

今日からはお子様セッションです！

# ビッグバン宇宙論

名古屋大学/IPMU

杉山直

# 宇宙の時系列

- 宇宙の始まり
- インフレーション → 田中さん
- ビッグバン
- First star → 梅村さん
- 構造形成 → 吉田さん

何をしゃべればよいのか？

元素合成 & CMB Only? → 佐藤さんがすでに！

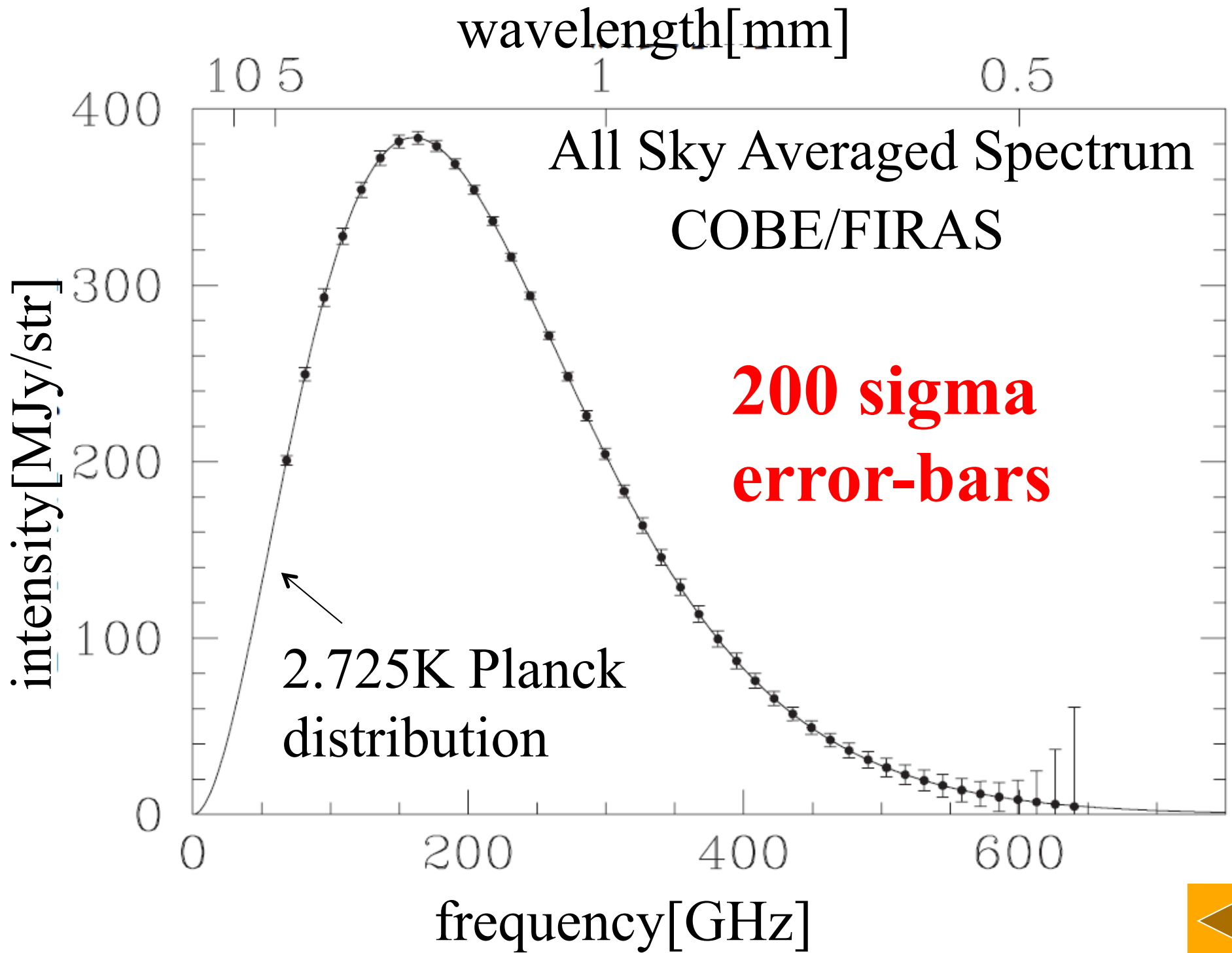
トップバッターなので、全体像を好きにしゃべる！

# 目次

- ビッグバンは本当にあったか
- ビッグバン宇宙論の成功
- ビッグバン宇宙論はどこまで到達したか
- 未解決の問題
- 現在、研究されている課題
- 今後の世界と日本の動き
  - Decadal Survey
  - 学会会議

# ビッグバンは本当にあったか

- プランク分布をした宇宙マイクロ波背景放射の存在
  - 2.725K
  - ほぼ完璧なプランク分布: ずれは $10^{-5}$ レベル以下
  - どの方向も同じ温度
  - プランク分布なので、かつて宇宙が熱平衡であった証拠
  - 断熱膨張なので、現在以前では、今よりも高温、 $T \propto (1+z)$



# CMB Spectral Distortion

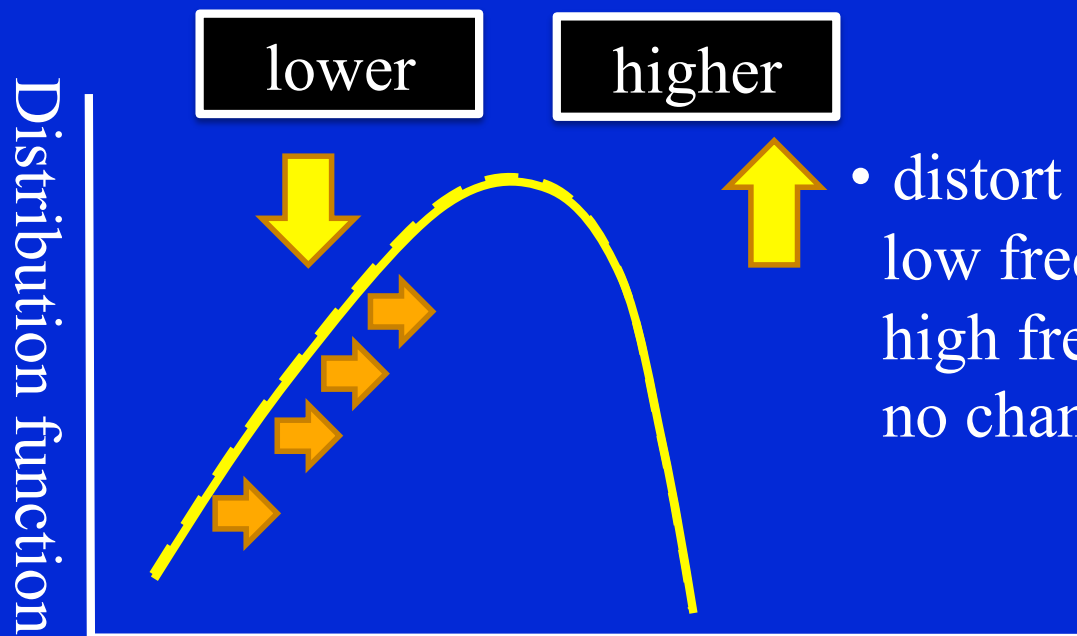
**Extremely Good Black Body Shape in average**

Observation by COBE/FIRAS

y-distortion

$$y < 1.5 \times 10^{-5}$$

$$y \equiv \int d \ln_e \sigma_T \frac{kT_e}{m_e c^2}$$



- distort Black Body  
low freq: lower temp  
high freq: higher temp  
no change: 220GHz

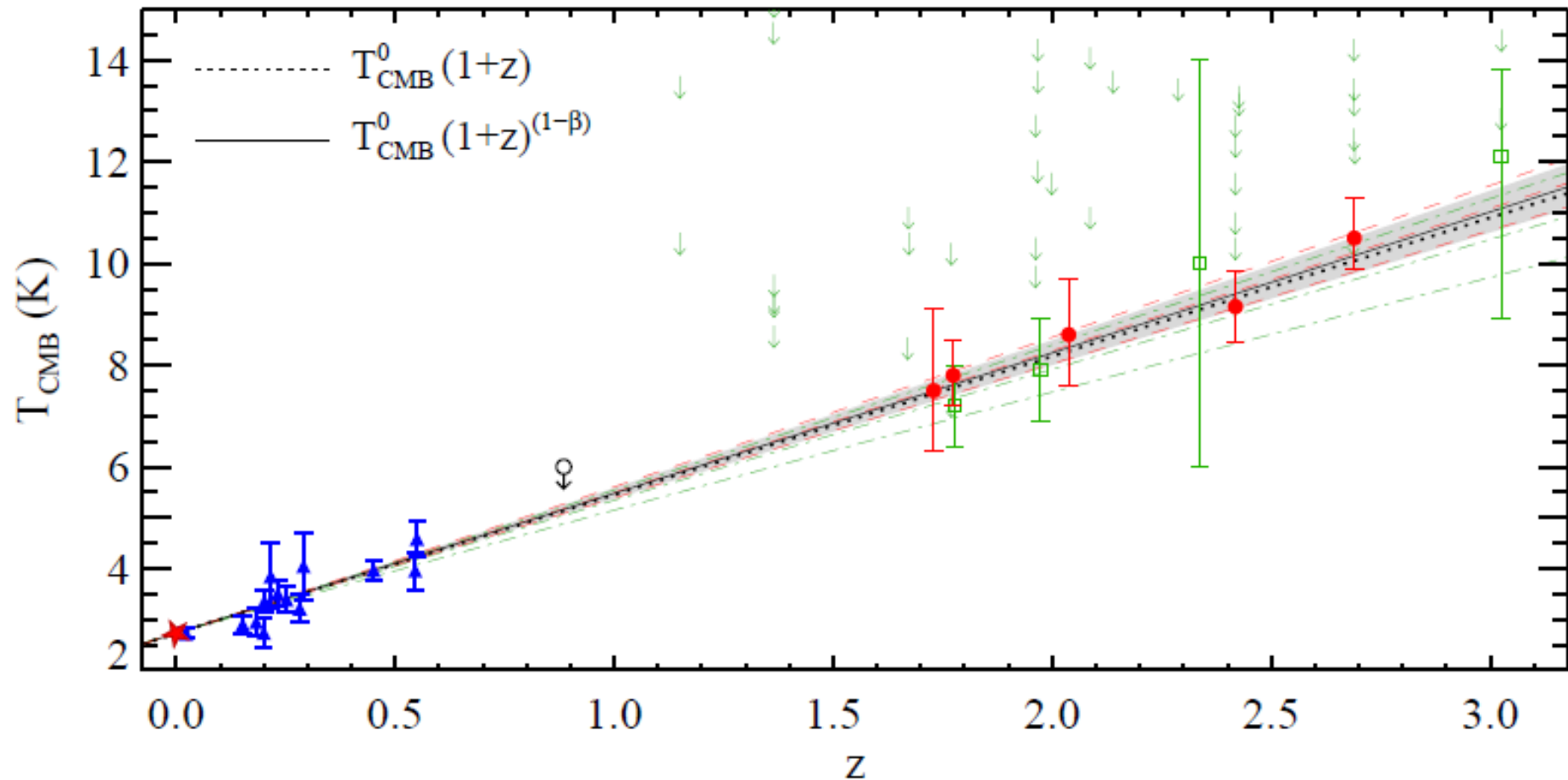
$\mu$ -distortion  $|\mu| < 9 \times 10^{-5}$

$$f_\nu \equiv \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT} + \mu\right) - 1}$$

# 断熱膨張: Time Evolution of CMB Temperature

Noterdaeme et al., arXiv:1012.3164

P. Noterdaeme et al.: The evolution of the Cosmic Microwave Background Temperature



$$T_{\text{CMB}}(z) = (2.725 \pm 0.002) \times (1 + z)^{1-\beta} \text{ K}; \beta = -0.007 \pm 0.027$$

# ビッグバン宇宙論の成功

- 宇宙マイクロ波背景放射の存在
- 元素合成
  - ヘリウム、重水素、リチウムなどの軽元素の存在量の理論予測と観測がよい一致
  - バリオンと光子の数比が求められる＝バリオンの存在量が決定できる  $\eta \equiv n_B/n_\gamma \propto \Omega_B h^2$

Progress of Theoretical Physics, Vol. 5, No. 2, March~April, 1950.

**Proton-Neutron Concentration Ratio in the Expanding Universe at the Stages preceding the Formation of the Elements.**

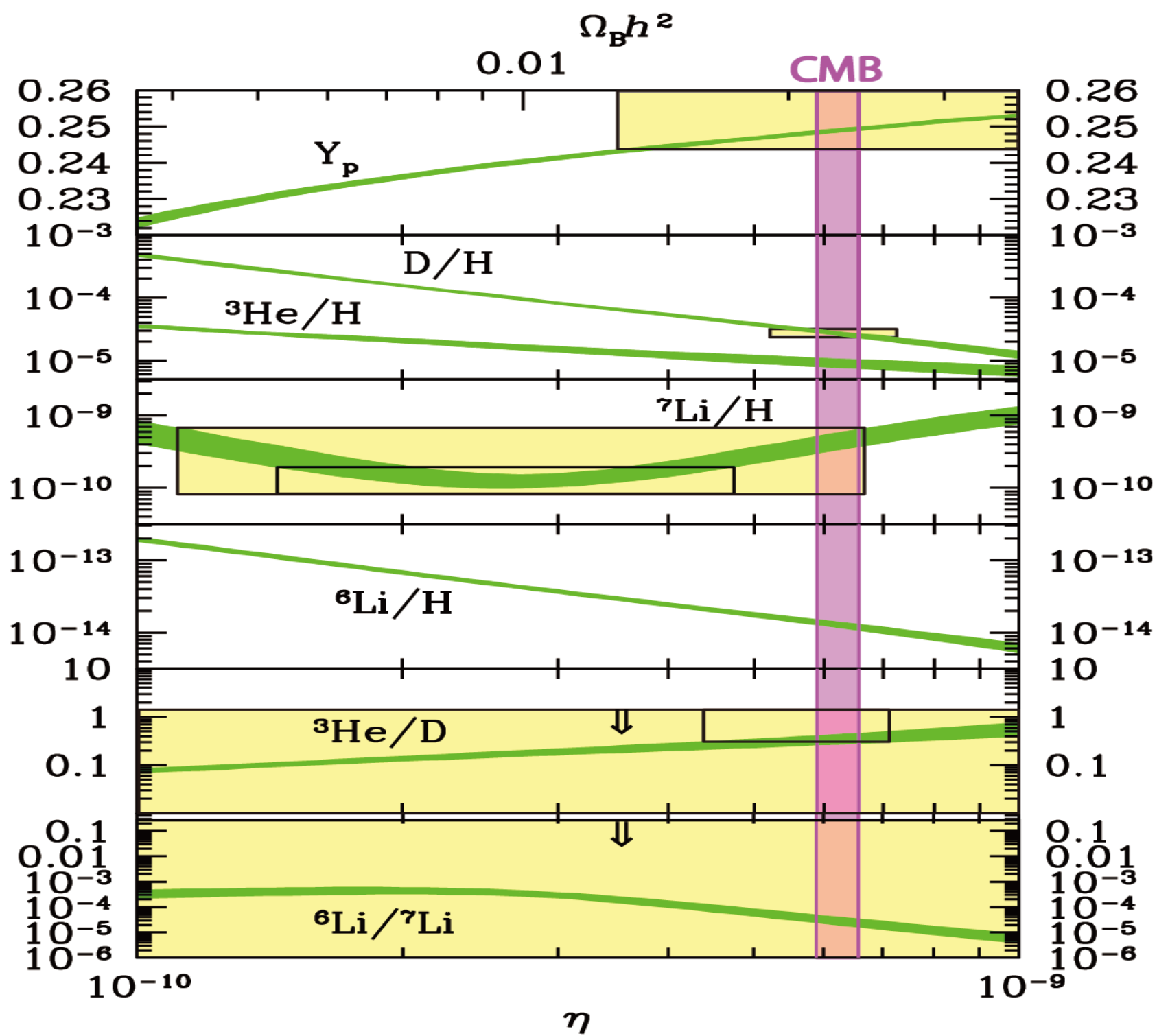
Chushiro HAYASHI.

*Department of Physics, Naniwa University.*

ADS

Citation 59





# ビッグバンのほころび？

- バリオンの量は、現在の宇宙の物質の量を説明するには足りない
  - ➡ 非バリオン暗黒物質
- 3つの古典的問題
  - モノポール(モジュライ)問題
  - 地平線問題
  - 平坦性問題
  - ➡ インフレーション

# インフレーションを加える

- ビッグバンの3大問題の解決
- 揺らぎの生成
  - 構造の種
  - 宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ

ほぼHarrison-Zeldovich Spectrum(Scale Free)でよい

宇宙論の標準モデル  
ビッグバン+インフレーション

# 標準宇宙論に付け加えるもの

## ■ Dark Matter

- 1930年代、Zwickyが銀河団のメンバー銀河の運動から「発見」
- 見えない物体が大量にあることは間違いない
- 軽元素合成, CMB温度揺らぎから、バリオンではありえない

## ■ Dark Energy

- 超新星を標準光源として1998年に「発見」
- 1990年代初めには、銀河のnumber countから日本のグループがすでに提案 (Fukugita, Yamashita, Takahara, Yoshii)

TEST FOR THE COSMOLOGICAL CONSTANT WITH THE NUMBER COUNT  
OF FAINT GALAXIES

M. FUKUGITA  
Research Institute for Fundamental Physics, Kyoto University

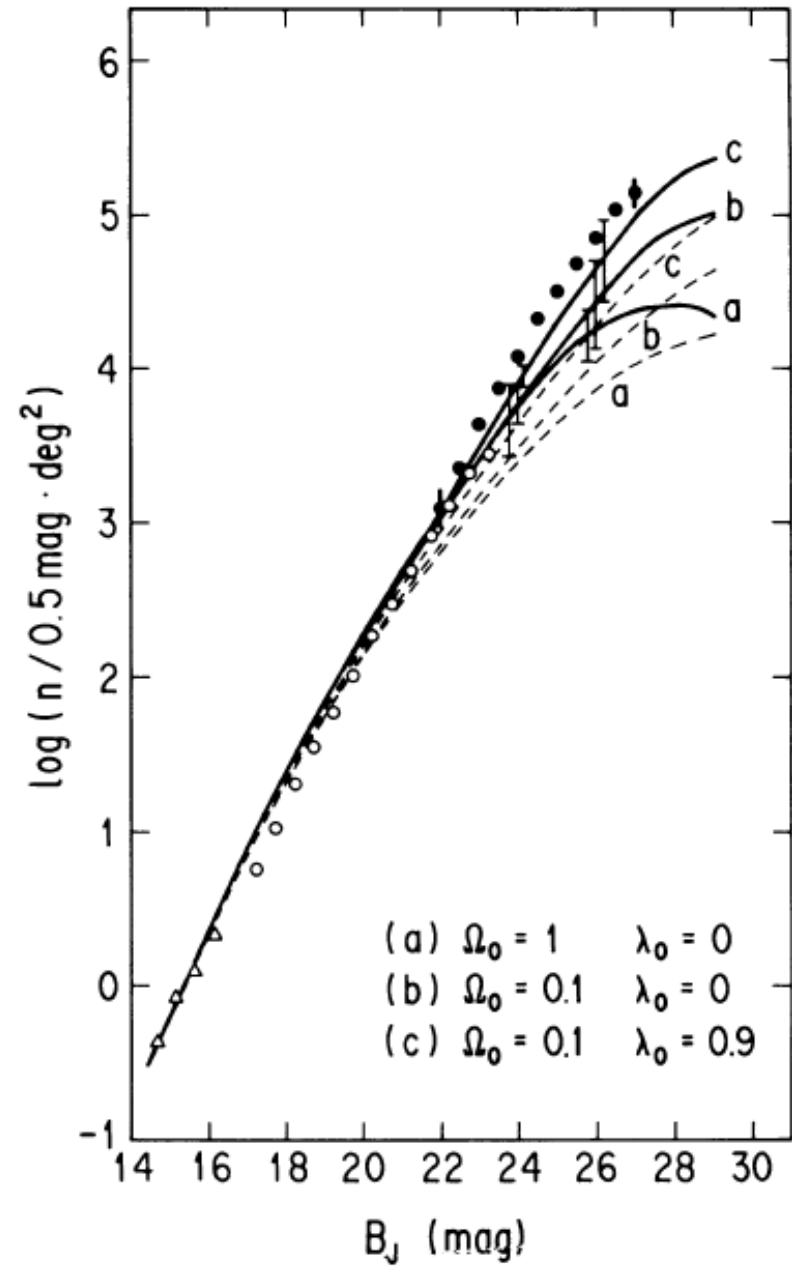
F. TAKAHARA  
Department of Physics, Tokyo Metropolitan University

K. YAMASHITA  
Department of Physics, Kyoto University

AND

Y. YOSHII  
National Astronomical Observatory, Tokyo  
Received 1990 March 2; accepted 1990 July 2

ABSTRACT



# 林先生のDark Energy (Cosmological Constant)の仕事！

Progress of Theoretical Physics, Vol. 30, No. 5, November 1963

## The Cosmical Constant and the Age of the Universe

Kenji TOMITA and Chushiro HAYASHI

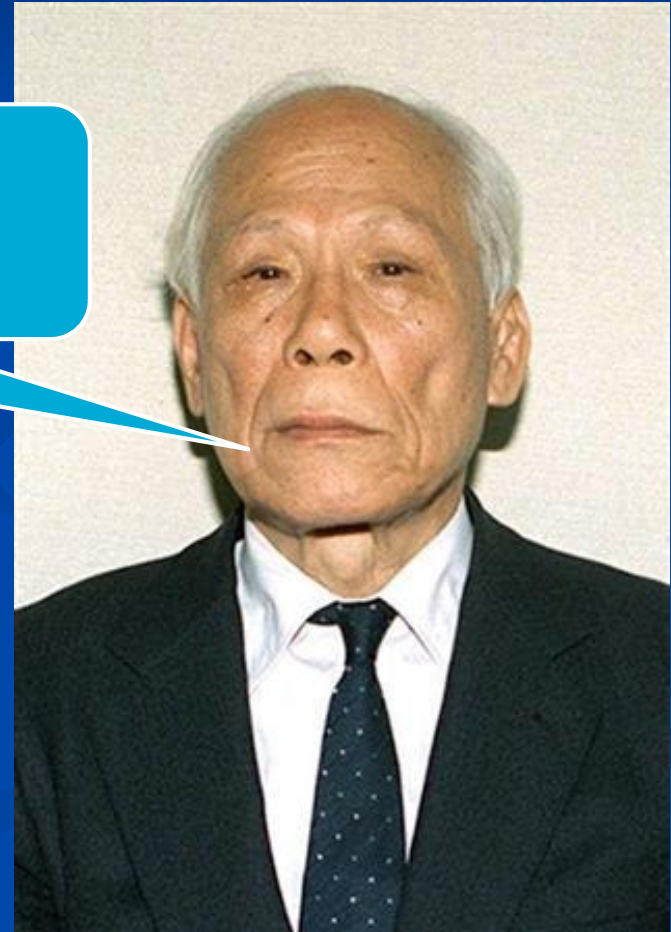
*Department of Nuclear Science, Kyoto University, Kyoto*

(Received July 26, 1963)

The present investigation deals with a question how much the age of an expanding universe can be lengthened by the introduction of the cosmical constant in the relativistic cosmology. The age and the redshift-magnitude relation of galaxies are calculated for various values of the deceleration parameter and the cosmical constant, which characterize the universe models. The comparison with the observational data on the redshift-magnitude relation indicates that, if the effect of the evolution of galaxies is neglected, the age is not beyond  $13 \times 10^9$  years and the cosmical constant can not be greater than  $6 \times 10^{-55} \text{ cm}^{-2}$ .

