

東京大学宇宙線研究所

理論グループ

川崎雅裕

伊部昌宏

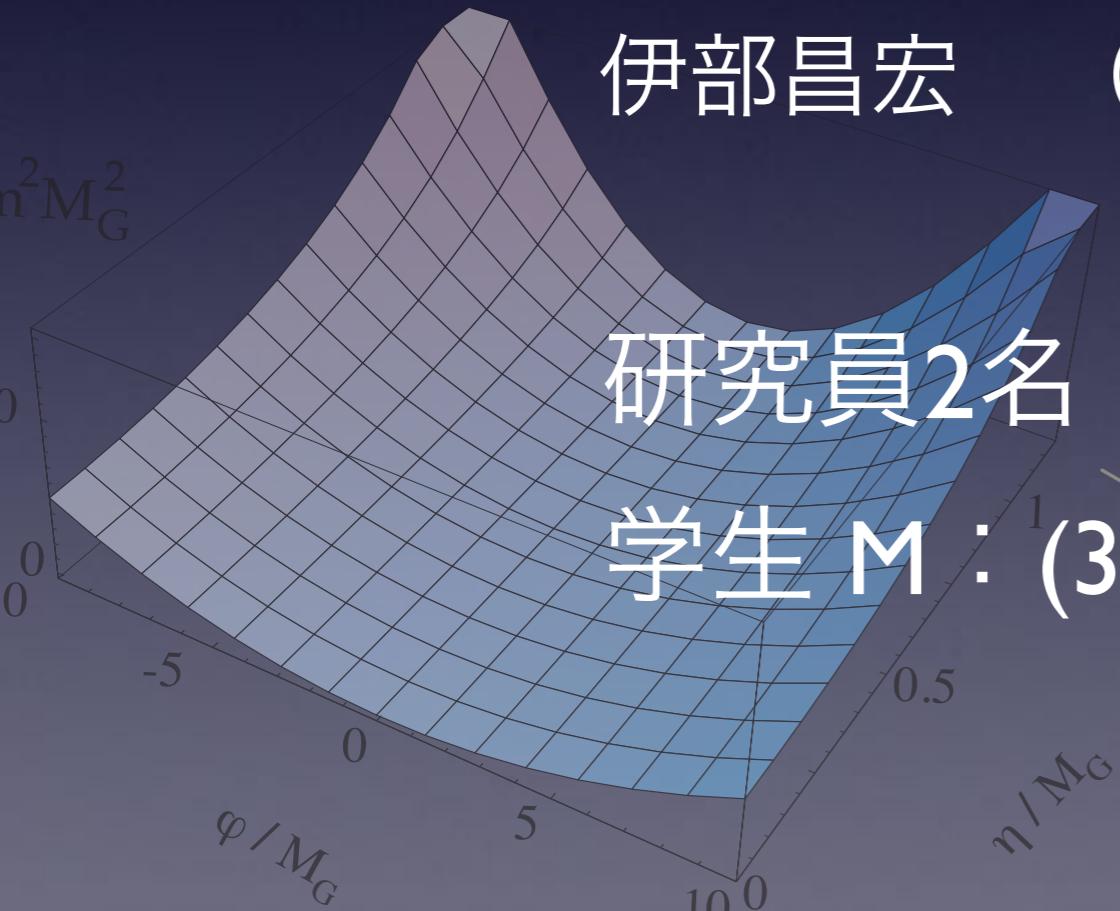
研究員2名

学生 M : (3名)

(宇宙論)

(素粒子論)

