

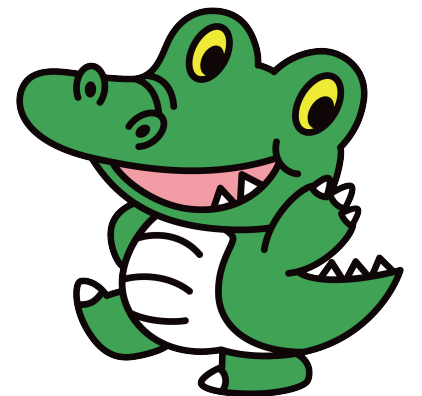
GUTスケール準安定宇宙ひもの 崩壊率とナノヘルツ背景重力波

濱田 佑 (大阪大学)

arXiv:2606.03008 (to appear in JHEP)
w/ Valerie Domcke (CERN)



THE UNIVERSITY OF
OSAKA



大阪大学
「ワニ博士」

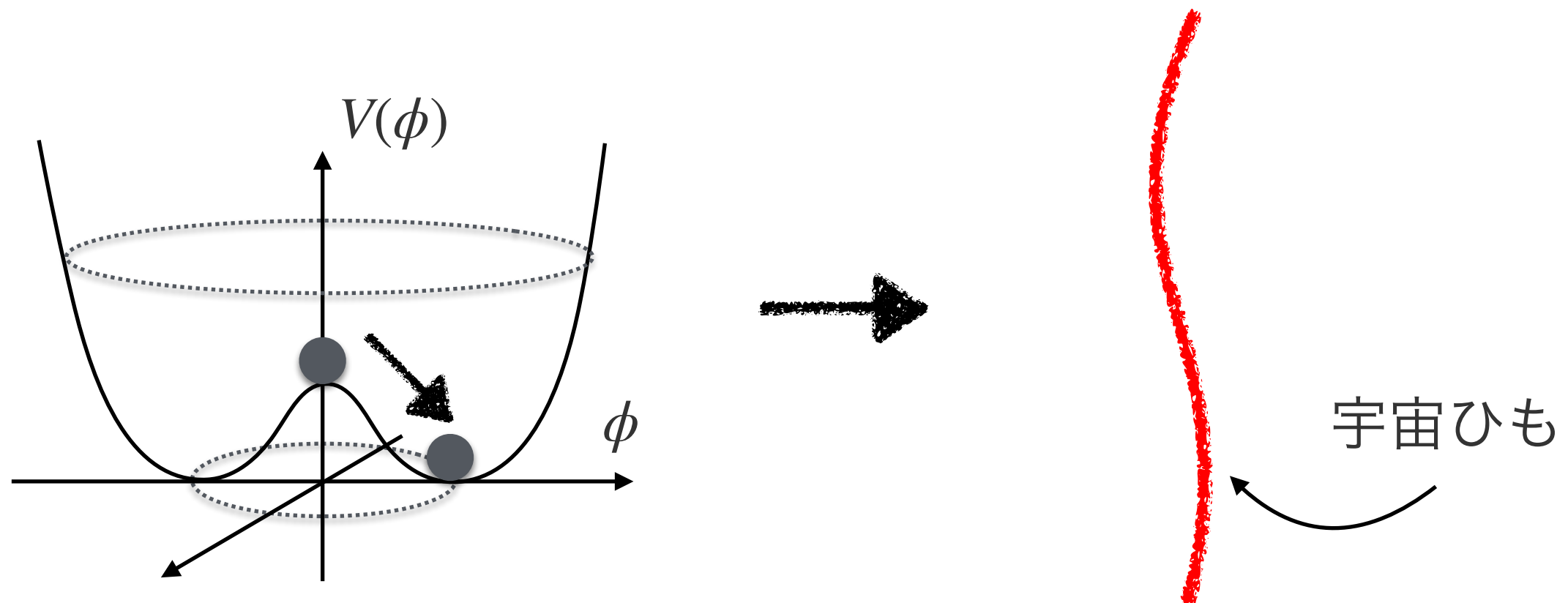
Introduction

宇宙ひも(Cosmic string)

[Abrikosov '58]

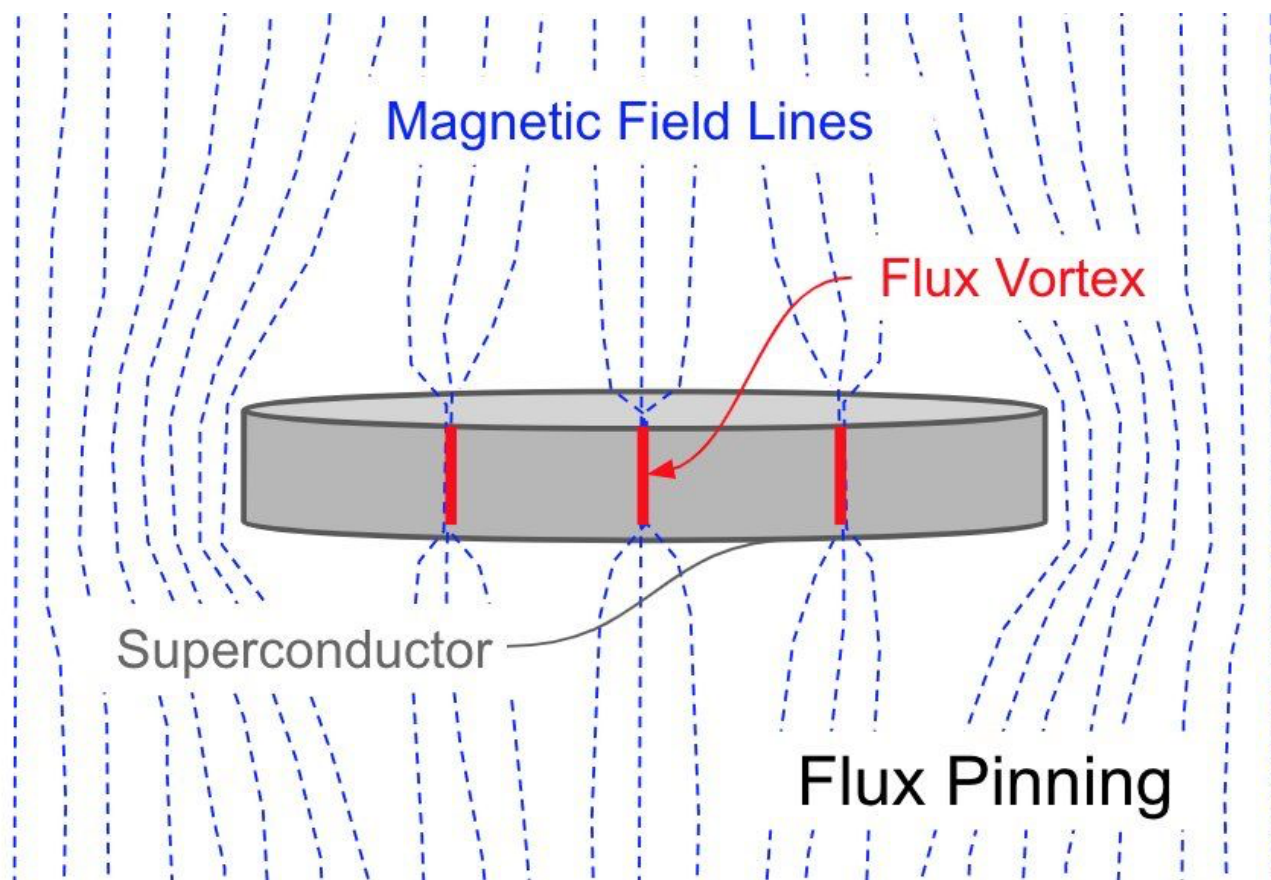
[Nielsen-Olesen '73]

- ひも状のソリトン (励起が1次元方向に伸びている)
- 場の非自明な励起状態 $\longleftrightarrow$ 粒子(摂動的な励起)
- $U(1)$ 対称性が自発的に破れる際に生じる



身近な例：

- 超伝導の磁場渦



- 超流動の量子渦



- いずれも $U(1)$ のSSBが背後にある

素粒子と「ひも」

- 超初期宇宙では何らかの $U(1)$ 対称性が破れたかも

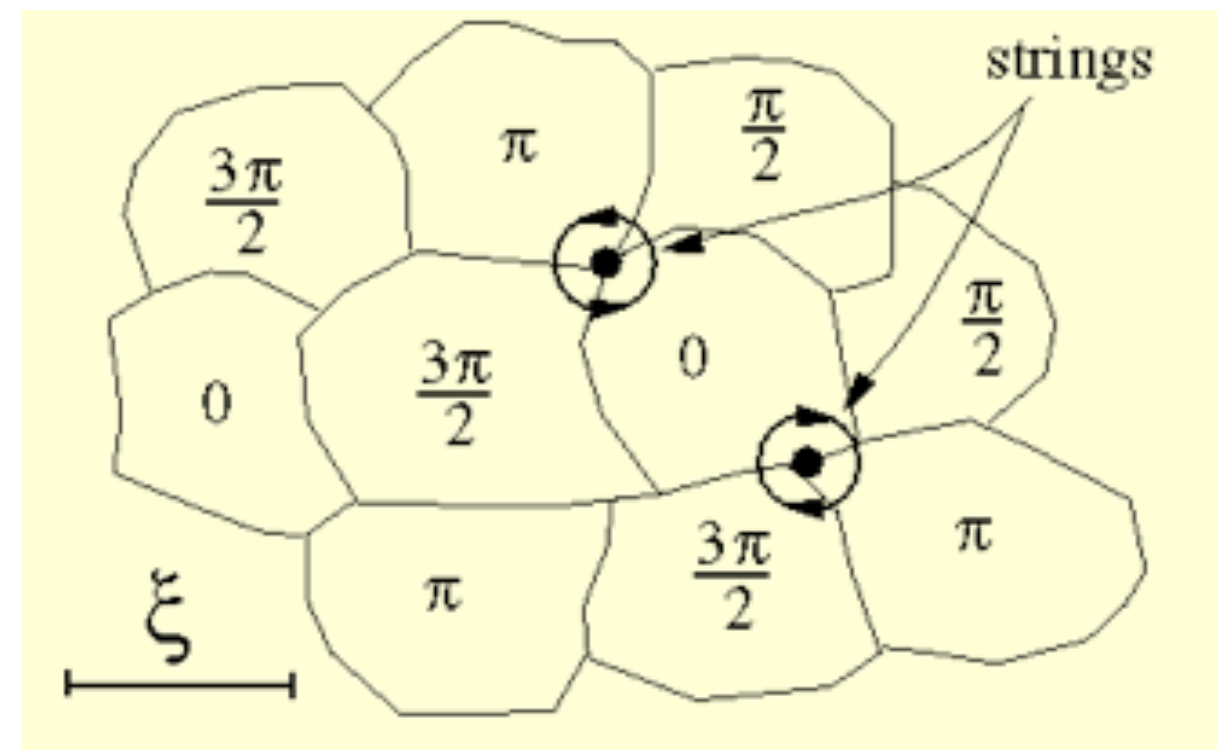
Ex1. $SO(10)$ GUT: $SO(10) \rightarrow G_{\text{SM}} \times \underline{U(1)_{B-L}} \rightarrow G_{\text{SM}}$

Ex2. QCD アクシオン: $G_{\text{SM}} \times \underline{U(1)_{PQ}} \rightarrow G_{\text{SM}}$

- 相転移は一様には起き得ない
→ 欠陥としてソリトンが生じる

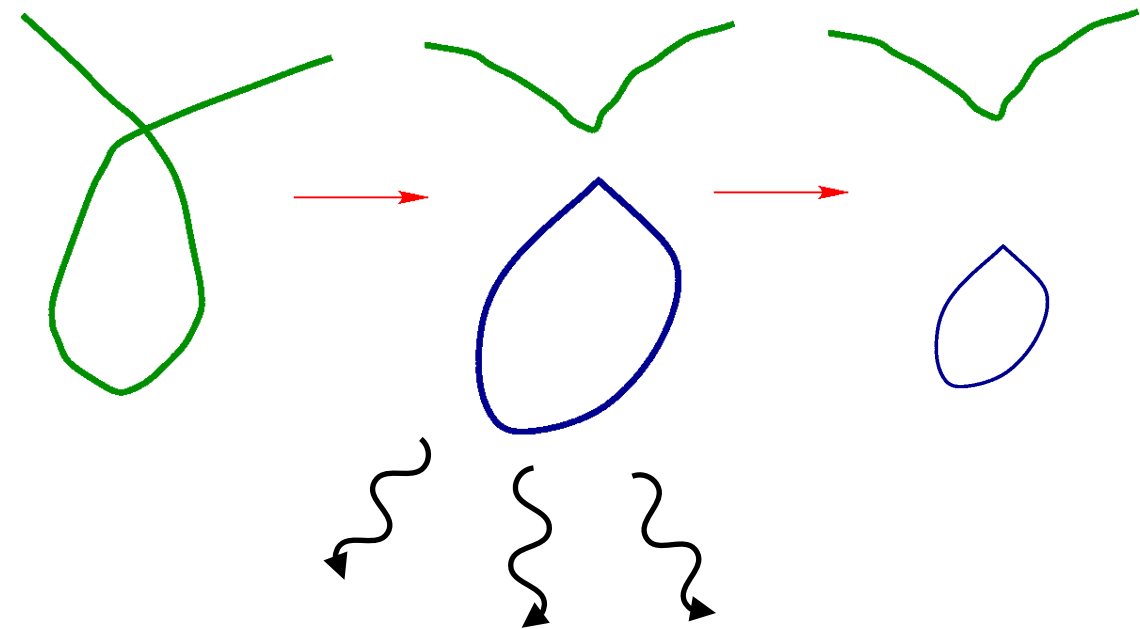
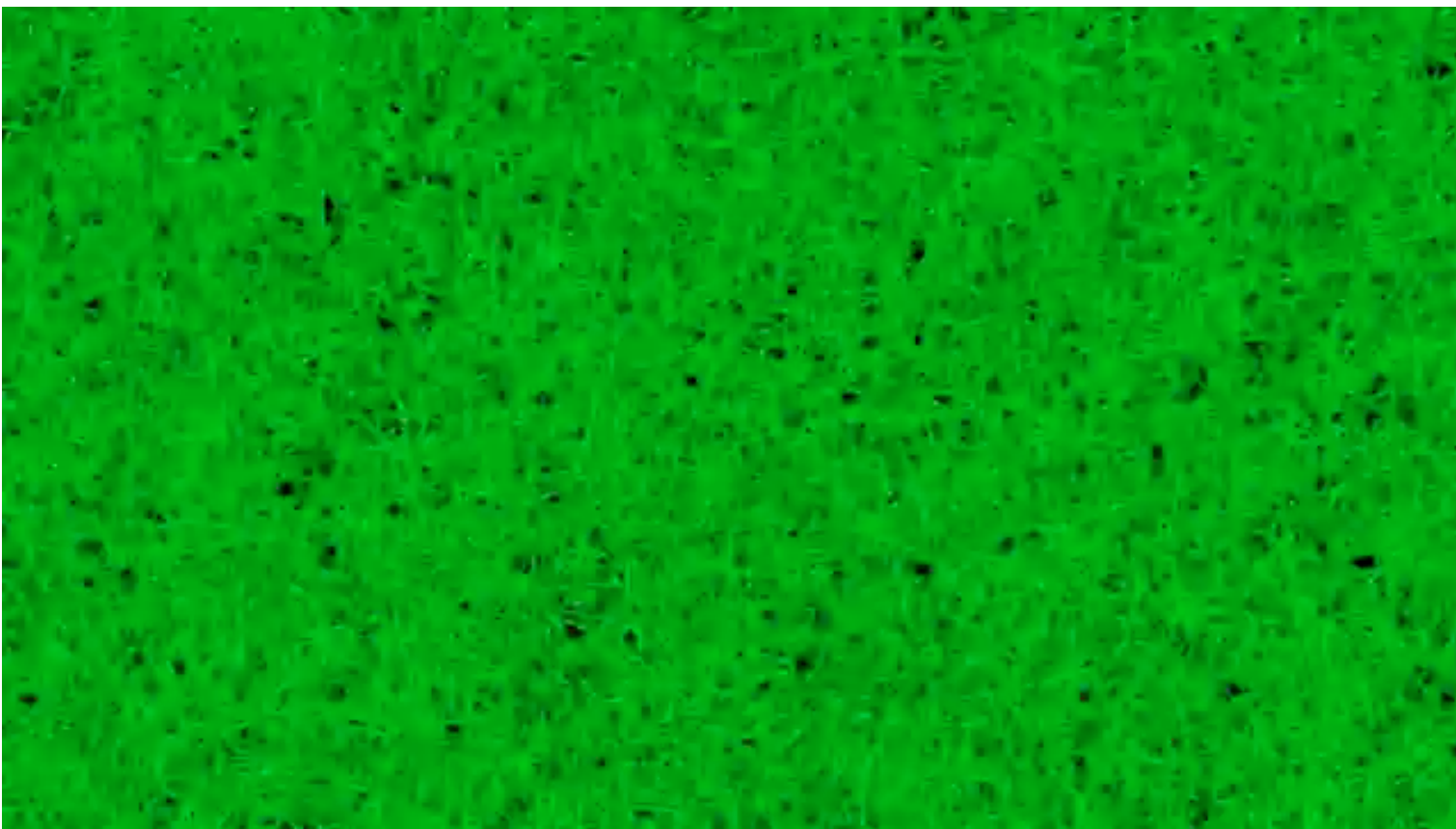
[Kibble '76] [Zurek '85]

