

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1名

学生M : (4名)

(宇宙論)

(素粒子論)

n/M_G

φ/M_G

$n^2 M_G^2$

0

0

-5

0

5

10 0

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

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？

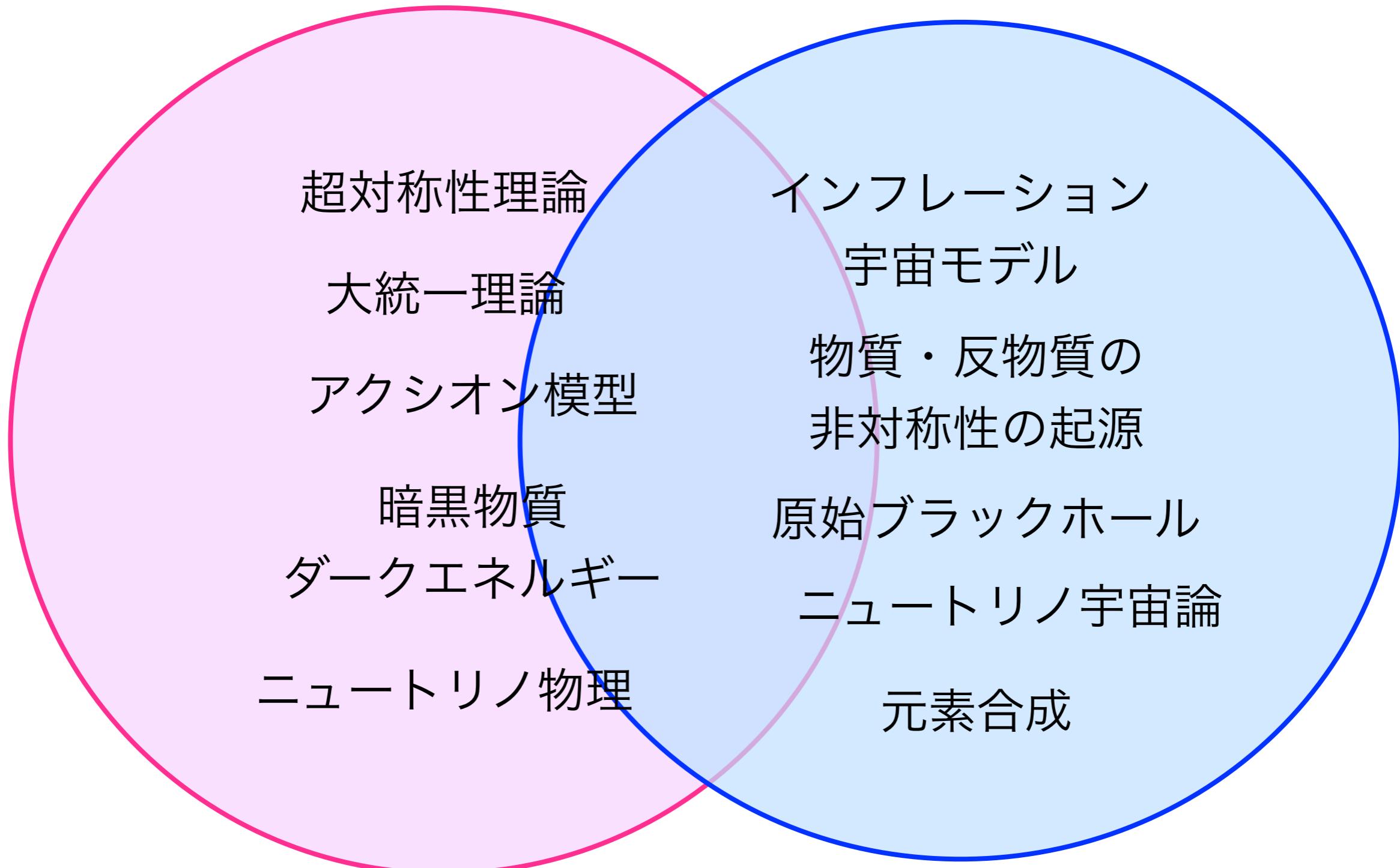
これらの疑問に答える理論を考えるのが理論グループの研究です

理論グループの研究