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



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？

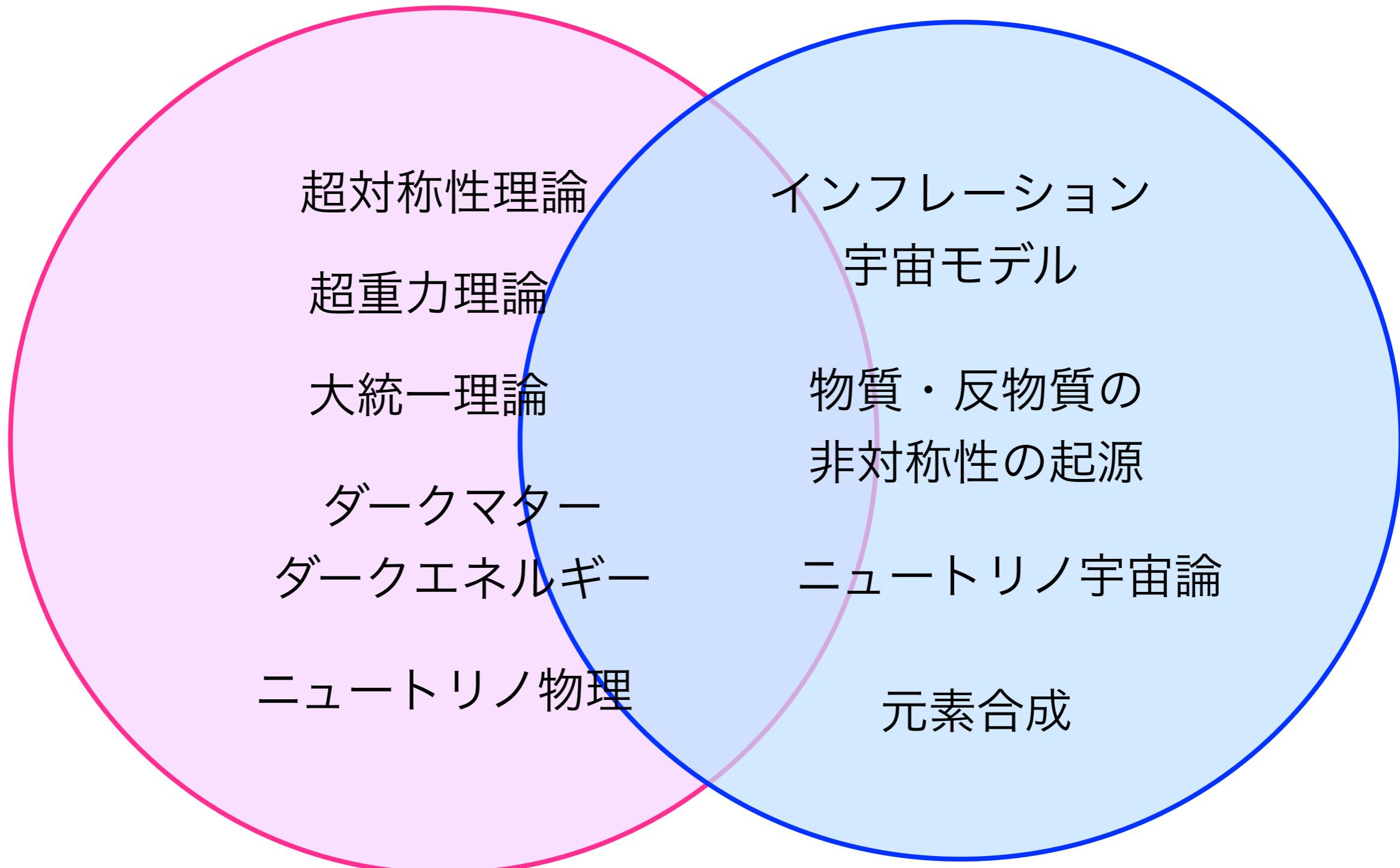
これらの疑問に答える理論を考えるのが理論グループの研究です

理論グループの研究

素粒子的宇宙論

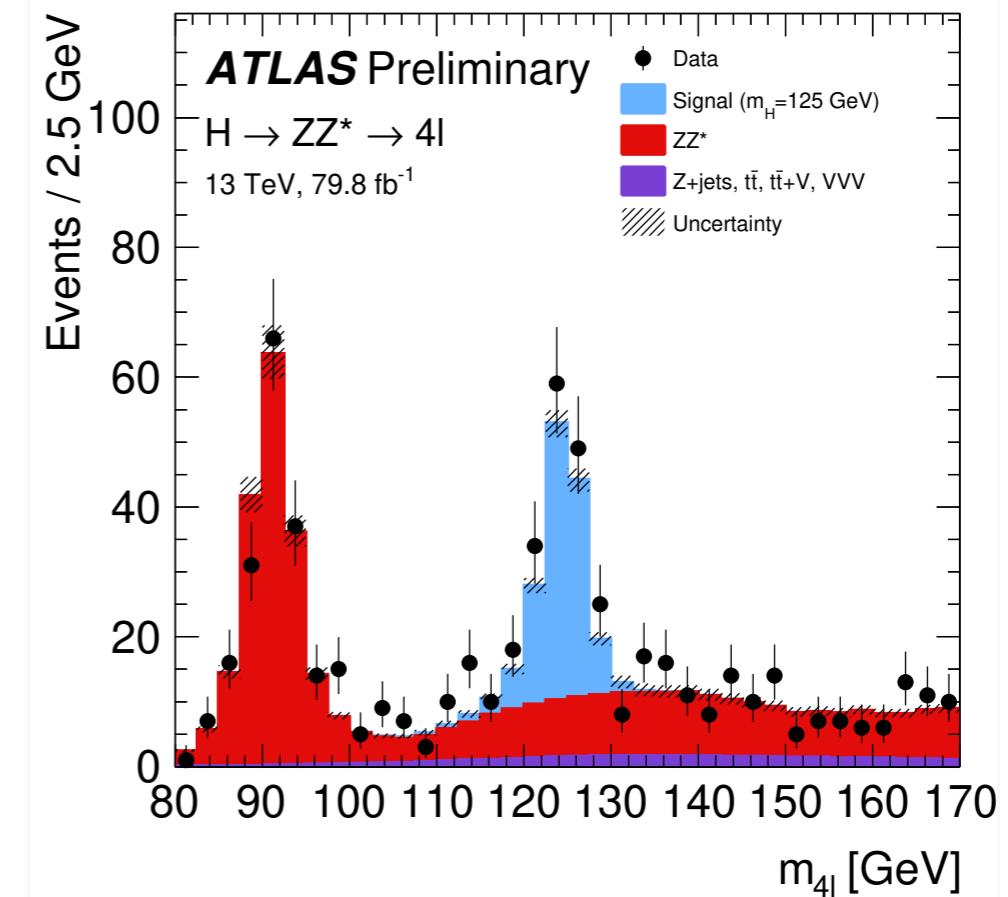
物質の究極の理解

宇宙の探求



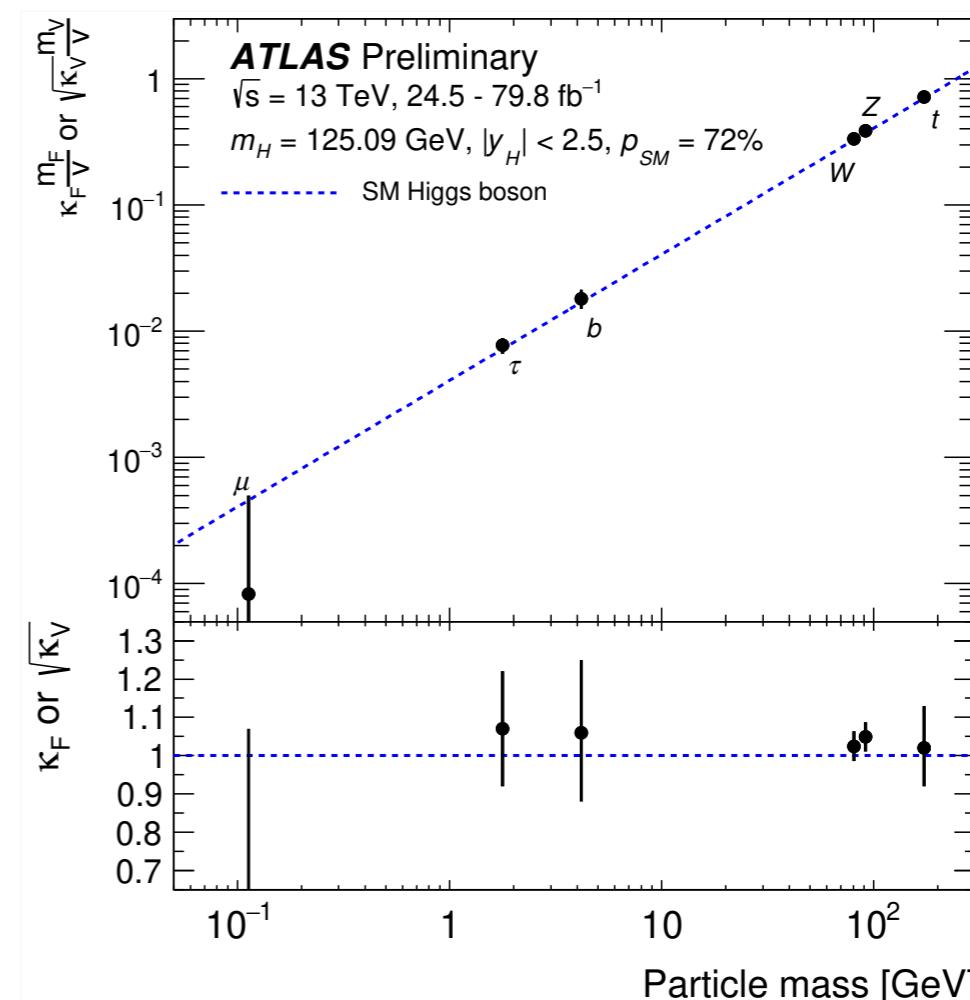
- ・質量を与える素粒子
 - ・ヒッグス
 - ・2011年 LHCで発見

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



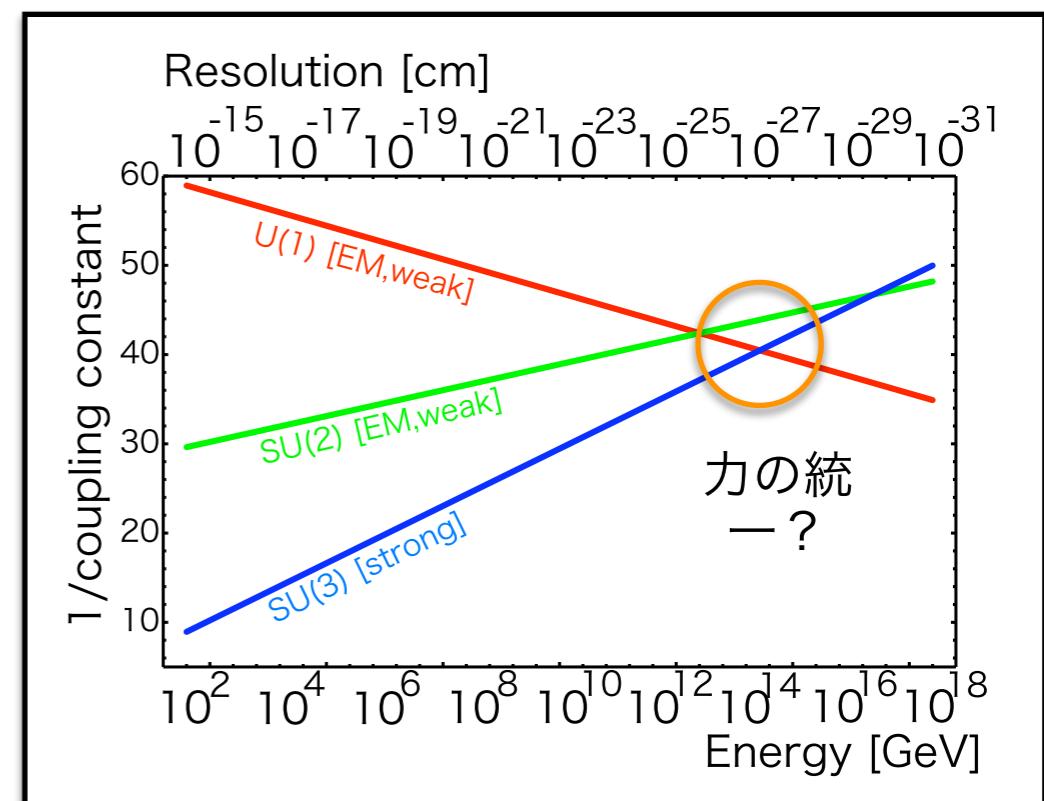
標準模型が完成！

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？
- 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！

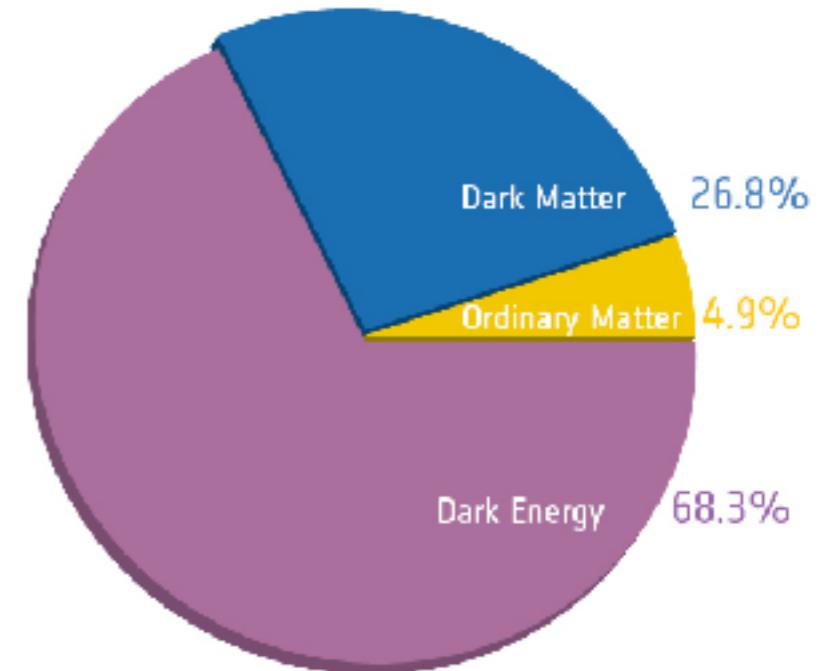
宇宙初期

- 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
 - ・最近の宇宙背景放射の観測からインフレーションの証拠

