また盛り上がってきた cosmic string

高橋慶太郎
京都大学基礎物理学研究所
２００８年９月１８日＠中間発表会
with 成子・山内・柳・仙洞田・佐々木

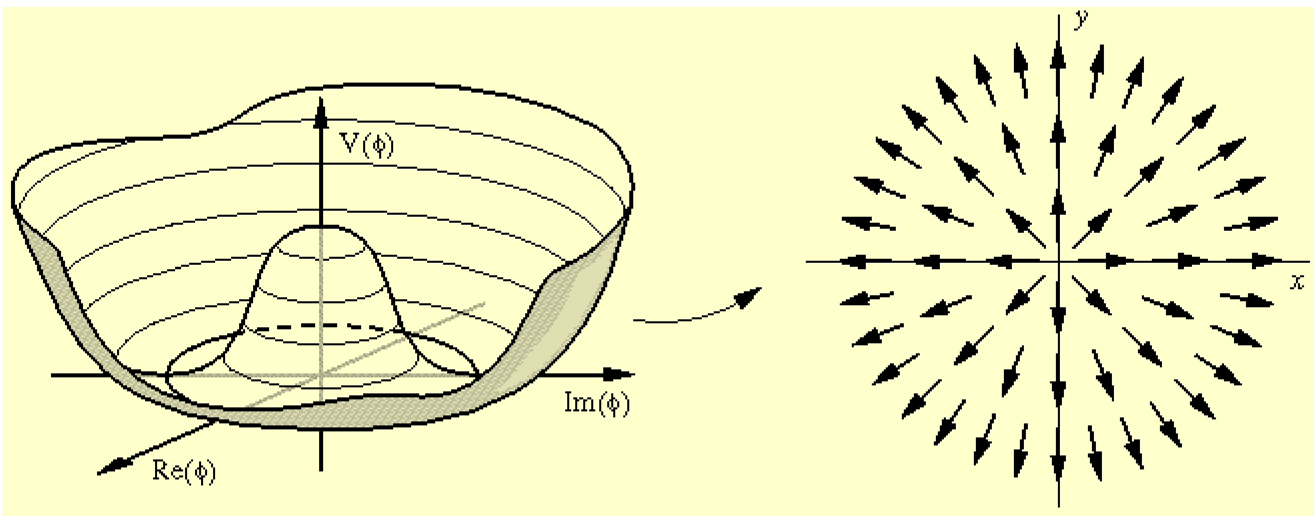
１、イントロダクション

cosmic string

宇宙の相転移のとき対称性が破れるとできることがある。

因果律　＋　場の連続性　→　真空に落ちられない場所

→　topological defect



cosmic stringは

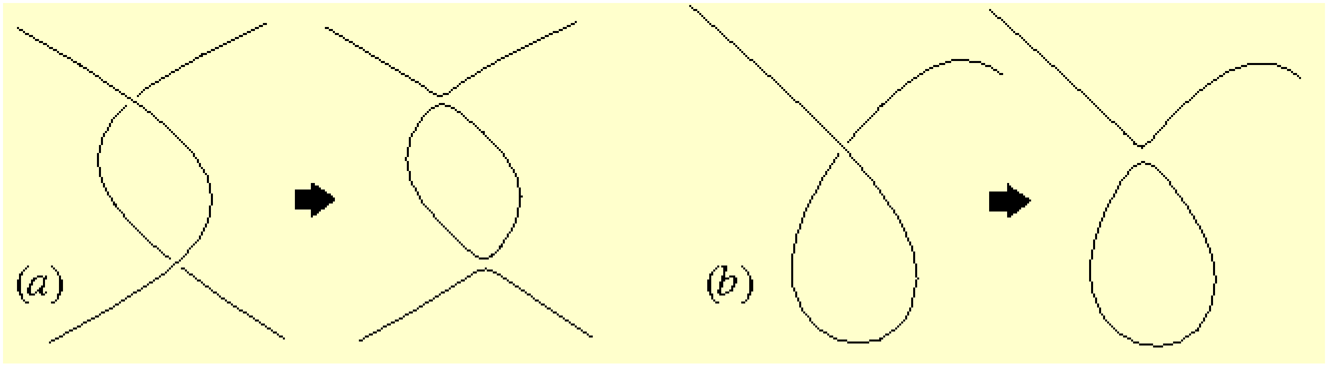
μ = 線密度 = tension ～ M_{PT}^2

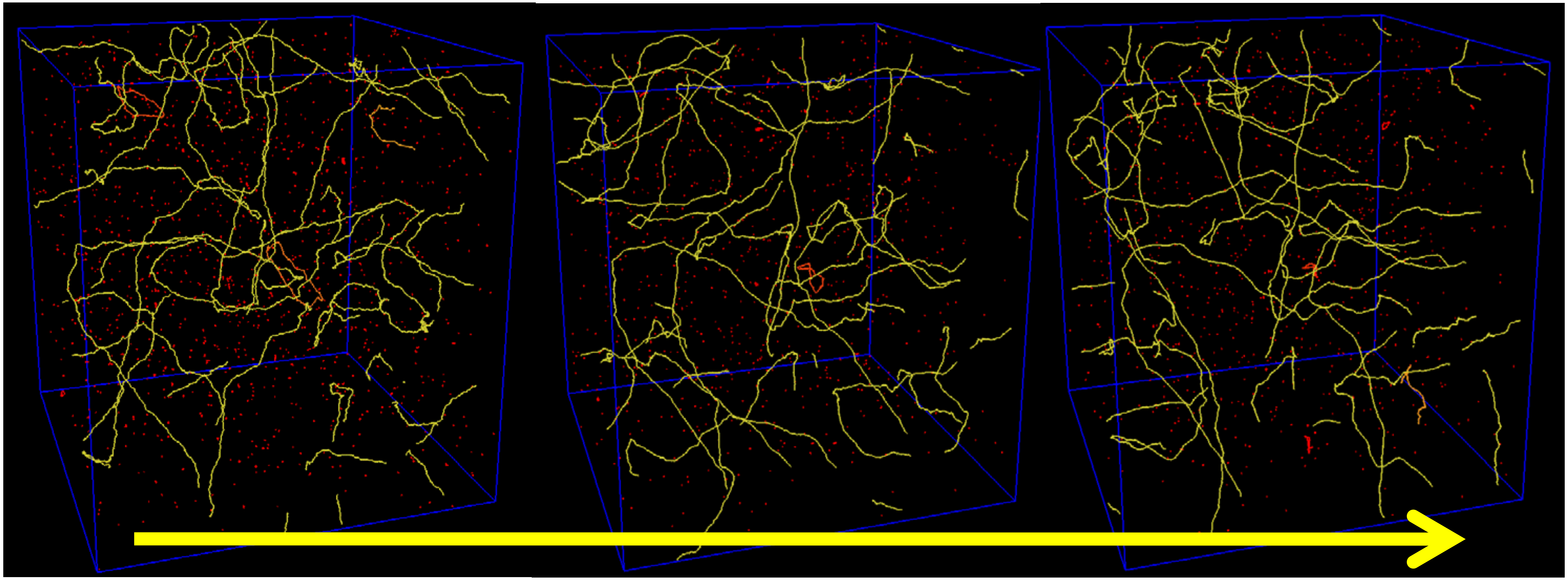
で特徴付けられる。GUTだと$G\mu \sim M_{PT}^2/M_{PL}^2 \sim 10^{-6}$。

