

CMB偏光で探る宇宙 構造と宇宙暗黒時代

名古屋大学大学院理学研究科

(4月から素粒子宇宙起源研究機構 併任)

IPMU

杉山 直

宇宙の3大暗黒問題

宇宙を支配する2つの成分

暗黒エネルギー、暗黒物質

宇宙全体の進化、構造の形成などを支配する

宇宙の最初の星が輝く前の時代

暗黒時代

宇宙の夜明け前、銀河・星の形成前史

現代宇宙論の3大暗黒問題

■ 暗黒エネルギー

宇宙全体の膨張を支配している

『反重力』つまり、引力ではなく斥力として働く
その結果、膨張を加速させる

■ 暗黒物質

宇宙の物質の大部分を占めている

通常重力を及ぼす『物質』

ただし、光（電磁波）では見ることができない

暗黒時代:ビッグバンのミッシングピース

暗黒時代

宇宙マイクロ波が輝いていた時代、宇宙誕生後38万年から、最初の星が輝いた数億年の時代まで。

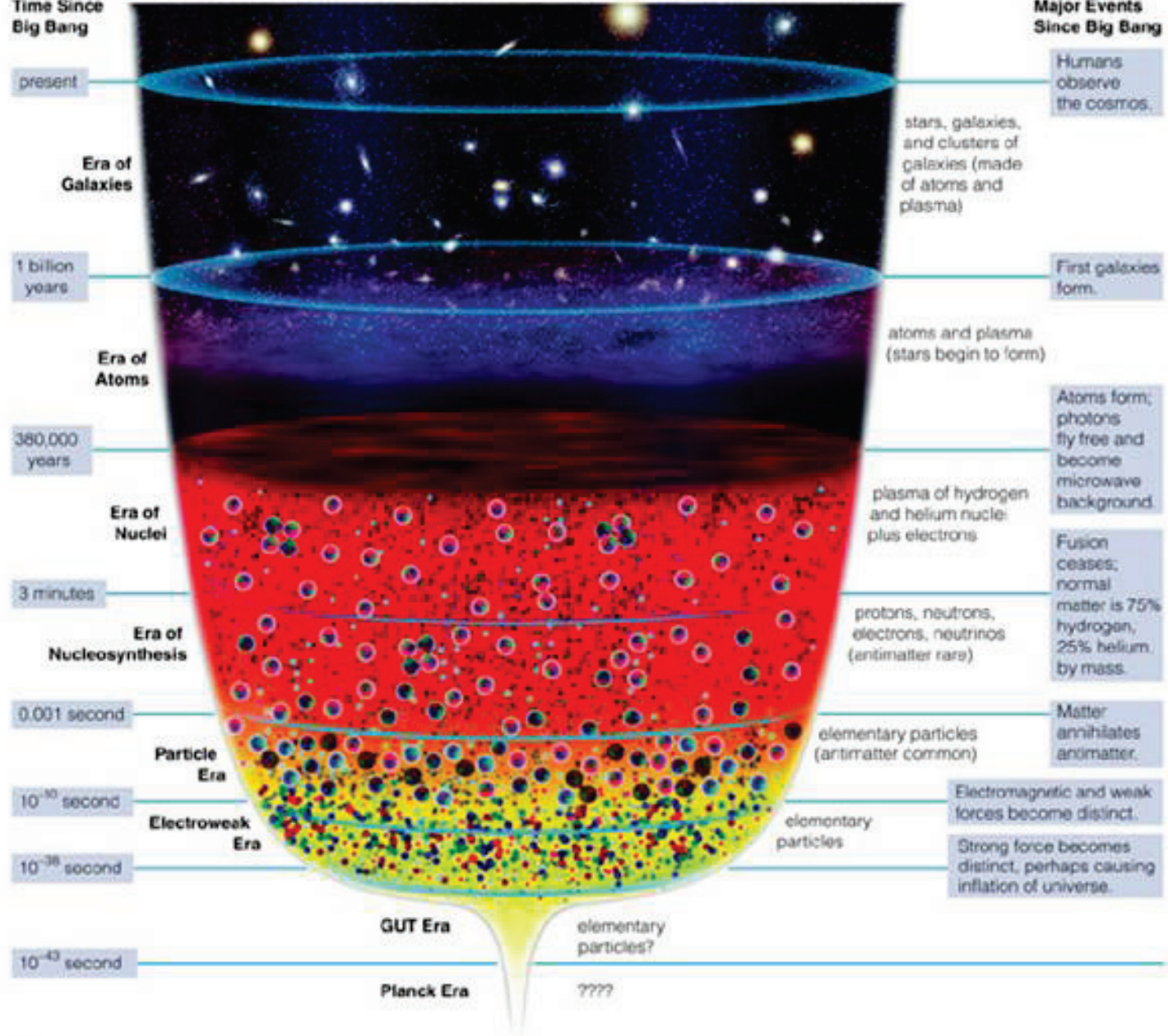
直接、光では観測できない:しっぽを捕まえる

■ いつ終わったのか

- 最初の星はいつ輝いたのか？

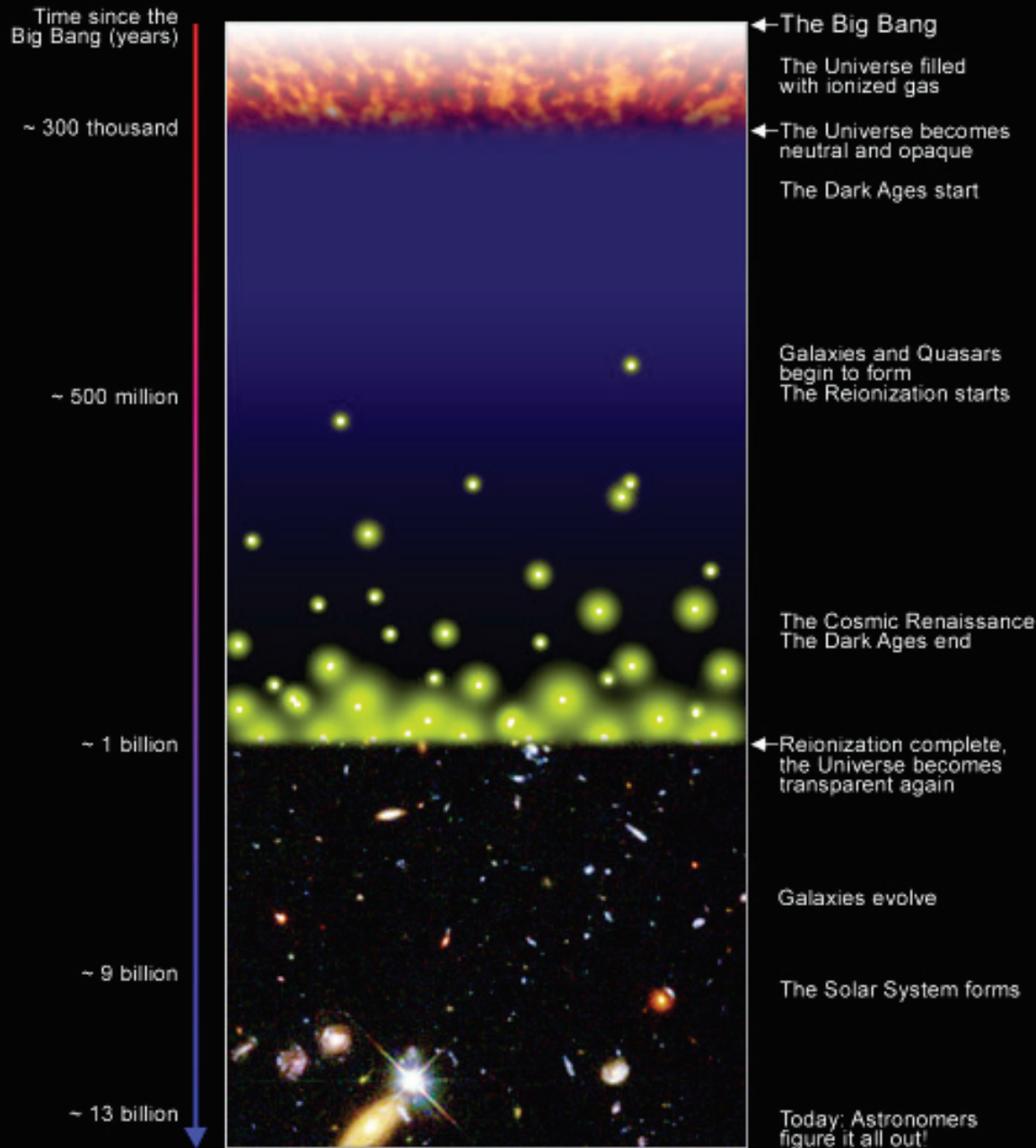
■ どのように終わったのか

- 徐々に星は輝きはじめたのか、一気にあらゆる場所で輝きはじめたのか
- 最初の星の重さは？



What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History



S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

晴れ上がり
38万年

暗黒時代
最初期星形成

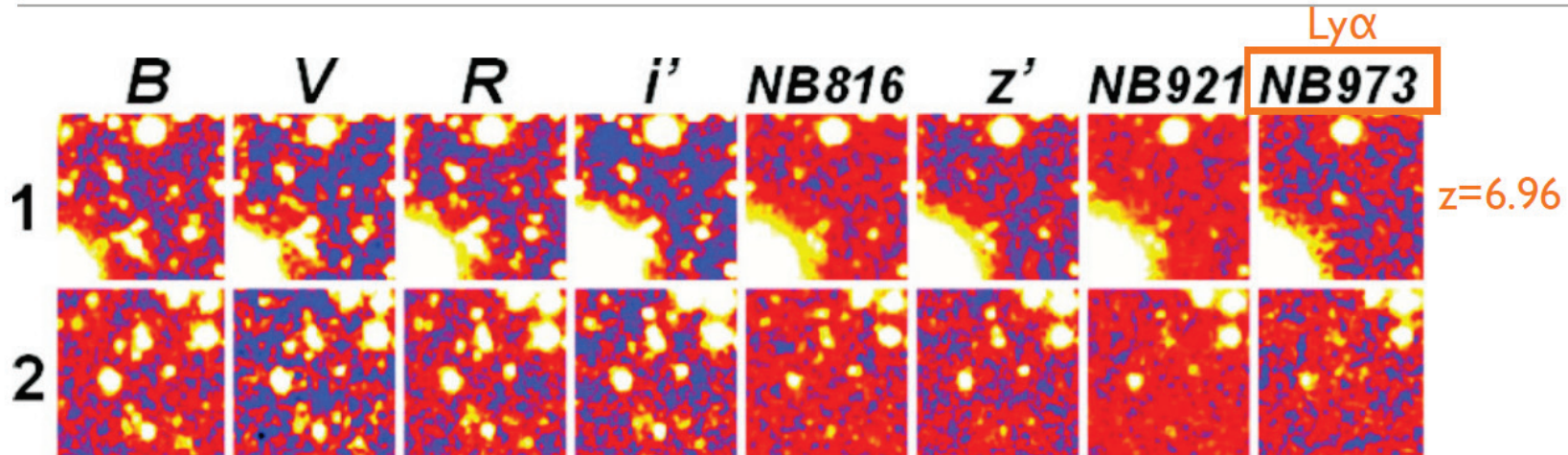
再加熱
reionization

人類が見ることのできている最も 遠く＝始まりの宇宙

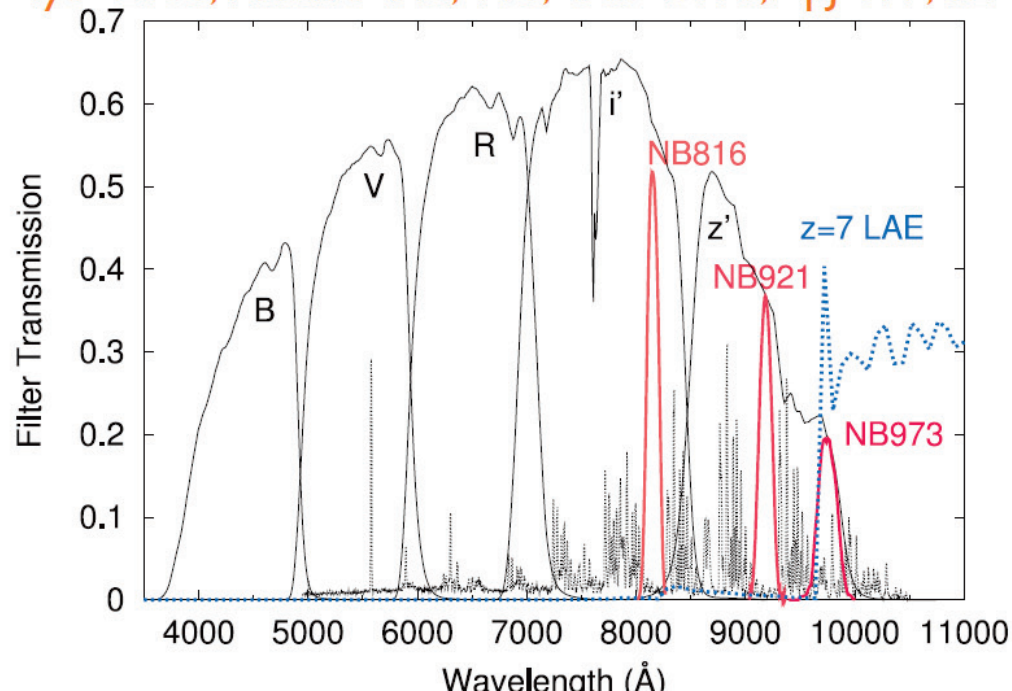
- すばる望遠鏡のかつての世界記録、宇宙誕生から7億8千万年(129億光年かなた)
 - Lyman-alpha emitter: Ly alphaで輝いている
 - 赤方偏移 $z=7$
- ハッブル宇宙望遠鏡の新しい赤外線カメラWFC3で、続々と見つかри始めている
 - Lyman-break Galaxy: Lyman limit@912Å より高エネルギーのphotonがすべて周囲の中性水素ガスに吸収される
 - $z\sim 7$ では、赤方偏移される。赤外線の観測が必要

Lyman α Emitters: $z=7$

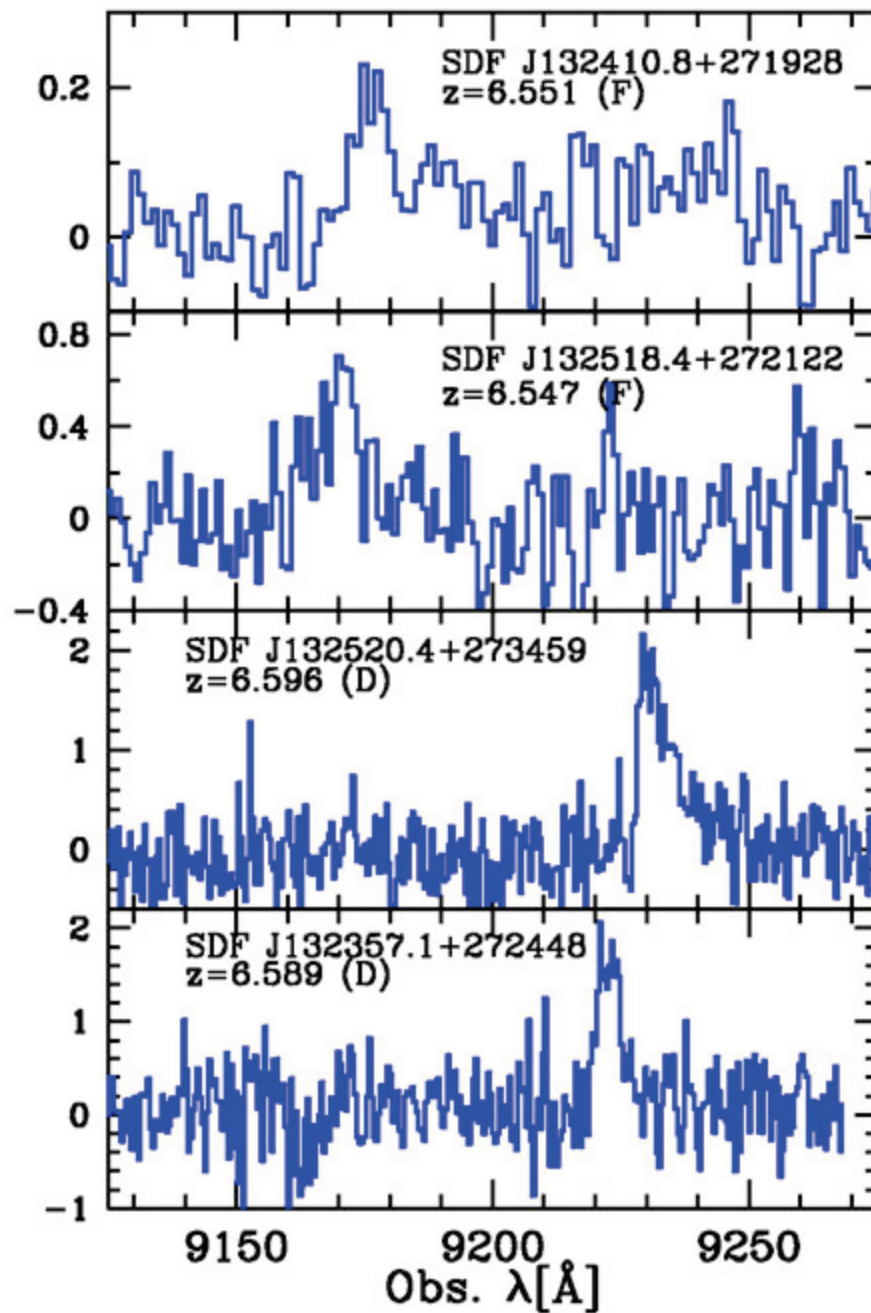
$$1260 \times (1+7) = 10080$$



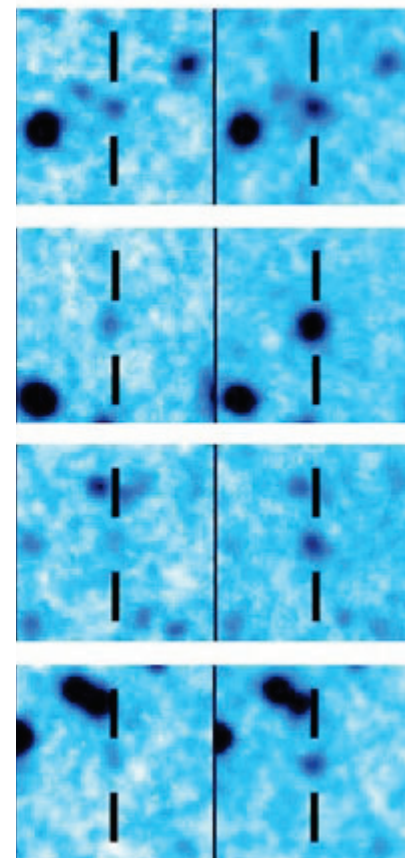
Iye+2006, Nature 443, 186; Ota+2008, ApJ 677, 12



