

宇宙背景放射偏光観測による ニュートリノ質量の測定 (の展望)

長谷川雅也(KEK)

2013.08.31

@ ニュートリノフロンティア研究会

最近良く見かけると思いますが

neutrinos masses

• Neutrinos in cosmology

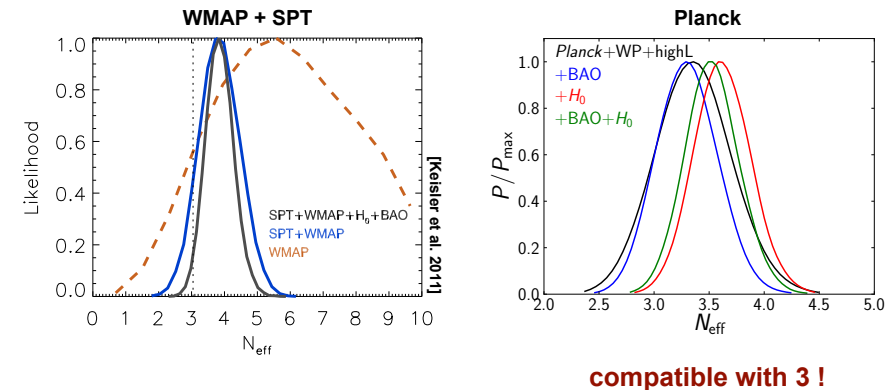
- after decoupling and thermalisation \rightarrow non relativistic
 \rightarrow contribute to matter density
- cosmology sensitive to the sum of the masses : $\sum m_\nu$
- oscillations: $\sum m_\nu \geq 0.06 eV$

data	95 % CL
Planck +WP	$\sum m_\nu < 0.93$
Planck +WP + highL	$\sum m_\nu < 0.66$
Planck +WP + highL + lensing	$\sum m_\nu < 0.84$
Planck +WP + highL + BAO	$\sum m_\nu < 0.23$

number of neutrinos

• CMB sensitive to the number of relativistic species at decoupling

- standard neutrinos : $N_{\text{eff}} = 3.04$
- confuse situation since WMAP + SPT + ACT...



- なぜCMB観測からニュートリノ質量の情報が得られるのか
- CMB偏光観測によって、精度がどれくらい上がるか

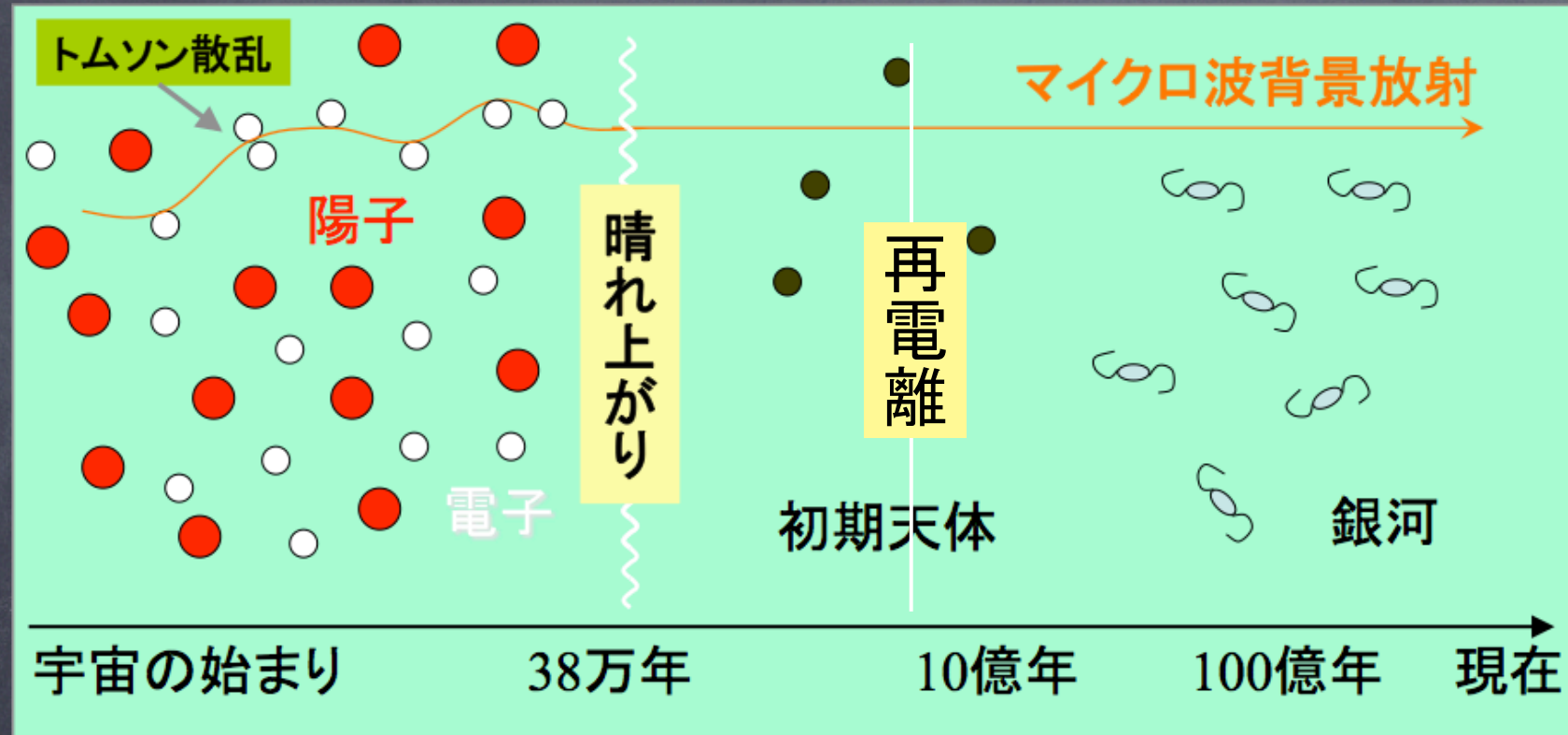
お話しします。

目次

- インTRODクシヨN (CMB, 宇宙背景ニュートリノ)
- CMB観測によるニュートリノ質量測定
 - 測定方法
 - 膨張則への影響を見る
 - 弱重力レンズ効果を見る
 - 最新の観測状況と今後の展望
 - POLARBEAR/Simons Array 計画
- CMB + 他の宇宙観測による展望 (時間があれば)
- まとめ

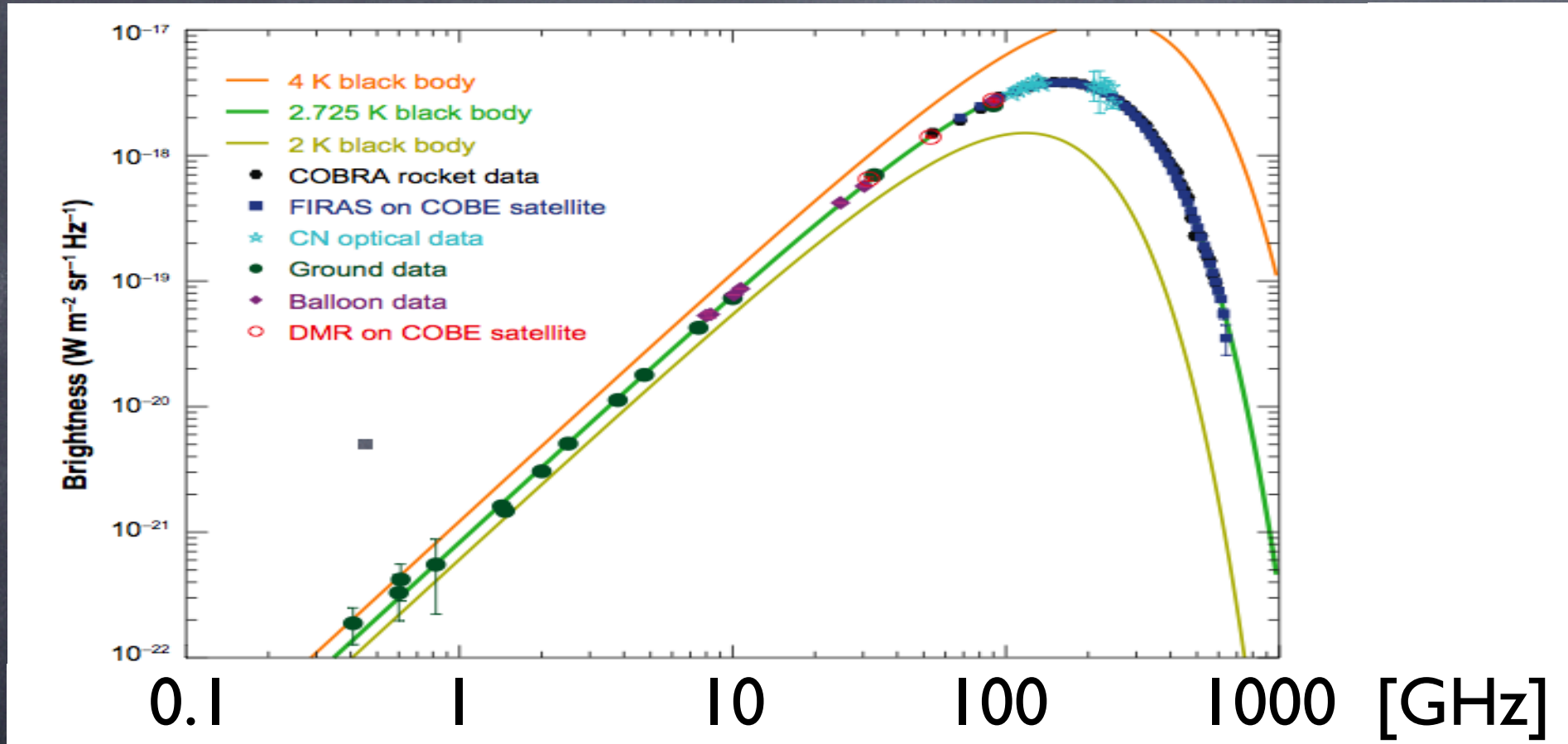
CMB観測の新しい応用例

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



- ビックバンの残光 (宇宙誕生38万年後の光)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

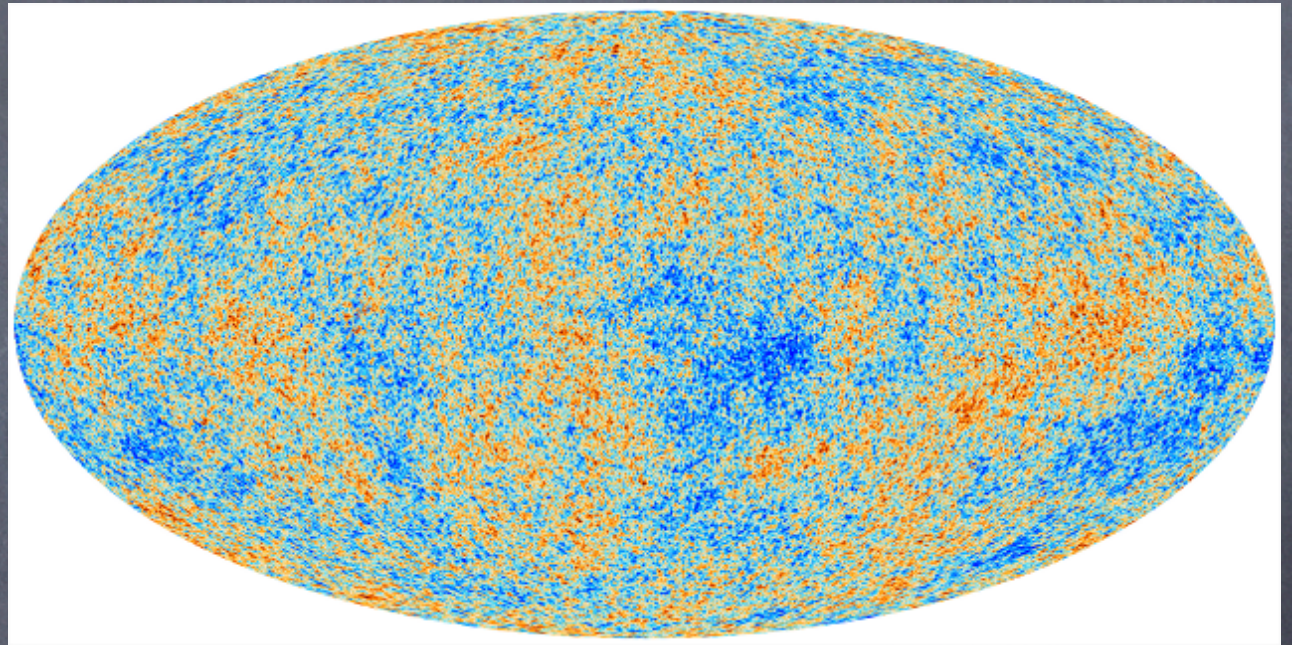
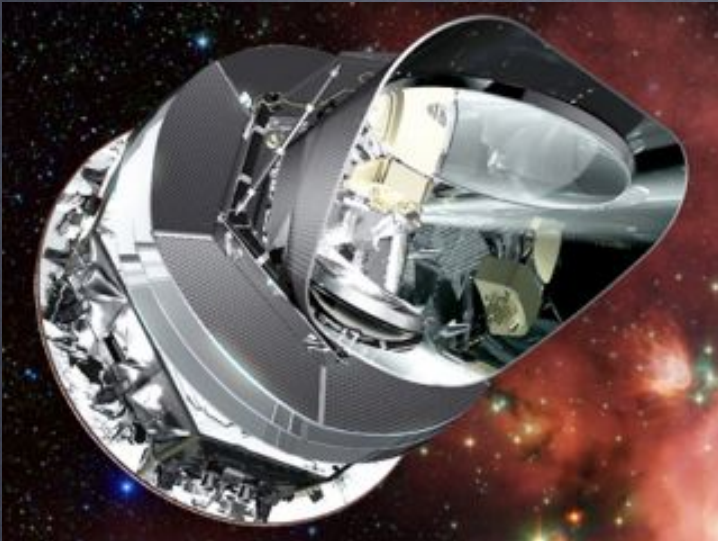


- ビックバンの残光 (宇宙誕生38万年後の光)
- 現在の温度= $2.725 \pm 0.002\text{K}$ (COBE/FIRAS)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