素粒子的宇宙論

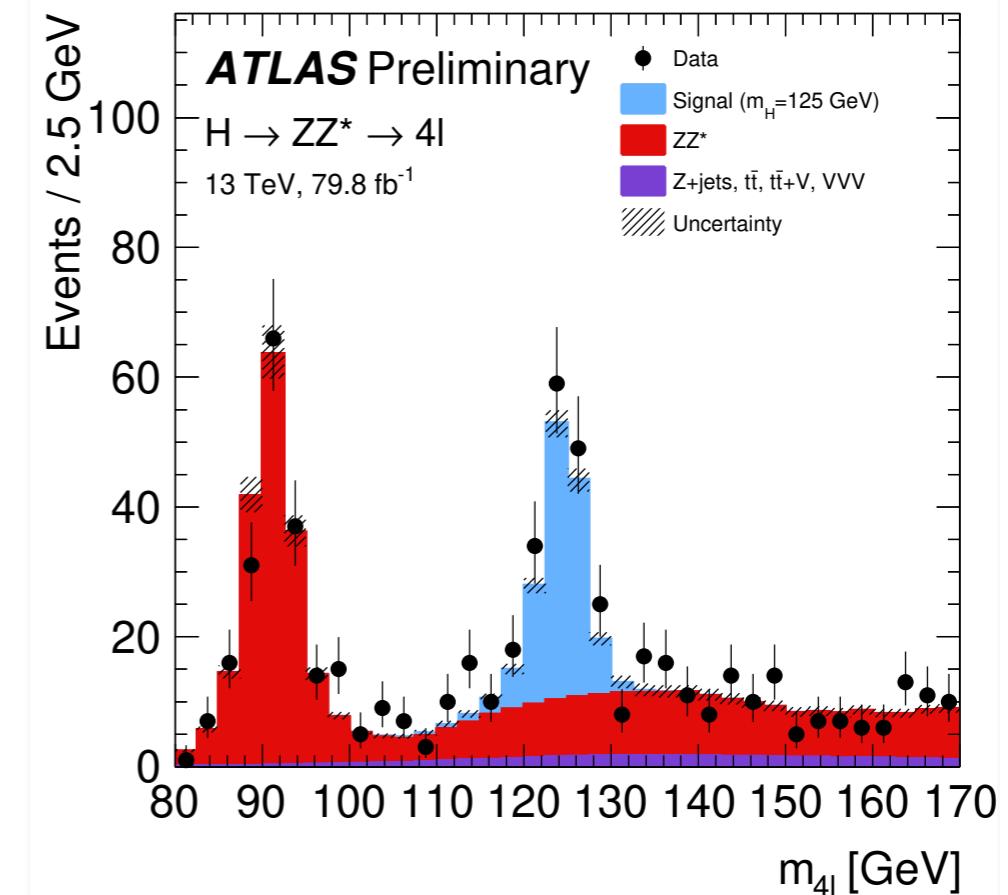
物質の究極の理解

宇宙の探求



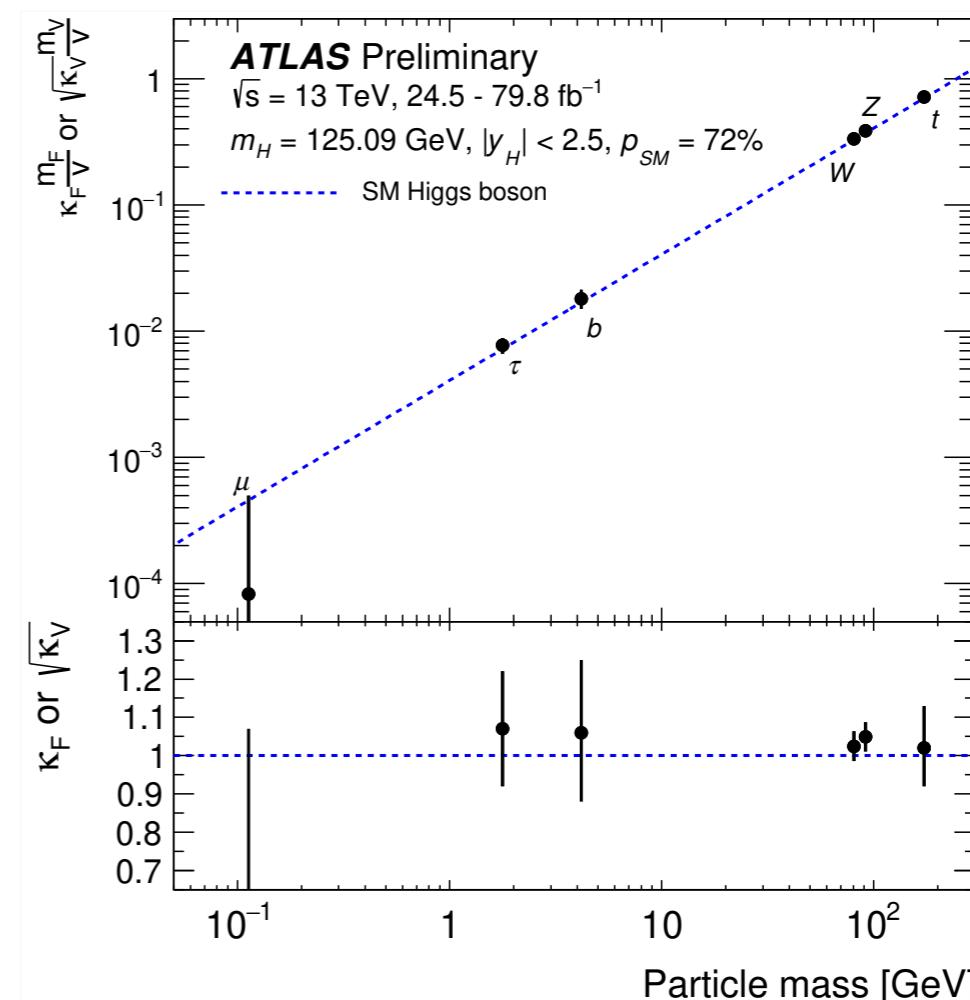
- ・質量を与える素粒子
 - ・ヒッグス
 - ・2011年 LHCで発見

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



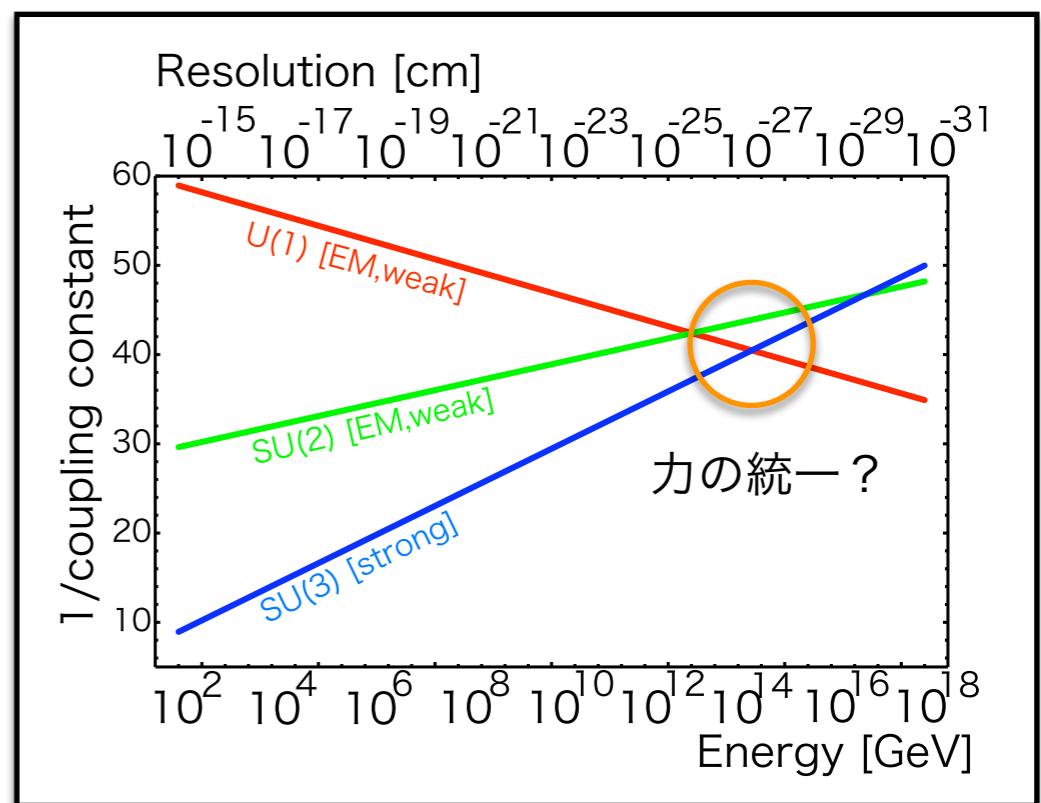
標準模型が完成！

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！

