

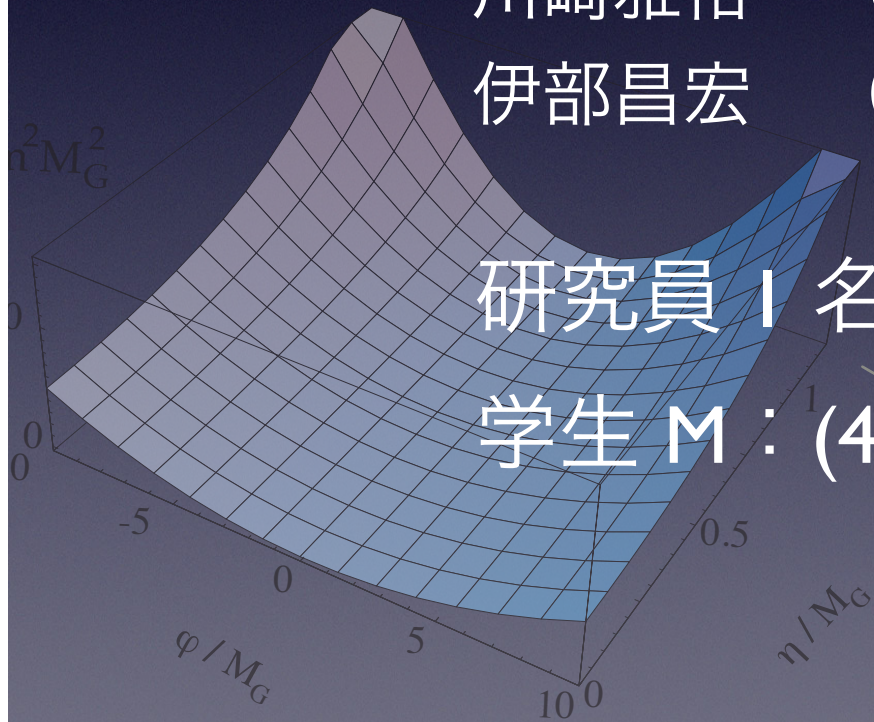
東京大学宇宙線研究所 理論グループ

川崎雅裕 (宇宙論)

伊部昌宏 (素粒子論)

研究員 1 名

学生 M : (4名) D : (3名)



$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2}eR + eg_{ij} \tilde{D}_\mu \phi^i \tilde{D}^\mu \phi^{*j} - \frac{1}{2}eg^2 D_{(a)} \psi \sigma \\ & + \frac{1}{4}ef_{(ab)} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{\mu\nu(b)} + \frac{1}{8}\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \bar{\psi}_\mu \tilde{D}_\rho \psi_\sigma \\ & + \frac{i}{2}e \left[\lambda_{(a)} \sigma_{\mu\nu} \tilde{D}^{\mu} \lambda^{(a)} + \bar{\lambda}_{(a)} \bar{\sigma}_{\mu\nu} \tilde{D}^{\mu} \lambda^{(a)} \right] \end{aligned}$$