Planck衛星による温度揺らぎの全天マップ

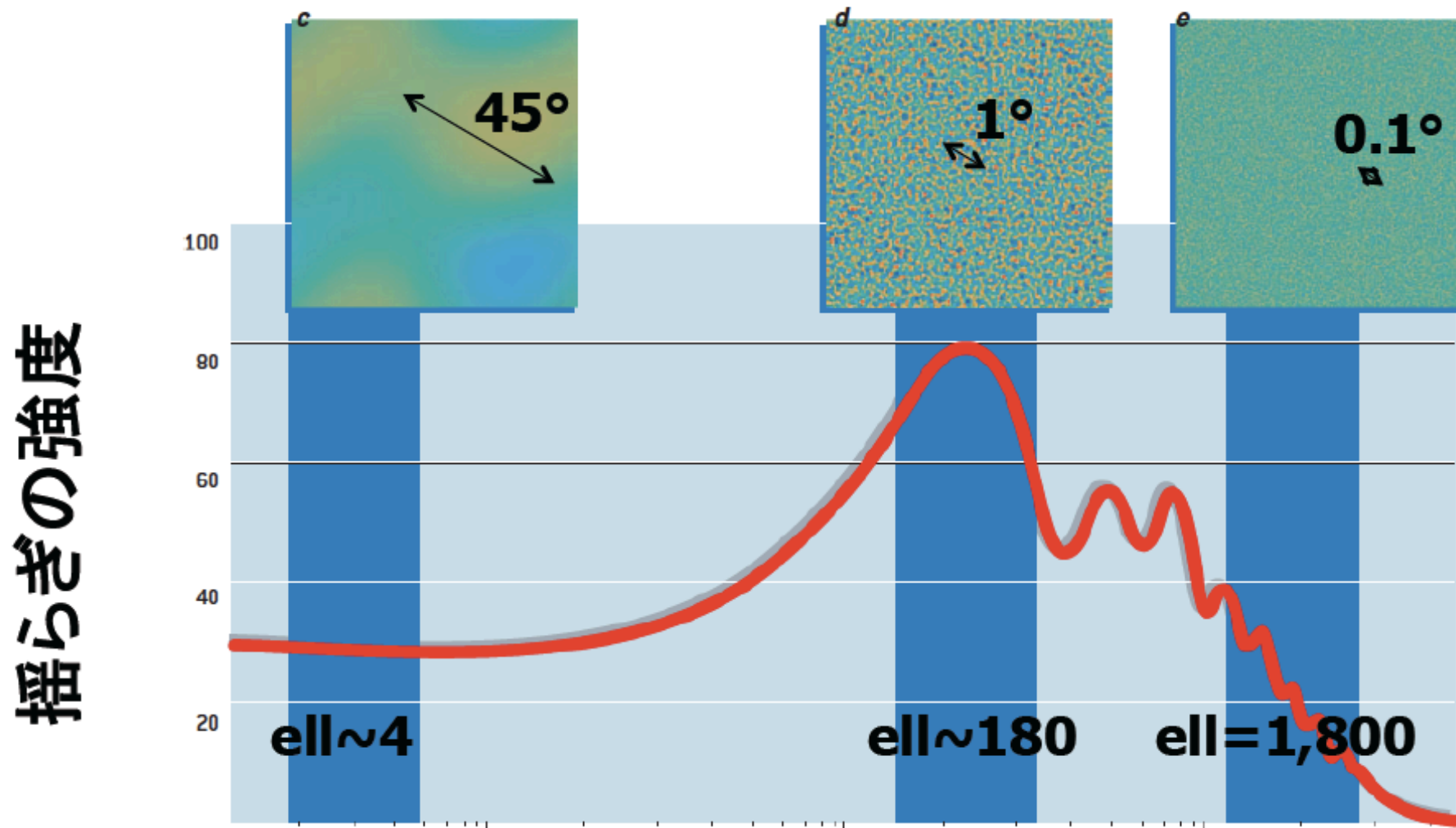
Planck衛星 (2009 -)



- ビックバンの残光 (宇宙誕生38万年後の光)
- 現在の温度= $2.725 \pm 0.002\text{K}$ (COBE/FIRAS)
- 異方性: 10^{-5} (大規模構造=現在の宇宙の種)

揺らぎの周波数解析=パワースペクトル

揺らぎの角度スケール

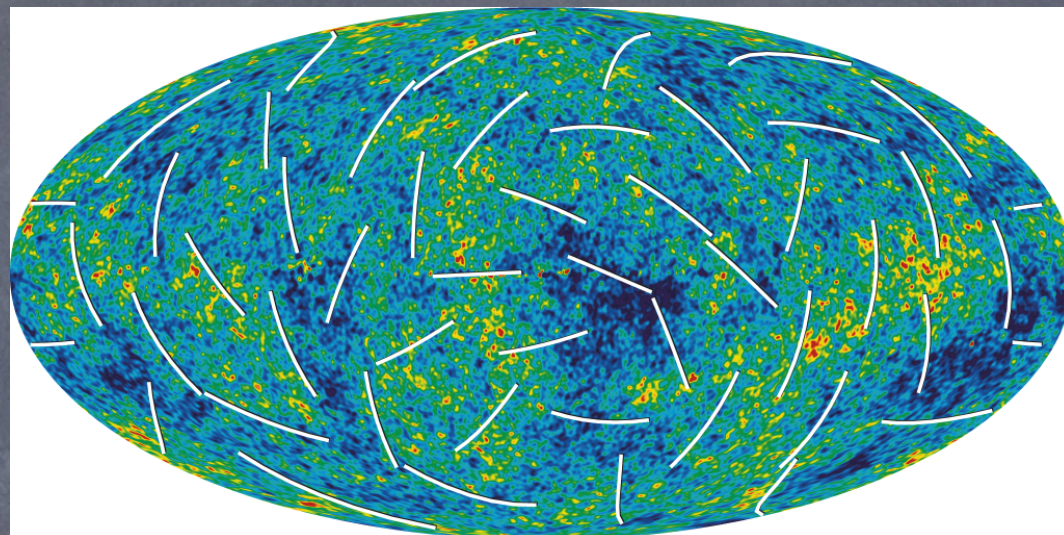
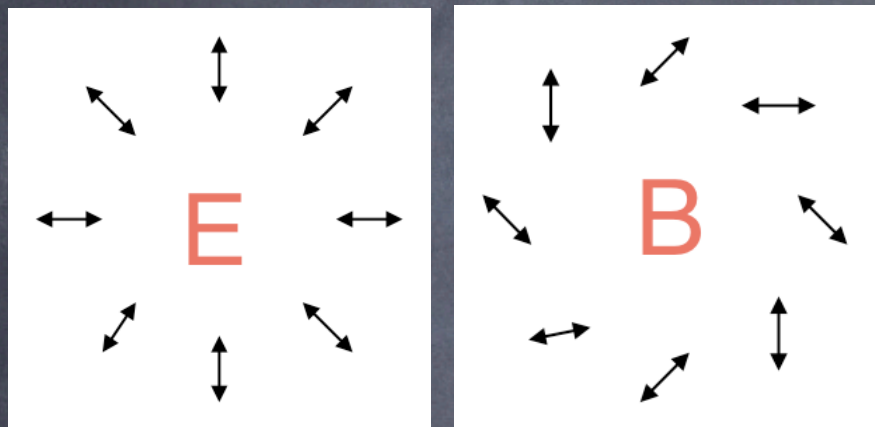


Wayne Hu & Martin White, 2004

角度スケールの逆数($ell = 180^\circ / \text{角度}$)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

WMAP衛星による偏光の全天マップ



- ビックバンの残光 (宇宙誕生38万年後の光)
- 現在の温度= $2.725 \pm 0.002\text{K}$ (COBE/FIRAS)
- 異方性: 10^{-5} (大規模構造=現在の宇宙の種)
- 直線偏光 (Eモード、Bモード) ← CMB研究の最前線

偏光について少し詳しく

● Eモード (検出済み)

初期密度揺らぎ起源

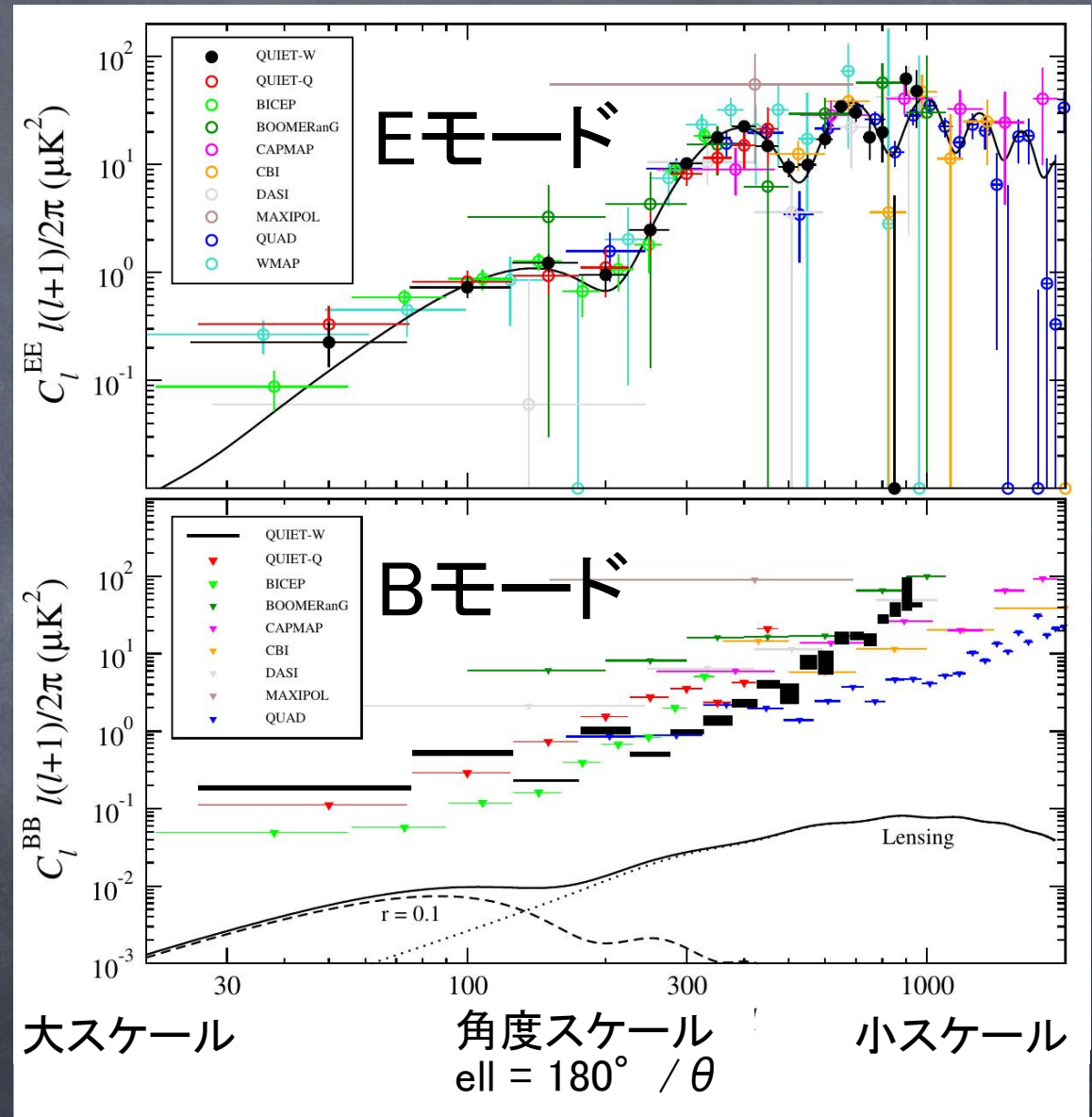
● Bモード (未検出)

原始重力波起源 (大スケール)

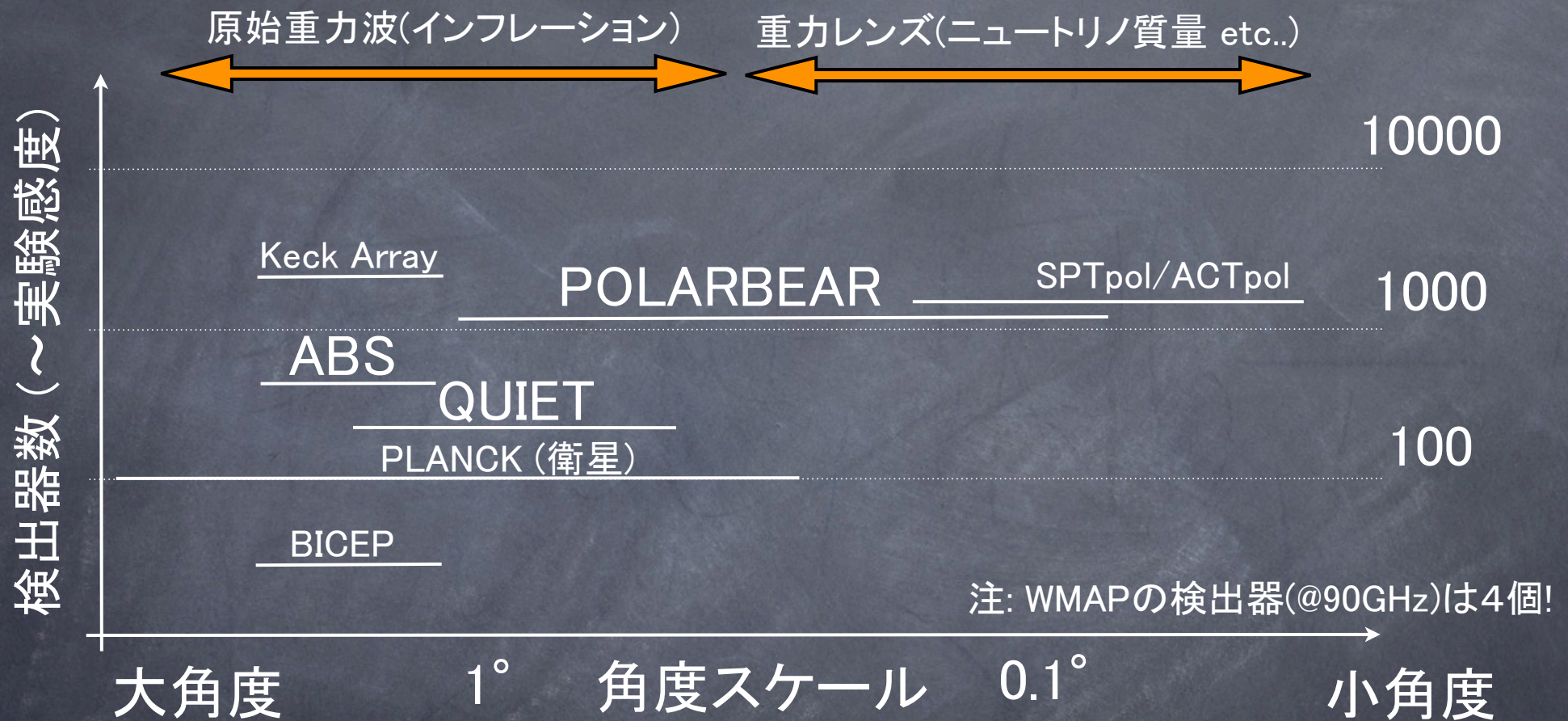
重力レンズ起源 (小スケール)

* 赤外線観測との相互相関から重力レンズBモードは検出されている。
(arXiv:1307.5830)

偏光Bモードの検出を目指して世界中で競争が起こっている。(2008年からKEKも参入)



(現行の)主な偏光実験



- Bモードの検出が期待できる地上実験が多数競合
- HEP出身の日本人が多数活躍(QUIET, POLARBEAR, ABS)

Belle出身組



日下
(QUIET→
ABS/MuSE)

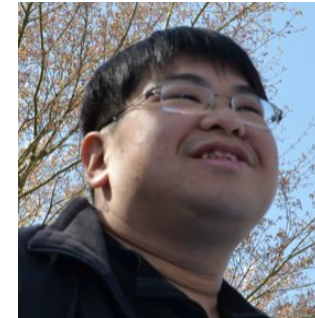


田島
(QUIET→GB)



羽澄
(QUIET→
POLARBEAR)

Kaon出身



森井
POLARBEAR

ニュートリノ出身



西野
POLARBEAR



長谷川
(QUIET→
POLARBEAR)

他にも

小栗 (原子炉 ν), 山口 (LHC ATLAS),
唐津 (RHIC PHENIX), 堀 (LHC ALICE)