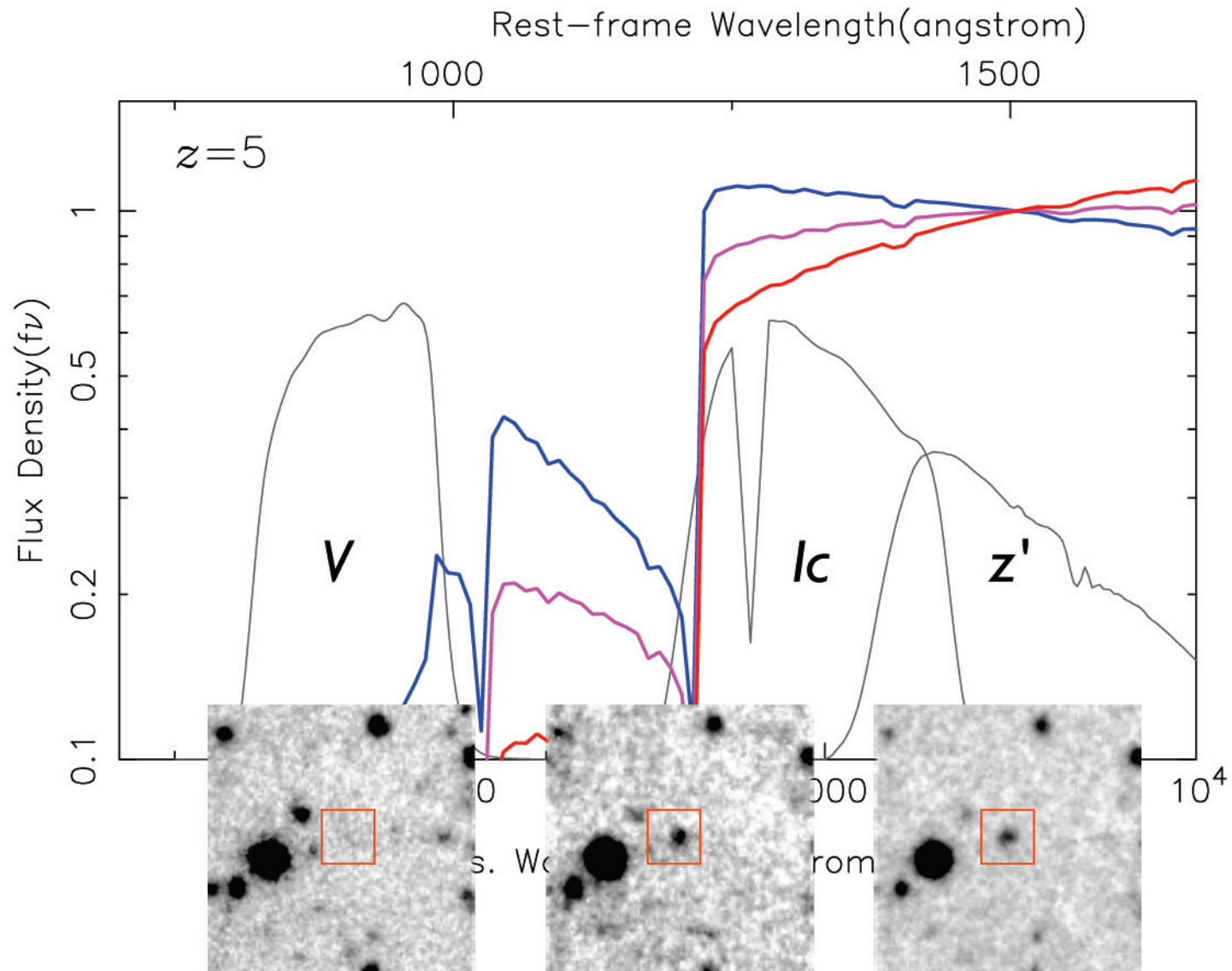
Flux [10^{-18} erg/cm²/s/Å]



z' NB921

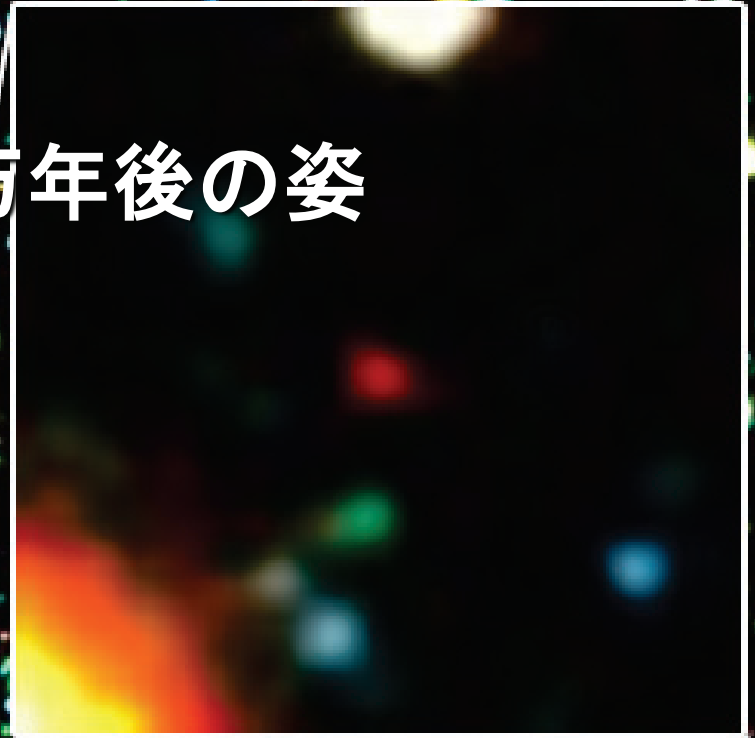


Lyman Break Galaxies



すばる望遠鏡が見つけた遠方の銀河
(最近まで世界記録)

宇宙誕生後、わずか7億8千万年後の姿
約129億年前の宇宙



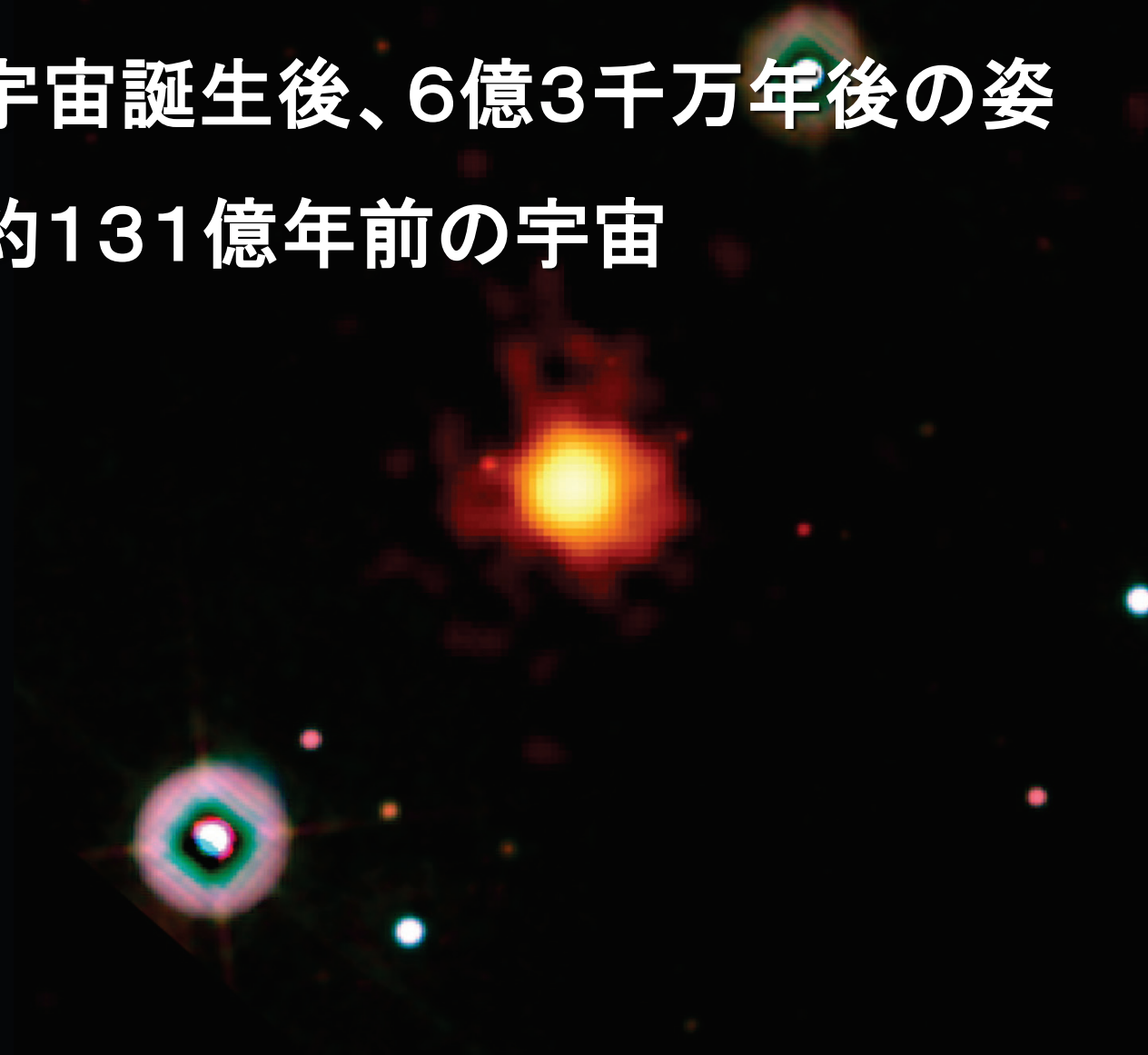
人類が見ることのできている最も 遠く＝始まりの宇宙

- 2009年4月に届いた、ガンマ線バーストという星の爆発からの光が、宇宙誕生後6億3千万年(131億光年かなた)であることがわかった

スペクトル: 1.1ミクロンでのdrop: $z=8.2$

宇宙誕生後、6億3千万年後の姿

約131億年前の宇宙



ガンマ線バースト: GRB 090423

人類が見ることのできている最も 遠く＝始まりの宇宙

- 2009年4月に届いた、ガンマ線バーストという星の爆発からの光が、宇宙誕生後6億3千万年(131億光年かなた)であることがわかった

$z=8.2$

これが今のところの世界記録！
これ以上は無理？



CMBでは、これより前の宇宙を見ることが可能

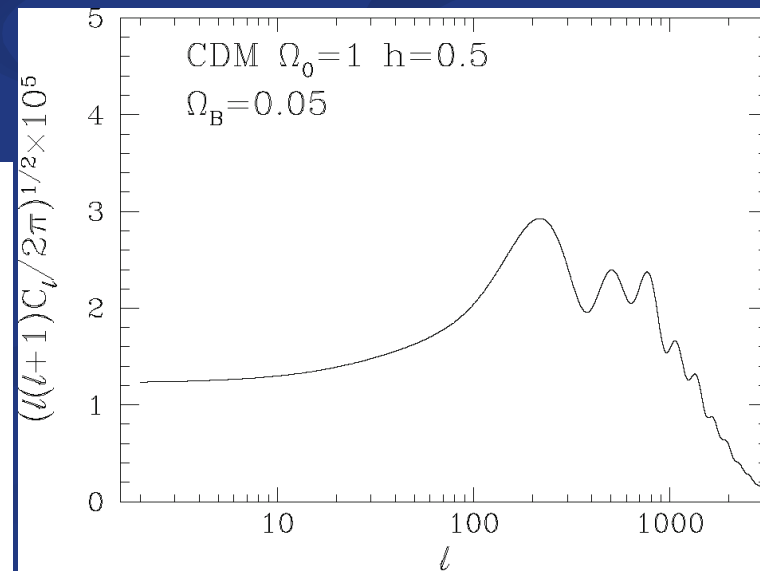
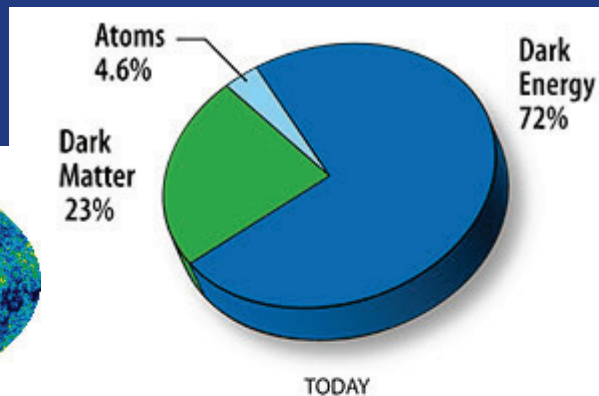
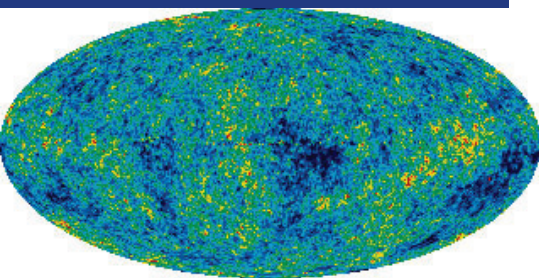
CMBが教えてくれること

■ 温度揺らぎ

- 宇宙初期に仕込まれた揺らぎが発展
- 音波モードの振動
 - 物理的な大きさが物質やバリオンの密度で決定
 - 観測によって、宇宙論パラメーターを決定できる

晴れ上がりは38万年

$z=1090$



Optical Depth τ

- 再加熱の後、宇宙は、本当に透明(中性)か？
- 答えは: NO!

赤方偏移 $z < 6$ では、銀河間にある水素ガスは、電離している → 大量の自由電子が、光子と相互作用する

- 星や活動銀河核(AGN, quasars)がイオン化光子 $E > 13.6\text{eV}$ を放出する

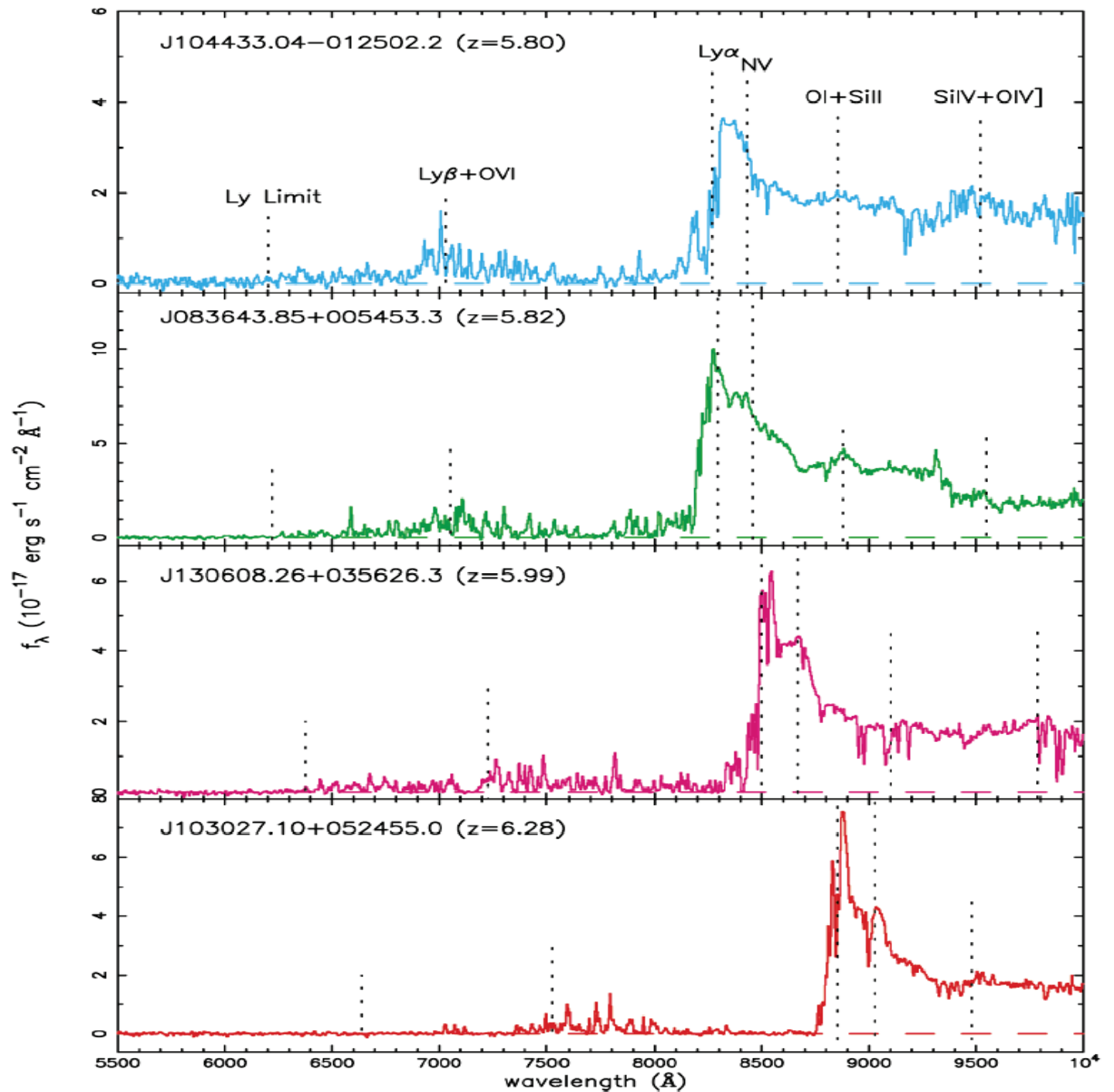


宇宙はじつは、少しだけ曇った状態

Gunn-Peterson effect

- 中性ガスが存在していれば、クエーサーの光りが吸収を受ける (Ly-alpha)
- 赤方偏移をしながら、絶えず受け続けるので 1260Å より長波長側、削られる
- $z < 6$ のクエーサーは吸収をあまり受けていない: 中性水素の割合、1% よりも少ない
- $z > 6$ になると、中性水素が 1% を超え、吸収が顕著

