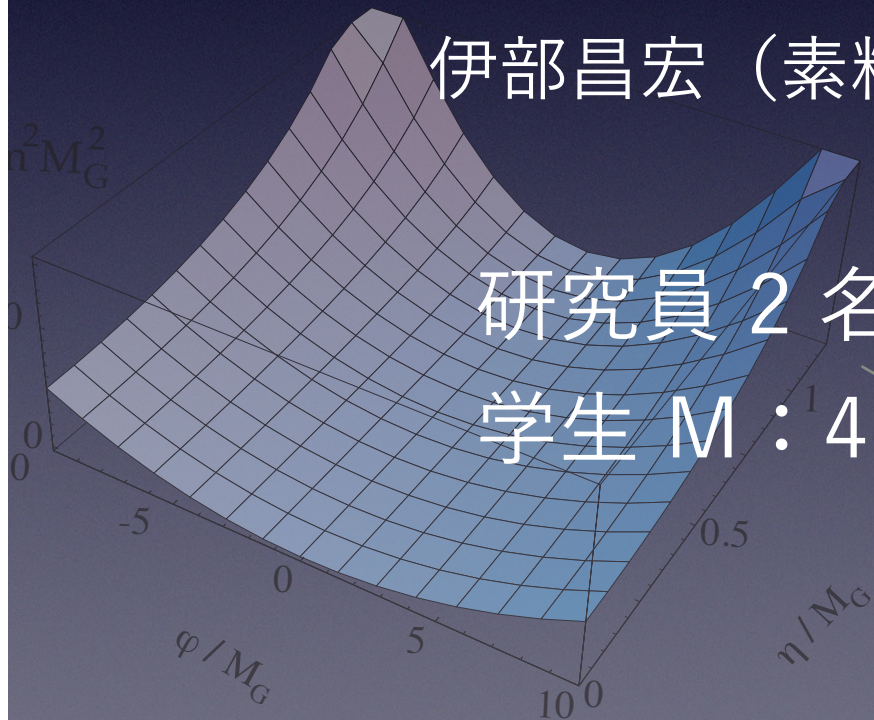


東京大学宇宙線研究所 理論グループ

伊部昌宏（素粒子論・素粒子論的宇宙論）

研究員 2 名

学生 M : 4名 D : 4名



理論グループの研究

我々が存在している自然が何故そのようなになっているのかを解明し、それを記述する基本原理を理解したい。

- 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？



- 宇宙は何で出来ているのか？
- 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いくのか？

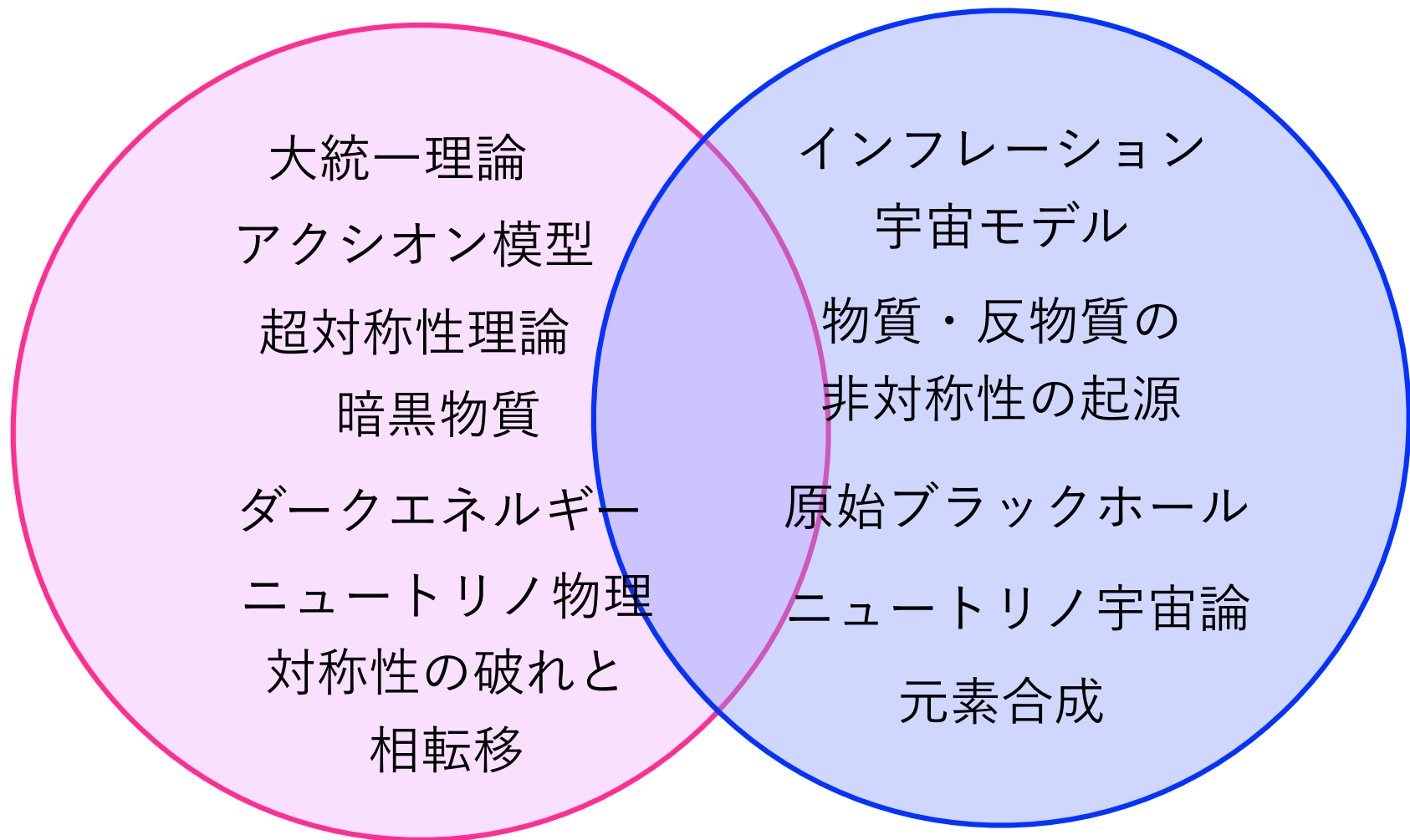
これらの疑問に答える理論を考えるのが理論グループの研究です

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

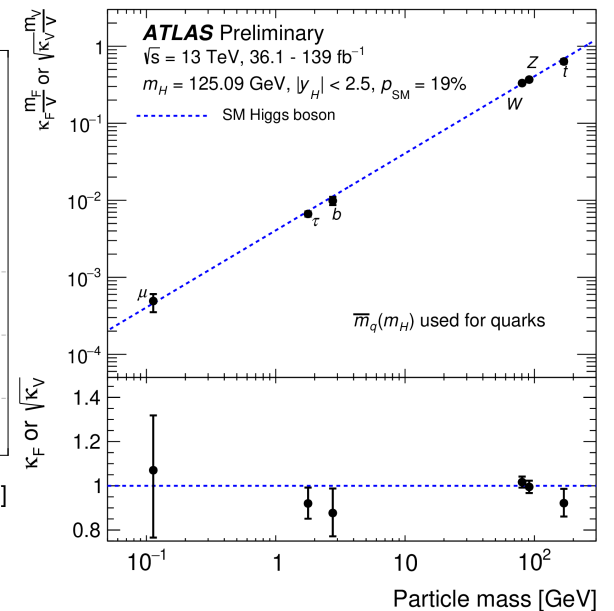
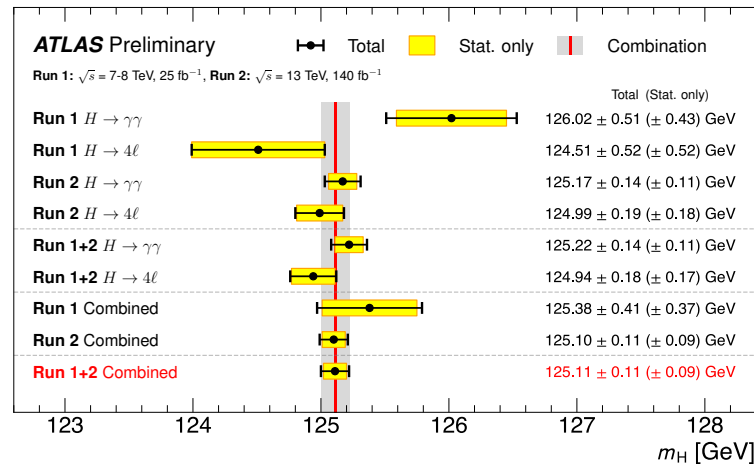