● HEP出身の日本人が多数活躍 (QUIET, POLARBEAR, ABS)。

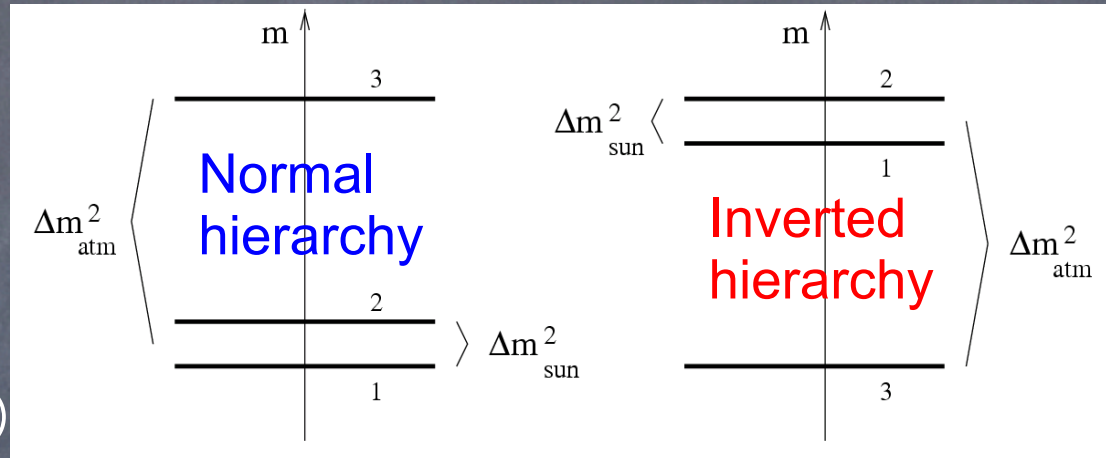
地上実験等からのインプット

ニュートリノ振動

$$\Delta m^2_{\text{atm}} \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m^2_{\text{sun}} \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\rightarrow \sum m_\nu > 0.10 \text{ (IH) or } 0.05 \text{ eV (NH)}$$



宇宙のエネルギー密度

$$\Omega_\nu h^2 = \frac{m_\nu}{93 \text{ eV}}$$

観測されている物質がすべてニュートリノだとすると ($\Omega_\nu \sim 0.3$) $\rightarrow \sum m_\nu < 3.7 \text{ eV}$

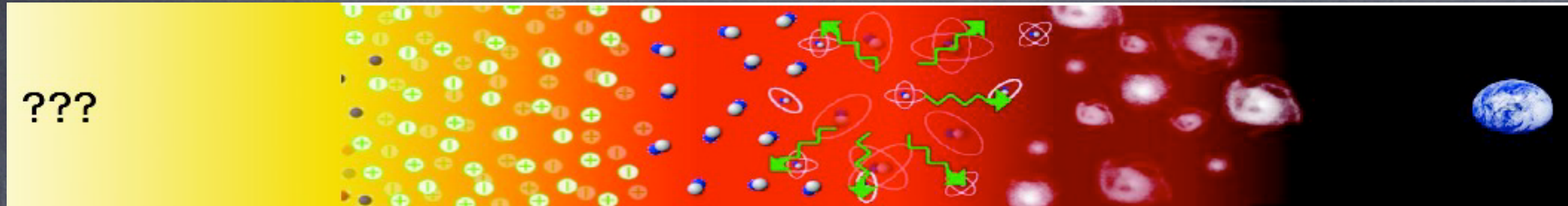
興味のある探索領域

$$0.05 \text{ eV} < \sum m_\nu < 3.7 \text{ eV}$$

宇宙背景ニュートリノ

過去

現在



インフレーション?

元素合成

晴れ上がり (38万年)

宇宙マイクロ波背景放射

ニュートリノ背景放射

- 宇宙誕生2秒後に脱結合 ($113 / \text{cc}/\text{family}$)
- CMB観測ですでに効果は観測されている ($N_{\text{eff}} = 3.36^{+0.68}_{-0.64}$)
- 現在の温度: 1.95K ($\sim 10^{-4}\text{eV}$)
 - 晴れ上がりの時の平均エネルギー: 0.56eV

重ければ物質、軽ければ放射として振る舞う

目次

- インTRODクシヨN (CMB, 宇宙背景ニュートリノ)
- CMB観測によるニュートリノ質量測定
 - 測定方法
 - 膨張則への影響を見る
 - 弱重力レンズ効果を見る
 - 最新の観測状況と今後の展望
 - POLARBEAR/Simons Array 計画
- CMB + 他の宇宙観測による展望 (時間があれば)
- まとめ

CMB観測の新しい応用例

CMBで ν 質量が制限できる理由

有限の質量による2つの効果

(1) 宇宙膨張への影響（膨張は宇宙の組成が支配）

「放射」→「物質」による違いを見る。

比較的重いニュートリノ($>0(1\text{eV})$)に有効

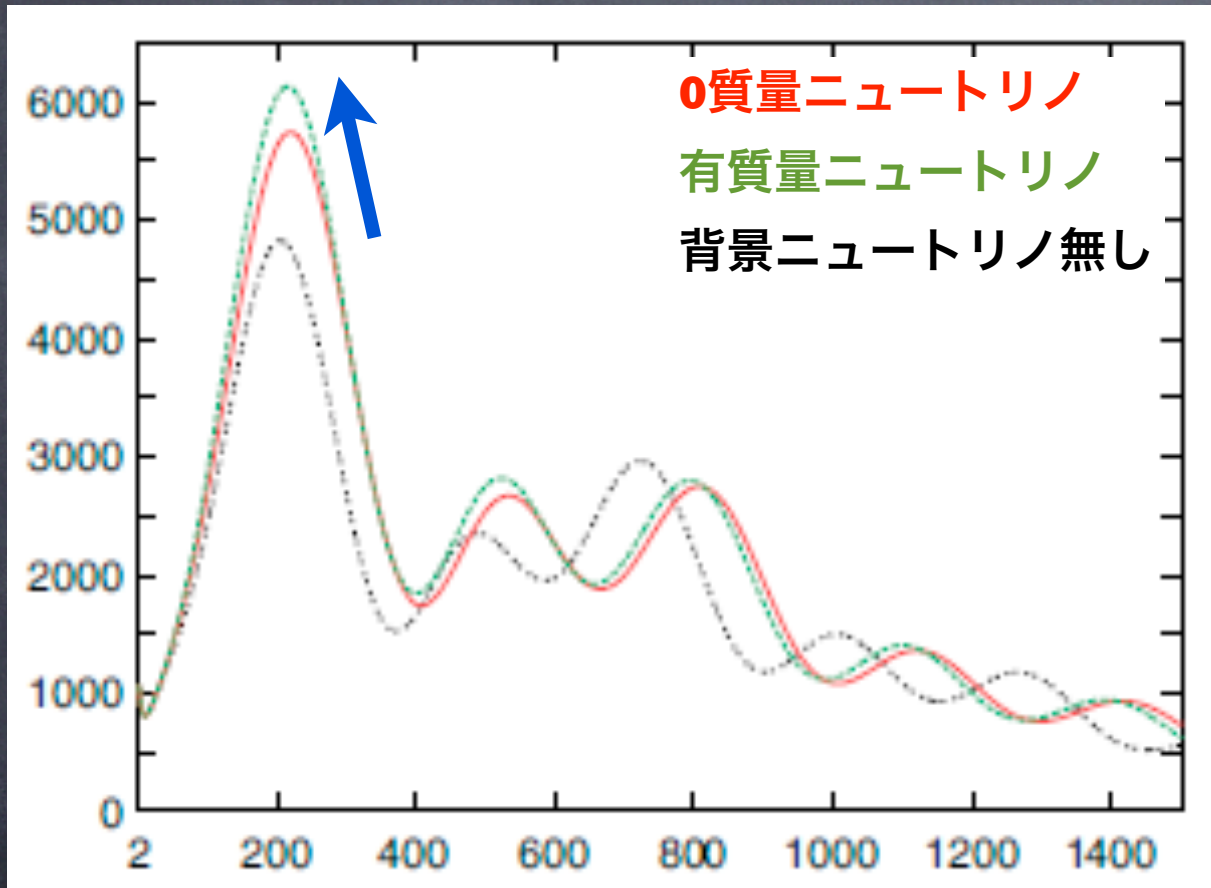
(2) 宇宙大規模構造への影響

速度分散が大きい為、大規模構造がならされる。

軽いニュートリノ質量和まで探索可能

これらの効果を通して、質量に制限がつけられる。

(1) 宇宙膨張への影響



ニュートリノが質量を持つと
(晴れ上がり時に物質だと)



物質優勢期の開始が遅くなる
($z \sim 3000$ の時には相対
論的となって、放射として振
る舞う為)

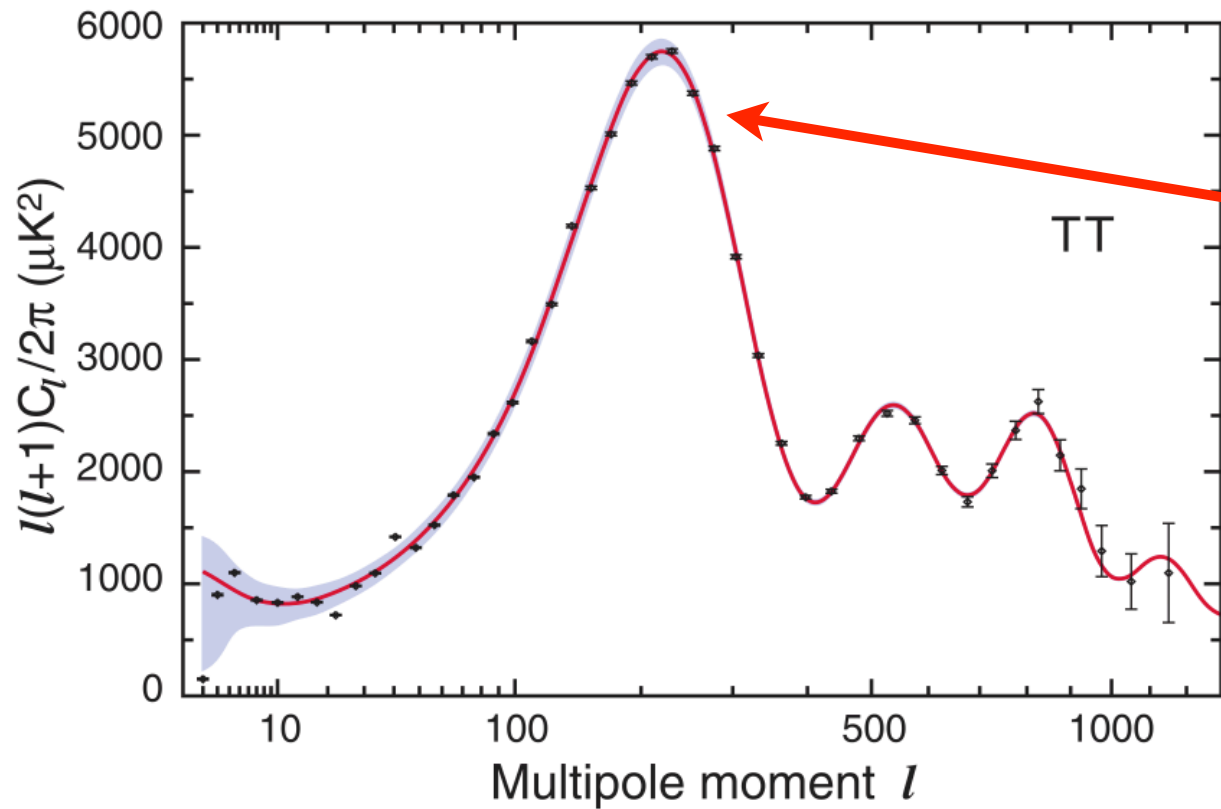


音響振動のピークが左上
に移動する(ISW効果)

大 ← 角度スケール ($l/180^\circ$) → 小

CMB温度揺らぎの1st peakから制限が付けられる。

WMAP 9yr. (温度揺らぎ)



標準 Λ CDMモデル(=0質量ニュートリノ)で良くデータを再現できている。

→ 晴れ上がり時に非相対論的なニュートリノ ($\sum m_\nu > \sim 3 \times 0.56 \text{eV}$)の兆候は無し。

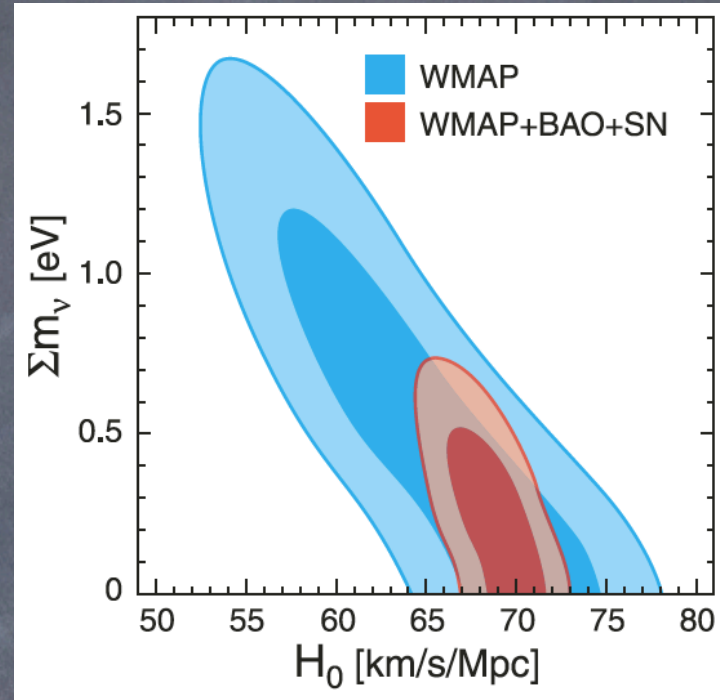
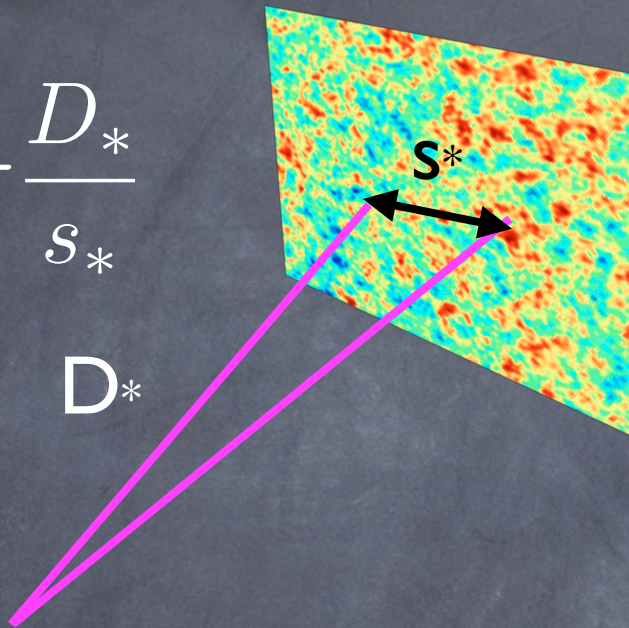
温度揺らぎ(1st peak)からの制限: $\sum m_\nu < 1.3 \text{eV}$