Becker et
al. AJ122,
2850



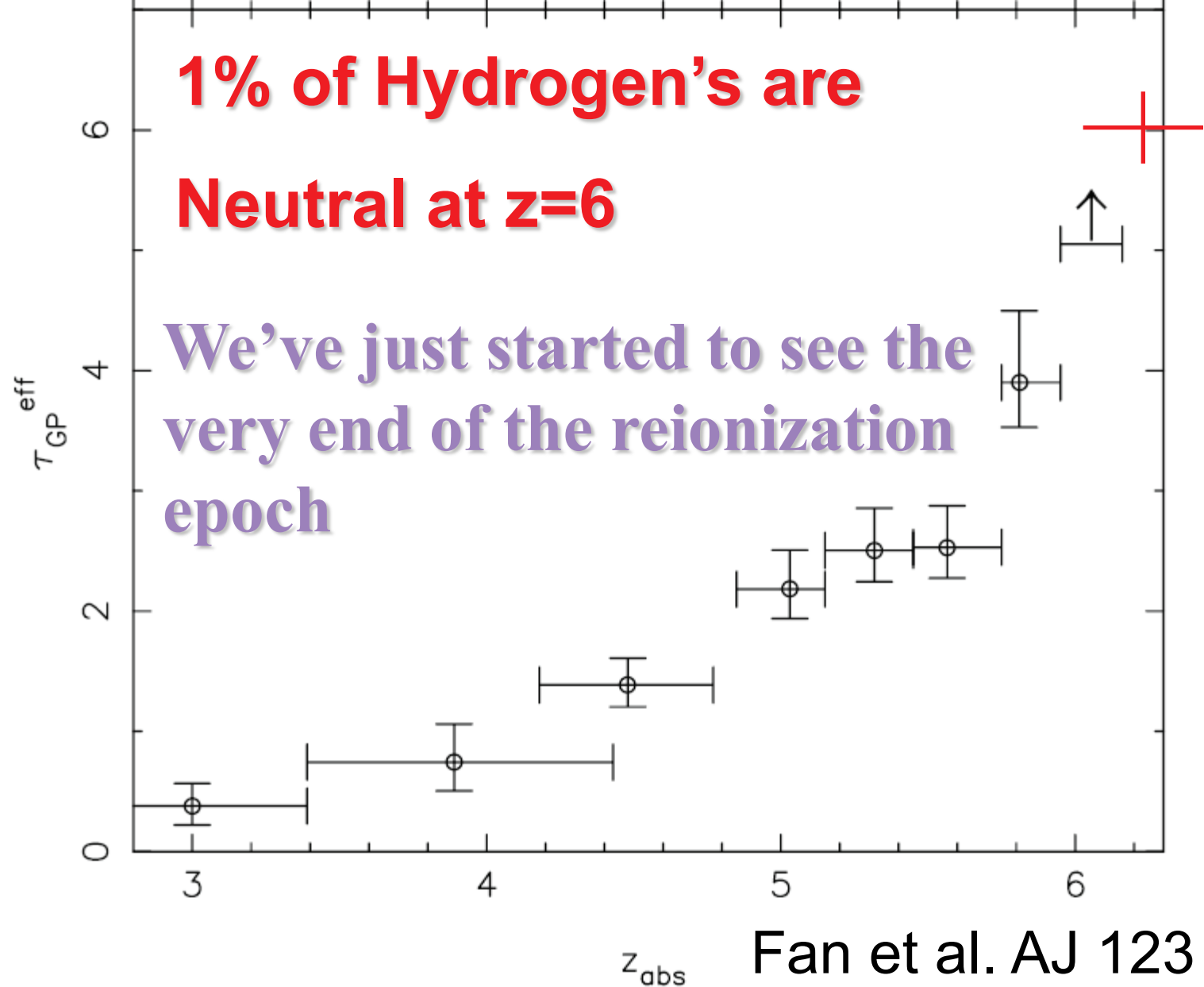


FIG. 1.—Evolution of Ly α absorption based on the observations of four quasars at $z > 5.7$ in Fan et al. (2001c), Becker et al. (2001), and Paper III. The results at $z_{\text{abs}} < 5.6$ are averaged over four lines of sight, and the error

宇宙マイクロ波背景放射

- イオン化されたガスが、光子にトムソン散乱を及ぼす
 - 温度揺らぎをdampさせる
 - イオン化された領域の運動により、温度揺らぎを引き起こす(ドップラー効果)
 - 散乱により、偏光を生む
 - Modulationにより、Bモード偏光も生じる

Define Optical Depth of Thomson Scattering as

$$\tau \equiv \int dt n_e \sigma_T$$

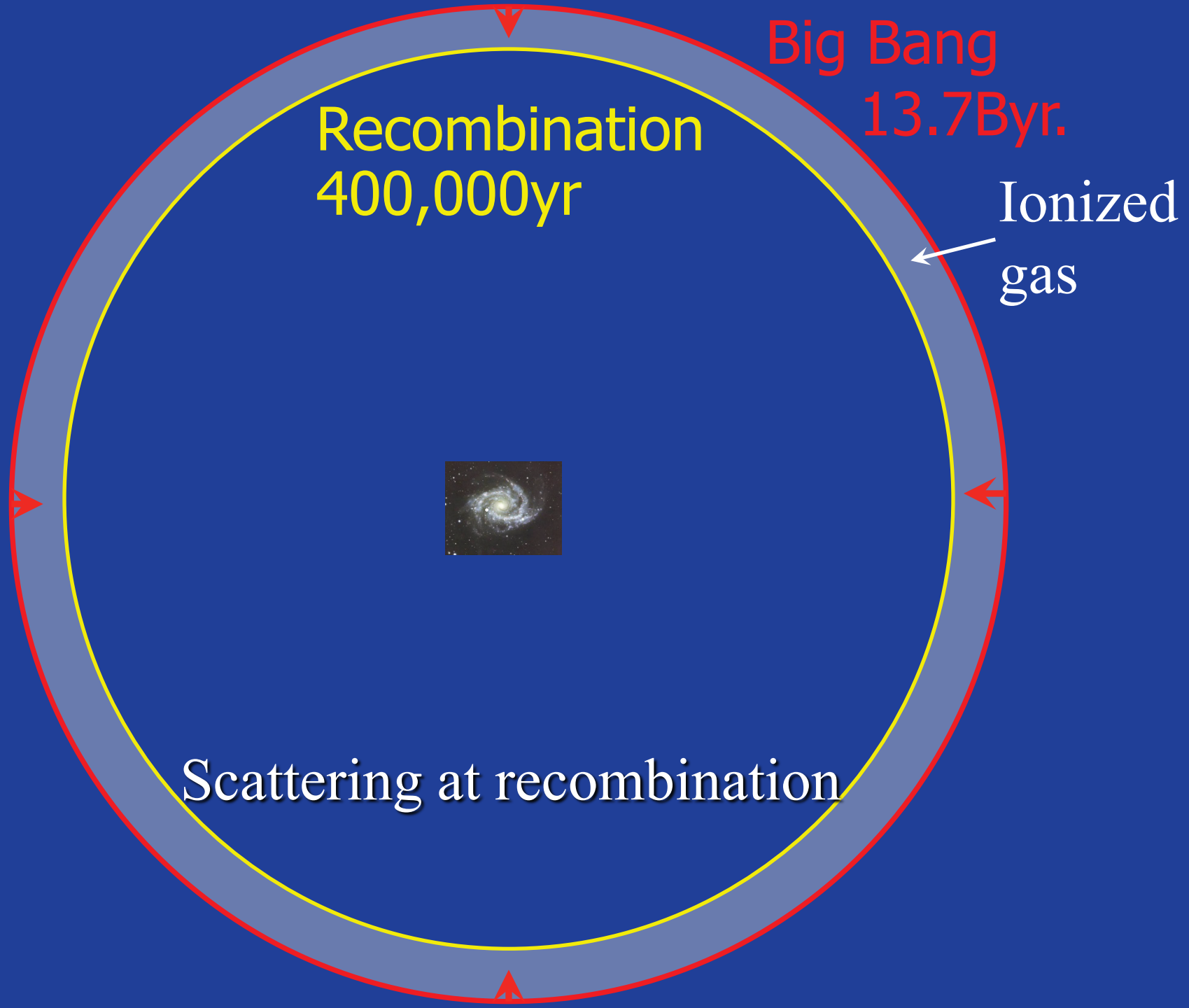


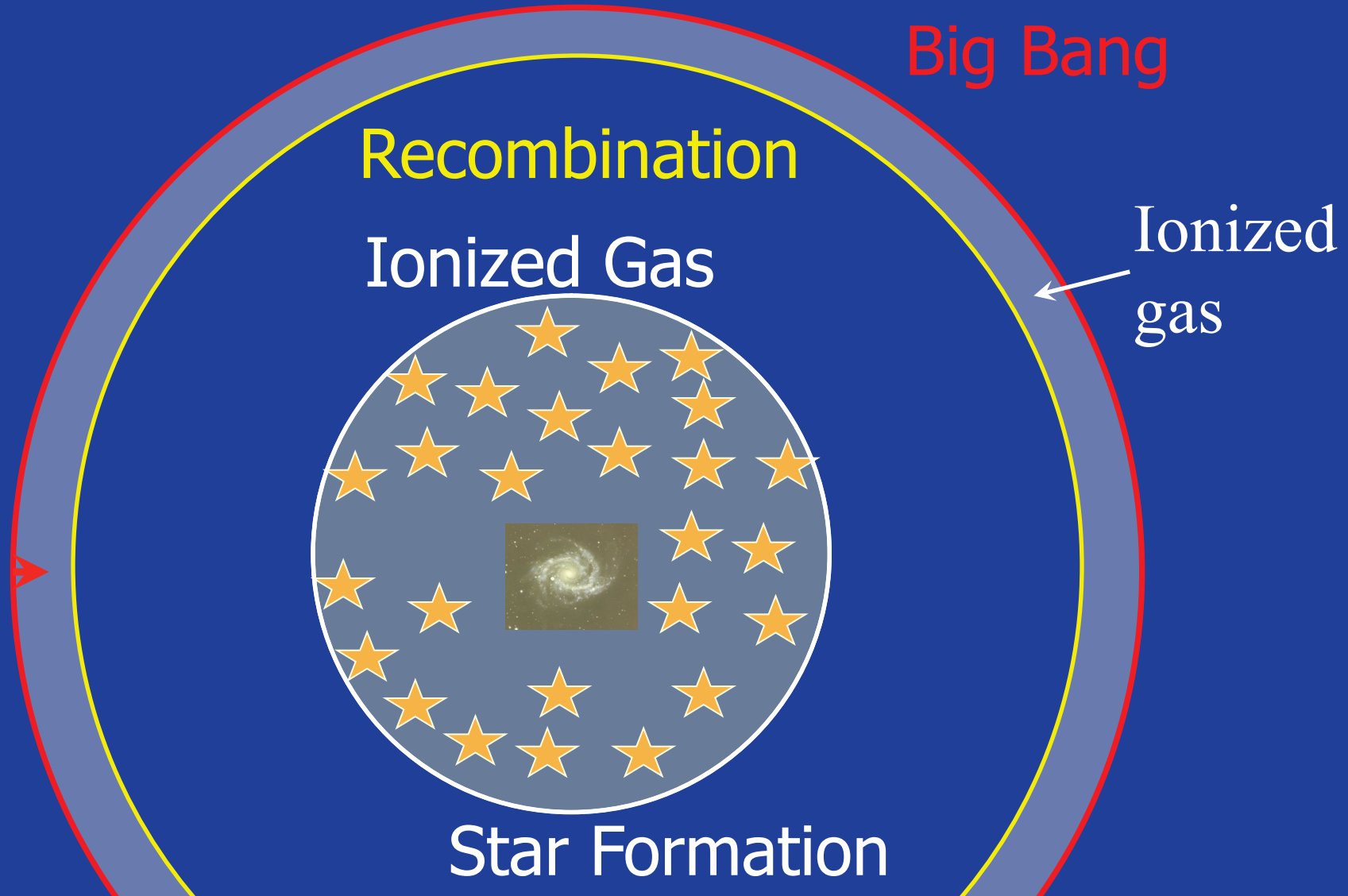
Temperature Fluctuations are Damped as

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

τ can be a probe of the epoch of reionization
(first star formation).

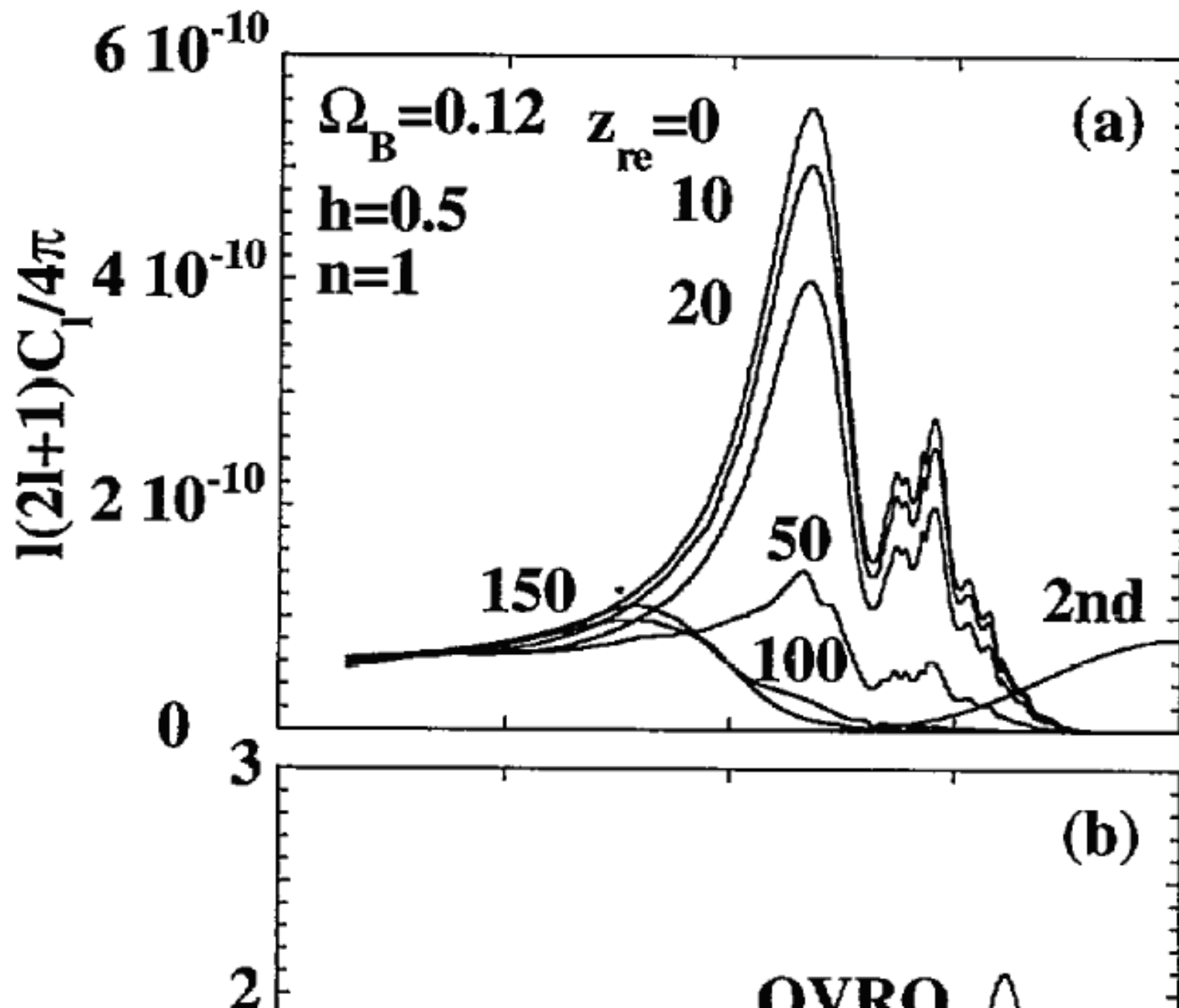
(Polarization is very important clue for reionization)





Some photons last scattered at the late epoch

Temperature Fluctuations Damped away on the scale smaller than the horizon at reionization



