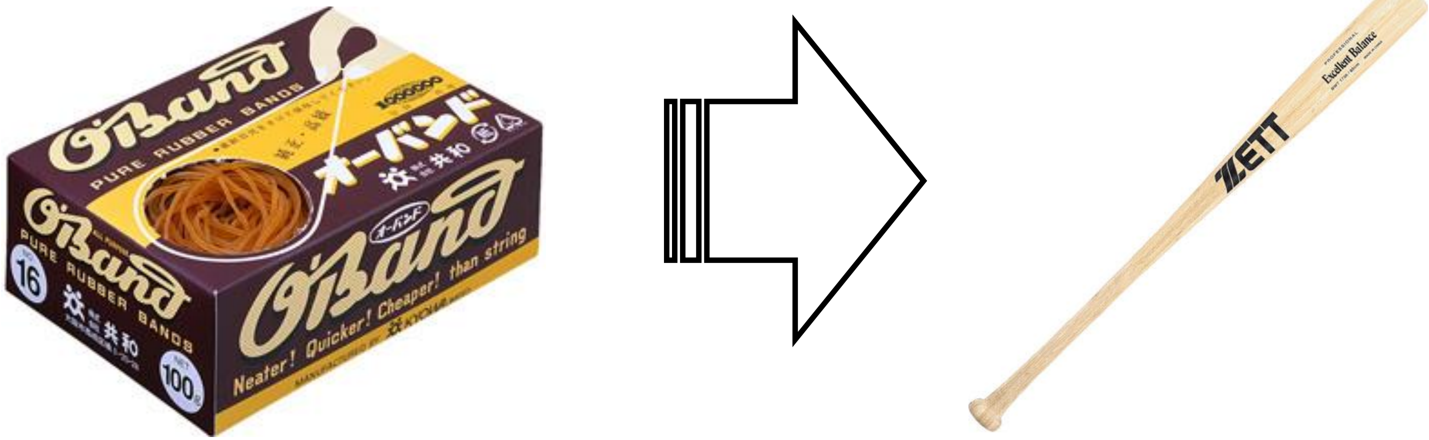
2015/03/23 物理学会@早稲田大

Dynamics of cosmic strings with higher-dimensional windings

山内大介
東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター

1410.6267 with Mattew Lake

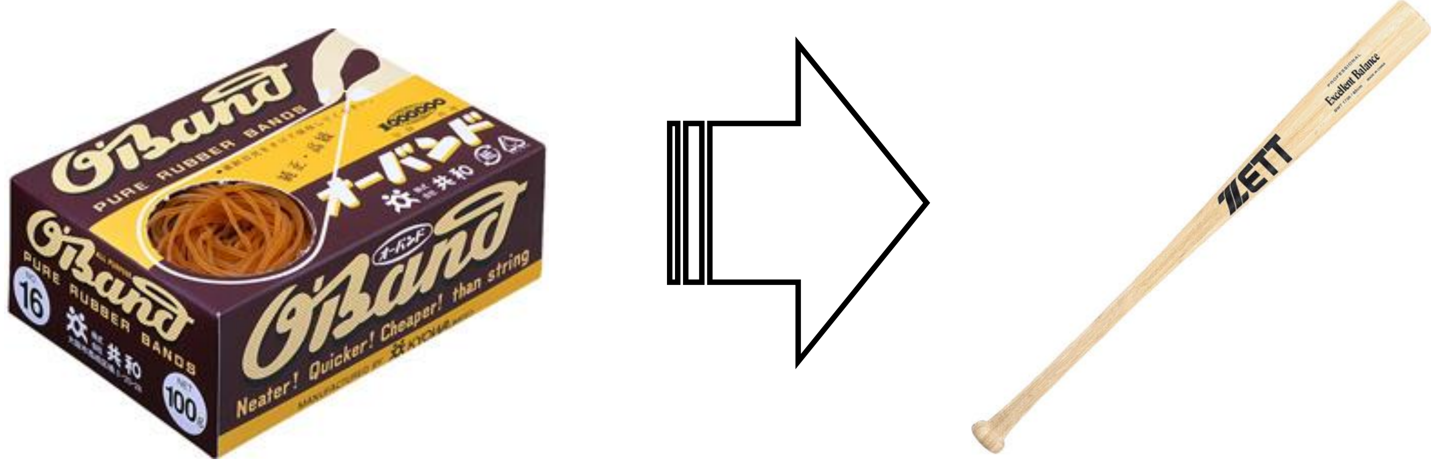
輪ゴムは棒にも なれるのか？



張力を持つ
ひも状物体

張力を持たない
棒状物体

輪ゴムは棒にもなれるのか？

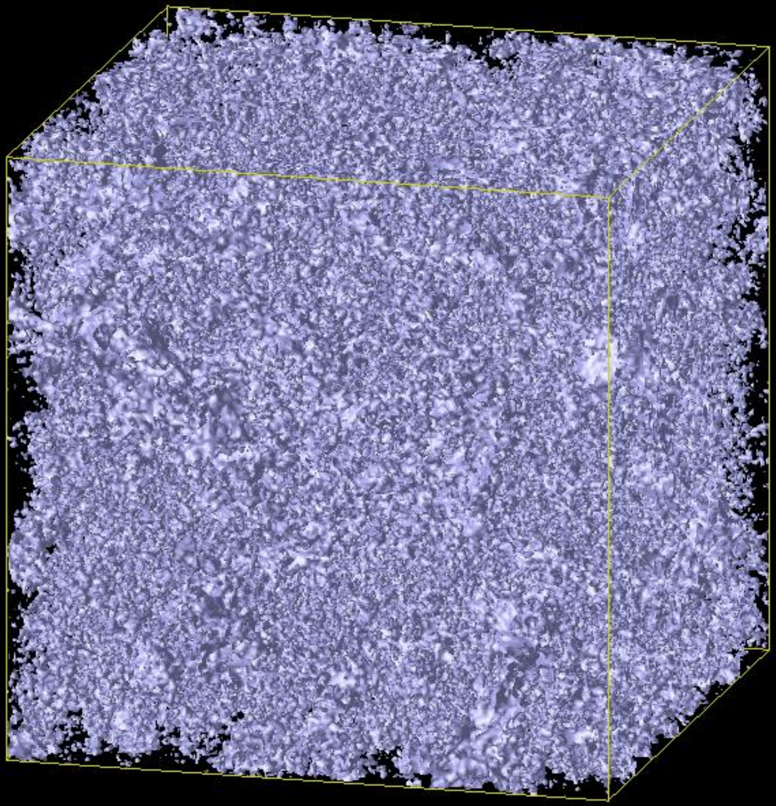