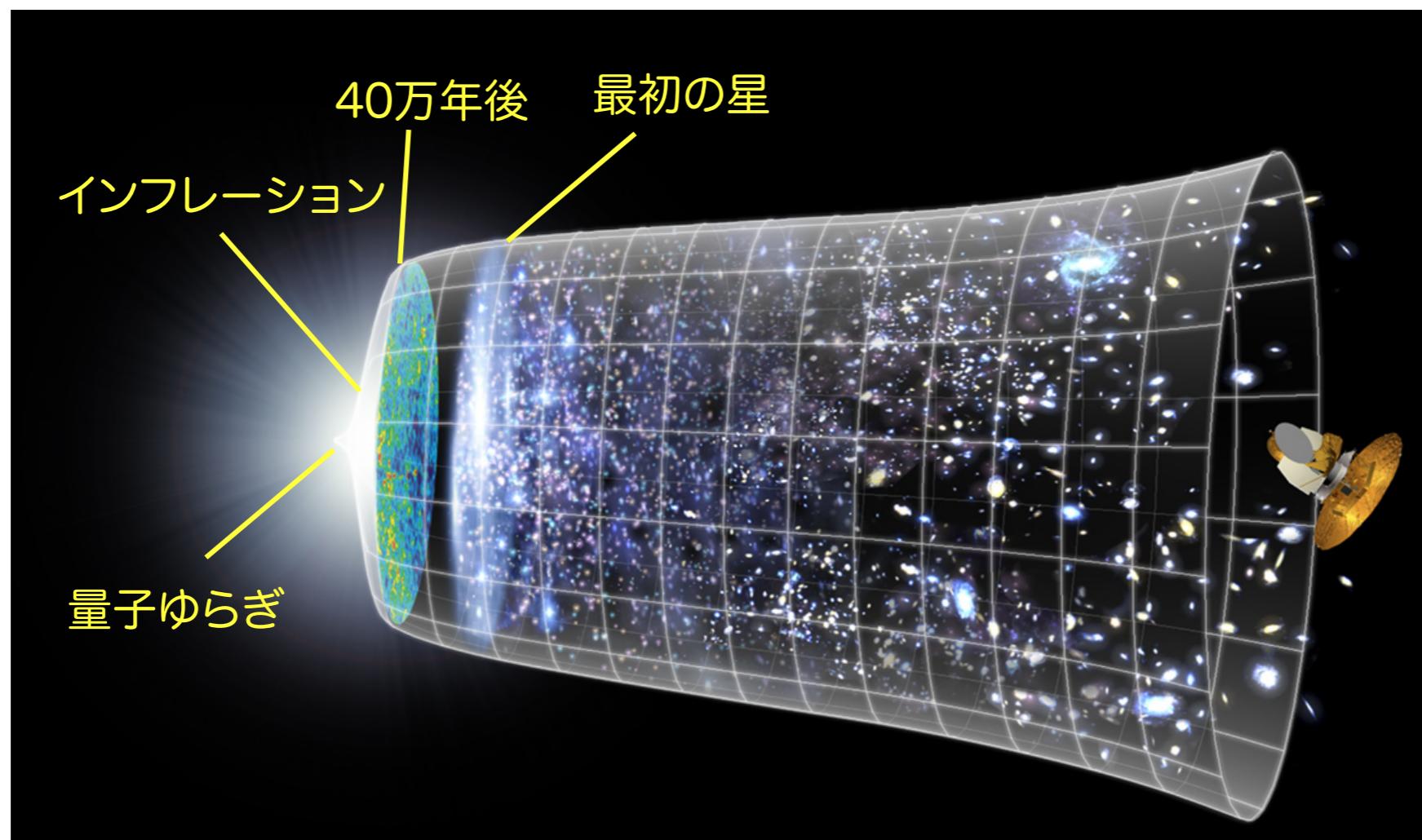
誕生直後 (10^{-36} 秒) の宇宙を理解できる時代になった

宇宙論の問題

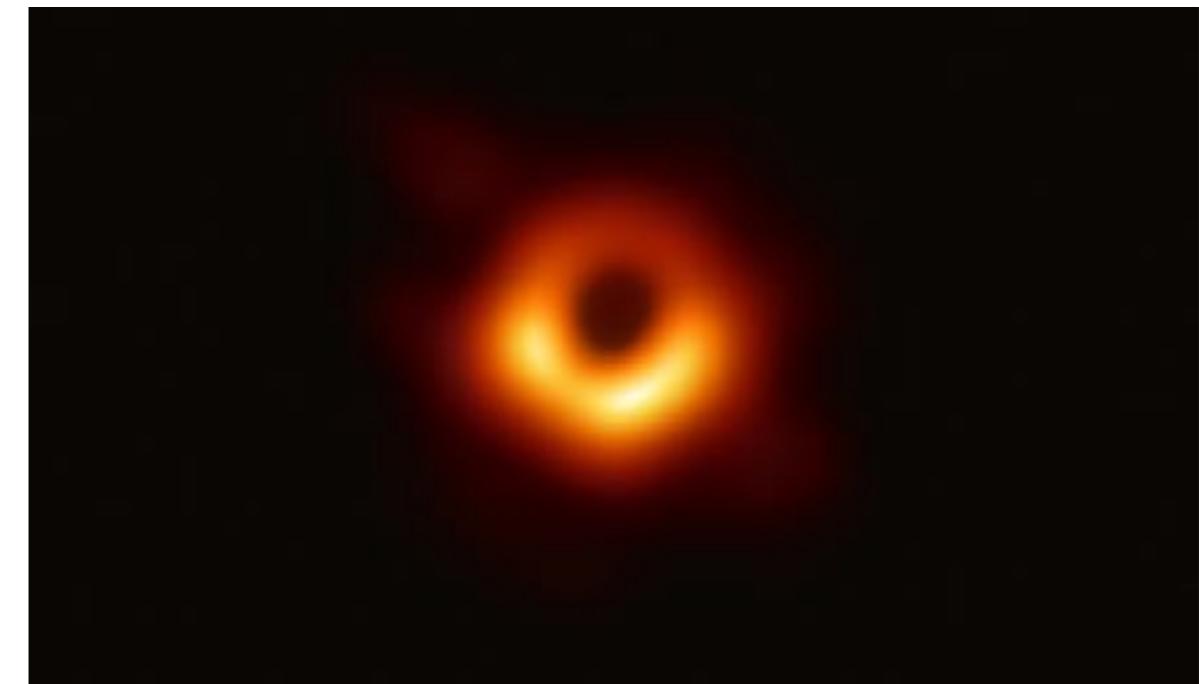
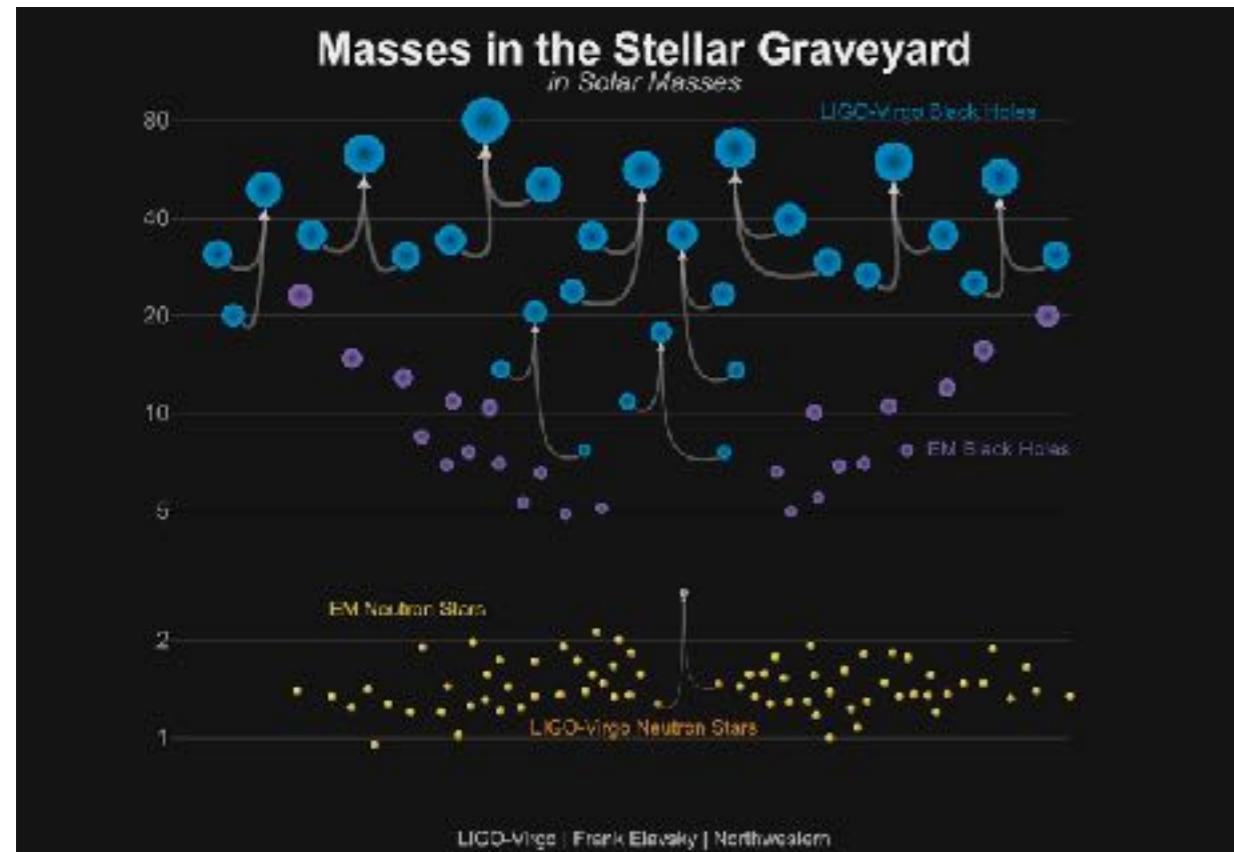
- インフレーションを起こす素粒子モデル
- 宇宙の物質・反物質非対称性
- ダークマター・ダークエネルギー