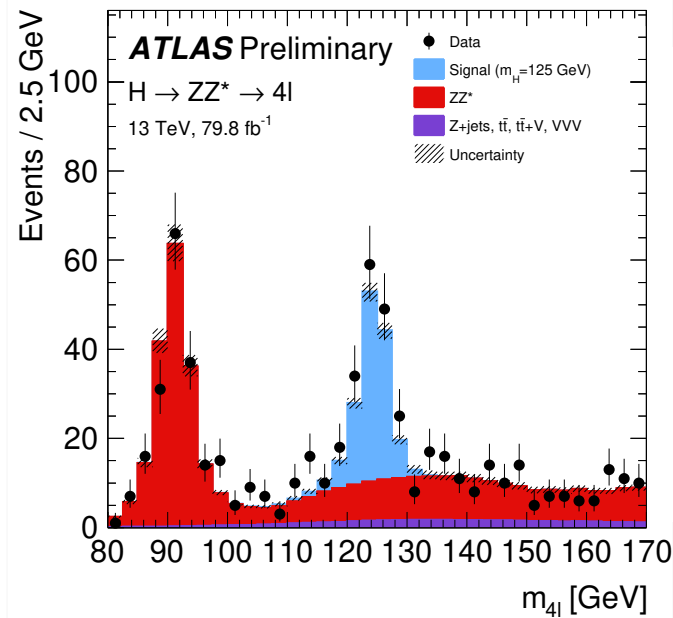


場の量子論を駆使してこれらの問題に挑む！

素粒子論の現状

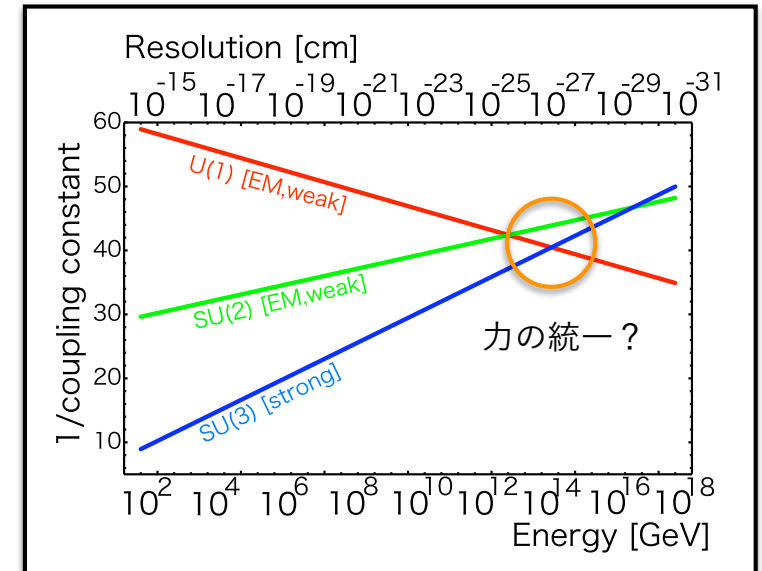
素粒子標準模型： $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ理論

- ✓ 2012年に Higgs 粒子の発見によって完成
- ✓ 現在ではHiggs 粒子の精密測定を通じて Higgs 粒子の背後に迫ろうとしている！



標準模型を超える物理？

- そもそもヒッグスの質量の起源は？
- 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？
- ニュートリノの質量の起源は？
- 暗黒物質は何か？
- インフレーションを記述する素粒子模型？
- 宇宙の物質反物質非対称性の起源は？
- CP対称性の起源？CP対称性の破れの起源？
- Higgs やインフレーションの背後に超対称性？
- 真空の安定性？