仮定も少なくクリーンな制限。

これだけでも $0\nu\beta\beta$ の上限値にひけを取っていない。

“Distance Degeneracy”

$$\ell_a = \pi \frac{D_*}{s_*}$$



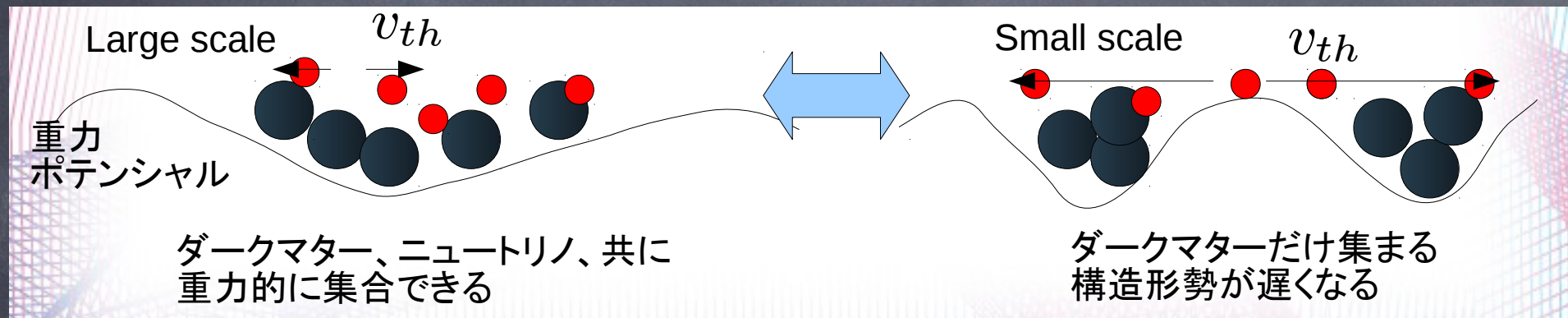
komatsu et. al.
2008

- ゆらぎの大きさは、晴れ上がりまでの距離(ハッブル定数、 Ω_Λ 、曲率)でも調整できる = ニュートリノ質量と強く縮退。
- 感度を上げるにはこの縮退を解かないといけない。(例 $\Sigma m_\nu < 0.30$ eV (PLANCK + BAO))
- CMB単体でも重力レンズ効果だと縮退が解ける。

(2) 宇宙大規模構造への影響

大スケール

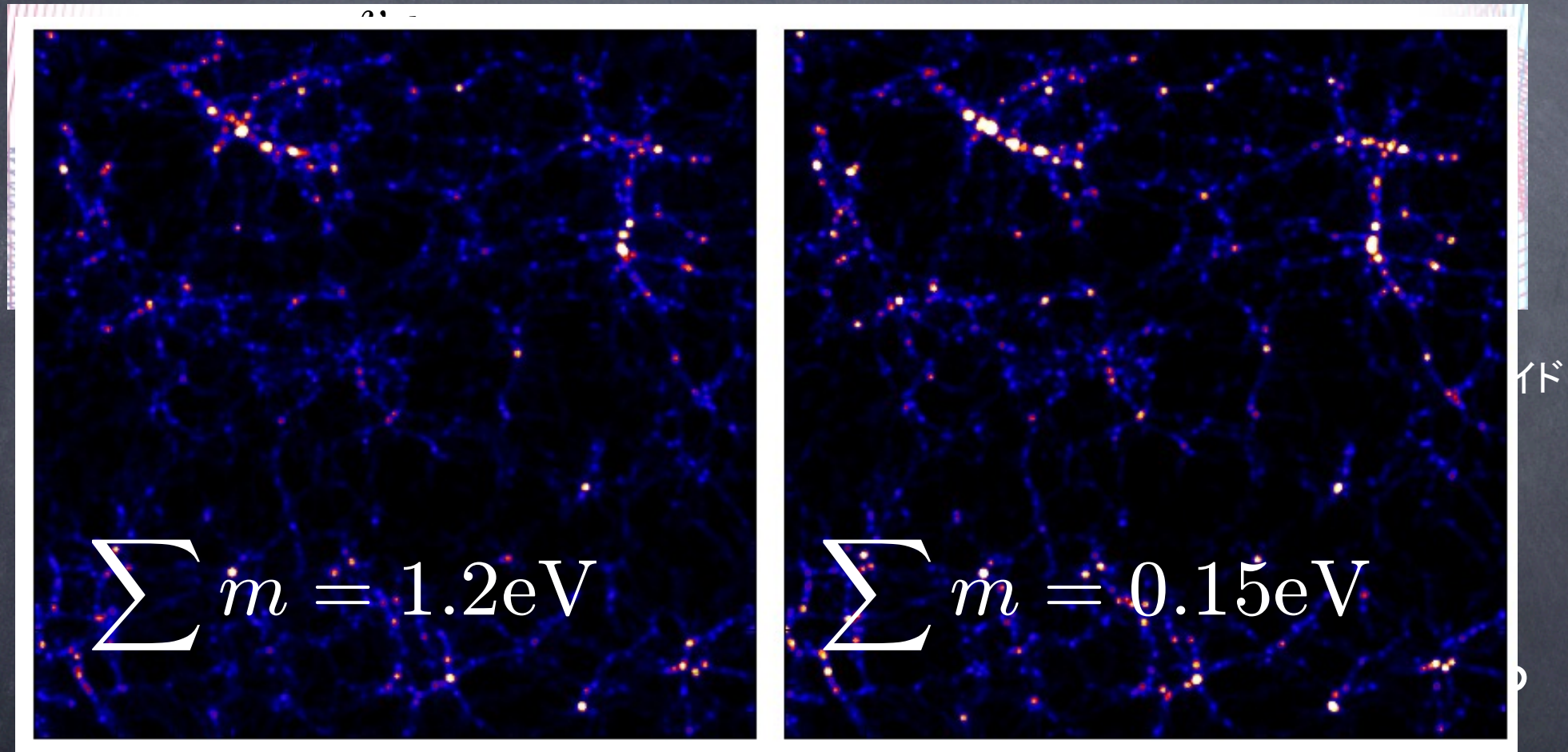
小スケール



市来氏(名古屋)
2011年春物理学会ニュートリノシンポジウムスライド

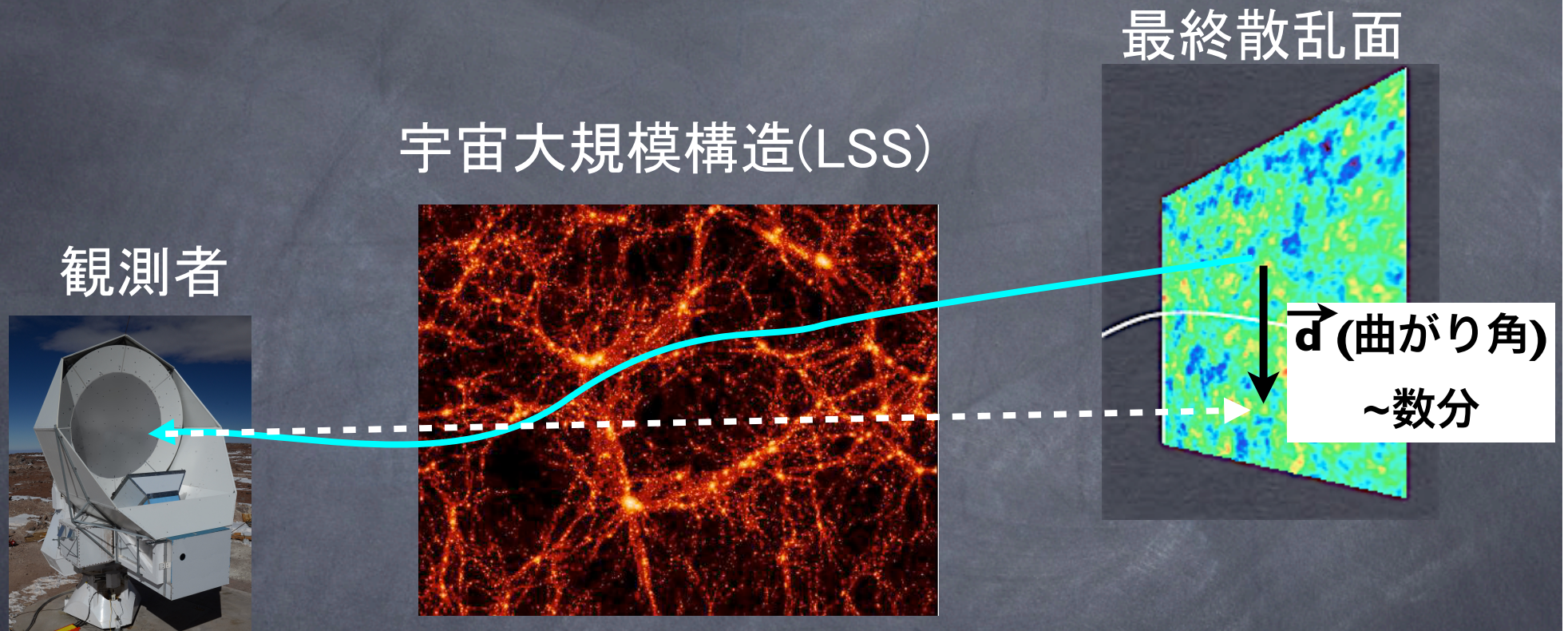
- ニュートリノは非常に大きな速度分散を持つ
 - あるスケール以下には留まれない (物質としてゆらぎに寄与できない)
 - 小スケールで大規模構造がならされる。

