

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

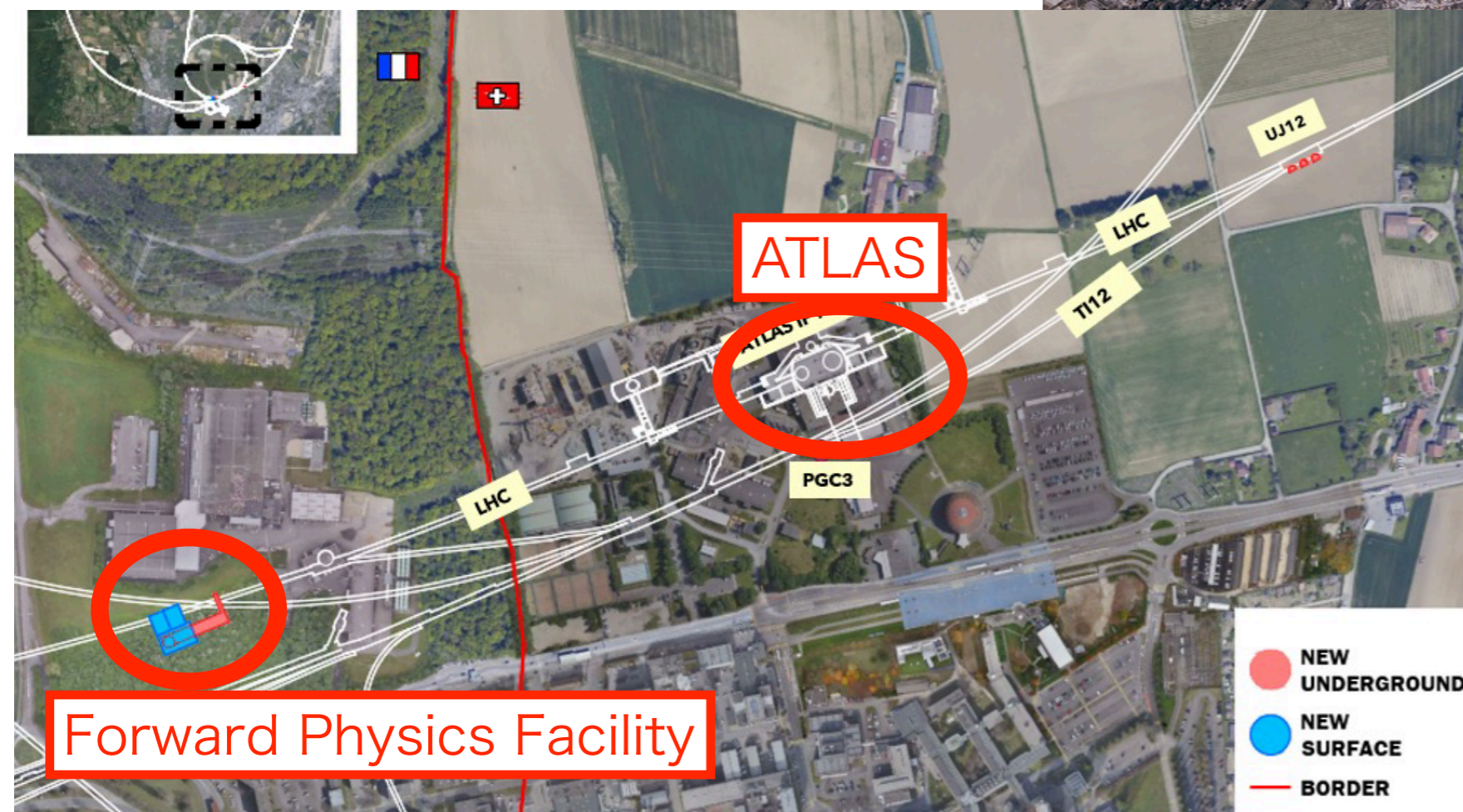
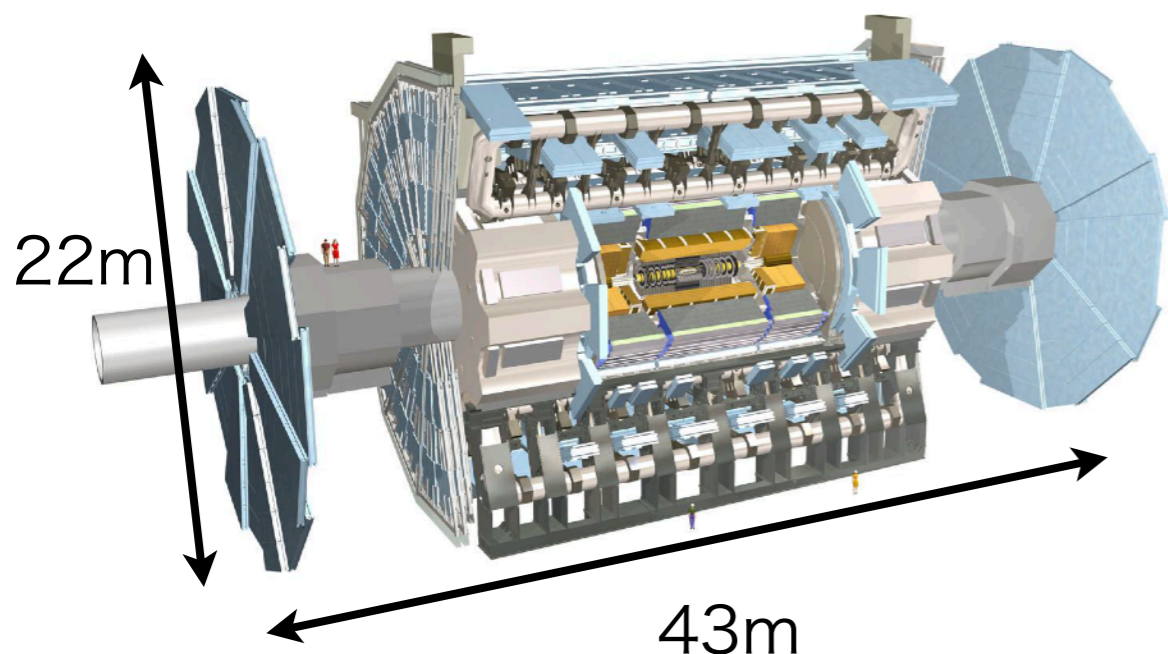
HL-LHC

