

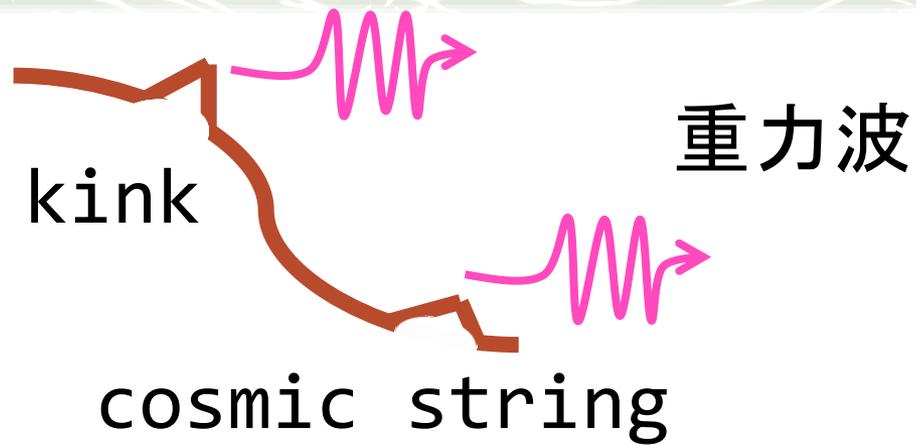
Gravitational wave background from string network with Y-junctions

名古屋大学 理学研究科

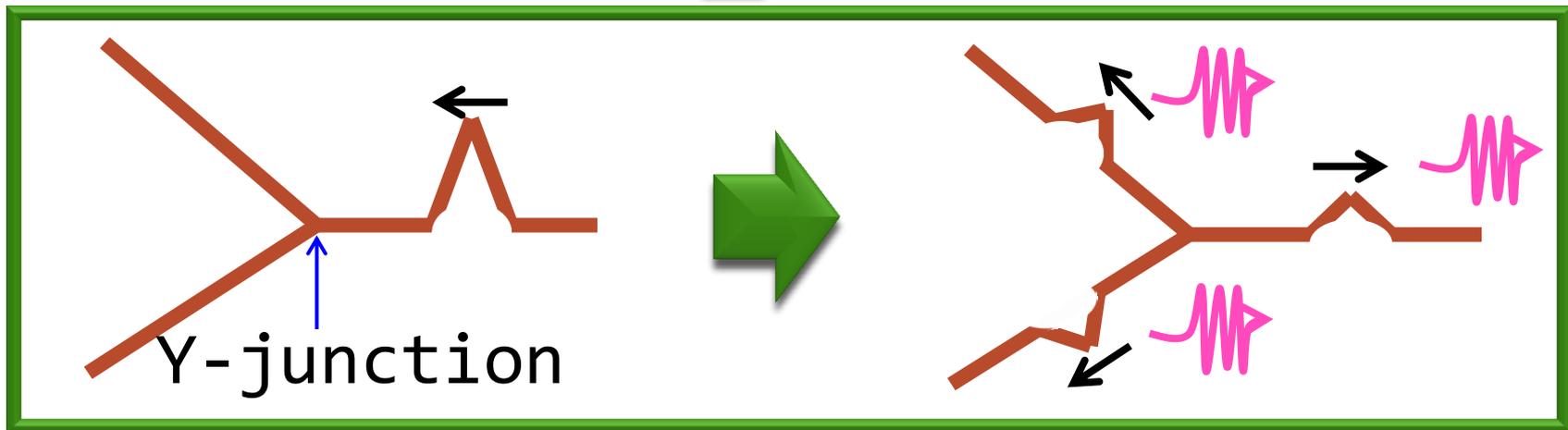
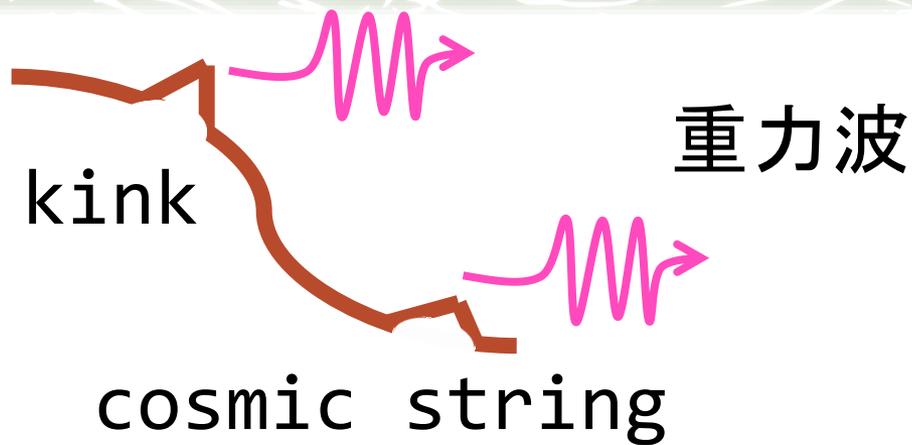
宇宙論研究室(C研) M1

松井由佳

今日のおはなし



今日のおはなし



目次

- Introduction
 - cosmic string, kink, 背景重力波
- Y-junction
 - Y-junctionとは？
 - kinkの分布の変化
 - 背景重力波の変化
- 考察
- まとめ
- Future work

目次

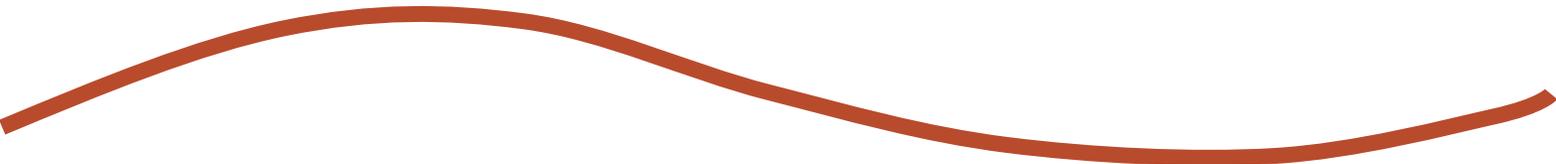
- Introduction
 - cosmic string, kink, 背景重力波
- Y-junction
 - Y-junctionとは？
 - kinkの分布の変化
 - 背景重力波の変化
- 考察
- まとめ
- Future work

Introduction(cosmic string)

Cosmic string

一次元の高エネルギー領域

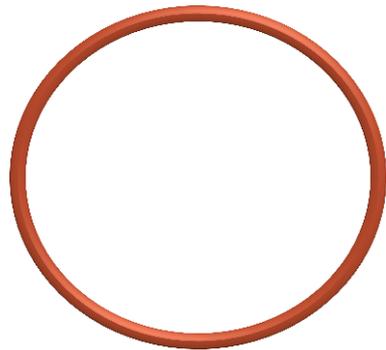
Introduction(cosmic string)



infinite string



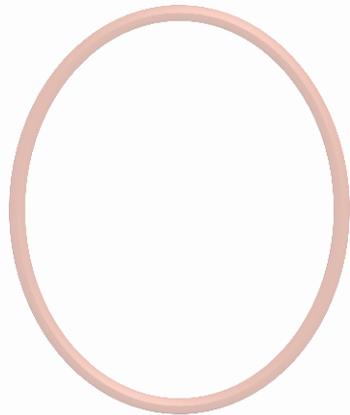
loop



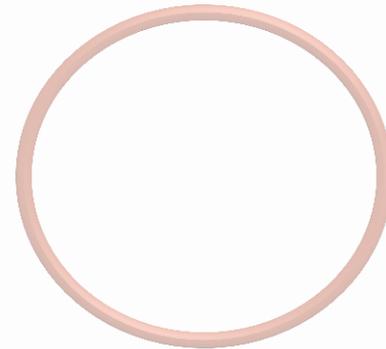
Introduction(cosmic string)



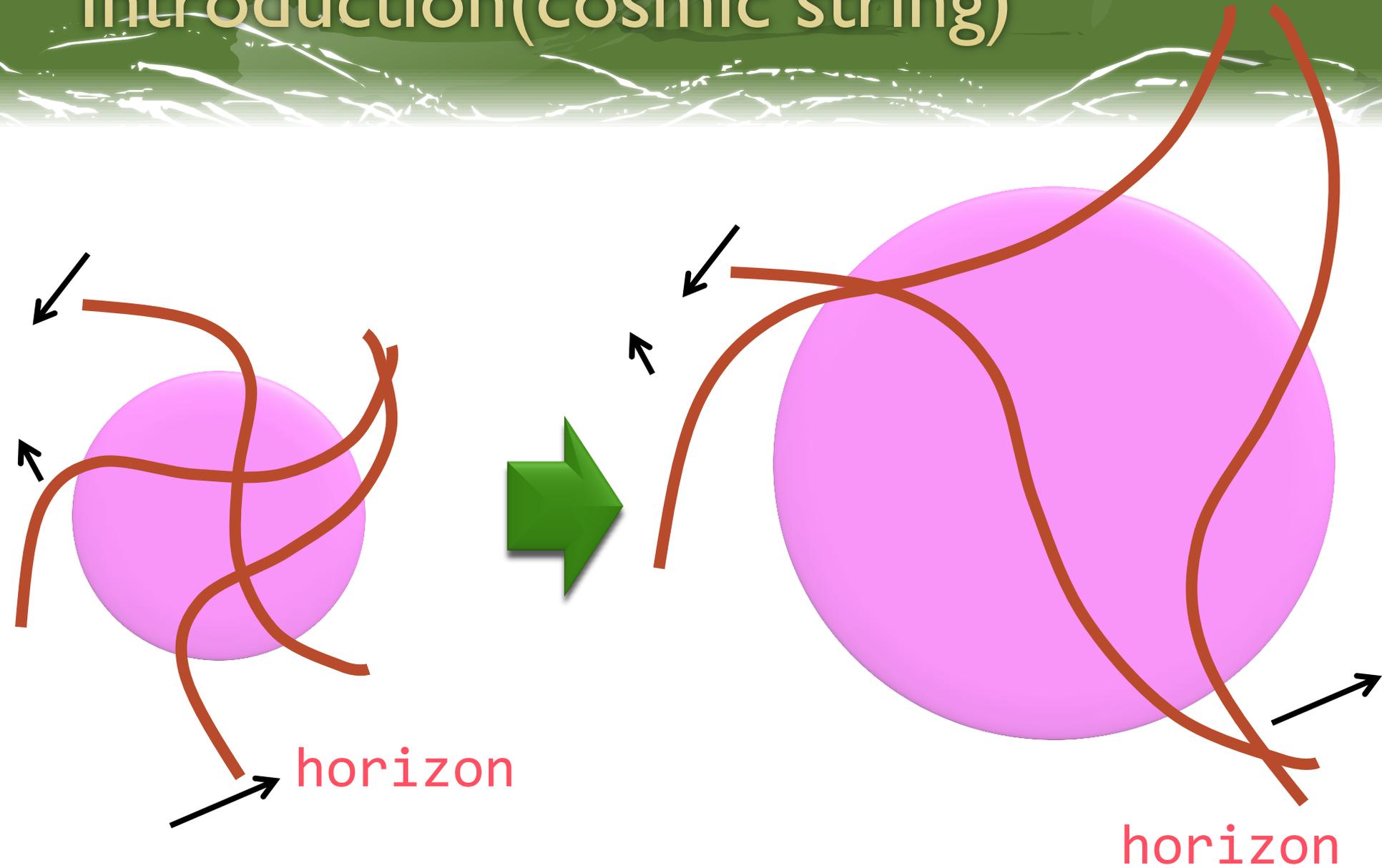
infinite string



loop



Introduction(cosmic string)

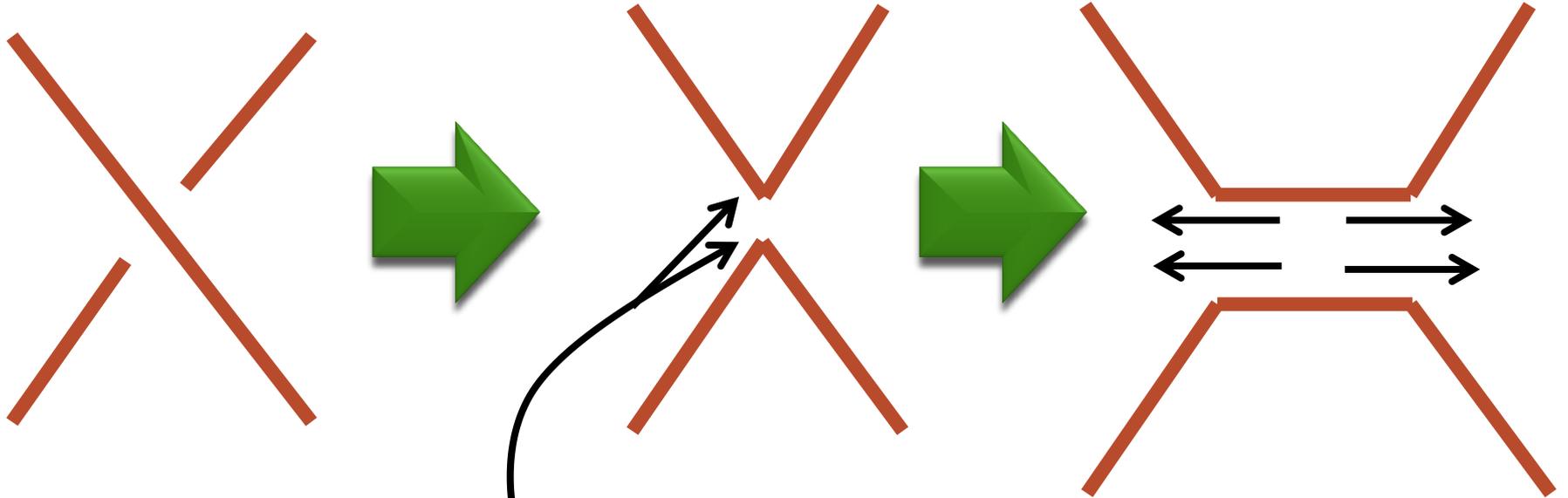


Introduction(kink)

衝突

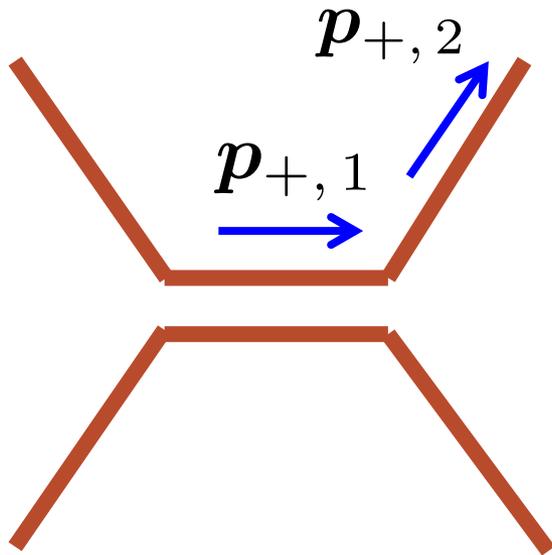
組み換わる!!