張力を持つ
ひも状物体

張力を持たない
棒状物体

輪ゴムは棒にも なれる~~のか？~~！

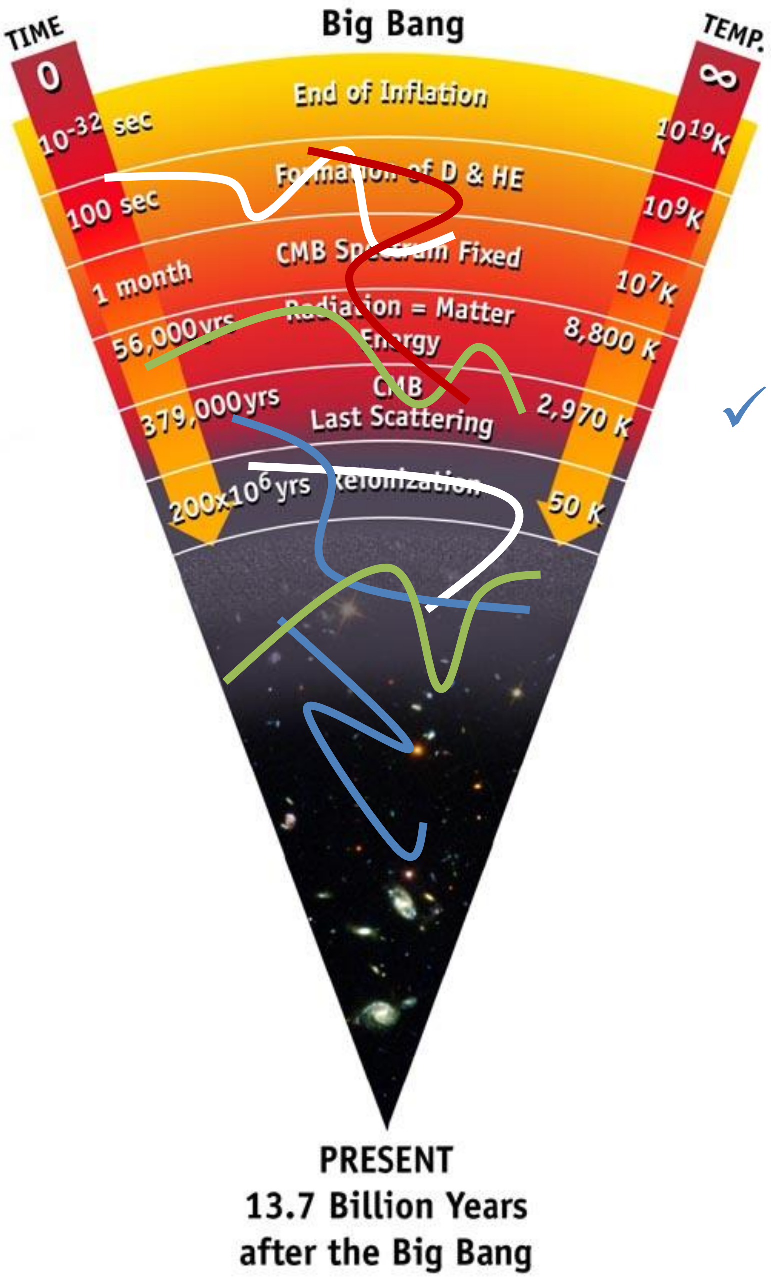
Cosmic strings



Hiramatsu+**DY**+, 1307.0308
Hiramatsu+**DY**, in progress

- ✓ Are produced in the very early universe
  - ➢ At the end of inflation
  - ➢ At the phase transition
- ✓ Are line-like topological defects

Why are cosmic strings still interesting?



