

東京大学宇宙線研究所

理論グループ

川崎雅裕

伊部昌宏

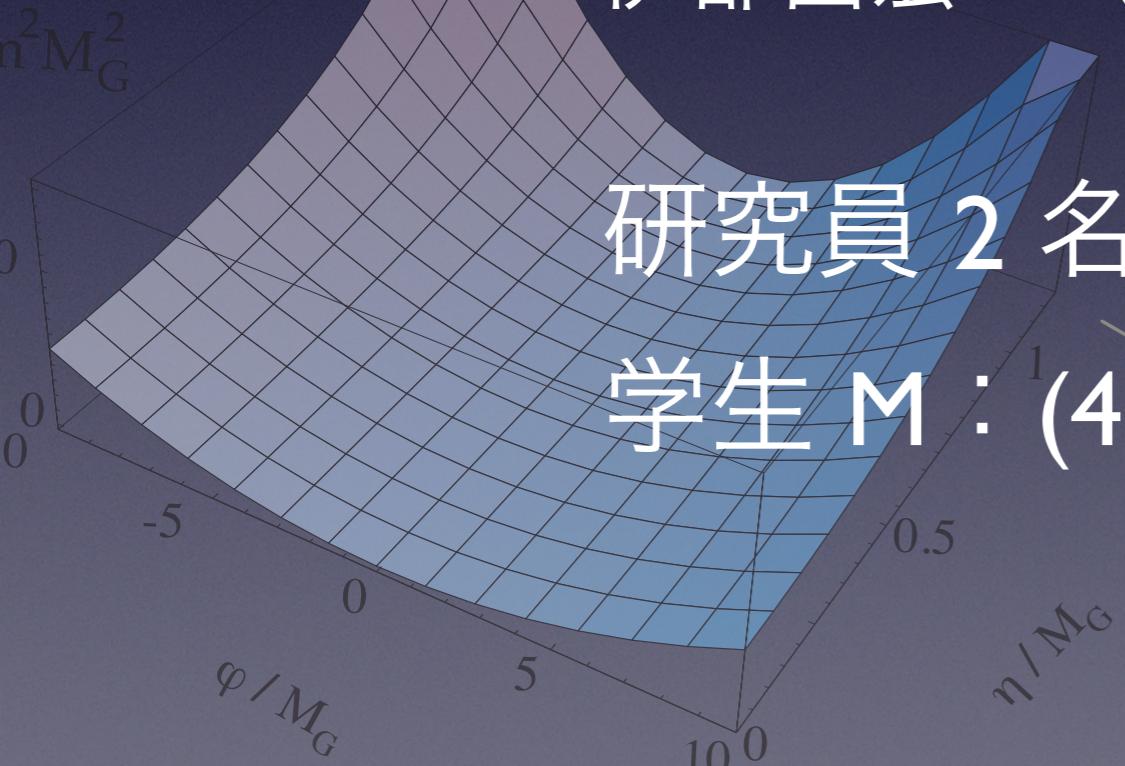
研究員 2 名

学生 M : (4名)

(宇宙論)

(素粒子論)

D : (4名)



$$\mathcal{L}_{SUGRA} = -\frac{1}{2}eR + eg_{ij}{}^*\tilde{\mathcal{D}}_\mu\phi^i\tilde{\mathcal{D}}^\mu\phi^{*j} - \frac{1}{2}eg^2D_{(a)}L_{(b)} + ie g_{ij}{}^*\bar{\chi}^j\bar{\sigma}^\mu\tilde{\mathcal{D}}_\mu\chi^i + e\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}\bar{\psi}^\mu\bar{\sigma}_\nu\tilde{\mathcal{D}}_\rho\psi_\sigma + \frac{1}{4}ef_R^{IJ}(ab)F_{\mu\nu}^{(a)}F^{\mu\nu(b)} + \frac{1}{8}e\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}f_I^{IJ}(ab)F_{\mu\nu}^{(a)}F_{\rho\sigma}^{(b)}$$
$$+ \frac{i}{2}e\left[\lambda_{(a)}\sigma^\mu\tilde{\mathcal{D}}_\mu\right] + \bar{\chi}_{(a)}\bar{\sigma}^\mu\tilde{\mathcal{D}}_\mu\chi_{(a)}$$

