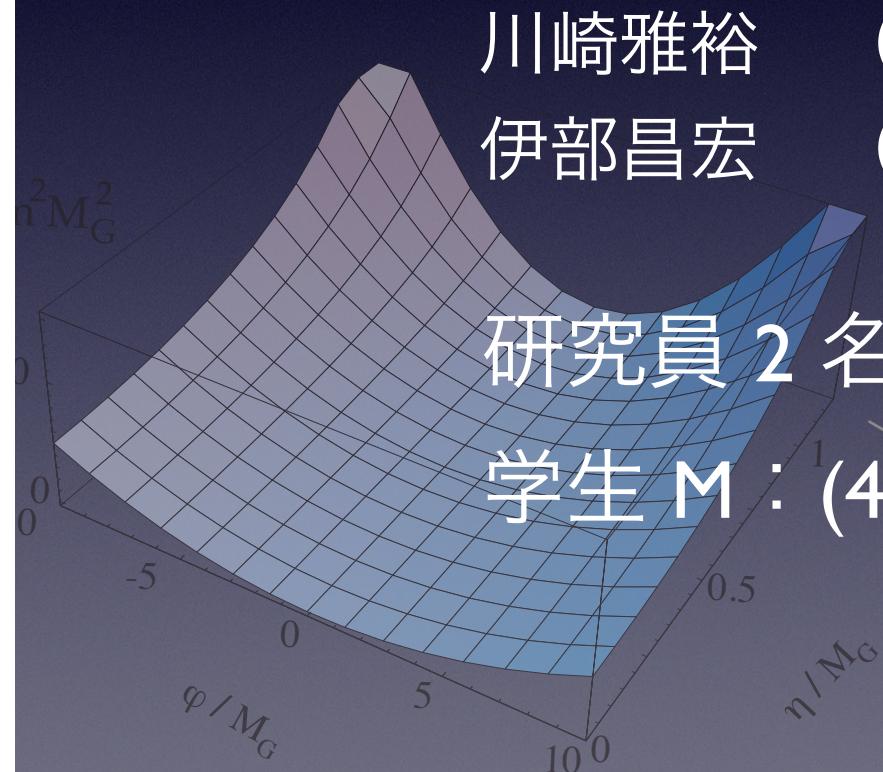


東京大学宇宙線研究所

理論グループ



$$\mathcal{L}_{SUGRA} = -\frac{1}{2}eR + eg_{ij}^* \tilde{\mathcal{D}}_\mu \phi^i \tilde{\mathcal{D}}^\mu \phi^{*j} - \frac{1}{2}eg^2 D_{(a)} D^{(a)} - \frac{1}{2}e f_R^{(ab)} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{\mu\nu(b)} + \frac{1}{8}e \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \bar{\psi}_\mu \bar{\sigma}_\nu \tilde{\mathcal{D}}_\rho \psi_\sigma + \frac{i}{2}e \left[\lambda_{(a)} \sigma^\mu \tilde{\mathcal{D}}_\mu \chi^{(a)} + \lambda_{(a)} \bar{\sigma}^\mu \tilde{\mathcal{D}}_\mu \chi^{*(b)} \right]$$

川崎雅裕
伊部昌宏

(宇宙論)
(素粒子論)