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！

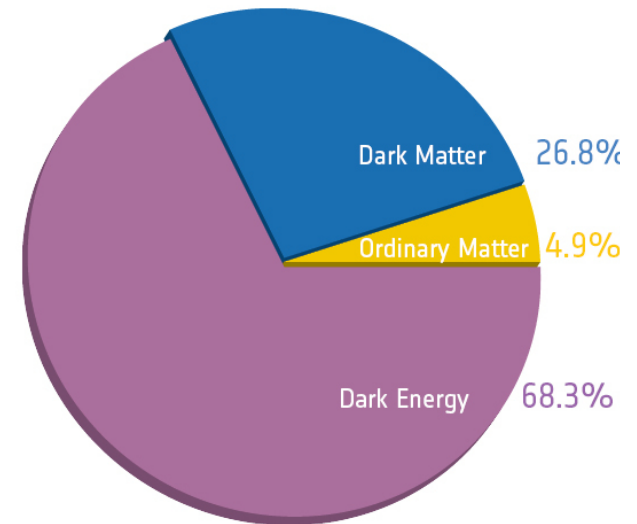
素粒子論の現状

- 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(CMB) の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

- インフレーション模型
- 密度揺らぎのスペクトル
- 宇宙の物質・反物質非対称性
- 暗黒物質、ダークエネルギー
- CMB vs 大規模構造 (Hubble Tension ?)
- Big-Bang Nucleosynthesis の再検討？
- 宇宙のニュートリノの実効的世代数？
- 原始ブラックホール ((超)巨大ブラックホール起源) ？



素粒子と宇宙の起源を同時に探る研究が求められている！

研究例：

超対称性インフレーション模型における
準安定安定な宇宙ひもからの統計的重力波

Akifumi Chitose, Shunsuke Neda, MI , Satoshi Shirai

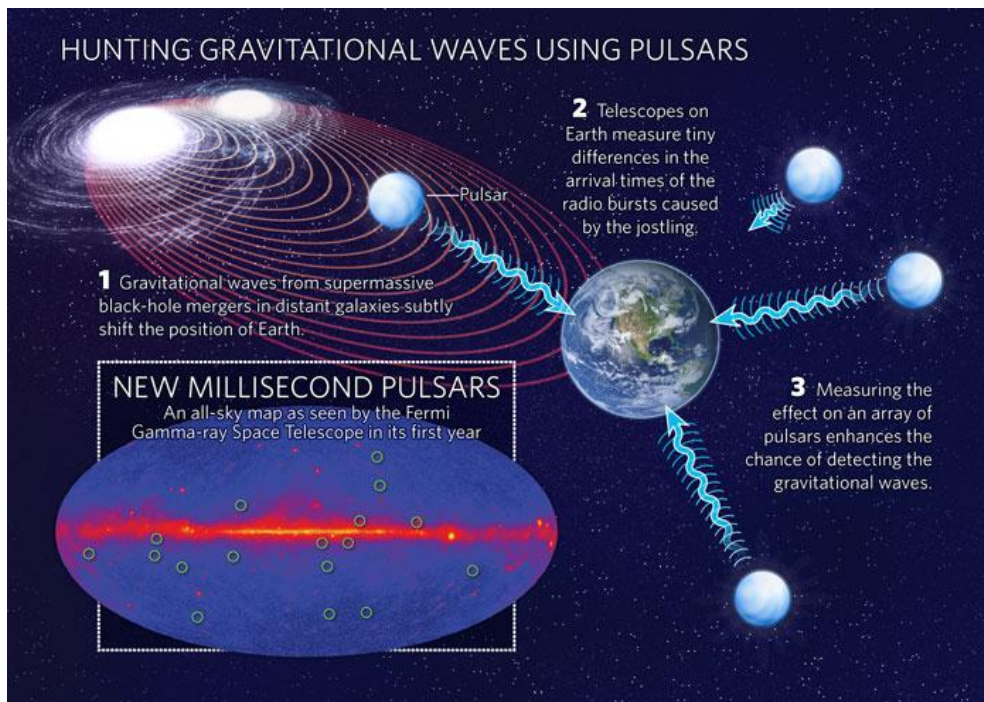
当時 D1

当時 D1

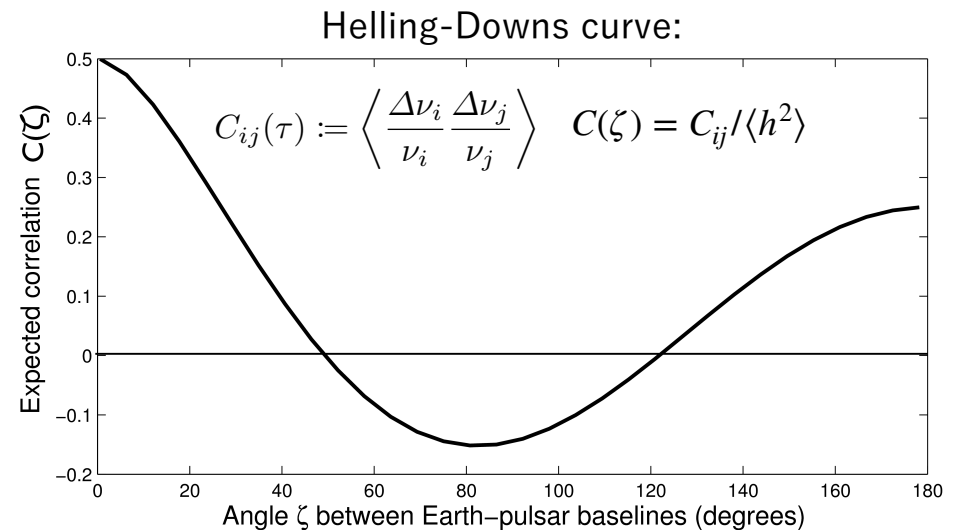
IPMU教員

パルサータ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 $\sim 5 \times 10^8$ 秒観測している。]



(Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration via [Nature](#))



