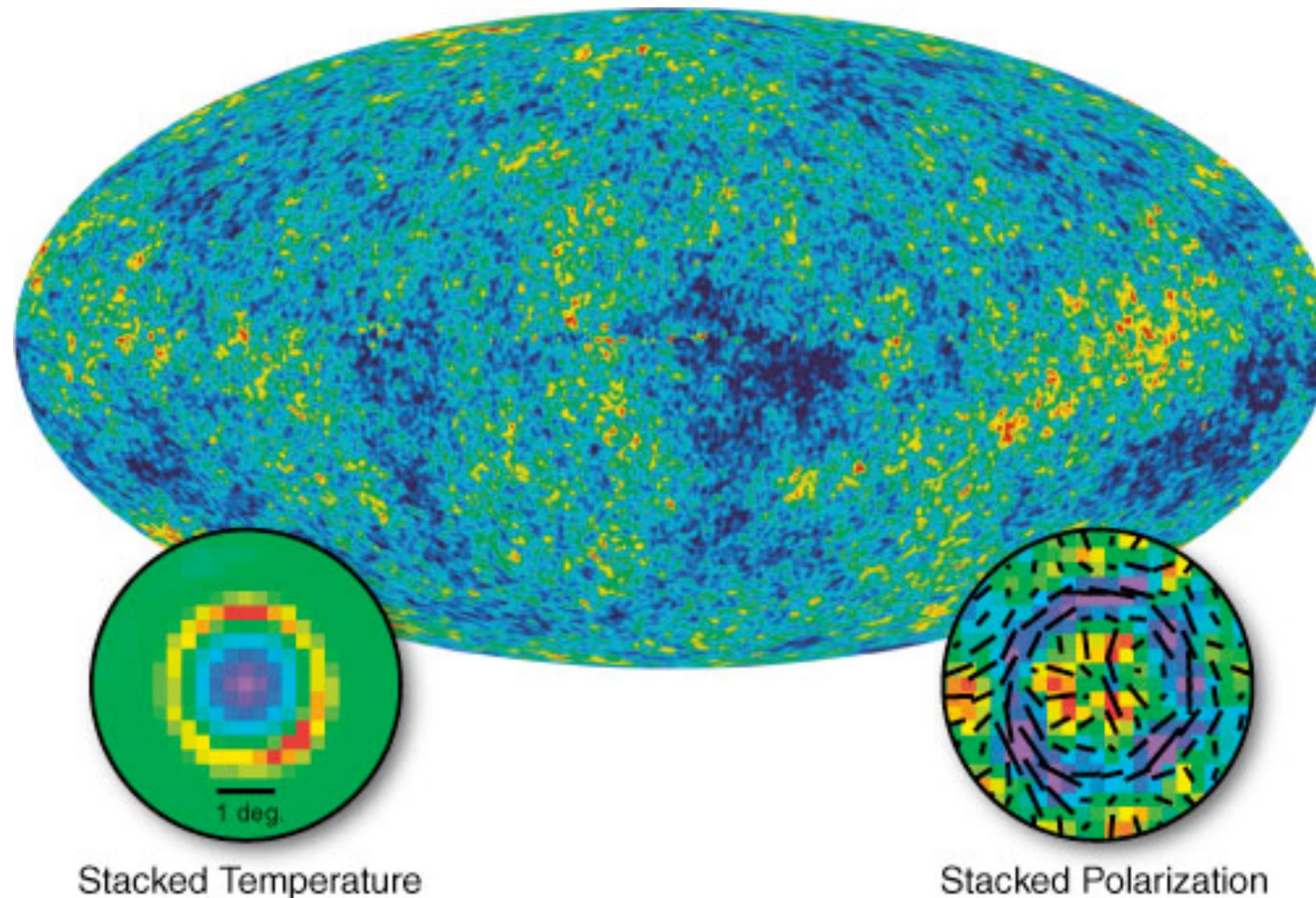


「Bモード偏光」とは何か？

小松英一郎

(テキサス宇宙論センター, テキサス大学オーステイン校)

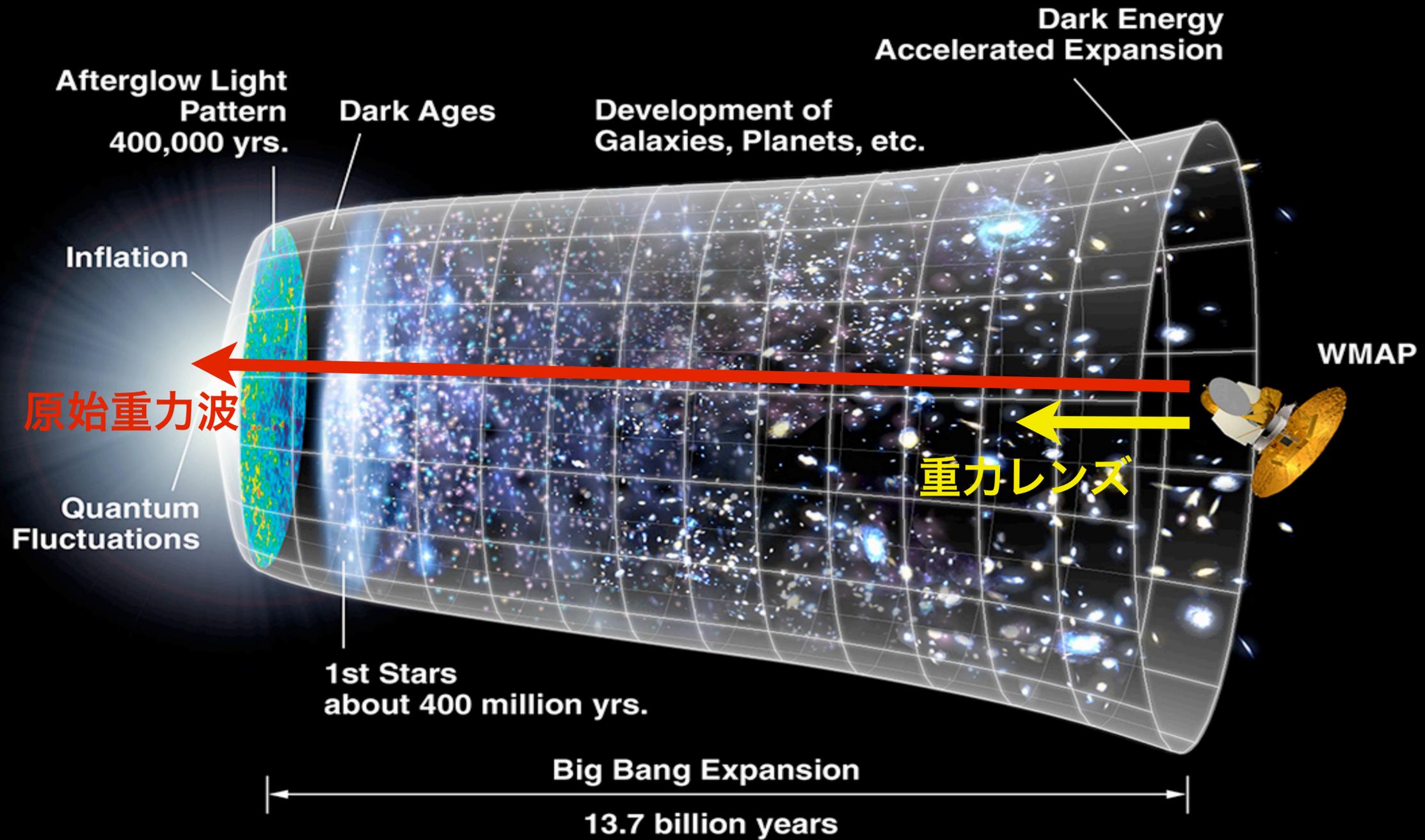
物理学会, 岡山大学, 2010年3月22日



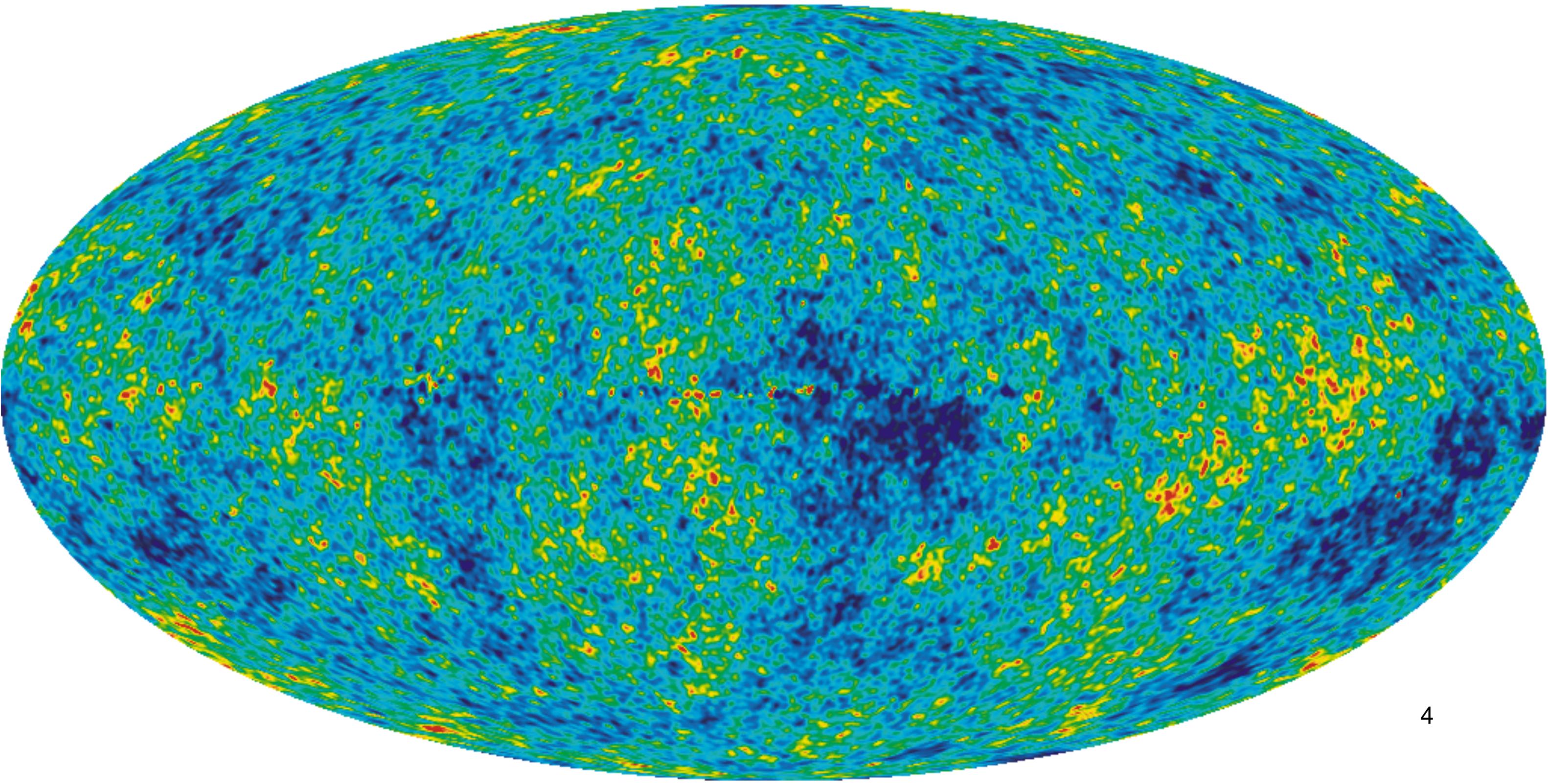
Bモード偏光で何がわかる

- **原始重力波を通じた初期宇宙の「直接」観測**
 - インフレーション宇宙にせまる
- **重力レンズを通じた宇宙の物質分布の進化の観測**
 - 暗黒エネルギーとニュートリノ質量

