

2010年8月29日～9月1日

RESCEU/DENET サマースクール

@ 高知

# Signature of primordial vector modes on large-scale structure

(兼プロジェクト報告)

樽家篤史 (東大理・ビッグバン)

# プロジェクト1:初期宇宙進化理論

宇宙の進化と成り立ちを探る

トップダウン/ボトムアップ的理論研究

CMB、宇宙大規模構造などの精密観測 (大規模・広視野)

統計量を精度よく測定 { 宇宙論パラメーターの高精度決定  
微弱な宇宙論的シグナルの検出

- ダークエネルギーの性質
- 宇宙論的スケールでの重力理論の検証
- ニュートリノ質量の測定
- 原始非ガウス性の検出

# この1年の(私的な)成果

精密な理論テンプレートの開発 (計算手法の確立)  
微弱なシグナルの特性の探求と検出方法の考案

- 宇宙論的N体シミュレーションによる  
原始非ガウス性の検出可能性の研究  
(ハローのバイスペクトルに現れる強いスケール依存性の定量化)  
Nishimichi, Taruya, Koyama, Sabiu, JCAP (<sup>10</sup>)
- 赤方偏移ゆがみと非線形重力進化の効果を取り入れた  
バリオン音響振動の精密理論テンプレートの開発  
Taruya, Nishimichi, Saito, PRD (<sup>10</sup>) in press
- 摂動論にもとづく精密理論テンプレートを使った、  
SDSS DR7 からのニュートリノ質量の制限  
Saito, Takada, Taruya, arXiv:1006.4845

# 今回の話

宇宙の骨董品

宇宙のひねくれもの

宇宙の絶滅危惧種

ベクトルモード



# ベクトルモード

宇宙の構成要素・非一様性を  $S(\vec{x}, t), V_i(\vec{x}, t), T_{ij}(\vec{x}, t)$   
スカラー・ベクトル・テンソルに分類

- スカラー：宇宙膨張・重力を支配
- ベクトル・テンソル：宇宙初期の残存物か、2次的生成物  
マイナーな成分だが、宇宙の進化を探る上で重要  
(テンソル→重力波)

ベクトルゆらぎ？

(直感的には)

流体でいうシアー (shear)、渦(vorticity) のようなもの

# ベクトルゆらぎの生成・進化

$$\delta g_{i0} = a^2 \sigma_i \quad \frac{1}{\mathcal{H}} (\nabla \times \mathbf{v})_i = \omega_i$$

宇宙論的摂動論の発展方程式

$$\dot{\sigma}_i + 2\mathcal{H}\sigma_i = 8\pi G a^2 P \Pi_i^{(V)} + \text{(新たな源項)}$$

$$\dot{q}_i + (1 - 3c_s^2)\mathcal{H}q_i = \frac{P}{P + \rho} \Pi_i^{(V)} \quad ; \quad q_i \equiv \mathcal{H}\omega_i$$

ベクトル型非等方ストレス  
(物質由来)

位相欠陥 (コスミックストリング)

スカラーモードの2次摂動

ベクトル型重力項の補正  
(重力理論の変更)

