

12/21/2010 理論懇談会

宇宙弦/宇宙超弦

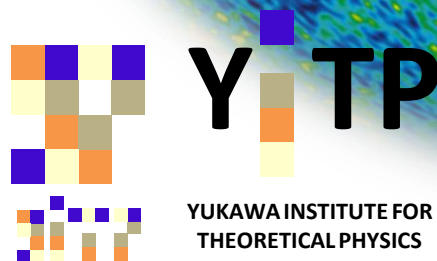
からの

宇宙マイクロ波背景輻射

山内 大介

京都大学 基礎物理学研究所

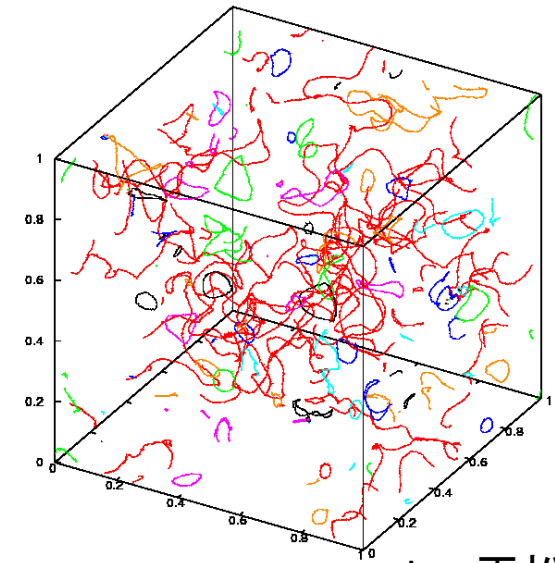
高橋慶太郎(名古屋大), 仙洞田雄一(弘前大),
柳哲文, 成子篤, 佐々木節 (YITP)



- in prep.
- PRD82, 063518 (2010), 1006.0687[astro-ph.CO]
- JCAP05,033 (2010), 1004.0600[astro-ph.CO]
- JCAP10,003 (2009), 0811.4698 [astro-ph]

Question:

宇宙弦 / 宇宙超弦 とは?



by 平松

➤ ひも状の位相欠陥

➤ 宇宙初期の「自発的対称性の破れ」
によって生成

➤ 宇宙初期の相転移をプローブ

➤ 弦理論の基本的物体
(F-弦、D-ブレーン)

➤ 宇宙初期の「D-ブレーンの衝突」
によって生成

➤ 超高エネルギー物理: 弦理論の
新しいプローブ

1.1: (場の理論的)宇宙弦

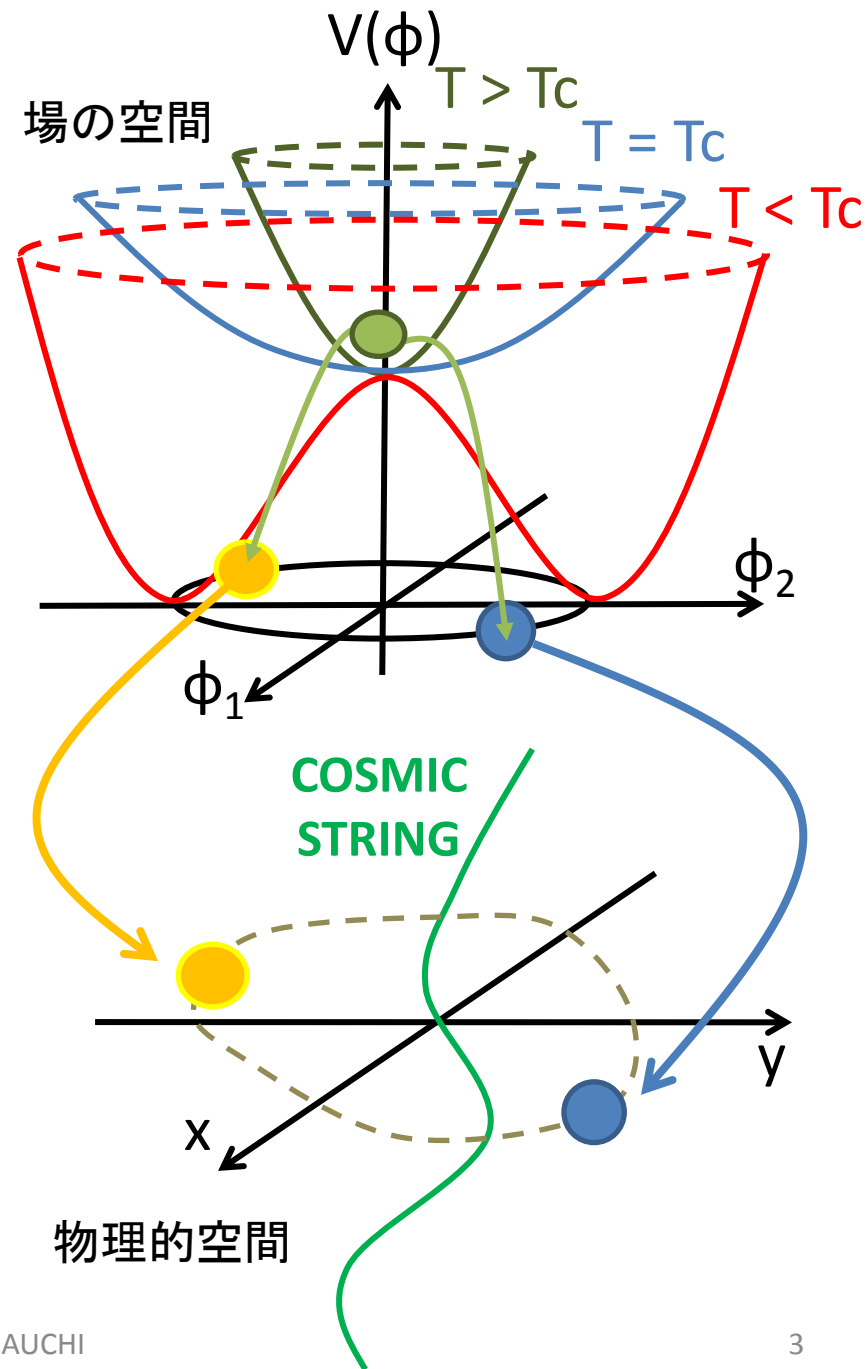
➤ 場の空間から物理的空間への非自明なマップによって宇宙弦が生成 [Kibble機構]

