

理論懇シンポジウム

「天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開」

平成時代における宇宙論の変遷
と新時代への期待：個人的視点から

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所

松原隆彦

2019年12月27日

9:00-9:40@国立天文台

平成元年≡1989年

- ・ 総理大臣：竹下登 (-6/3)、宇野宗佑 (-8/10)、海部俊樹
- ・ リクルート事件
- ・ 美空ひばり、千代の富士に国民栄誉賞
- ・ 「ザ・ベストテン」が終了

平成初期の研究室

・ プレプリント

- ・ 研究室や個人宛に郵送で送られてくる出版前の原稿
- ・ 毎日送られてくるプレプリントの番号とタイトルのデータをパソコンに打ち込むのがM1の仕事
- ・ 論文を書いたら大量のプレプリントをコピーして世界中に配る
 - ・ 研究室の人が論文を書いたら、研究室総出でプレプリの封筒詰めと宛名貼りをするのを手伝う
- ・ 手に入りにくい雑誌に載った論文は、コピーを繰り返したプレプリの状態で見られることがある
 - ・ タイプライターのフォントが潰れて読めない、数式が手書きで読めない、、、

平成初期の研究室

- ・ 研究者間のコミュニケーションは手紙か電話
- ・ 電子メールが使われ始めていたが、使いこなしている人があまり多くなかったので当てにならない
 - ・ 届かないことも当たり前
- ・ 国際雑誌へ投稿は船便かSAL便

平成初期の研究室

- ・ 計算機は十数名の研究室全体で1、2台。X端末かパソコンが部屋に一台ずつ。
- ・ ノート型パソコンはあったが厚さ5センチ、高額かつ低性能
- ・ TeXが普及し始め、論文をTeXで書くようになる。
PlainTeX+physixx または LaTeX のどちらかを選ばされた。
- ・ 修士論文をLaTeXで書いたが、ノートパソコンで100ページコンパイルするのに5分以上かかったため、1日に数度だけしかコンパイルしない。
- ・ UnixマシンにつながったX端末でTeXを動かすとはるかに速かったが、先輩が優先して使うため、修士学生はめったに使えない

平成初期の研究室

- ・ OHP

- ・ オーバー・ヘッド・プロジェクタ

- ・ トラペ

- ・ トランスペアレンシー：OHPに投影させる透明のシートのこと、OHPシート
- ・ のちにプレゼンファイルのことを指すようになるが、違和感がある

- ・ トラペン

- ・ トラペの言い間違いと思われるが、トラペに書き込むペンのことかもしれない

- ・ スライド

- ・ 写真投影用のフィルムを紙で補強したもの
- ・ これものちにプレゼンファイルのことを指すようになるが、違和感がある

宇宙論から見る平成の歴史

- ・ 平成元年 (1989)

- ・ CfA2 Great Wall が発見される

- ・ 平成2年 (1990)

- ・ COBE: CMBがほぼ完璧な黒体放射であることを発見

- ・ 平成4年 (1992)

- ・ COBE: CMBの温度ゆらぎを初めて発見

- ・ 平成8年 (1996)

- ・ Hubble Deep Fieldの最初のリリース

- ・ 平成10年 (1998)

- ・ Ia型超新星による加速膨張宇宙の発見 (宇宙項 $\Lambda \neq 0$)

宇宙論から見る平成の歴史

- ・ 平成11年 (1999)

- ・ BOOMERanG: CMB温度ゆらぎ中に音響振動を発見 (平均曲率 $K \doteq 0$)

- ・ 平成13年 (2001)

- ・ 2dF銀河サーベイ: 質量密度パラメータ $\doteq 0.25$ (Λ CDMモデルの確立へ)

- ・ 平成15年 (2003)

- ・ WMAP: 全天CMB温度ゆらぎマップ (宇宙論パラメータの精密決定、宇宙年齢137億年 $\pm 1\%$, 密度ゆらぎスペクトル $n_s \doteq 0.96$)

- ・ 平成15年 (2003)

- ・ Sloan Great Wallの発見

- ・ 平成16年 (2004)

- ・ DASI: CMBの偏光Eモードゆらぎを初めて発見

宇宙論から見る平成の歴史

- ・ 平成17年 (2005)

- ・ SDSS and 2dF: 銀河分布中にバリオン音響振動を発見 (cold dark matter+baryon)

- ・ 平成18年 (2006)

- ・ COBEを率いたG.スムートとJ.マザーがノーベル物理学賞を受賞

- ・ 平成22年 (2010)

- ・ Planck衛星: より詳しい全天CMB温度ゆらぎマップ (宇宙論パラメータの精密決定, Λ CDMモデルの精密検証)

- ・ 平成23年 (2011)

- ・ 宇宙の加速膨張の発見でS.パールマッター、B.シュミット、A.リースがノーベル物理学賞を受賞

- ・ 平成27年 (2015)

- ・ BICEP2が初期重力波起源のCMB偏光Bモードゆらぎを見つけたと発表も、翌年取り下げるという大騒ぎ

宇宙論から見る平成の歴史

- ・ 平成28年 (2016)

- ・ LIGO: 重力波の直接検出 (強重力場における一般相対性理論の検証)

- ・ 平成31年 (2019)

- ・ 物理的宇宙論における理論的功績でP.J.E. ピーブルスがノーベル物理学賞を受賞

平成時代の宇宙論

- 一言で言えば…
- 「 Λ CDMモデルが確立した時代だった」

Λ CDMモデル

- 平成が始まった頃、 Λ CDMモデルを支持する理論家はあまりいなかった
 - 「宇宙項は美しい」
 - ダークマターの存在はしぶしぶ認めざるを得ないが、その上にわけのわからない要素があって欲しくない

ちなみに21年前、

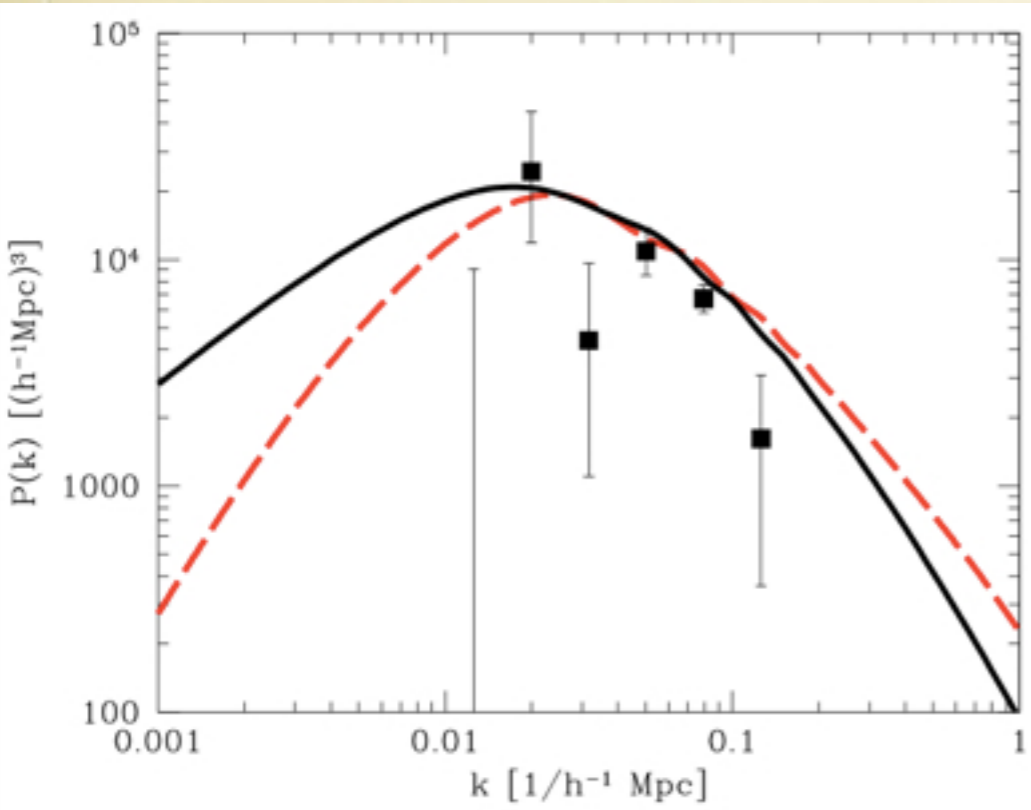
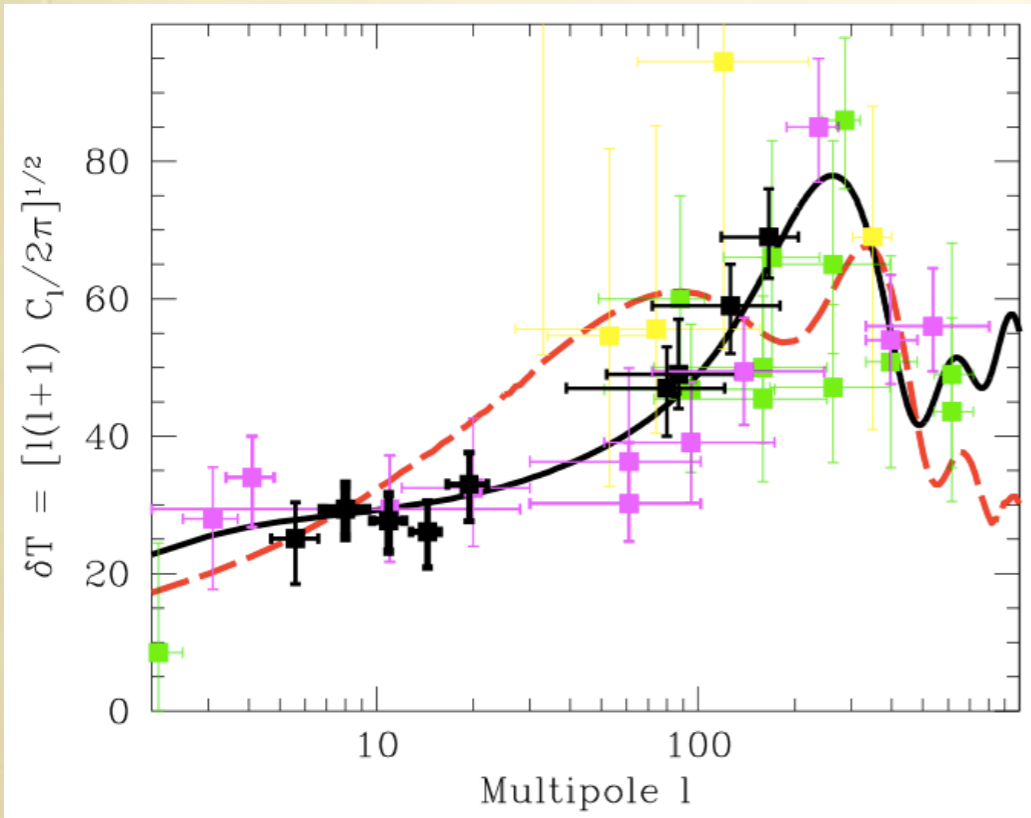
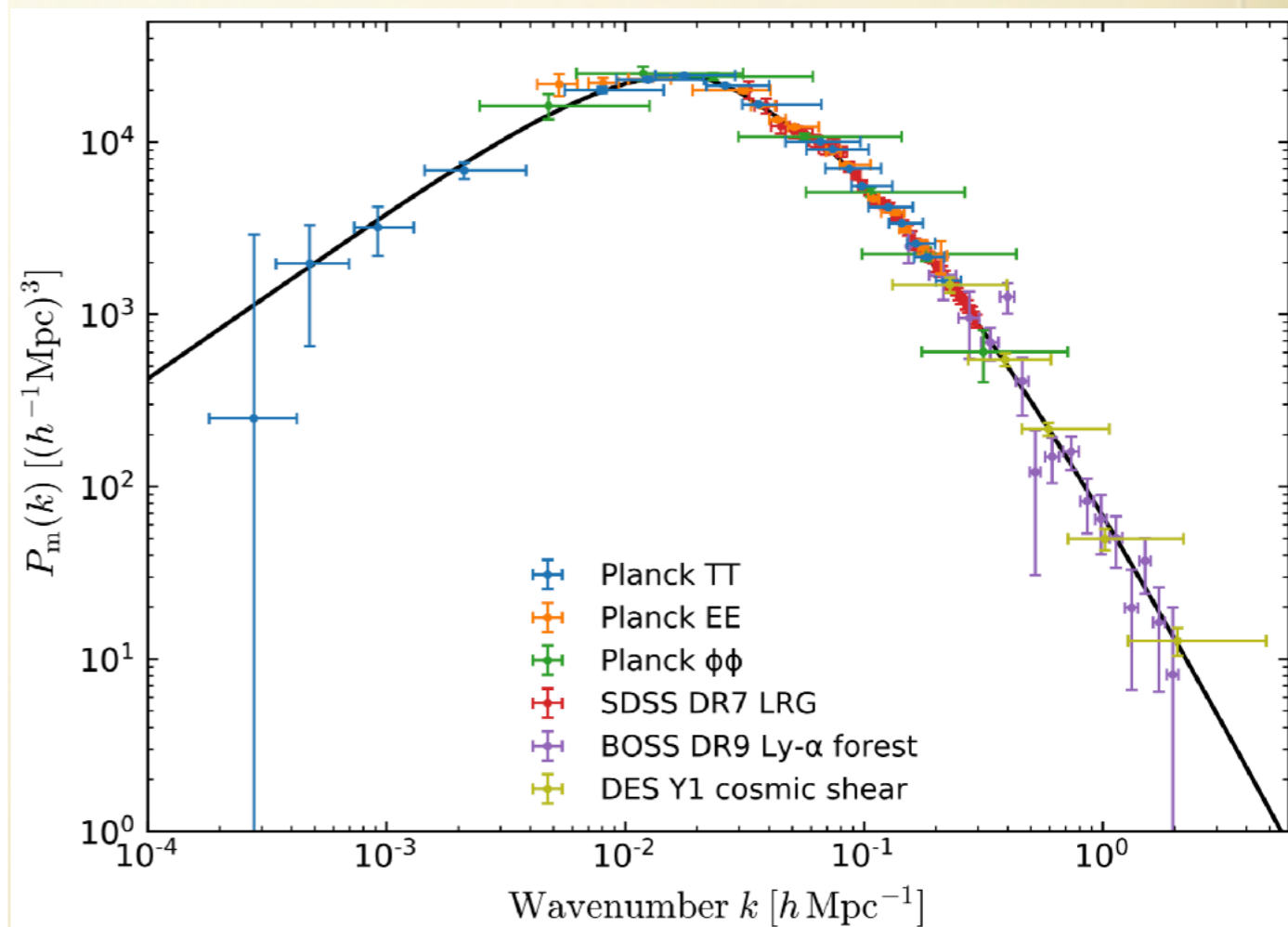
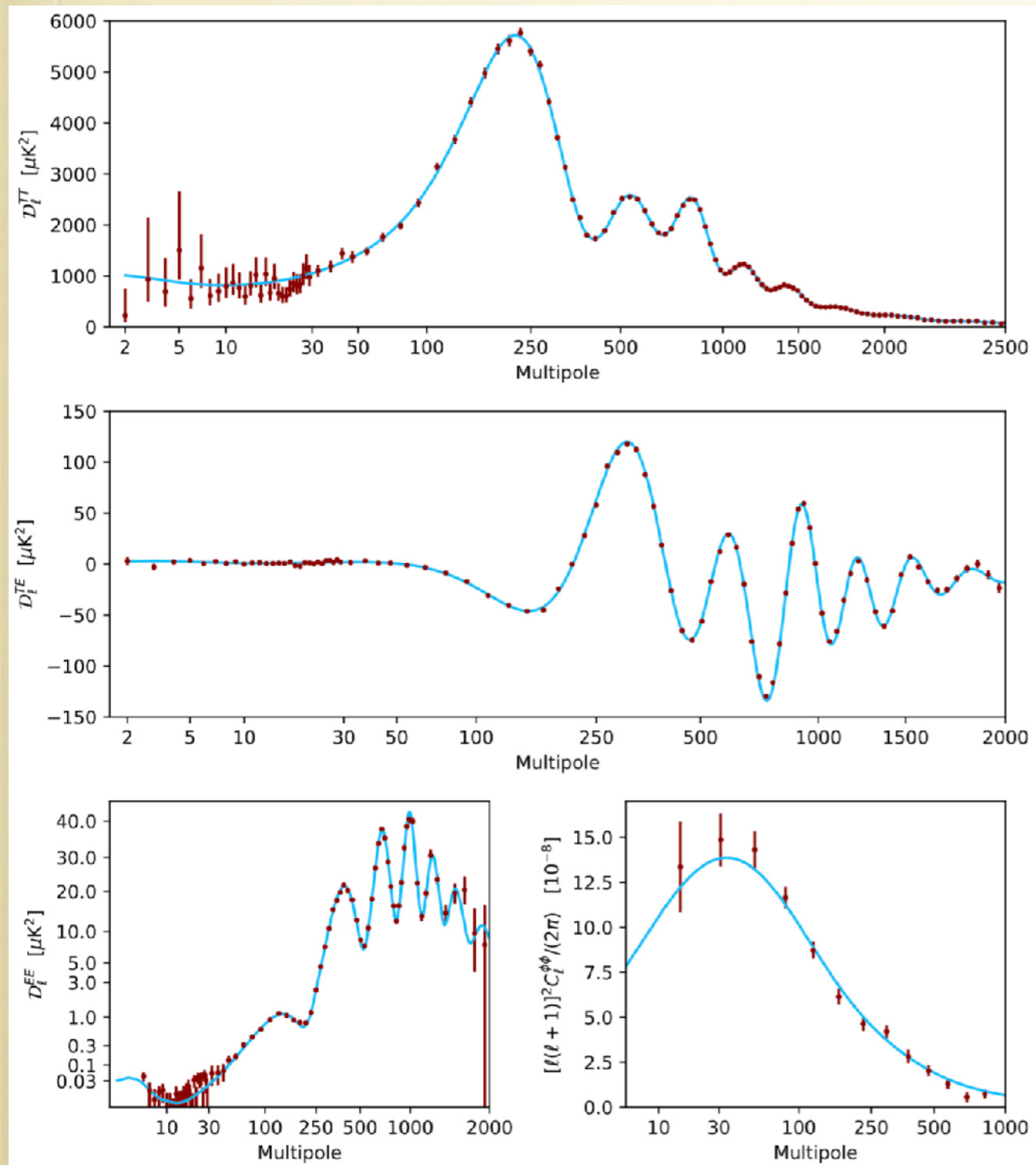