移動



kink

Introduction(kink)



kinkのsharpness

$$\psi \equiv \frac{1}{2}(1 - \mathbf{p}_{\pm,1} \cdot \mathbf{p}_{\pm,2})$$

$$0 \leq \psi \leq 1$$

kinkの時間発展

$$\psi \propto t^{-2\zeta}$$

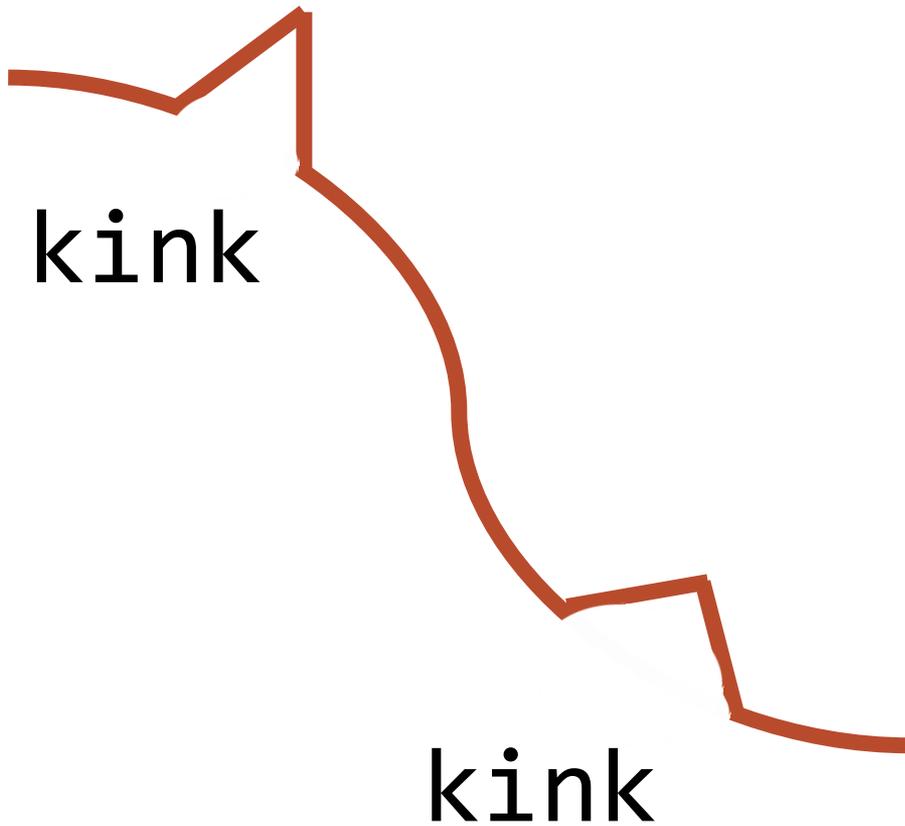
$$\text{MD} : \zeta = 0.2$$

$$\text{RD} : \zeta = 0.09$$

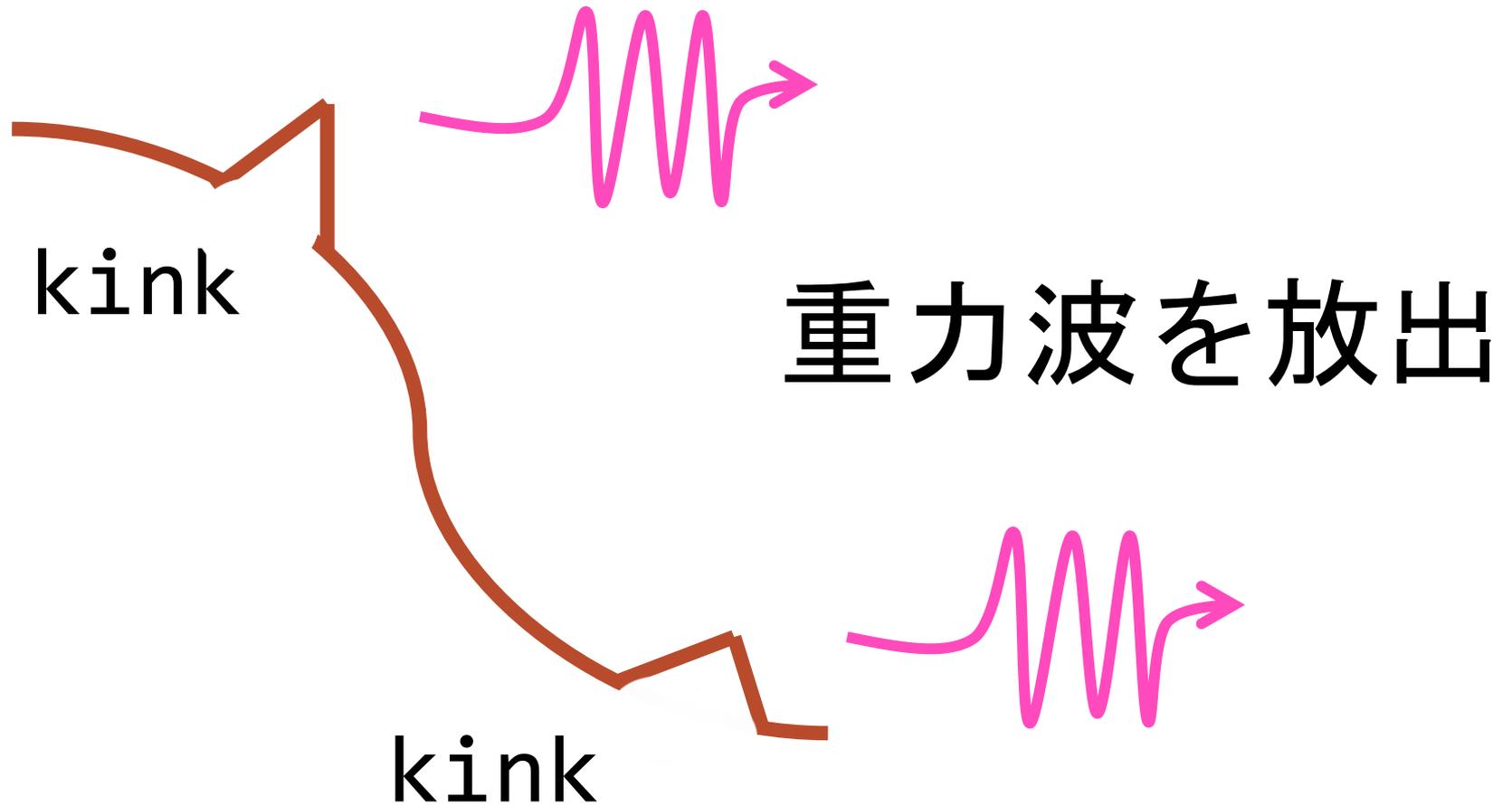
宇宙膨張で鈍る

Kawasaki et al. (2010)

Introduction(kinkからの背景重力波)



Introduction(kinkからの背景重力波)

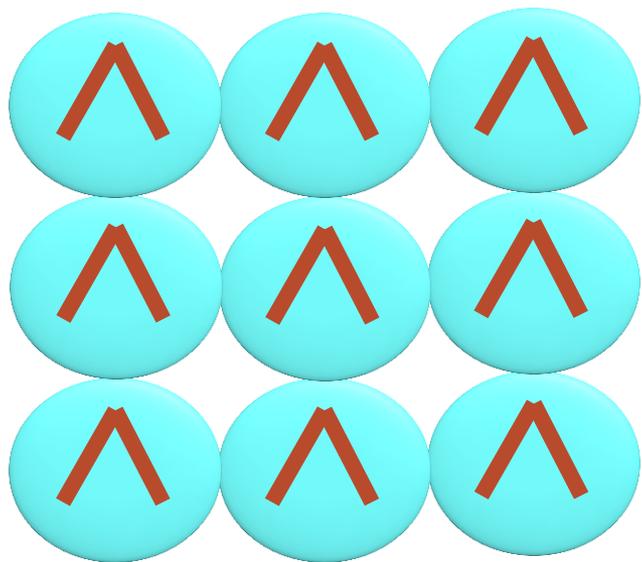


Introduction(kinkからの背景重力波)



Introduction(kinkからの背景重力波)

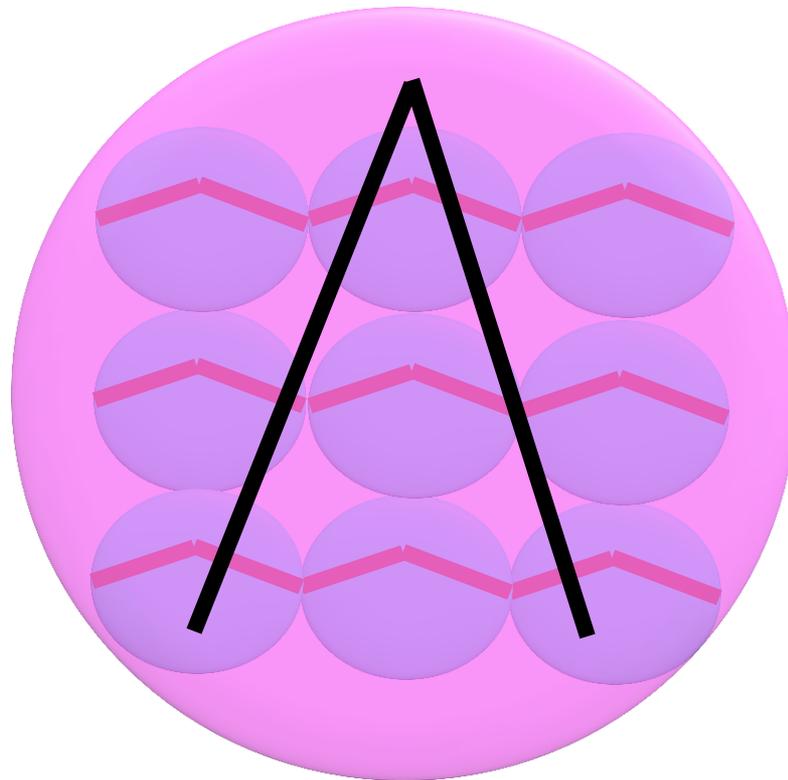
昔



horizon



今

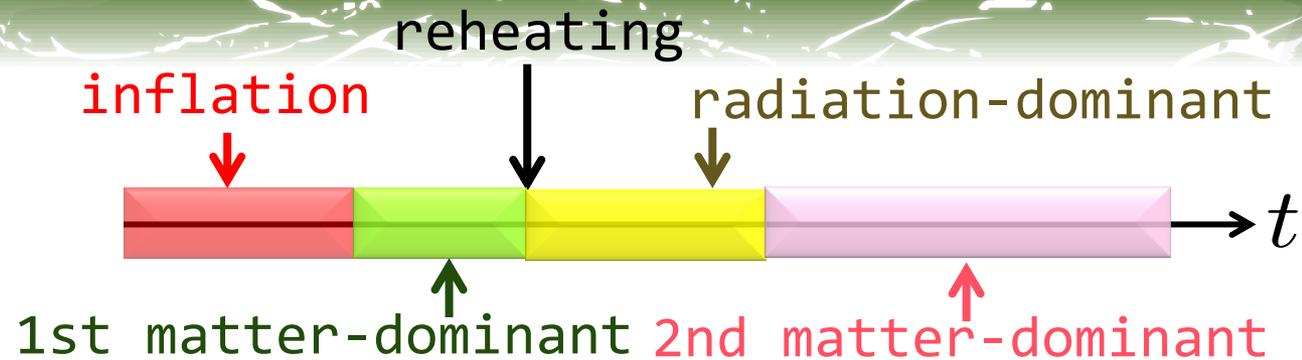
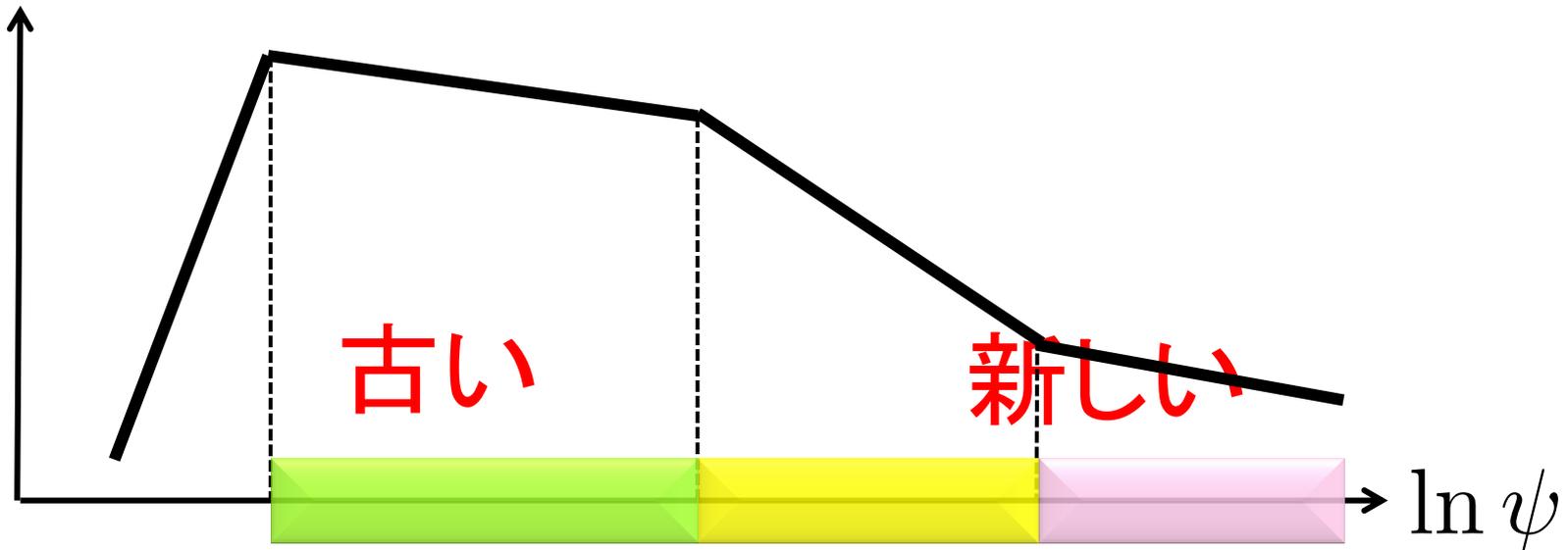


horizon

Introduction(kinkからの背景重力波)

kinkの分布

$\ln(\text{kinkの数})$



1st MD era

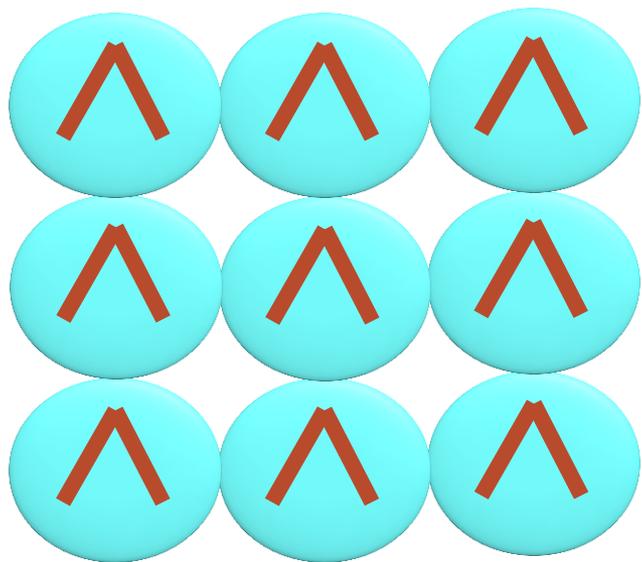
RD era

2nd MD era

Kawasaki et al. (2010)

Introduction(kinkからの背景重力波)

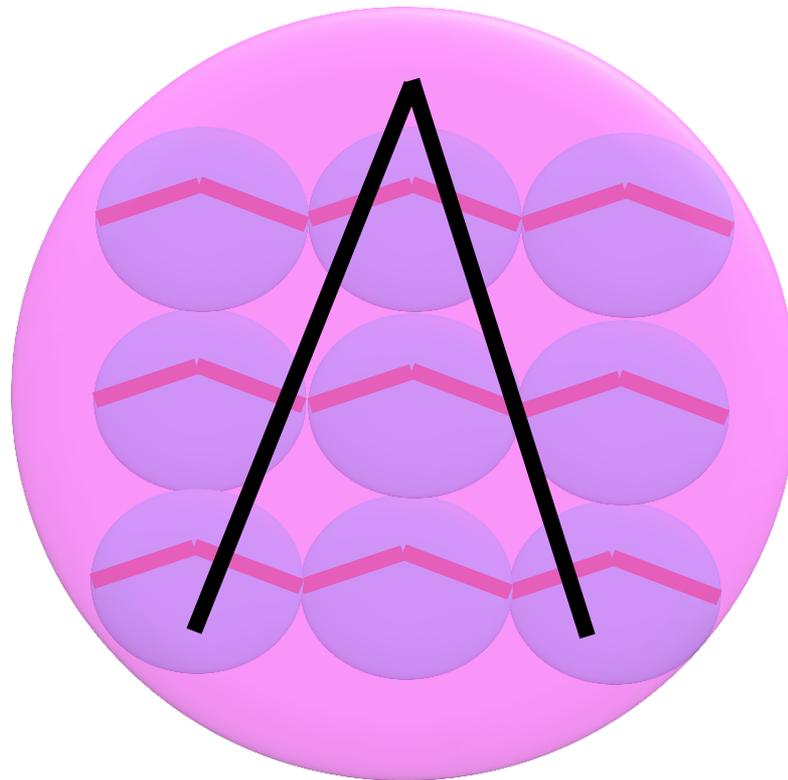
昔



horizon



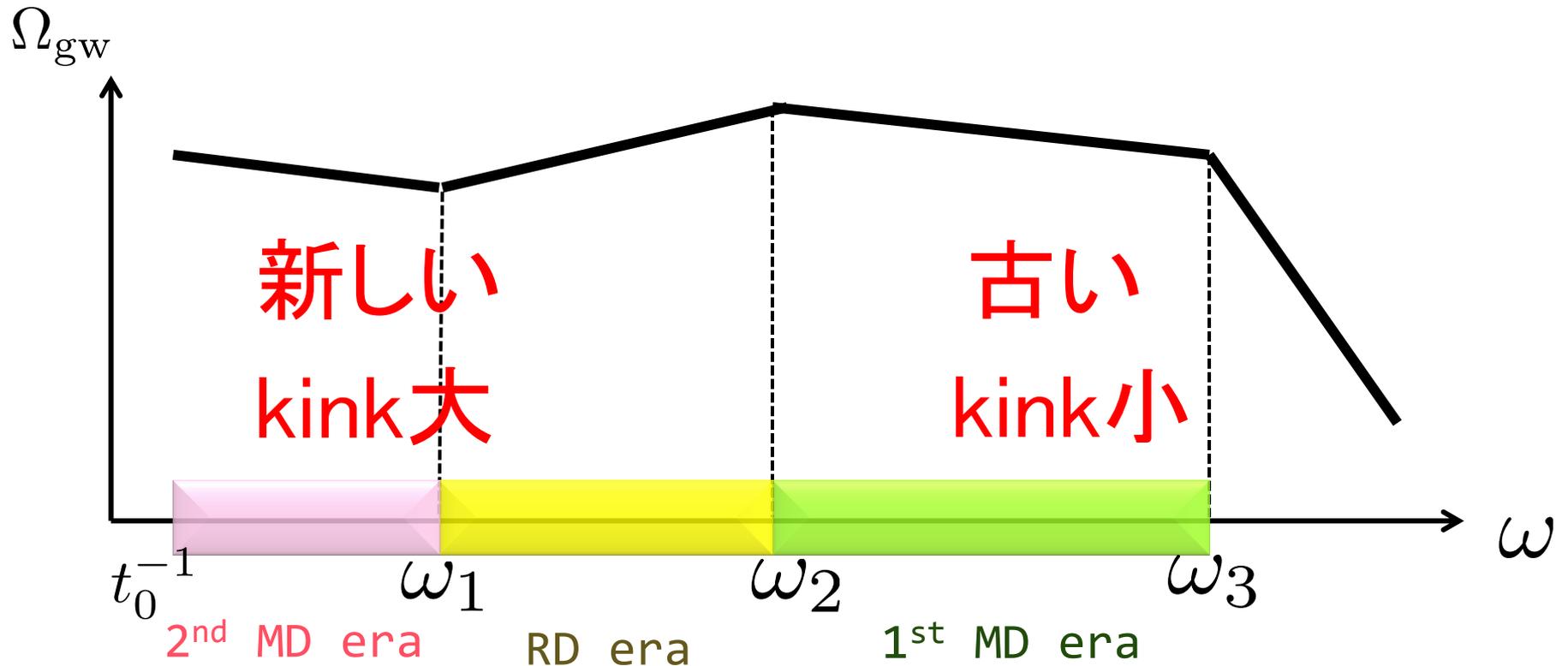
今



horizon

Introduction(kinkからの背景重力波)