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？

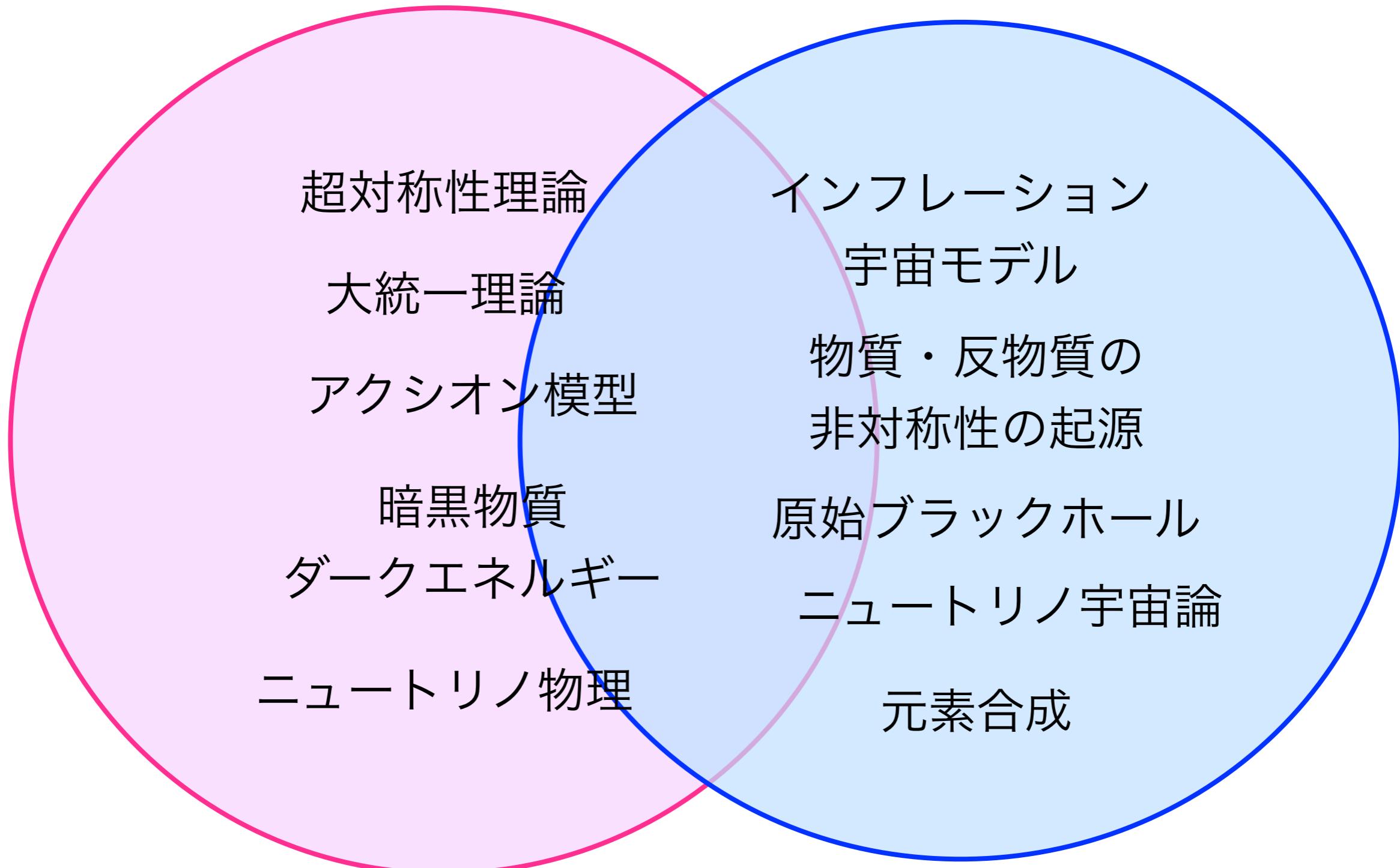
これらの疑問に答える理論を考えるのが理論グループの研究です

理論グループの研究

素粒子的宇宙論

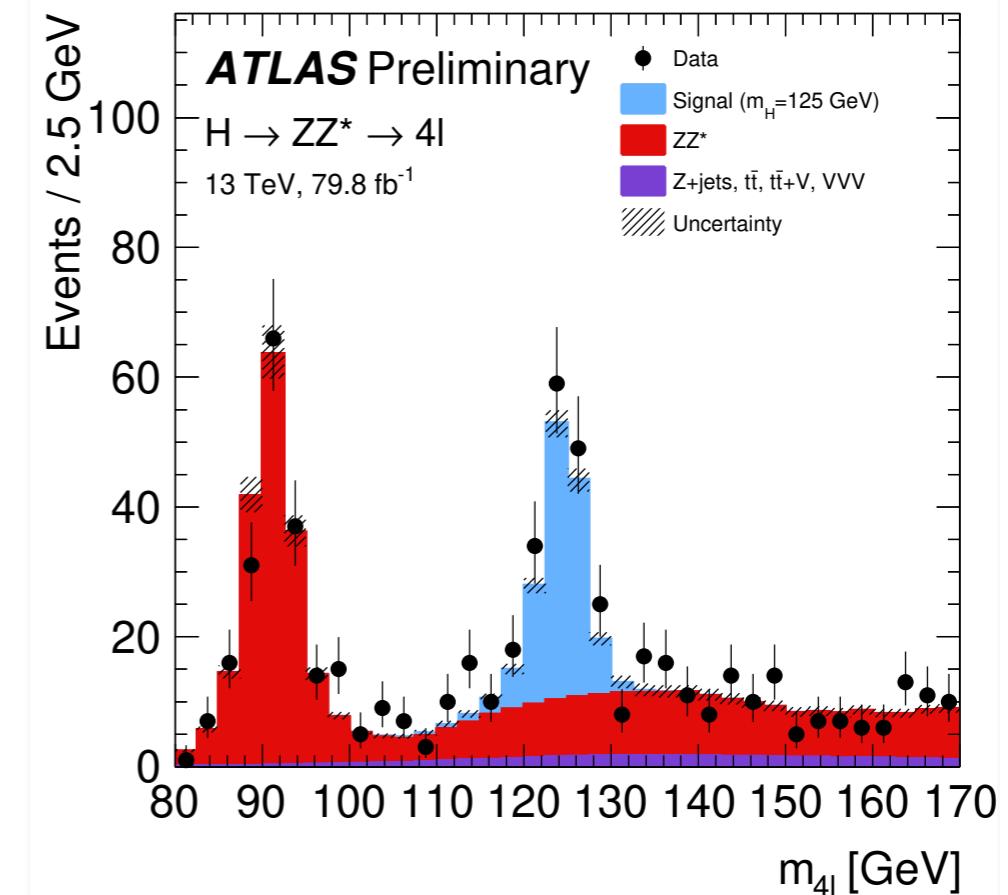
物質の究極の理解

宇宙の探求



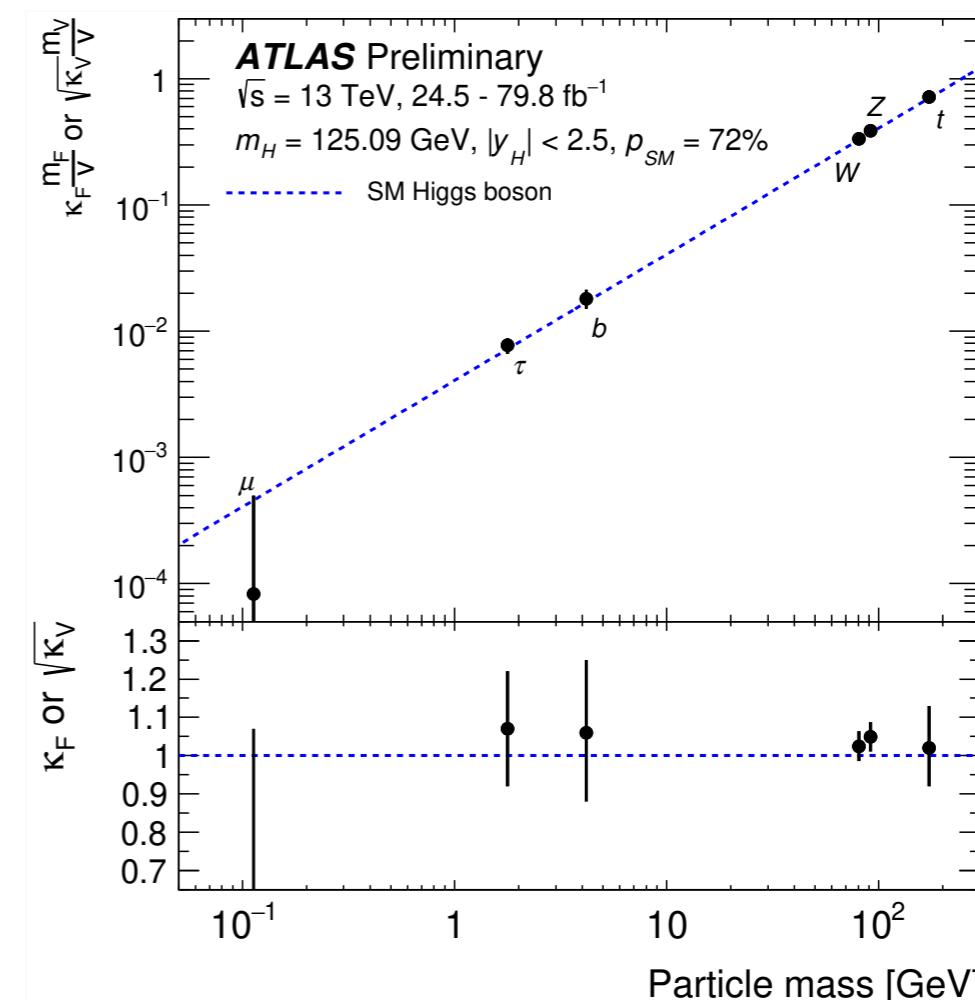
- ・質量を与える素粒子