Table 2. The Cosmological Tests

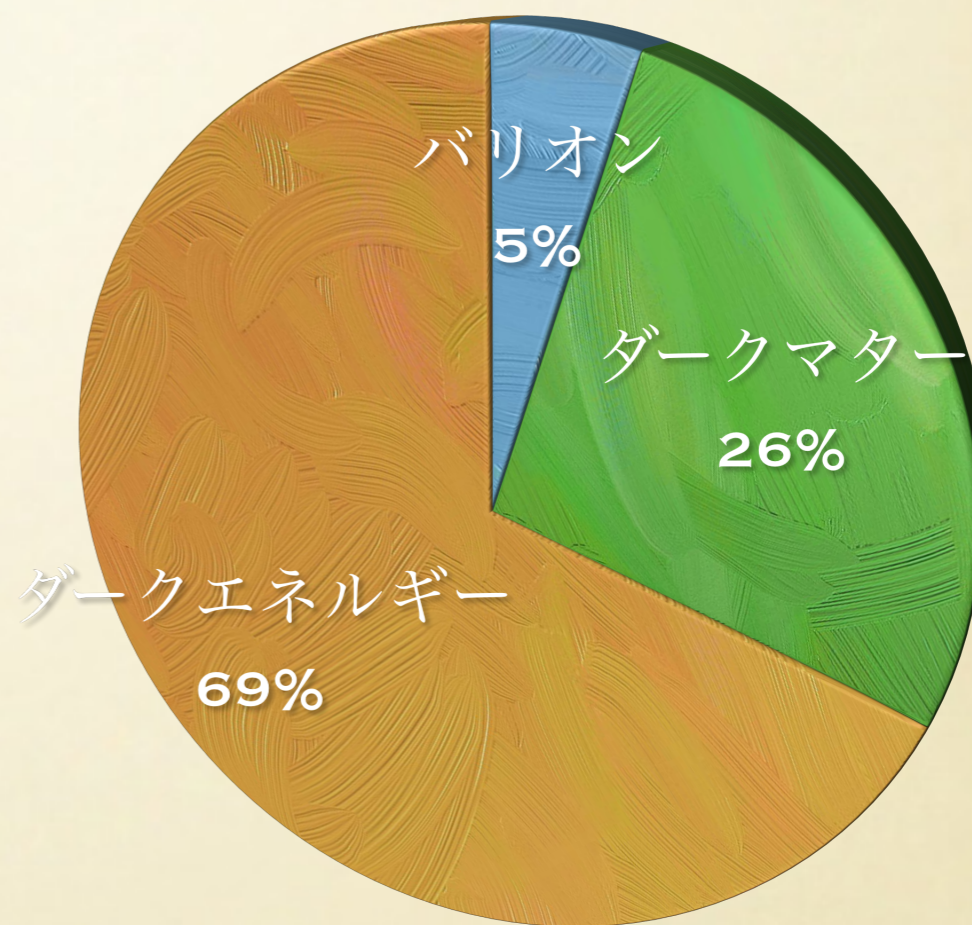
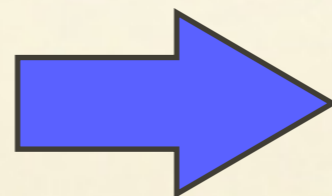
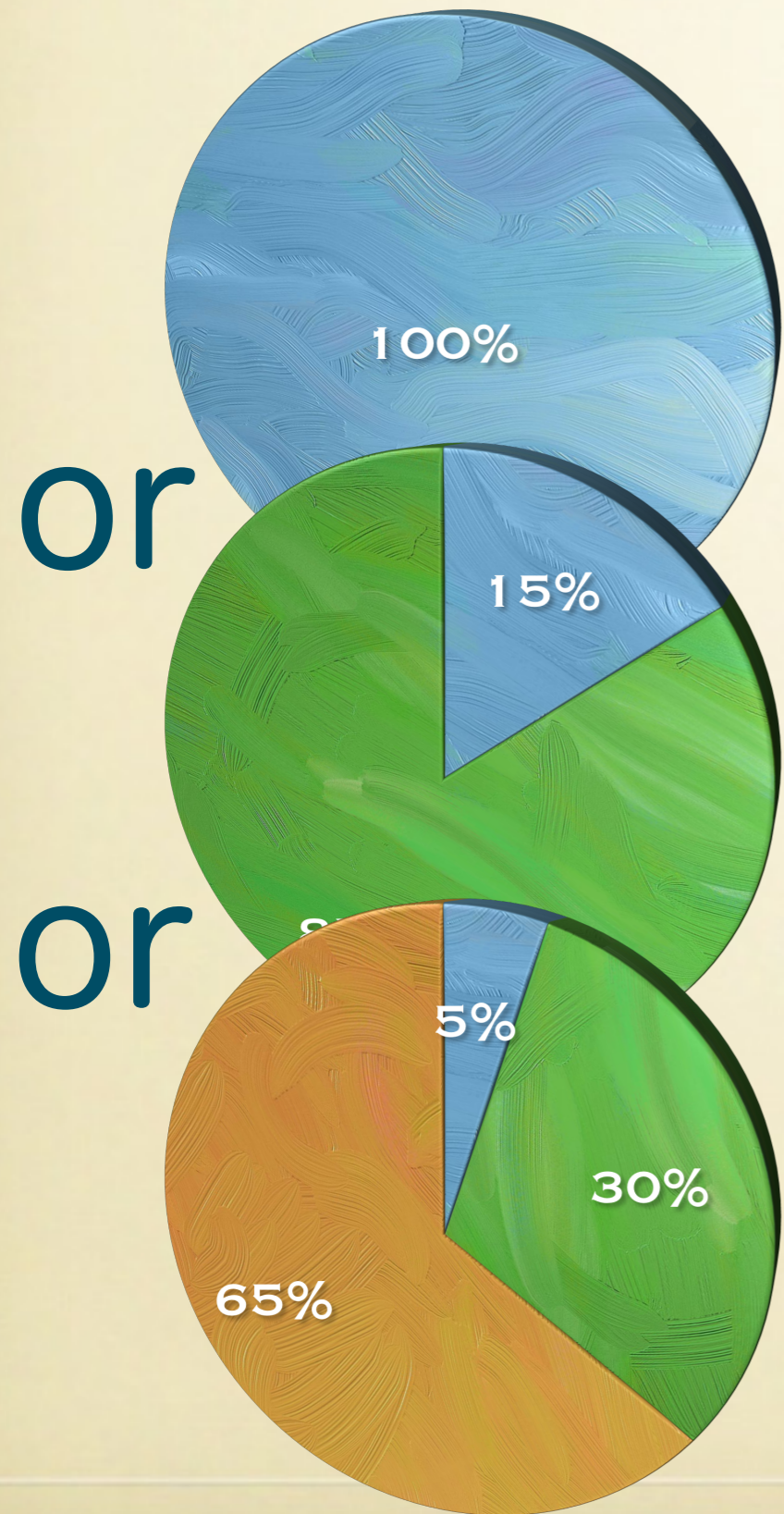
Test	Einstein- de Sitter	$\Omega_m = 0.25 \pm 0.1$	
		Flat	Open
1a. Dynamical mass measures	X	. \checkmark	. \checkmark
1b. World time $t(z)$: ages of stars & elements	X??	. $\checkmark?$. $\checkmark?$
1c. Redshift- magnitude relation	X	. \checkmark	. X??
1d. Lensing of quasars by galaxies	$\checkmark?$. X??	. $\checkmark?$
1e. Counts: $dN =$ $f(m, z)dm dz$?	. ?	. ?
2a. Large-Scale structure	X?	. $\checkmark?$. $\checkmark?$
2b. CBR anisotropy	X?	. $\checkmark?$. $\checkmark??$
2c. Cluster evolution	X?	. $\checkmark?$. $\checkmark?$
2d. Baryon mass fraction in clusters	X	. \checkmark	. \checkmark
2e. Galaxy formation	?	. ?	. ?
3a. Aesthetics	\checkmark	. X?	. X?
3b. Inflation	\checkmark	. \checkmark	. ??

From: P.J.E. Peebles, "Is Cosmology Solved? An Astrophysical Cosmologist's Viewpoint" (1998)

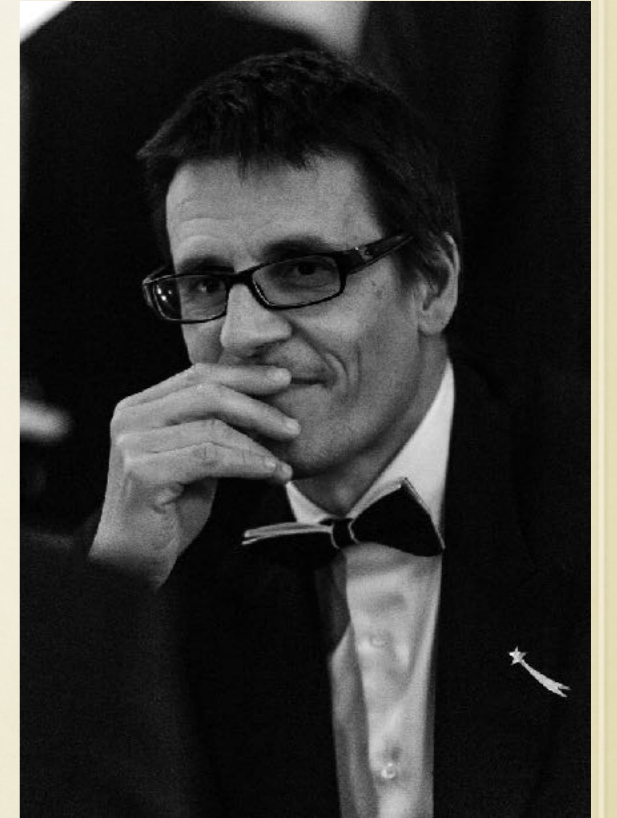
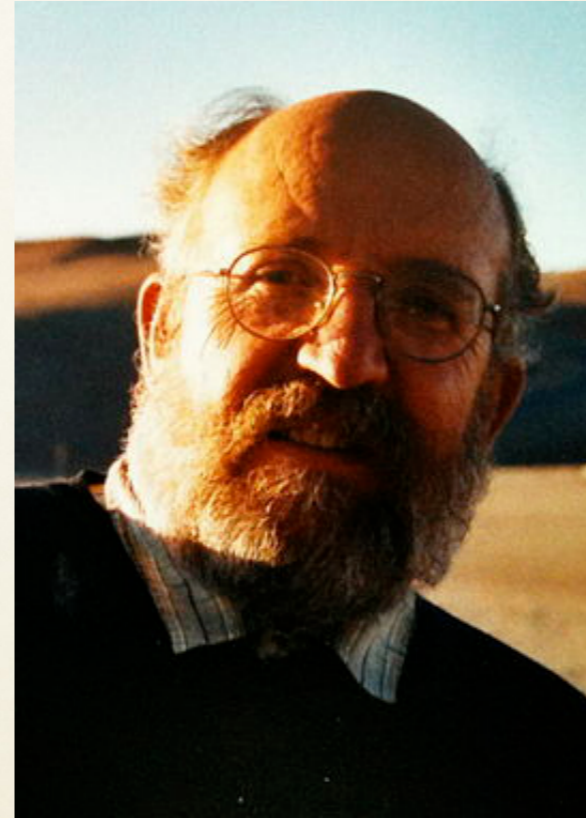
現在



1998 → 2019



2019年ノーベル物理学賞



・ピーブルス

- ・ 物理的宇宙論における数多くの理論的発見に対して

・マイヨールとケロー

- ・ 太陽に似た星を周回する太陽系外惑星の発見に対して



The Large-Scale
Structure of the
Universe

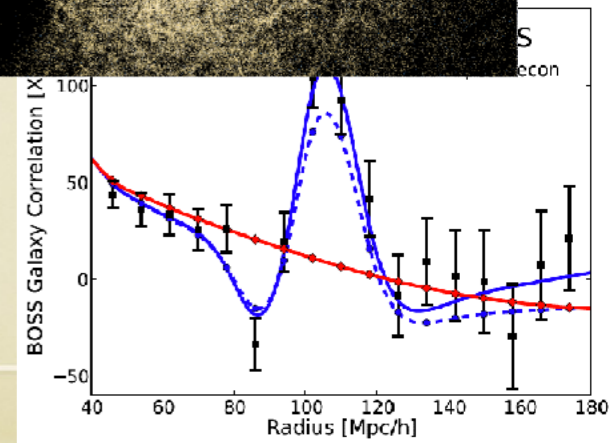
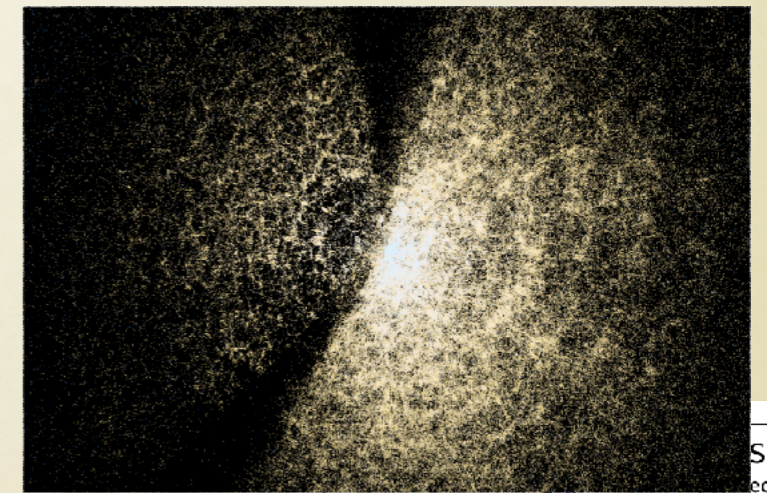
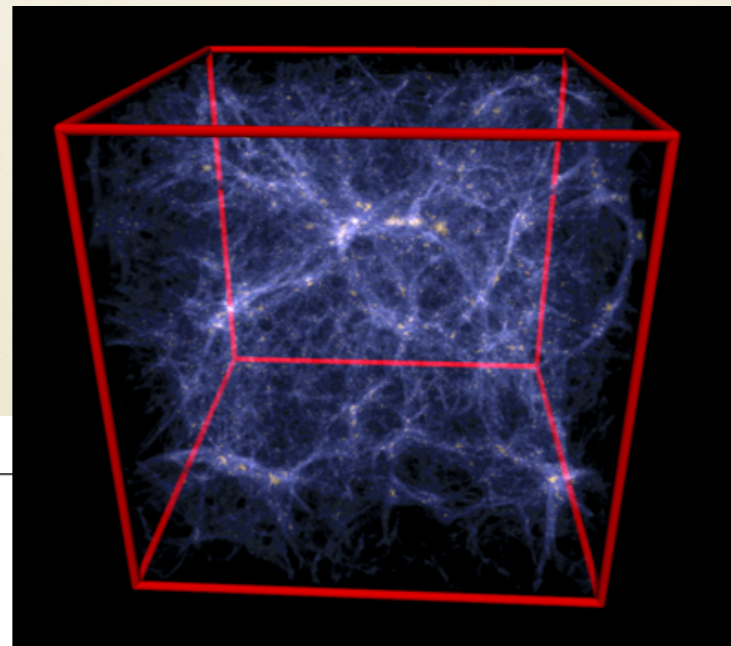
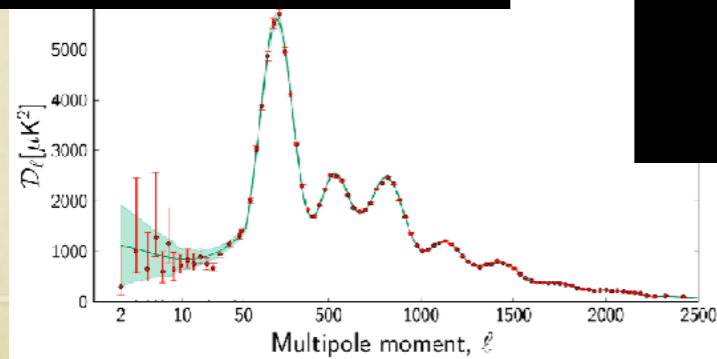
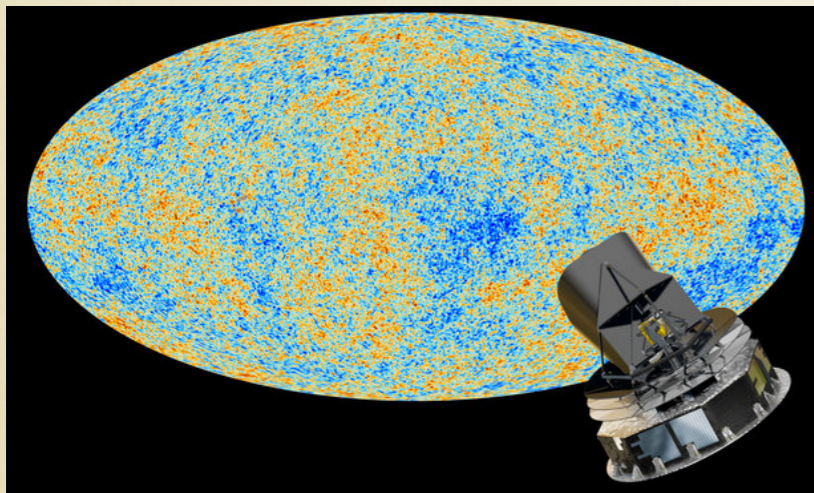
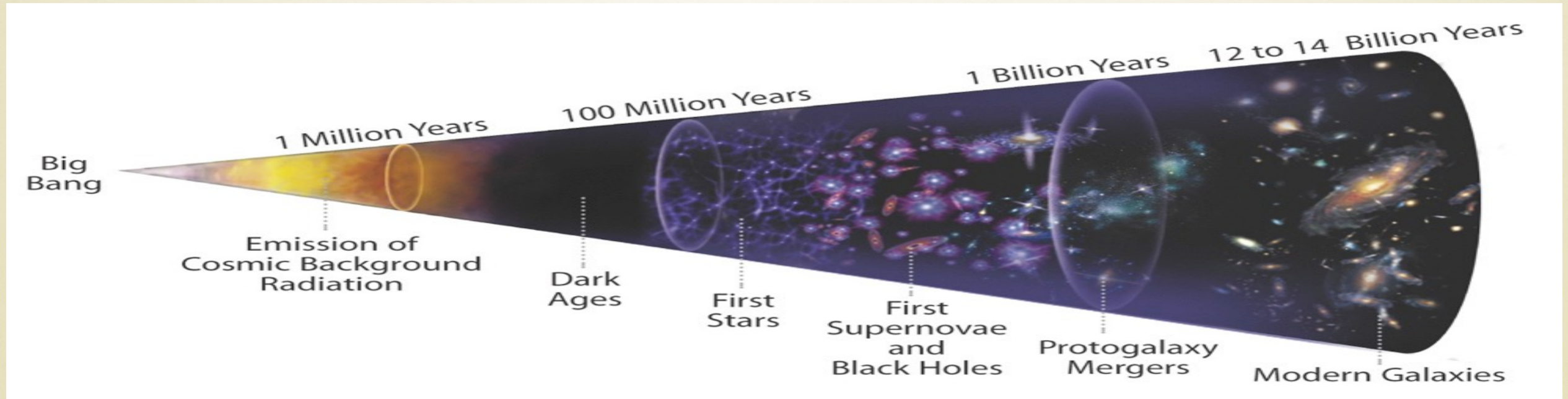
by