✓ Could be a probe for the early phases of the universe before the CMB epoch

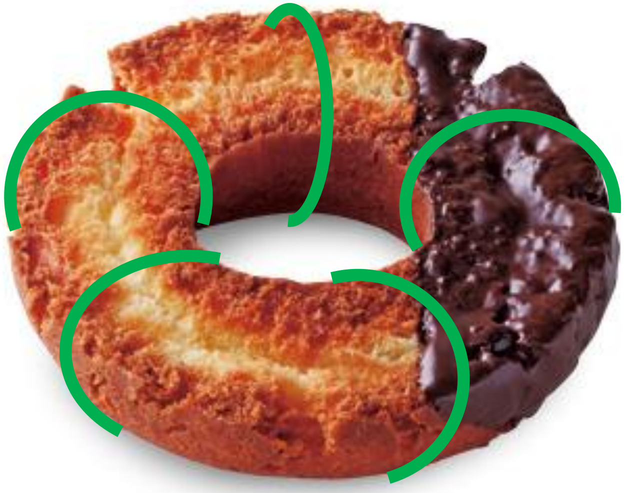
- Have a potential to reveal the physics during phase transition
- Possible sources of GWs and CMB
- Macroscopic objects of superstrings (“*cosmic superstrings*”)

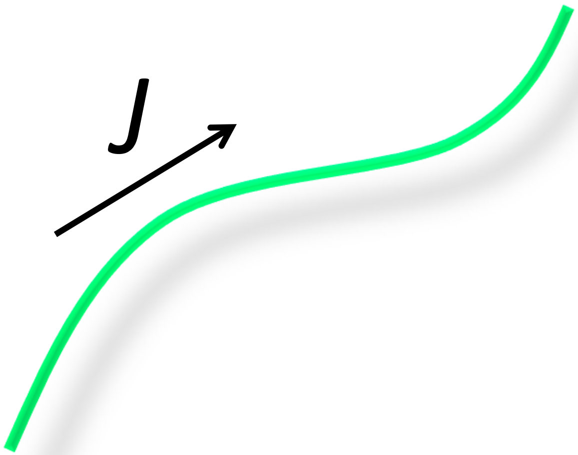
[Nielsen (1980)]

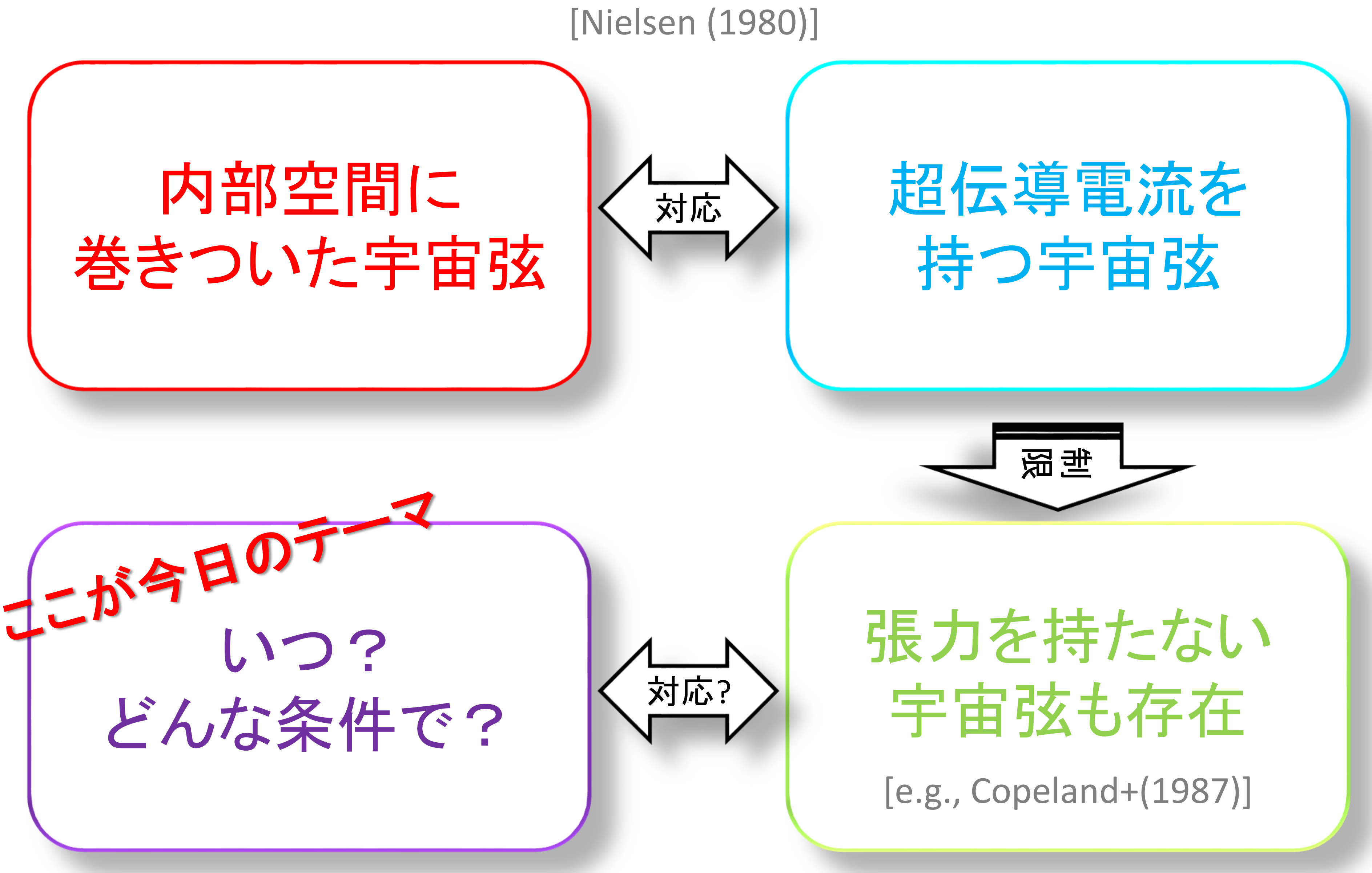
内部空間に
巻きついた宇宙弦

対応

超伝導電流を
持つ宇宙弦







[Nielsen (1980)]

