

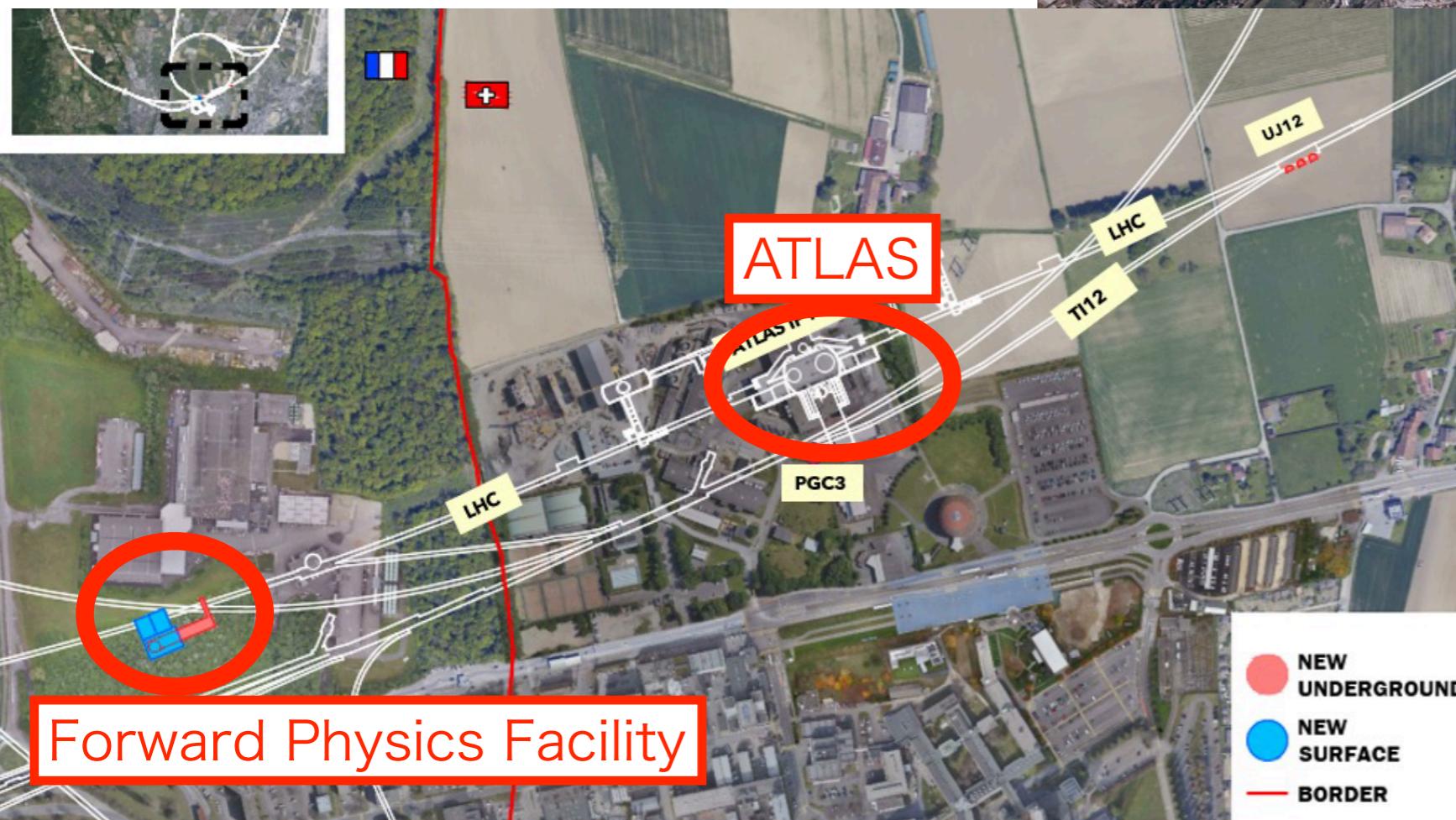
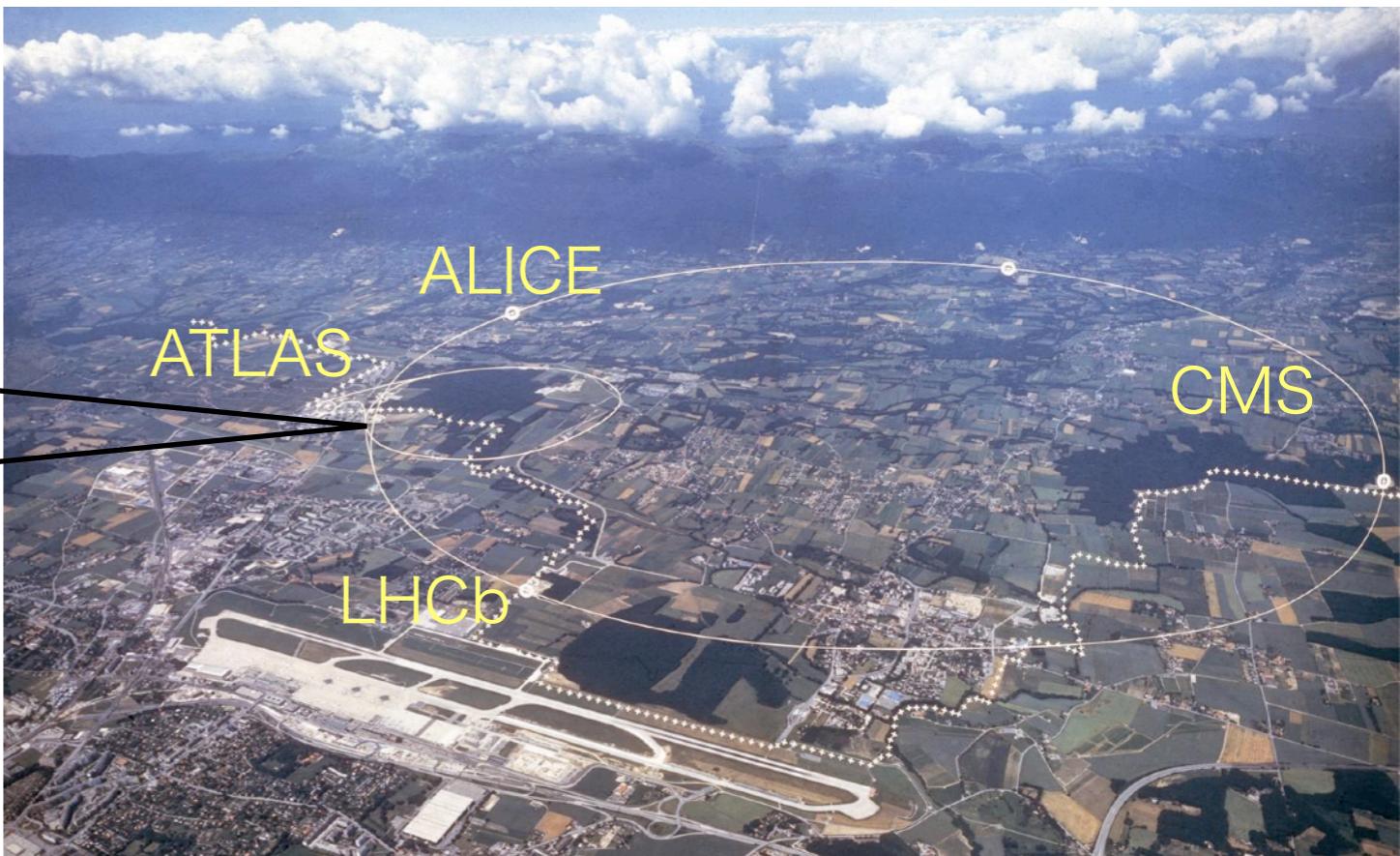
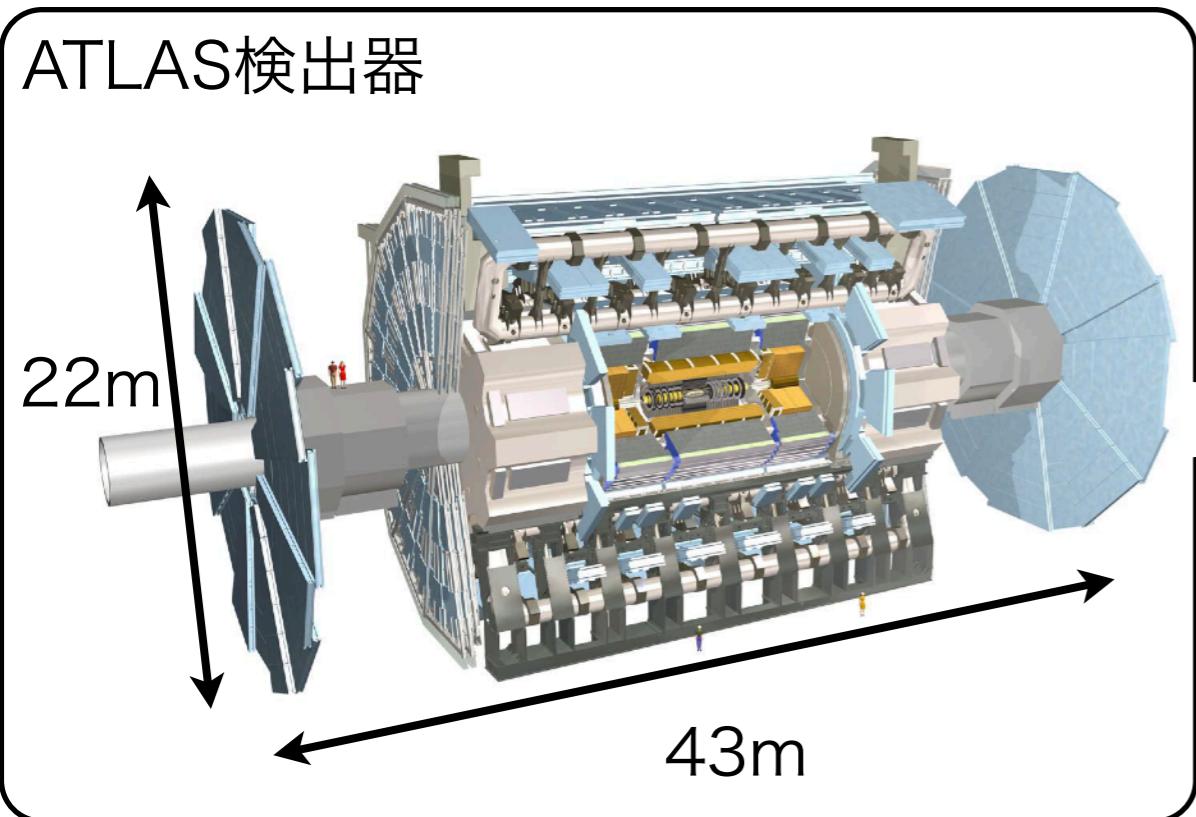
2022/9/24  
未来の学術振興構想  
素粒子原子核分科会シンポジウム