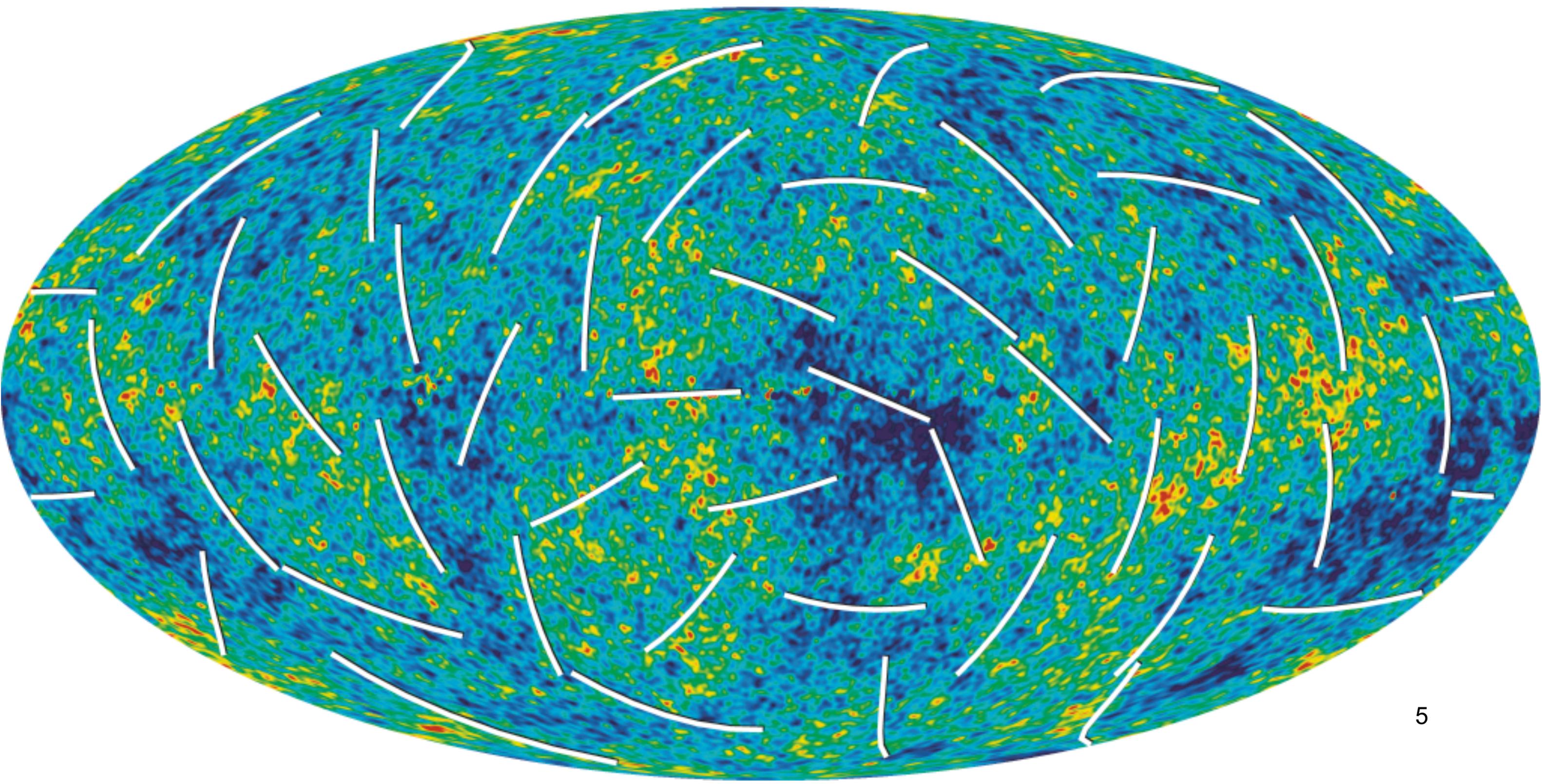
Bモード偏光で探る宇宙の進化



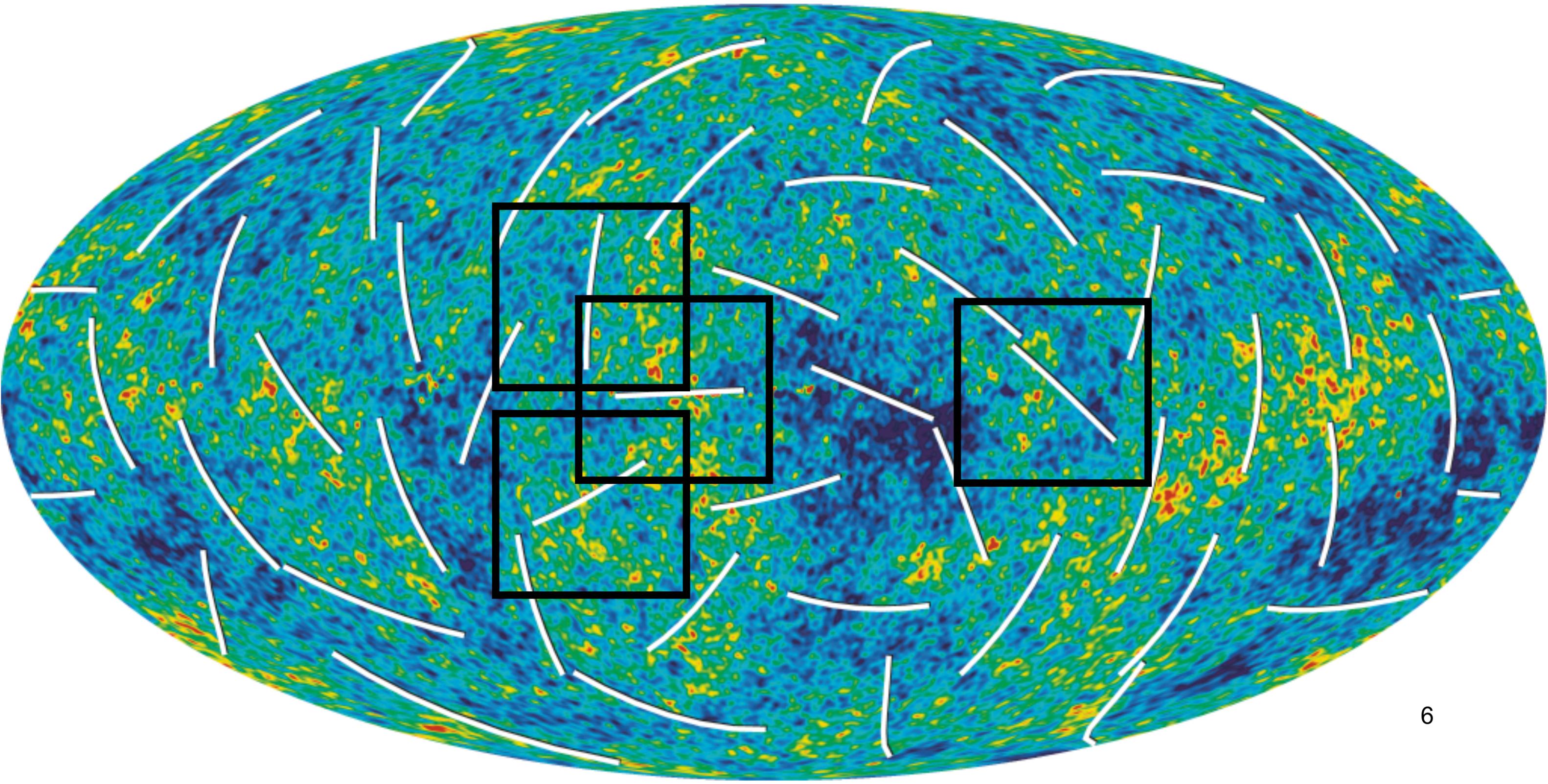
温度揺らぎから



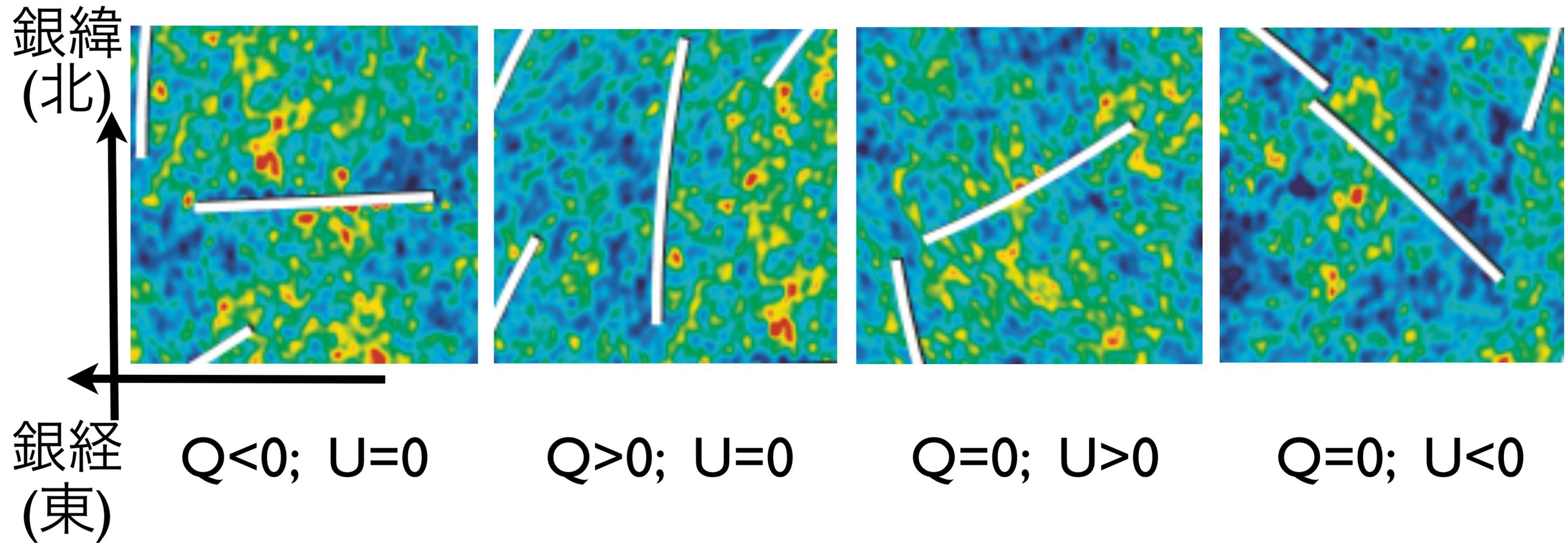
偏光へ！



白線：電場の振幅が大きい方向



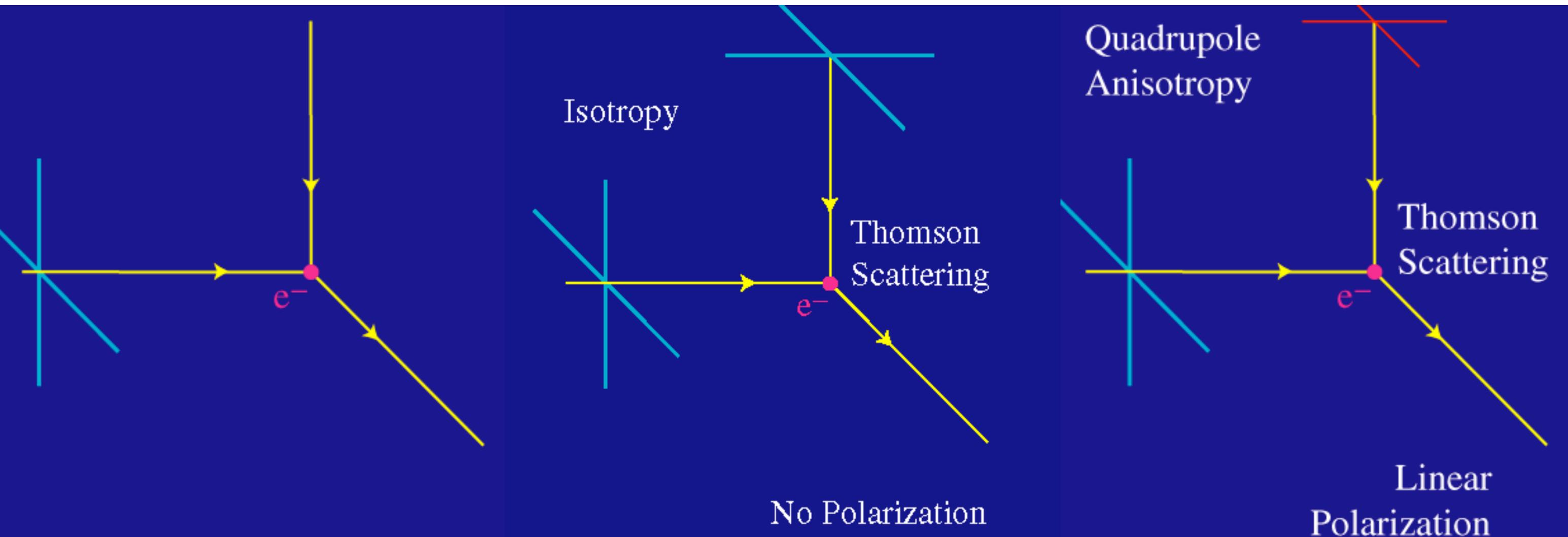
EとBに行く前に：QとU



- $Q = |E_{\text{銀緯成分}}|^2 - |E_{\text{銀経成分}}|^2$

- $U = |E_{\text{銀経から反時計周り45度成分}}|^2 - |E_{\text{銀緯から反時計回り45度成分}}|^2$

Wayne Huのウエブサイトより

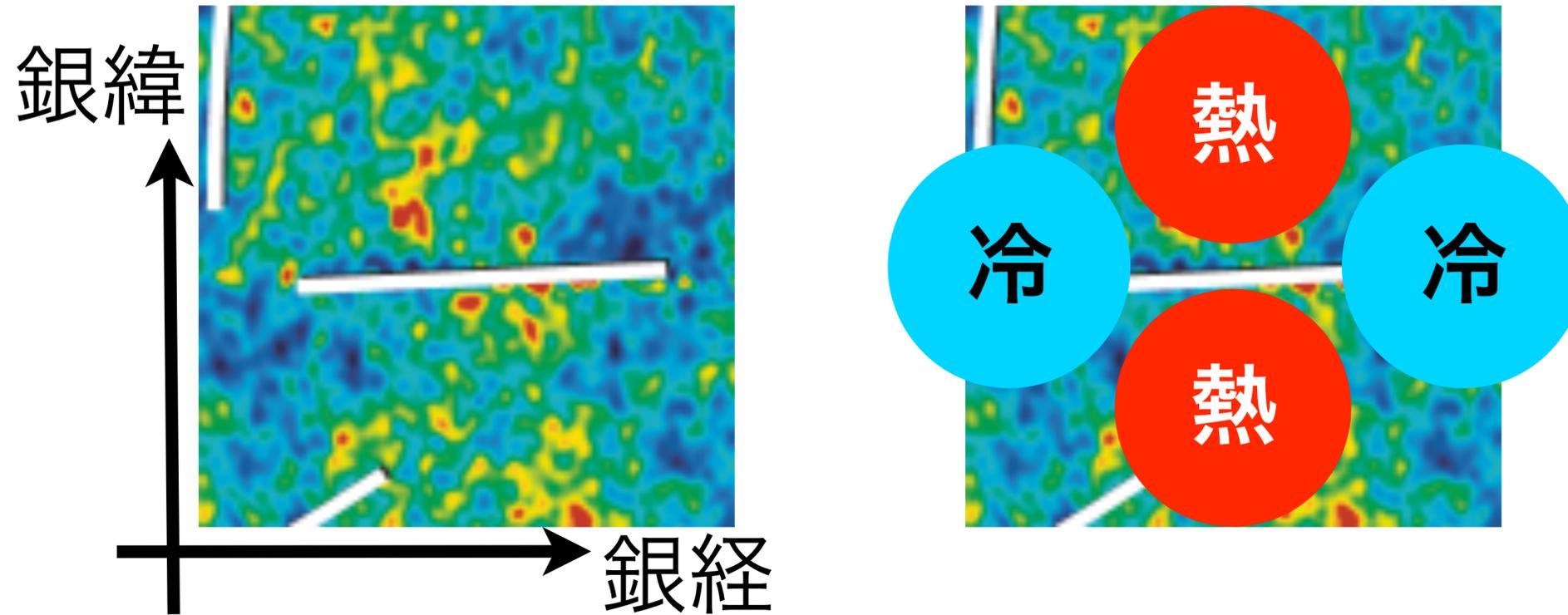


トムソン散乱による
選択的散乱

四重極がない場合
偏光は生じない

四重極があれば
偏光が生じる

原則



$$Q > 0; U = 0$$

- トムソン散乱で生じる偏光の方向は「熱い」に沿う。

四重極の起源(1)：密度揺らぎ

物質密度



ポテンシャル

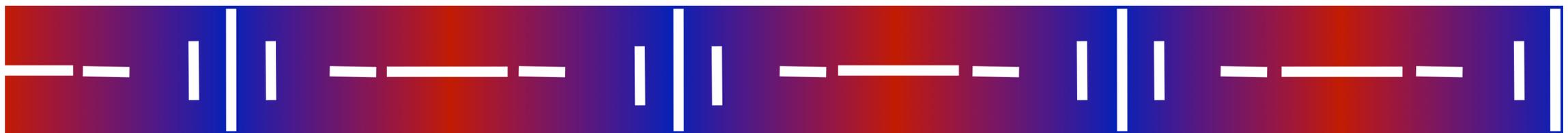


