



2026 8/24 PPP

Pure-Yang Mills理論における cosmic stringと 背景重力波に現れるその痕跡

Kazuto Nakamura (Tohoku U.), Masaki Yamada (Tohoku U.)

Particle and Cosmology group D1

(arXiv:2512.16821 published in PRD)

目次

- イン트로ダクション
- Cosmic string としての color flux tube
- スtringネットワークの一般論
- 本研究の主な成果：Delayed scalingと重力波放射の計算
- まとめ

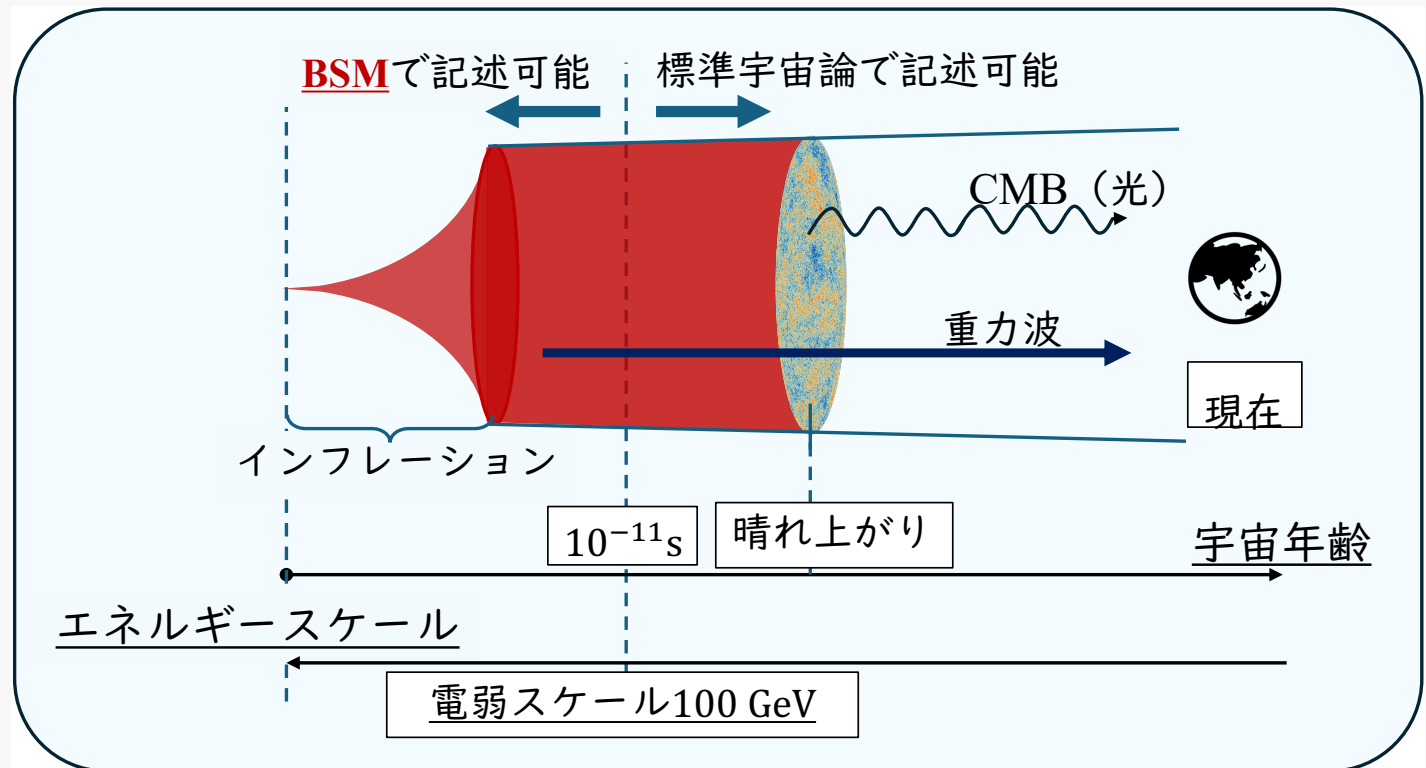
目次

● イントロダクション

- Cosmic string としての color flux tube
- スtringネットワークの一般論
- 本研究の主な成果：Delayed scalingと重力波放射の計算
- まとめ

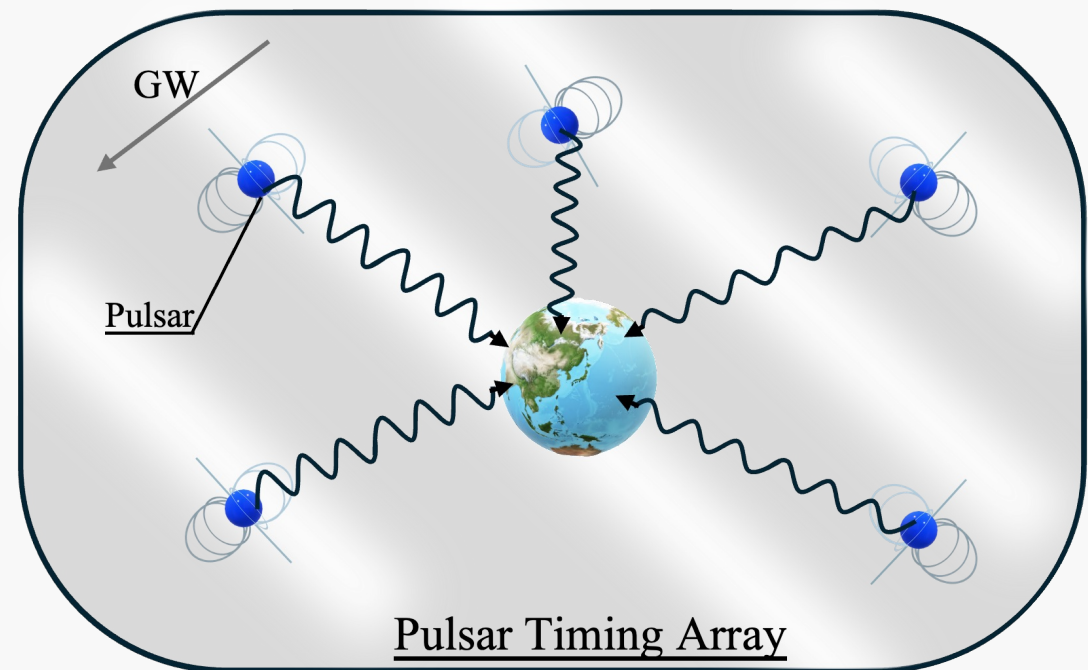
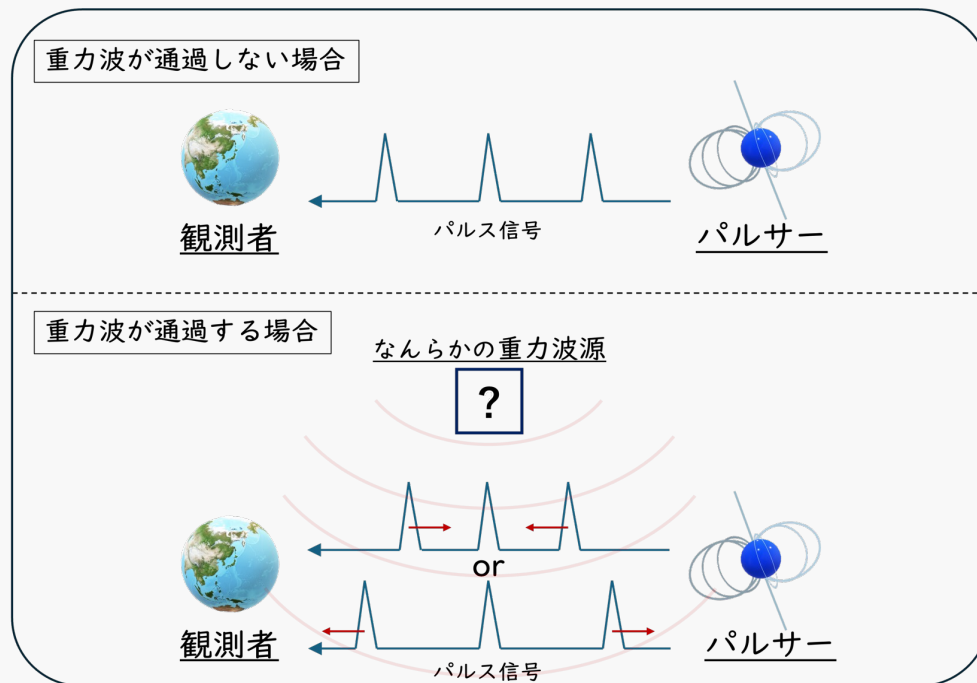
高温時代のBSM現象を起源とする 「初期宇宙に生成された重力波」は現在まで届く

