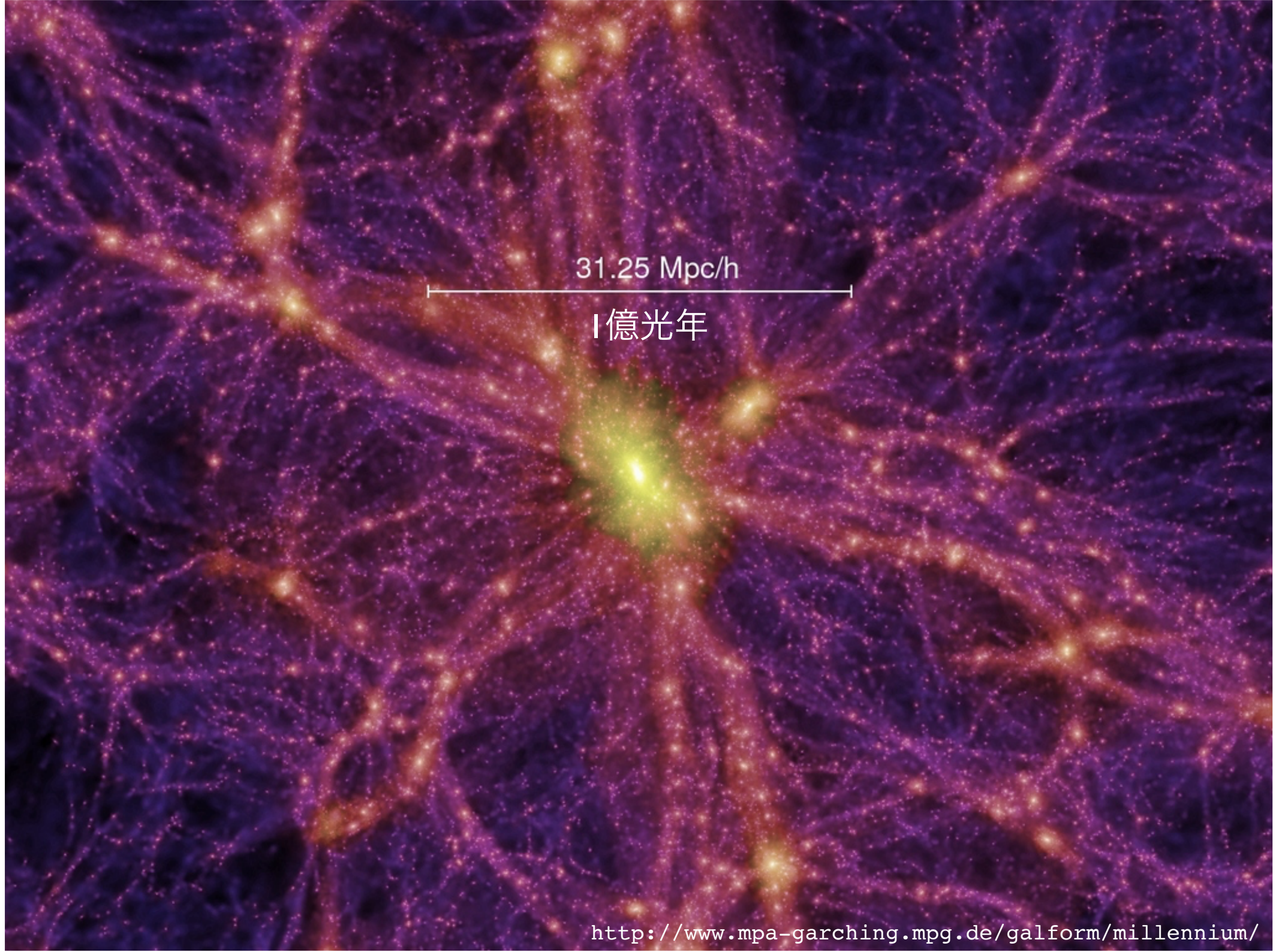
ビッグバンから
138億年後
(現在)

$z=3.5$

Diemand, Kuhlen & Madau ('06)