➤ **張力: $G\mu$**

: 自発的対称性の破れのスケールと関連

$$G\mu \approx \frac{M_{PT}^2}{M_{pl}^2},$$

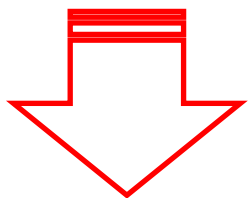
例: GUT弦 $G\mu_{GUT} = 10^{-6}$



1.2 : 宇宙超弦

[review: Polchinski(2005), Davis+Kibble (2005), Copeland+Kibble (2009), Sakellariadou(2009), Majumdar (2008)]

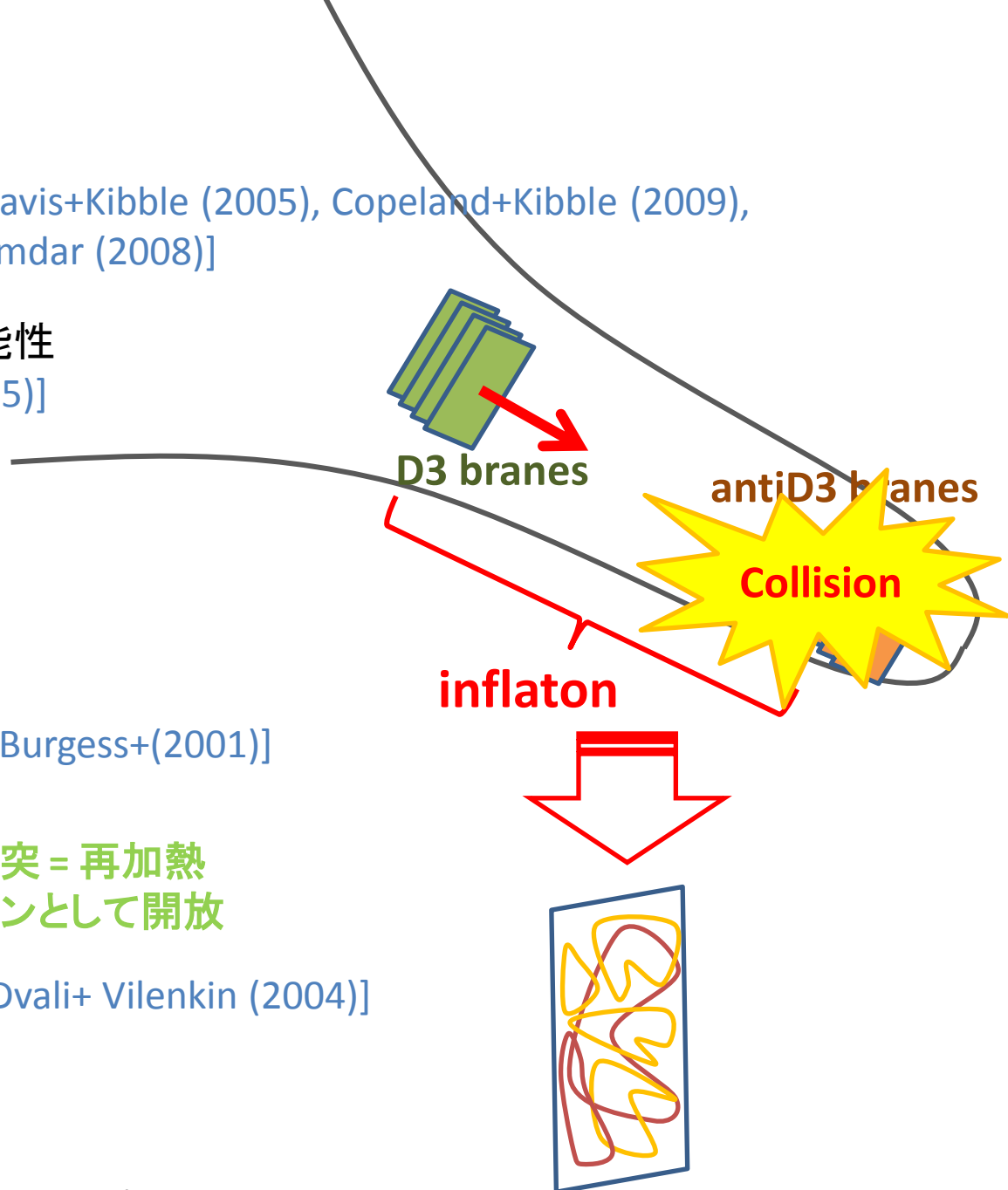
- F-弦が宇宙弦として振る舞う可能性
[Witten (1985)]