宇宙ひもが新物理の帰結として現れる



宇宙ひもと重力波

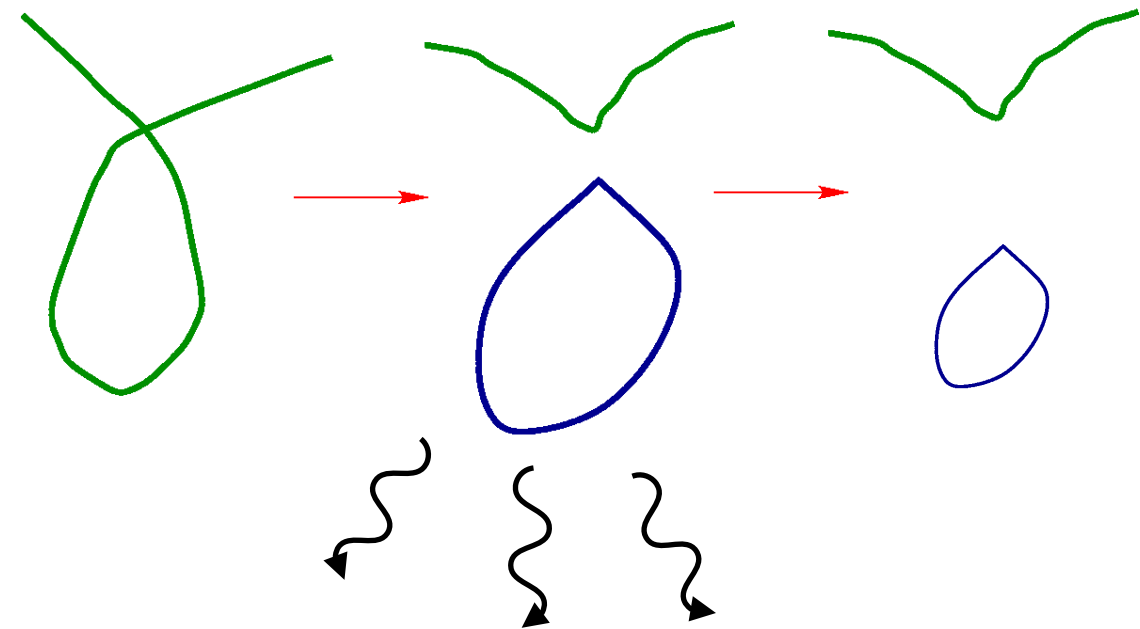
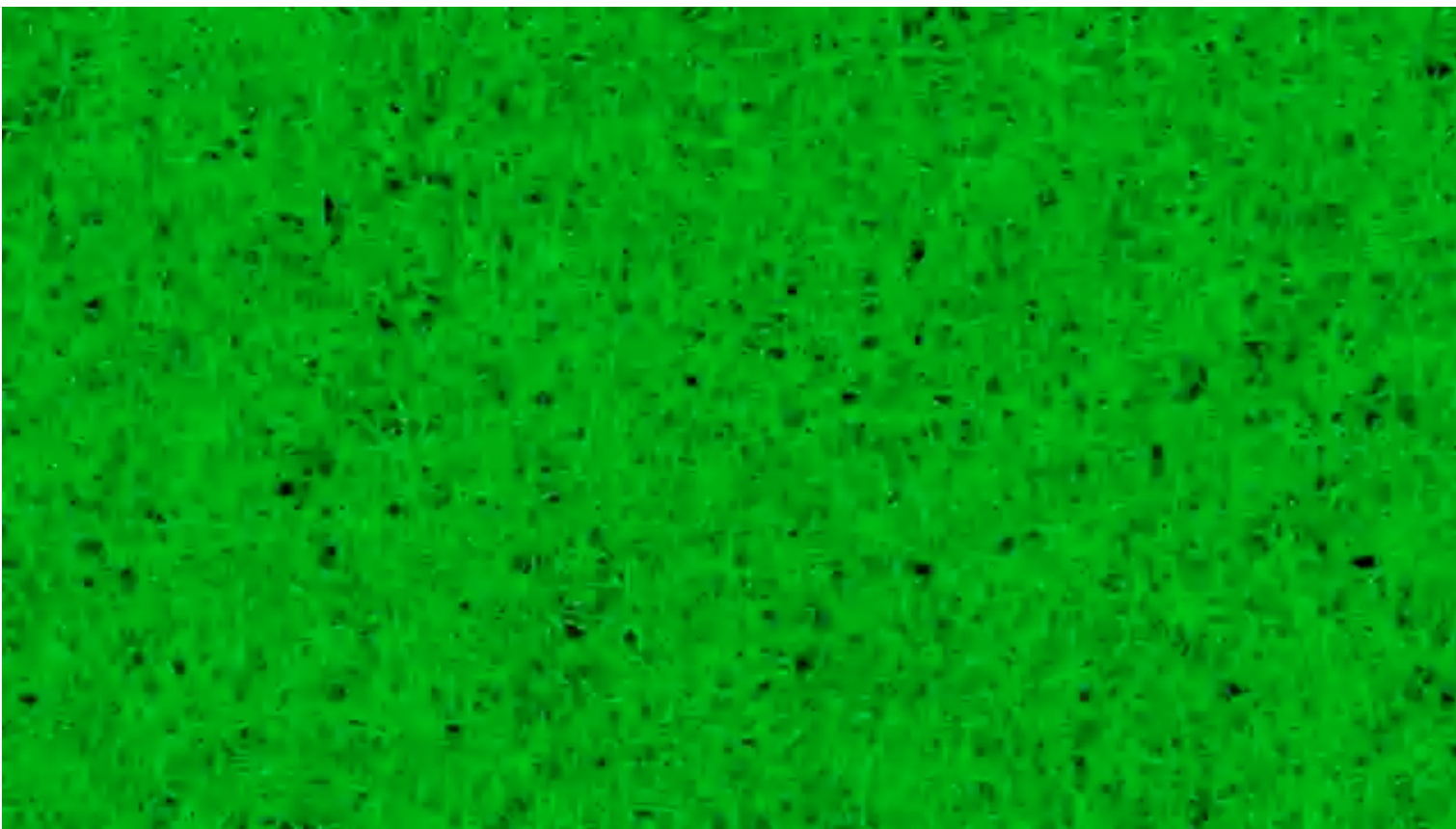
- 相転移時に生成された宇宙ひもは、現在の宇宙まで残りながら重力波を出す



Gravitational Wave/
Particle

宇宙ひもと重力波

- 相転移時に生成された宇宙ひもは、現在の宇宙まで残りながら重力波を出す



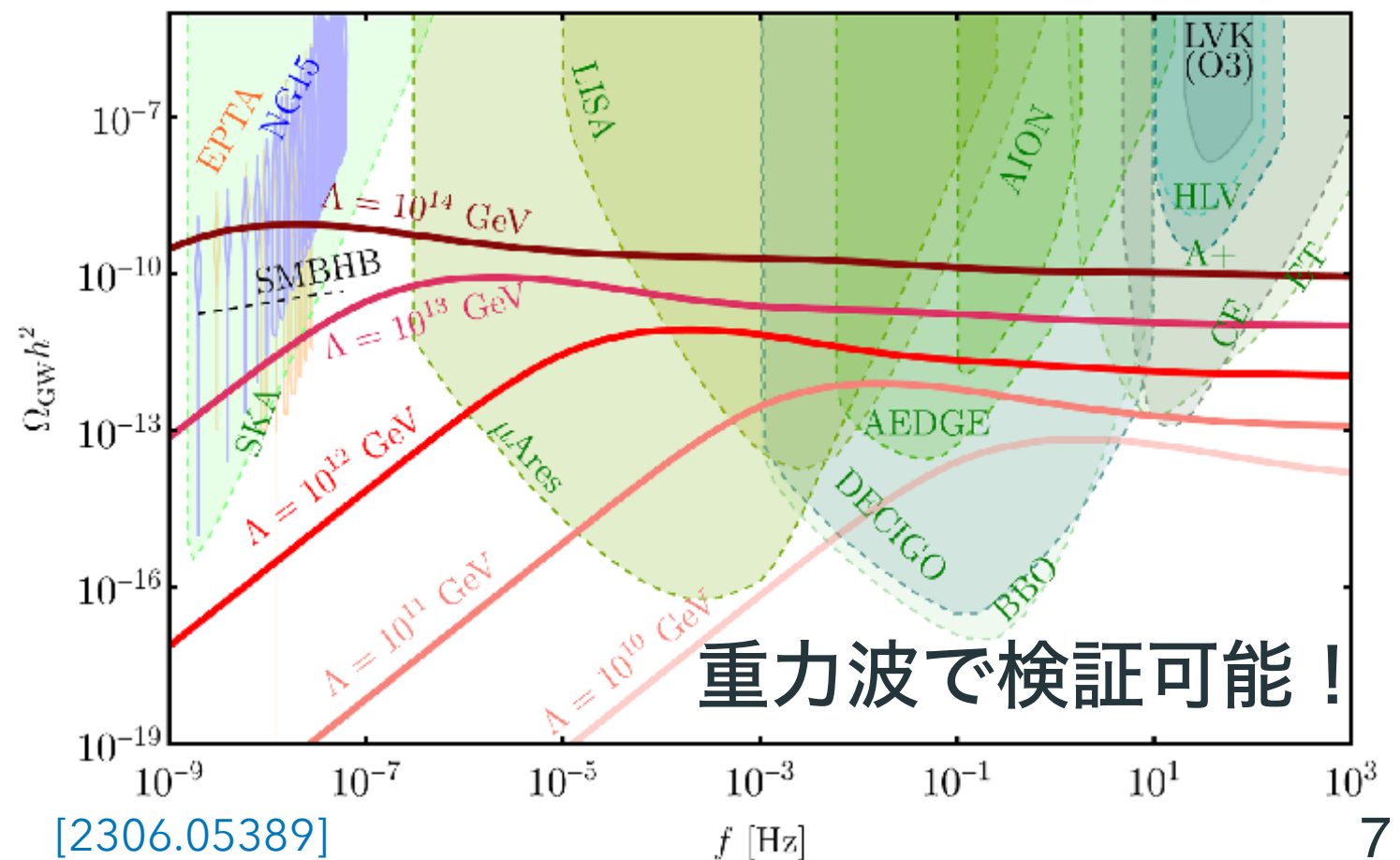
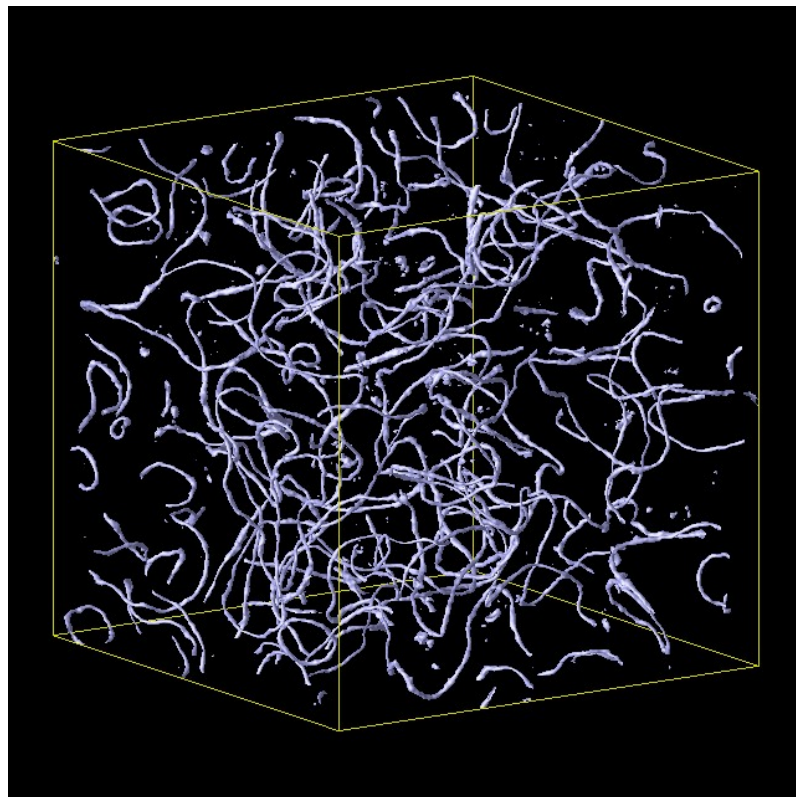
Gravitational Wave/
Particle

宇宙ひもと重力波

- GW spectrum observed today: $\mu \sim v_{U(1)}^2$: string tension

$$\frac{\rho_{\text{GW},0}(f)}{\rho_{\text{tot},0}} \simeq \frac{(G\mu)^2}{H_0^2} \int_{t_i}^{t_0} dt \int d\ell \left(\frac{a(t)}{a(t_0)} \right)^4 n_{\text{loop}}(t, \ell)$$

現在 ← very flat spectrum → 過去



Plan of talk

- Introduction
- Pulsar Timing Array
- Metastable cosmic string
- Summary

Pulsar Timing Array

Pulsar Timing Array (PTA)

[NANOGrav, InPTA, EPTA, PPTA, CPTA, 2023]

Physics

ABOUT BROWSE PRESS COLLECTIONS

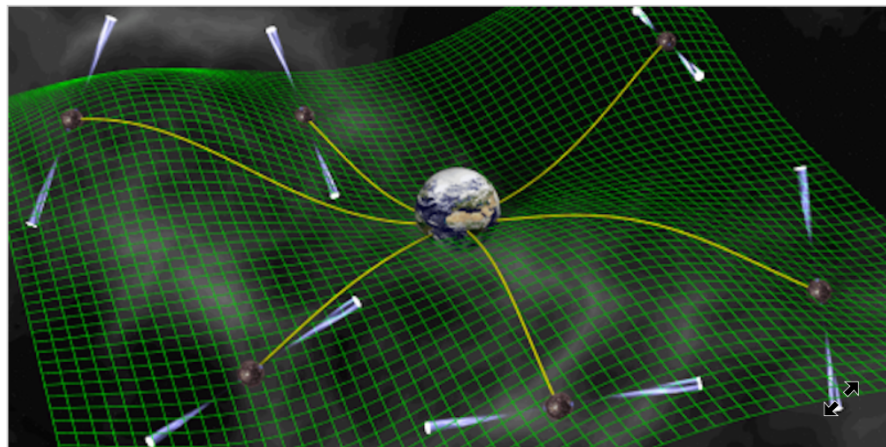
Search articles

RESEARCH NEWS

Researchers Capture Gravitational-Wave Background with Pulsar “Antennae”

June 29, 2023 • Physics 16, 118

Four independent collaborations have spotted a background of gravitational waves that passes through our Galaxy, opening a new window on the astrophysical and cosmological processes that could produce such waves.

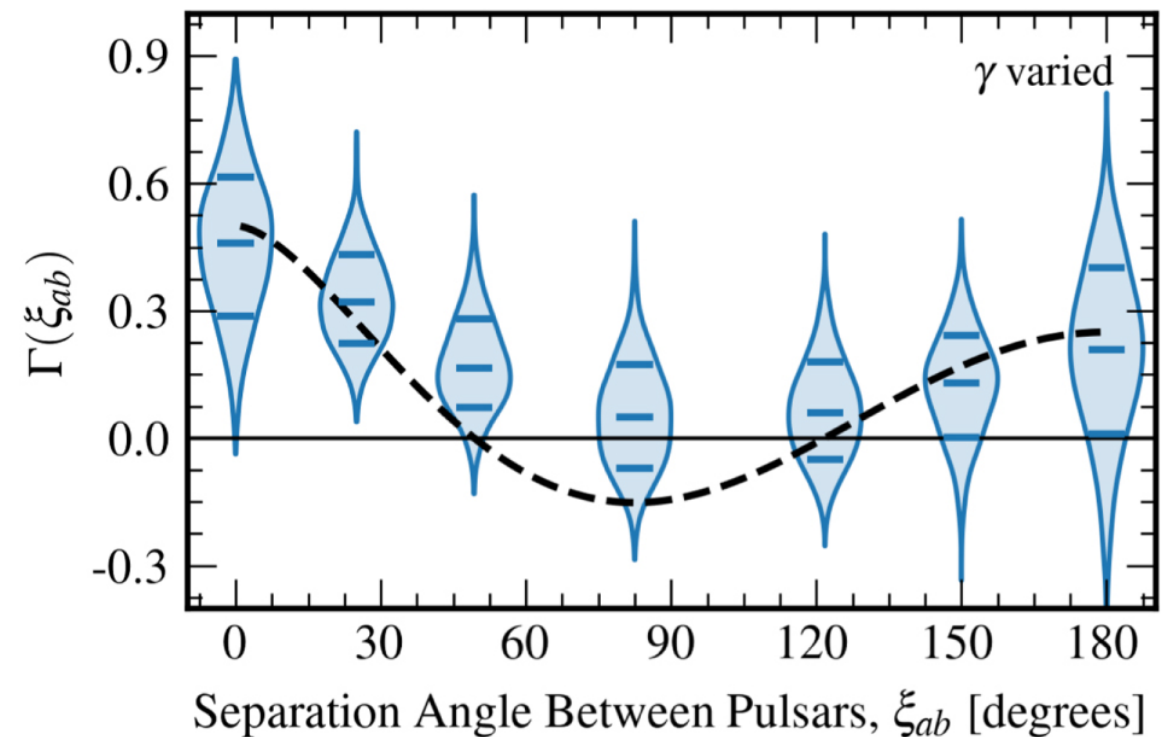


D. Champion/Max Planck Institute for Radio Astronomy

パルサータイミングのずれを測る：

$$\delta t_a \equiv t_a^{\text{obs}} - t_a^{\text{model}}$$

[NANOGrav, 2306.16213]



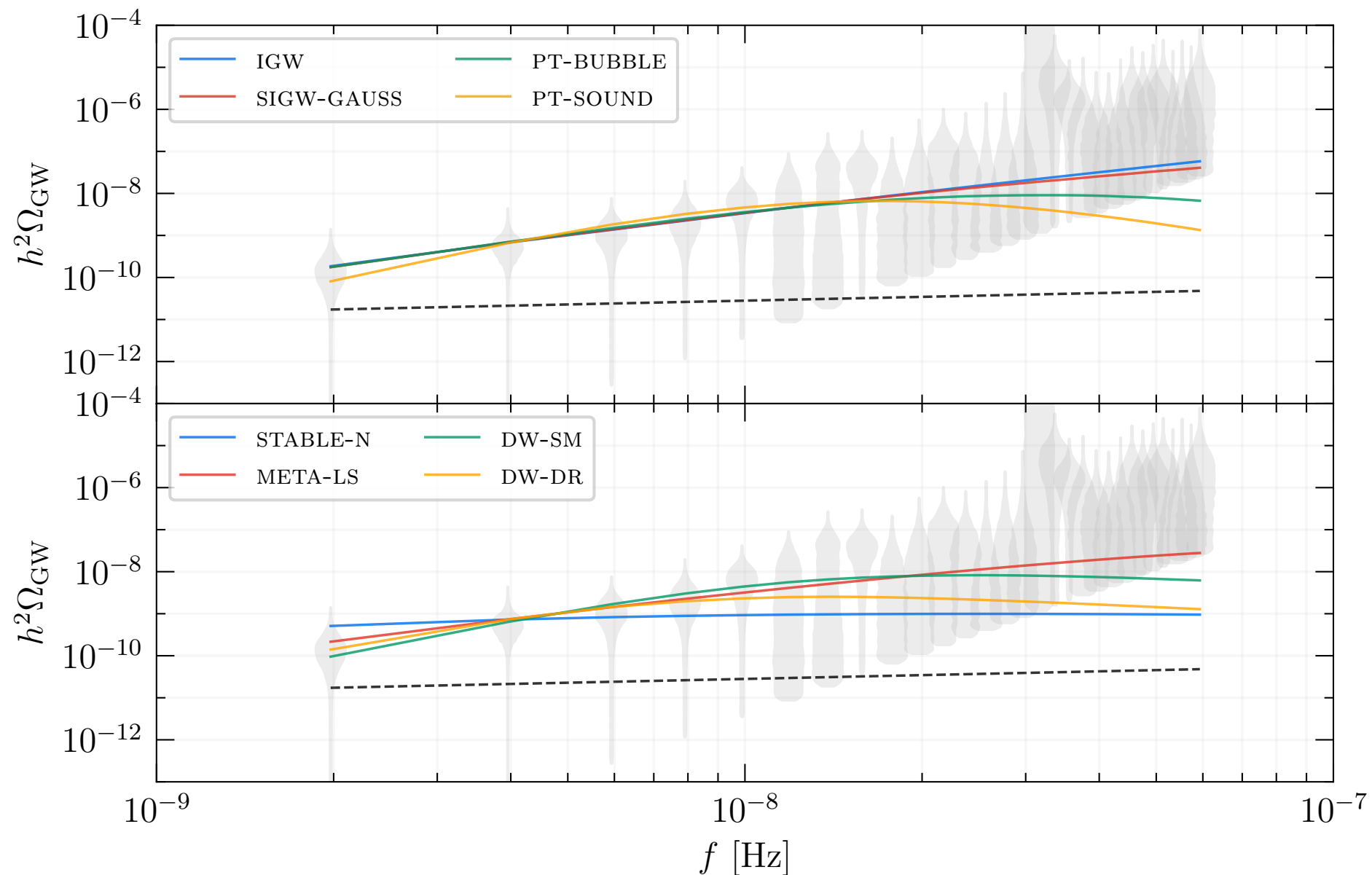
背景重力波を仮定した理論予言
(Hellings-Downs)と一致

→背景重力波の証拠 (3-4 σ)

What is the source?