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

質量の起源：ヒッグス粒子

H

質量
小

第1世代

第2世代

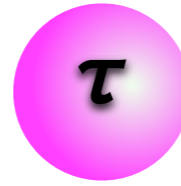
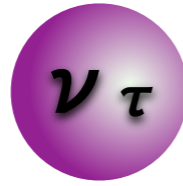
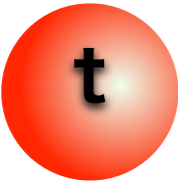
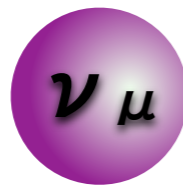
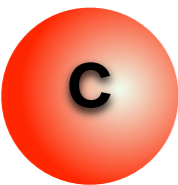
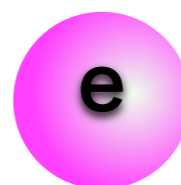
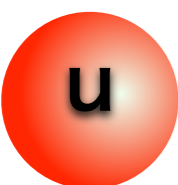
第3世代

大

物質構成フェルミオン

クォーク

レプトン



力の媒介：ゲージボゾン

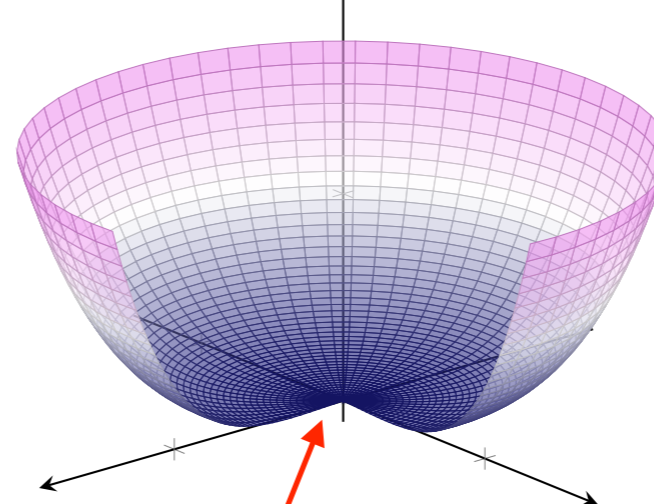


ヒッグスポテンシャル

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

初期宇宙

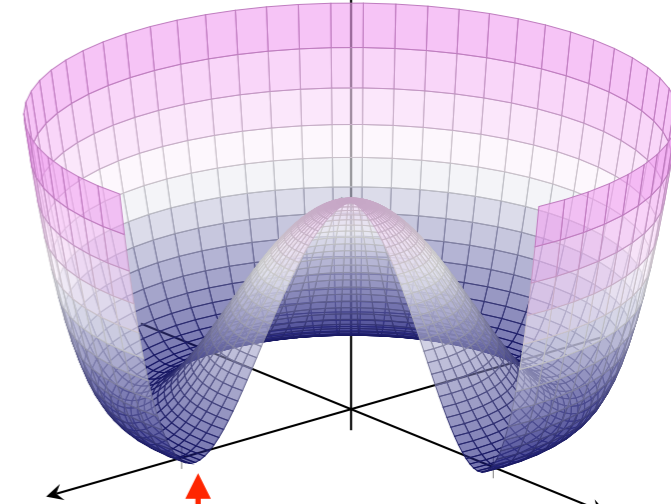
$V(\phi)$



$$\langle \phi \rangle = 0$$

現在の宇宙

$V(\phi)$



相転移

$$\langle \phi \rangle = \frac{v}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{-\mu^2}{2\lambda}}$$