cosmic stringの宇宙論的効果の大きさは$G\mu$で決まる。

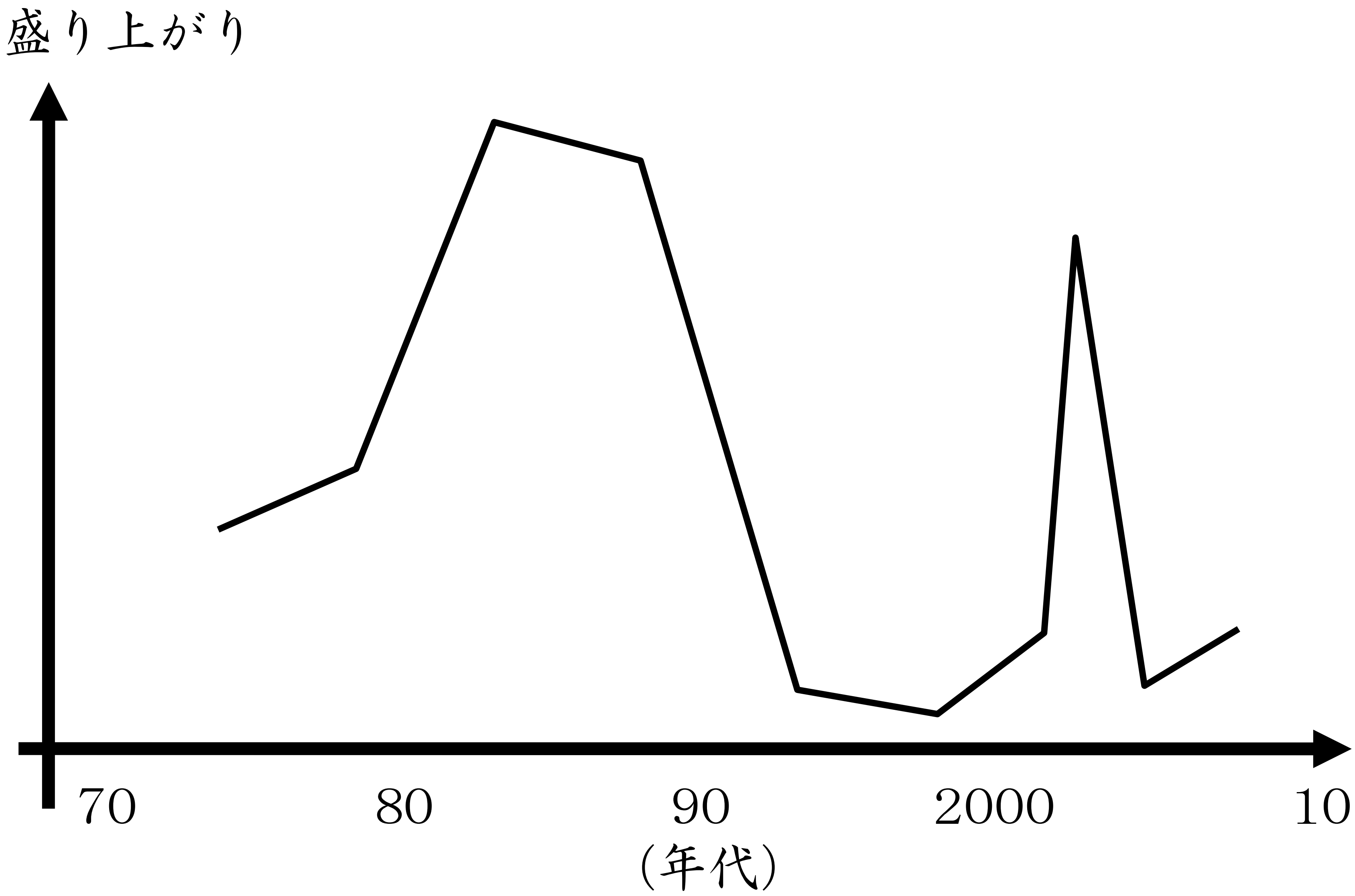
cosmic string network

dynamics
- 波の伝播
- reconnection
  → loop形成

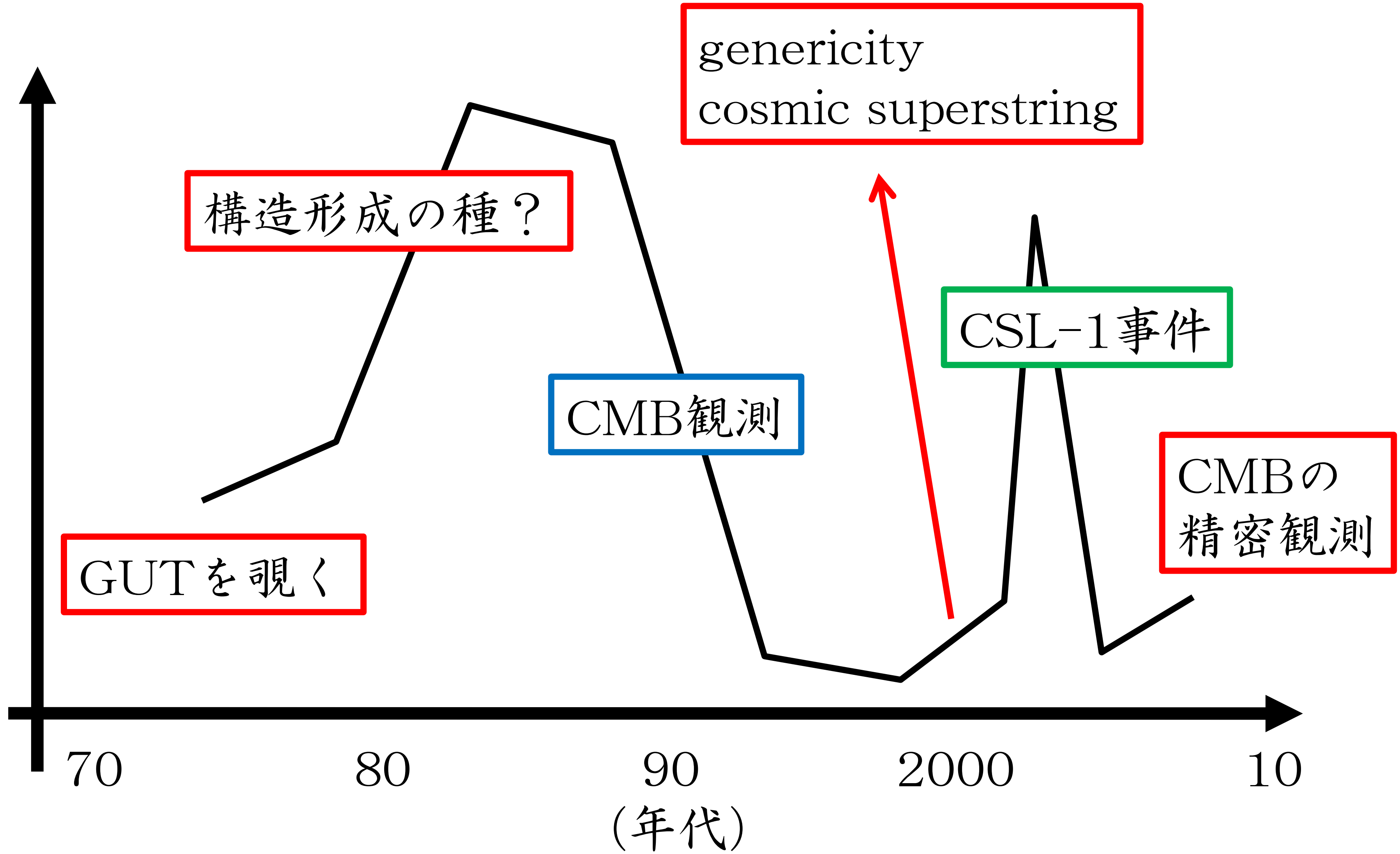




cosmic stringの栄枯盛衰



cosmic string の栄枯盛衰



cosmic stringによる構造形成

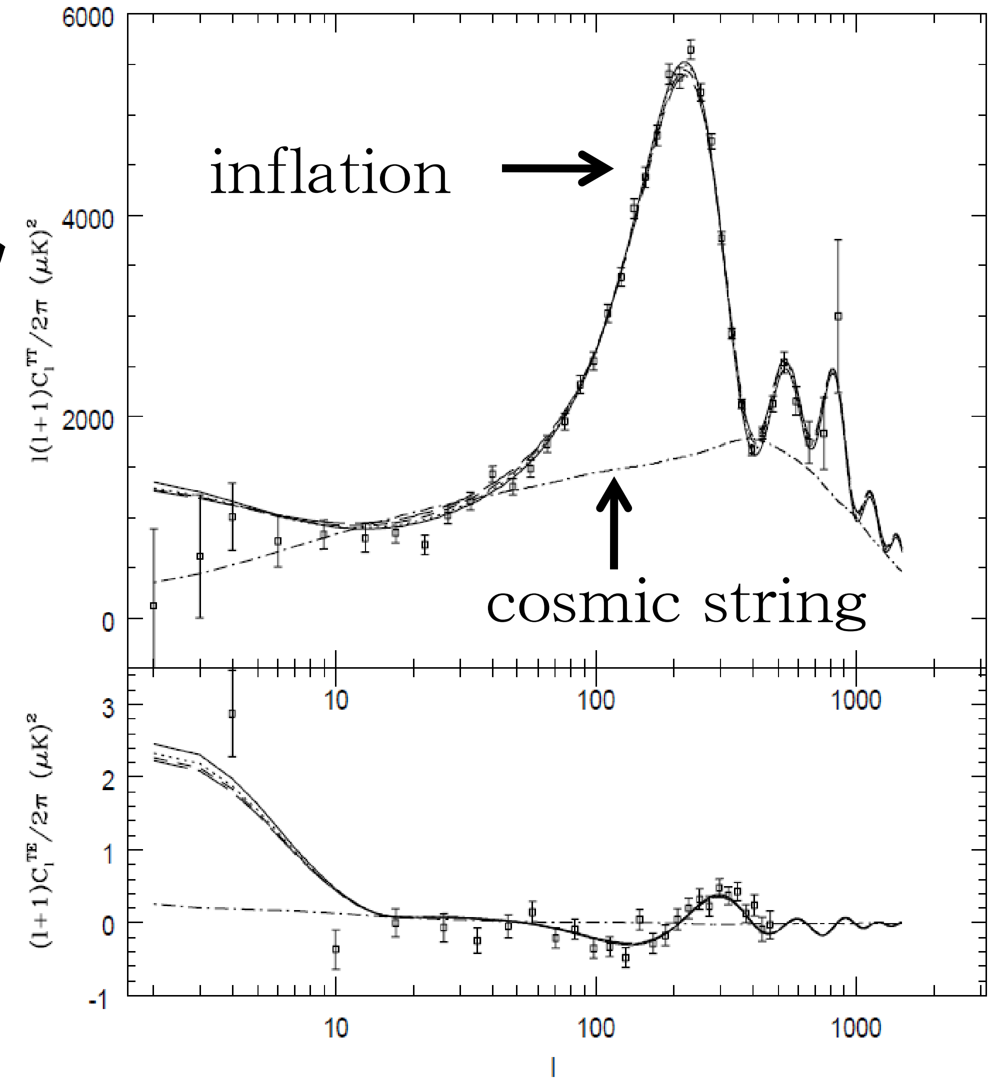
cosmic stringがぐちゃぐちゃ動くとプラズマにもゆらぎができる。

→ インフレーションの対抗馬として注目される

しかしCMBの観測によって否定される。

→ CMBゆらぎへの寄与は10%以下

パラメータがGμしかなく、予言能力があってきちんと否定されたよいサイエンス



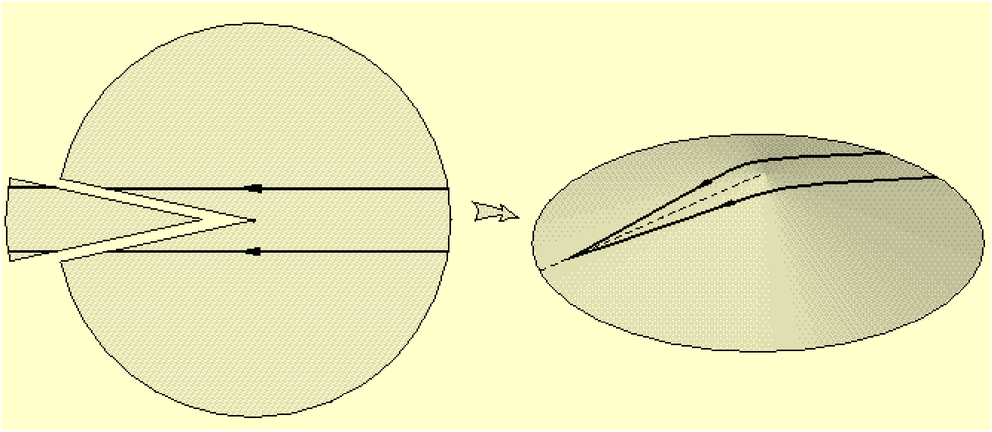
cosmic string探索

重力レンズ

deficit angle

→ 特徴的な重力レンズ

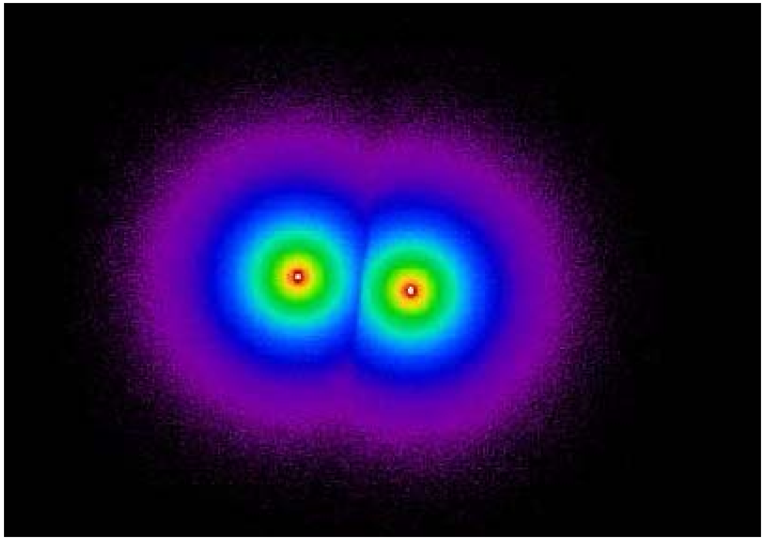
→ 今のところ見つかっていない

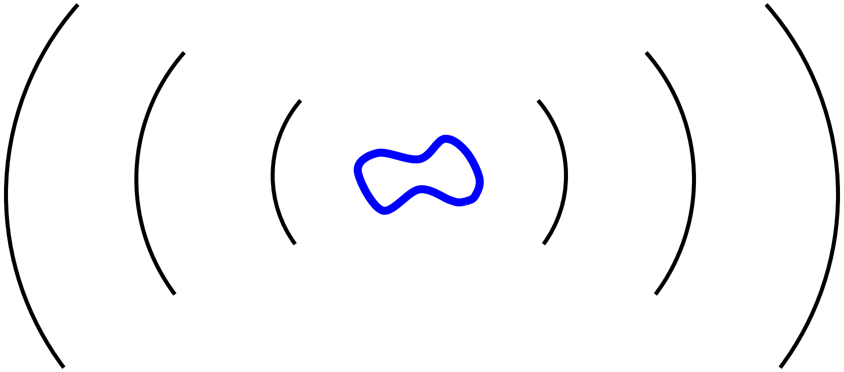


重力波

loopからよく放出される

→ pulsar timingから制限





$$G\mu < 10^{-7}, \quad \Omega_{CS} < 0.01$$

最近の発展の背景

- genericity in GUT (Jeannerot et al., 2003)
  インフレーションの後に相転移が起きると、だいたいどういうゲージ群から出発してもcosmic string生成は避けられない。

- superstring
  プランクスケールのcosmic stringはすでに観測的に棄却。ブレーンワールドモデルによってsuperstringのスケールがもっと低くてもよくなった。

- CMB観測
  - 小スケール
  - Bモード
  - nonGaussianity

  μが小さくてもこういうものはcosmic stringがdominantである可能性がある

やりたいこと

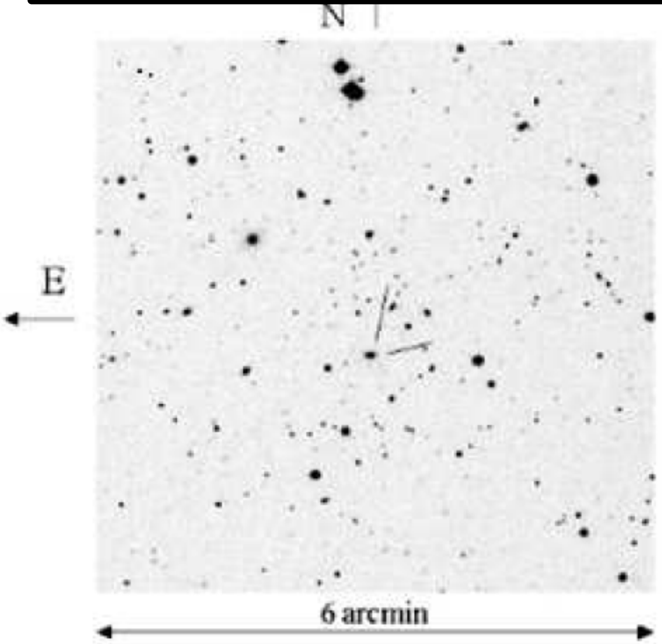
モチベーション

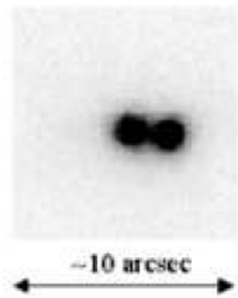
- cosmic stringは構造形成の種としては働かないが、理論的にはどうもあるっぽいので探したい
- 普通のcosmic stringとsuperstringを観測的に区別