[NANOGrav, 2306.16219]

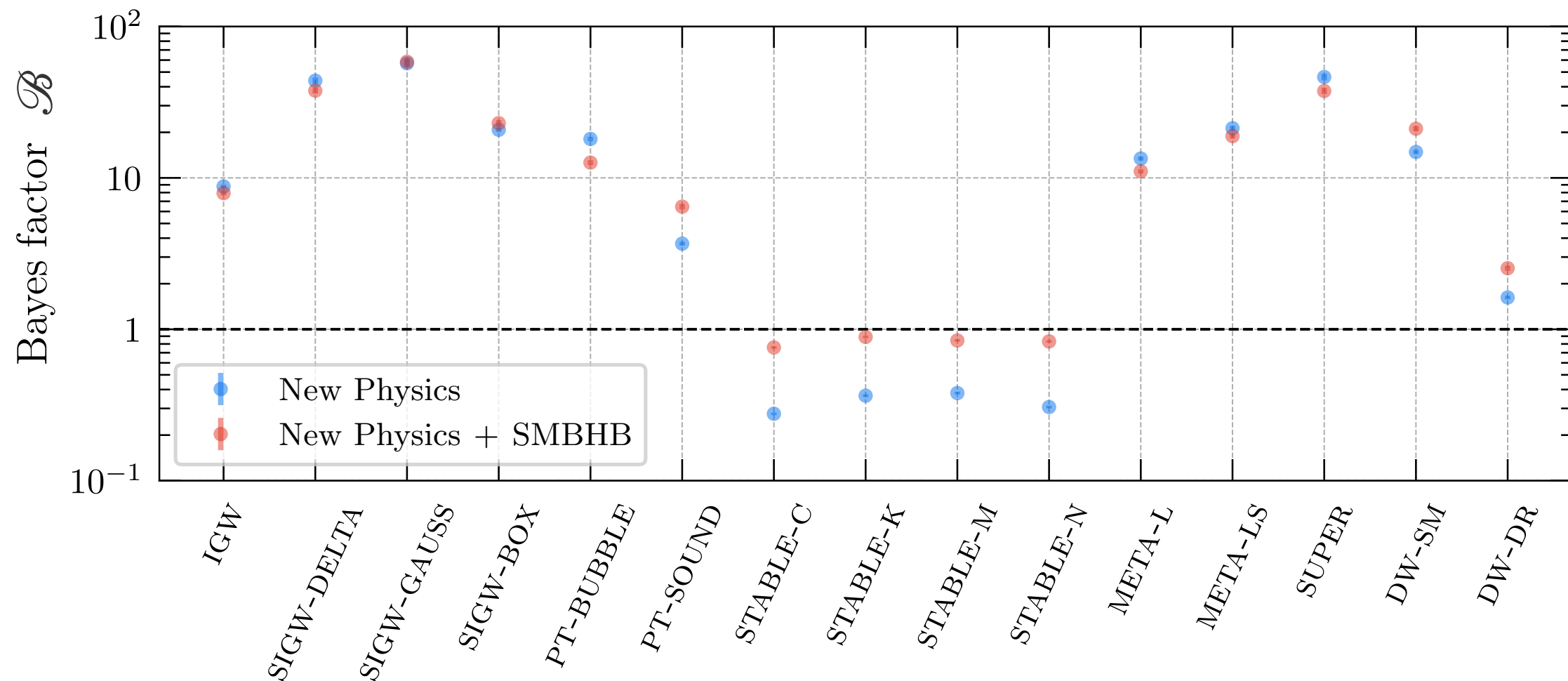
- 天体物理起源：超巨大ブラックホール連星(SMBHB)
- 宇宙論的起源 (i.e., New Physics)：様々な可能性



What is the source?

[NANOGrav, 2306.16219]

- 天体物理起源：超巨大ブラックホール連星(SMBHB)
- 宇宙論的起源 (i.e., New Physics)：様々な可能性



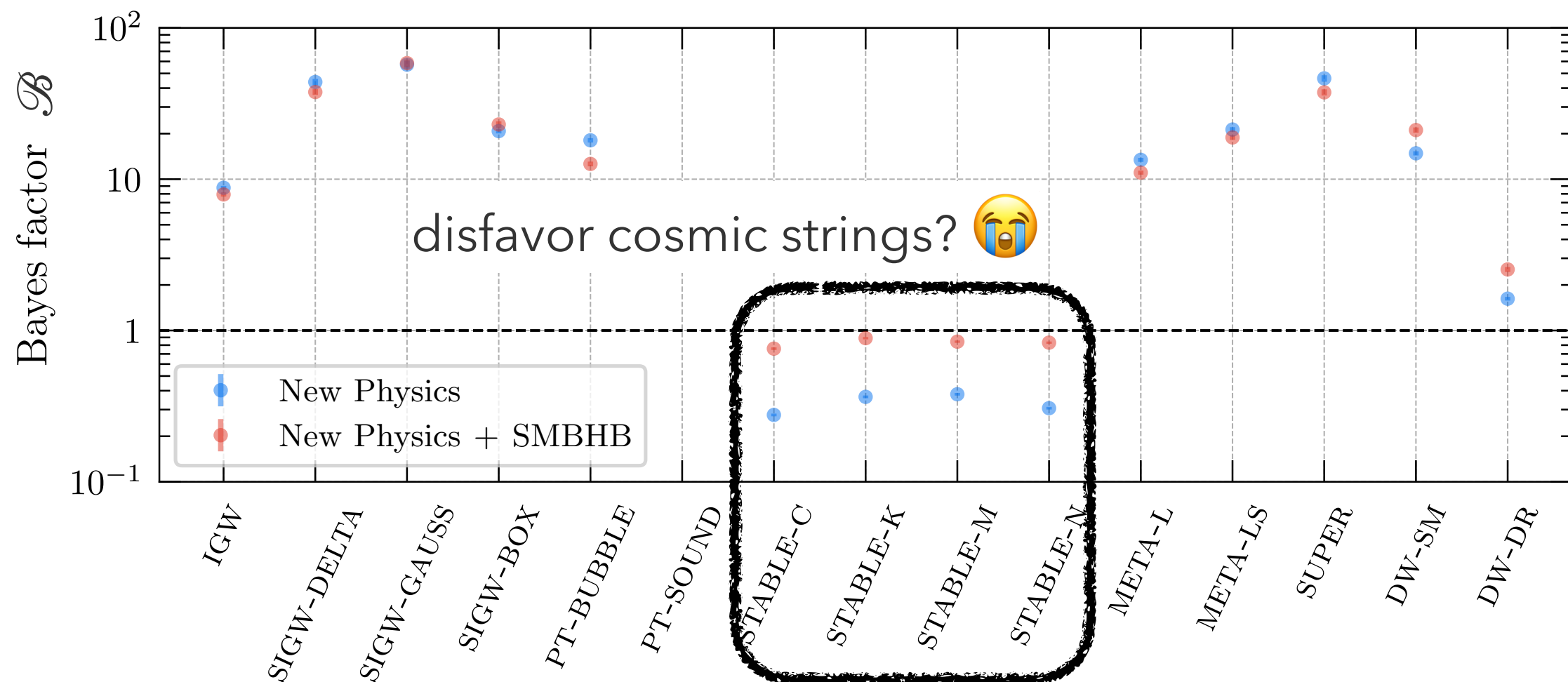
$$\mathcal{B} \equiv \frac{\mathcal{P}(\mathcal{D} | \mathcal{H})}{\mathcal{P}(\mathcal{D} | \mathcal{H}_{\text{SMBHB}})}$$

← (marginalized) likelihood

What is the source?

[NANOGrav, 2306.16219]

- 天体物理起源：超巨大ブラックホール連星(SMBHB)
- 宇宙論的起源 (i.e., New Physics)：様々な可能性



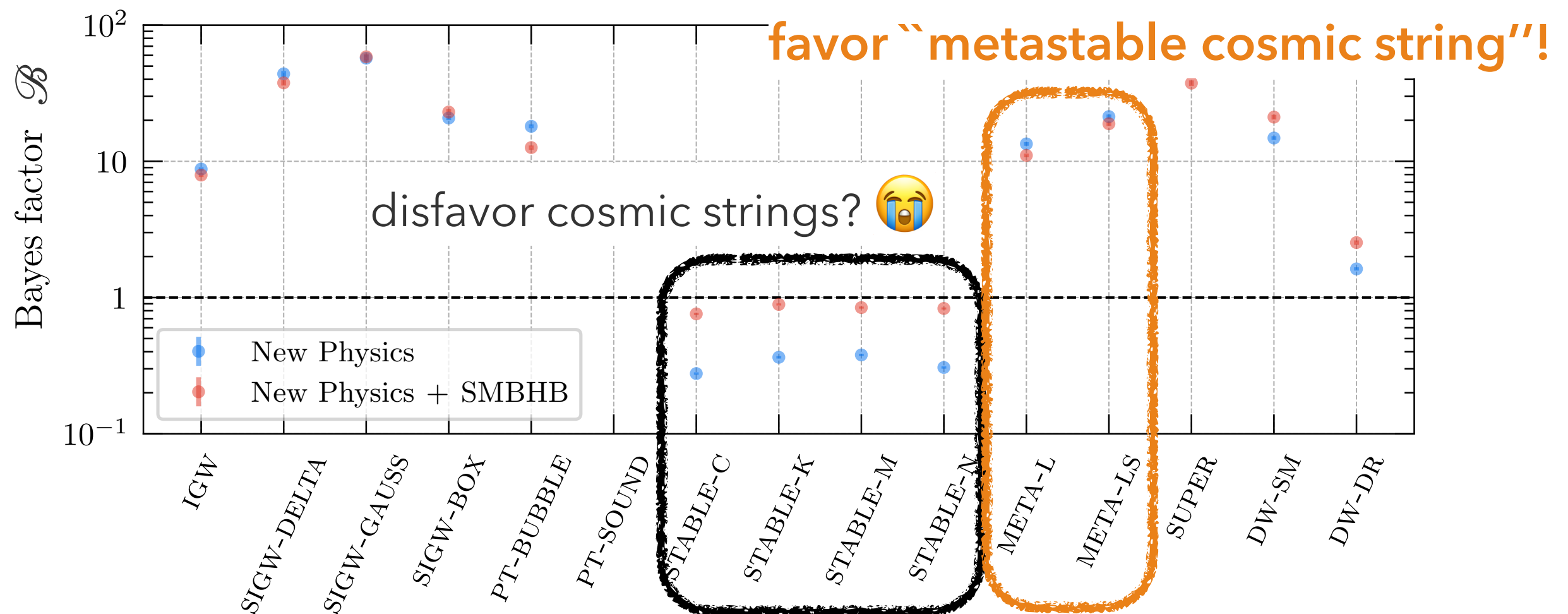
$$\mathcal{B} \equiv \frac{\mathcal{P}(\mathcal{D} | \mathcal{H})}{\mathcal{P}(\mathcal{D} | \mathcal{H}_{\text{SMBHB}})}$$

(marginalized) likelihood

What is the source?

[NANOGrav, 2306.16219]

- 天体物理起源：超巨大ブラックホール連星(SMBHB)
- 宇宙論的起源 (i.e., New Physics)：様々な可能性



$$\mathcal{B} \equiv \frac{\mathcal{P}(\mathcal{D} | \mathcal{H})}{\mathcal{P}(\mathcal{D} | \mathcal{H}_{\text{SMBHB}})}$$

(marginalized) likelihood

Plan of talk

- Introduction
- Pulsar Timing Array
- Metastable cosmic string
- Summary

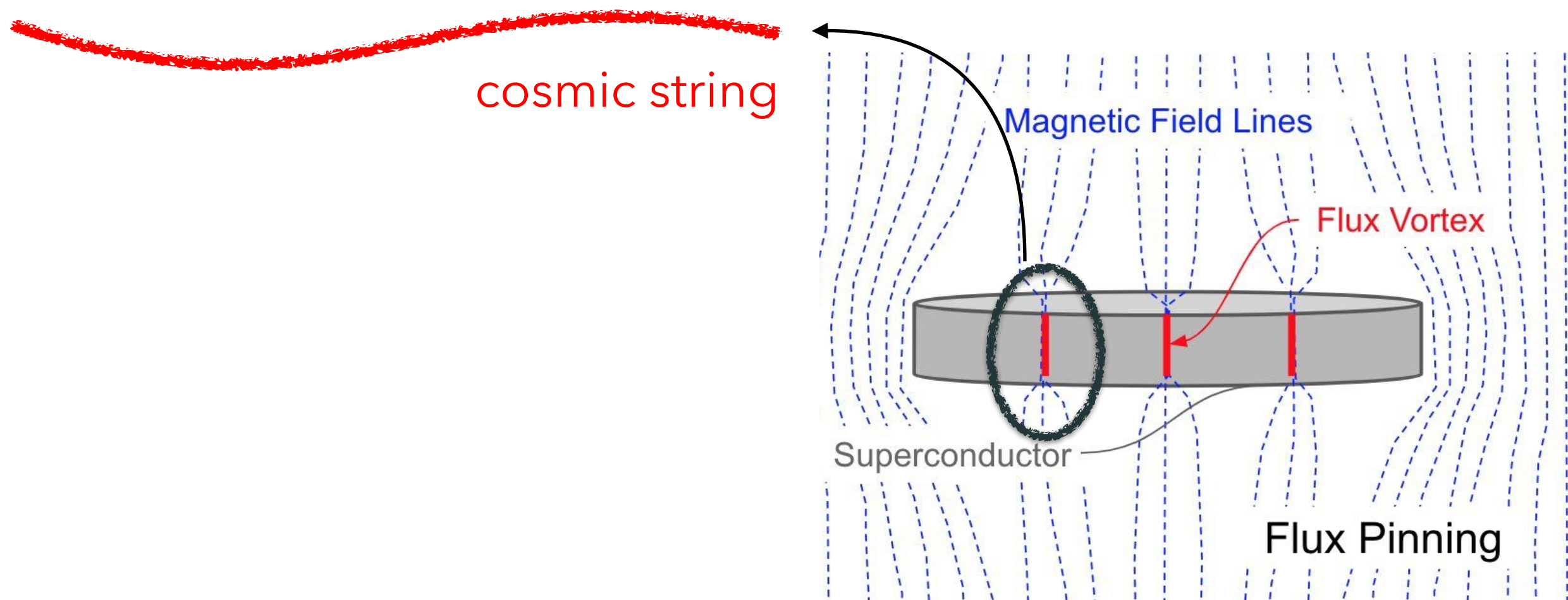
Metastable cosmic string

[Domcke-YH, 2606.03008]

Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

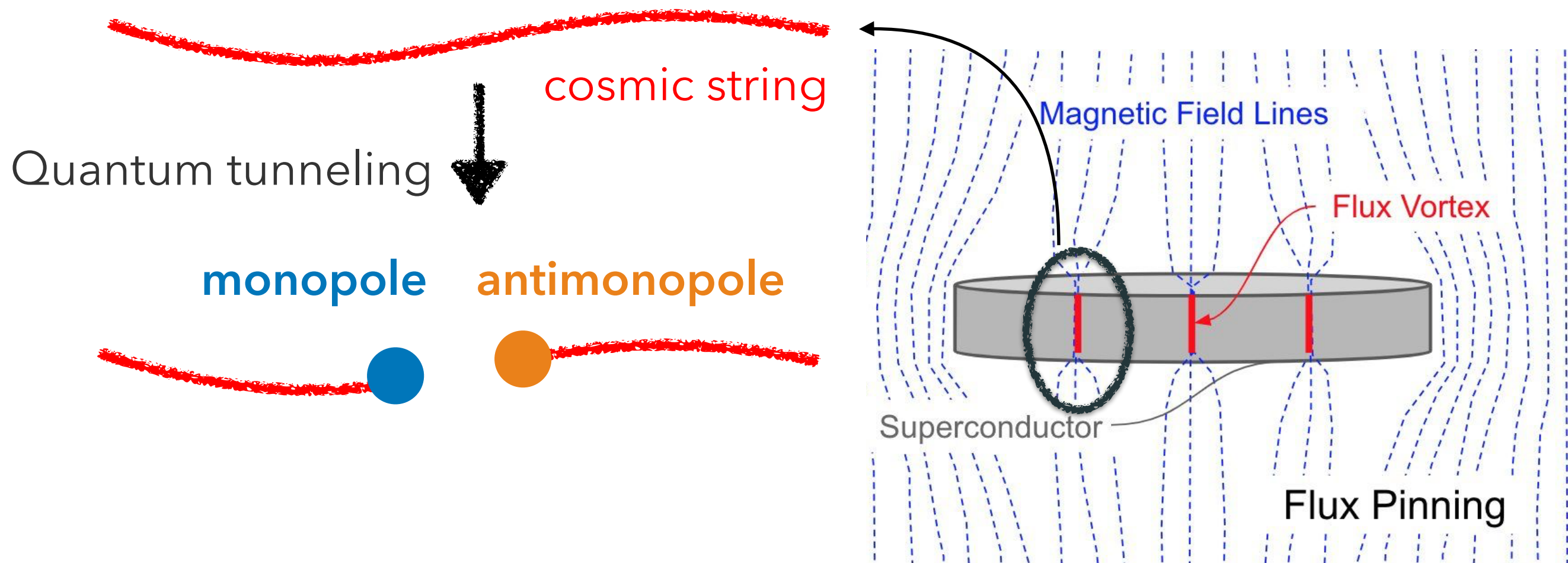
- ひも(磁束)が切れるか？ → 普通は無理 $\because \nabla \cdot \vec{B} = 0$



Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

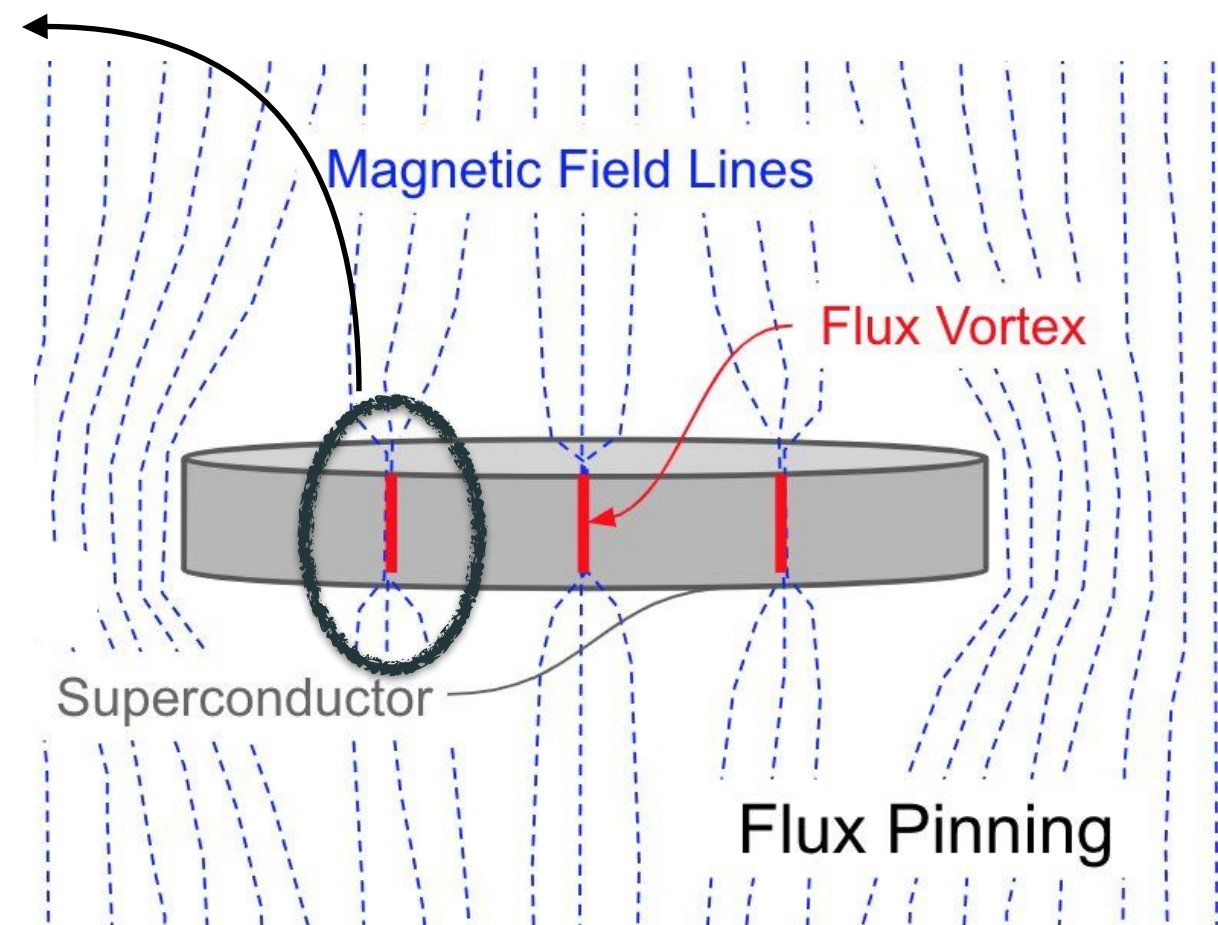
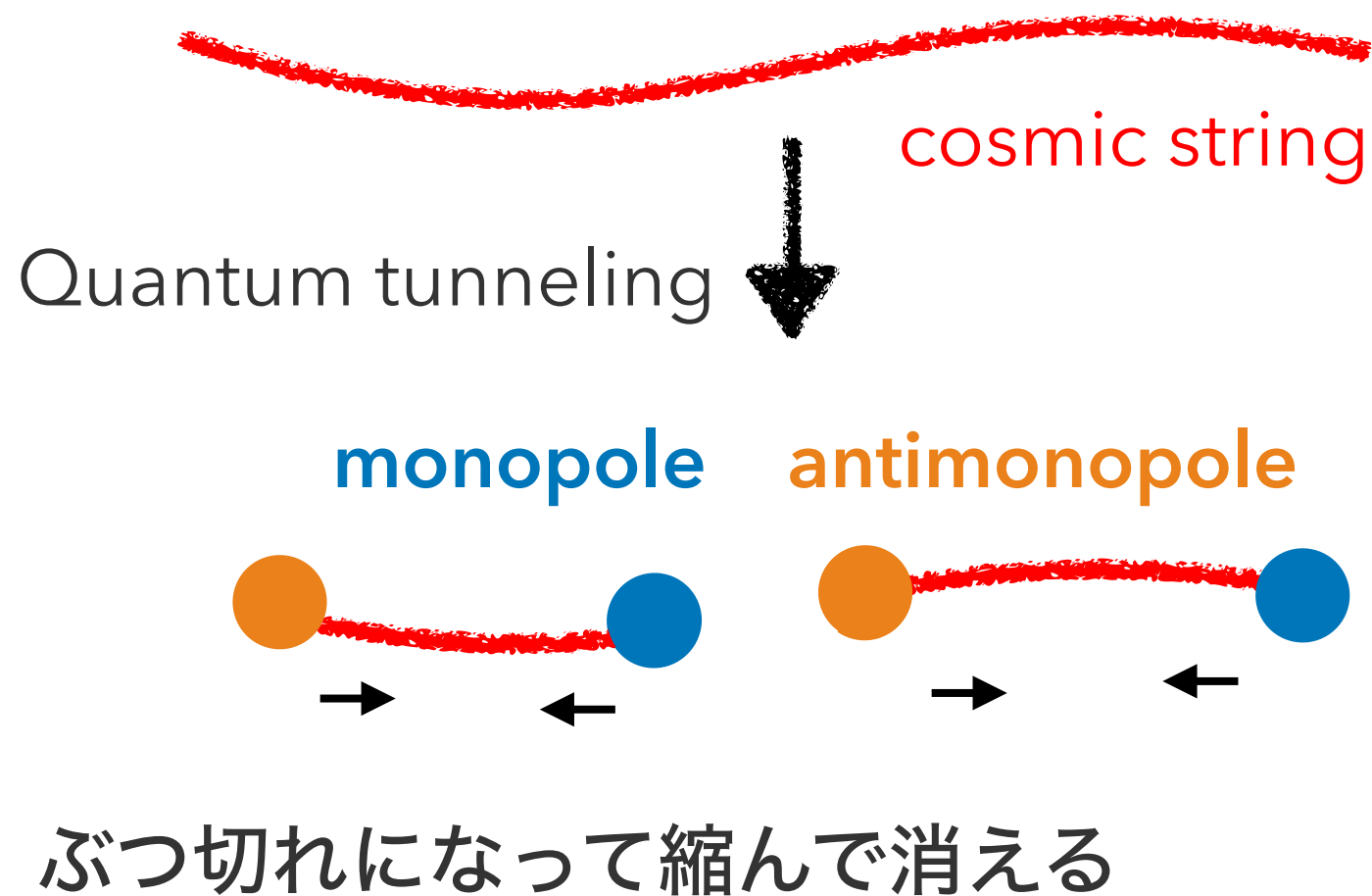
- ひも(磁束)が切れるか？→普通は無理 $\because \nabla \cdot \vec{B} = 0$
- 磁気モノポールがいれば可能！→量子効果による対生成



Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

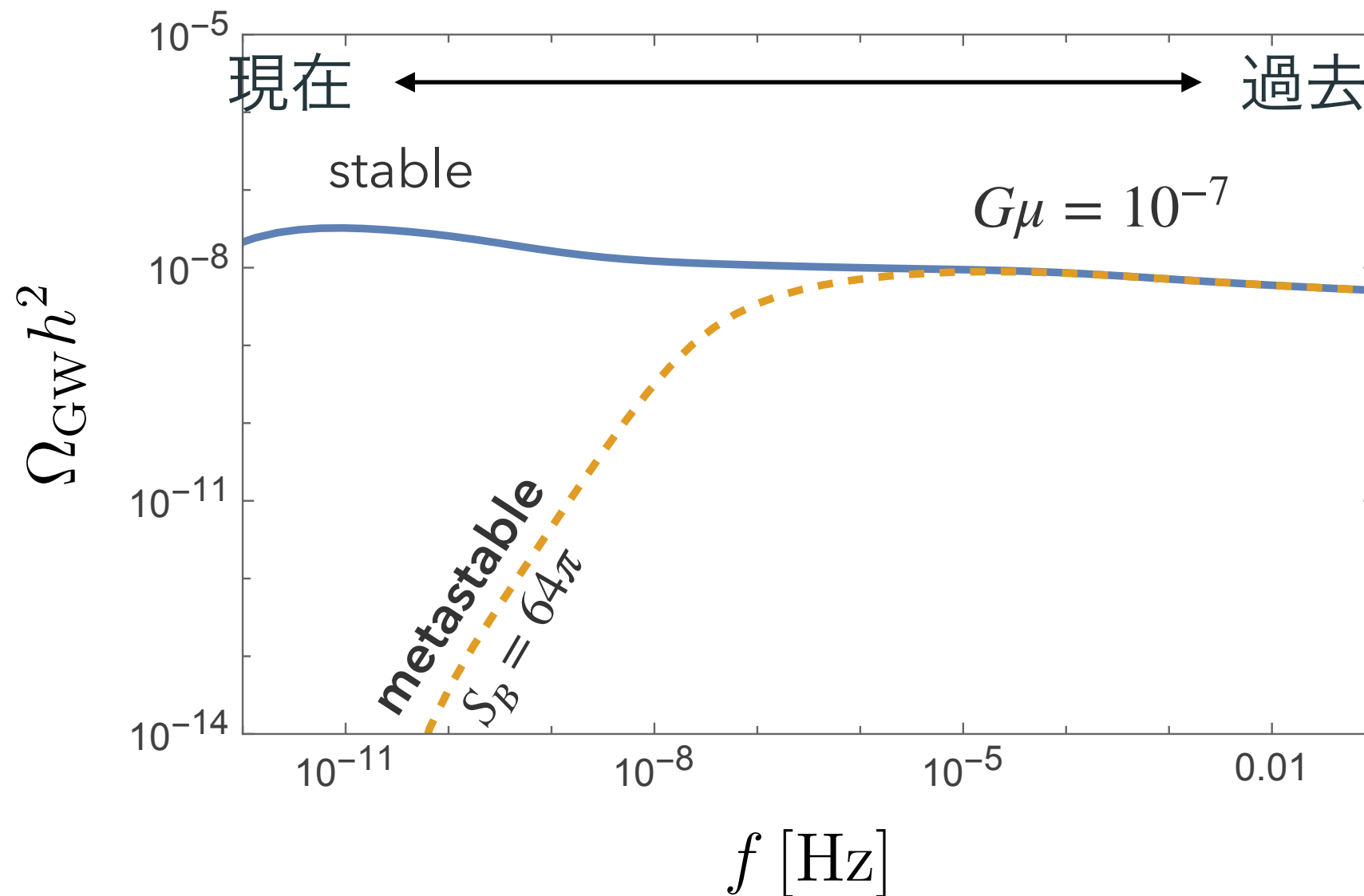
- ひも(磁束)が切れるか？→普通は無理 $\because \nabla \cdot \vec{B} = 0$
- 磁気モノポールがいれば可能！→量子効果による対生成



Metastable cosmic string

[Buchmuller+, 2107.04578, 2307.04691]

- late timeで重力波を出さなくなる→スペクトラムに影響



ひもの崩壊率: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

$\mu \sim v_{\text{U}(1)}^2$: string tension

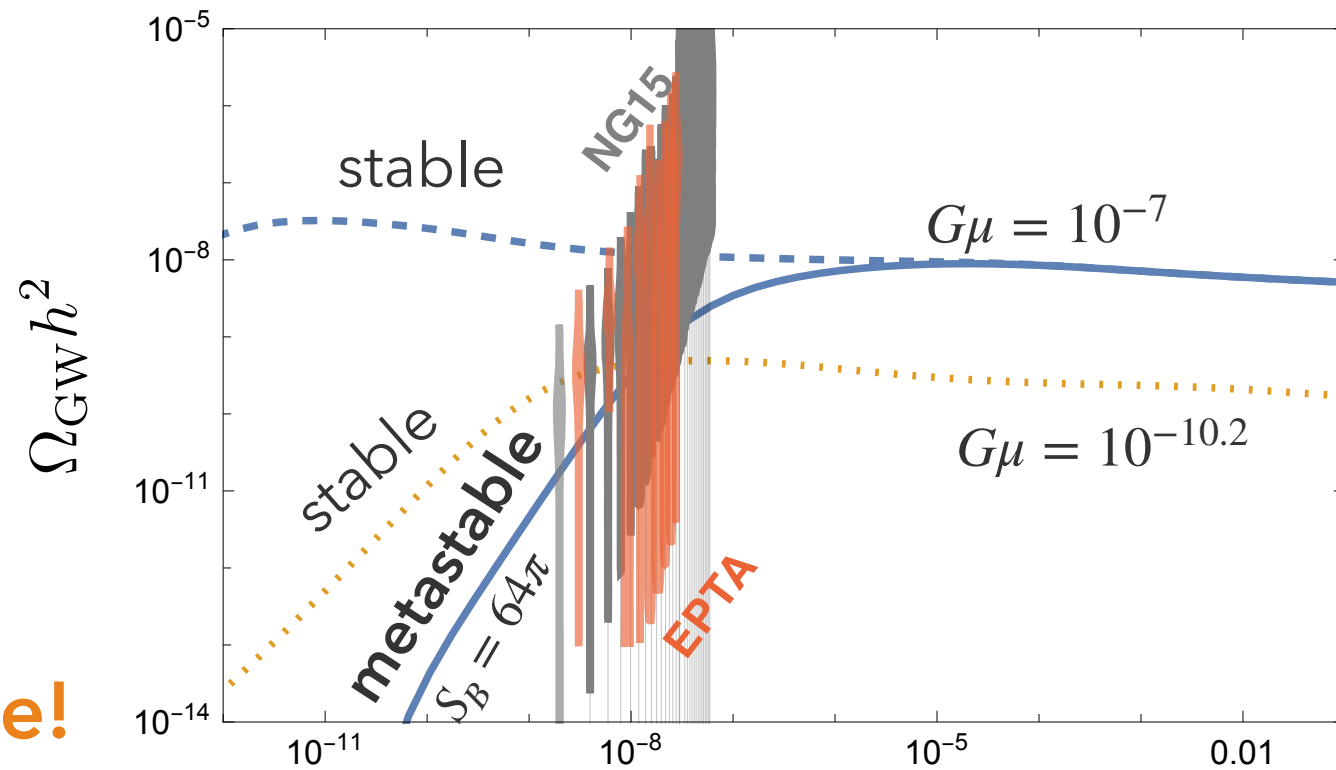
S_B : bounce action

Miracle of metastable string?

- metastableだと、nHz帯の
PTAシグナルを良くfitできる

[NANOGrav, 2306.16219]

$$\rightarrow \begin{cases} S_B \sim 64\pi \\ v_{U(1)} \sim 10^{16} \text{ GeV} \end{cases} \text{ GUT scale!}$$

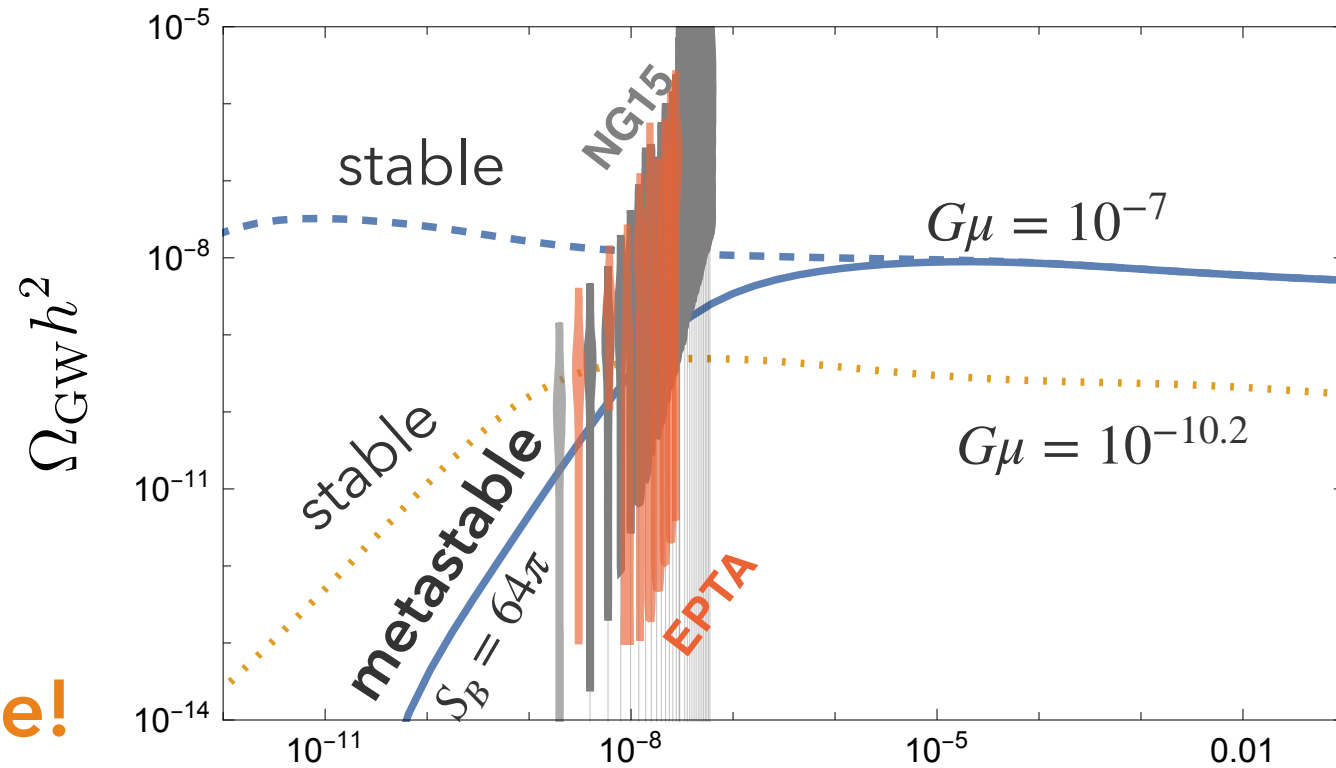


Miracle of metastable string?