(2) 宇宙大規模構造への影響

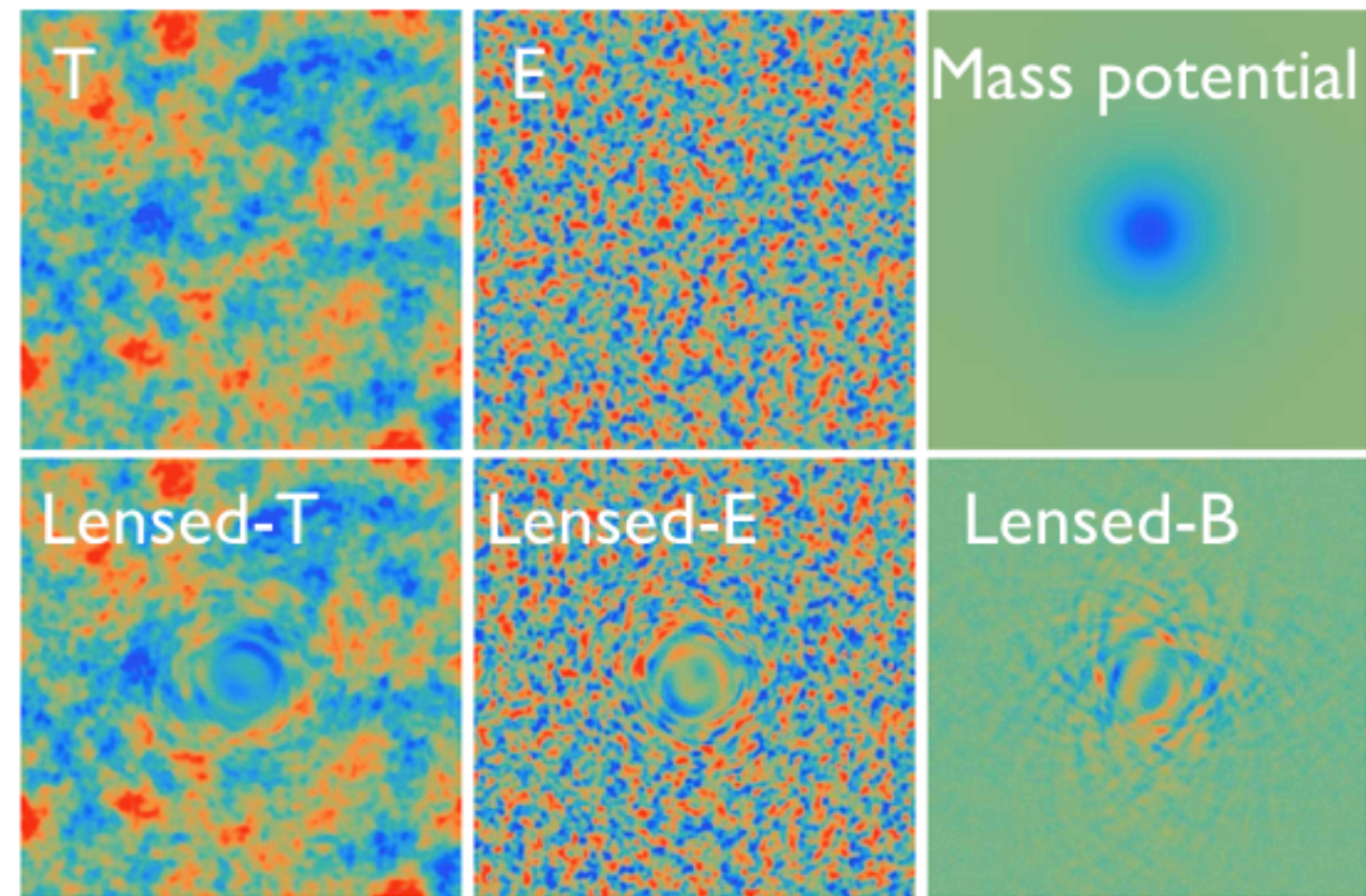


- 小スケールで大規模構造がならされる。
抑制ぐあいから $\frac{20}{20}$ ニュートリノ質量の情報を得る

CMB重力レンズ効果

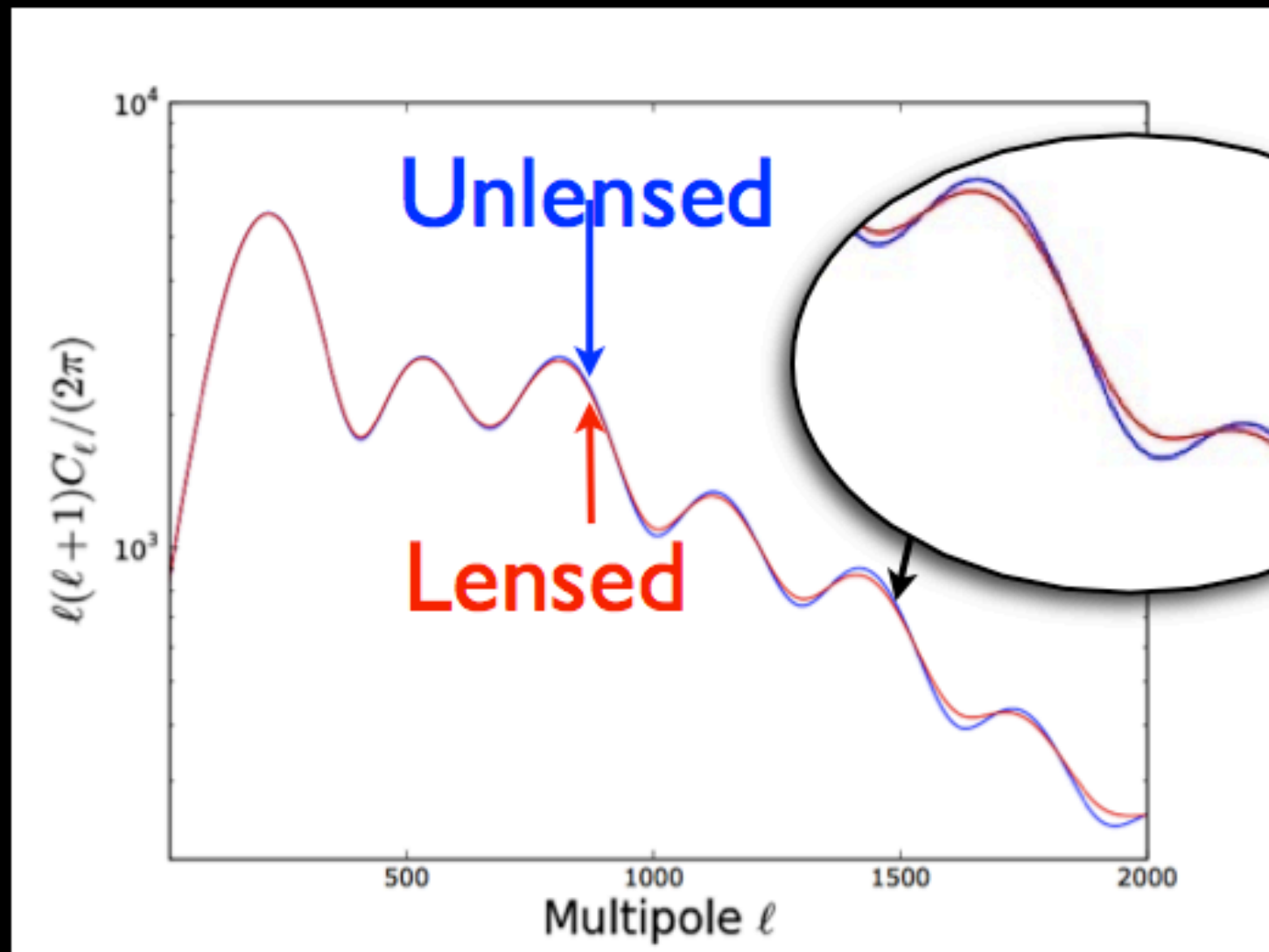


- 重力レンズ効果でCMBの像(マップ)も歪む
- 小スケールの温度ゆらぎがならされる。
- “重力レンズ 偏光Bモード” がうまれる。



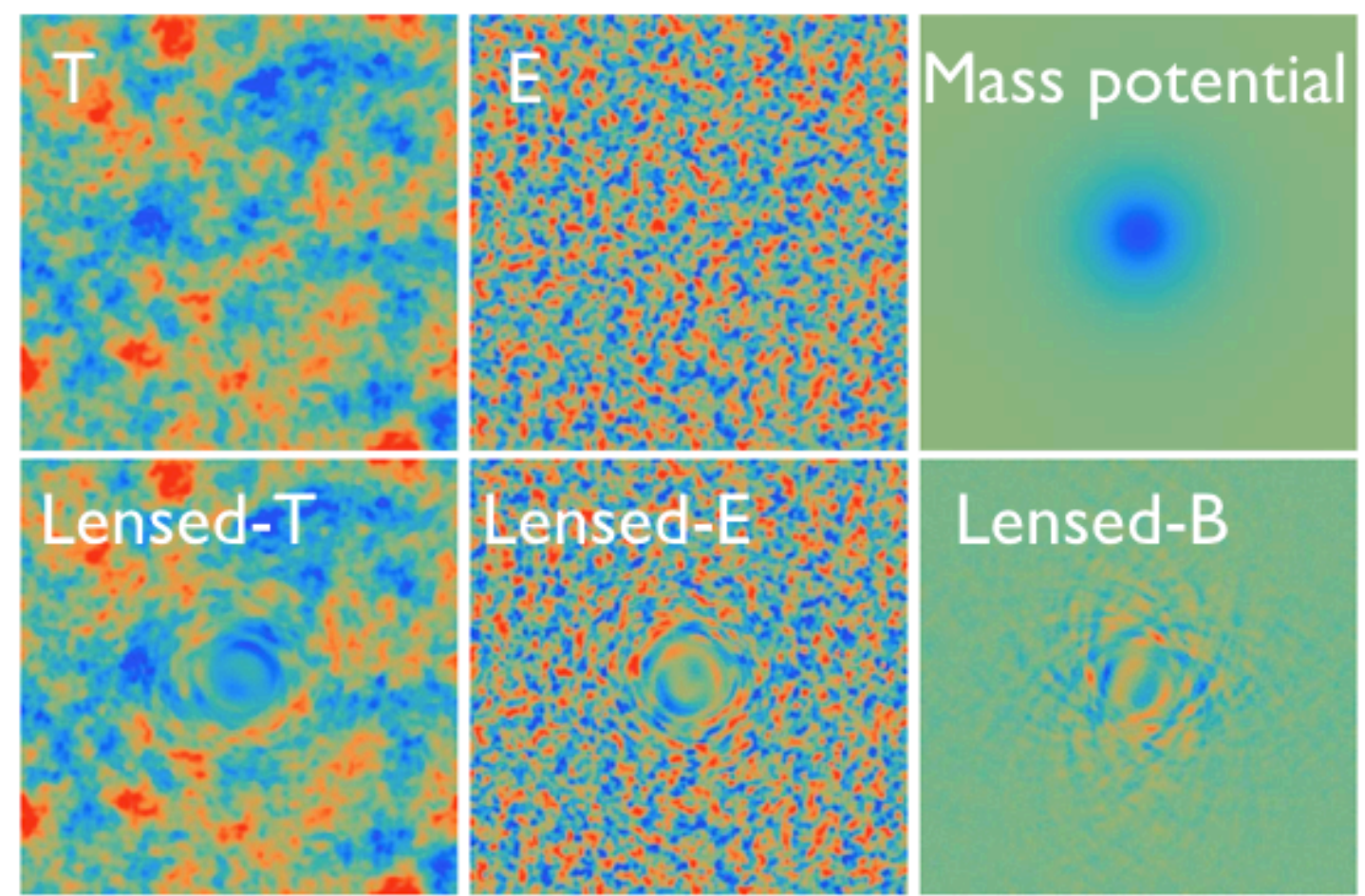
Hu and Okamoto (2002)

- 重力レンズ効果でCMBの像(MAP)も歪む
 - 小スケールの温度ゆらぎがならされる。
 - “重力レンズ 偏光Bモード” がうまれる。



がり角)

- ② 小スケールの温度ゆらぎがならされる。
- ② “重力レンズ 偏光Bモード” がうまれる。

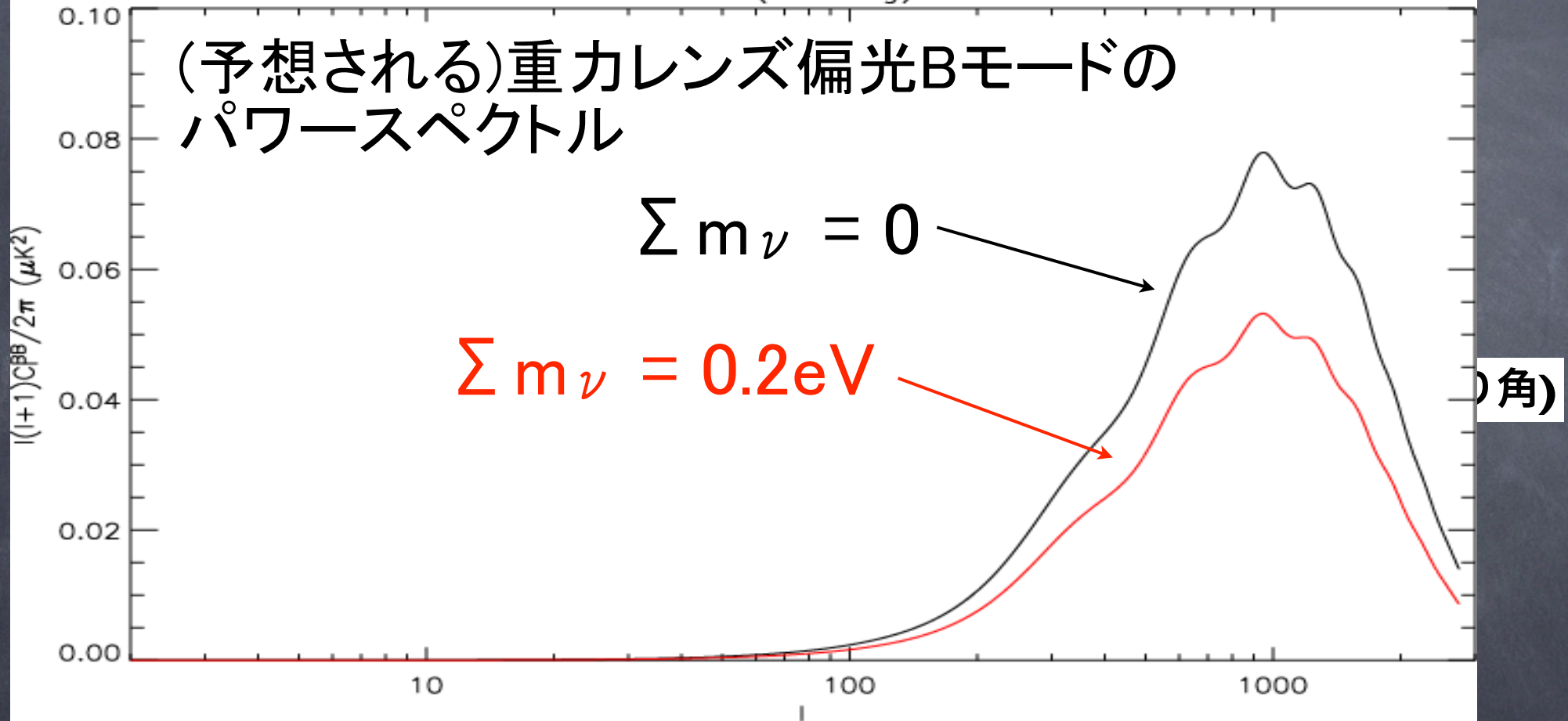


Hu and Okamoto (2002)

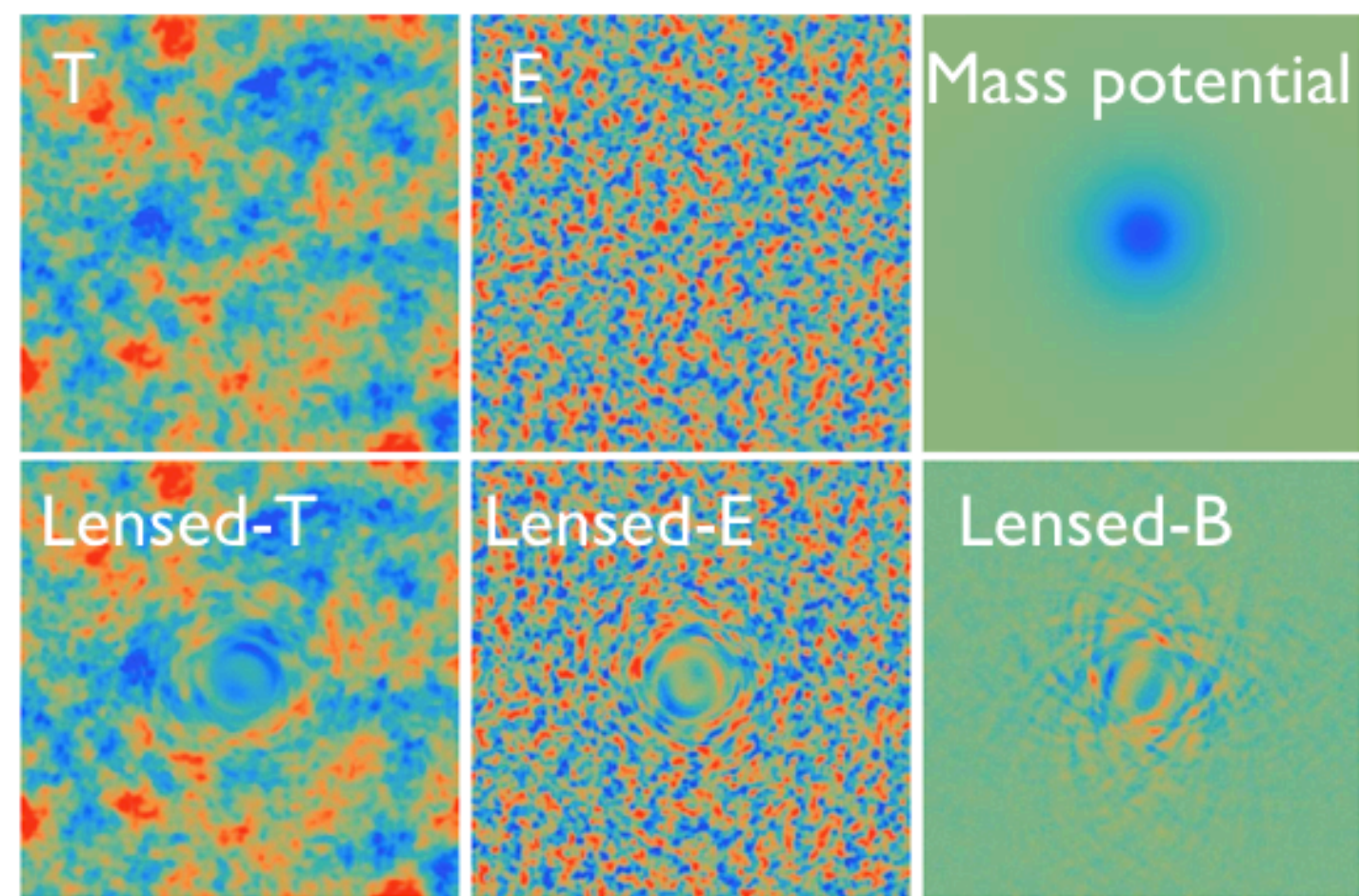
- 重力レンズ効果でCMBの像(MAP)も歪む
 - 小スケールの温度ゆらぎがならされる。
 - “重力レンズ 偏光Bモード” がうまれる。

BB (Lensing)

(予想される)重カレンズ偏光Bモードの
パワースペクトル



- 重カレンズ効果でCMBの像(MAP)も歪む
- 小スケールの温度ゆらぎがならされる。
- “重カレンズ 偏光Bモード” がうまれる。



Hu and Okamoto (2002)