HL-LHC

戸本 誠  
KEK素核研/名古屋大学

# (HL-)LHC/ATLAS実験

ATLAS検出器



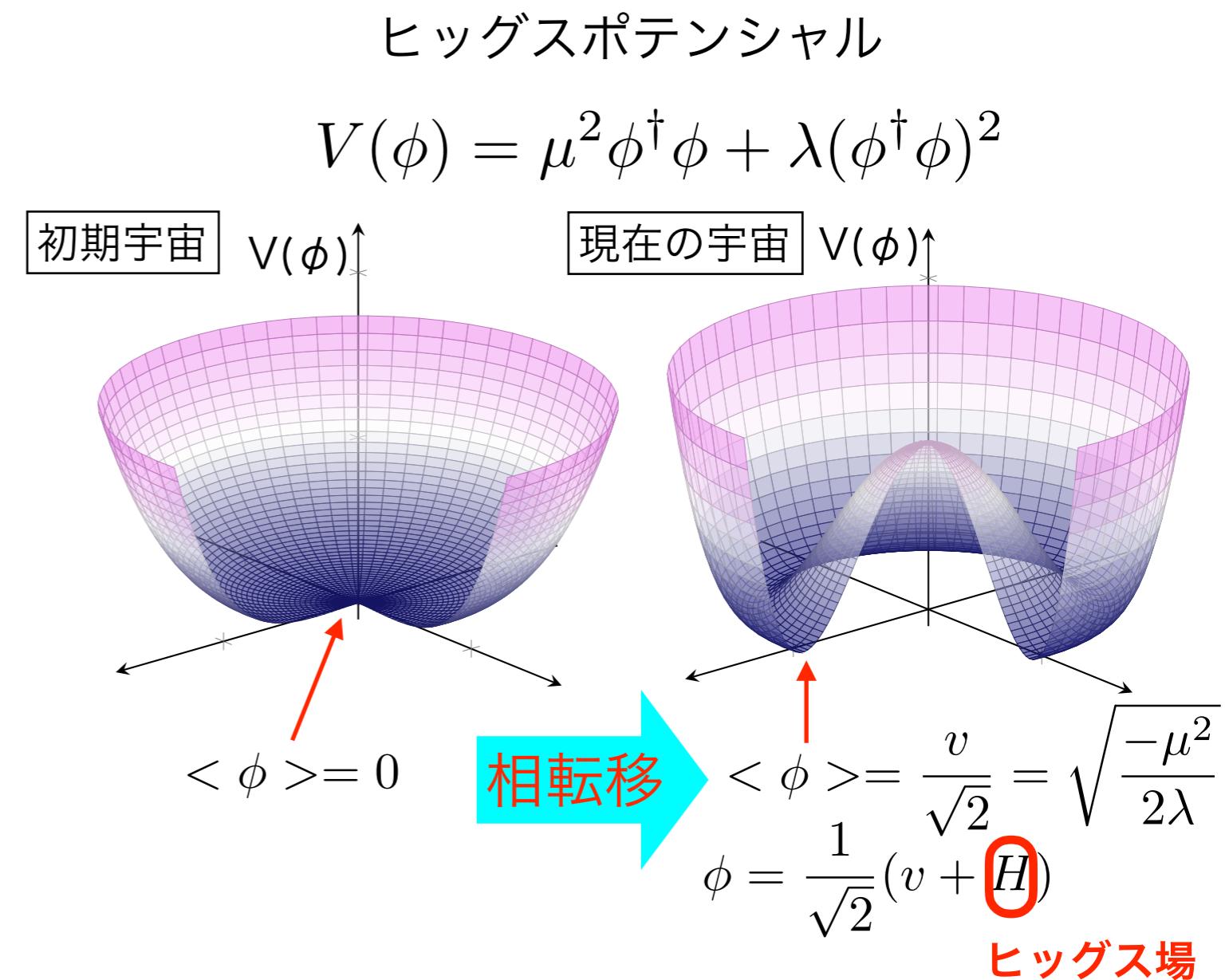
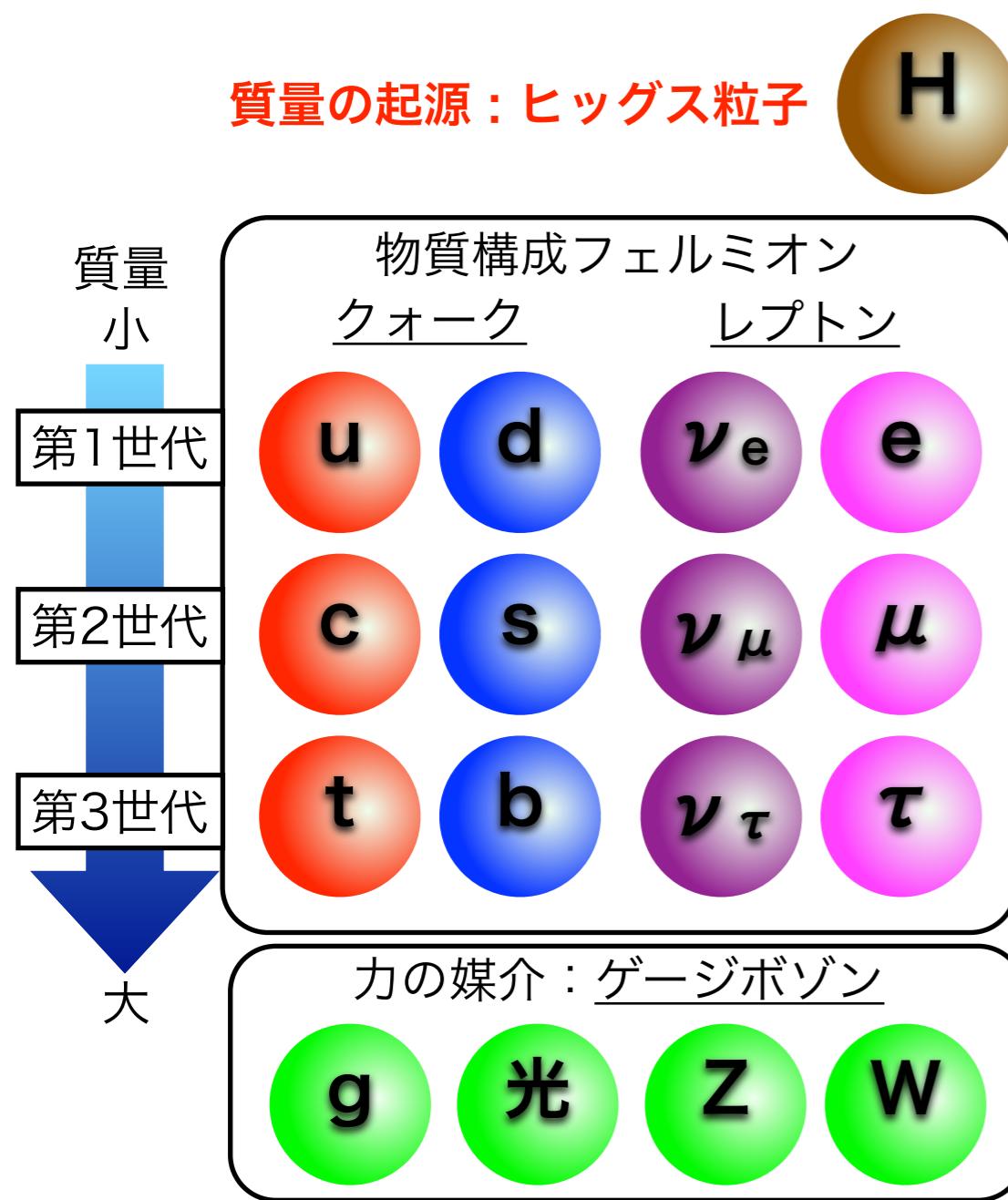
- LHC加速器を用いた実験
    - ATLAS, CMS, ALICE, LHCb等
    - HL-LHC/ATLASは2019年から大規模学術フロンティア採択
- 注) Forward Physics FacilityとATLASは全く別の実験  
→ 音野氏の発表