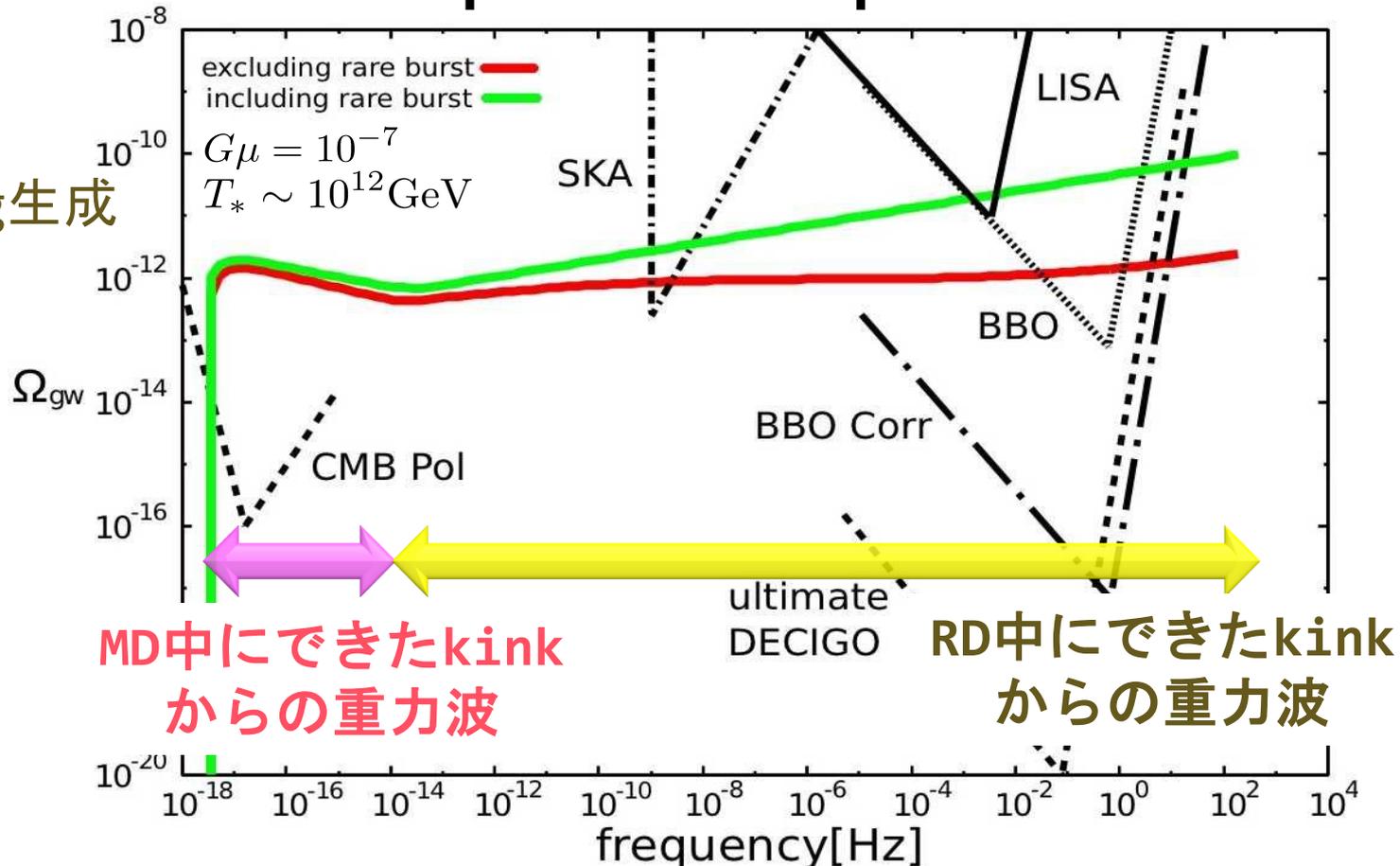
背景重力波のpower spectrum



Introduction(kinkからの背景重力波)

背景重力波のpower spectrum

RDに
string生成



Introduction(kinkからの背景重力波)

背景重力波のpower



Introduction(kinkからの背景重力波)

背景重力波で考慮すべきこと

先行研究では
相転移由来のcosmic stringを考えていた



superstring由来のcosmic stringも考えられる

- stringの組み換え確率
- superstring由来のcosmic stringが持つ Y-junctionによるkinkの分布の変化

Introduction(kinkからの背景重力波)