実際にやること

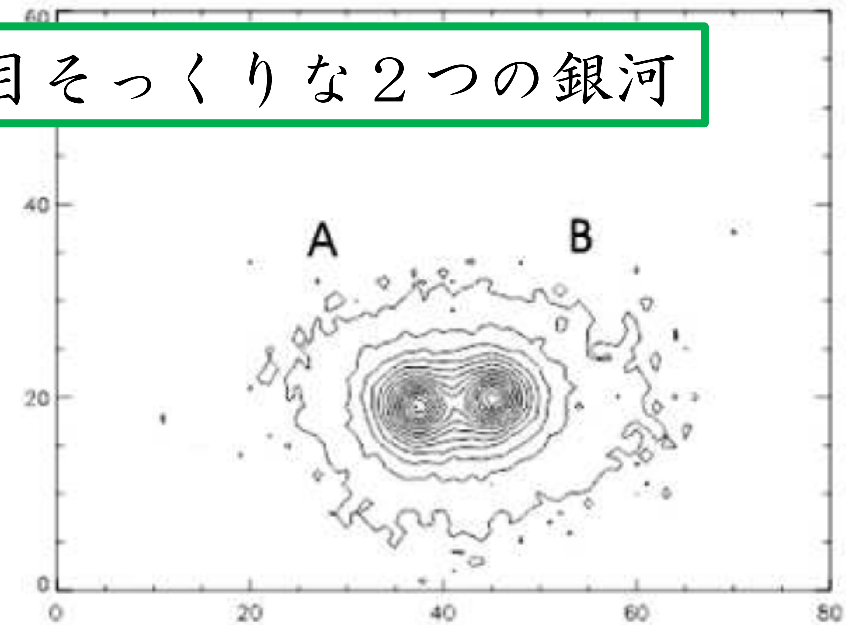
- string networkの解析的モデル
- CMBの小スケール温度ゆらぎの１点関数を計算、シミュレーションと比較
- 後々は２点関数、３点関数、偏光、重力波、weak lensing、micro lensingなども

CSL-1事件 (Sazhin et al. 2003-2006)

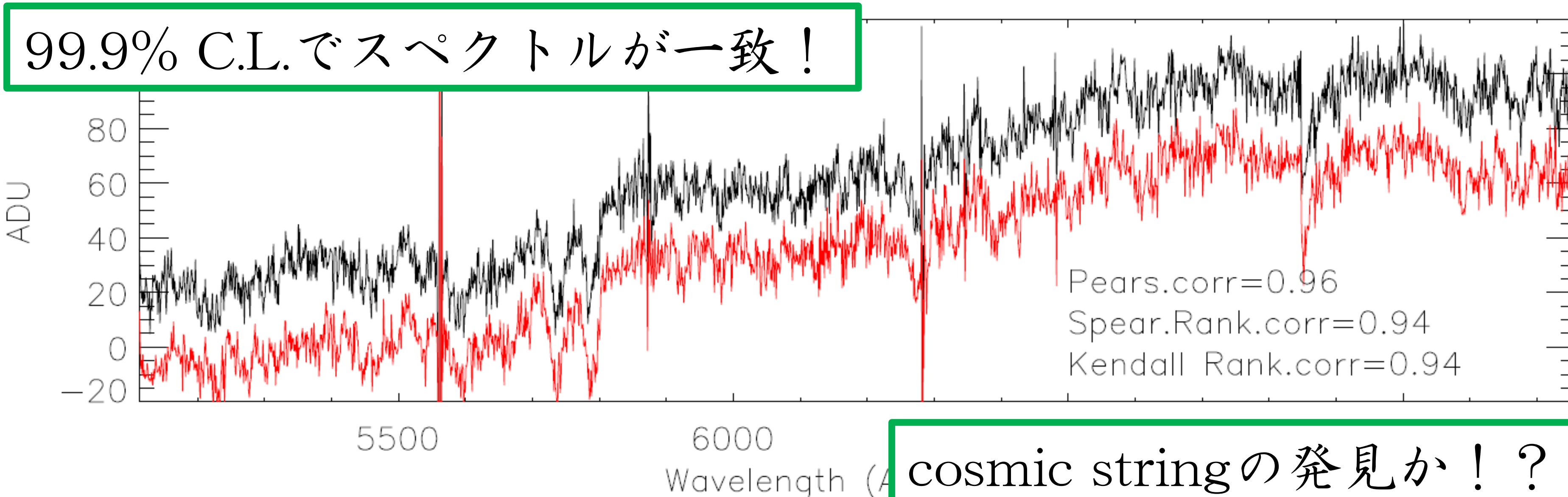




見た目そっくりな２つの銀河



99.9% C.L.でスペクトルが一致！

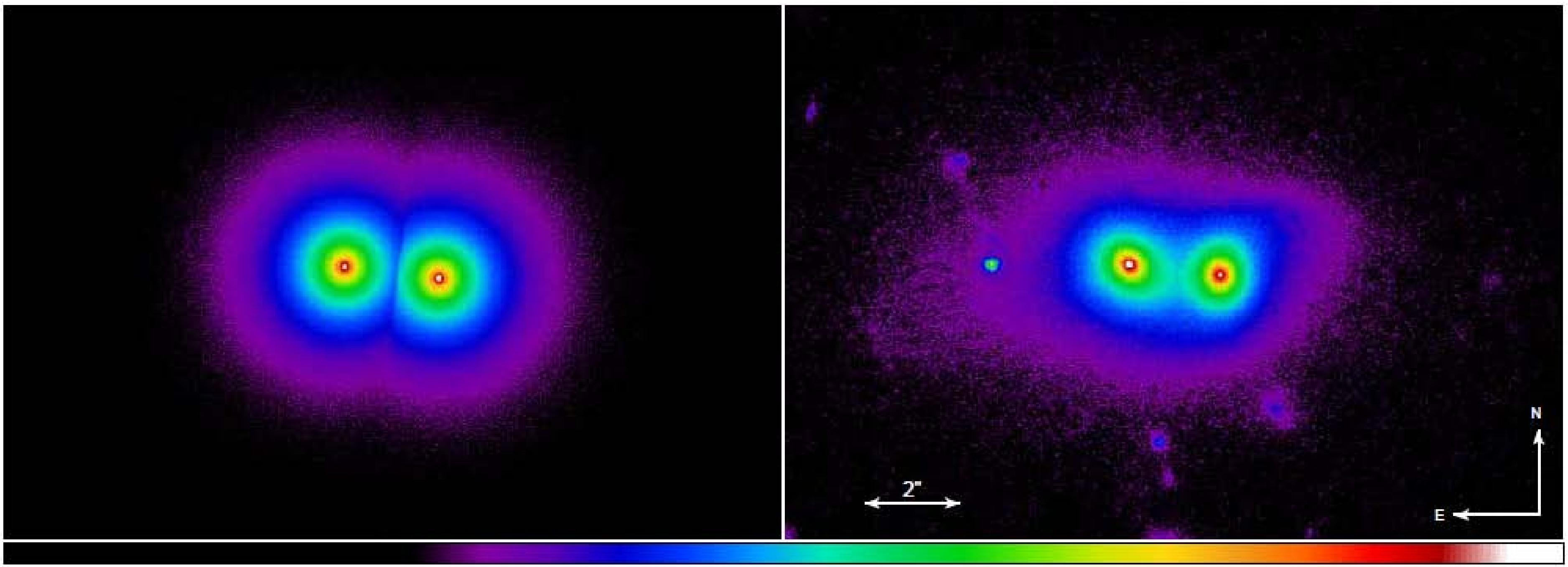


cosmic stringの発見か！？

CSL-1事件の結末

シミュレーション

HSTによる観測



よく似た銀河のbinaryでした・・・

２、cosmic string と cosmic superstring

cosmic stringの種類

field-theory string

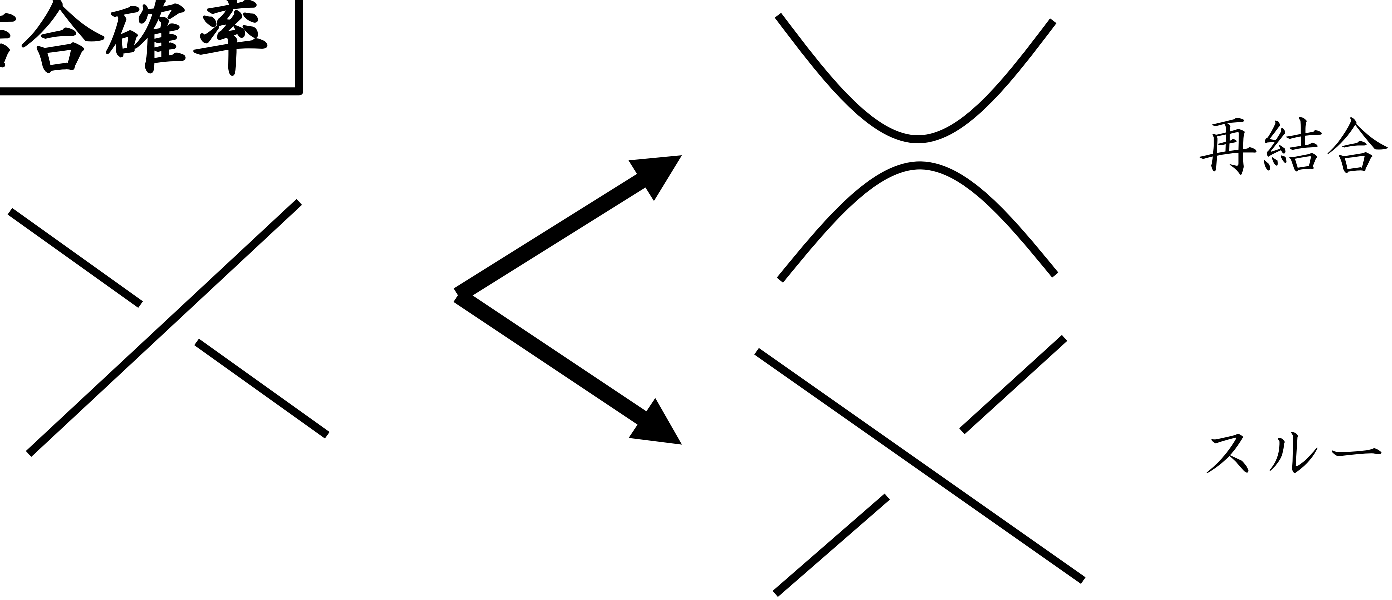
- 普通のcosmic string
- 相転移のときにできる
- μ は相転移のエネルギースケール