理論グループの研究

- 物質は究極的には何から出来ているのか？
- 相互作用の基本法則は何か？



密接に関係

- 宇宙は何でできているのか？
- 宇宙はどのように始まりそして進化して来たのか？
- 宇宙は今後どうなって行くのか？

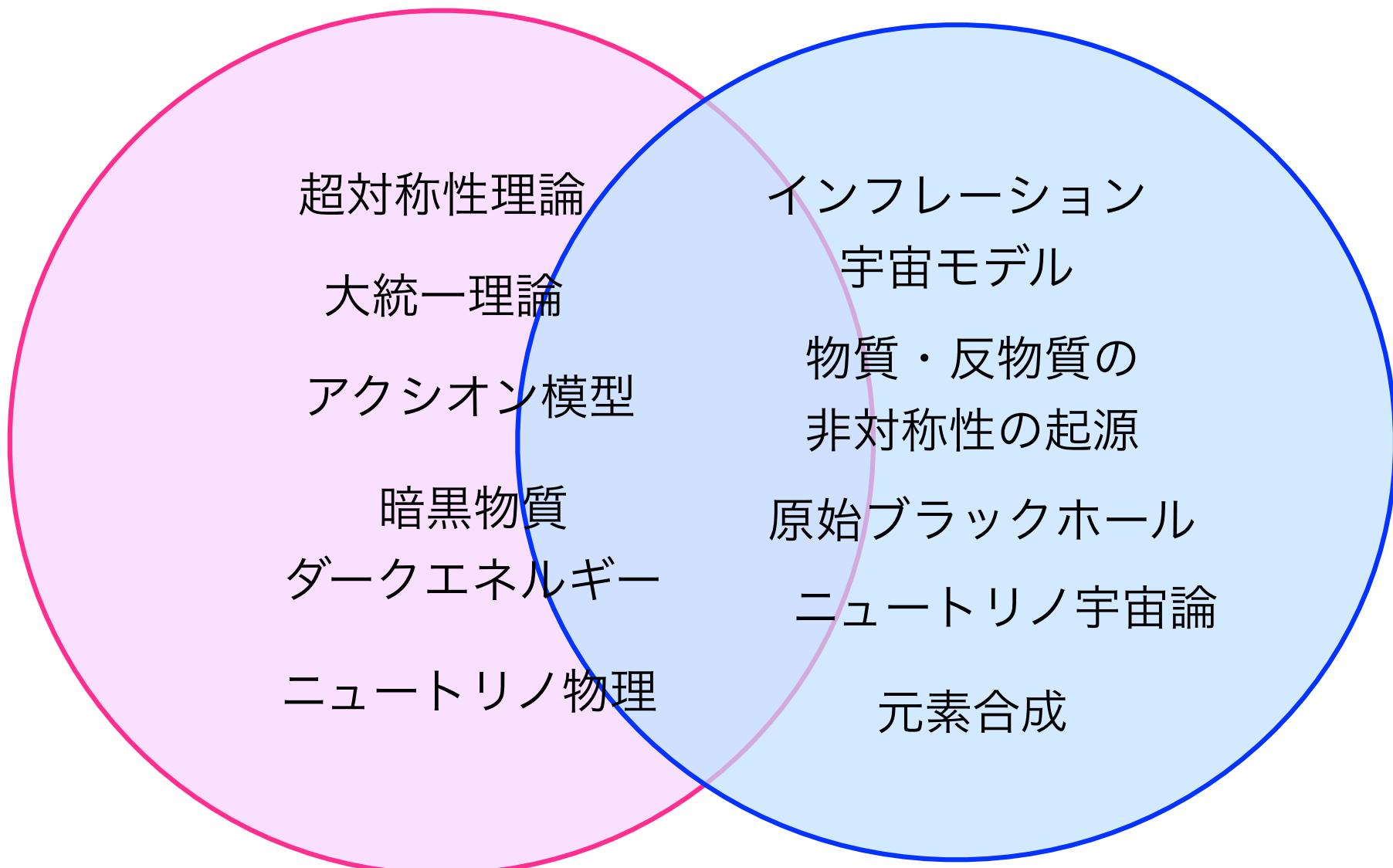
これらの疑問に答える理論を考えるのが理論グループの研究です

理論グループの研究

素粒子的宇宙論

物質の究極の理解

宇宙の探求

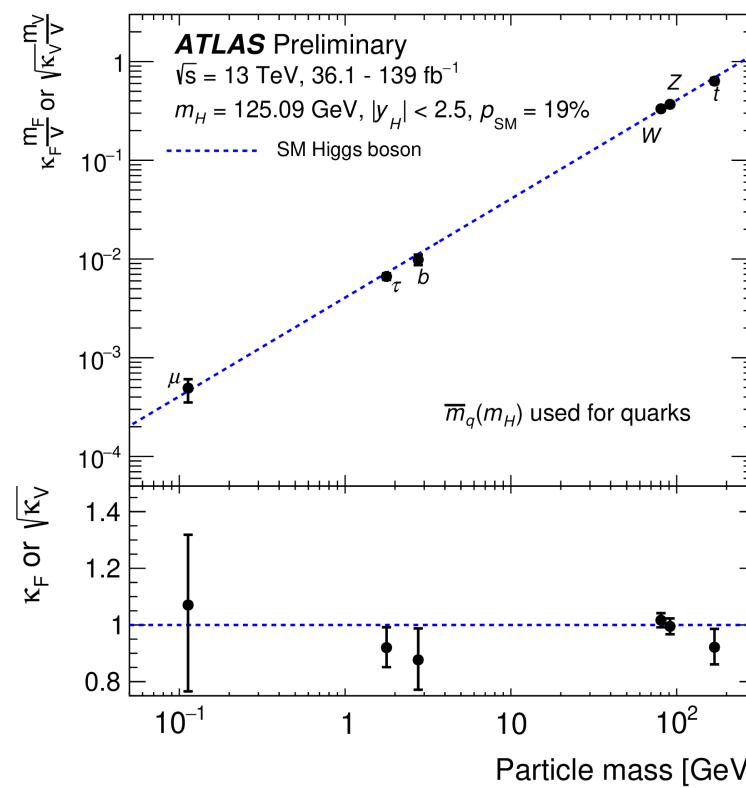
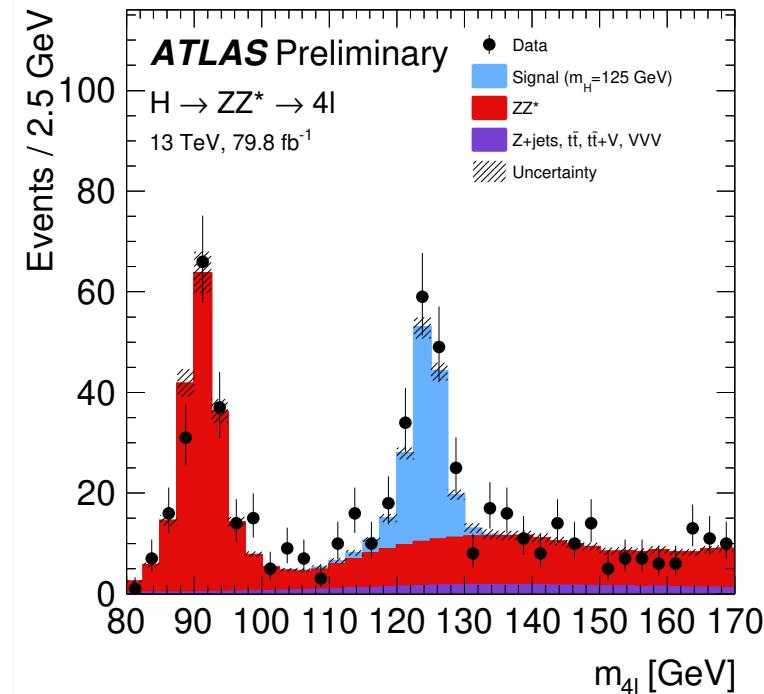


- ・質量を与える素粒子
 - ・ヒッグス
 - ・2011年 LHCで発見

$$m_H = 124 - 126 \text{ GeV}$$

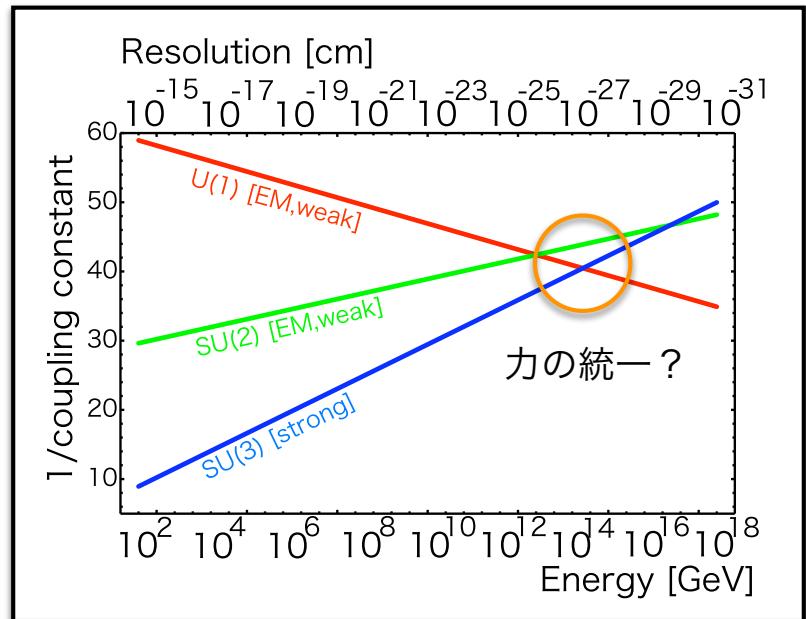
標準模型が完成！

標準模型の背後に迫る時代に
突入している！



標準模型を越える物理？

- 標準模型は最終理論か？
- ヒッグスの質量の起源は？
- ニュートリノの質量の起源は？
- 宇宙の物質反物質非対称性の起源は？
- 暗黒物質は何か？
- CP対称性の起源？CP対称性の破れの起源？
- 標準模型では電磁力と弱い力が統一された。更なる統一は期待出来るか？
- 超対称性？