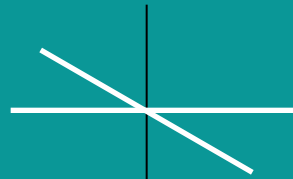
宇宙再加熱

- 温度揺らぎを消す
- 偏光を生み出す

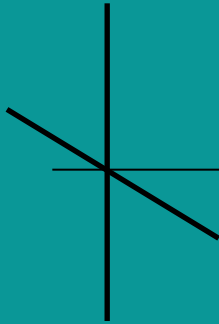
トムソン散乱による

Incoming
Electro-Magnetic
Field

Same Flux



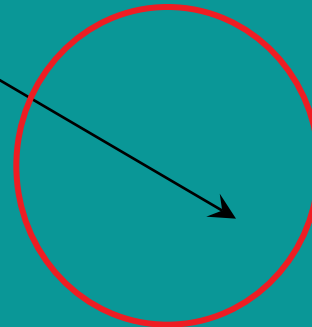
Same
Flux



No-Preferred
Direction
UnPolarized

Electron

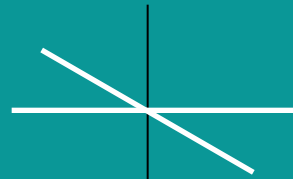
scattering



Homogeneously Distributed Photons

Incoming
Electro-Magnetic
Field

Weak Flux



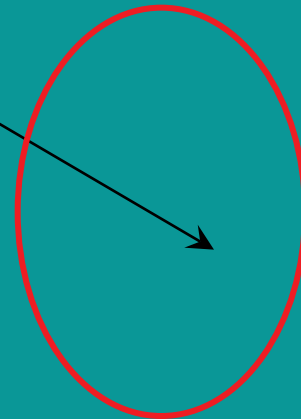
Preferred
Direction
Polarized

Strong
Flux



Electron

scattering

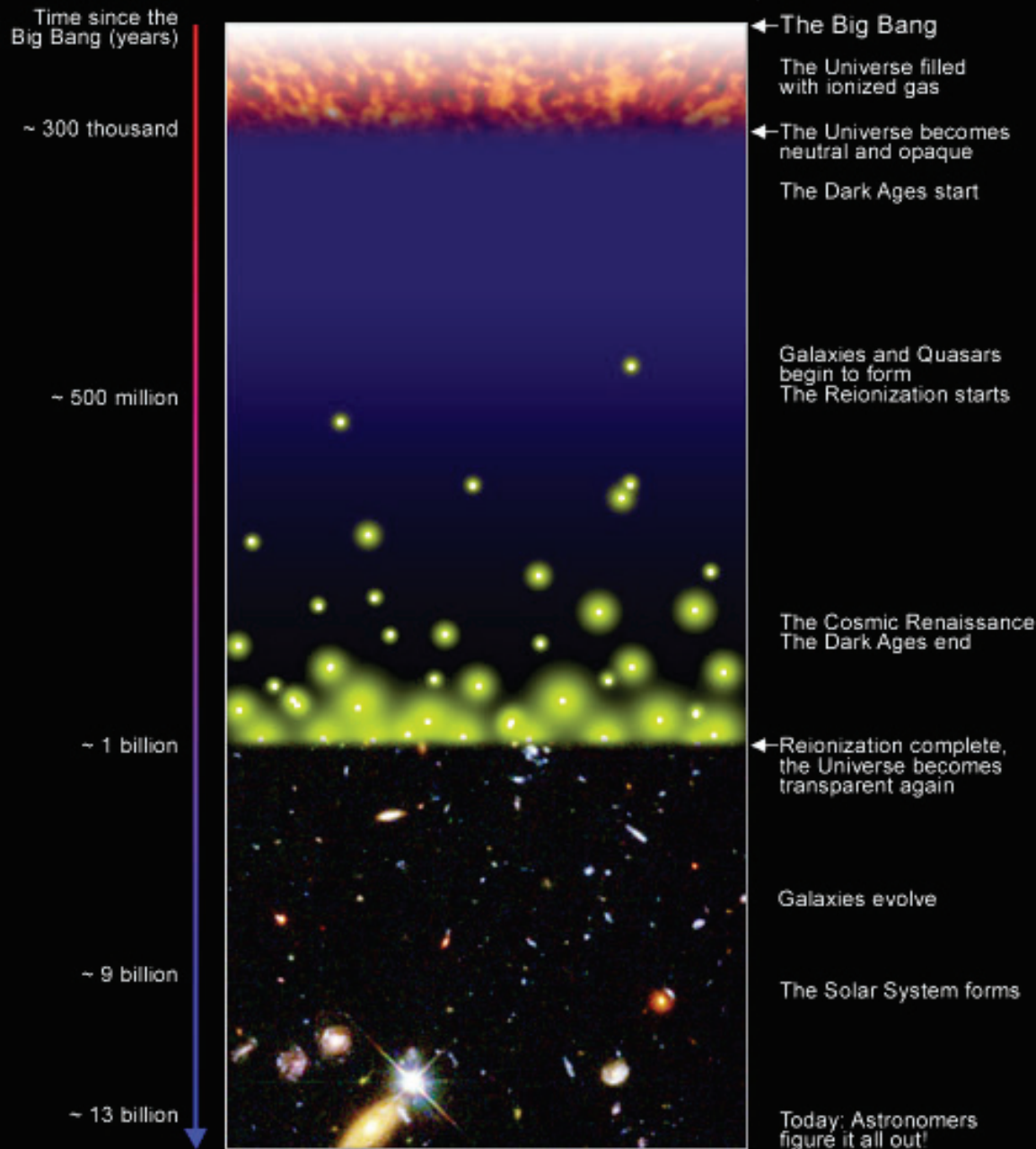


Photon Distributions with the Quadrupole Pattern

偏光は、光子が最後に散乱した情報を残している！

What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History

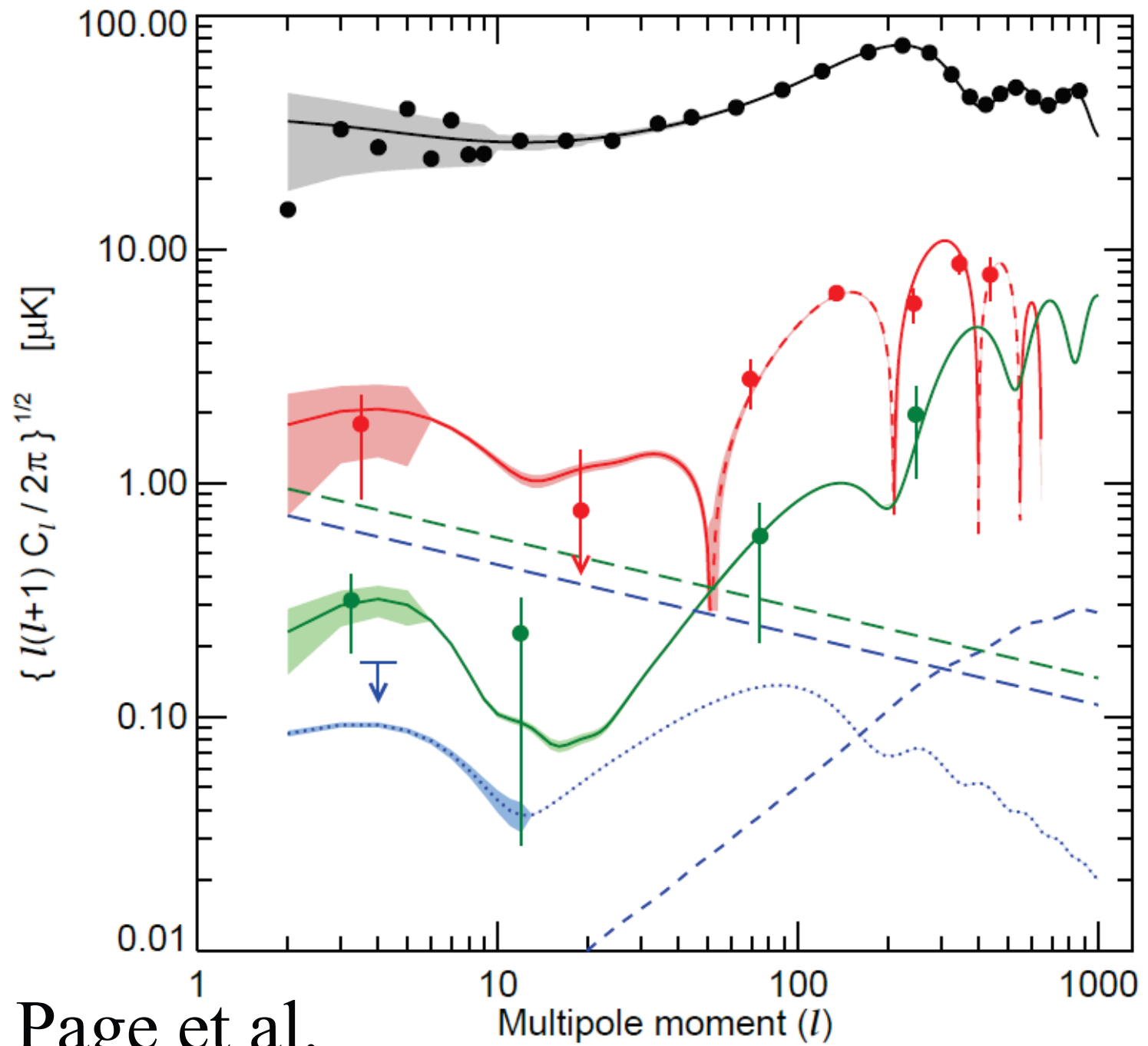


S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

CMBの温度揺らぎと偏光
には

暗黒時代が

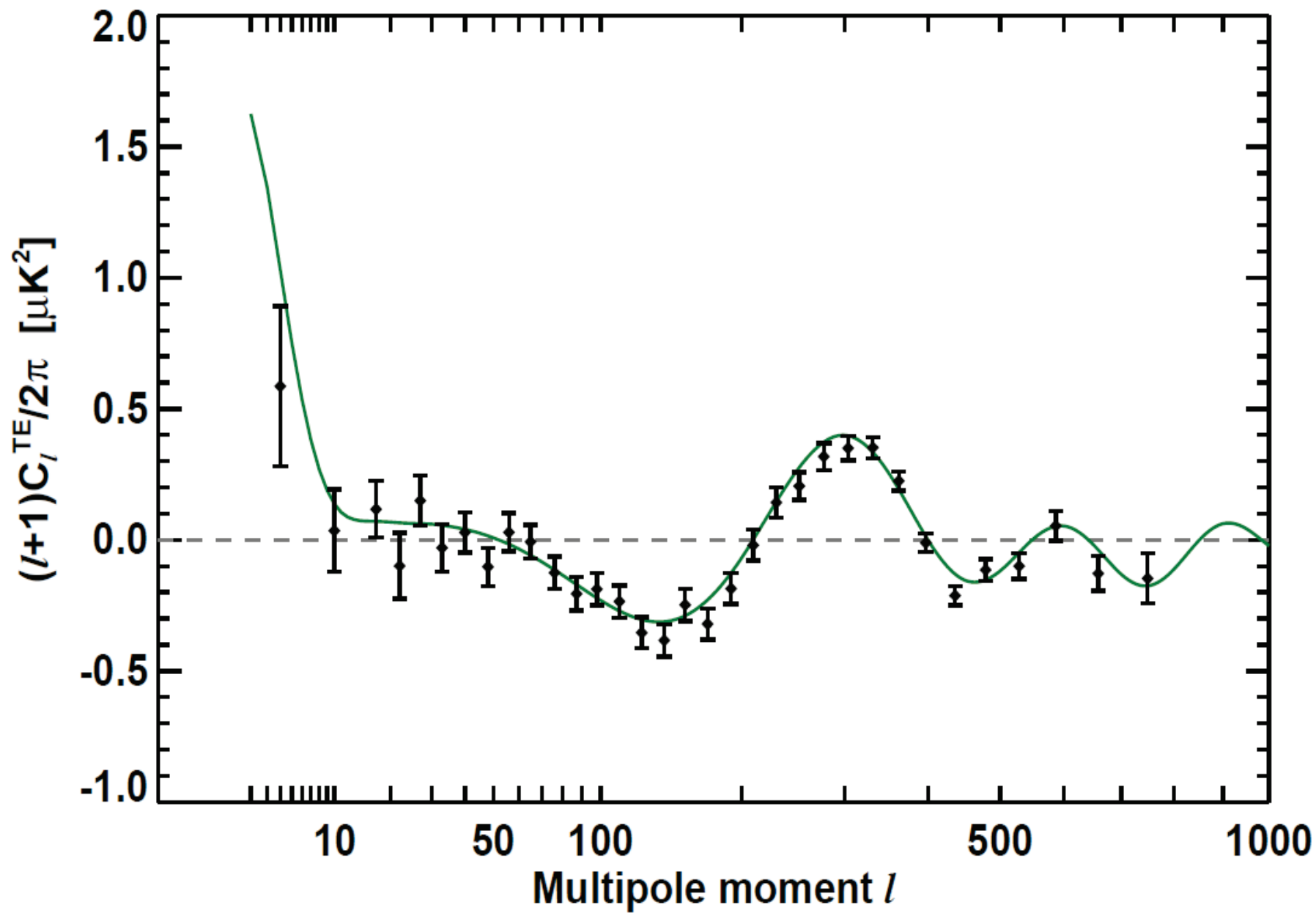
- ・いつ
 - ・どれだけの時間かかって
 - ・どのように
- 終わったのか
の情報が含まれている

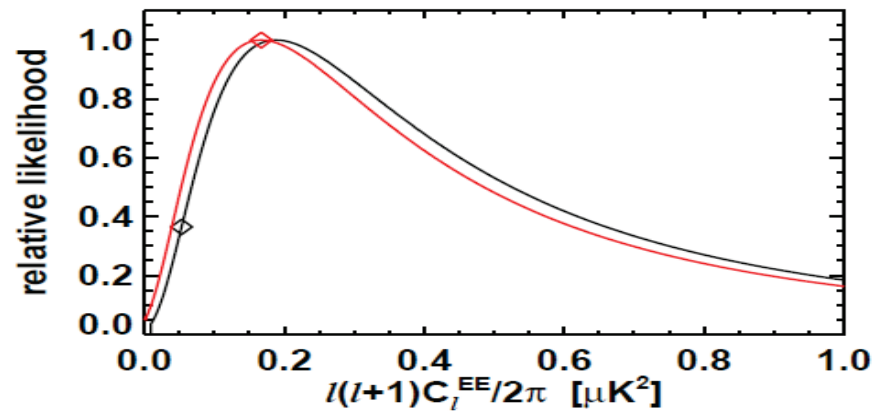
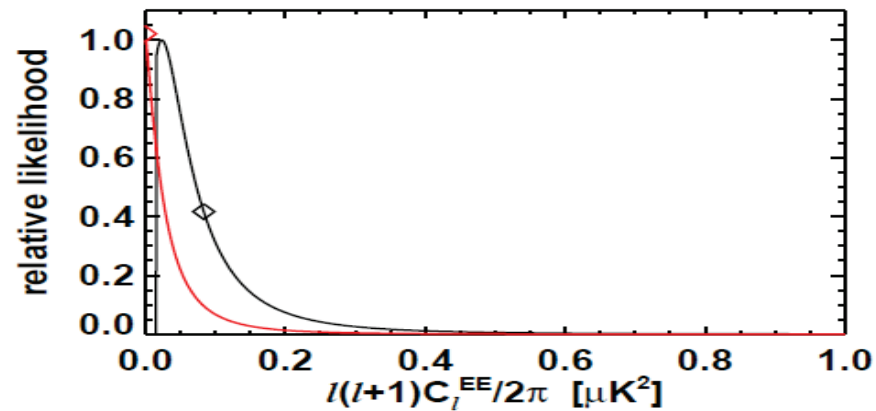
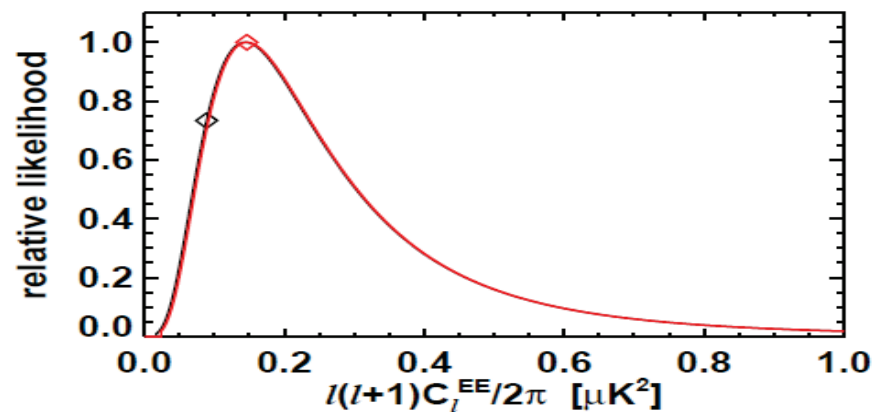
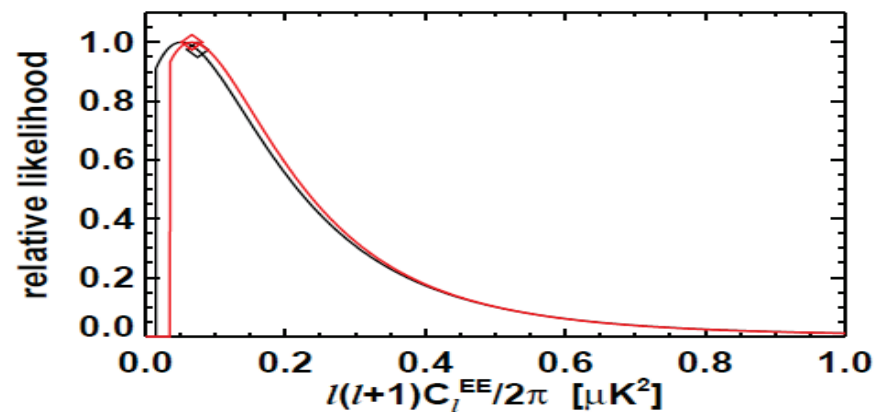
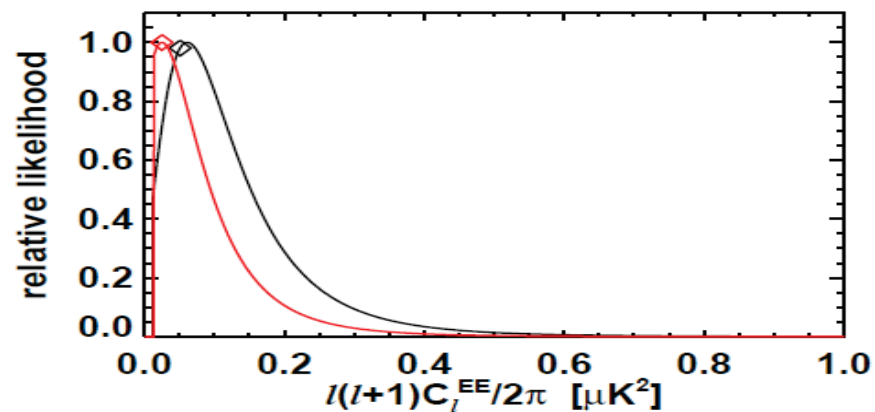
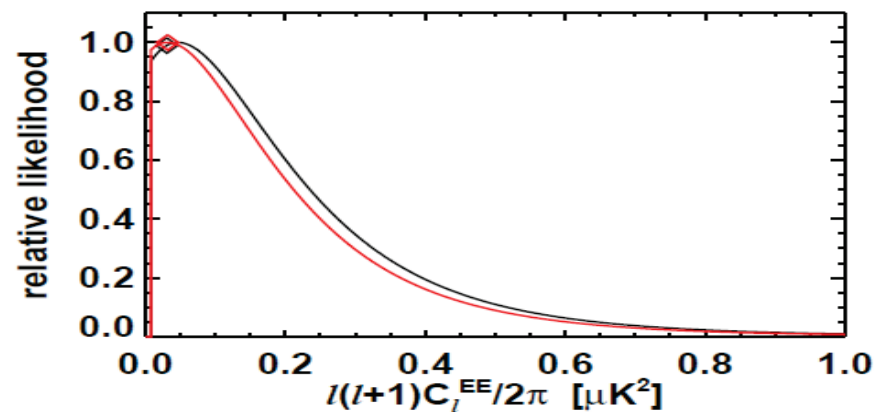