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

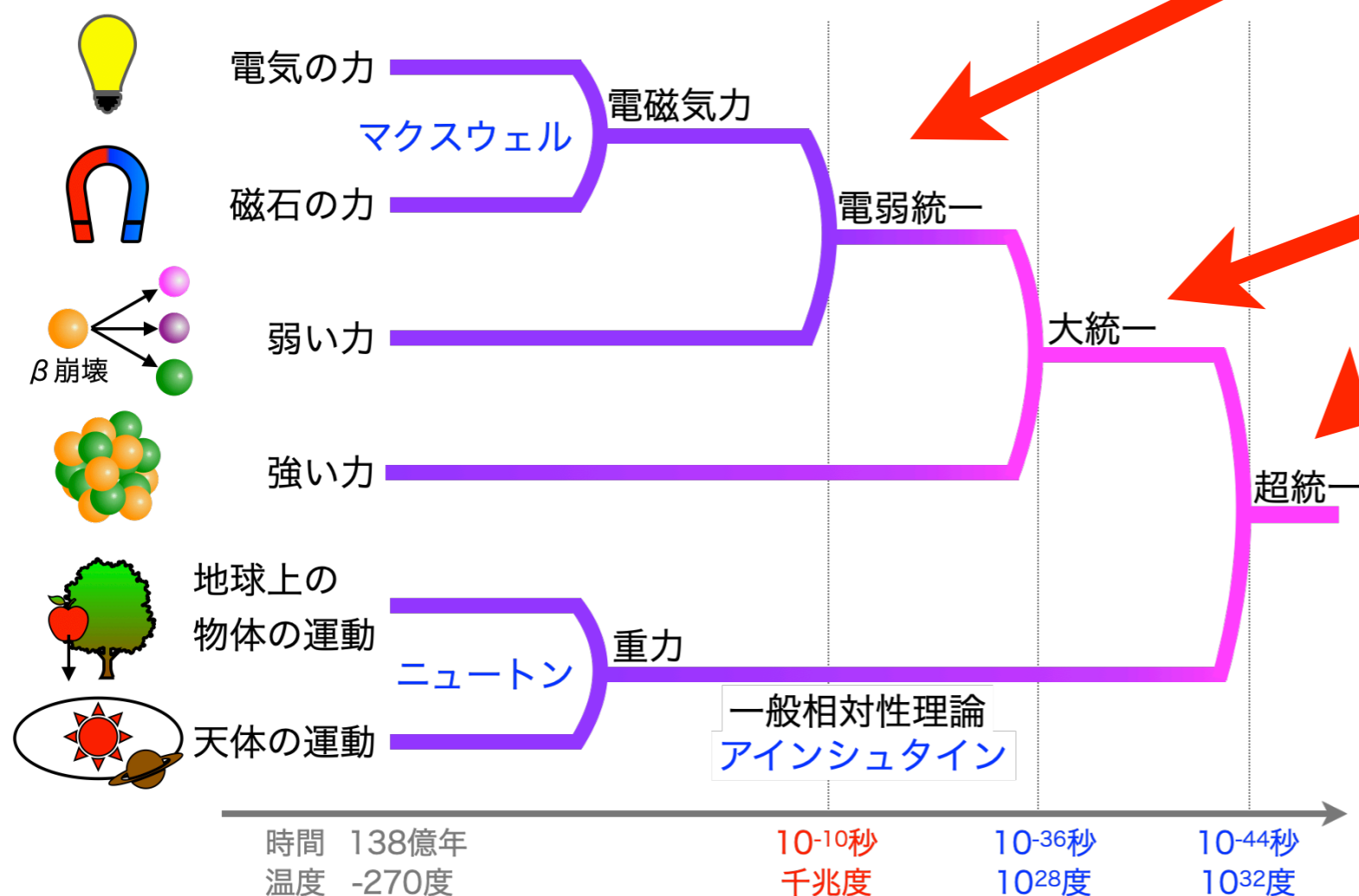
ヒッグス場

未解決問題

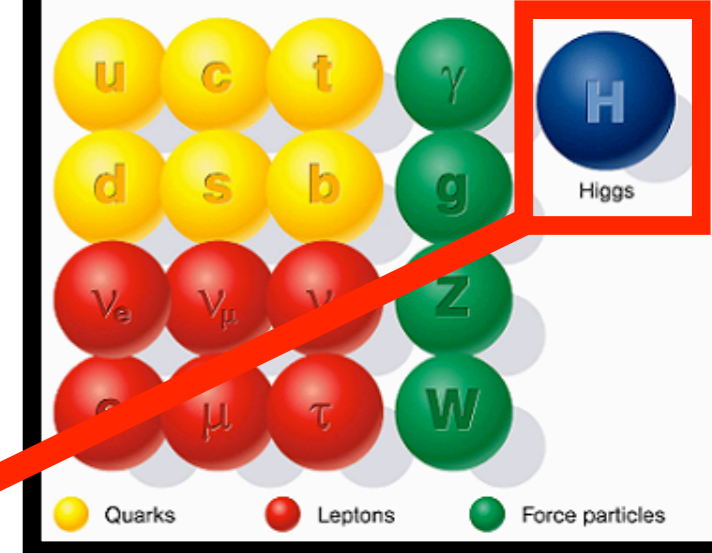
新物理がないと解決できない現象があることも明らかに

- ・ ヒッグスポテンシャルの謎
- ・ 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.