温度揺らぎ~重力ポテンシャル $\times (1/3)$

温度揺らぎ



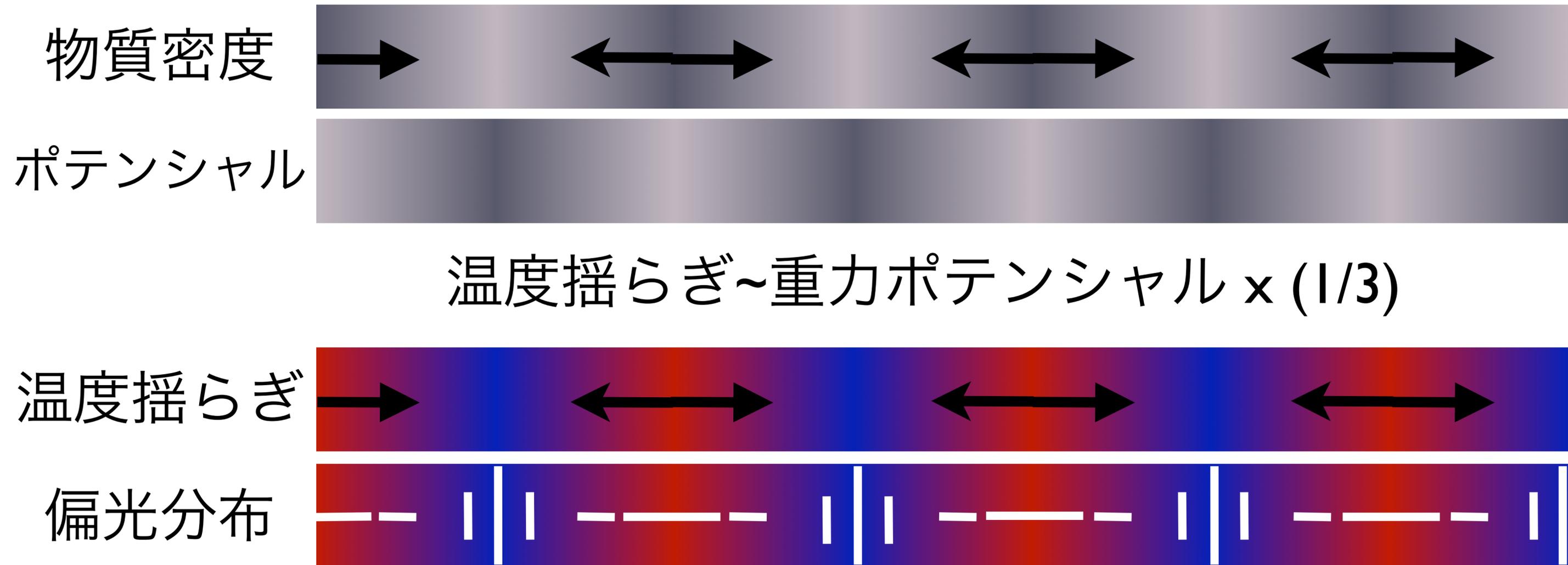
偏光分布



- 密度揺らぎから生成される偏光パターンは、密度揺らぎの濃淡が変化する方向に垂直、あるいは平行。

Eモード偏光：流体の運動

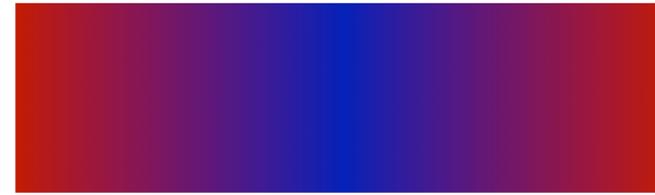
Zaldarriaga & Harari (1995)



- プラズマがポテンシャルに落ちると、放射状の偏光パターンが生成される。

速度勾配から四重極を作る (角度 > 2度)

温度揺らぎ



$$\Delta T/T = \Phi/3$$

ポテンシャル



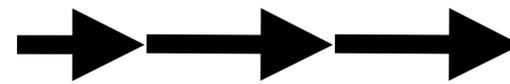
プラズマが落ち込む

加速度
 $a = -\partial\Phi$



$$a > 0 = 0$$

速度場



速度勾配

電子の静止系での

速度場



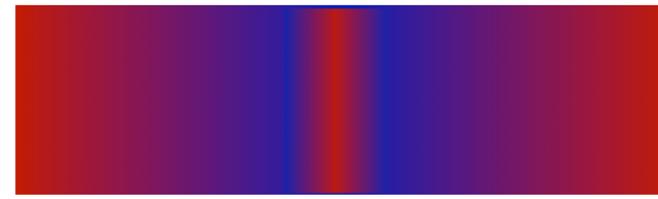
左の電子は運動方向に沿って前後に冷たい光子を見る

偏光分布

放射状 偏光なし

速度勾配から四重極を作る (角度 < 2度)