- ブレーンインフレーション模型
[Kachru+(2003), Davali+Tye(1999), Burgess+(2001)]

- ✓ 最終段階でD-ブレーンが衝突 = 再加熱
- ✓ エネルギーをF-弦, D-ブレーンとして開放

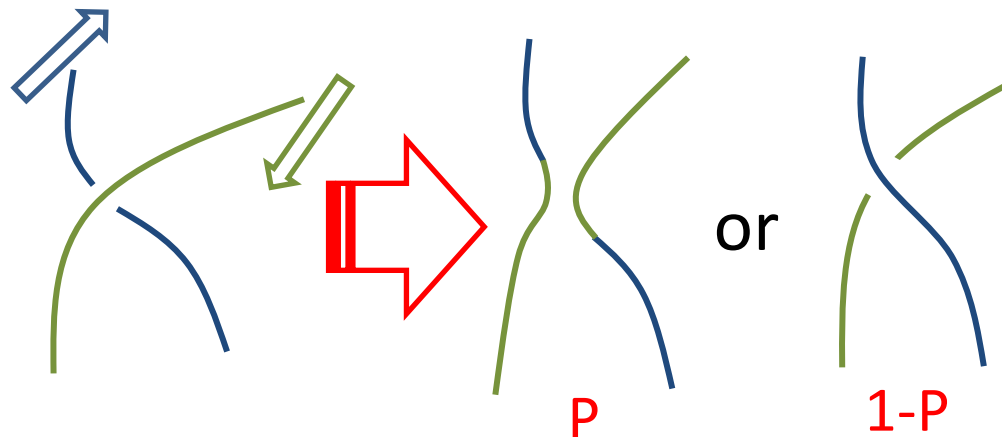
[Sarangi+Tye(2002), Jones+(2003), Dvali+ Vilenkin (2004)]



Q: 宇宙弦/宇宙超弦は観測的に区別可能か？

A: Yes!

「繋ぎ換え確率 P 」



➤ 場の理論的宇宙弦

: $P = 1$

[numerical: Shellard(1987), Matzner(1988), Moriarty+(1988),
Achucarro+de Putter(2006), Achucarro+Verbiest(2010)]

[analytic: Eto+ (2007), Hashimoto+Tong (2005), Hanany+Hashimoto(2005)]