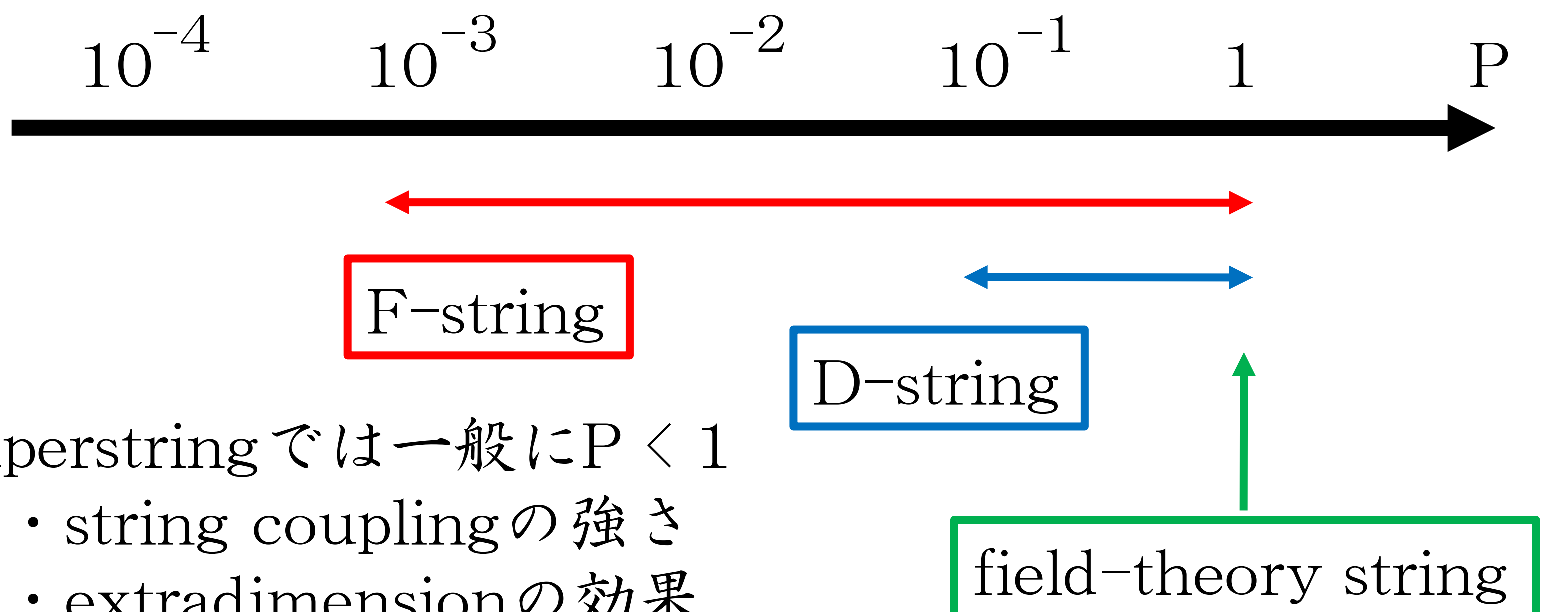
superstring

- F-string：いわゆる「超弦」
- D-string：D1-braneまたはDp-braneが丸まったもの
- brane inflationが終わる時にできる
- μ はモデルによる($G\mu = 10^{-11} \sim 10^{-6}$)
- 安定かどうかはモデルによる
- FとDの組み合わせもある

観測的には「再結合確率」を通して区別できる
(組み合わせネットワークは複雑なので今は無視)

再結合確率

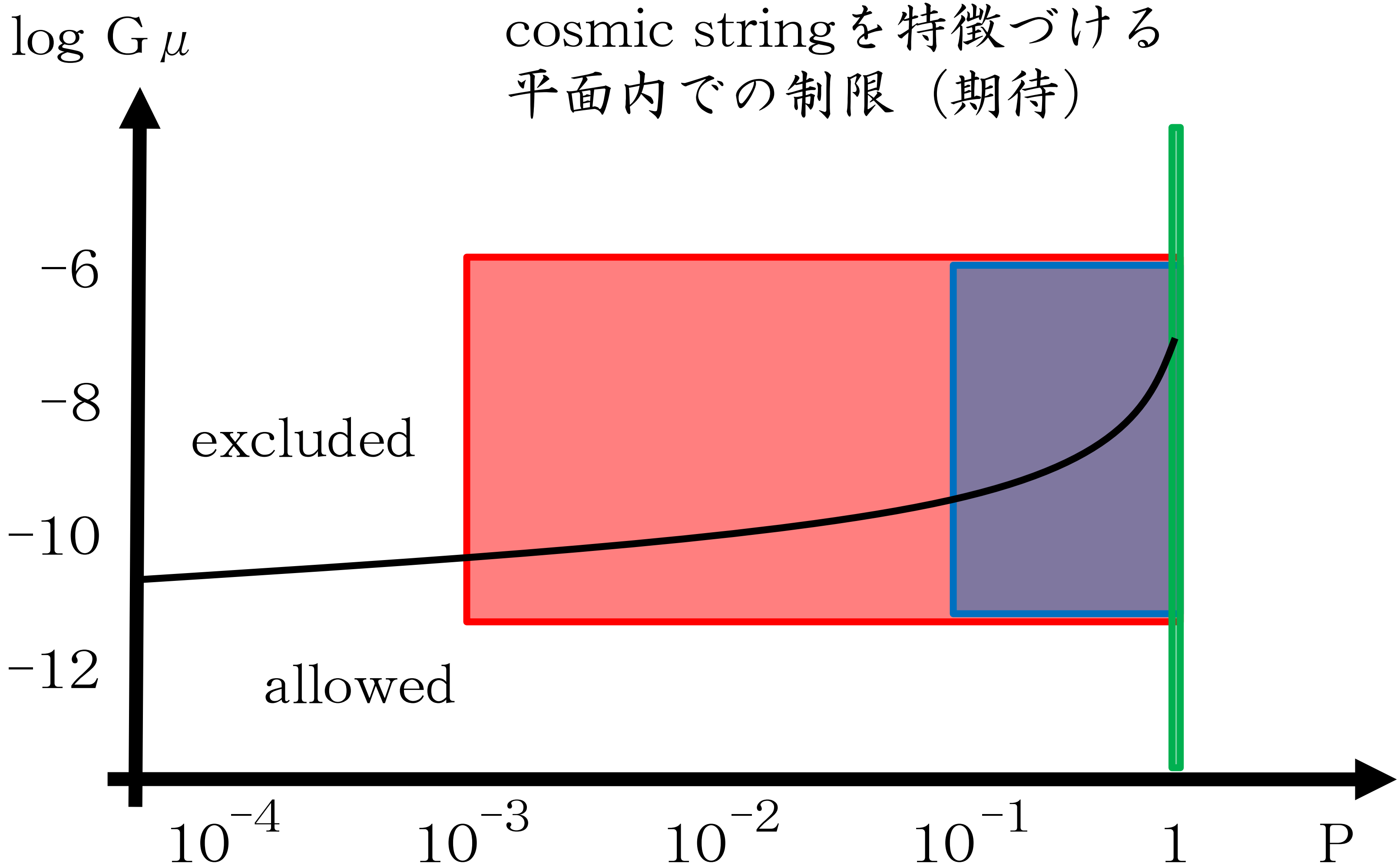




superstringでは一般にP < 1

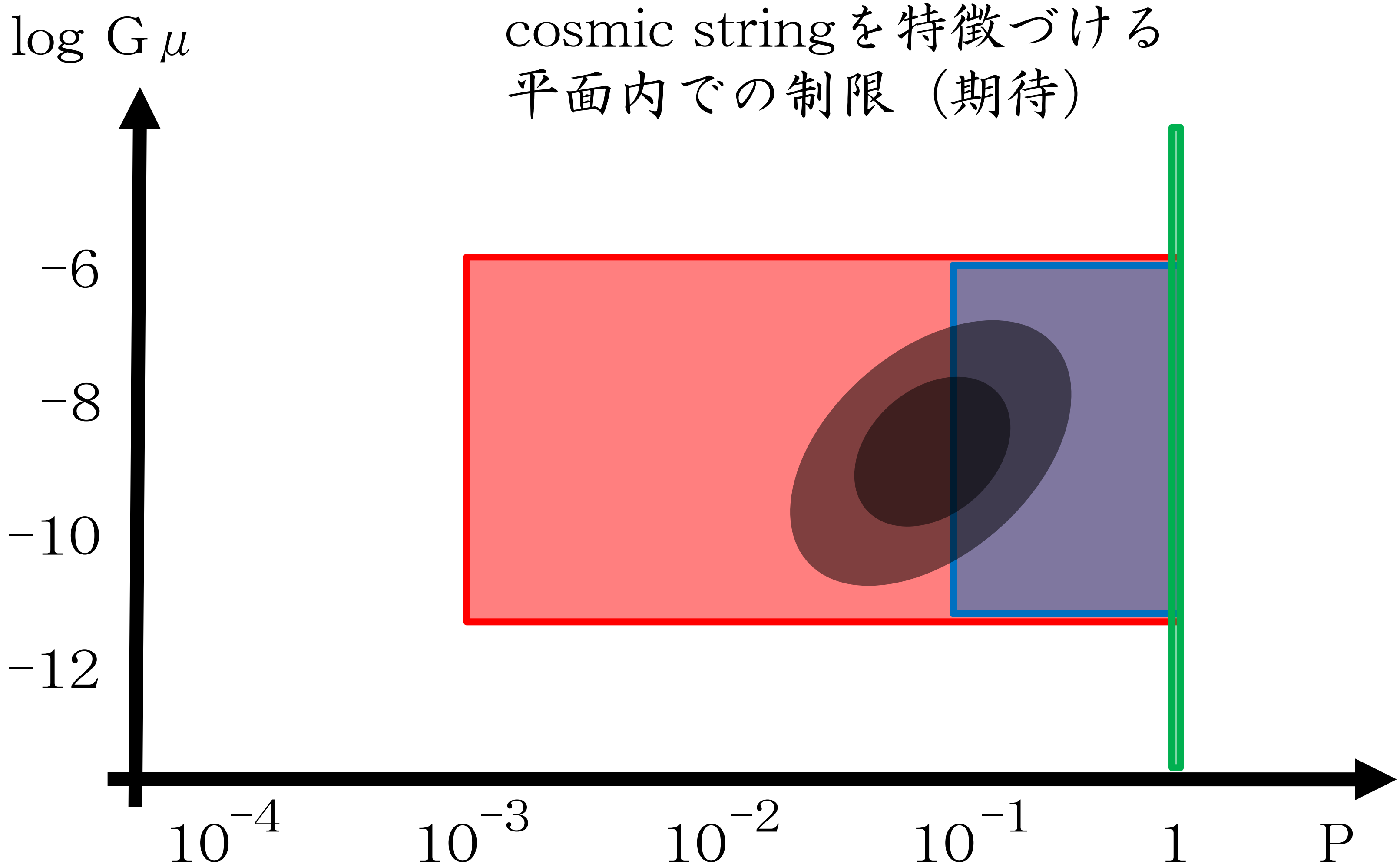
- string couplingの強さ
- extradimensionの効果