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...

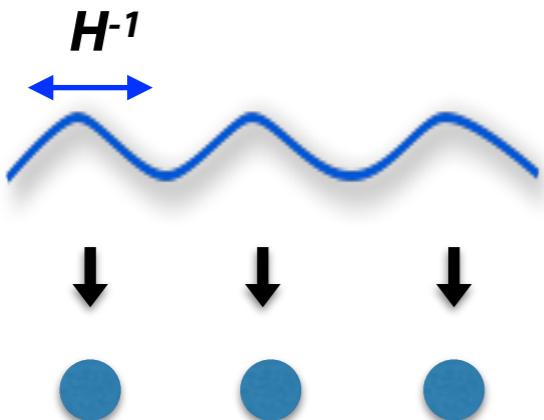
インフレーションなどの初期宇宙に起源?

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

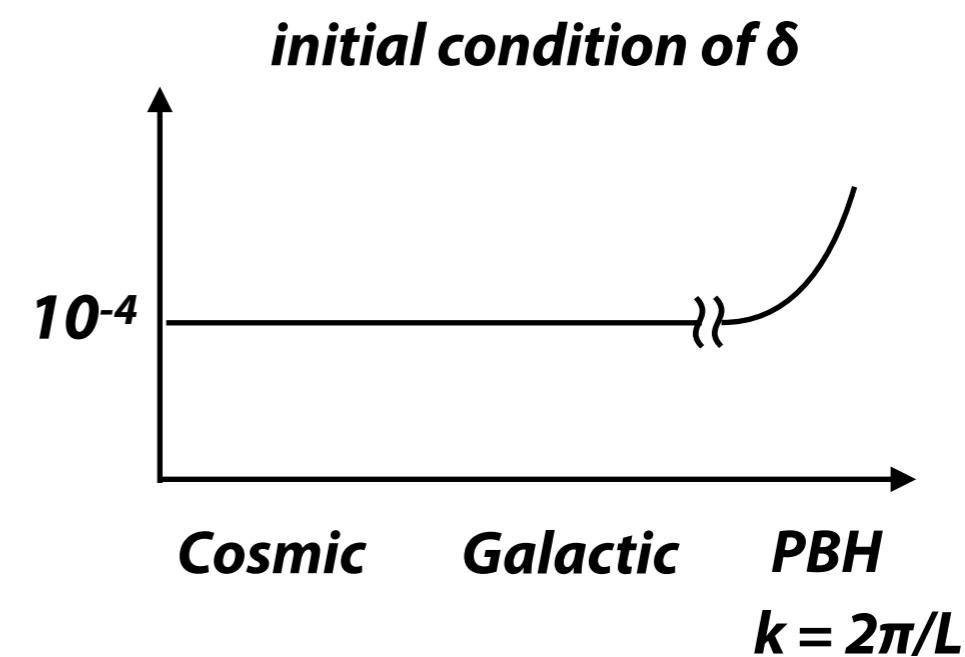
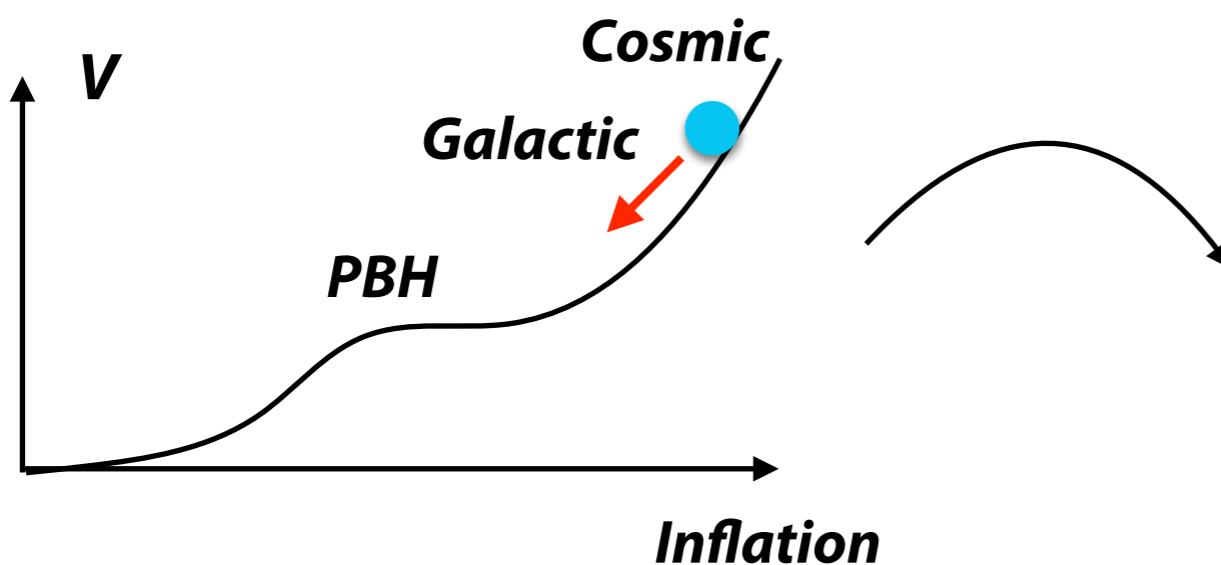


Collapsed objects : Mass $\sim 4\pi/3 \rho H^{-3}$
 $\sim M_{SUN} (T/0.2\text{GeV})^2$