➤ 宇宙超弦

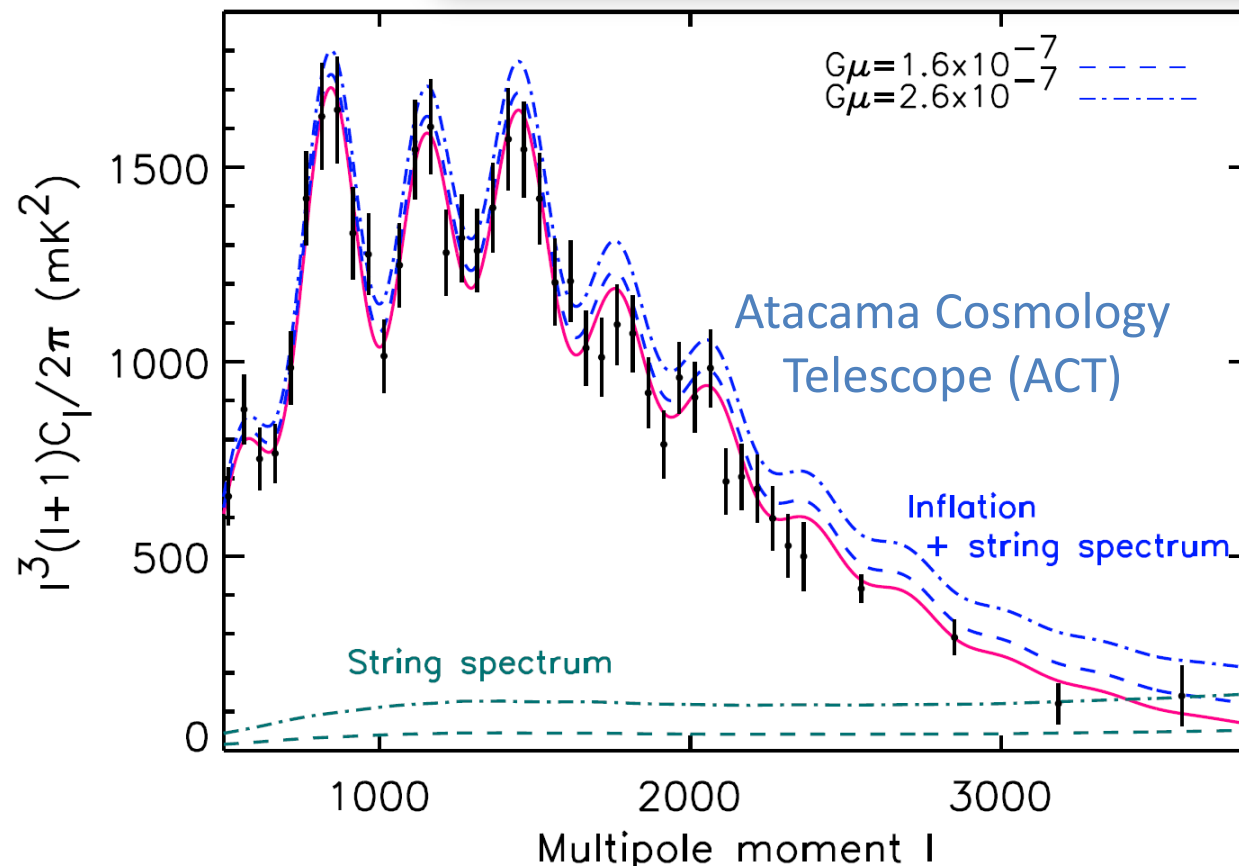
: $P \ll 1$

[Polchinski(1988), Jackson+Jones+Polchinski (2005), Hanany+Hashimoto (2005)]

1.3 : (場の理論的)宇宙弦のCMBによる制限

➤ 宇宙弦による特異な重力場は、小スケールCMBで観測可能！

$$G\mu < 1.6 \times 10^{-7} \text{ (95\%CL)}$$



[Dunkley+ (ACT), 2010]

....では、
宇宙超弦からの
寄与は???

目標

- ① 宇宙弦/宇宙弦ネットワークの解析模型
- ② 宇宙弦による小スケールCMBパワースペクトルの解析的模型の提案
- ③ 繋ぎ換え確率 P を導入 = 宇宙超弦への拡張

① 宇宙弦/宇宙超弦ネットワークの 解析模型

- Takahashi, Naruko, Sendouda, **DY**, Yoo, Sasaki,
JCAP 0910, 003 (2009), arXiv:0811.4698

①: 解析模型 : 速度依存1スケールモデル

➤ ネットワークのモデル化:

2つの典型的な量で記述(仮定) ⇒ 相関長 ξ , RMS速度 v_{rms}

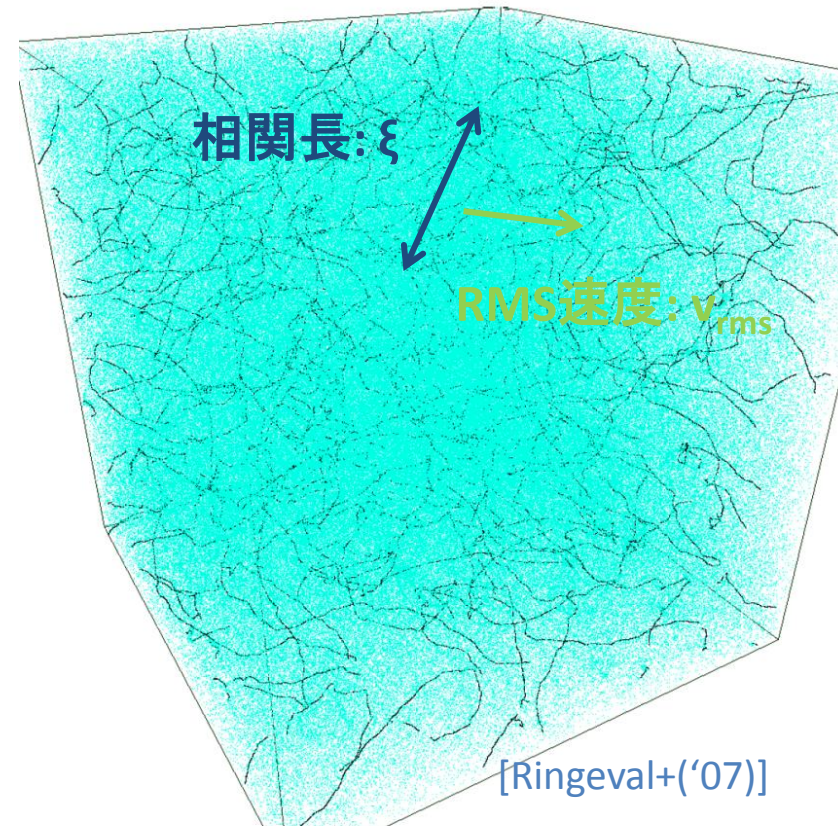
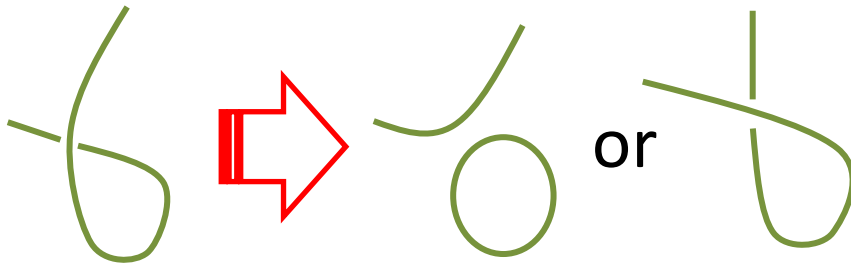
$$\rho_{str} = \frac{1}{\xi^3} \times \mu \xi = \frac{\mu}{\xi^2} \quad \xi = \frac{1}{H\gamma}$$