- metastableだと、nHz帯の
PTAシグナルを良くfitできる

[NANOGrav, 2306.16219]

$$\rightarrow \begin{cases} S_B \sim 64\pi \\ v_{U(1)} \sim 10^{16} \text{ GeV} \end{cases} \text{ GUT scale!}$$



- 模型的にはとても自然、 $\because$ GUTでは任意の宇宙ひもはmetastable

$$\text{Eg.) } SO(10) \xrightarrow{v_{\text{GUT}}} G_{SM} \times U(1)_{B-L} \xrightarrow{v_{B-L}} G_{SM}$$

$\downarrow$ $\downarrow$
 GUT monopole ($\rightarrow$ inflation) string

PTAシグナルはGUTのヒントかも

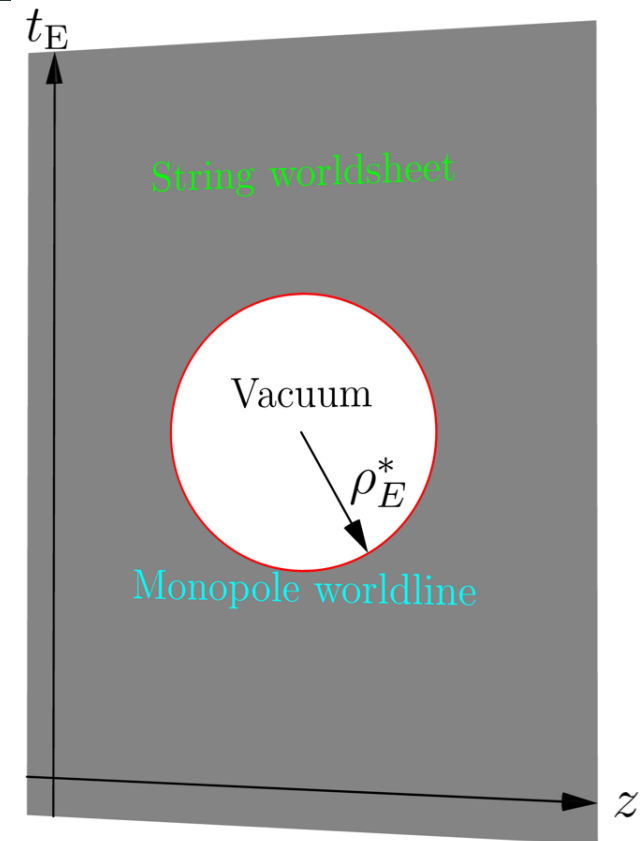
PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu} \sim \# \frac{8\pi^2}{g^2} \left(\frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \right)^2$
[Preskill-Vilenkin '93]



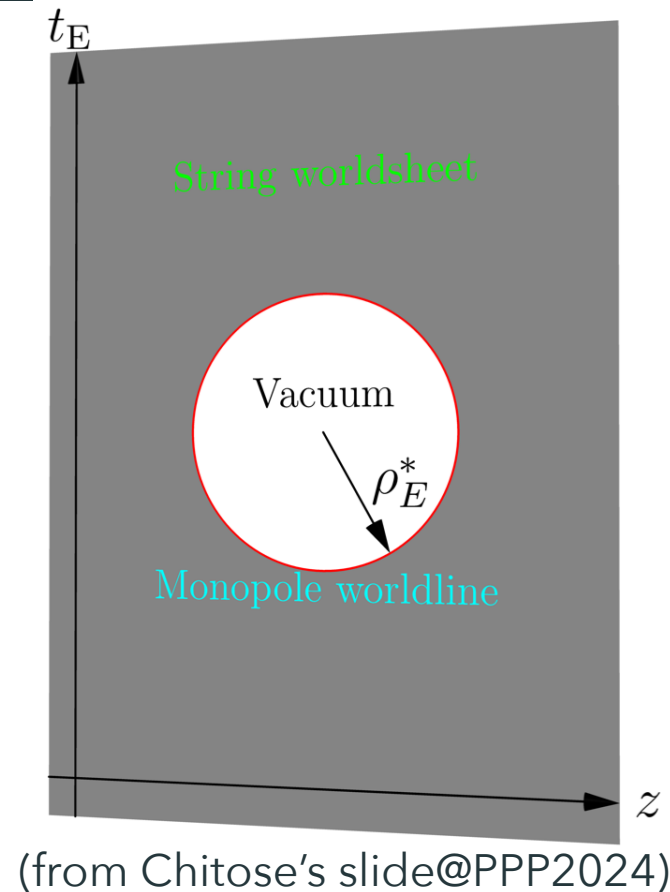
(from Chitose's slide@PPP2024)

PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu} \sim \# \frac{8\pi^2}{g^2} \left(\frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \right)^2$
[Preskill-Vilenkin '93]

$$\text{PTA favors } S_B \sim 64\pi \rightarrow \frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \sim \#g \sqrt{\frac{8}{\pi}} = \mathcal{O}(1)$$



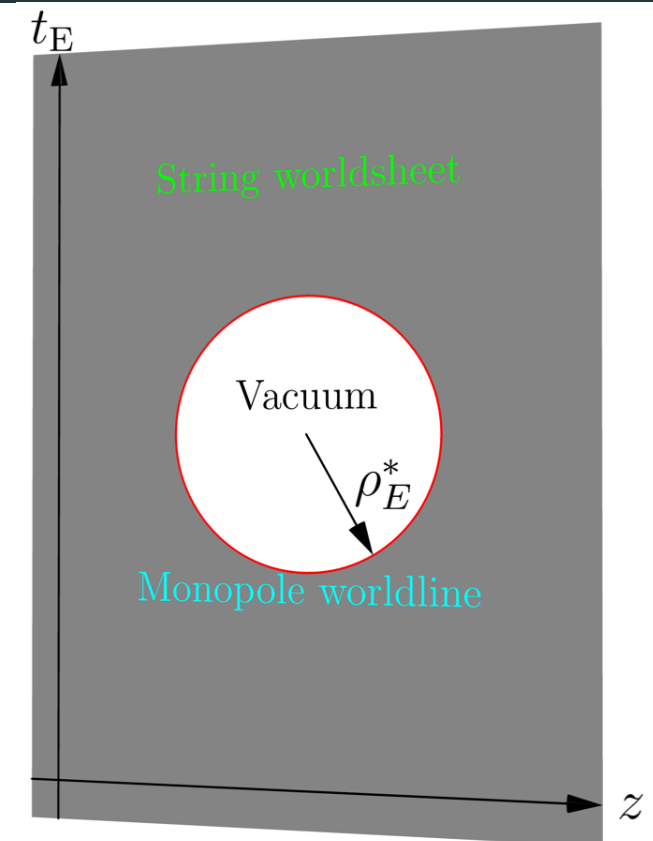
PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu} \sim \# \frac{8\pi^2}{g^2} \left(\frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \right)^2$
[Preskill-Vilenkin '93]

$$\text{PTA favors } S_B \sim 64\pi \rightarrow \frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \sim \# g \sqrt{\frac{8}{\pi}} = \mathcal{O}(1)$$

→ 2つのbreaking scaleはめっちゃ近い (どっちもGUTスケール)



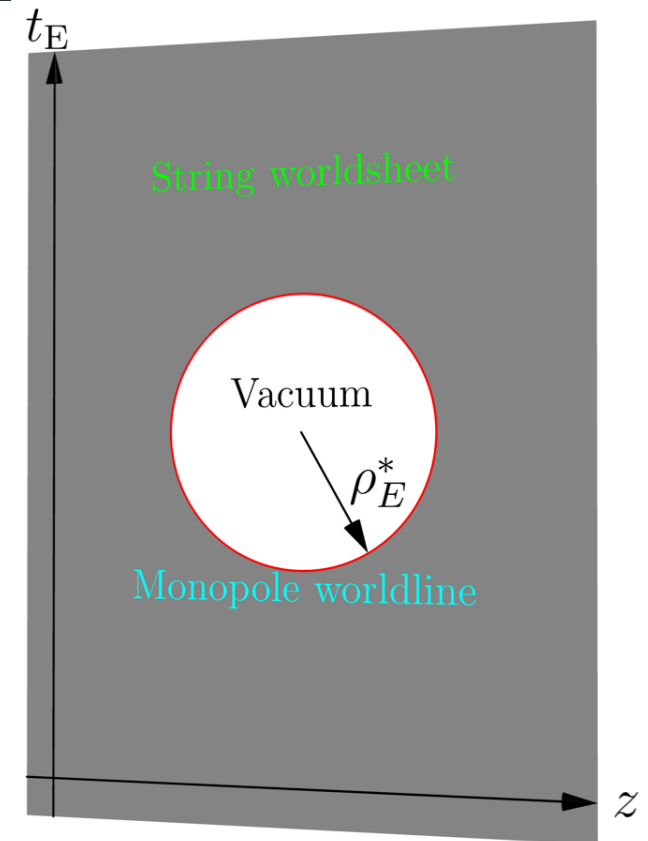
(from Chitose's slide@PPP2024)

PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu} \sim \# \frac{8\pi^2}{g^2} \left(\frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \right)^2$
[Preskill-Vilenkin '93]

$$\text{PTA favors } S_B \sim 64\pi \rightarrow \frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \sim \# g \sqrt{\frac{8}{\pi}} = \mathcal{O}(1)$$



(from Chitose's slide@PPP2024)

→2つのbreaking scaleはめっちゃ近い(どっちもGUTスケール)

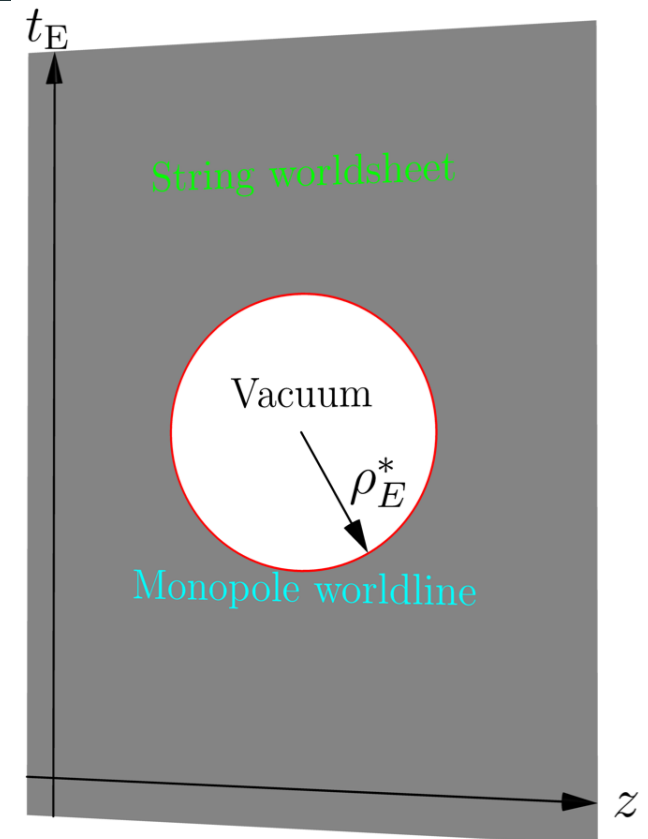
⚠️ ただし $m_M \gg \sqrt{\mu} \Leftrightarrow v_{SU(2)} \gg v_{U(1)}$ を仮定 かなり微妙...? 🤔

PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu} \sim \# \frac{8\pi^2}{g^2} \left(\frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \right)^2$
[Preskill-Vilenkin '93]

$$\text{PTA favors } S_B \sim 64\pi \rightarrow \frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \sim \# g \sqrt{\frac{8}{\pi}} = \mathcal{O}(1)$$



(from Chitose's slide@PPP2024)

→2つのbreaking scaleはめっちゃ近い(どっちもGUTスケール)

⚠️ ただし $m_M \gg \sqrt{\mu} \Leftrightarrow v_{SU(2)} \gg v_{U(1)}$ を仮定 かなり微妙...? 🤔



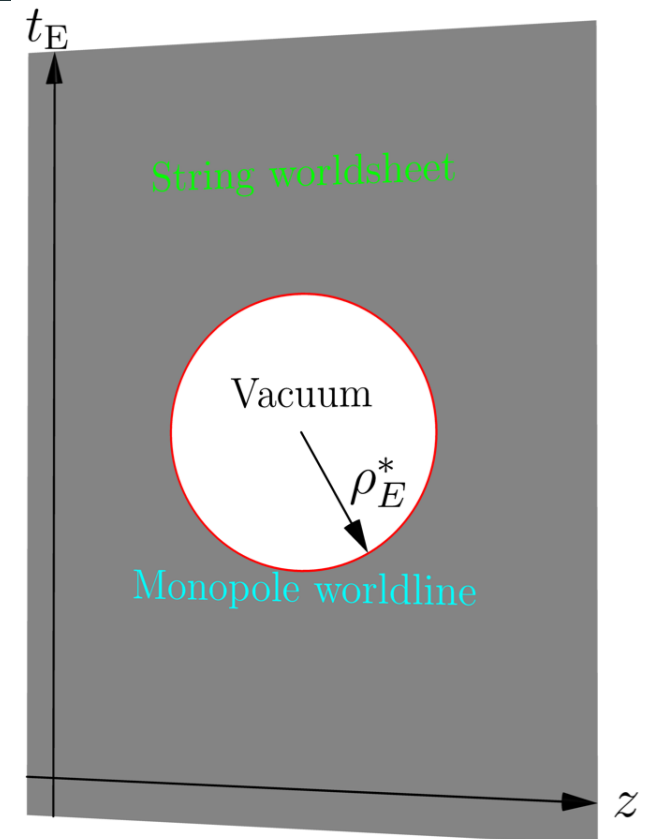
S_B を精密に計算すべし (崩壊率: $\Gamma \propto e^{-S_B}$)

PTA interpretation

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu} \sim \# \frac{8\pi^2}{g^2} \left(\frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \right)^2$
[Preskill-Vilenkin '93]

$$\text{PTA favors } S_B \sim 64\pi \rightarrow \frac{v_{SU(2)}}{v_{U(1)}} \sim \# g \sqrt{\frac{8}{\pi}} = \mathcal{O}(1)$$



(from Chitose's slide@PPP2024)

→2つのbreaking scaleはめっちゃ近い(どっちもGUTスケール)

⚠️ ただし $m_M \gg \sqrt{\mu} \Leftrightarrow v_{SU(2)} \gg v_{U(1)}$ を仮定 かなり微妙...? 🤔



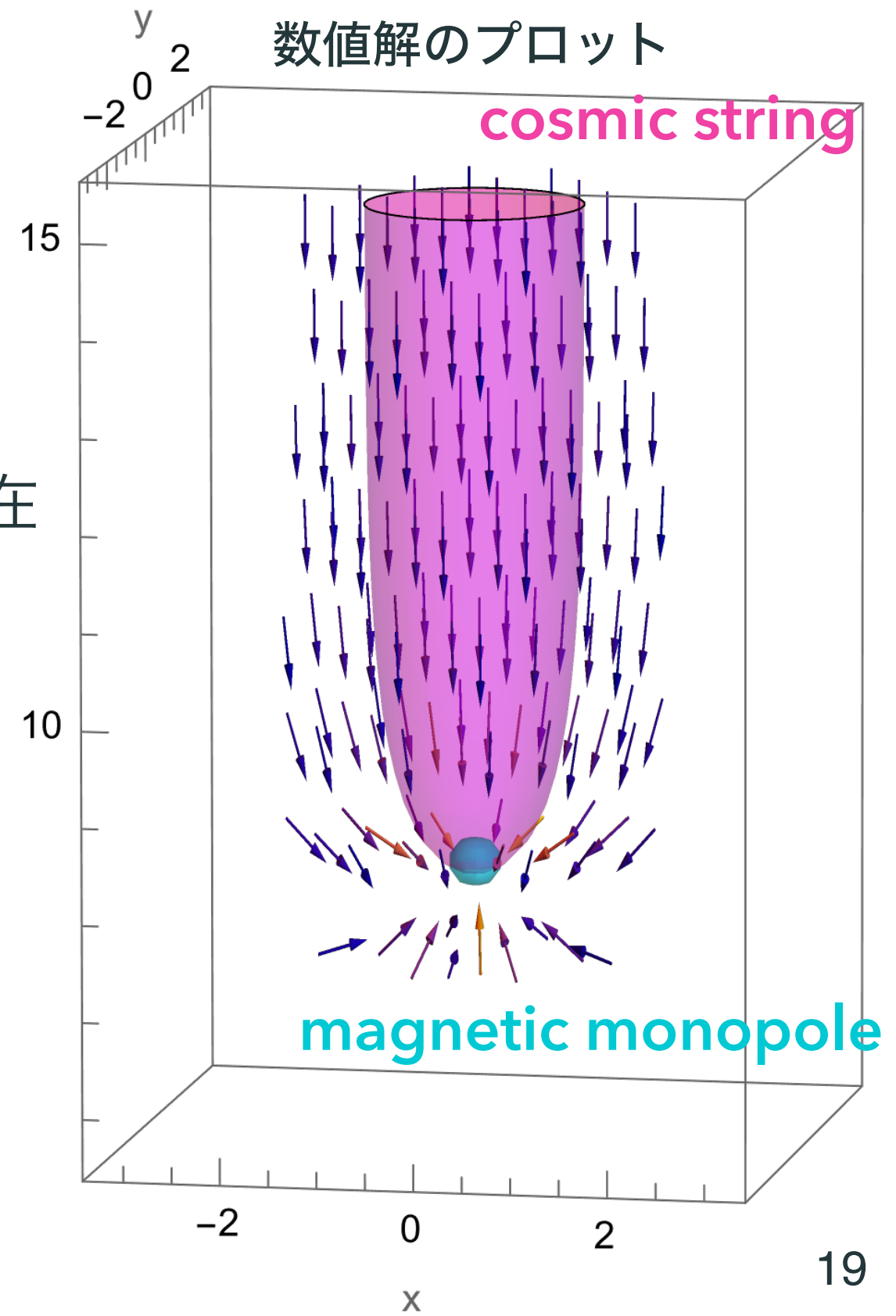
S_B を精密に計算すべし (崩壊率: $\Gamma \propto e^{-S_B}$)

(cf)集団座標法による S_B の見積もりもあるが、上限を与えるのみ [Chitose+, '23]

Toy model: $SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$

- S_B を近似無しで数値的に計算した
(場のEOMを全部解いた！)
- バウンス解なので負モードが一つ存在
→ monopole位置の並進に対応
- monopole位置を R に固定した上で
gradient flowで作用を最小化 ($S_*(R)$)
- R を変えて繰り返す→最大化

$$S_B = \max_R S_*(R)$$

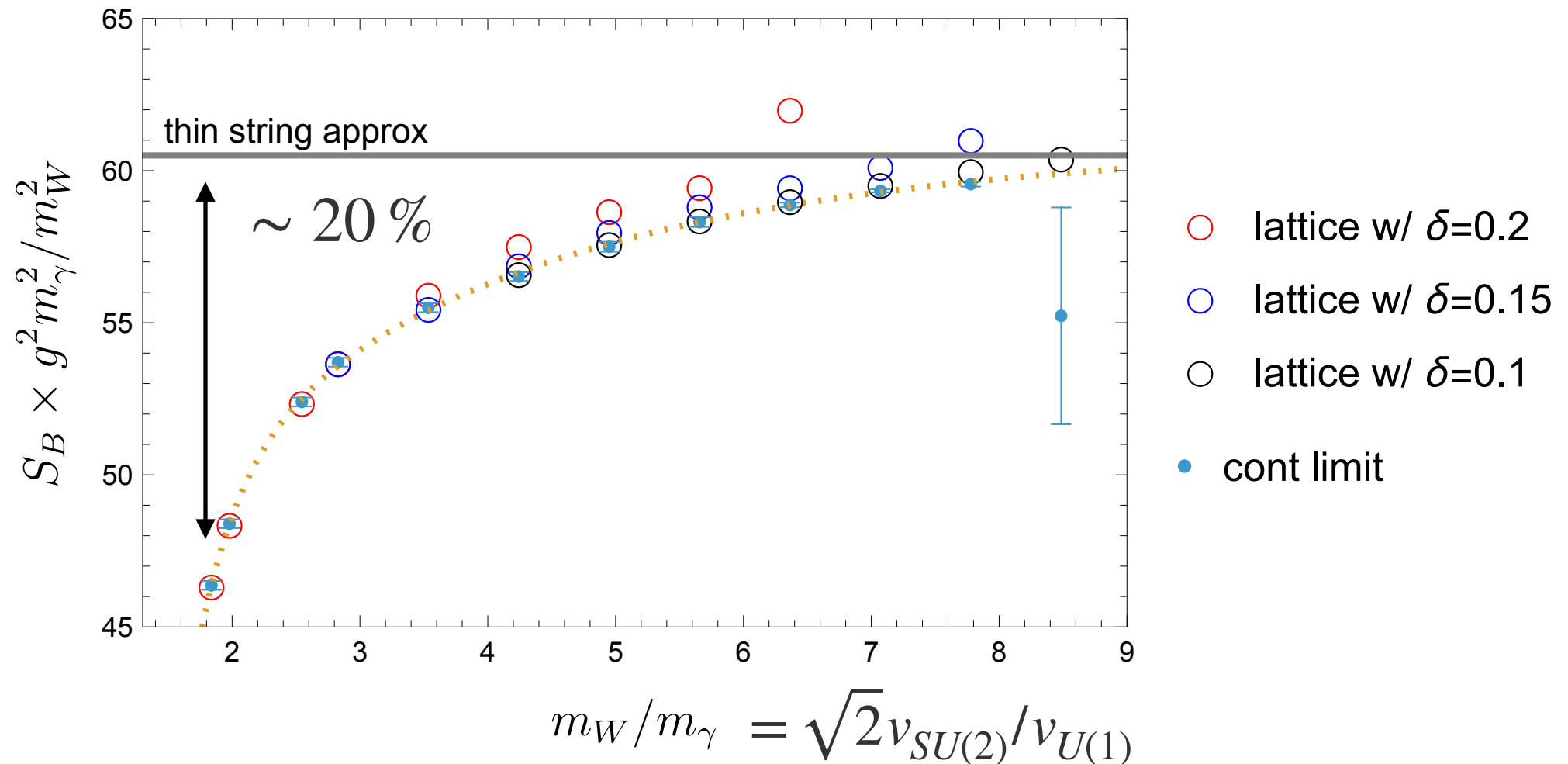


Our result

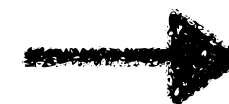
[Domcke-YH, 2606.03008]