杉山が天体核の准教授時代(1996-2000)、  
土曜日になると林先生が現れて

杉山さん、宇宙項って今どうなっ  
ているの？

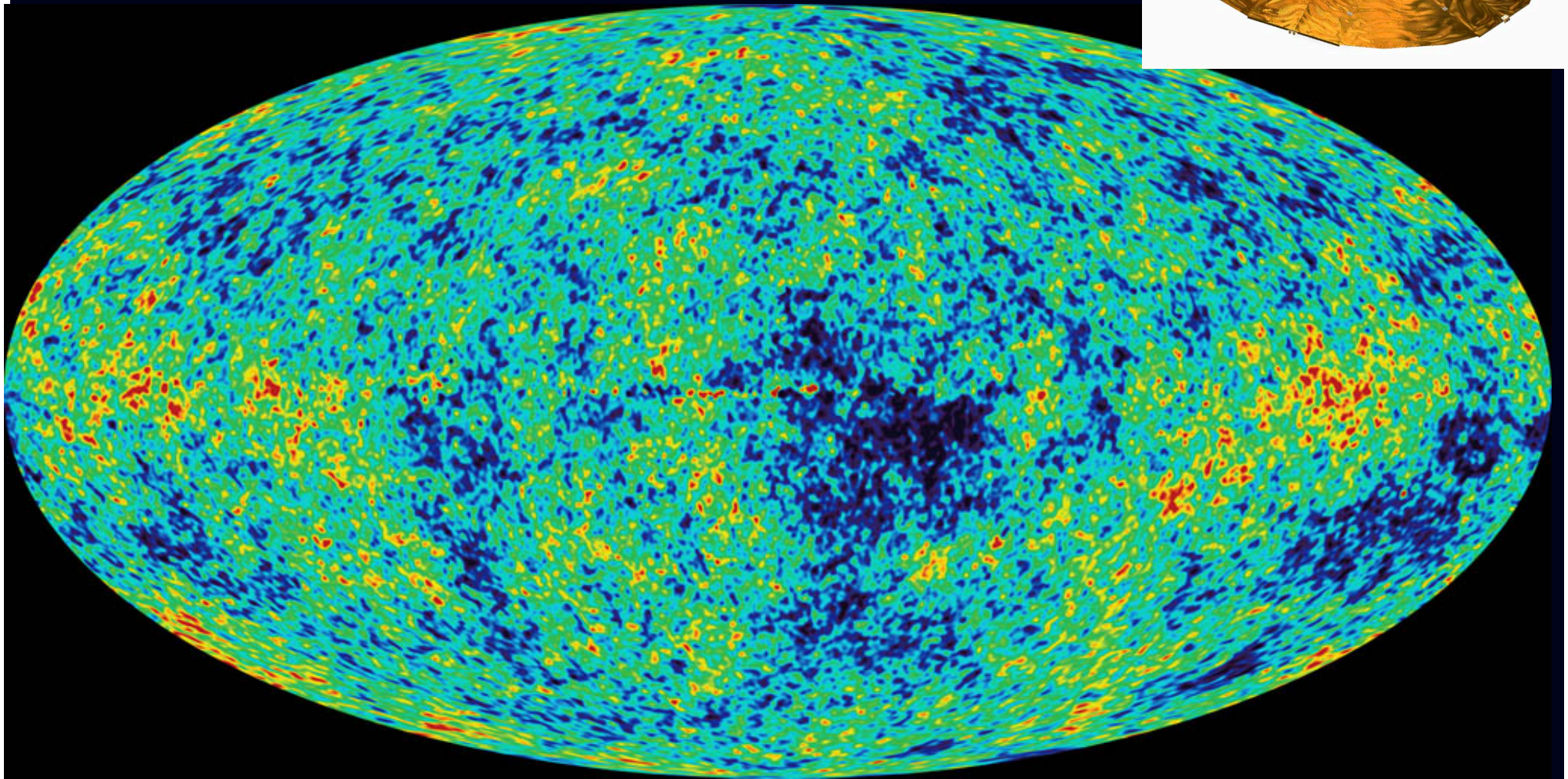
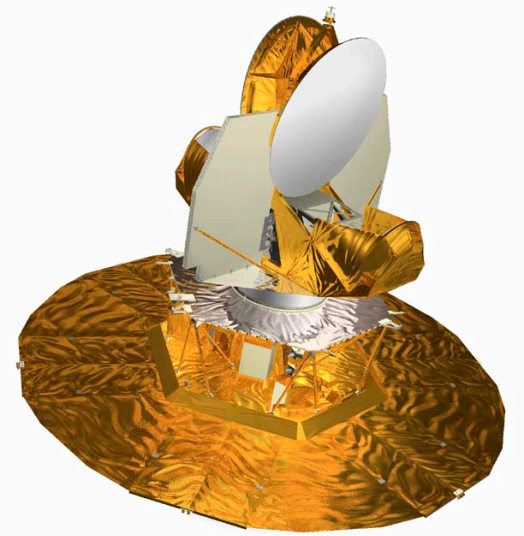


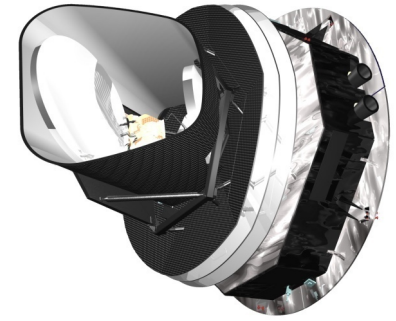
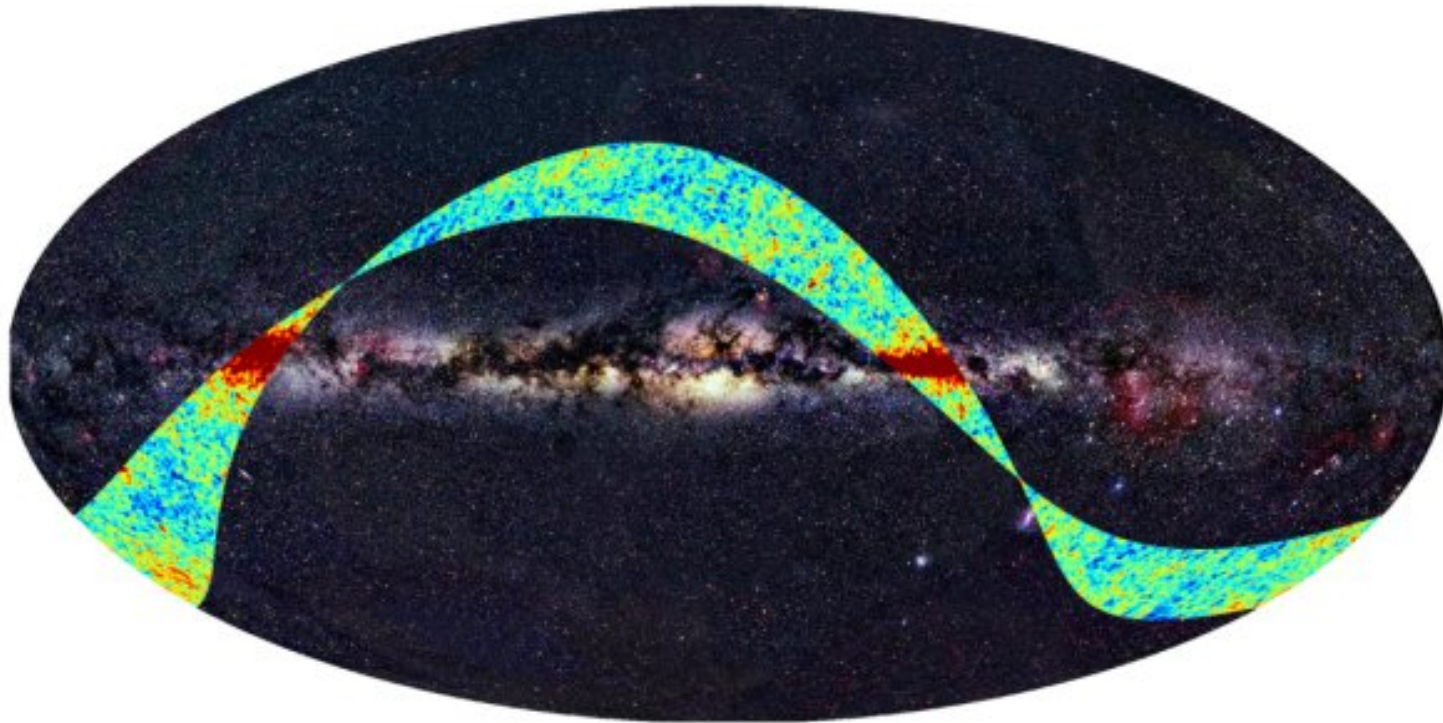
# Current Status of Cosmology

- Cosmological Parameters are well determined
  - Temperature Fluctuations of CMB
    - COBE/WMAP
    - Precise measurement of Matter, Baryon and Curvature  
(but they are degenerate, need additional probe)
  - Supernova Survey
    - Proof of dark energy
  - Gravitational lensing
    - Strong lensing: Proof of dark matter
    - Weak lensing: Tracer of large scale structure



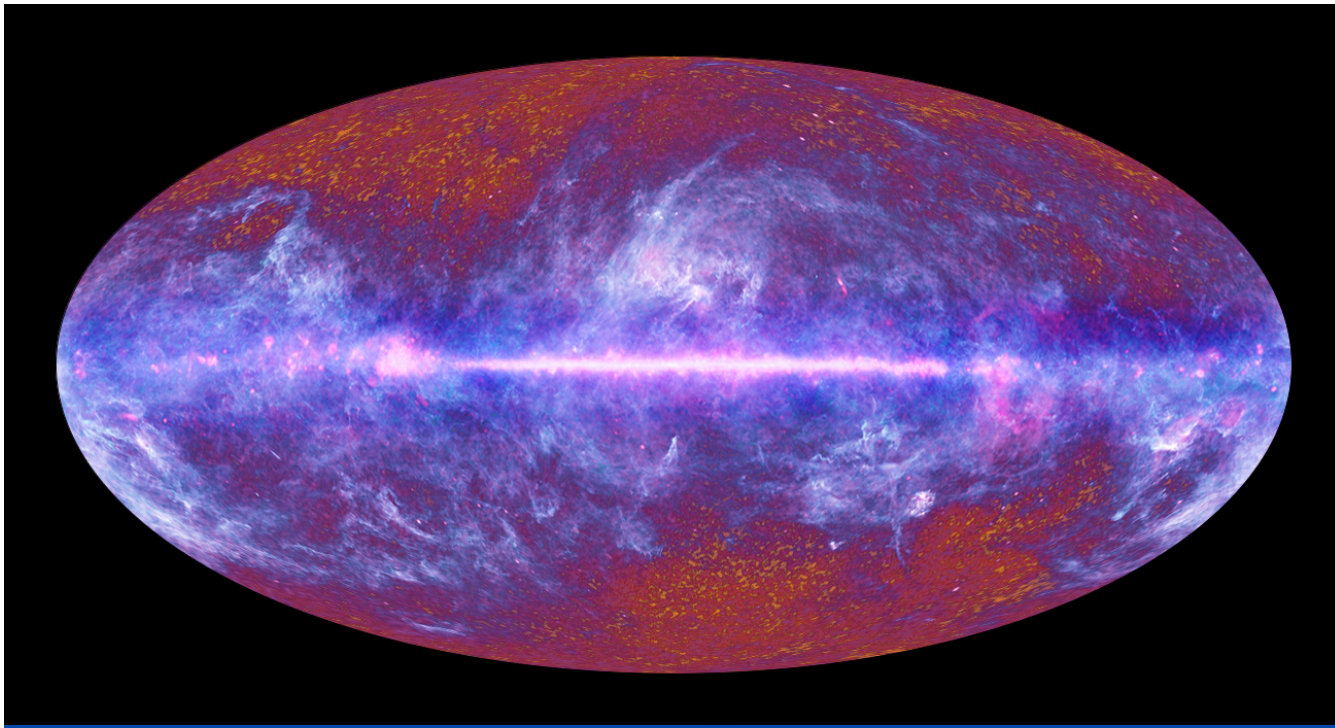
WMAP





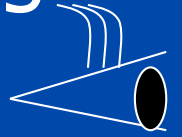
ALCATEL

ALCATEL SPACE INDUSTRIES



Planck is coming!

Angular diameter



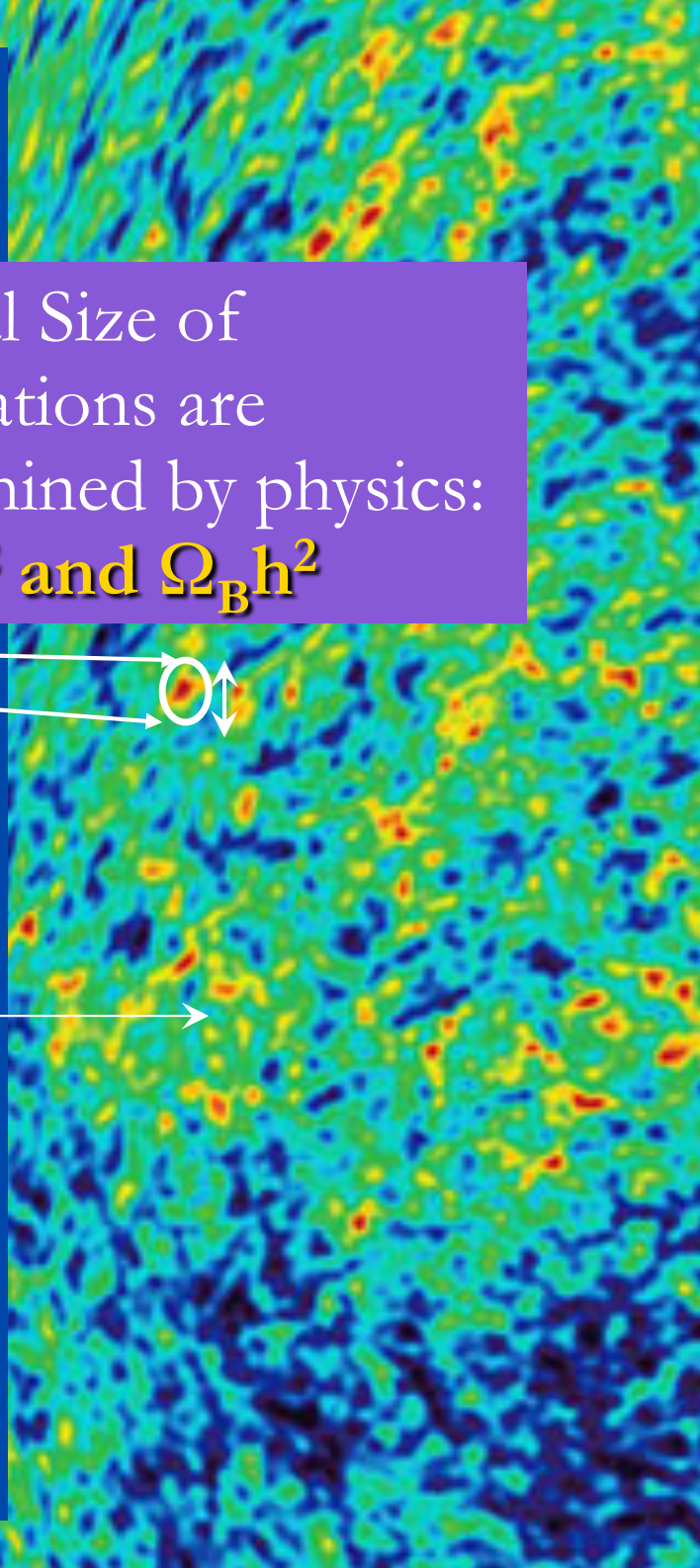
Light transfer

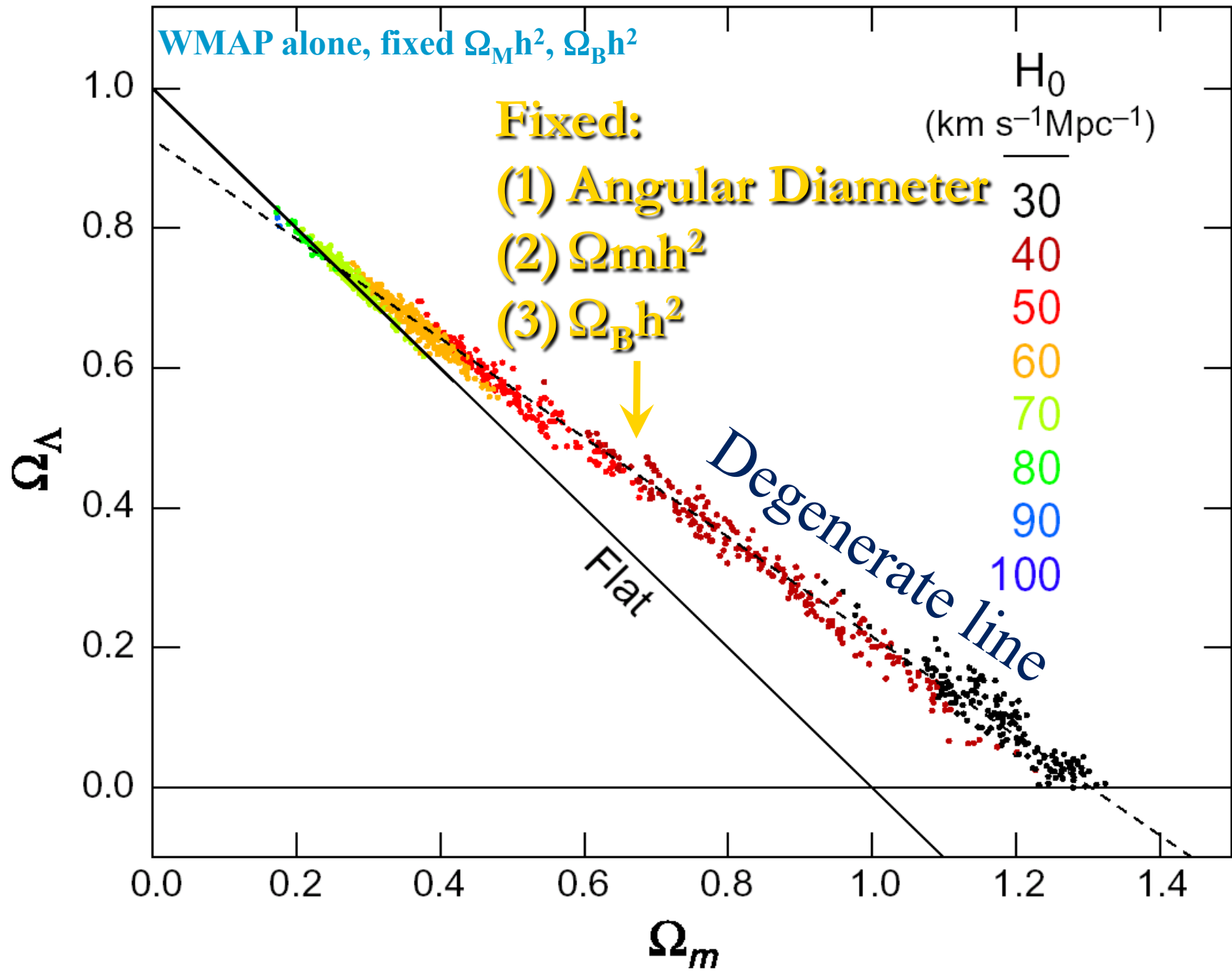
Observer

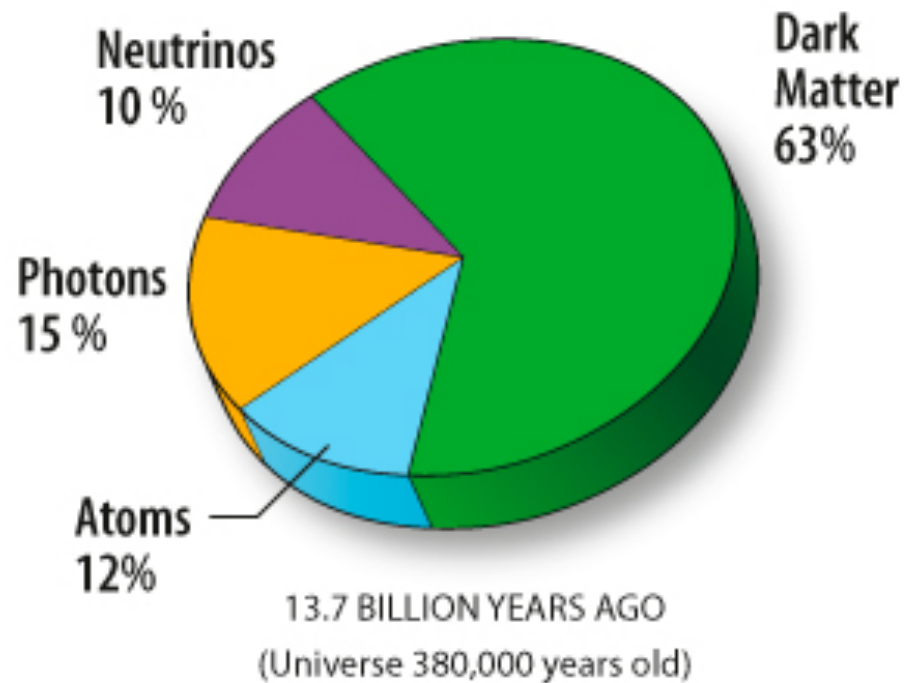
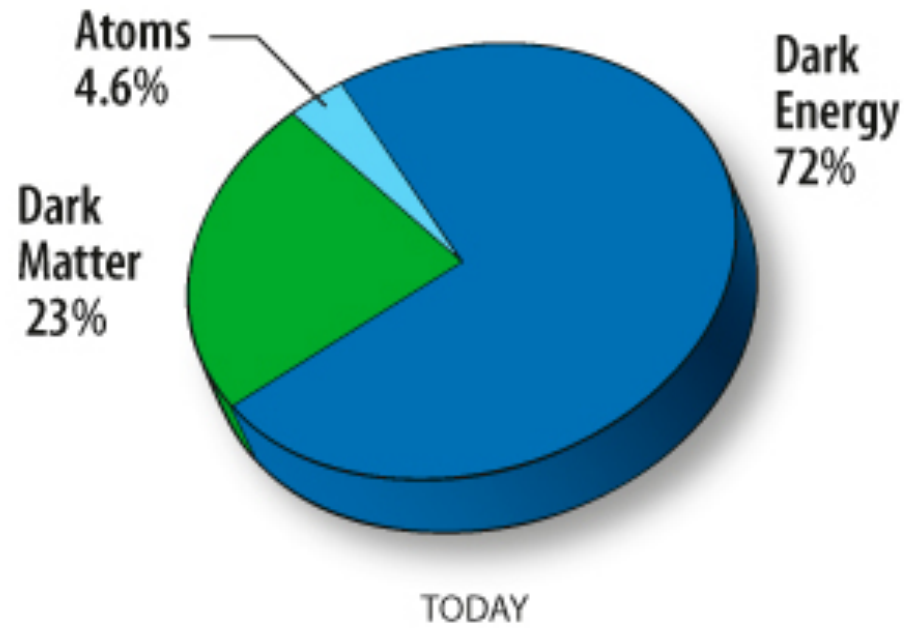


13.7 billion light year

Typical Size of fluctuations are determined by physics:  
 $\Omega_m h^2$  and  $\Omega_B h^2$

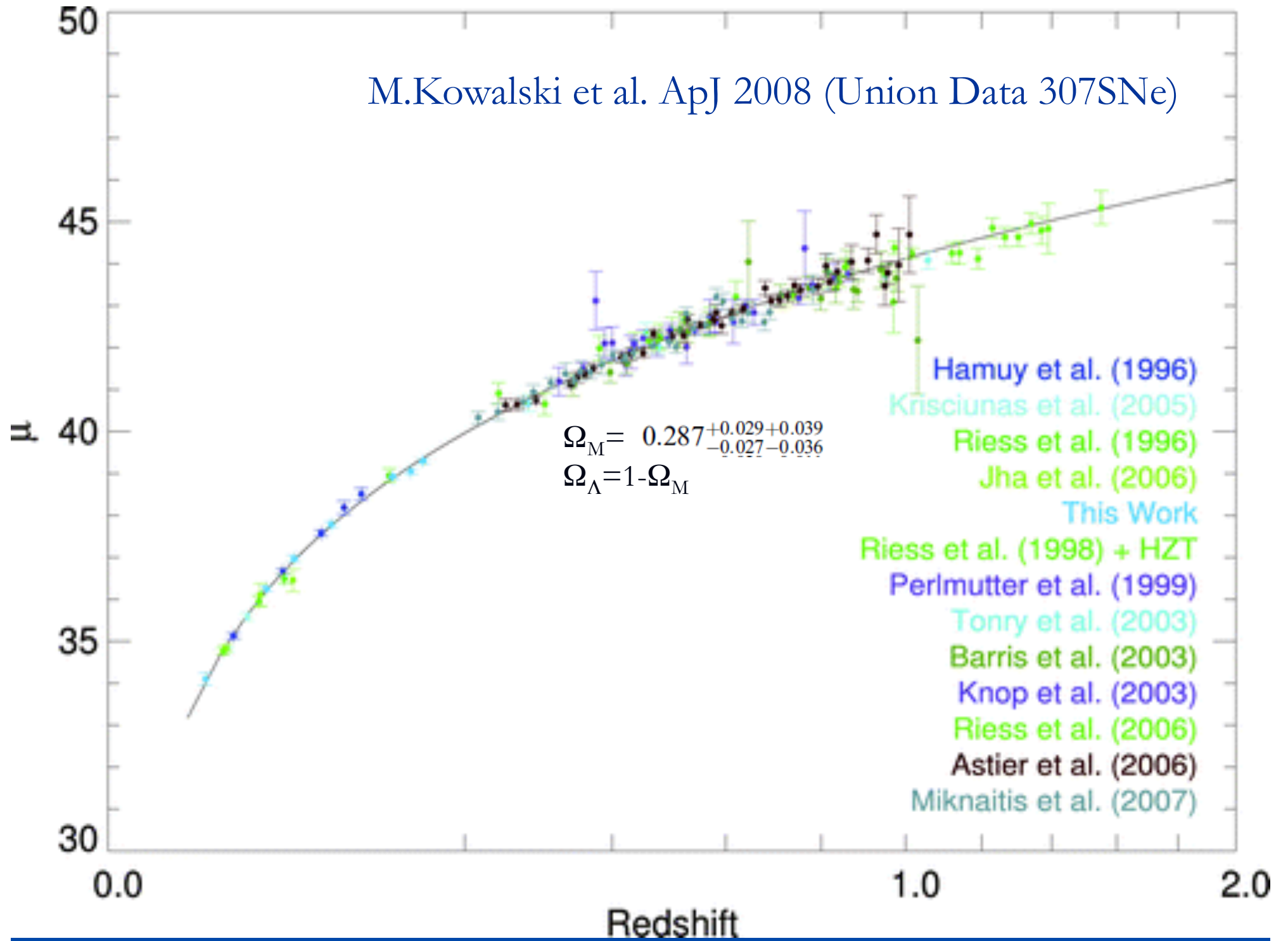


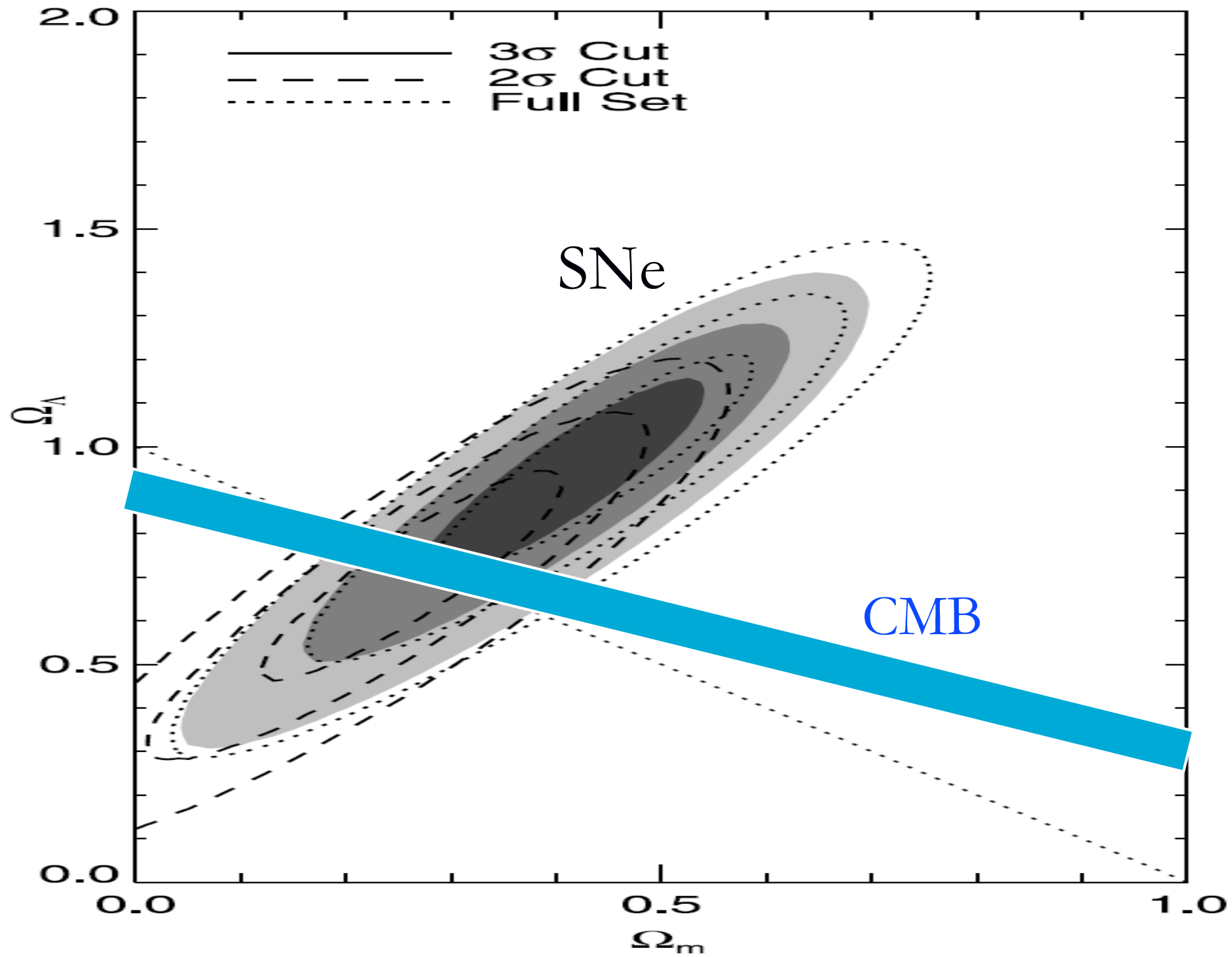




Either Assume: Flat space  
 $\Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_M$   
Or  
Combine with SNe etc.