背景重力波で考慮すべきこと

先行研究では
相転移由来のcosmic stringを考えていた



superstring由来のcosmic stringも考えられる

- stringの組み換え確率
- superstring由来のcosmic stringが持つ Y-junctionによるkinkの分布の変化

目次

□ Introduction

- cosmic string, kink, 背景重力波

□ Y-junction

- Y-junctionとは？
- kinkの分布の変化
- 背景重力波の変化

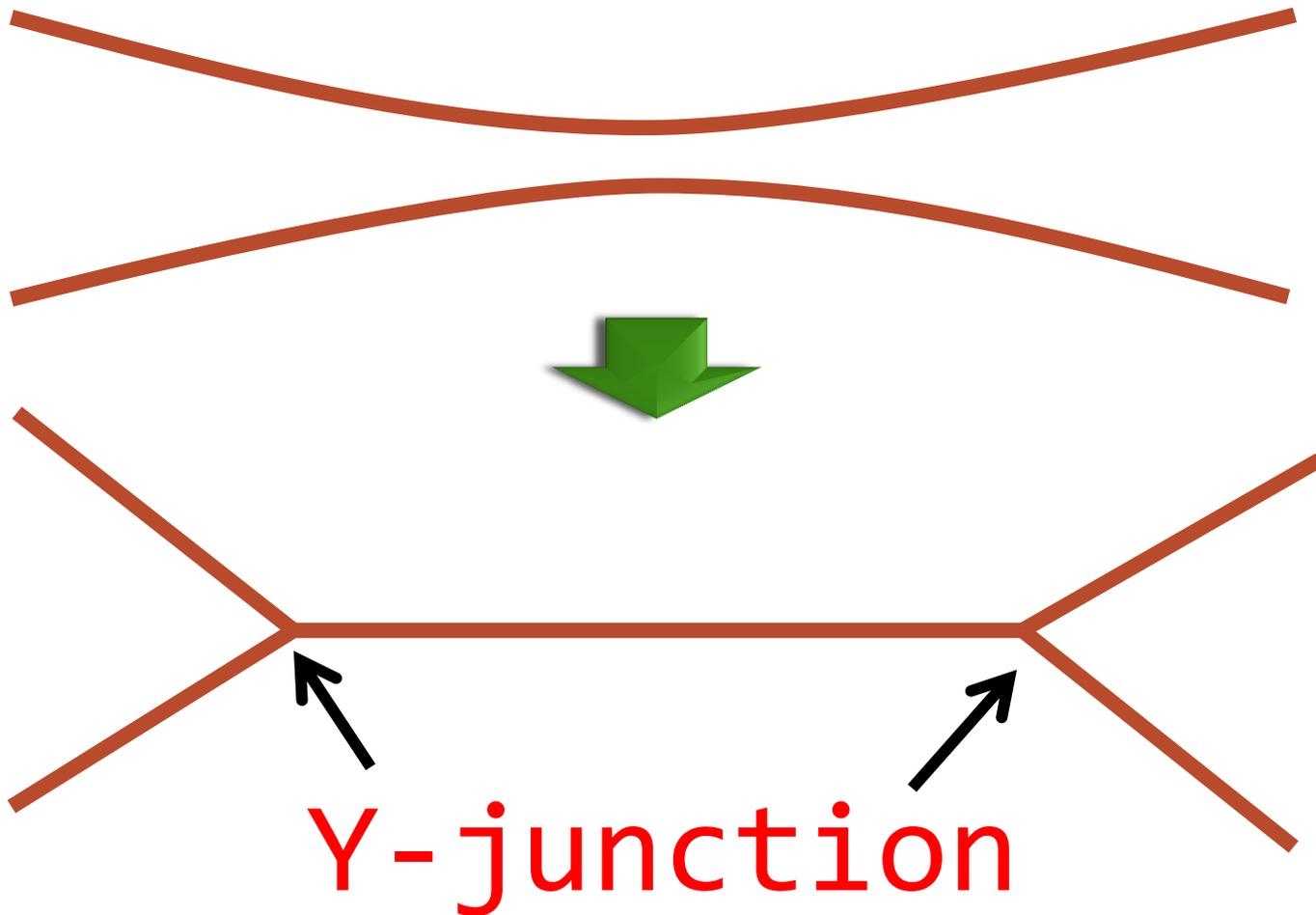
□ 考察

□ まとめ

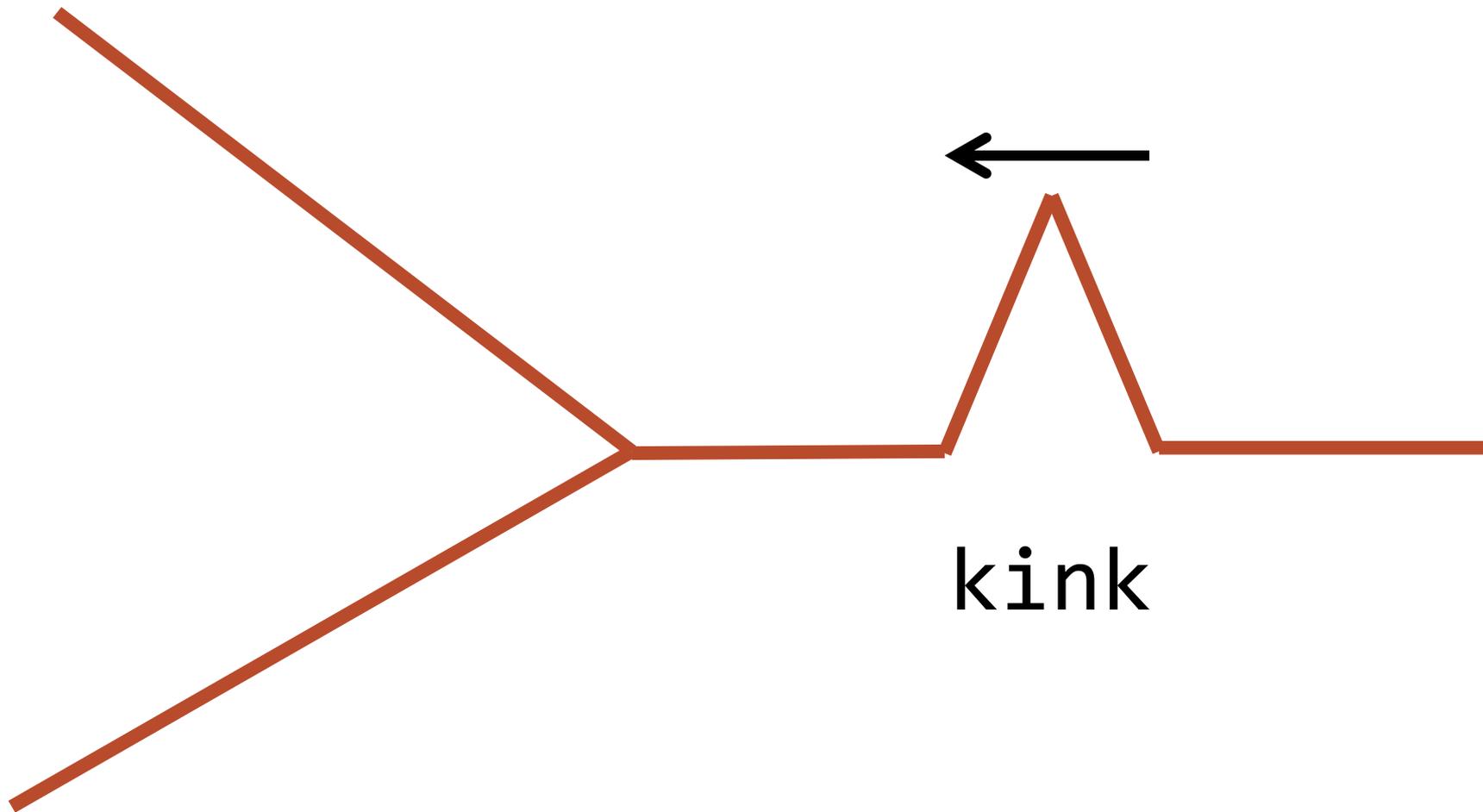
□ Future work

Y-junction

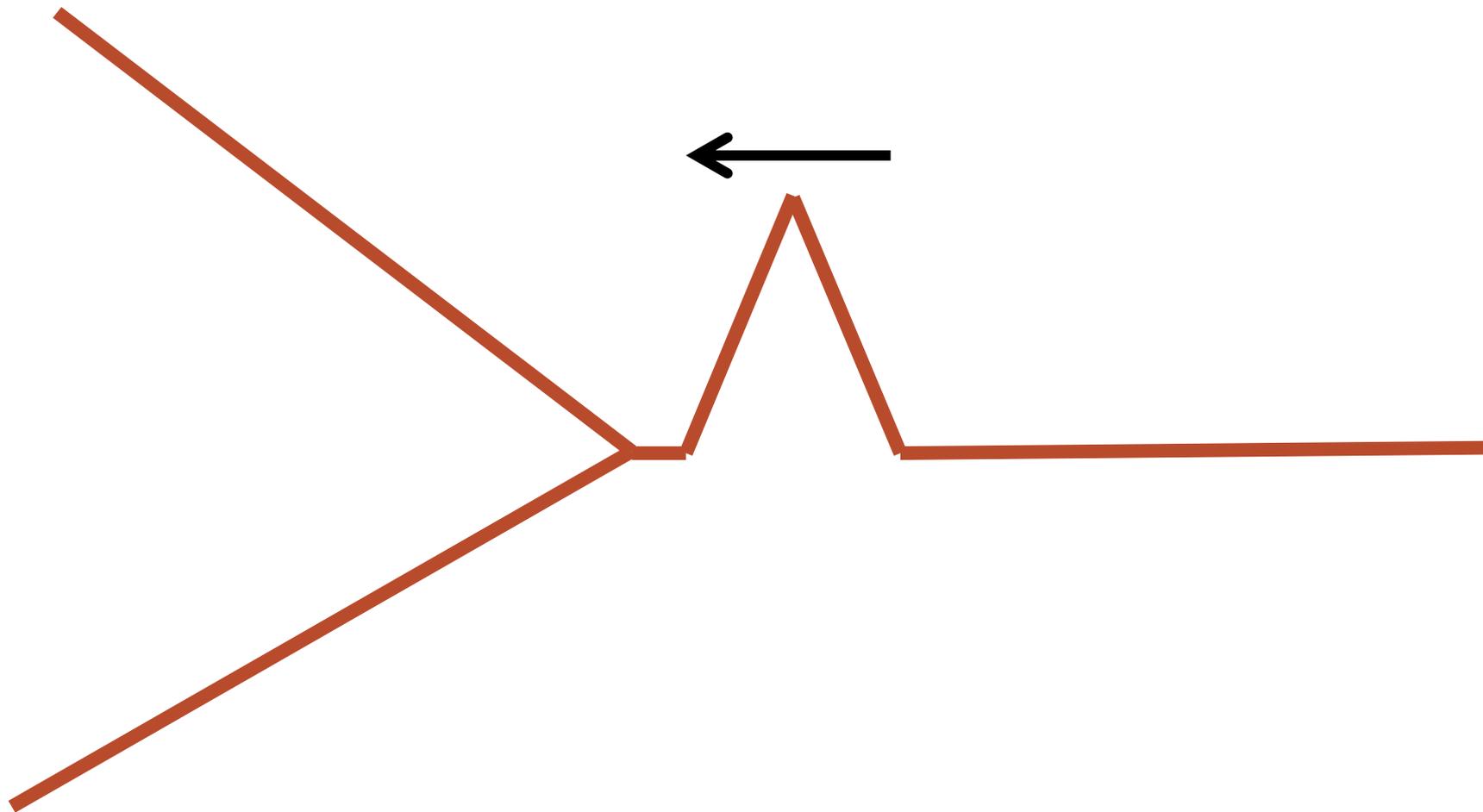
superstring由来のcosmic string



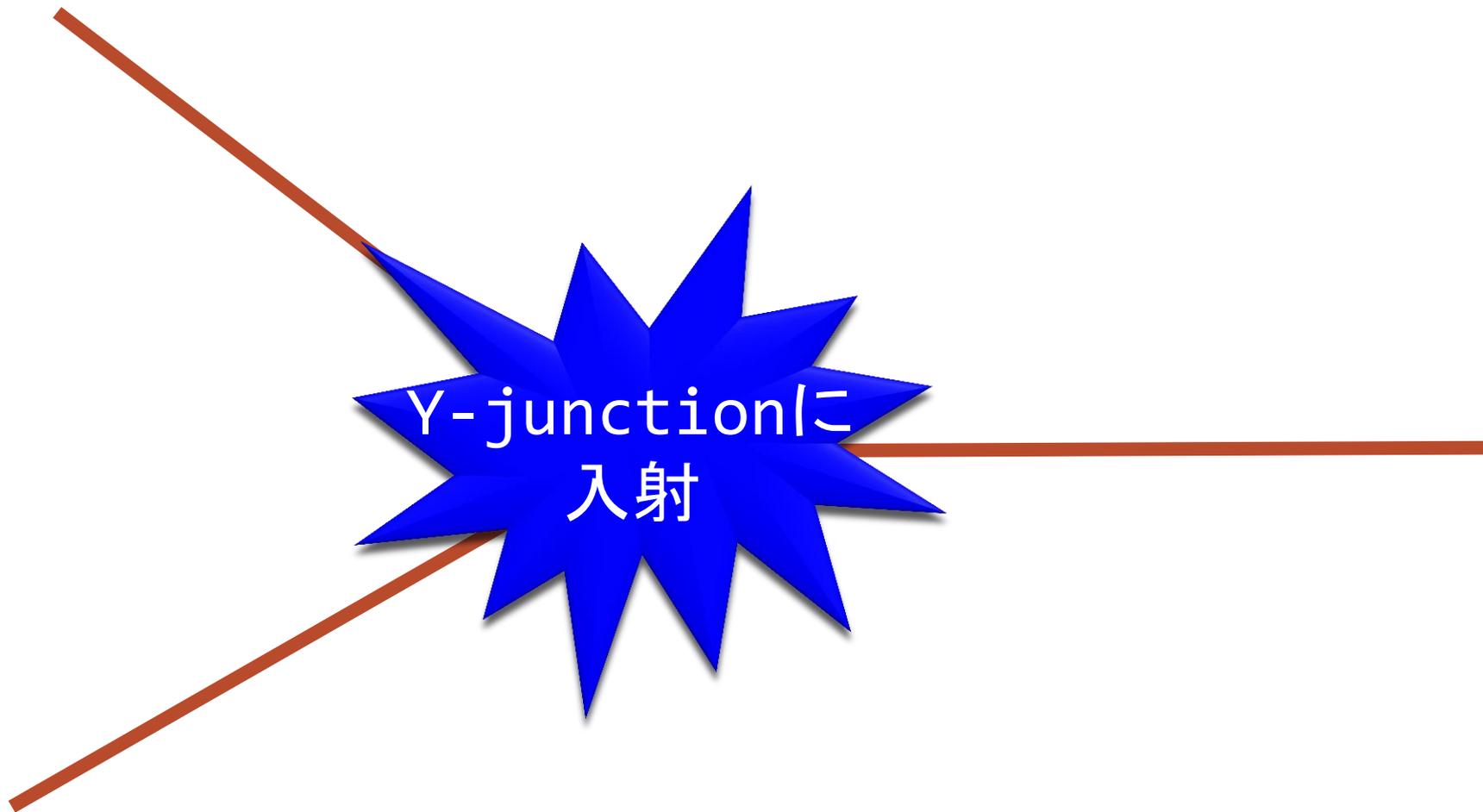
Y-junctionは何をする？



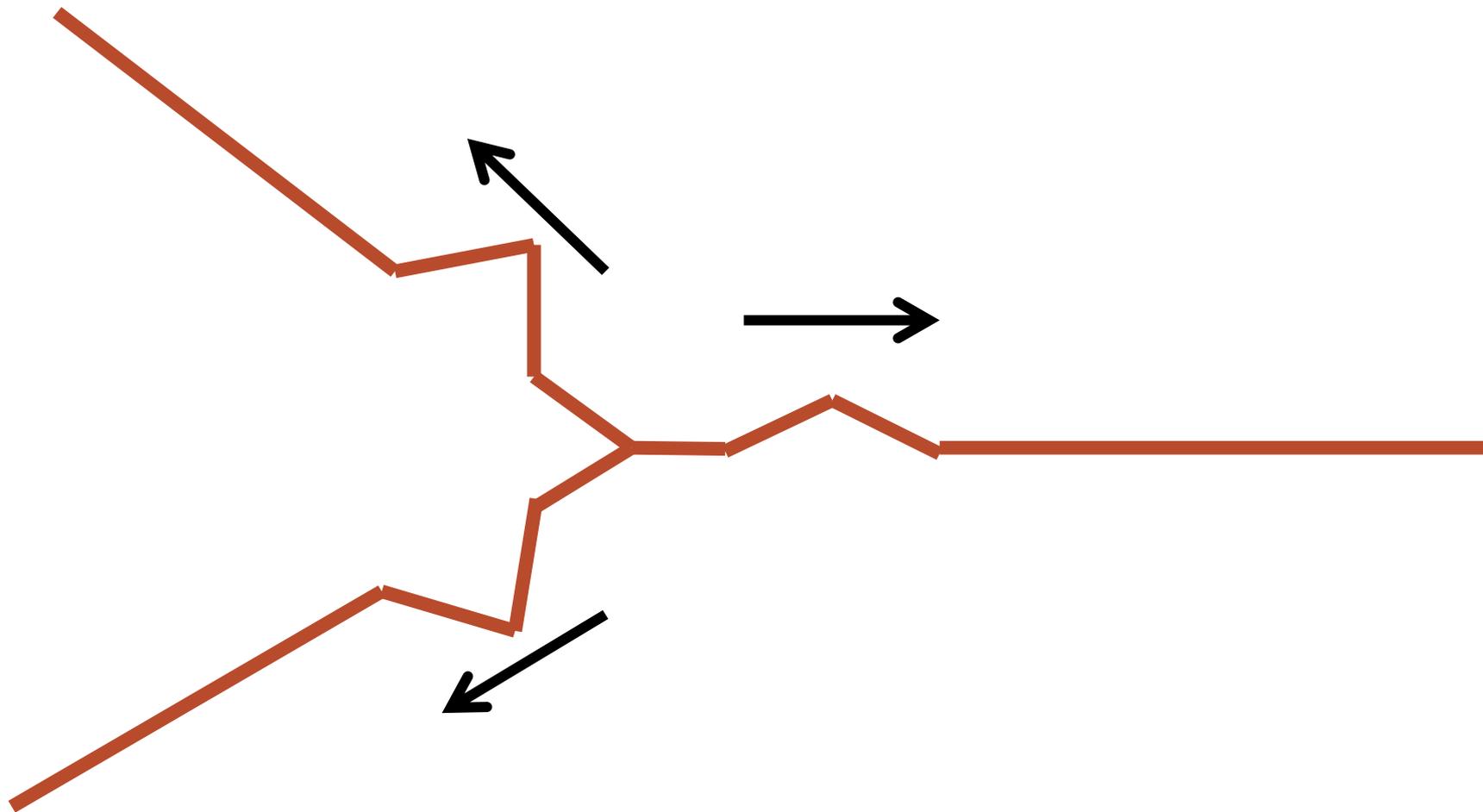
Y-junctionは何をする？



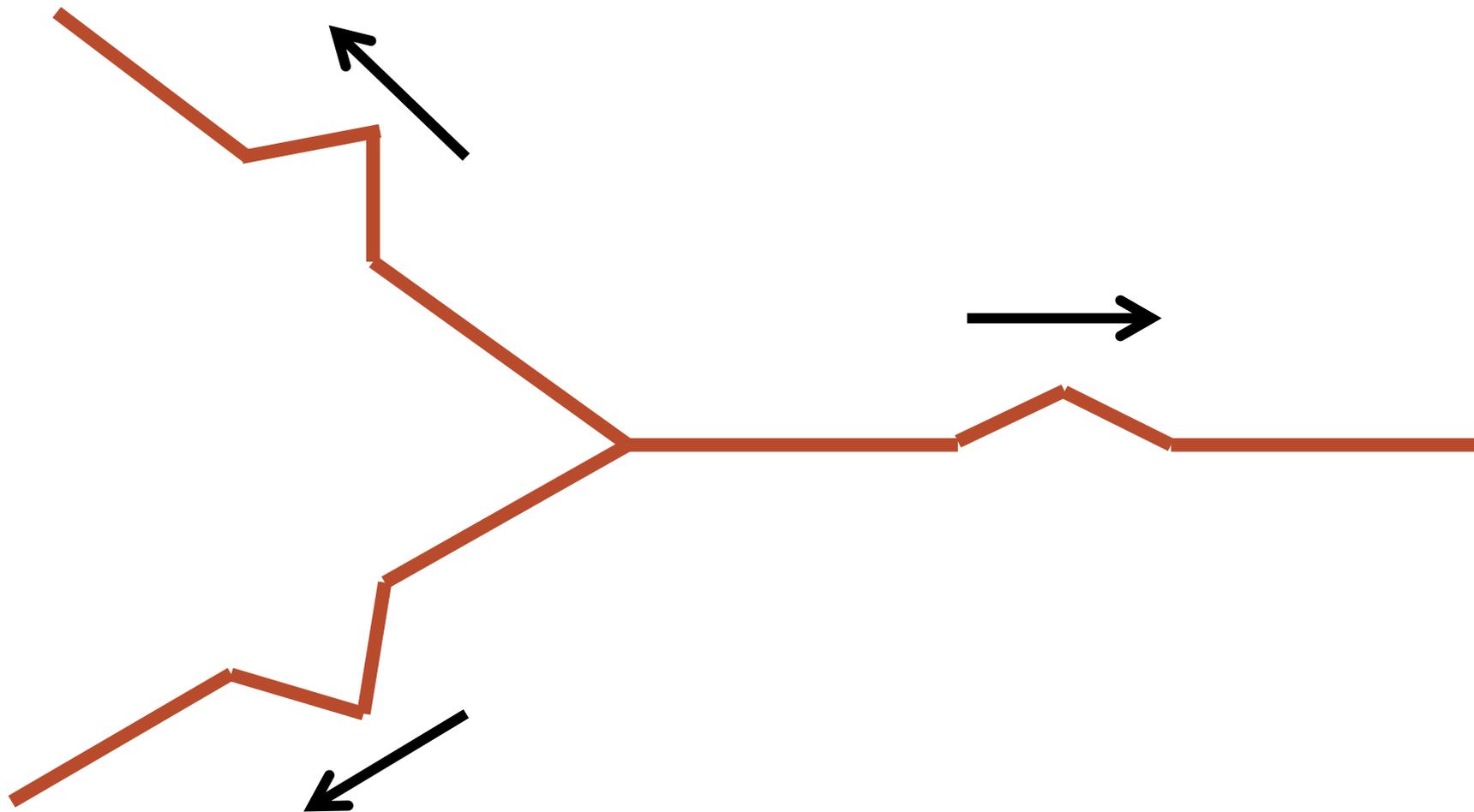
Y-junctionは何をする？



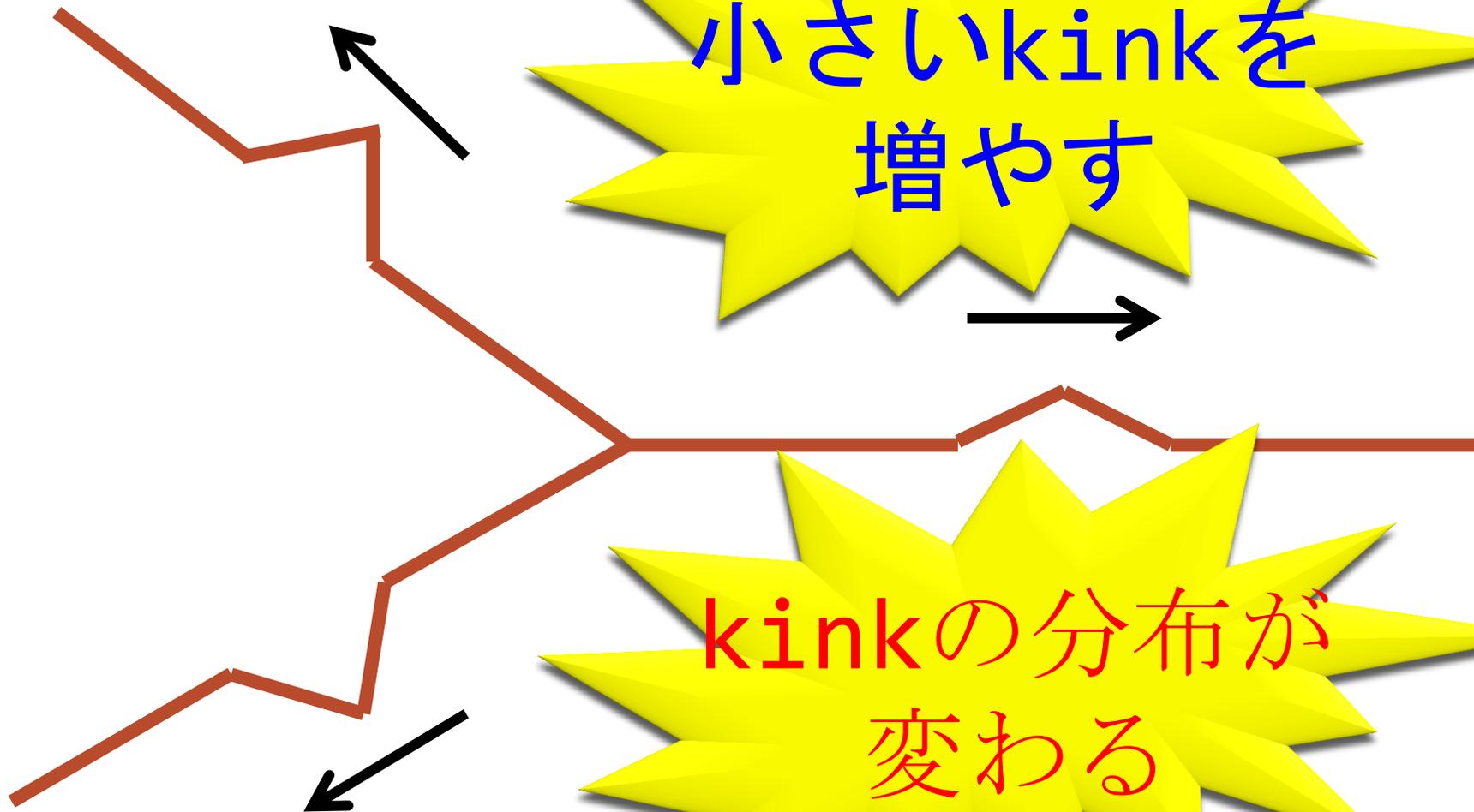
Y-junctionは何をする？



Y-junctionは何をする？



Y-junctionは何をする？



小さいkinkを増やす

kinkの分布が変わる

Y-junctionなしのkinkの分布

体積 V 中のkinkの数の時間発展

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t)$$

$$N(\psi, t)$$

時刻 t でsharpness ψ
の尖りを持つkinkの数

Y-junctionなしのkinkの分布

体積V中のkinkの数の時間発展

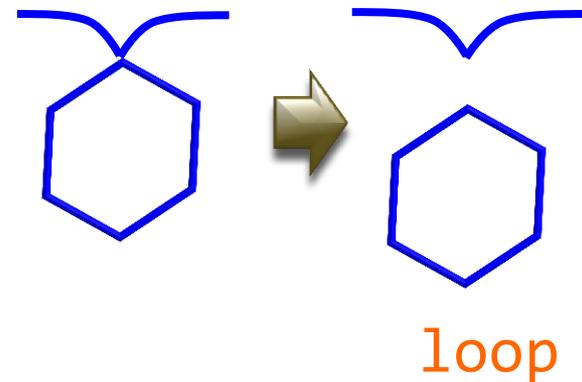
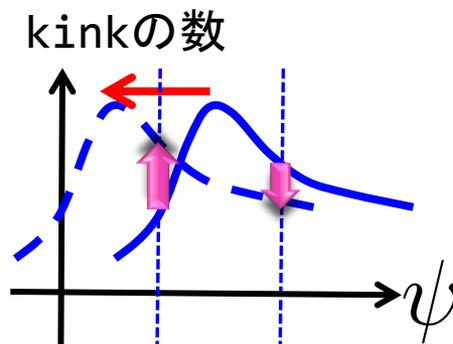
$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \boxed{\frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi)} + \boxed{\frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t))} - \boxed{\frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)}$$