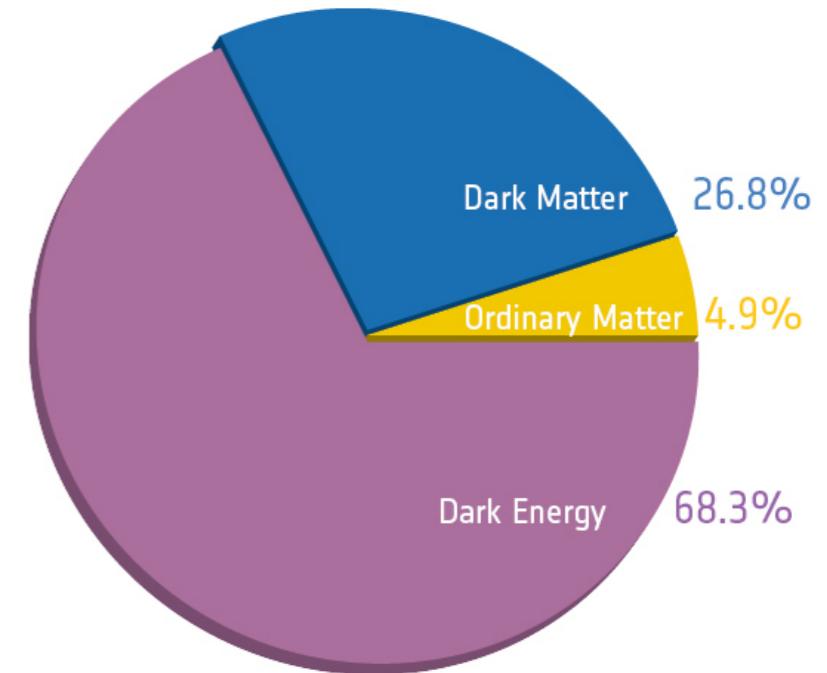
宇宙初期

- 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

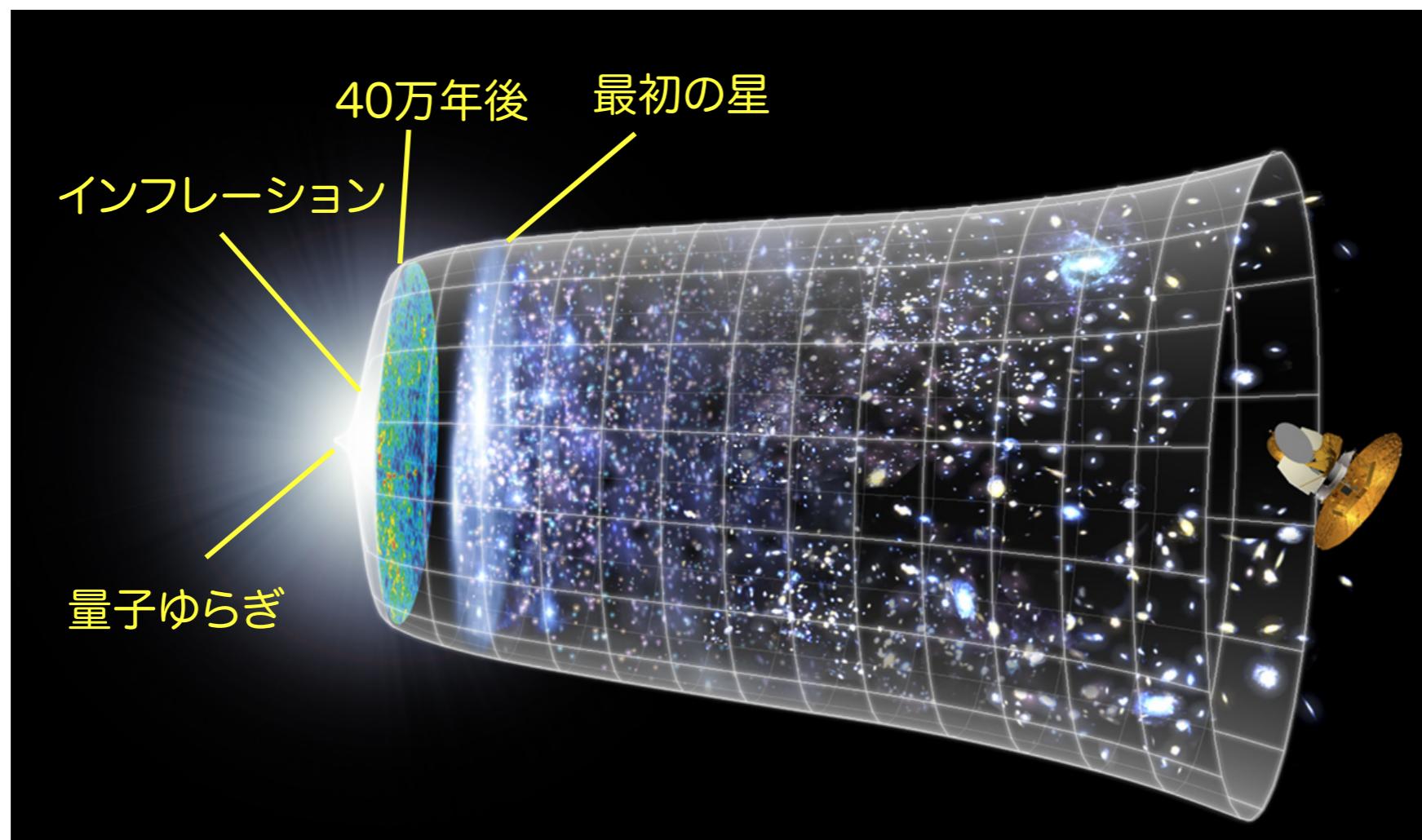
誕生直後 (10^{-36} 秒) の宇宙を理解できる時代になった

宇宙論の問題

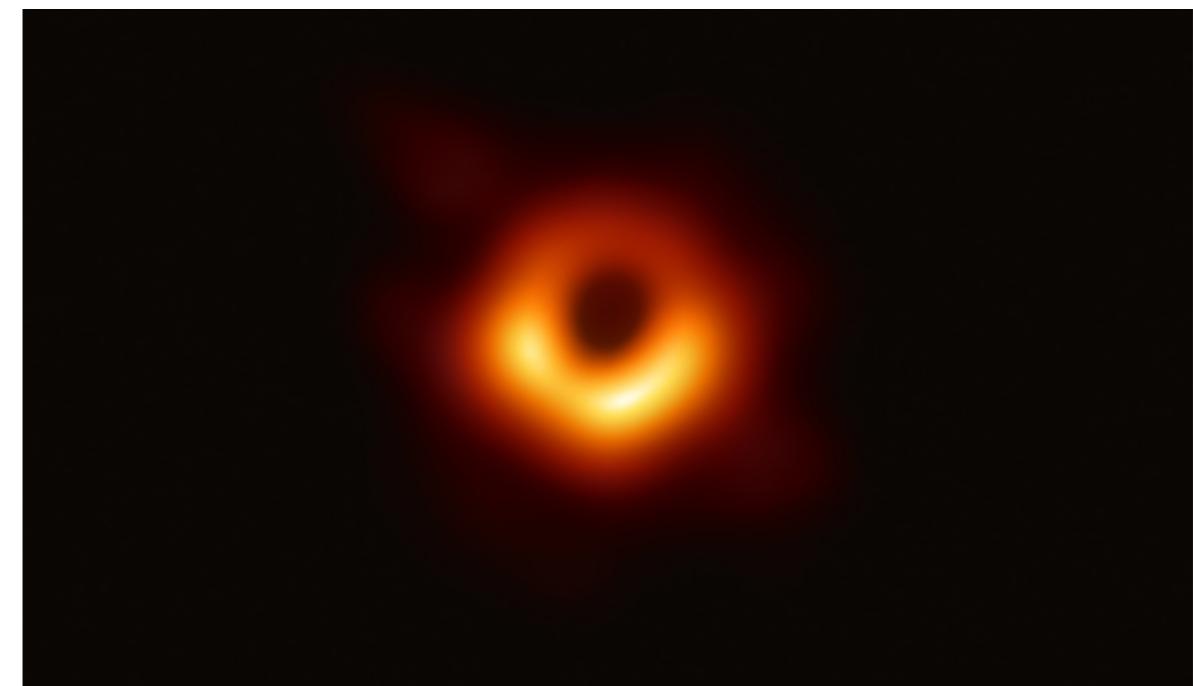
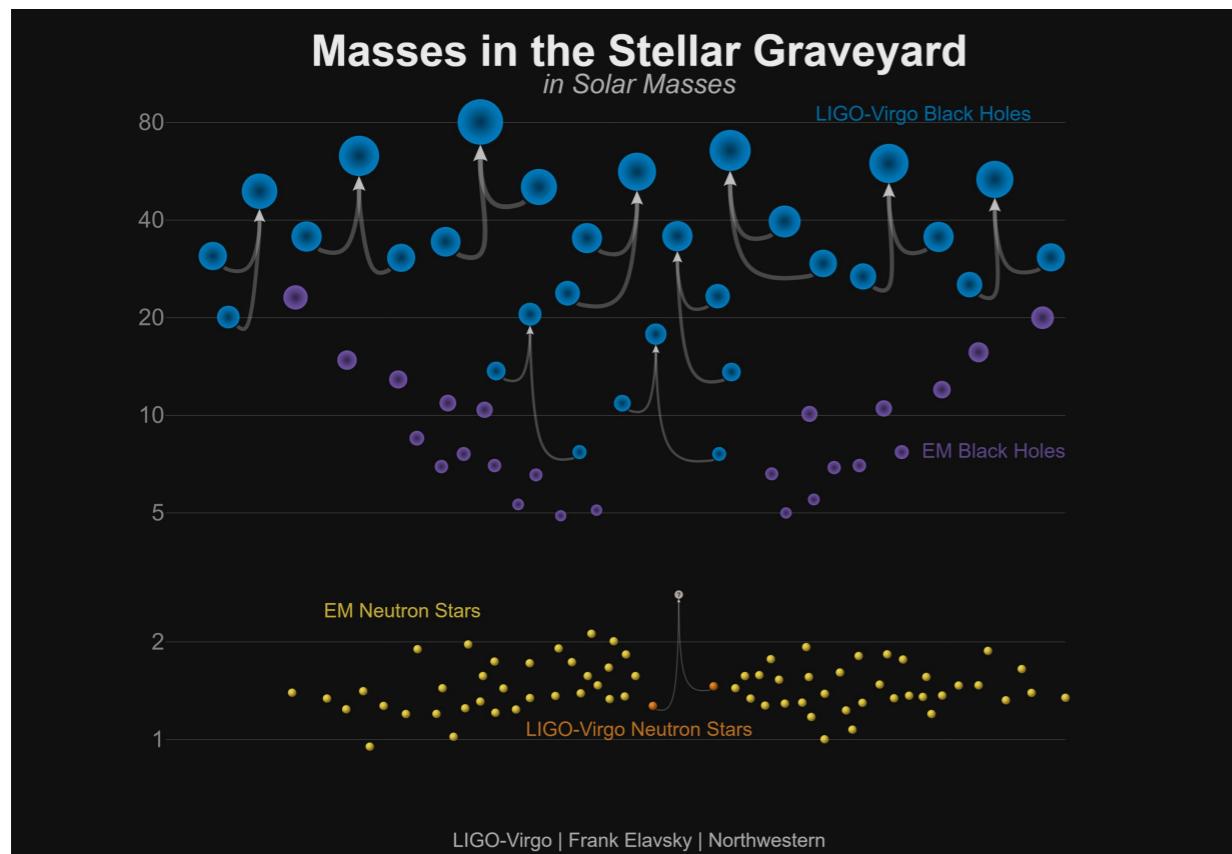
- インフレーションを起こす素粒子モデル
- 宇宙の物質・反物質非対称性
- ダークマター・ダークエネルギー