M.Kowalski et al. ApJ 2008 (Union Data 307SNe)





# Current Status of Cosmology

- Cosmological Parameters are well determined
  - Temperature Fluctuations of CMB
    - COBE/WMAP
    - Precise measurement of Matter, Baryon and Curvature  
(but they are degenerate, need additional probe)
  - Supernova Survey
    - Proof of dark energy
  - Gravitational lensing
    - Strong lensing: Proof of dark matter
    - Weak lensing: Tracer of large scale structure



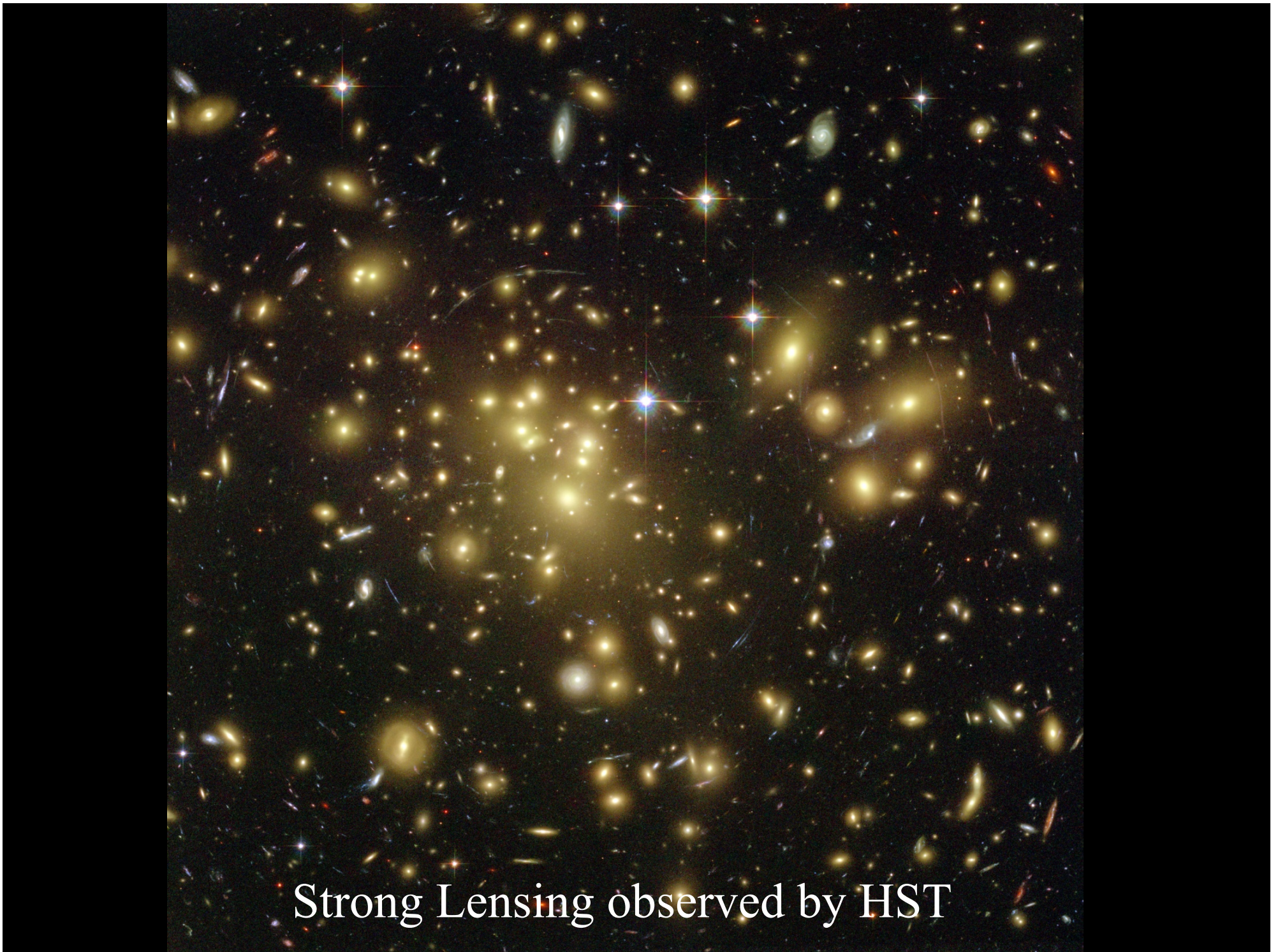


## Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

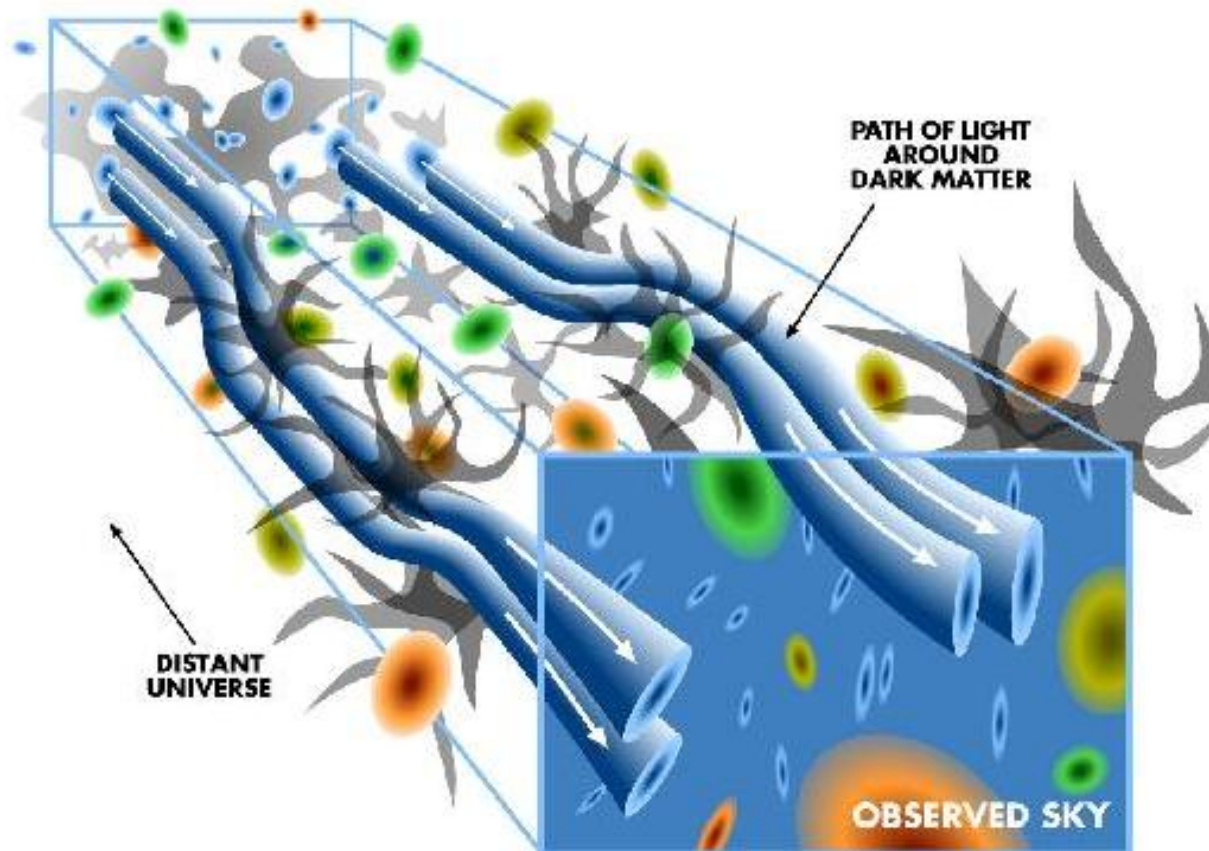
Strong Lensing



Strong Lensing observed by HST

# Weak gravitational lensing

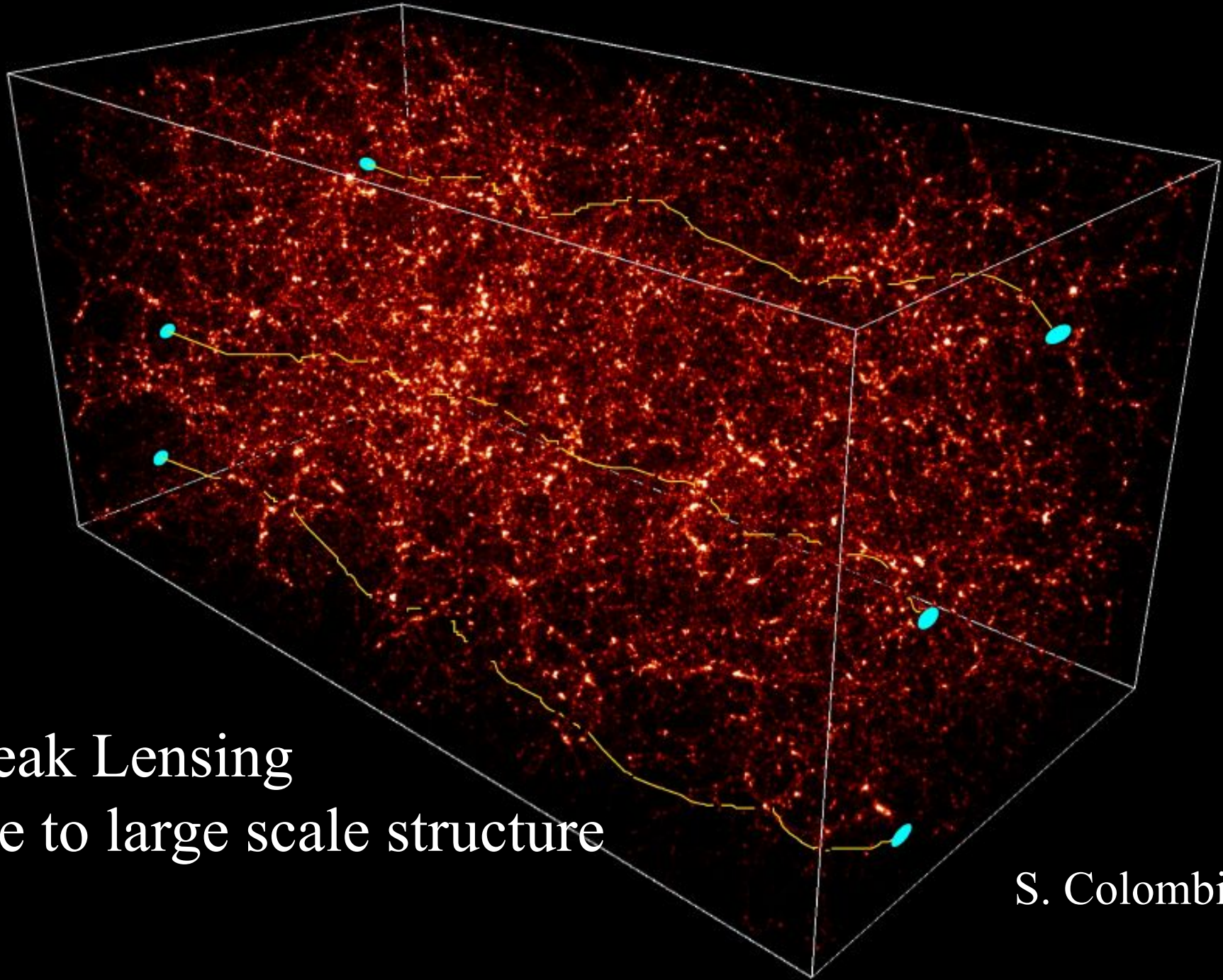
Measure the cosmic shear field



Witteman et al.

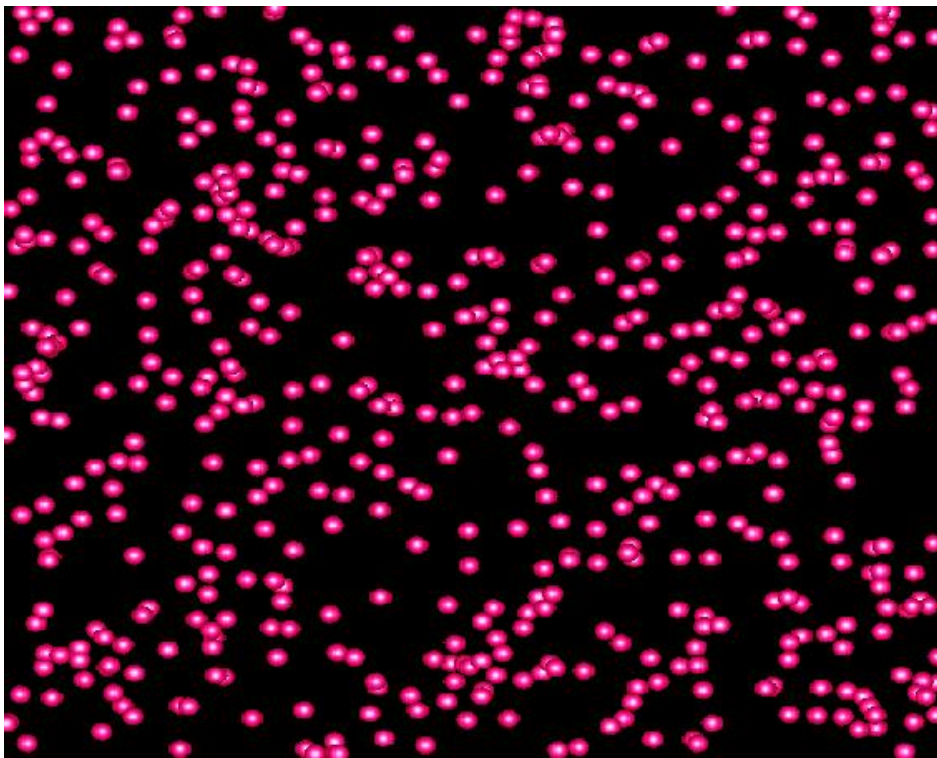
Nature 405, 143 (00)

$$\langle \gamma^2 \rangle \sim \Omega_M^{1.2} P(k)$$
$$\sim \Omega_M^{1.2} \sigma_8^2$$



Weak Lensing  
due to large scale structure

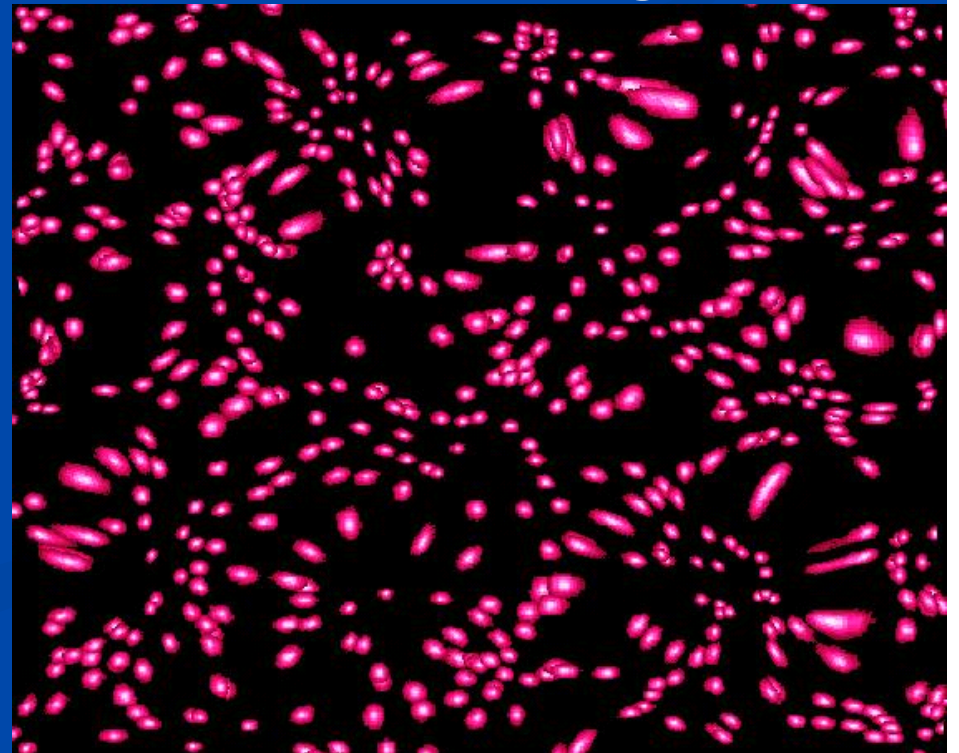
S. Colombi

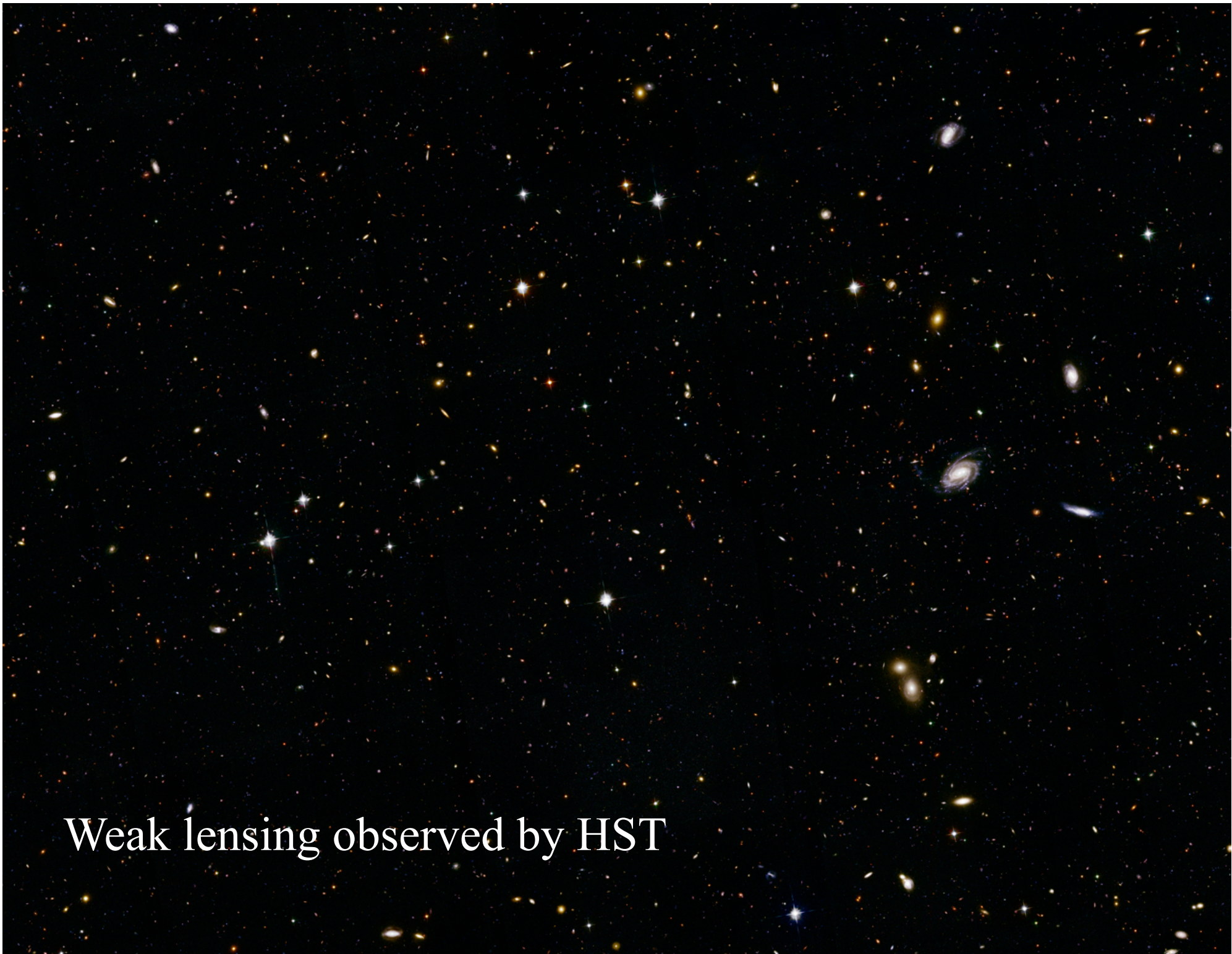


Original

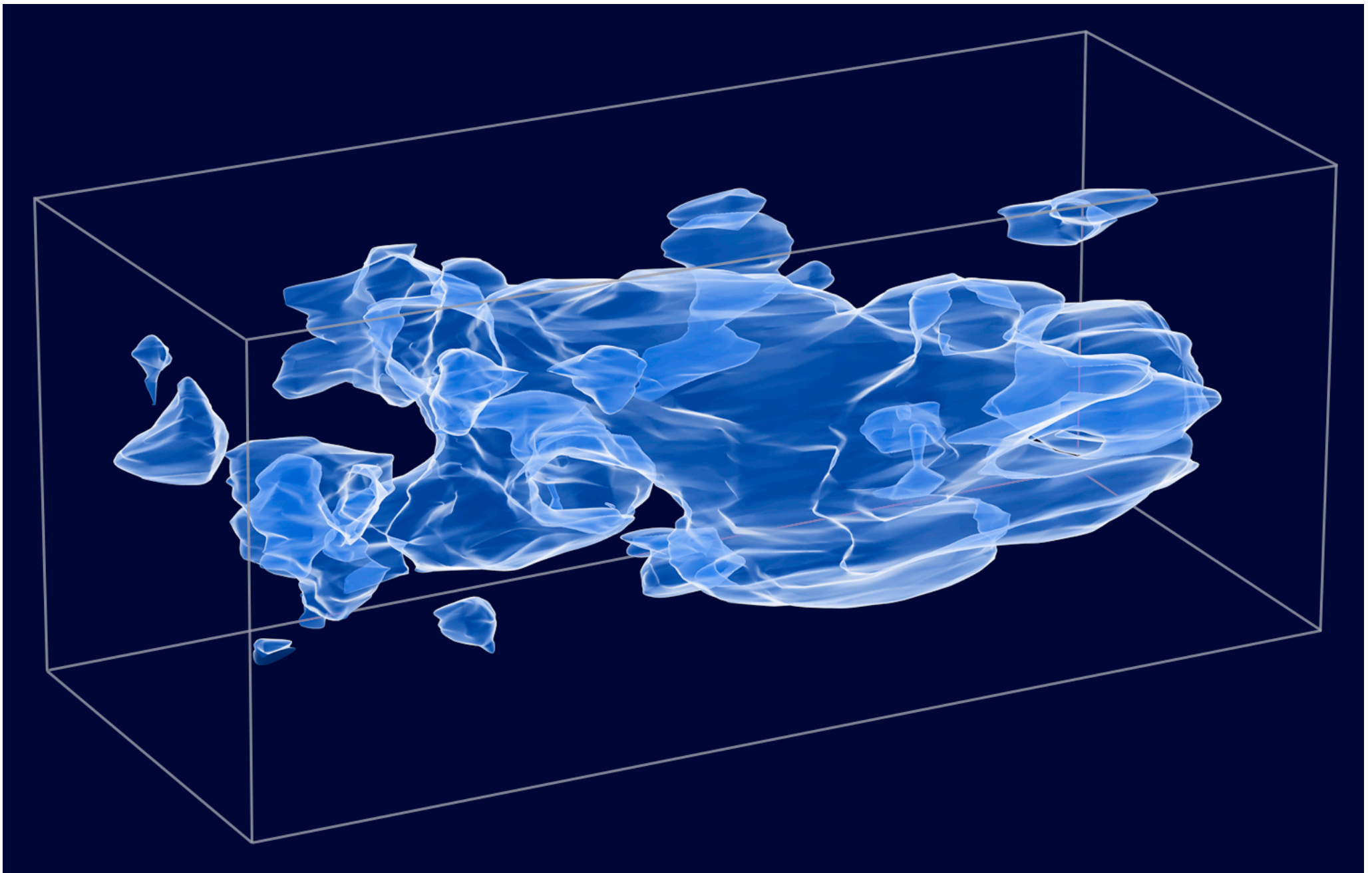


Weak lensing





Weak lensing observed by HST



3 dimensional shape of dark matter distribution  
obtained by weak lensing (COSMOS: HST, Subaru etc)

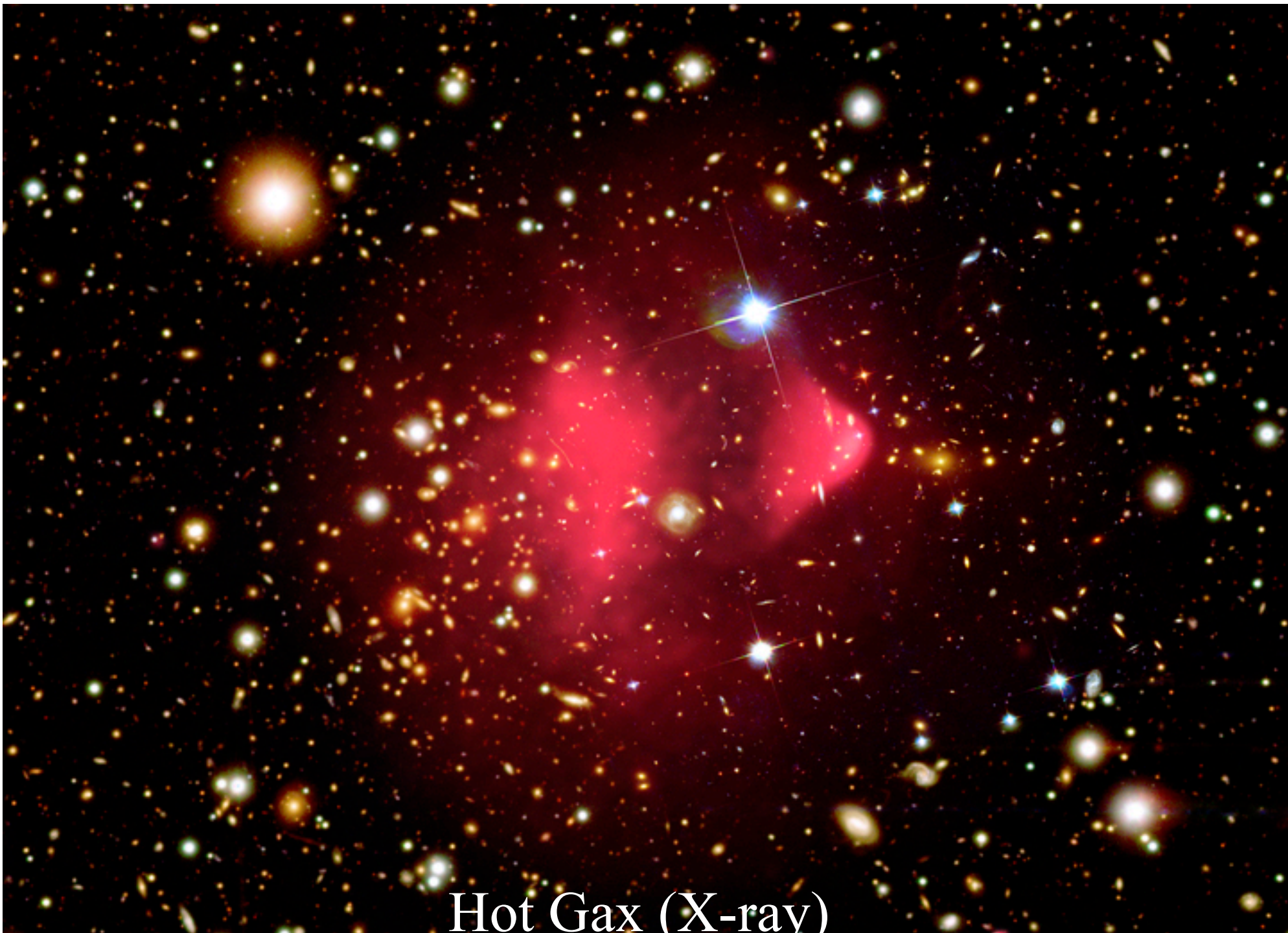
# Bullet Cluster

- Star light from HST
- Hot gas from X-ray (Chandra)
- Dark matter distribution by lensing (HST)