 - ・ヒッグス
 - ・2011年 LHCで発見

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



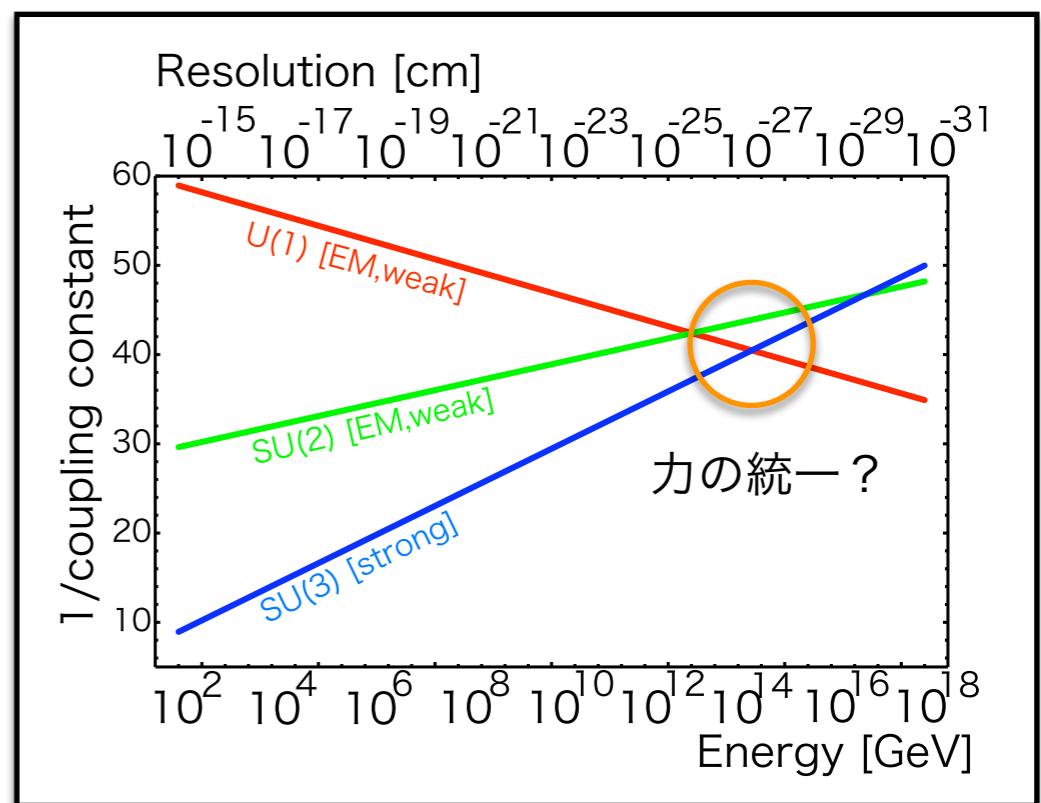
標準模型が完成！

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。更なる統一是期待出来るか？
- 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！