温度揺らぎ



ポテンシャル



加速度
 $a = -\partial\Phi + \partial P$



$a > 0 < 0$

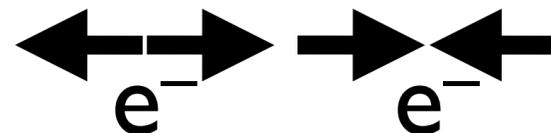
速度場



速度勾配

電子の静止系での

速度場



偏光分布

放射状



接線状

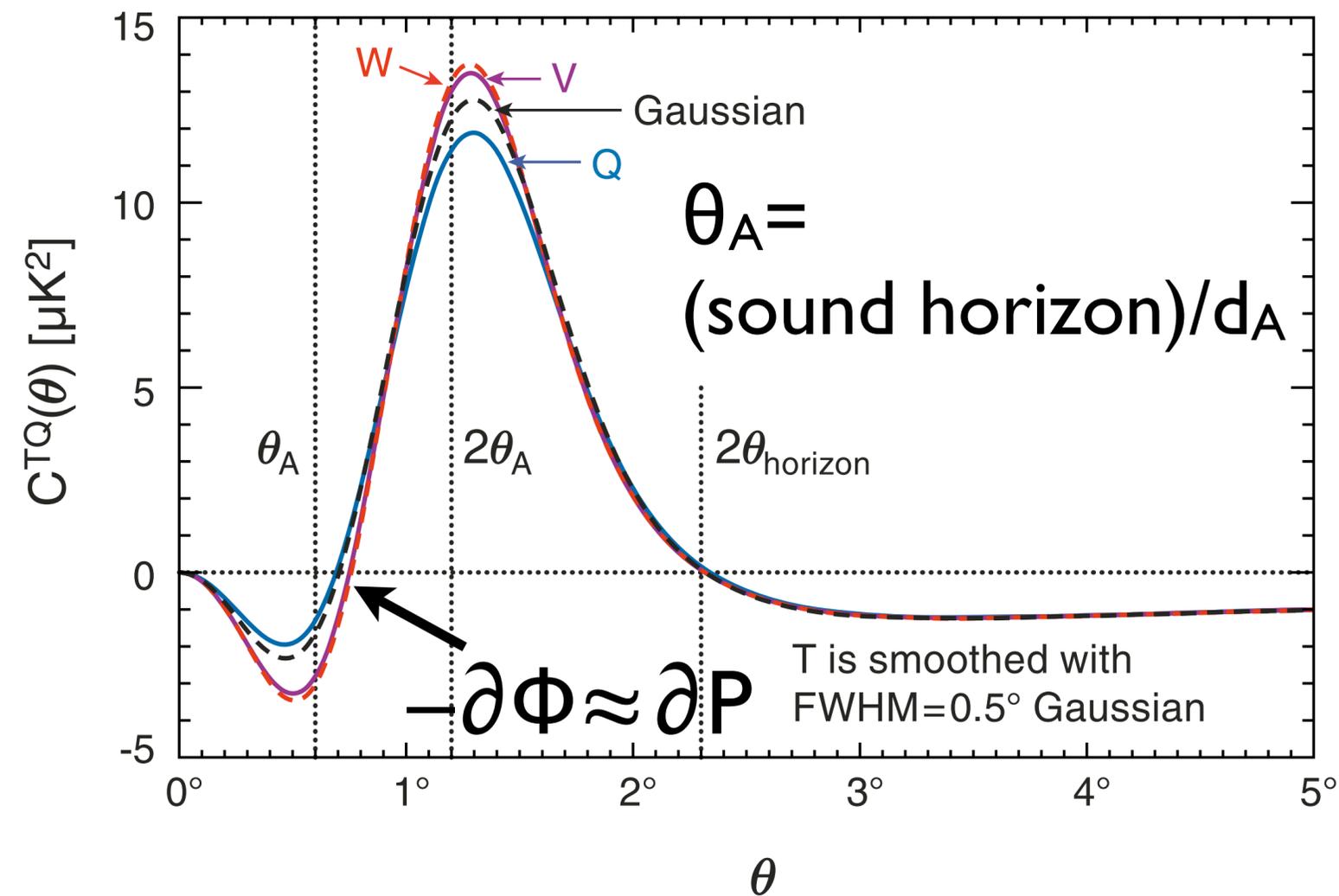
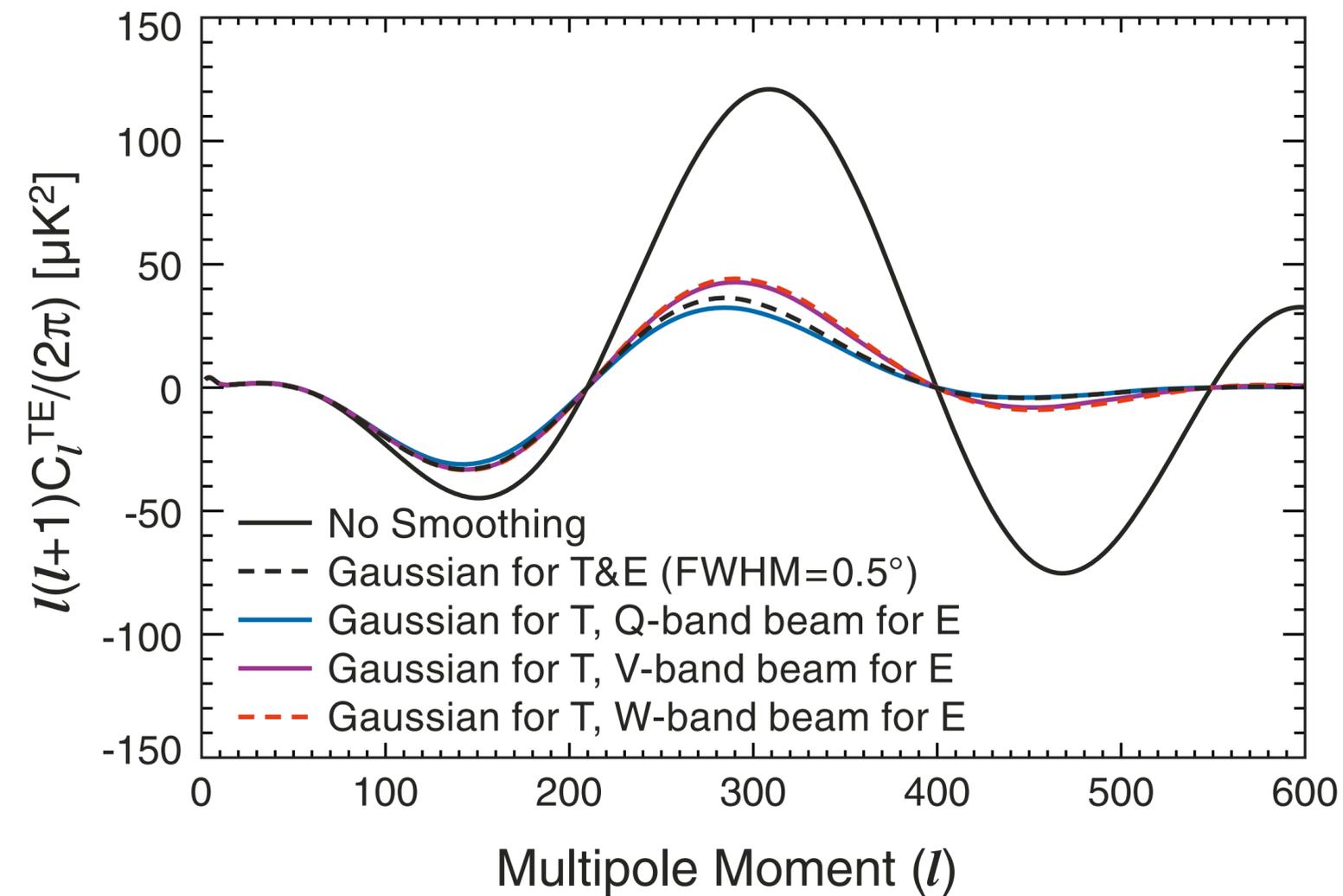
重力によってプラズマが

圧縮、温度が上昇する

プラズマが落ち込む

圧力勾配によって速度が減少

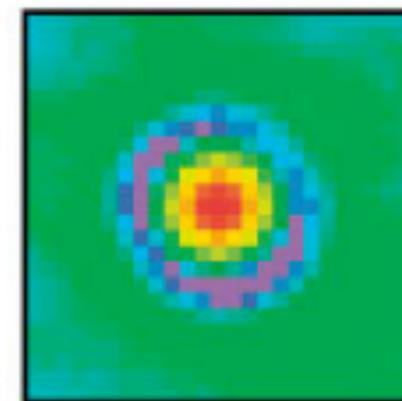
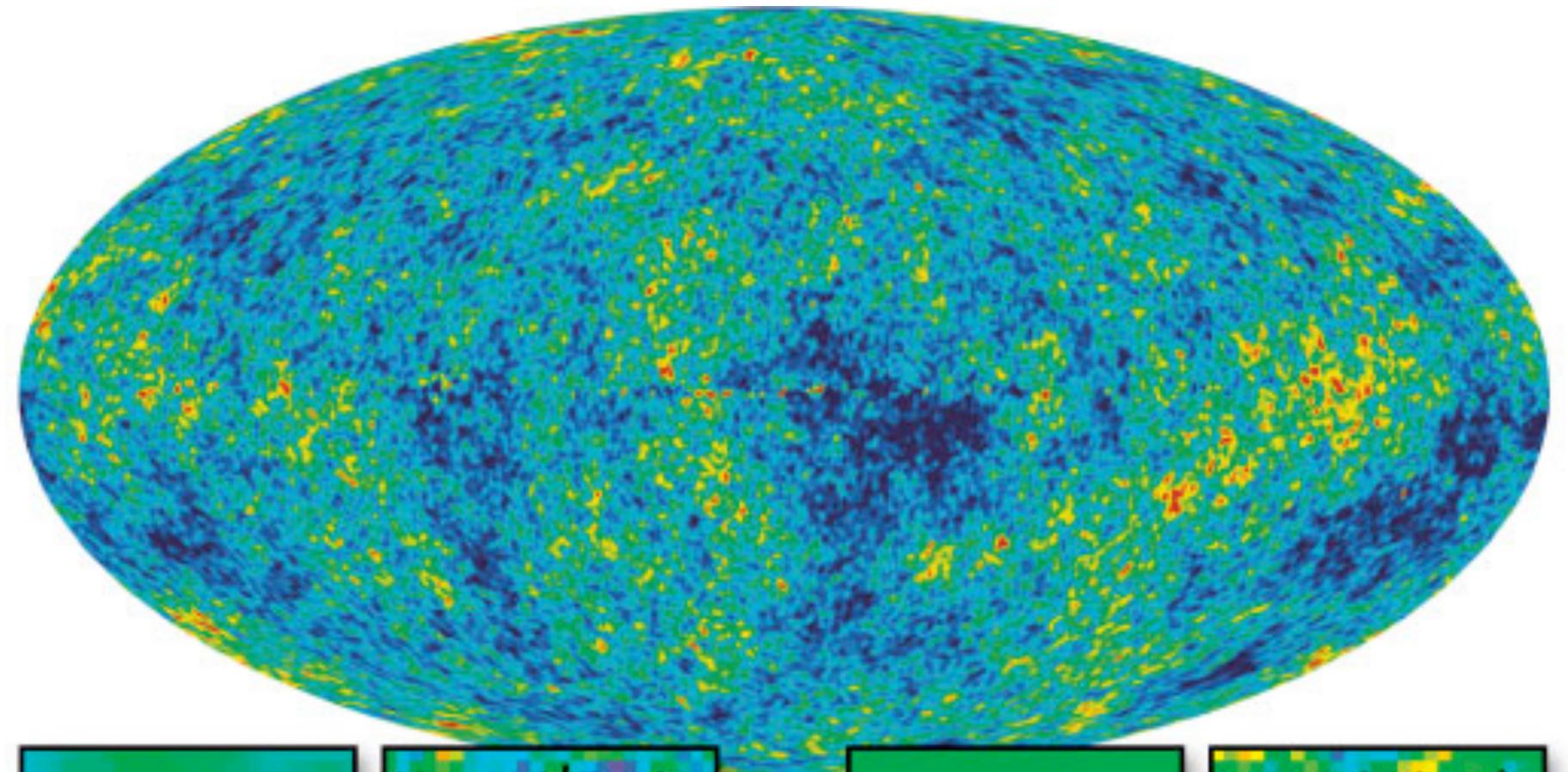
温度とEモード偏光の相関 (Coulson et al. 1994)



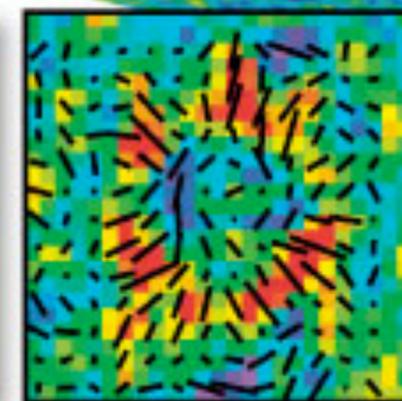
● $C^{TQr}(\theta) = -\int dl \ln l / [l^2 C_l^{TE} / (2\pi)] J_2(l\theta)$ 14

偏光を可視化する

- 温度揺らぎのピークを「ホットスポット」と「コールドスポット」に分けて足し上げる。
- **12387** ホットスポット
- **12628** コールドスポット