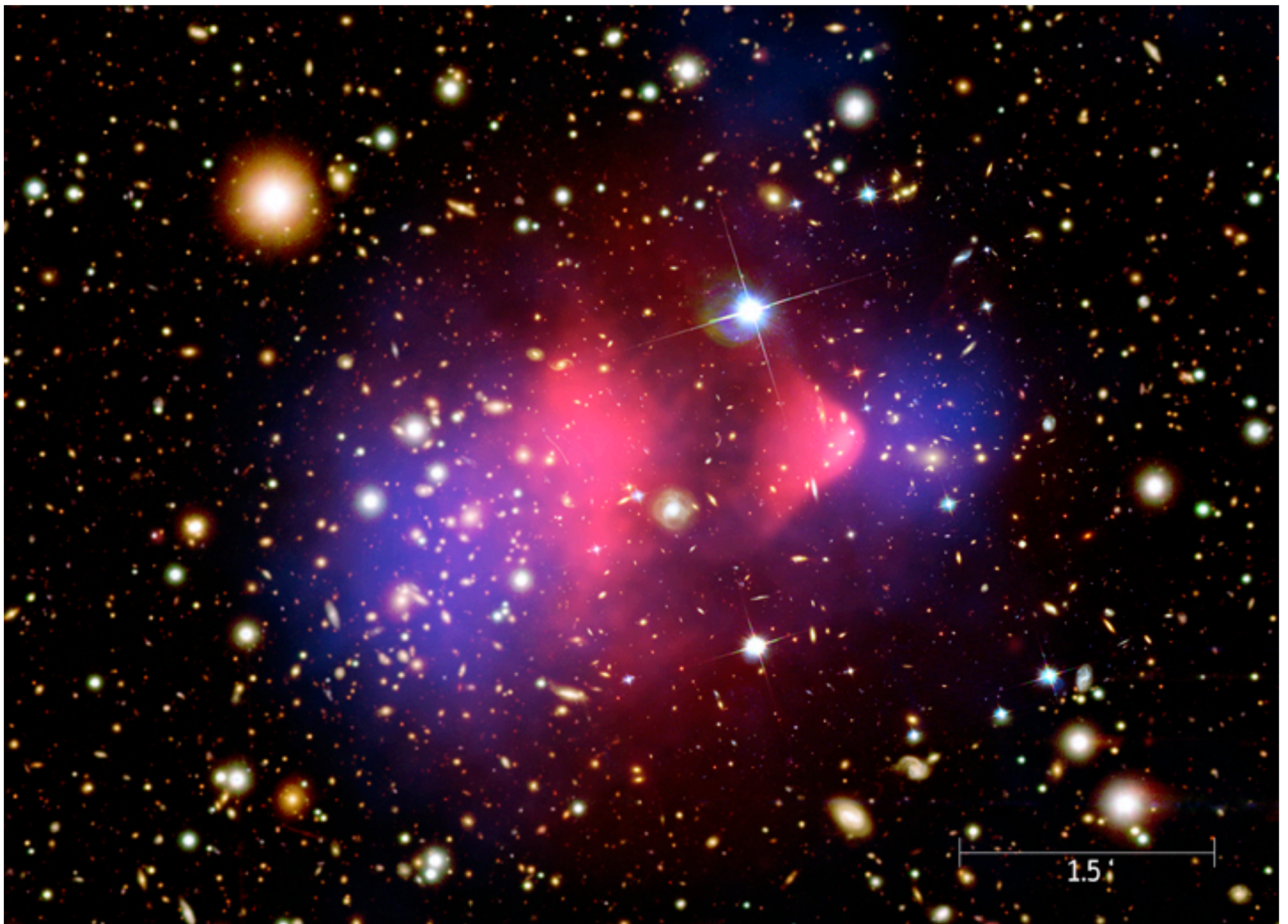
Star Light

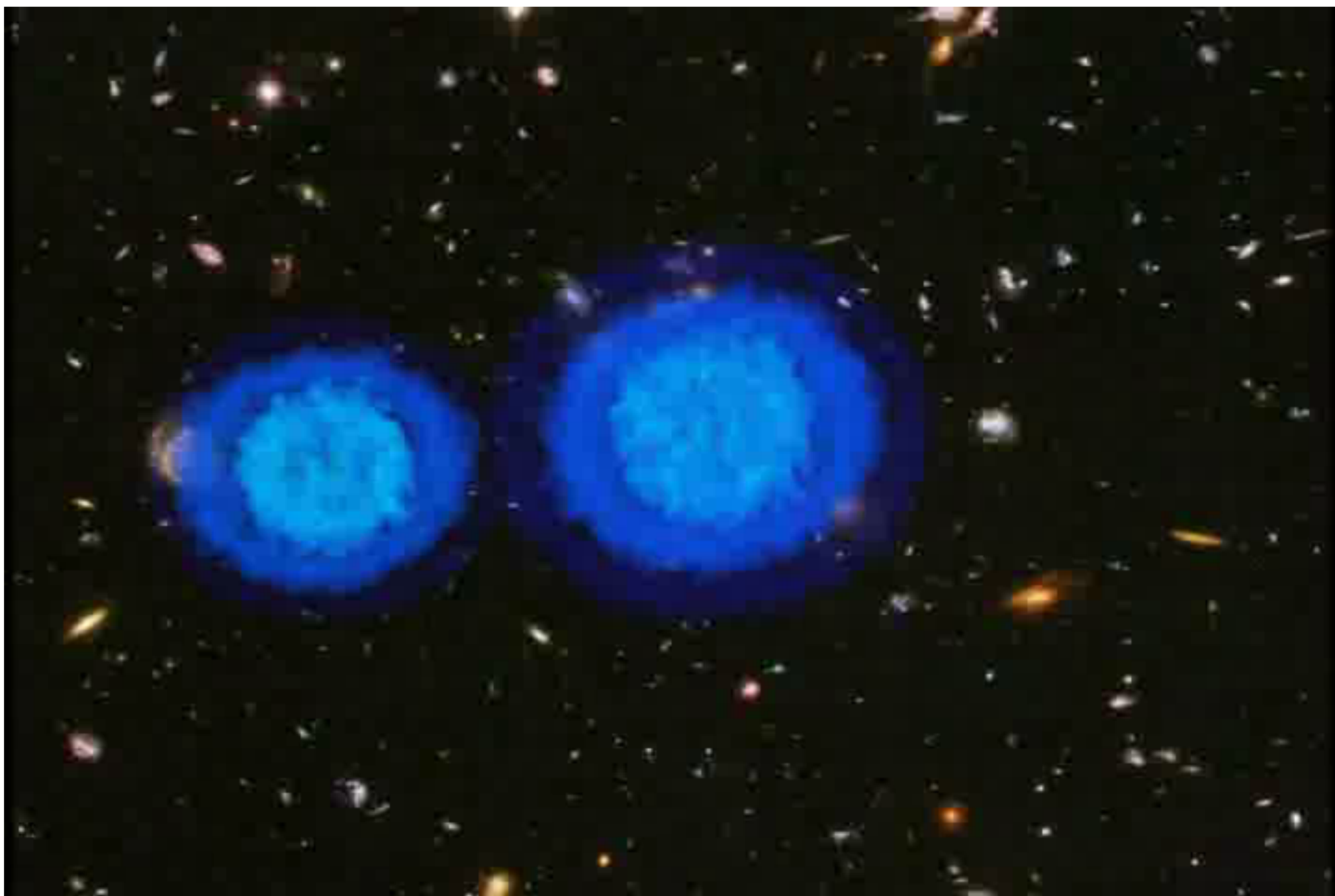


Hot Gax (X-ray)



Dark Matter (Lensing)





- Dark Matter follows galaxies (star light) a
- Hot Gas stays in middle



Merging process is on going

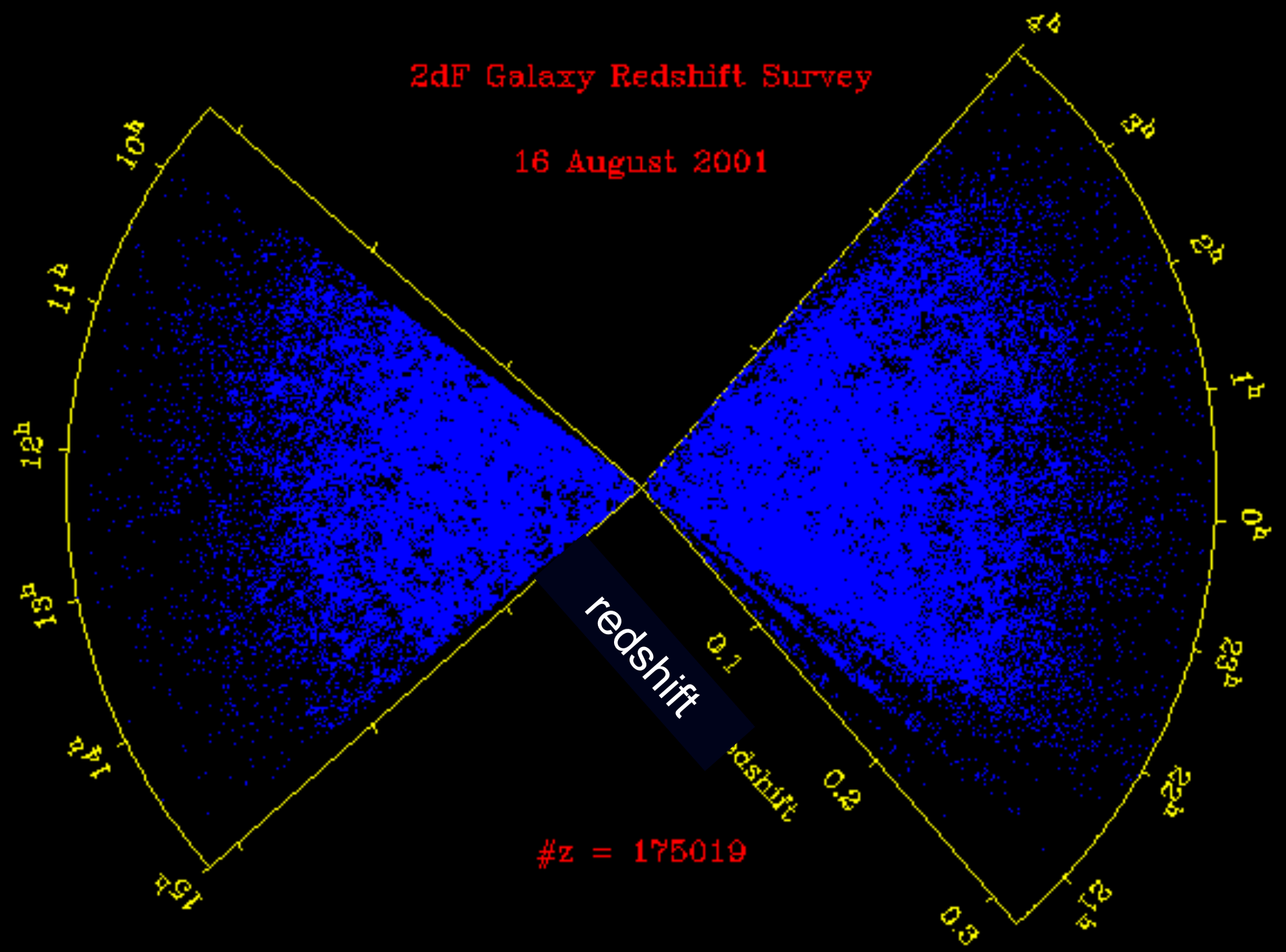
**Dark Matter is really collisionless!**

# Current Status of Cosmology

- Mapping the universe by galaxy survey
  - 2dF/SDSS
  - Baryon Acoustic Oscillation
- The most distant galaxy and reionization
  - Ly-alpha emitter by Subaru:  $z=6.9$
  - Gamma ray burst:  $z=8.2$
  - HST/Wide Field Camera 3:  $z\sim 8-8.5$
  - Reionization was completed by  $z\sim 6$  (SDSS-QSO)
  - WMAP polarization: reionization at  $z\sim 10$

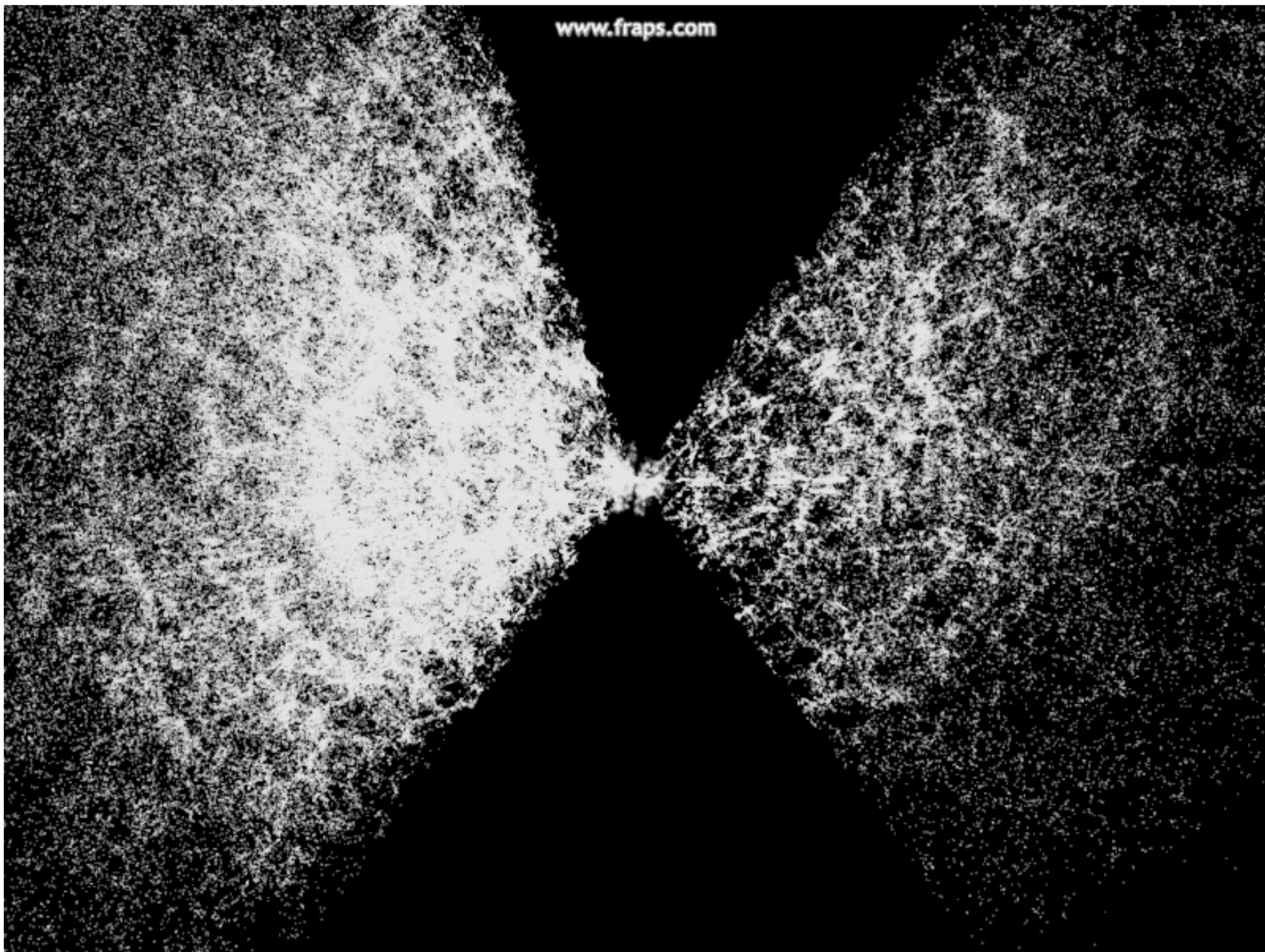
# 2dF Galaxy Redshift Survey

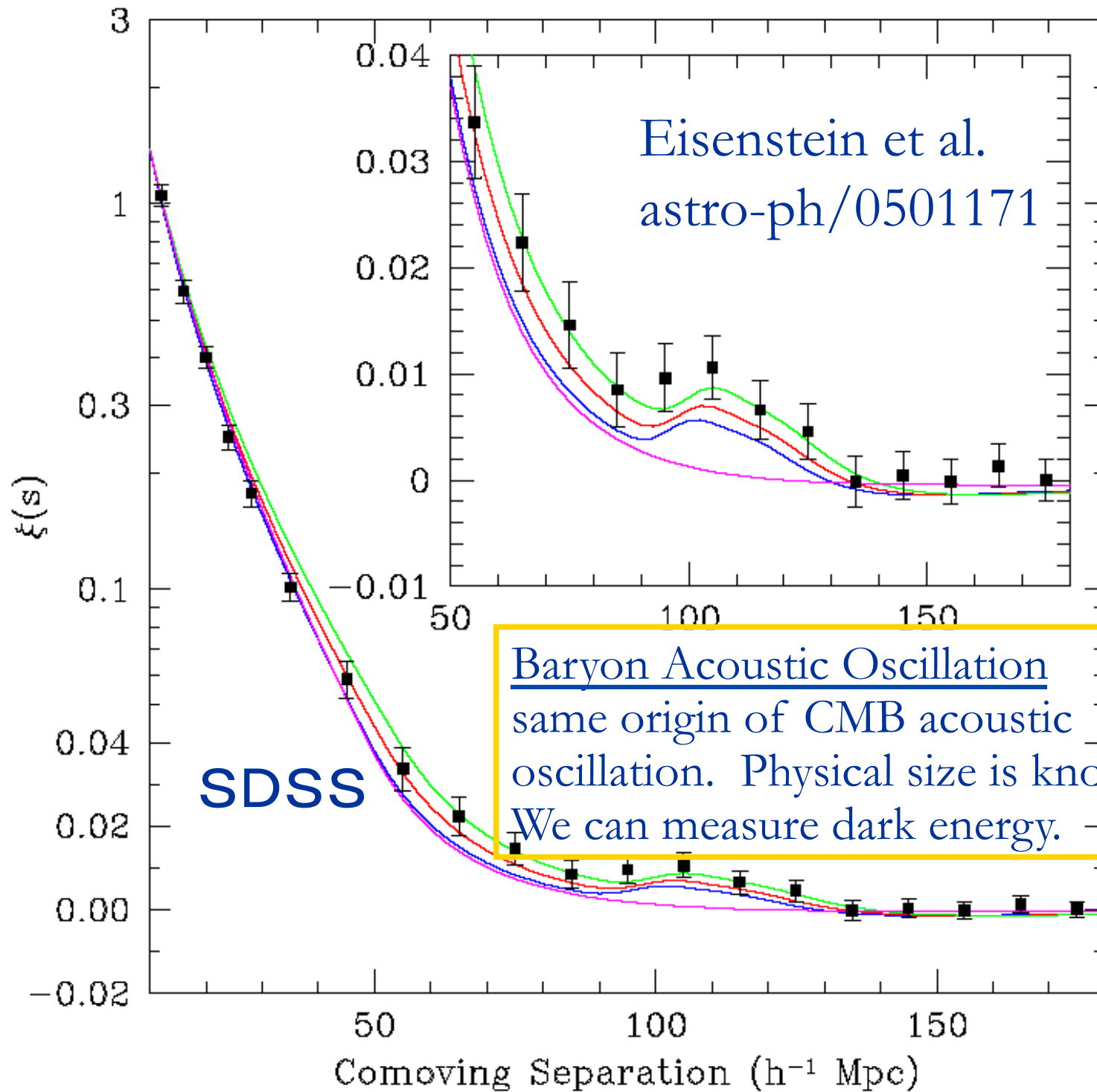
16 August 2001

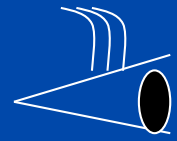




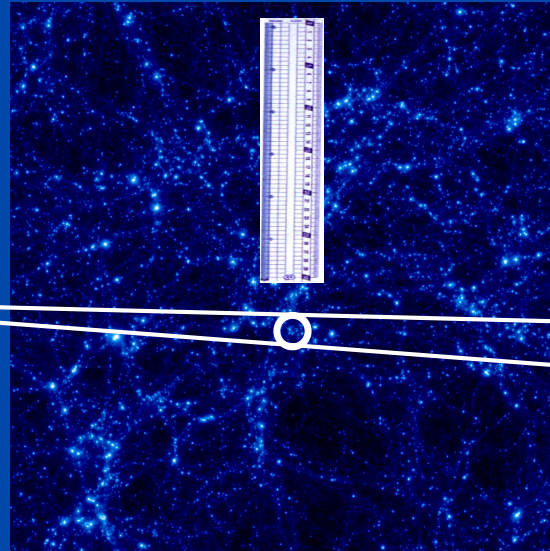
[www.fraps.com](http://www.fraps.com)







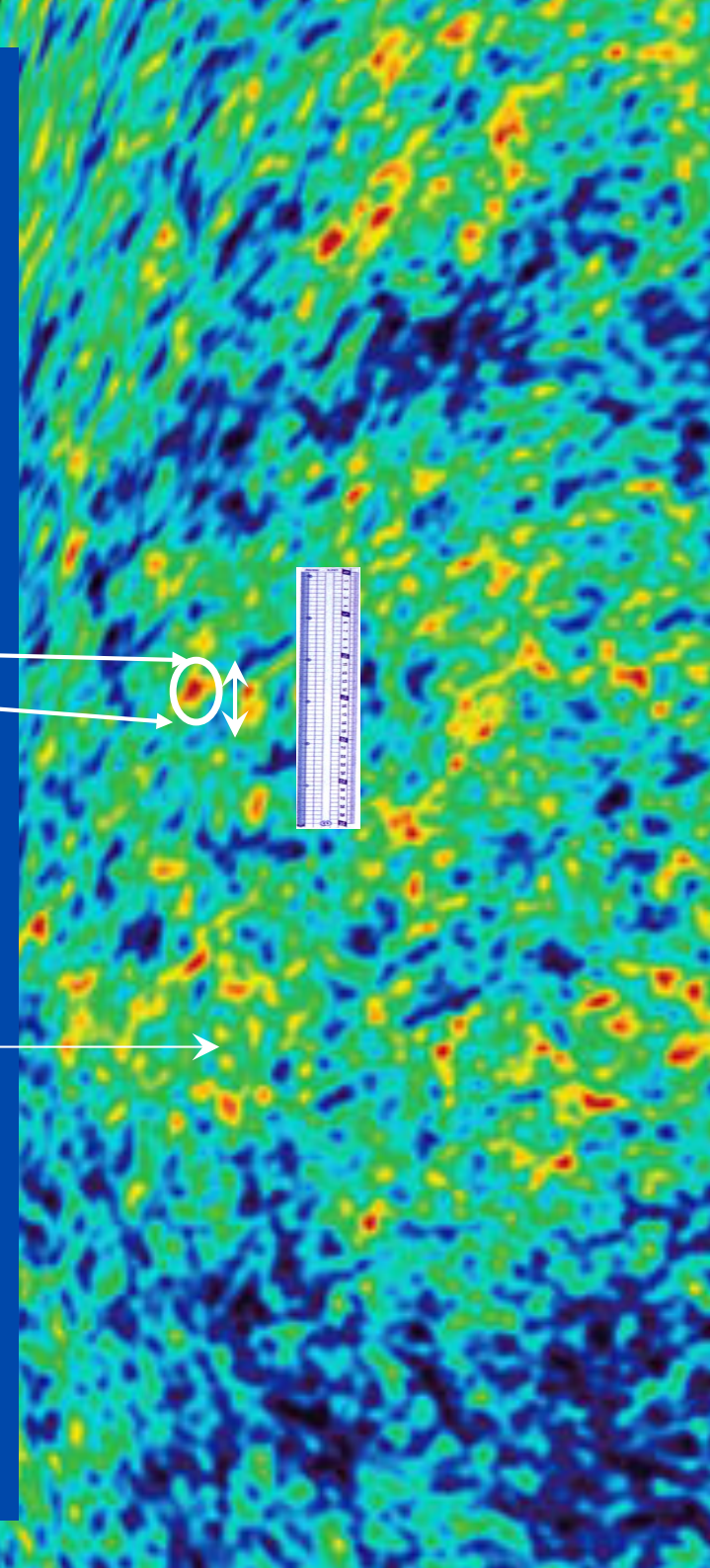
Observer



$z=0.5\sim 1$



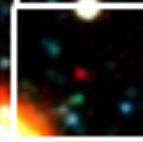
$z=1100$

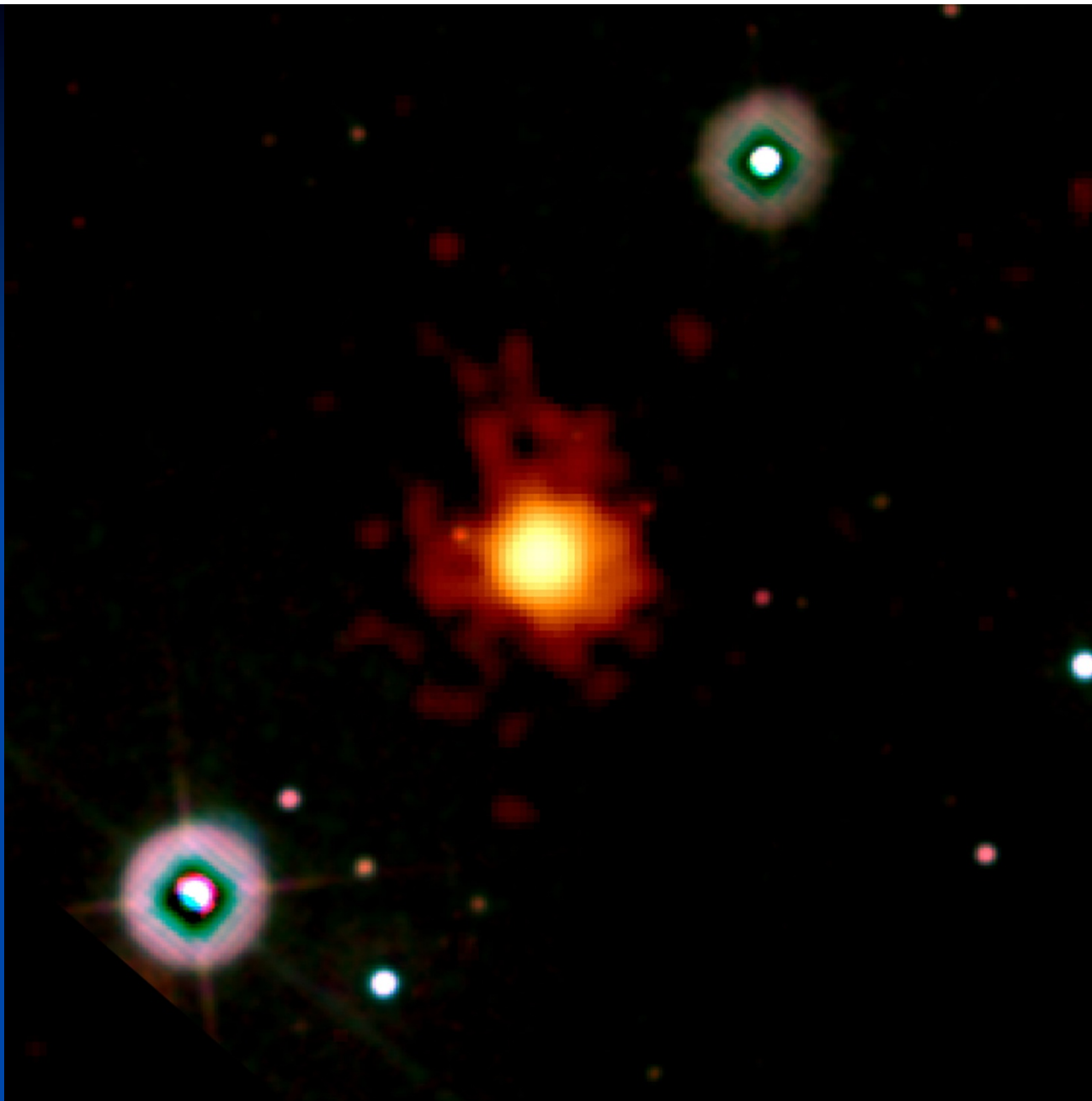


# Current Status of Cosmology

- Mapping the universe by galaxy survey
  - 2dF/SDSS
  - Baryon Acoustic Oscillation
- The most distant galaxy and reionization
  - Ly-alpha emitter by Subaru:  $z=6.9$
  - Gamma ray burst:  $z=8.2$
  - HST/Wide Field Camera 3:  $z\sim 8-8.5 \rightarrow z=8.5549$
  - Reionization was completed by  $z\sim 6$  (SDSS-QSO)
  - WMAP polarization: reionization at  $z\sim 10$

Ly-alpha emitter: The most distant galaxy (used to be) discovered by Subaru telescope.