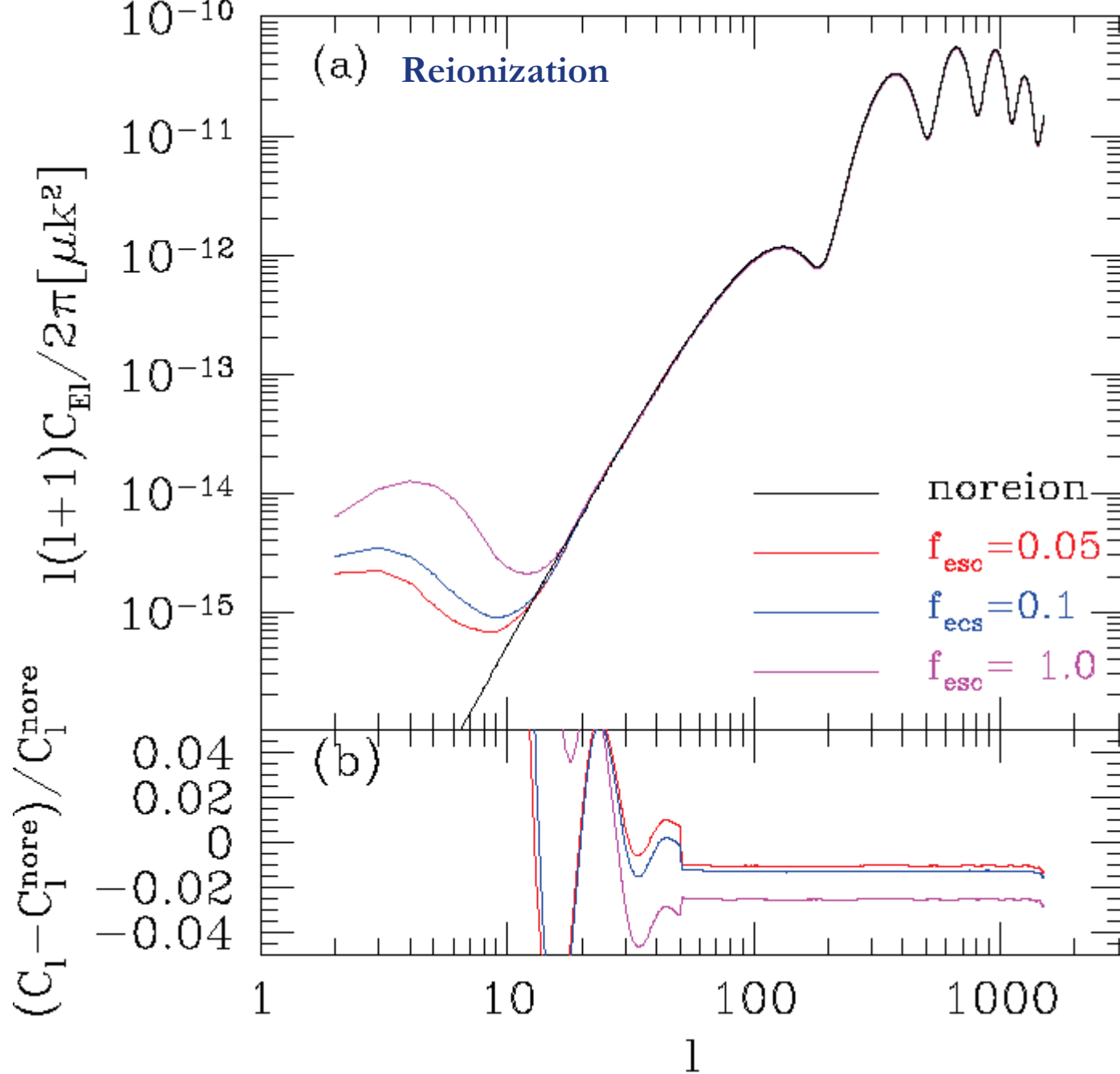
Page et al.

WMAP 7yr data

- Optical depth $\tau=0.088 \pm 0.015$
 $z=10.5 \pm 1.2$
- 特に、EEが、 $l=2-7$ で、 5.5σ で測定された
- どれだけの期間、reionizationが続いたのか
 - まだパラメターとして入れた段階で、それに対する制限は論文には与えられていない
 $\tau=0.088 \rightarrow 0.087$ へ
- どのように、空間的に進行していったのか？
 - WMAPでは答えられない



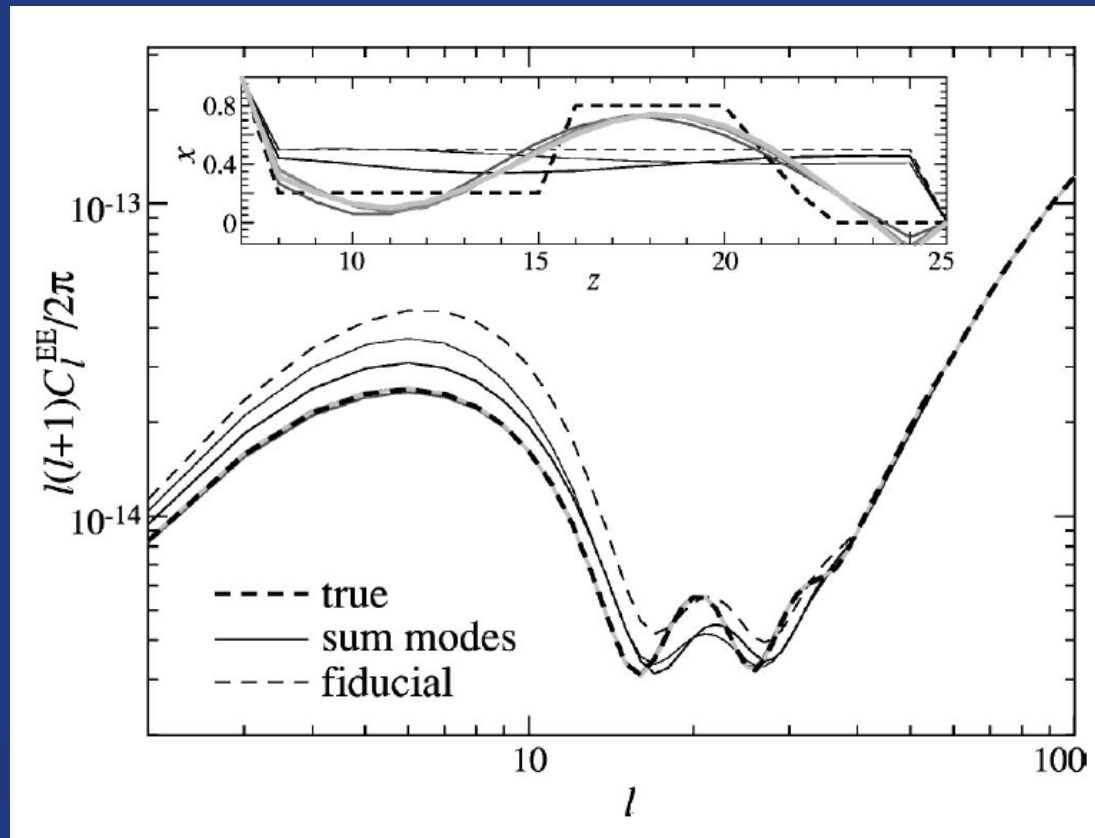
$l = 2$  $l = 3$  $l = 4$  $l = 5$  $l = 6$  $l = 7$ 



大角度スケールのEモード偏光

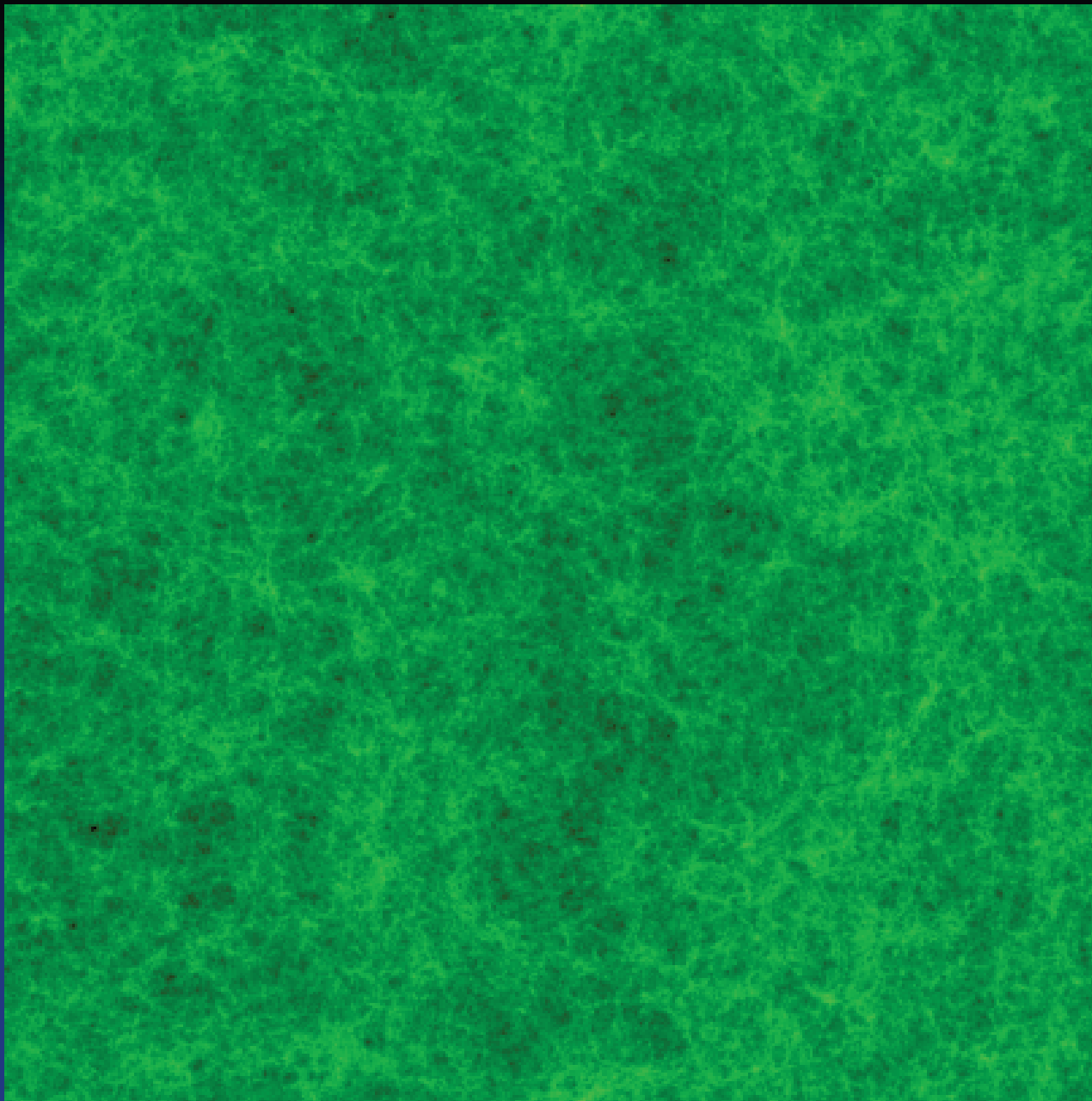
- 平均のoptical depthを与える
- 再加熱の平均的な時間発展を、かなり詳細に与える

c.f. Hu and Holder



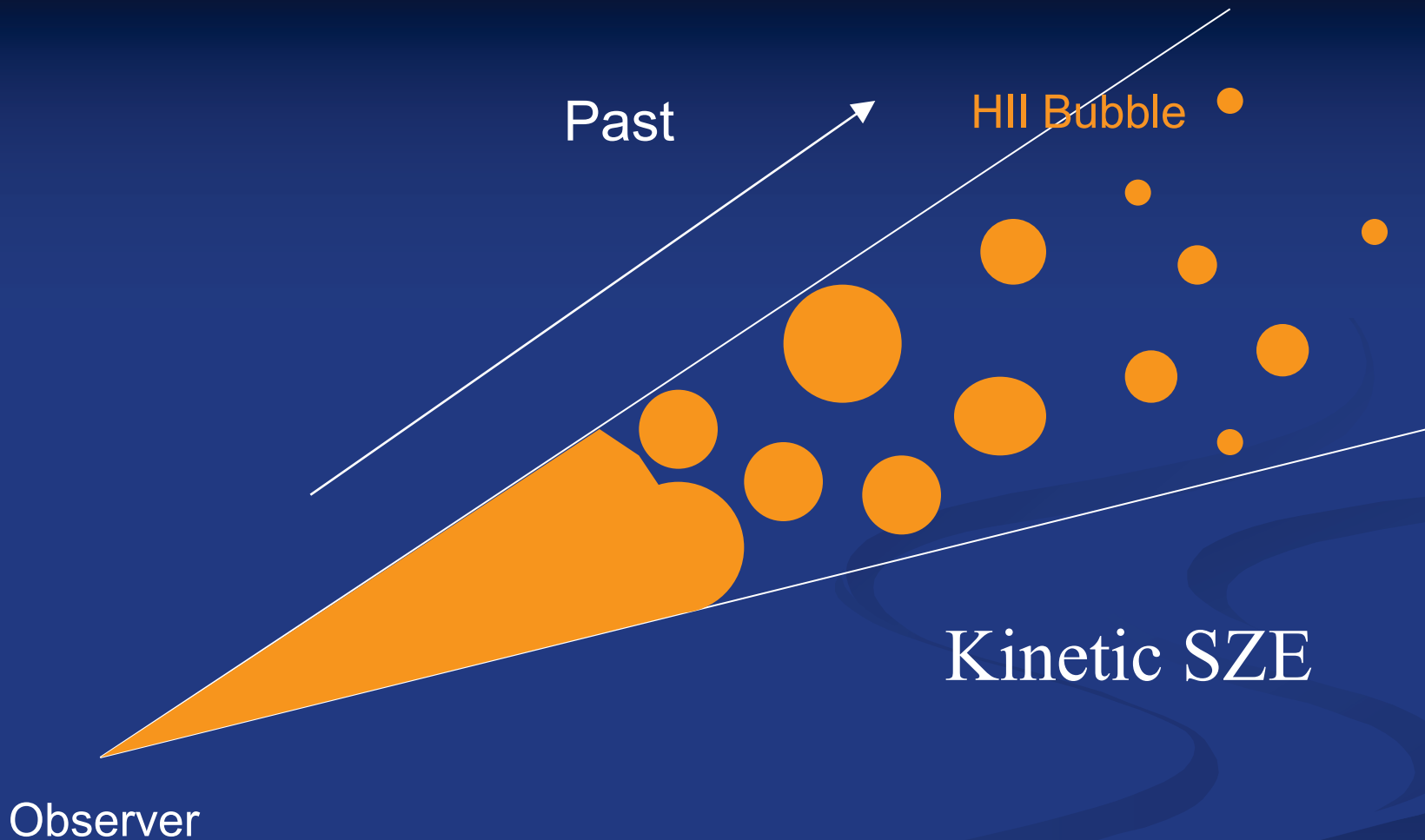
暗黒時代の終焉

- WMAPは、宇宙全体の平均の情報
- どのように、再加熱は進行したのか？
 - 最初の星の周りに、イオン化した領域が広がる
 - やがて、全部を覆い尽くしていった。
- どれだけの期間かかったのか？
 - 一瞬、それとも、長い期間？