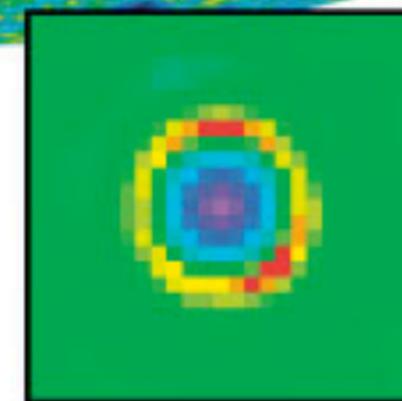


Temperature

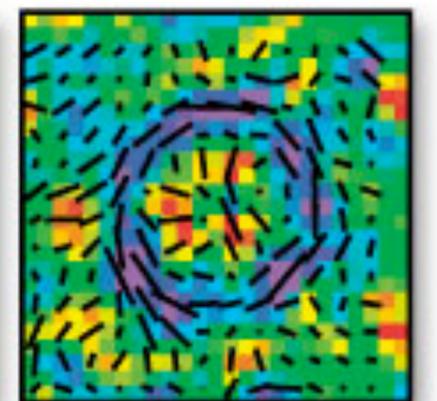


Polarization

HOT SPOT



Temperature



Polarization

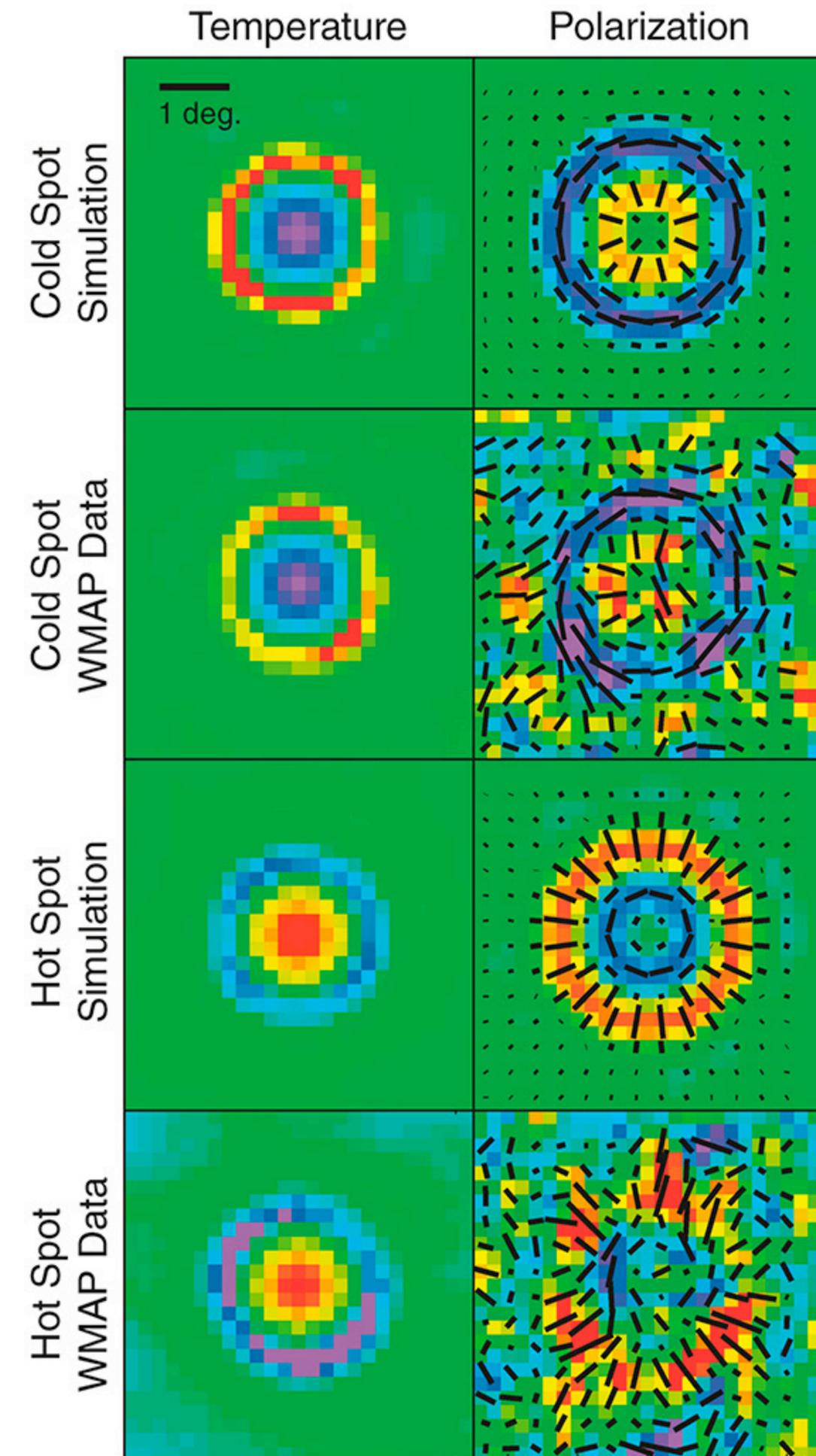
COLD SPOT

WMAPデータ

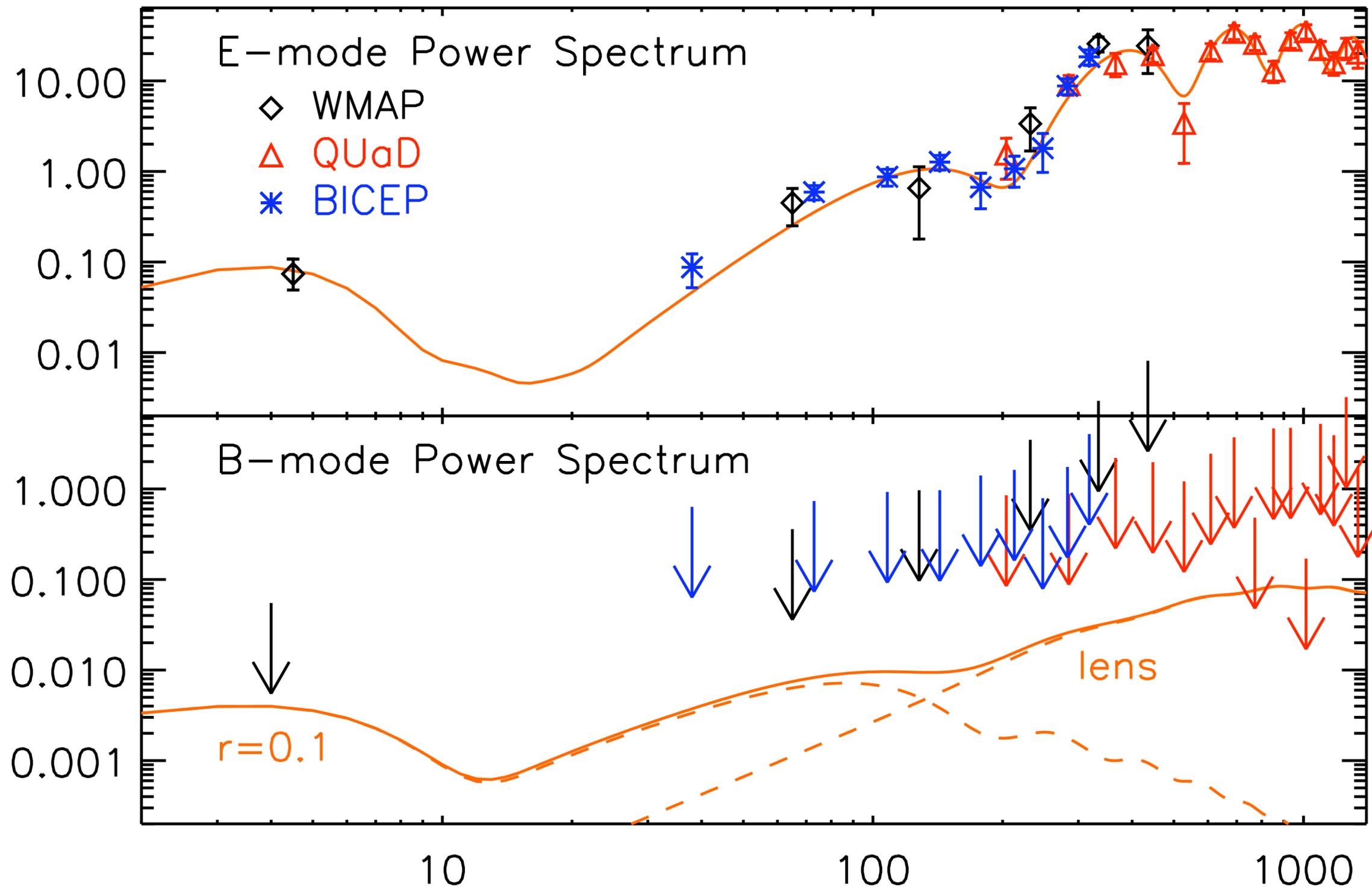
- 全ての温度揺らぎのピークを「ホットスポット」と「コールドスポット」に分けて平均
- 1.2度にある「圧縮フェイズ」と0.6度にある「減速フェイズ」がクリアに検出されている
 - 統計的有意性： 8σ

Eモード偏光は検出されている。

Bモードは？



(偏光の大きさ)² [uK²]



10度角 $l=180度/\theta$ 1度角

- Bモード偏光は、未だ見つからず。

Eモード偏光

物質密度

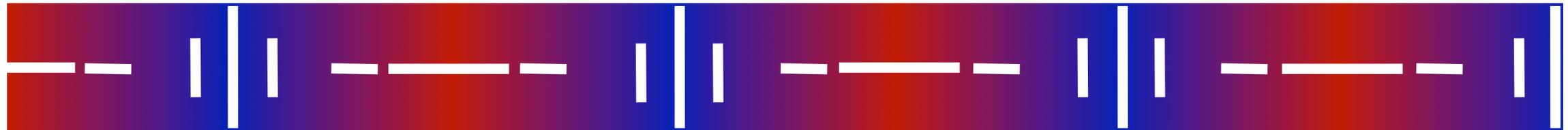
揺らぎ



$$\delta(\mathbf{k}, \mathbf{x}) = \cos(\mathbf{k}\mathbf{x})$$

波数ベクトル \mathbf{k} の方向

偏光分布



- **Eモード偏光**：温度揺らぎをつくる種（今の場合密度揺らぎ）の波数ベクトルに平行、あるいは垂直な偏光
- 波数ベクトルをx軸と取れば、純粋なQ偏光(U=0)

Bモード偏光

何かの
揺らぎ



$$h(\mathbf{k}, \mathbf{x}) = \cos(\mathbf{k}\mathbf{x})$$

波数ベクトル \mathbf{k} の方向

偏光分布



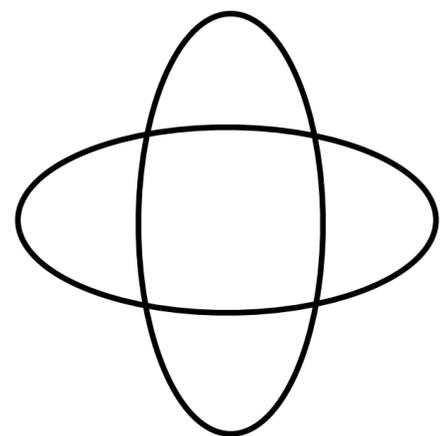
- **Bモード偏光**：温度揺らぎをつくる種（今の場合まだ何かわからない）の波数ベクトルに対し45度傾いた偏光
- 波数ベクトルをx軸と取れば、純粋なU偏光(Q=0)

原始重力波による四重極の生成

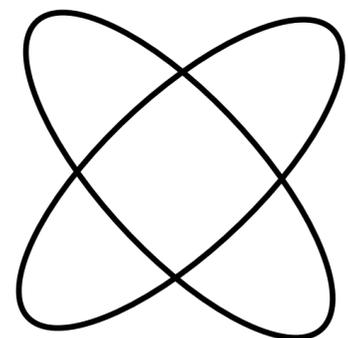
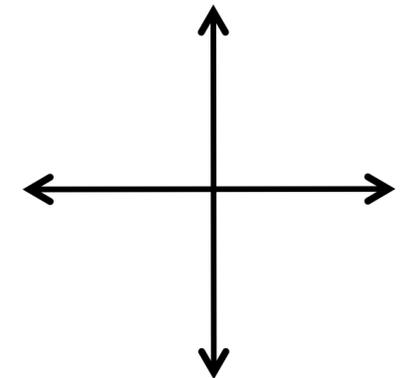
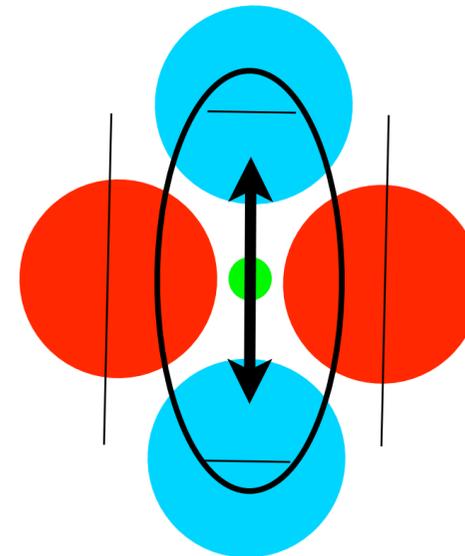
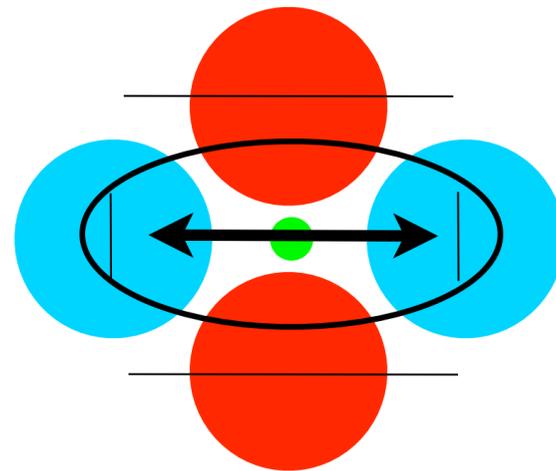
• 重力波が伝播すると、空間に四重極の歪みが生じる