- 重力波はほぼ散乱せず
初期宇宙の情報を現在
に届ける
- 現在では背景重力波
として観測されうる

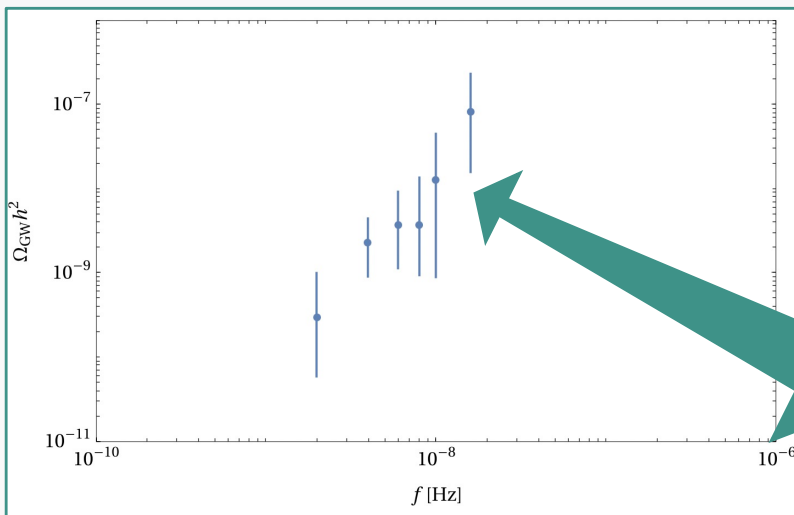


PTAによって起源不明の重力波信号が観測された

- パルサーを用いた銀河規模の重力波望遠鏡を使う重力波観測手法
→ 周波数の小さい（波長が長い）重力波を捉えられる



重力波源としての Cosmic Superstring (CSS)



NANOGrav collaboration, G. Agazie et al.,
Astrophys. J. Lett. 951 (2023) L8 [2306.16213].

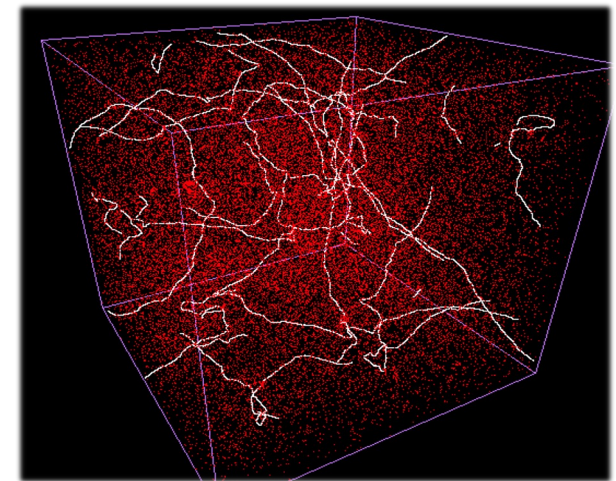
ゲージ理論でも
多種類のCSSが現れうる

Yamada, Yonekura 2022

(Bodiut, Victor Andrei. (2016). The Multiverse. 10.13140/RG.2.1.4131.0323)

Cosmic Superstring

- 弦理論の文脈で出現する1次元状の巨視的物体
- 重力波スペクトルは広い周波数に渡って分布
- 量子性を有する



目次

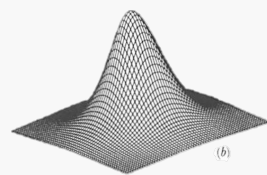
- インTRODクシヨン
- Cosmic string としての color flux tube
- ストリングネットワークの一般論
- 本研究の主な成果：Delayed scalingと重力波放射の計算
- まとめ

Abelian-Higgsモデル $U(1) \rightarrow I$

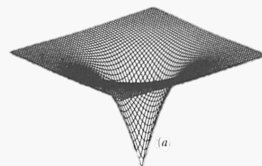
$$\begin{aligned} \pi_1(\mathcal{M}_{\text{vac}}) = \pi_1(G/H) = I &\Rightarrow \text{No cosmic string} \\ (G \rightarrow H) &\neq I \Rightarrow \text{Cosmic string} \end{aligned}$$

$$\mathcal{L} = (\partial_\mu + ieA_\mu)\bar{\phi}(\partial^\mu - ieA^\mu)\phi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{\lambda}{4}(|\phi|^2 - \eta^2)^2$$

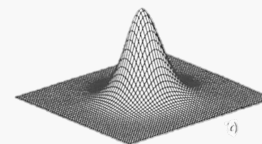
$$\pi_1(U(1)) = \pi_1(S^1) = \mathbb{Z} \rightarrow \left. \frac{\delta S}{\delta \phi} \right|_{\text{cosmic string}} = 0$$