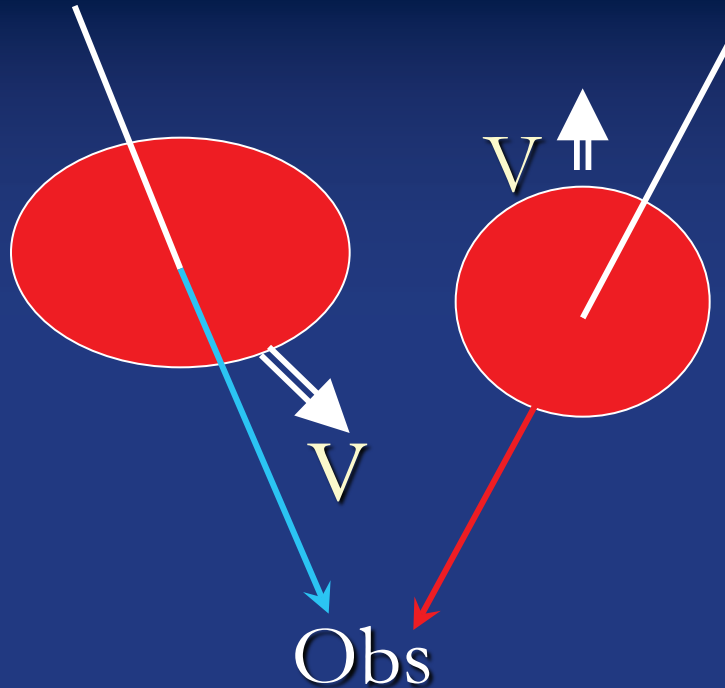
Simulation done by LLian Iliev, Sussex

Patchy reionization



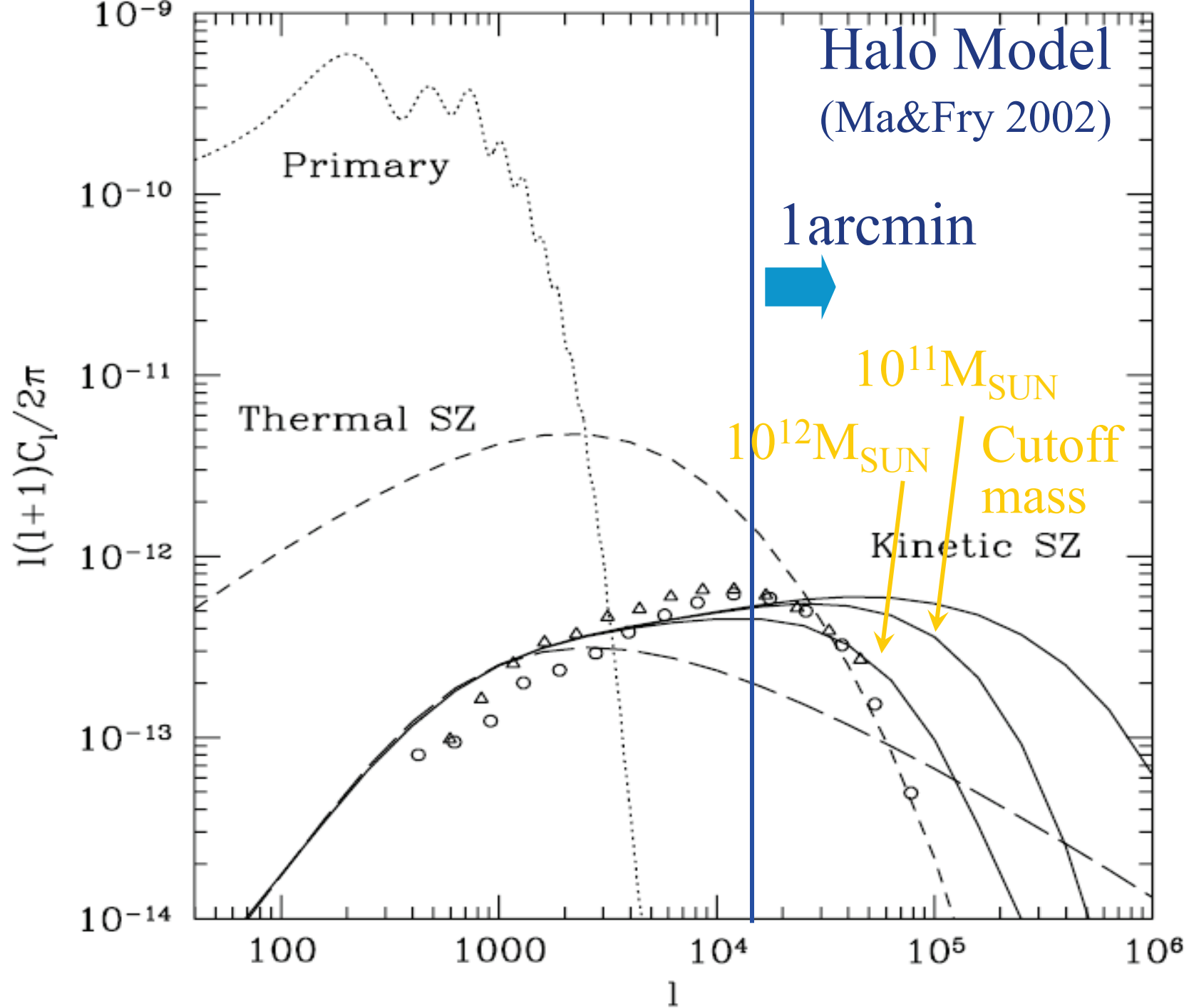
Kinetic Sunyaev-Zeldovich Effect

= Doppler Effect from Ionized Bubbles

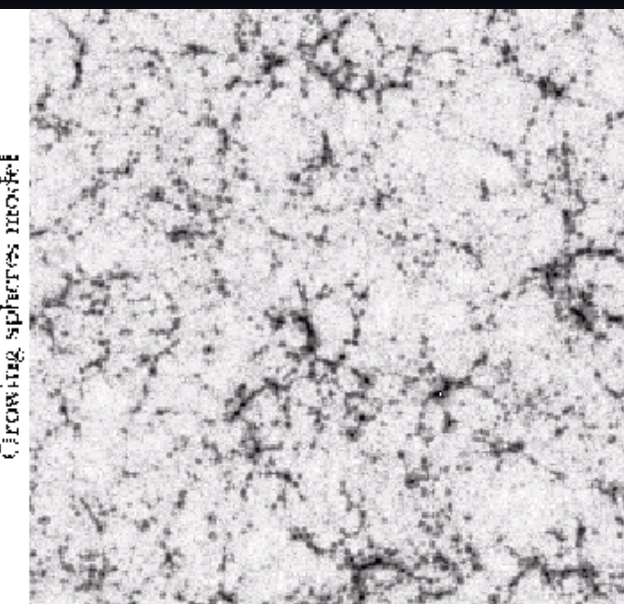


$$\Delta T / T = \int dl n_e \sigma_T V_{||} / c$$

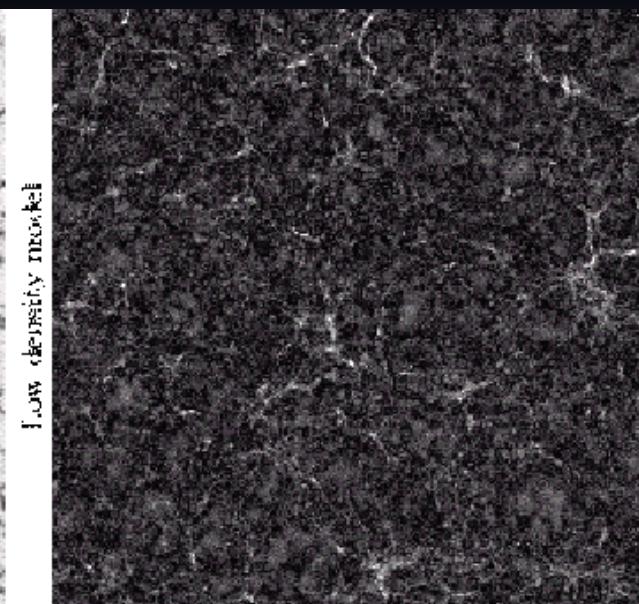
WMAPよりも小角度スケールの温度揺らぎ！



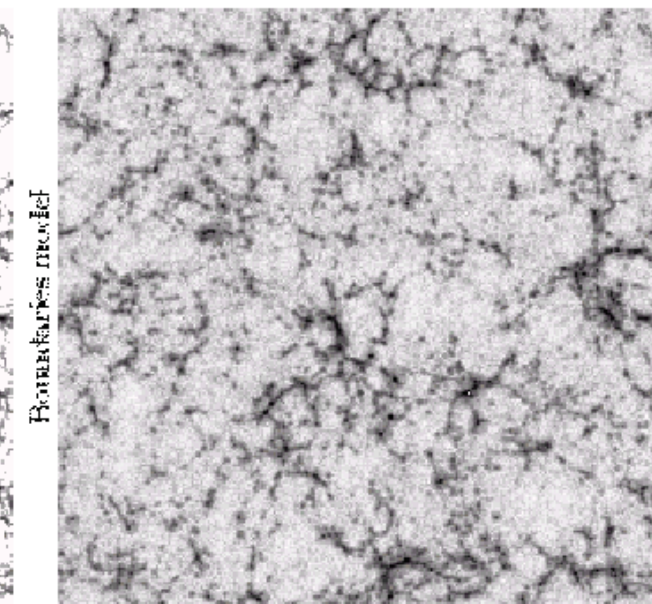
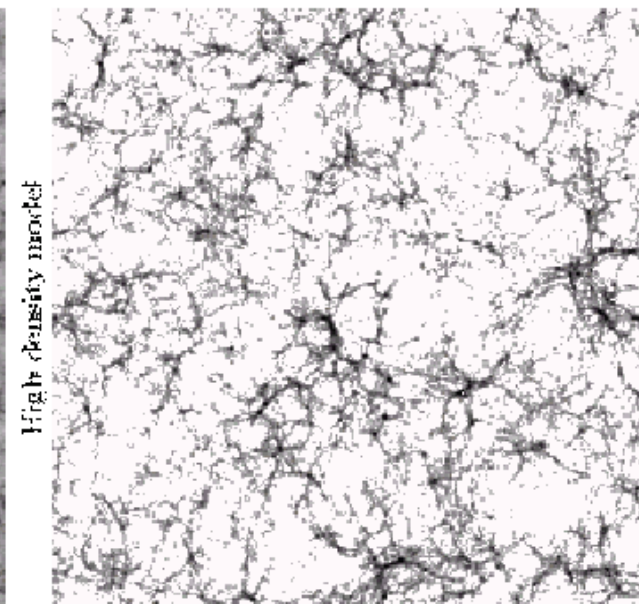
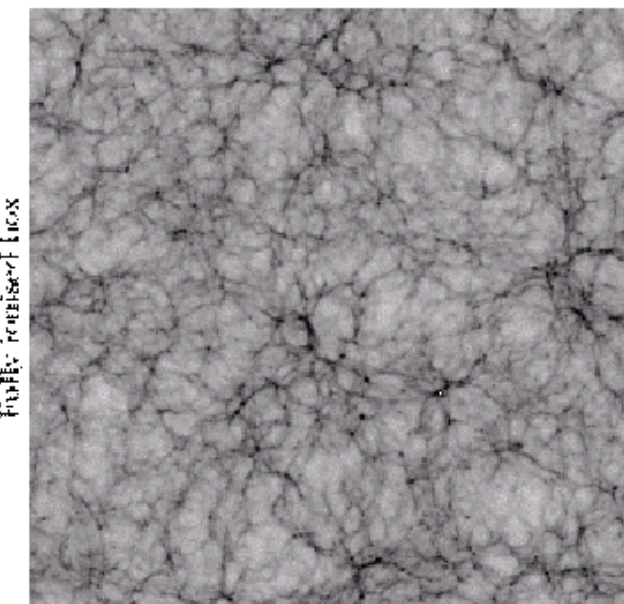
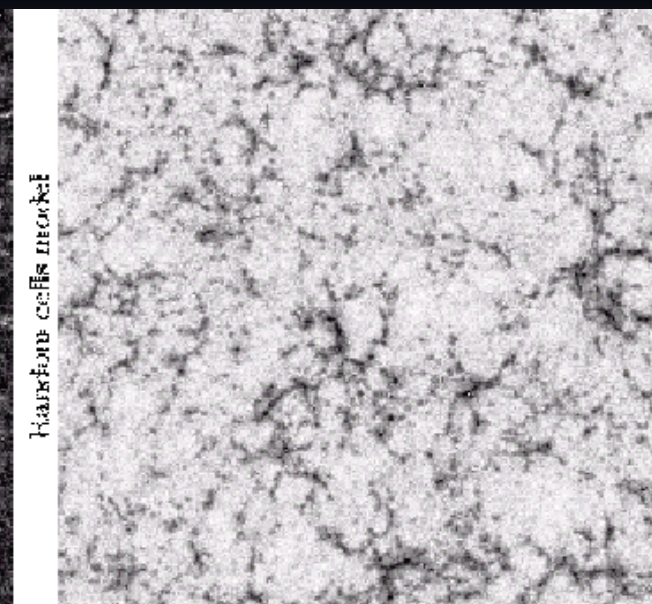
A: Growing sphere



C: Low density



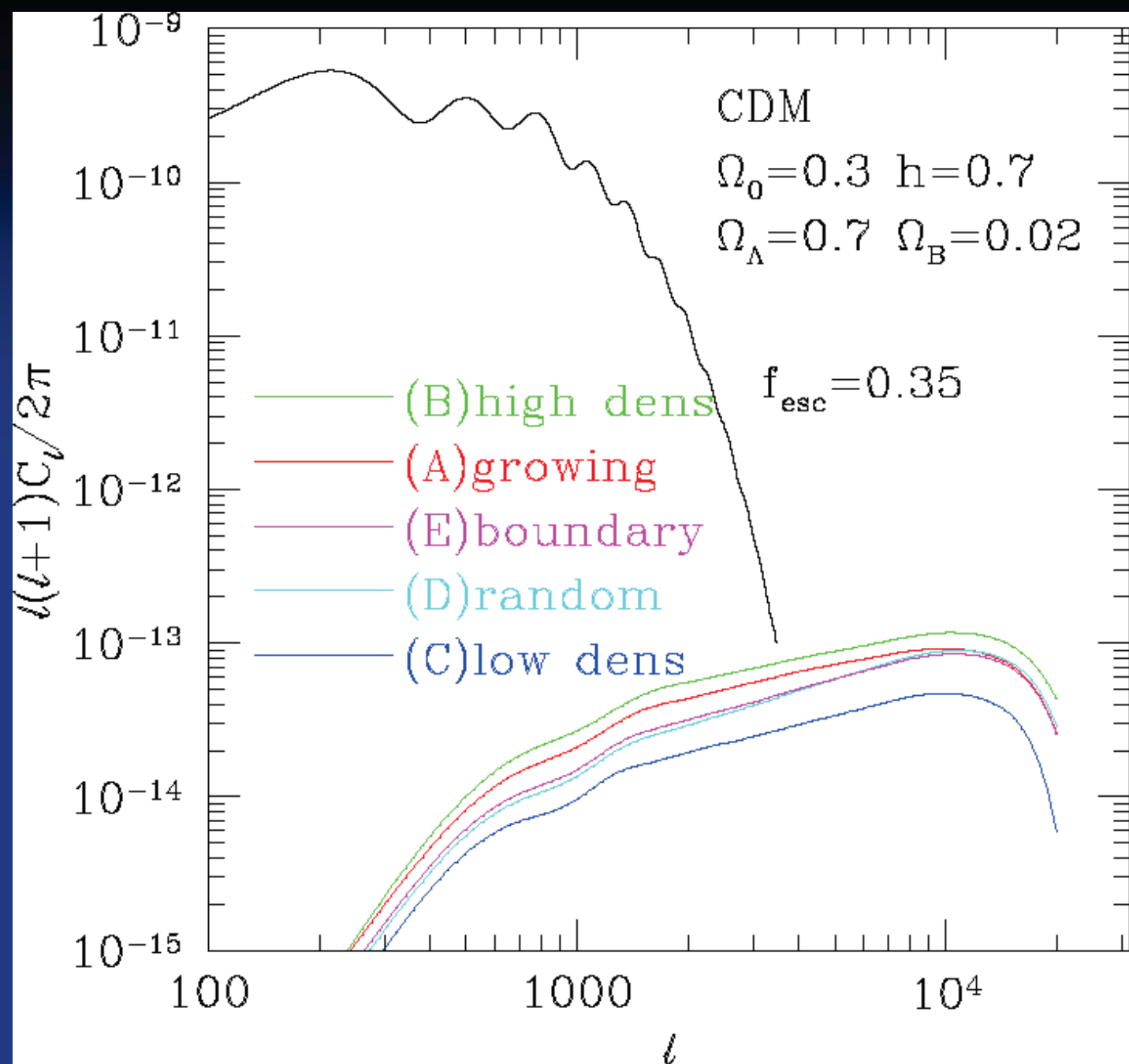
D: Random cells



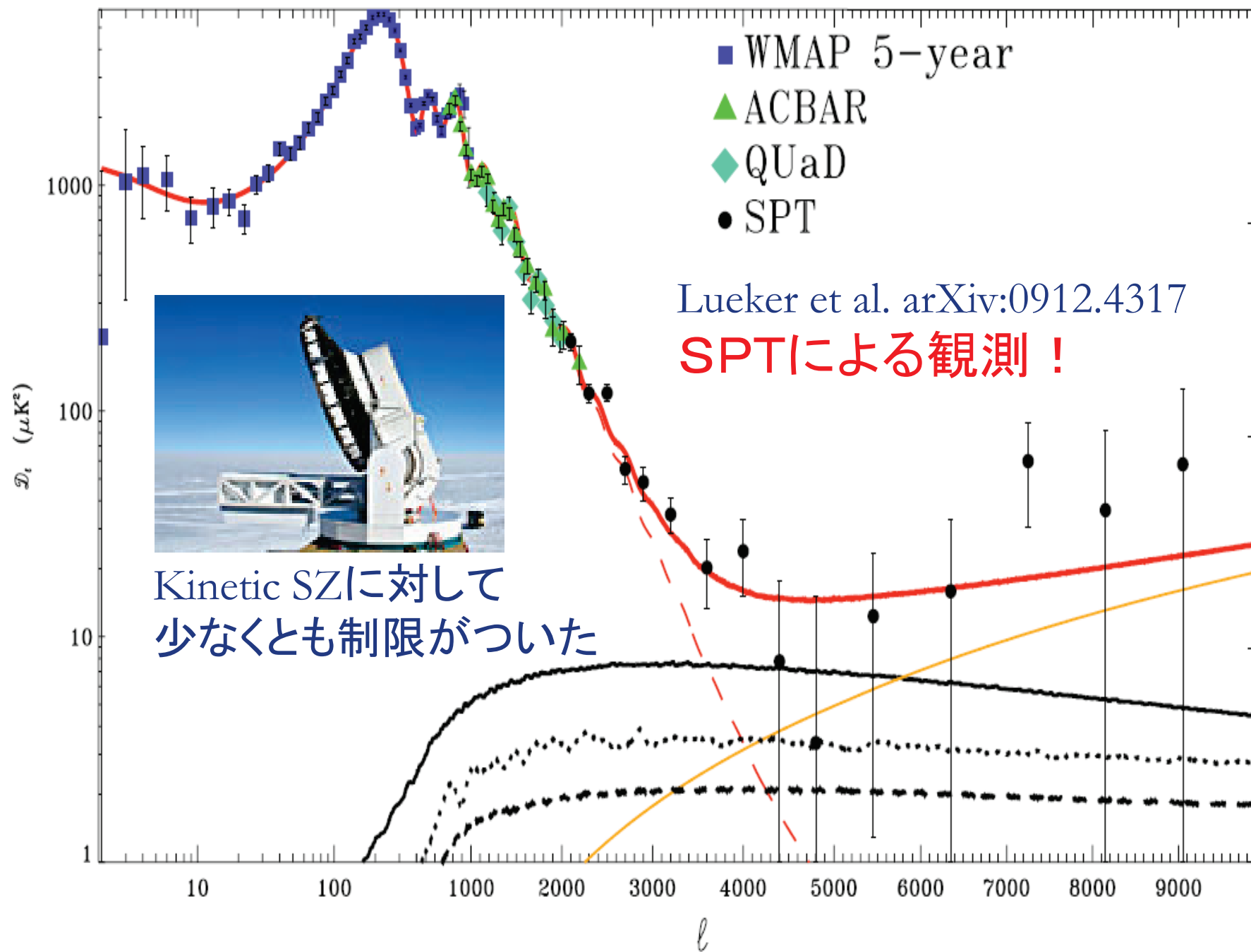
Density Field

B: High density

E: Boundary



Dependence on distribution of ionized region



再加熱の偏光への影響

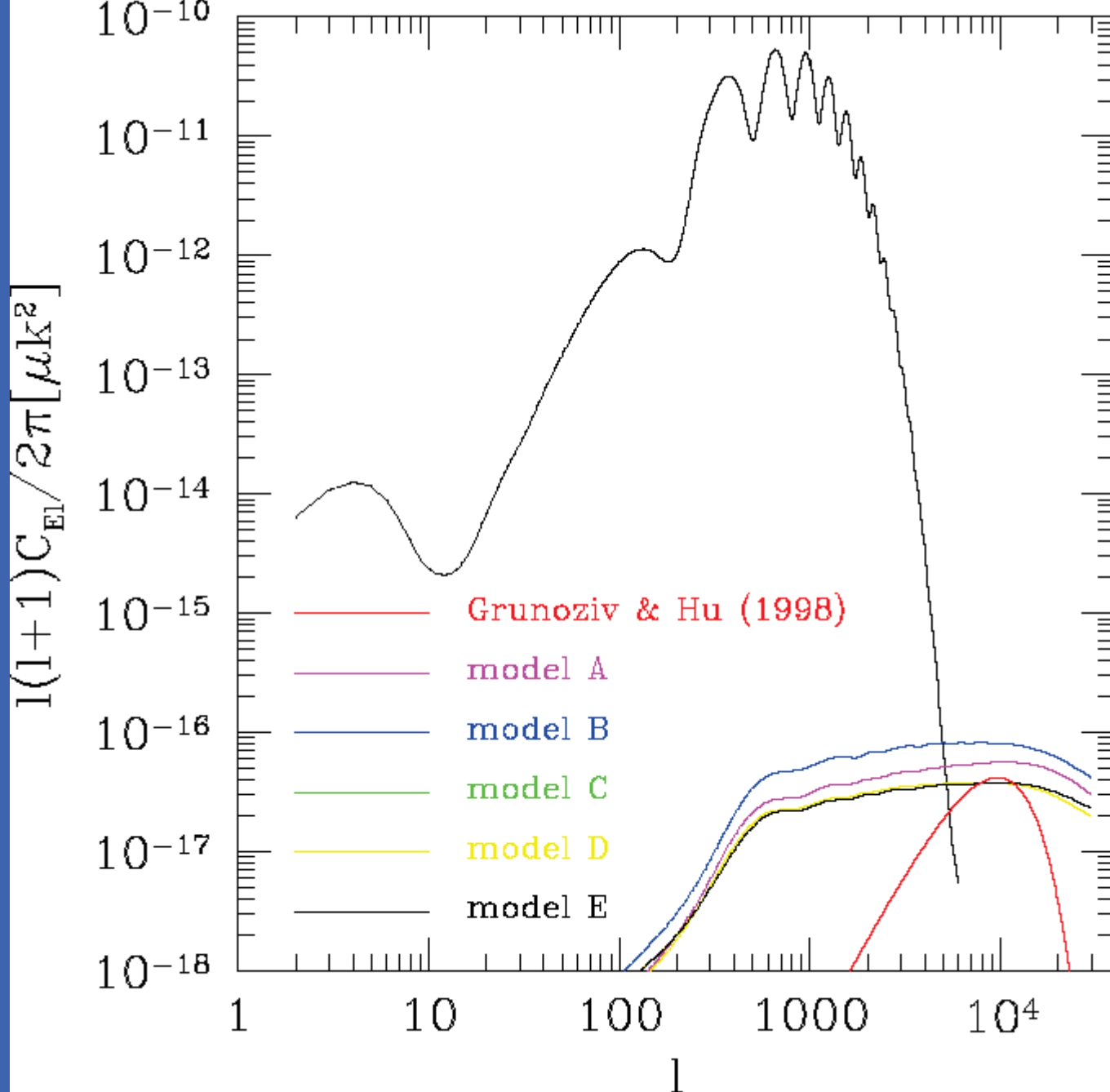
- Eモードを大スケールに生成(WMAPがすでに観測)