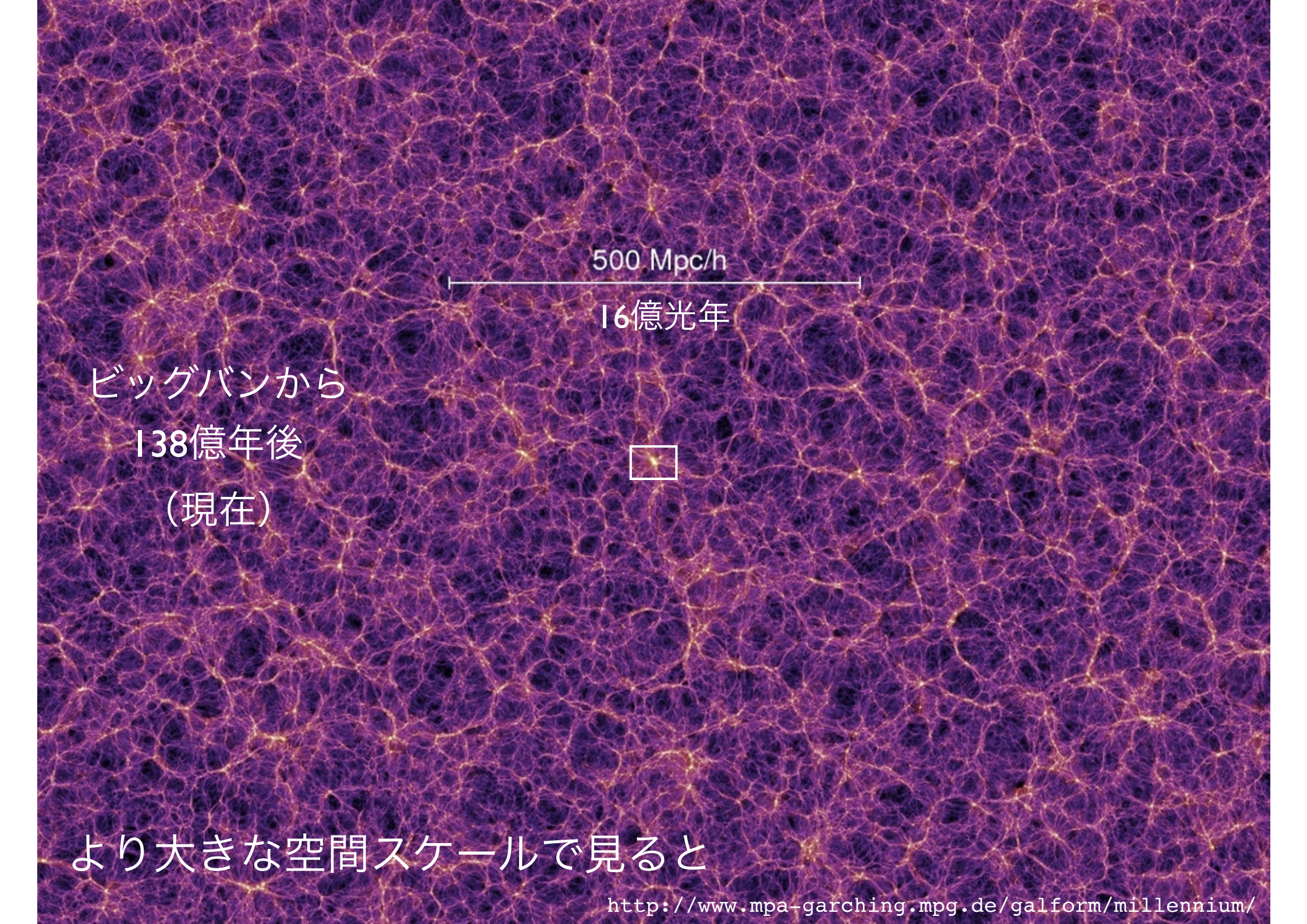


冷たい暗黒物質が支配する **重力**（万有引力）により、
密度ムラの高い領域に物質がかき集められ、構造が発達



31.25 Mpc/h

1 億光年



500 Mpc/h

16億光年

ビッグバンから

138億年後

(現在)



より大きな空間スケールで見ると

500 Mpc/h

16億光年

ビッグバンから
138億年後
(現在)

宇宙マイクロ波背景放射

ビッグバンから38万年後

ゆらぎの起源は共通

より大きな空間スケール

バリオン音響振動の検出

宇宙マイクロ波背景放射に遅れること5年、
2005年、銀河分布の密度ムラからもう一つの「宇宙のこだま」
を発見

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 633:560–574, 2005 November 10
© 2005. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

(Eisenstein et al. '05)

DETECTION OF THE BARYON ACOUSTIC PEAK IN THE LARGE-SCALE CORRELATION FUNCTION OF SDSS LUMINOUS RED GALAXIES

DANIEL J. EISENSTEIN,^{1,2} IDIT ZEHAVI,¹ DAVID W. HOGG,³ ROMAN SCOCCIMARRO,³ MICHAEL R. BLANTON,³ ROBERT C. NICHOL,⁴
RYAN SCRANTON,⁵ HEE-JONG SEO,¹ MAX TEGMARK,^{6,7} ZHENG ZHENG,⁸ SCOTT F. ANDERSON,⁹ JIM ANNIS,¹⁰ NETA BAHCALL,¹¹
JON BRINKMANN,¹² SCOTT BURLES,⁷ FRANCISCO J. CASTANDER,¹³ ANDREW CONNOLLY,⁵ ISTVAN CSABAI,¹⁴ MAMORU DOI,¹⁵
MASATAKA FUKUGITA,¹⁶ JOSHUA A. FRIEMAN,^{10,17} KARL GLAZEBROOK,¹⁸ JAMES E. GUNN,¹¹ JOHN S. HENDRY,¹⁰
GREGORY HENNESSY,¹⁹ ZELJKO IVEZIĆ,⁹ STEPHEN KENT,¹⁰ GILLIAN R. KNAPP,¹¹ HUAN LIN,¹⁰ YEONG-SHANG LOH,²⁰
ROBERT H. LUPTON,¹¹ BRUCE MARGON,²¹ TIMOTHY A. MCKAY,²² AVERY MEIKSIN,²³ JEFFERY A. MUNN,¹⁹
ADRIAN POPE,¹⁸ MICHAEL W. RICHMOND,²⁴ DAVID SCHLEGEL,²⁵ DONALD P. SCHNEIDER,²⁶
KAZUHIRO SHIMASAKU,²⁷ CHRISTOPHER STOUGHTON,¹⁰ MICHAEL A. STRAUSS,¹¹
MARK SUBBARAO,^{17,28} ALEXANDER S. SZALAY,¹⁸ ISTVÁN SZAPUDI,²⁹
DOUGLAS L. TUCKER,¹⁰ BRIAN YANNY,¹⁰ AND DONALD G. YORK¹⁷
Received 2004 December 31; accepted 2005 July 15