Magnetic field



Higgs field



Energy density

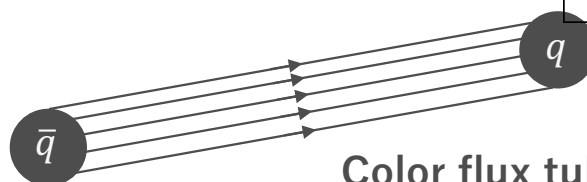
Cosmic string = 古典的な運動方程式の解

$\Rightarrow$ 衝突時には「組み換え」が古典的に起こる



運動する物体として振る舞う安定なcolor flux tube

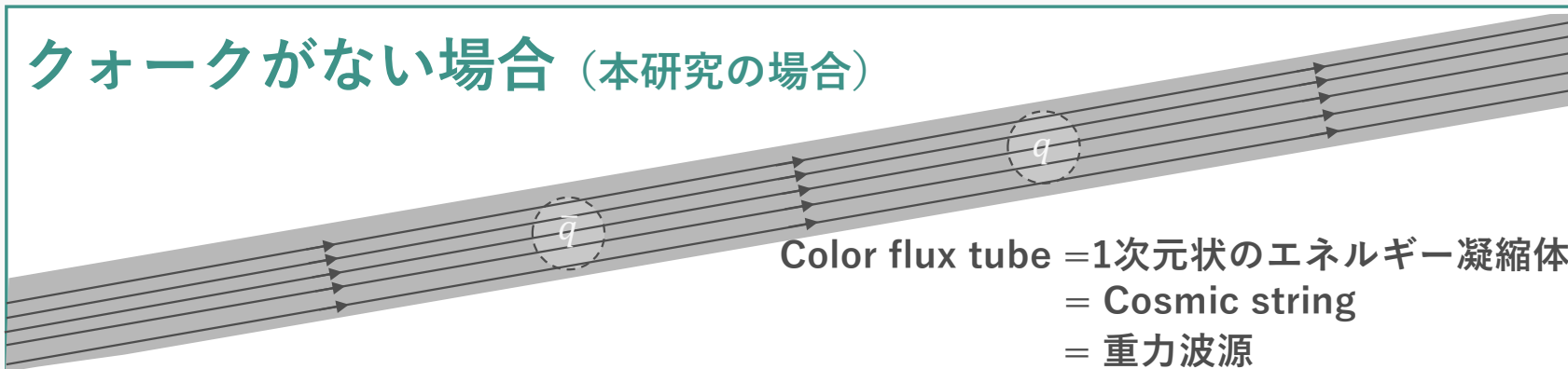
クォークがある場合



$$W_R(C) = \text{Tr}_R \mathcal{P} \exp \left(i \oint_C A_\mu dx^\mu \right)$$

Color flux tubeはクォークによって切断

クォークがない場合（本研究の場合）



Color flux tube = 1次元状のエネルギー凝縮体
= Cosmic string
= 重力波源

Color flux tubeの安定性

素粒子（電子）の安定性

0-form symmetry (通常の対称性)

$$\hat{U}(t)\hat{\psi}(x,t)\hat{U}^\dagger(t) = e^{-iq\alpha}\hat{\psi}(x,t)$$

対称性が存在
⇒ 保存電荷 q によって
電子は安定



可能な崩壊先がない

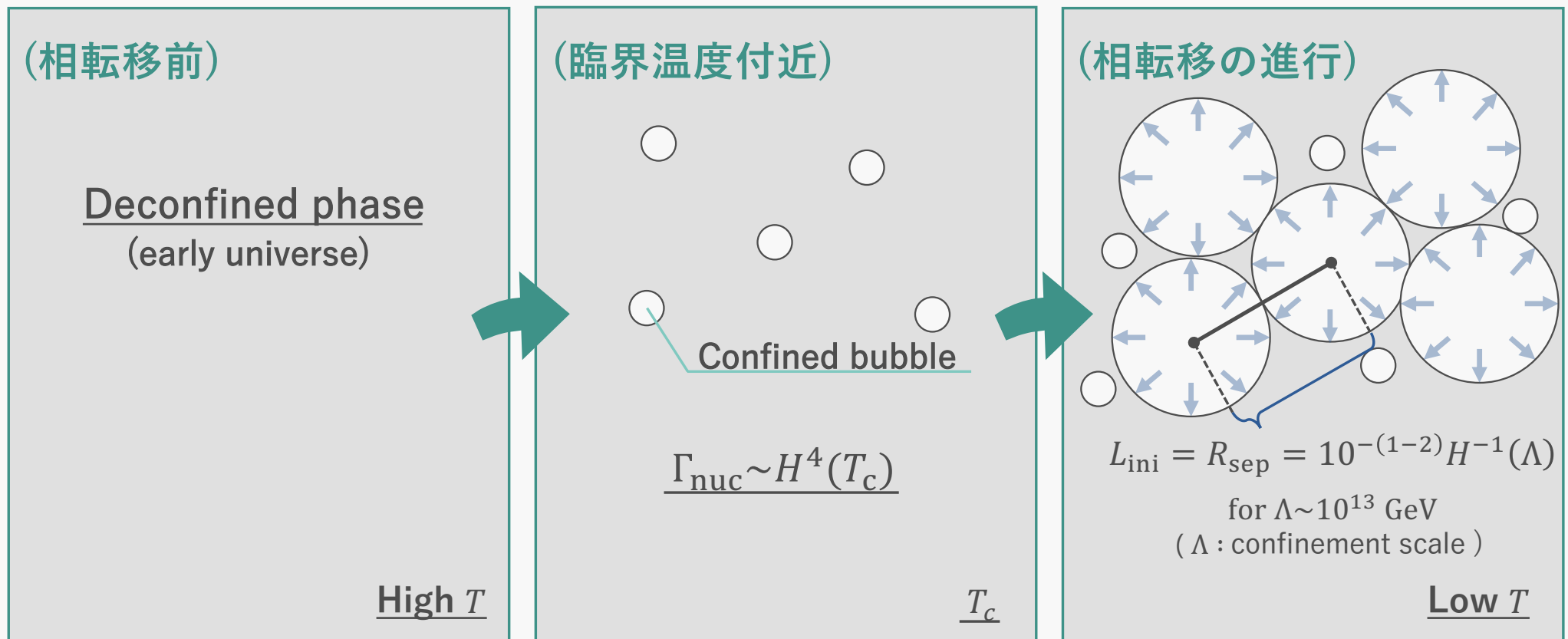
Color flux tubeの安定性

1-form center symmetry (Wilson loopのもつ電荷)