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

超対称性理論

大統一理論

アクシオン模型

暗黒物質

ダークエネルギー

ニュートリノ物理

インフレーション

宇宙モデル

物質・反物質の
非対称性の起源

原始ブラックホール

ニュートリノ宇宙論

元素合成

- 質量を与える素粒子

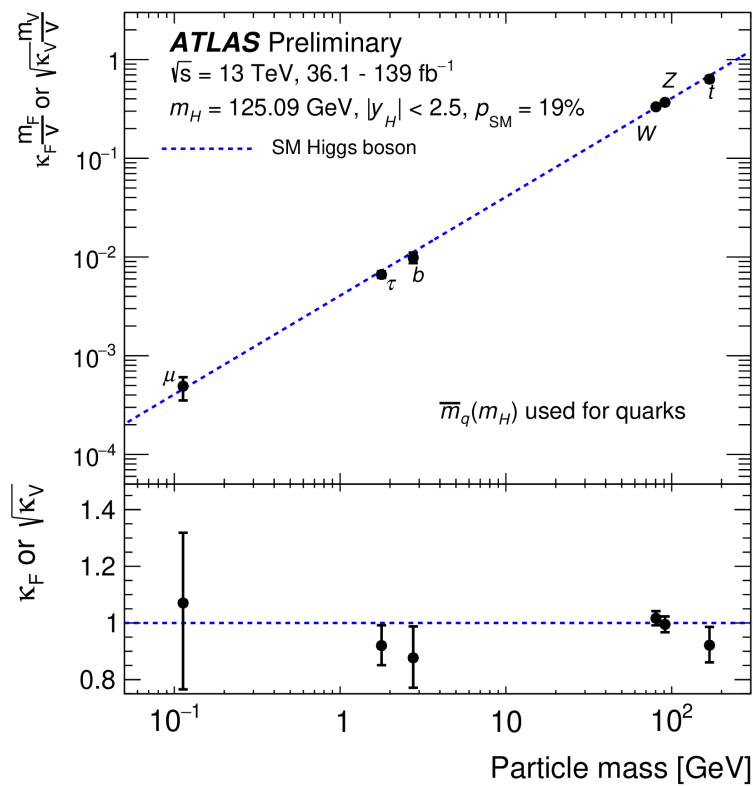
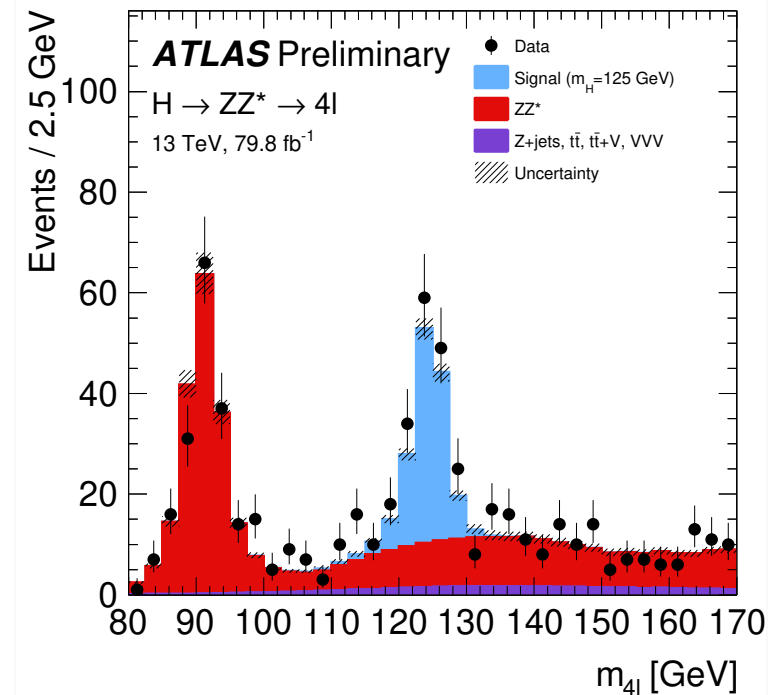
- ・ ヒッグス