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...

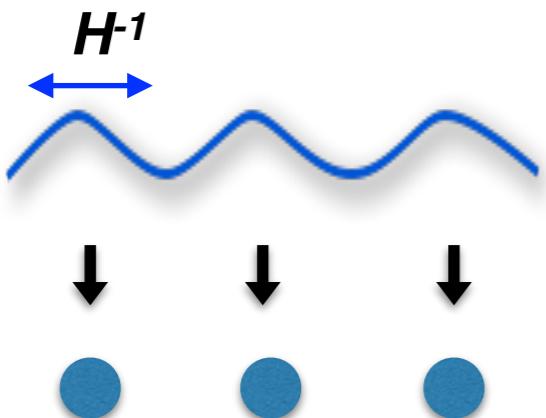
インフレーションなどの初期宇宙に起源?

研究例 1：インフレーションや原始ブラックホールに関する研究

(cf. 2017 Inomata (当時D1), Kawasaki, Mukaida, Yanagida)

✓ 原始ブラックホール

$O(1)$ の揺らぎ $\delta = (\rho - \rho_{\text{average}}) / \rho_{\text{average}}$ がハッブルホライズン H^{-1} に入ると

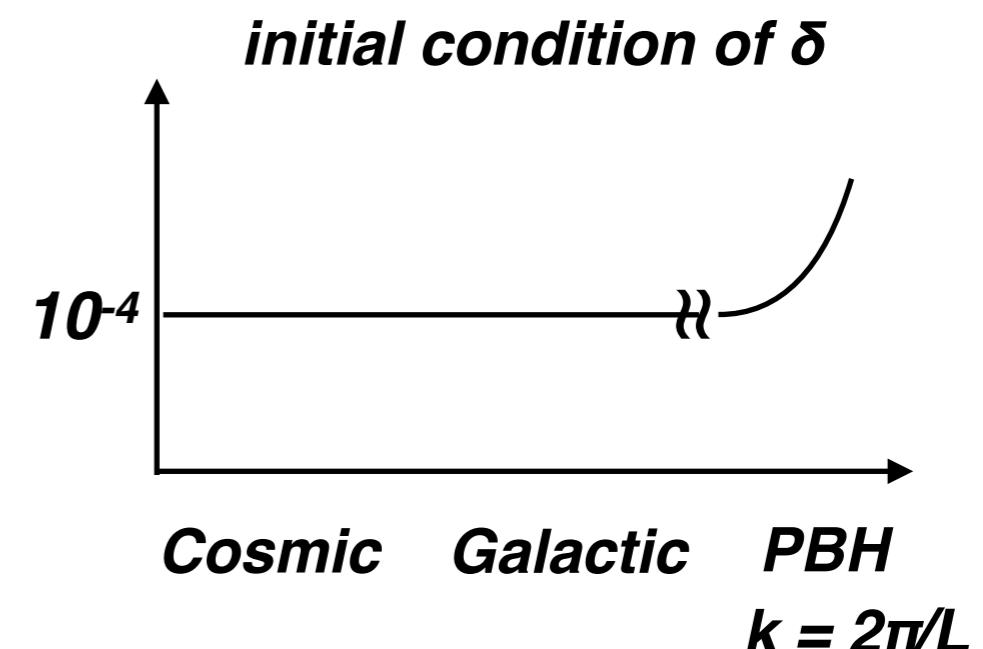
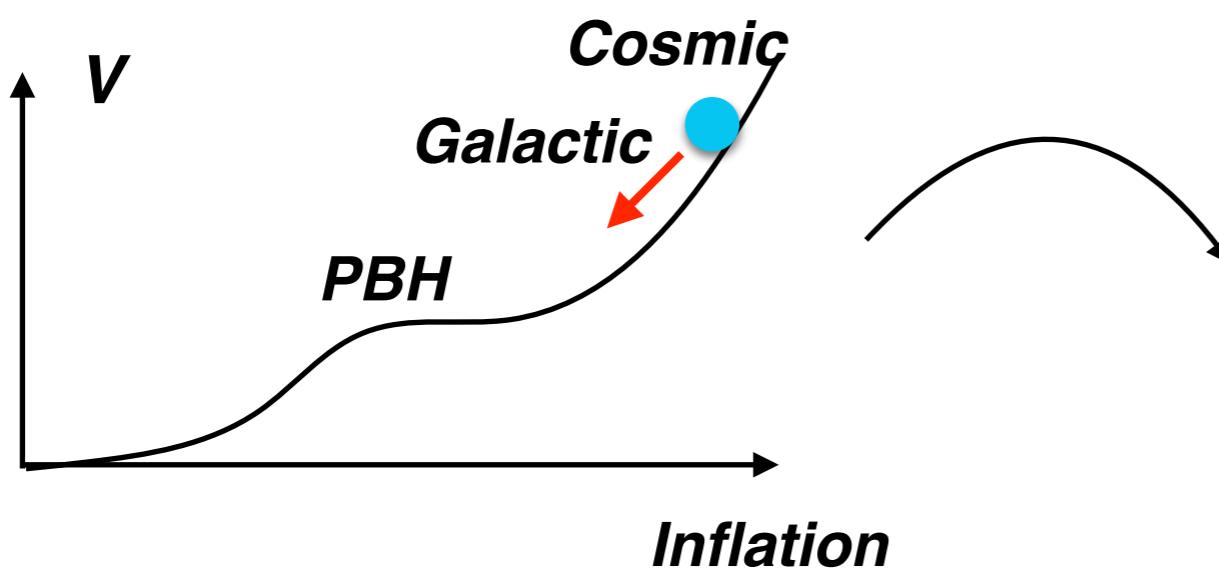