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？？

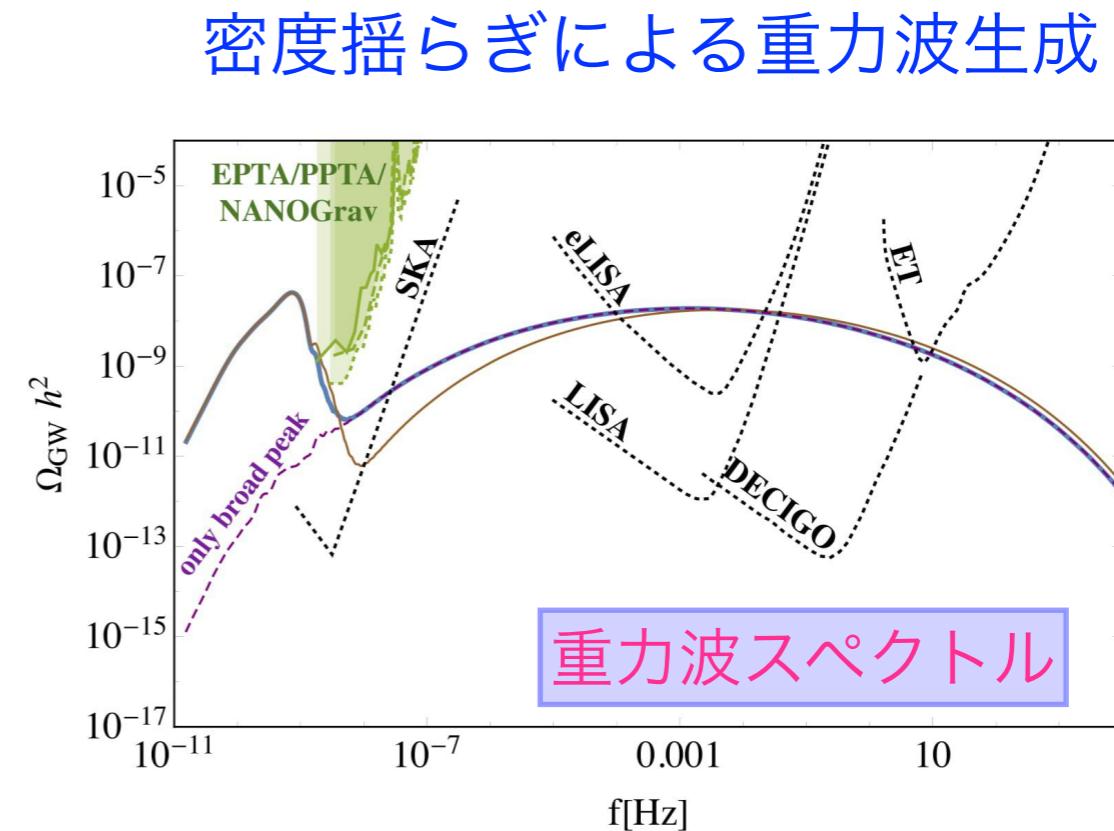
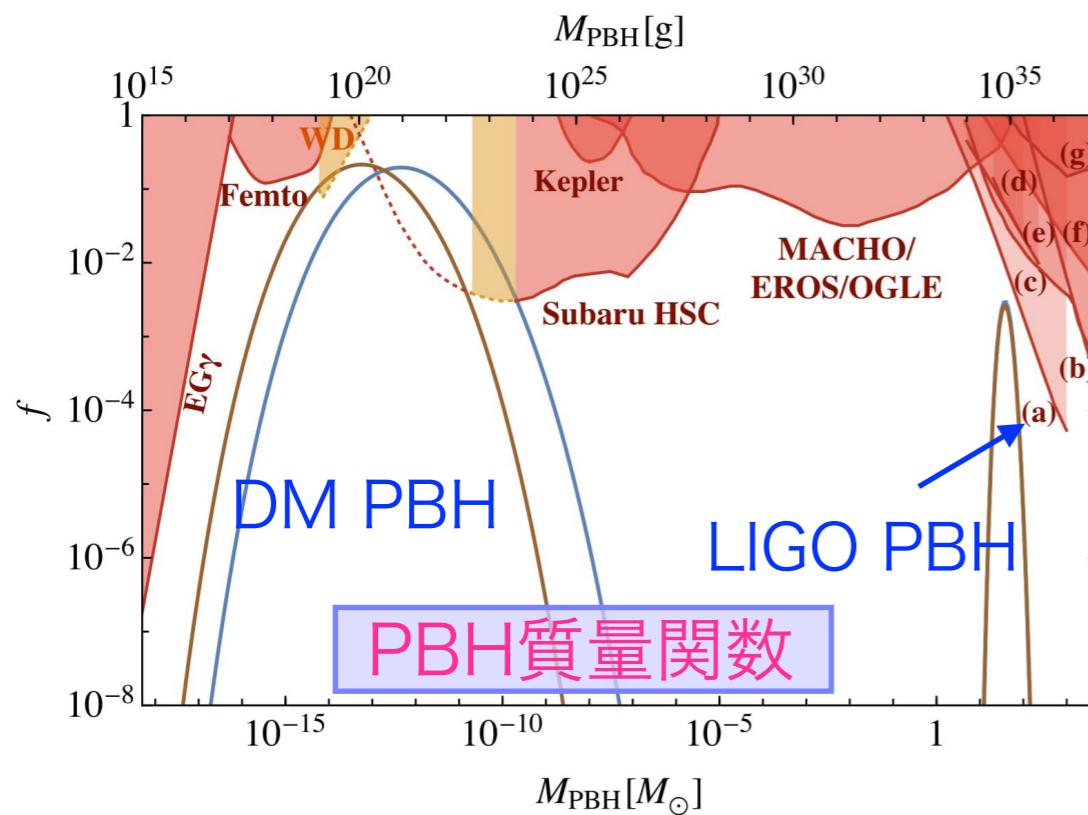
✓ 例えば揺らぎのタネはインフレーションでつくる



✓ 原始ブラックホール暗黒物質

- ✓ 様々な観測から原始ブラックホールの存在量は厳しく制限されている...
- ✓ 初期密度ゆらぎのスペクトルに対しても様々な制限
- ✓ 模型を上手につくると制限と矛盾ないPBH 暗黒物質模型も可能
- ✓ LIGO で見つかった $30 M_{\odot}$ 程度の質量のブラックホールも同時に説明可能!

(川崎研は原始ブラックホールの理論研究でも世界をリードしています)



研究例 2 : Axion 模型と新たなタイプの Cosmic String

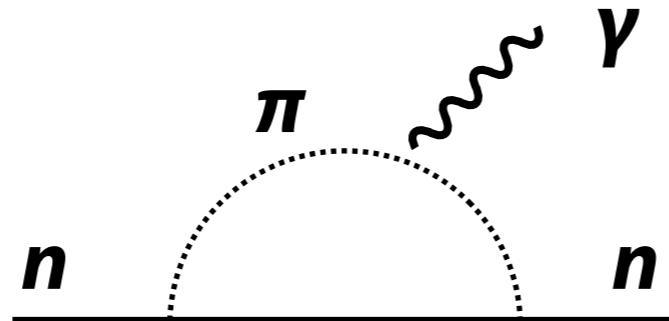
2020 Hiramatsu, Ibe, Suzuki

標準模型における強い CP の破れの問題

- ✓ QCD には CP の破れを起こすパラメータ θ が許される = strong CP

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \ni \frac{g_s^2}{32\pi^2} \theta G^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}$$

- ✓ 強い相互作用の CP の破れは中性子にスピンに比例する電気双極子を誘導



実験的には全く見つかっていない！

$$d_n/e \sim 10^{-15} \theta \text{ cm} \quad [1979 \text{ Crewther, Veccia, Veneziano, Witten}]$$

$$d_n/e < 2.9 \times 10^{-26} \text{ cm} @ 90\% \text{ CL} [\text{hep-ex/0602020}] \rightarrow \theta < 10^{-11}$$

なぜ θ がこんなに小さいのか？ = Strong CP problem

研究例 2 : Axion 模型と新たなタイプの Cosmic String

2020 Hiramatsu, Ibe, Suzuki

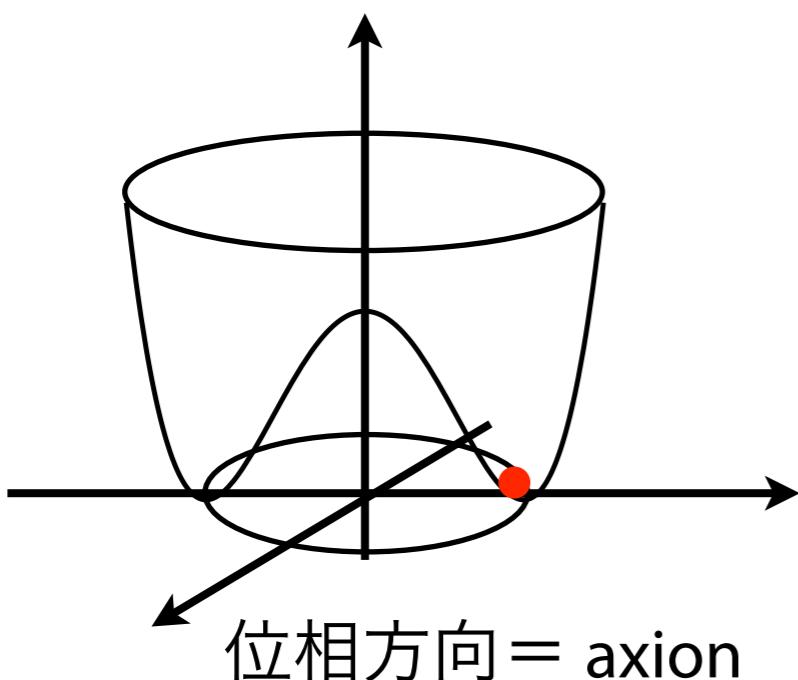
- ✓ QCD に対し量子アノマリーを持つ $U(1)$ 対称性が存在すれば解決できる
[1977 Peccei & Quinn]

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \ni \frac{g_s^2}{32\pi^2} \theta G^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}$$

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \ni \frac{g_s^2}{32\pi^2} \theta G^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}$$

(異なる θ を持つ理論同士が等価になるため $\theta = 0$ とも等価)

- ✓ QCD にはもそのような対称性はない = 自発的に破れている



Axion = Goldstone Boson が存在するはず !

Axion は暗黒物質の候補

研究例 2 : Axion 模型と新たなタイプの Cosmic String

2020 Hiramatsu, Ibe, Suzuki

- ✓ 量子アノマリーを持つ $U(1)_{PQ}$ 対称性は本当に存在するのか?