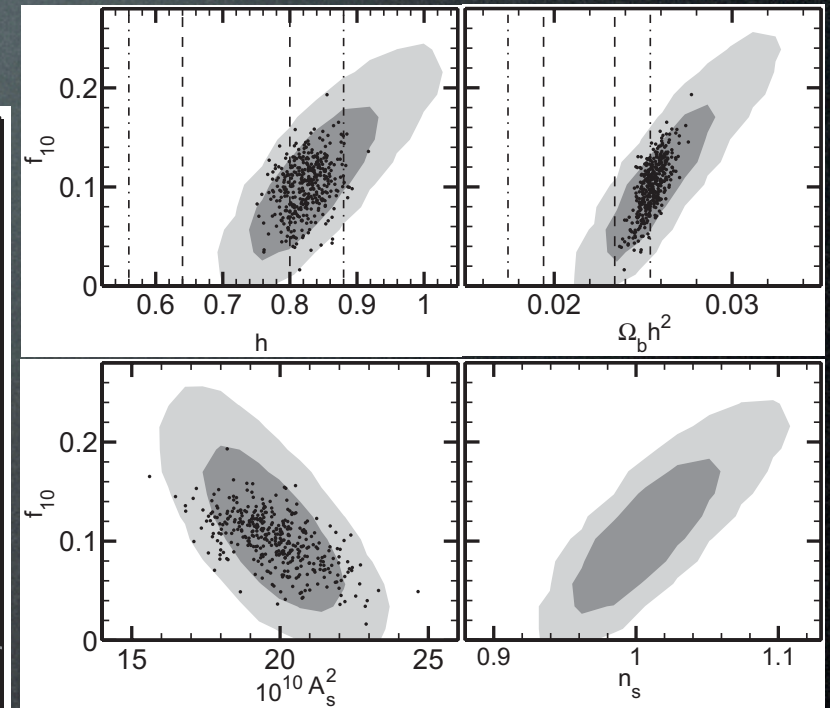
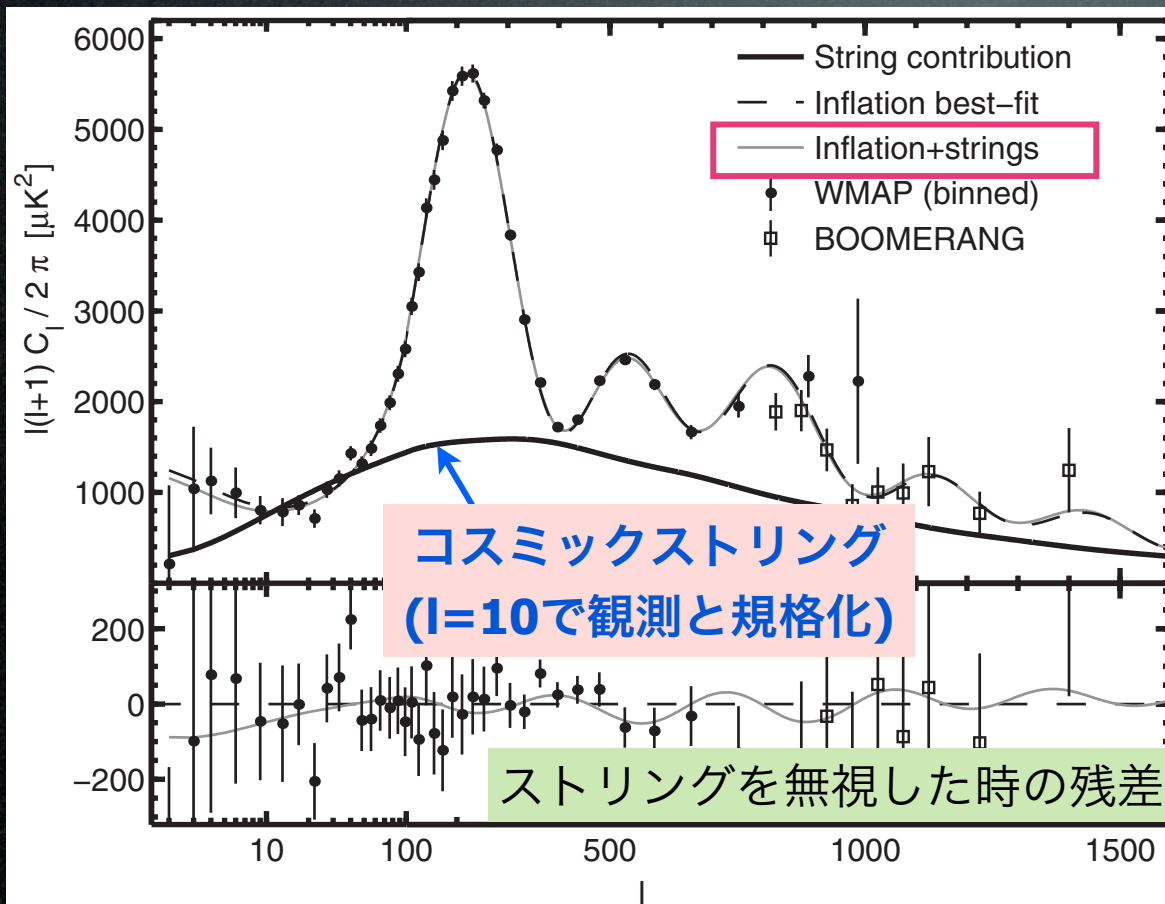
宇宙論的ベクトル場

(Einstein-Aether理論 / 拡張Horava理論)

その他：ベクトル場による非等方インフレーション

# CMBからの観測的制限

## コスミックストリングの場合



Bevis et al. ('08)

スカラー成分の10%  
以下 ( $l=10$ で)  
( $G\mu \lesssim 0.7 \times 10^{-6}$ )

# 宇宙大規模構造を用いた探査法

銀河の分光サーベイによる

赤方偏移ゆがみ

(redshift distortion)

$\omega_i$

銀河の撮像サーベイによる

弱重力レンズ効果

(cosmic shear survey)

$\sigma_i$

スカラーモードの影響を分離して検出できる



# 赤方偏移ゆがみ

分光観測から求まる銀河の赤方偏移に、銀河の特異速度成分がドップラーシフトとして混じるため、本来の値よりずれる

$$\vec{s} = \vec{r} + \frac{(\vec{v} \cdot \hat{z})}{a H(z)} \hat{z}; \quad \begin{cases} \vec{v} & : \text{(銀河の)特異速度場} \\ \hat{z} & : \text{観測者の視線方向} \end{cases}$$