-空間が伸びる -> 赤方偏移 -> 温度が下がる

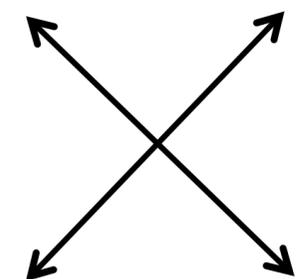
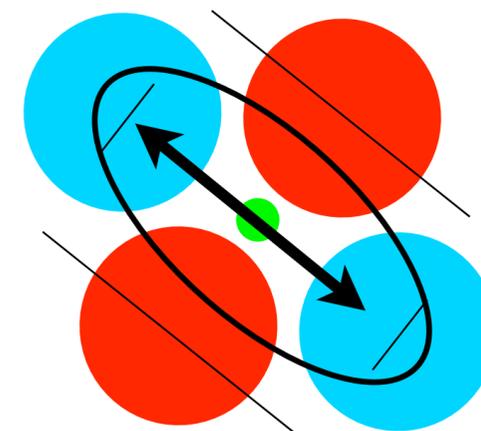
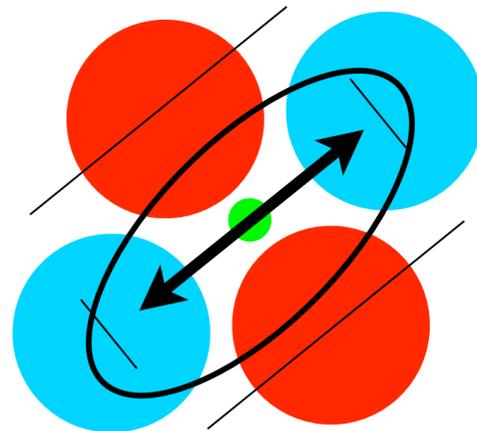
-空間が縮まる -> 青方偏移 -> 温度が上がる



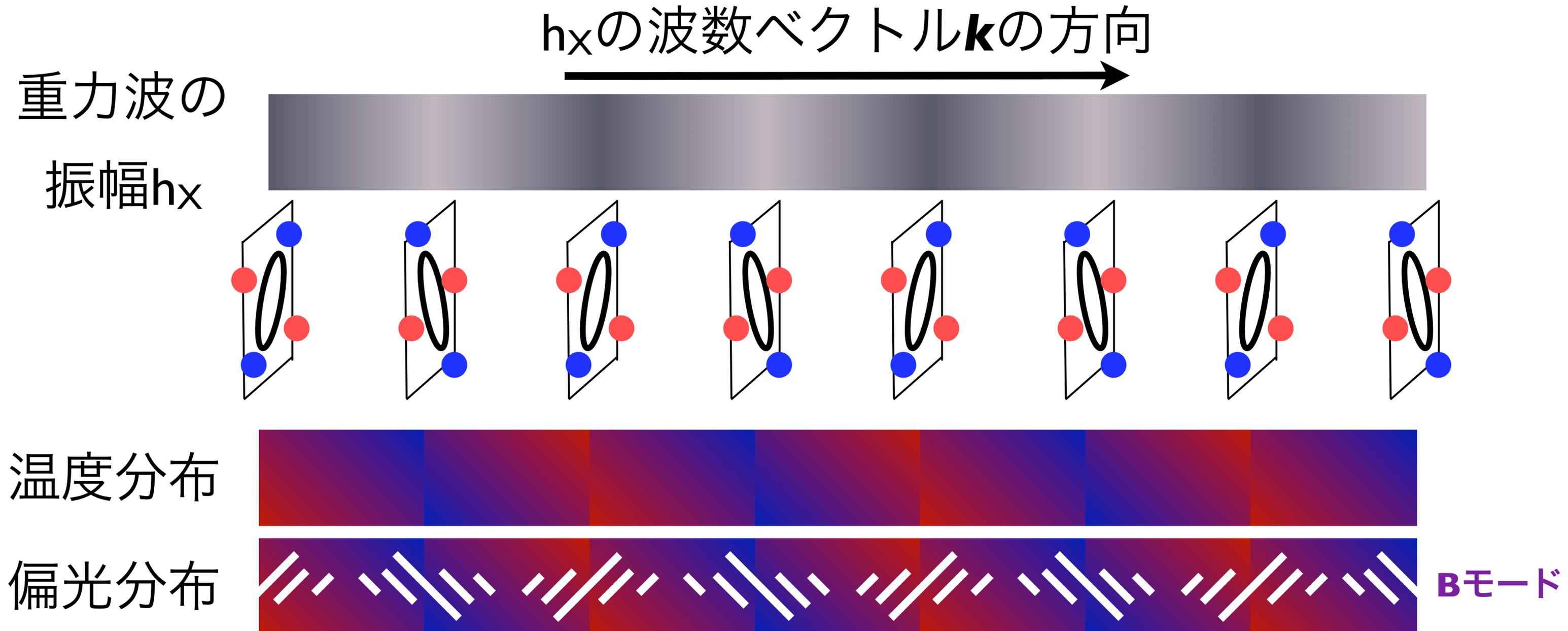
“+モード”



“Xモード”



四重極の起源(2)：重力波



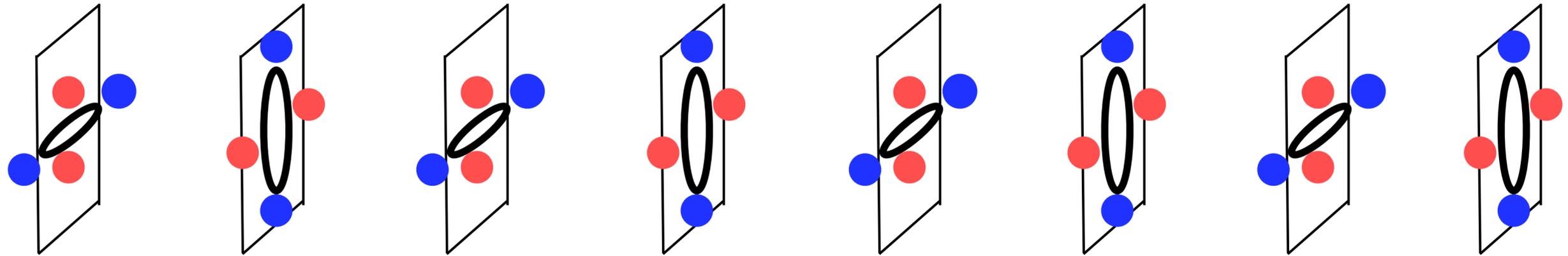
- 重力波の揺らぎから生成される偏光パターン(の1つ)は、重力波の振幅が変化する方向に対して45度傾く。

四重極の起源(2)：重力波

h_+ の波数ベクトル \mathbf{k} の方向



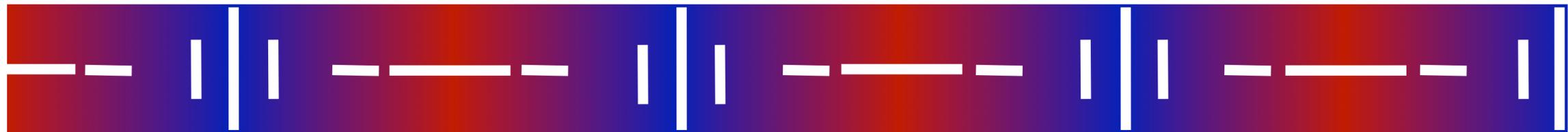
重力波の
振幅 h_+



温度分布



偏光分布



Eモード

- 重力波の揺らぎから生成される偏光パターン(の1つ)は、重力波の振幅が変化する方向に平行・垂直。

ここまですをまとめると

- 密度揺らぎはEモード偏光しか生成できない
- 重力波はEモード偏光もBモード偏光も生成できる
- **Bモード偏光を使って重力波を測定できる！**

スカラー-テンソル比, r

- 最新のWMAPの結果より、 $r < 0.24$ (95%CL)
- r とは何だ？
- 原始重力波の振幅の2乗を、原始重力ポテンシャル（厳密には原始曲率揺らぎ）の2乗で割ったもの：

$$r = \frac{2(\langle h_+^2 \rangle + \langle h_x^2 \rangle)}{\langle \phi^2 \rangle}$$

偏光はどこからやってくる

- CMBの偏光はトムソン散乱により生じる。
- 自由電子が必要！

偏光 ● 宇宙は $z > 1090$ （宇宙年齢 < 38 万年）で完全電離

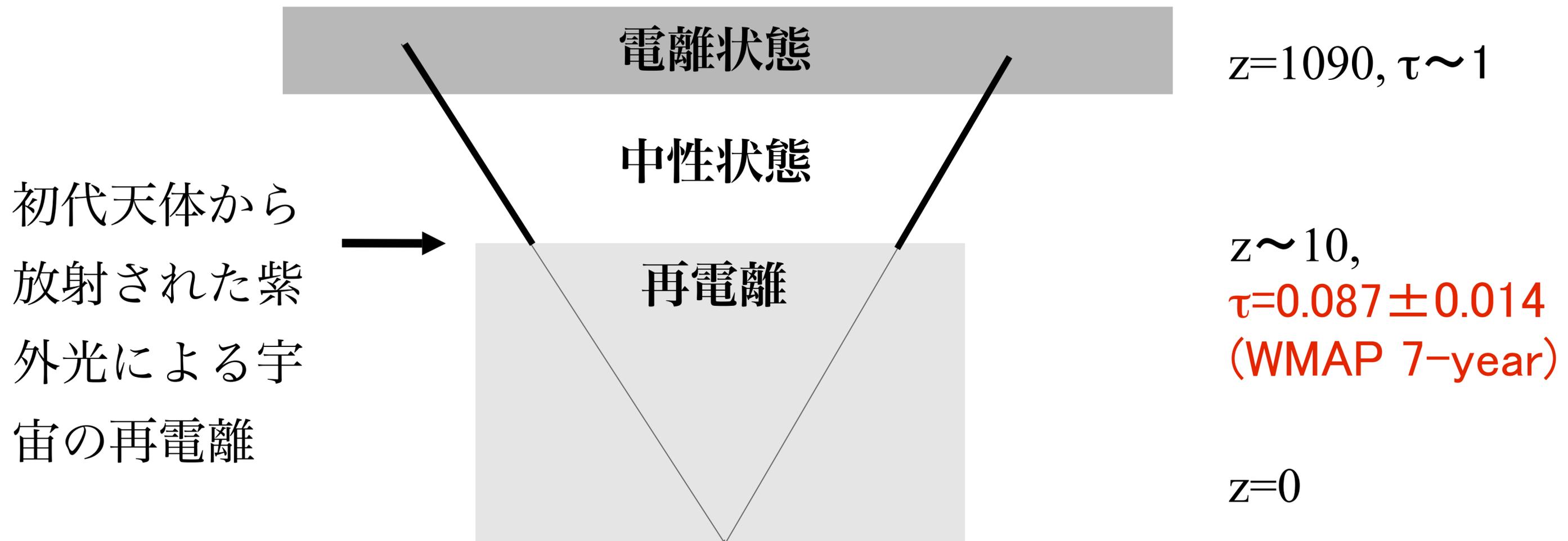
- 宇宙は $1090 < z < \sim 30$ でほぼ中性【ダークエイジ】