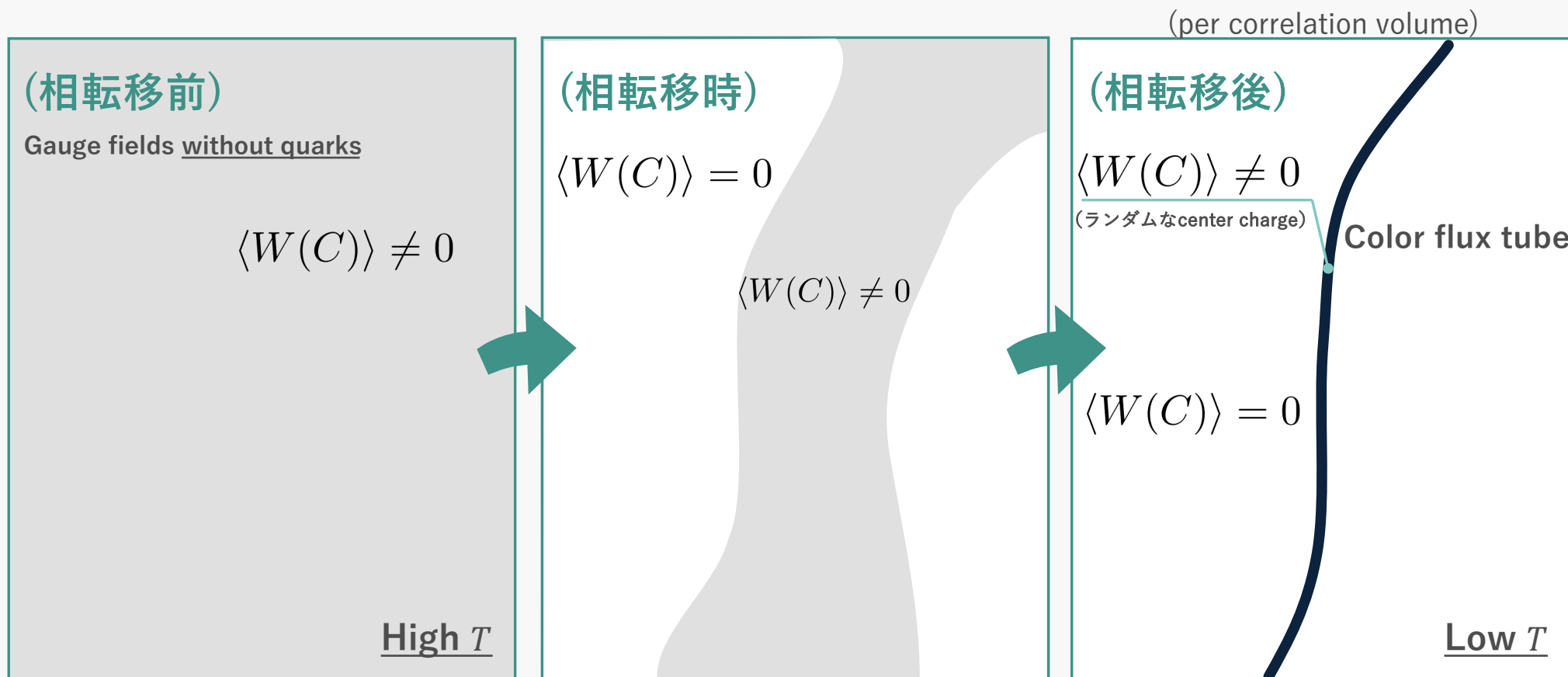
$$\begin{aligned}\hat{U}(\Sigma)\hat{W}(q,C)\hat{U}^\dagger(\Sigma) \\ = e^{-iq\alpha \text{Link}(\Sigma,C)}\hat{W}(q,C)\end{aligned}$$

1-form symmetryが存在
⇒ Color flux tubeは、
その保存電荷 q により安定

非閉じ込め相から閉じ込め相への1次相転移



非閉じ込め相から閉じ込め相への1次相転移



Color flux tube の Holographic dual による記述

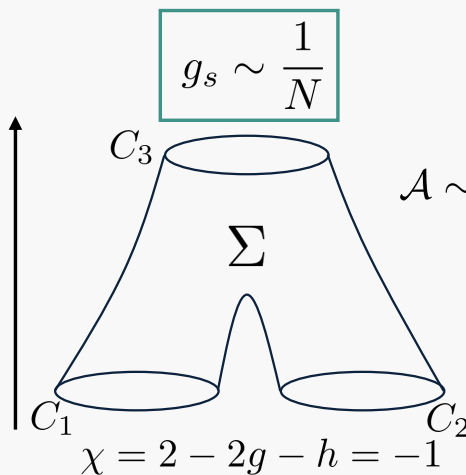
$$S_{\text{ws}} = \frac{1}{4\pi\alpha'} \int d^2\sigma \sqrt{h} h^{ab} G_{\mu\nu}(X) \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu + \frac{1}{4\pi} \int d^2\sigma \sqrt{h} \Phi(X) R^{(2)} + \dots$$

$$S_{\text{YM}} = -\frac{1}{4g^2} \int d^4x F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu},$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$



$$\mathcal{A} \sim Z_{\text{string}}[\Sigma] \sim g_s^{-\chi} = g_s$$



$$\mathcal{A} \sim \langle W_F^\dagger(C_3) W_F(C_1) W_F(C_2) \rangle \sim N^\chi = N^{-1}$$

(for large N)

1より小さい組み替え確率

	通常の Cosmic string	Pure YMにおける Color flux tube
その起源	自発的対称性の破れ	閉じ込め相転移
衝突時の組み換え確率	$P \sim 1$	$P \sim \frac{1}{N^2}, e^{-N} < 1$
Tension	$\mu \sim v^2$	$\mu \sim \Lambda^2$
形成過程	真空の向きが ランダムに選択される	1-form center charge がランダムに選択される (1次相転移)

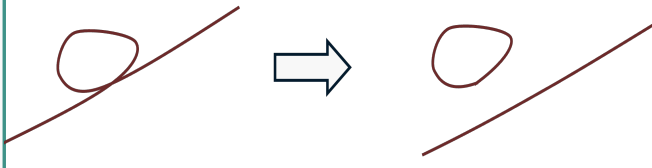
目次

- イン트로ダクション
- Cosmic stringとしてのcolor flux tube
- ストリングネットワークの一般論
- 本研究の主な成果：Delayed scalingと重力波放射の計算
- まとめ

密過ぎず希薄過ぎない状態へ向かう＝スケーリング則

「組み換え」 相互作用が存在

- ストリング同士が衝突すると「組み換え」と呼ばれる相互作用によってループを生成する。

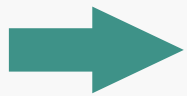


長いストリングが 密集している場合

- 「組み換え」が頻繁に起こる。
⇒ストリングの数密度は、宇宙膨張単体の効果より速く減少。

長いストリングが 希薄な場合

- 「組み換え」は抑制される。
⇒ストリングの数密度は、宇宙膨張単体の効果よりゆっくり減少。



このネットワークを定量的にモデル化
＝VOSモデル

統計進化を扱うVOSモデル

時間発展を特徴づける統計量

$$v, \rho$$

南部－後藤作用

$$S_{\text{NG}} = -\mu \int d^2\zeta \sqrt{-\gamma}$$

膨張宇宙背景

$$\left(\begin{array}{l} \mu : \text{Tension of string} \\ k(v) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{1-8v^6}{1+8v^6} \\ \tilde{c} : \text{loop chopping efficiency} \end{array} \right)$$