Collapsed objects : Mass $\sim 4\pi/3 \rho H^3$
 $\sim M_{\text{SUN}} (T/0.2\text{GeV})^2$

シュワルツシルト半径 G Mass $\sim H^{-1}$ が *object* 半径を超える → 原始ブラックホール

暗黒物質の候補？ *LIGO-Virgo Merger Signal?*

✓ 例えば揺らぎのタネはインフレーションでつくる



✓ NANOGrav Signal vs LIGO-Virgo Merger Signal

2020 年に NANOGrav (Pulser Timing Array) 実験が 10^{-9} Hz の重力波の検出の兆候を報告した

✓ *LIGO-Virgo* で見つかっている $30 M_{\odot}$ 程度の質量のブラックホールを説明する PBH 模型でこの重力波も説明可能！ (cf. 2020 Inomata Kawasaki, Mukaida, Yanagida)

PBH = Curvaton (平なポテンシャルを持つ場)の揺らぎで生成
Curvaton の揺らぎが重力波も生成する！

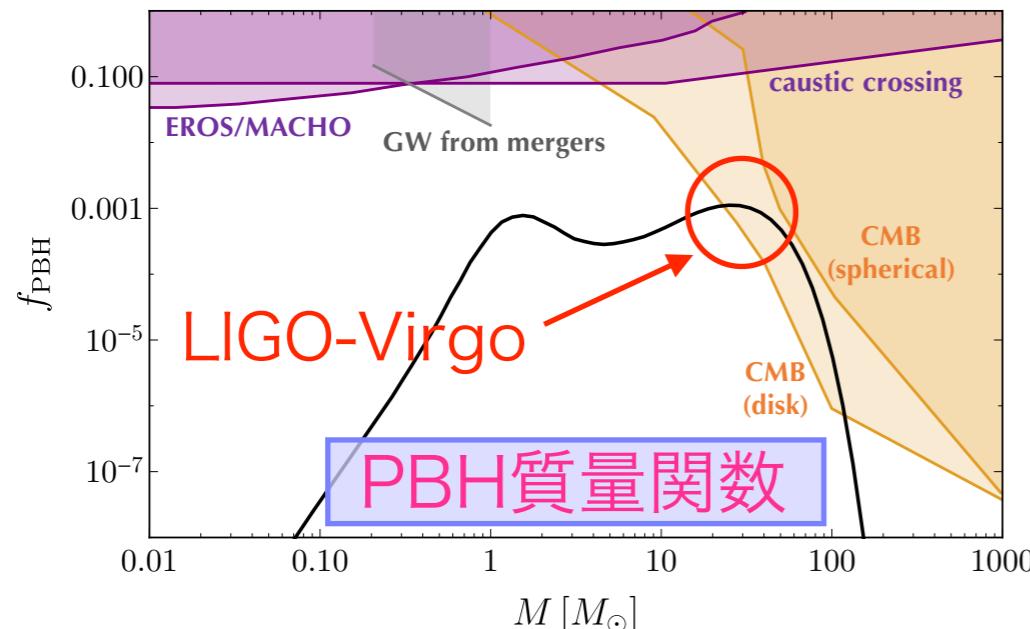


FIG. 1. PBH mass spectrum (black solid) with the parameter set (28). The shaded regions are constrained by EROS/MACHO [73, 74], caustic crossing events [75], CMB anisotropy with the assumption of the spherical and the disk accretion onto PBHs [76], and GWs from mergers [77]. See also Ref. [12] for other constraints.

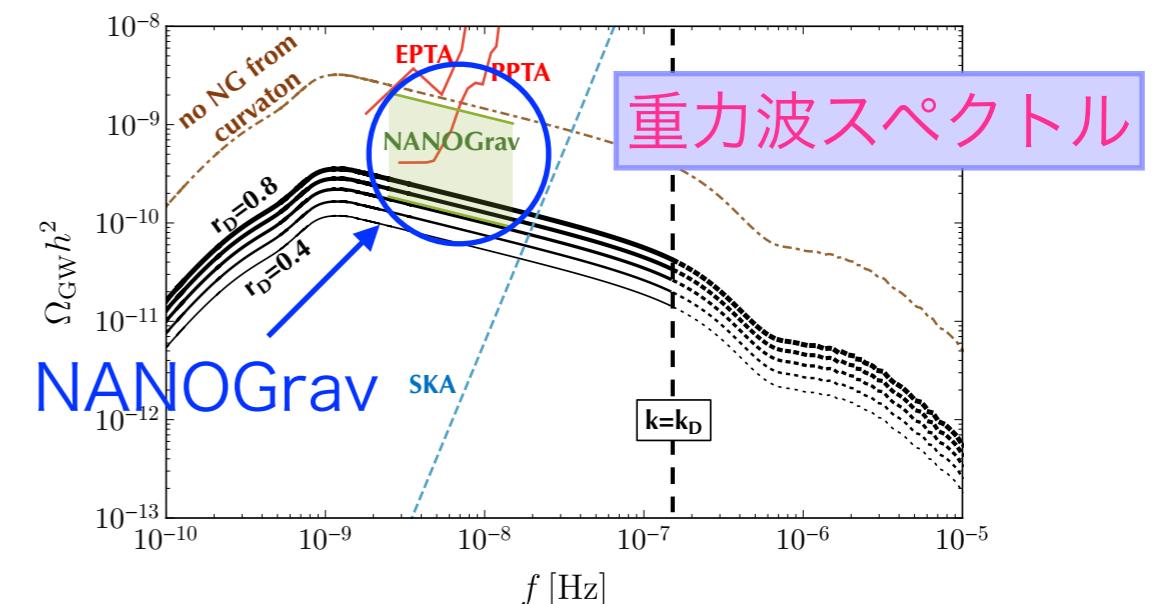


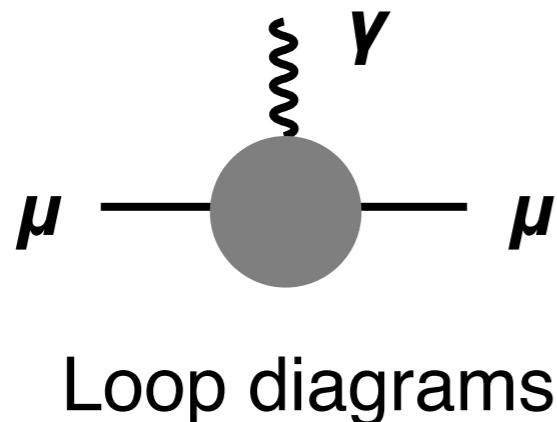
FIG. 2. The spectra of the induced GWs with $r_D = 0.8$ (black, top, thick) ~ 0.4 (bottom, thin). The difference of r_D between two adjacent lines is 0.1. $p(0.8) = 4.4$ is taken for the coefficient of the skewness given in Eq. (21) because of $n_2 = 0.8$. We also show the spectrum without the non-Gaussianity from curvaton ($\mu_3/\sigma = -9/4$, brown dot-dashed). The green-shaded region shows the 2σ region of the NANOGrav results with the tilt of $\Omega_{GW} \propto f^{-0.4}$. The constraints are also shown from the previous results of EPTA [78] and PPTA [79], and the future sensitivity of SKA [80]. The black dotted lines show the spectra on $k > k_D$, which might be suppressed more because the curvaton decay is not instantaneous (see below Eq. (18)).