- 重力レンズ効果でCMBの像(MAP)も歪む
 - 小スケールの温度ゆらぎがならされる。
 - “重力レンズ 偏光Bモード” がうまれる。

注: 実際は重力ポテンシャルを再構成して議論しますが(その方が精度は格段に上がる)今日は割愛します。

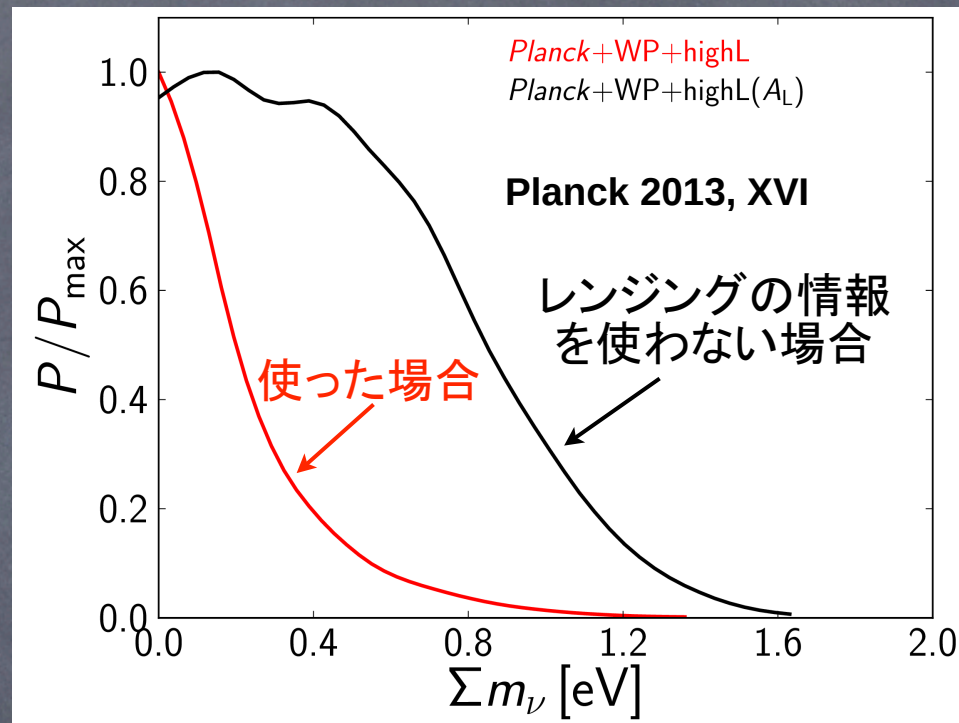
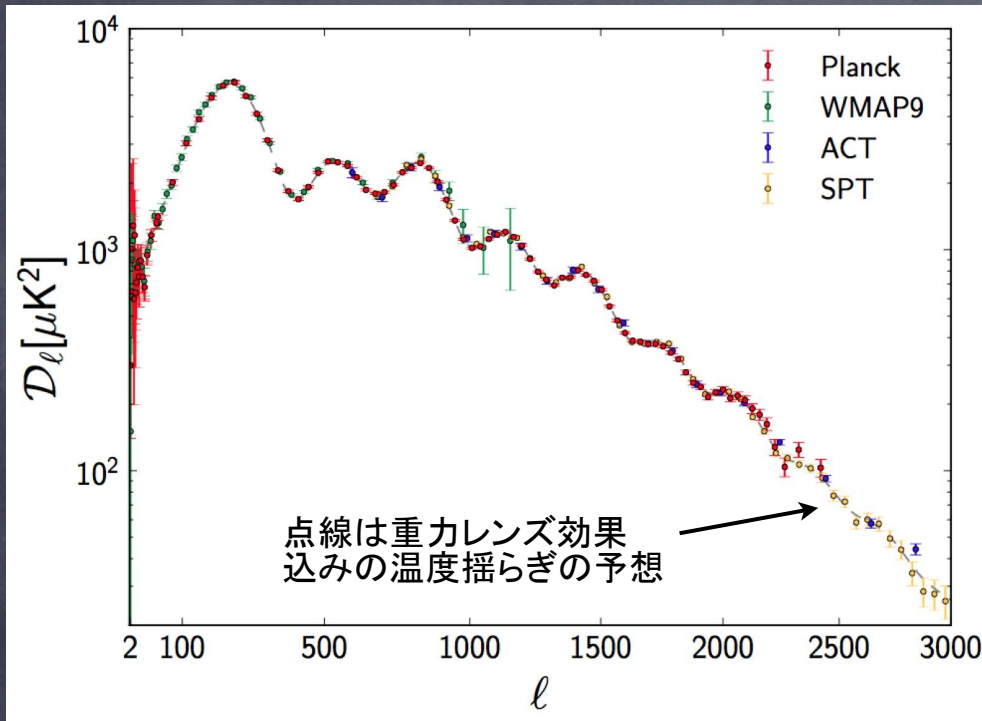
これらの効果から、ニュートリノ質量に制限がつけられる。

目次

- インTRODクシヨN (CMB, 宇宙背景ニュートリノ)
- CMB観測によるニュートリノ質量測定
 - 測定方法
 - 膨張則への影響を見る
 - 弱重力レンズ効果を見る
 - 最新の観測状況と今後の展望
 - POLARBEAR/Simons Array 計画
- CMB + 他の宇宙観測による展望 (時間があれば)
- まとめ

CMB観測の新しい応用例

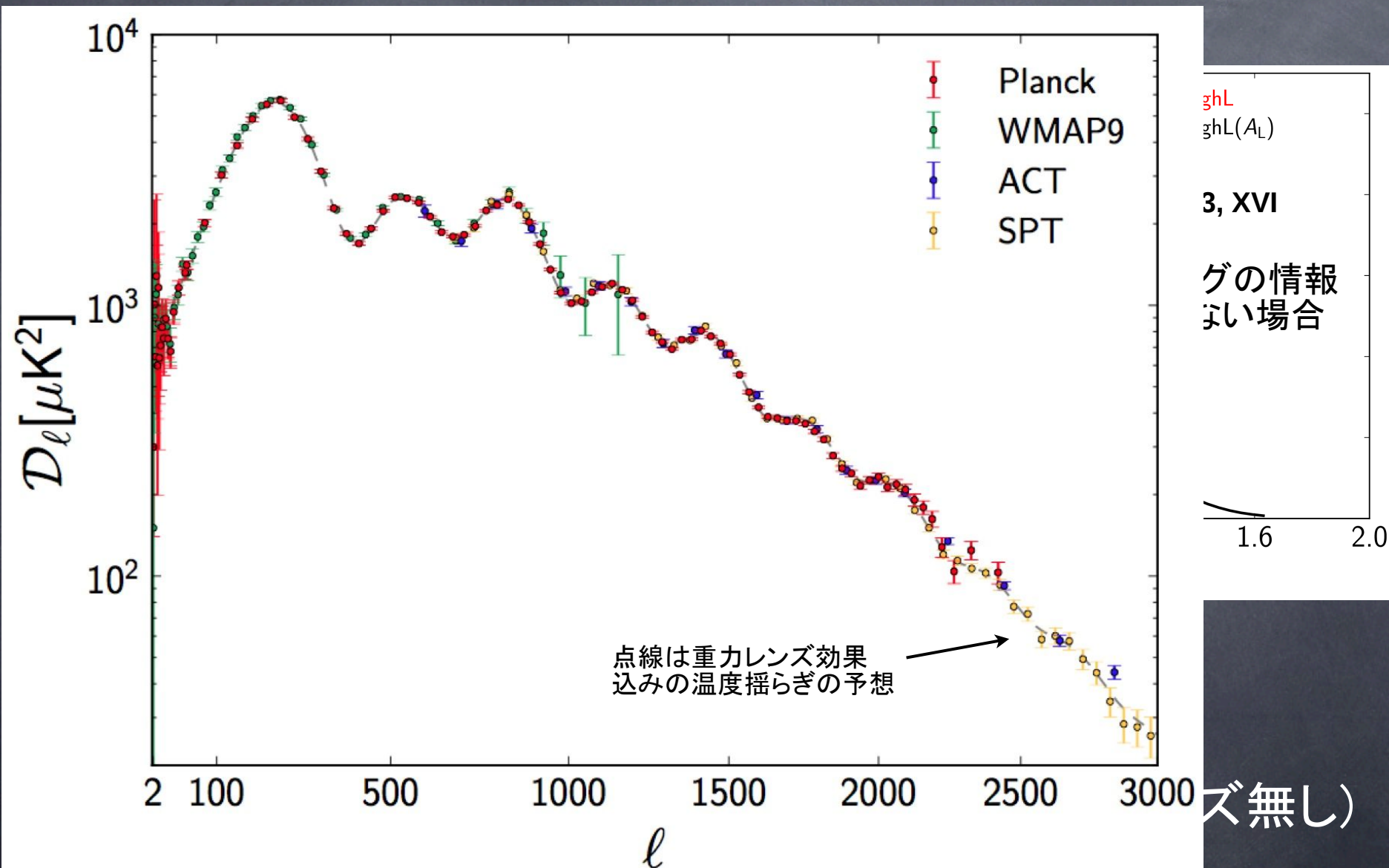
最新の観測状況 (温度ゆらぎ)



- 温度揺らぎの抑制はSPT実験で良く観測されている。
- CMB観測only (PLANCK+WP+SPT)で
 - $\Sigma m_\nu < 0.66\text{eV}$ (95%CL) \longleftrightarrow 1.08eV (重力レンズ無し)

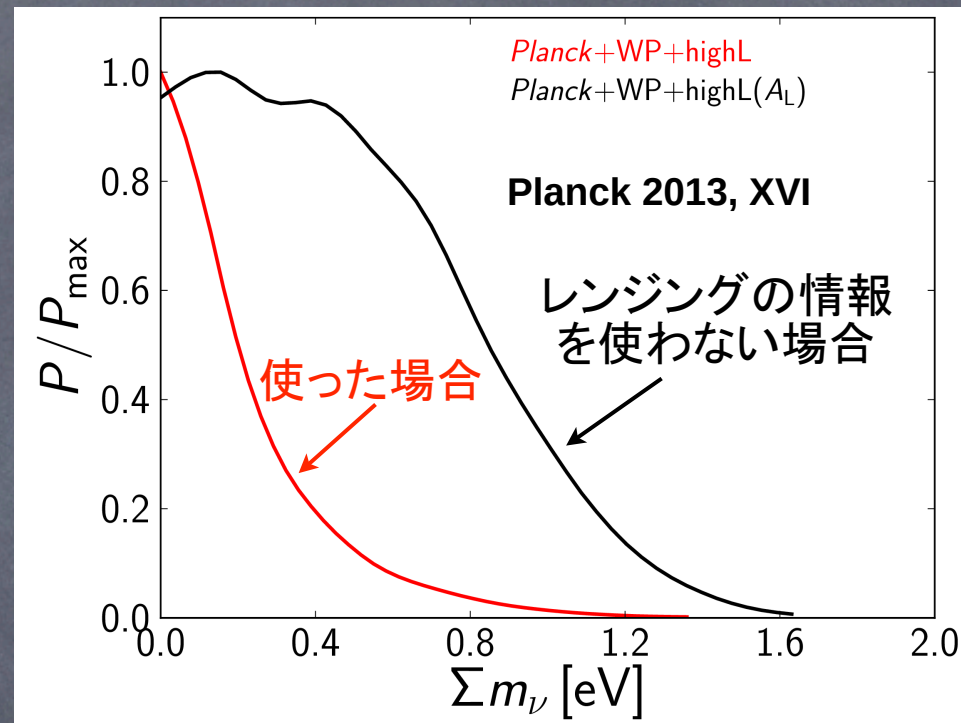
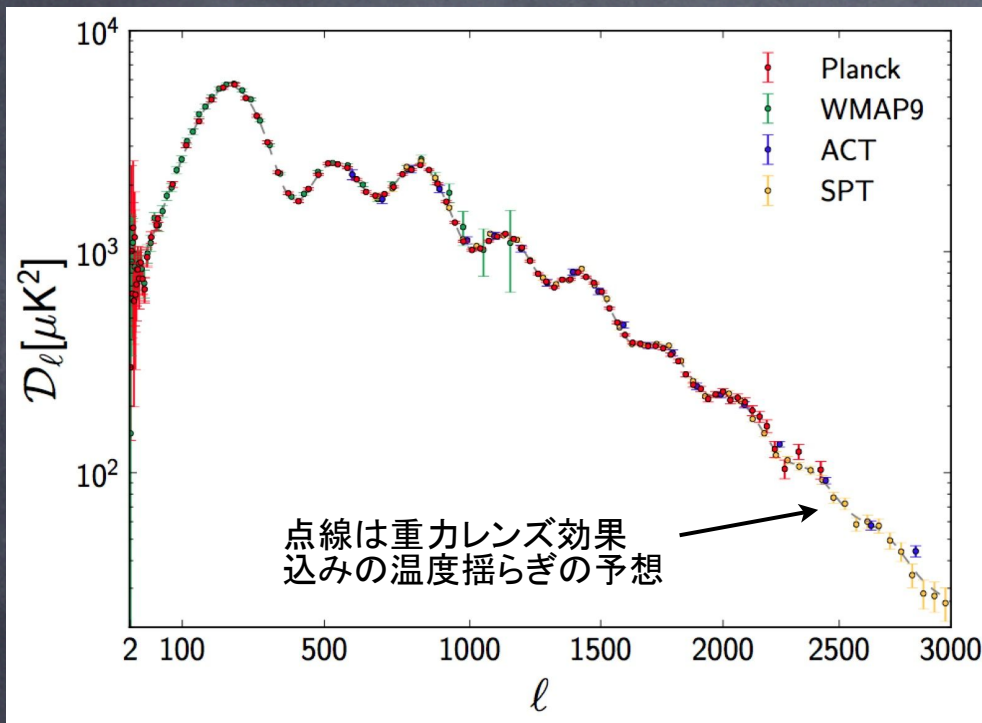
重力レンズ効果を通して $0(<\text{eV})$ の探索精度が実現できている

最新の観測状況（温度ゆらぎ）



重力レンズ効果を通して $0 < eV$ の探索精度が実現できている

最新の観測状況 (温度ゆらぎ)

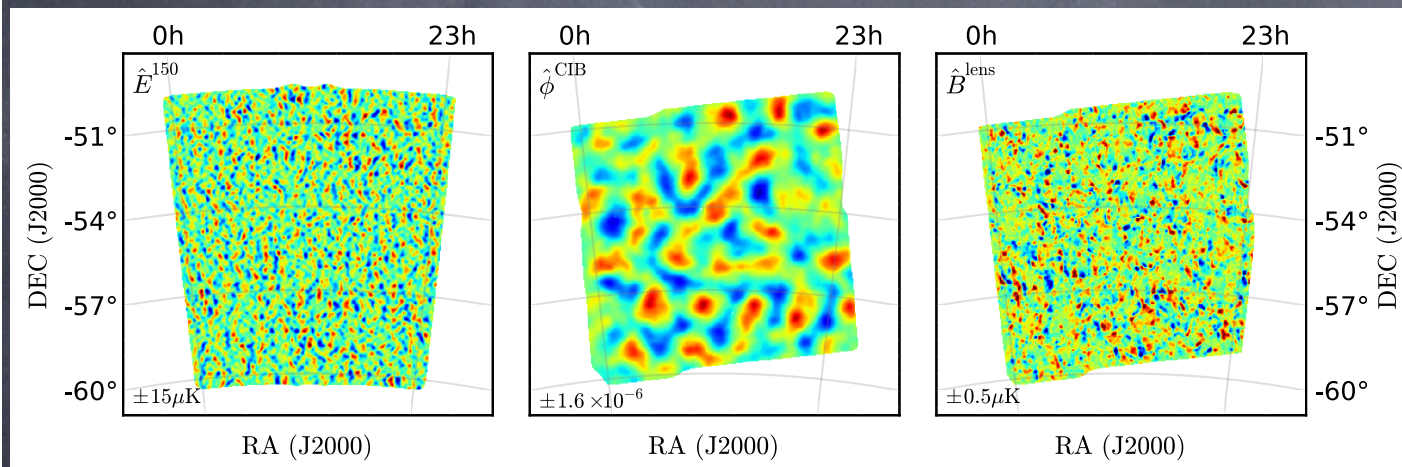


- 温度揺らぎの抑制はSPT実験で良く観測されている。
- CMB観測only (PLANCK+WP+SPT)で
 - $\Sigma m_\nu < 0.66\text{eV}$ (95%CL) \longleftrightarrow 1.08eV (重力レンズ無し)