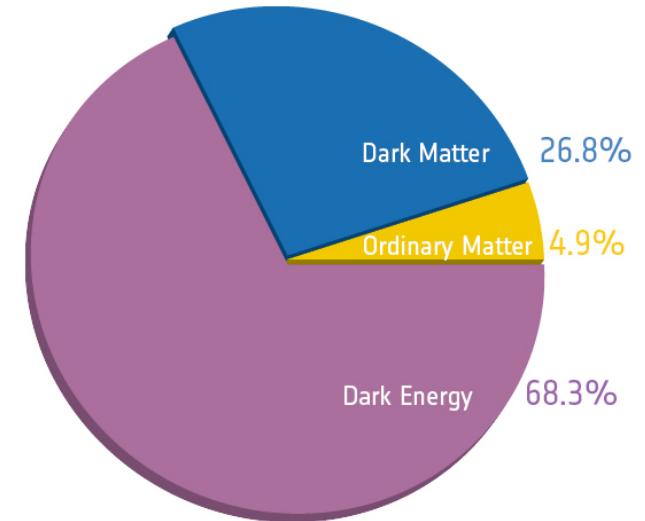
究極の理論への道は遠く、
まだまだ考えることが沢山ある！

宇宙初期

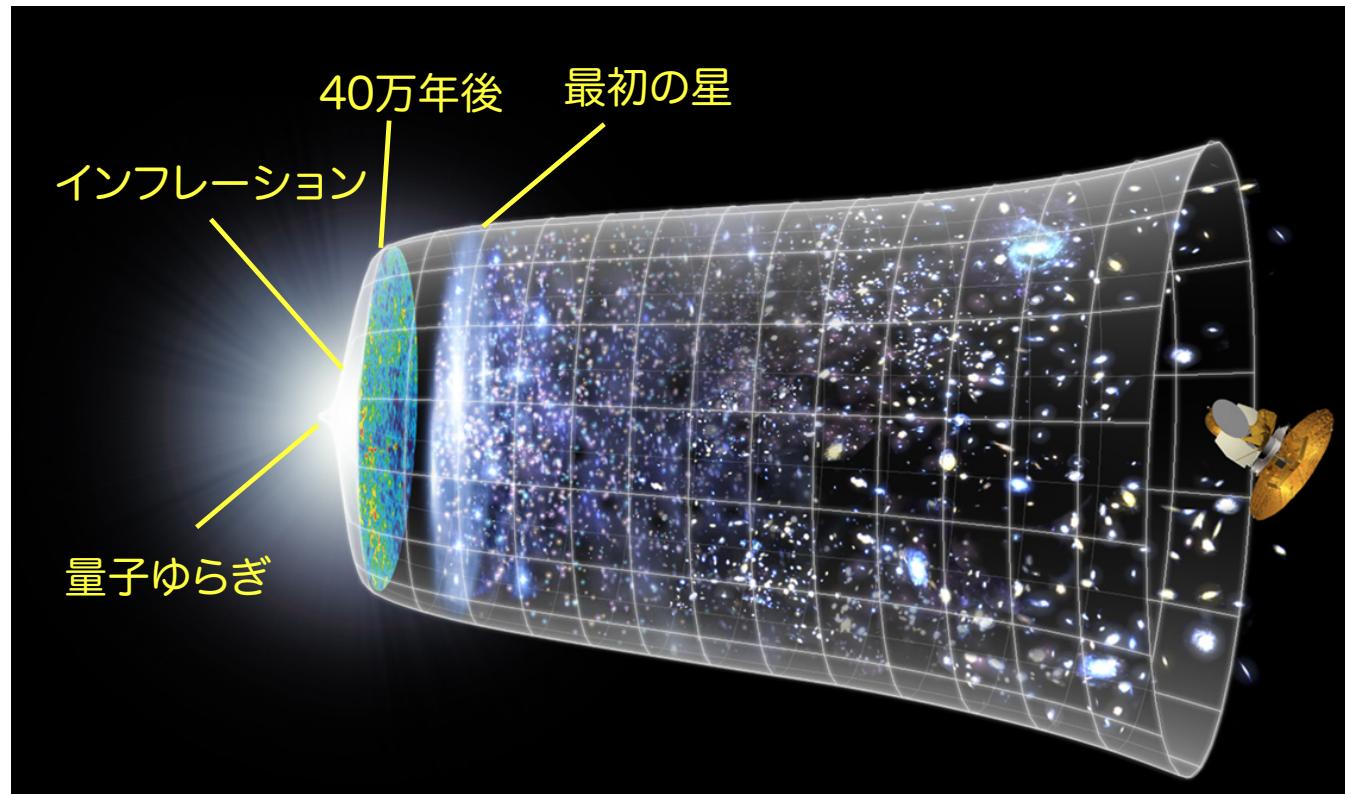
- ビッグバン標準宇宙論
 - ・宇宙が誕生して約 1 秒から現在までの宇宙の進化を正しく記述する
- インフレーション宇宙モデル
 - ・さらに初期の宇宙を記述し標準モデルを補う
 - ・宇宙の平坦さ（宇宙が長生き）を説明
 - ・宇宙が因果律を超えて一様に見えることを説明
 - ・銀河の種（密度揺らぎ）を説明
 - ・宇宙背景放射非等方性の観測からインフレーションの証拠
誕生直後 ($\sim 10^{-36}$ 秒?) の宇宙を理解できる時代になった