string同士の衝突により
ψという尖りを持つ
kinkができる数

宇宙膨張による
kinkが鈍る効果

loopに奪われた
kinkの数

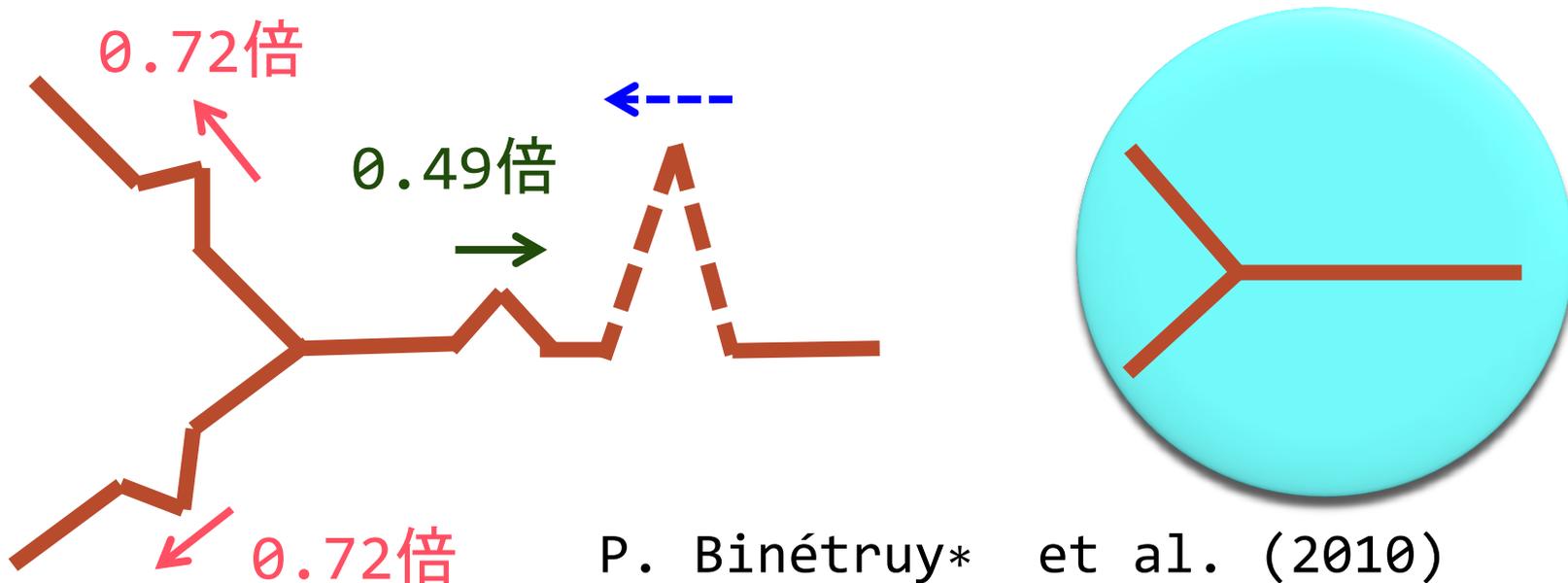
$\bar{\Delta}, \gamma, \zeta, \eta : \text{Const.}$



Y-junctionありのkinkの分布

体積V中のkinkの数の時間発展

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta V}}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

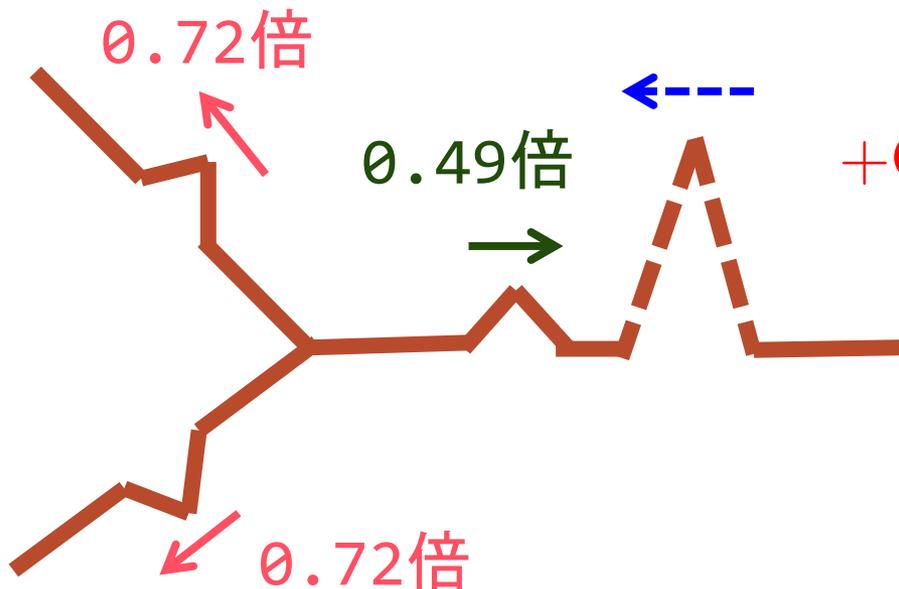


Y-junctionありのkinkの分布

体積V中のkinkの数の時間発展

$\alpha = \text{Const.}$

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t) + \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$



$$+ \Theta(0.49 - \psi) \frac{\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.49}, t\right)$$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

Y-junctionありのkinkの分布

体積V中のkinkの数の時間発展

$\alpha = \text{Const.}$

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t) + \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

0.72倍

透過したkink

ψ が0.72以下で影響が強くなる

透過して(0.72倍して)
 ψ になるkinkの数

Hubble timeに約 $\alpha(<1)$ 回
kinkがY-junctionに侵入

$$-\frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

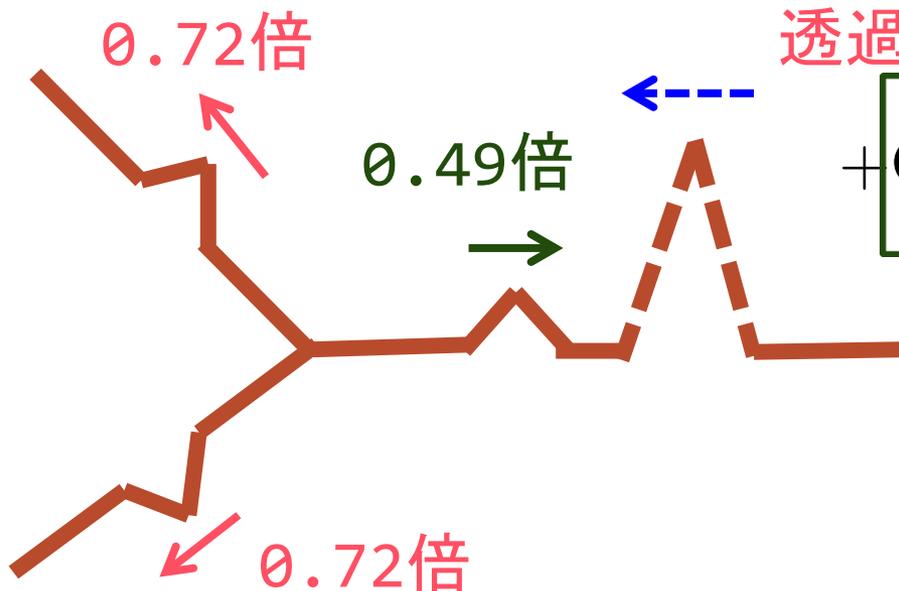
θ

Y-junctionありのkinkの分布

体積V中のkinkの数の時間発展

$\alpha = \text{Const.}$

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t) + \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$



$$+ \Theta(0.49 - \psi) \frac{\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.49}, t\right)$$

反射したkink

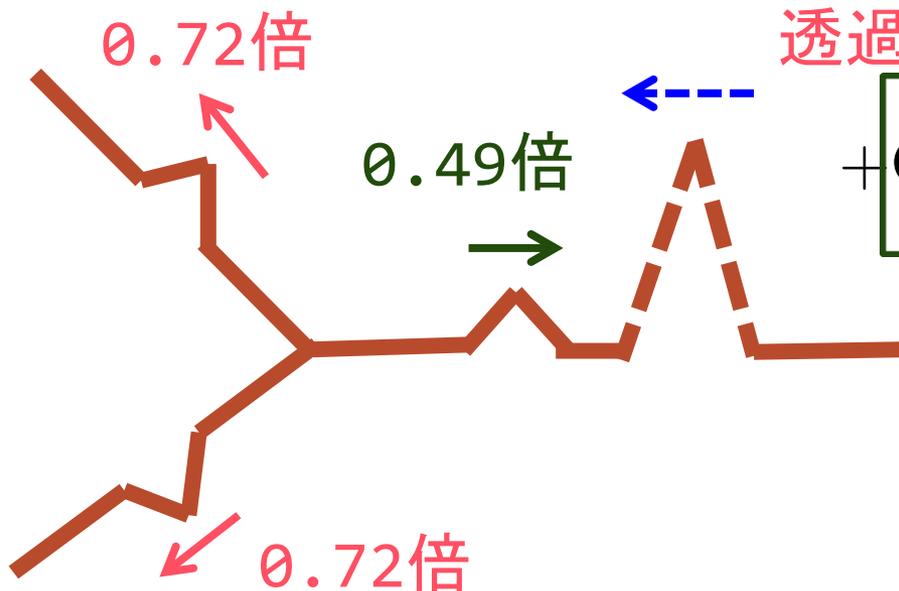
$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

Y-junctionありのkinkの分布

体積V中のkinkの数の時間発展

$\alpha = \text{Const.}$

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t) + \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$



$$+ \Theta(0.49 - \psi) \frac{\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.49}, t\right)$$

反射したkink

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

入射して消えたkink

Y-junction ありの kink の分布

体積 V 中の kink の数の時間発展

$\alpha = \text{Const.}$

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

$$+ \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

$\ln(\text{kink の数})$

透過した kink

$$+ \Theta(0.49 - \psi) \frac{\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.49}, t\right)$$

反射した kink

数が多い!!

$\ln \psi$

$\frac{\psi}{0.72}$ $\frac{\psi}{0.49}$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

入射して消えた kink

Y-junctionありのkinkの分布

簡単のためRDの時のみ考える

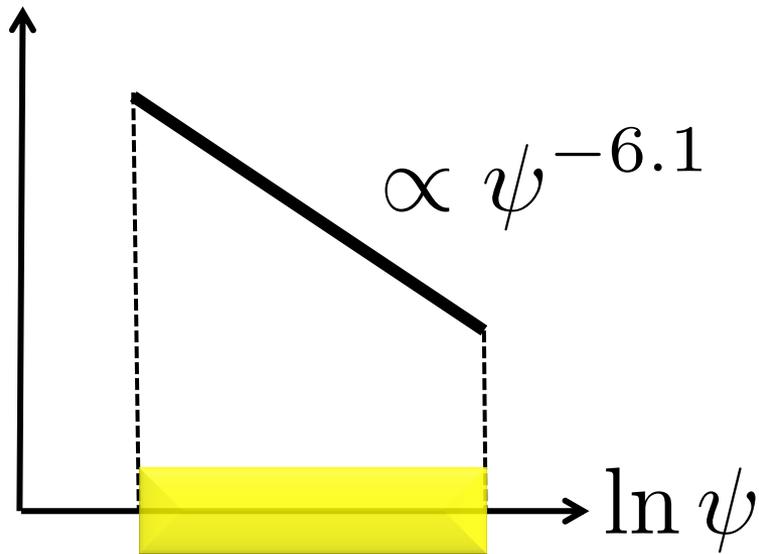
$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t)$$

$$= \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

$$+ \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

ln (kinkの数)



RD era

Kawasaki et al. (2010)

Y-junctionありのkinkの分布

簡単のためRDの時のみ考える

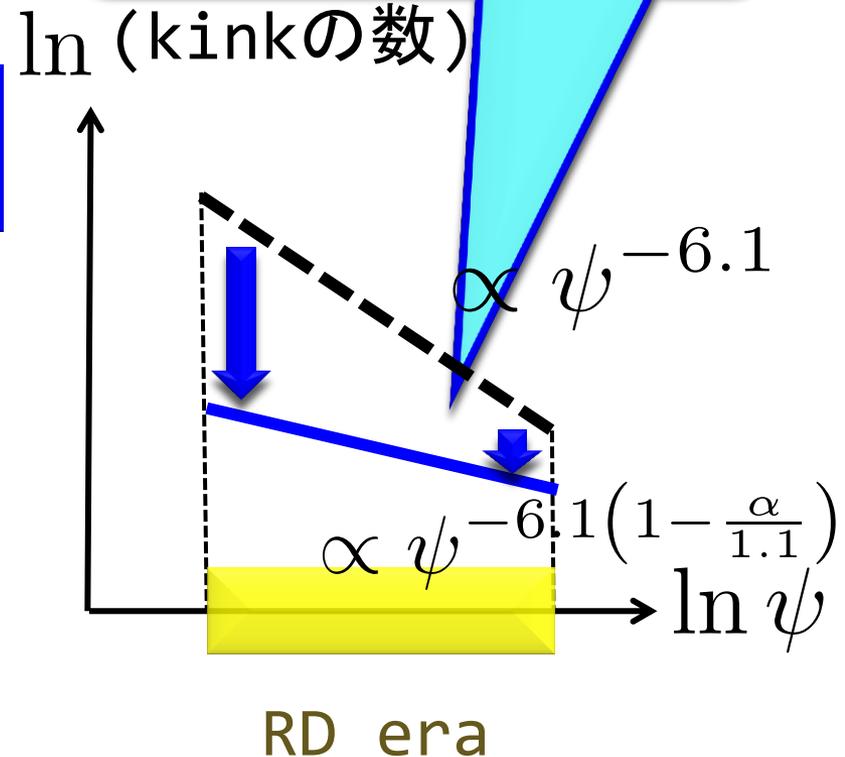
入射したkinkが消える
 →振幅:減
 →ベキ:変化

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t)$$

$$= \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

$$+ \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$



Y-junctionありのkinkの分布

簡単のためRDの時のみ考える

透過kinkで数が増える
 →振幅:増
 →ベキ:急

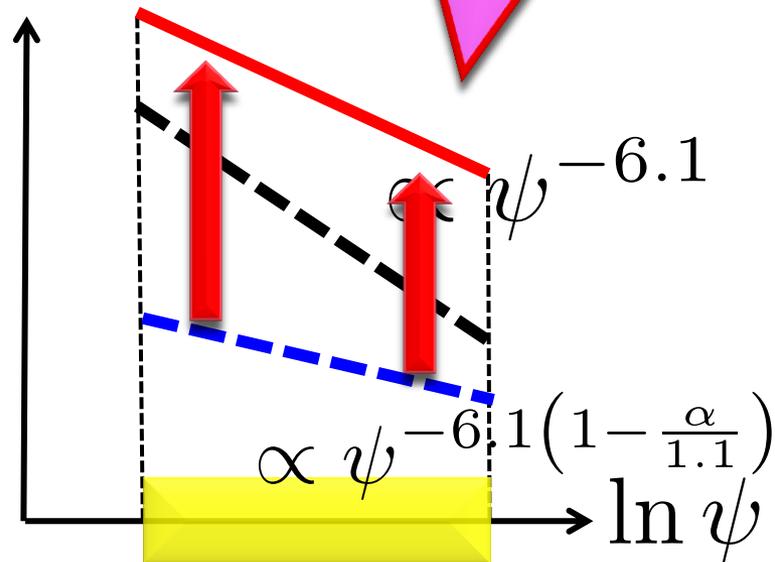
$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t)$$

$$= \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

$$+ \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

ln (kinkの数)