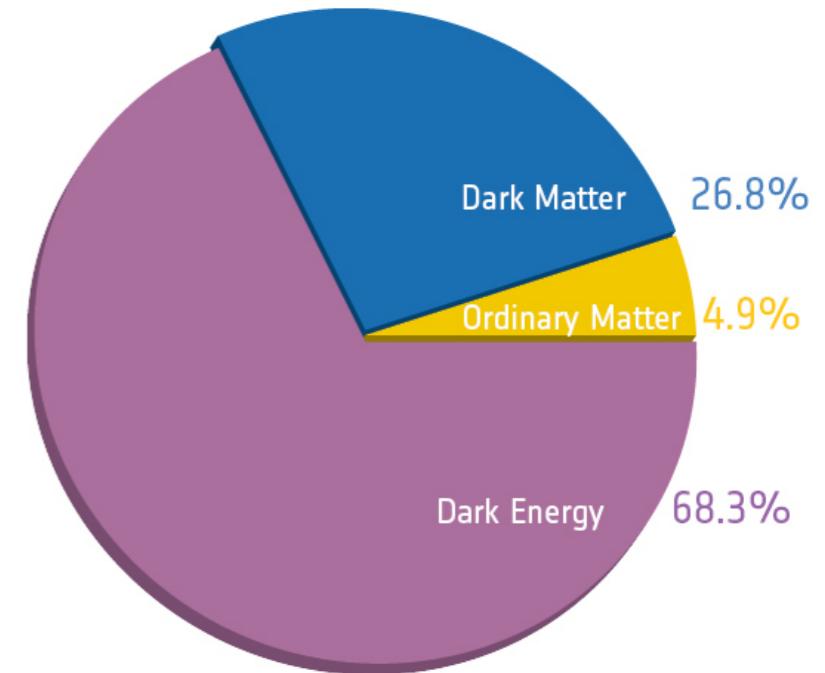
宇宙初期

- 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

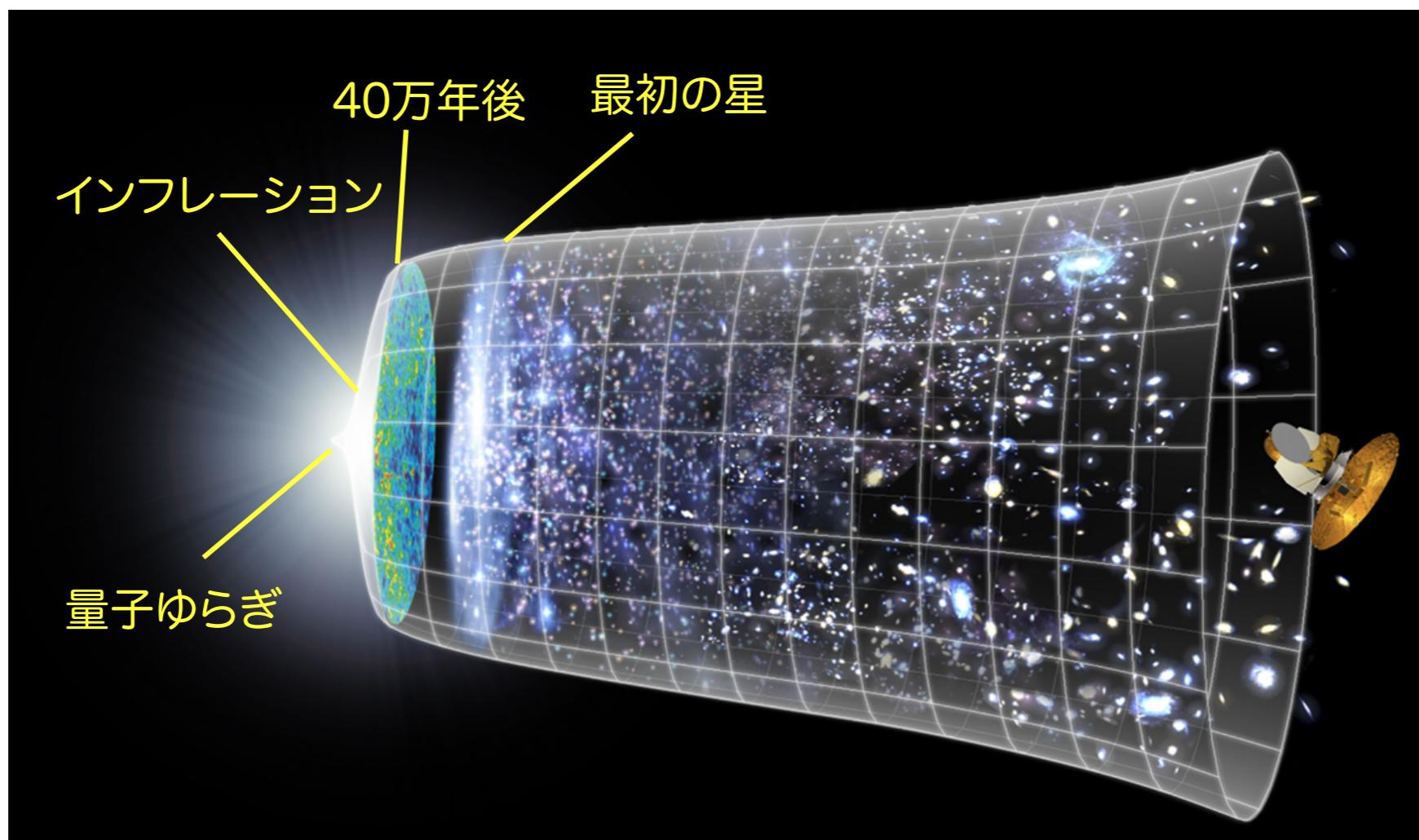
誕生直後 (10^{-36} 秒) の宇宙を理解できる時代になった

宇宙論の問題

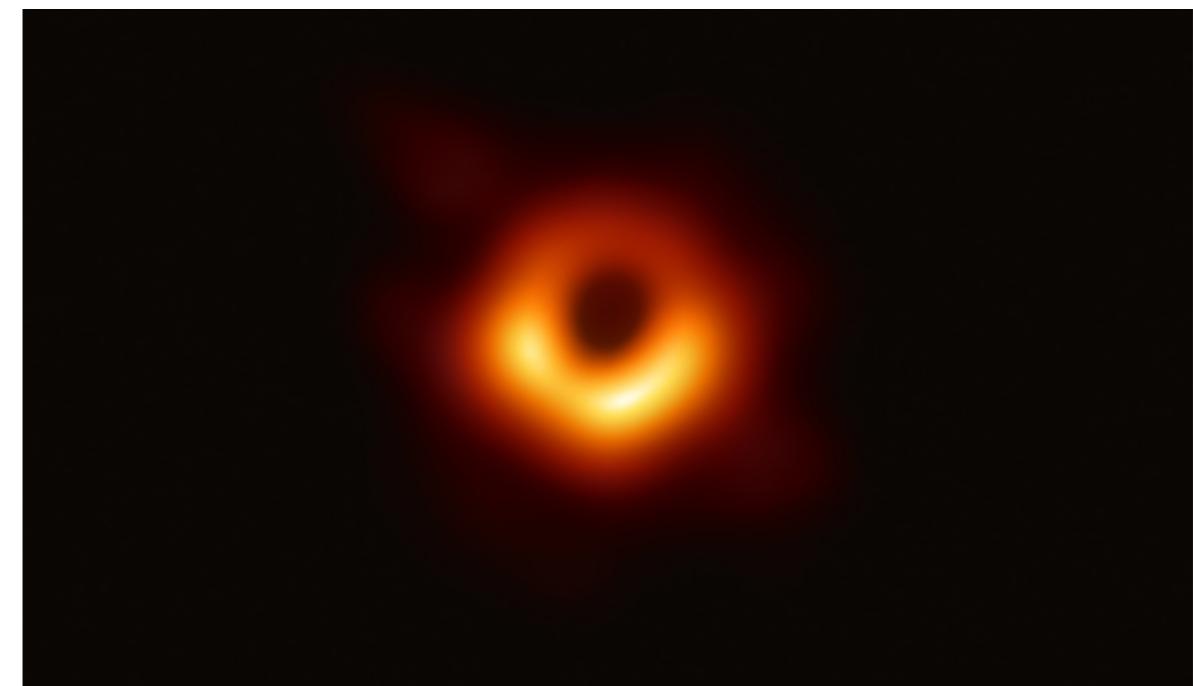
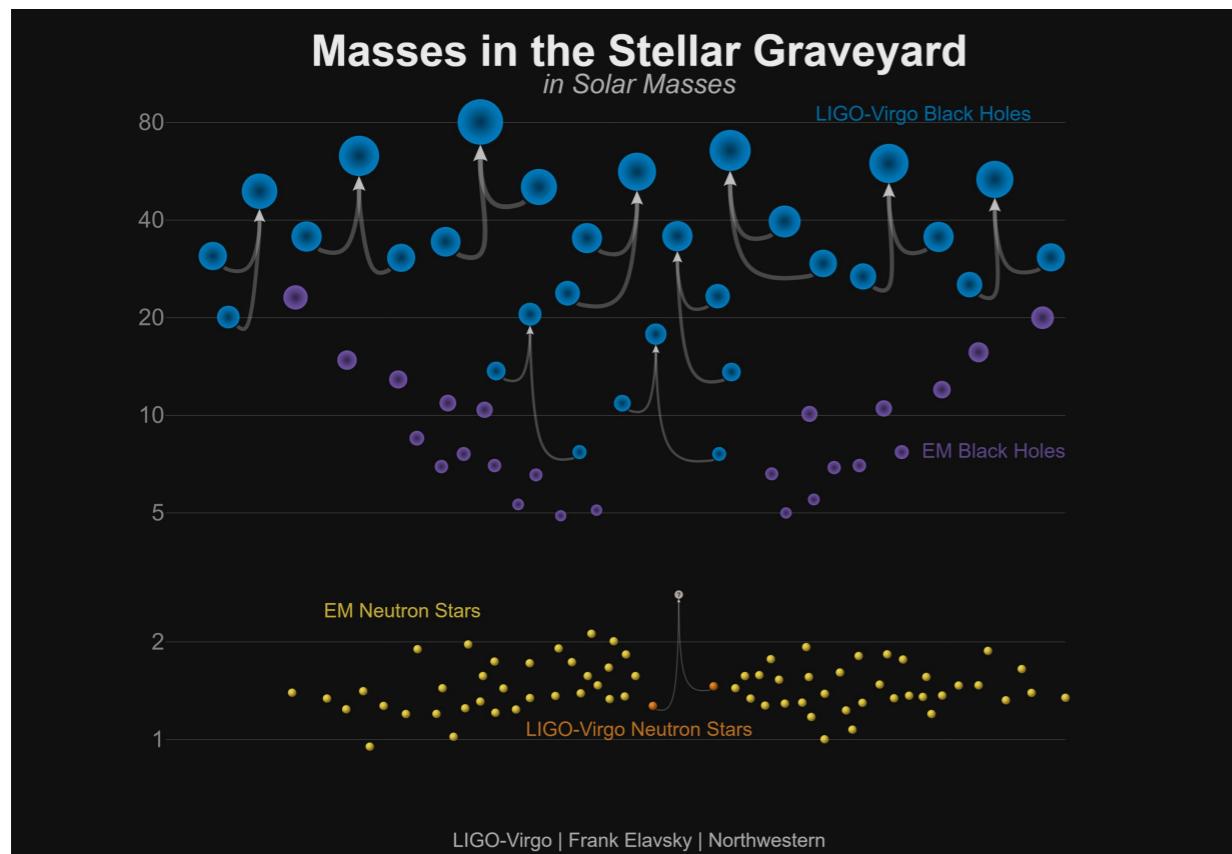
- インフレーションを起こす素粒子モデル
- 宇宙の物質・反物質非対称性
- ダークマター・ダークエネルギー



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...

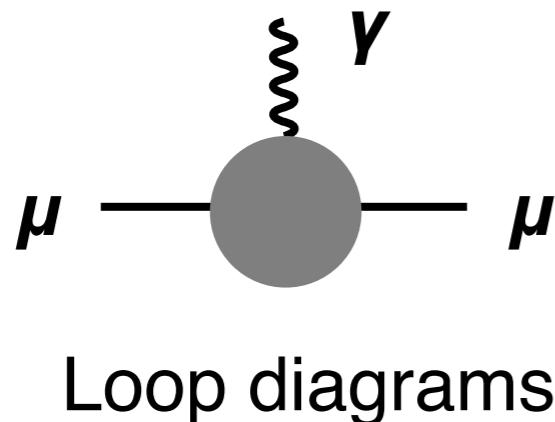
インフレーションなどの初期宇宙に起源?

研究例 1 : Muon 異常磁気能率を説明する超対称標準模型

2021 MI, Kobayashi (D3), Nakayama (D1), Shirai (IPMU)

- ✓ Muon 磁気能率 : [magnetic moment] = $\vec{m} = \frac{1}{2m_\mu}(\vec{L} + g\vec{S})$
 $g = 2$ @ Leading order (by covariant Dirac equation)

- ✓ 量子補正によって $g - 2 \neq 0$ となる



Loop diagrams には重くて実験で生成し難い
粒子の効果も効く

$g - 2 \neq 0$ の測定は新物理探索の重要 channel !

BNL E821 実験 (2006) が標準模型予言と測定値が 3.7σ 乖離していると報告

→ 新物理の兆候 ?

研究例 2 : Muon 異常磁気能率を説明する超対称標準模型

2021 MI, Kobayashi (D3), Nakayama (D1), Shirai (IPMU)

✓ Muon g – 2 experiment at Fermilab (2021)