量子重力まで考えるとゲージ対称性以外は不自然

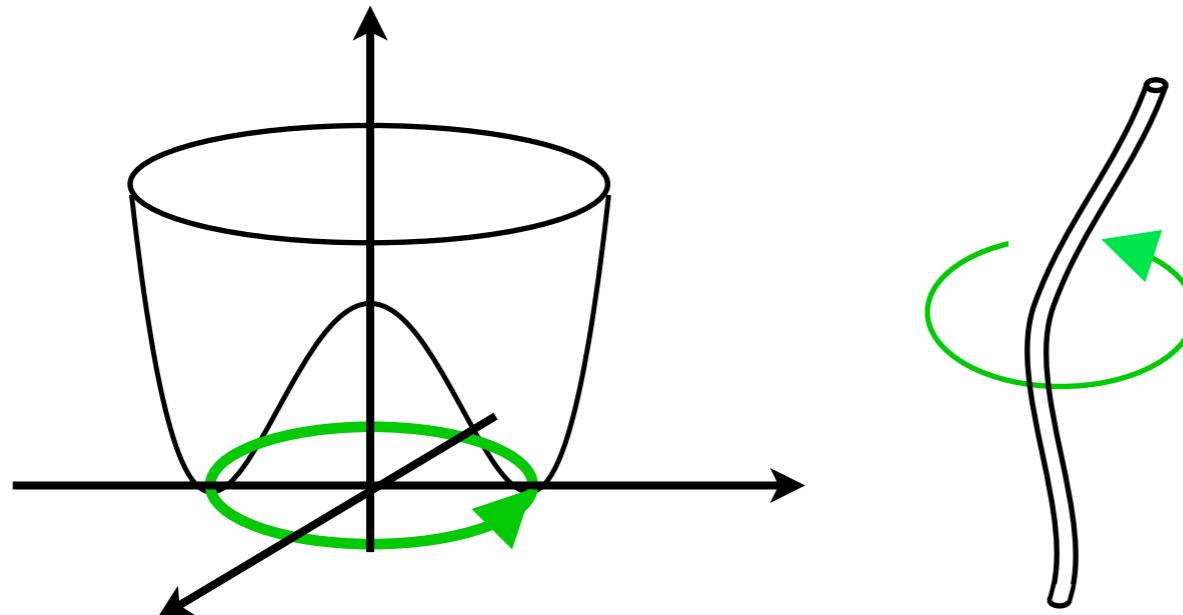
量子アノマリーがあるとゲージ対称性には出来ない

- ✓ ゲージ対称性でプロテクトした $U(1)_{PQ}$ 対称性なら可能

1992 Barr, Seckel see also 2017, Fukuda, Suzuki, Yanagida and MI

(標準模型における偶然対称性=バリオン対称性など同様な仕組み)