宇宙論の問題

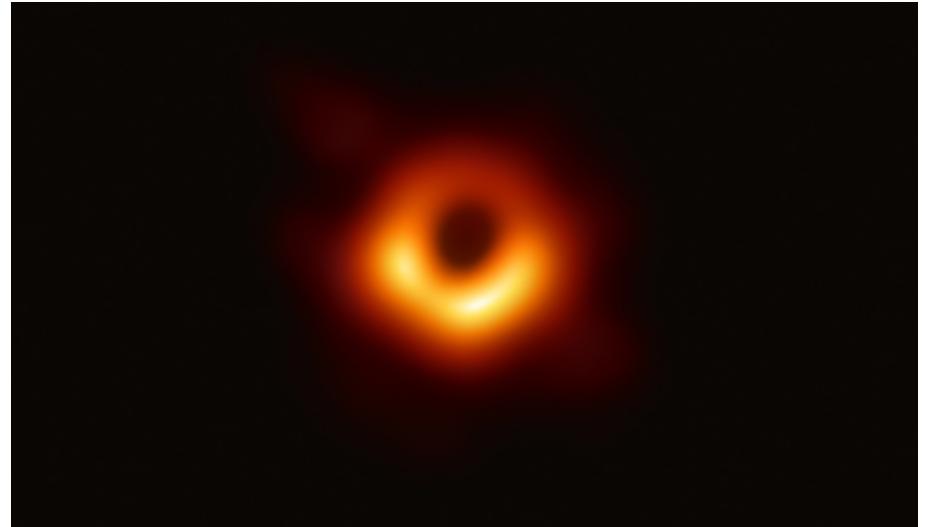
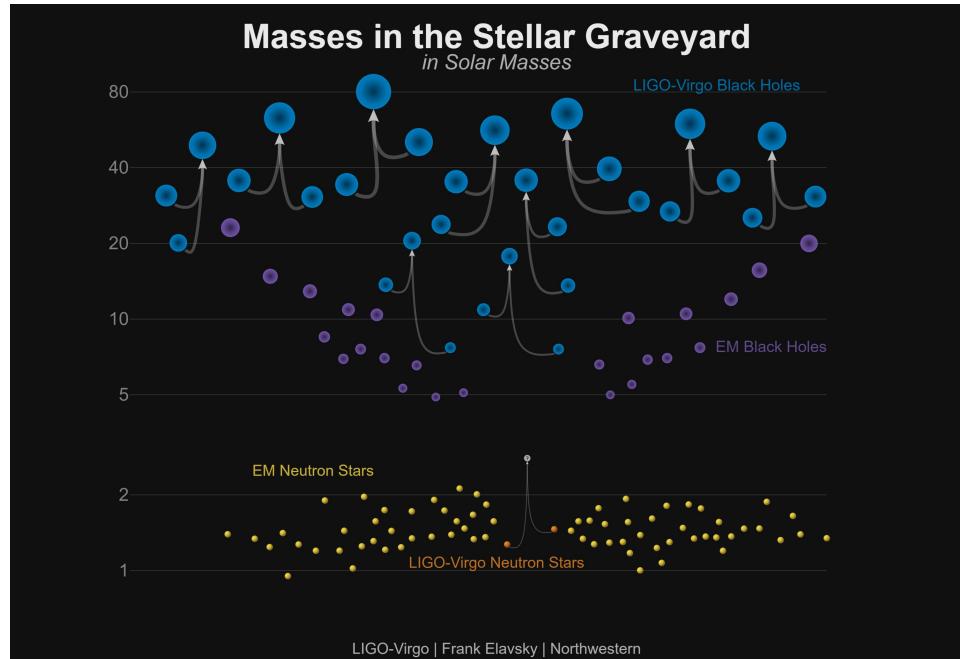
- インフレーションを起こす素粒子モデル
- 宇宙の物質・反物質非対称性
- ダークマター・ダークエネルギー



宇宙論と素粒子論はもはや切り離せない！



宇宙論の問題



EHT による M87 BH の画像 (質量 $\sim 10^9 M_\odot$)

重力波観測を通じて太陽質量の数十倍の重いブラックホールが発見

銀河中心には $10^{3-9} M_\odot$ の巨大ブラックホールが存在

巨大ブラックホールの起源は未だ不明...

インフレーションなどの初期宇宙に起源？

研究例：

準安定宇宙ひもの再考察 (2003)

Akifumi Chitose, MI, Yuhei Nakayama, Satoshi Shirai, Keiichi Watanabe

当時M2

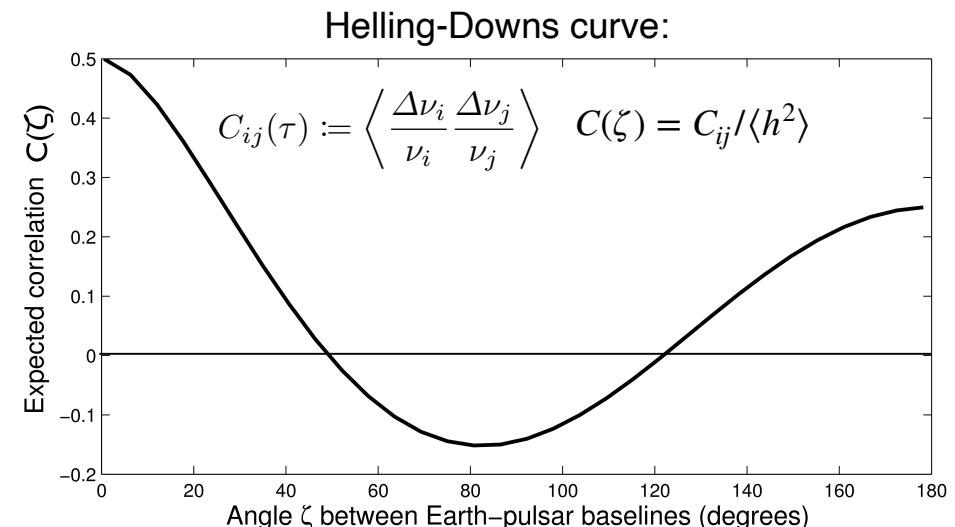
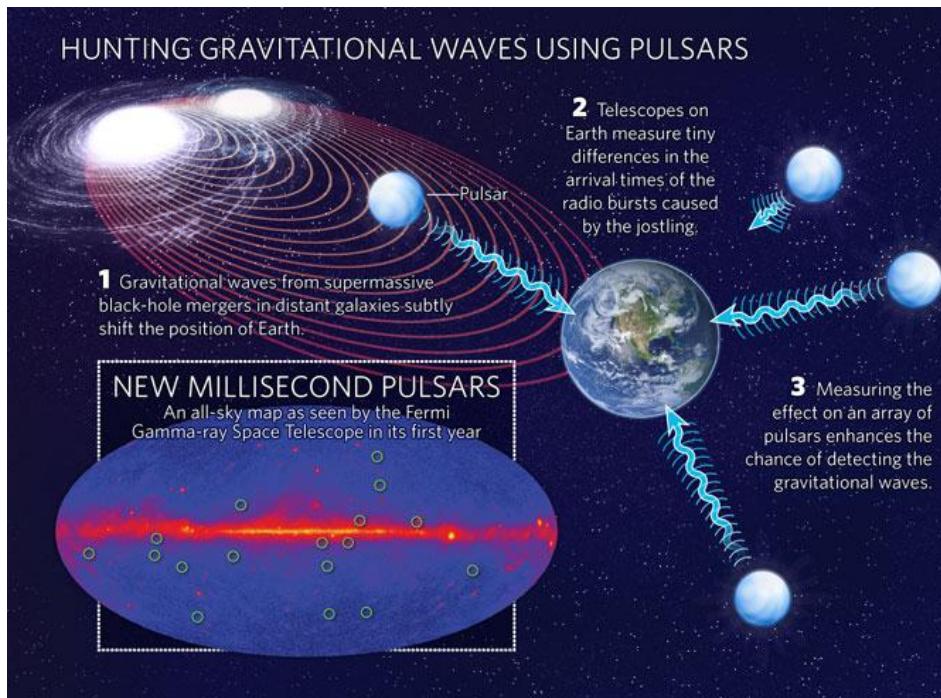
当時D3