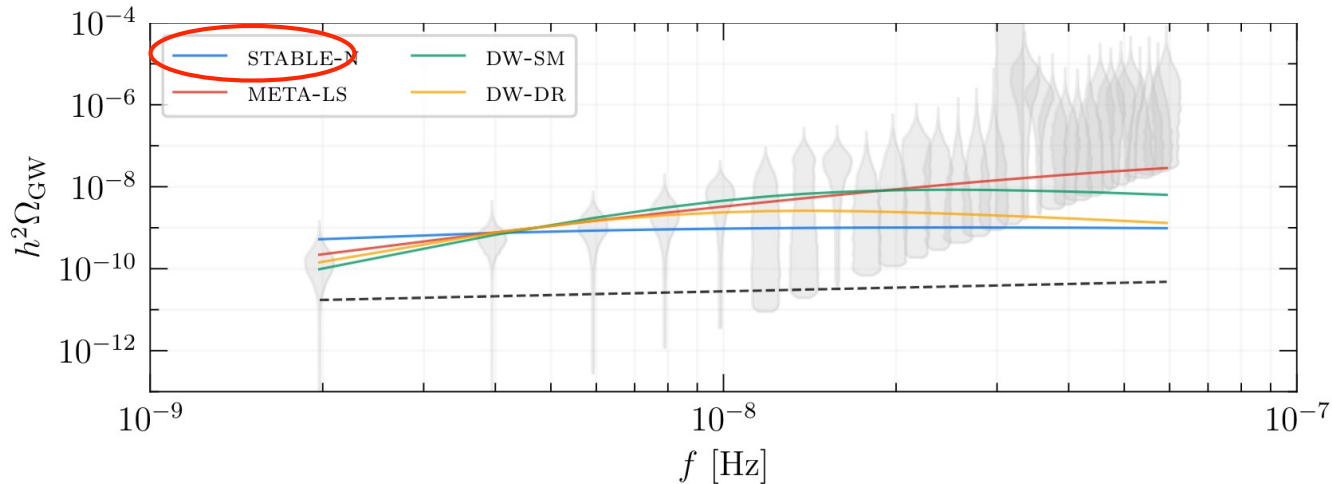
背景重力波に特徴的な角度相関

PTA 実験はランダムな重力波を発見出来る！

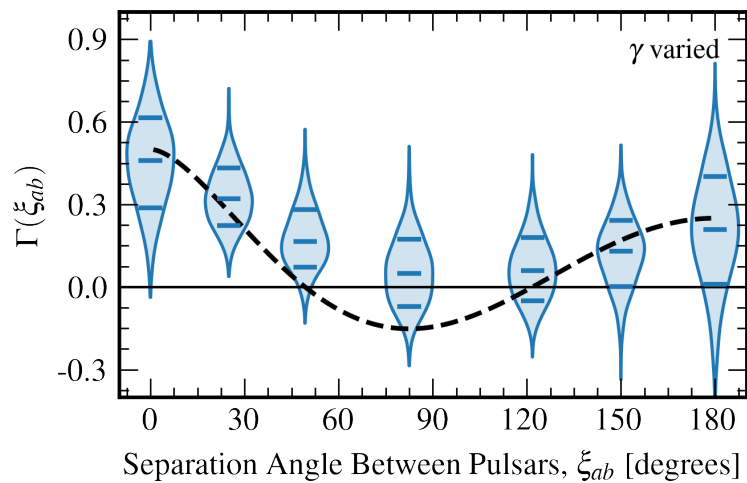
パルサータイミングアレイ実験：背景重力波発見？

[NANOGrav 2306.16219]

$$\Omega_{\text{GW}}(f) \equiv \frac{f}{\rho_c} \left| \frac{d\rho_{\text{GW}}}{df} \right| :$$



[NANOGrav 2306.16213]