重力レンズ効果を通して $0(<\text{eV})$ の探索精度が実現できている

最新の観測状況 (Bモード偏光)

$$\text{Eモードマップ (SPTpol)} \times \text{重力ポテンシャル (CIB)} = \text{Bモードマップ (再構成)}$$

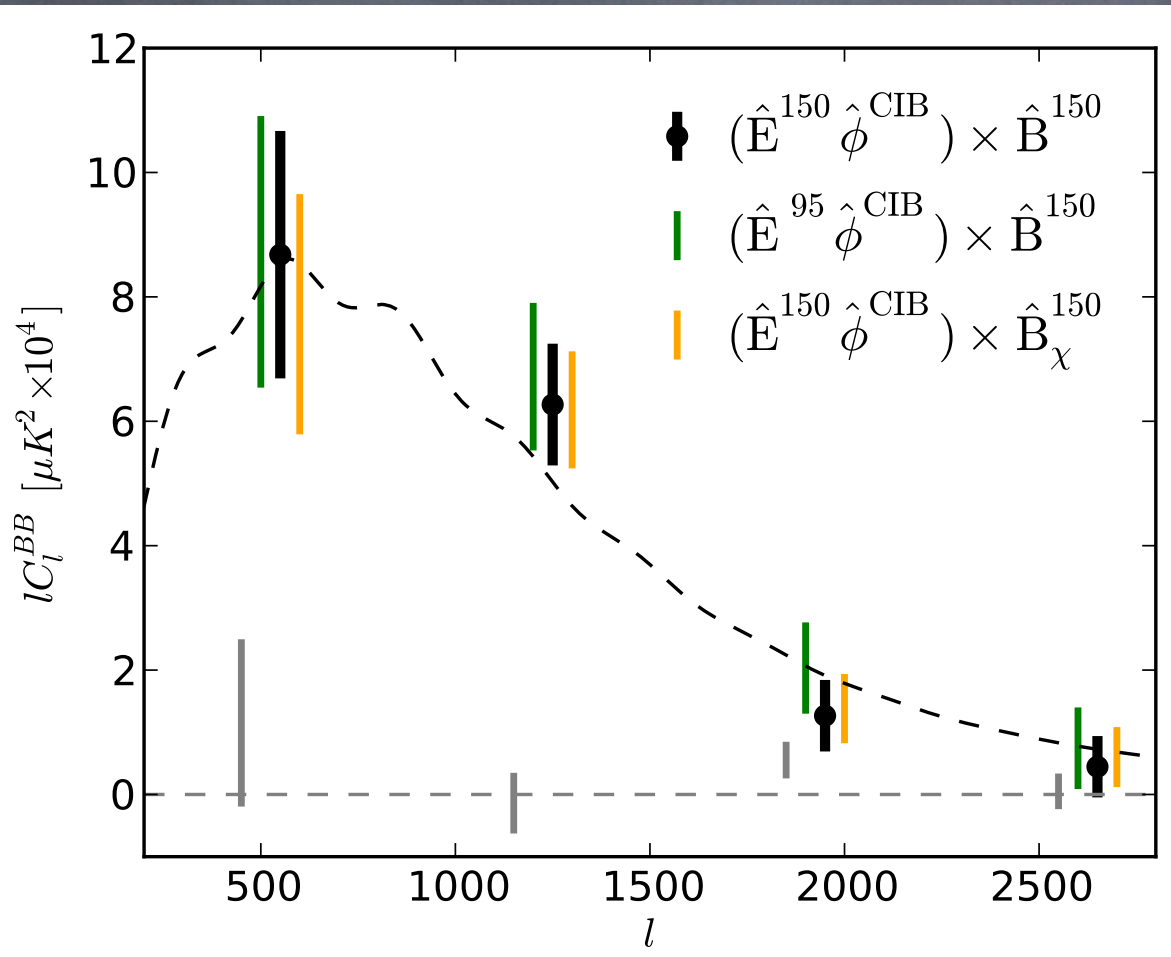
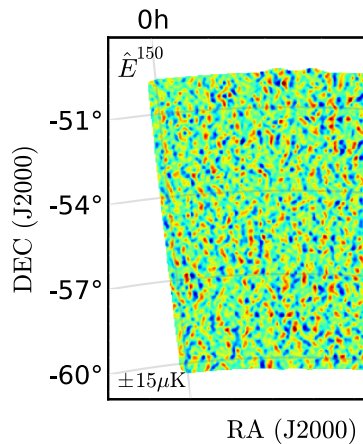


SPTpol
Bモード
マップ
(not openly
available)

- SPTpolが(CIBのデータを用いて)重力レンズBモードの検出に成功。
- 偏光Bモードを用いた ν 質量の制限はこれから

最新の観測状況 (Bモード偏光)

Eモードマップ
(SPTpol)



SPTpol
Bモード
マップ
(not openly
available)

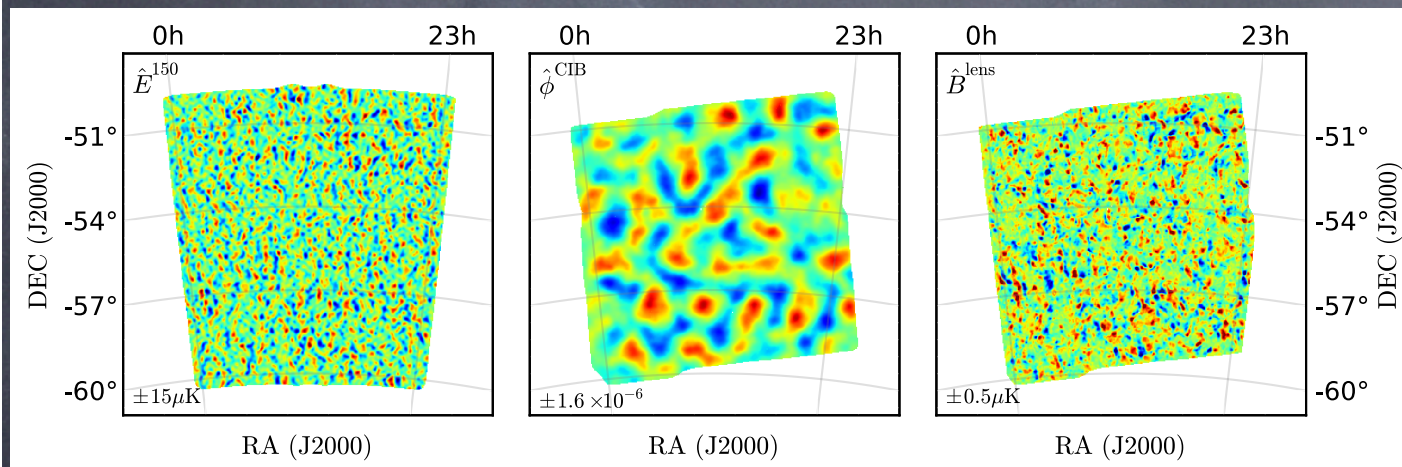
SPTpol
に成功

Bモードの検出

偏光Bモードを用いた ν 質量の制限はこれから

最新の観測状況 (Bモード偏光)

Eモードマップ (SPTpol) × 重力ポテンシャル (CIB) = Bモードマップ (再構成)



SPTpol
Bモード
マップ
(not openly available)

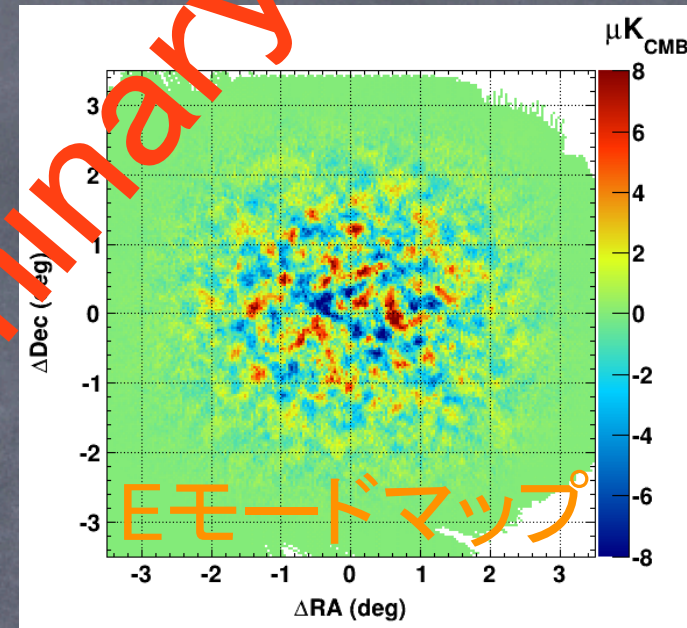
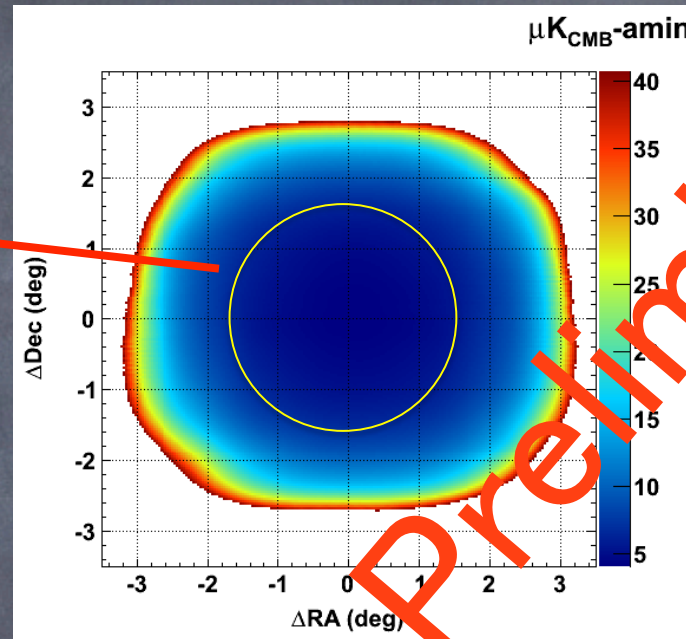
- SPTpolが(CIBのデータを用いて)重力レンズBモードの検出に成功。
- 偏光Bモードを用いた ν 質量の制限はこれから。
- POLARBEARはBB自己相関の初検出を目指して鋭意解析中

POLARBEAR-1の現状

初年度のデータ

ノイズレベル
5 μ K arcmin (偏光)

最も深いマップ
(Planckより15倍の
深さ)

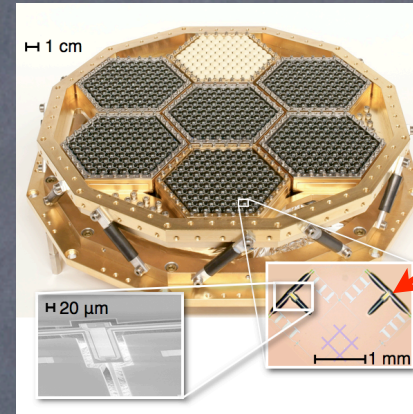


- 2012年4月から本観測開始。
- 重レンズBモードに特化した観測 (3° x3° のパッチを深くサーベイ) : すでに >3000時間のデータ取得。
- 鋭意解析中 (解析パイプラインの構築(茅根)、偏光特性の較正(西野)で大活躍中)

POLARBEARロードマップ

- POLARBEAR-1 (2012 -)

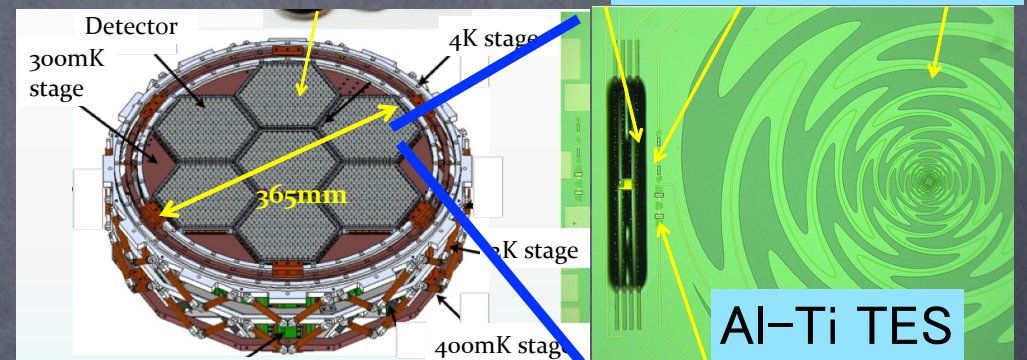
- 1274 bolometers
- 150GHz
- 75meV (w/ Planck)



TES bolometer

- POLARBEAR-2 (2015 -)

- 7588 bolometers
 - 95 & 150 GHz
 - 65meV (w/ Planck)
- 初の日本主導のCMB偏光実験



Sinuous-antenna

Al-Ti TES

- Simons Array (2016 -)

- 22764 bolometers
- 95, 150, 220GHz
- 60meV (w/ Planck)



PB2 x 3台

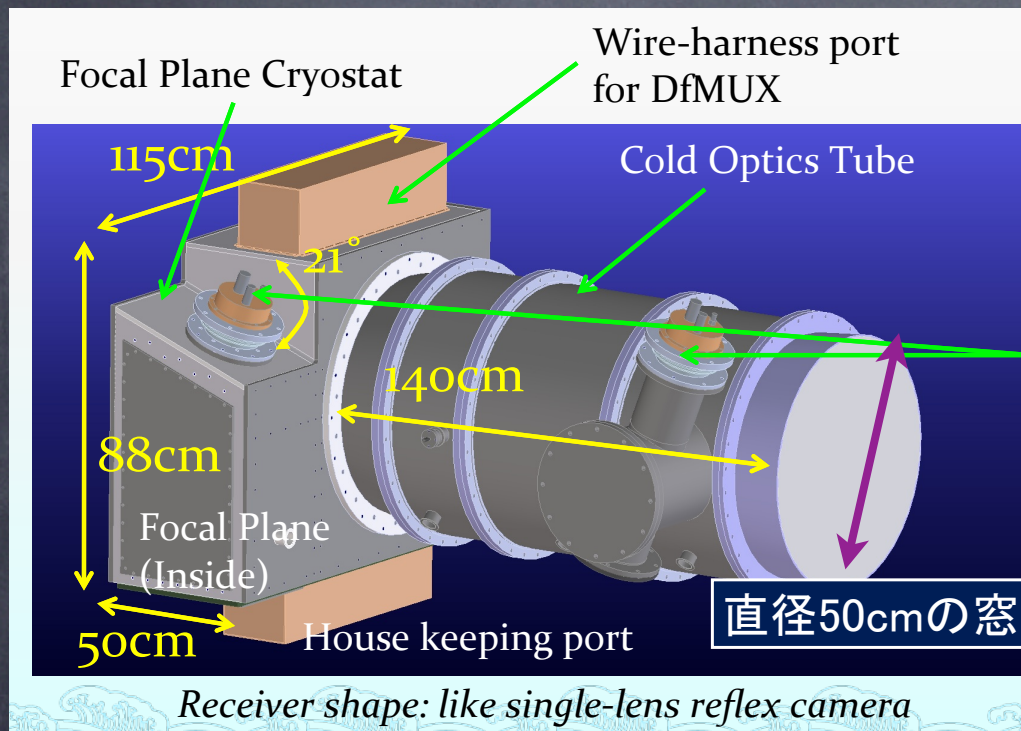
POLARBEAR-2の開発現状

POLARBEAR-2 レシーバ

CMB史上最大の焦点面サイズ
(7566個のTESボロメータアレイ)

Challenges

1. 50cmの窓を開けながら、焦点面を0.25Kまで冷却（低温、光学系）
2. 7588個のボロメータを238個のSQUIDアレイで読み出し
多重読み出し: 32MUX ← 8MUX (Readout)
3. 7588個の検出器のQC



- 来年度中のdeploymentを目指してR&Dが進んでいる所。
- 腕に覚えのある方、ご連絡お待ちしております。

POLARBEAR-2の開発現状

POLARBEAR-2 レシーバ

CMB史上最大の焦点面サイズ
(7566個のTESボロメータアレイ)

Challenges

1. 50cmの窓を開けながら、焦点面を0.25Kまで冷却（低温、光学系）
2. 7588個のボロメータを238個のSQUIDアレイで読み出し
多重読み出し: 32MUX ← 8MUX (Readout)
3. 7588個の検出器のQC