ABSTRACT

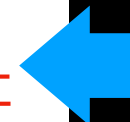
We present the large-scale correlation function measured from a spectroscopic sample of 46,748 luminous red galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. The survey region covers $0.72 h^{-3} \text{ Gpc}^3$ over 3816 deg^2 and $0.16 < z < 0.47$, making it the best sample yet for the study of large-scale structure. We find a well-detected peak in the correlation function at $100 h^{-1} \text{ Mpc}$ separation that is an excellent match to the predicted shape and location of the imprint of the recombination-epoch acoustic oscillations on the low-redshift clustering of matter. This detection demonstrates the linear growth of structure by gravitational instability between $z \approx 1000$ and the present and confirms a firm prediction of the standard cosmological theory. The acoustic peak provides a standard ruler by

＝
バリオン音響振動

(バリオン＝通常の物質)

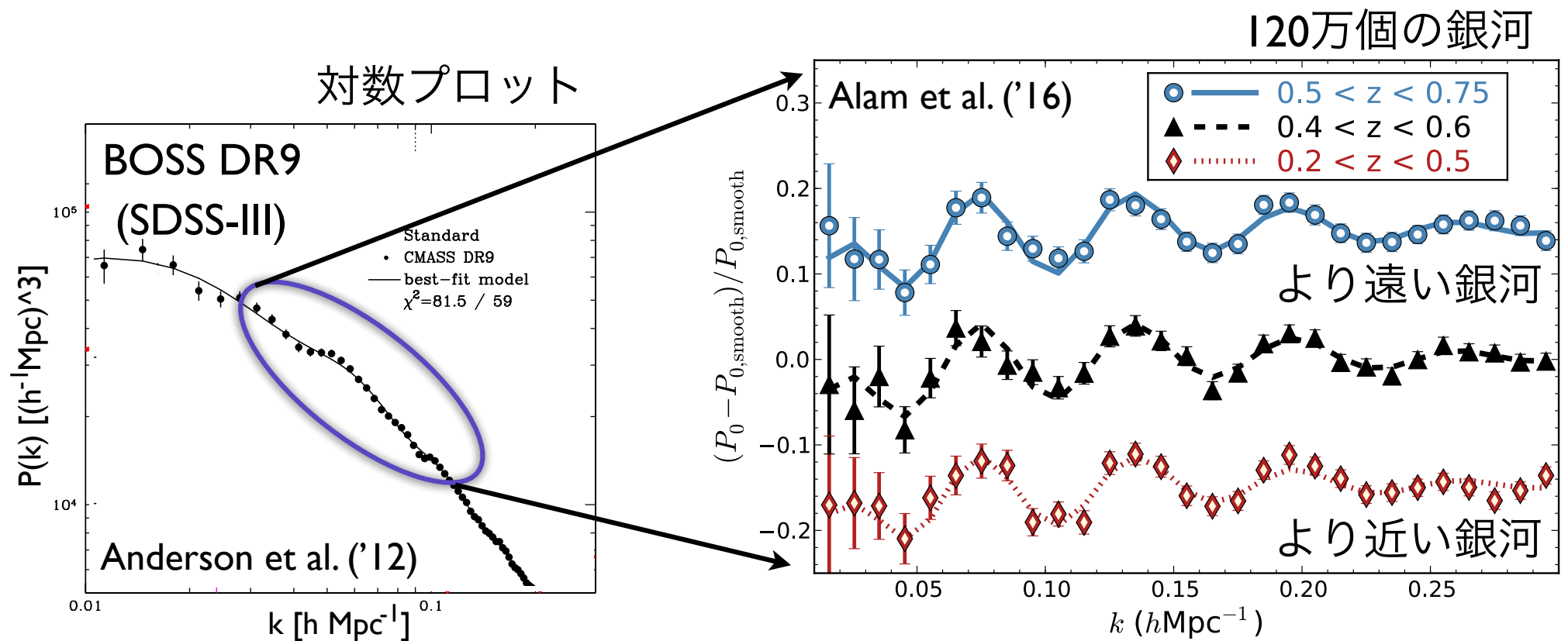
ピーブルス博士の
予言通り！

アメリカのアストロ
フィジカルジャーナル
誌に掲載された論文



バリオン音響振動

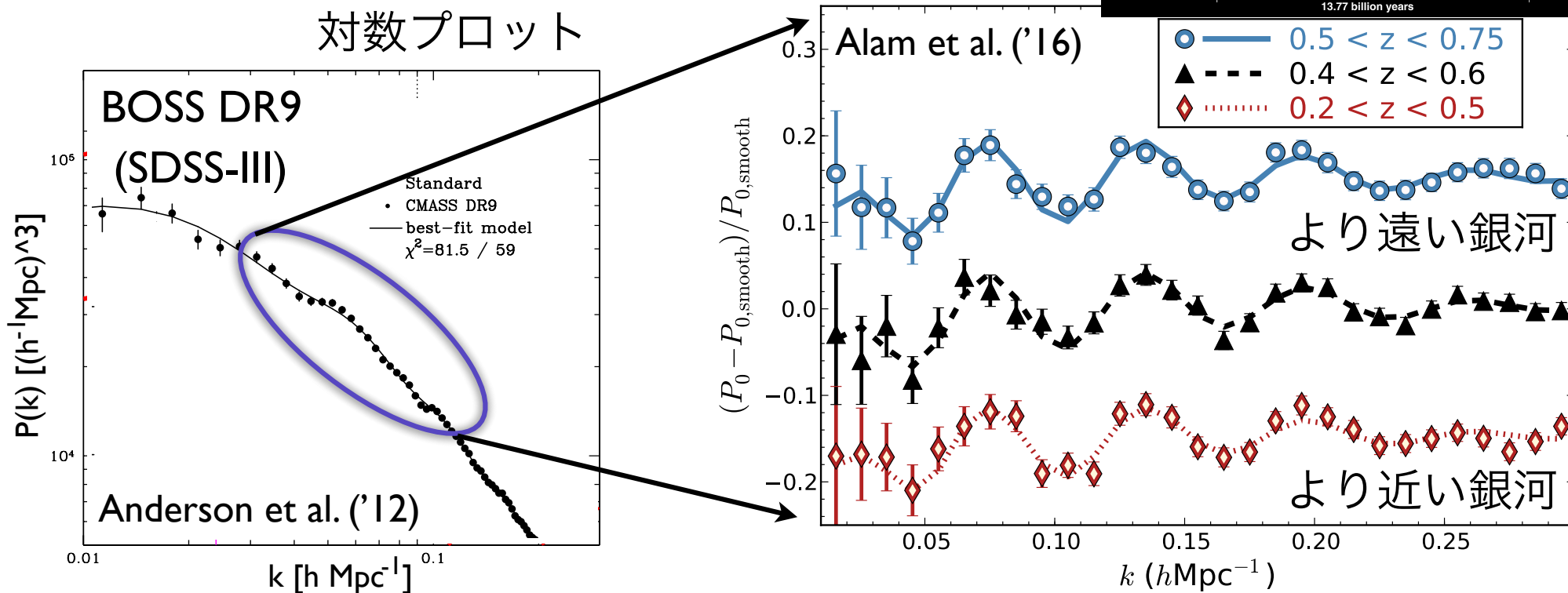
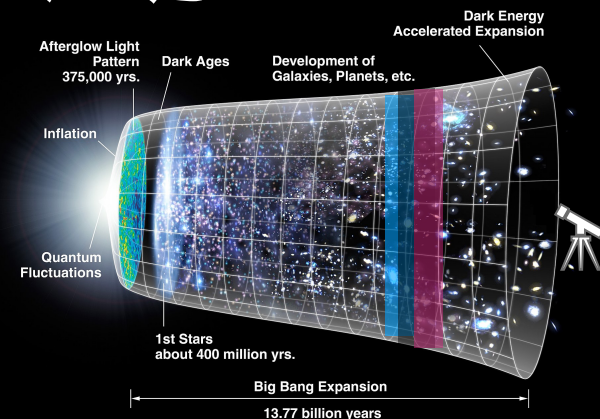
最新の銀河カタログから
スペクトル分解した密度ムラの強度分布



異なる3つの時刻（赤方偏移）から得られたスペクトル

バリオン音響振動

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

バリオン音響振動の効能

バリオン音響振動の振動スケール（波長）を使って
遠方宇宙の「距離」を測定できる

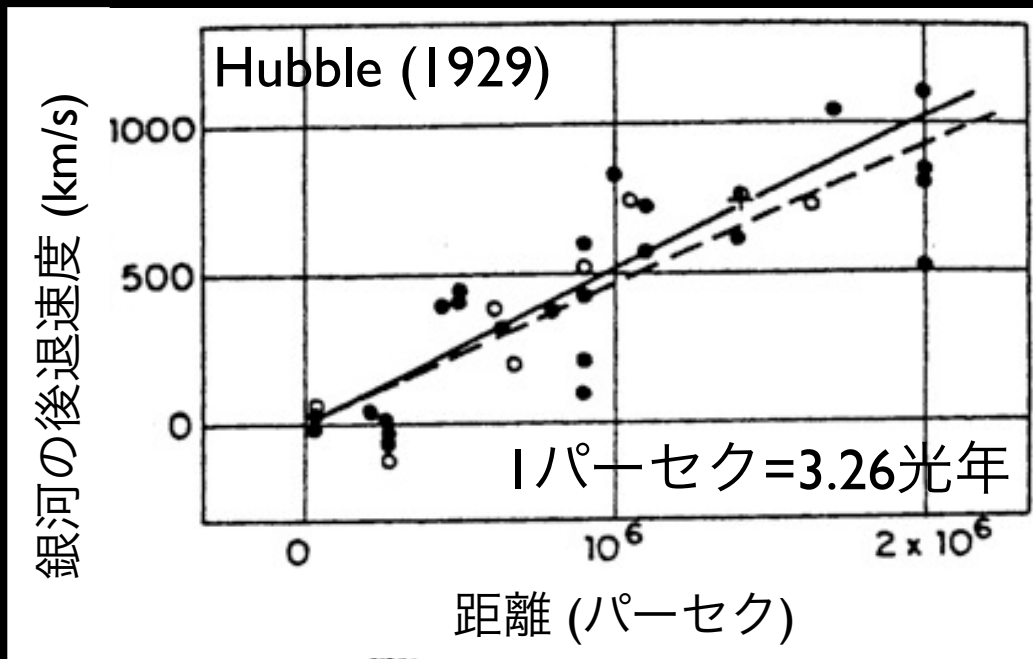
ハッブルとルメートルは

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！
(宇宙膨張の精密診断)