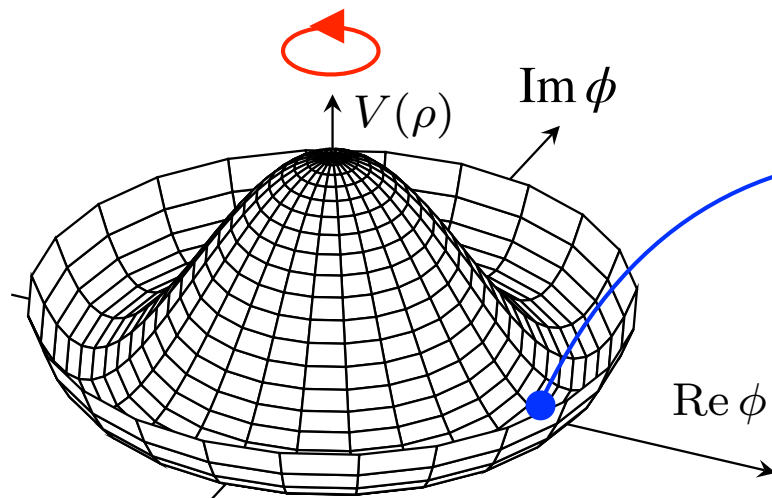
準安定な宇宙ひも由来の重力波が
結果をよく再現する！

Approx. 3σ excess compared
with uncorrelated noise

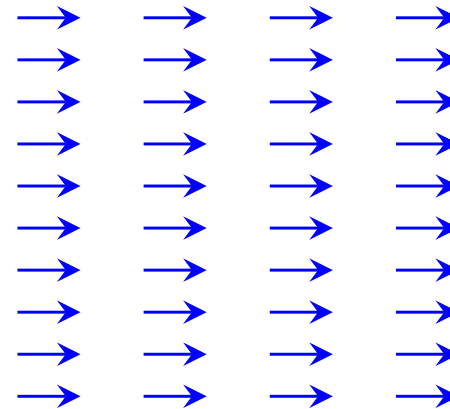
宇宙ひもとは？

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

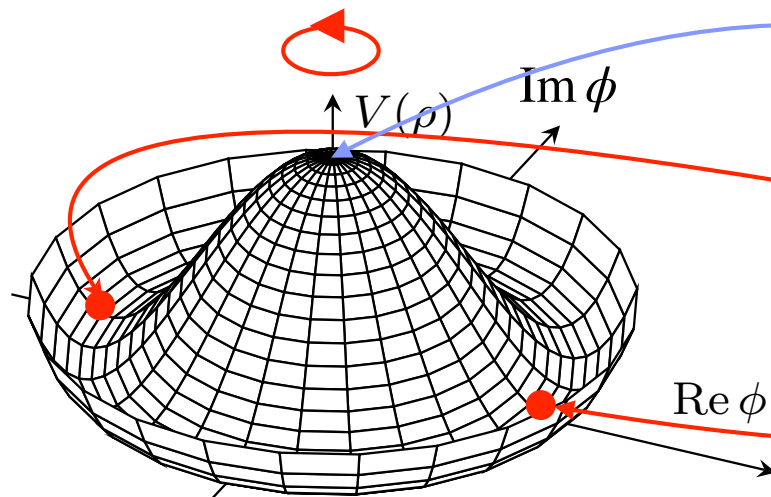


宇宙の各点で期待値の“方向”が等しい
= 単純な真空

宇宙ひもとは？

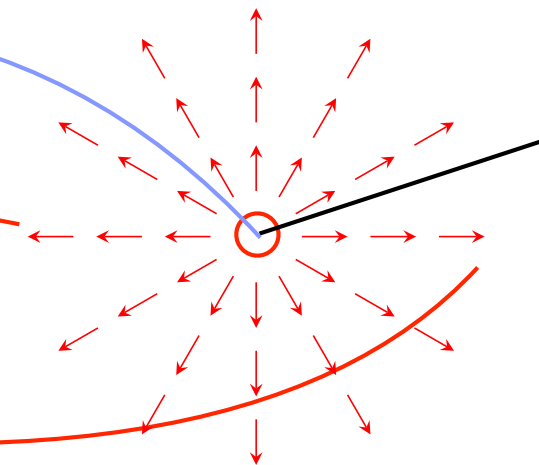
自発的対称性の破れ (Higgs Mechanism)

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

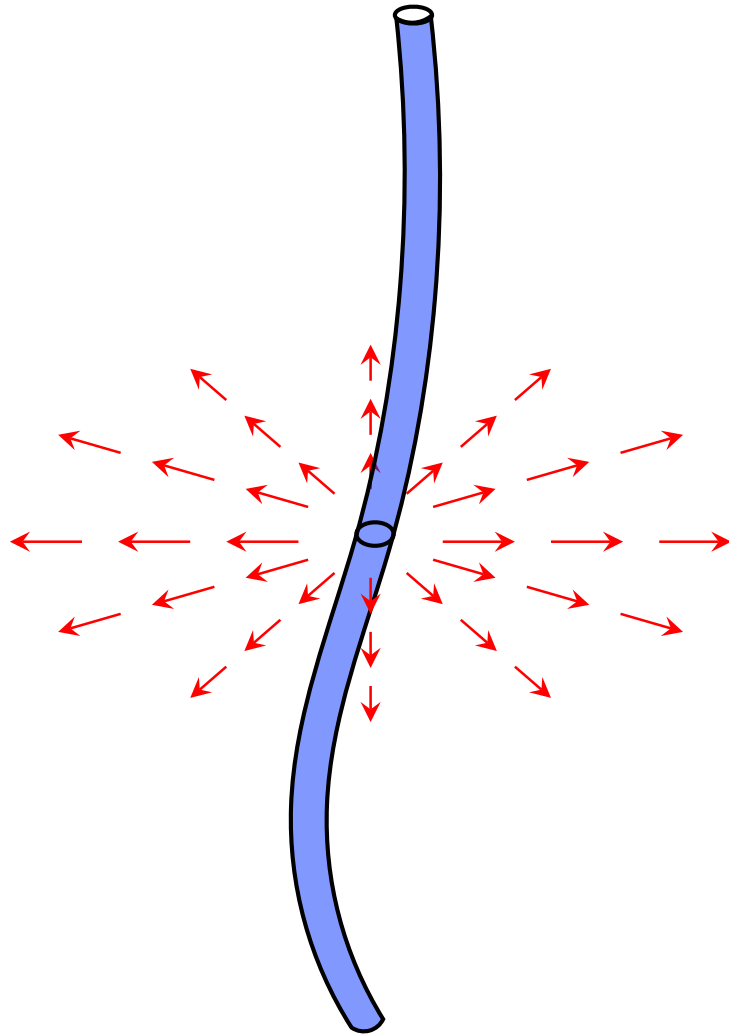
対称性が
破れない場所



単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では対称性が
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

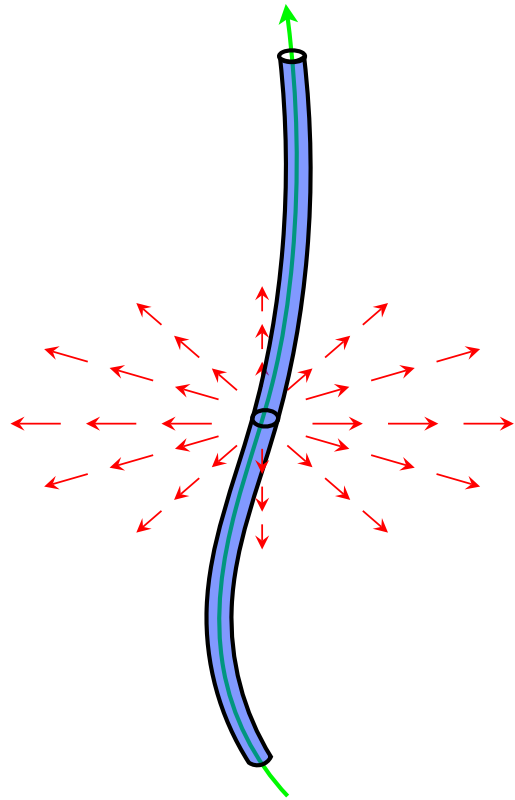
宇宙ひも！

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

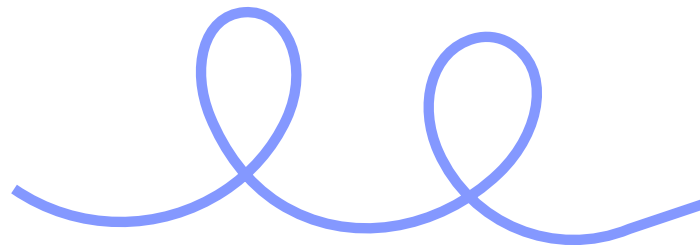
中に新物理の磁場が入っている



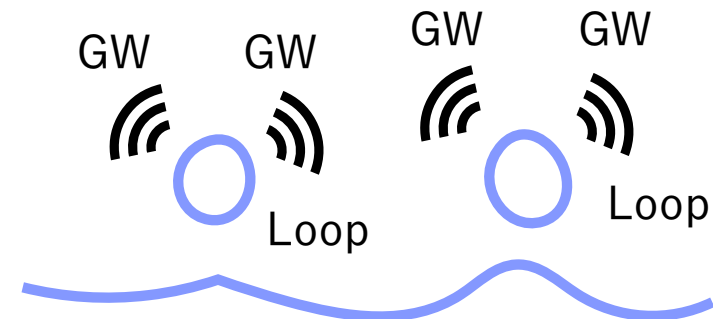
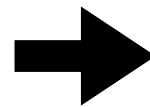
宇宙ひもの中には新物理の磁力線が通っている