# LHC実験の最大の成果

2012年に125 GeVのヒッグス粒子を発見

→ 素粒子標準模型が非常に良い有効理論であることが明らかに

- 物質構成フェルミオン
- ゲージ対称性に基づいた3種の相互作用
- 質量起源はヒッグス場との相互作用（ヒッグス機構+湯川結合）による

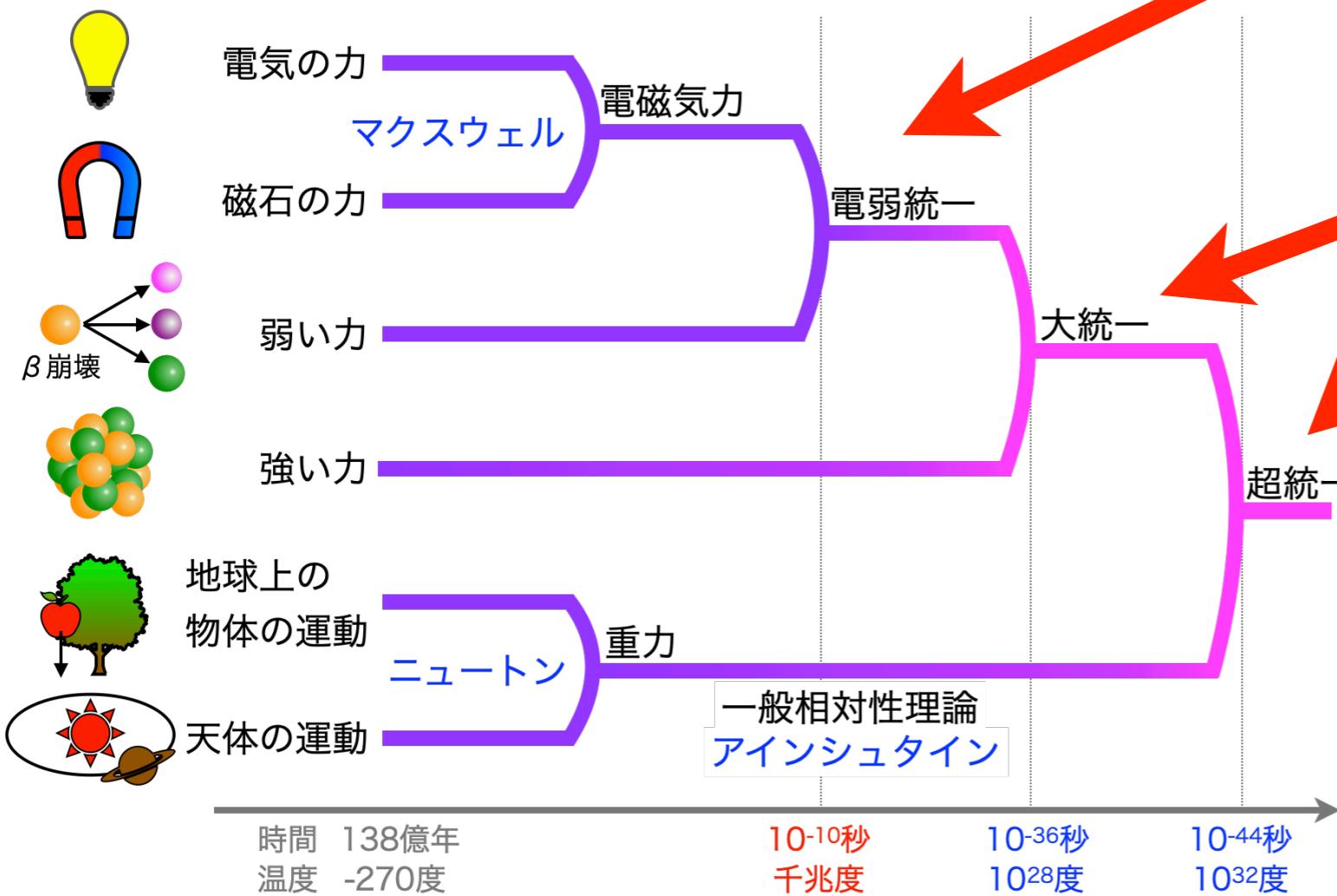


# 未解決問題

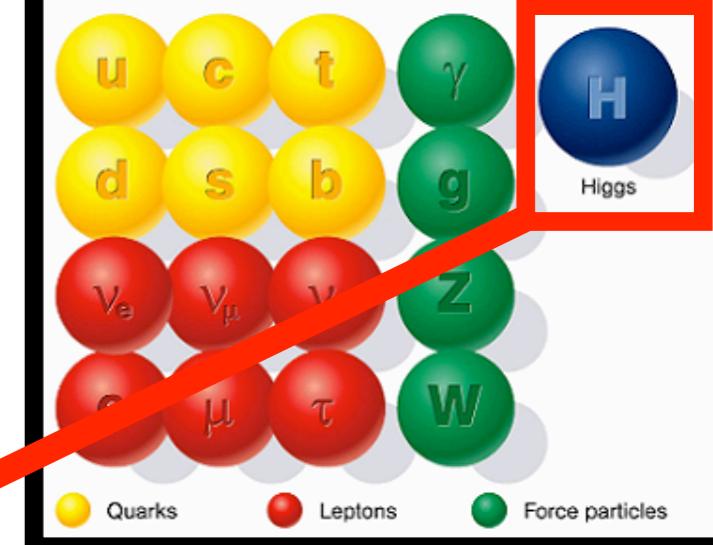
新物理がないと解決できない現象があることも明らかに

- ・ ヒッグスボテンシャルの謎
- ・ 階層性問題、ヒッグス質量の不自然さ (naturalness)
- ・ 世代構造の謎
- ・ 物質反物質の非対称性
- ・ 暗黒物質の謎
- ・ 力の大統一、超統一 etc.

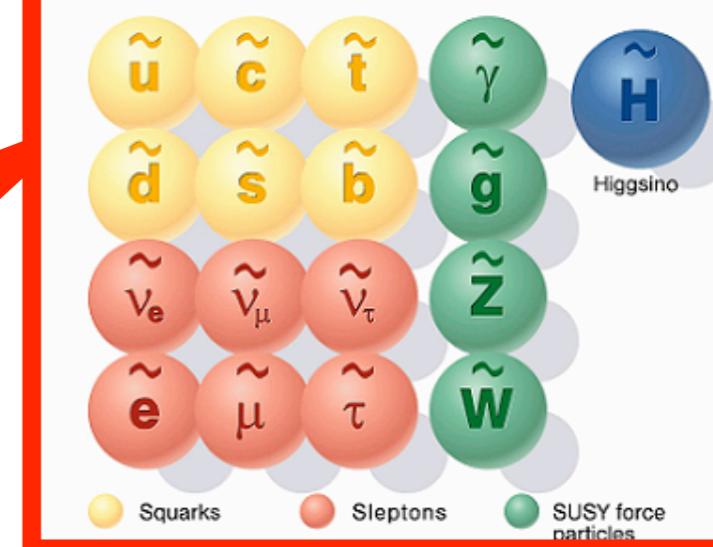
ビジョン



標準模型粒子



超対称性粒子



LHCの使命：新物理探索

- (1) ヒッグス粒子の徹底検証
- (2) TeV領域の新物理直接探索  
超対称性、暗黒物質 etc.