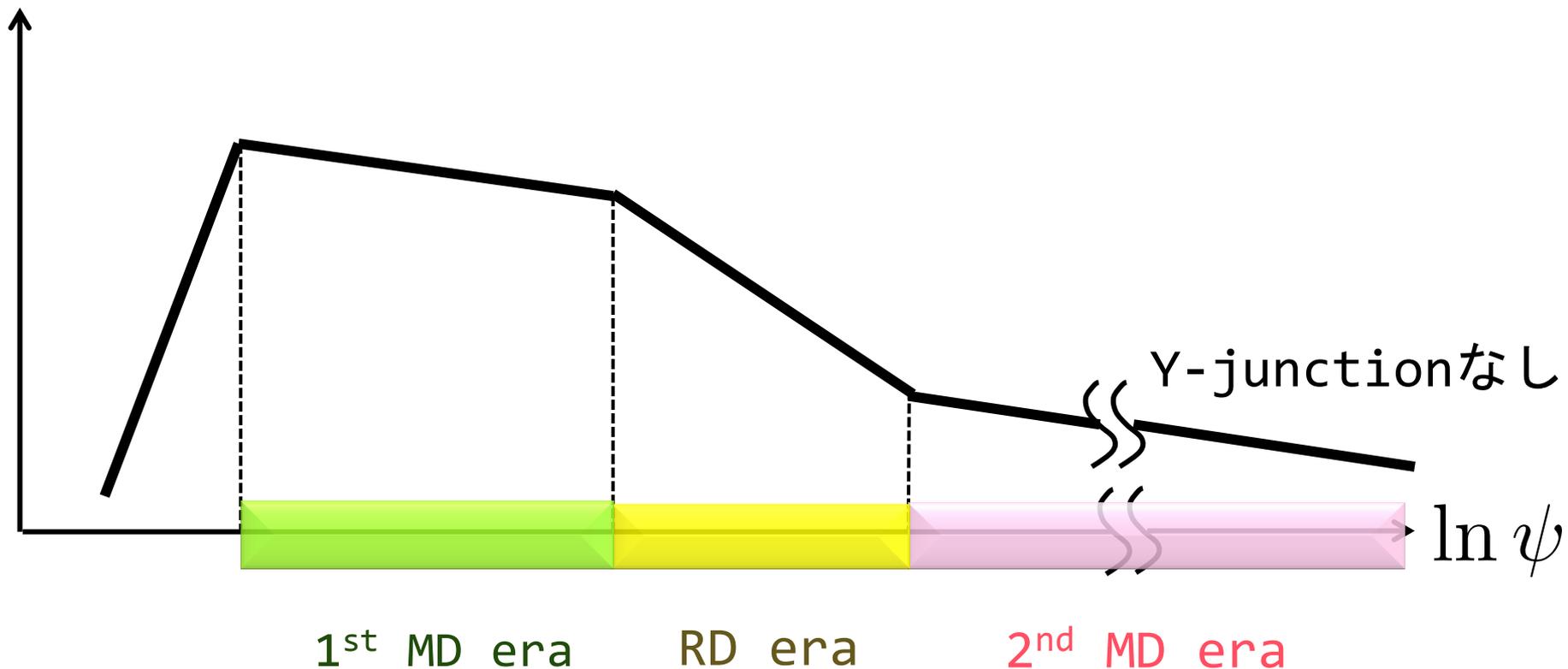
RD era

目次

- Introduction
 - cosmic string, kink, 背景重力波
- Y-junction
 - Y-junctionとは？
 - kinkの分布の変化
 - 背景重力波の変化
- 考察
- まとめ
- Future work

考察: Y-junctionありのkinkの分布

$\ln(\text{kinkの数})$



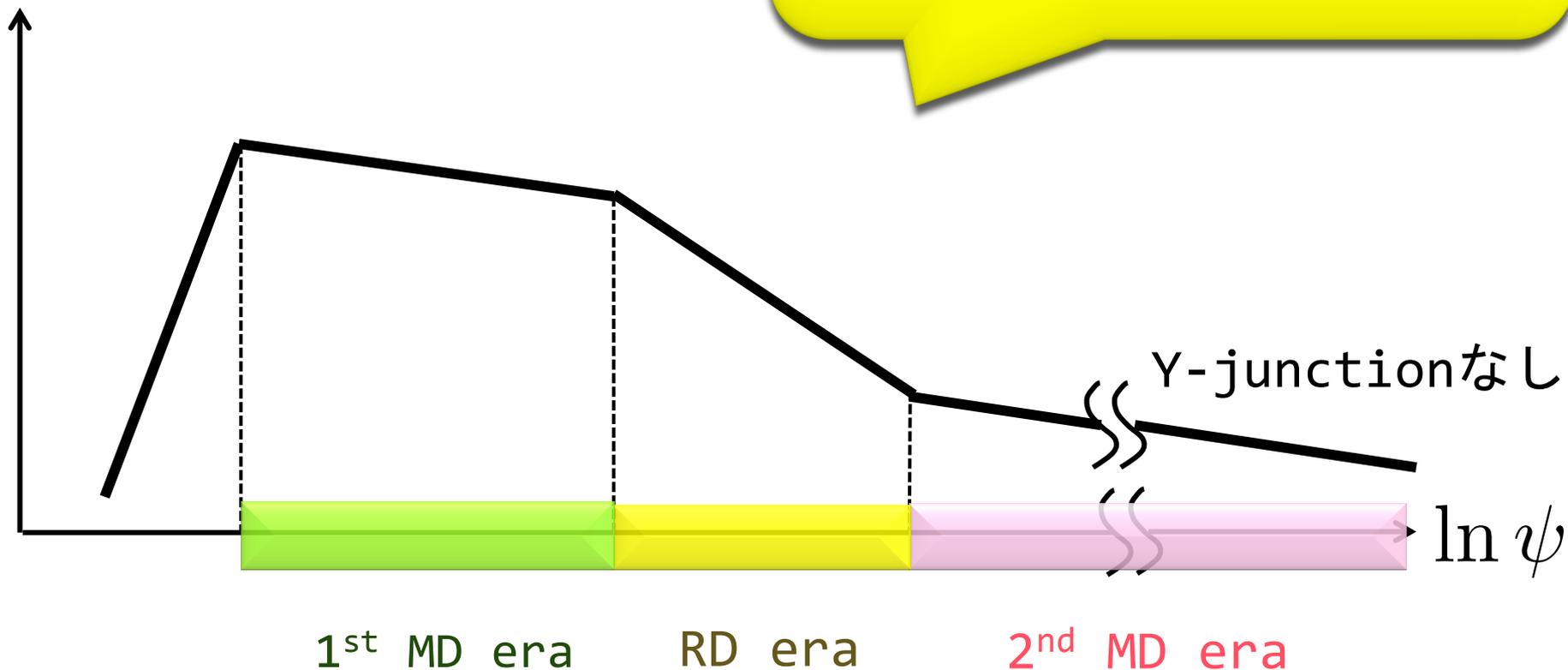
考察: Y-junctionありのkinkの分布

Y-junction



小さいkinkを増やす

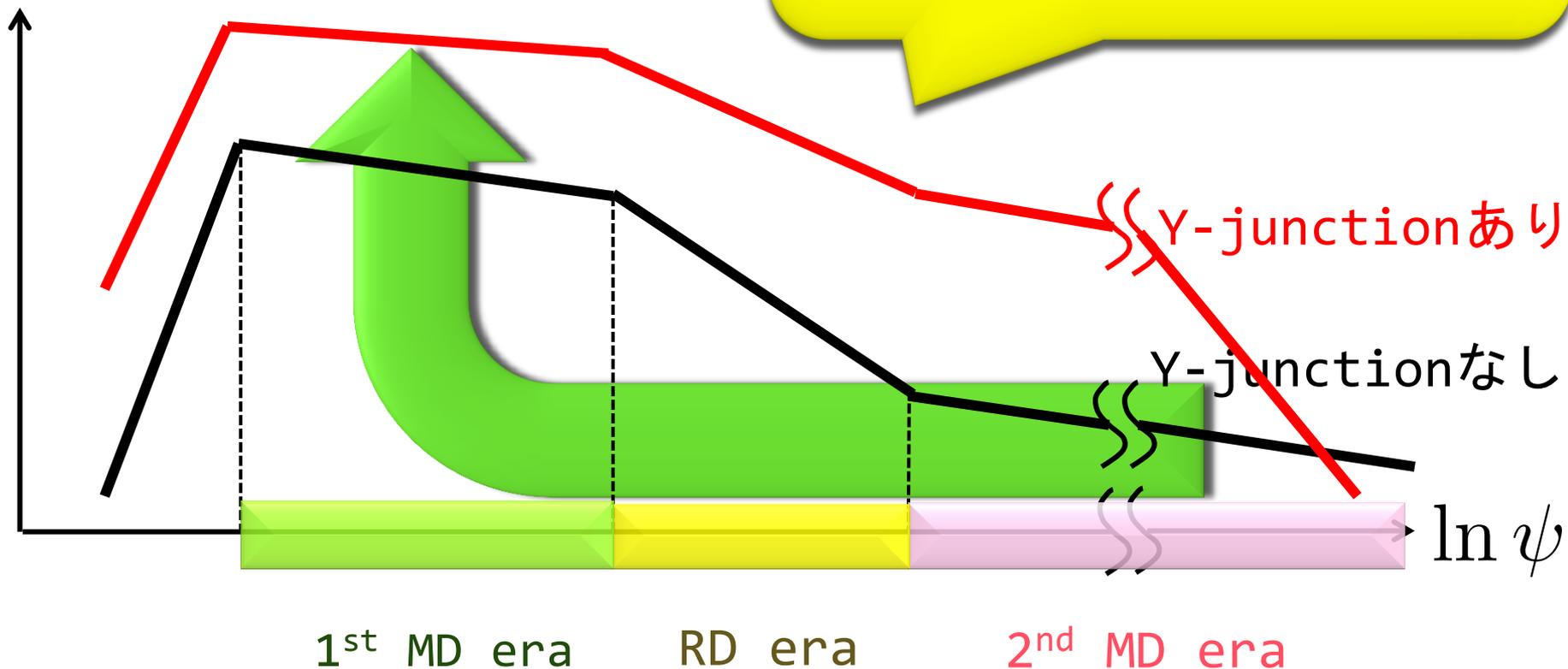
$\ln(\text{kinkの数})$



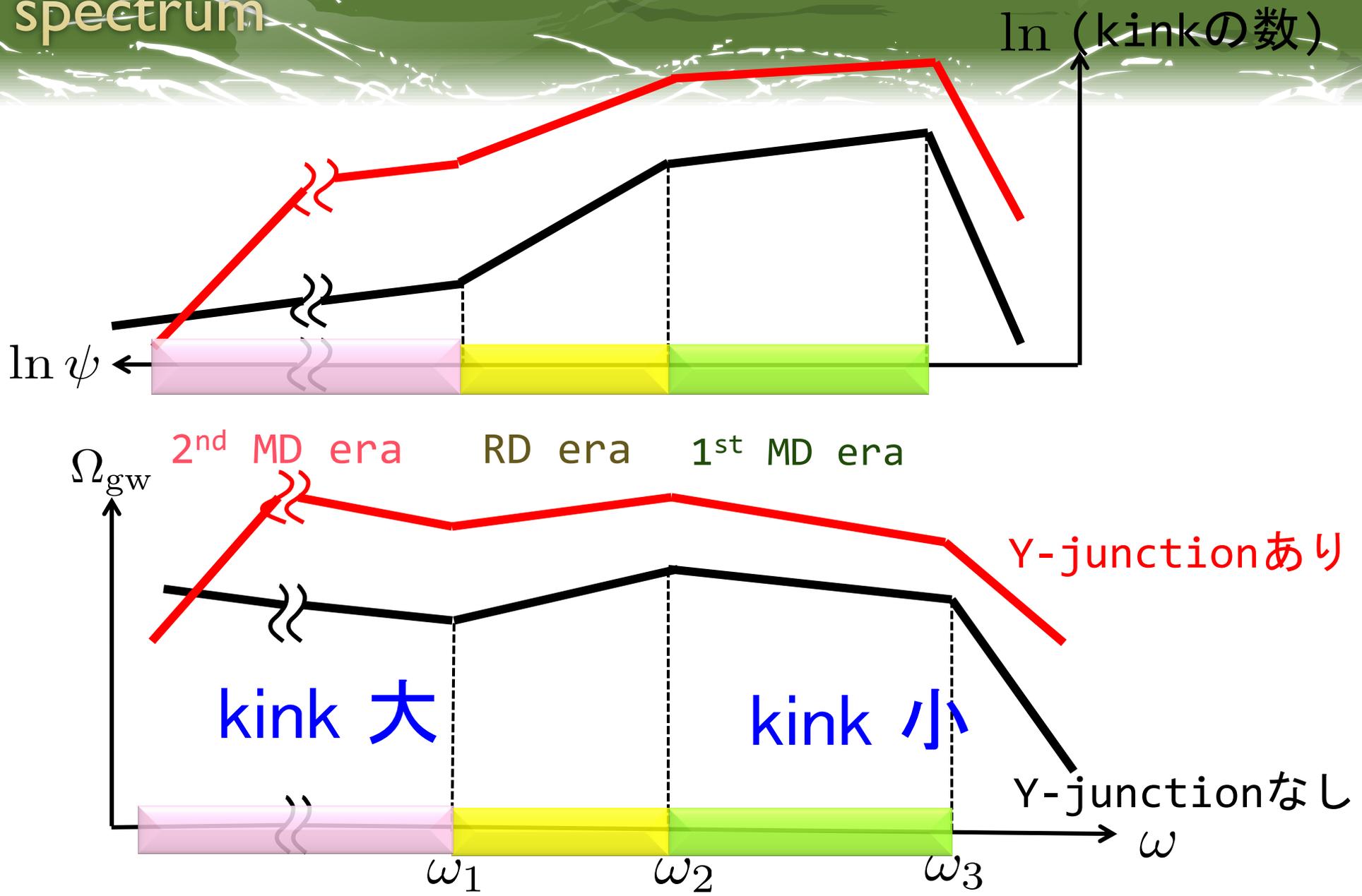
考察: Y-junctionありのkinkの分布

Y-junction
↓
小さいkinkを増やす

$\ln(\text{kinkの数})$



考察: Y-junctionありの背景重力波のpower spectrum



まとめ

- Y-junctionは小さいkinkの数を増やす。
- 背景重力波のpower spectrumのベキが変化する。

Future work

- kinkの分布を数値的に求め、背景重力波のpower spectrumを求める。
- stringの組み換え確率を考慮する。



BACK UP



COSMIC STRING

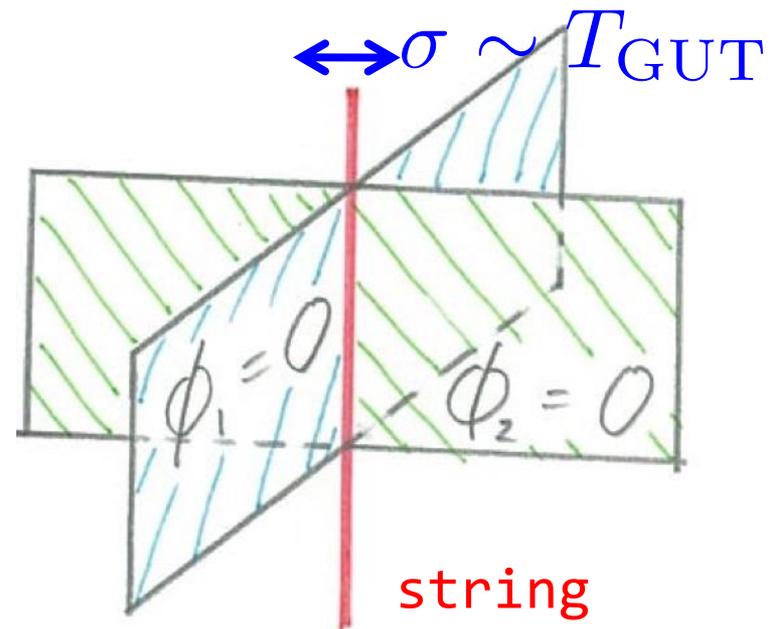
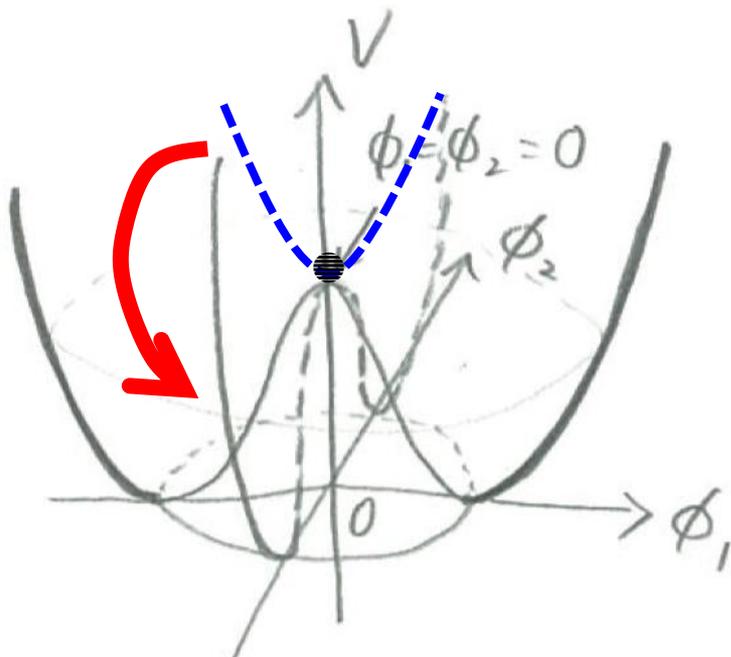
cosmic string生成

stringを形成するスカラー場のポテンシャル(4次元時空上)

$$V = \frac{\lambda}{4}(\phi^2 - \sigma^2)^2 + \alpha T^2 \phi^2 \quad \phi \equiv (\phi^1, \phi^2)$$