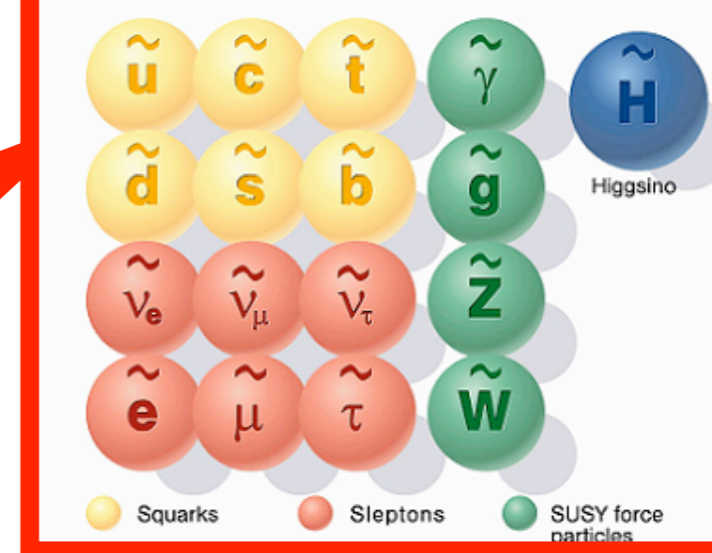
ビジョン



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.

ヒッグスポテンシャルの謎

- ヒッグスポ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？

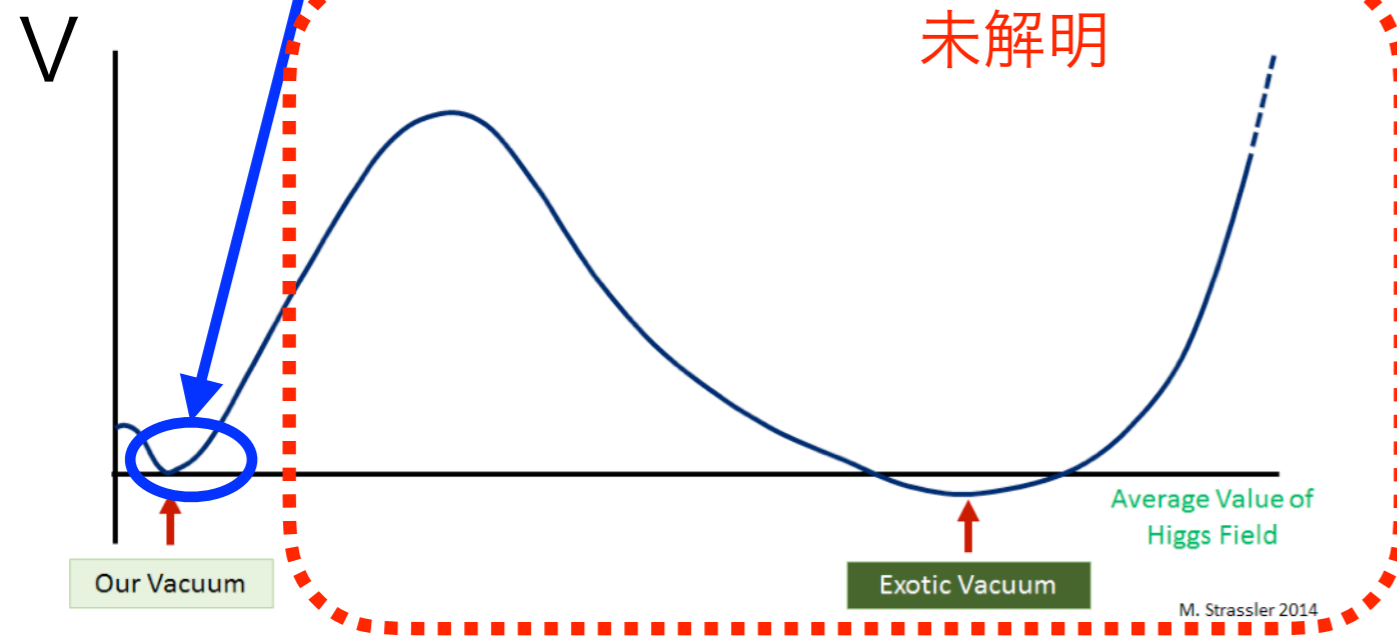
$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$