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 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)

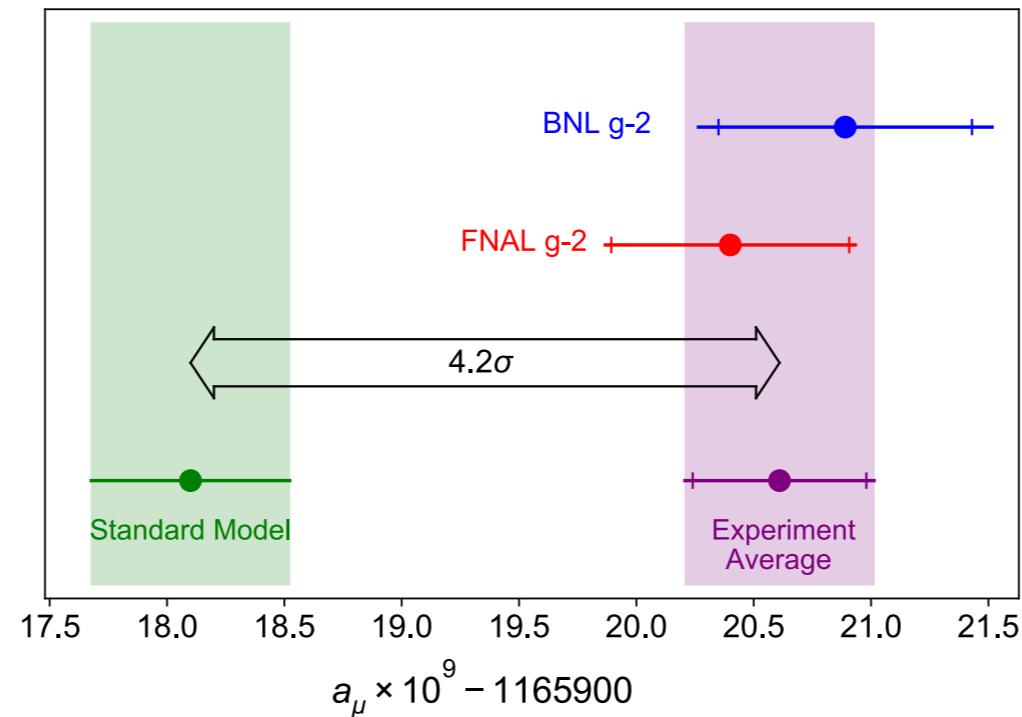


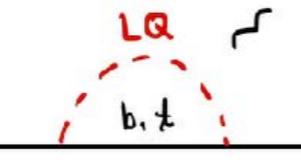
FIG. 4. From top to bottom: experimental values of a_μ from BNL E821, this measurement, and the combined average. The inner tick marks indicate the statistical contribution to the total uncertainties. The Muon $g - 2$ Theory Initiative recommended value [13] for the standard model is also shown.

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？

NP type	diagrams	mass range	probe
Supersymmetry		200~500 GeV	$\tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow (h\tilde{\chi}_1^0) (W^\pm \tilde{\chi}_1^0)$ $pp \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell}^*$
Scalar extensions		20~100 GeV, 150~250 GeV	$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ $h \rightarrow AA$
Axion-like particle		40 MeV~6 GeV	$e^+ e^- \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma\gamma$
Leptoquark		1.5~2 TeV	$pp \rightarrow LQL\bar{Q}$
$U(1) \mu-\tau$		10~200 MeV	$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- Z'$ $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} Z'$
Vector-like lepton		< 7 TeV	$h, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

[北原さん(名古屋大学)のスライド @ 高エネルギー将来計画検討委員会より]

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 $O(10)$ TeV)