GRB 090423 taken by Swift's Ultraviolet/Optical (blue, green) and X-Ray (orange, red) telescopes.



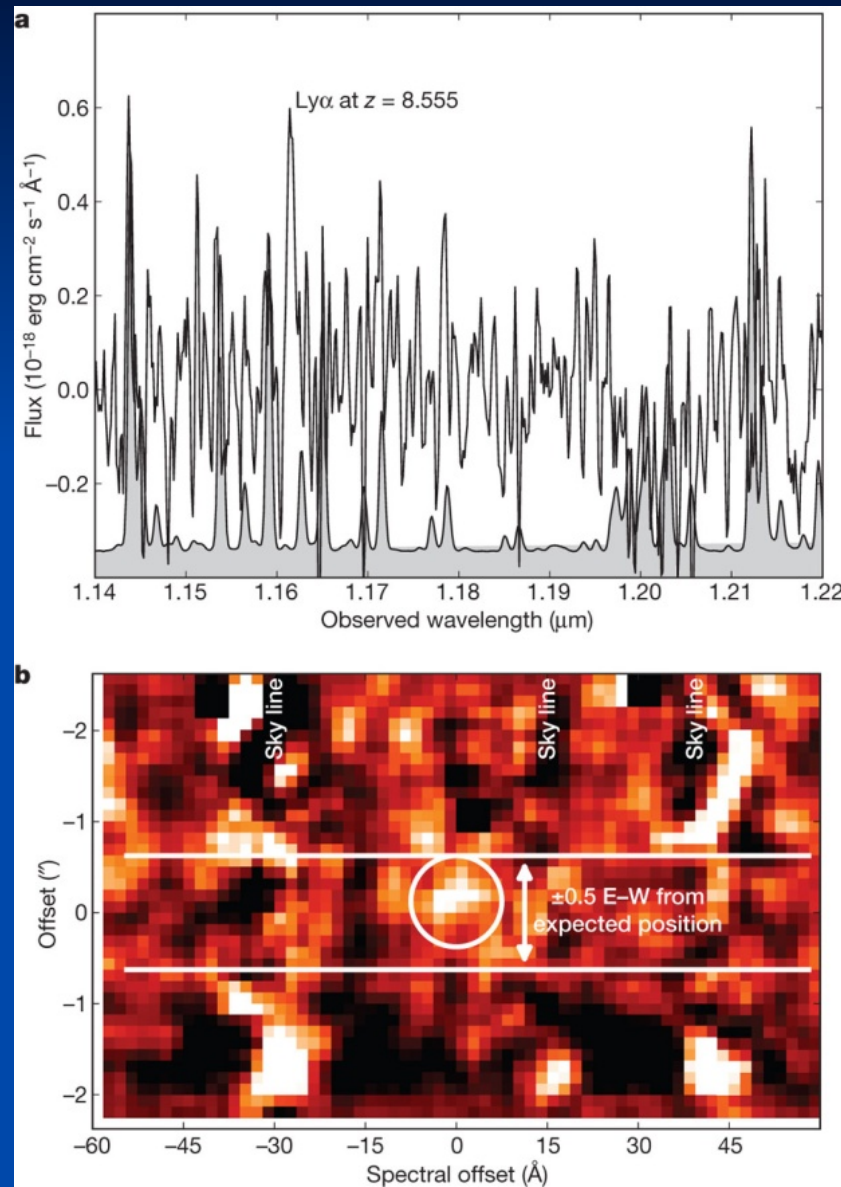
HST/Wide Field Camera 3:  $z \sim 8-8.5$  galaxies



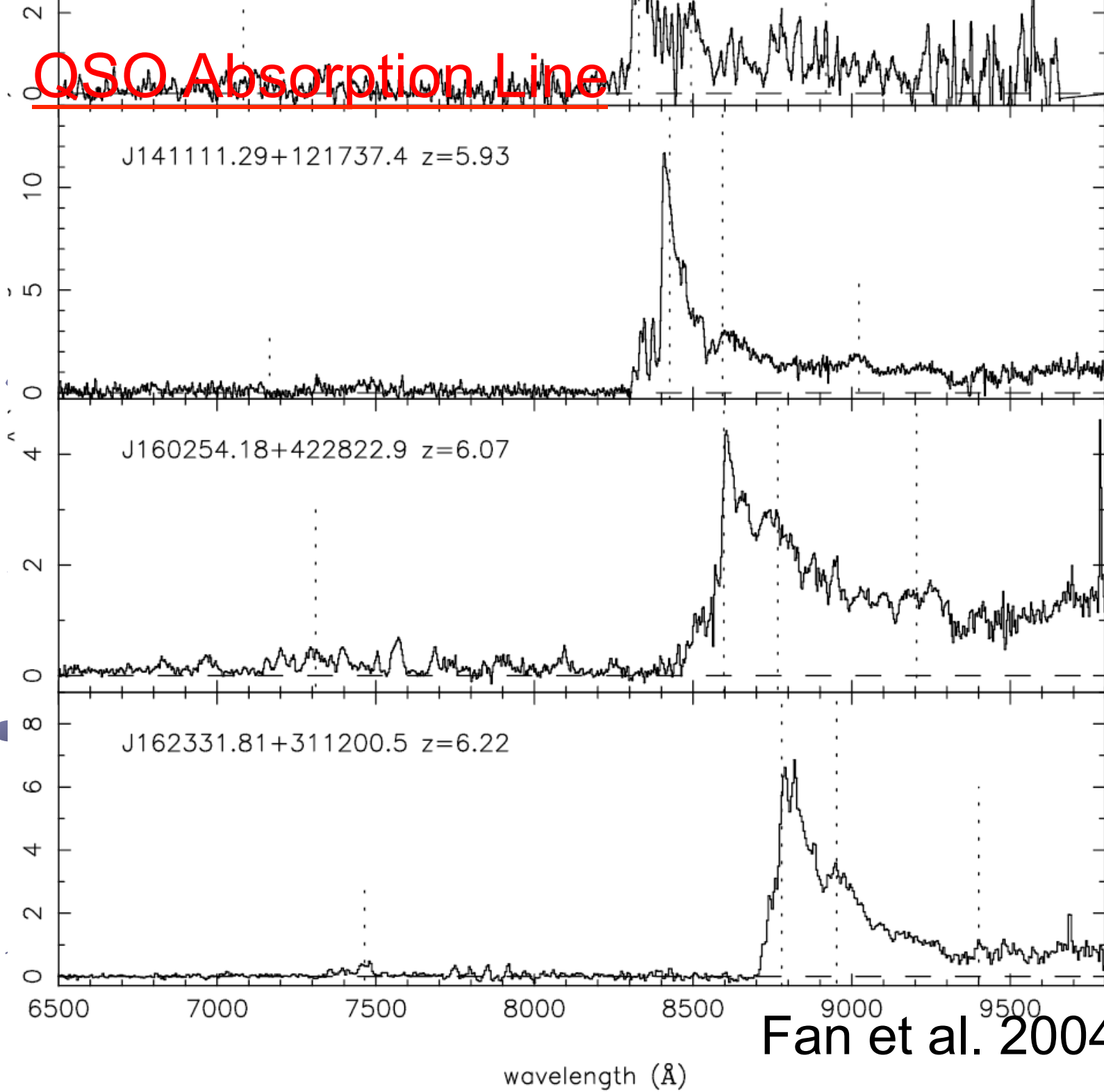
$z=8.5549$  galaxy found by VLT



Two representations of the spectrum of UDFy-38135539 showing its significance.



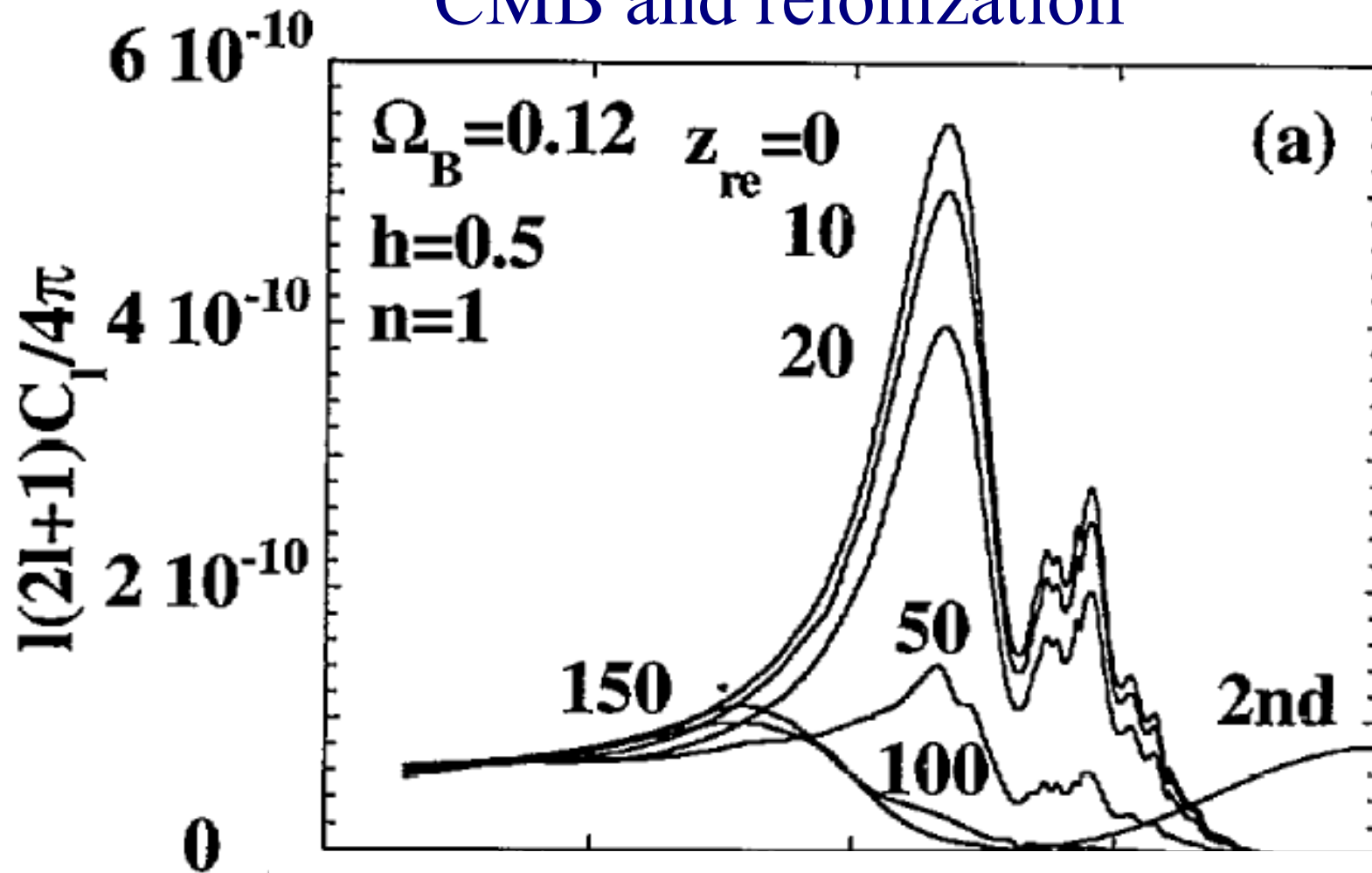
# QSO Absorption Line



Fan et al. 2004

wavelength (Å)

N.S., Silk, Vittorio, ApJL (1993), 419, L1  
CMB and reionization

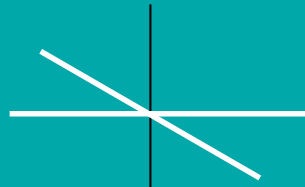


$$\Delta T / T = \left( \Delta T / T_{NoDamping} \right) \times e^{-\tau}$$

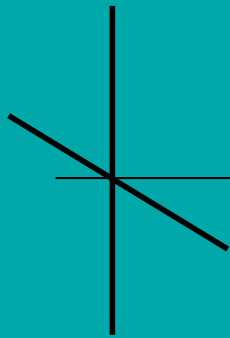
CMB Temperature Power Spectrum

Incoming  
Electro-Magnetic  
Field

Same Flux



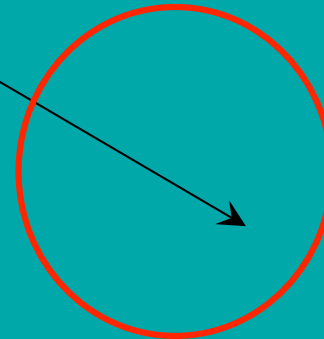
Same  
Flux



No-Preferred  
Direction  
**UnPolarized**

Electron

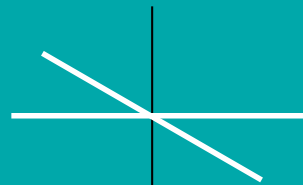
scattering



Homogeneously Distributed Photons

Incoming  
Electro-Magnetic  
Field

Weak Flux

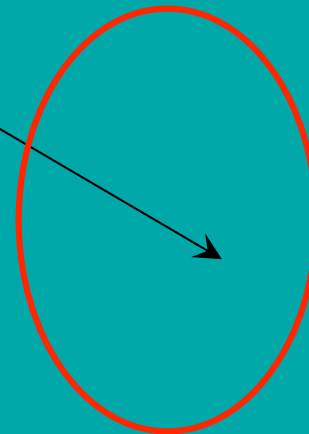


Strong  
Flux

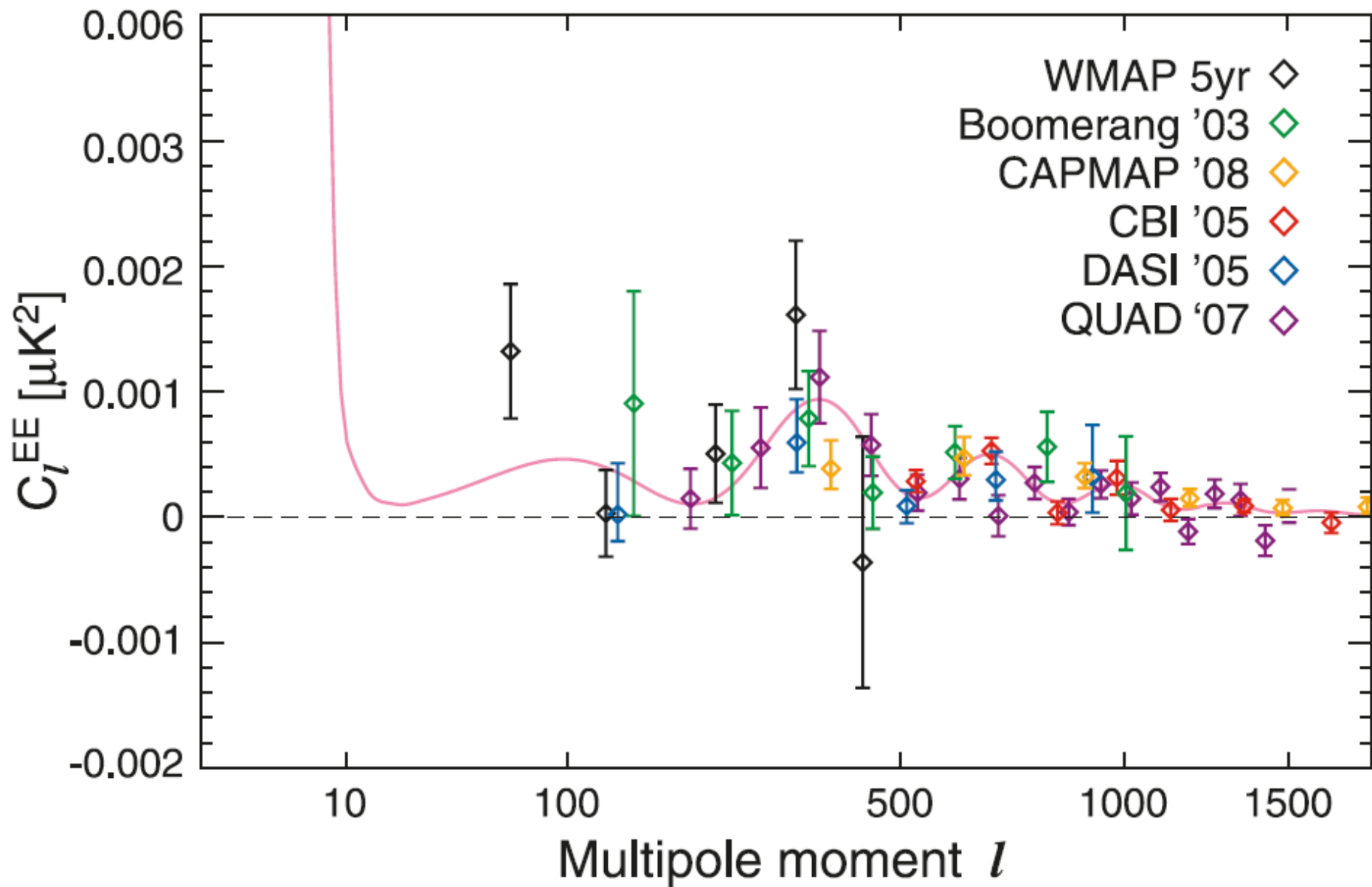


Preferred  
Direction  
**Polarized**

Electron  
scattering



Photon Distributions with the Quadrupole Pattern



# Reionization from WMAP

- Thomson Optical depth = 0.84,
  - Damping of temperature anisotropies
  - Polarization
- Reionization epoch:  $z=10.8$  if complete reionization
- But, it is not clear when it starts to reionize

# Current Status of Big Bang Cosmology

- We understand the contents of the universe:

However...

- no idea about dark energy
  - no evidence of dark matter particles
  - Yet most of baryons are unseen
- We start to see the end of dark ages
- However...
- We don't know how and when it starts
  - We don't know how long it stays



# Current Status of Big Bang Cosmology

- We are almost certain the existence of Inflation

However...

- no idea about exact mechanism of Inflation
- no direct proof of Inflation yet (Nobel Prize!?)
- We don't know how and when Inflation ended

# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

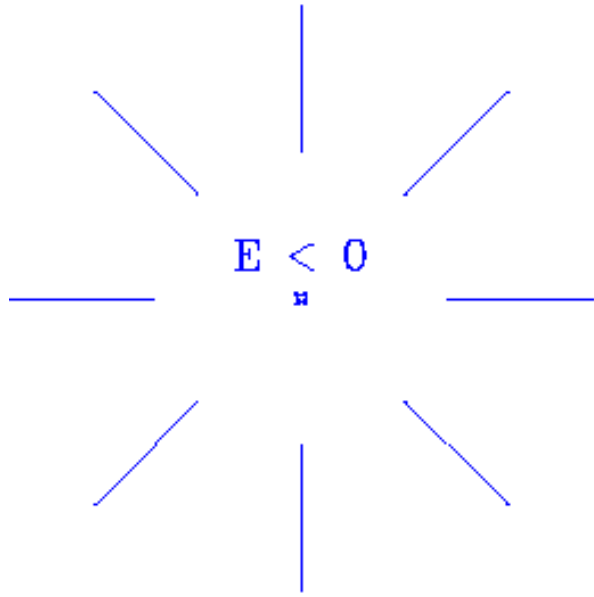
# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

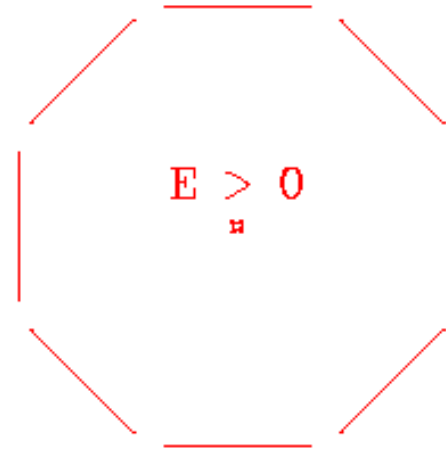
# 1. インフレーションの存在を証明する

- Harrison-Zeldovich Spectrum: 済み
- Consistency Relationを示す
  - 重力波モード(tensor)の揺らぎを検出
  - 観測的には、CMBの偏光成分を測定、Parity OddのB-modeを検出する。