➤ ループ生成 ⇒ エネルギー損失

$c\xi$ の長さの
ループを生成

ループ生成率
: P に依存

$$\frac{\Delta\rho_{str}}{\Delta t} \approx - \frac{\mu \tilde{c} \xi \times (P v_{rms} / \xi)}{\xi^3}$$



✓ Velocity dependent one-scale model (VOS)

$$\xi = \frac{1}{H\gamma}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{t}{\gamma} \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{3} \left[(1 - v_{\text{rms}}^2) - \frac{\tilde{c} P v_{\text{rms}} \gamma}{\text{Loop formation}} \right] \quad : \text{エネルギー保存} \\ \frac{dv_{\text{rms}}}{dt} = (1 - v_{\text{rms}}^2) H \left[\frac{k(v_{\text{rms}}) \gamma}{\text{Curvature acceleration}} - 2v_{\text{rms}} \right] \quad : \text{EOM} \end{array} \right.$$

➤ ネットワークのアトラクター解 : スケーリング解 $\xi = 1/H\gamma \rightarrow \propto 1/H, v_{\text{rms}} \rightarrow \text{const.}$

$$\gamma \approx \sqrt{\frac{\pi \sqrt{2}}{3\tilde{c}P}} \quad \Rightarrow \quad \rho_{\text{str}} = \frac{\mu}{\xi^2} = \mu H^2 \gamma^2 \propto \frac{1}{P}$$

: 繋ぎ換え確率Pを考慮したスケーリング解

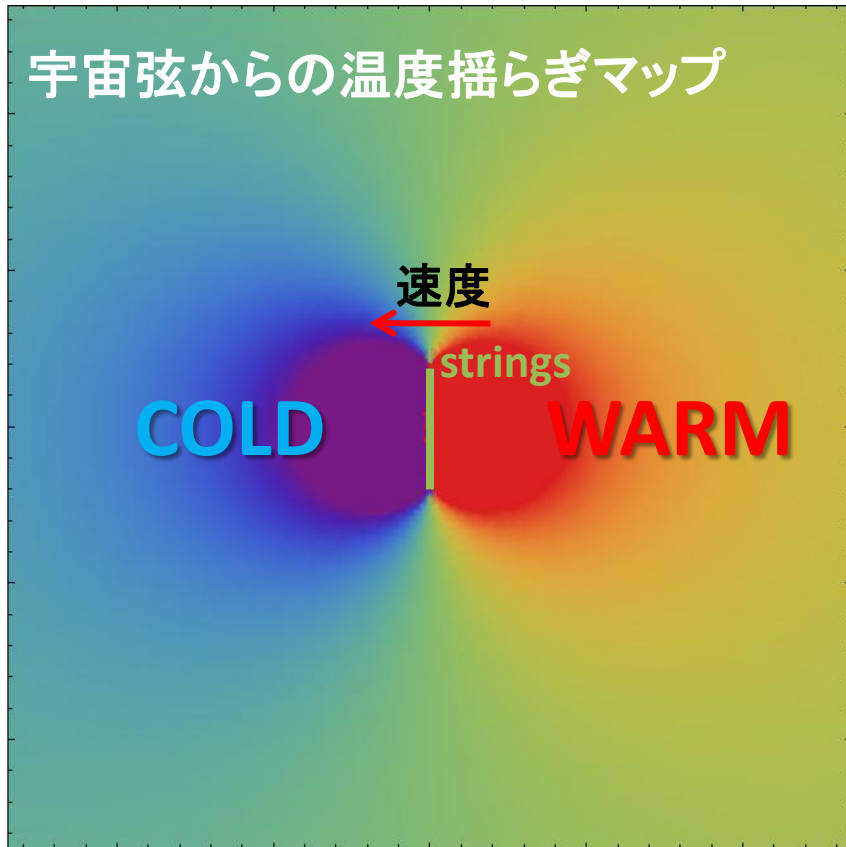
[see also Martins, Shellard ('96, '02), Avgoustidis, Shellard ('06)]