cosmic stringへの制限



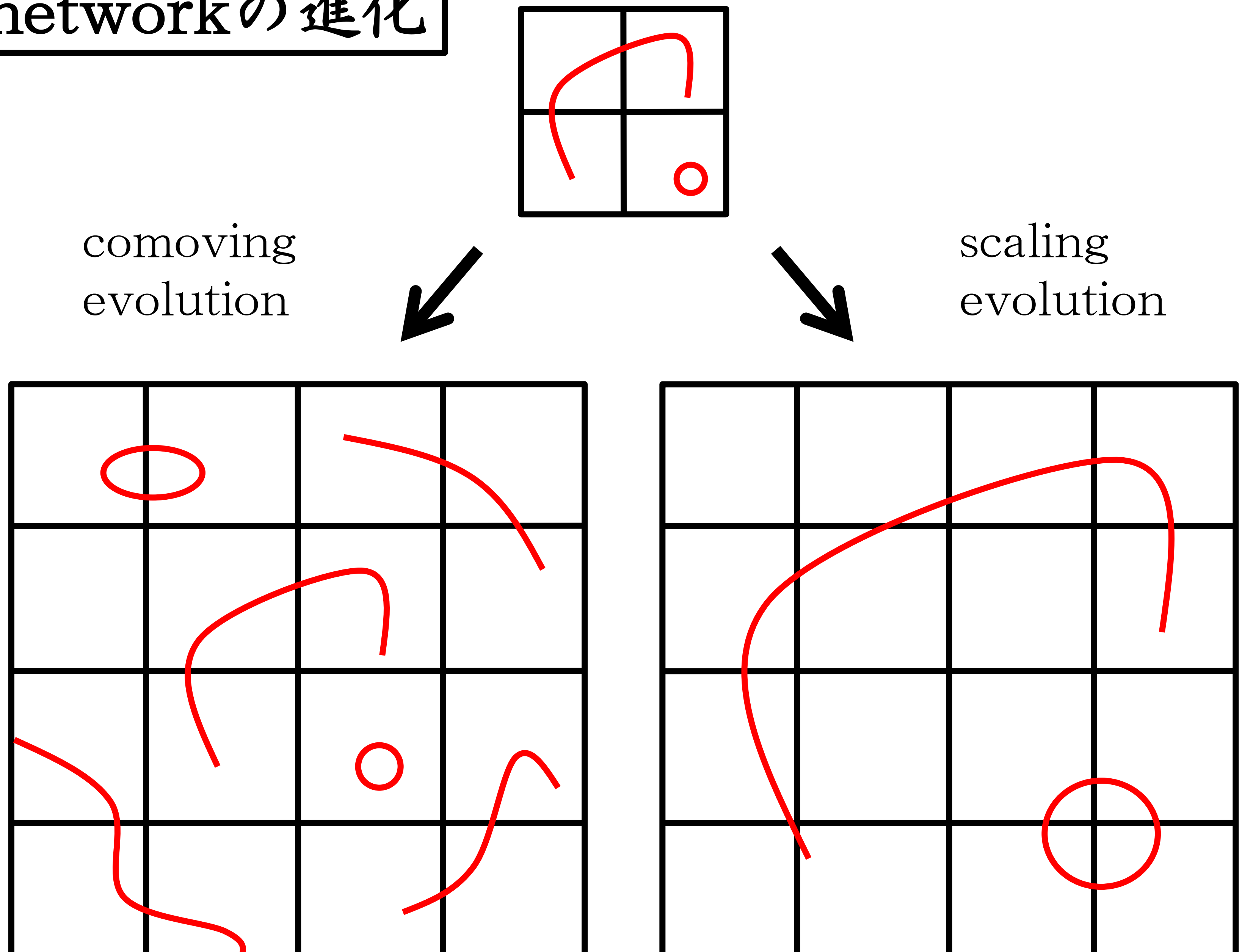
再結合確率にはどのような観測的影響があるか

cosmic stringへの制限



再結合確率にはどのような観測的影響があるか

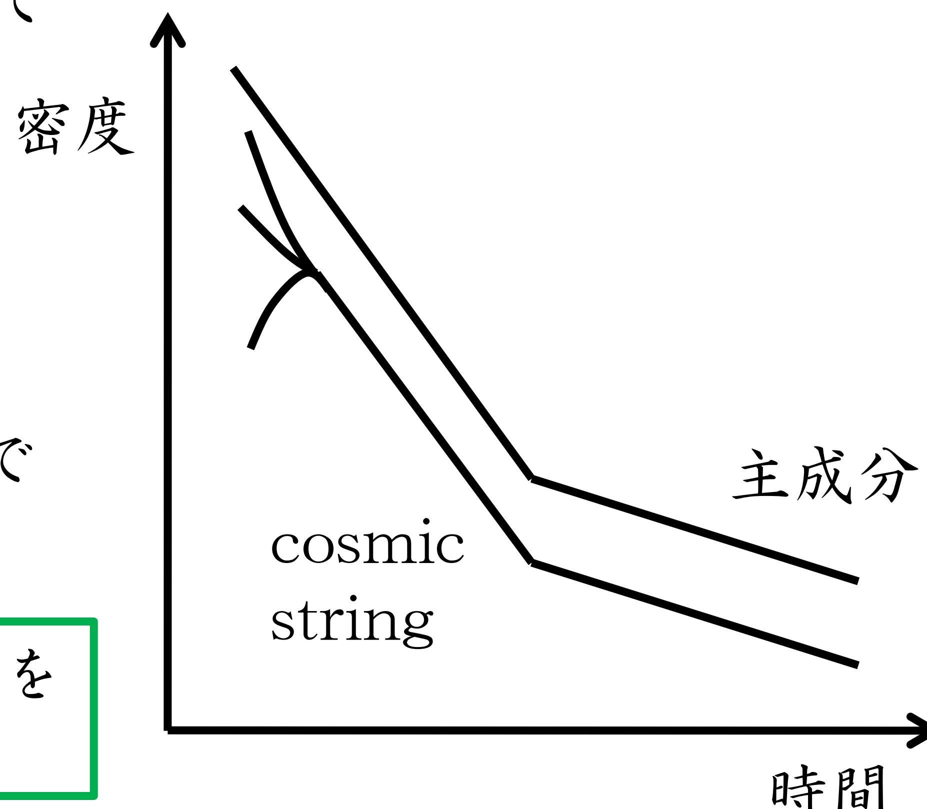
networkの進化



スケーリング

スケーリングする、というのがだいたいの
シミュレーションや解析的モデルの答え
「<u>horizon内にhorizonくらいの相関長を持ったstringが数本</u>」

- 長いstringは衝突によって
  次々とloopを生成
- loopは重力波などを
  放出してすぐにdecay
- 初期条件によらず
  attractorに落ち着く
- 全てがhorizonスケールで
  特徴付けられる



この振る舞いがcosmic stringを
面白くしている。

再結合確率の影響

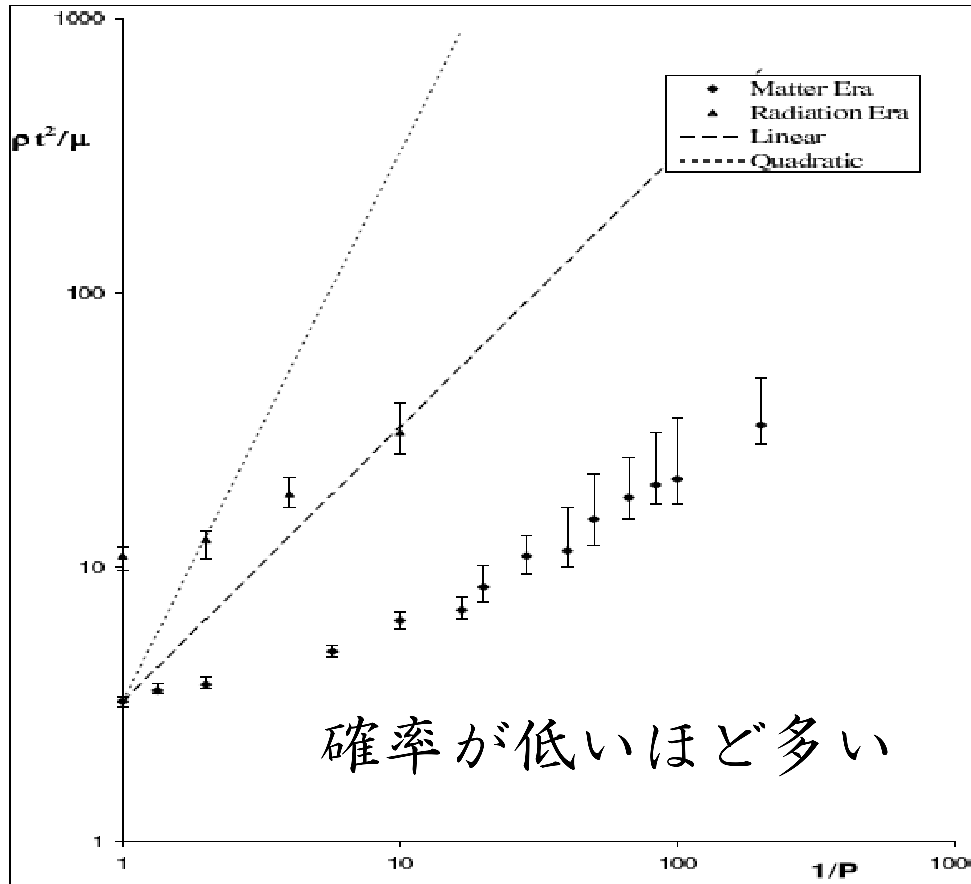
スケーリングするためには
どんどんループを作って
エネルギーを捨てなければ
ならない。