+

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

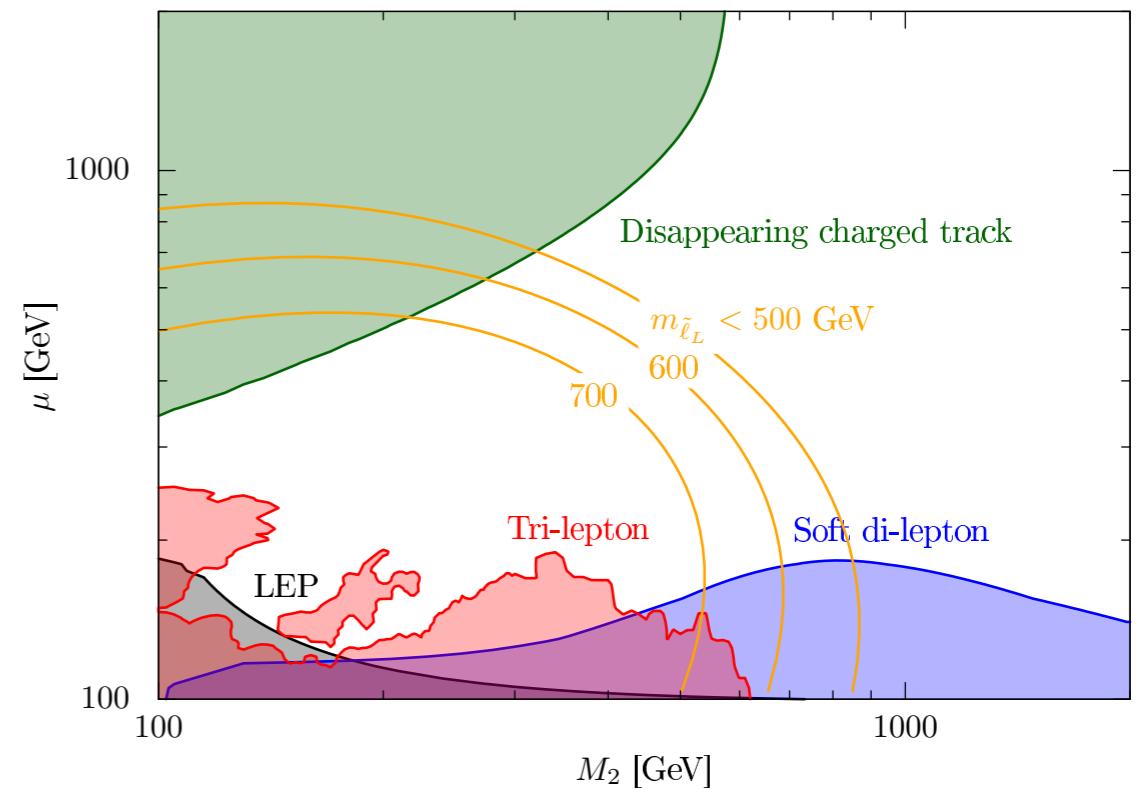
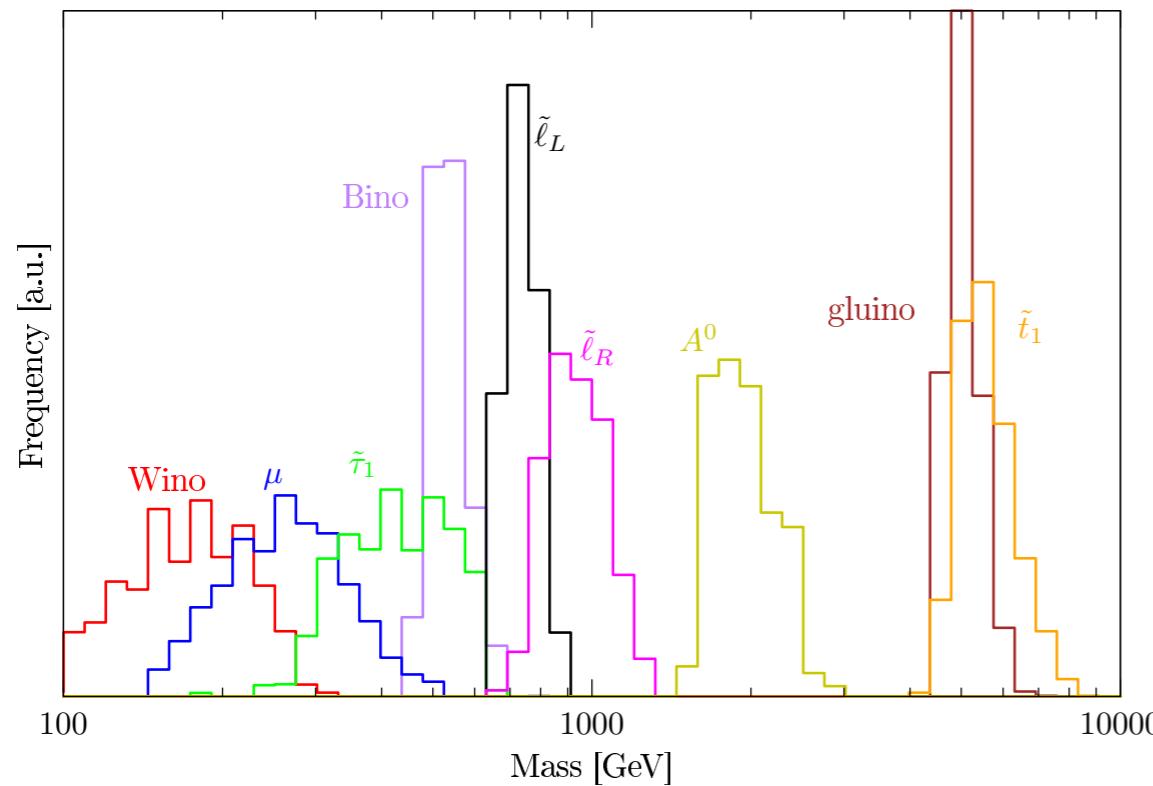
(g-2 と Higgs 質量を説明する我々の模型以外の模型は全て CP の問題は妥協している)

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)