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -2H(1+v^2)\rho - \frac{\tilde{c}v\rho}{L} \\ \dot{v} &= (1-v^2) \left(\frac{k(v)}{R} - 2Hv \right) \end{aligned}$$

VOS model
(Velocity-dependent
One Scale model)

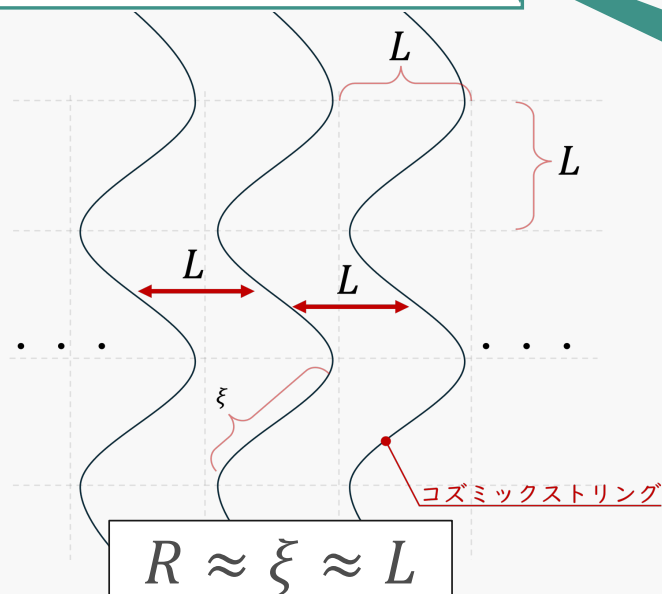
統計進化を扱うVOSモデル

$$\dot{\rho} = -2H(1 + v^2)\rho - \frac{\tilde{c}v\rho}{L}$$

$$\dot{v} = (1 - v^2)\left(\frac{k(v)}{R} - 2Hv\right)$$

$$\rho = \frac{\mu L}{L^3} = \frac{\mu}{L^2}$$

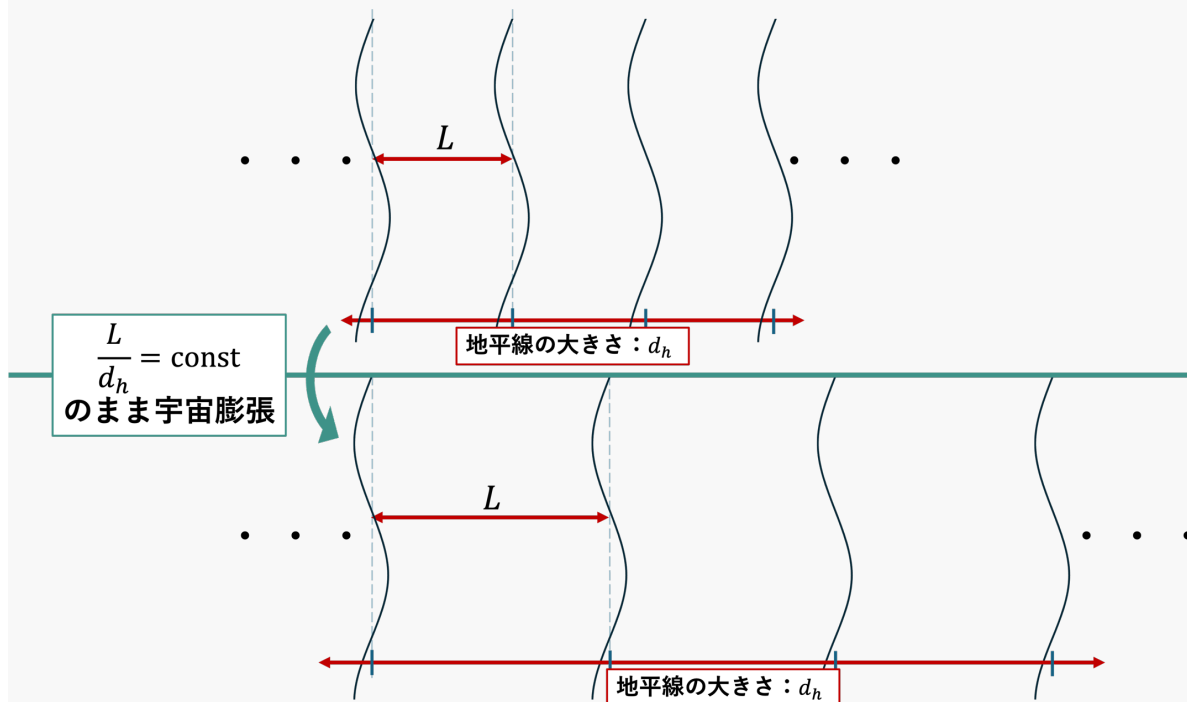
典型的なストリング間の距離 $L \equiv \gamma(t) \cdot t$
 を使って $\gamma(t)$ を定義し、書き直す



$$\frac{\dot{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{2t} \left(2Ht(1 + v^2) - 2 + \frac{\tilde{c}v}{\gamma} \right)$$

$$\dot{v} = \frac{1 - v^2}{t} \left(\frac{k(v)}{\gamma} - 2Htv \right)$$

スケーリング則 $\gamma(t) = \text{const}$ が成り立つこと



地平線 (因果関係をもてる距離)