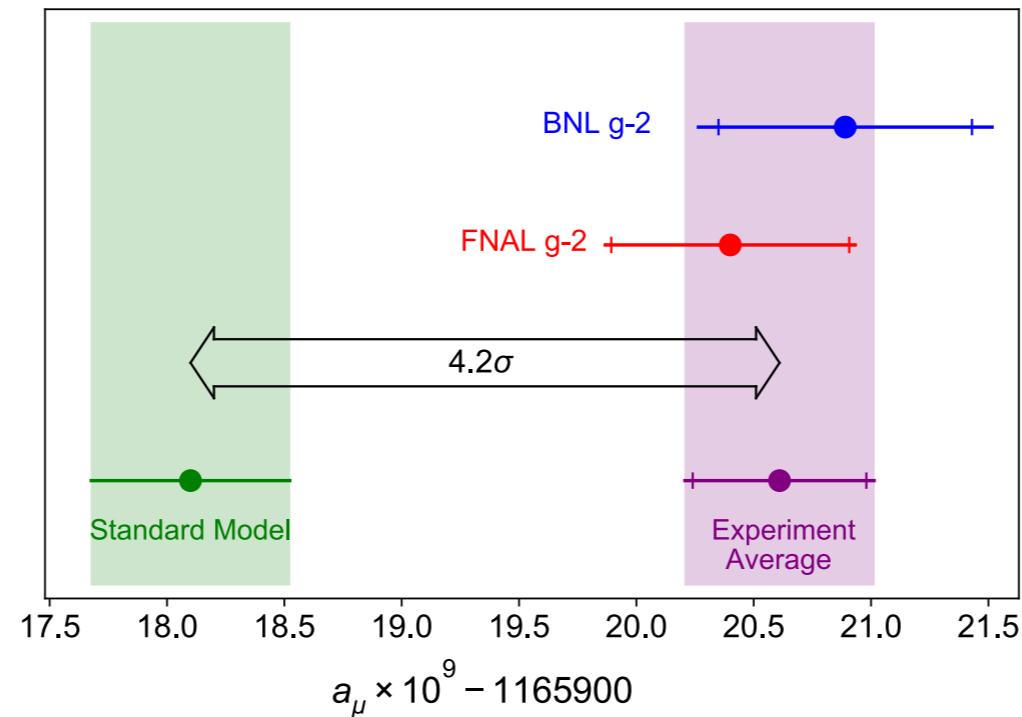


FIG. 4. From top to bottom: experimental values of a_μ from BNL E821, this measurement, and the combined average. The inner tick marks indicate the statistical contribution to the total uncertainties. The Muon $g - 2$ Theory Initiative recommended value [13] for the standard model is also shown.

BNL E821 で見られた乖離を確認し新物理の兆候は 4.2σ に上がった！
(ただし lattice simulation を用いた標準模型予言の計算に一部議論が残っている)

研究例 2 : Muon 異常磁気能率を説明する超対称標準模型

2021 MI, Kobayashi (D3), Nakayama (D1), Shirai (IPMU)

- ✓ どんな新物理模型で説明できるか?

超対称標準模型に注目

実は Higgs 粒子の質量の説明しつつ

観測と合わない CP 対称性の破れを生じさせないようにしつつ

g-2 を説明するのは至難の技...

Higgs 質量 = 125 GeV

(quark の超対称 partner の質量が $O(10)\text{TeV}$)

+

Muon g-2
(muon および weak gauge boson の
超対称 partner の質量が $O(100) \text{GeV}$)

= 模型の複雑化

複雑な模型 (=相互作用の種類が多い) ほど CP の新たな破れの原因につながる...

- ✓ なんとか条件を全て満たす模型ができました → Collider search に強い予言

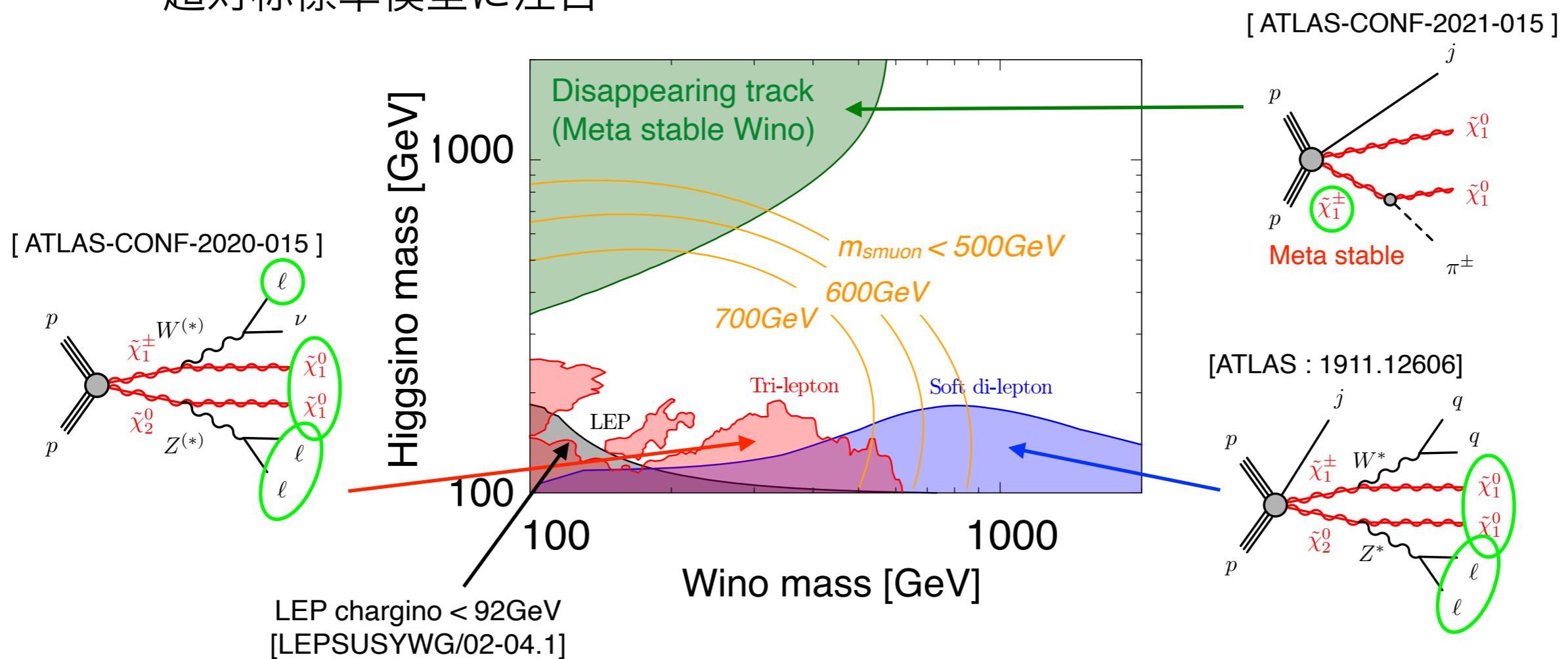
(g-2 と Higgs 質量を説明する我々の模型以外の模型は全て CP の問題は妥協している)

研究例 2 : Muon 異常磁気能率を説明する超対称標準模型

2021 MI, Kobayashi (D3), Nakayama (D1), Shirai (IPMU)

- ✓ どんな新物理模型で説明できるか？

超対称標準模型に注目



- ✓ なんとか条件を全て満たす模型ができました → Collider search に強い予言
($g-2$ と Higgs 質量を説明する我々の模型以外の模型は全て CP の問題は妥協している)
- ✓ この模型と宇宙論の整合性については今後整理する予定