暗黒エネルギーの謎
を解く手がかり

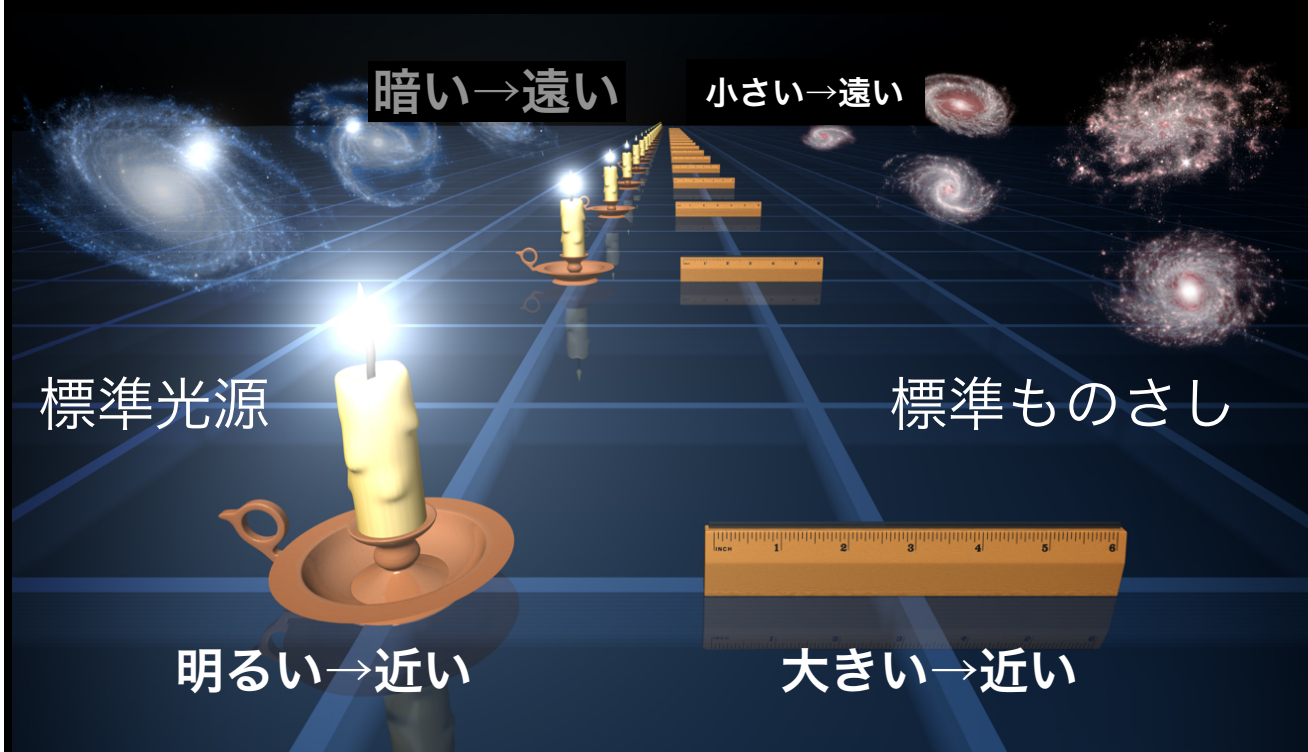


バリオン音響振動の効能

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