長い宇宙ひものは切れずに安定 (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)

長く宇宙ひもの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

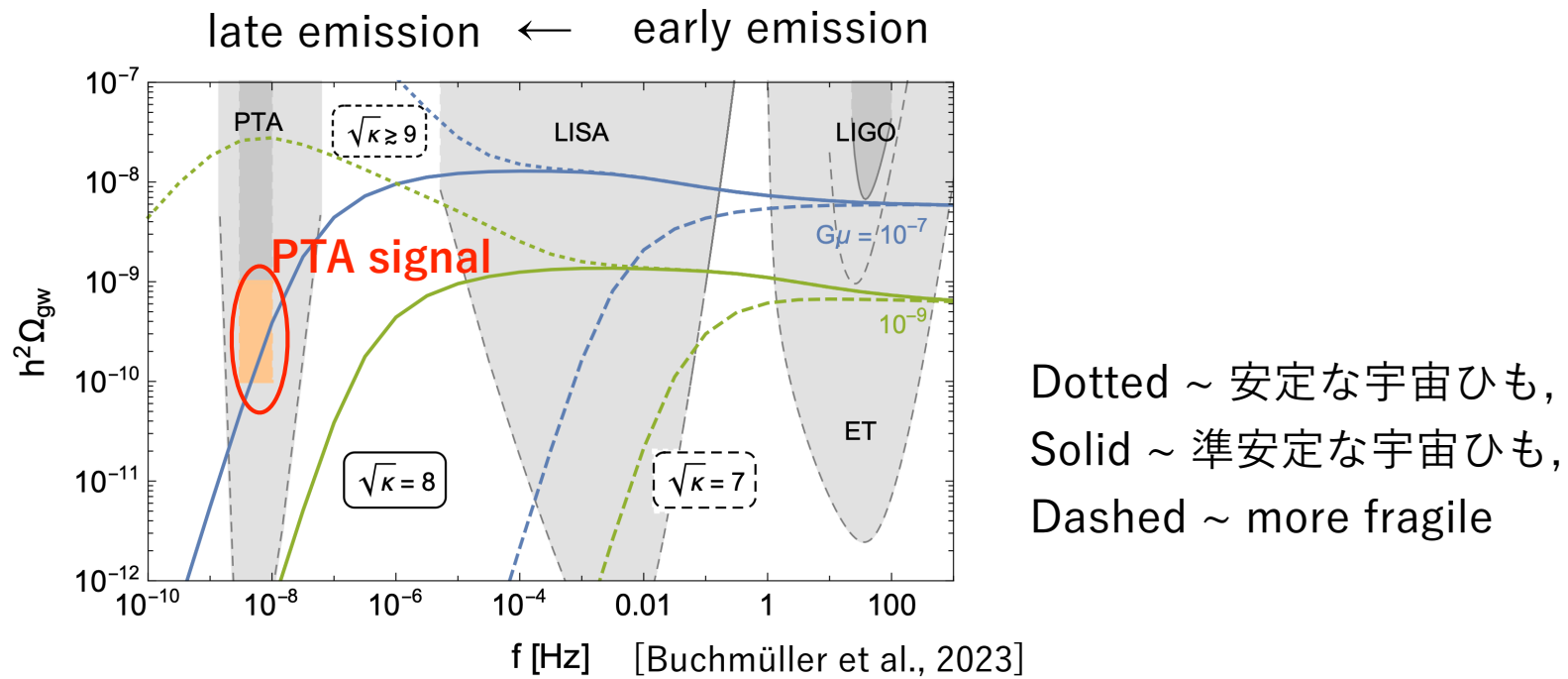


長いひもの繋ぎかわり



主にループから重力波を発生

なぜ準安定な宇宙ひも？



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

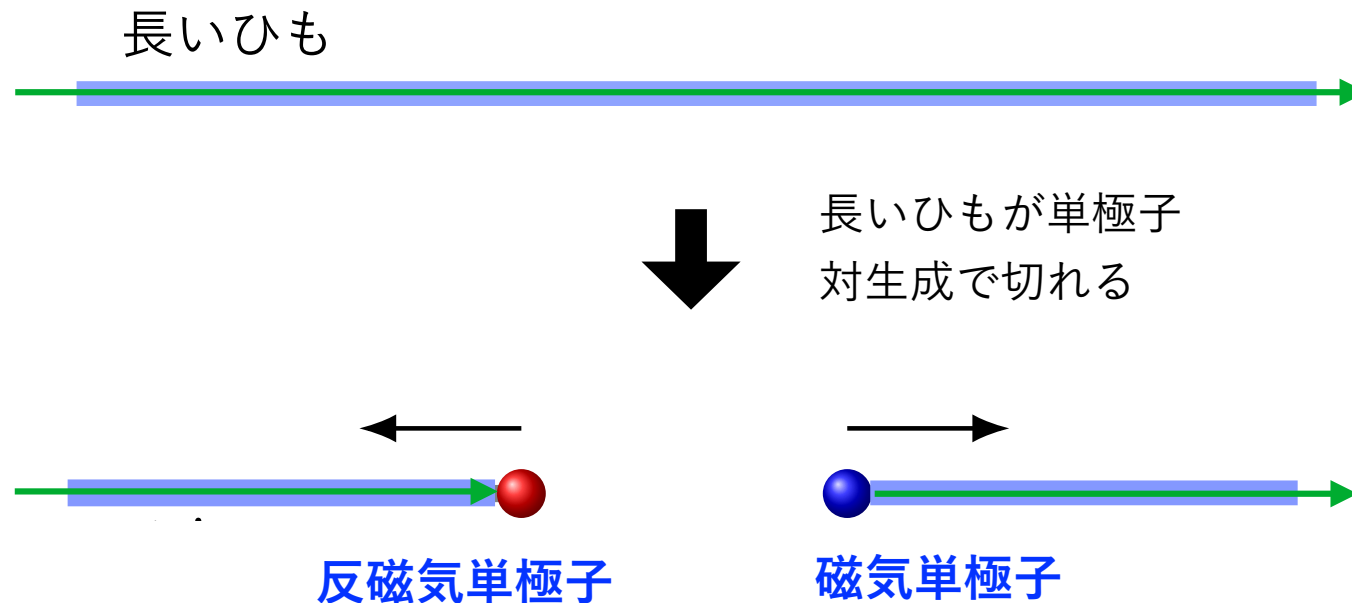
宇宙ひもは安定なのでは？

Key : 磁力線

U(1) 対称性を持つ新物理に**磁気単極子**が含まれている場合

→ 磁気単極子は磁力線の端点となり得る

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

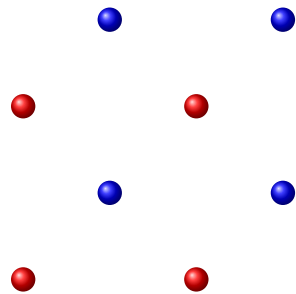