$Q > 0 \quad U = 0$



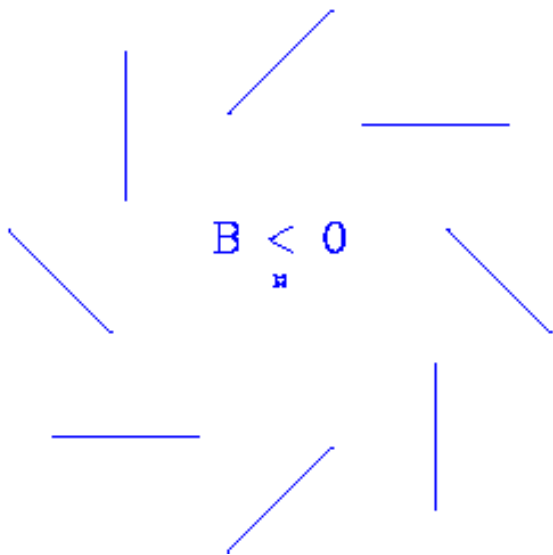
$Q < 0 \quad U = 0$



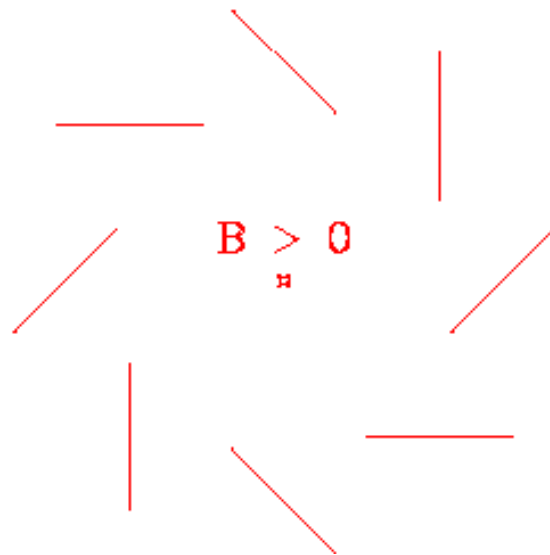
**E-mode**

2 independent  
parity modes

$Q = 0 \quad U < 0$

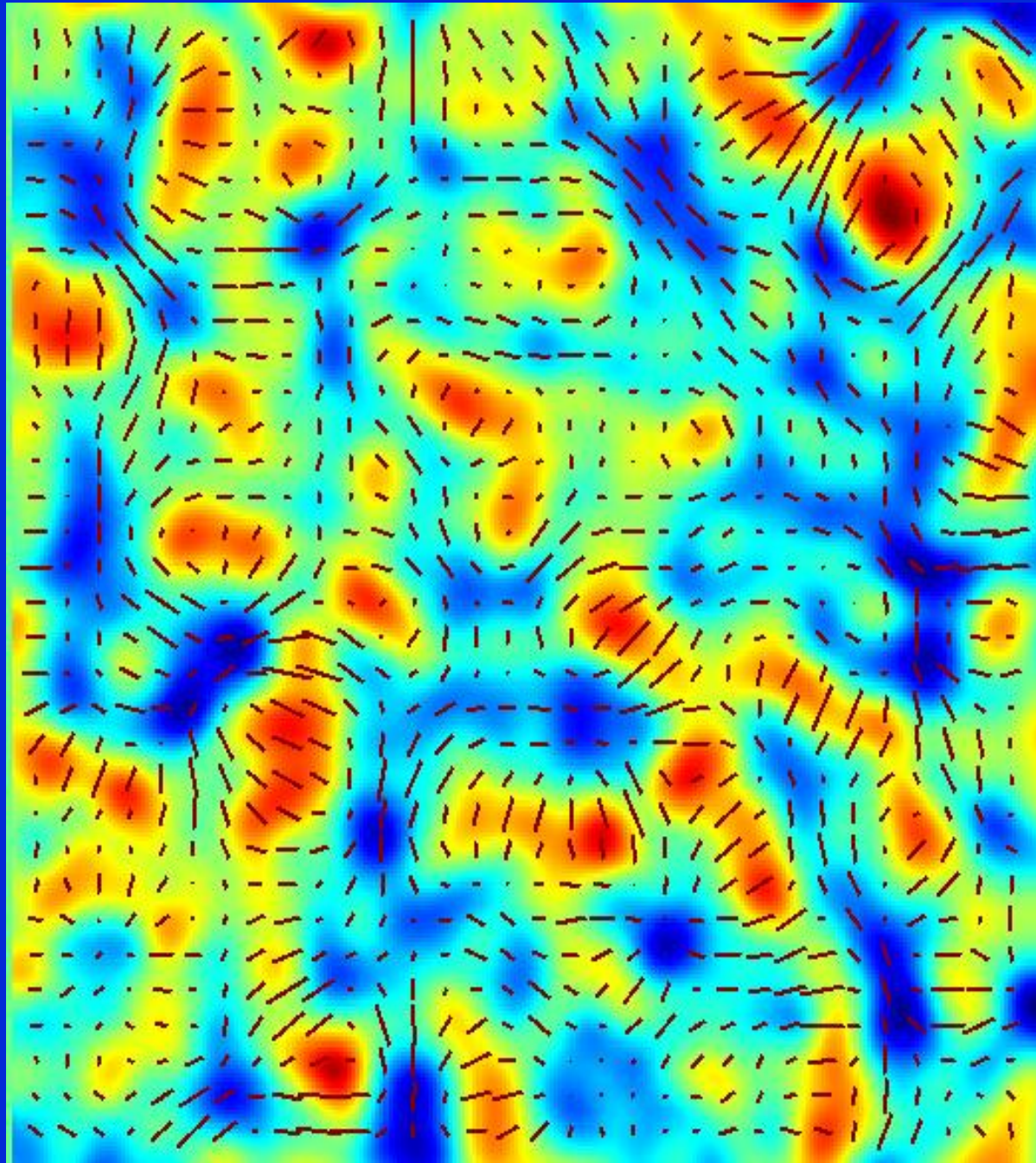


$Q = 0 \quad U > 0$



**B-mode**

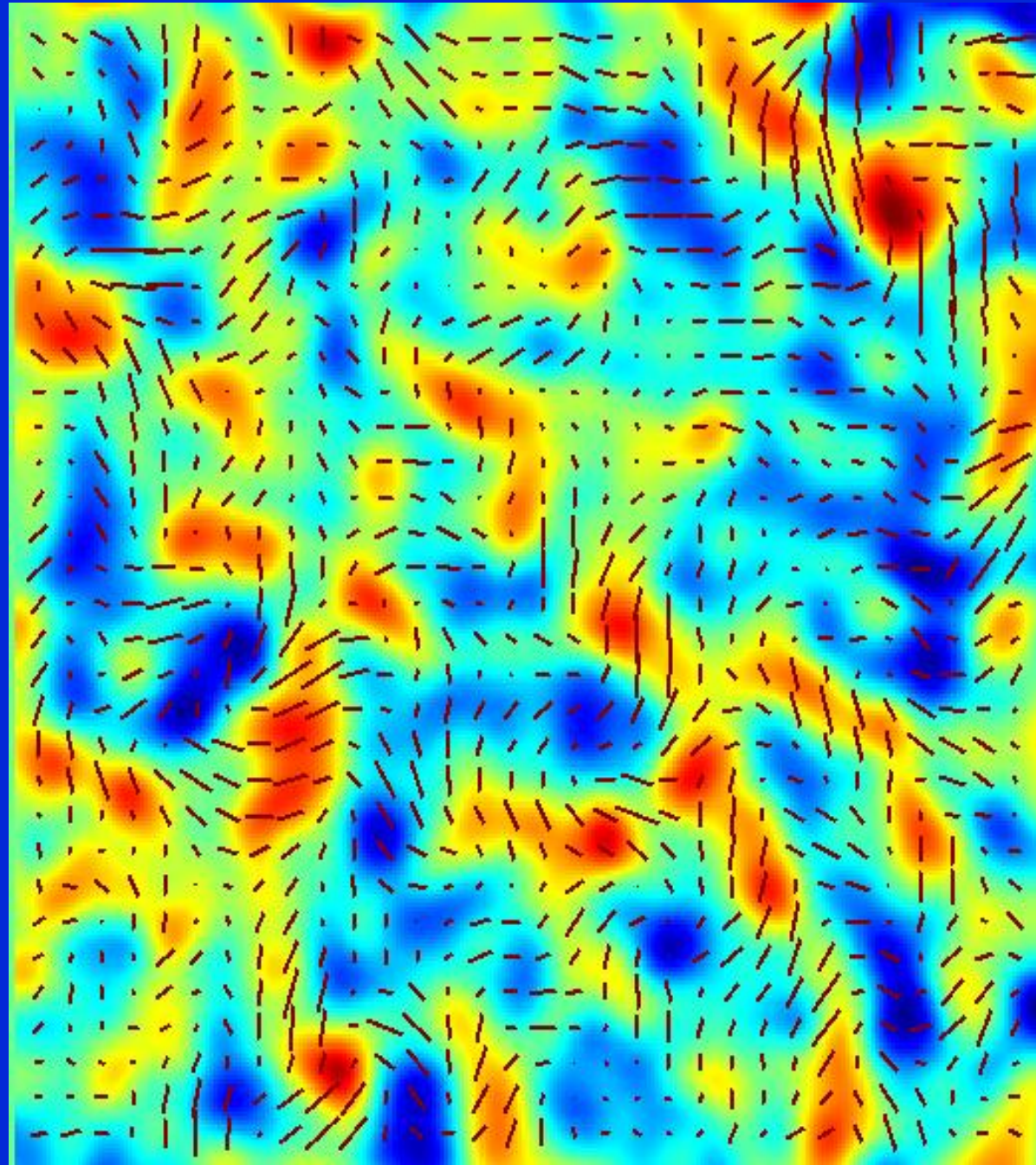
Seljak



E-mode

Scalar Perturbations only produce E-mode

Seljak



B-mode

Tensor perturbations produce both E- and B- modes

# We can Prove Inflation from B-mode Polarization

- Consistency Relation

$$n_T = -2 A_T / A_S$$

- $n_T$ : Tensor Power Law Index
  - $A_T$ : Tensor Amplitude
  - $A_S$ : Scalar Amplitude
- If we can find B-mode, we can measure tensor spectrum ( $n_T$  &  $A_T$ ), and test consistency relation

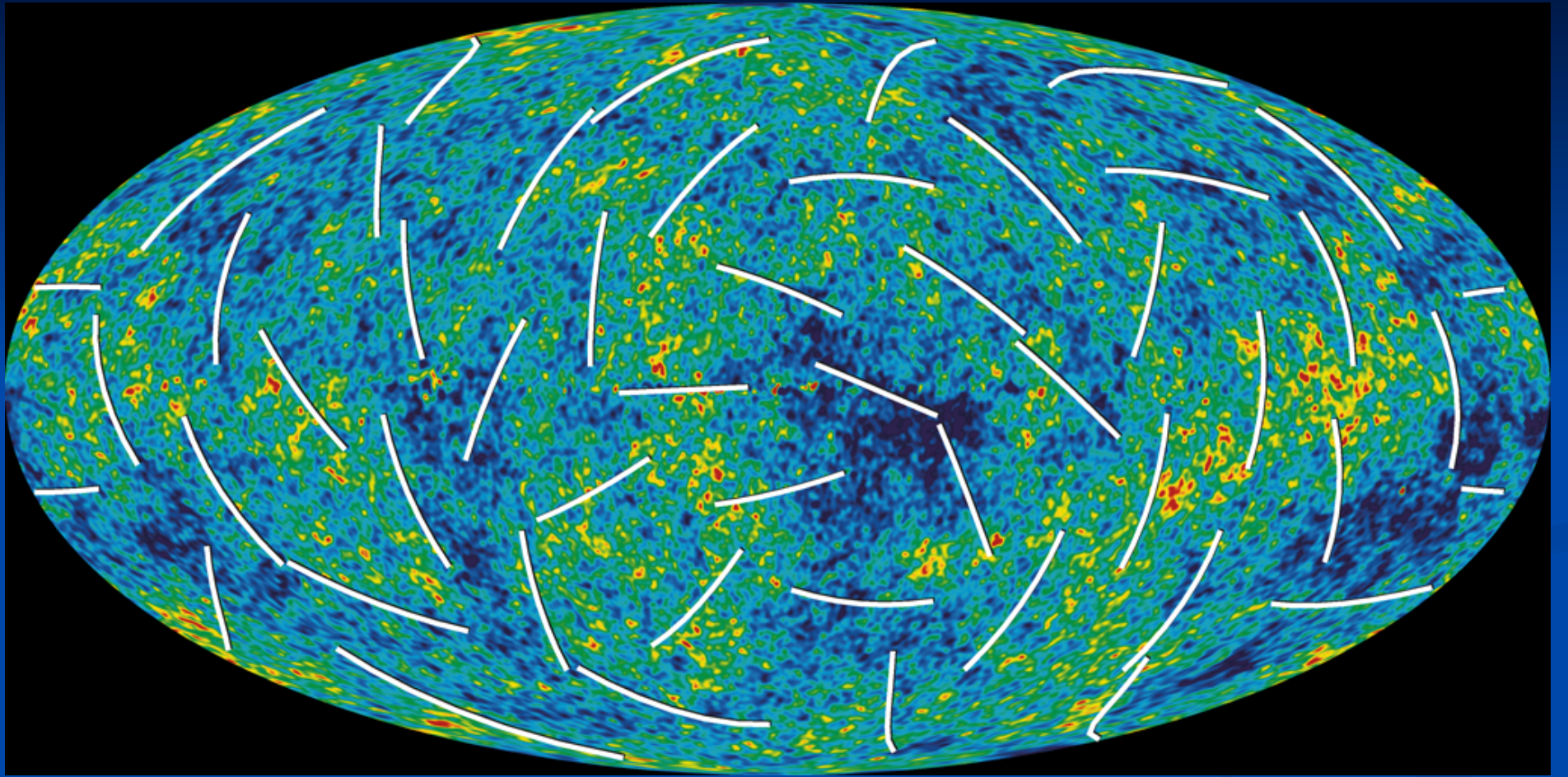


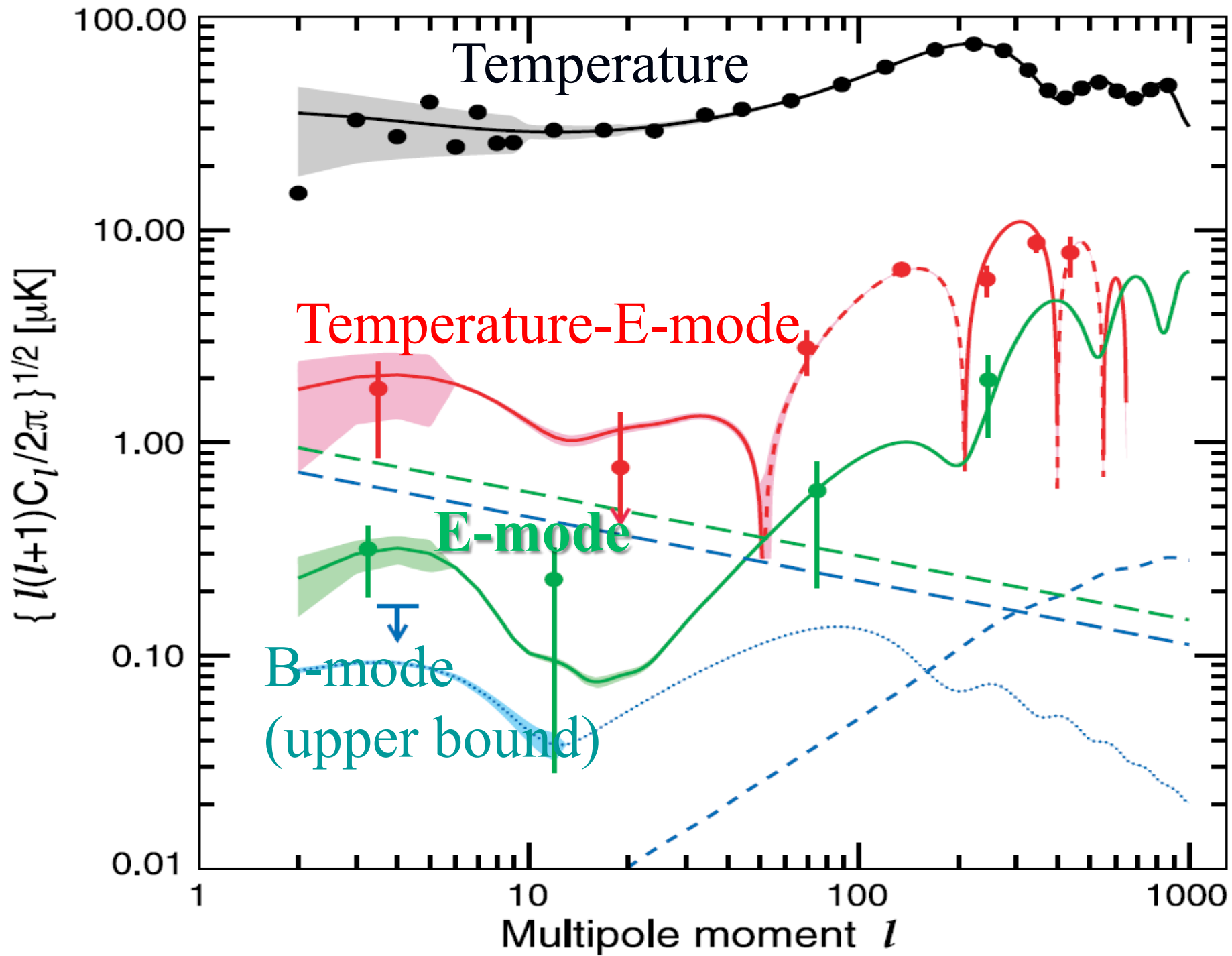
# Observations

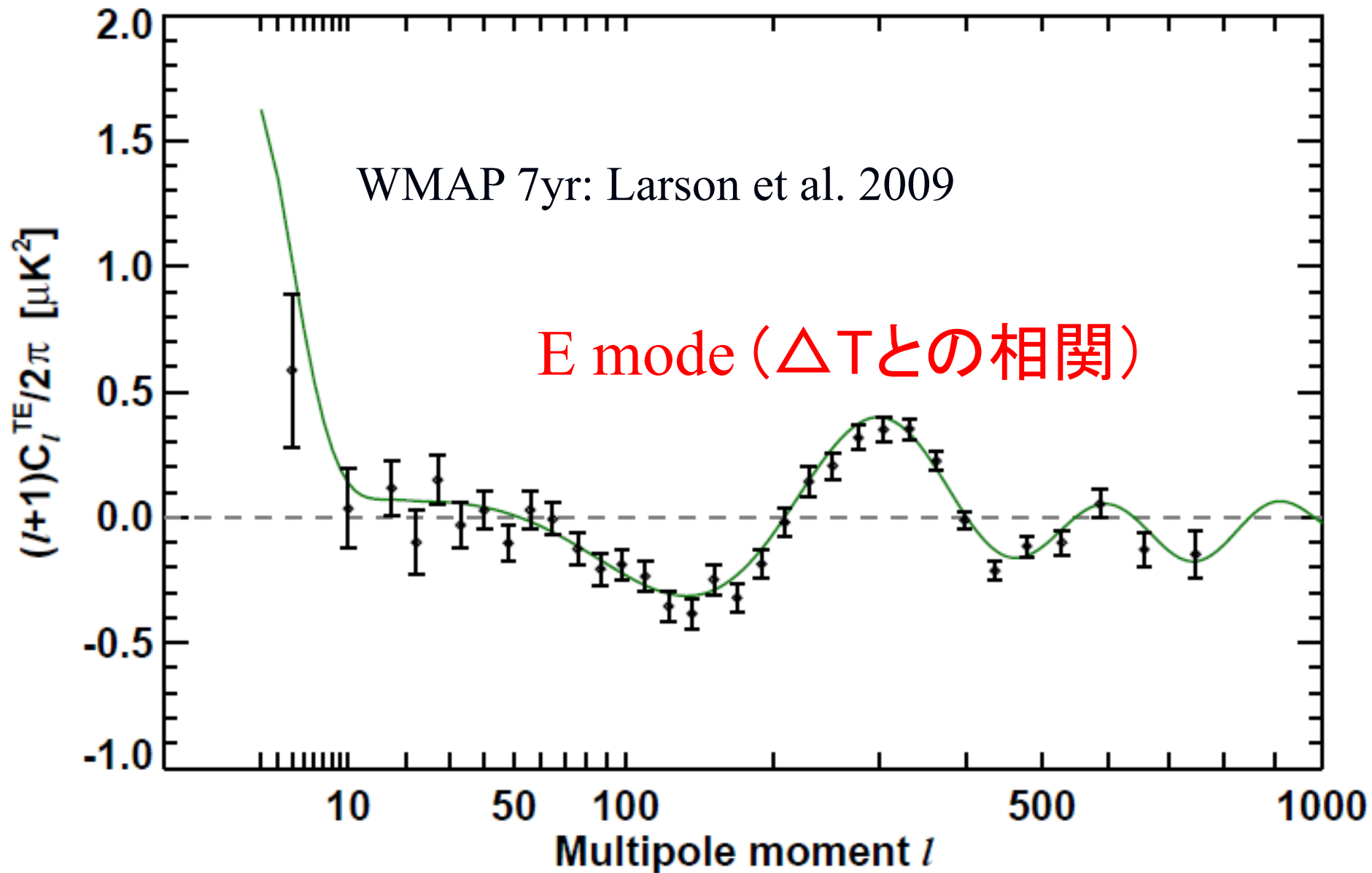
Very difficult to detect

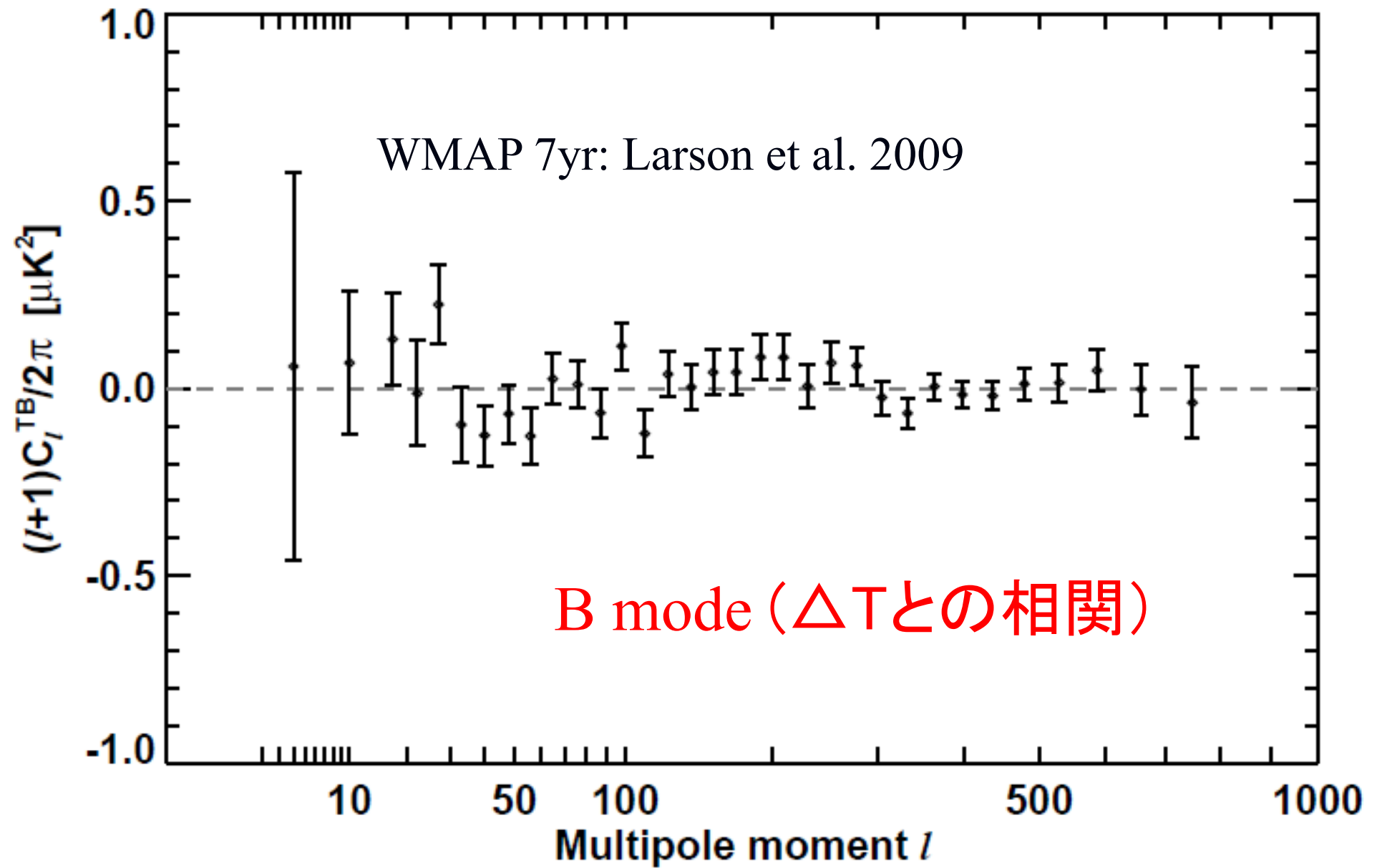
- Typically amplitude of polarization is factor 10 smaller than temperature fluctuations
- Foreground from the Galaxy

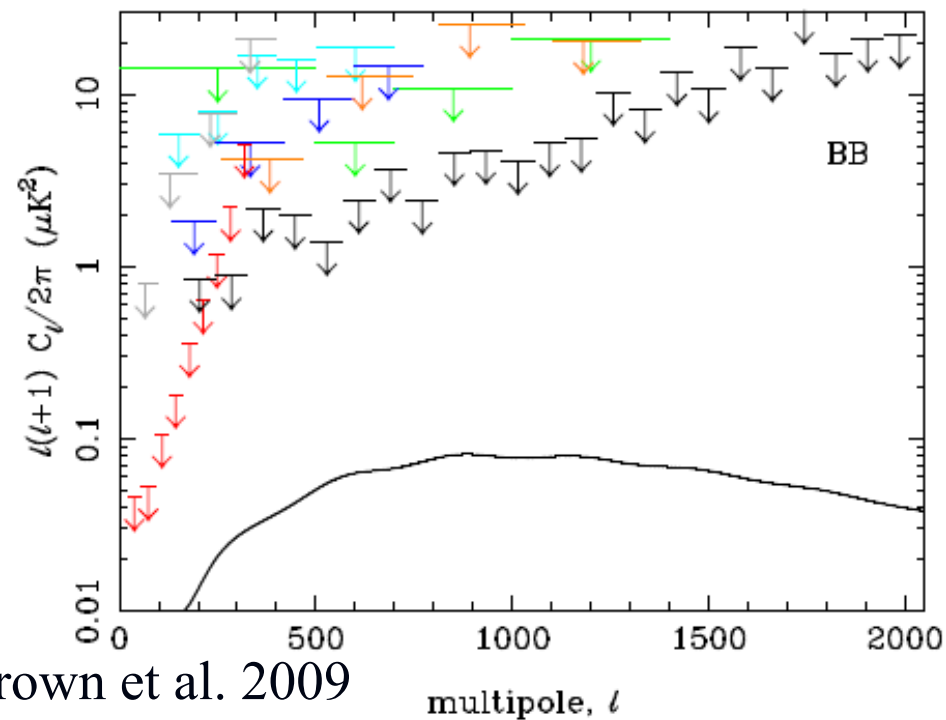
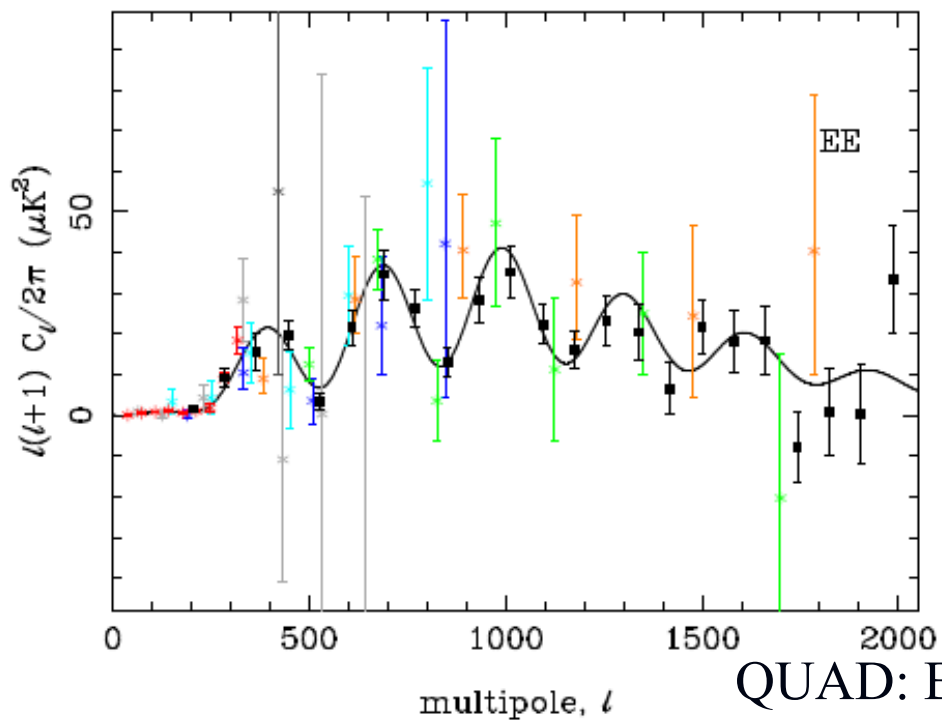
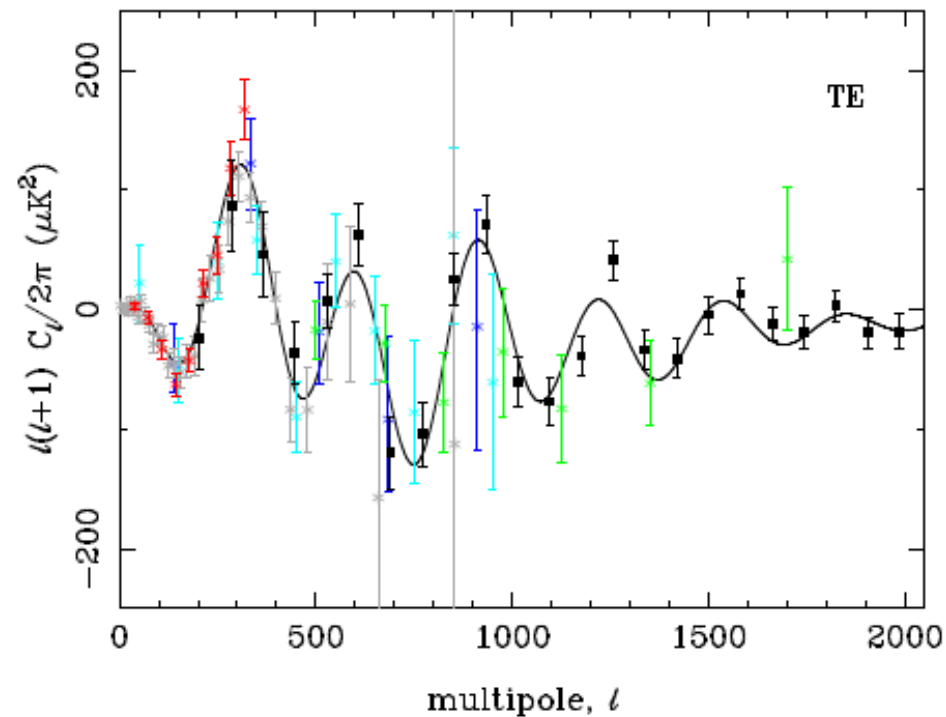
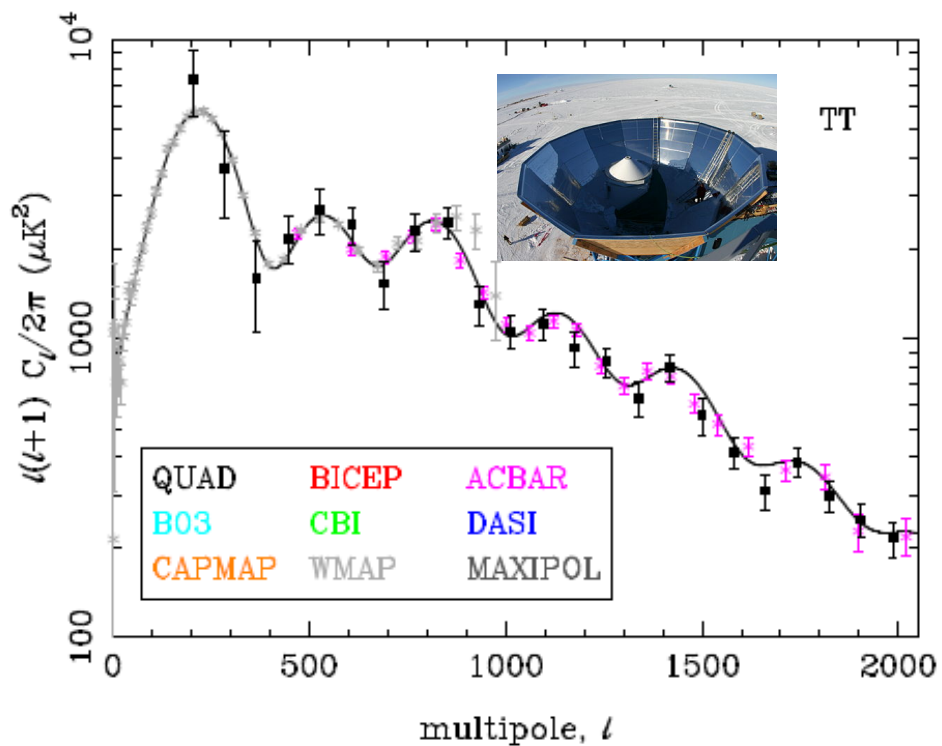
- First Detection of E-mode Polarization was from DESI experiments (J. Carlstrom's group)
- Boomerang Experiment (Balloon at Antarctica)
- WMAP made clear detection of E-mode polarization in the all sky map (3yr data)