# ヒッグスボテンシャルの謎

- ・ ヒッグスボテンシャルに関して、ほとんどわかっていない
  - 相転移は1次か？2次か？ 強さは？
  - 宇宙にどう広がったか？
  - 別に安定な真空は存在するか？

展開

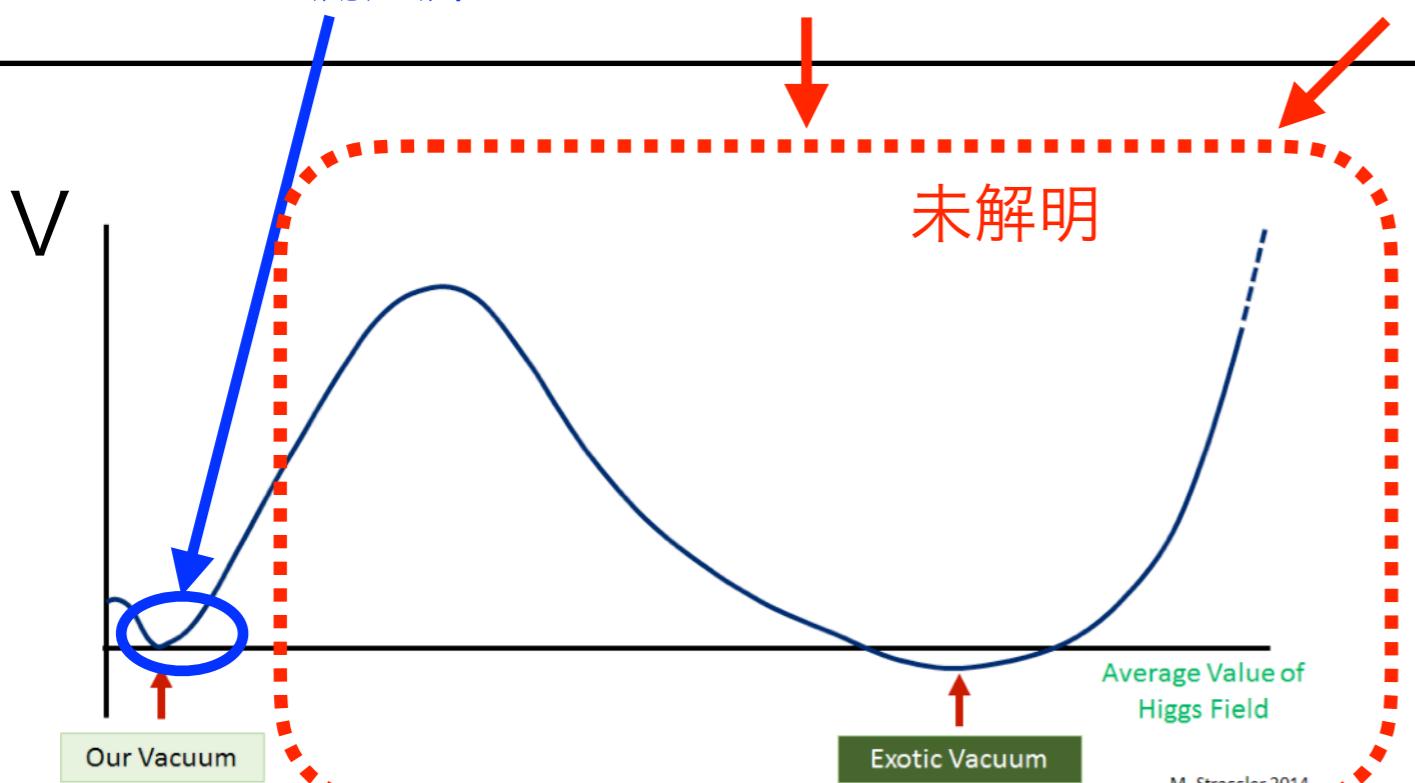
$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}}(v + H)$$

ヒッグス粒子質量=125GeV

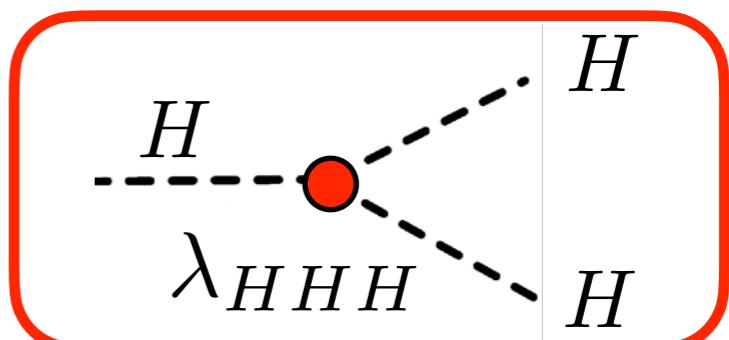
$$V(H) = \frac{1}{2} m_h^2 H^2 + \frac{1}{3!} \lambda_{HHH} v H^3 + \frac{1}{4!} \lambda_{HHHH} H^4 + \dots$$