内部空間に
巻きついた宇宙弦

対応

超伝導電流を
持つ宇宙弦

制限

張力を持たない
宇宙弦も存在

[e.g., Copeland+(1987)]

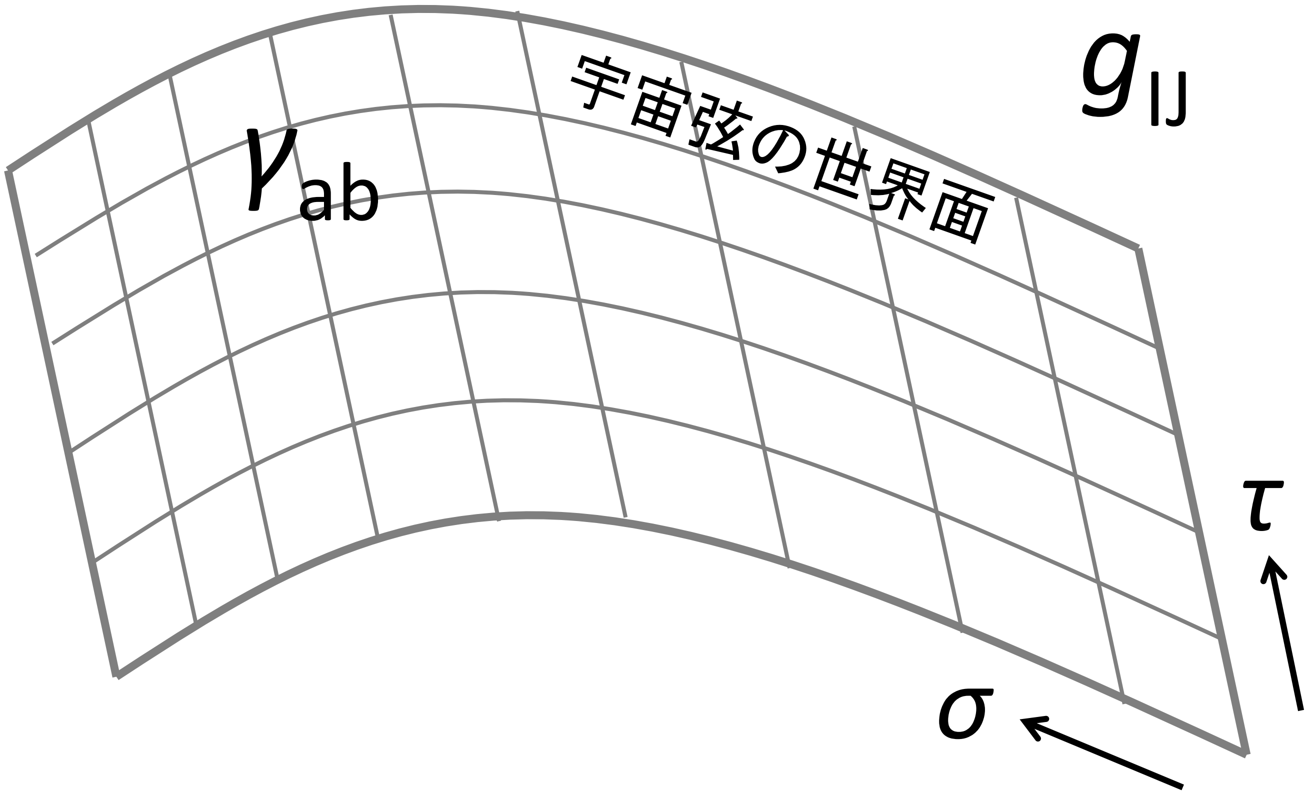
対応?