偏光 ● $z < \sim 30$ から $z \sim 6$ （宇宙年齢 < 10 億年）にかけて電離

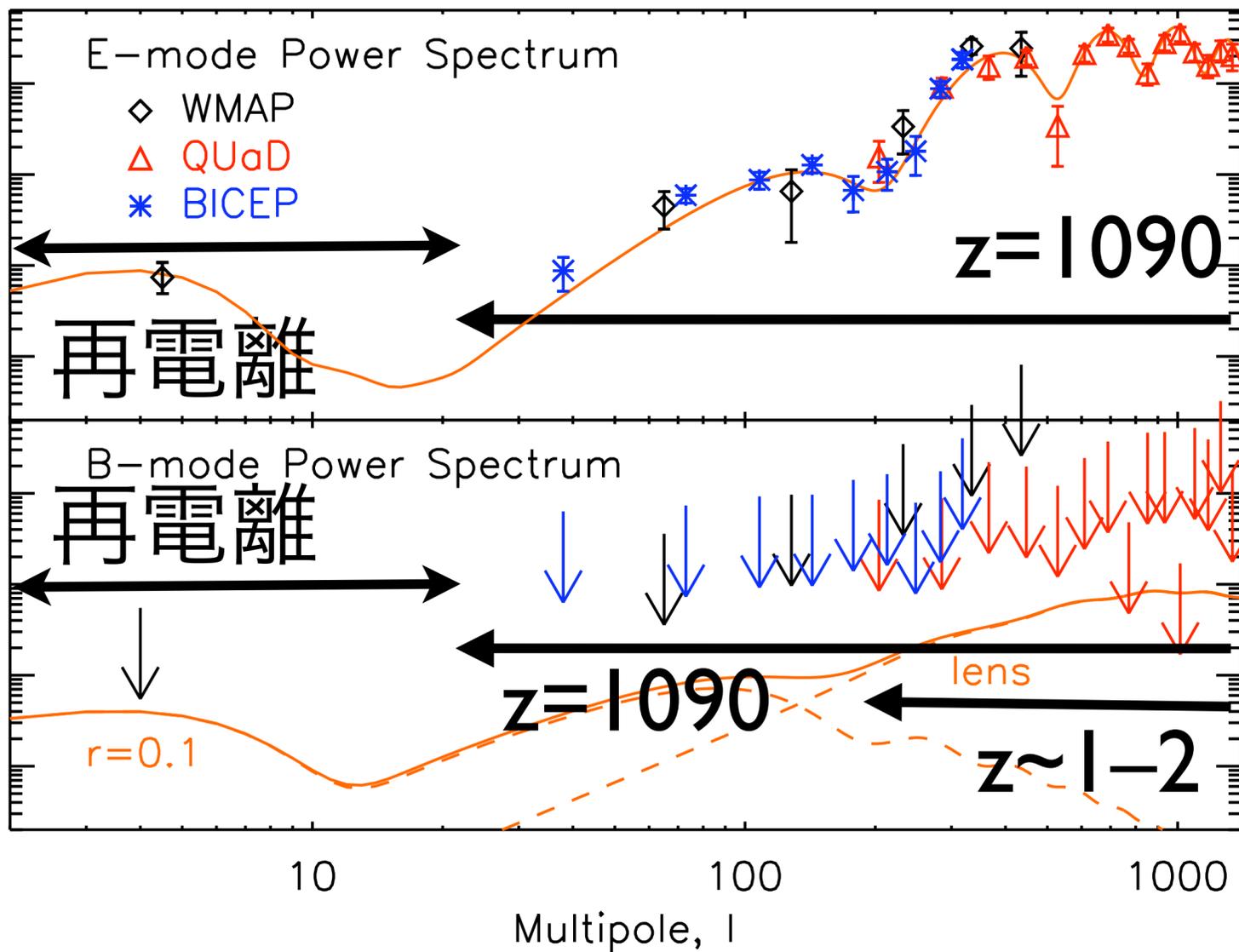
偏光 ● $z \sim 6$ から現在の宇宙は完全電離

宇宙の再電離と偏光の生成

- 現在観測される宇宙マイクロ波背景輻射は $z=1090$ で散乱された光。
- そのうち、いくらか($\sim 9\%$)は再電離時に放出された自由電子で散乱されてどこかへ行ってしまう。
- 一方で、どこかへ行くはずだった光子のうちいくらか($\sim 9\%$)は我々の方向に散乱される。そして、**その散乱光は偏光している!**



再電離の寄与



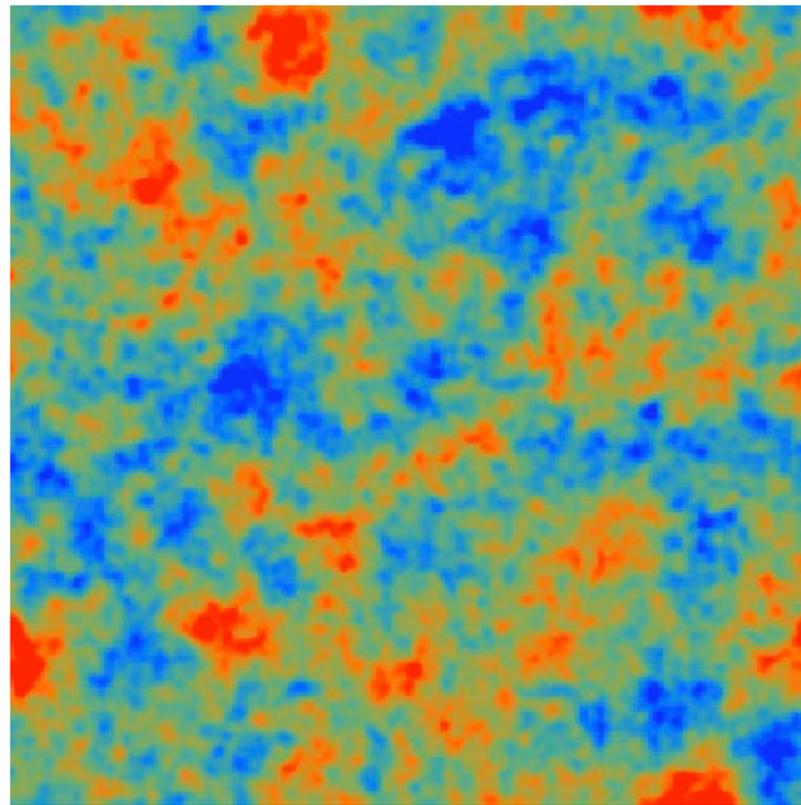
- 再電離の寄与により、 $l < 20$ に偏光が現れる。
- 再電離がなければ偏光はずっと小さい。
- $l \sim 100$ のBモードは地上観測でも測定可能だが、 $l < 20$ は気球あるいは宇宙からの観測が必要。