研究例 2：暗黒光子にまつわる位相欠陥

2021 MI, Hiramatsu, Suzuki, Yamaguchi (OB)

- ✓ 近年 Sub-GeV の質量の暗黒光子模型を含む暗黒物質模型が注目されている
暗黒光子は運動項を通じて通常の光子と混合している。

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \boxed{\frac{\epsilon}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu}}$$

光子 暗黒光子 混合項

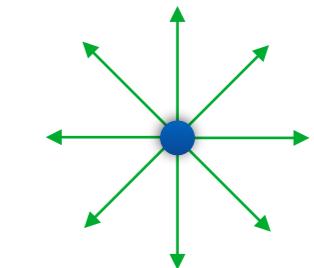


- ✓ 暗黒光子にまつわる位相欠陥

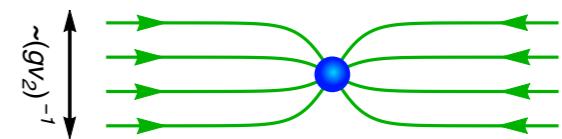
暗黒光子の質量が U(1) ゲージ対称性の自発的対称性の破れによるものであれば暗黒光子に暗黒宇宙ひもが生じる



暗黒光子の U(1) が非可換ゲージ群由来の場合暗黒モノポールが生じる



暗黒モノポール周りで U(1) ゲージ対称性が破れるとモノポールが宇宙ひもに繋がれたビーズ状の解が得られる

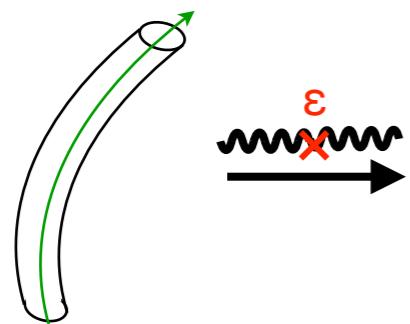


研究例 3：暗黒光子にまつわる位相欠陥

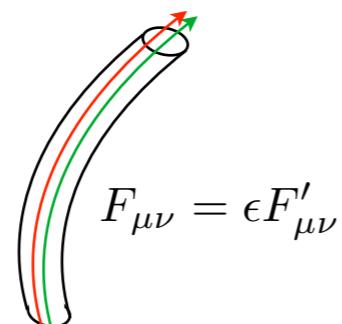
2021 MI, Hiramatsu, Suzuki, Yamaguchi (OB)

✓ これらの位相欠陥は混合した光子からどのように見えるか？

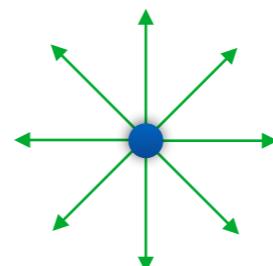
暗黒宇宙ひも内部に
暗黒光子の磁束密度



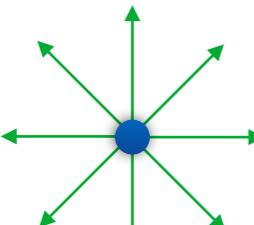
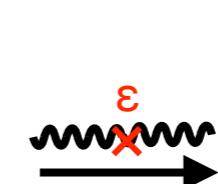
混合効果で光子
の磁束密度



暗黒磁気モノ
ポール



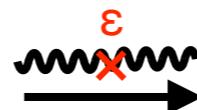
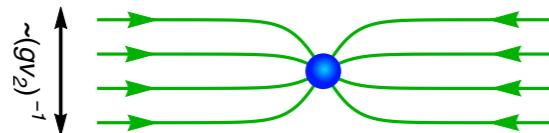
光子側には何も
生じない



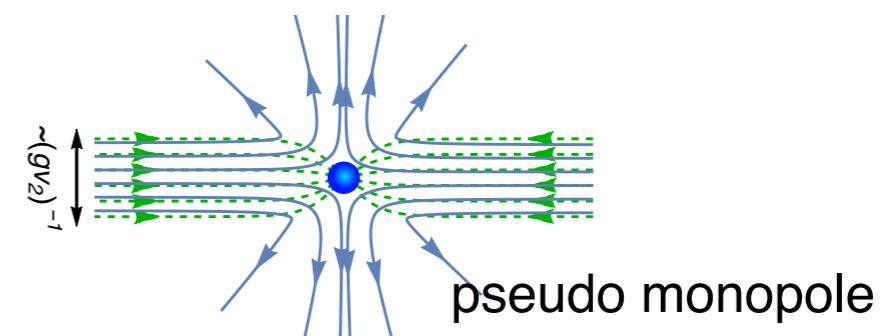
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