ここが今日のテーマ

いつ？
どんな条件で？

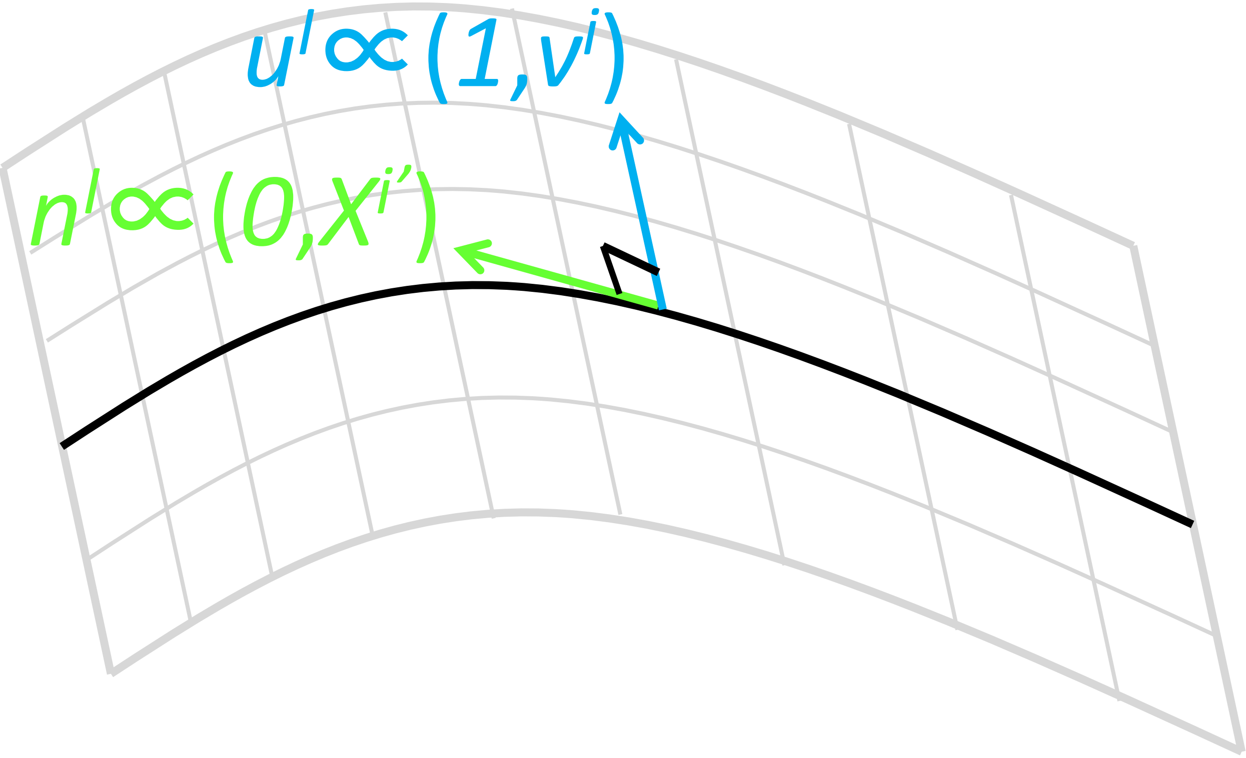
- 作用：南部-後藤作用

$$S = -\mathcal{T}\int d^2\zeta\sqrt{-\gamma}$$



➢ エネルギー運動量テンソル [Carter (1990)]

$$\sqrt{-g}T^{IJ} = \mathcal{T}\int d\tau d\sigma\sqrt{-\gamma}\left(u^I u^J - n^I n^J\right)\delta^5(x-X)$$

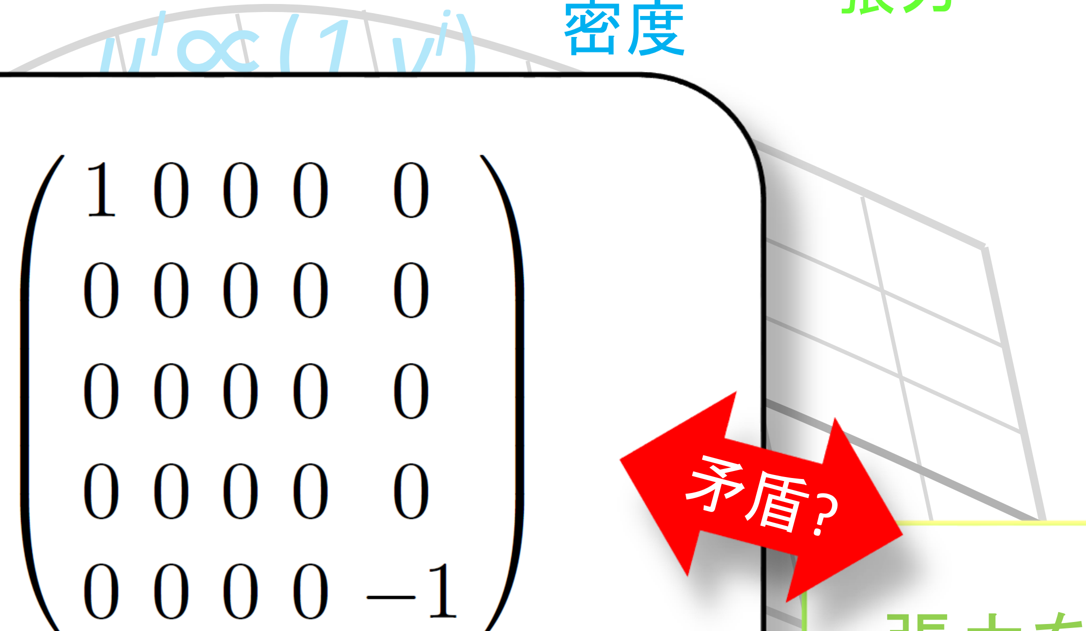


➢ エネルギー運動量テンソル [Carter (1990)]

$$\sqrt{-g}T^{IJ} = \mathcal{T}\int d\tau d\sigma \sqrt{-\gamma}\left(u^I u^J - n^I n^J\right)\delta^5(x-X)$$

↑ エネルギー密度

↑ 張力



$$T^{IJ} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

張力は常にゼロになることはない (?)

矛盾?