*ゲージとスカラーの質量は縮退と仮定

$$m_{h_2} = m_\phi = m_W, \quad m_{h_1} = m_\gamma$$



- $m_W / m_\gamma \rightarrow \infty$ で thin-string limit に漸近
- $m_W / m_\gamma \rightarrow 1$ で $S_B \rightarrow 0$ (古典的に不安定)



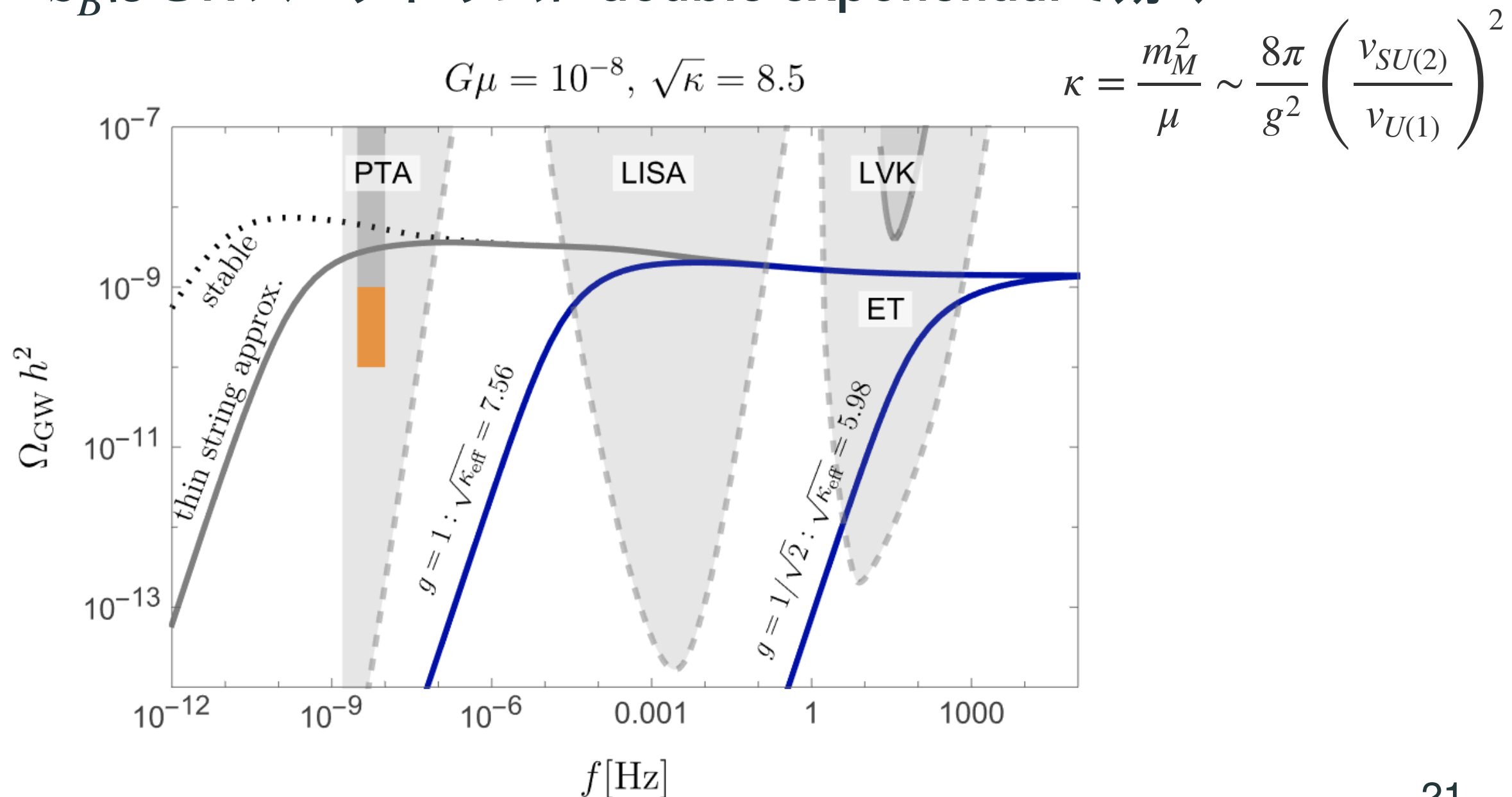
consistent

Our result

[Domcke-YH, 2606.03008]

- $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$ & スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く



PTA interpretation changes

[Domcke-YH, 2606.03008]

- GUTを念頭に置くと $g \simeq 0.7$

$$\left. \frac{m_W}{m_\gamma} \right|_{\text{PTA}}^{\text{old}} \simeq 1.2 \rightarrow \left. \frac{m_W}{m_\gamma} \right|_{\text{PTA}}^{\text{new}} \simeq 1.6$$

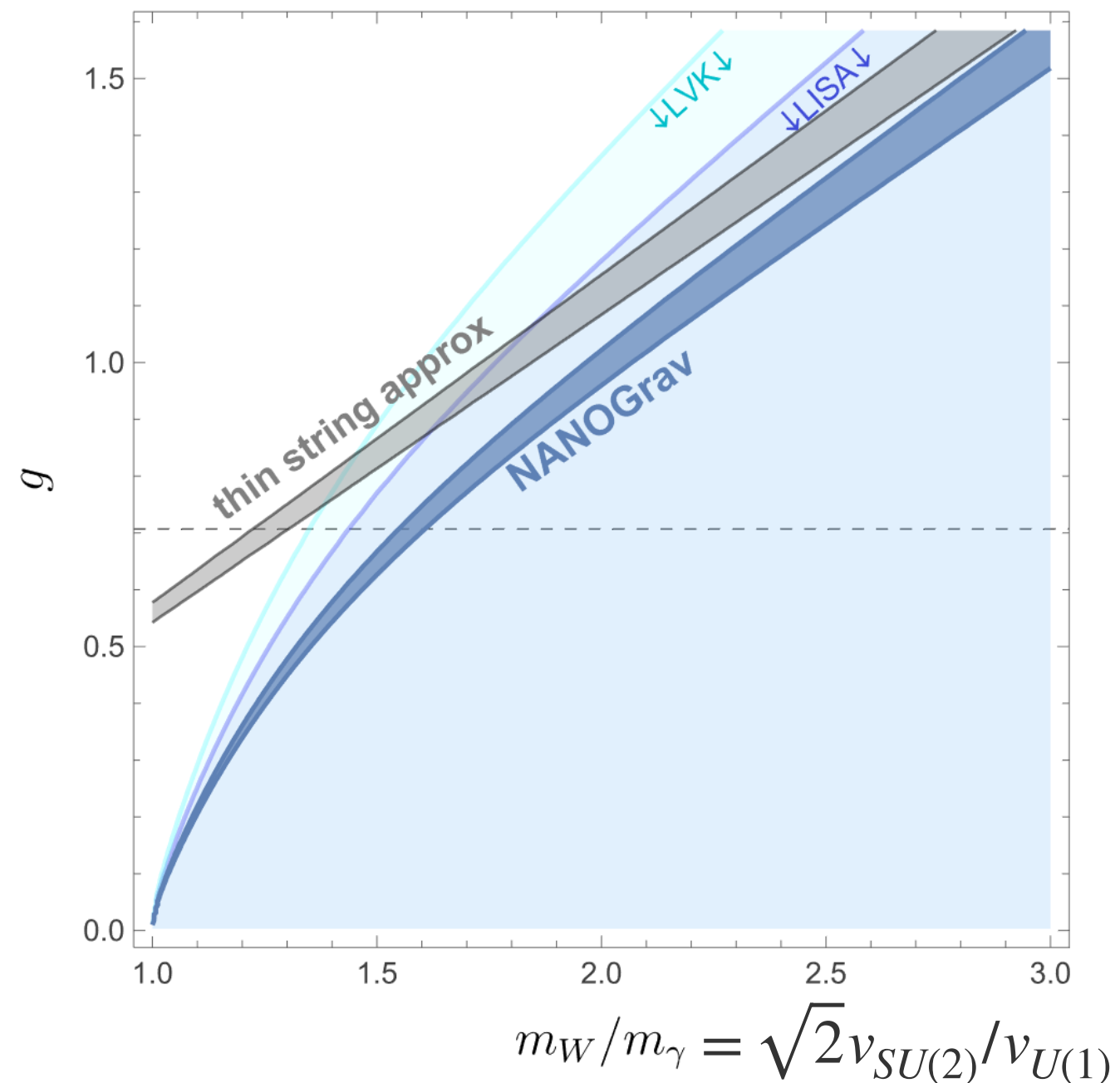
- 一般の g ではさらに大きなずれ
- 階層性を強める方に働く

→ 模型構築的には嬉しい

$$\because SU(2) \xrightarrow[\text{mon.}]{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow[\text{string}]{v_{U(1)}} 1$$

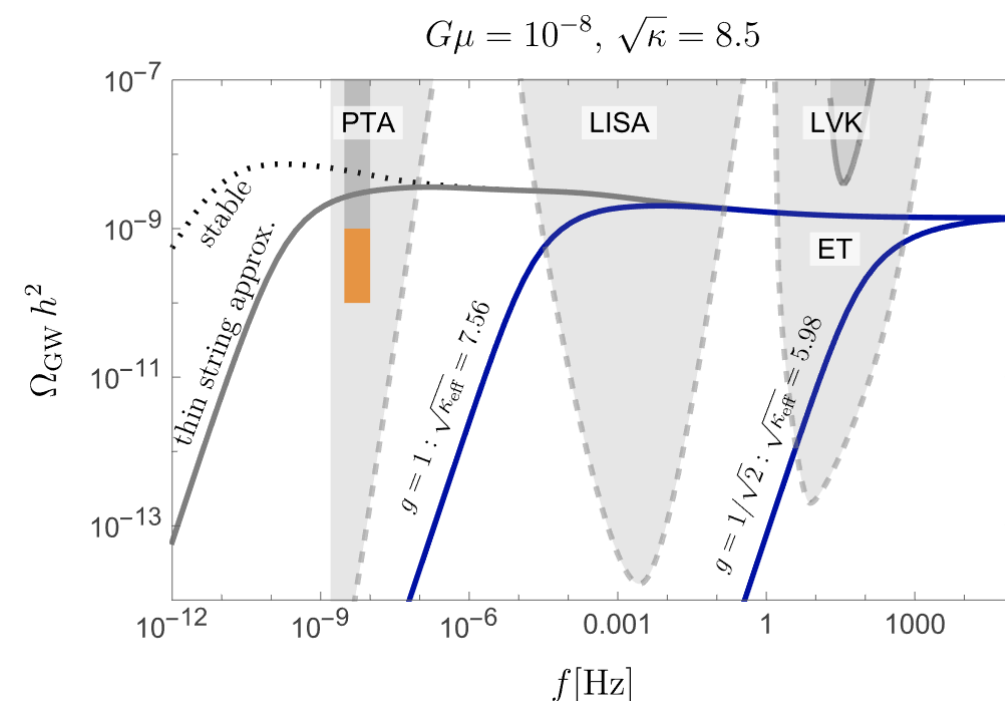
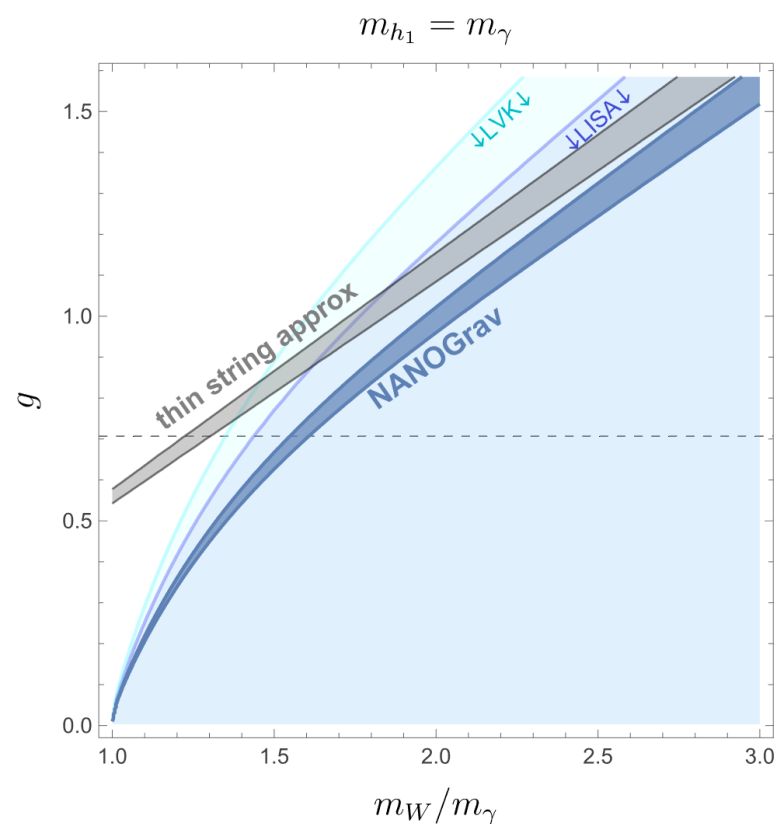
途中でインフレーションが必要

*ゲージとスカラーの質量は縮退と仮定



Summary

- 宇宙ひもは新物理の手がかりになりうる
- PTAで受かった重力波シグナルは、準安定宇宙ひも由来の可能性
→特にGUT由来かもしれない
- 重力波スペクトラムは崩壊率にとっても敏感
→我々が初めて真面目に計算した→パラメータ空間のrefine



Future direction 1

[in progress w/ Domcke]

- **SUSY double hybrid inflation模型** [Buchmüller '21]

$$SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \rightarrow U(1)_R \times U(1)_{B-L} \rightarrow U(1)_Y$$

- ふたつのinflaton ϕ, ϕ'

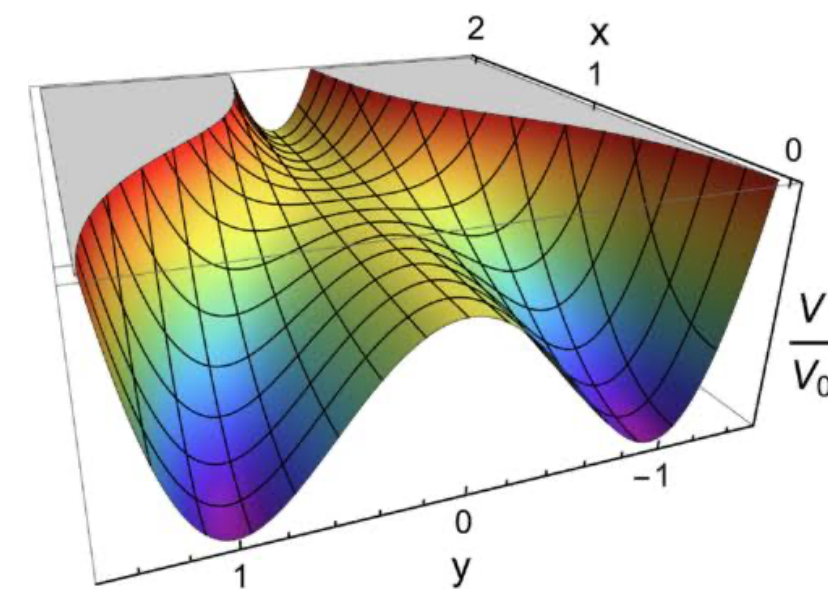
(i) ϕ が転がる $\rightarrow U^a$ がtachyonic $\rightarrow$ monopole

(ii) ϕ' が転がる $\rightarrow S, S_c$ がtachyonic $\rightarrow$ string

- metastable stringを実現するには(i)が先に起きないといけない

- PTA interpretation compatible w/ LVK bound, CMB, leptogenesis?

	$SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$
U^a	$(\mathbf{3}, 0)$
S	$(\mathbf{2}, \sqrt{3/8})$
S_c	$(\bar{\mathbf{2}}, -\sqrt{3/8})$
ϕ	$(\mathbf{1}, 0)$
ϕ'	$(\mathbf{1}, 0)$



Future direction 2

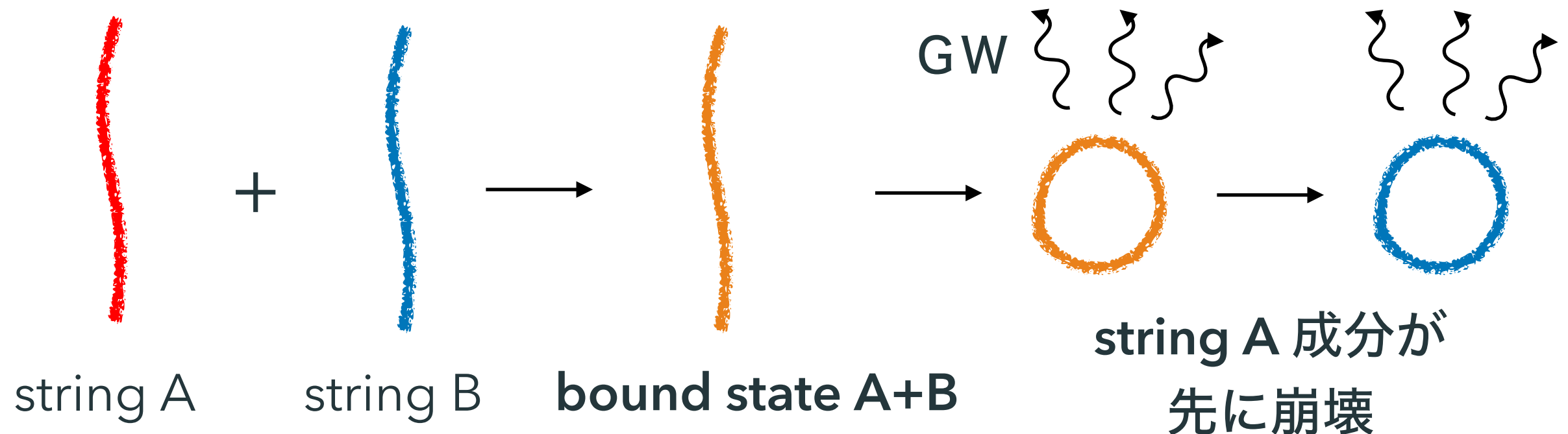
[in progress w/ Chitose & Yamatsu]

- Metastable string in E6 GUT

$E_6 \sim G_{\text{SM}} \times U(1) \times U(1) \rightarrow$ 2種類のmetastable stringがいる

自明なケース: metastable string A & B $\rightarrow$ それぞれ崩壊

非自明なケース:



- 特徴的なGW spectrum $\rightarrow$ PTAで E_6 と $SO(10)$ が識別できるか？

Backup

Conventional calculation of decay rate

崩壊率: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$ の S_B を計算すべし

- Thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu}$ [Preskill-Vilenkin '93]

⚠ ただし $S_B \gg 2\pi^2/g^2 \sim 40$ を仮定

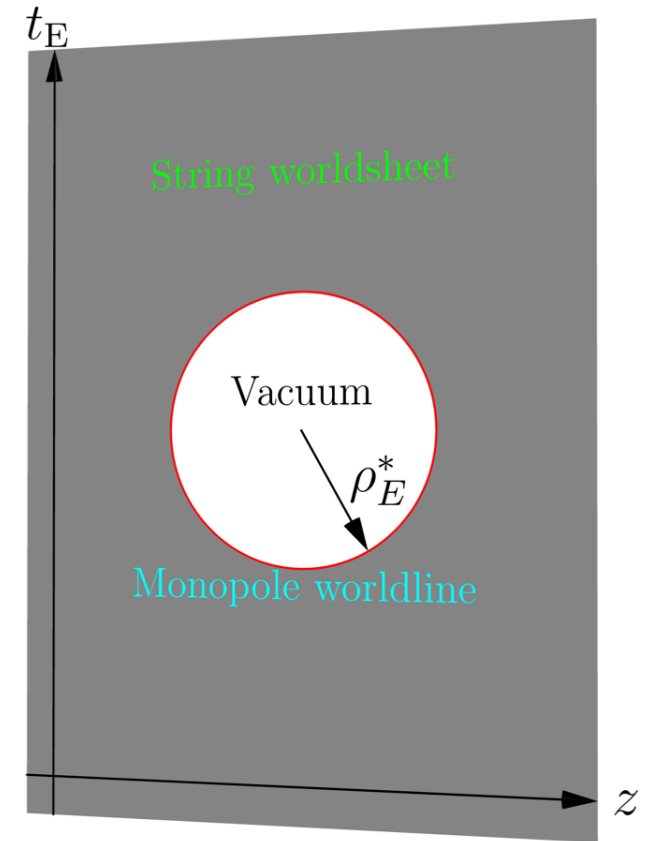
PTA favors $S_B \sim 64\pi \sim 200$ 微妙...? 🤔

- 集団座標法 [Shifman-Yung, '02][Chitose+, '23]

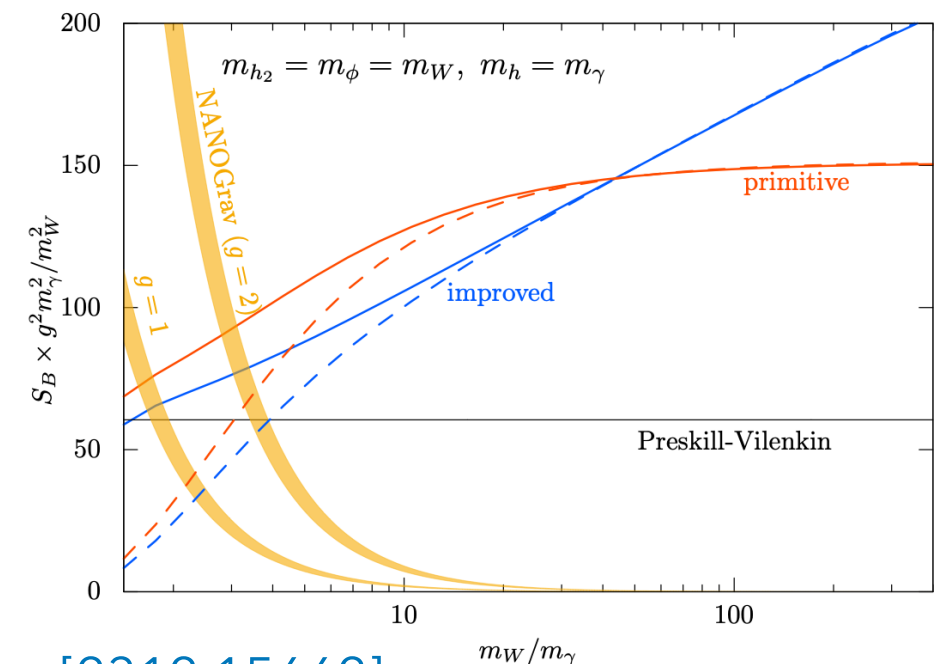
stringと真空を繋ぐパラメータ β を導入

→ 集団座標 $\beta(\rho_E)$ のEOMを解く

厳密な上限だがかなりゆるい



(from Chitose's slide)



[2312.15662]

Conventional calculation of decay rate

Decay rate per length: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

- スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く

m_M : monopole mass

μ : string tension

Conventional calculation of decay rate

Decay rate per length: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

- スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く

- thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu}$

[Preskill-Vilenkin '93]

m_M : monopole mass

μ : string tension

Conventional calculation of decay rate

Decay rate per length: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

- スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く

- thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu}$
[Preskill-Vilenkin '93] m_M : monopole mass
 μ : string tension

⚠ ただし $m_M \gg \sqrt{2\pi\mu}/g$ を仮定 $\Leftrightarrow S_B \gg 2\pi^2/g^2 \sim 40$

Conventional calculation of decay rate

Decay rate per length: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

- スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く

- thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu}$
[Preskill-Vilenkin '93] m_M : monopole mass
 μ : string tension

⚠ ただし $m_M \gg \sqrt{2\pi\mu}/g$ を仮定 $\Leftrightarrow S_B \gg 2\pi^2/g^2 \sim 40$

PTA favors $S_B \sim 64\pi \sim 200$

Conventional calculation of decay rate

Decay rate per length: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

- スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く

- thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu}$

[Preskill-Vilenkin '93]

m_M : monopole mass

μ : string tension

⚠️ ただし $m_M \gg \sqrt{2\pi\mu}/g$ を仮定 $\Leftrightarrow S_B \gg 2\pi^2/g^2 \sim 40$

PTA favors $S_B \sim 64\pi \sim 200$

okay...? 🤔

Conventional calculation of decay rate

Decay rate per length: $\Gamma \simeq \frac{\mu}{2\pi} \exp[-S_B]$

- スtringグループの数密度 $\sim e^{-\Gamma(t-t_i)}$

→ S_B はGWスペクトラムにdouble exponentialで効く

- thin-string近似: $S_B \simeq \pi \frac{m_M^2}{\mu}$

[Preskill-Vilenkin '93]

m_M : monopole mass

μ : string tension

⚠️ ただし $m_M \gg \sqrt{2\pi\mu}/g$ を仮定 $\Leftrightarrow S_B \gg 2\pi^2/g^2 \sim 40$

PTA favors $S_B \sim 64\pi \sim 200$

okay...? 🤔

→ uncertainty $\sim 40/200 = 0.2$

Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

$$U(1) \xrightarrow{v_{U(1)}} 1$$



cosmic string

Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

$$v_{SU(2)} > v_{U(1)}$$

$$SU(2) \xrightarrow{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow{v_{U(1)}} 1$$



cosmic string

Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

$$v_{SU(2)} > v_{U(1)}$$

$$SU(2) \xrightarrow{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow{v_{U(1)}} 1$$

admits magnetic monopole
(like GUT monopole)



cosmic string

Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

$$v_{SU(2)} > v_{U(1)}$$

$$SU(2) \xrightarrow{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow{v_{U(1)}} 1$$

admits magnetic monopole
(like GUT monopole)



cosmic string

Quantum tunneling



monopole



antimonopole

Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

$$v_{SU(2)} > v_{U(1)}$$

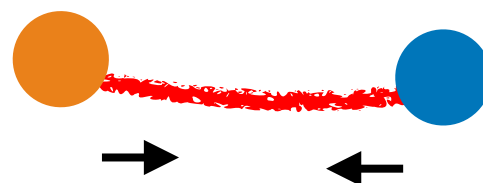
$$SU(2) \xrightarrow{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow{v_{U(1)}} 1$$

admits magnetic monopole
(like GUT monopole)



cosmic string

Quantum tunneling



Eventually disappear

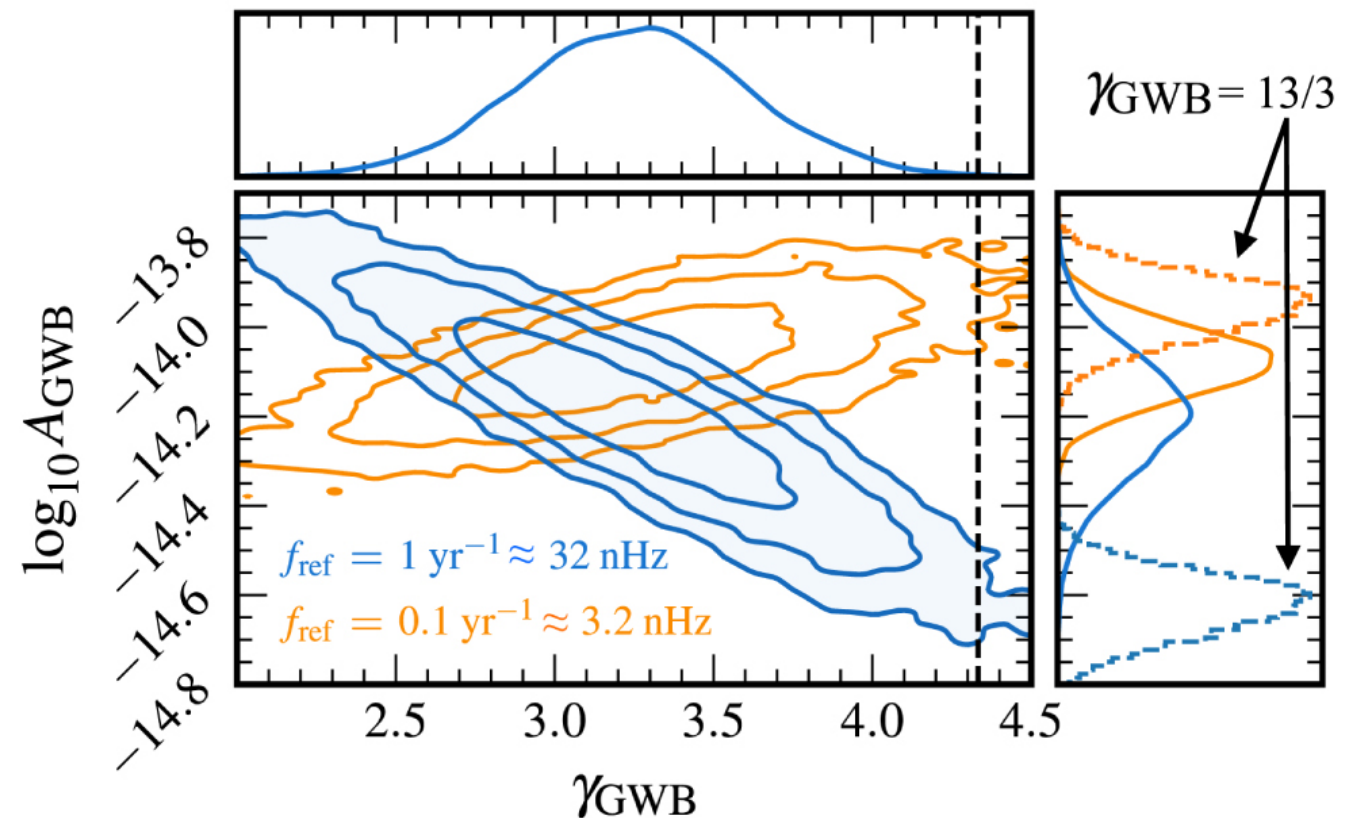
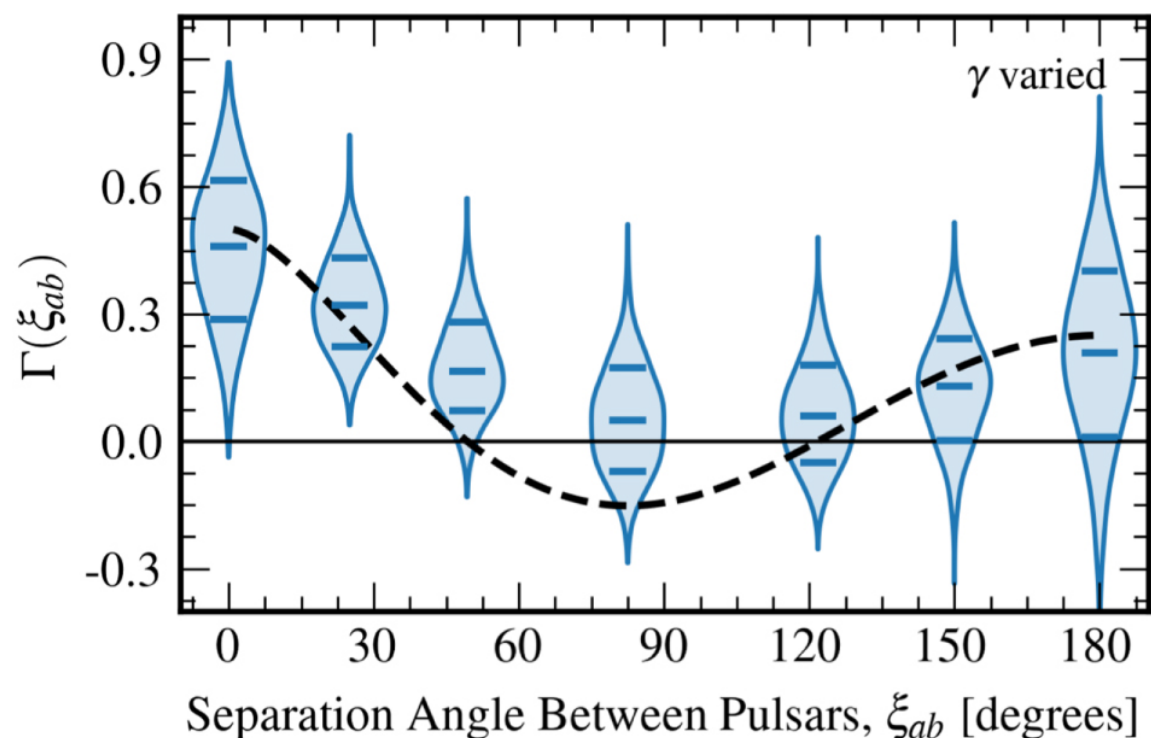
背景重力波の証拠@PTA

[NANOGrav, 2306.16213]

パルサータイミングのずれ：

$$\delta t_a \equiv t_a^{\text{obs}} - t_a^{\text{model}}$$

$$P_{\text{GW}}(f)\Gamma(\xi_{ab}) \stackrel{\text{F.T.}}{\sim} \sum_{a,b} \langle \delta t_a(t) \delta t_b(t) \rangle$$



一様等方性を仮定した理論予言
(Hellings-Downs)と一致

→背景重力波の証拠 (3-4 σ)

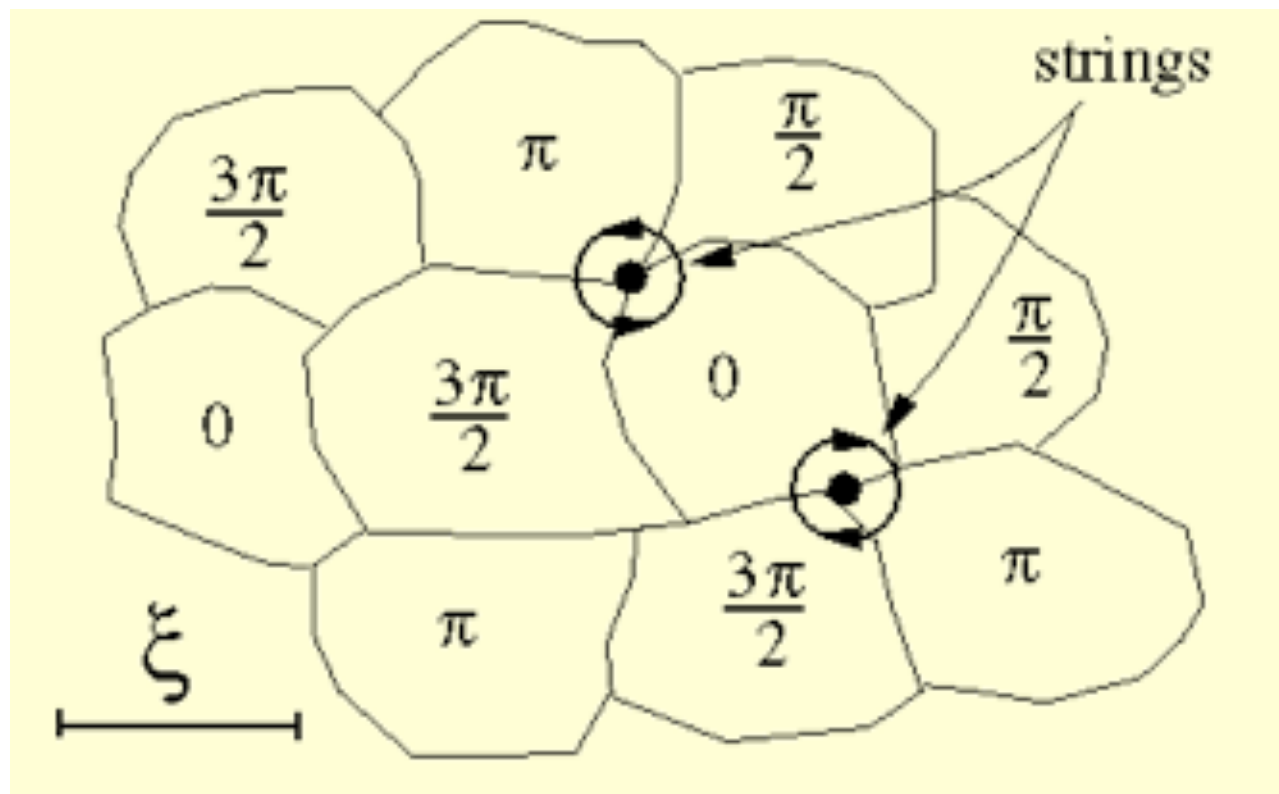
$$\Omega_{\text{GW}} \sim f^5 P_{\text{GW}}(f) \sim \frac{A_{\text{GWB}}^2}{H_0^2} f_{\text{yr}}^2 \left(\frac{f}{f_{\text{yr}}} \right)^{5-\gamma_{\text{GWB}}}$$