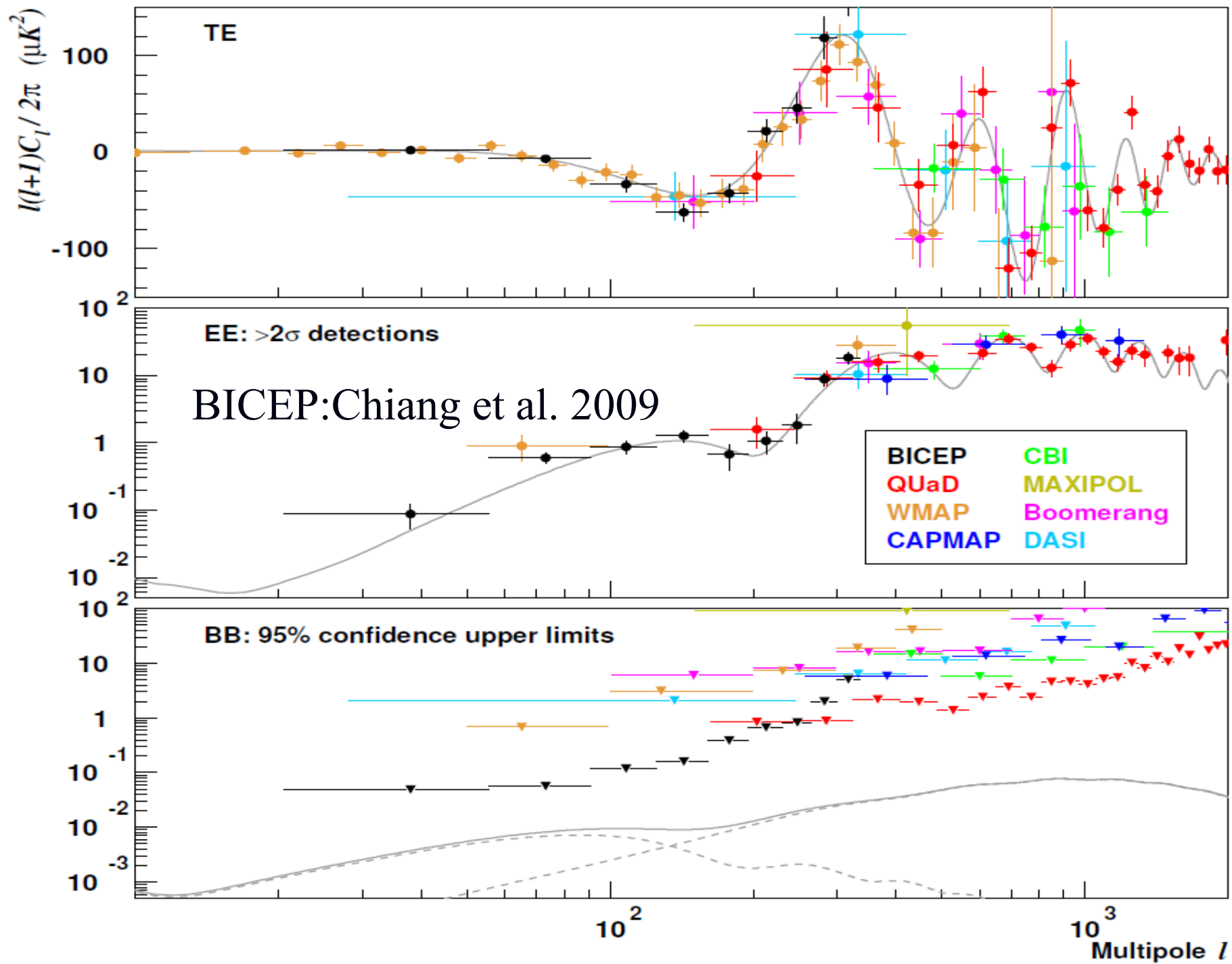


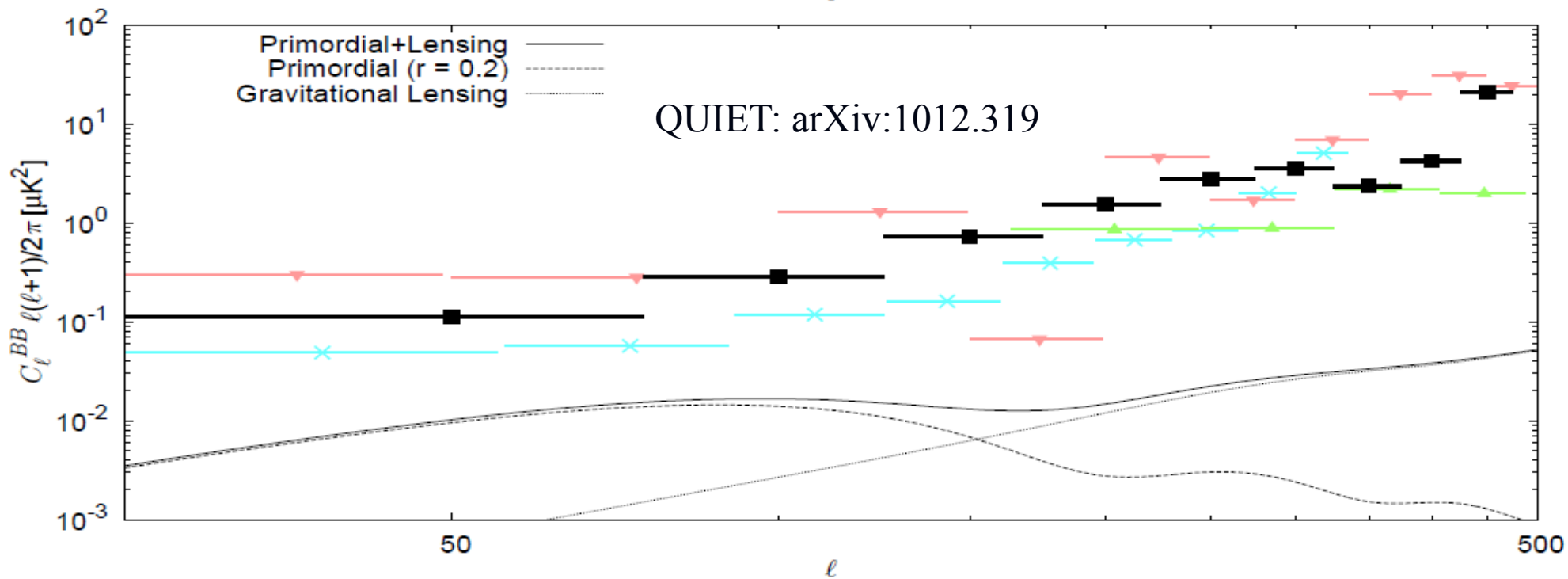
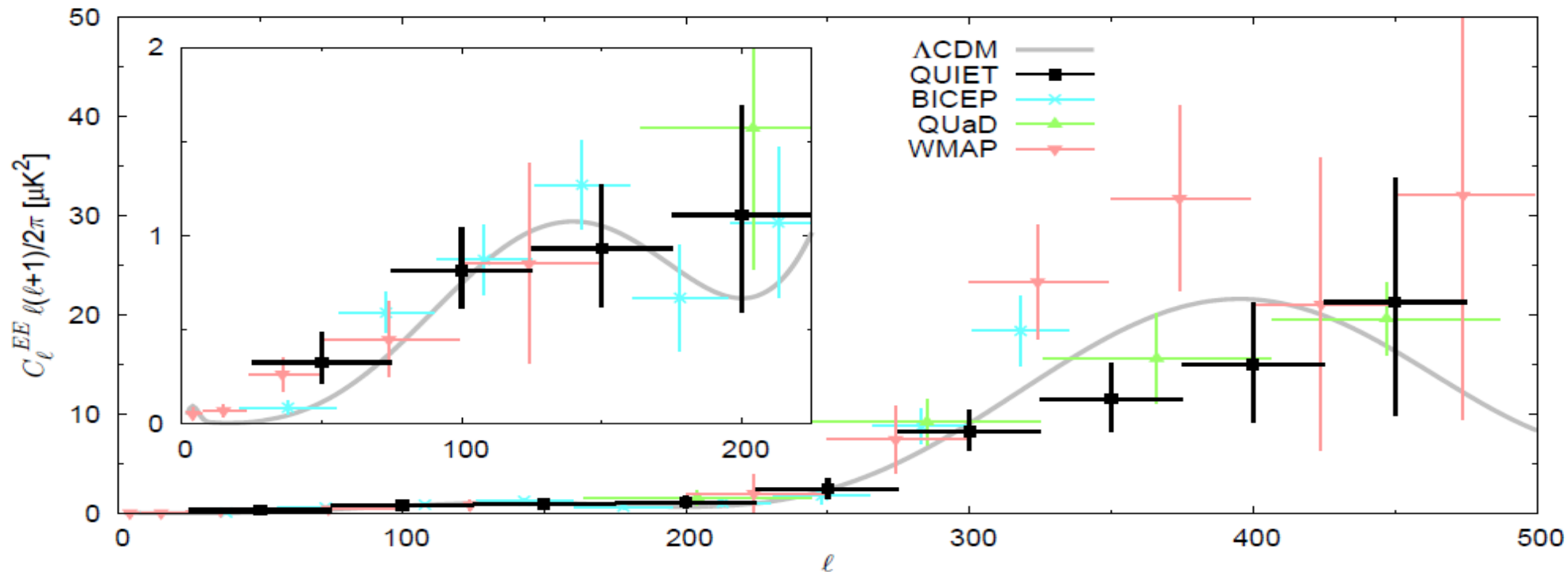






QUAD: Brown et al. 2009







Polarization for WMAP is  
Temperature Fluctuations for COBE  
anyway, detect (E-mode)!

But only upper bound for B-mode Polarization

Now a big race in which who is going to detect B-mode first time is open!

In Japan, Masashi Hazumi's group joins the race

- Join QUIET group
- Eventually launch a small satellite
- They just got a big grant! ~\$10million

# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

## 2. インフレーションの機構を解明する

- ゆらぎのnon-Gaussianityを測定する
- インフレーションからの重力波を直接検出
  - スペクトルに、reheatingなどの痕跡が残る
  - ついでに、ビッグバンの歴史も刻まれている

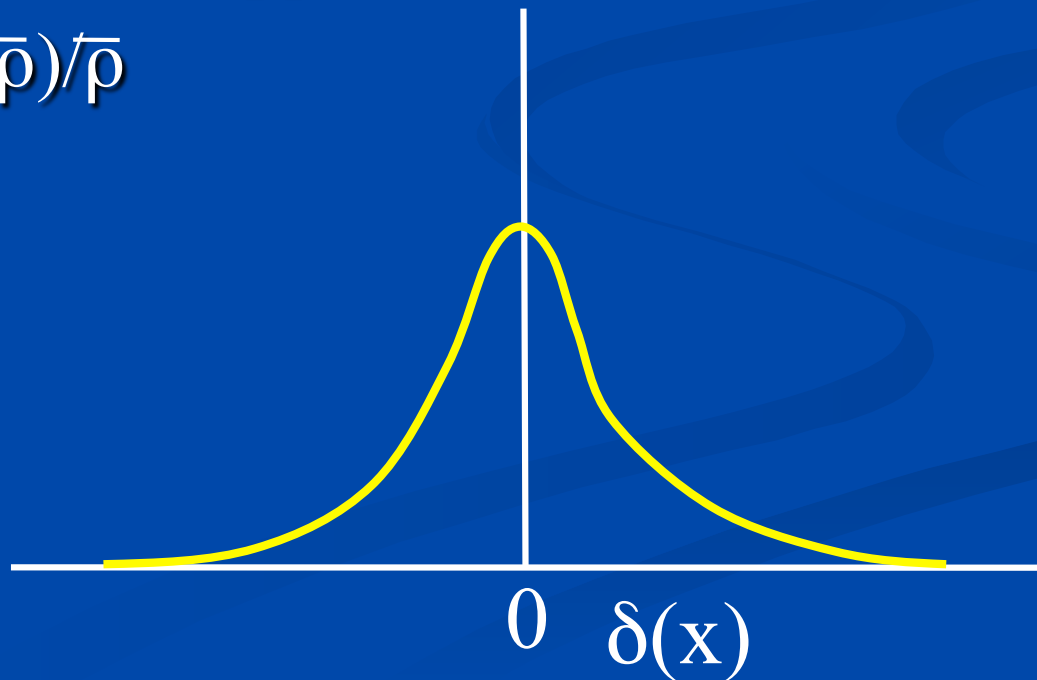
## 2. インフレーションの機構を解明する

- ゆらぎのnon-Gaussianityを測定する
- インフレーションからの重力波を直接検出
  - スペクトルに、reheatingなどの痕跡が残る
  - ついでに、ビッグバンの歴史も刻まれている

# Recent Hot Topics: Non-Gaussianity

- Fluctuations generated during the inflation epoch
  - Quantum Origin
  - Gaussian as a first approximation

$$\delta(\mathbf{x}) \equiv (\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}) / \bar{\rho}$$



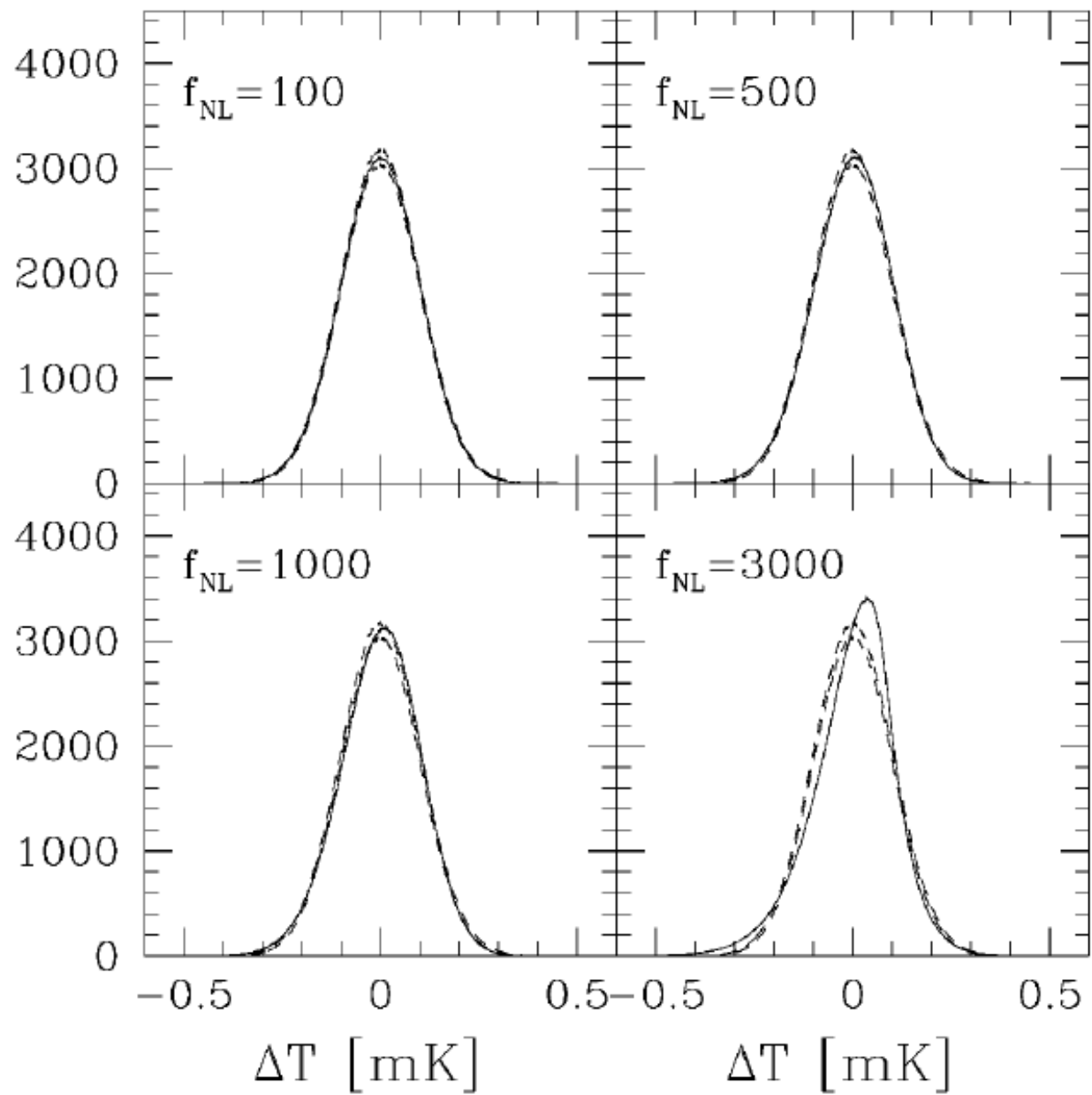
# Non Gaussianity from Second Order Perturbations of the inflationary induced fluctuations

- $\Phi = \Phi_{\text{Linear}} + f_{\text{NL}}(\Phi_{\text{Linear}})^2$

$\Phi_{\text{Linear}} = O(10^{-5})$ , non-Gaussianity is tiny!

Amplitude  $f_{\text{NL}}$  depends on inflation model

[quadratic potential provides  $f_{\text{NL}} = O(10^{-2})$ ]



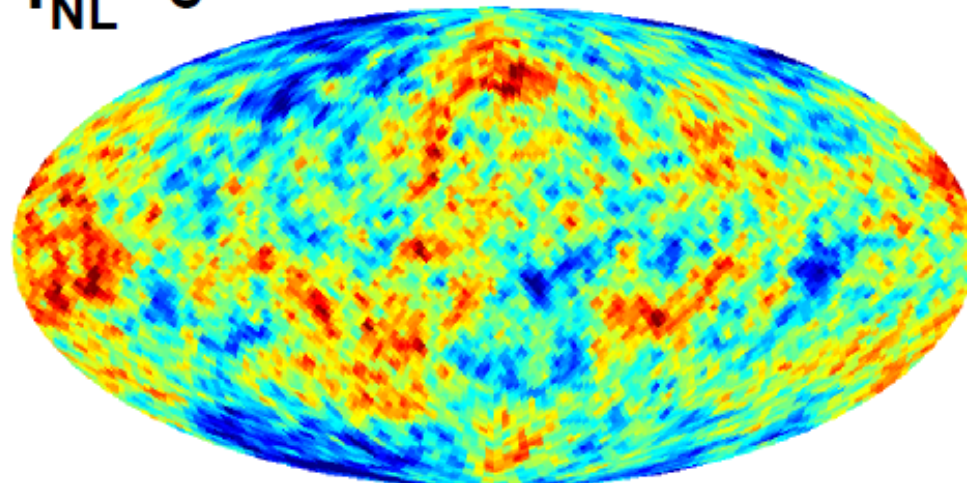


# Positive $f_{NL}$ = More Cold Spots

Simulated temperature maps from  $\Phi(x) = \Phi_G(x) + f_{NL} \Phi_G^2(x)$

$f_{NL}=0$

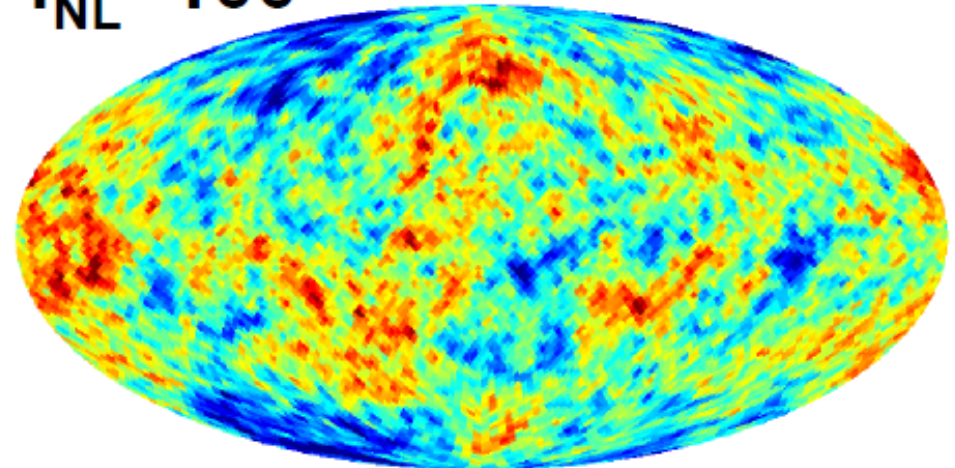
Gaussian simulation,  $n=1024^3$



-2.00e-04 2.00e-04 K

$f_{NL}=100$

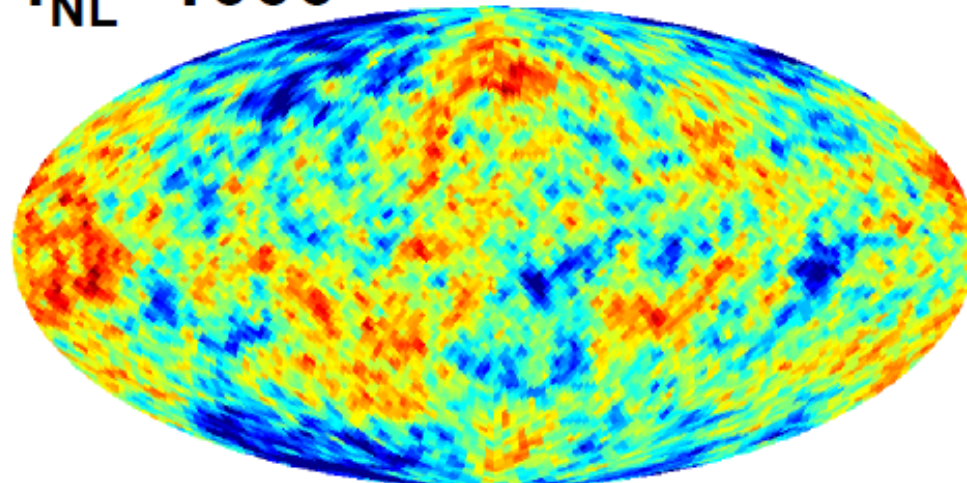
Gaussian simulation,  $f_{NL}=100$ ,  $1024^3$



-2.00e-04 2.00e-04 K

$f_{NL}=1000$

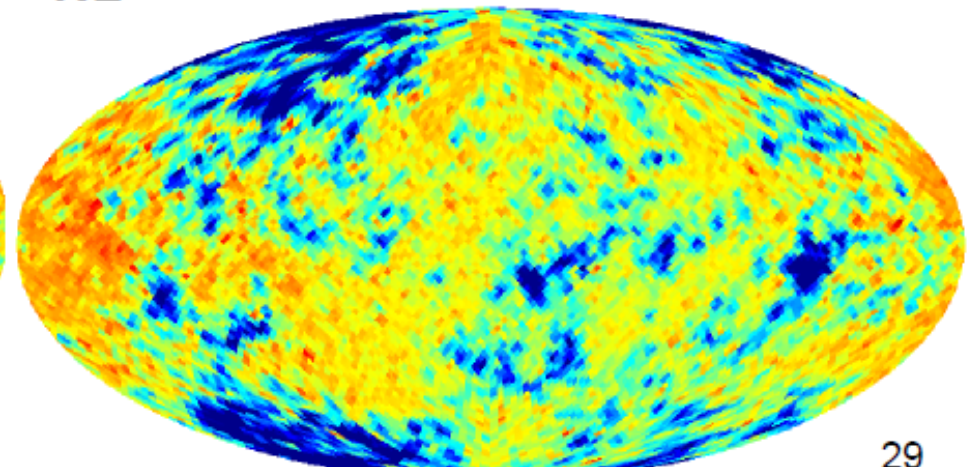
Gaussian simulation,  $f_{NL}=1000$ ,  $n=1024^3$



-2.00e-04 2.00e-04 K

$f_{NL}=5000$

Gaussian simulation,  $f_{NL}=5000$ ,  $n=1024^3$



-2.00e-04 2.00e-04 K

Very Tiny Effect:

Fancy analysis (Bispectrum etc) starts to reveal non-Gaussianity?

First “Detection” in WMAP CMB map

**+27 <  $f_{NL}(\text{local})$  < +147** (95% CL;  **$l_{\text{max}}=750$** )  
(Yadav & Wandelt, arXiv:0712.1148)



$$f_{NL}^{\text{local}} = 32 \pm 21 \text{ (68\% CL)}$$

Komatsu et al. WMAP 7 yr.