P.J.E. Peebles

*Princeton Series
in Physics*

物理的宇宙論とは

- 物理学を用いて宇宙全体を理解しようとする研究分野

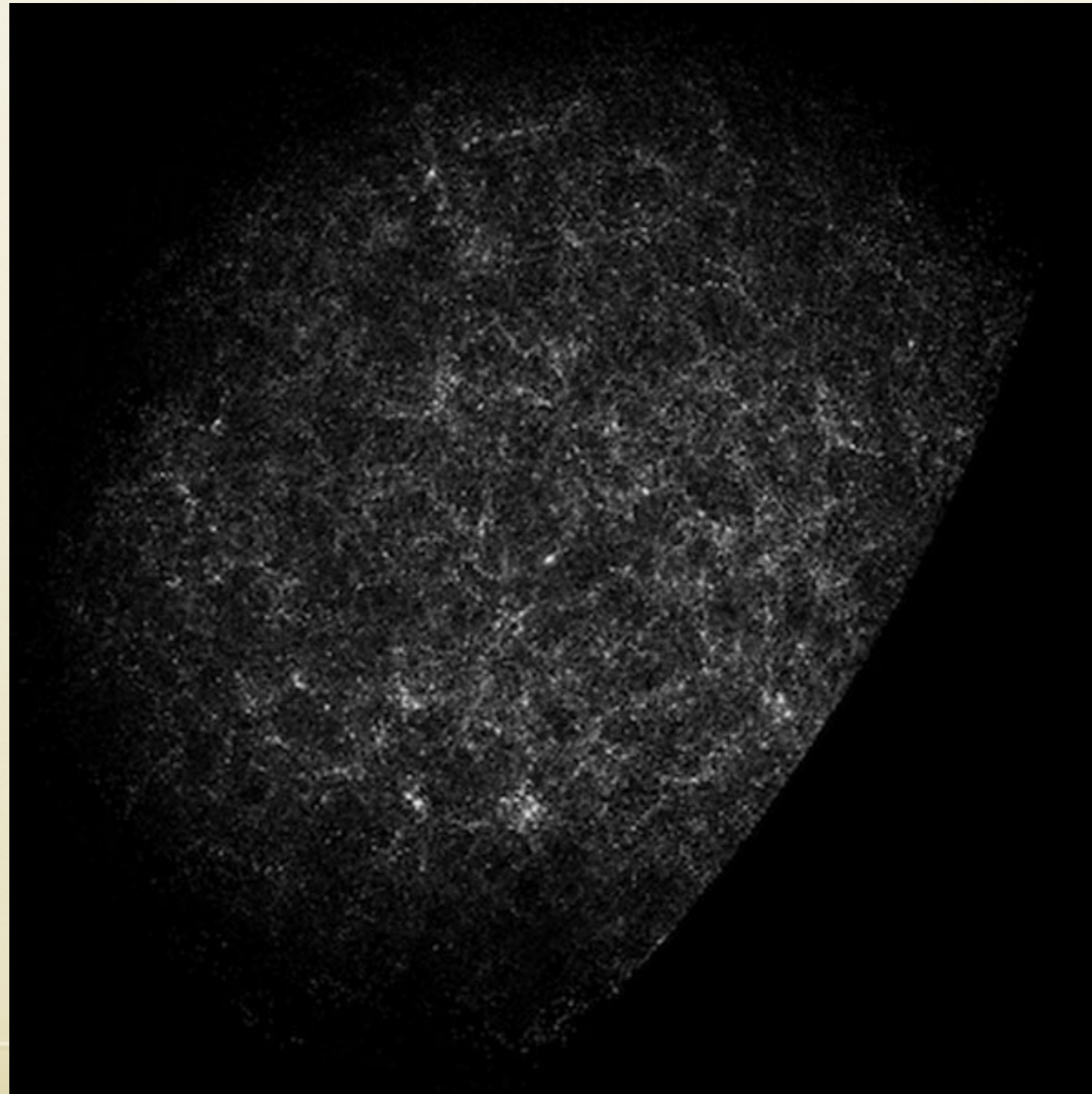


平成前

- ・ 平成前は、宇宙論といえば理論的な研究が主だった
- ・ 観測との定量的な比較は難しかった
 - ・ 1桁ぐらい違っていてもOK or 誤差が指数の肩に乗る
 - ・ $10 \div 100, e^{3 \pm 2}$ (3~150)
- ・ 宇宙に関する定性的な進展が主
 - ・ 等方的CMBの存在予言とその検出
 - ・ ビッグバン元素合成
 - ・ インフレーション理論の提案
 - ・ ダークマター宇宙モデルの提案

一様等方宇宙からのずれ：ゆらぎと構造

- Shane-Wirtanen catalog (1967, Lick observatory)



宇宙構造の定量解析

- 多数の銀河位置から、銀河の群れ集まり方を定量化する方法の確立：相関関数 (東辻, 木原, Peebles,...)

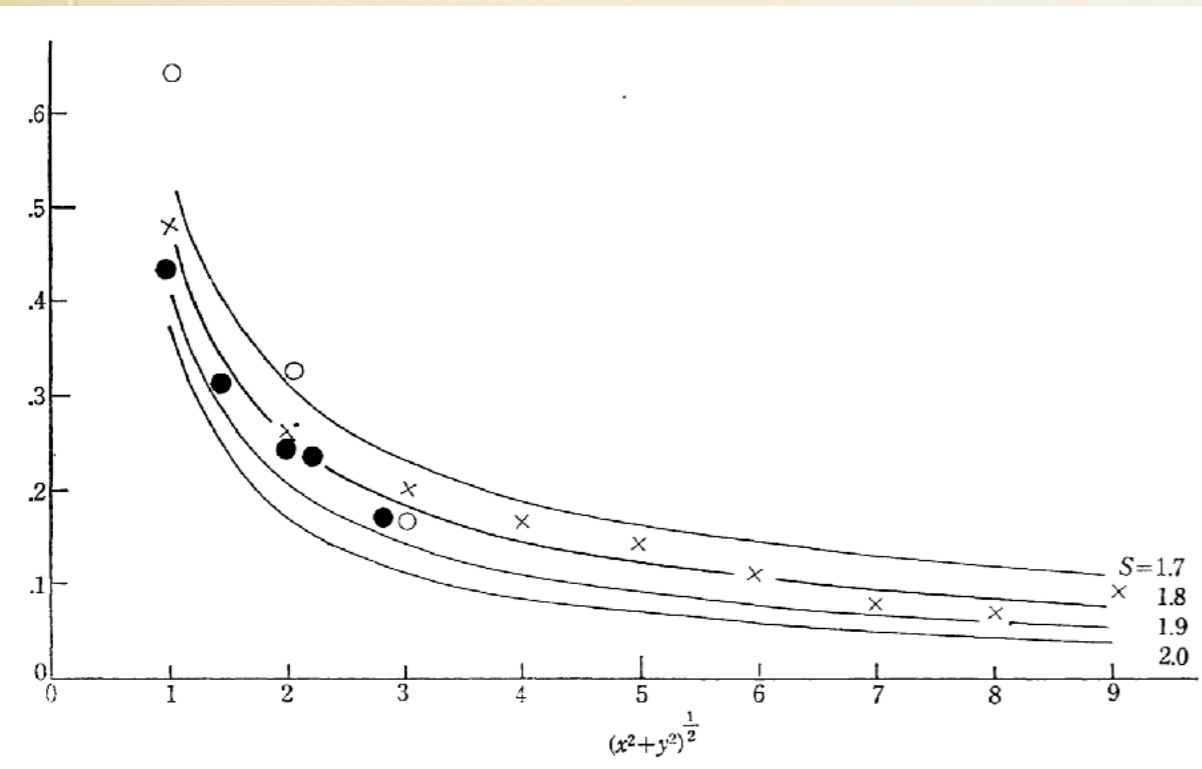
Vol. 21, No. 3 Publications of the Astronomical Society of Japan 1969

The Correlation Function for the Distribution of Galaxies

Hiroo TOTSUJI and Taro KIHARA

Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo

(Received May 15, 1969; revised June 26, 1969)



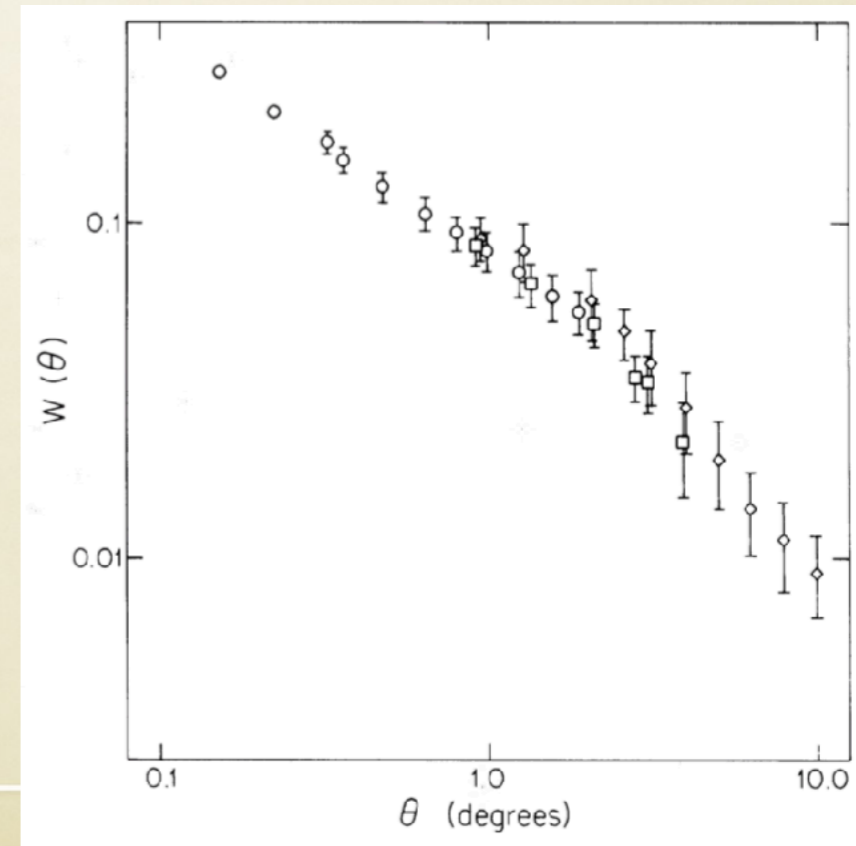
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 217:385-405, 1977 October 15
© 1977. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

STATISTICAL ANALYSIS OF CATALOGS OF EXTRAGALACTIC OBJECTS. VII. TWO- AND THREE-POINT CORRELATION FUNCTIONS FOR THE HIGH- RESOLUTION SHANE-WIRTANEN CATALOG OF GALAXIES*

EDWARD J. GROTH AND P. J. E. PEEBLES

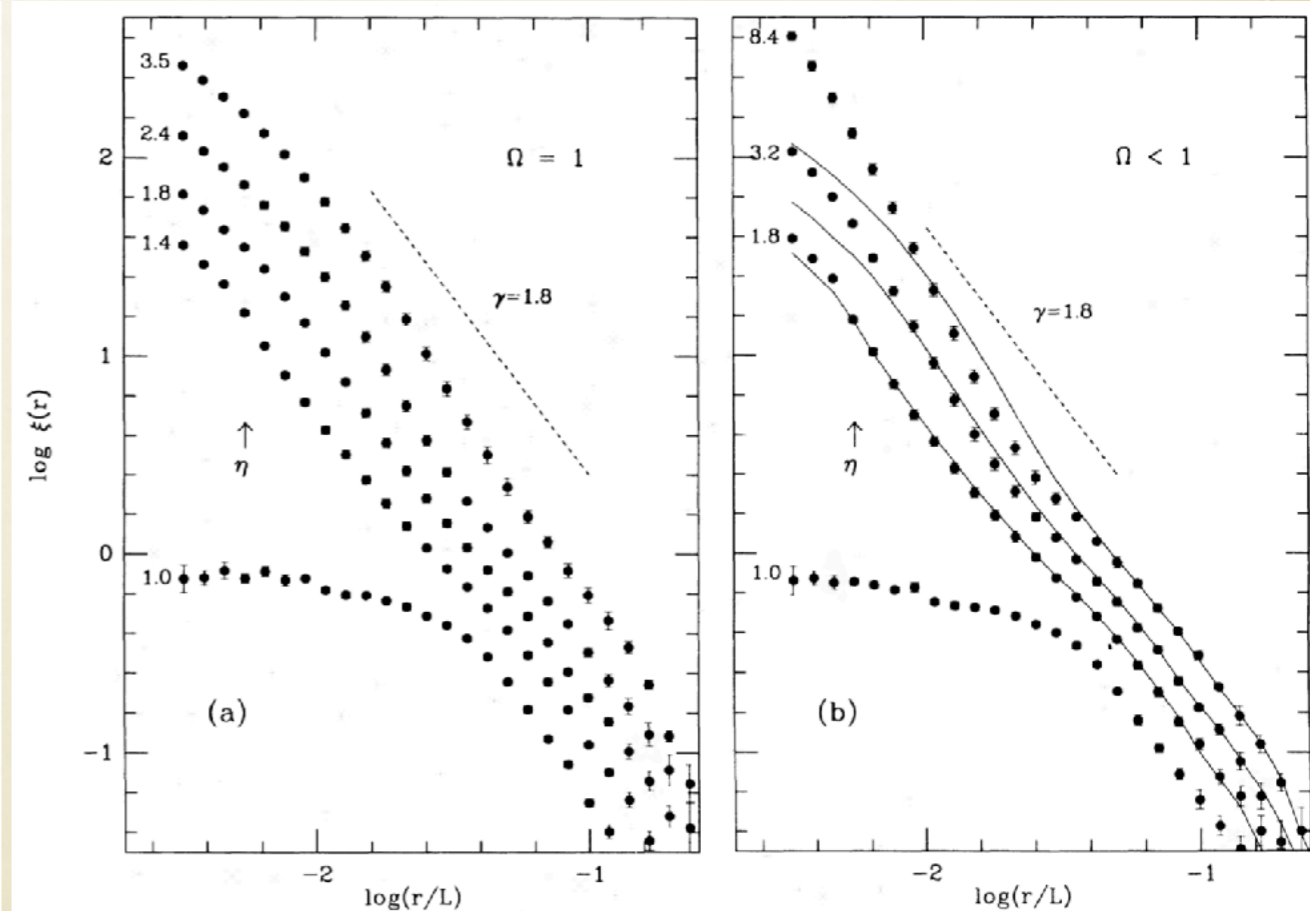
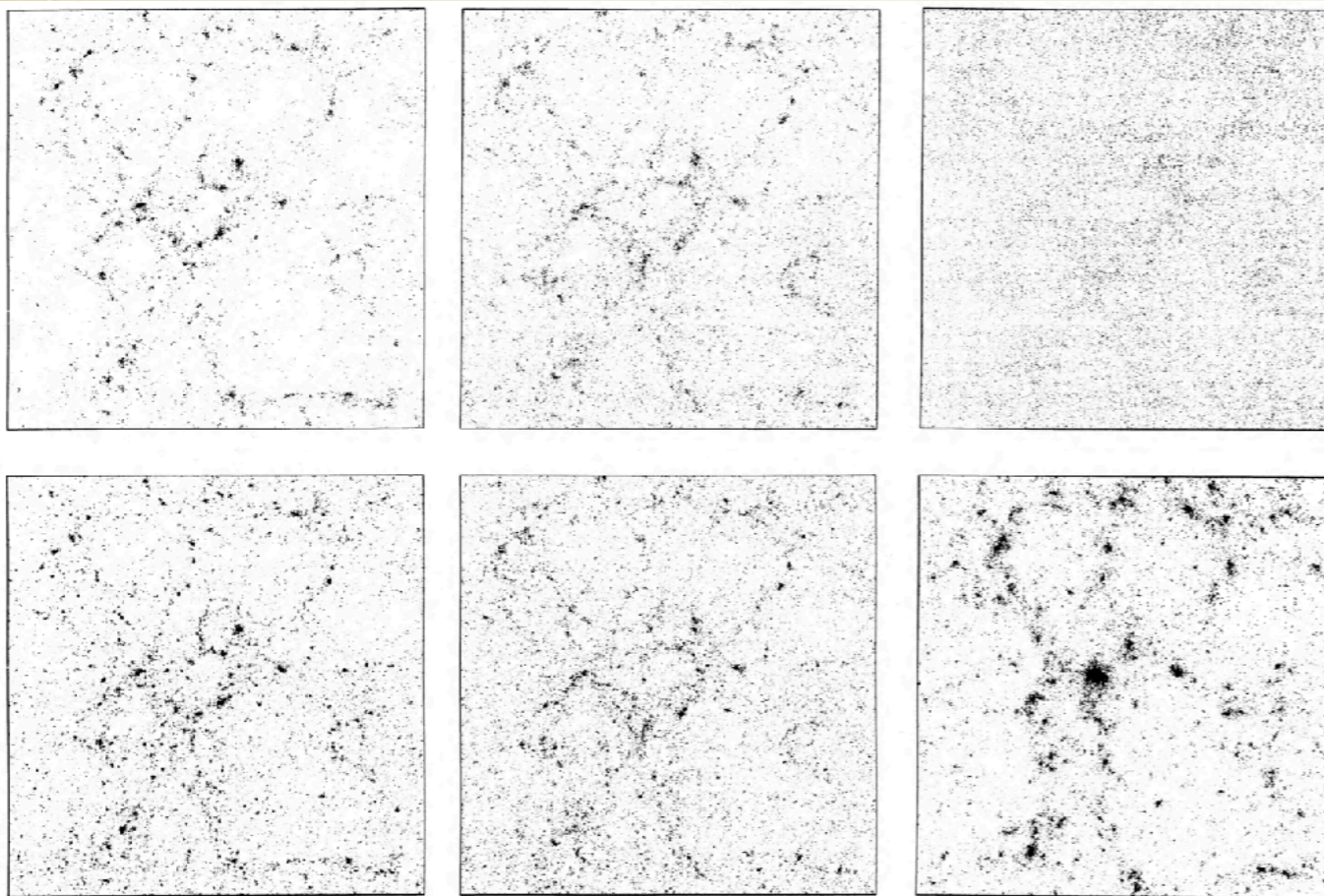
Joseph Henry Laboratories, Physics Department, Princeton University