② 宇宙弦による小スケールCMB パワースペクトルの解析模型

- **DY**, Takahashi, Sendouda, Yoo and Sasaki,
PRD82, 063518 (2010), arXiv:1006.0687[astro-ph.CO]

②: 1本のまっすぐな宇宙弦/宇宙超弦からの信号

宇宙弦からの温度揺らぎマップ



➤ Gott-Kaiser-Stebbins 効果

[Kaiser+Stebbins, Nature 310 ('84)391,
Gott III, ApJ 288, 422 ('85)]

宇宙弦 → 階段関数的な温度揺らぎ
(ドップラー効果)

$$\frac{\Delta T_{\text{GKS}}}{T} = 4\pi \frac{v}{\sqrt{1-v^2}} \alpha_{\text{seg}} G\mu$$

② : セグメント公式 [DY, Takahashi, Sendouda, Yoo, Sasaki(2010)]

観測される温度揺らぎの天球マップは、それぞれのマップの重ね合わせ:

$$\int \frac{d^2 \hat{\mathbf{n}}}{2\pi} e^{-i\ell \cdot \hat{\mathbf{n}}} \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^{\text{total}} = a_\ell^{\text{total}} = \sum_{i \in \text{all segments}} a_\ell^{(i)}$$



$$C_\ell^{TT} = \left\langle |a_\ell^{\text{total}}|^2 \right\rangle = \underbrace{\left\langle \sum_{i \in \text{seg}} |a_\ell^{(i)}|^2 \right\rangle}_{\text{単一セグメント相関}} + \underbrace{\left\langle \sum_{i \neq j \in \text{seg}} a_\ell^{(i)} a_\ell^{(j)} \right\rangle}_{\text{セグメント-セグメント相関}}$$