張力を持たない
宇宙弦も存在

[e.g., Copeland+(1987)]

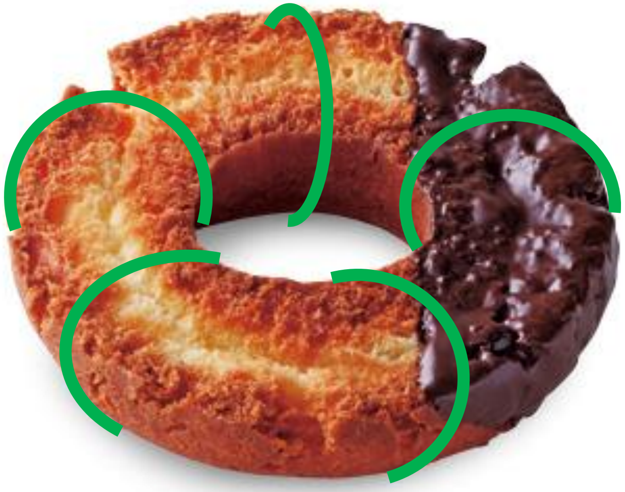
➢ エネルギー運動量テンソル [Carter (1990)]

$$\sqrt{-g}T^{IJ} = \mathcal{T}\int d\tau d\sigma\sqrt{-\gamma}\,\left(u^I u^J - n^I n^J\right)\delta^5(x-X)$$

エネルギー密度

張力

$u^I \propto (1, v^i)$



内部空間の巻きつきの効果を取り入れるべき！

対応!

張力を持たない
宇宙弦も存在

[e.g., Copeland+(1987)]

4次元実効エネルギー運動量テンソル

- 余剰次元方向が小さく丸まっているとして積分！

考慮すべき条件

- 4次元から見て実効的なτ方向/σ方向単位ベクトルを構成する
- 余剰次元方向の埋め込みが解になっている

4次元実効エネルギー運動量テンソル

$$\sqrt{-g}T^{IJ} = \mathcal{T}\int d\tau d\sigma\sqrt{-\gamma}\left(u^I u^J - n^I n^J\right)\delta^5(x-X)$$

ステップ1:余剰次元方向を積分

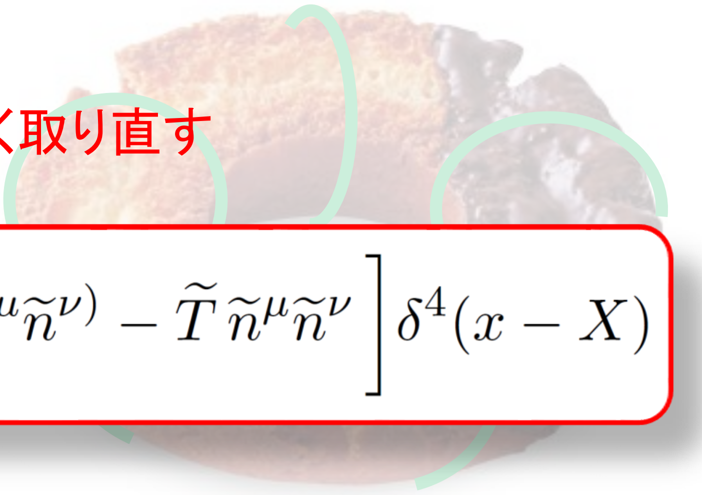
$$\sqrt{-\tilde{g}}\,\tilde{T}^{\mu\nu} = \mathcal{T}\int d\tau d\sigma\sqrt{-\gamma}\left(u^\mu u^\nu - n^\mu n^\nu\right)\delta^4(x-X)$$

→ 単に4次元にするだけでは方向ベクトルの直交性が破れる！

$$\tilde{g}_{\mu\nu}u^\mu n^\nu \neq 0$$

ステップ2:直交基底をうまく取り直す

$$\boxed{\sqrt{-\tilde{g}}\,\tilde{T}^{\mu\nu} = \int d\tau d\sigma\sqrt{-\gamma}\left[\tilde{U}\,\tilde{u}^\mu\tilde{u}^\nu + 2\tilde{\Sigma}\,\tilde{u}^{(\mu}\tilde{n}^{\nu)} - \tilde{T}\,\tilde{n}^\mu\tilde{n}^\nu\right]\delta^4(x-X)}$$



4次元実効エネルギー運動量テンソル

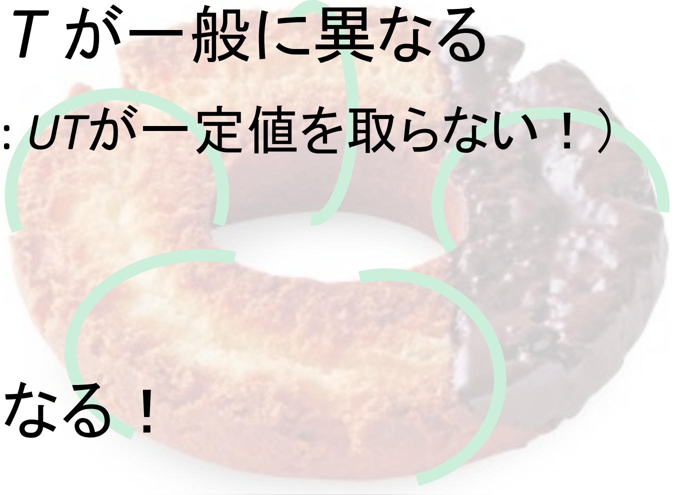
$$\sqrt{-\tilde{g}}\,\tilde{T}^{\mu\nu} = \int d\tau d\sigma \sqrt{-\gamma}\left[\tilde{U}\,\tilde{u}^{\mu}\tilde{u}^{\nu} + 2\tilde{\Sigma}\,\tilde{u}^{(\mu}\tilde{n}^{\nu)} - \tilde{T}\,\tilde{n}^{\mu}\tilde{n}^{\nu}\right]\delta^4(x-X)$$