Received 1977 March 4; accepted 1977 April 7



コールド・ダークマター・モデルによる構造形成

- 構造形成の宇宙論的数値シミュレーション (e.g., Davis, Efstathiou, Frenk, White 1985)
- “Cold dark matter (CDM) + バイアス銀河形成モデル” が観測によって求めた相関関数を再現する



CDMモデルとバイアス銀河形成

- CDMシミュレーションの相関関数 \neq 銀河の相関関数
 - 銀河はCDM空間分布のバイアスされた探針（トレーサー）
 - “Biased structure formation”

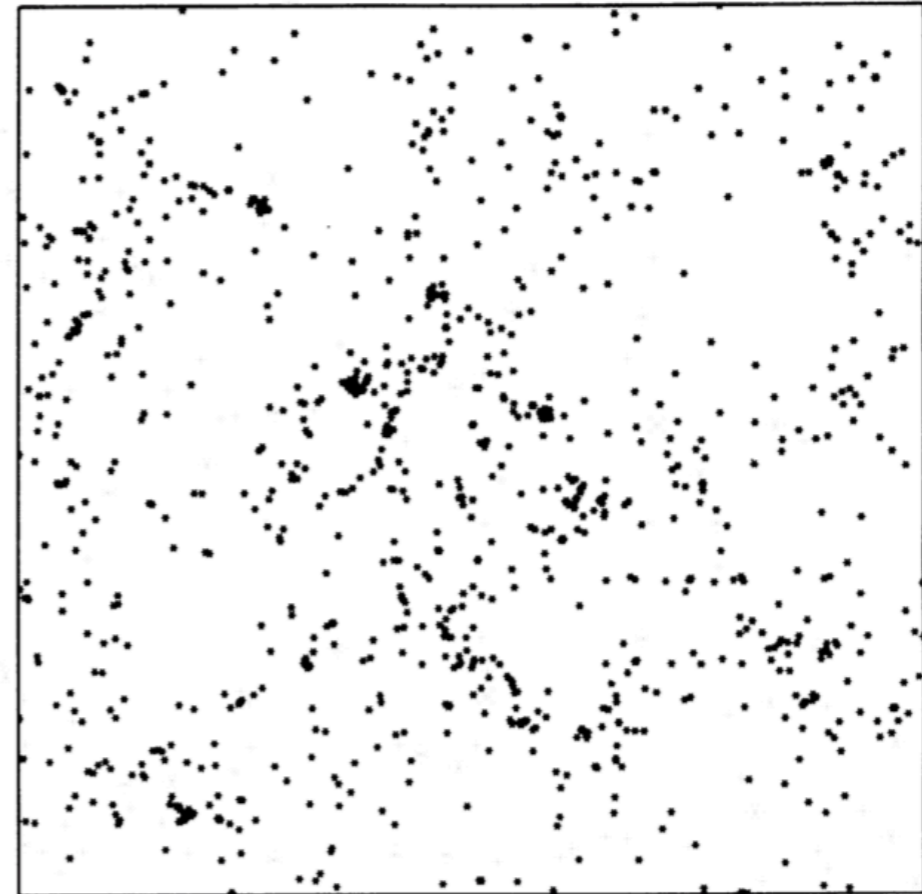
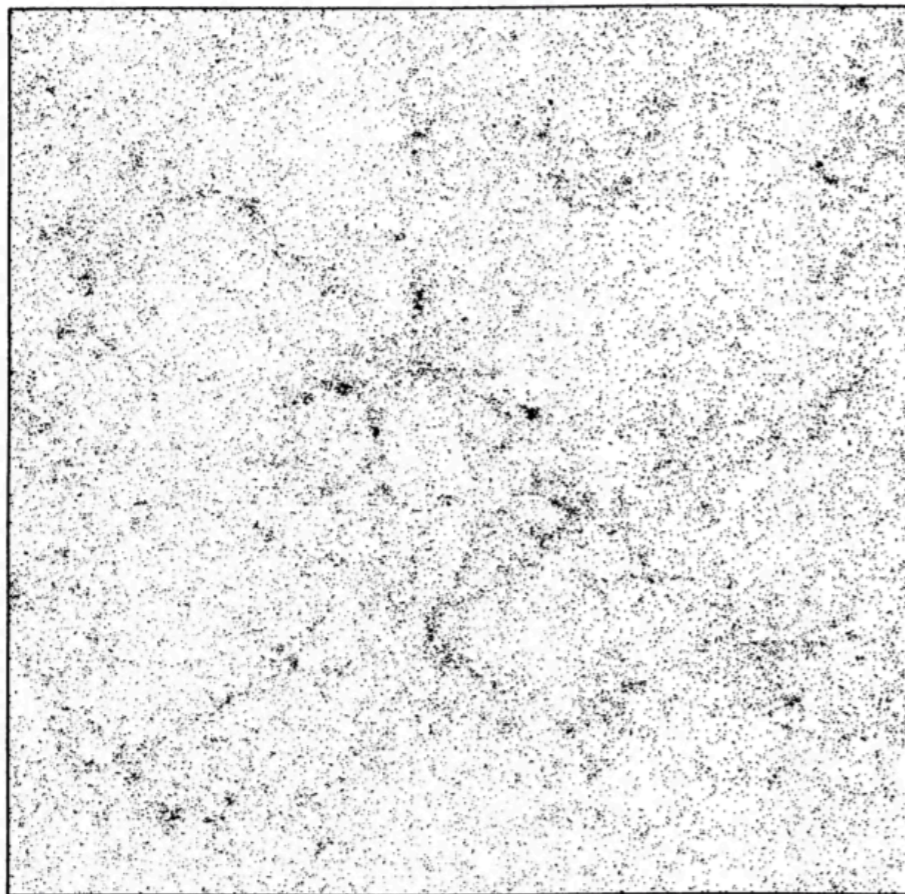
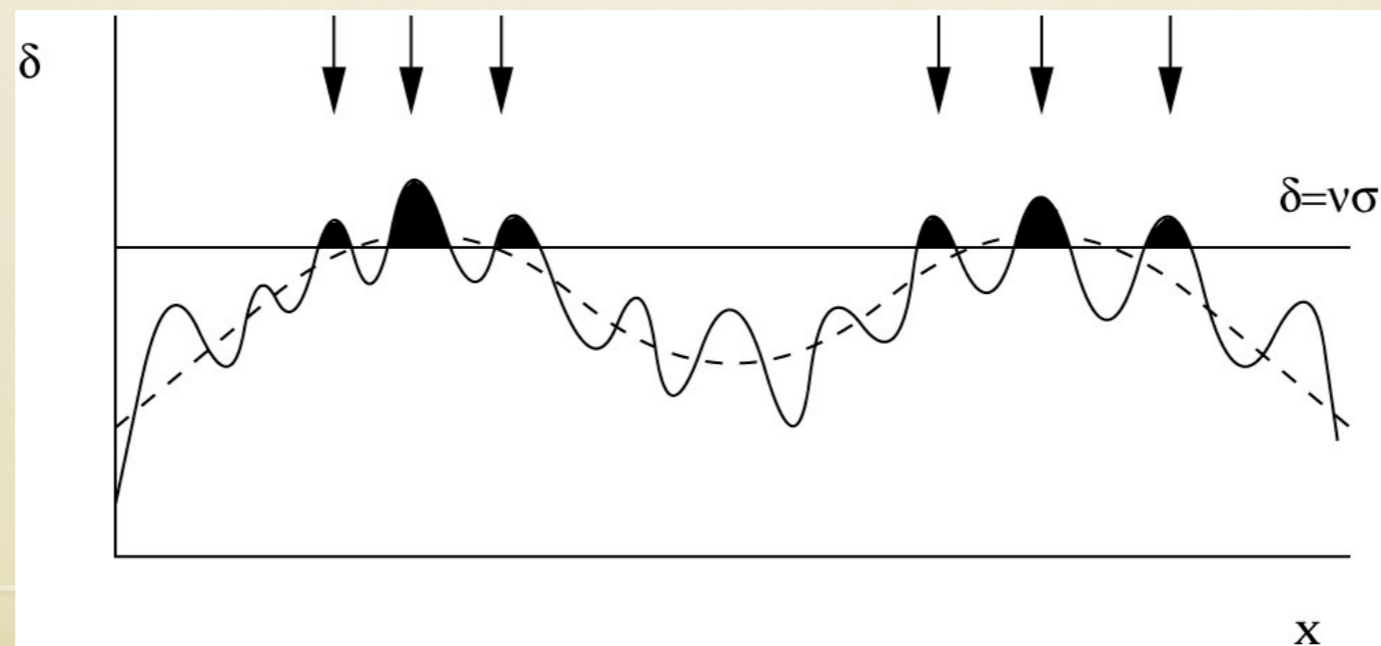


FIG. 16.—The projected distribution of all particles (*left*) and of the “galaxies” (*right*) in EdS1 at $a = 1.4$. The side of the box is $32.5h^{-1}$ Mpc. “Galaxies” are assumed to form only at the 2.5σ peaks of the linear density distribution.

ピーク理論

- ・ バイアス銀河形成を論ずるための理論的枠組み：
 - ・ ピークの統計理論 (Bardeen, Bond, Kaiser and Szalay 1985)

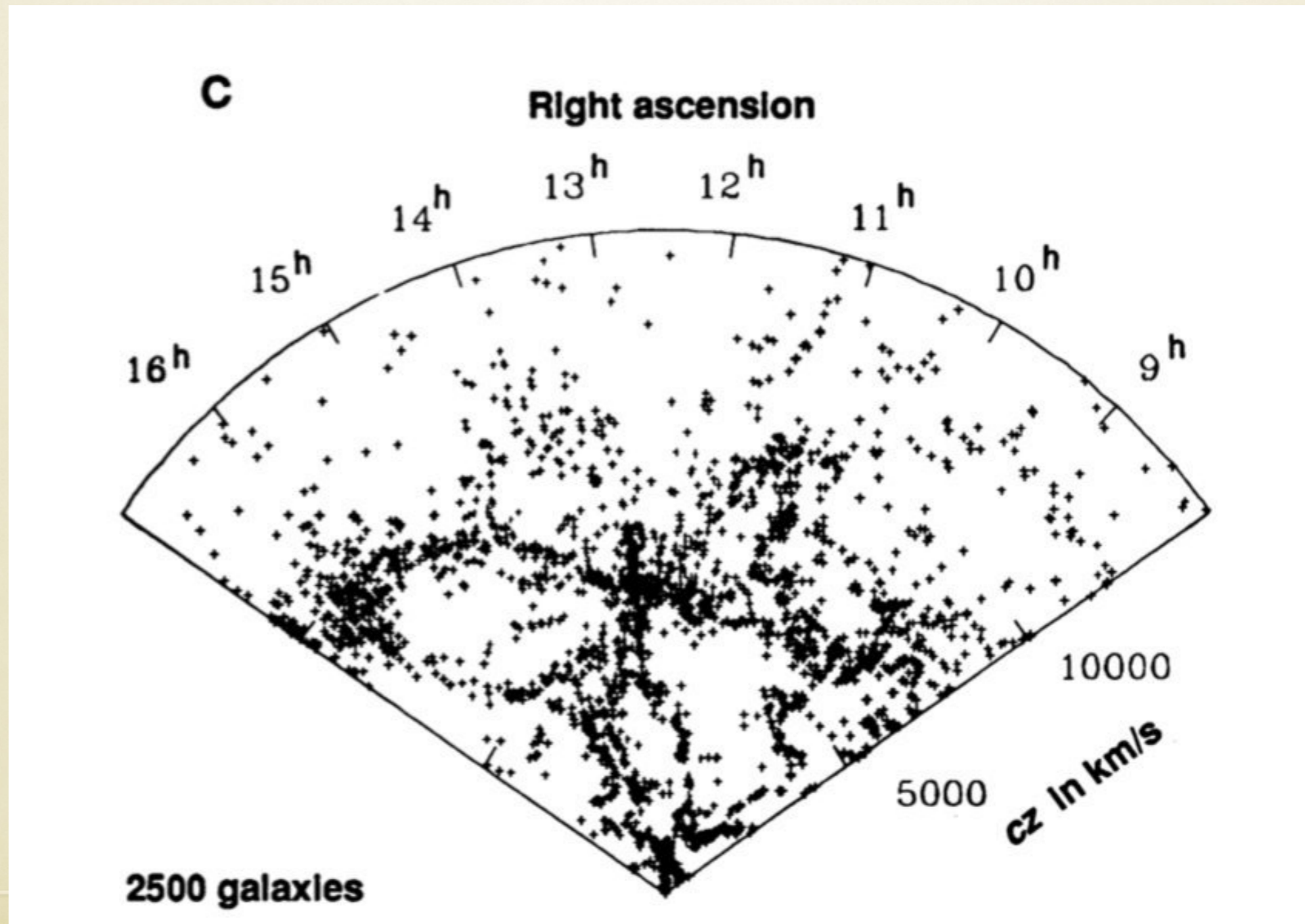
THE STATISTICS OF PEAKS OF GAUSSIAN RANDOM FIELDS
J. M. BARDEEN¹
Physics Department, University of Washington
J. R. BOND¹
Physics Department, Stanford University
N. KAISER¹
Astronomy Department, University of California at Berkeley, and Institute of Astronomy, Cambridge University
AND
A. S. SZALAY¹
Astrophysics Group, Fermilab
Received 1985 July 25; accepted 1985 October 9



図はPeacock 1998

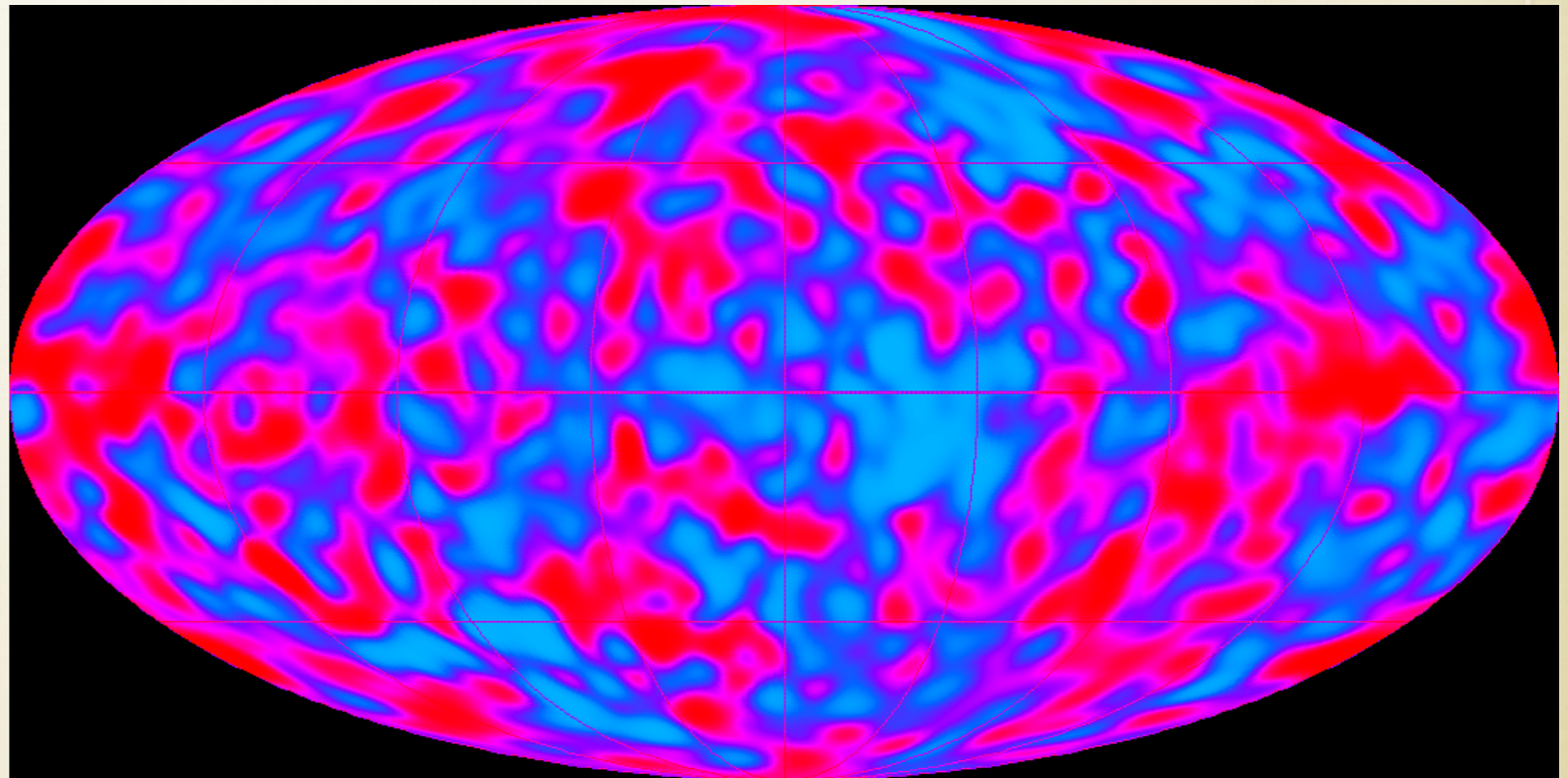
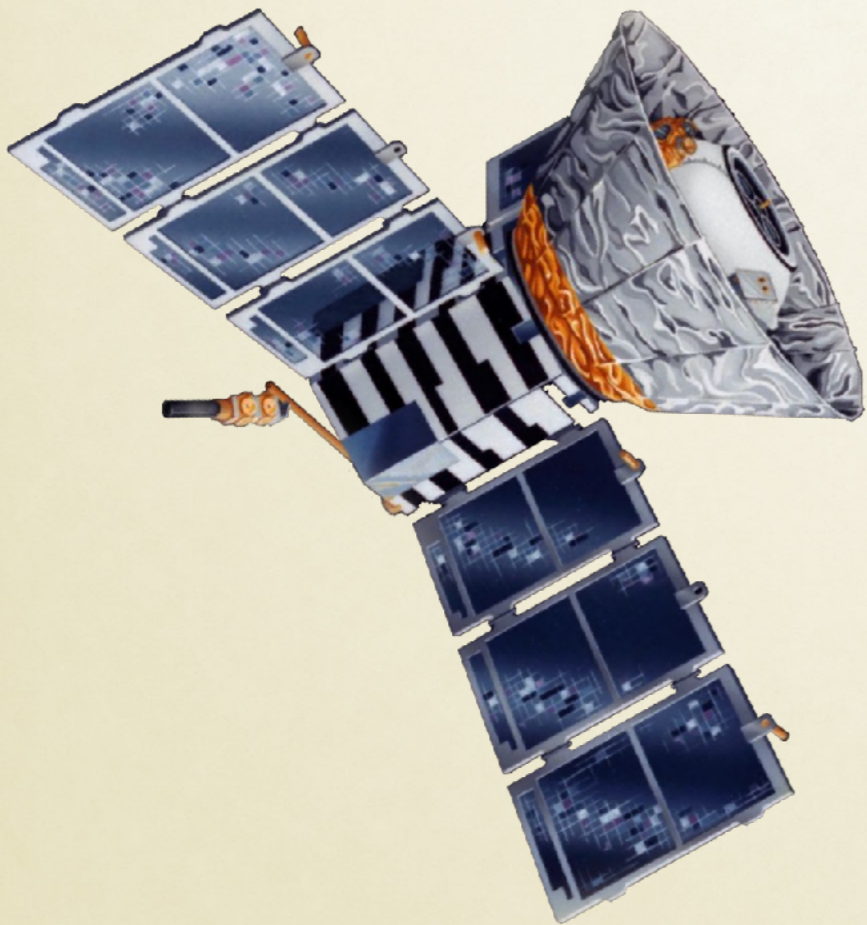
CfA2 Great Wall の発見