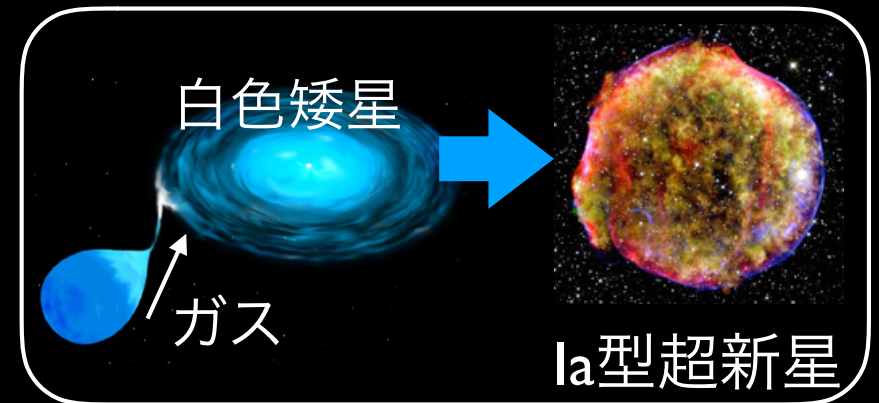
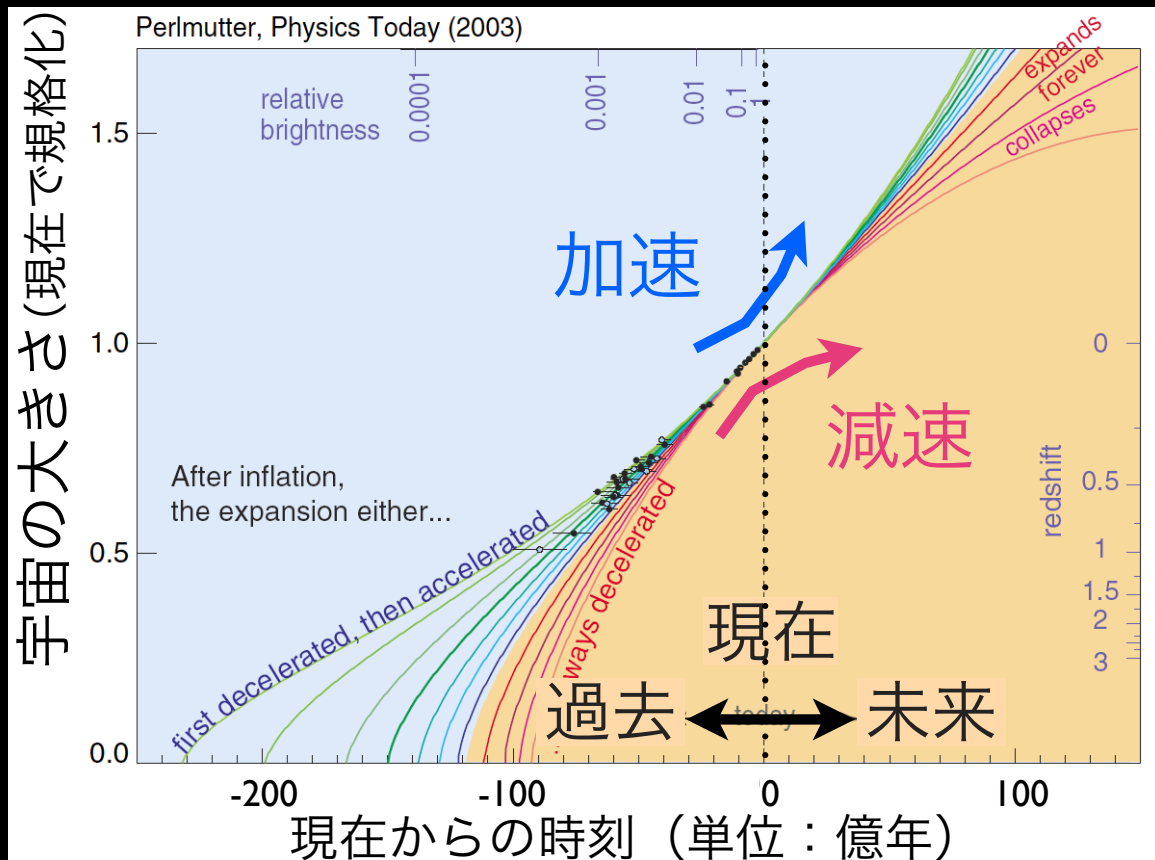
遠方天体の見かけの明るさ / サイズから測定可能