銀河分布のクラスタリングパターンが歪んで見える

パワースペクトルが非等方性になる：

$$P(k) \longrightarrow P^{(S)}(k, \mu); \quad \mu \equiv (\vec{k} \cdot \hat{z}) / |\vec{k}|$$

# Kaiser Formula

線形領域での公式 (銀河バイアスなし)

実空間のパワースペクトル

standard  
formula

$$P^{(S)}(k, \mu) = (1 + f \mu^2)^2 P_{\delta}(k) \quad \text{Kaiser ('87)}$$

growth-rate parameter

$$f(z) \equiv \frac{d \ln D_+}{d \ln a} \left[ D_+(z) : \text{線形成長因子} \right]$$



ベクトルモードがあると、

modified  
formula

$$P^{(S)}(k, \mu) = (1 + f \mu^2)^2 P_{\delta}(k) + \frac{1}{2} \mu^2 (1 - \mu^2) P_{\omega}(k)$$

渦度のパワースペクトル

# 多重極展開

多重極展開を行うことで、ベクトルモードを独立に分離可能：

$$P^{(S)}(k, \mu)$$

$$= \sum_{\ell=0} P_{\ell}^{(S)}(k) \mathcal{P}_{\ell}(\mu)$$

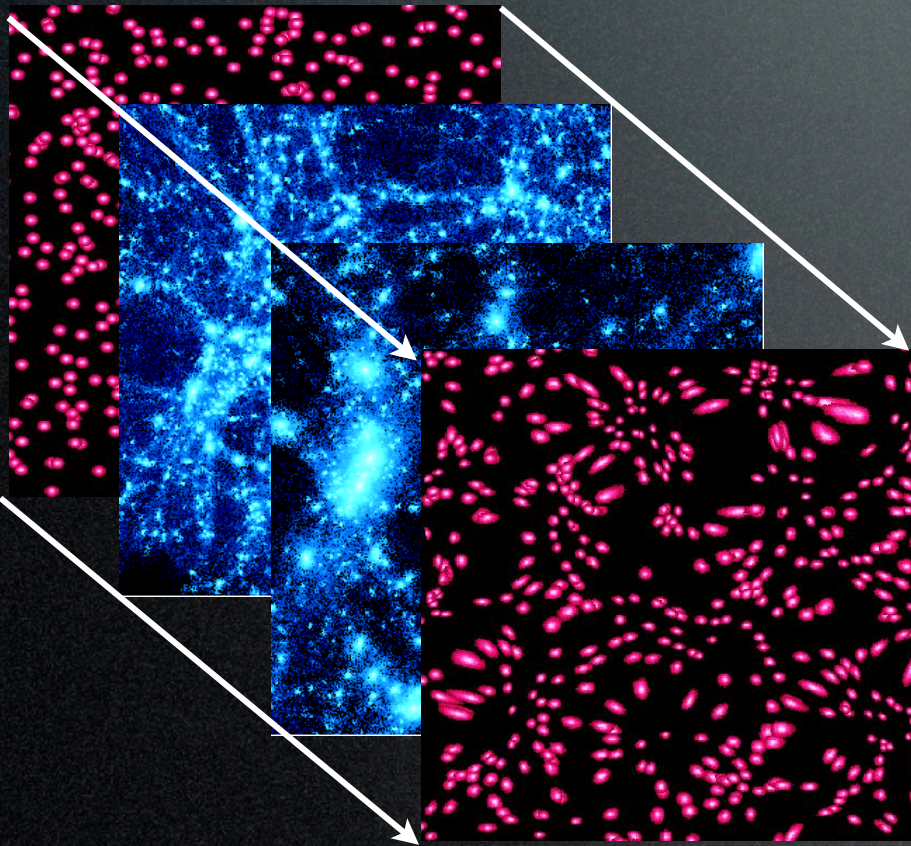
$$\left\{ \begin{array}{l} P_0^{(S)}(k) = (1 + \frac{2}{3}f + \frac{1}{5}f^2) P_{\delta}(k) + \frac{1}{15} P_{\omega}(k) \\ P_2^{(S)}(k) = (\frac{4}{3}f + \frac{4}{7}f^2) P_{\delta}(k) + \frac{1}{21} P_{\omega}(k) \\ P_4^{(S)}(k) = \frac{8}{35} f^2 P_{\delta}(k) - \frac{4}{35} P_{\omega}(k) \end{array} \right.$$

スカラー由来(密度ゆらぎ)のパワースペクトルに対して、

5~10% ぐらいの振幅ならベクトルモードを検出可能

# 弱重力レンズ効果 (cosmic shear)

遠方の背景銀河のイメージが、前景の大規模構造 (非一様性) の重力によって歪められる効果



複素楕円率

$$\chi = \left( \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} \right) e^{i2\phi} \rightarrow 2\gamma$$