このタイプの模型は $SO(10)$ ゲージ群を使った大統一模型によく現れる！

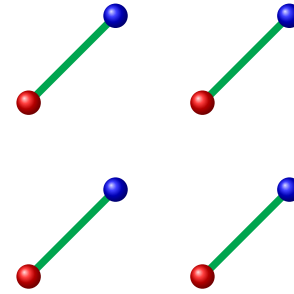
PTA 信号を説明するには

SU(2) の破れのエネルギースケール ~ U(1) の破れのエネルギースケール

先にモノポールが出来てすぐに紐ができる。



@ SU(2) breaking
= many monopoles



@ U(1) breaking
= strings are formed

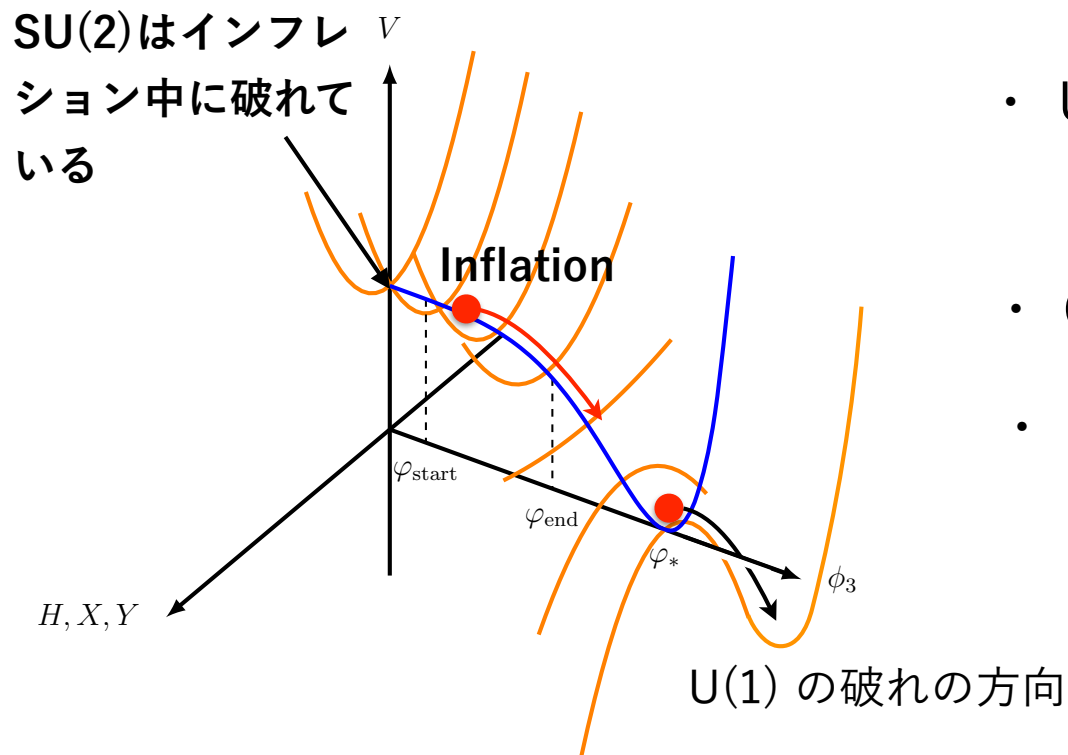
短いひもだらけになってしまう？

PTA 信号を説明するには

ちゃんと長い準安定ひもが作れるインフレーションモデルは可能か？

超対称性を持つ New (Hilltop) Inflation 模型

超対称性 → インフレーションに必要なフラットポテンシャルを実現
SU(2) を破る場をインフラトンに用いることでインフレーション後の宇宙にモノポールが残らないようにする！