- ・ 2011年 LHCで発見

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

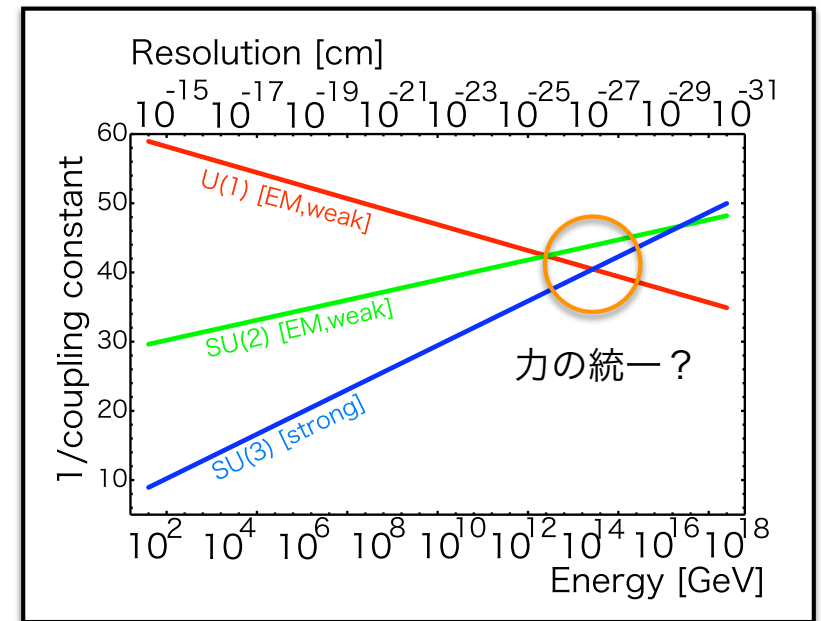
標準模型が完成！

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

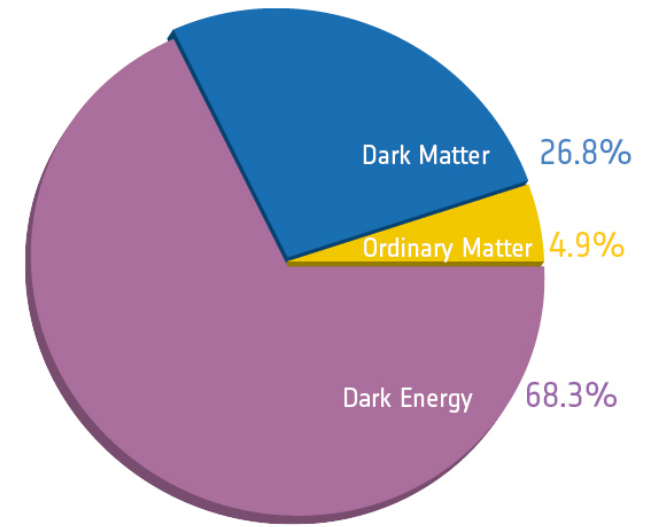
- 宇宙の平坦さ（宇宙が長生き）を説明
- 宇宙が因果律を超えて一様に見えることを説明
- 銀河の種（密度揺らぎ）を説明

- 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

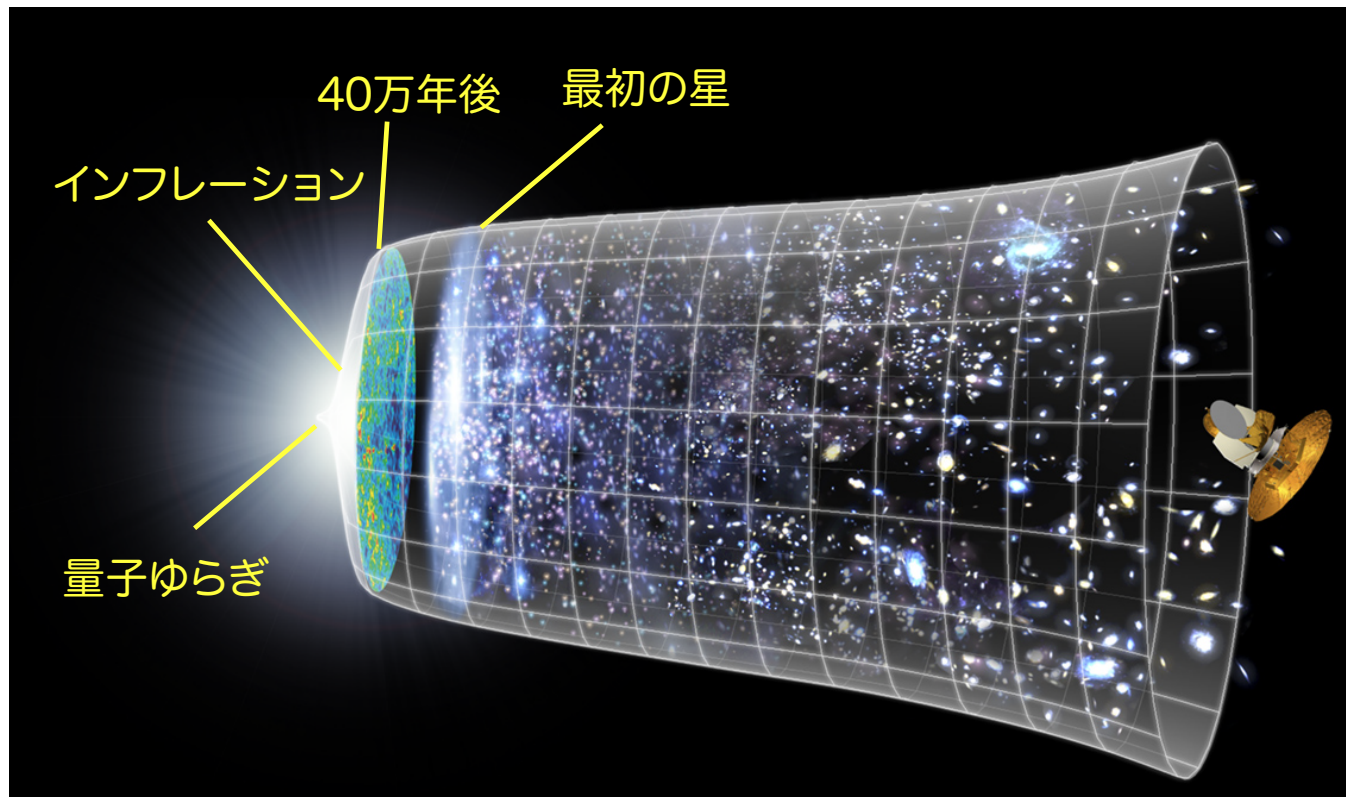
誕生直後 ($\sim 10^{-36}$ 秒?)の宇宙を理解できる時代になった