測定済                  未測定                  未測定



極小点まわりの  
曲率だけ理解

まずは、3点自己結合の測定で明らかに



強い1次相転移の場合：

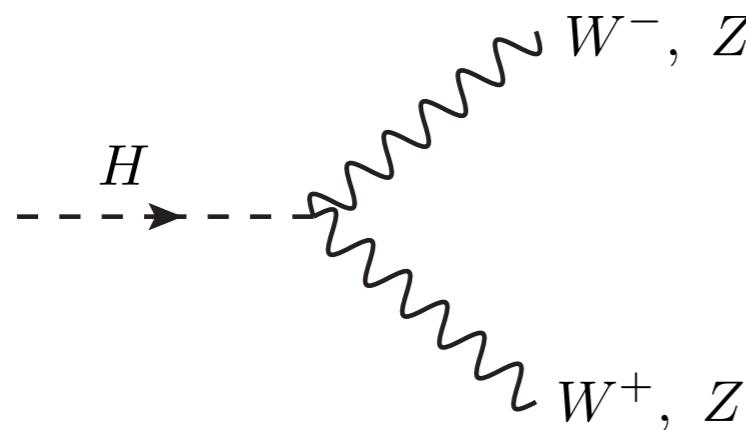
- ・ 電弱バリオジェネシスによる物質反物質の非対称性
- ・ 原子重力波

ビジョン

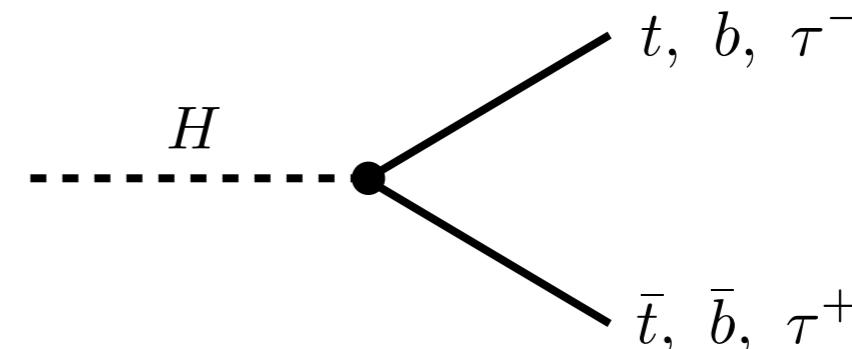
宇宙や物質の進化に現れる相転移ダイナミクスの理解：物性、原子核、宇宙との関連

# 世代構造の謎

- W/Zボゾンの質量起源：ヒッグス機構



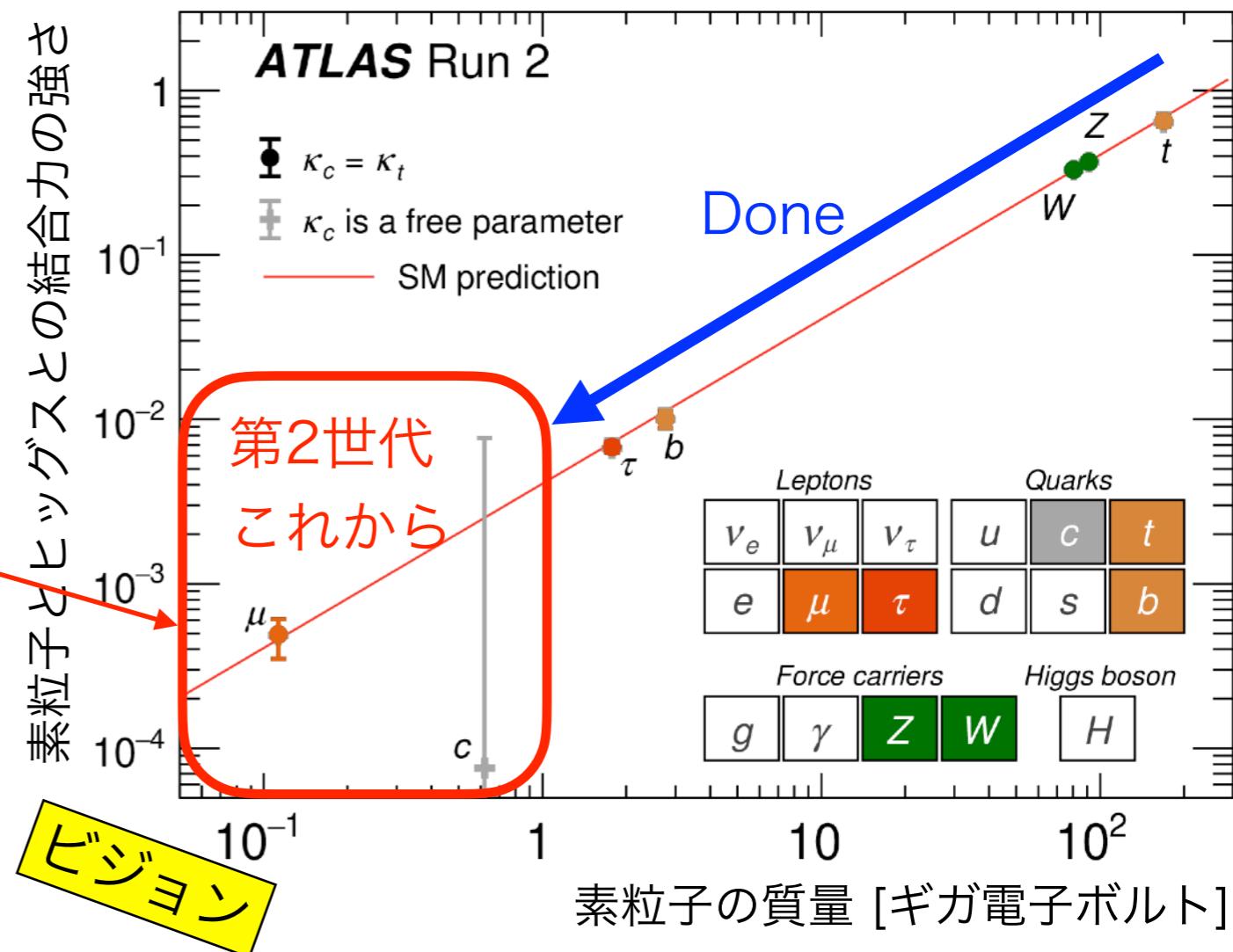
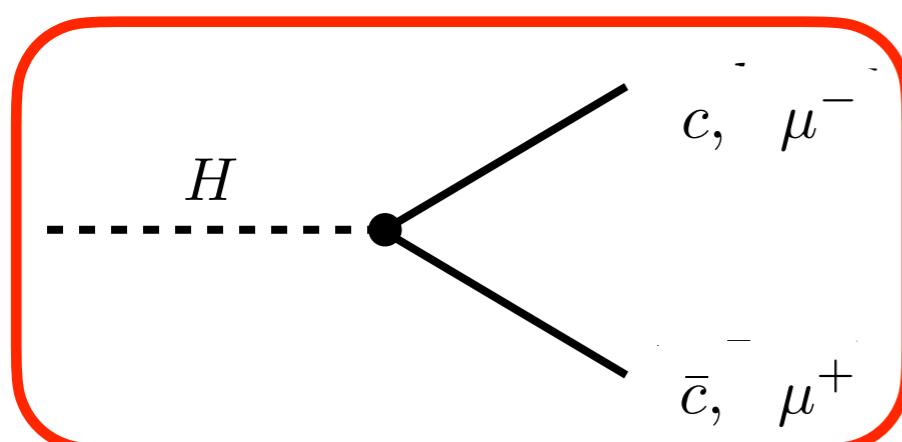
- 第3世代フェルミオンの質量起源：湯川結合



- 第1,2世代フェルミオンの質量起源は？

$H \rightarrow \mu\mu$  の発見は確実

$H \rightarrow cc$ , ストレンジや第1世代にも挑む



- 世代を跨いだ質量起源→世代構造の起源

- 3桁、6桁の質量差を湯川結合の大きさに押しつける不自然さの理解

- ボゾンとフェルミオンの質量起源が同じヒッグス場なのか？

# HL-LHC実験

HL-LHC計画：LHCの陽子衝突を**10倍**にupgrade

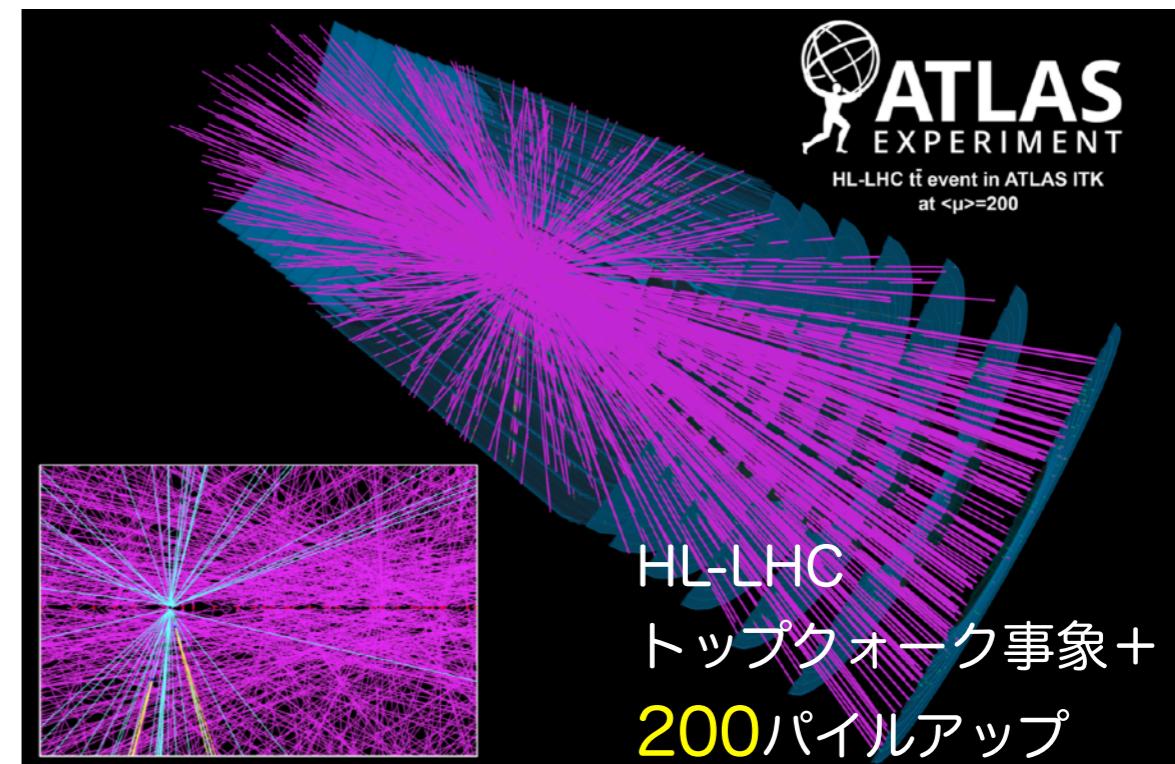
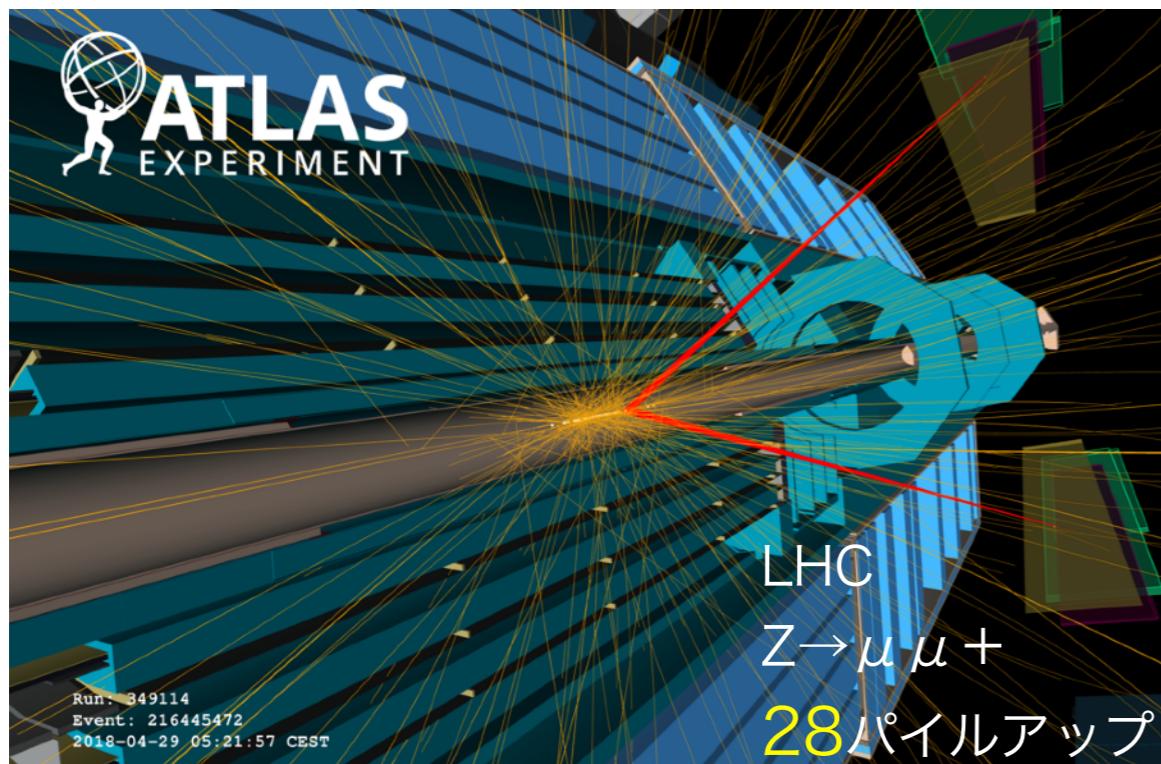
実験	実験期間	重心系エネルギー	積分ルミノシティ
Run 2	2015~2018	13 TeV	150 fb <sup>-1</sup>
Run 3	2022~2025	13.6 TeV	250 fb <sup>-1</sup>
HL-LHC	2029~ (10年間)	14 TeV	3,000 - 4,000 fb <sup>-1</sup>