$$d_h(t) = a(t) \int_0^t \frac{c dt'}{a(t')} \sim t$$

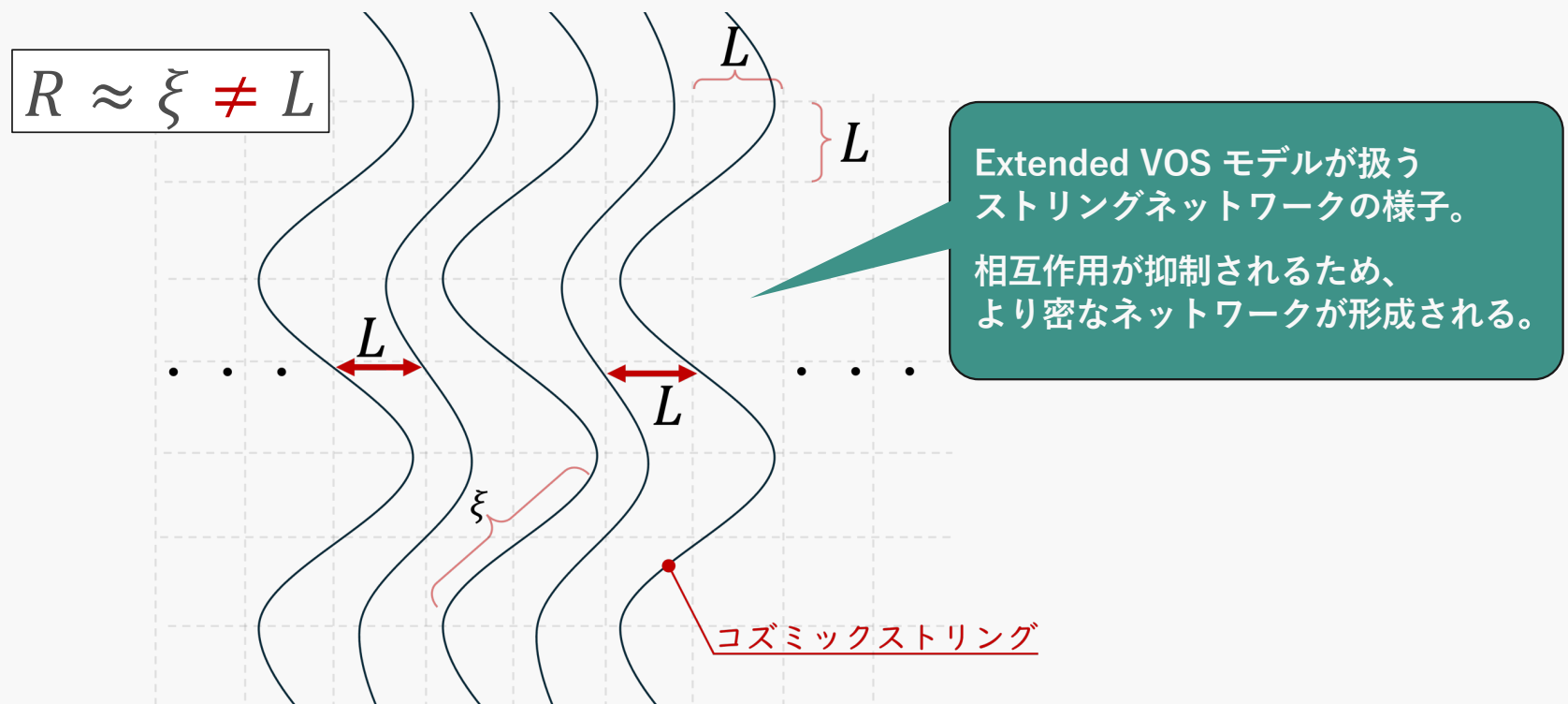


スケーリング則 $\Leftrightarrow \gamma(t) = \text{const}$

$$L \equiv \gamma(t) \cdot t$$

Extended VOS modelへの改良

- 相関長 ξ とLong string間の L は独立に進化する。



目次

- イン트로ダクション
- Cosmic stringとしてのcolor flux tube
- スtringネットワークの一般論
- **本研究の主な成果：**
Delayed scalingと重力波放射の計算
- まとめ

Pure Yang-Mills理論におけるColor flux tube

性質①

閉じ込め相転移で color flux tube が形成

- ゲージ群として、具体的には $\text{Spin}(4N)$ ($N \geq 2$) を考える。
- 漸近自由なゲージ理論なので閉じ込め相転移でcolor flux tubeが形成される。
- (基本表現の) Fermion がいない
⇒ 巨視的にも安定
⇒ Cosmic string
として現在まで残る

性質②

3種類の ストリングが存在

- $\text{Spin}(4N)$ ($N \geq 2$) の中心の構造は $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ 。
- $(1,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,1)$ で分類される3種類のストリングが存在。
- このうち2種は対称。

性質③

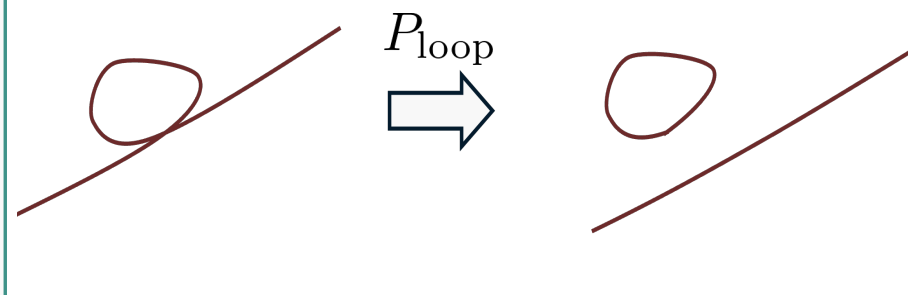
組み換え確率 $P_i < 1$ を伴う相互作用

- 3つのストリングは全て量子的な性質を持つ。
- 3種類のストリングは各々2種類の相互作用を持つ。
 - ループの生成
 - 異種ストリング間の Zipper 型の相互作用

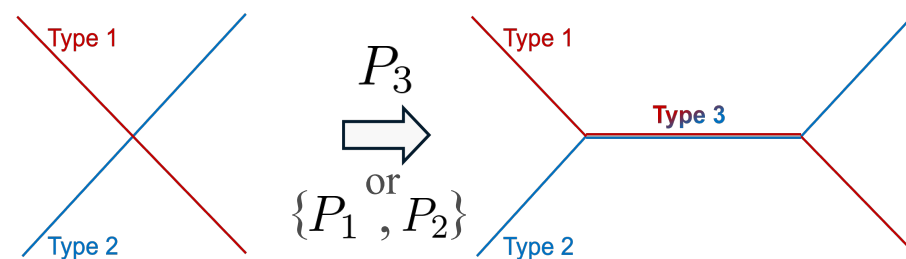
相互作用をしながら3種類のストリングが共存

- 2種類の相互作用項を現象論的に加える（南部後藤作用には現れない）

ループの生成



異種ストリングとの組み換え (Zipper 型の相互作用)



量子性のため、相互作用は確率的に生じる

⇒ 「組み換え確率」 P_i を 現象論的なパラメータ として導入

相互作用と組み換え確率を含む VOS モデル

実際に計算したVOS方程式系 $\{i, j, k\} = \{1, 2, 3\}$

$$\frac{\dot{\gamma}_i}{\gamma_i} = \frac{1}{2t} \left(2Ht(1 + v^2) - 2 + P_{\text{loop}} \frac{c_\xi \tilde{c} v_i}{\gamma_i^2} + P_k d \bar{v}_{ij} \frac{c_\xi}{\gamma_j^2} + P_j d \bar{v}_{ki} \frac{c_\xi}{\gamma_k^2} - P_i d \bar{v}_{jk} \frac{c_\xi \gamma_i^2}{\gamma_j^2 \gamma_k^2} \right)$$

$$\dot{v}_i = \frac{1 - v_i^2}{t} \left(\frac{k(v_i)}{c_\xi} - 2Hv_i t \right) \left[\begin{array}{l} P_{\text{loop}} : \text{Loopの生成を伴う過程の組み換え確率} \\ P_i : \text{Zipper相互作用でタイプ} i \text{ のストリング生成を伴う過程の組み換え確率} \\ \bar{v}_{ij} : \text{タイプ} i \text{ とタイプ} j \text{ のストリングにおける平均の相対速度} \end{array} \right]$$