展開

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

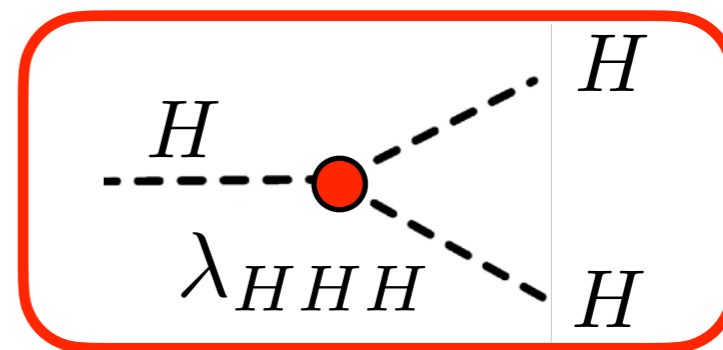
ヒッグス粒子質量=125GeV

$$V(H) = \frac{1}{2} \underbrace{m_h^2}_{\text{測定済}} H^2 + \frac{1}{3!} \underbrace{\lambda_{HHH}}_{\text{未測定}} v H^3 + + \frac{1}{4!} \underbrace{\lambda_{HHHH}}_{\text{未測定}} H^4 + \dots$$



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：

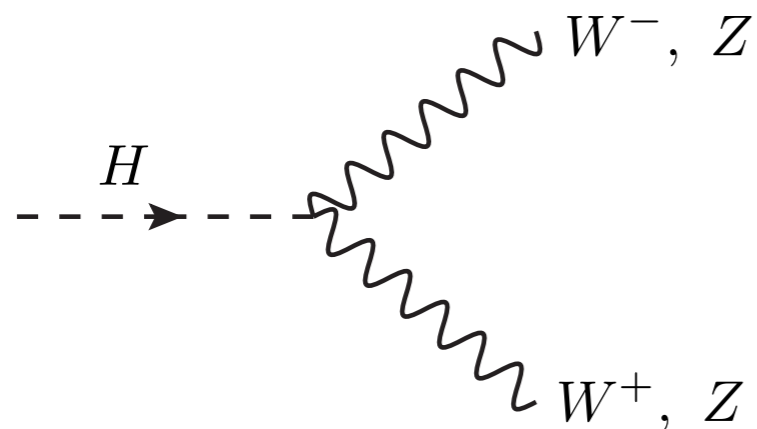