- Geller & Huchra 1989



COBE

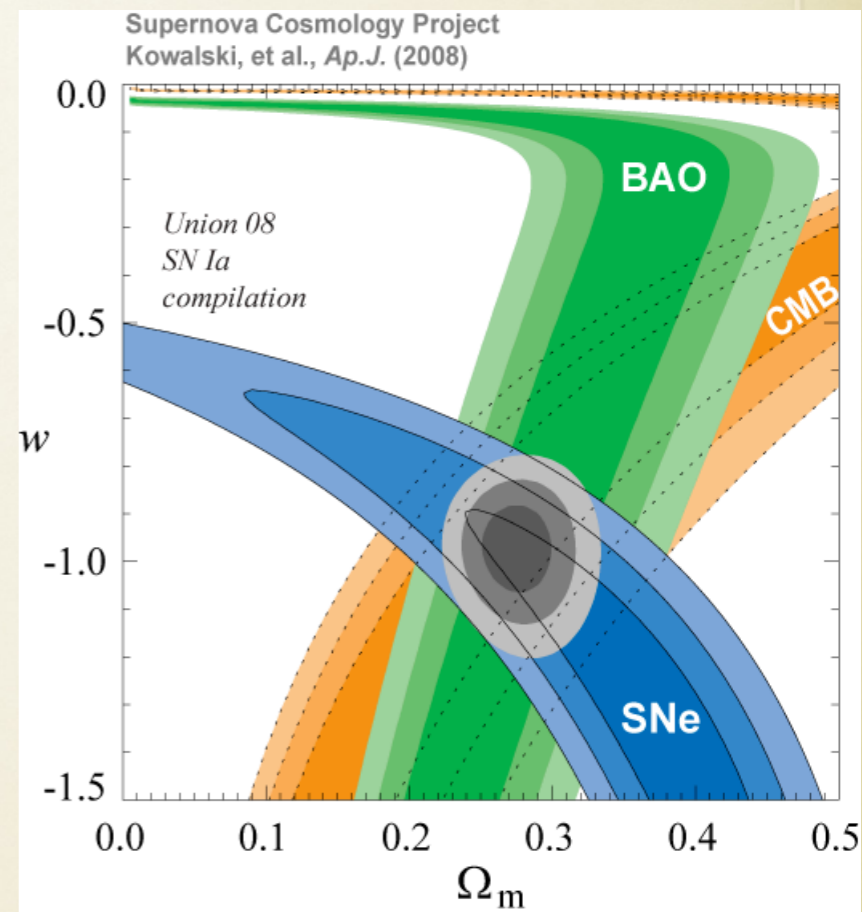
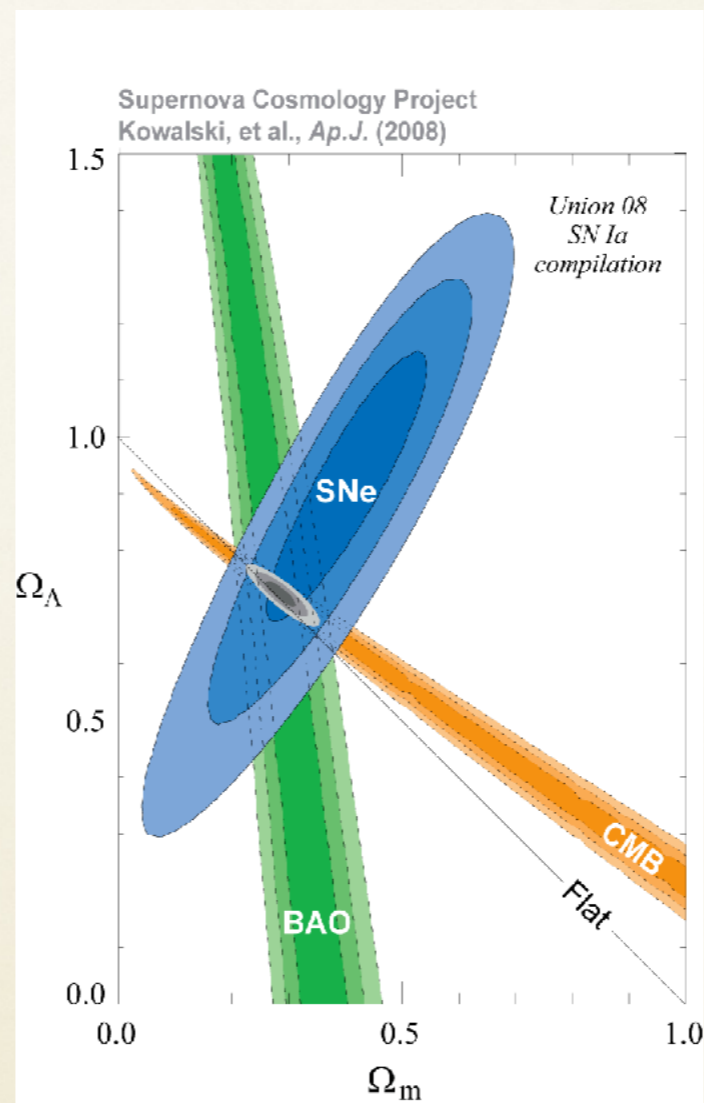
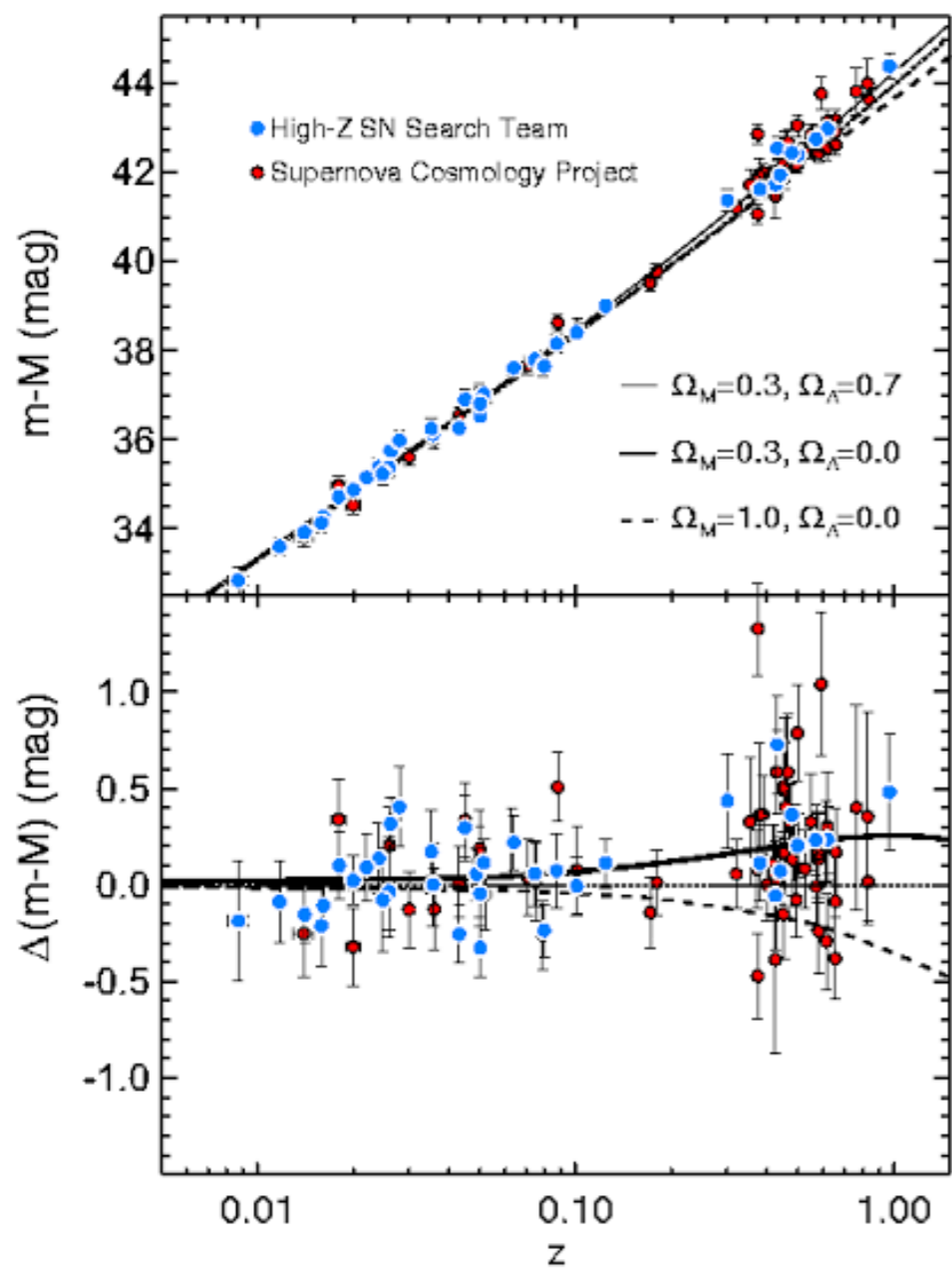
- 宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎの発見 (1992)



2006 Nobel Prize



超新星宇宙論：加速膨張の発見 (1998)

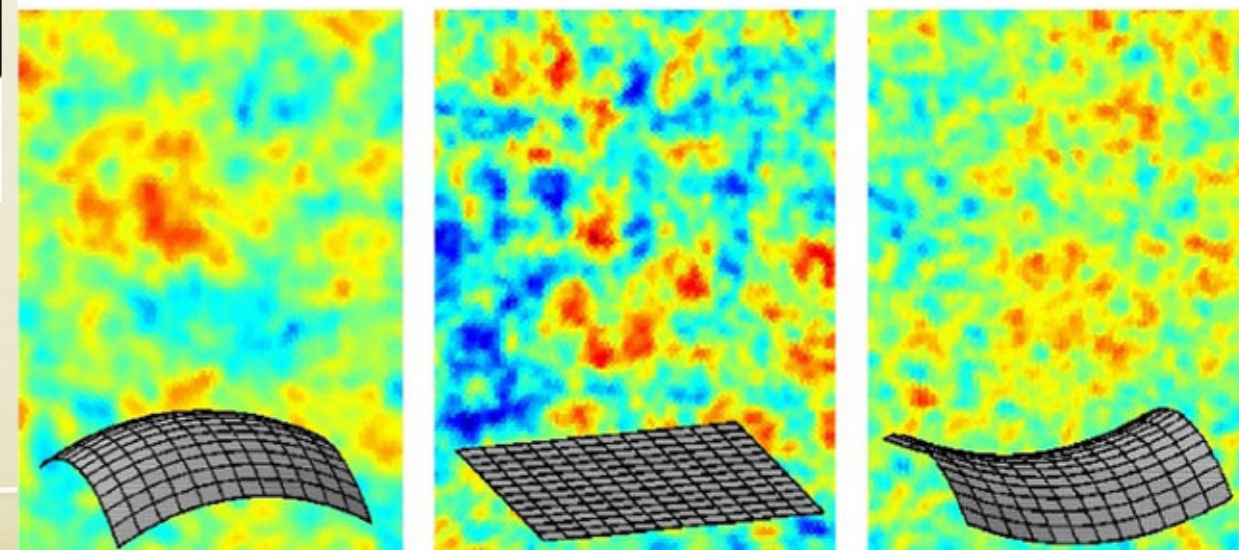
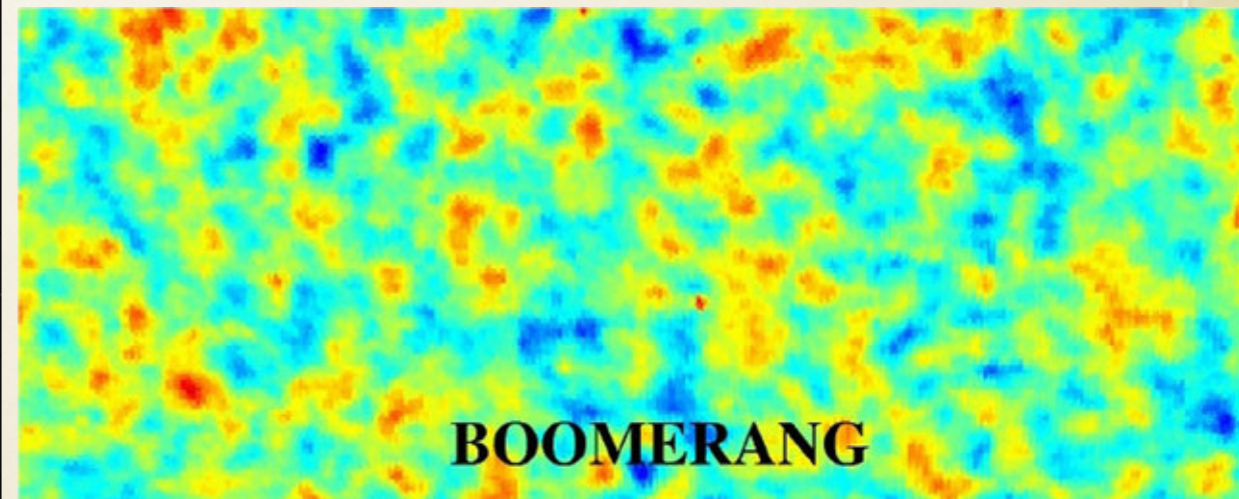
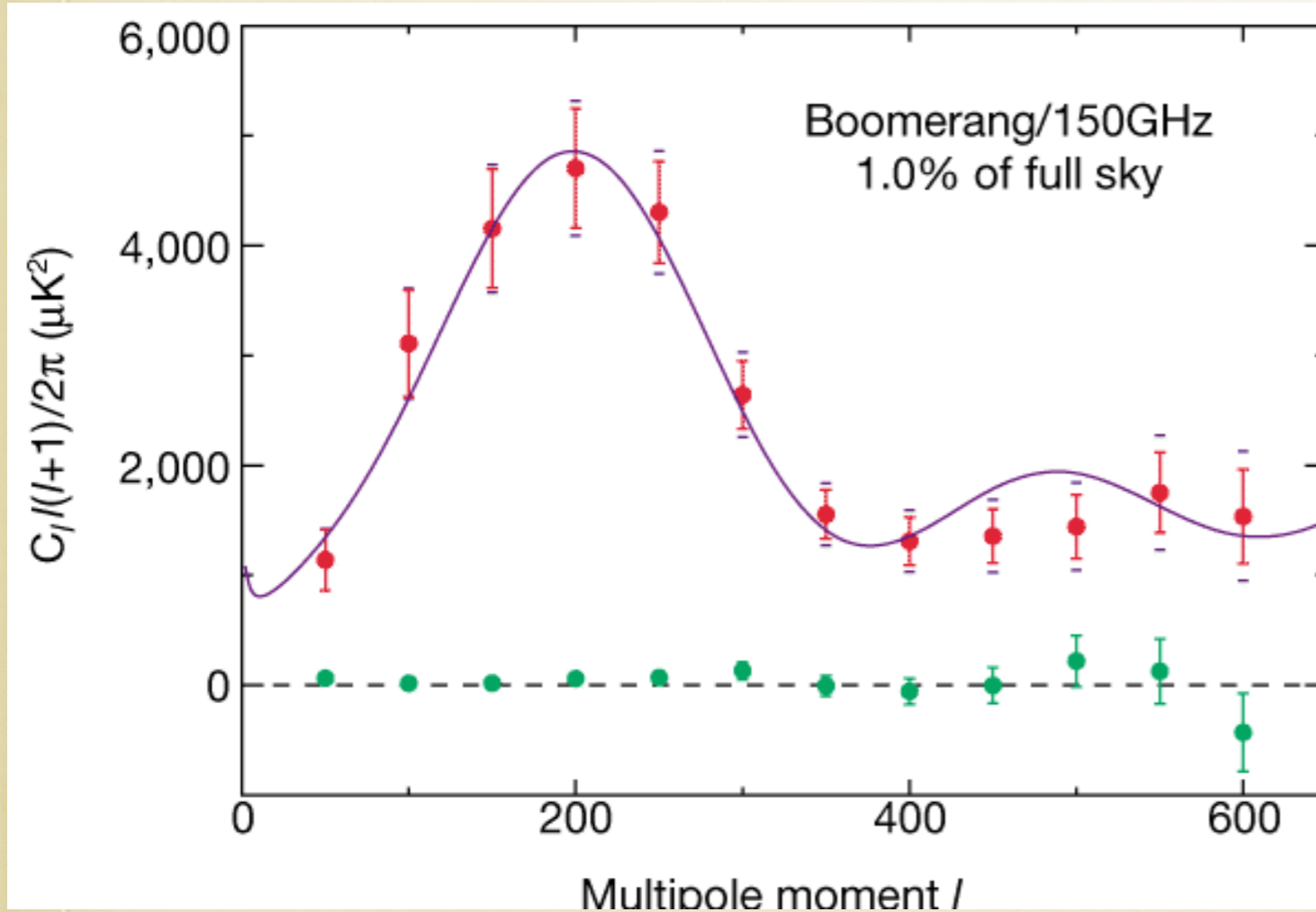