4次元から見て適切な基底ベクトル

- (τ,τ), (σ,σ)成分以外に(τ,σ)成分が現れる
- エネルギー密度 *U* と張力 *T* が一般に異なる

（Note : *UT*が一定値を取らない！）

通常の宇宙弦と大きく異なる！



ステップ3:余剰次元方向の運動を「うまく」取り扱う

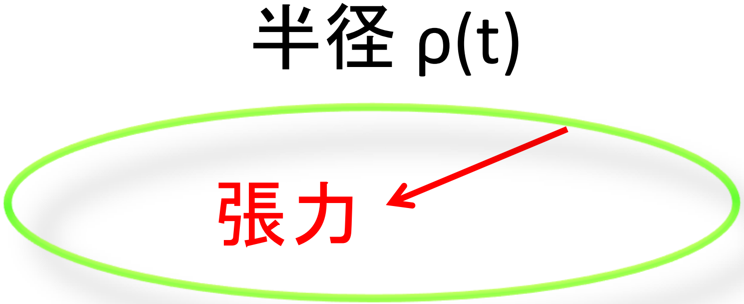
$$\widetilde{T}^{\mu\nu} \sim \begin{pmatrix} \omega^{-2} & 0 & 0 & 2\left(1-\omega^2\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\left(1-\omega^2\right) & 0 & 0 & -\left(2\omega^2-1\right) \end{pmatrix}$$