再結合確率低い
→ ループできにくい
→ 平衡点でストリング多い

P → horizon内の本数
μ → １本の重さ
観測的にPとμに制限。

（ただしシミュレーションも
解析的モデルもあまり収束
していない。）

スケーリングに到達したとき
horizon内に何本あるか？



Avgoustidis & Shellard, 2005

まとめ

cosmic stringの種類：field, F, D

・μ とPでcosmic stringを特徴づける

・Pから一意に決めることはできないが、
1より有意に小さかったらsuperstring！

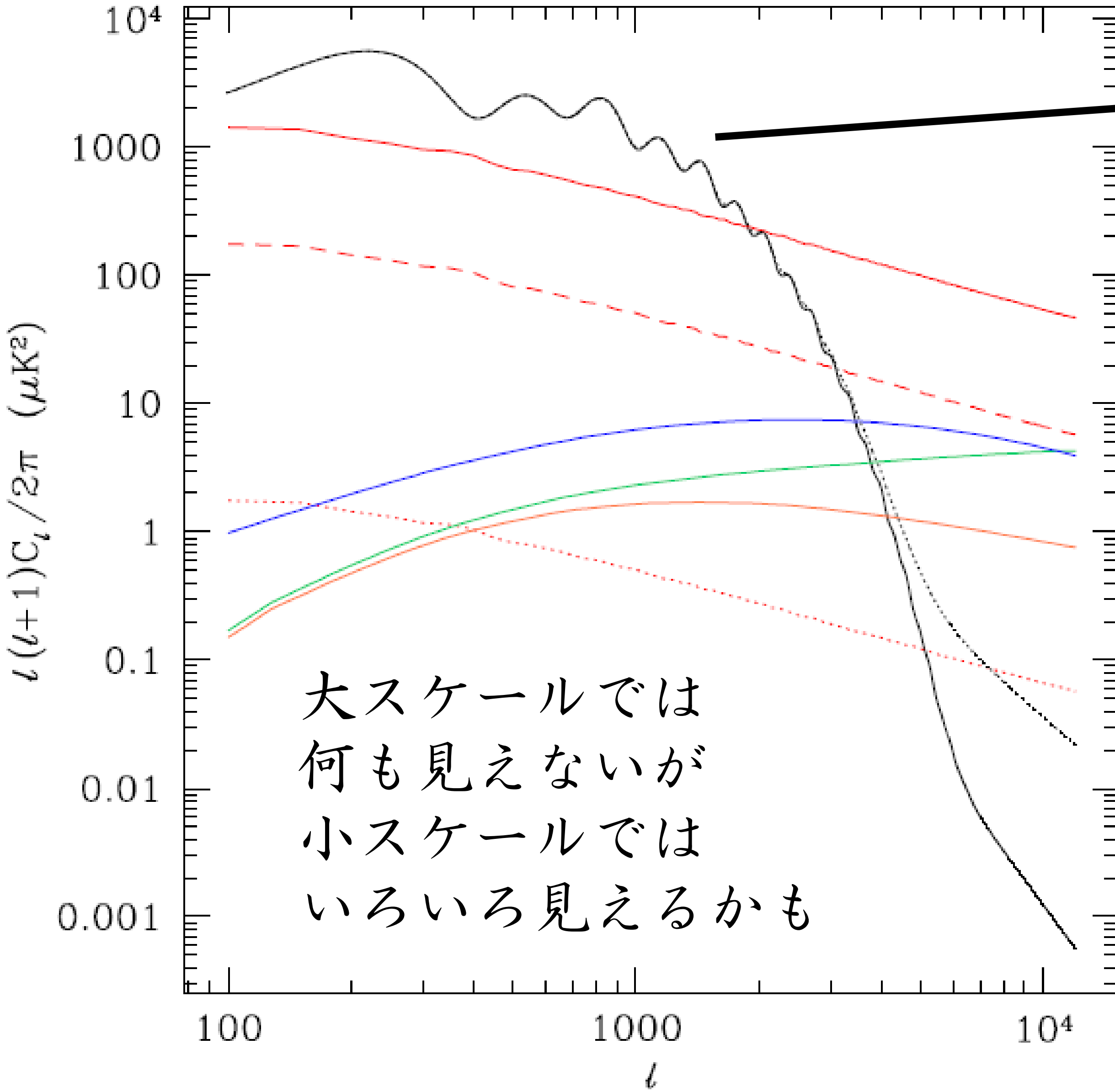
ネットワーク

・初期条件によらず、ある状態に落ち着く

・落ち着く先はPに依存する
→ Pにより予言が異なる（CMB・重力波）

3、cosmic string とCMB

CMBスペクトル



大スケールでは
何も見えないが
小スケールでは
いろいろ見えるかも

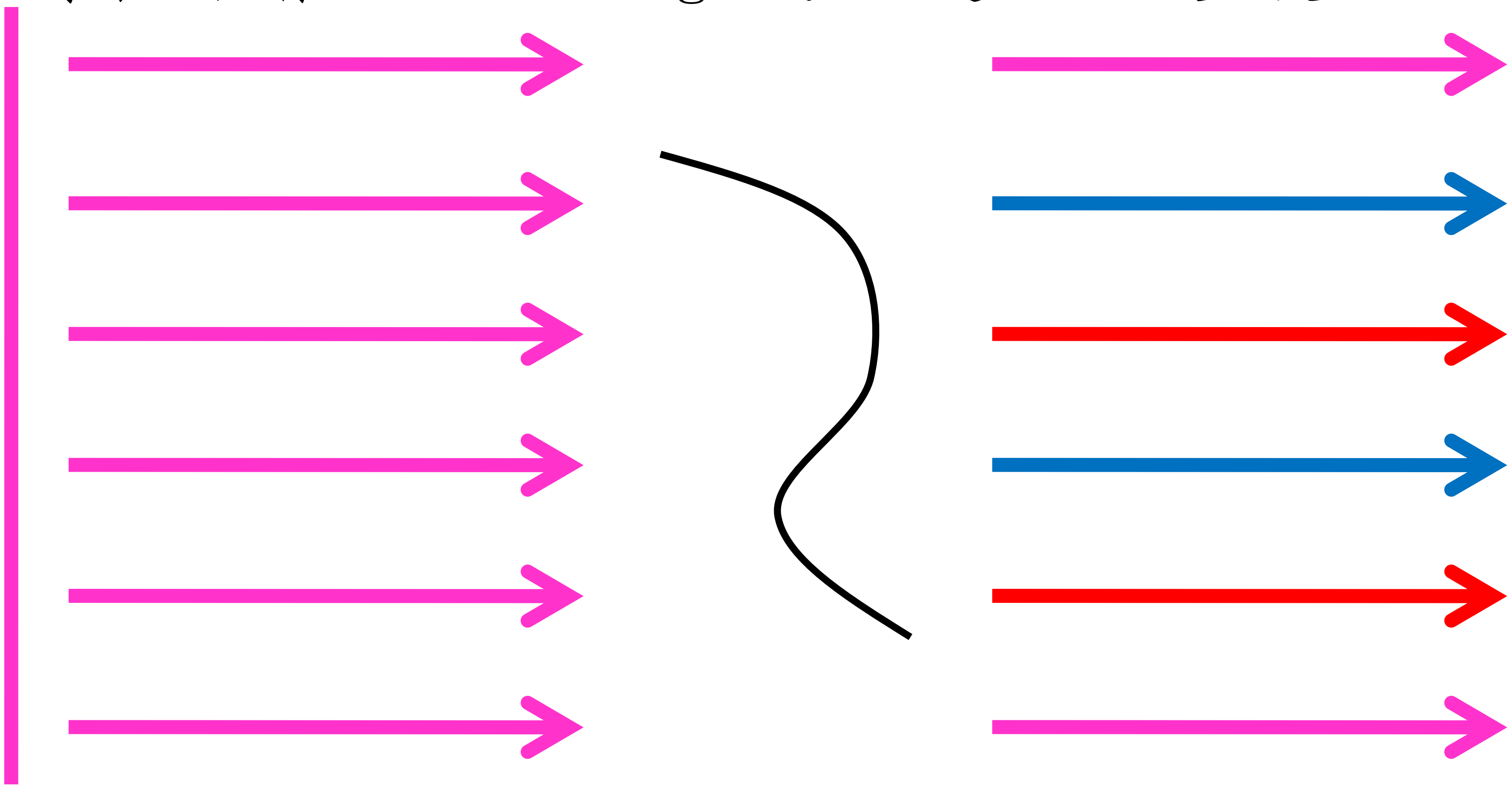
primary
小スケールで
シルク減衰

secondary
・cosmic string
・SZ
・OV

小スケール：
等方な放射が
何かを通過して
できる。

イメージ

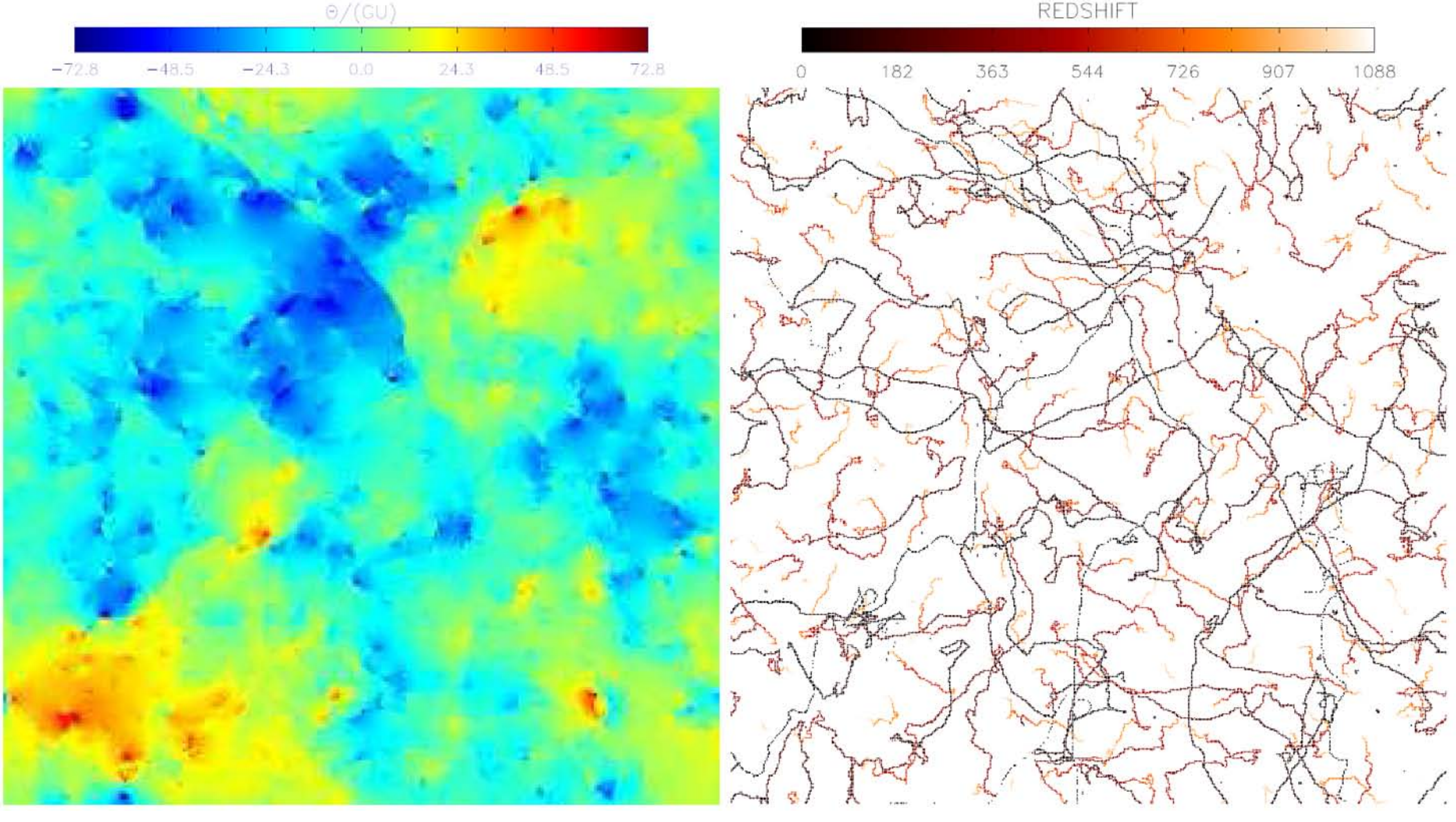
等方な放射がcosmic stringの近くを通ると温度が変わる



小スケールではsecondaryのISWだけ考えればよい
(プラズマの運動を考えなくてよい)