$T \sim \sigma$ で相転移

$T \ll \sigma$ にて



cosmic stringとは？

μ
stringの
エネルギー線密度

cosmic string

3次元空間では1次元
長さ無限の
高エネルギー領域

ζ^0

world sheet

cosmic string

ζ^1

4次元時空上では
2次元平面

stringのaction

$$S[x^\mu] = -\mu \int d^2\zeta \sqrt{-\det(\gamma_{ab})}$$

FLRW時空上のcosmic stringの運動

FLRW metric

$$ds^2 = a^2(\tau) (d\tau^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2)$$

cosmic stringの運動方程式

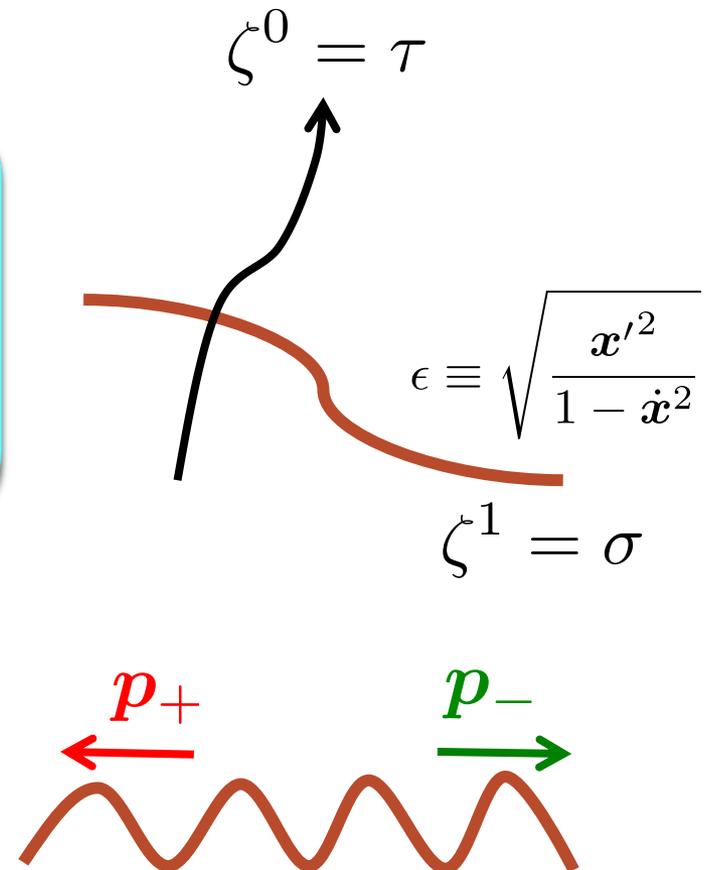
$$\ddot{\mathbf{x}} + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\mathbf{x}}(1 - \dot{\mathbf{x}}^2) = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\mathbf{x}'}{\epsilon} \right)'$$

時間微分

stringの方向(σ)微分



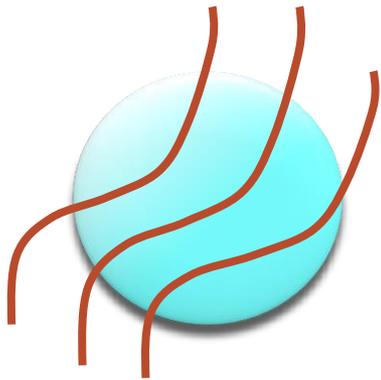
$$a', b' \longrightarrow p_{\pm} \equiv \dot{\mathbf{x}} \mp \frac{1}{\epsilon} \mathbf{x}'$$



cosmic stringのスケーリング則

★ 仮定: **Horizon**内でstringの本数一定

Horizon内に $\mathcal{O}(1)$



Horizon

$$\left[\begin{array}{l} \text{stringの} \\ \text{エネルギー密度} \end{array} \right] = \frac{\mathcal{O}(1) \times \mu \times t}{t^3} \propto t^{-2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{RD: } a \propto t^{\frac{2}{3}} \rightarrow \rho_{\text{string}} \propto a^{-3} \\ \text{MD: } a \propto t^{\frac{1}{2}} \rightarrow \rho_{\text{string}} \propto a^{-4} \end{array} \right.$$

初期にて radiation > string



string dominant とはならない!!

Horizon内でstringの本数一定



KINK

ψ の時間発展

stringの運動方程式

$$\ddot{x} + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{x}(1 - \dot{x}^2) = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{x'}{\epsilon} \right)'$$



$$\dot{p}_{\pm} = -H \{ p_{\mp} - (p_{+} \cdot p_{-}) p_{\pm} \}$$



$$\psi = \frac{1}{2} (1 - p_{+,1} \cdot p_{+,2})$$

$$\langle p_{+} \cdot p_{-} \rangle \equiv -\alpha$$

$$\dot{\psi} = -2H\alpha\psi$$



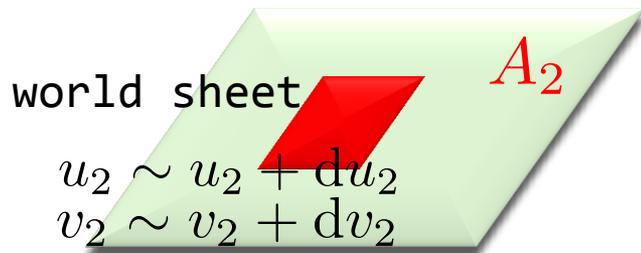
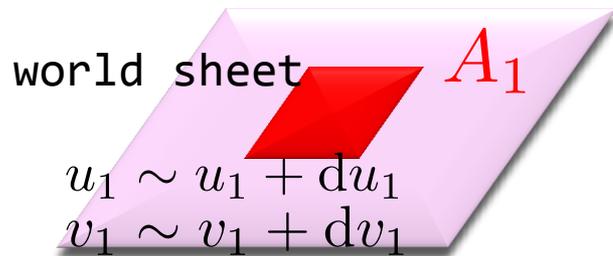
$$a \propto t^{\nu}, \quad \zeta = \alpha\nu$$

$$\psi \propto a^{-2\alpha} \propto t^{-2\zeta}$$

$$p_{\pm} \equiv \dot{x} \mp \frac{1}{\epsilon} x'$$

宇宙膨張と同じ
タイムスケールで
減衰

kinkの分布



world sheet上のintersectionの確率

$$= \frac{A_1, A_2 \text{がはる4元体積}}{\text{全体の4元体積}}$$

$$= \frac{d\Omega}{V dt}$$

$$d\Omega = |\sqrt{-g} \epsilon_{\lambda\mu\nu\rho} x_{1,u}^\lambda x_{1,v}^\mu x_{2,u}^\nu x_{2,v}^\rho| du_1 dv_1 du_2 dv_2$$



$A_1, A_2 \ll$ Hubble horizonの時

$$d\Omega = \frac{1}{4} \Delta du_1 dv_1 du_2 dv_2$$

$$\Delta = \frac{1}{4} |(\mathbf{p}_{+,1} \times \mathbf{p}_{+,2}) \cdot (\mathbf{p}_{-,1} - \mathbf{p}_{-,2}) + (\mathbf{p}_{+,1} - \mathbf{p}_{+,2}) \cdot (\mathbf{p}_{-,1} \times \mathbf{p}_{-,2})|$$

kinkの分布

string 1がstring 2のいつかどこかにintersectionする確率

$$dp_1 = \frac{\int d\Omega}{V dt} = \frac{\int du_2 \int dv_2 \frac{1}{4} \Delta du_1 dv_1}{V dt}$$

$$\int du_2 \int dv_2 = \int d\sigma \cdot 2dt = \frac{2V}{\xi^2} dt$$

$L = \frac{V}{\xi^2}$

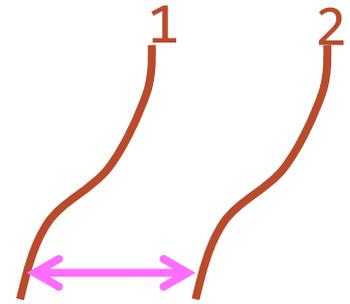
$$\Delta \rightarrow \bar{\Delta} = \int \frac{d^2 p_{+,1}}{4\pi} \frac{d^2 p_{-,1}}{4\pi} \frac{d^2 p_{+,2}}{4\pi} \frac{d^2 p_{-,2}}{4\pi} \Delta$$

$$dp_1 = \frac{\bar{\Delta}}{2\xi^2} du_1 dv_1$$

$du_1 dv_1$ で積分
double counting回避のため $\times \frac{1}{2}$

体積V中のintersection数(kinkの数)

$$dN_{\text{intersect}} = \frac{\bar{\Delta} V dt}{2\xi^4}$$



ξ : 相関長

sharpnessの分布

intersectionの数 $\propto \Delta$

$$\bar{\Delta} = \int \frac{d^2 \mathbf{p}_{+,1}}{4\pi} \frac{d^2 \mathbf{p}_{-,1}}{4\pi} \frac{d^2 \mathbf{p}_{+,2}}{4\pi} \frac{d^2 \mathbf{p}_{-,2}}{4\pi} \\ \times \frac{1}{4} |(\mathbf{p}_{+,1} \times \mathbf{p}_{+,2}) \cdot (\mathbf{p}_{-,1} - \mathbf{p}_{-,2}) + (\mathbf{p}_{+,1} - \mathbf{p}_{+,2}) \cdot (\mathbf{p}_{-,1} \times \mathbf{p}_{-,2})|$$

$$= \int \frac{d^2 \mathbf{p}_{+,1}}{4\pi} \frac{d^2 \mathbf{p}_{+,2}}{4\pi} \Delta(\mathbf{p}_{+,1}, \mathbf{p}_{+,2})$$

$$= \bar{\Delta} \int \underline{d\psi} g(\psi) \quad \mathbf{1}$$

$$\langle \mathbf{p}_+ \cdot \mathbf{p}_- \rangle = 0$$

\mathbf{p}_- で平均

$$\psi = \frac{1}{2} (1 - \mathbf{p}_{+,1} \cdot \mathbf{p}_{+,2})$$

sharpnessの分布

$$g(\psi) = \frac{35}{256} \sqrt{\psi} (15 - 6\psi - \psi^2)$$

$$\psi > 1 \Rightarrow g(\psi) = 0$$

どんな ψ のkinkが
できるかを表す

kinkの分布(kinkのsharpnessが考慮された intersection数)

体積 V 中、単位時間あたり sharpness $\psi \sim \psi + d\psi$ のkinkが残る intersection数の変化

$$\dot{N}|_{\text{new}} d\psi = \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) d\psi$$

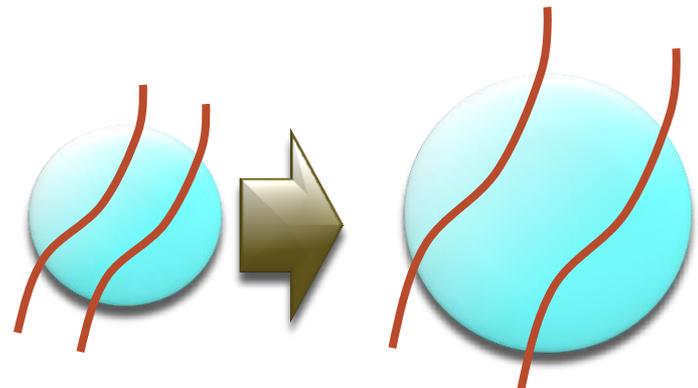
stringはhorizon内で一定の本数になると考えられている



(相関長) \propto horizon

$$\xi = \gamma t$$

$$\gamma = \text{Const.}$$

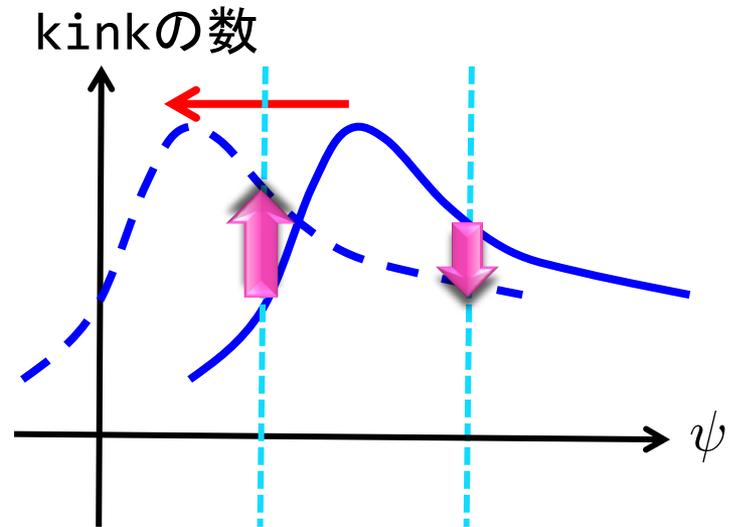


kinkの分布(kinkの鈍化が考慮された intersection数)

宇宙膨張にて ψ は減少

合計のkinkの数は保存

$$\frac{d}{dt} \left\{ \int^{\psi(t)} d\psi' N(\psi', t) \right\} = 0$$

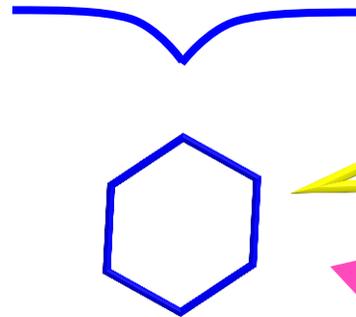
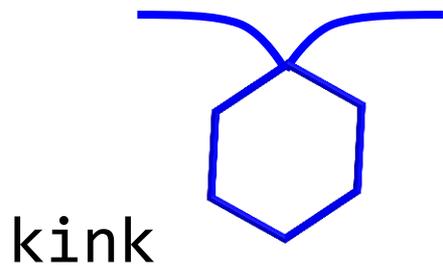


kinkの鈍化が考慮されたintersection数の変化

$$\left. \frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) \right|_{\text{stretch}} = \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) \frac{2\zeta}{t}$$

kinkの分布(loopに奪われるkinkの数)

self-intersection



loopに奪われた
kink

長さt

infinite stringの長さの変化(シミュレーションより)

$$\left. \frac{\dot{L}}{L} \right|_{\text{loop}} = -\frac{\eta}{\gamma t} \quad \eta: \text{ファクター}$$

(loopに奪われるkinkの数) \propto (loopの長さ)

loopに奪われるkinkの数

$$\left. \frac{\dot{N}}{N} \right|_{\text{loop}} = -\frac{\eta}{\gamma t}$$

kinkの分布

1st MD eraにて

$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t) = \frac{\bar{\Delta}_m V}{\gamma_m^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta_m}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta_m}{\gamma_m t} N(\psi, t)$$



$$\psi = \psi_* \left(\frac{t_*}{t} \right)^{2\zeta_m}$$

$$\beta \equiv 3 - 3\nu - \frac{\eta}{\gamma} + 2\zeta$$

単位体積あたりのintersectionの数(kinkの数)

$$\frac{N(\psi, t)}{V(t)} = \frac{\bar{\Delta}_m}{\gamma_m^4 t^{3-\beta_m}} \int_{\max\{t_*, \psi \frac{1}{2\zeta_m} t\}}^t \frac{dt'}{t'^{1+\beta_m}} g \left(\psi_* \left(\frac{t_*}{t'} \right)^{2\zeta_m} \right)$$

kinkができる時間

Y-junctionありのkinkの分布

簡単のためRDの時のみ考える

透過kinkで数が増える
 →振幅:増
 →ベキ:急

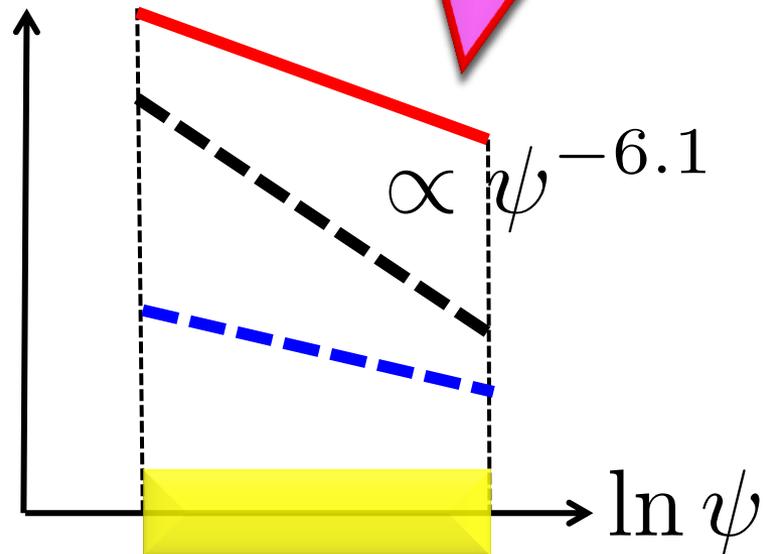
$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t)$$

$$= \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

$$+ \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

ln (kinkの数)