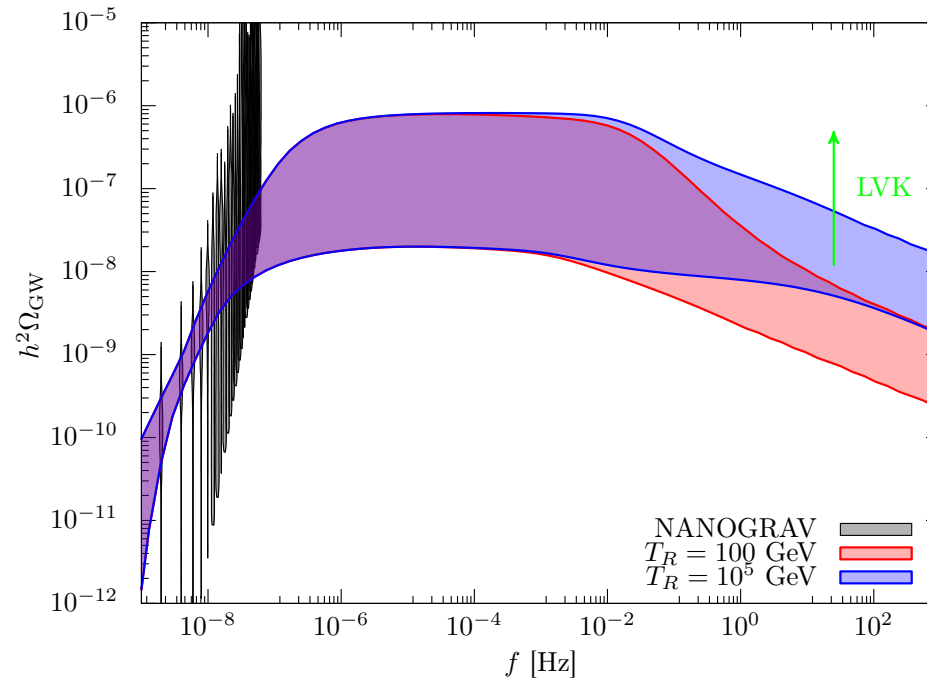


- U(1) の破れはインフレーション後
→ **長い準安定ひもが形成可能！**
- CMB 非等方性と整合する揺らぎ
- 物質反物質の起源として非熱的レプトジェネシス機構が機能

超対称性を持つ New (Hilltop) Inflation 模型

- 最終的な重力波スペクトル

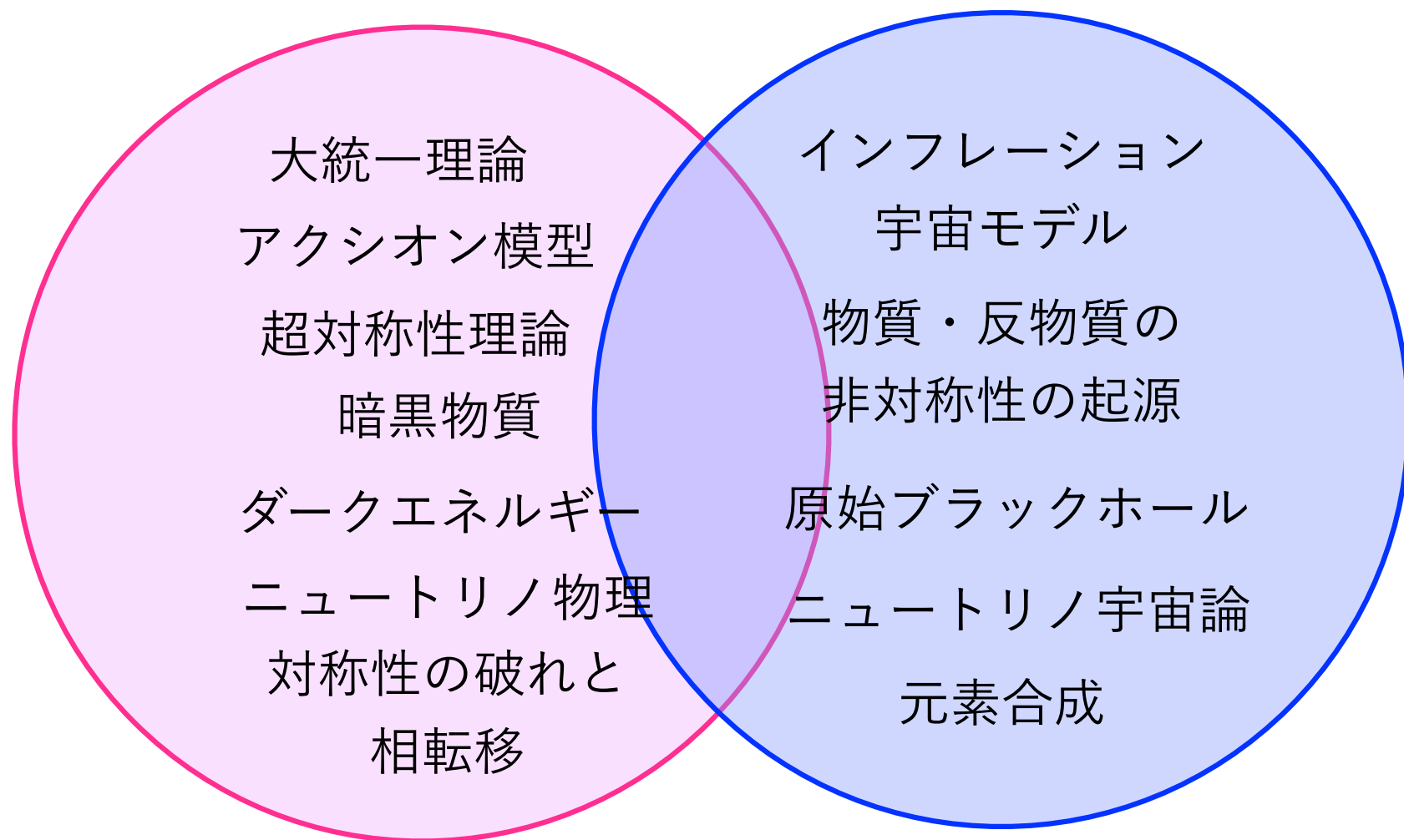
← 現在に近い宇宙からの GW 初期宇宙からの GW →



インフレーション後の再加熱温度 T_R が 10^3 GeV 程度とすると
LIGO-VIRGO-KAGRA からの制限 @ $f \sim 25\text{Hz}$ を回避できる

近い将来の PTA 実験 (@ $f \sim 10^{-9}\text{Hz}$) や重力波干渉実験
(@ $f \sim \mathcal{O}(1-100)\text{Hz}$) さらに検証可能！

この研究以外にも様々な理論研究を行っています。
興味がある方は午後の LAB TOUR に聞きに来てください。



理論グループの特徴

- 素粒子・宇宙を両方学べる環境
 - ・毎週水曜日：ジャーナルクラブ
 - ・金曜日：コロキウム
- 閑静な柏キャンパス
- 数物連携宇宙研究機構(IPMU)
 - ・IPMUの人々との積極的に共同研究しています。
 - ・IPMUのセミナーでは理論グループのメンバーの興味とオーバーラップの高いセミナーが行われています
- 理学系研究科物理学専攻では A1 サブコースに属します。

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**
- 修士論文の研究開始 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