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！

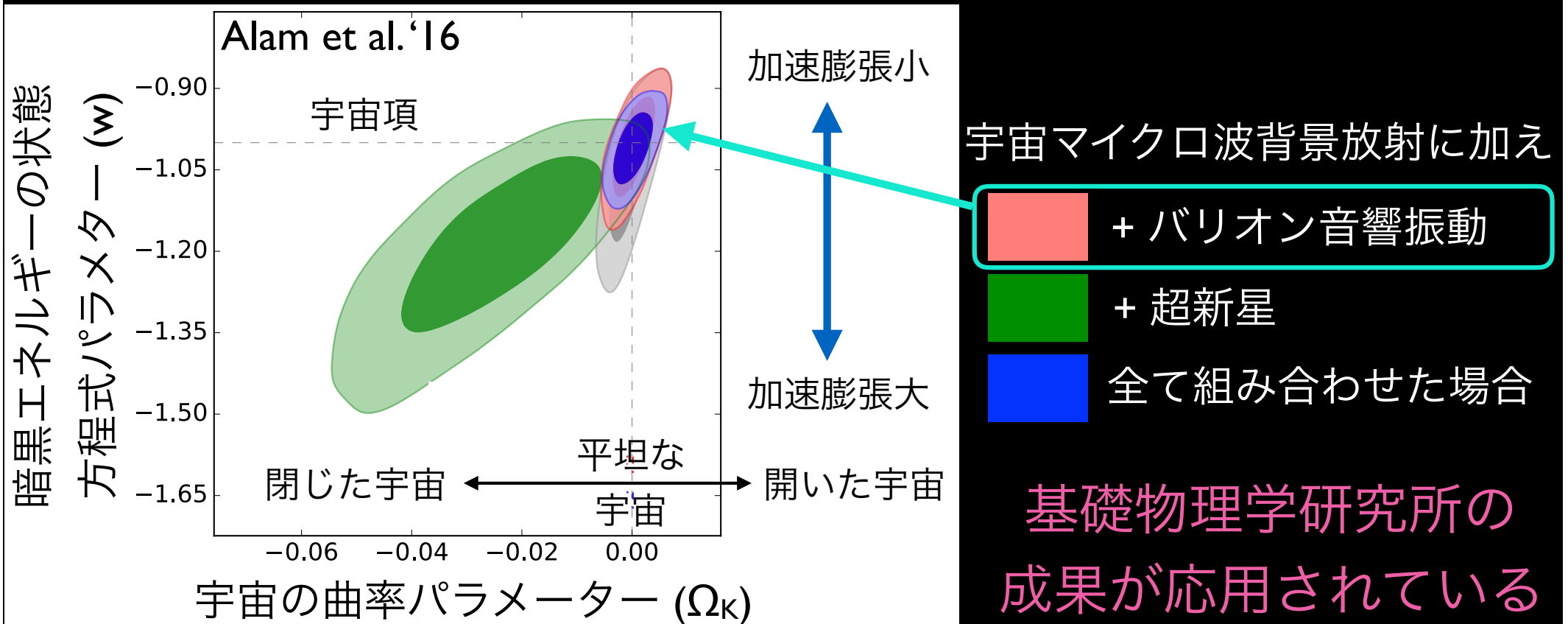


2011年ノーベル物理学賞

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



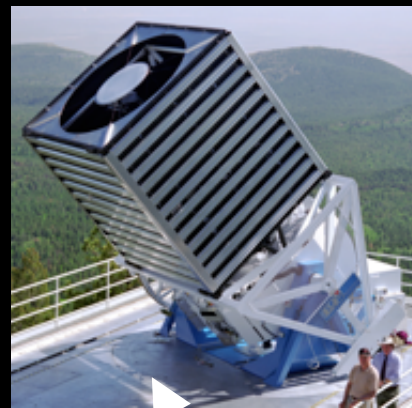
今のところ、

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

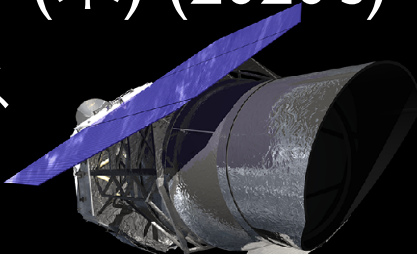
世界規模で進む地上・スペース観測プロジェクト

DES (欧米) (2013~) HETDEX (米) (2018~) DESI (米) (2020)



WFIRST (米) (2020's)

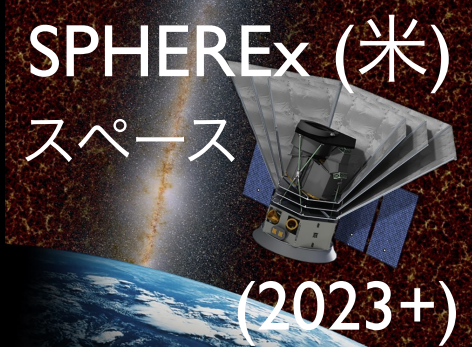
スペース



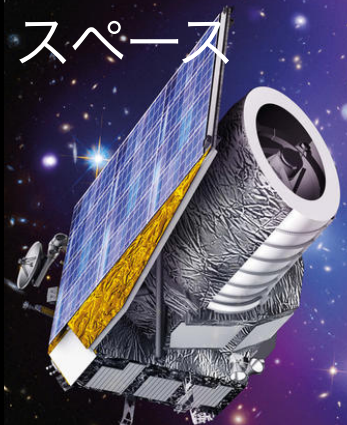
Euclid (欧) (2023+) eBOSS (米欧) (2014~)



LSST (米) (2023+)



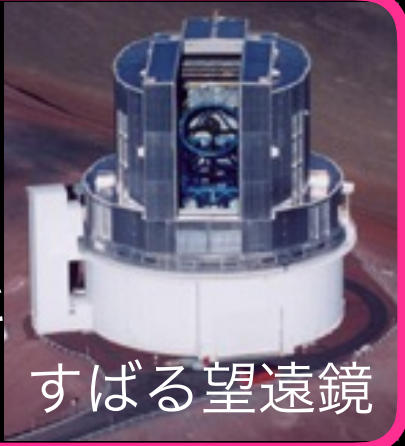
SPHEREx (米) (2023+)
スペース



スペース

SuMIRe (日) (2014~)

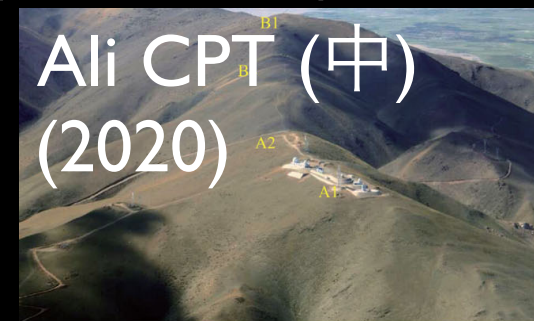
広視野カメラと多天体分光器



すばる望遠鏡

宇宙マイクロ波背景放射の観測

宇宙初期に起こったインフレーションの直接的証拠を検出する
(原始重力波)