IPMU教員

当時D2

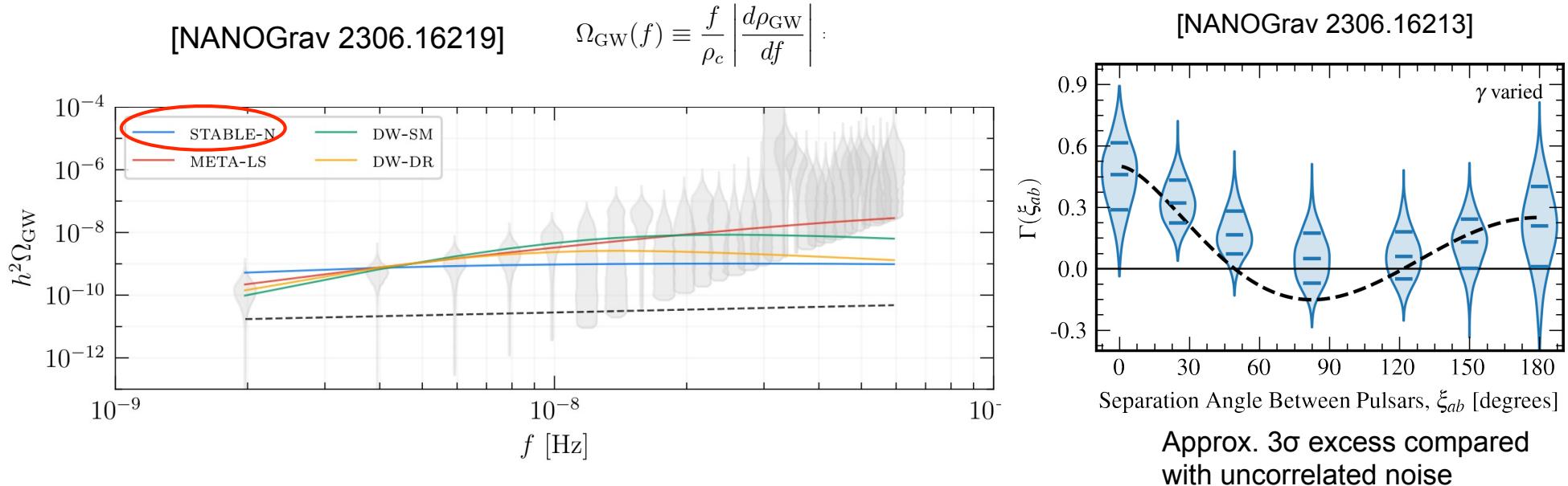
パルサーテイミングアレイ実験：背景重力波発見？

- ・ミリ秒パルサー：宇宙では信じられないほど安定した時計。
- ・時空を通過するGWがパルスの到着時刻をわずかに変化させる。
- ・タイミング分析：PTAは、GWを示す多くのパルサーからの到着時刻の観測値と予測値の差の相関を検出することができる。
- ・[NANOGravは67個のパルサーからの電波を15年間～ 5×10^8 秒観測している。]



背景重力波に特徴的な角度相関
PTA 実験はランダムな重力波を発見出来る！

パルサーテイミングアレイ実験：背景重力波発見？



準安定な宇宙ひも由来の重力波が結果をよく再現する！

ひもの張力 (= 単位長さの重さ) μ :

$$G_N \mu \sim 10^{-8} - 10^{-4}$$

$$(\mu^{1/2} \sim 10^{15} - 10^{17} \text{ GeV} \leftarrow \text{大統一理論のスケール?})$$

Breaking @ cosmic time $t_s \sim \Gamma_d^{-1/2}$

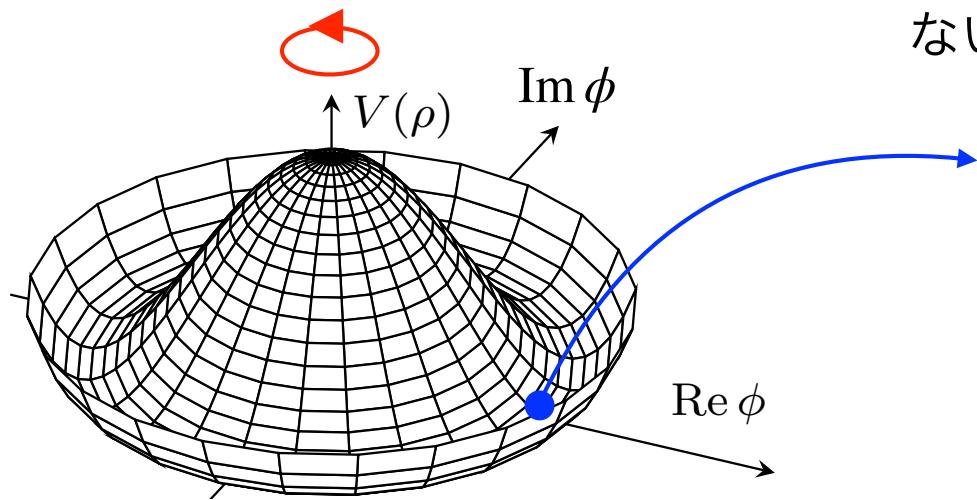
$$t_s \sim 10^3 \text{ sec}, \quad (G_N \mu \sim 10^{-4})$$

$$t_s \sim 10^6 \text{ sec}, \quad (G_N \mu \sim 10^{-8})$$

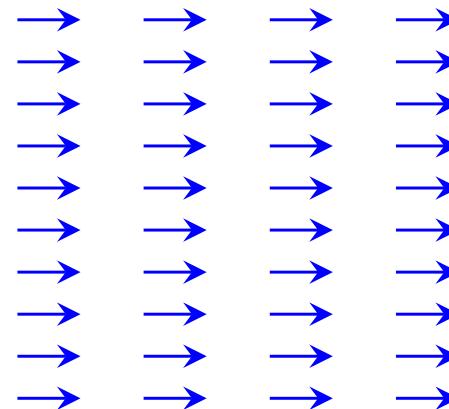
宇宙ひもとは？

自発的対称性の破れ (Higgs Mechanism)

$U(1)$ 位相回転対称性の場合



自発的な破れは複素場 ϕ が 0 ではない真空期待値を持つことで生じる

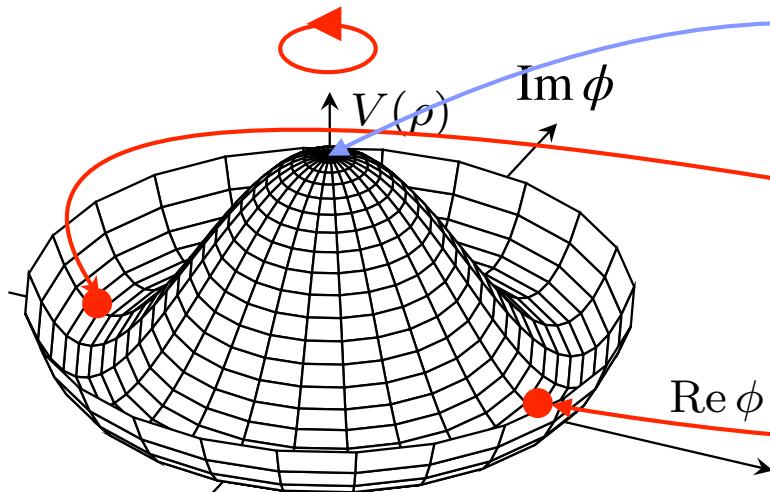


宇宙の各点で期待値の“方向”が等しい
= 単純な真空

宇宙ひもとは？

自発的対称性の破れ (Higgs Mechanism)