(1) Bjorken xの大きいパートンによる衝突頻度が向上： $\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2} \times 14 \text{ TeV}$

(2) 反応確率の低い粒子が生成可能 実効的な重心エネルギー：

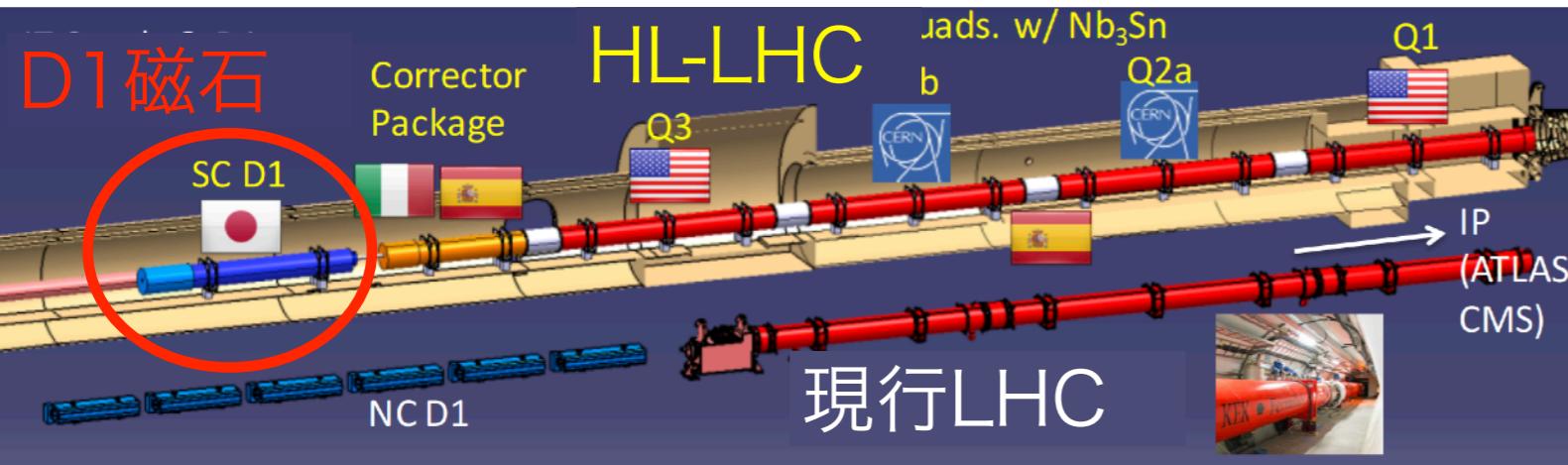
- 重い未知粒子の探索感度が向上
- 弱い相互作用をする未知粒子探索感度が向上
- ヒッグス粒子反応の徹底精査が可能

- 陽子ビーム衝突点周りの加速器磁石の高磁場化、大口径化
- 1桁上の細分化、高速化、放射線耐性強化を実現した検出器開発



# 日本の活躍

加速器アップグレード：ビーム分離用超伝導双極磁石（D1磁石）



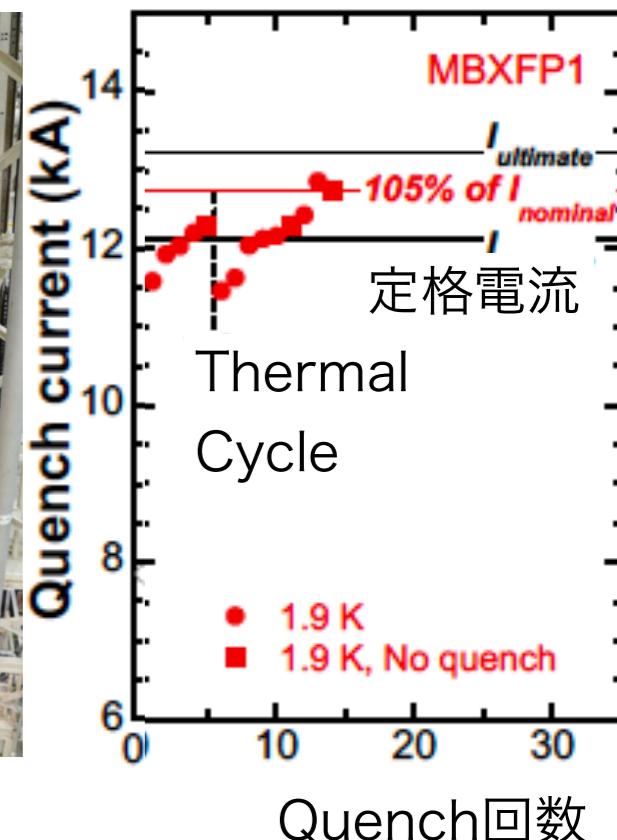
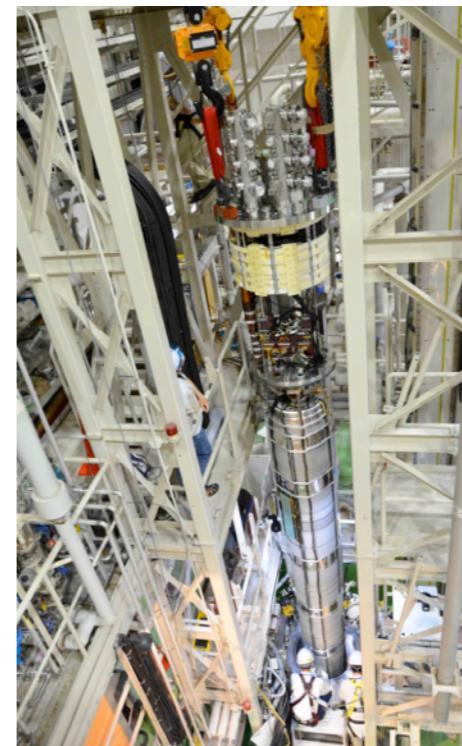
完成した実証機



実機磁石のコイル製造



実証機の冷却励磁試験

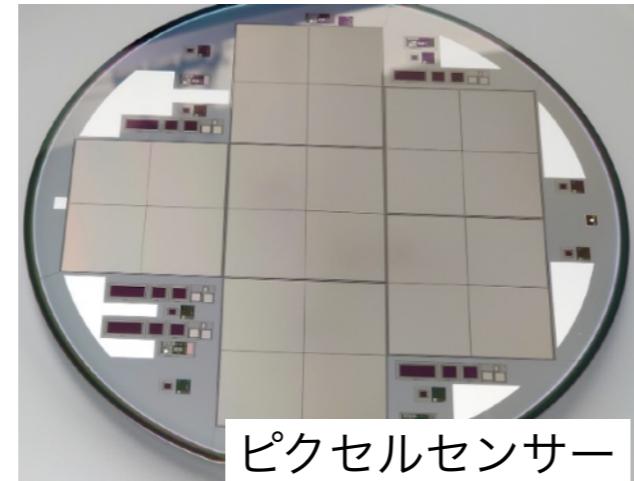


## 内部飛跡検出器

- strip sensor (約7,000枚)
- pixel sensor+module (約2,200枚)



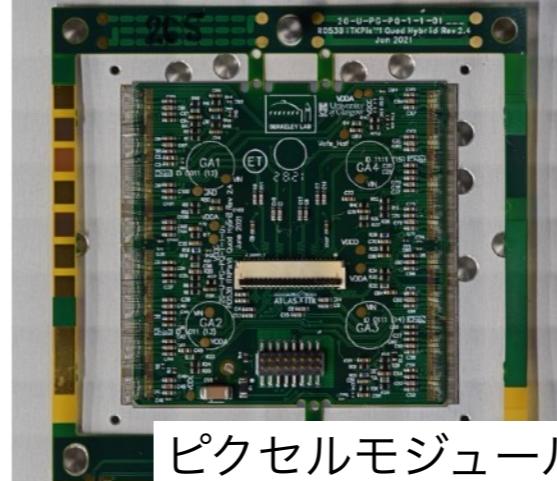
ストリップセンサー



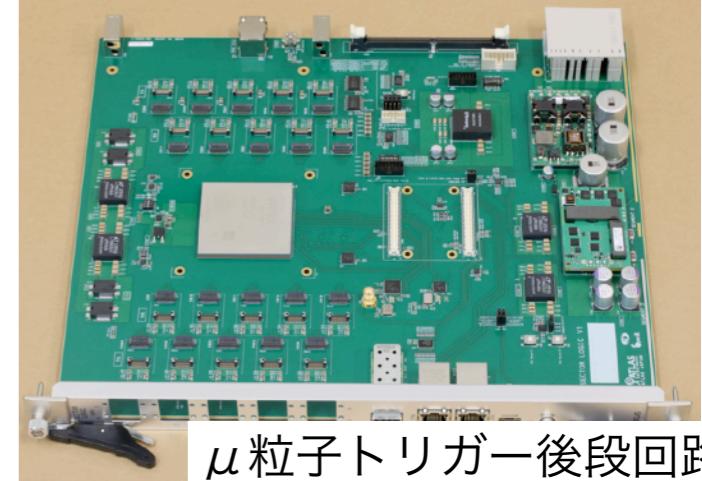
ピクセルセンサー

## エンドキャップ ミューオントリガー

- 2種類の前段回路 (約1500枚、150枚)
- 後段プロセッサ回路 (約50枚)