宇宙論の問題

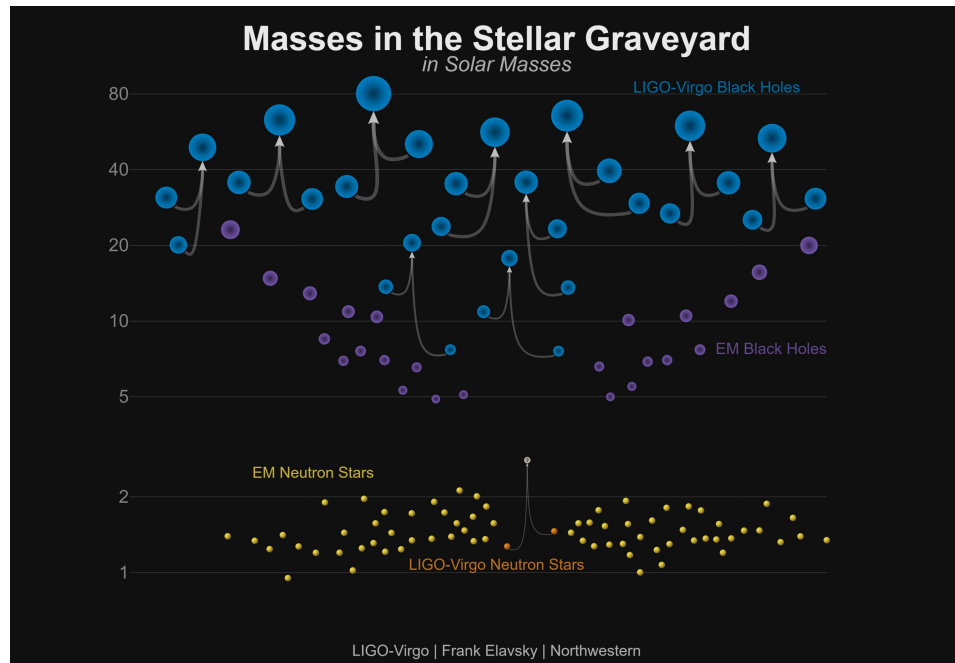
- インフレーションを起こす素粒子モデル
- 宇宙の物質・反物質非対称性
- ダークマター・ダークエネルギー



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 $10^3\text{-}9M_{\odot}$ 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：大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida

2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida

標準模型：SU(3)_{color} x SU(2)_L x U(1)_Y ゲージ理論

物質：quark & lepton

	SU(3)	SU(2)	U(1) _Y		
Quarks	$Q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	3	2	1/6	x 3 世代
	\bar{u}_R	$\bar{3}$	-	-2/3	
	\bar{d}_R	$\bar{3}$	-	1/3	
Leptons	$\ell_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	-	2	-1/2	
	\bar{e}_R	-	-	1	
Gauge bosons	g		Z, W, γ		

わりと複雑...

研究例 1：大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida


2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ を $SU(5)$ に埋め込むと...

フェルミオンたちはたった2種類にまとまる!

$$\psi(5^*) = \begin{pmatrix} \bar{D}_R^1 \\ \bar{D}_R^2 \\ \bar{D}_R^3 \\ L_L^1 \\ L_L^2 \end{pmatrix} \quad \psi(10) = \begin{pmatrix} 0 & \bar{U}_R^3 & -\bar{U}_R^2 & U_L^1 & D_L^1 \\ -\bar{U}_R^3 & 0 & \bar{U}_R^1 & U_L^2 & D_L^2 \\ \bar{U}_R^2 & -\bar{U}_R^1 & 0 & U_L^3 & D_L^3 \\ -U_L^1 & -U_L^2 & -U_L^3 & 0 & \bar{E}_R \\ -D_L^1 & -D_L^2 & -D_L^3 & -\bar{E}_R & 0 \end{pmatrix}$$