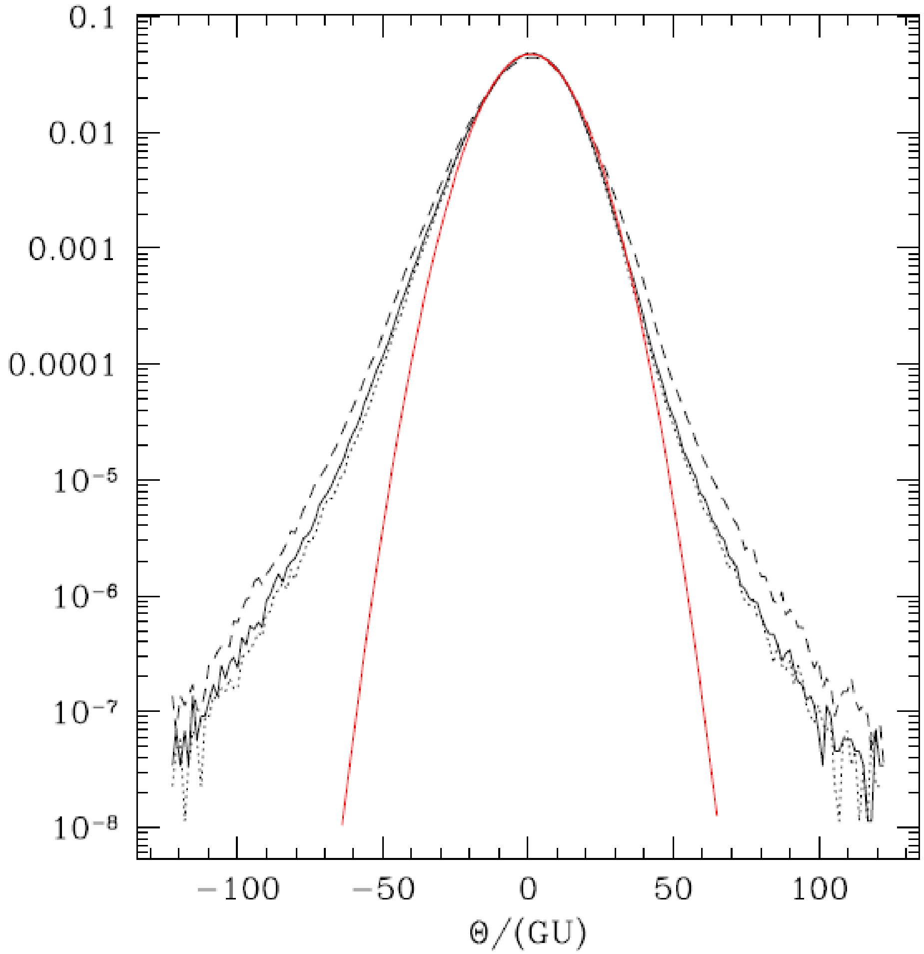
シミュレーション

Fraisse et al. (2008)によるシミュレーション
Nambu-Goto stringのdynamics (P=1) → 光子を伝播



１点関数

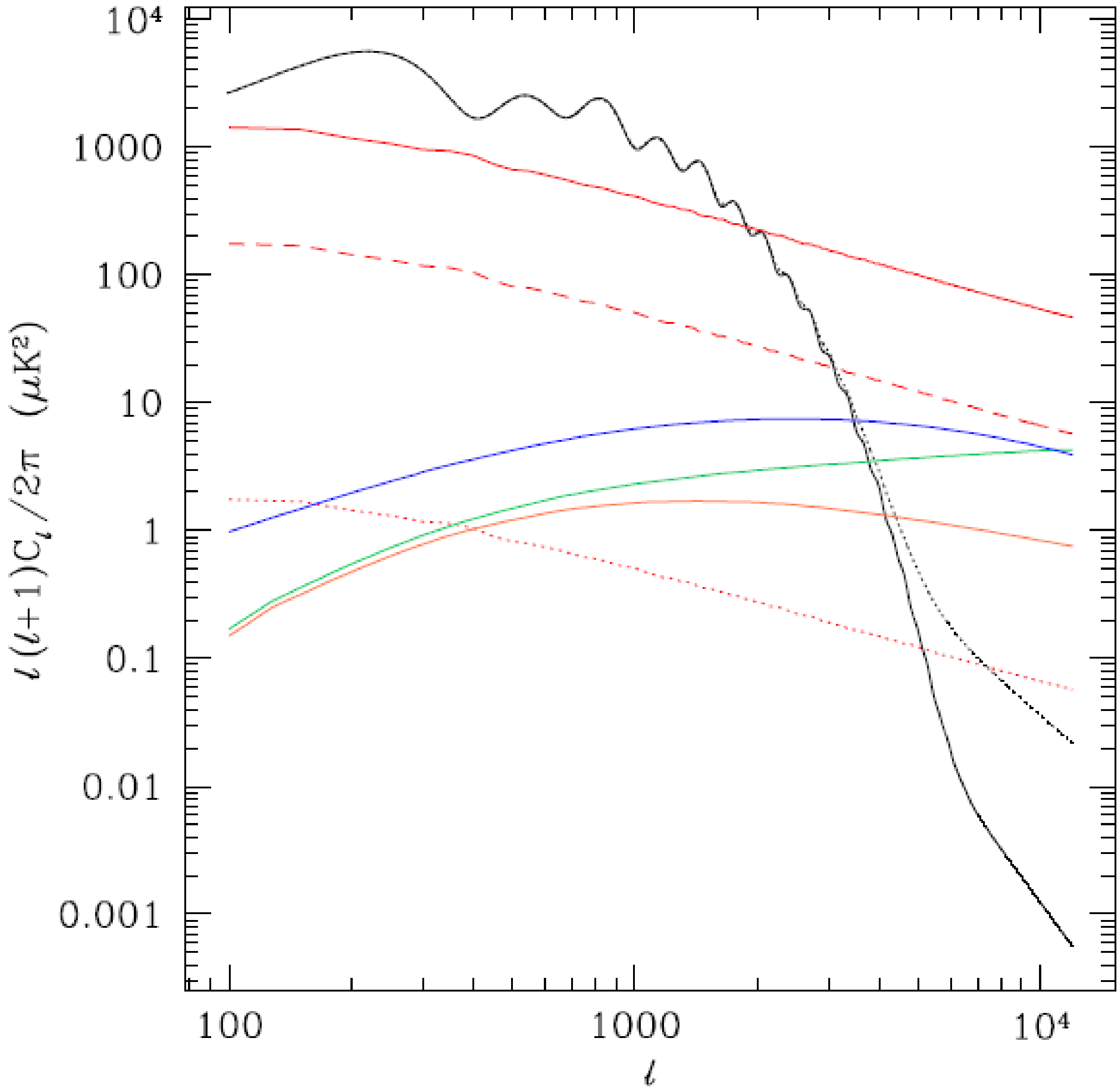
シミュレーションで得られた温度の１点関数
解像度0.42’（とんでもなく細かい）



シミュレーション
- 推奨 (solid line)
- loop全部入り (dashed line)
- loopなし (dotted line)
- Gaussian fit (red line)

- ゆらぎが小さいところではGaussianでよく合う
- ゆらぎが大きいところでnonGaussian tailがある
- negative skewness
- loopはあまり寄与しない
- nonGaussianはkink?

２点関数



primary
$G\mu = 2\times10^{-6}$
すでに否定
$G\mu = 7\times10^{-7}$
現在の上限
$G\mu = 7\times10^{-8}$
thermal SZ
kinetic SZ
OV

- μ^2 でスケール
- th-SZは差っぴける
- 後はnonGaussian
  B-modeで区別？

まとめ

CMBとcosmic string

・primaryは小スケールで減衰

・小スケールではISWだけ考えればよい

・１点関数でnonGaussian tailがある

・μが上限近くなら２点関数はdominant

シミュレーションの問題点

・dynamical range, resolution

・１つのモデルに対して多数回試行

・再結合確率依存性

→ 解析的なモデルを作って再結合確率依存性を見たい

４、CMBゆらぎの
再結合確率依存性

やること

簡単な解析的モデルでCMBの１点関数を計算する。

・ネットワークのモデル化

→ 既成のスケーリングモデルの拡張

→ シミュレーションとよく合う（P < 1も含めて）

・CMBゆらぎのモデル化

→ オリジナル

→ まずP = 1でFraisse et al.と合うかどうか見る

→ 合えばP < 1に拡張

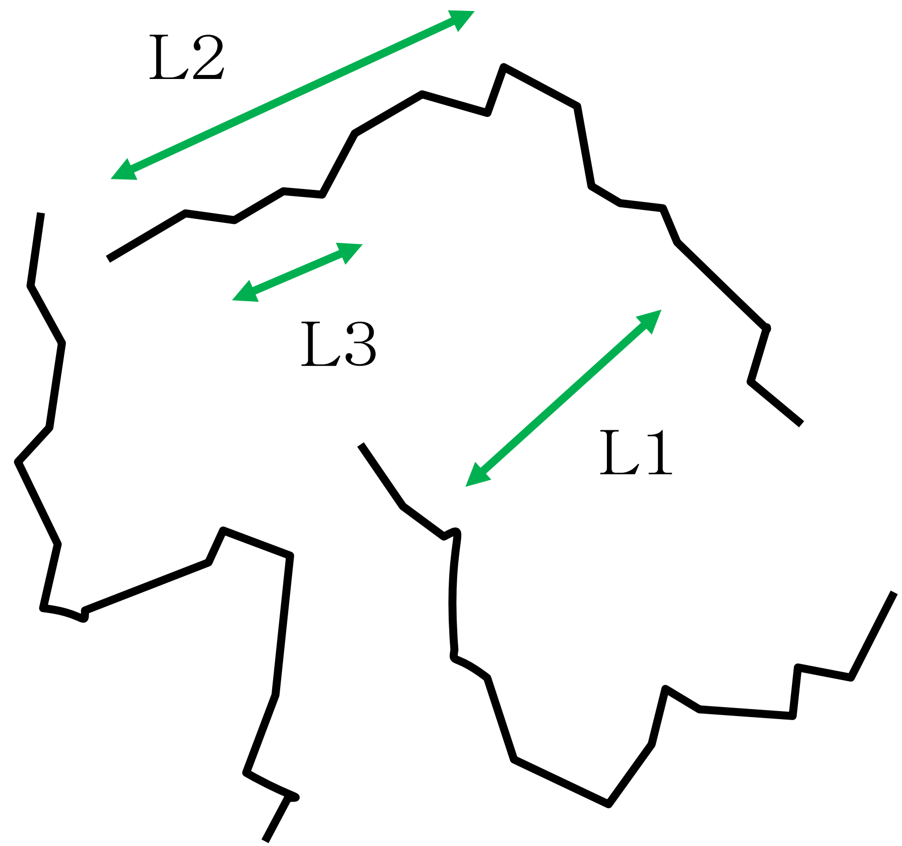
→ １点関数のP依存性がわかる

ネットワークの解析的モデル

次のように簡単化してモデル化
- 真っ直ぐなsegmentだけ
- つながりは無視
- loopはすぐdecay（無視）
- L1: segment間の平均距離
- L2: segmentの長さ
- L3: kink間の平均距離
- v: segmentの平均速度

→ velocity-three scale model
これらを時間の関数として
発展方程式を立てて解く

シミュレーションでは
$L1 \sim L2 \sim 1/H \gg L3,\ v \sim 0.5$



発展方程式の雰囲気①

いろいろな量がL1, L2, L3で表される

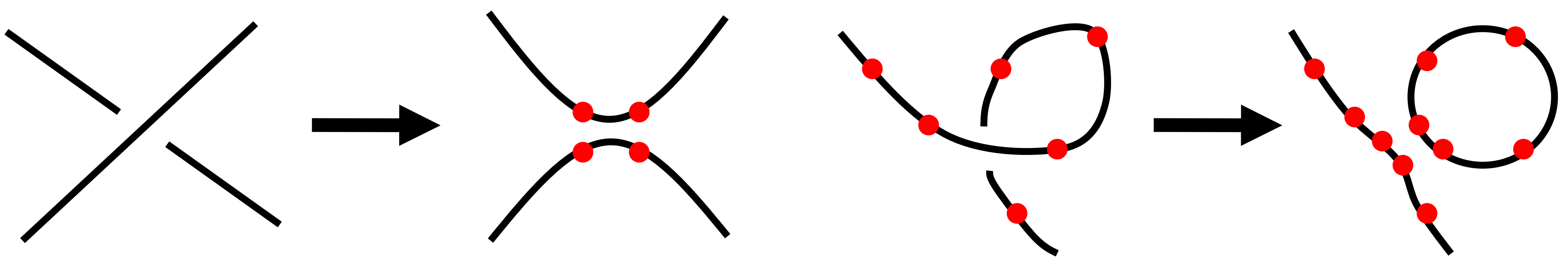
$$n_{\mathrm{CS}} = \frac{1}{L_1^{\,3}}, \quad N_{\mathrm{CS}} = \frac{1}{H^3 L_1^{\,3}}, \quad \rho_{\mathrm{CS}} = \frac{\mu L_2}{L_1^{\,3}}, \quad N_{\mathrm{kink}} = \frac{1}{H^3 L_1^{\,3}} \frac{L_2}{L_3}$$

segmentのエネルギー密度の発展方程式

$$\frac{d\rho_{\mathrm{CS}}}{dt} = \text{（宇宙膨張で薄まる）} + \text{（loop形成で減る）}$$

kink数の発展方程式

$$\frac{dN_{\mathrm{kink}}}{dt} = \text{（宇宙膨張で薄まる）} + \text{（loop形成で増減）} + \text{（重力波放出で減る）}$$



発展方程式の雰囲気②

segmentのエネルギー密度の発展方程式

$$\frac{d\rho_{\mathrm{CS}}}{dt} = -2H\rho_{\mathrm{CS}} - C\frac{v}{L_1}\rho_{\mathrm{CS}}$$

kink数の発展方程式

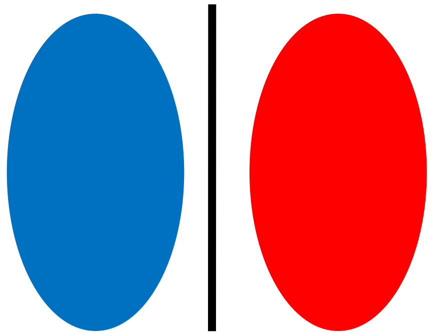
$$\frac{dN_{\mathrm{kink}}}{dt} = (2-\alpha\frac{L_2}{L_3})\frac{v}{L_1}\frac{1}{H^3L_1{}^3} - \frac{1}{\tau_{\mathrm{GW}}}N_{\mathrm{kink}} \qquad \tau_{\mathrm{GW}} = \Gamma\frac{L_3}{G\mu}$$