定数パラメータ

 $d, \tilde{c}, c_\xi$

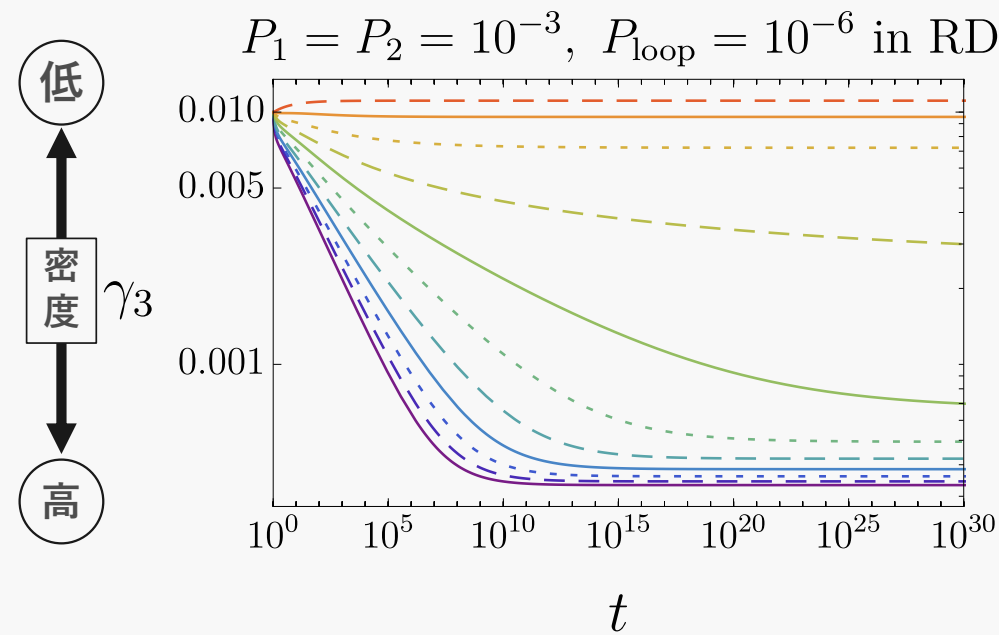
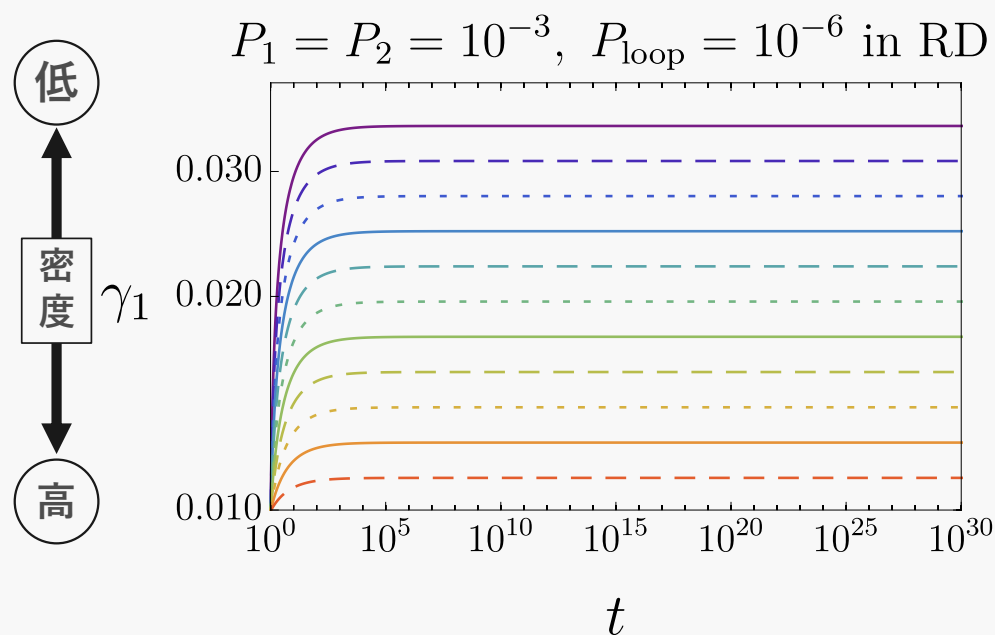
組み替え確率の関係式

 $P_1 = P_2$

3種類あるストリングのうち、
2つは対称であることを反映。
⇒ $\gamma_1 = \gamma_2, \gamma_3$ の2つで十分。

スケーリング則に到る様子は様々に変化

K. N, Yamada 2025



$P_3 :$	10^{-2}	$10^{-2.1}$	$10^{-2.2}$	$10^{-2.3}$	$10^{-2.4}$	$10^{-2.5}$
	$10^{-2.6}$	$10^{-2.7}$	$10^{-2.8}$	$10^{-2.9}$	10^{-3}	