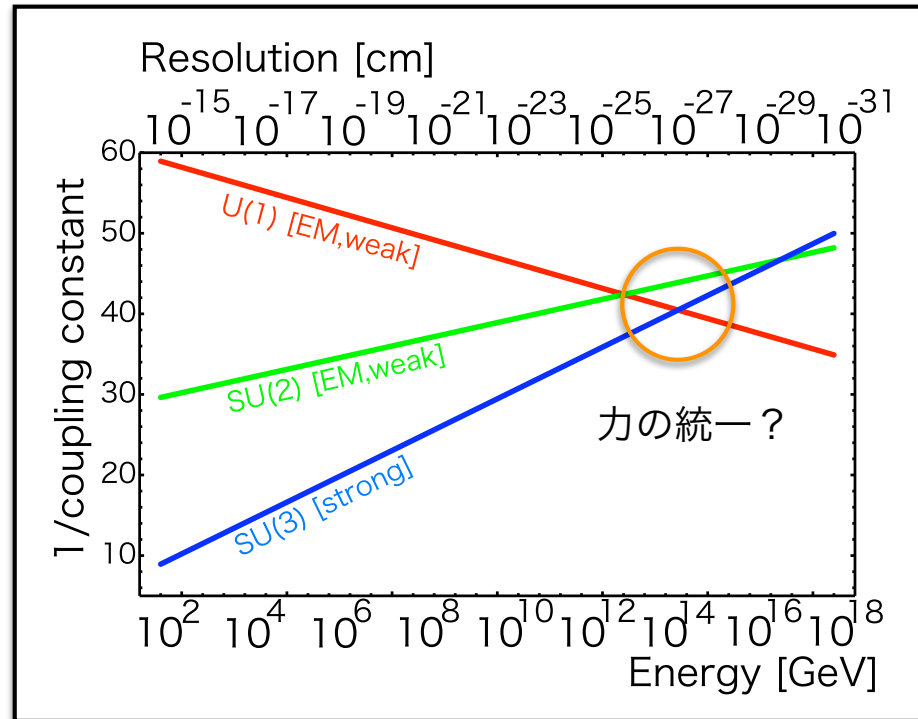
偶然とは思えない!

 $\psi(5^*) + \psi(10) \times 3$

研究例 1：大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida

2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida



力の強さも実際に高エネルギーでは近づいていく！

10^{14} GeV に統一理論の可能性！

Grand Unified Theory (GUT)

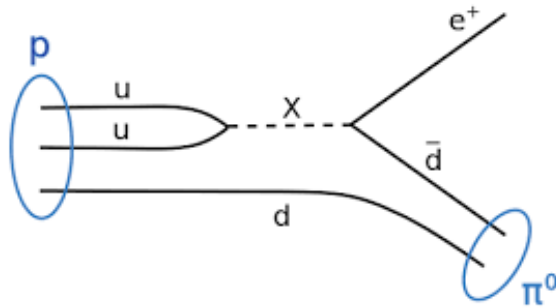
研究例 1：大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida

2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida

統一理論ではレプトンとクォークが同じものになっている。

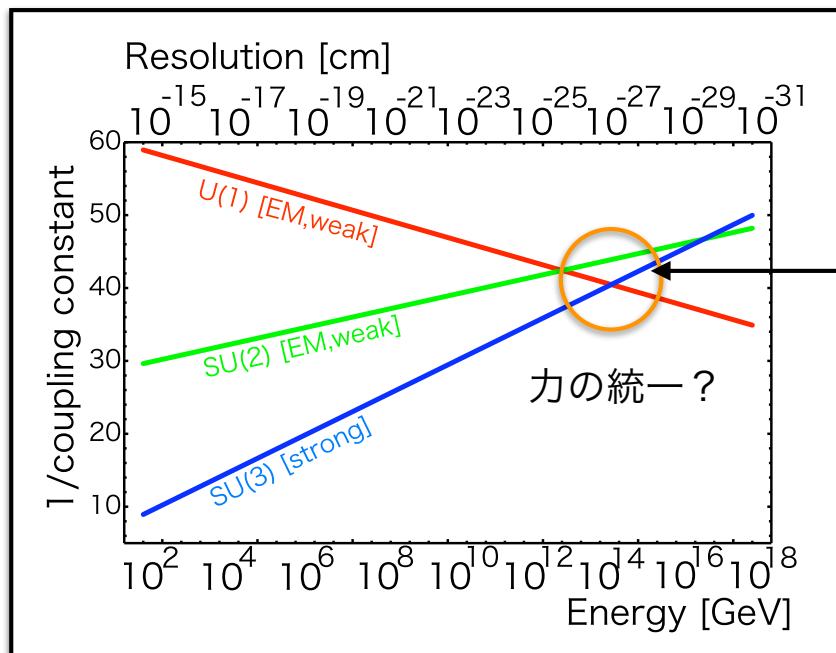
クォークがレプトンに変化できる → 陽子崩壊！



寿命は $\sim 10^{27} \text{ year} \times (M_X/10^{14} \text{ GeV})^4$

SuperKamiokande 実験ですでに棄却...