Mid-2020s

地上

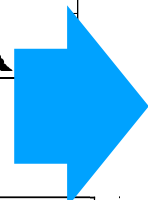
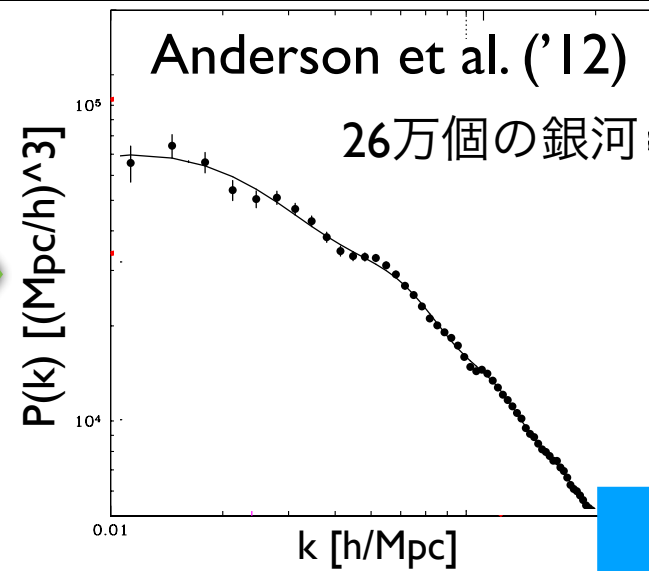
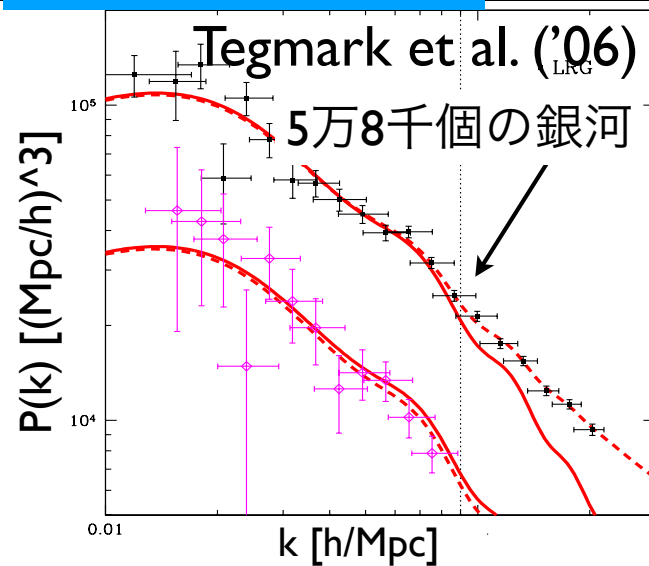


精密科学としての宇宙論へ

ピーブルス博士が切り拓いた物理学的宇宙論は、

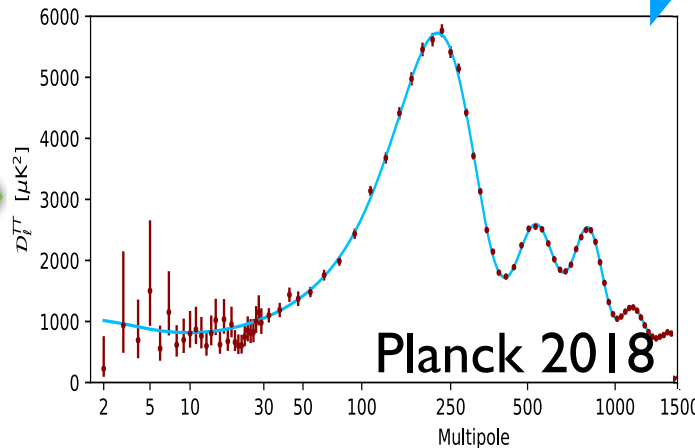
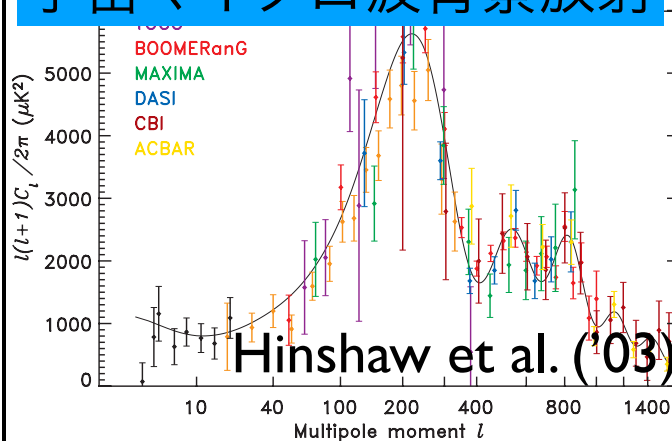
精密科学へと昇華しつつある

宇宙の大規模構造



誤差が
パーセントレベル
の宇宙論へ
(精密宇宙論)

宇宙マイクロ波背景放射



変革する宇宙論

これまでの観測で出来なかったことが可能になる：

- 宇宙の加速膨張の起源（暗黒エネルギーの性質）
- 宇宙論スケールでの一般相対性理論の検証
- ニュートリノ質量和の制限・測定
- 原始重力波の検出（インフレーション初期宇宙の検証）
- ...

ピーブルス博士が（おそらく）予想していなかった展開

今後10年のタイムスケールで大きな変革がやって来る（かも）

まとめ

原始宇宙からの「こだま」と最新観測が明らかにした宇宙の姿

ピーブルス博士の物理学的宇宙論と宇宙の「こだま」

- 宇宙マイクロ波背景放射：宇宙の残光と「こだま」

最新観測から浮かび上がった宇宙の謎

- バリオン音響振動：もう1つの宇宙の「こだま」

宇宙の謎を解く手がかり

精密化が進む宇宙論研究により、ピーブルス博士が築き上げた
宇宙観が変貌する日が近いうちに来るかもしれない