- ✓ $U(1)$ 対称性の破れ → Cosmic String が形成



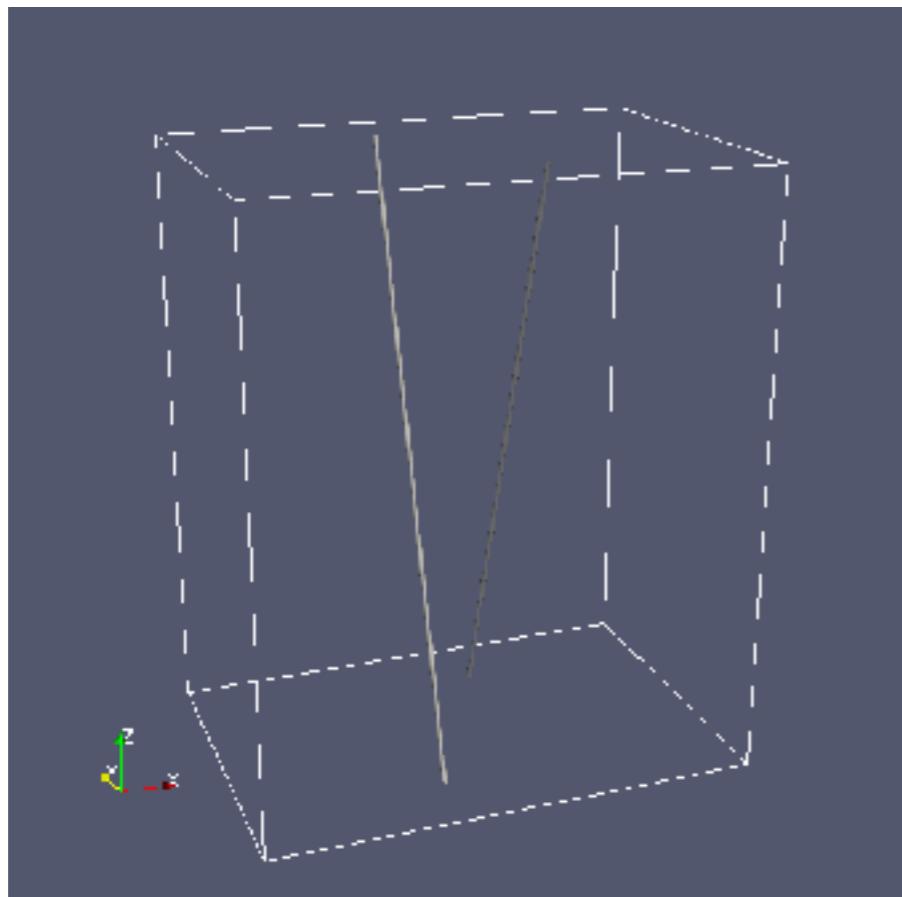
Cosmic String 形成は
宇宙論を議論するのに重要

研究例 2 : Axion 模型と新たなタイプの Cosmic String

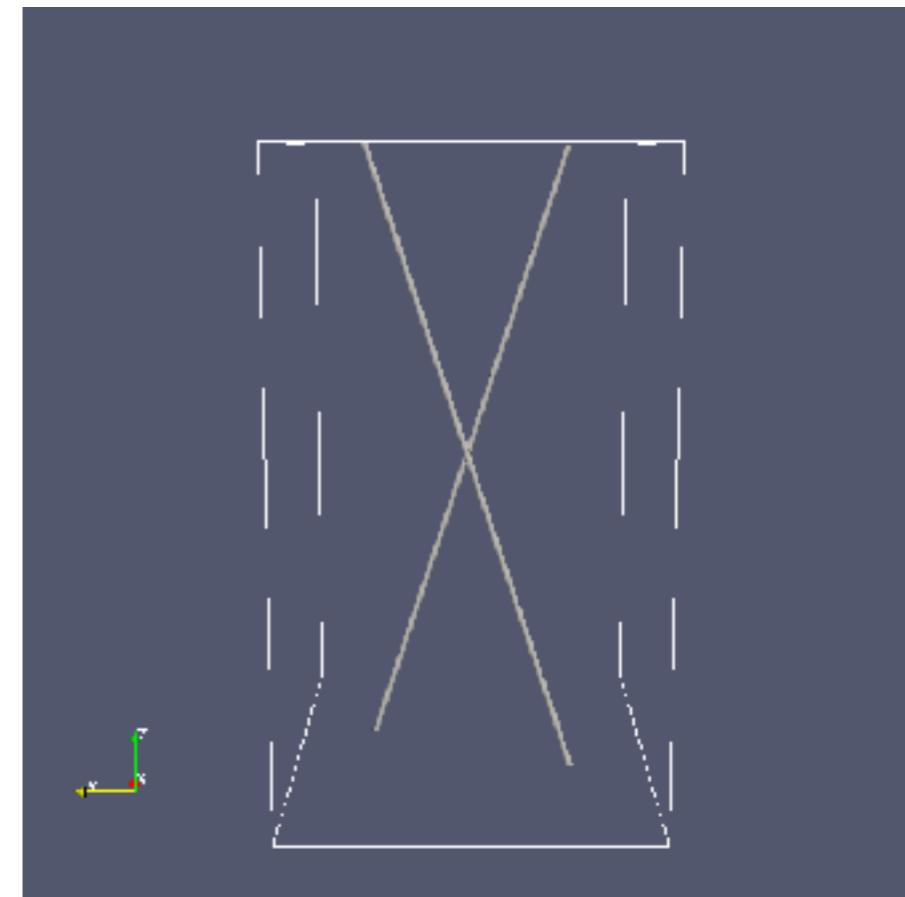
2020 Hiramatsu, Ibe, Suzuki

- ✓ ゲージ $U(1) \times U(1)_{PQ}$ 模型における Cosmic String の Simulation

普通の Cosmic String の衝突 = Reconnection



横から



前から

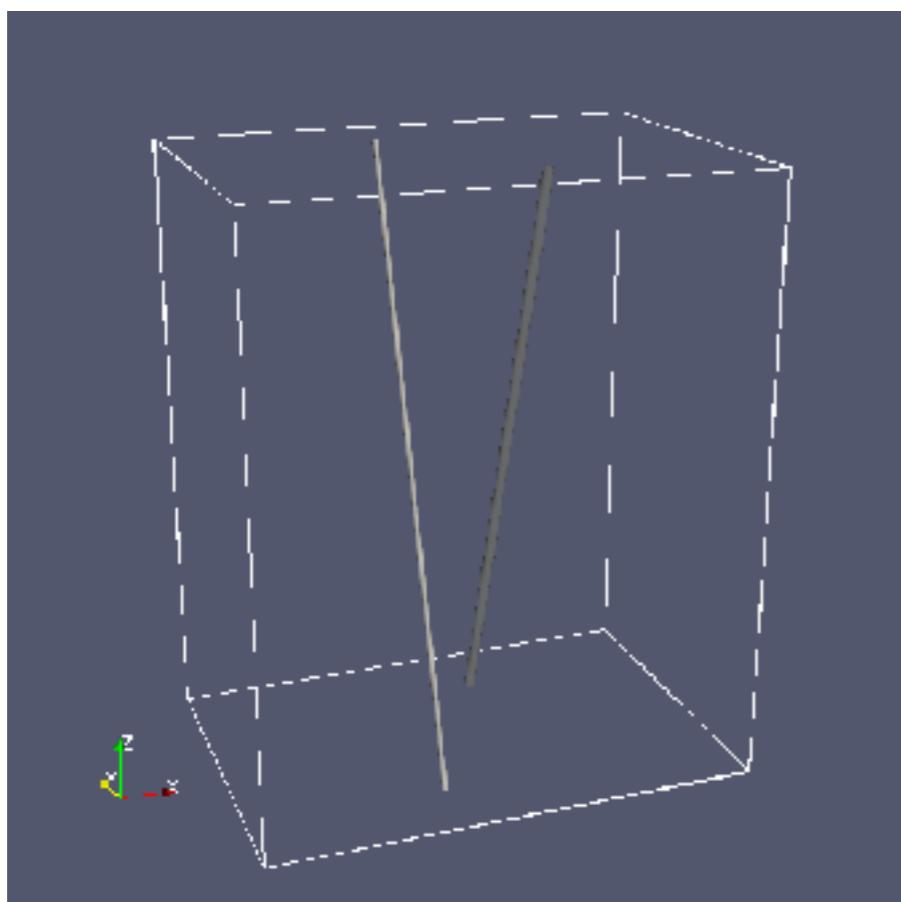
<http://numerus.sakura.ne.jp/research/open/NewString3D/>