RD era

Y-junctionありのkinkの分布

簡単のためRDの時のみ考える

透過kinkで数が増える
 →振幅:増
 →ベキ:急

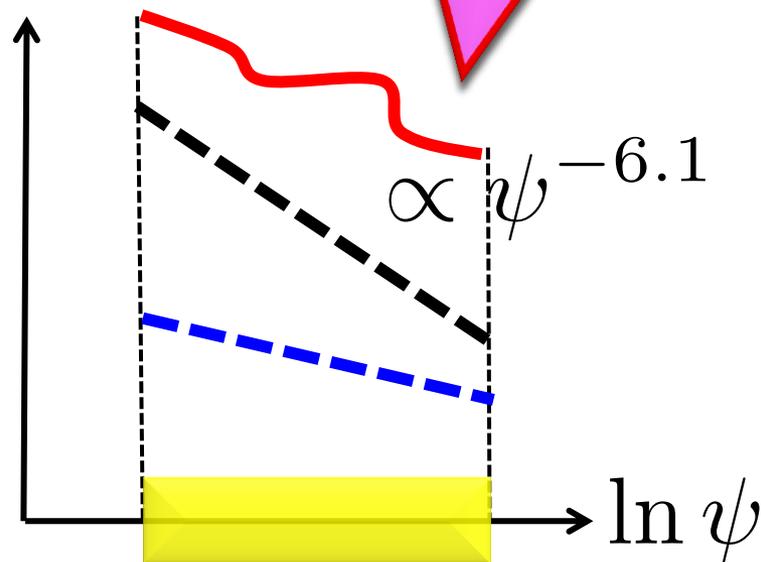
$$\frac{\partial N}{\partial t}(\psi, t)$$

$$= \frac{\bar{\Delta}V}{\gamma^4 t^4} g(\psi) + \frac{2\zeta}{t} \frac{\partial}{\partial \psi} (\psi N(\psi, t)) - \frac{\eta}{\gamma t} N(\psi, t)$$

$$+ \Theta(0.72 - \psi) \frac{2\alpha}{t} N\left(\frac{\psi}{0.72}, t\right)$$

$$- \frac{\alpha}{t} N(\psi, t)$$

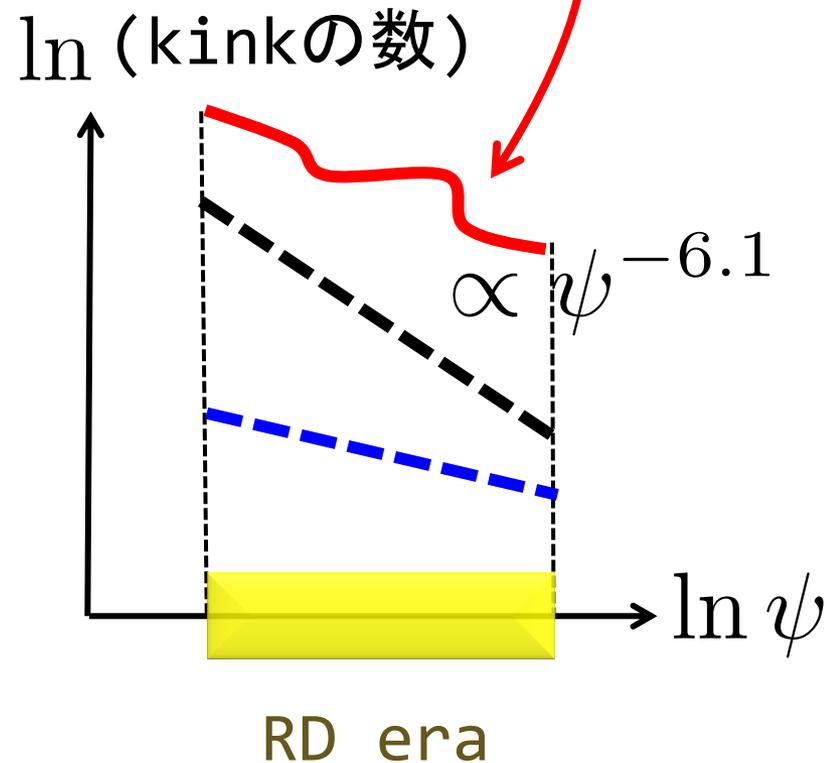
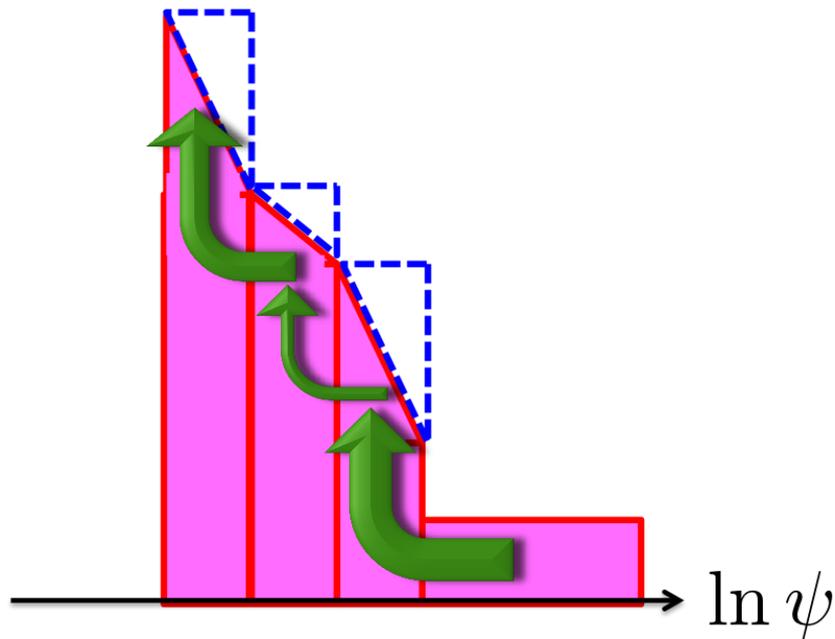
ln (kinkの数)



RD era

Y-junctionありのkinkの分布

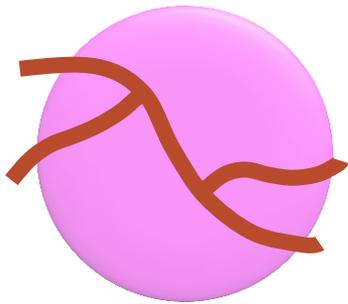
波々の理由



Y-junctionありのkinkの分布

RDの時のみ考えた時、
kinkの数が正ベキにならない理由

仮定: Horizonの中にjunctionが1~1.5個



junction間の距離

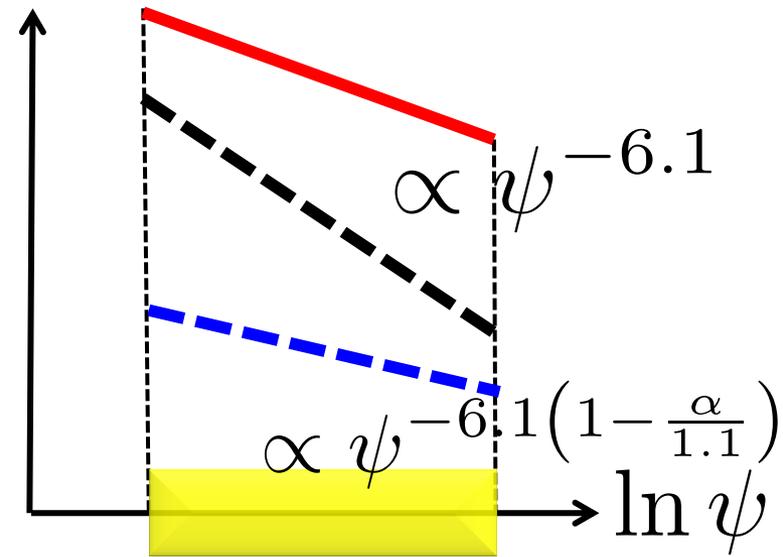
$$\sim \frac{t}{\alpha} = \frac{2t}{2\alpha}$$

left, right-modeのどちらかなので

$\sim \frac{2t}{4\alpha}$ Horizonの距離

$\sim \frac{2t}{4\alpha}$ junctionの数
1 ~ 1.5

$\ln(\text{kinkの数})$

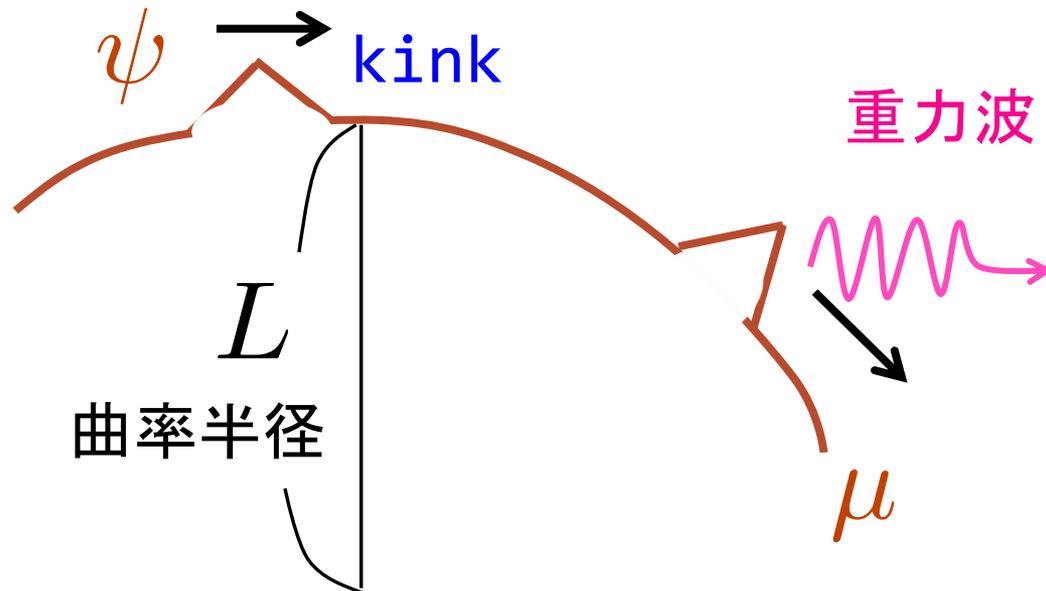


RD era



GRAVITATIONAL WAVE

一つのkinkからの重力波

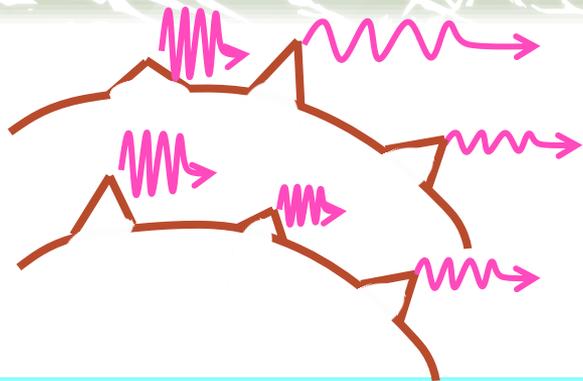


高振動数 ($\omega \gg L^{-1}$) にて

単位時間単位振動数あたりに放出される重力波のエネルギー

$$\left. \frac{dP}{d\omega} \right|_{\text{one kink}} \sim G \mu^2 \psi \omega^{-\frac{5}{3}} L^{-\frac{2}{3}}$$

多数のkinkからの重力波とは？



多数のkinkがあったら、
重ね合わさってできた
背景重力波の
power spectrumは
どうなる？

infinite string 上の kink から生成される
背景重力波の密度パラメータ

$$\Omega_{\text{gw}}(\omega) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{gw}}}{d \ln \omega}$$

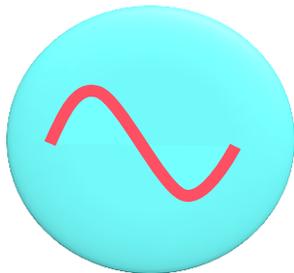
$$\rho_{\text{gw}} = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{one kinkからの} \\ \text{重力波の} \\ \text{power spectrum} \end{array} \right] \times \left[\text{kinkの数} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{重力波を} \\ \text{放出していた時間} \end{array} \right]}{\left[\text{体積} \right] \times \underline{a} \text{ 波長の伸び}}$$

古いkinkからの重力波と今のkinkからの重力波

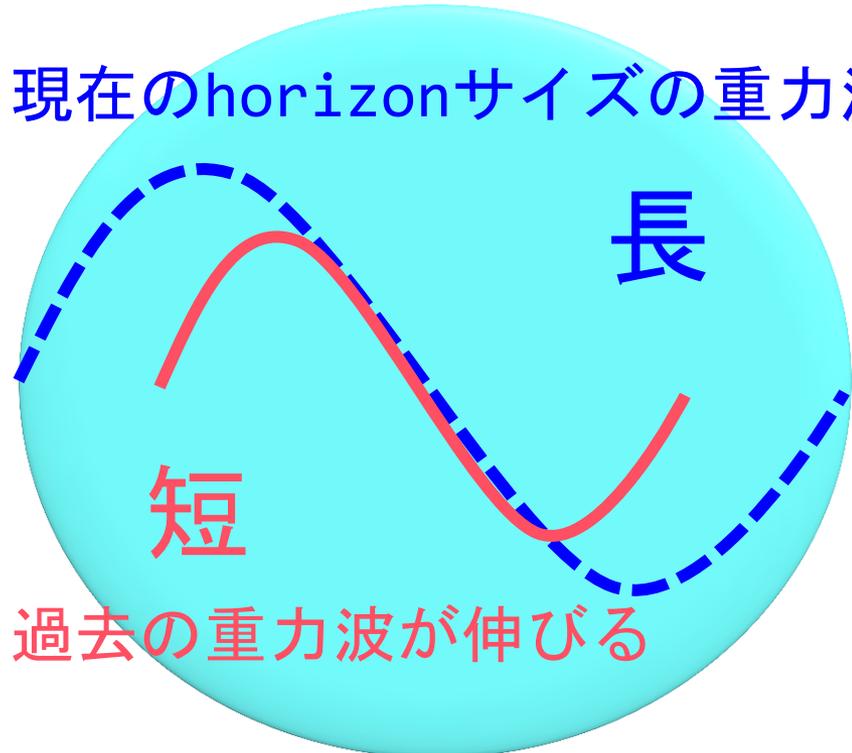
$$\text{重力波} \propto a = \begin{cases} t^{\frac{1}{2}} & (\text{RD}) \\ t^{\frac{2}{3}} & (\text{MD}) \end{cases}$$

Horizon $\propto t$ ← Horizonの方が成長が早い

過去



現在 現在のhorizonサイズの重力波





**COSMIC STRING
FROM
SUPERSTRING**

Cosmic string from superstring

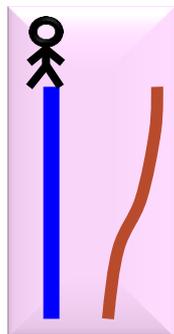
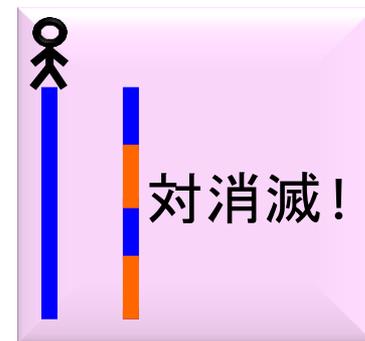
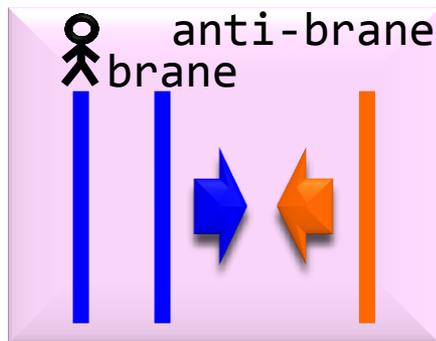
超弦理論



D-string
F-string

D-string

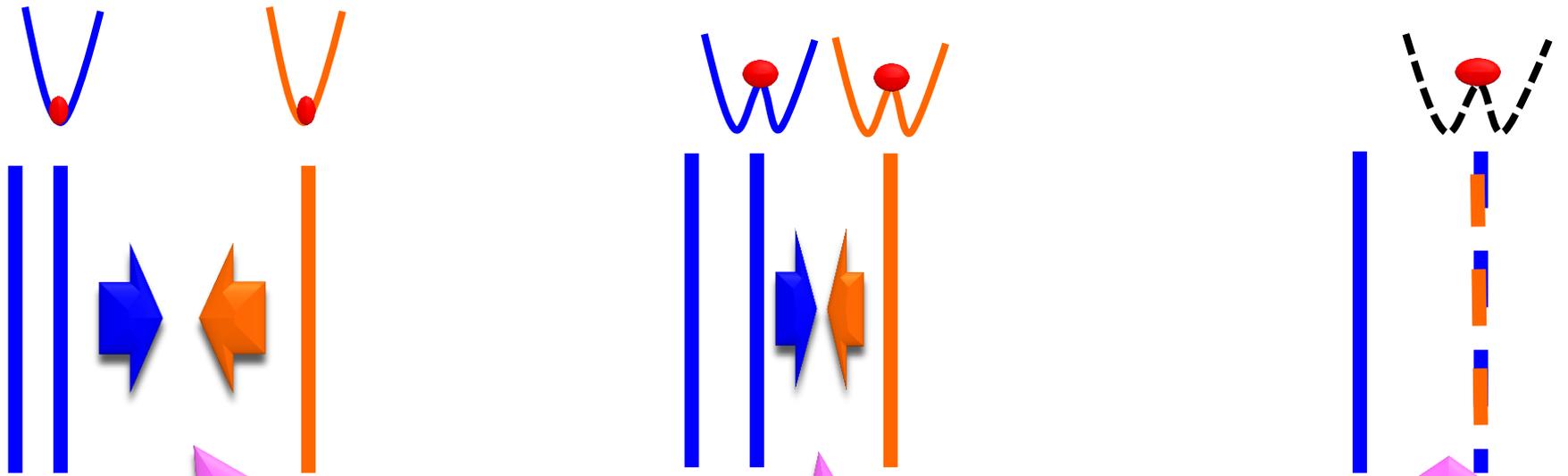
brane inflationで生成



対称性が回復している
ところだけ
cosmic stringとして残る

Cosmic string from superstring

D-string



brane全面に
対称性あり

対称性が破れているところと
対称性があるところあり

対称性ありのところだけ
stringとして残る