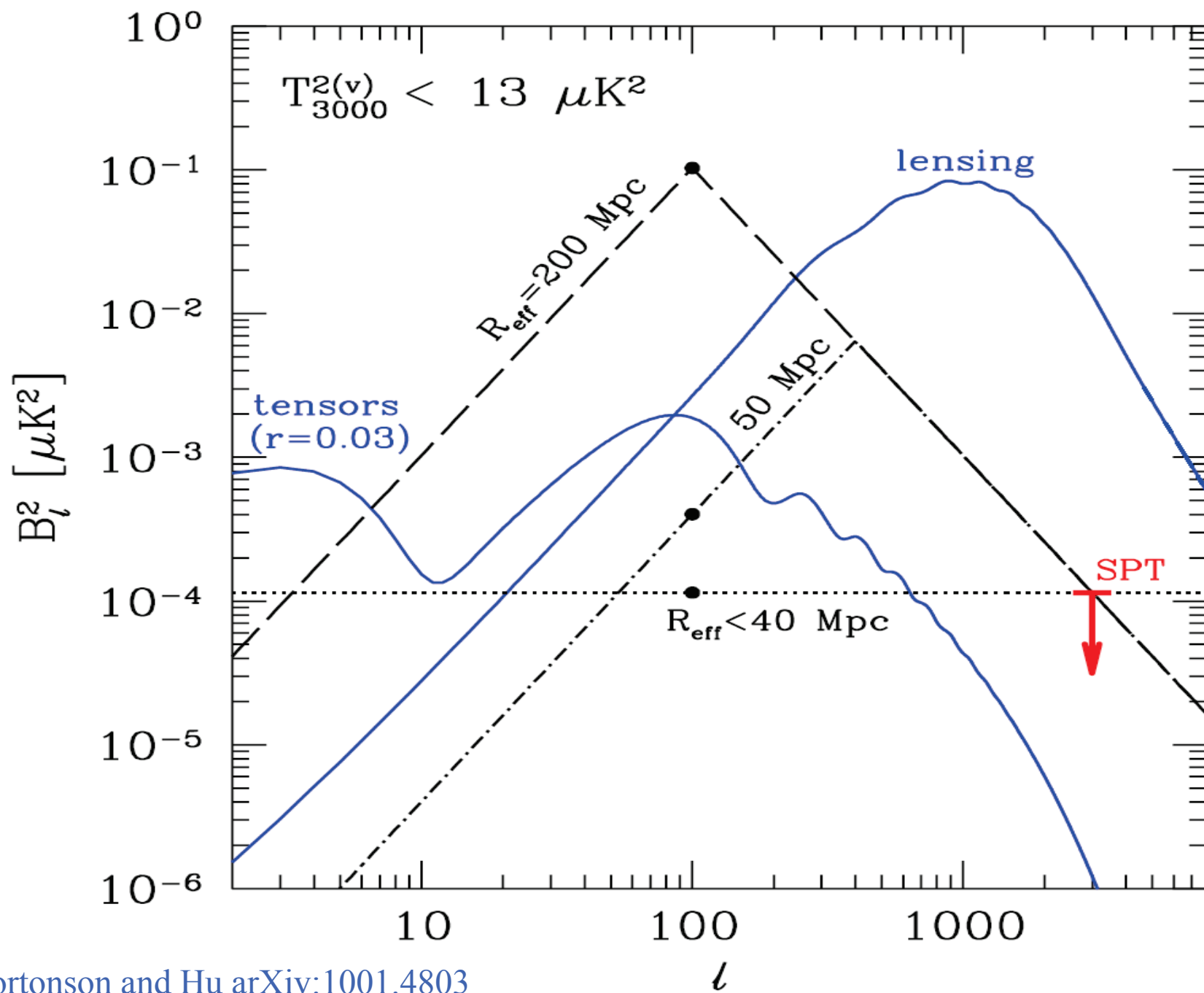
$$P \propto \tau e^{-\tau} Q \approx n_e \sigma_T l Q$$

- 小スケールで、patchy領域からの偏光

$$P \propto (\delta \tau e^{-\tau}) Q \approx (\delta n_e) \sigma_T l Q$$

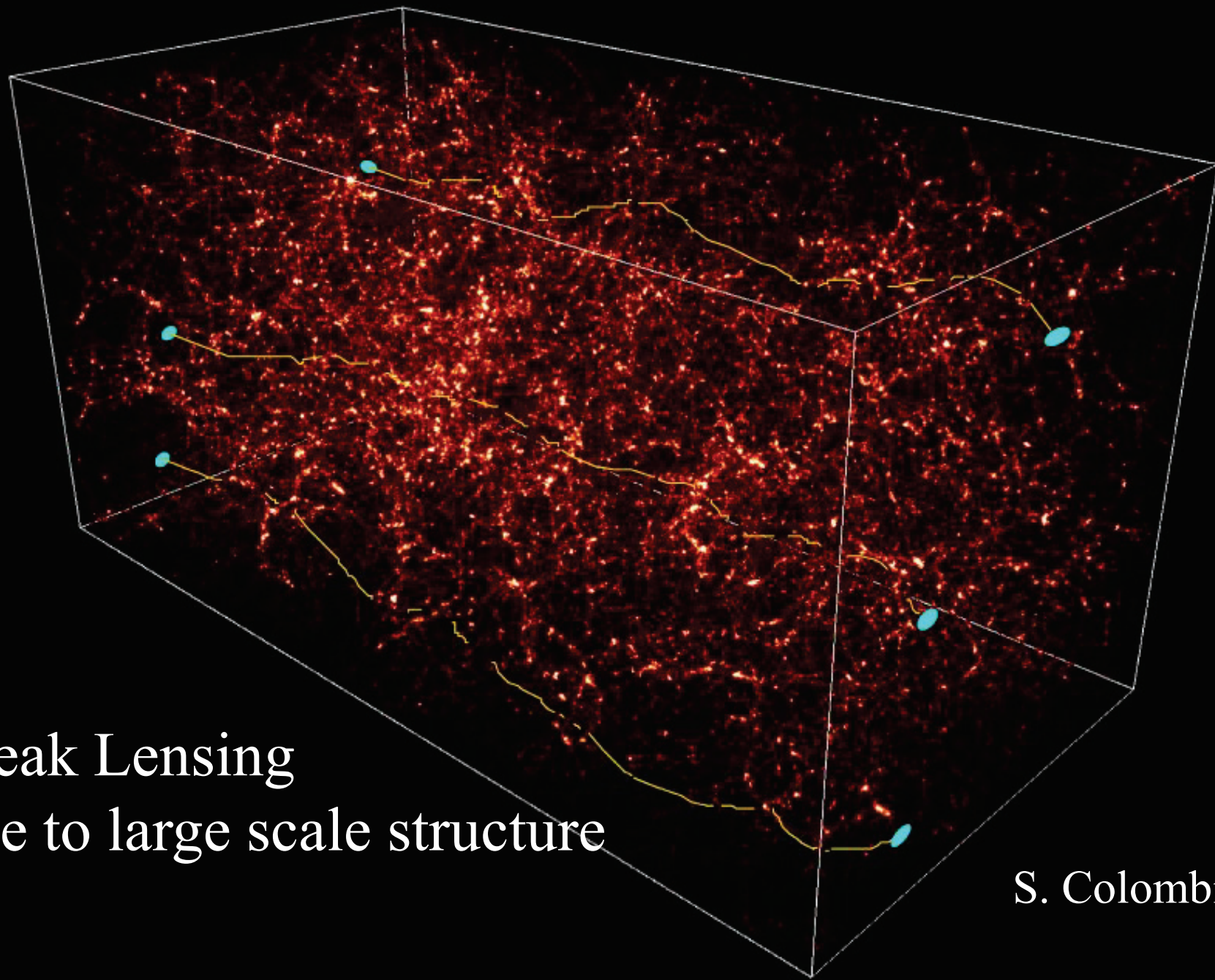
- Eモードの偏光をBモードに変える働き





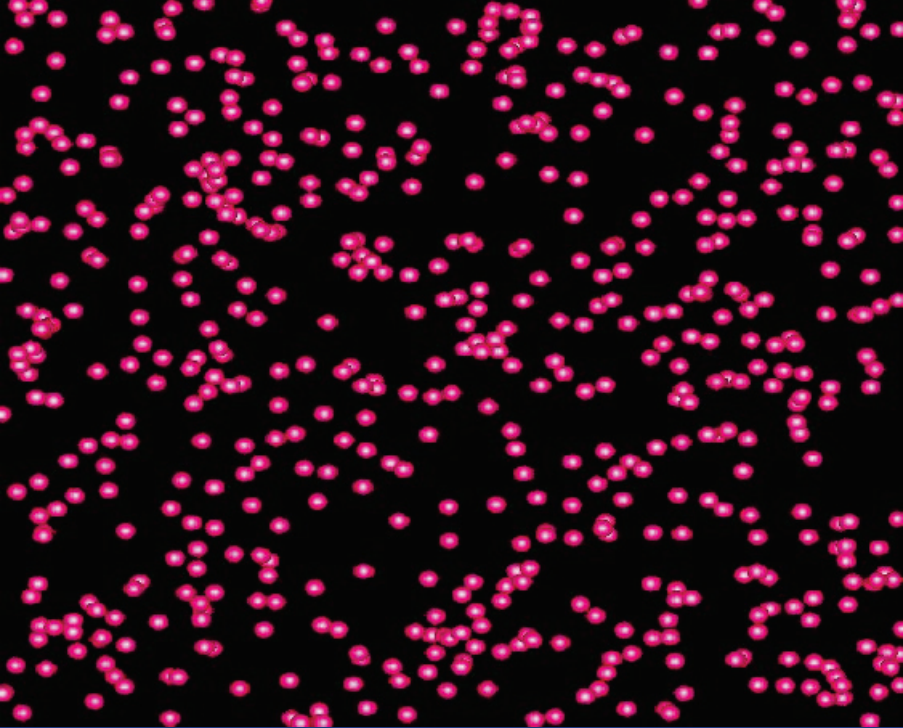
もっとなんと後の時代に対する情報 重力レンズ

- 重力レンズで、Eモード偏光から、Bモードが生成される
- 絶対に存在している
- 大規模構造のスケールに偏光。 $\sim 100-1000$
- 物質分布の詳細な情報を得ることができる
見えない物質の分布に敏感
 - 例えばニュートリノ質量などに感度がある