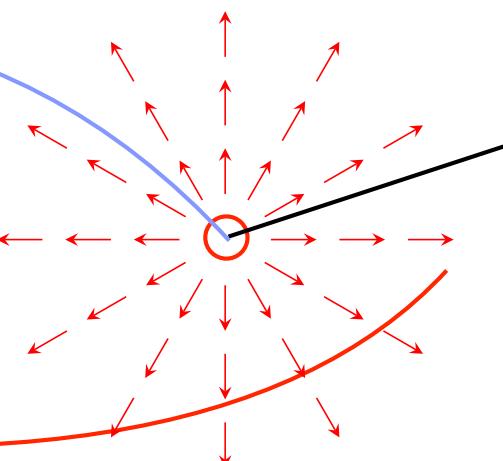
U(1) 位相回転対称性の場合



宇宙の離れた場所で対称性の破れの
向きが異なることがある

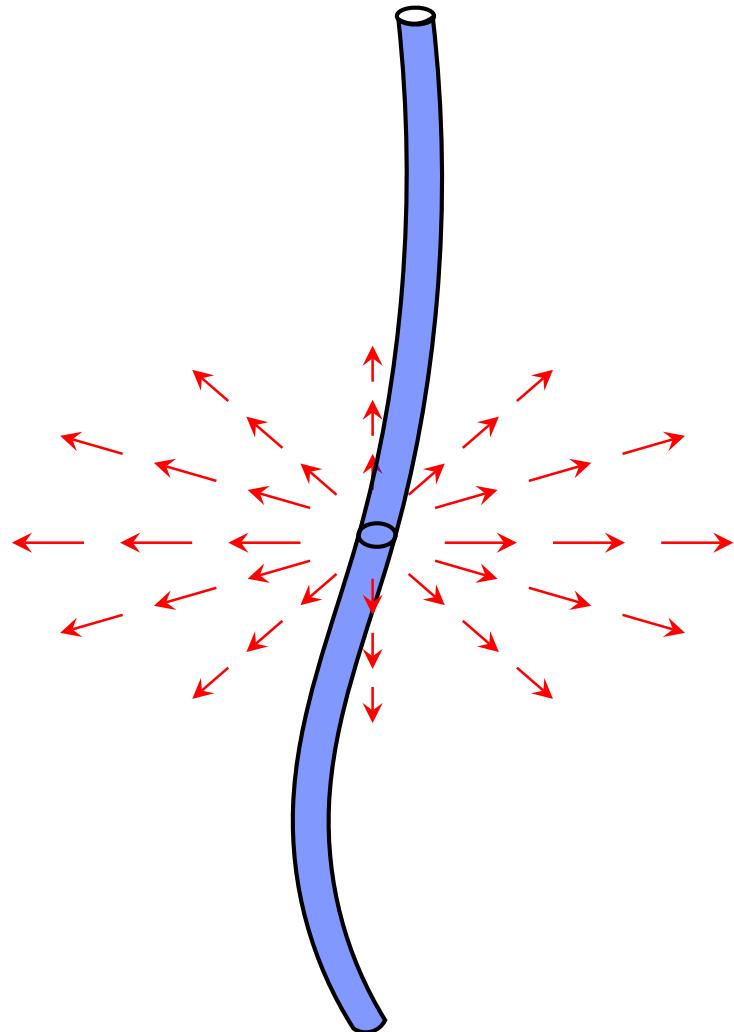
対称性が
破れない場所

单連結でない真空構造を持つ理論の場合、
方向が異なる破れに囲まれた点は対称性が
回復してしまう



対称性が破れない場所 = 位相欠陥

宇宙ひもとは？



3次元の宇宙に位相欠陥ができると
1次元のひも状の物体を形成する

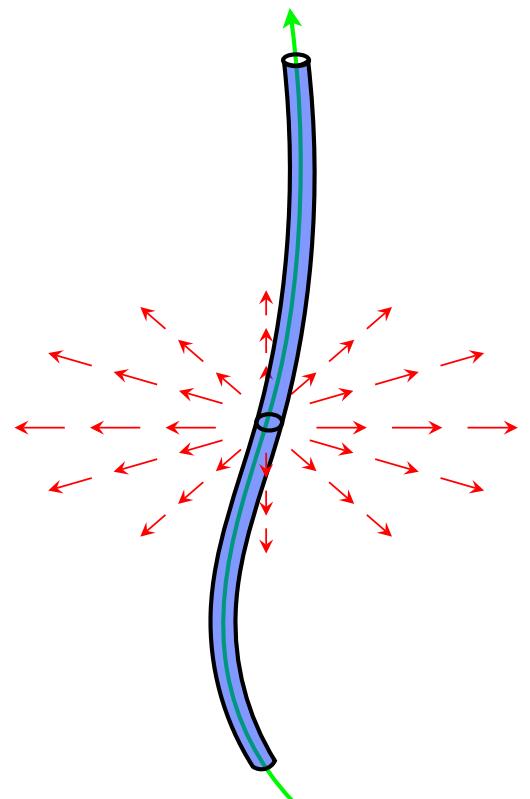
宇宙ひも！

宇宙ひもは様々な新物理模型に現れる
非常にポピュラーな存在

標準模型を超えた理論に新たな $U(1)$ 対称性があると
初期宇宙の相転移での対称性の破れに伴って宇宙ひもが生じる！

宇宙ひもの性質のまとめ

中に新物理の磁場が入っている

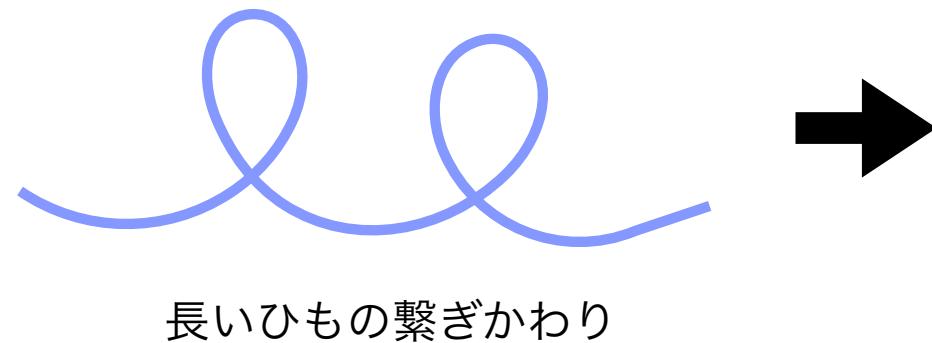


宇宙ひもの中には新物理の磁力線が通っている

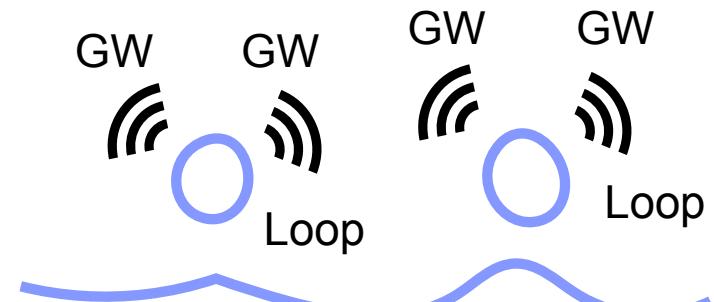
長い宇宙ひもは切れずに安定 (c.f. 磁力線は途切れない)
(繋ぎ変わることはできる：磁力線と同様)