重力レンズ効果

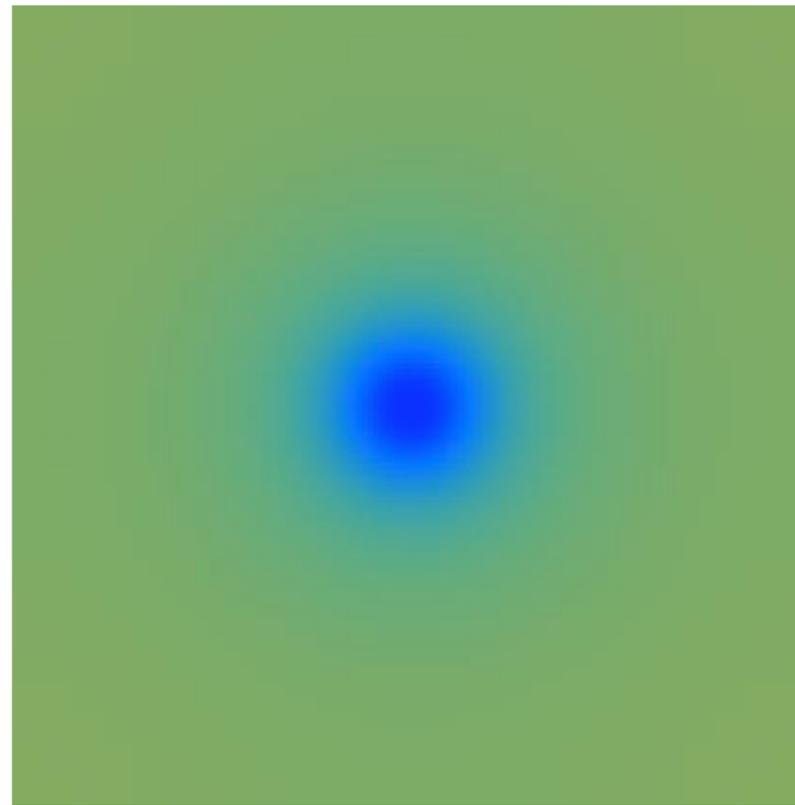


重力レンズ効果

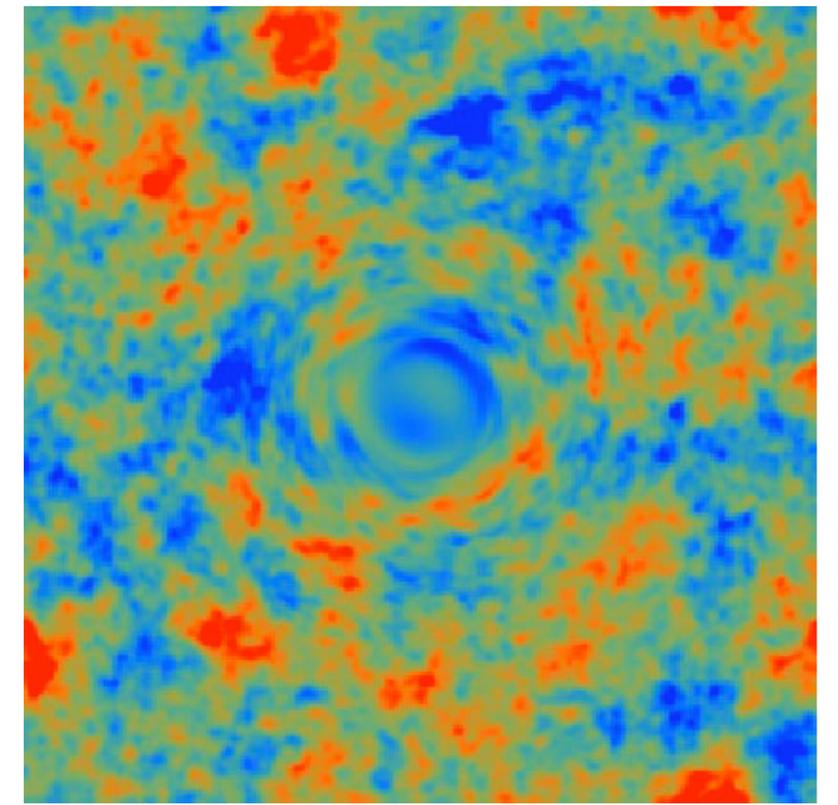
- 銀河の形を歪めるだけでなく、温度揺らぎのパターンも歪める。



+



=



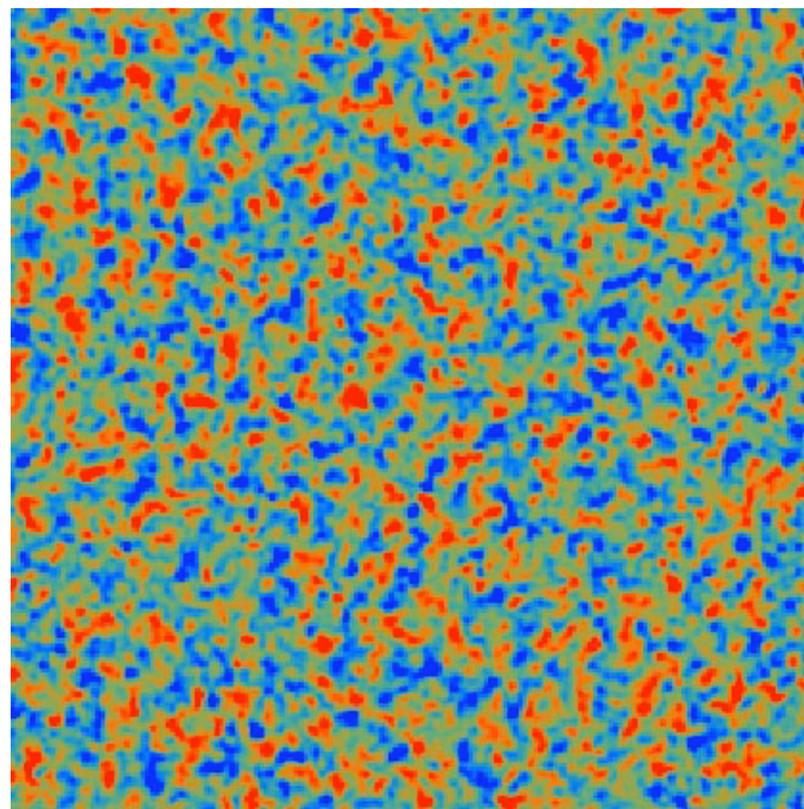
レンズ前の温度揺らぎ

前景の物質集中

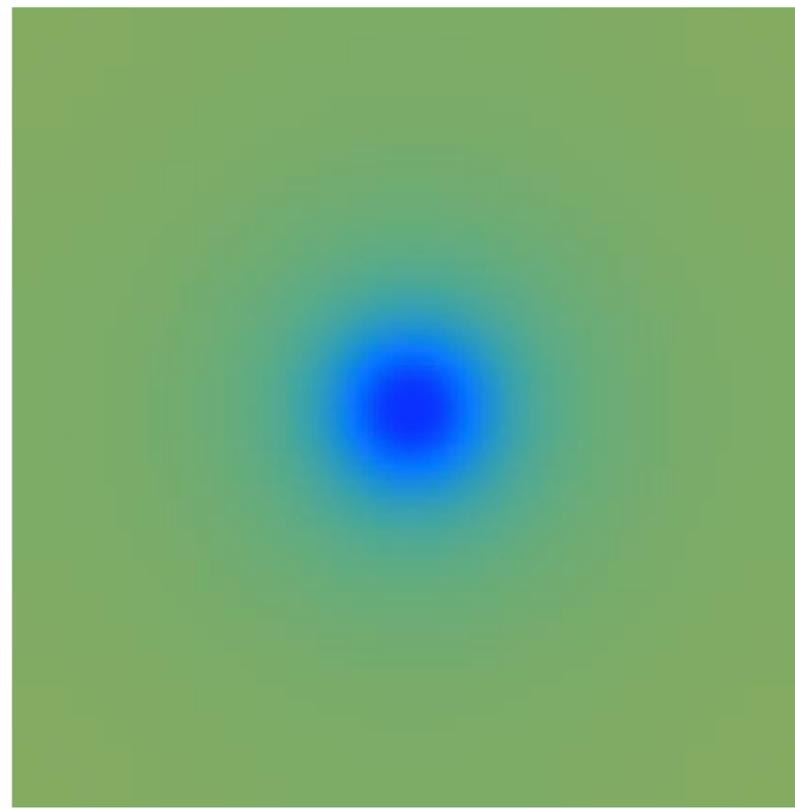
レンズ後の温度揺らぎ

重力レンズ効果

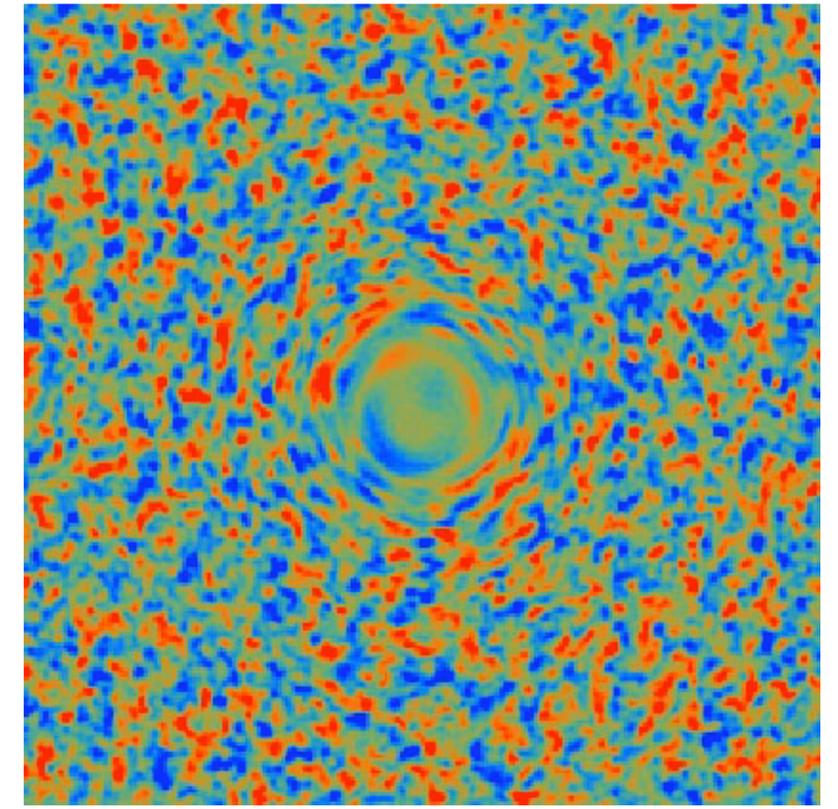
- Eモード偏光のパターンも歪められる。



+



=



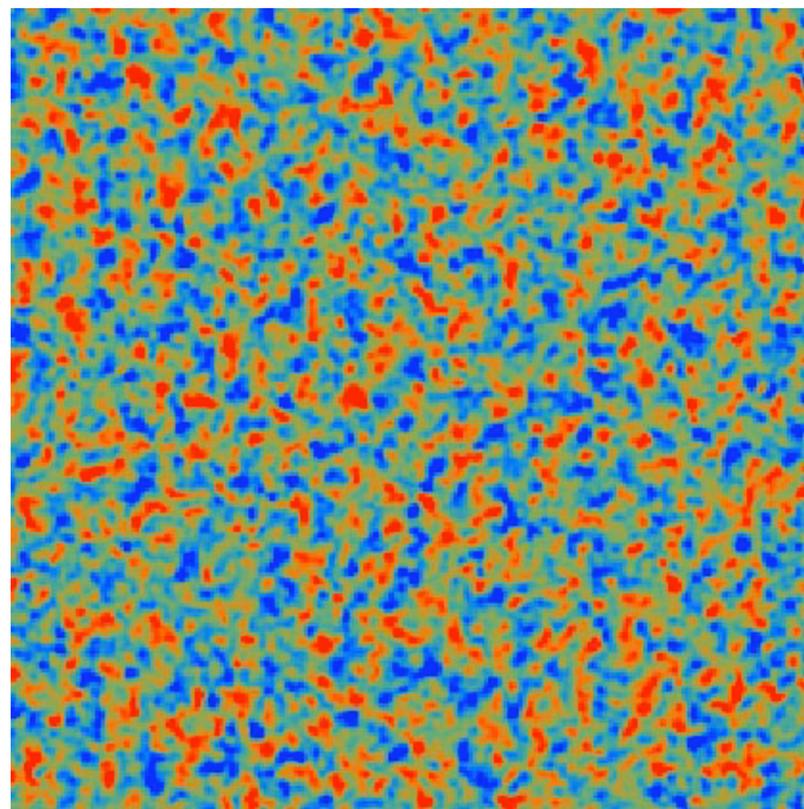
レンズ前のE偏光

前景の物質集中

レンズ後のE偏光

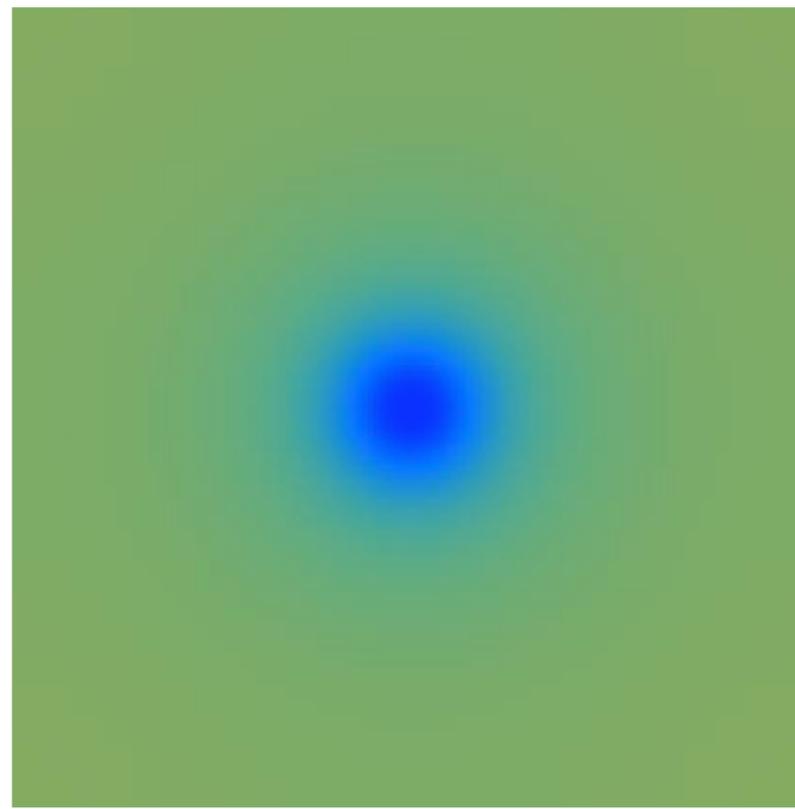
重力レンズ効果

- **Bモード偏光がEモードから生成される！**



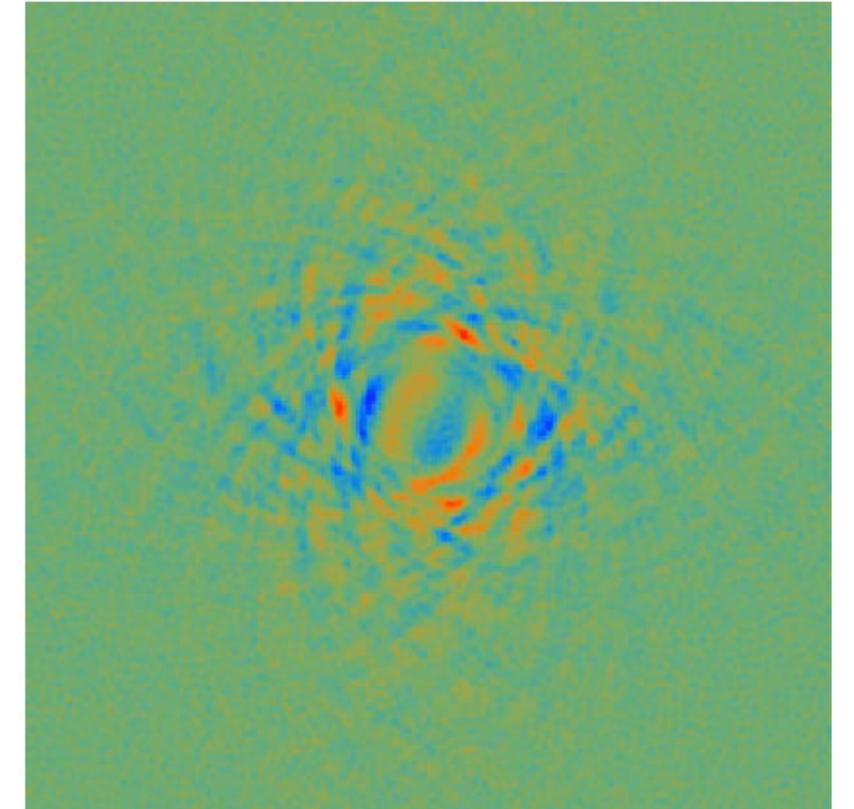
レンズ前のE偏光

+



前景の物質集中

=



レンズでできたB偏光

Bモード偏光のサイエンス

- **原始重力波の検出**：インフレーション宇宙を“見る”
 - 横山さんの講演参照
- **重力レンズ効果の測定**： $z \sim 1-2$ の宇宙の大規模構造をマッピング（杉山さんの講演参照）
 - $z < 1$ の銀河サーベイ観測と合わせて構造形成の時間発展を探る → 暗黒エネルギーの性質・ニュートリノ質量を制限
- 再電離時のEモード偏光：初代天体の物理

一気に最先端へ！

- 現代宇宙論は観測の進歩によって発展してきた。
- 残念ながら我が国の宇宙論業界は、歴史上重要な観測的発見に対し、**全く寄与できていない。**
- **観測・実験が伴わなければ、日本が宇宙論でインパクトを与える事はこの先もない。**

近年の発見（抜粋）

- Science誌: “Breakthrough of the Year”
 - 1998: 暗黒エネルギーの発見(Ia型超新星)
 - 2003: 標準宇宙論の確立(WMAP, SDSS, 2dFGRS)
- ノーベル物理学賞
 - 1978: 宇宙マイクロ波背景輻射の発見(1965)
 - 2006: 背景輻射の温度揺らぎの発見(1992)

将来を夢想(妄想)する

- ~2012年: 原始揺らぎの非ガウス性の発見 (by Planck)
- ~2020年: 原始重力波起源のBモード偏光の発見 (by LiteBIRD: 羽澄さん、松村さんの講演参照)