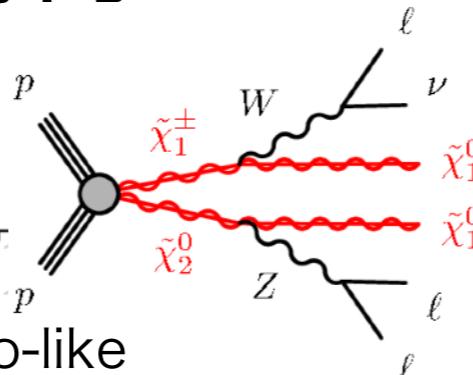
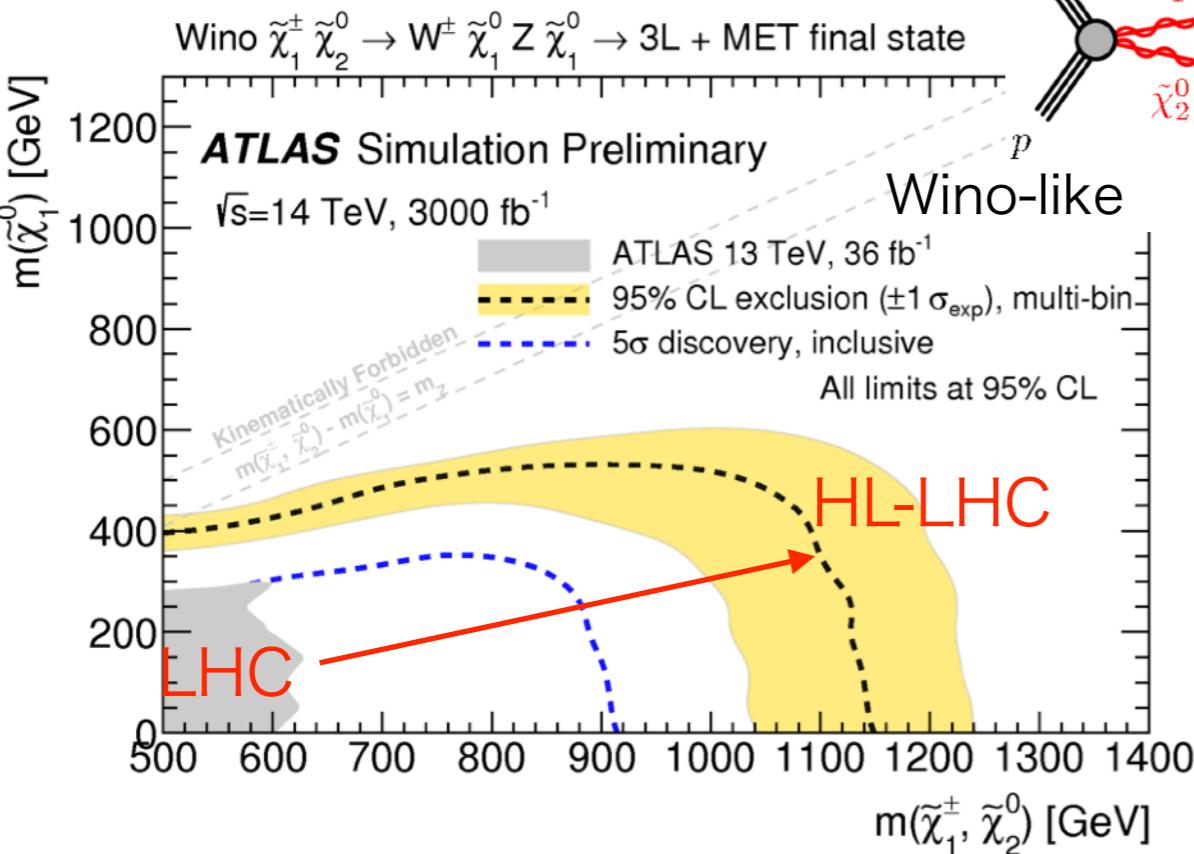
ピクセルモジュール



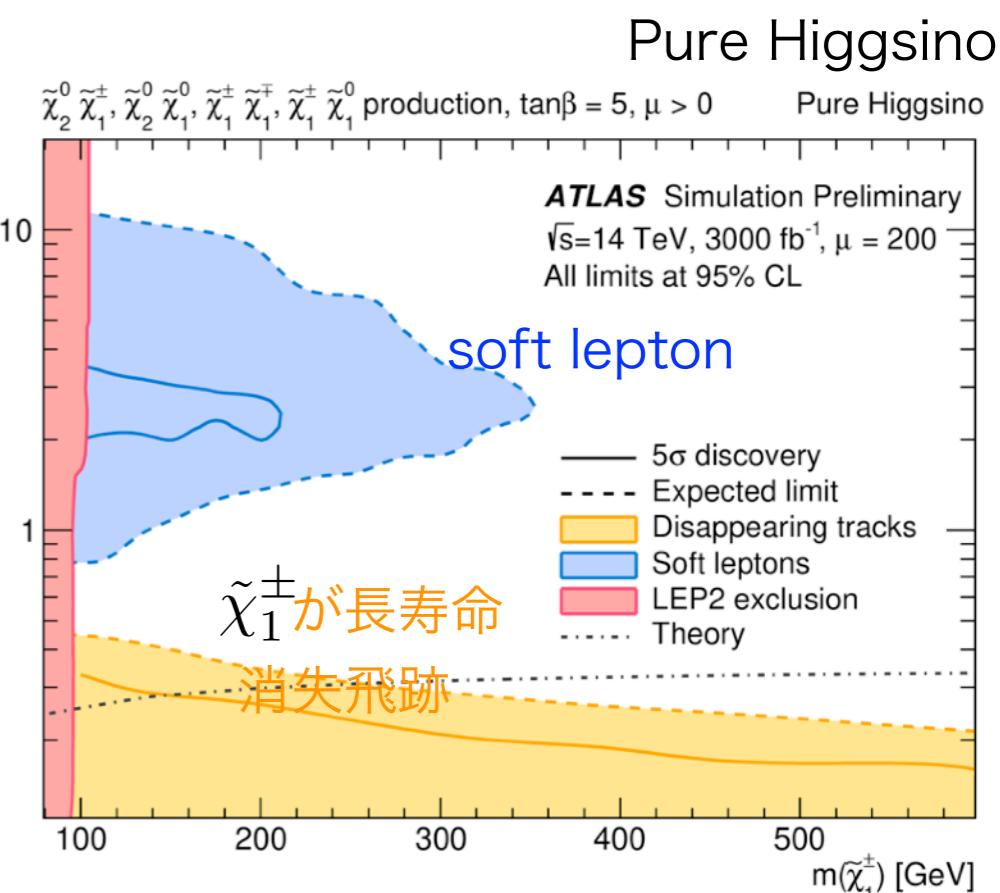
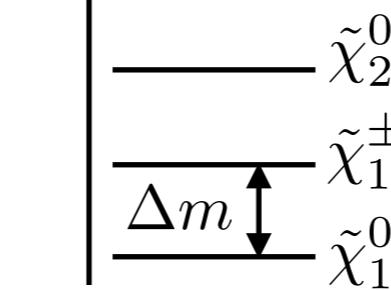
$\mu$ 粒子トリガー後段回路