2011 Nobel Prize



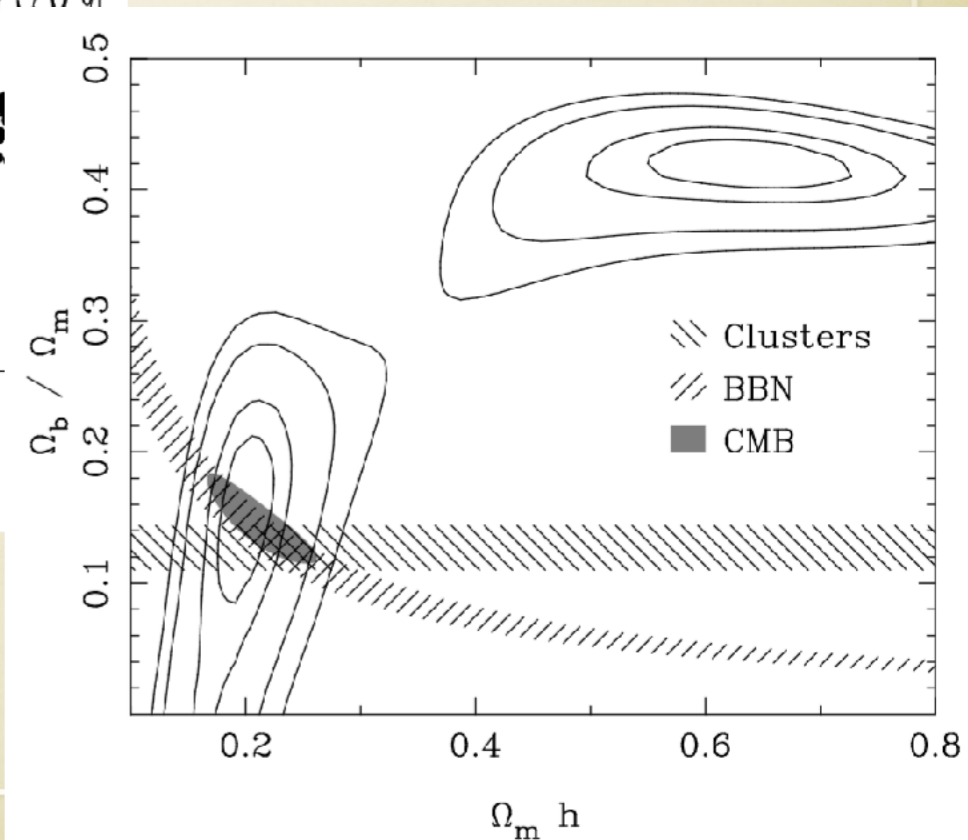
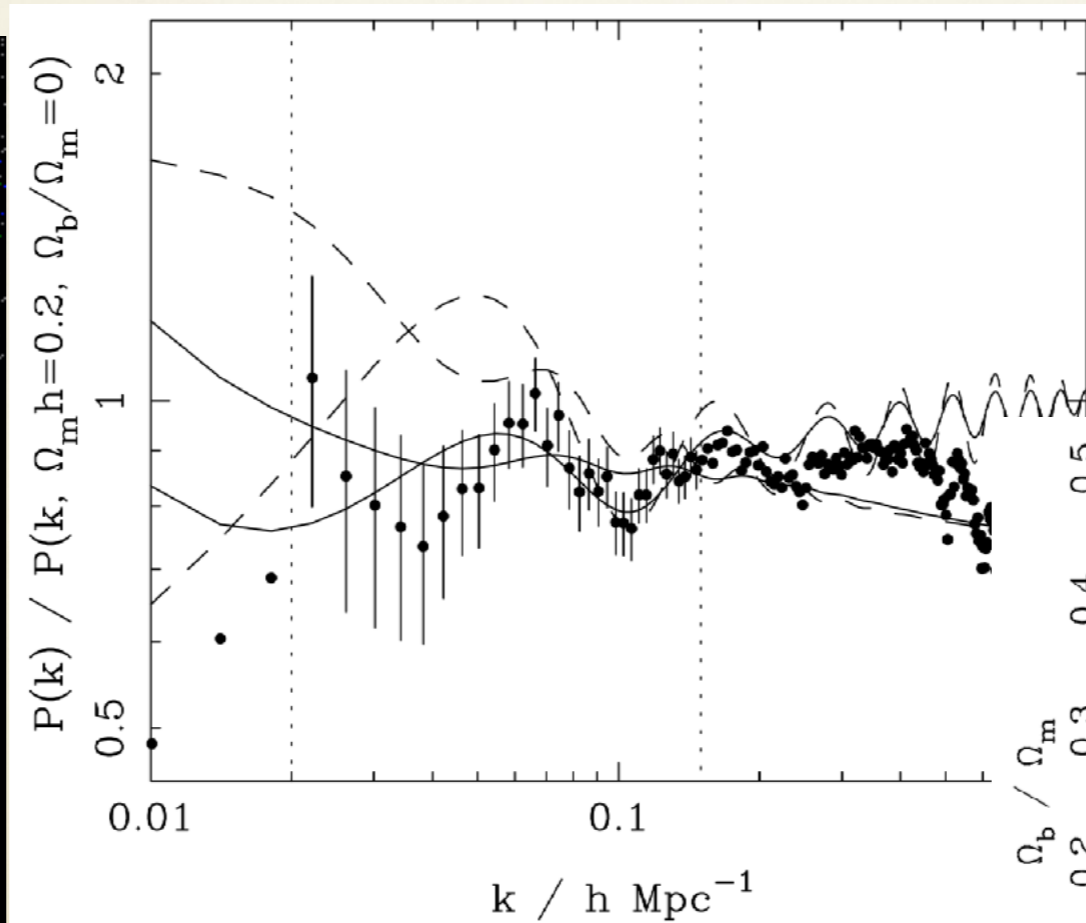
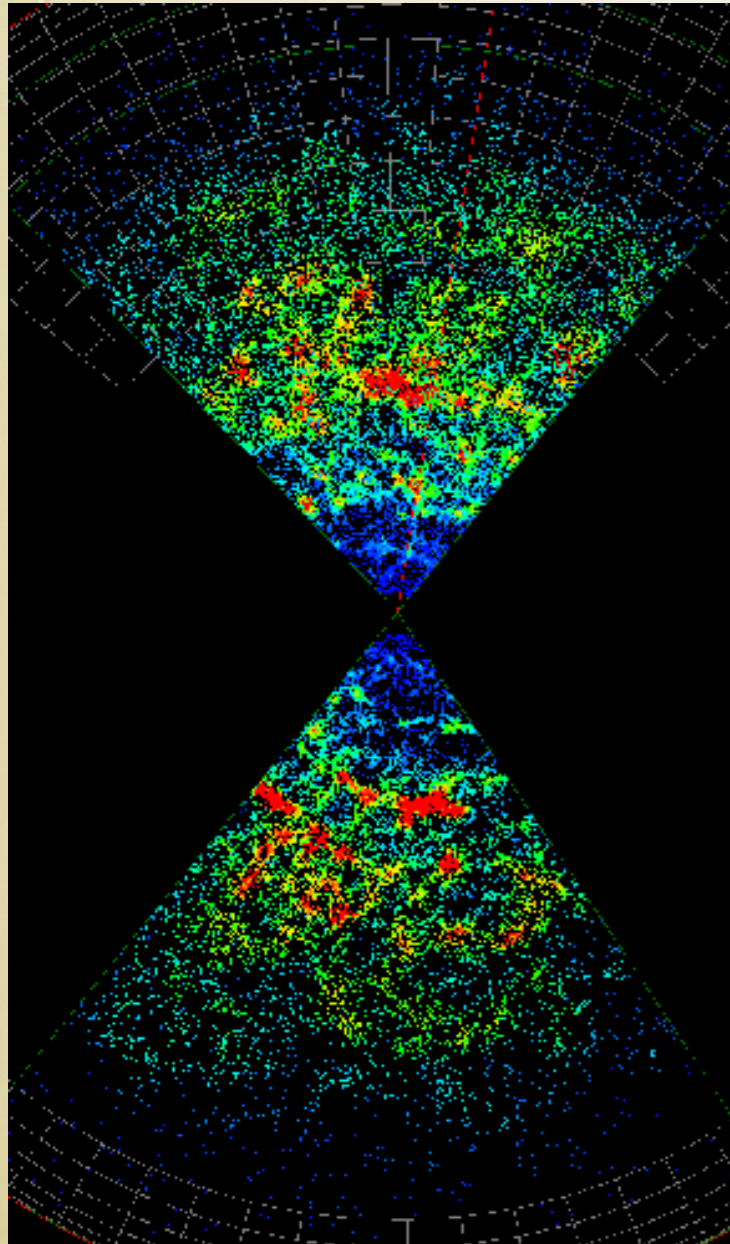
CMBゆらぎ音響振動の発見

- BOOMERanG (1999)



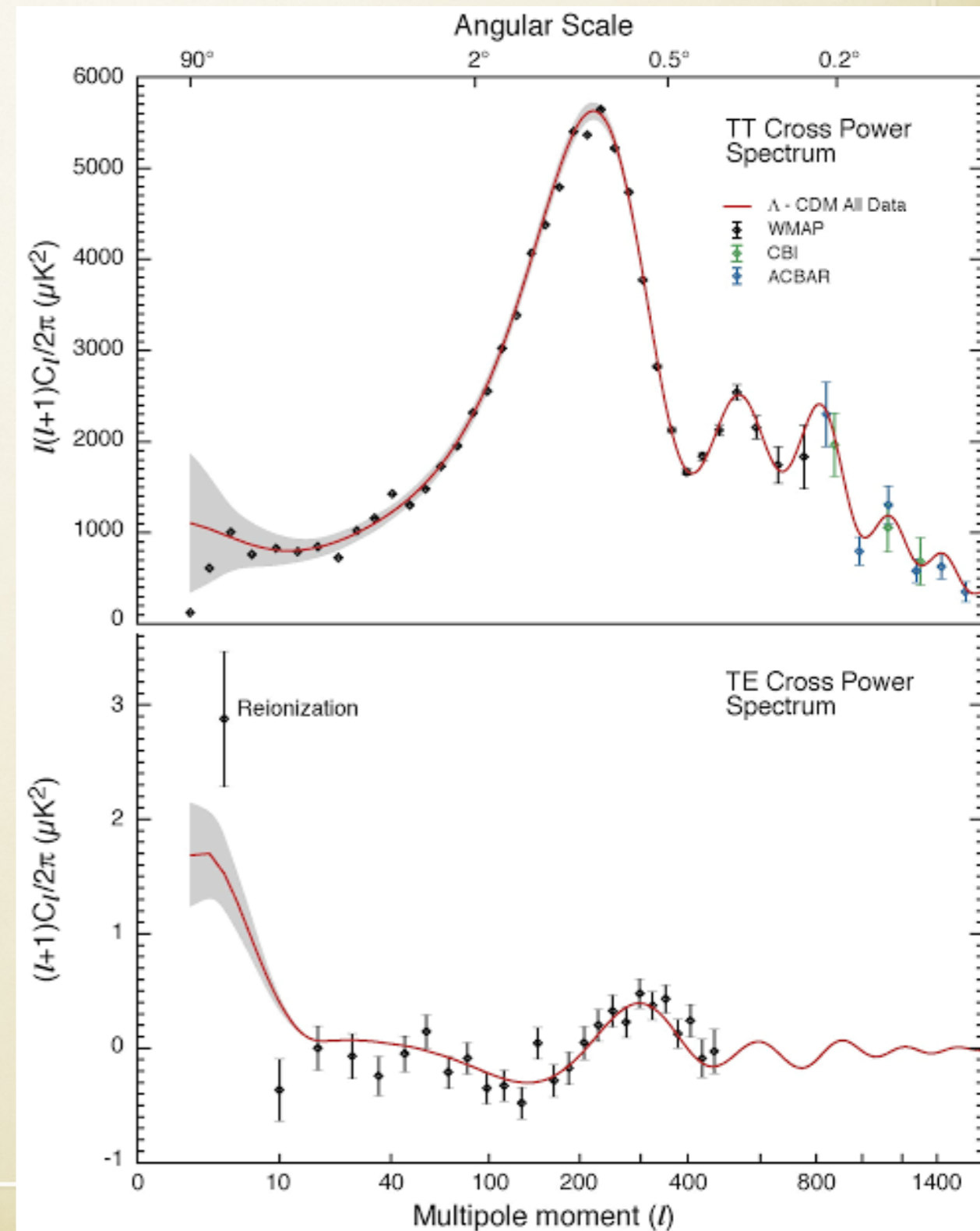
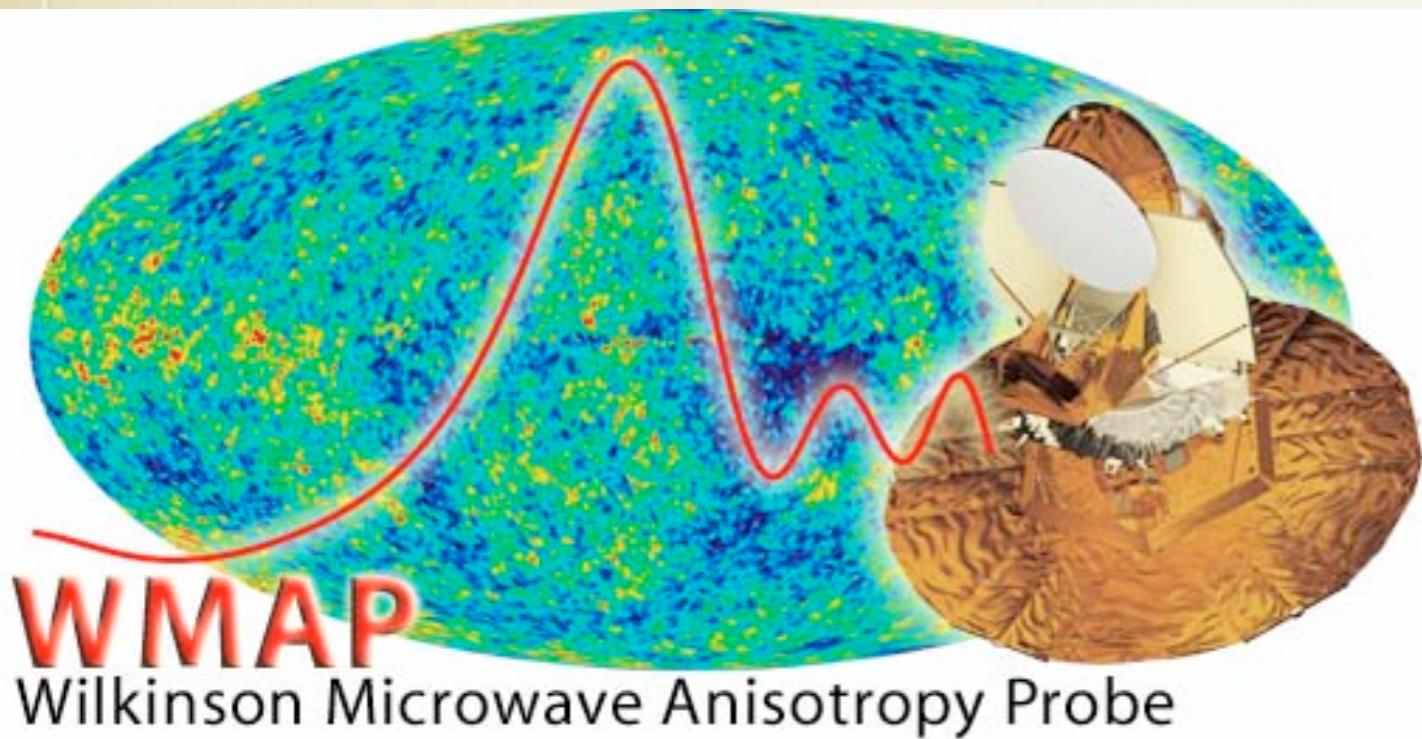
2dF銀河サーベイ (2001)