ビーズ解

暗黒磁気モノポール周りの磁束が宇宙
ひもに閉じ込められた状態



ひもに光子の磁束密度が誘導され閉じ込め
られた暗黒磁気モノポール周りから光子の
磁束がモノポール状に放射される



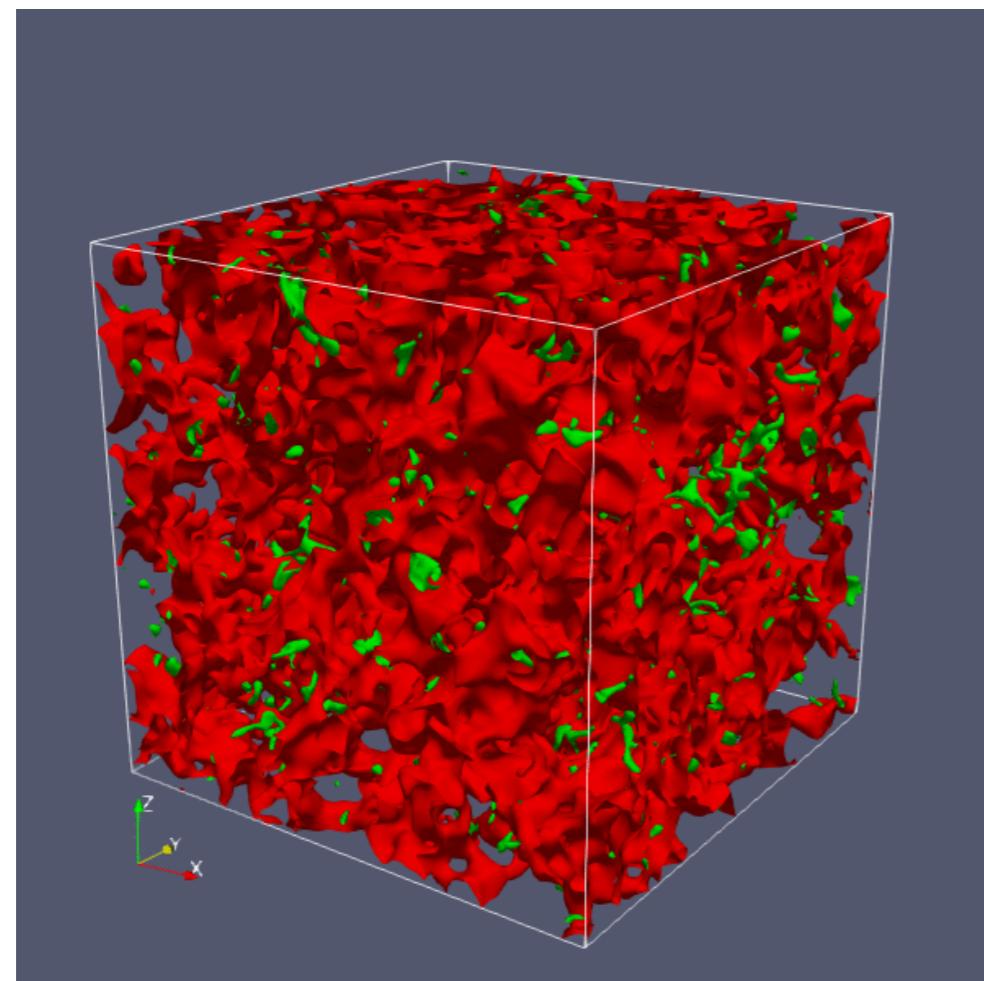
研究例 3：暗黒光子にまつわる位相欠陥

2021 MI, Hiramatsu, Suzuki, Yamaguchi (OB)

✓ これらの位相欠陥は混合した光子からどのように見えるか？

数値シミュレーションの結果

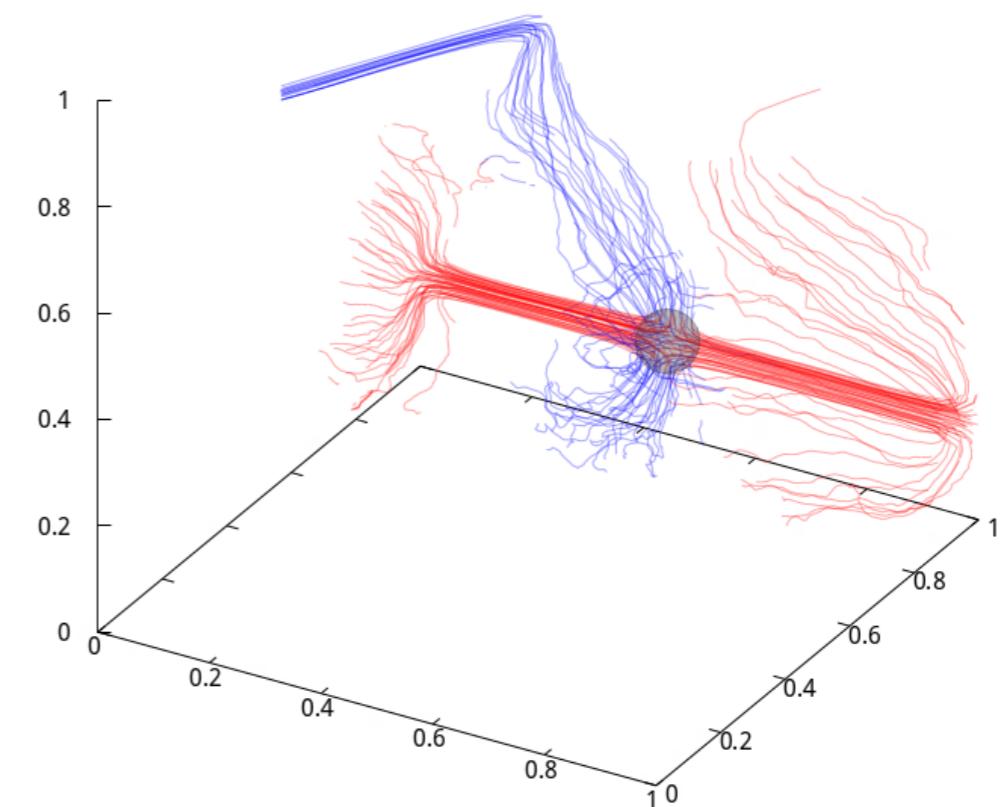
($SU(2) \rightarrow U(1) \rightarrow Z_2$ への自発的破れ)



右下のビーズ解周りの QED magnetic flux

赤：cosmic string に沿って monopole に流入

青：monopole から外に向かって流出



理論グループの成果

- ・多岐にわたる
- ・データベース(INSPIRE)で検索してください

<http://inspirehep.net/>

find ea Kawasaki, Masahiro or ea Ibe, Masahiro

- ・最近の理論グループ全体の論文数

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
36	34	40	21	25	27	26	29	16

1人当たり毎年約2-3編

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、金曜日: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。

- サブコース：川崎（宇宙論）A5、伊部（素粒子論）A1

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を中心の生活
 - 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
 - 修士論文の研究開始 → 12月完成
- D1~D3 修士論文の内容は学術雑誌に発表
 - 独立した研究者になる
 - 博士論文を完成 自ら研究課題を見つけ研究を遂行する

最近の修士過程の学生の研究例

Anisotropies in Cosmological 21 cm Background by Oscillons/I-balls of Ultra-light Axion-like Particle

Masahiro Kawasaki,^{a,b} Kazuyoshi Miyazaki,^a Kai Murai,^a Hiromasa Nakatsuka,^a and Eisuke Sonomoto^a

Free Streaming Length of Axion-Like Particle After Oscillon/I-ball Decays

Kaname Imagawa,^a Masahiro Kawasaki,^{a,b} Kai Murai,^a Hiromasa Nakatsuka,^a and Eisuke Sonomoto^a

Chiral composite asymmetric dark matter

Masahiro Ibe,^{a,b} Shin Kobayashi^b and Keiichi Watanabe^b

卒業後の進路

修士	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
進学	1	2	1	2	2	2	2	3	1	1	1
就職	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	2

博士	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
研究職	0	1	2	0	1	1	1	1	2	0	0
就職	0	1	1	0	0	0	1	1	0	2	2

- 大学院で何を学び、研究するかは人生における重要な選択なのでよく調べて決めてください
- 興味のある方は午後のオンライン研究室訪問にお越しください。