(寿命の下限 $\sim 10^{34} \text{ year}$)



よく見ると一致もそれほど
良くない。。

研究例 1：大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida

2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida

$$\psi(5^*) = \begin{pmatrix} \bar{D}_R^1 \\ \bar{D}_R^2 \\ \bar{D}_R^3 \\ L_L^1 \\ L_L^2 \end{pmatrix} \quad \psi(10) = \begin{pmatrix} 0 & \bar{U}_R^3 & -\bar{U}_R^2 & U_L^1 & D_L^1 \\ -\bar{U}_R^3 & 0 & \bar{U}_R^1 & U_L^2 & D_L^2 \\ \bar{U}_R^2 & -\bar{U}_R^1 & 0 & U_L^3 & D_L^3 \\ -U_L^1 & -U_L^2 & -U_L^3 & 0 & \bar{E}_R \\ -D_L^1 & -D_L^2 & -D_L^3 & -\bar{E}_R & 0 \end{pmatrix}$$

クォークとレプトンが SU(5) の表現に埋め込まれるのは偶然か？

実はクォークとレプトンが SU(5) 表現に埋め込まれていなくても標準模型のエネルギー領域ではあたかも SU(5) 表現に埋め込まれているように見える一般的枠組みがある！

Fake GUT ?

研究例 1 : 大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida

2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida

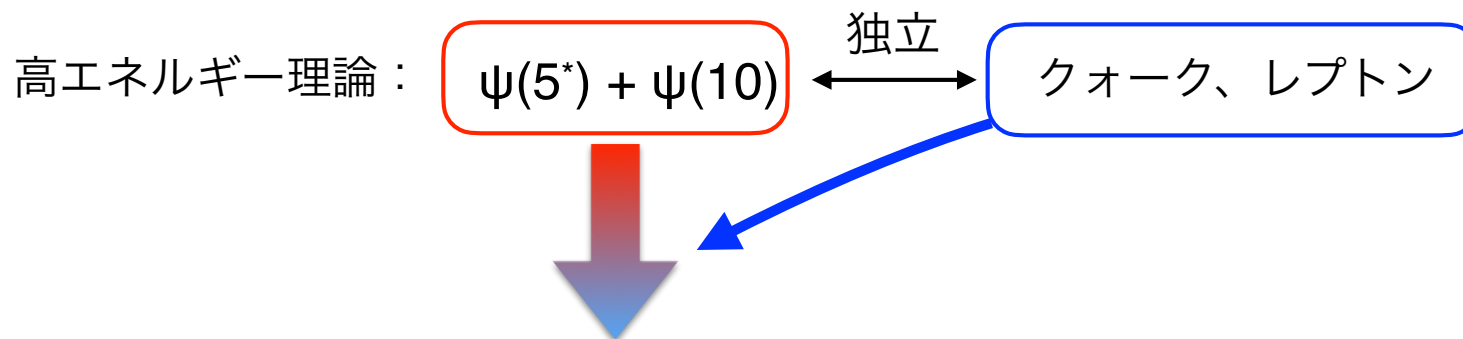
Fake GUT

ゲージ群 = $SU(5) \times H$

理論は $\psi(5^*) + \psi(10)$ を含む

理論は $\psi(5^*) + \psi(10)$ 以外にもいろいろ物質場を含む

ただし $\psi(5^*) + \psi(10)$ はクォーク、レプトンを含まなくてよい



標準模型 : クォーク、レプトン $\sim \psi(5^*) + \psi(10)$

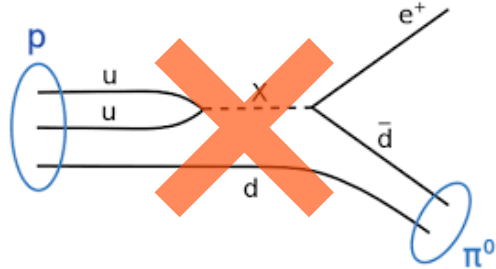
fake GUT では $\psi(5^*) + \psi(10)$ の中身が勝手にクォーク&レプトンに勝手にすり替わってしまう。