- 電弱バリオジェネシスによる物質反物質の非対称性
- 原子重力波

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

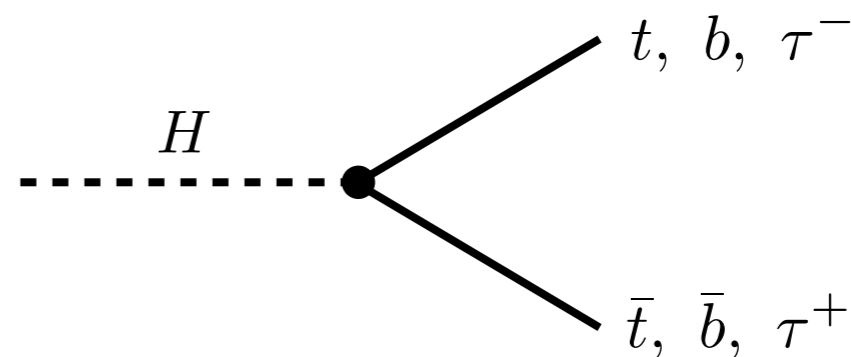
ビジョン

世代構造の謎

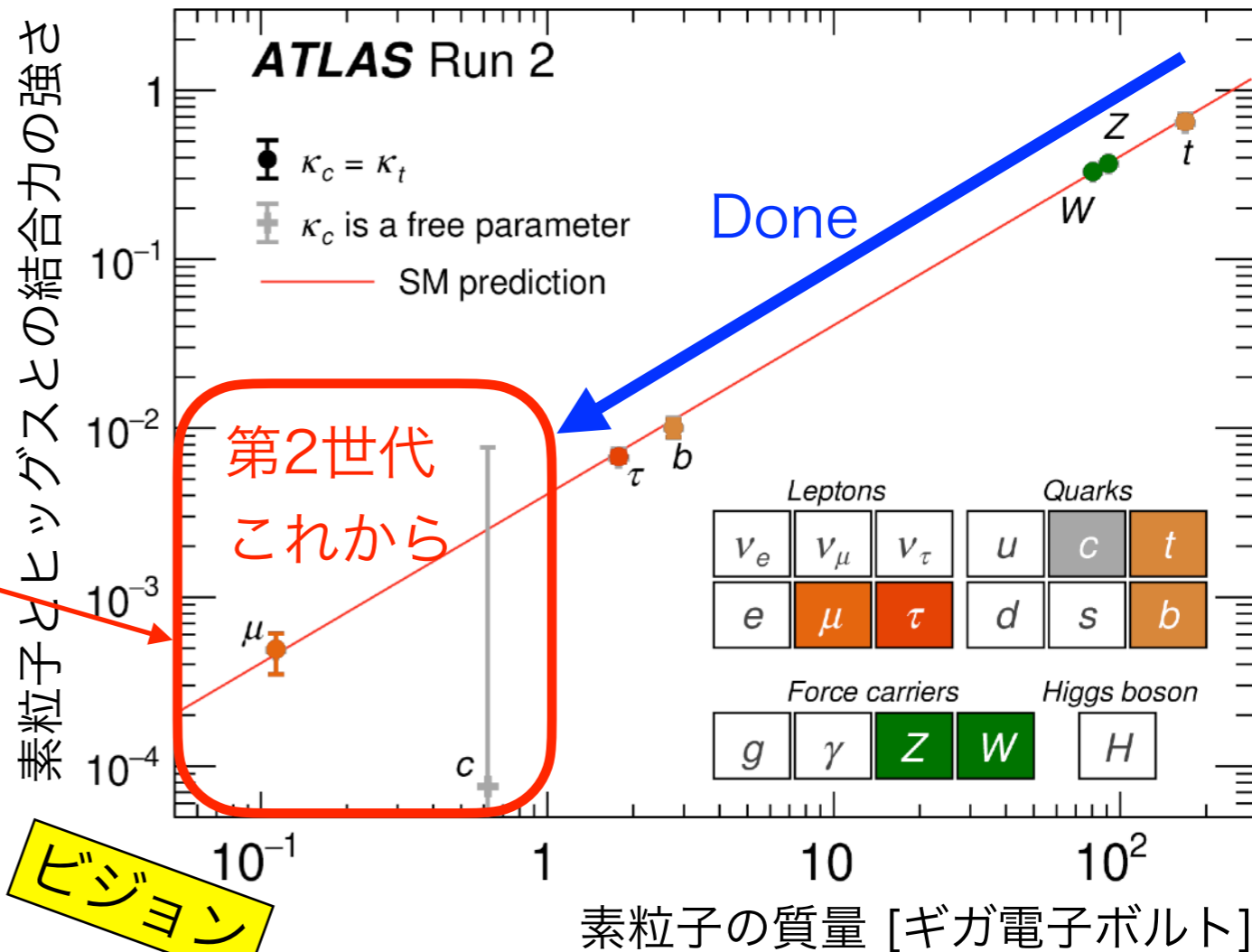
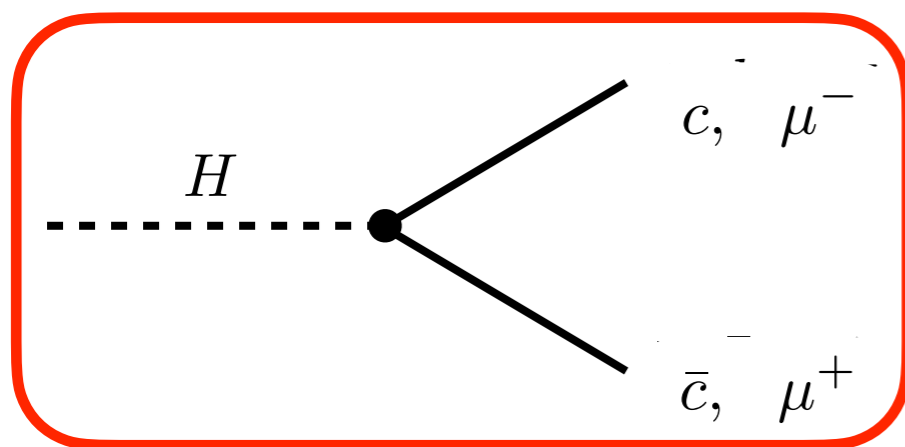
- W/Zボゾンの質量起源：ヒッグス機構



- 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 ⁻¹
Run 3	2022～2025	13.6 TeV	250 fb ⁻¹
HL-LHC	2029～ (10年間)	14 TeV	3,000 - 4,000 fb ⁻¹