0

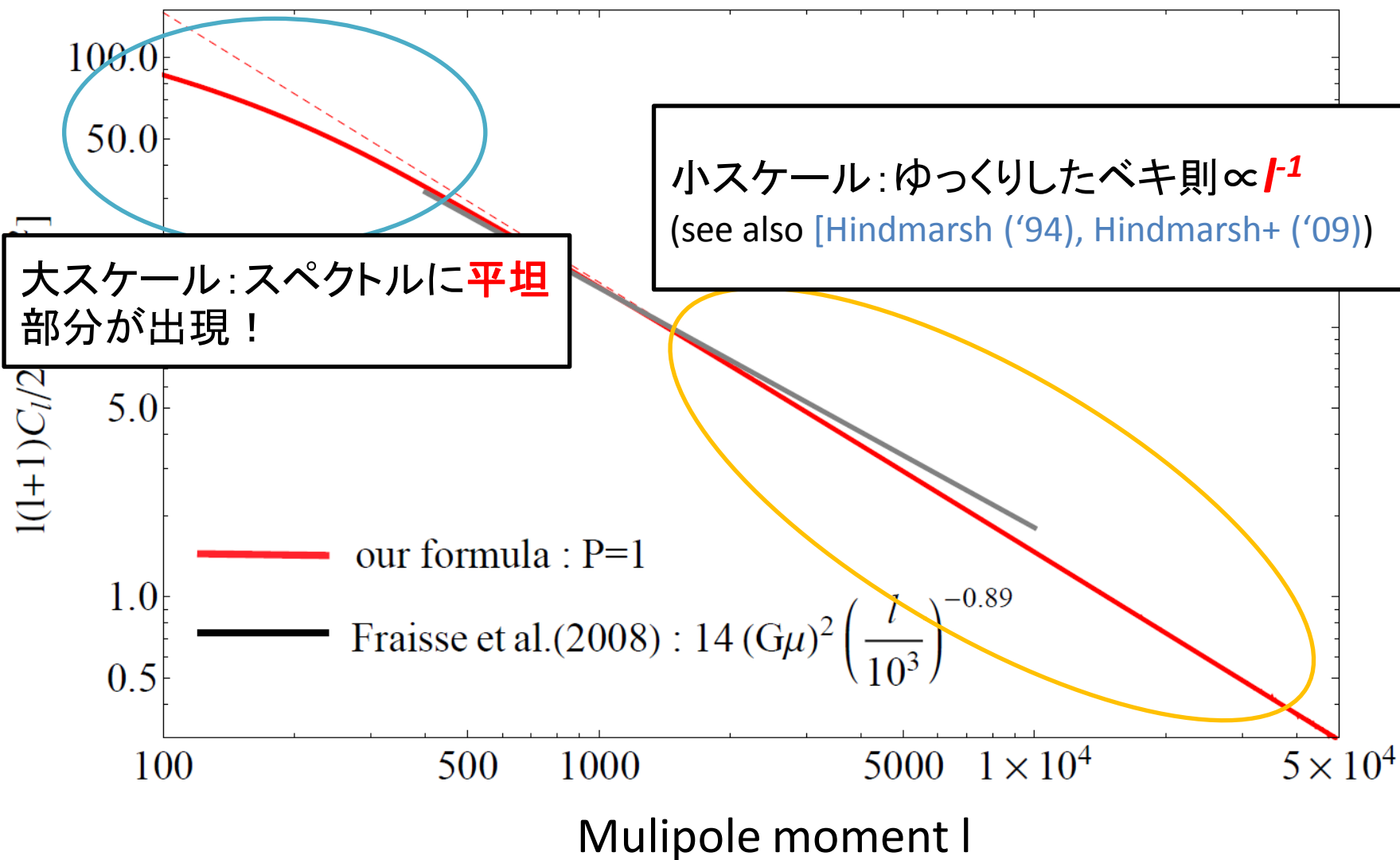
➤ アンサンブル平均 = セグメントのパラメータ平均

$$\rightarrow \int dz \frac{dV}{dz} \int d\Theta_{\text{conf}} \cdot \frac{dn_{\text{seg}}}{d\Theta_{\text{conf}}} |a_\ell(z, \Theta_{\text{conf}})|^2$$

パラメータ (z, Θ) 平均

一つの宇宙弦による
パワースペクトル

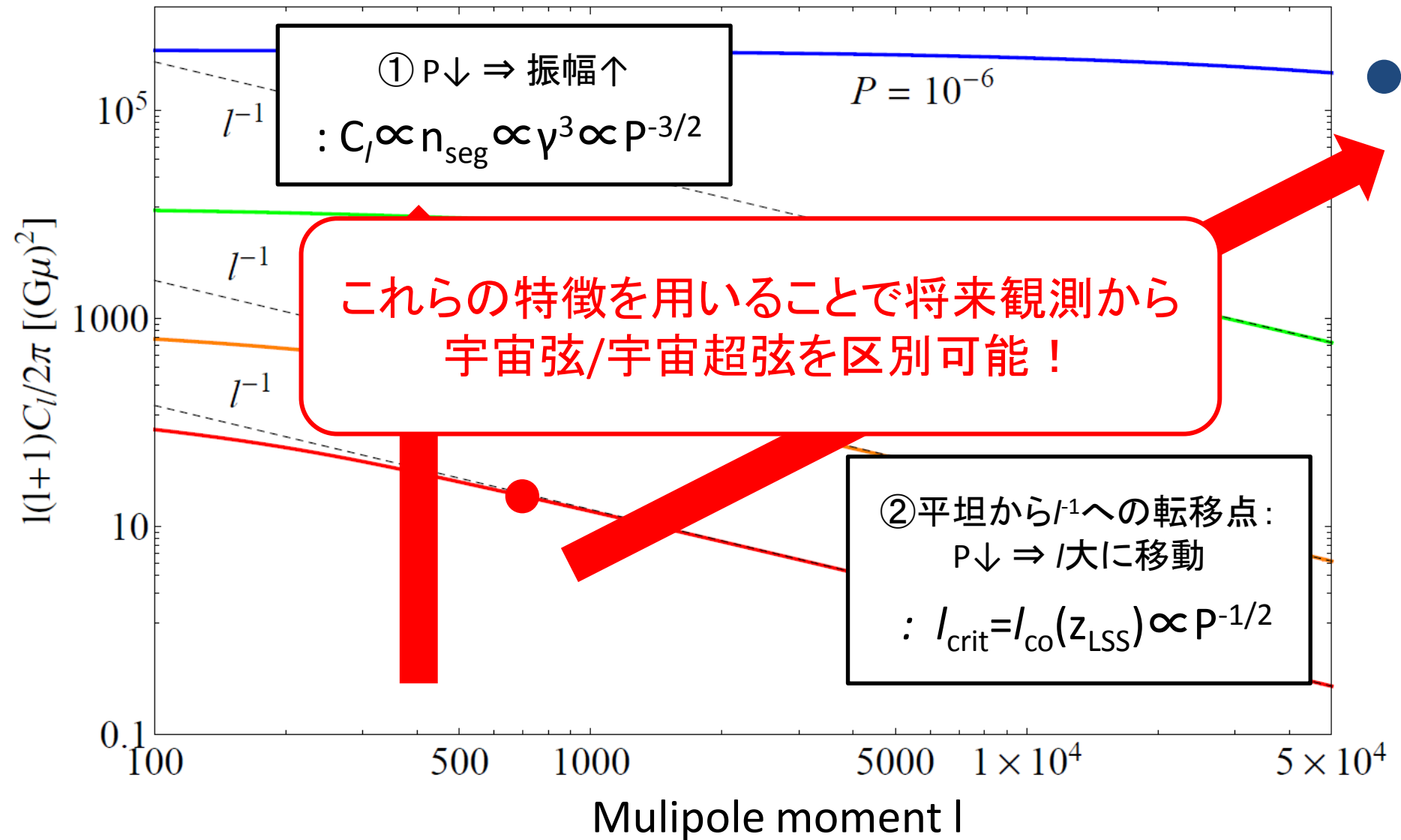
② : 宇宙弦による小スケールCMBパワースペクトル



③ 繋ぎ換え確率 P の導入 = 宇宙超弦へ拡張

- **DY**, Takahashi, Sendouda, Yoo and Sasaki,
PRD82, 063518 (2010), arXiv:1006.0687[astro-ph.CO]