研究例 1：大統一理論の再考察

2019 Ibe, Shirai, Suzuki and Yanagida

2022 Ibe, Shirai, Watanabe and Yanagida

Fake GUT

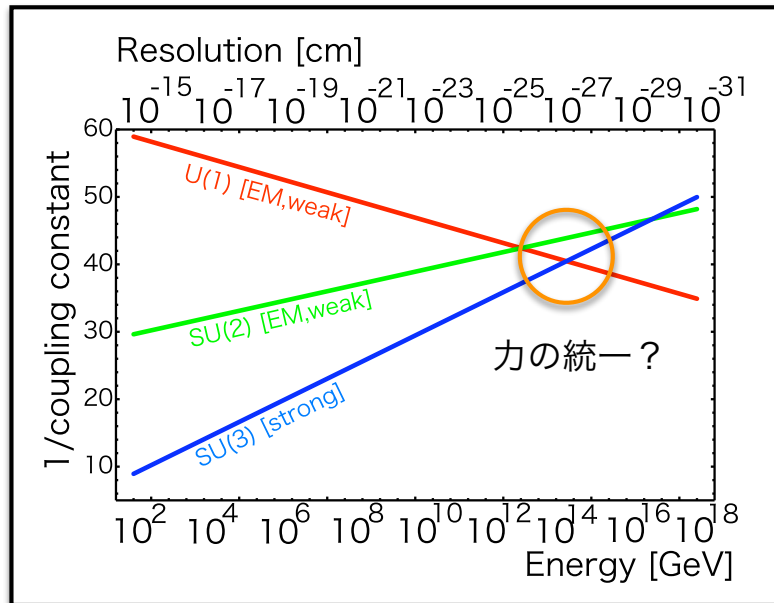


陽子崩壊が大幅に抑制 → SK 制限を逃れる。

それでも陽子崩壊はやはり崩壊する。

様々な崩壊モードが可能！

(例えば $p \rightarrow \pi^0 + \mu$ がメインモードにもなれる。)



fake GUT では力の統一がそれほど良くないのも当然。

Hyper-K に期待が高まる！

まだまだ新しい考え方なのでいろいろ考える必要がある！

研究例 2：暗黒光子にまつわる位相欠陥

2021 MI, Hiramatsu, Suzuki, Yamaguchi

2023 MI, Chitose

- ✓ 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

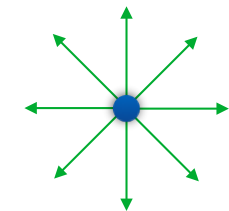


✓ 暗黒光子にまつわる位相欠陥

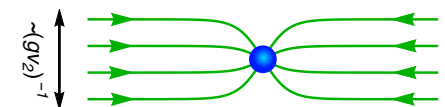
暗黒光子の質量が U(1) ゲージ対称性の自発的対称性の破れによるものであれば暗黒光子に暗黒**宇宙ひも**が生じる



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



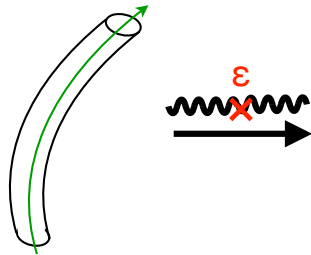
研究例 2：暗黒光子にまつわる位相欠陥

2021 MI, Hiramatsu, Suzuki, Yamaguchi

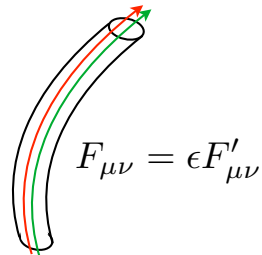
2023 MI, Chitose

✓ 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？

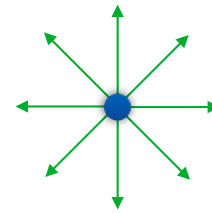
暗黒宇宙ひも内部に
暗黒光子の磁束密度



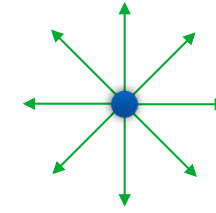
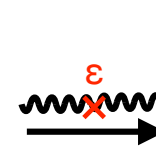
混合効果で光子
の磁束密度



暗黒磁気モノ
ポール

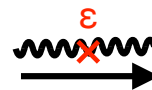
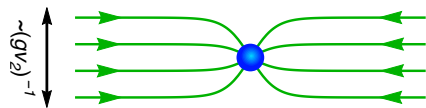