- 来年度中のdeploymentを目指してR&Dが進んでいる所。
- 腕に覚えのある方、ご連絡お待ちしております。

目次

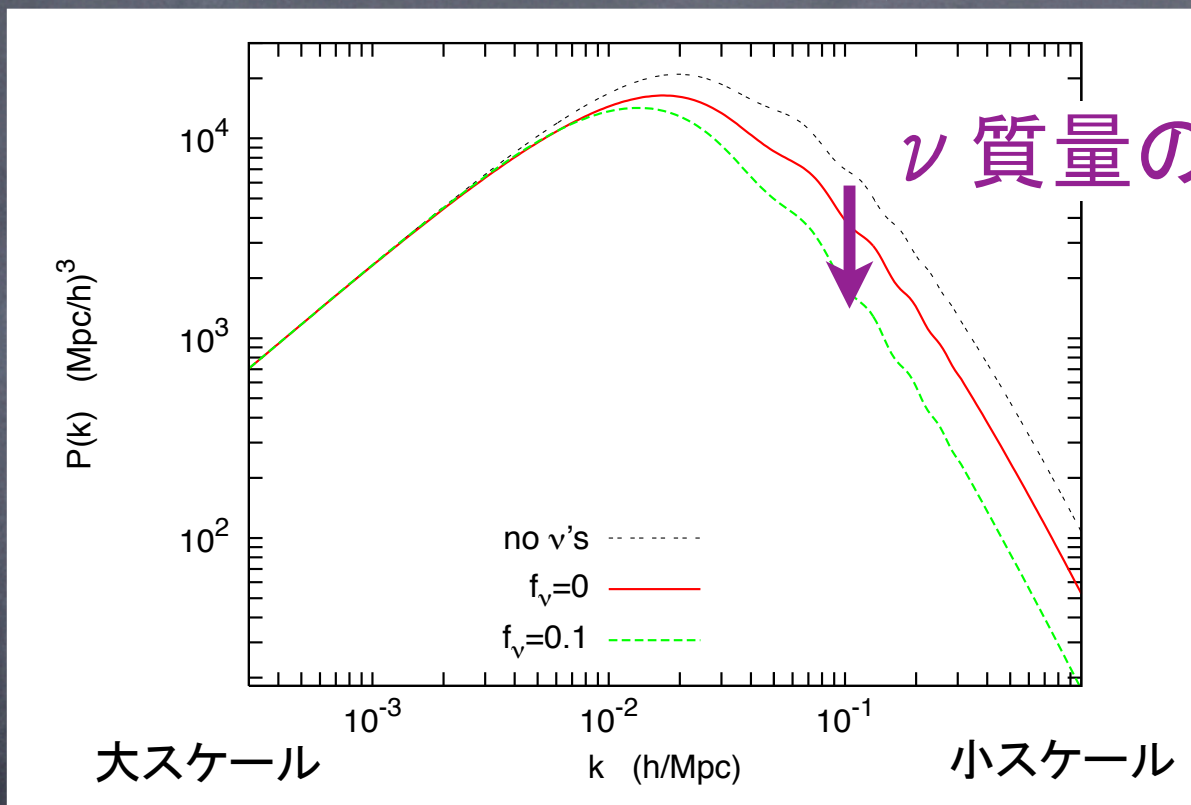
- インTRODクシヨN (CMB, 宇宙背景ニュートリノ)
- CMB観測によるニュートリノ質量測定
 - 測定方法
 - 膨張則への影響を見る
 - 弱重力レンズ効果を見る
 - 最新の観測状況と今後の展望
 - POLARBEAR/Simons Array 計画
- CMB + 他の宇宙観測による展望 (時間があれば)
- まとめ

CMB観測の新しい応用例

物質揺らぎのパワースペクトル

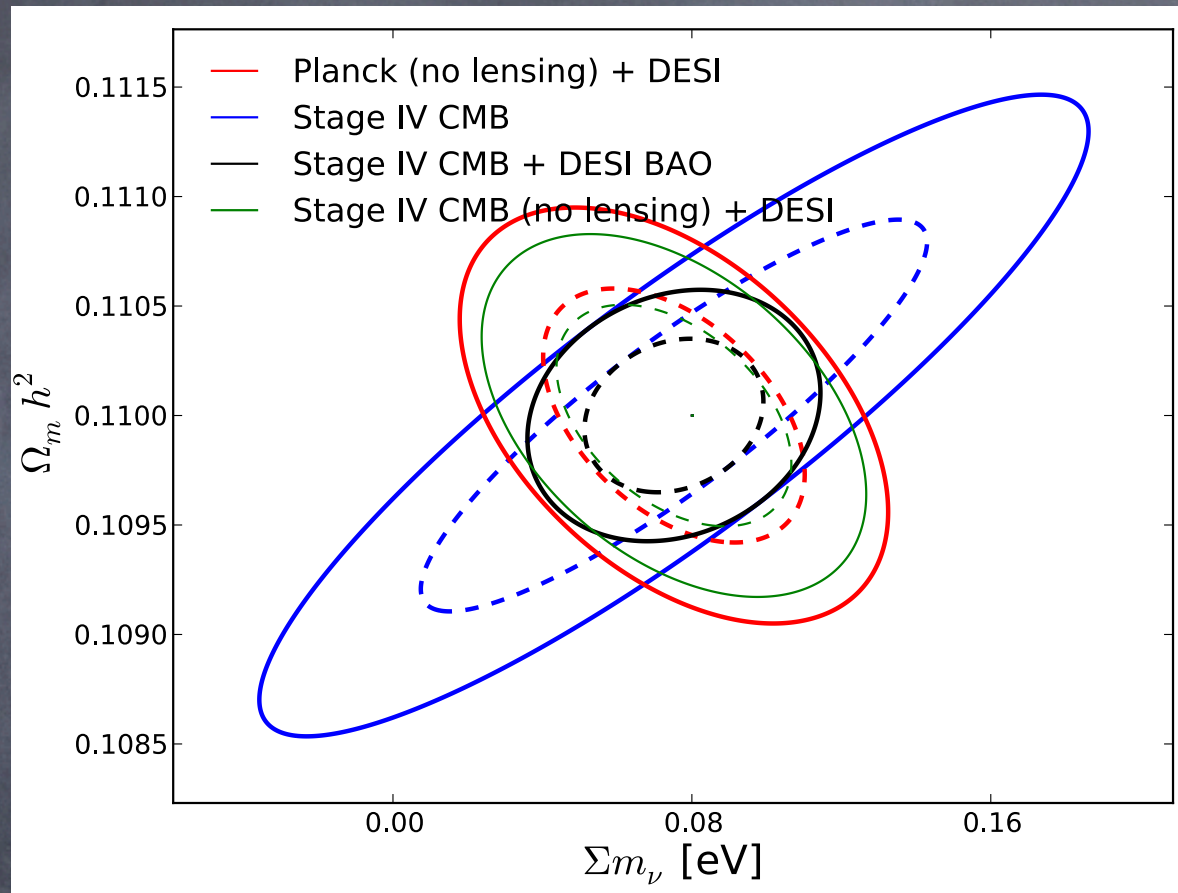
(=大規模構造
の定量化)

CMB ← 銀河サーベイ ← 弱重カレンズ ← Ly α ←



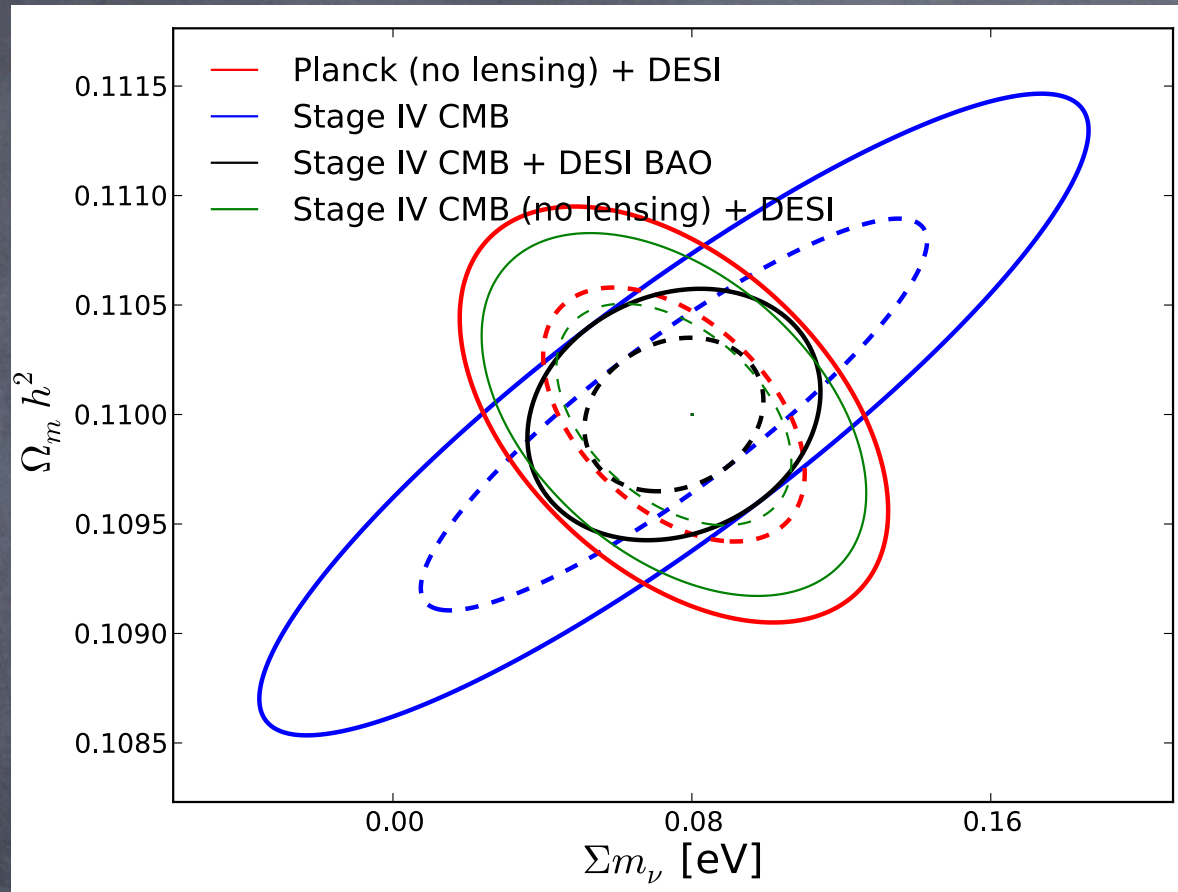
- 大規模構造をトレースできる測定は他にもたくさんある。
- 小スケールに行くほどニュートリノ質量の効果が顕著になるので、CMB(大～中) + その他の測定(小スケール)で攻めるのが効果的。

CMB + 銀河サーベイ



- 高感度(50万個のTES)、高角度分解能なCMB偏光観測と、広領域の銀河サーベイ(分光)が実現すれば、階層構造を決定できる精度が期待できる ($\sigma(\Sigma m_\nu) = 16\text{meV}$)。

CMB + 銀河サーベイ

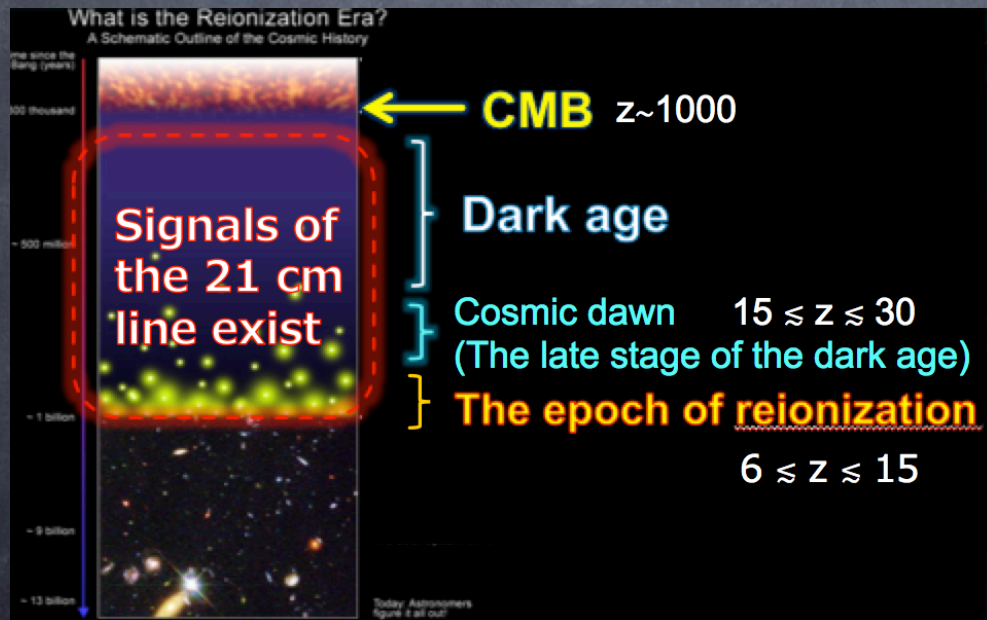


- ちなみに、黒線（重力レンズ効果をCMBで見る）vs 緑線（重力レンズ効果を銀河サーベイで見る）からも、CMB観測が効果的にニュートリノ質量の制限に効いているのがわかる。

CMB + 21cm 観測

21cm トモグラフィー (中性水素からの微弱な電波)

HI gas
(IGM)



詳しくはAstrophys.J.653:810-830 (2006) 等

有利な点:

- ・ 小スケールまでゆらぎが線形
- ・ $z > 6$ に感度 (DEは効かない)
- ・ トモグラフィーができる。(階層性にも言及可能)

←→ CMBと相補的

要検討な点:

- ・ 再電離の仕方
- ・ 前景放射
- ・ 銀河バイアス

- ニュートリノ質量の制限についての議論も、開始されている。

CMB + 21cm 観測からの制限

Preliminary!

大山さん、郡さん(KEK宇宙理論) & 羽澄 in preparation (2013)

- CMB (Planck+Simons Array) +21cmで、IHの場合有限質量の効果有意に観測できる見込み。 * 2016年頃~の実験

他の宇宙観測による ν 質量制限

観測量	現在の制限 [eV]	期待される制限[eV]	現存する観測	将来の観測計画
CMB	1.3	0.6	WMAP, PLANCK	—
CMB + 距離指標	0.58	0.35	WMAP, PLANCK	—
CMB + CMBの弱重力レンズ	—	0.05-0.2	PLANCK, ACT, SPT	ACTPol, SPTPol, POLARBEAR
銀河クラスタリング分布	0.6-0.8	0.1	SDSS, WiggleZ, BOSS	BigBOSS, Subaru PFS, HETDEX, WFIRST
銀河の弱重力レンズ	0.6	0.07	CFHTLS, COSMOS	DES, HSC, LSST, EUCLID
ライマン- α	0.2	0.1	SDSS, BOSS	BigBOSS, TMT, GMT
21cm	—	0.006-0.1	GBT, LOFAR, PAPER, GMRT	MWA, SKA, FFTF
銀河団の個数分布	0.3	0.1	SDSS, SPT, ACT, XMM, Chandra	DES, eRosita, LSST

天文月報(斎藤俊氏)より転用

現状の予測：宇宙論パラメータの値や、系統誤差の議論など、不確実な所も多いが、概ねどの観測でも明るい未来は描けている。

まとめ

- ニュートリノの有限質量は宇宙の進化に大きな影響を及ぼす
- CMB観測からもニュートリノ質量に制限がつけられる。
 - 膨張則への影響 <-- 主に温度ゆらぎの情報が活躍
 - 大規模構造への影響 <-- 偏光観測が(これから)活躍
- 高角度分解能のCMB偏光観測
 - POLARBEAR (KEKが参加している), SPTpol, ACTpol
 - 逆階層構造であれば、将来CMBのみで有限な ν 質量の兆候を捉えられる可能性は大。
- 宇宙観測(CMB+他の観測)からの制限も検討が進んでいる
 - 和が 0.1eV 以下である事が言えれば、IHは棄却できる。
--> 将来実験で($\sigma \sim$ 数十 eV)階層構造に決着が付く。