(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

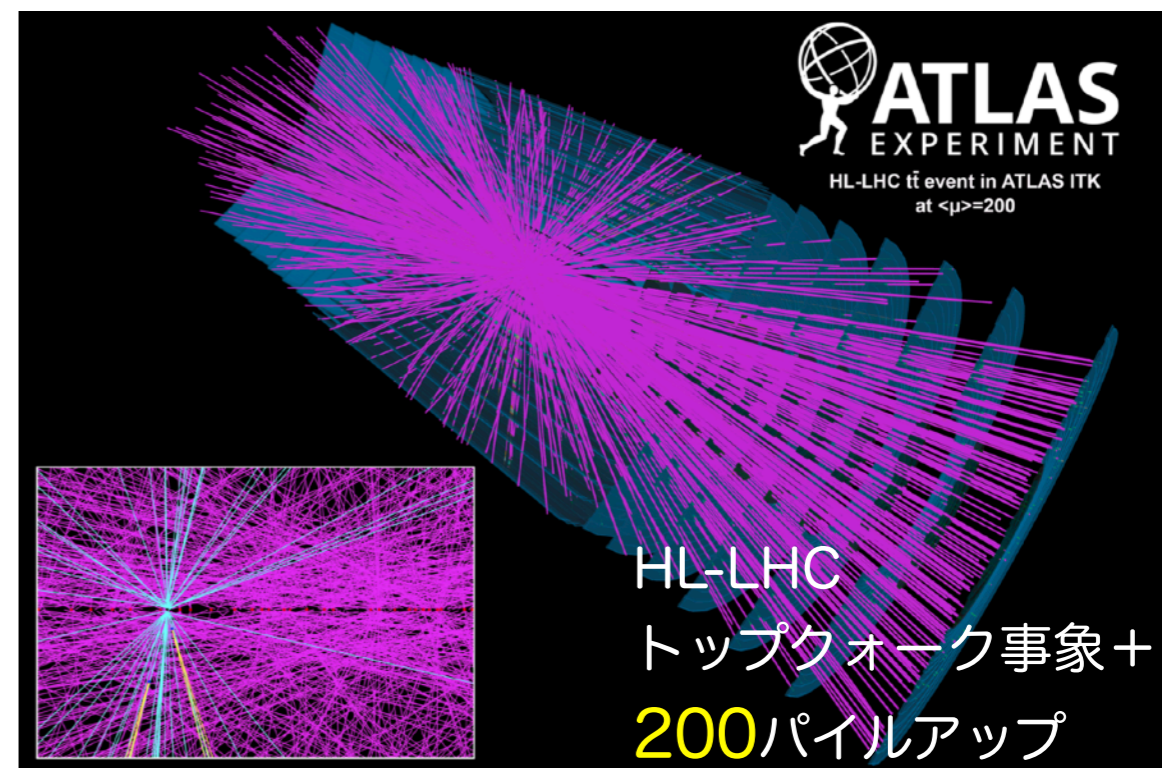
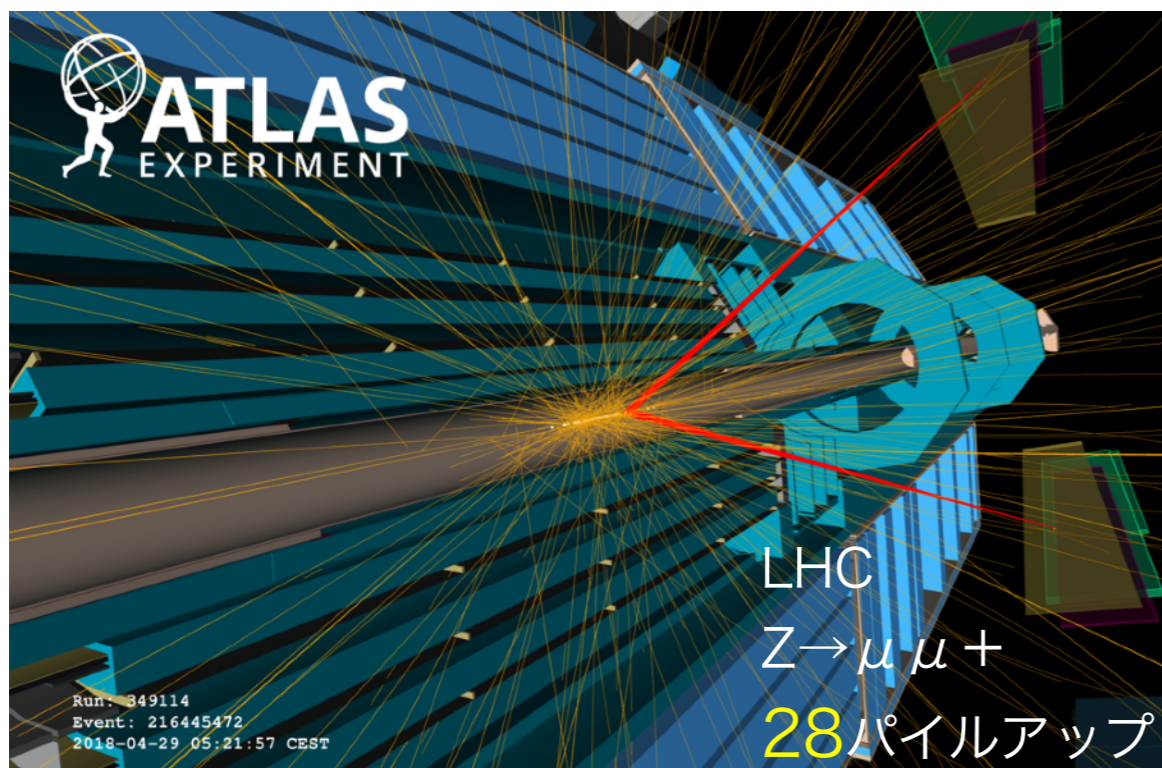
実効的な重心エネルギー：