レンズの歪み場

重力レンズ効果により複素楕円率 (歪み場) は空間的な相関をもつ

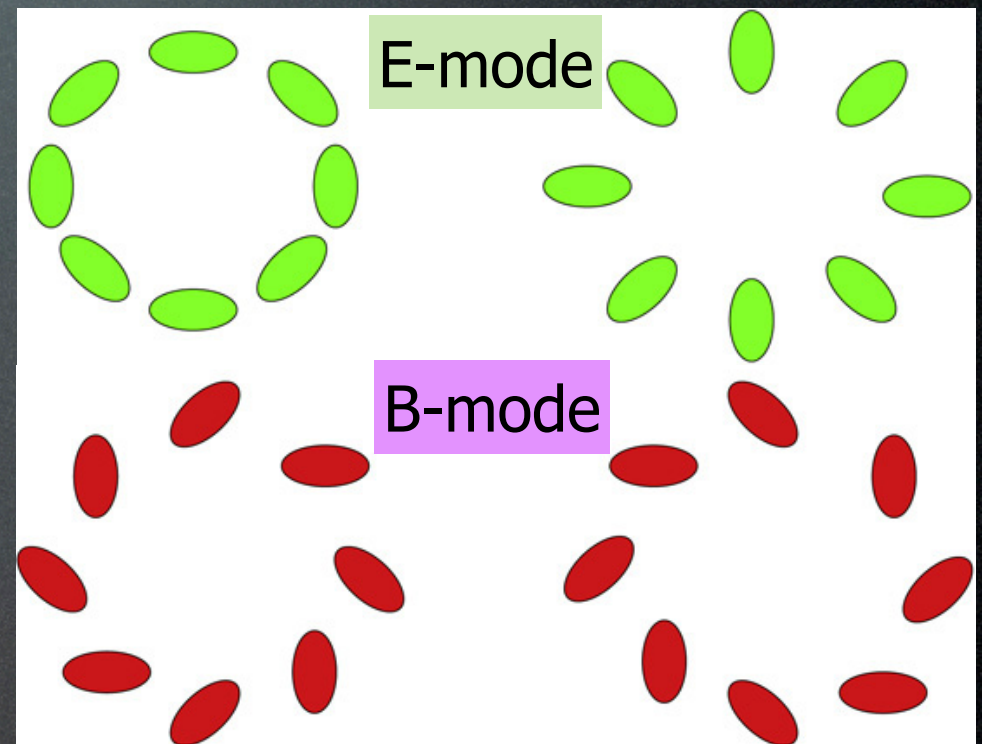
# E-/B-モード分解

(CMB偏光のアナロジーで)

歪み場の空間パターンをパリティ対称性で分類

## 重要な特徴

スカラーモード(密度ゆらぎ)に由来する重力レンズ効果では、E-モードしか生まれない



ベクトルモード由来の重力レンズ効果では、

B-モードも生成される (ベクトルモード検出の鍵)

# ベクトル由来の重力レンズ (B-モード)

ベクトルモードの作るレンズ歪み場

平坦宇宙の場合

$$\gamma = - \int_0^{r_s} dr \frac{r_s - r}{2r r_s} r^2 e_+^i e_+^j [e_r^k \partial_i \partial_j \sigma_k - \frac{d}{dr} \partial_j \sigma_i]$$

$r$  : 共動動径距離

$r_s$  : 背景銀河の共動動径距離

$e_r, e_+ \equiv e_\theta + i e_\varphi$  :

射影ベクトル

計量のベクトル  
モード

角度パワースペクトル (B-モード)

$$C_l^{\text{BB}} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty dk k^2 \int_0^{r_s} dr \int_0^{r_s} dr' \times \left( \frac{3r_s - 4r}{2r r_s} \right) \left( \frac{3r_s - 4r'}{2r' r_s} \right) j_\ell(kr) j_\ell(kr') P_\sigma(k; r, r')$$

# まとめ

## 宇宙大規模構造を用いたベクトルモードの探査法

- 分光銀河サーベイによる 赤方偏移ゆがみ
- 撮像銀河サーベイによる 弱重力レンズのB-モード

➡ パワースペクトルの基本的な公式を導出： $P^{(S)}(k, \mu)$ ,  $C_{\ell}^{BB}$

### 検出可能性 / 観測的制限

{ 赤方偏移ゆがみ： スカラー成分の振幅の 5~10 % @  $k < 0.1h/\text{Mpc}$   
{ 重力レンズ B-モード： コスミックストリングなら  $G\mu \sim 10^{-7}$  (??)

※ ダークエネルギー探査へのインパクト・シナジー