長く宇宙ひもは繋ぎ変わりながら宇宙に留まり続ける

宇宙ひものループは重力波を放出して縮んで行く

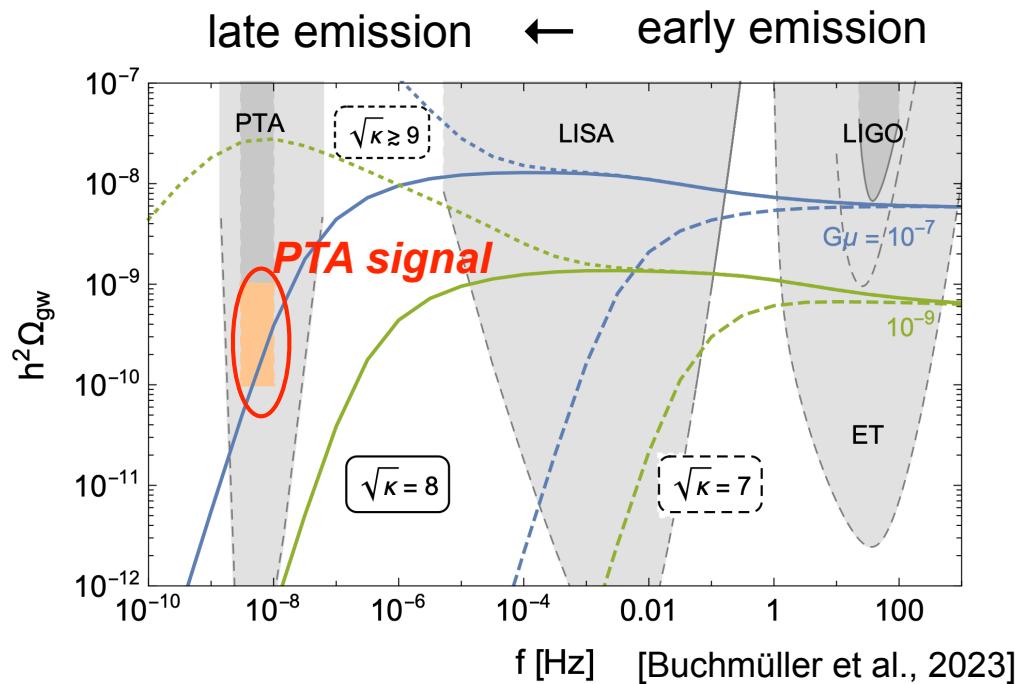


長いひもの繋ぎかわり



主にループから重力波を発生

なぜ準安定な宇宙ひも？



Dotted ~ 安定な宇宙ひも,
Solid ~ 準安定な宇宙ひも,
Dashed ~ more fragile

安定な宇宙ひもだと重力波のスペクトルが合わない...

(特に宇宙の後期になって生じた宇宙ひものループの寄与が邪魔)

宇宙後期 ($t = 10^3 \sim 10^6 \text{ sec}$) 以降に長いひも (= ループの源)
自体が消えてしまえばよい

→ 準安定な宇宙ひも

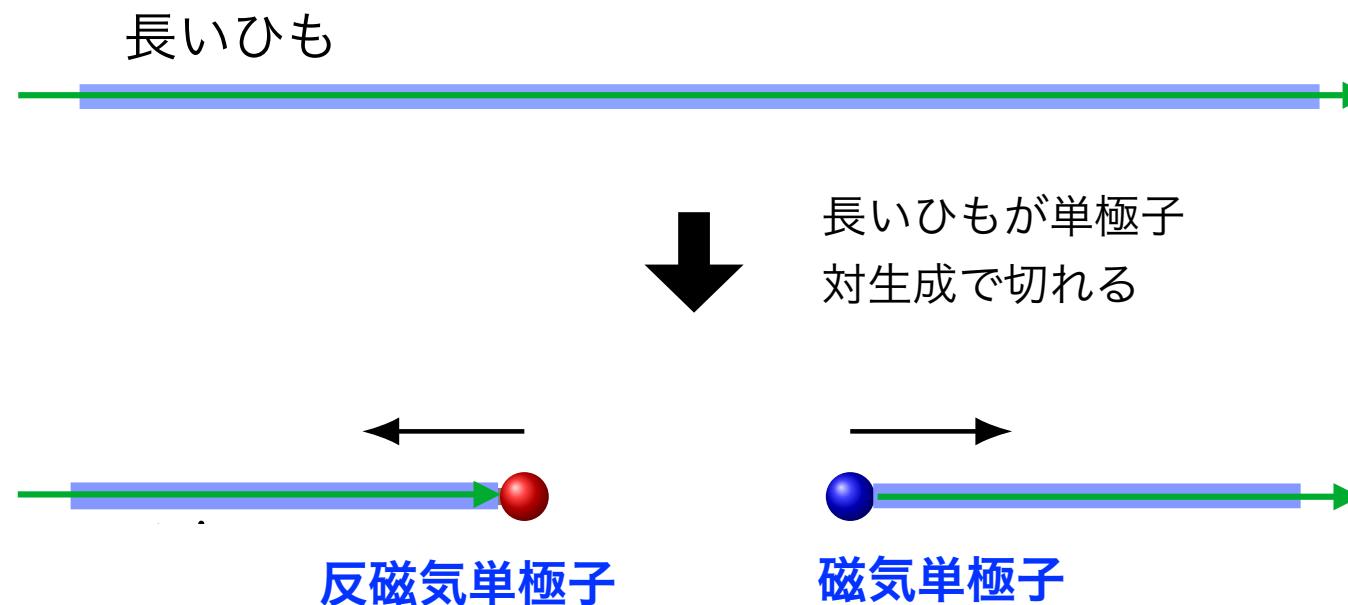
宇宙ひもは安定なのでは？

Key : 磁力線

$U(1)$ 対称性を持つ新物理に **磁気单極子** が含まれている場合

→ 磁気单極子は磁力線の端点となり得る

→ 宇宙ひもの内部に **磁気单極子** と **反磁気单極子** が対生成されれば
宇宙ひもは断裂する ! [Vilenkin 1982]