# 期待できる成果

## 超対称性粒子探索



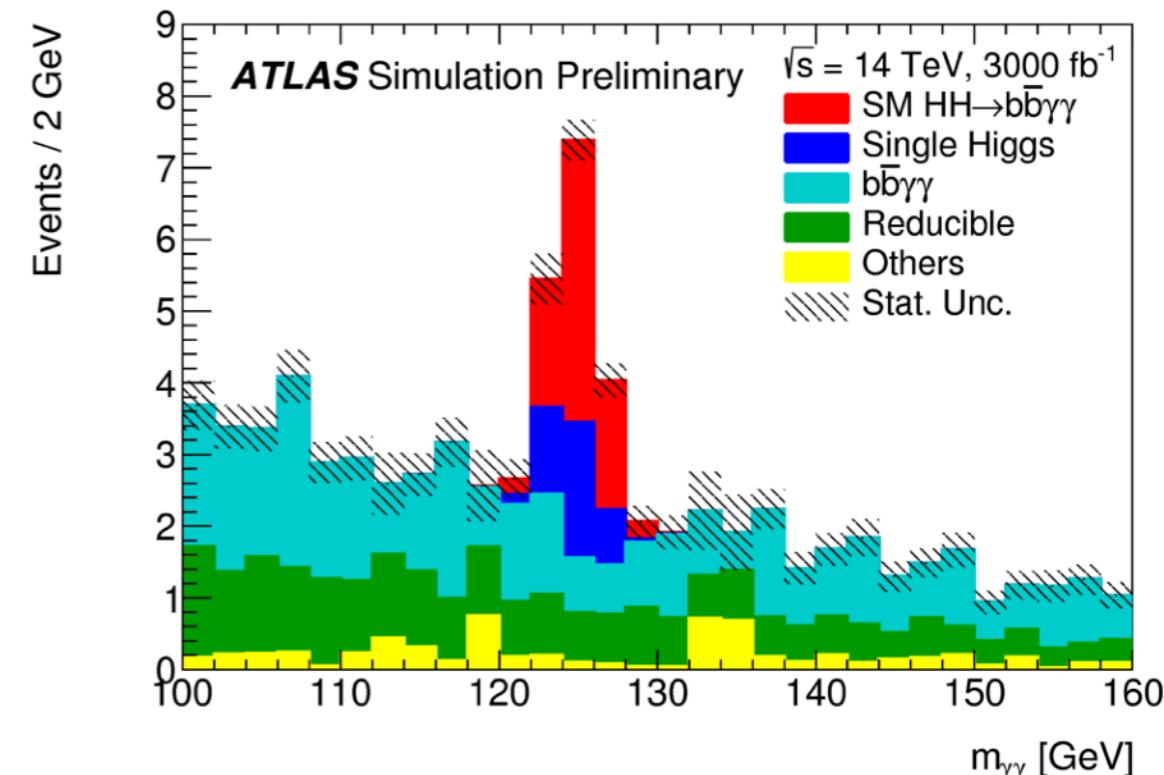
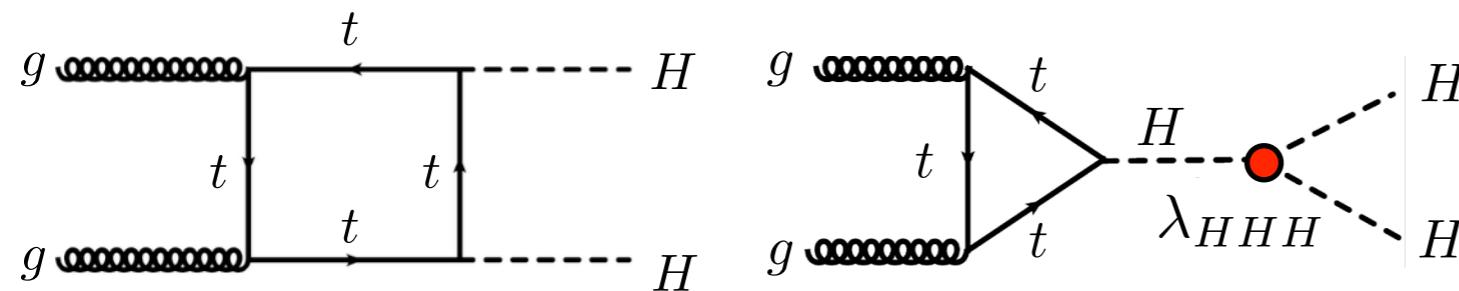
質量 大



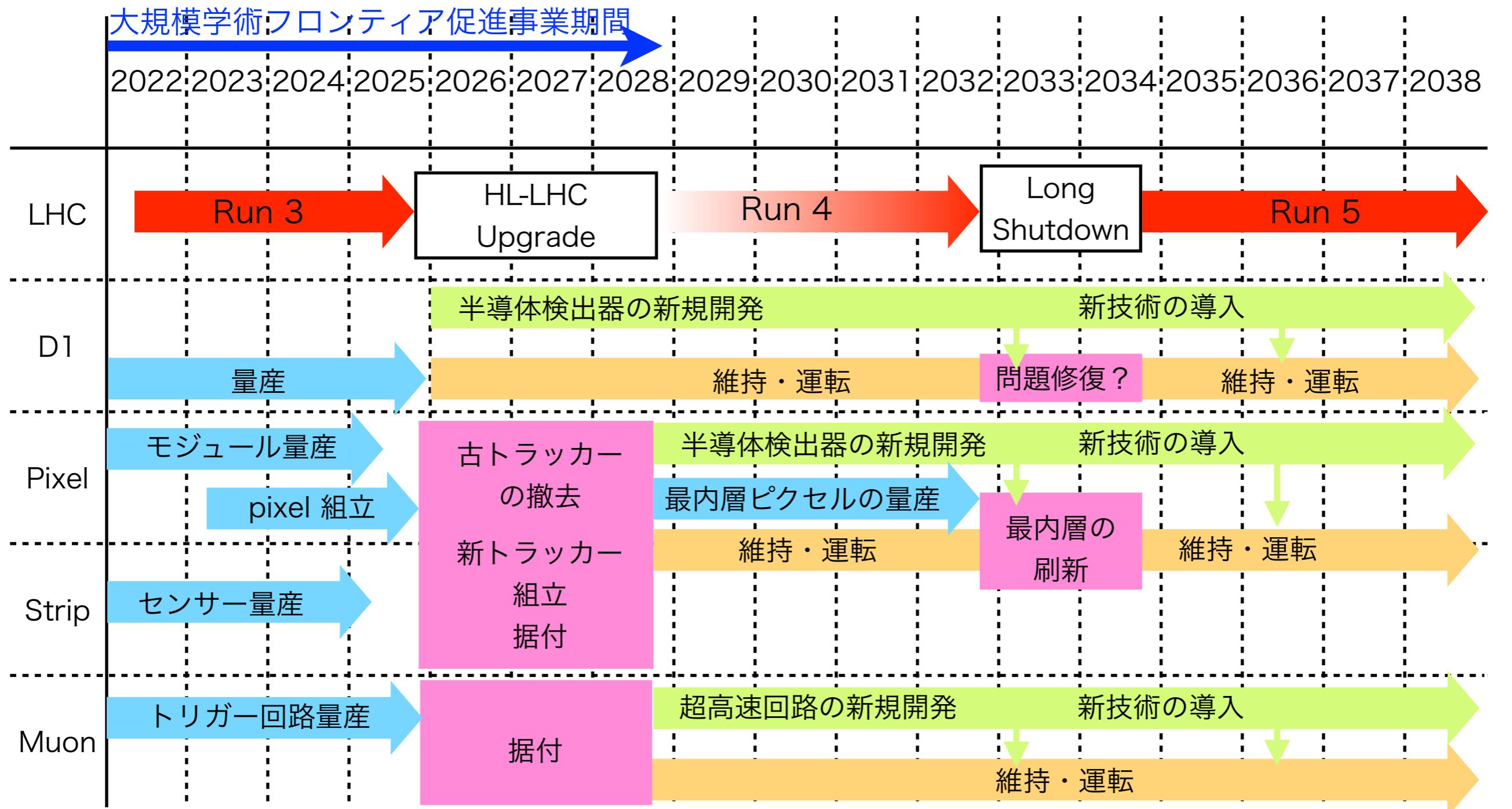
naturalness、暗黒物質 etc. の理解に向けて

## ヒッグス粒子3点自己結合

- まずは、ヒッグス粒子対生成の発見を目指す
- $\lambda_{HHH}$  が有限値を持つかどうかの検証が可能
- トップクォーク質量精密測定とともに宇宙の安定性の理解



# HL-LHC/ATLAS schedule



- より良い物理成果を出すために、加速器・検出器の積極的なupgrade
    - 2032年頃に最内層ピクセル検出器の交換を計画
    - 高温超伝導なども視野に入れた超伝導磁石の高磁場化、耐放射線強化にむけた開発
    - 超高時間・空間分解能半導体検出器、超高速読み出し回路など、新検出器技術の開発
- 次世代のエネルギーフロンティア実験に向けた基礎技術、社会的波及効果の高い技術
- ビジョン

# まとめ

唯一のEnergy Frontier加速器 LHCの陽子衝突を10倍にし、素粒子物理の最重要課題に挑む

- 力の大統一、Naturalness、暗黒物質などを説明する新物理の直接探索

**関連：他の素粒子実験で見られるアノマリーの原因となる新物理の直接的検証**

- ヒッグス粒子の精密測定、ヒッグスボテンシャルの測定が本格的にスタート

- 世代構造の起源、広い質量スケールの質量起源の理解を目指す

**関連：世代構造の起源はフレーバー物理実験と相補的**

- 相転移ダイナミクス、真空の安定性、粒子反粒子の非対称性に挑戦する

**関連：物性、インフレーション、核子の質量起源などの相転移、背景重力波と関連**

HL-LHCで物理成果を出すためには、加速器・検出器の先端的開発が鍵

- ビーム輝度を高めるための高磁場超伝導磁石の開発・建設

**関連：超伝導技術を利用した省電力化**

- 1桁上の細分化、高速化、放射線耐性強化を実現した検出器の開発・建設

**関連：半導体技術の医療・工学への応用、 $\mu$ 粒子を使った社会インフラ検証**



## 国際協調と国際的人材育成

- 平和的な研究を目的とする、42カ国/181機関/約3,000人の国際共同実験

- 日本からは、13大学・機関から約150名の研究者

- スタッフ：50人、博士：30人、修士70人

- これまでに、370編の修士論文、80編の博士論文… 人材育成