研究例 2 : Axion 模型と新たなタイプの Cosmic String

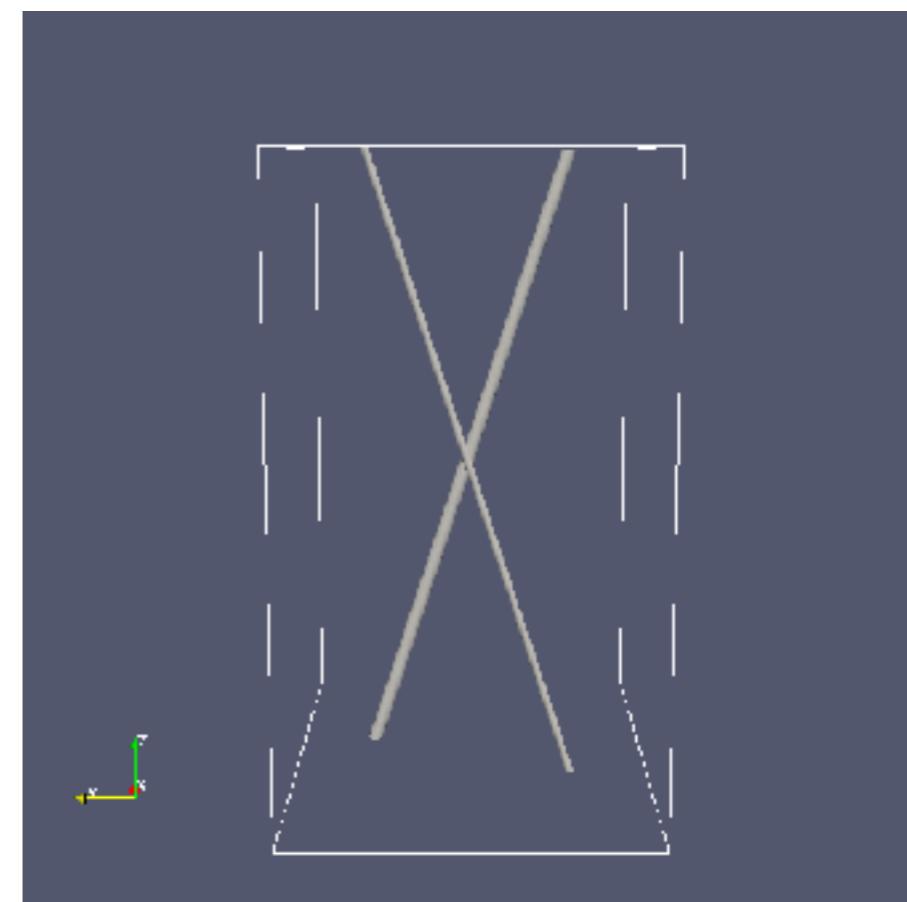
2020 Hiramatsu, Ibe, Suzuki

- ✓ ゲージ $U(1) \times U(1)_{PQ}$ 模型における Cosmic String の Simulation

新しいタイプの Cosmic String の衝突



横から



前から

この模型の Cosmic String network の evolution は非常に複雑

宇宙論的に問題の無い ゲージ $U(1) \times U(1)_{PQ}$ 模型の可能性を明らかにした

<http://numerus.sakura.ne.jp/research/open/NewString3D/>

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

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
23	37	36	34	40	21	25	27	26

1人当たり毎年約2-3編

理論グループの特徴

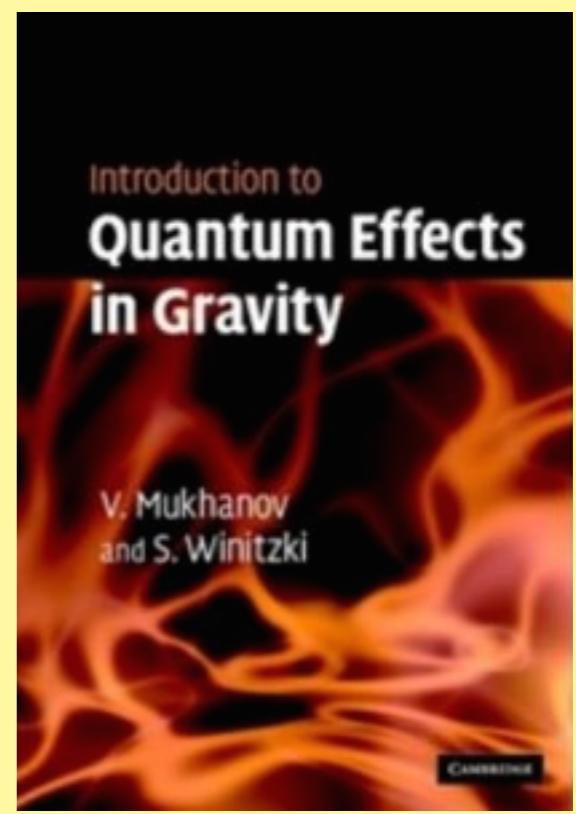
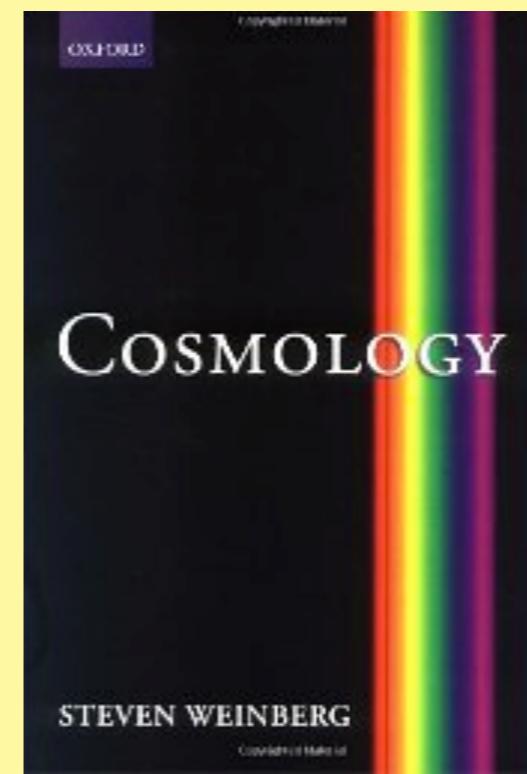
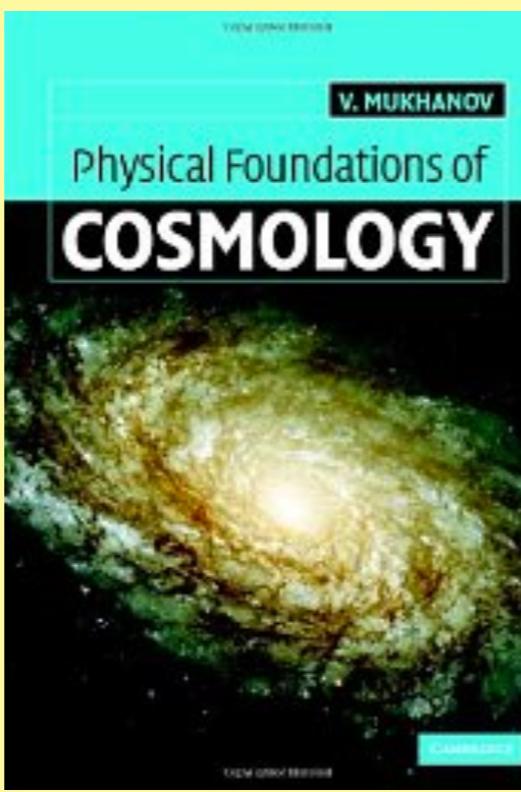
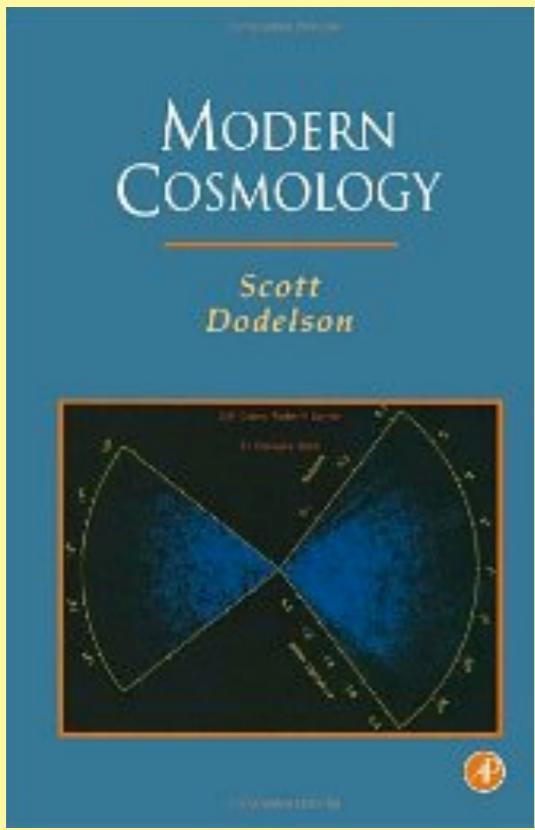
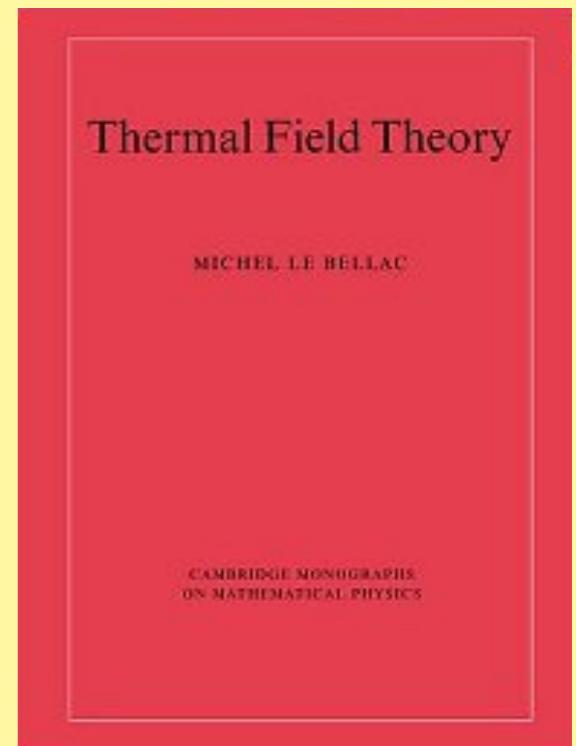
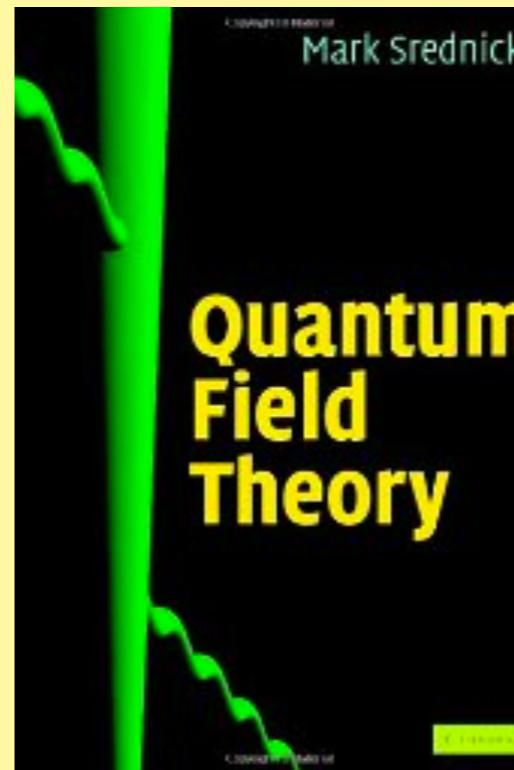
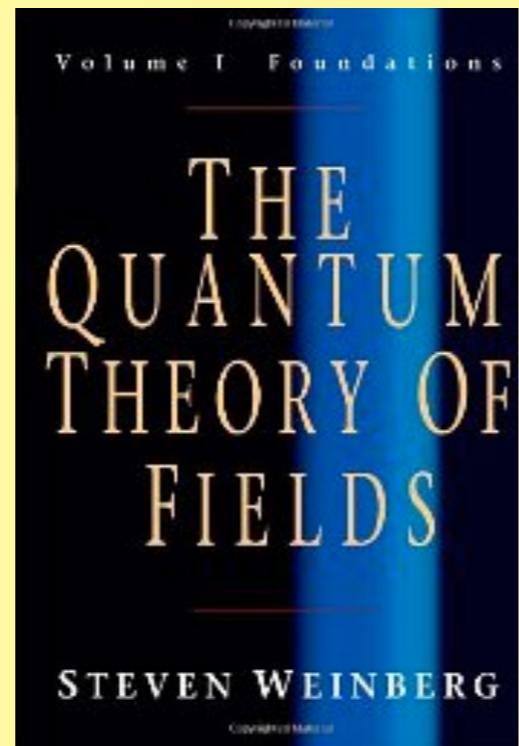
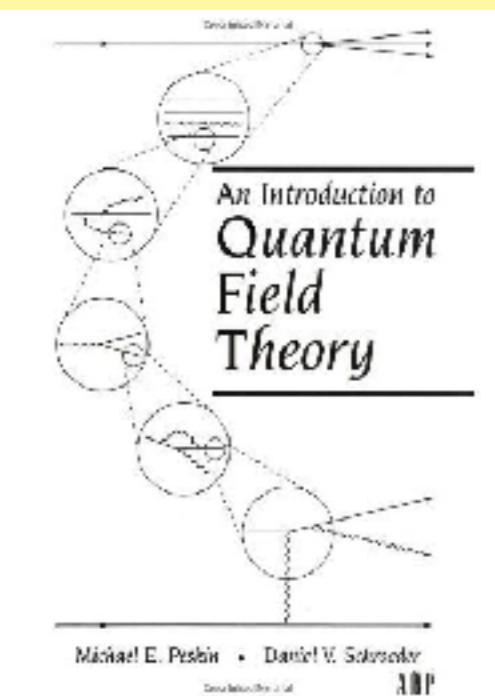
- 素粒子・宇宙の研究室が一体的に運営
 - ・セミナーは共通、学生は同じ部屋
(水曜日: ランチ・ジャーナル、金曜日: コロキウム)
 - ・素粒子と宇宙の両方に興味がある学生に最適
- 閑静な柏キャンパス
- 数物連携宇宙研究機構(IPMU)
 - ・IPMUの人々との積極的に共同研究しています。
 - ・IPMU の学生との共同のゼミ等があります。

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
 - 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

● ゼミに使う教科書の例



最近の修士課程の学生の研究例

Formation of supermassive
primordial black holes by
Affleck-Dine mechanism

Masahiro Kawasaki^{a,b} Kai Murai^{a,b}

Big Bang Nucleosynthesis constraints on sterile
neutrino and lepton asymmetry of the Universe

Graciela B. Gelmini,^a Masahiro Kawasaki,^{b,c} Alexander Kusenko,^{a,c} Kai Murai,^{b,c}
Volodymyr Takhistov^a

Cosmological Constraint on Dark Photon from N_{eff}

Masahiro Ibe^{a,b}, Shin Kobayashi^a, Yuhei Nakayama^a and Satoshi Shirai^b

卒業後の進路

修士	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1
進学	3	3	1	2	1	2	2	2	2	3	1
就職	0	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0

博士	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1
研究職	2	1	0	1	2	0	1	1	1	1	2
就職	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0

- 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。
- 申し訳ありませんが伊部は15時45分までです。。。