光子側には何も
生じない

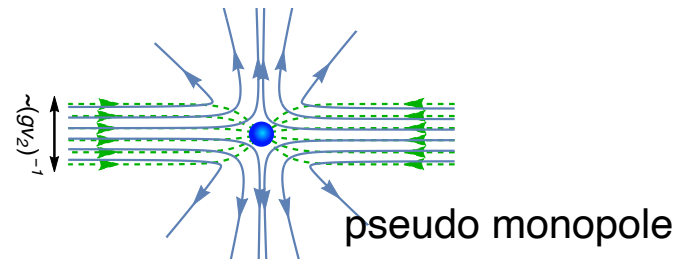


ビーズ解

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 2：暗黒光子にまつわる位相欠陥

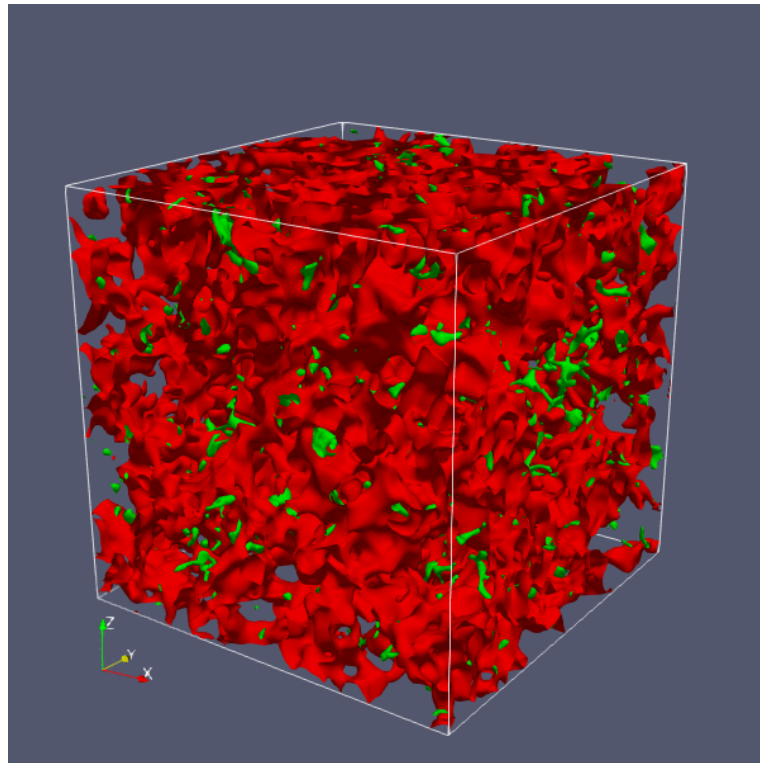
2021 MI, Hiramatsu, Suzuki, Yamaguchi

2023 MI, Chitose

- ✓ 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

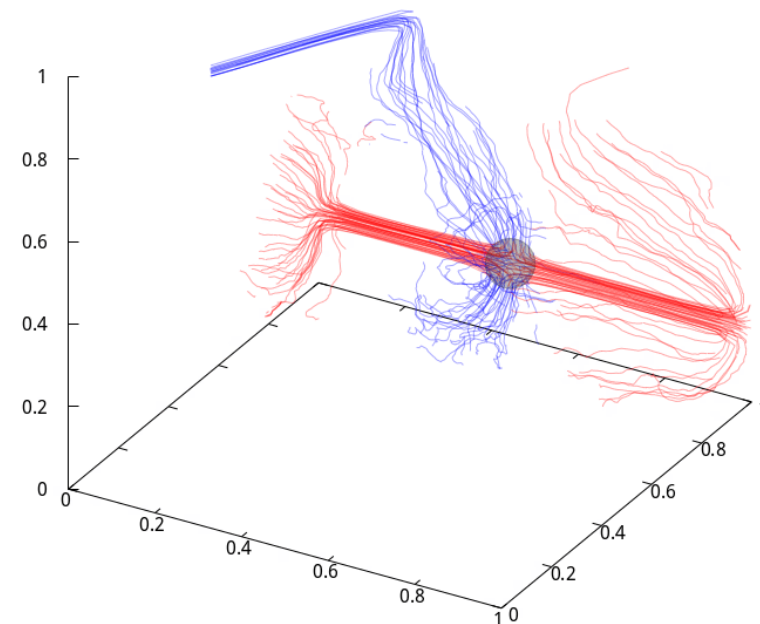
(SU(2) \rightarrow U(1) \rightarrow Z₂ への自発的破れ)



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)
 - ・IPMU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
- 論文修士論文の研究開始  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
- 博士論文を完成 遂行する

最近の修士過程の学生の研究例

IPMU22-0054

Precise Estimate of Charged Wino Decay Rate

Masahiro Ibe^{a,b}, Masataka Mishima^a, Yuhei Nakayama^a and Satoshi Shirai^b

^a ICRR, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

^b Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI),
The University of Tokyo Institutes for Advanced Study,
The University of Tokyo, Kashiwa 277-8583, Japan

More on Dark Topological Defects

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

¹ICRR, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

(Dated: March 21, 2023)

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

^aICRR, University of Tokyo, Kashiwa, 277-8582, Japan

^bKavli IPMU (WPI), UTIAS, University of Tokyo, Kashiwa, 277-8583, Japan

^cFrontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, Sendai, 980-8578 Japan

^dDepartment of Physics, Tohoku University, Sendai, 980-8578 Japan

E-mail: kkasai@icrr.u-tokyo.ac.jp, kawasaki@icrr.u-tokyo.ac.jp,
naoya.kitajima.c2@tohoku.ac.jp, kai.murai.e2@tohoku.ac.jp,
neda@icrr.u-tokyo.ac.jp, fumi@tohoku.ac.jp

卒業後の進路

修士	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4
進学	2	1	2	2	2	2	3	1	1	1	1
就職	0	0	1	0	0	2	0	0	1	2	1

博士	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4
研究 職	1	2	0	1	1	1	1	2	0	0	1
就職	1	1	0	0	0	1	1	0	2	2	0

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