Kibble-Zurek 機構

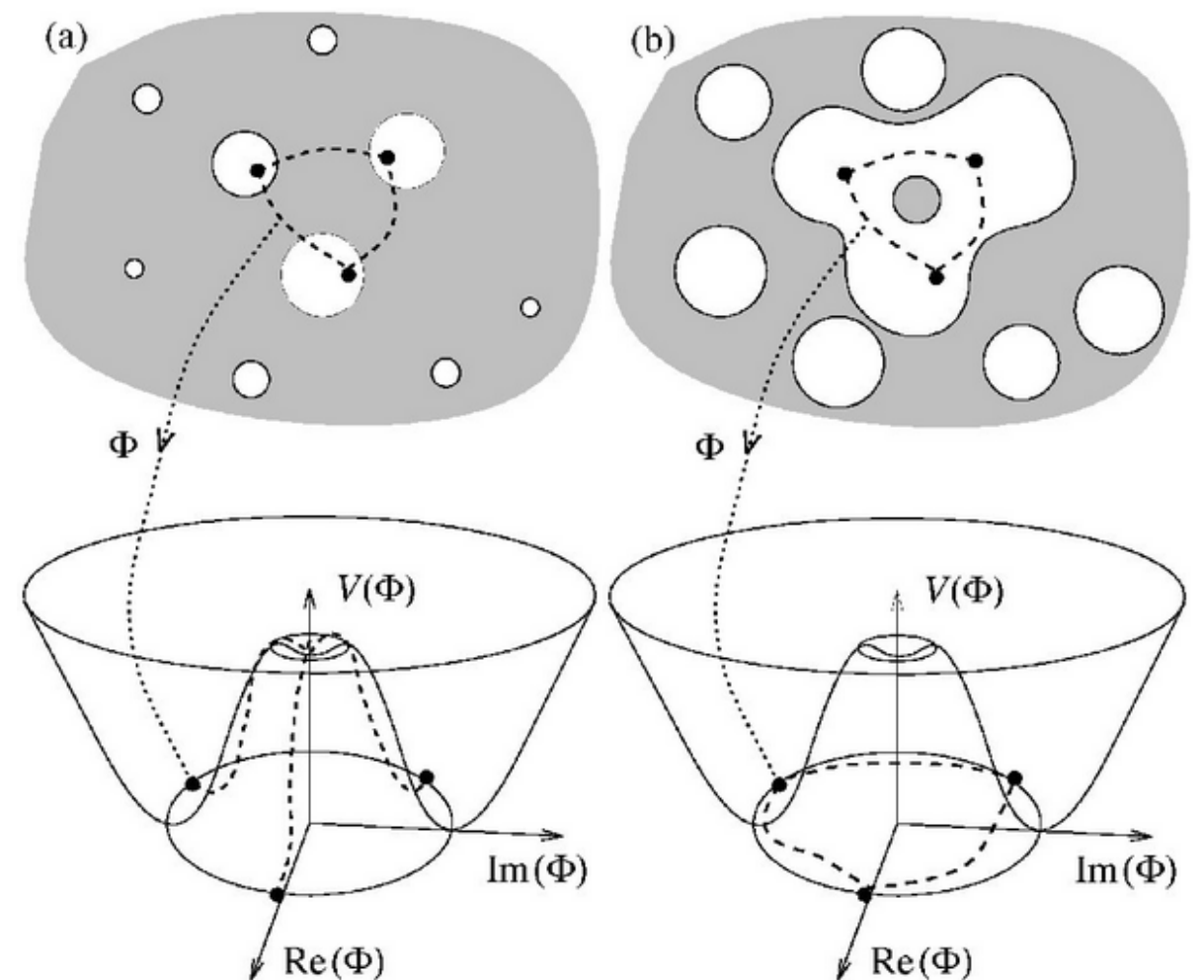
[Kibble '76]

[Zurek '85]

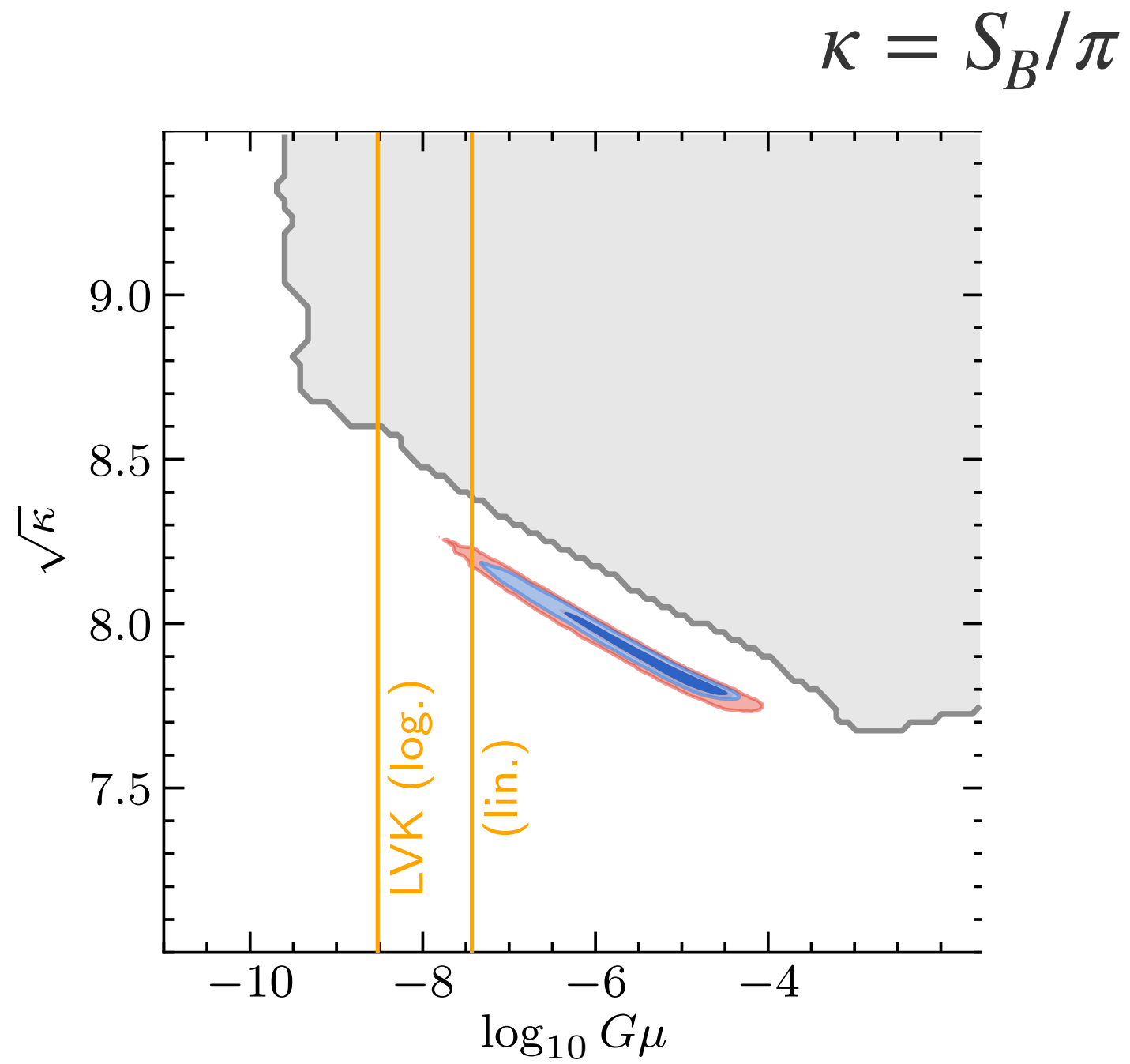
- 初期宇宙でU(1)を破る相転移が起きたと期待
- 相転移は一様には起き得ない → 欠陥としてソリトンが生じる



二次相転移



一次相転移



Metastable cosmic string

[Preskill-Vilenkin '93]

$$v_{SU(2)} > v_{U(1)}$$

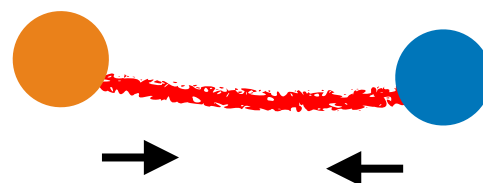
$$SU(2) \xrightarrow{v_{SU(2)}} U(1) \xrightarrow{v_{U(1)}} 1$$

admits magnetic monopole
(like GUT monopole)



cosmic string

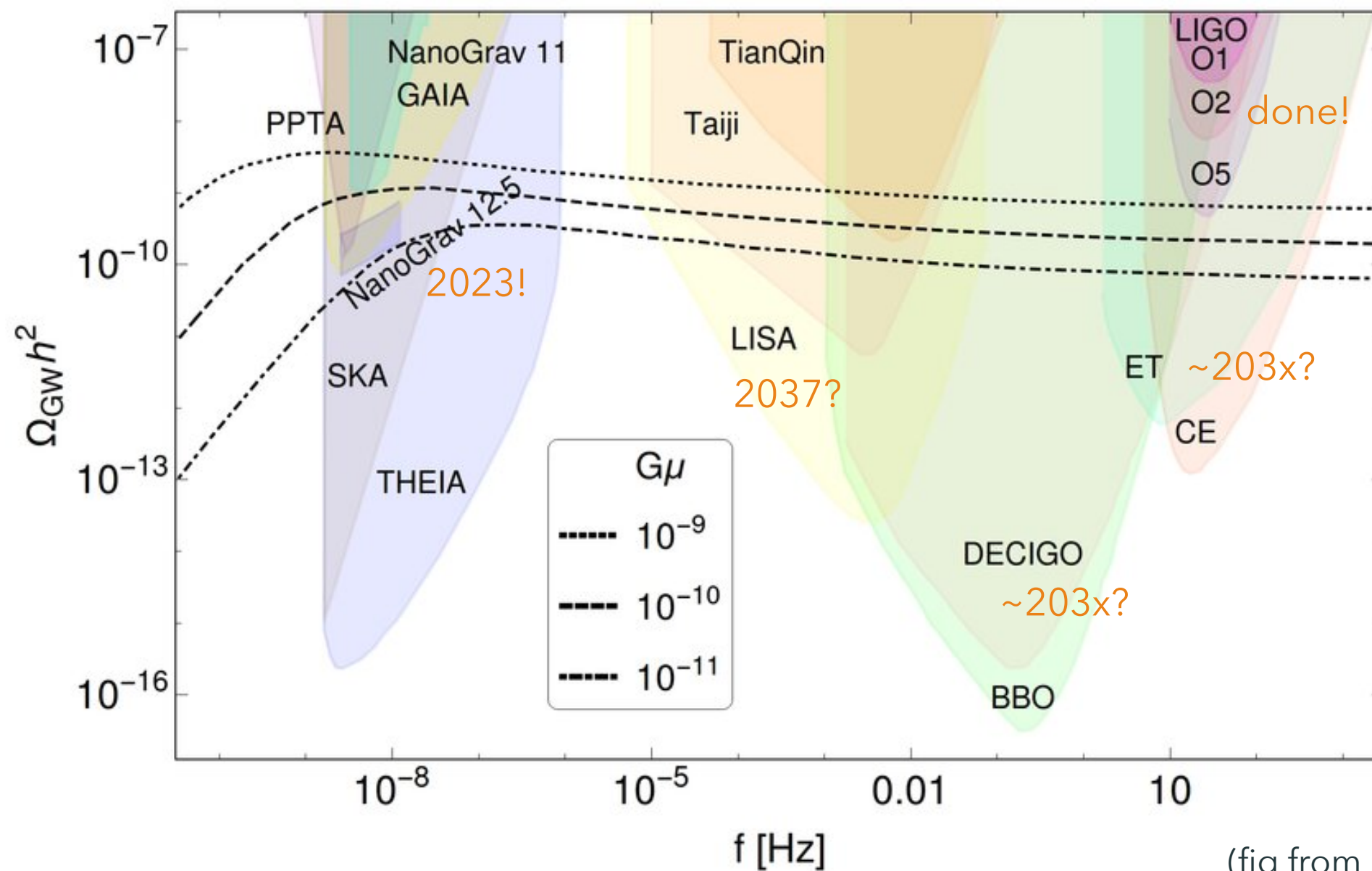
Quantum tunneling



Eventually disappear

Future prospect of GW

$$G\mu \simeq v_{\text{st.}}^2 / M_{\text{pl.}}^2$$



(fig from arXiv: 2212.05291)

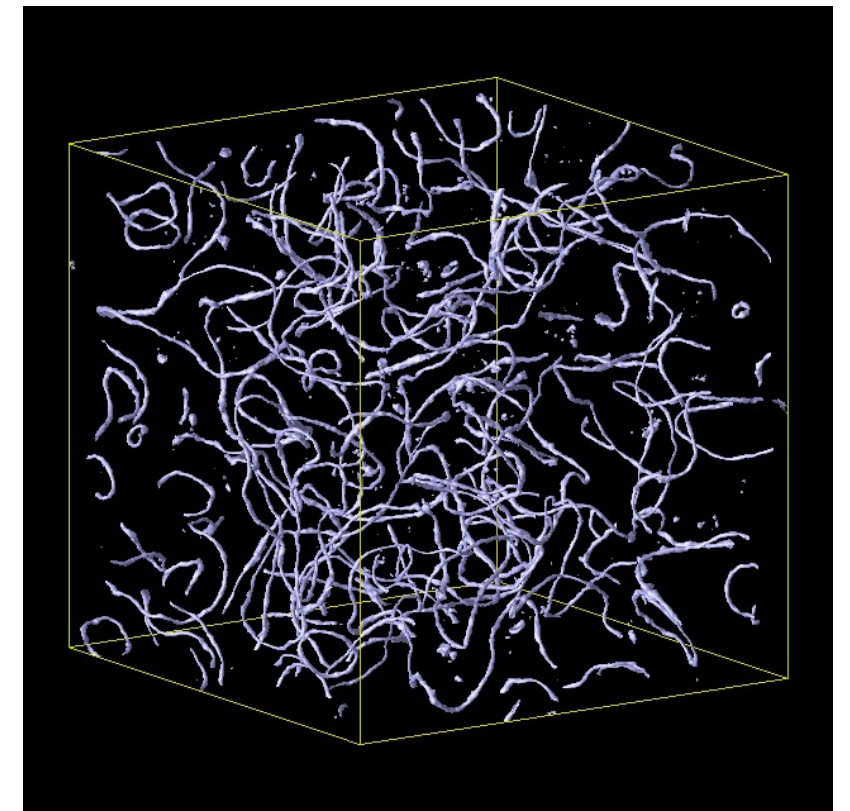
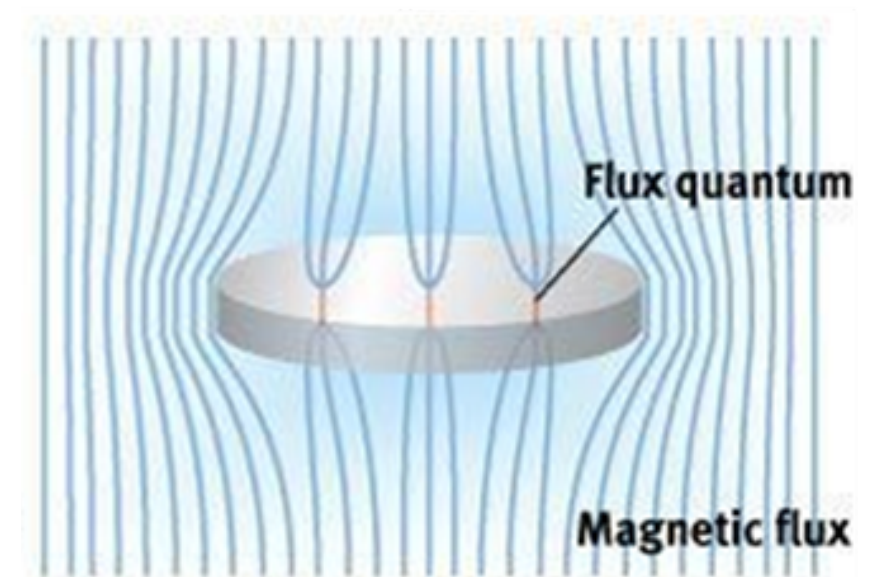
宇宙ひもと重力波の時代!?

宇宙ひもはアツい

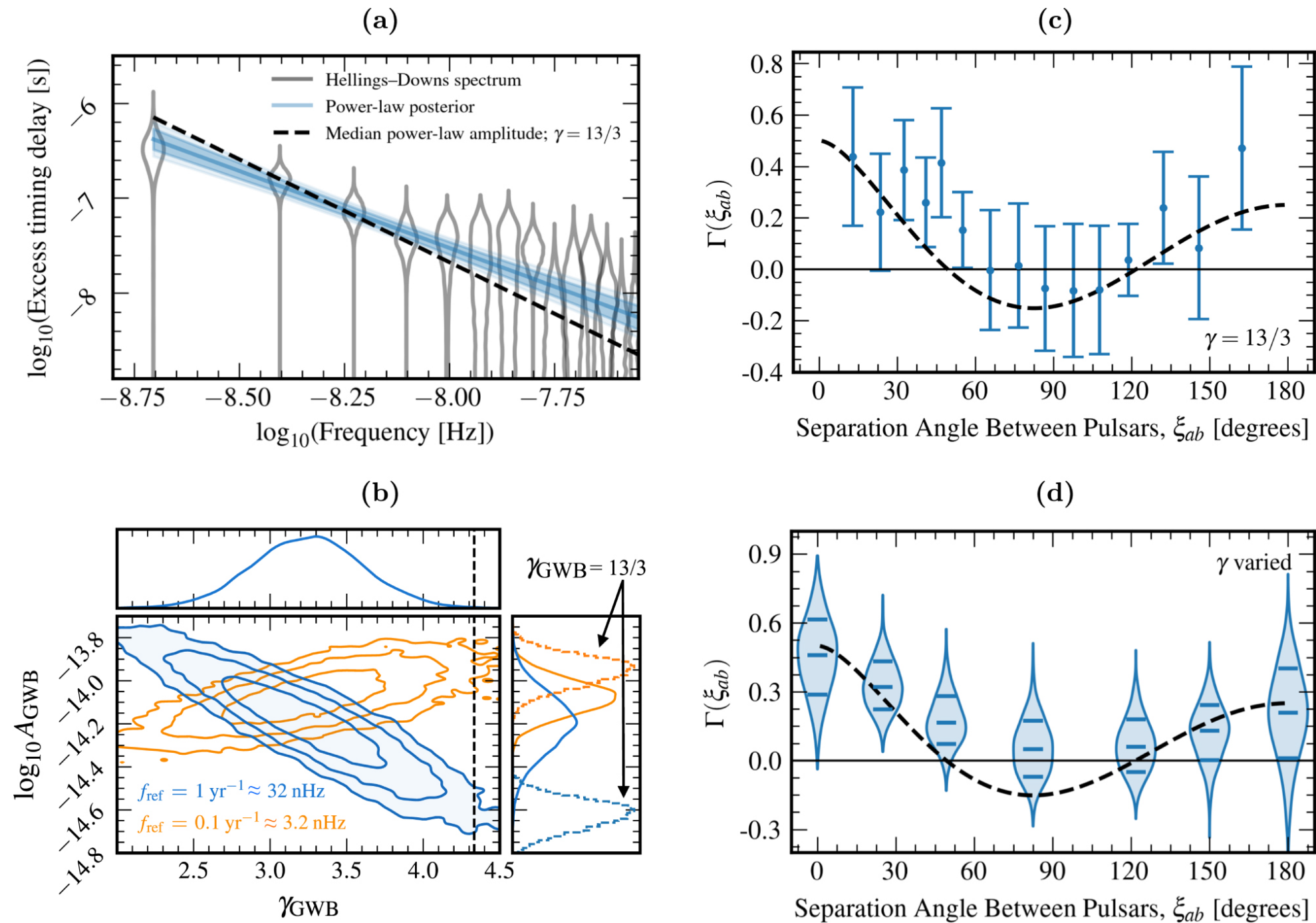
- 超伝導物質
 - 入り込んだ磁場は宇宙ひもと同じ
 - 超伝導体の相図と関係
- 我々の宇宙空間にもあるかも!
 - 宇宙マイクロ波背景放射
 - 重力波
 - 発見されれば新しい物理の強い証拠

宇宙ひもを使って標準模型を超える物理を探る

(例: 大統一理論, QCDアクシオン, etc)



GW is observed by PTA!



[NANOGrav, 2306.16213]