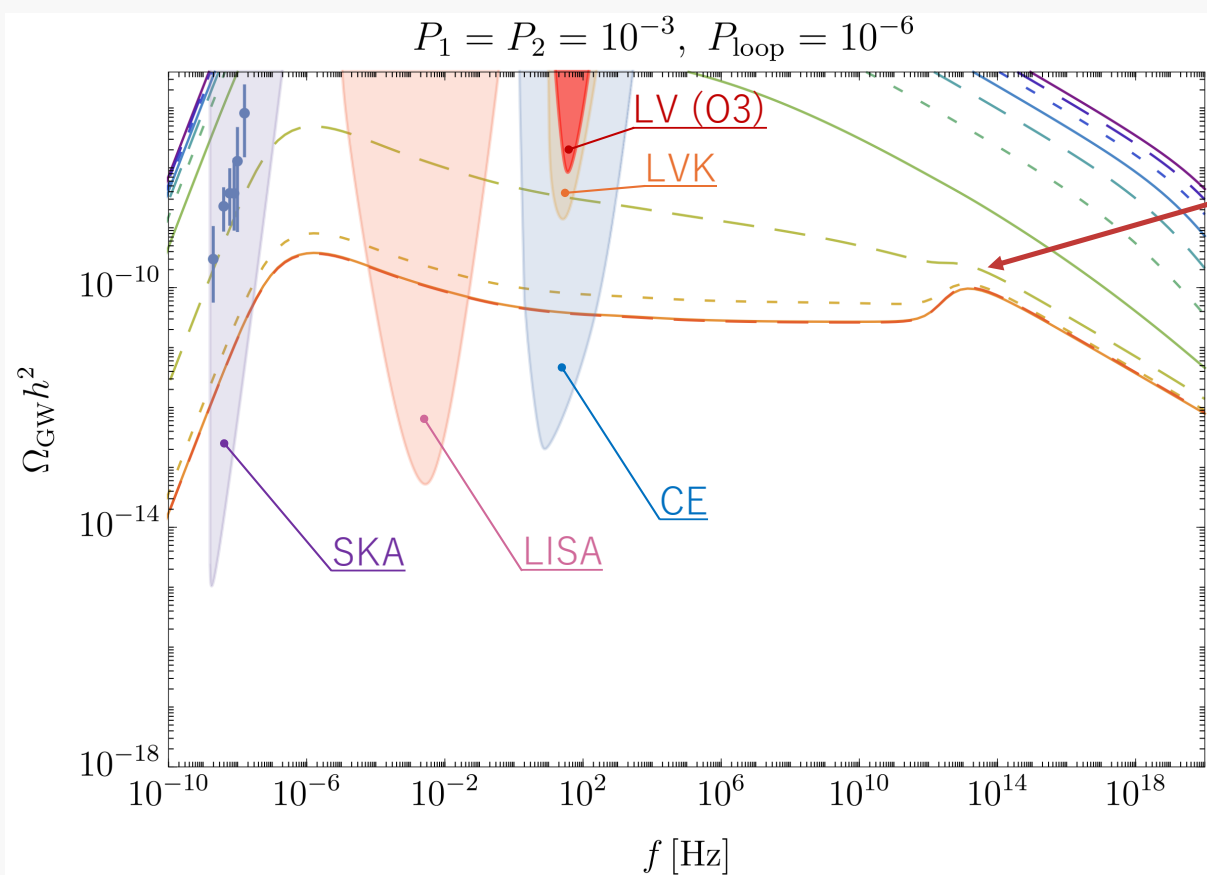
主にループ上にできるカuspから放出される

重力波の計算手順

$$\rho_i \rightarrow \rho_{\text{loop},i} \rightarrow \rho_{\text{GW},i}$$

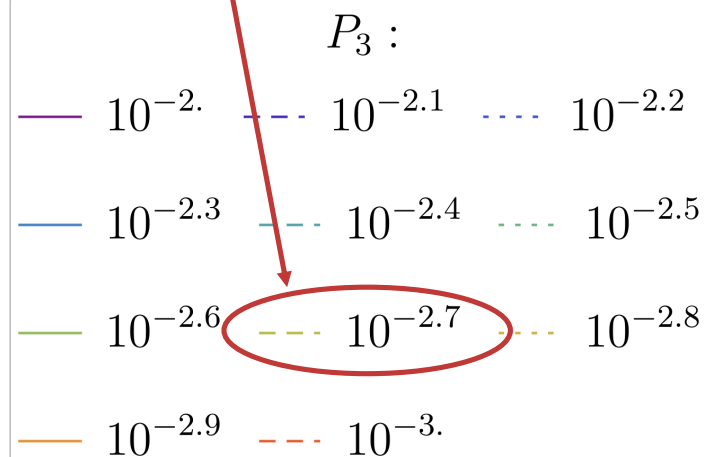


特定の組み換え確率では重力波を説明しうる



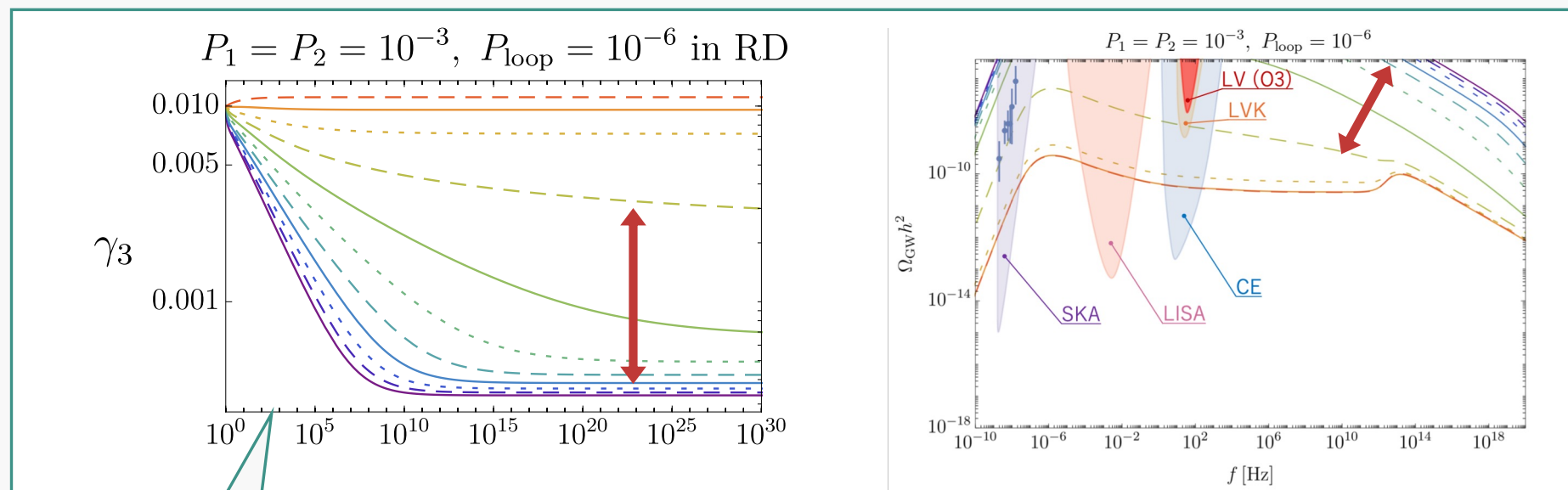
K. N. Yamada 2025

このうち、最も
観測と一致する結果



高周波領域が抑制された重力波スペクトル

- 平坦ではない（高周波領域での抑制）領域＝スケーリング時間の増大



スケーリング時間が遅延する場合、
高周波領域の重力波が抑制され、特徴的な傾きが現れる

目次

- イン트로ダクション
- Cosmic stringとしてのcolor flux tube
- スtringネットワークの一般論
- 本研究の主な結果：Delayed scalingと重力波放射の計算
- **まとめ**

多種類のCSSネットワークに特有のダイナミクスと重力波放射

多種類のCSSを含む ネットワークの ダイナミクス

- スケーリング解の組み換え確率依存性を明らかにした。
(今回は省略)
- スケーリング時間の組み換え確率依存性を明らかにした。
(今回は省略)
- スケーリング時間が著しく増大する場合の存在を示した。

多種共存CSS ネットワークから 放出される重力波

- 重力波スペクトラムの組み換え確率依存性を明らかにした。
- 高周波領域の重力波が抑制されるパラメータ領域の存在を明らかにした。

重力波観測との比較

- 既存の観測制限を回避し、かつPTAの観測結果を説明できるパラメータ領域を提供する可能性。
- 今後の重力波観測が進むことにより検証可能。