このタイプの模型は $SO(10)$ ゲージ群を使った大統一模型によく現れる！

崩壊率はどうやって計算？

必要な寿命は $t = 10^3 \sim 10^6$ sec

理論と比較するには理論からの計算が不可欠！

単位長さの断裂率に対する Preskill Vilenkin 近似 (1992)

$$\Gamma_d = \frac{\mu}{2\pi} e^{-\pi\kappa}, \quad \kappa = \frac{M_M^2}{\mu}$$

μ : ひもの単位長さ当たりの重さ, M_M : 磁気单極子質量

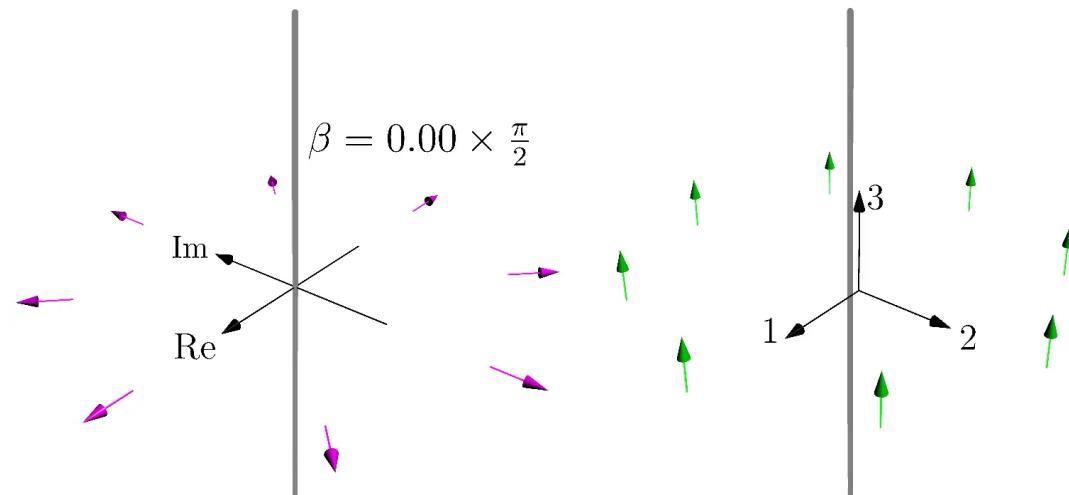
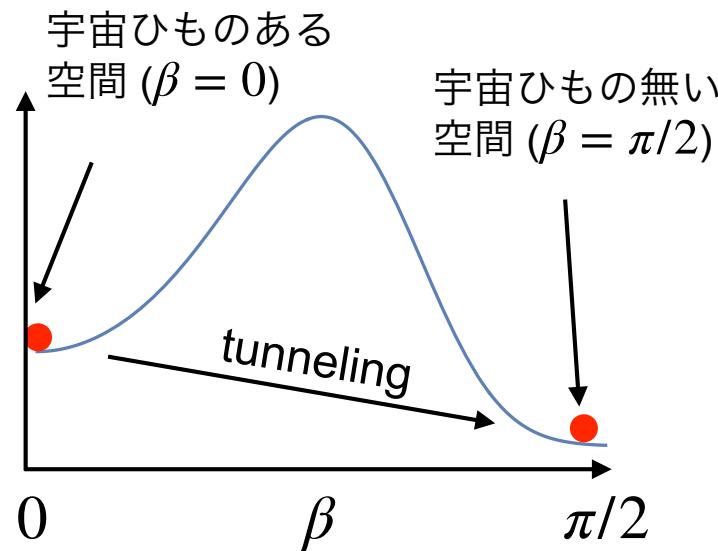
ラフな見積もりで $\kappa \gg 1$ でのみ有効な近似

重力波信号から要求される値 $\kappa = O(1)$ なので大丈夫か？

崩壊率はどうやって計算？

我々の解析： *JHEP 04 (2024) 068*

太さを持った宇宙ひもの断裂数率は難しいがなんとか1次元のトンネル効果の計算に帰着 (Shifman&Yung 2002)



重力波信号を説明できる寿命ではやはり Preskill-Vilenkin 近似は信頼できない
今回の結果は重力波信号を大統一模型で解釈するのに重要な input になる！
(まだ未完成なことが沢山あるので継続して研究中)

理論グループの特徴

- 素粒子・宇宙の研究室が一体的に運営
 - セミナーは共通、学生は同じ部屋
(水曜日:ジャーナルクラブ / コロキウム)
 - 素粒子と宇宙の両方に興味がある学生に最適
 - 閑静な柏キャンパス
 - 数物連携宇宙研究機構(IPMU)
 - I.PMUの人々との積極的に共同研究しています。
- 伊部（素粒子論）A1
- 川崎先生は来年度のM1生を取りませんが宇宙論+素粒子としての運営は続きます。

進学後の道のり

- M1~M2

- 基礎勉強（とても大事）　　場の理論、宇宙論
- 講義（本郷）M1前半は本郷での講義が中心の生活
- 教科書や論文を読むゼミ@柏 or 本郷
- 興味のある分野の論文を読むhep-ph, astro-phをチェック
- **M1の秋からプロジェクト → M2 の春頃までに論文にする**



12月完成

修士論文の内容は学術雑誌に発表

- D1~D3

- 独立した研究者になる自ら研究課題を見つけ研究を遂行する
- 博士論文を完成

最近の修士過程の学生の研究例

Revisiting Metastable Cosmic String Breaking

Akifumi Chitose^a, Masahiro Ibe^{a,b}, Yuhei Nakayama^a, Satoshi Shirai^b, and Keiichi Watanabe^a

More on Dark Topological Defects

Akifumi Chitose^{1,*} and Masahiro Ibe^{1,†}

Small Instanton Effects on Composite Axion Mass

Takafumi Aoki^a, Masahiro Ibe^{a,b}, Satoshi Shirai^b, and Keiichi Watanabe^a

Clustering of Primordial Black Holes from QCD Axion Bubbles

Kentaro Kasai^a, Masahiro Kawasaki^{a,b}, Naoya Kitajima^{c,d},
Kai Murai^{a,d}, Shunsuke Neda^a, Fuminobu Takahashi^d

Primordial Origin of Supermassive Black Holes from Axion Bubbles

Kentaro Kasai^a, Masahiro Kawasaki^{a,b}, Naoya Kitajima^{c,d},
Kai Murai^d, Shunsuke Neda^a, Fuminobu Takahashi^d

卒業後の進路

修士	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5
進学	1	2	2	2	2	3	1	1	1	1	2
就職	0	1	0	0	2	0	0	1	2	1	0

博士	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5
研究職	2	0	1	1	1	1	2	0	0	1	0
就職	1	0	0	0	1	1	0	2	2	0	1

- 興味のある方は午後の研究室訪問にお越しください。
(都合により 4 時半までです。すみません。)