これを解くとNcsやNkinkなどが定数に近づくのがわかる。
C, α, Γなどを調節してシミュレーションに合わせる。
Ncs ～ 5, Nkink ～ 100

温度ゆらぎ

segment周りの温度ゆらぎ

$$\Delta_{\rm CS} = 4\pi \frac{v}{\sqrt{1-v^2}} \alpha G\mu$$

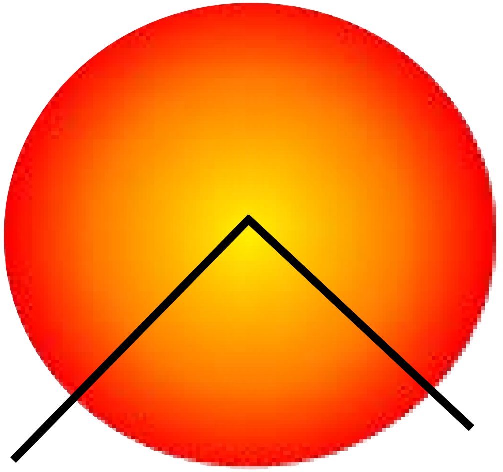


kink周りの温度ゆらぎ

$$\Delta_{\rm kink} = 4\alpha G\mu \log \frac{\delta}{L_{\rm kink}}$$

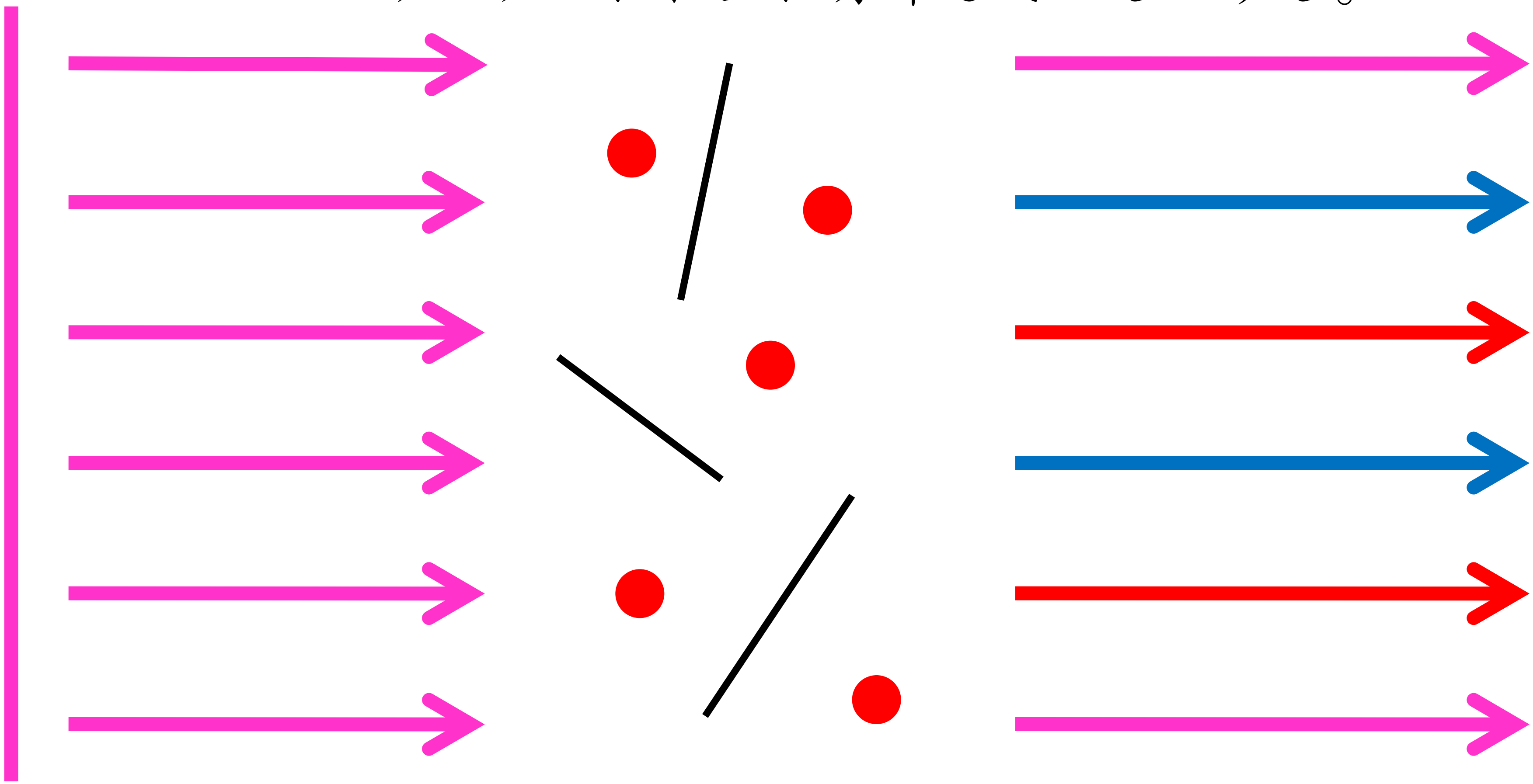
δ ：impact parameter

kink付近で対数的に
温度ゆらぎが大きくなる



イメージ

segmentとkinkがhorizon内にNcs・Nkink個ランダムに独立に分布しているとする。



目論見：
segmentの近くを何回も通過 → random walk → Gaussian
kinkの近くをたまに通過 → nonGaussian tail

１点関数の計算

一般に数密度n、断面積σの粒子に対するoptical depthは

$$\tau = \int n\sigma d\lambda$$

segmentを断面積L2^{2}の粒子と思うと

$$\tau_{\rm CS} = \pi N_{\rm CS} H^2 L_2^2 \log\left(1 + z_{\rm rec}\right) \approx 20$$

となって十分散乱し、random walkとなる。分散は

$$\sigma_{\rm Gauss} = \Delta_{\rm CS}\sqrt{\tau_{\rm CS}} \approx 17G\mu$$

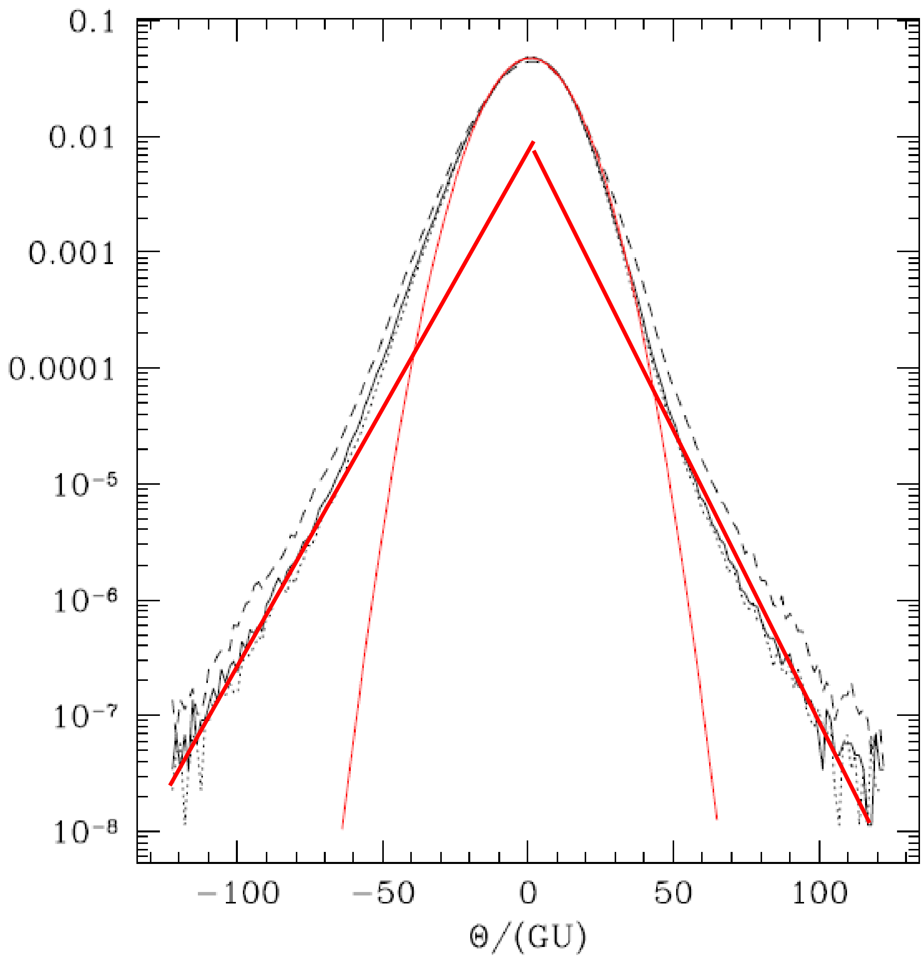
となる。一方kinkの方では次のようなtailを得る。

$$P_{\rm kink}(\Delta) = Ae^{-\Delta/\Delta_0}$$

$$A = \frac{\pi N_{\rm CS}^2 \log\left(1 + z_{\rm rec}\right)}{N_{\rm kink}\Delta_0} \approx 2(G\mu)^{-1}$$

$$\Delta_0 = \frac{2\alpha}{\sqrt{1 - v^2}} G\mu \approx 2.3G\mu$$

１点関数の比較



$$P_{\mathrm{G}}(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$P_{\mathrm{NG}}(\Delta) = Ae^{-\Delta/\Delta_0}$$

$$\sigma_{\mathrm{sim}} \approx (12-13)G\mu$$

$$A_{\mathrm{sim}} \approx 0.01(G\mu)^{-1}$$

$$\Delta_{0,\mathrm{sim}} \approx 7.2G\mu$$

$$\sigma_{\mathrm{th}} \approx 17G\mu$$

$$A_{\mathrm{th}} \approx 2(G\mu)^{-1}$$

$$\Delta_{0,\mathrm{th}} \approx 2.3G\mu$$

Gaussian部分はよく合う。
nonGaussianがちょっと・・。
kinkが効きすぎ。

再結合確率を考慮した発展方程式

P＜1だと衝突してもloopを形成しない確率がある。

segmentのエネルギー密度の発展方程式

$$\frac{d\rho_{\mathrm{CS}}}{dt} = -2H\rho_{\mathrm{CS}} - C\frac{v}{L_1}\rho_{\mathrm{CS}}$$

×P

kink数の発展方程式

$$\frac{dN_{\mathrm{kink}}}{dt} = (2-\alpha\frac{L_2}{L_3})\frac{v}{L_1}\frac{1}{H^3L_1^3} - \frac{1}{\tau_{\mathrm{GW}}}N_{\mathrm{kink}} \qquad \tau_{\mathrm{GW}} = \Gamma\frac{L_3}{G\mu}$$

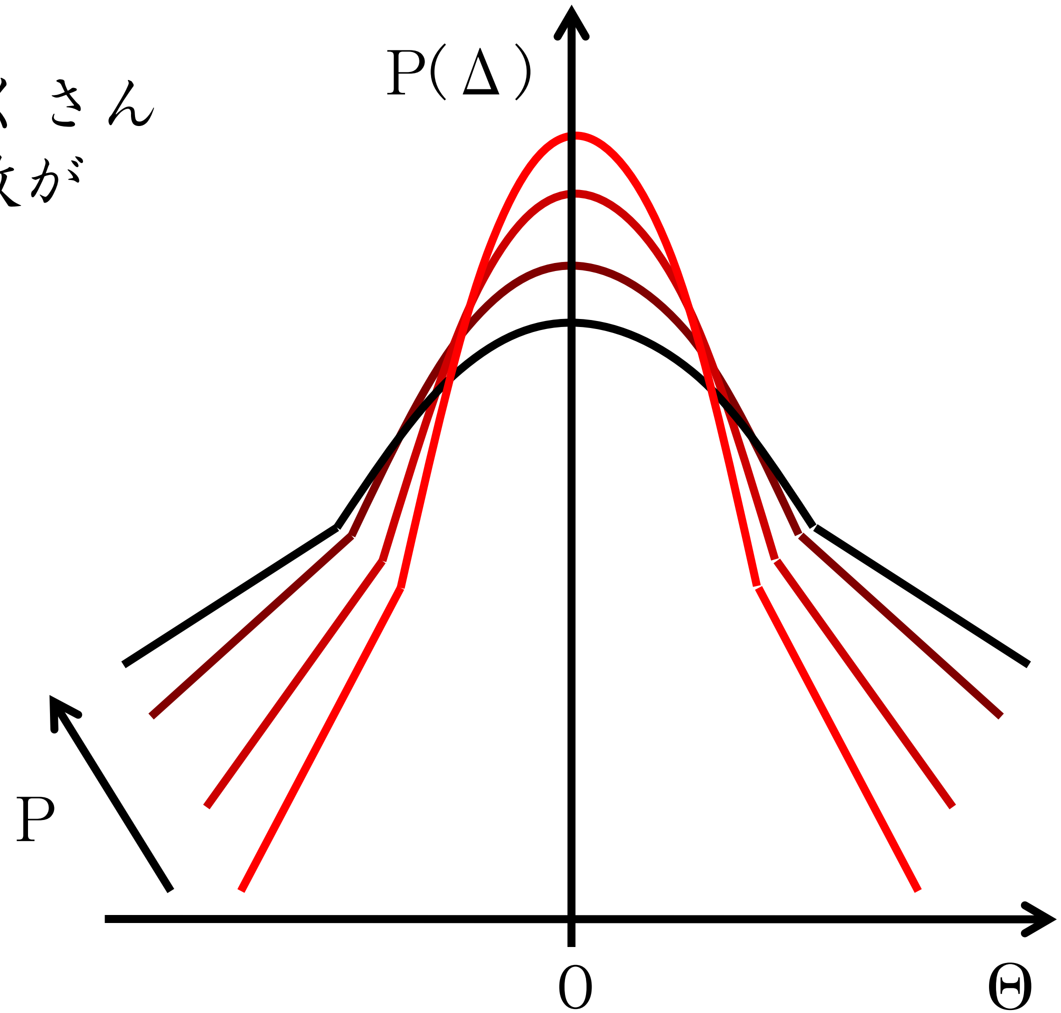
×P

C, α, ΓはP=1のものを使うとすると、これを解いて
Ncs(P)やNkink(P)が求まる。

予想

Pが小さいとstringがたくさん残るのでGaussianの分散が大きくなりそう。

kinkは？



まとめ

簡単なモデル化でCMBの１点関数を計算。

・Gaussian部分はよく合う

・nonGaussian部分はいまいち

・もう少し考えて合うようになったらP＜１に拡張

その後

・２点関数も簡単に計算できそう

・ほかにもいろいろ

これを書きたい