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

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
37	36	34	40	21	25	27	26	29

1人当たり毎年約2-3編

理論グループの特徴

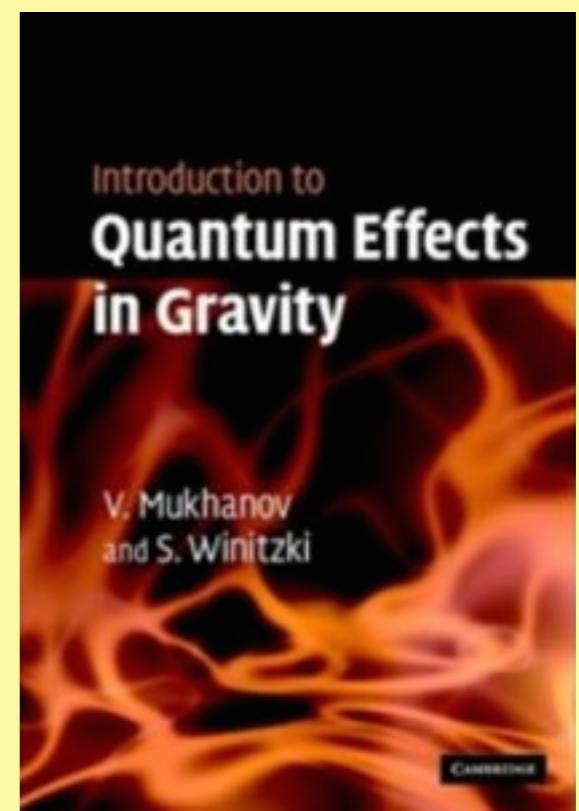
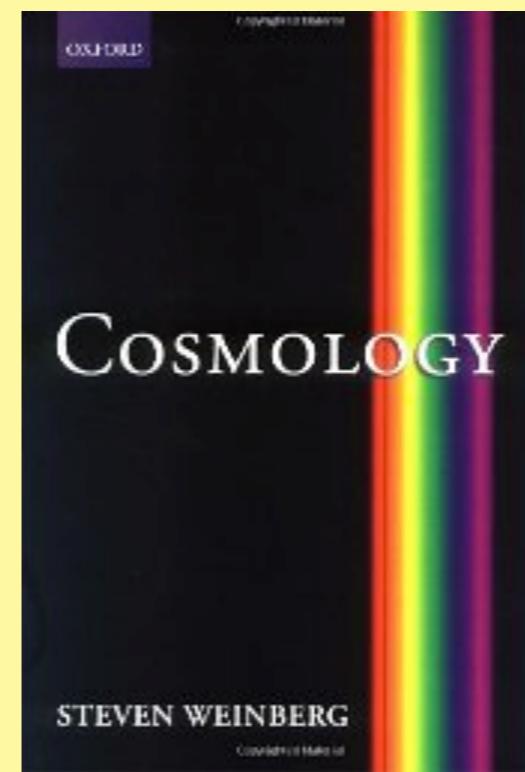
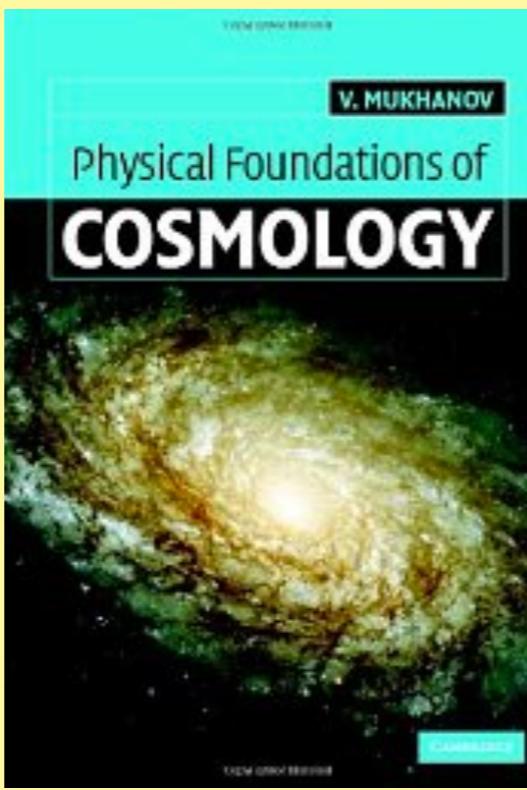
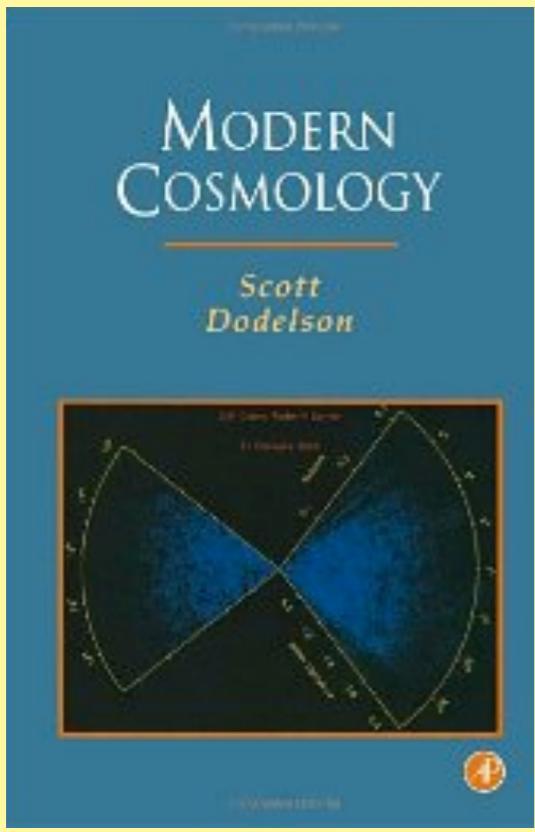
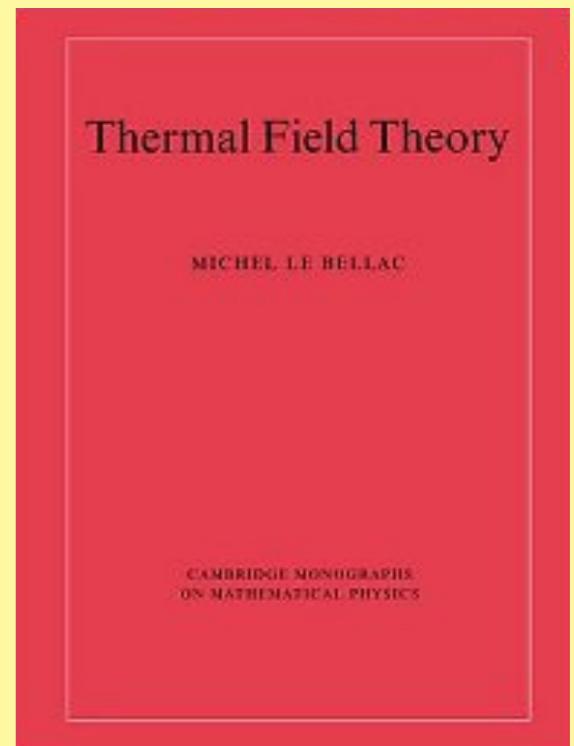
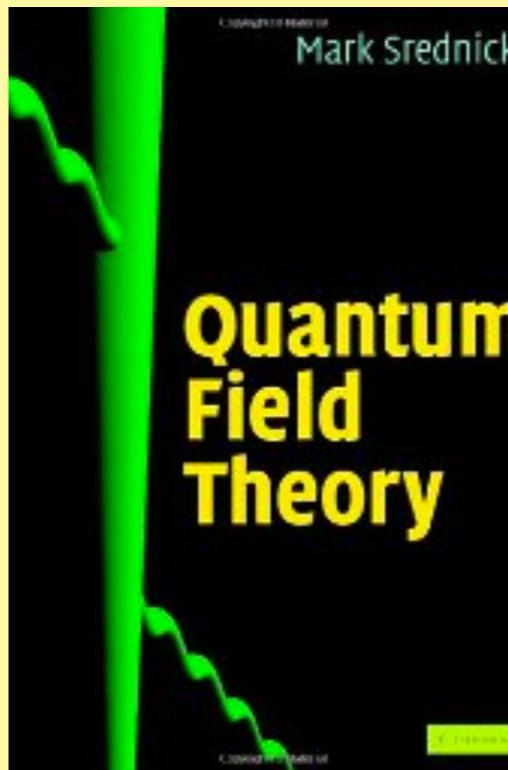
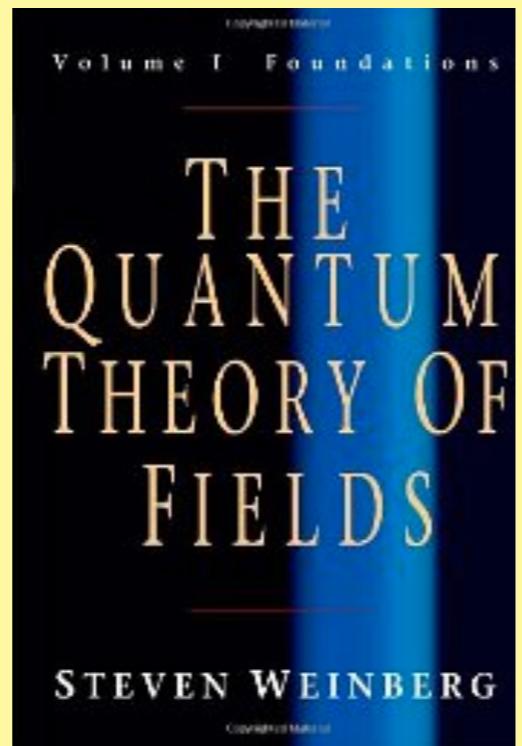
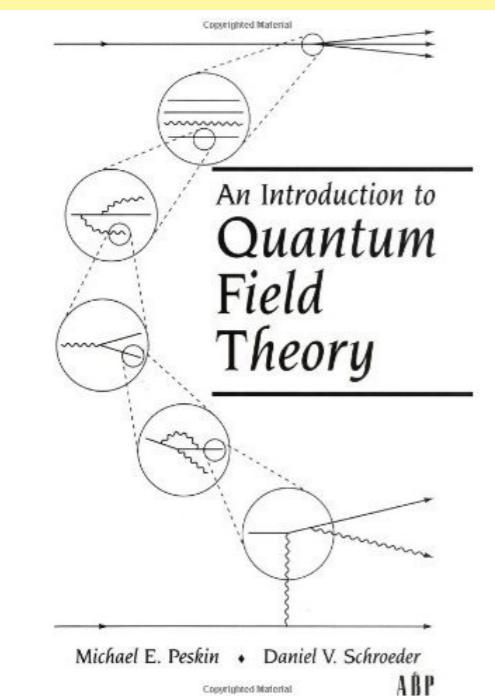
- 素粒子・宇宙の研究室が一体的に運営
 - ・セミナーは共通、学生は同じ部屋
(水曜日: ランチ・ジャーナル、金曜日: コロキウム)
 - ・素粒子と宇宙の両方に興味がある学生に最適
- 閑静な柏キャンパス
- 数物連携宇宙研究機構(IPMU)
 - ・IPMUの人々との積極的に共同研究しています。
 - ・IPMU の学生との共同のゼミ等があります。

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前半は本郷中心の生活（現在は remote 授業）
 - 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　　自ら研究課題を見つけ研究を遂行する
 - 博士論文を完成

● ゼミに使う教科書の例



卒業後の進路

修士	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2
進学	3	1	2	1	2	2	2	2	3	1	1
就職	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1

博士	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2
研究職	1	0	1	2	0	1	1	1	1	2	0
就職	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	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。