Weak Lensing
due to large scale structure

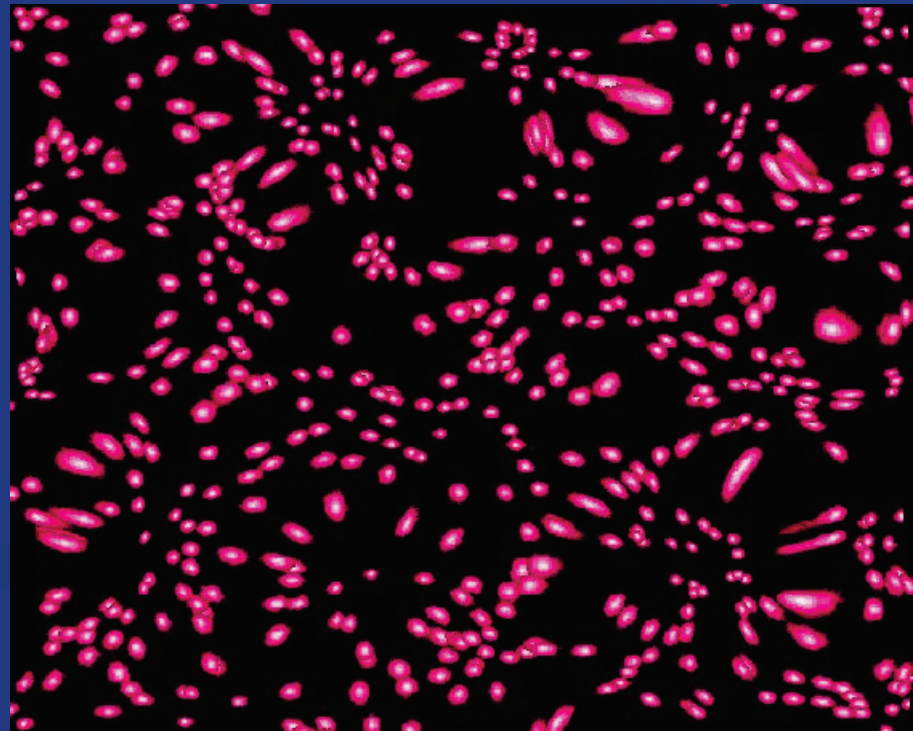
S. Colombi

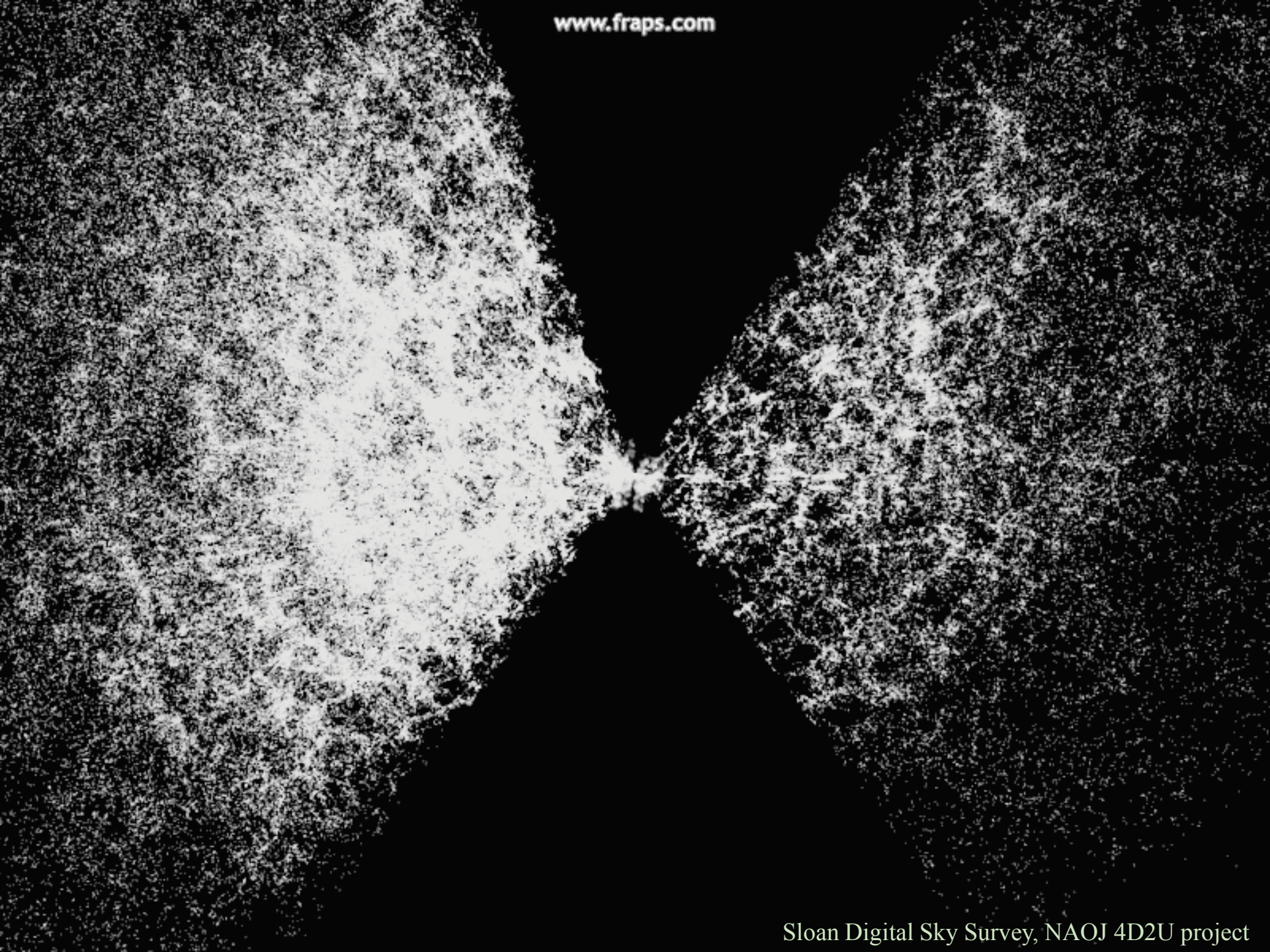


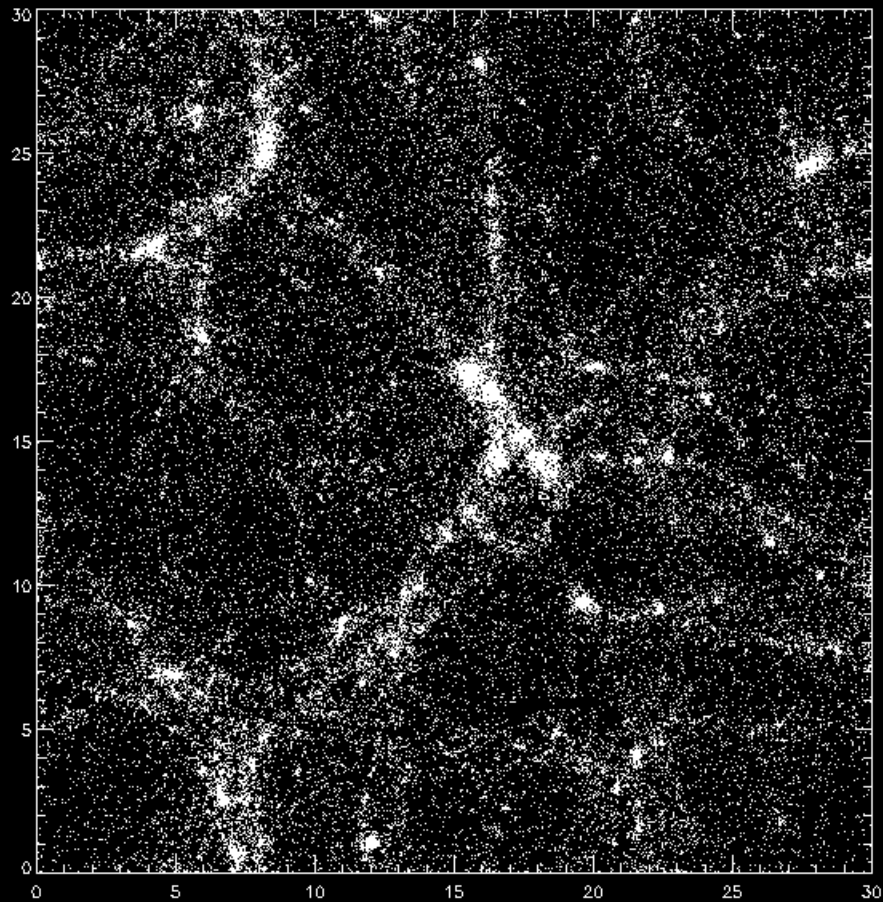
Original



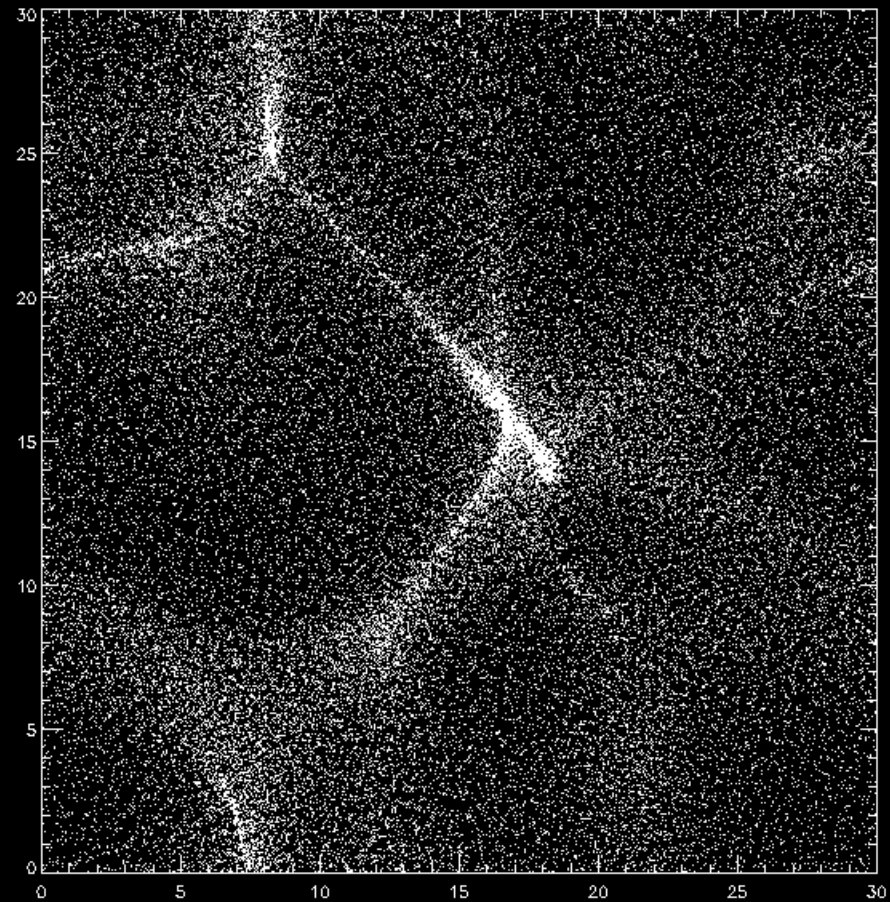
Weak lensing





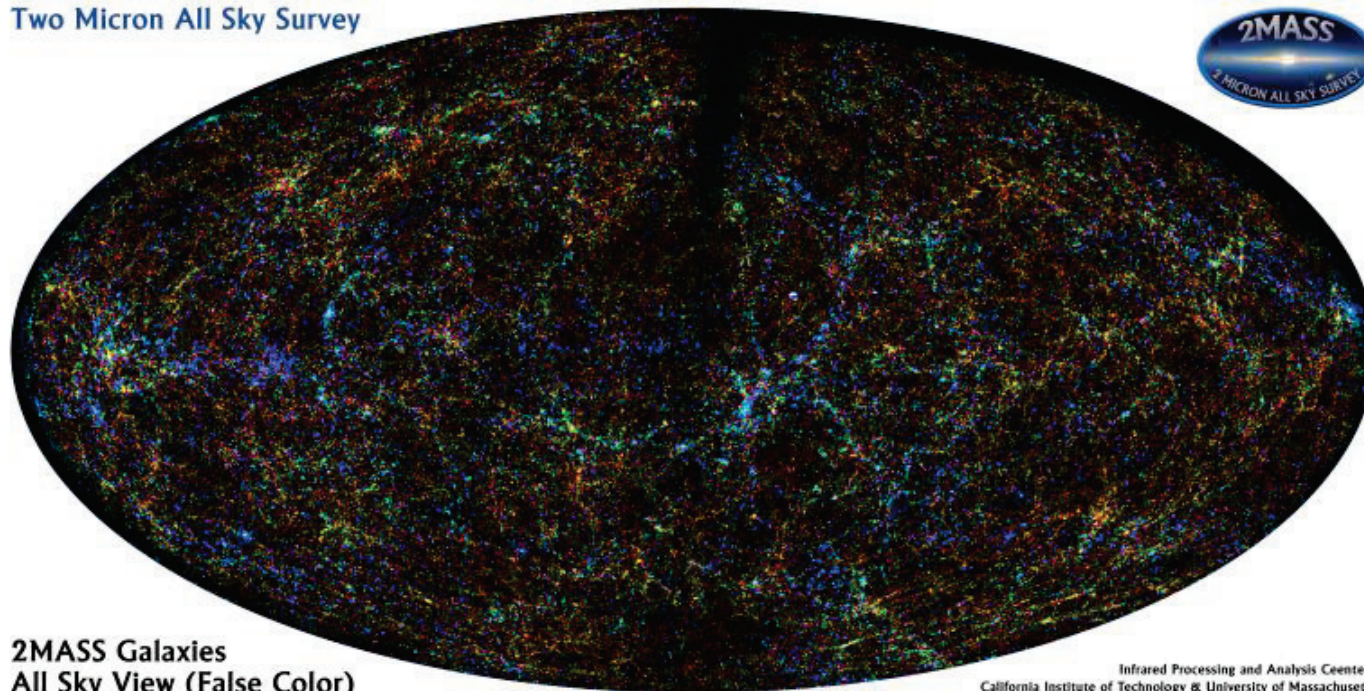


Cold Dark Matter



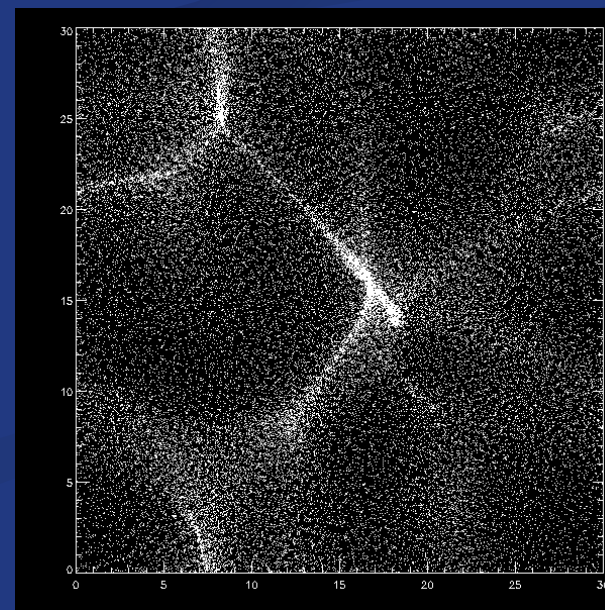
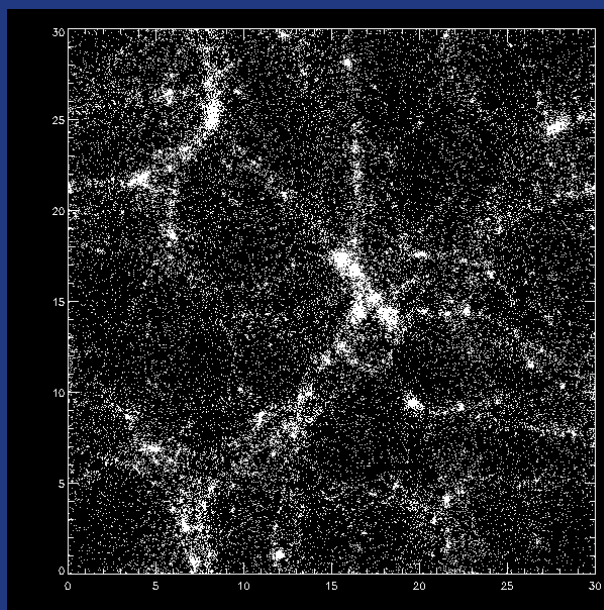
Neutrino as Dark Matter
(Hot Dark Matter)

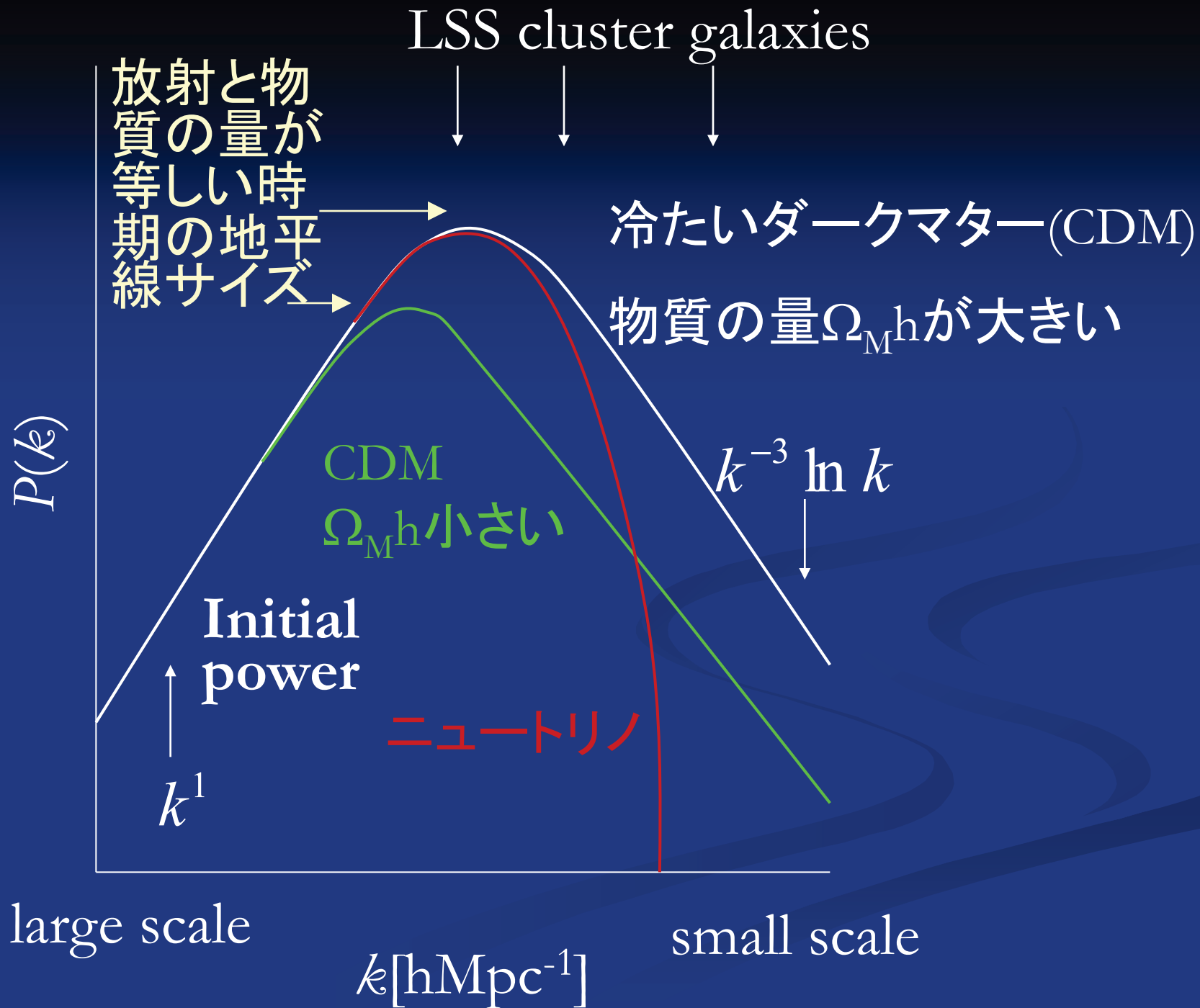
Numerical Simulation

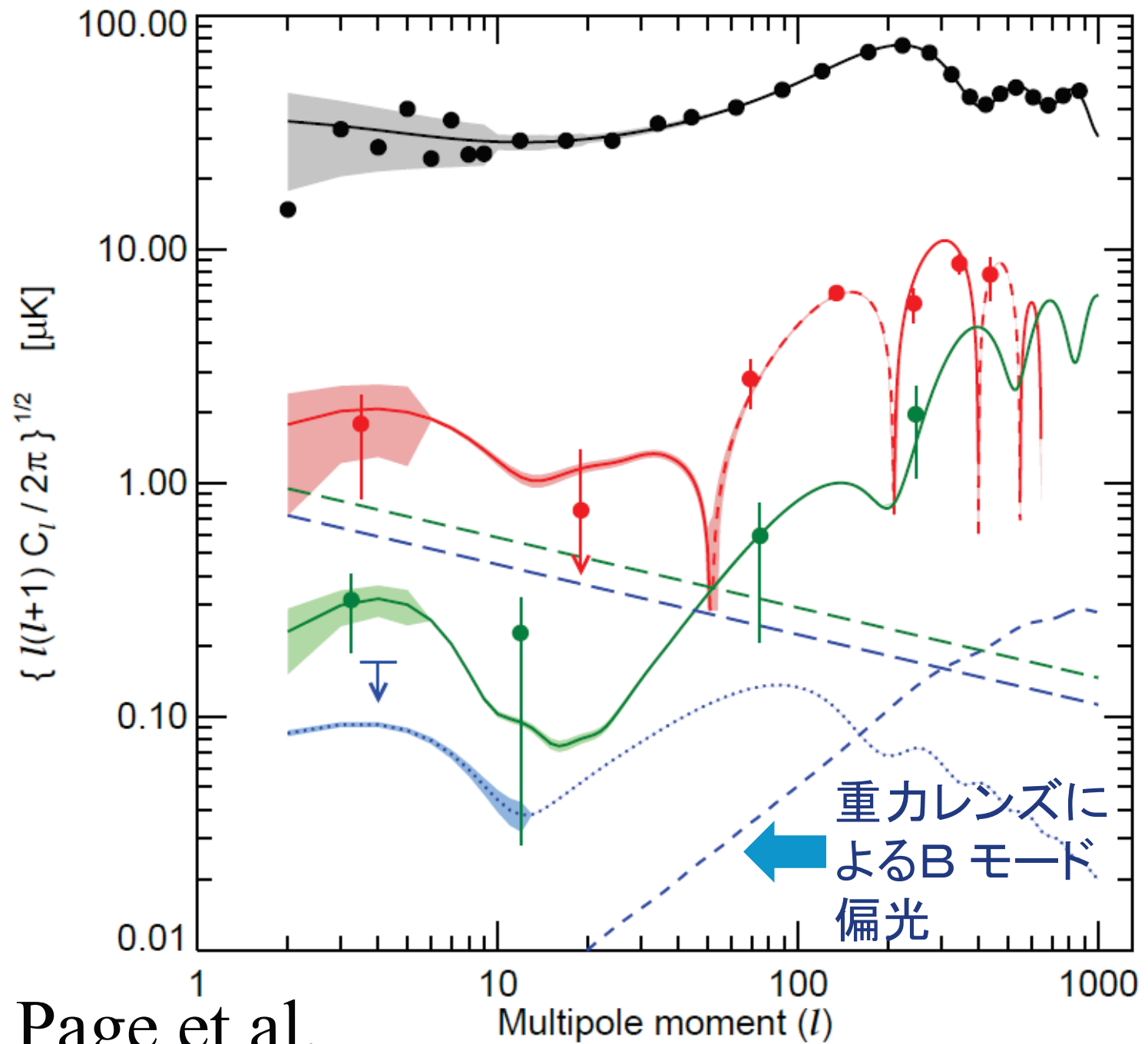


**2MASS Galaxies
All Sky View (False Color)**

Infrared Processing and Analysis Center/
California Institute of Technology & University of Massachusetts







Page et al.

まとめ

- 温度揺らぎ＋偏光：宇宙再加熱のよい指標となる
- 大スケールのE-modeから、再加熱の空間平均情報を得られる
- 小スケールでの温度揺らぎ、偏光は、イオン化した領域の情報を与える
 - 温度揺らぎ：kinetic SZ効果は、もうすぐ測定される
 - 小スケールで、再加熱のためにB-modeが生成される
ただし、とても小さいだろう！
 - 将来の21cm線の観測も重要：LOFAR, MWA, SKA
- B-mode、重力レンズから、大規模構造の情報