ここで: ω^2 = (全体のひも長さ)^2/(4次元部分のひも長さ)^2

「張力ゼロ」=「4次元と余剰次元にエネルギーを等しく分配したとき」

例：4次元で見てループ

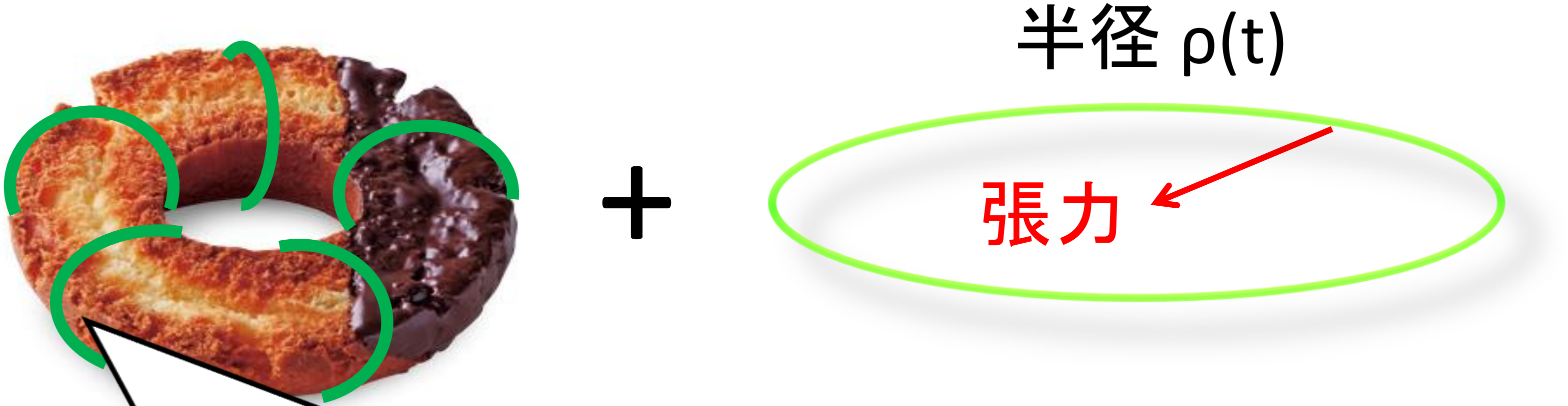
+



$$\ddot{\rho} = -\frac{2\omega^2 - 1}{\widetilde{\epsilon}^2}\rho$$

実際にω^2=1/2でループは静止する

例：4次元で見てループ

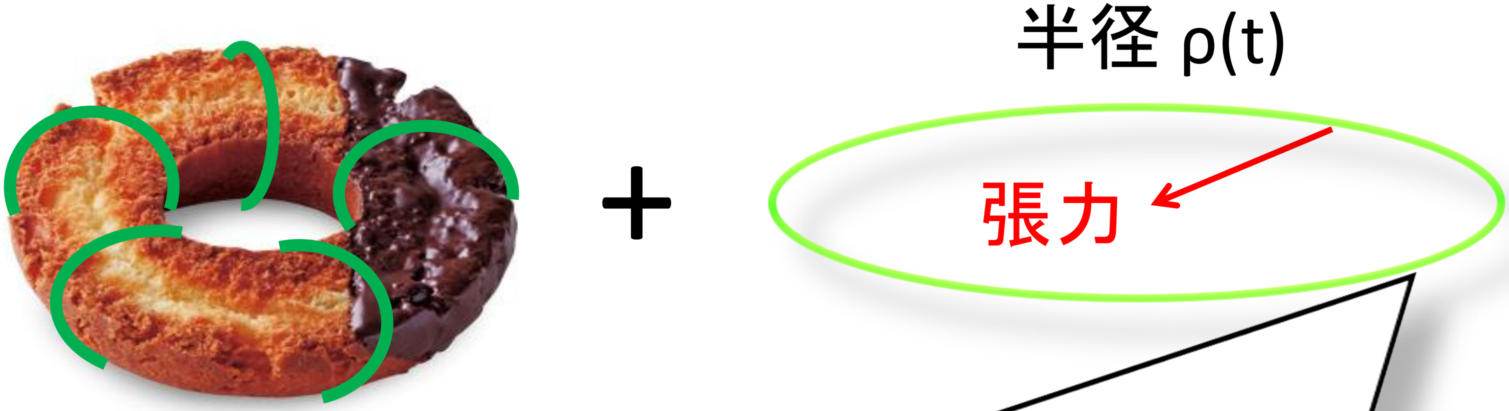


- 内部空間の解（σ=0~2πで周期的）

$$\phi = n_\theta \sigma + n_\theta \int^t \widetilde{\epsilon}^{-1}(t')dt'$$

n_θ: 余剰次元への巻きつき数

例：4次元で見てループ



- 4次元から見た実効的エネルギー密度

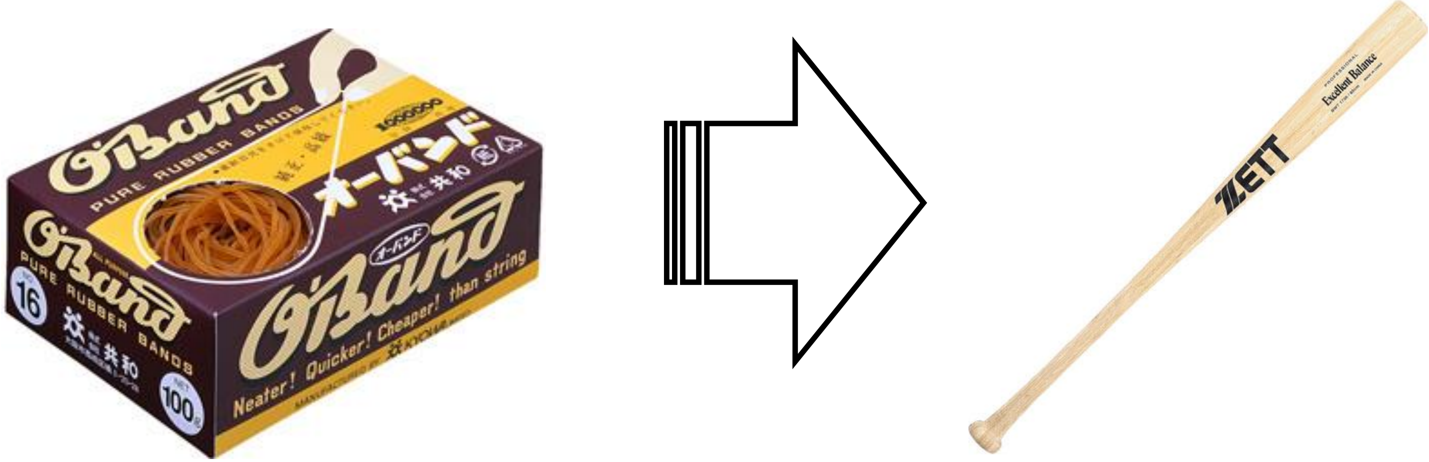
$$\widetilde{U}=\mathcal{T}\left[1+\left(\frac{Rn_\theta}{a\rho}\right)^2\right],\quad \widetilde{\Sigma}=\mathcal{T}\left[1+\left(\frac{Rn_\theta}{a\rho}\right)^2\right]^{-1},\quad \widetilde{T}=\mathcal{T}\left[1-\left(\frac{Rn_\theta}{a\rho}\right)^2\right]$$

n_θ: 余剰次元への巻きつき数

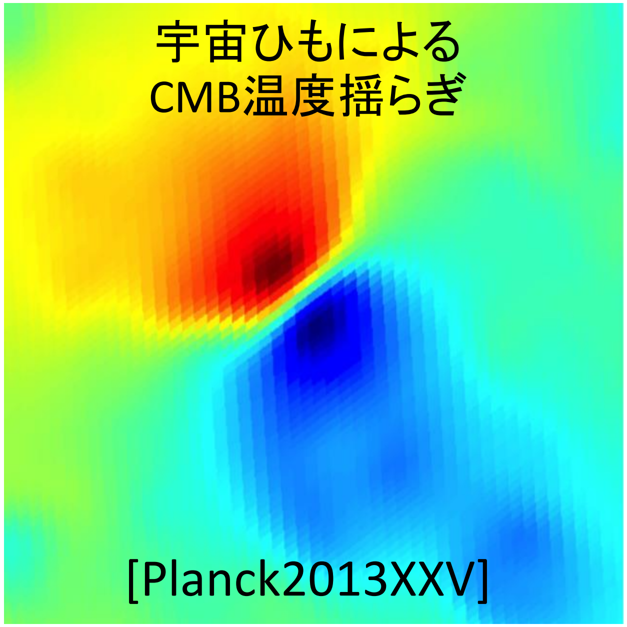
- 非対称項が出現
- 4次元ひも長さが内部空間ひも長さと一致したとき張力ゼロ
- Fixed trace type [Carter (1990)] に対応

まとめ

輪ゴムは棒にも
なれる~~のか？~~！



まとめ


宇宙ひもによる
CMB温度揺らぎ

[Planck2013XXV]

- ➢ 観測への示唆

✓ CMB　→　P=-ρを前提に議論

✓ 重力波　→　ループは張力によって収縮することを前提に議論

⇨ 棒（張力なし）である場合には
結果は全く変わる！