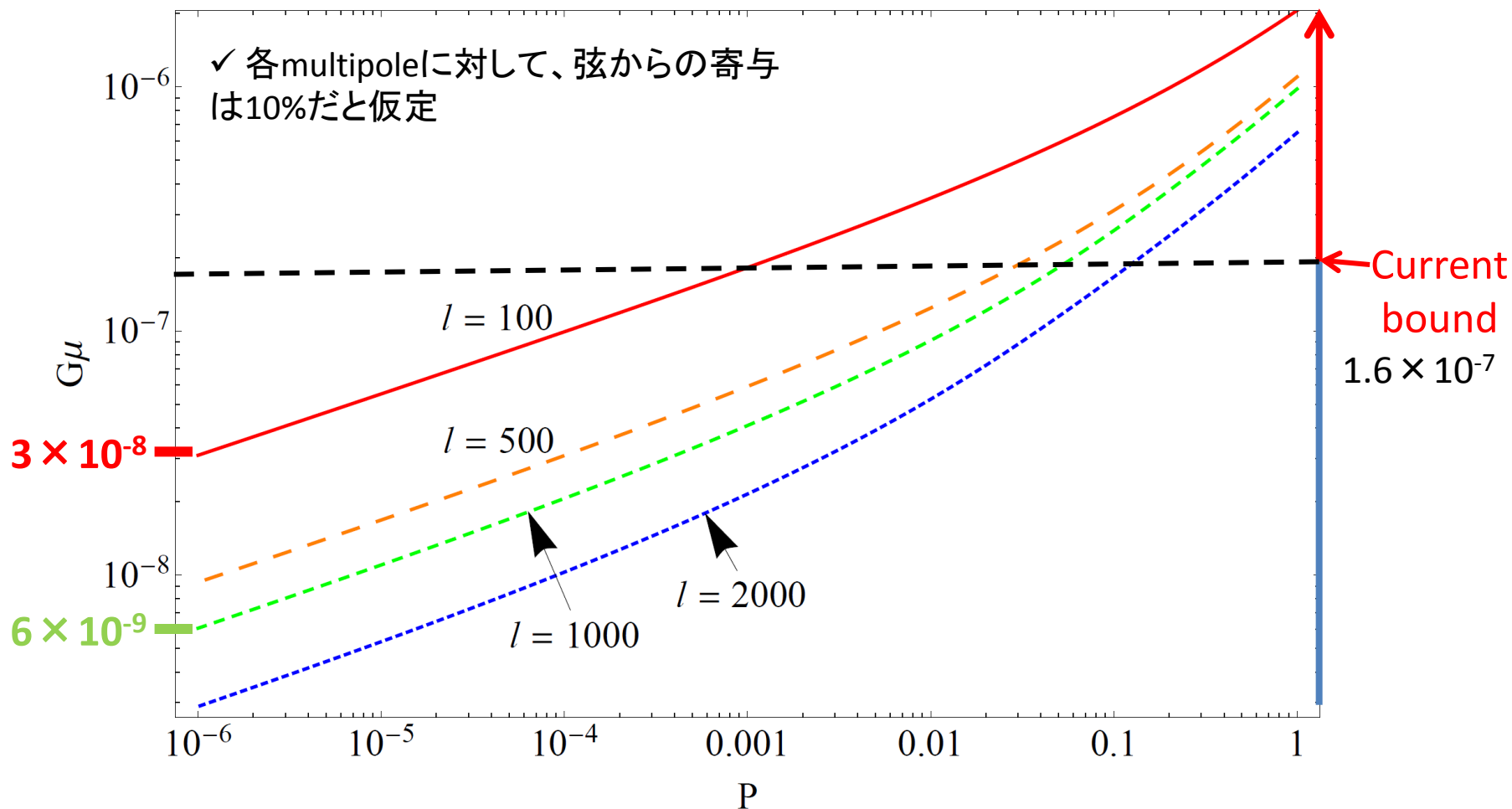
③ : 宇宙超弦による小スケールCMBパワースペクトル



③ : 宇宙弦/宇宙超弦の張力を観測から制限

Pを小さくすると、振幅が大きくなる

⇒ 宇宙超弦の張力はより厳しく制限！



4 : まとめ

- 超高エネルギー物理のプローブ: 宇宙弦/宇宙超弦
- 小スケールCMB温度揺らぎを解析的に計算するための手法を開発し、宇宙弦 ($P=1$)/宇宙超弦 ($P<1$)について適用
- 一般的性質として大角度: 平坦, 小角度: l^{-1} となることを見出した。
- $P \downarrow \Rightarrow$ 振幅 \uparrow であるので、張力 $G\mu$ への制限は小さい P に対してより厳しく働く

今後 ✓ 宇宙(超)弦による重力レンズ

- 小スケールCMB B-モード偏光
- 弱重力レンズ探査

THANK YOU !