- ・ 銀河パワースペクトルから密度パラメータを正確に決定
- ・ 物質パワースペクトル中にバリオン音響振動を発見



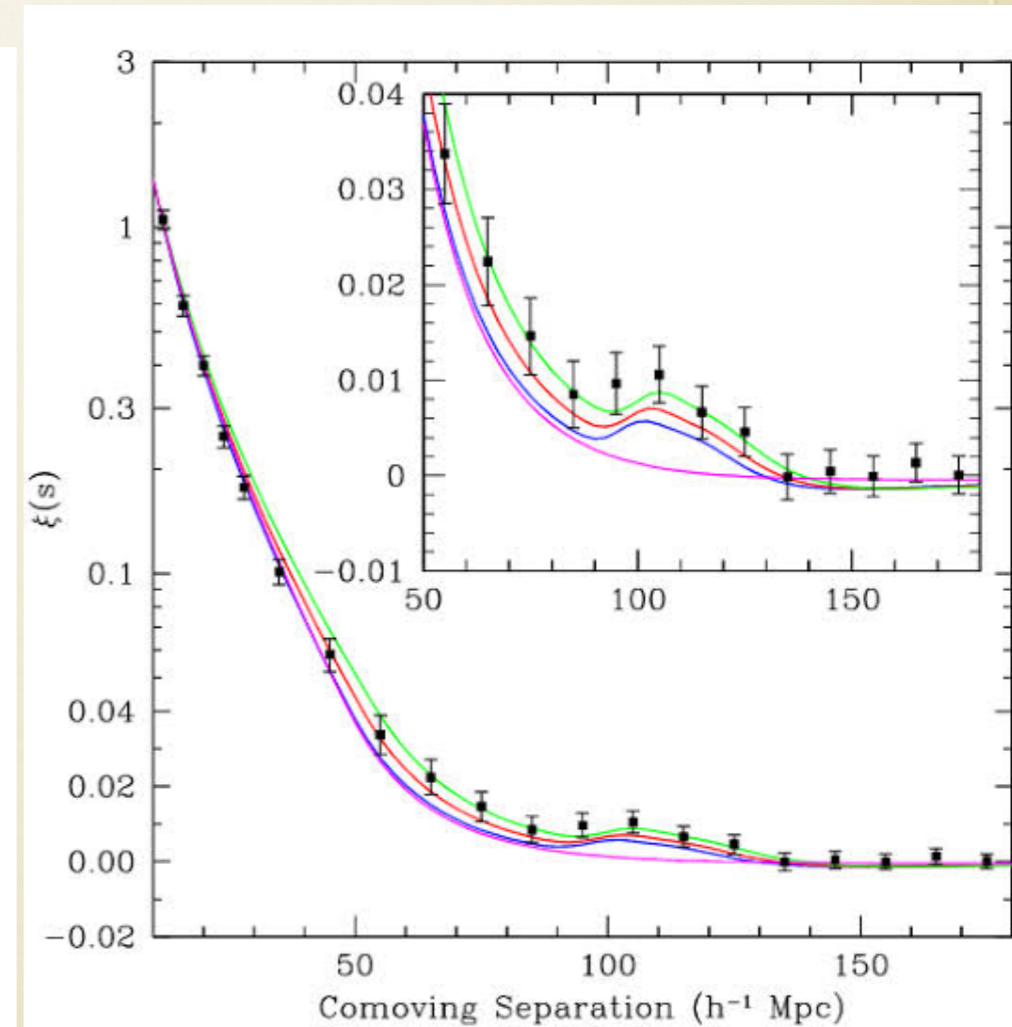
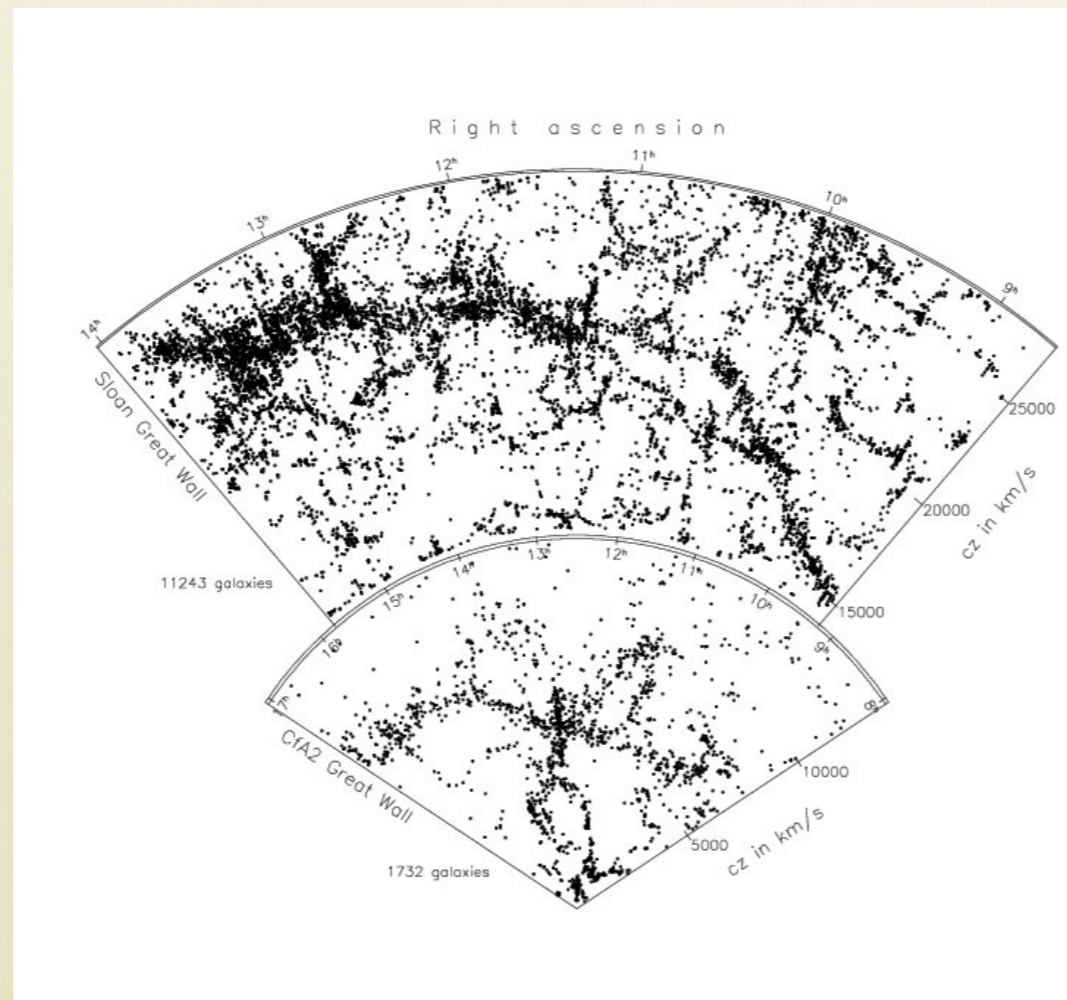
WMAP (2003)

- %レベルで Λ CDMモデルを検証
- e.g., 宇宙年齢137億年



Sloan Digital Sky Survey (2000-)

- Sloan Great Wall の発見(2003)
- 銀河相関関数バリオン音響振動ピークの測定によるダークエネルギーへの制限 (2005)



2006年グーグル検索

Google™ ウェブ [イメージ](#) [ニュース](#) [ローカル](#) ^{New!} [グループ](#) [more](#) »

バリオン音響振動 [検索オプション](#)
[表示設定](#)

ウェブ全体から検索 日本語のページを検索

ウェブ

バリオン音響振動 の検索結果 **1** 件中 **1** - **1** 件目

[\[PPT\] スライド* タイトルなし](#)

ファイルタイプ: Microsoft Powerpoint 97 - [HTMLバージョン](#)

宇宙初期のバリオン音響振動. コールドダークマター + バリオン + 光子. → 宇宙の晴れ上がり以前において音響振動: ... バリオン音響振動とEAP効果によるダークエネルギーへの制限. 近将来的な(高赤方偏移)銀河サーベイで期待される制限 ...

www.tuhep.phys.tohoku.ac.jp/COE2005/slides/Matsubara.ppt - [関連ページ](#)

2019年グーグル検索

Google

バリオン音響振動

[すべて](#) [画像](#) [動画](#) [ショッピング](#) [ニュース](#) [もっと見る](#)

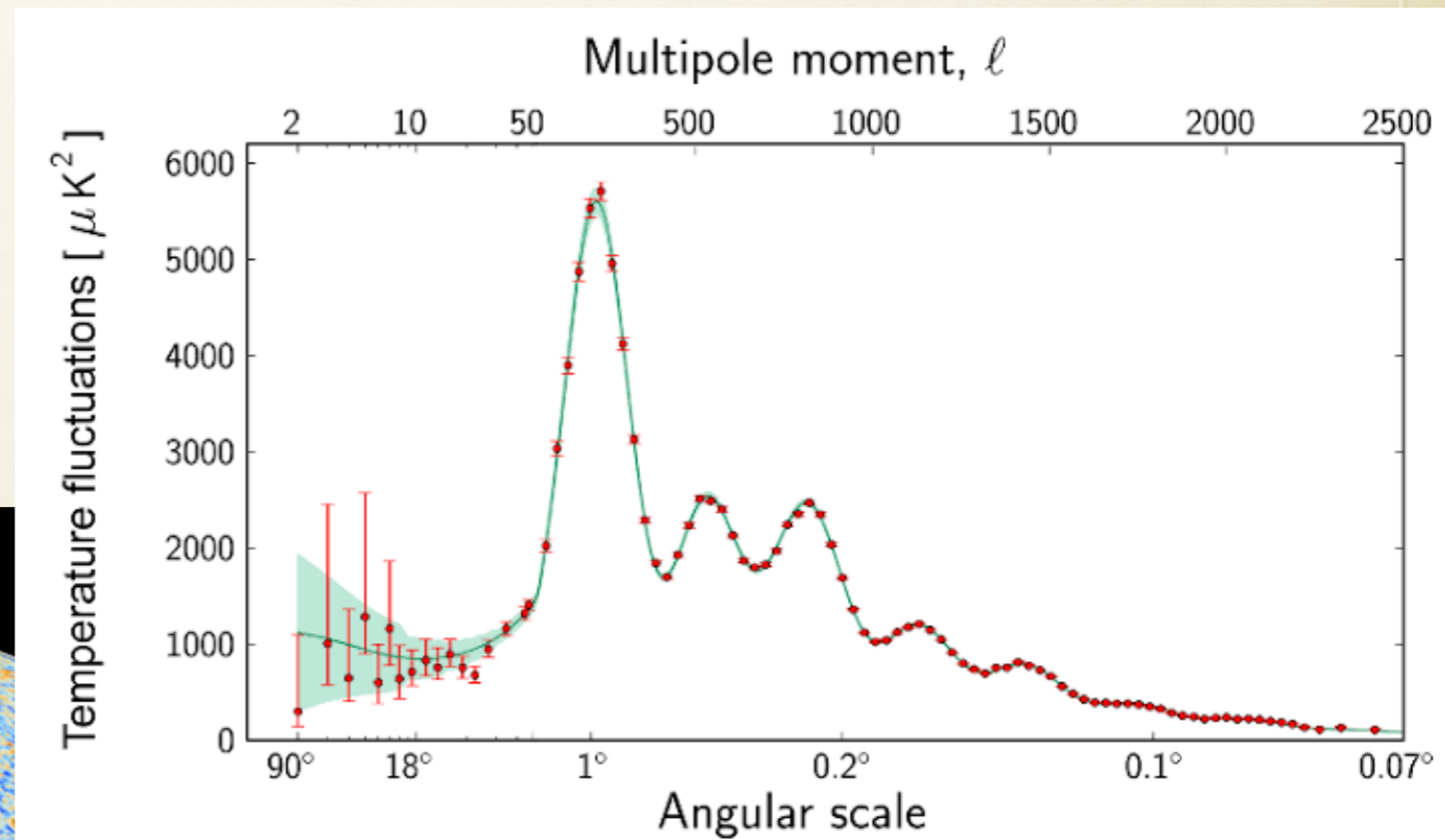
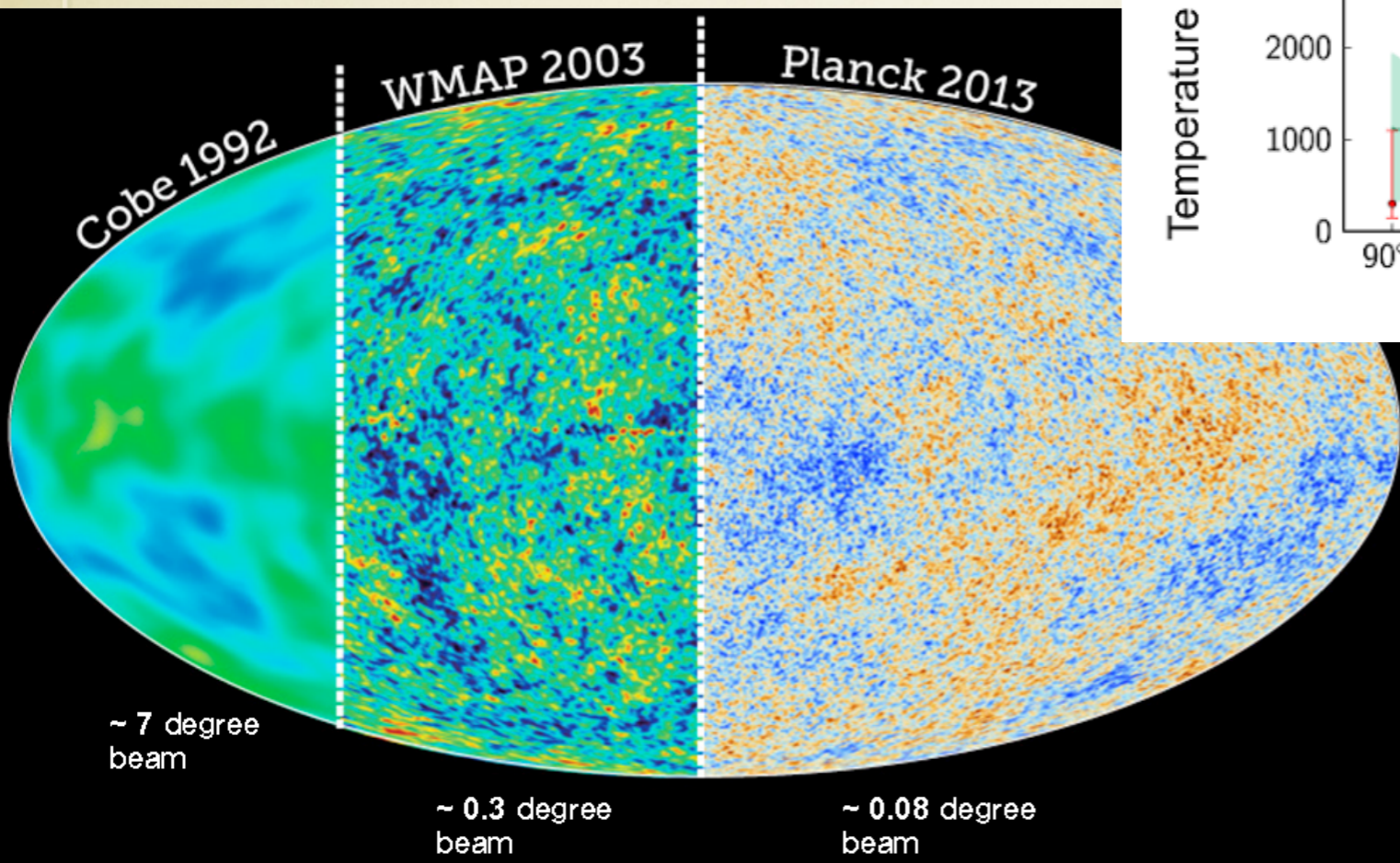
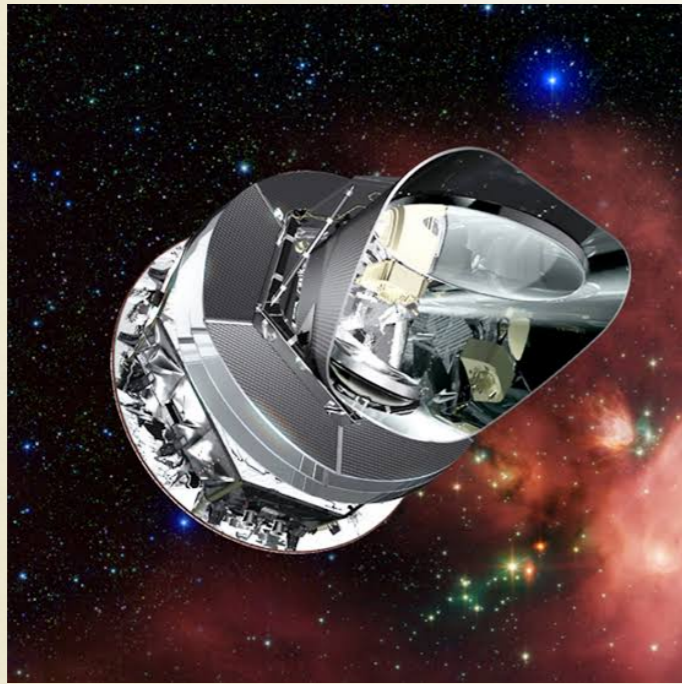
約 6,370 件 (0.33 秒)

天文学辞典 » **バリオン音響振動**

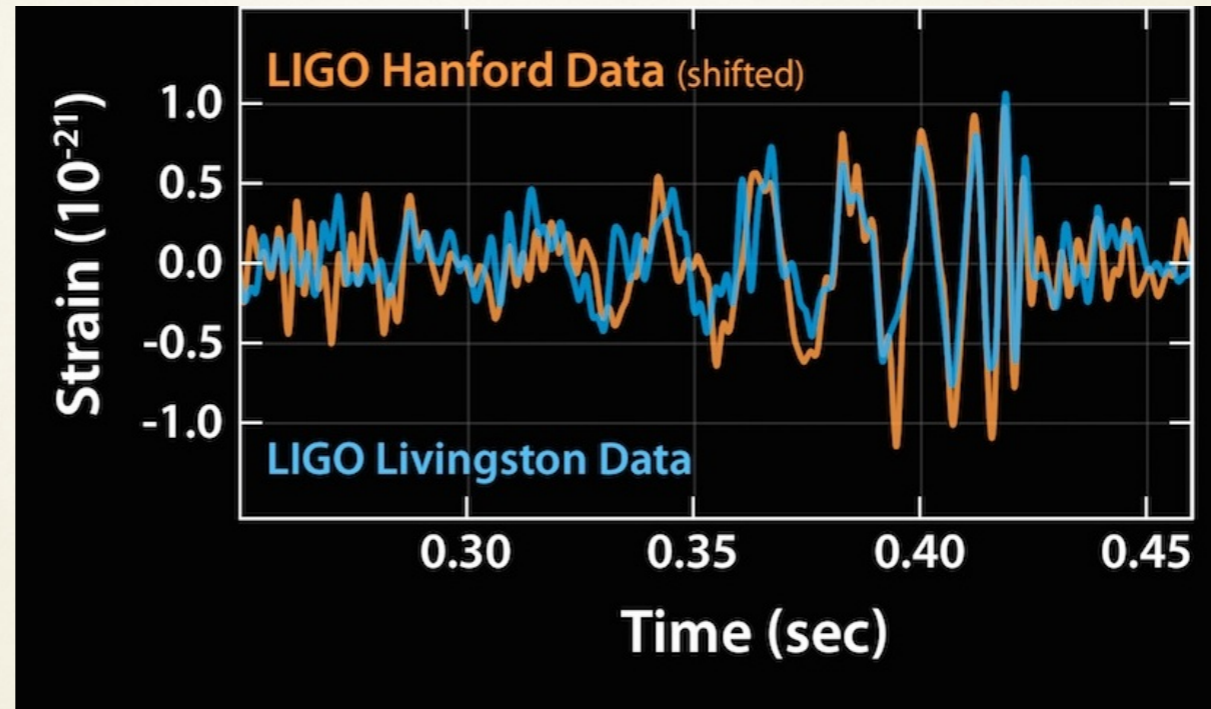
[astro-dic.jp](#) > [理論](#) > [宇宙論](#) ▼

宇宙初期には、バリオンと光子がトムソン散乱により強く結合して一体となり、一つの流体として振る舞う。このバリオン光子流体は圧力を持つため、空間的なゆらぎがあると、それは音波振動となって空間中を伝播する。これを**バリオン音響振動**という。この振動は、

Planck (2013-2018)