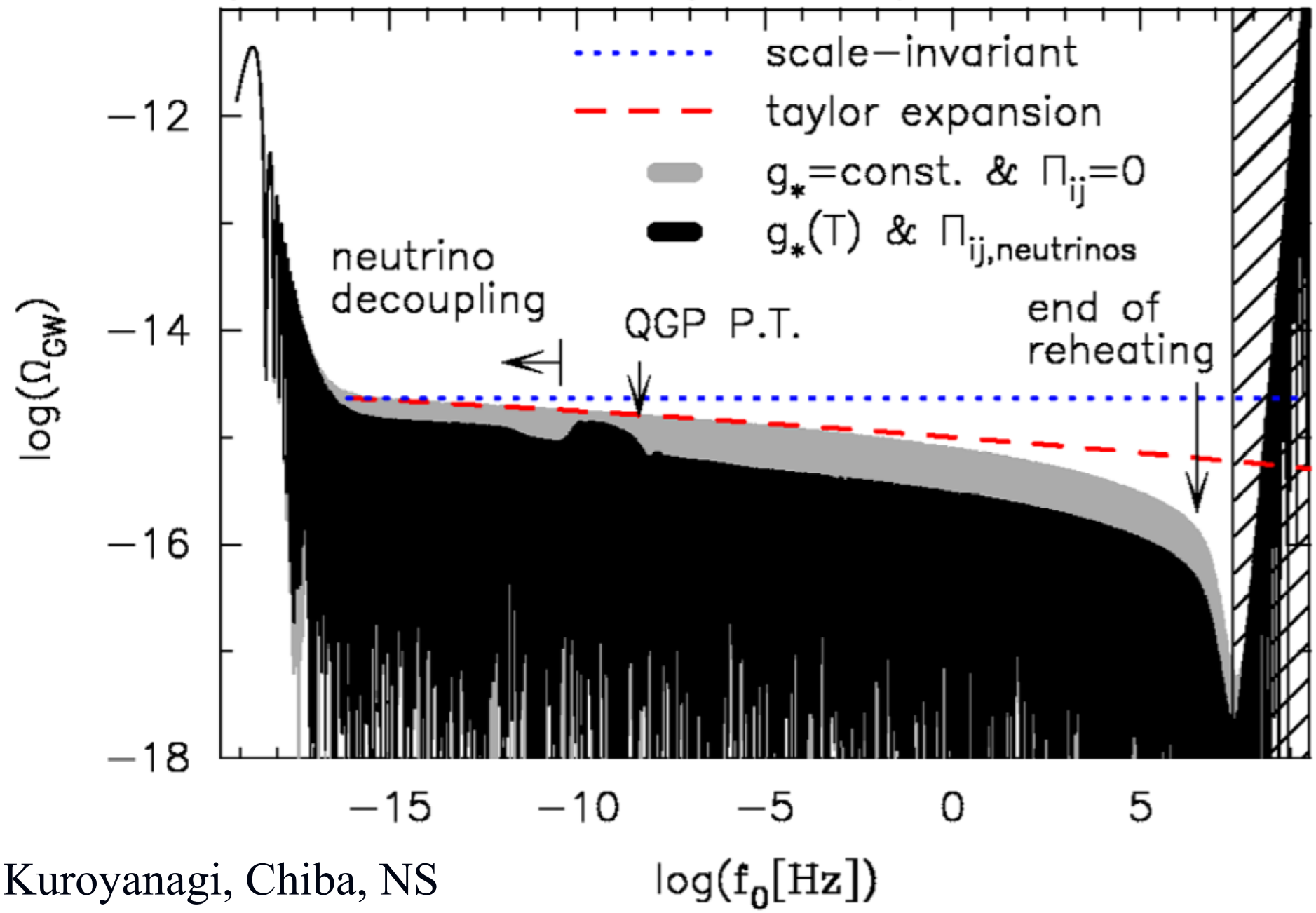
## 2. インフレーションの機構を説明する

- ゆらぎのnon-Gaussianityを測定する
- インフレーションからの重力波を直接検出
  - スペクトルに、reheatingなどの痕跡が残る
  - ついでに、ビッグバンの歴史も刻まれている

## 2. インフレーションの機構を説明する

- ゆらぎのnon-Gaussianityを測定する
- インフレーションからの重力波を直接検出
  - スペクトルに、reheatingなどの痕跡が残る
  - ついでに、ビッグバンの歴史も刻まれている

( chaotic inflation:  $m^2\phi^2$  model )



Kuroyanagi, Chiba, NS

$\log(f_0 [\text{Hz}])$

# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する



### 3. バリオン数生成がいつどのよう に起きたのか解明する

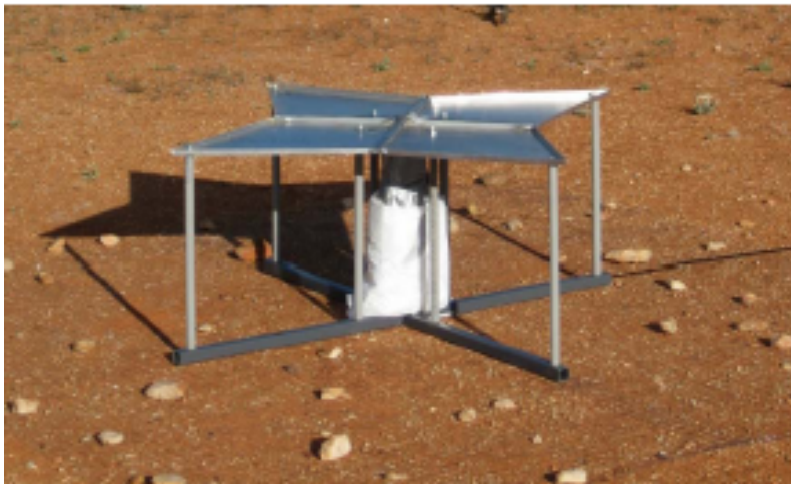
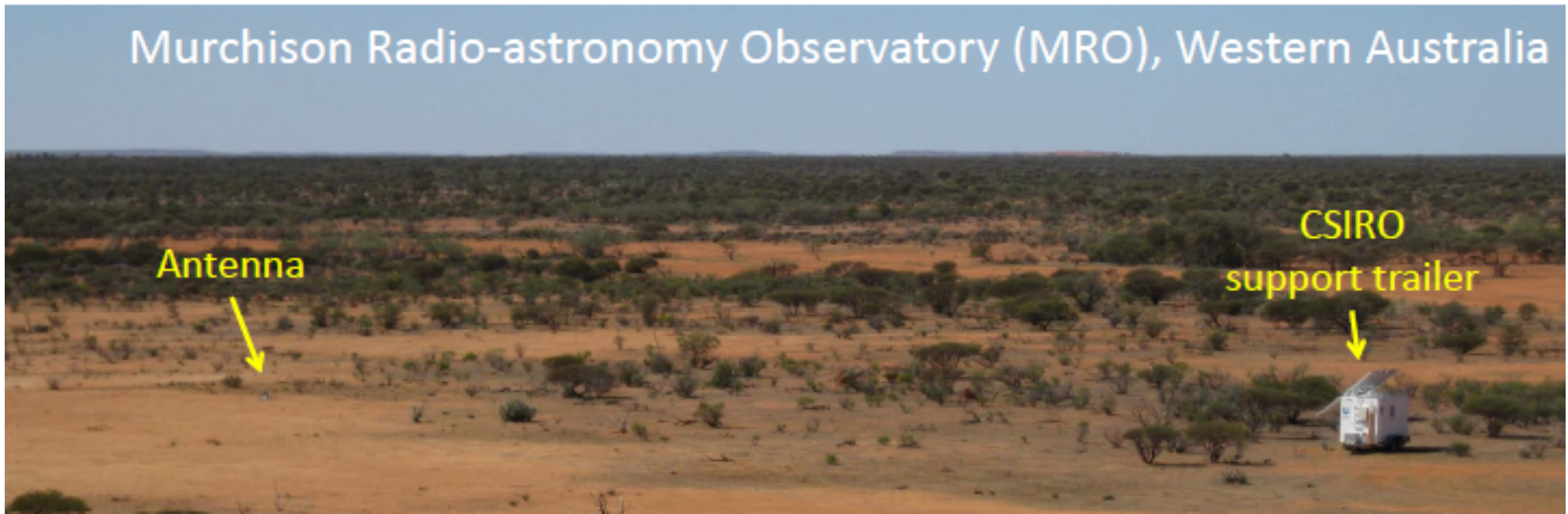
- 素粒子の人、考えてください！

# 4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする

- 中性水素の出す21cm線放射を検出する
  - EDGES @ Australia すでに観測結果を発表
  - LOFAR(蘭)、MWA(豪)、PAPER(南ア)が稼働を始めている
  - SKAが本命
- CMBの偏光 (E-mode)

# EDGES – Experiment to Detect the Global EoR Signature

Murchison Radio-astronomy Observatory (MRO), Western Australia

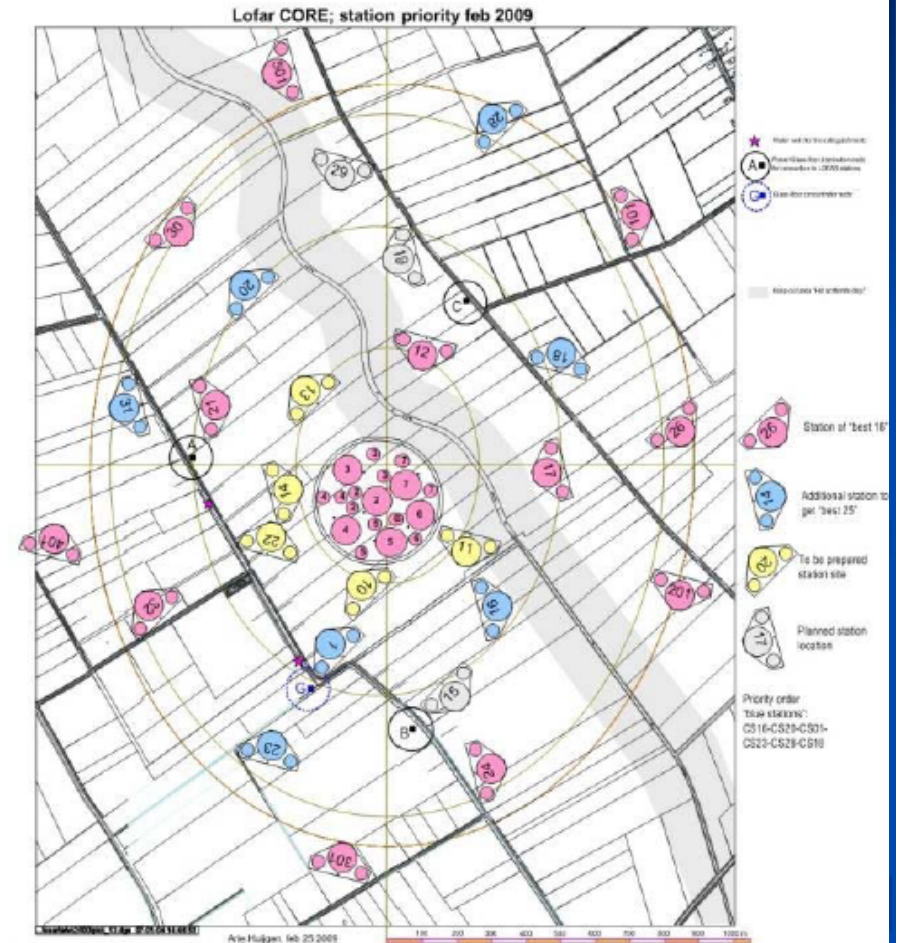
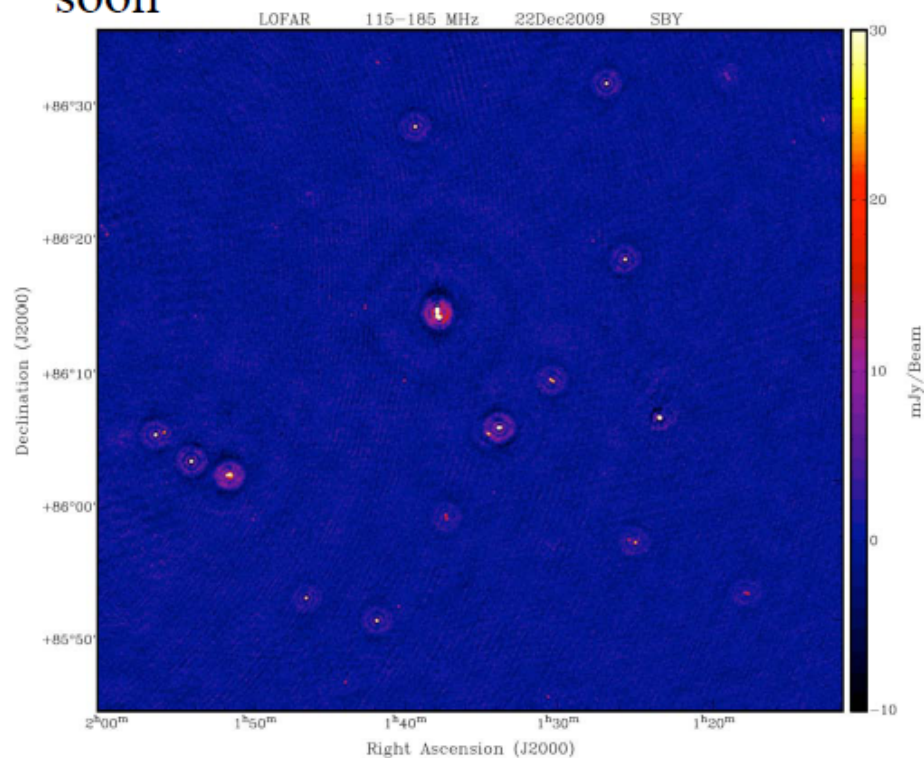


**A lower limit of  $\Delta z > 0.06$  for the duration of the reionization epoch**

J.D. Bowman & A.E.E. Rogers, [Nature 2010](#)

# LOFAR

- 15 Core Stations (where the HBA are split into 2 substations of each 24 tiles)
- 5 Remote stations
- 3 German stations
- Most of the array should be operational by 2010H2
- Million source shallow survey starting soon



Survey image: 10" PSF, 1 mJy noise,  
120-170 MHz, not deconvolved

Ger du Bruyn

# PAPER in South Africa: PSA-32



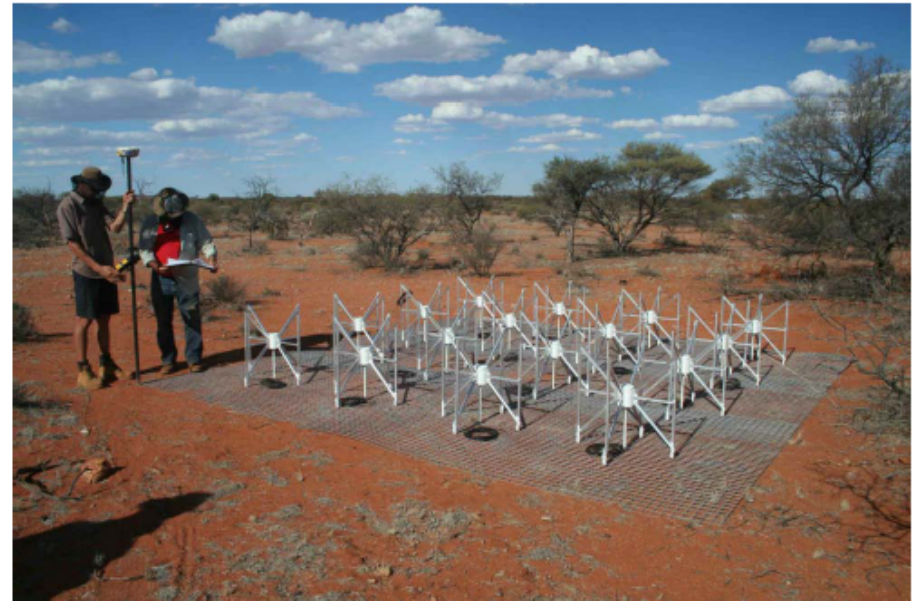
30:43:17.5  
S  
21:25:41.9  
W  
Karoo, ZA

# Murchison Widefield Array (MWA)

**Table 1. MWA Specifications**

Frequency range	80-300 MHz
Number of receptors	8192 dual polarization dipoles
Number of antenna tiles	512
Number of baselines	130,816
Collecting area	~8000 m <sup>2</sup> (at 200 MHz)
Field of View	~15°-50° (1000 deg <sup>2</sup> at 200 MHz)
Configuration	Core array ~1.5 km diameter (97% of area) + extended array ~3 km diameter (3% of area)
Bandwidth	220 MHz (Sampled); 30.72 MHz (Processed)
Spectral channels	1024 (30 kHz spectral resolution)
Temporal resolution	0.5 sec uncalibrated, 8 sec calibrated
Polarization	Full Stokes
Continuum point source sensitivity	20mJy in 1 sec (at 200 MHz full bandwidth); 0.34mJy in 1 hr
Array voltage-beams	32, single polarization

Science: 21 cm cosmology, heliosphere, transients, and Galactic physics



# ビッグバン宇宙の未解決問題

1. インフレーションの存在を証明する
2. インフレーションの機構を解明する  
補題) インフレーションからビッグバンへ、いつどのようにつながっていったのかを解明する
3. バリオン数生成がいつどのように起きたのかを解明する
4. 最初期の星形成を解明し、暗黒時代の終わりを明らかにする
5. ダークマターの正体を解明する
6. ダークエネルギーの正体を解明する

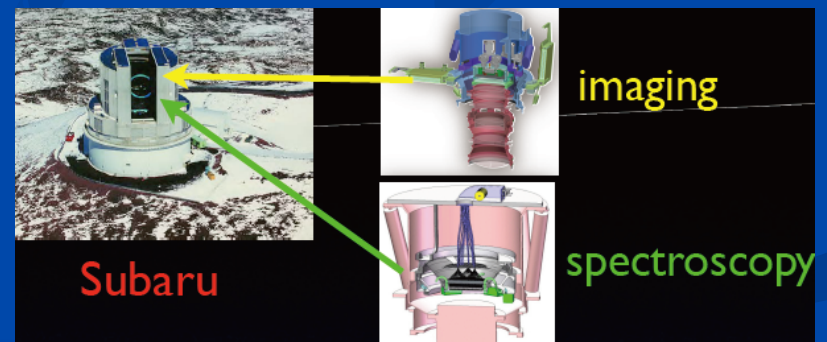
# 5. ダークマターの正体を解明する

- 素粒子なら
  - 直接検出
  - LHCで生成する
- 大規模構造等でその性質に迫る: 吉田氏のトーク



# 6. ダークエネルギーの正体を解明

- 宇宙の加速膨張の時間変化を測定する
  - バリオン音響振動
    - 宇宙の物差し
  - 重力レンズのTomography
    - 密度揺らぎの時間進化
  - たくさんのラインを10年程度の時間を置いて精密測定する
    - 膨張時間進化の直接測定



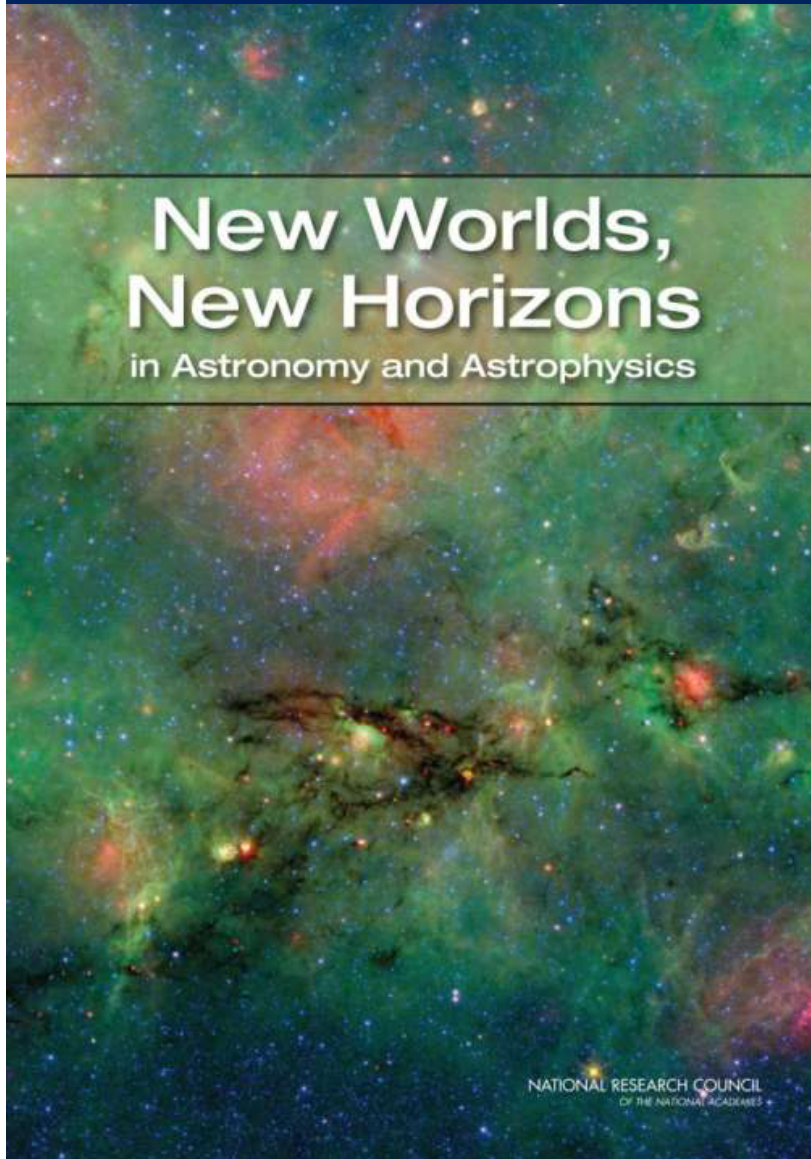
超広視野カメラ＋マルチファイバー分光器

Subaru Measurement of Images and Redshifts (SuMIRe)

# 未来へ

- US Decadal Survey
- 日本学術会議

# US Decadal Survey



## Discovery areas:

- Identification and characterization of nearby habitable exoplanets
- Gravitational wave astronomy
- Time-domain astronomy
- Astrometry
- The epoch of reionization

# Questions

- How did the universe begin?
- What were the first objects to light up the universe and when did they do it?
- How do cosmic structures form and evolve?
- What are the connections between dark and luminous matter?
- What is the fossil record of galaxy assembly and evolution from the first stars to the present?
- How do stars and black holes form?
- How do circumstellar disks evolve and form planetary systems?
- How do baryons cycle in and out of galaxies and what do they do while they are there?
- What are the flows of matter and energy in the circumgalactic medium?

# Questions

- How did the universe begin?
- What were the first objects to light up the universe and when did they do it?
- How do cosmic structures form and evolve?
- What are the connections between dark and luminous matter?
- What is the fossil record of galaxy assembly and evolution from the first stars to the present?
- How do stars and black holes form?
- How do circumstellar disks evolve and form planetary systems?
- How do baryons cycle in and out of galaxies and what do they do while they are there?
- What are the flows of matter and energy in the circumgalactic medium?

# Questions(Cont')

- What controls the mass-energy-chemical cycles within galaxies?
- How do black holes work and influence their surroundings?
- How do rotation and magnetic fields affect stars?
- How do massive stars end their lives?
- What are the progenitors of Type Ia supernovae and how do they explode?
- How diverse are planetary systems and can we identify the telltale signs of life on an exoplanet?
- Why is the universe accelerating?
- What is dark matter?
- What are the properties of the neutrinos?
- What controls the masses, spins and radii of compact stellar remnants?

# Questions(Cont')

- What controls the mass-energy-chemical cycles within galaxies?
- How do black holes work and influence their surroundings?
- How do rotation and magnetic fields affect stars?
- How do massive stars end their lives?
- What are the progenitors of Type Ia supernovae and how do they explode?
- How diverse are planetary systems and can we identify the telltale signs of life on an exoplanet?
- Why is the universe accelerating?
- What is dark matter?
- What are the properties of the neutrinos?
- What controls the masses, spins and radii of compact stellar remnants?

# 3つのターゲット

## ■ 宇宙の夜明け

- Cosmic Dawn: Searching for the first stars, galaxies, and black holes

## ■ 新世界(系外惑星)

- New Worlds: Seeking nearby, habitable planets

## ■ 宇宙の物理

- Physics of the Universe: Understanding Scientific Principles

(1) Dark Energy (2) Dark Matter (3) Inflation (4) black hole & GR



# 大衛星プロジェクト：優先順位

1. Wide Field InfraRed Survey Telescope (WFIRST)  
かつてJDEMと呼んでいたもの。超新星、BAO、重力レンズサーベイによって、dark energy 解明

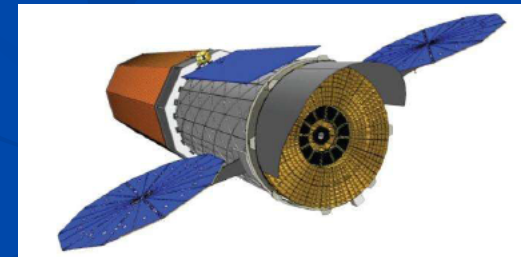
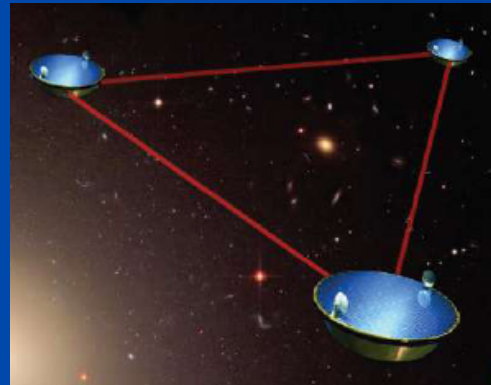
2. 中規模ミッションの増強

3. LISA

スペース重力波

4. IXO

巨大な集光力、高分散分光をもつX線望遠鏡



# 中規模衛星プロジェクト：優先順位

1. New Worlds Technology Development Program
3. Inflation Technology Development Program

地上の観測でB-mode偏光が見えたら、10倍の感度を持つスペースミッションをやるべし

# 大規模地上プロジェクト: 優先順位

1. Large Synoptic Survey Telescope (LSST)  
8.4m口径サーベイ専用広視野望遠鏡(3.5degree)
2. 中規模のオリジナルなミッションをいくつか選考  
たとえば、BigBOSS, CMB, ExoPlanet
3. Giant Segmented Mirror Telescope (GSMT)  
30mクラス望遠鏡(TMT or GMT)  
2020年代中ごろにデータを取り始める?
4. Atmospheric Cerenkov Telescope Array (ACTA)

# 中規模地上プロジェクト：優先順位

1. Cerro Chajnantor Atacama Telescope (CCAT)  
中規模のオリジナルな計画のモデルケース  
25m口径、広視野サブミリ波望遠鏡



# 学術会議

- 「天文学と宇宙物理学の展望と長期計画」(158p)
  - 物理学委員会・天文学宇宙物理学分科会作成
  - シンポジウム開催、40を超えるプロジェクト提案
  - 3つのフラッグシッププロジェクト
    - LCGT
    - TMT
    - SPICA
- マスタープラン策定
  - 学術の大型研究計画検討分科会

# 学術会議

- マスタープラン策定
  - 学術の大型研究計画検討分科会
  - G8の場で配ることができるような「お墨付き計画」
  - 学術全般から43計画
  - 大型施設計画(100億円超)、大規模研究計画(連携)
  - 天文・宇宙系では
    - LCGT
    - TMT
    - SKA
    - Astro-H
    - SPICA
    - SCOPE(地球磁気圏スペース)
    - 太陽系進化の解明を目指す宇宙開発探査・開発プログラム

# まとめ

- 宇宙論は、インフレーション+ビッグバンという標準モデルを手に入れた
- しかし、dark energy, dark matterが必要
- インフレーションも詳細は不明
- 今後、巨大プロジェクトが予定されている

# 素粒子との比較

## 素粒子

- 標準モデルの確立  
1983年まで
- B-factory、日本では筑波に、  
1998年に完成、建設に378  
億円
- 残された謎はヒッグス粒子
- LHC加速器を建設  
世界で1個、\$9Billion
- 国際線形加速器もpropose  
世界で1個、1兆円？

## 宇宙論

- 標準モデルの確立  
2000年まで
- すばる望遠鏡、1999年に完  
成、建設に400億円
- 残された謎はdark matter,  
dark energy
- ALMAを建設  
世界で1個、1000億円
- 30m望遠鏡等を建設？  
世界で2個？、1000億円？



巨大科学を推し進めると滅びる！



生き延びた哺乳類