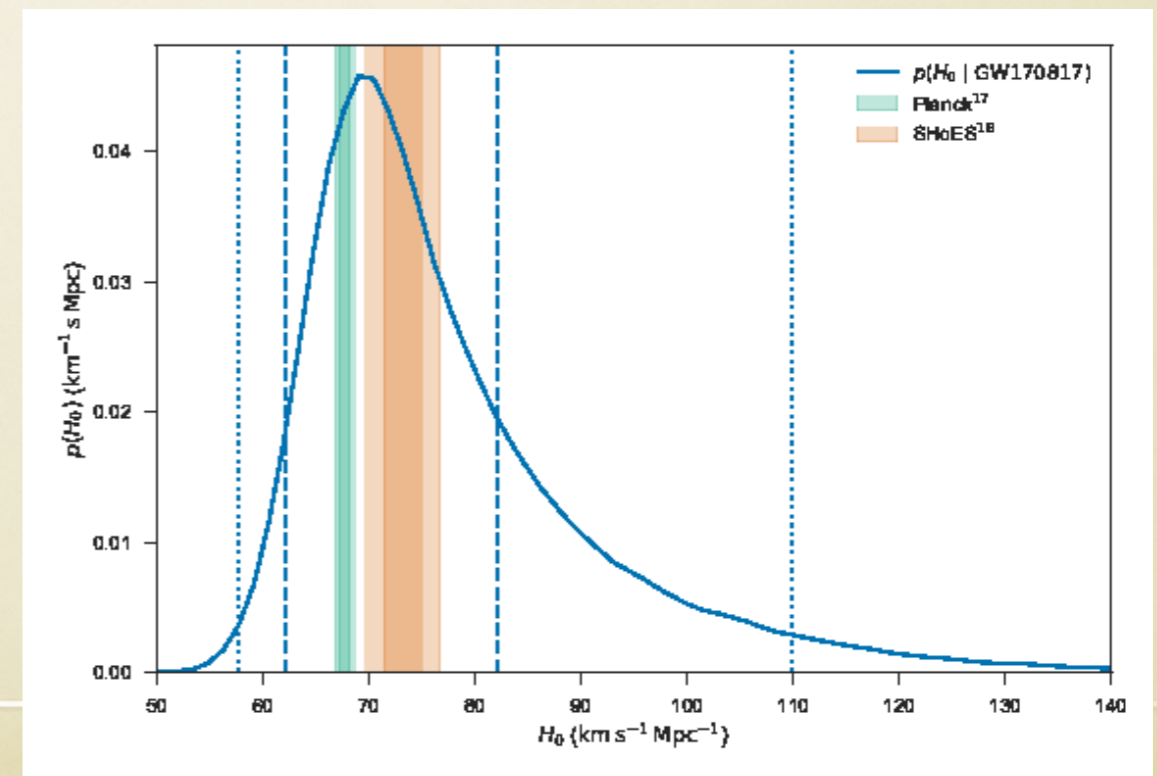
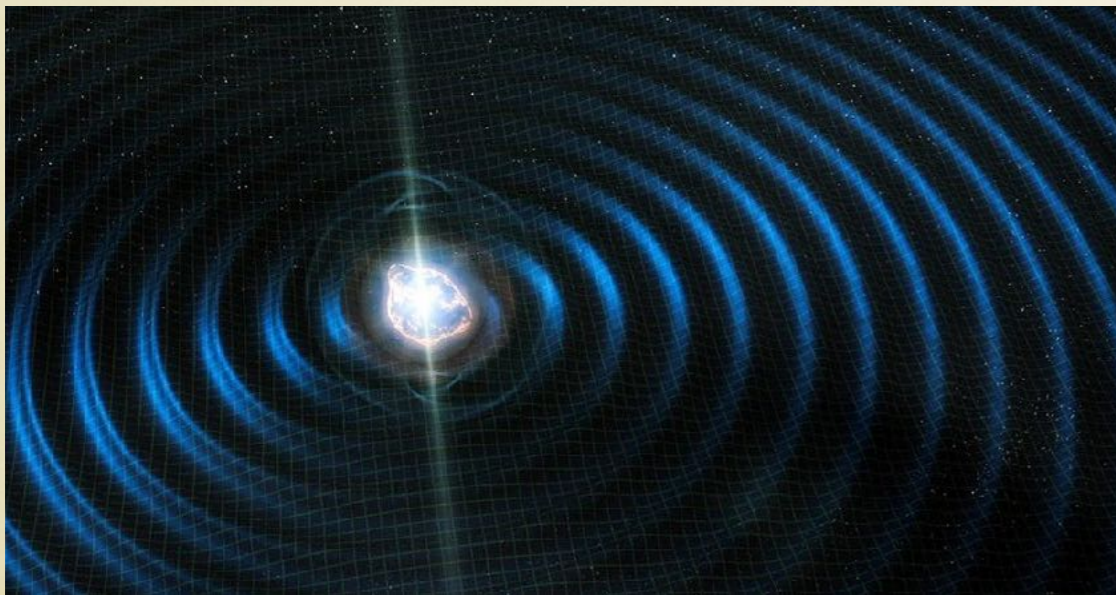


aLIGO (2016)



2017 Nobel Prize

- Gravitational wave as “the standard siren”



宇宙論に残されている大問題

- ・ ダークマターの正体
- ・ 宇宙の加速膨張の原因（ダークエネルギー）
- ・ インフレーションの有無、具体的機構
- ・ 密度ゆらぎの起源（量子ゆらぎと古典化）
- ・ 宇宙創世、量子重力（量子論と宇宙全体の関係）
- ・ 余剰次元の有無、時空間とは結局なにものか
- ・ 宇宙はひとつか？ 複数あるならそれは検証可能か

理論的現状

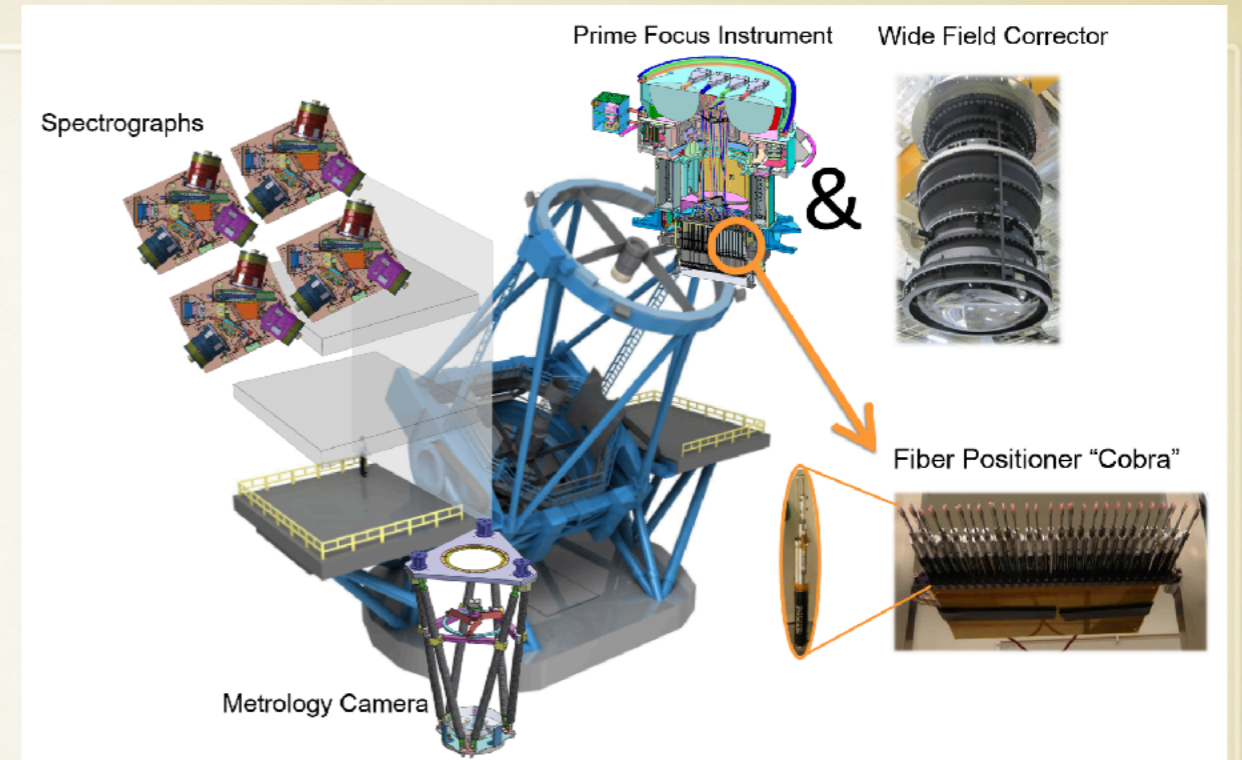
- ・ Λ CDMモデル以上の確実な知見は得られていないのが現状
- ・ 平成時代になってから Λ CDMモデルを超える理論モデルが多数提案されてきたが、いまのところはまだ将来の検証待ち
 - ・ ダークマターのさまざまなモデル
 - ・ ダークエネルギーのさまざまなモデル
 - ・ インフレーション理論のさまざまなバージョン
 - ・ サイクリック宇宙モデル
 - ・ ブレーン宇宙論
 - ・ 非ガウス初期ゆらぎ
 - ・ 修正重力理論
 - ・ 原始ブラックホール
 - ・ マルチバース理論
 - ・ ……

宇宙論の今後

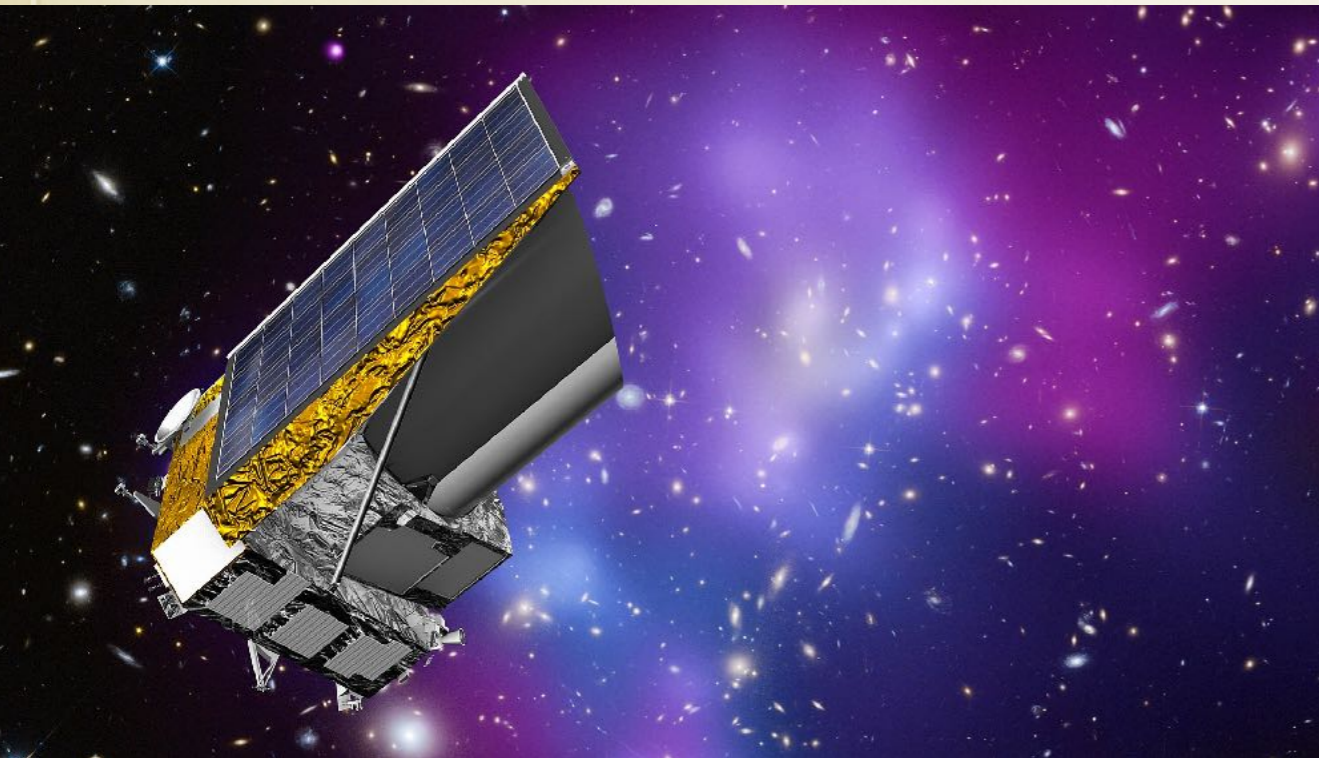
- ・ 現在の宇宙論の理論研究は、素粒子論の現状に似ている、と言えないこともない
 - ・ Λ CDMモデル \Leftrightarrow 素粒子標準モデル
 - ・ どちらも、基本的理論とは考えられないが、観測（実験）を定量的に説明するには十分
 - ・ それらを超える理論を構築するための観測的（実験的）手がかりを探ることが必要
 - ・ より精密な観測の必要性



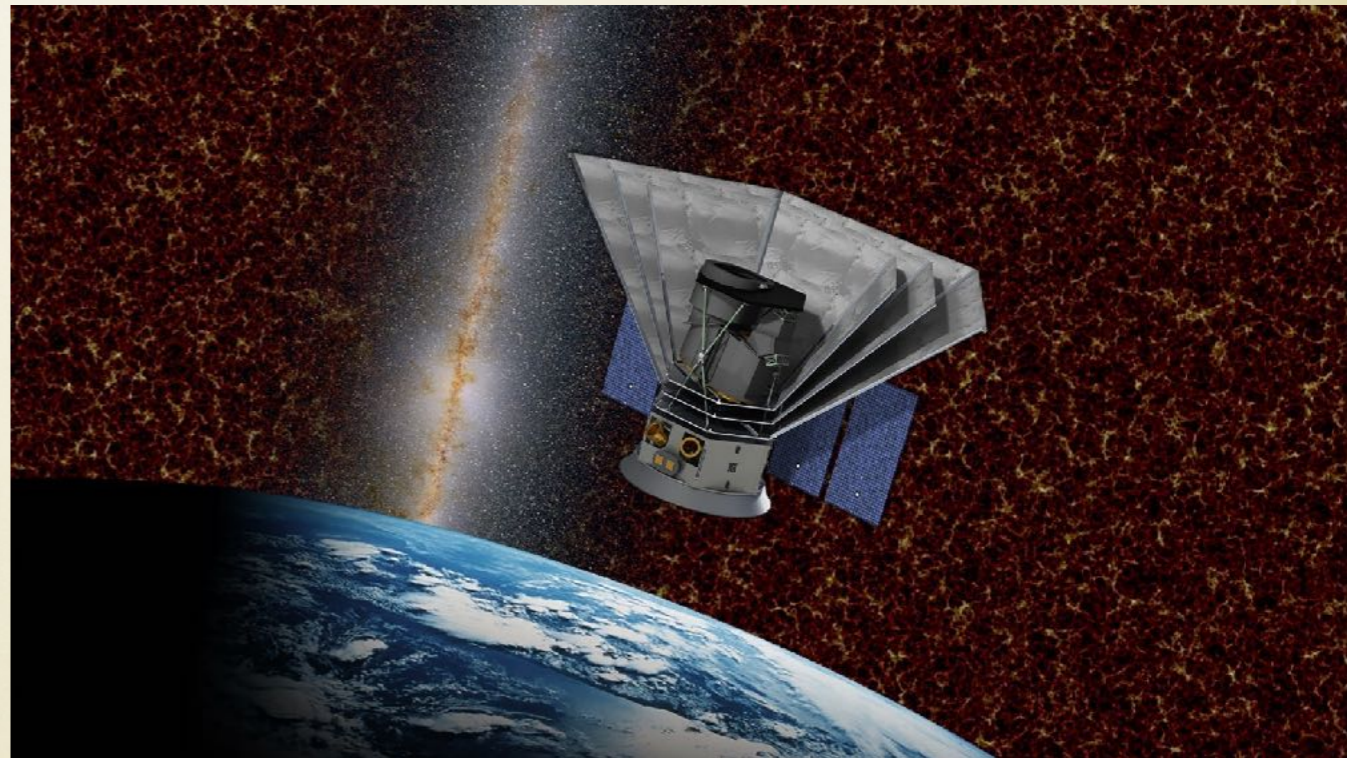
LSST (2020~)



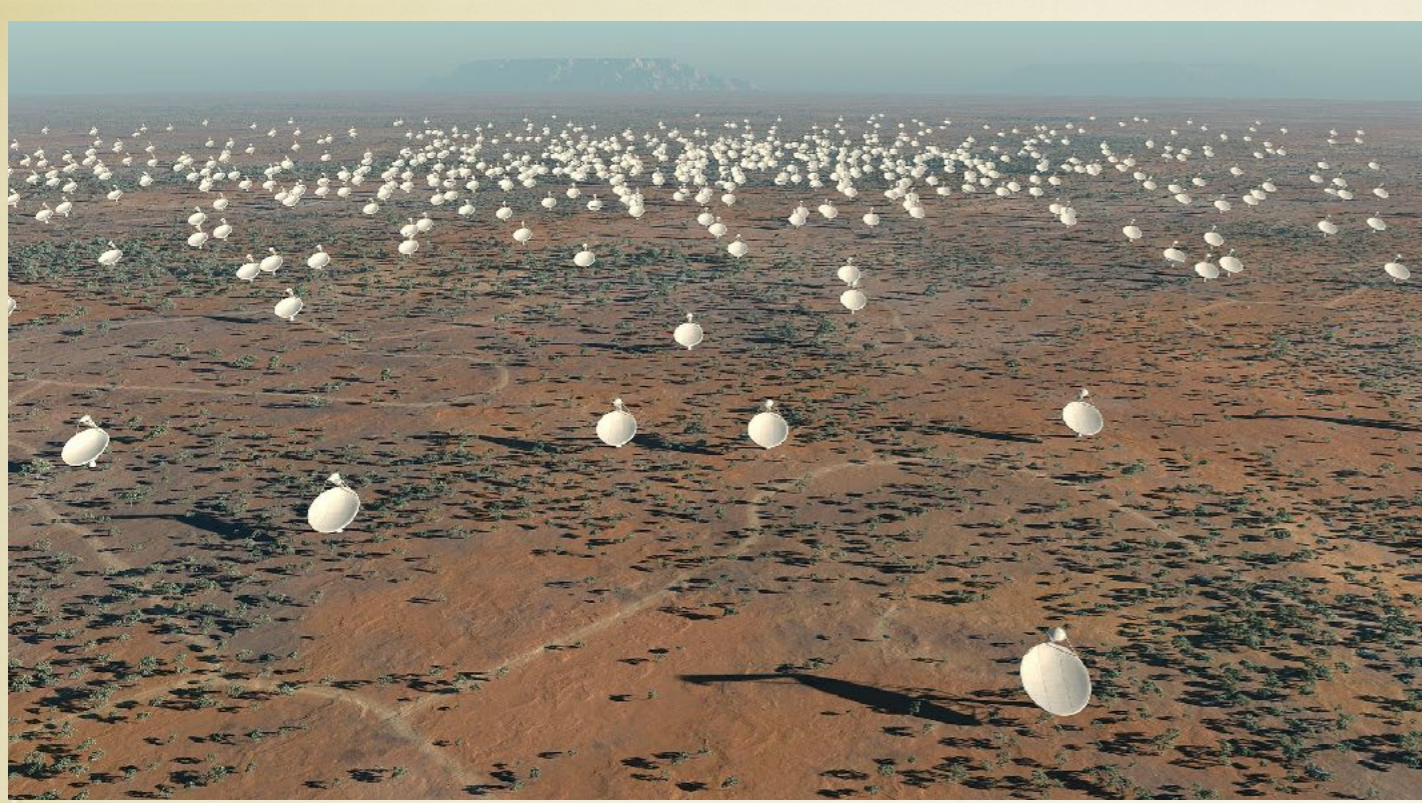
HSC/PFS (2022~)



Euclid (2022~)



SPHEREx (2023~)



SKA (2024?~)



LiteBIRD (2025?~)



WFIRST (2026?~)