→ 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

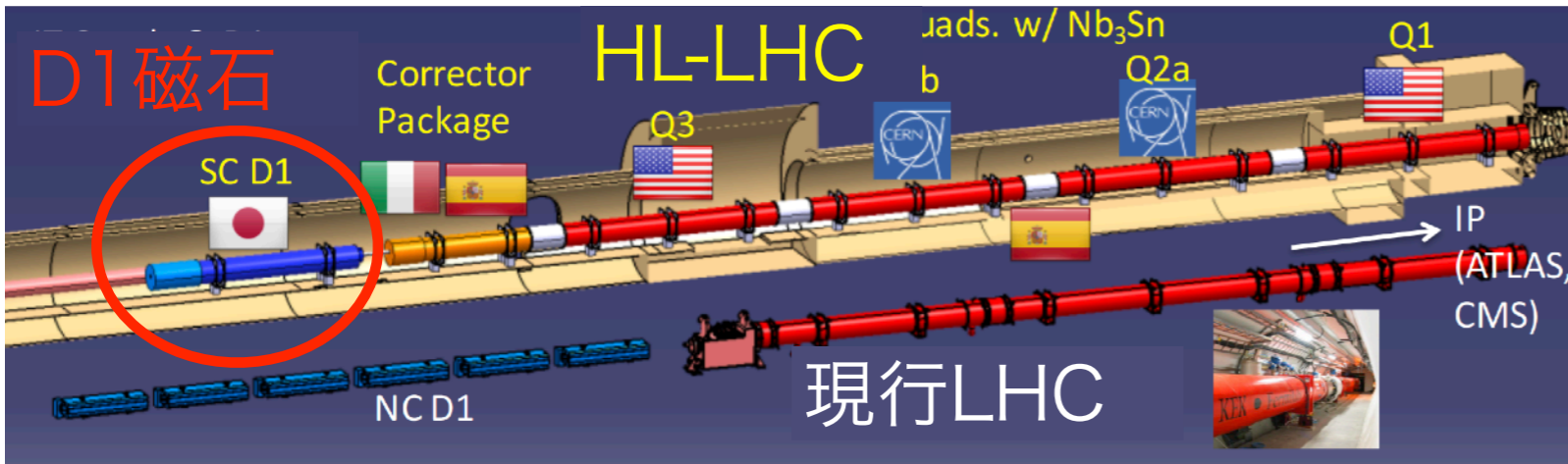
→ ヒッグス粒子反応の徹底精査が可能

- 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

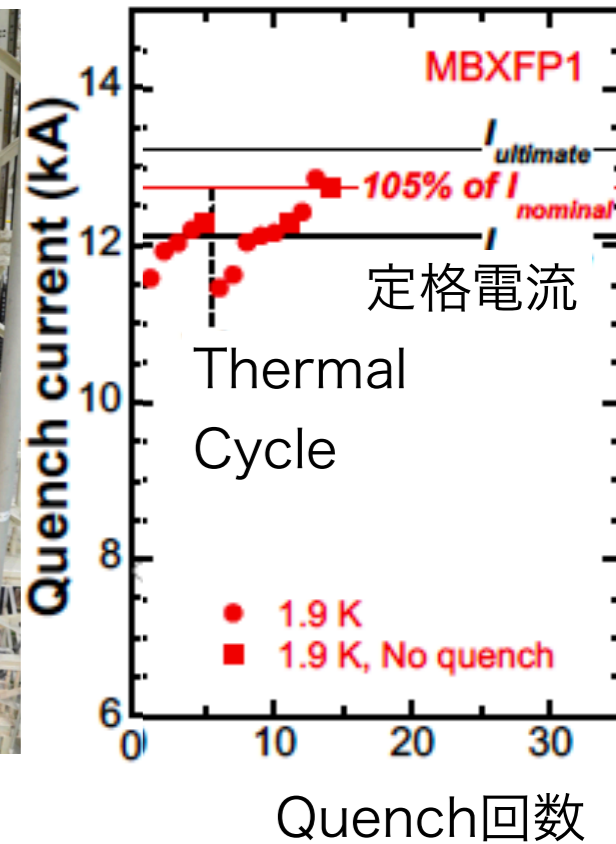
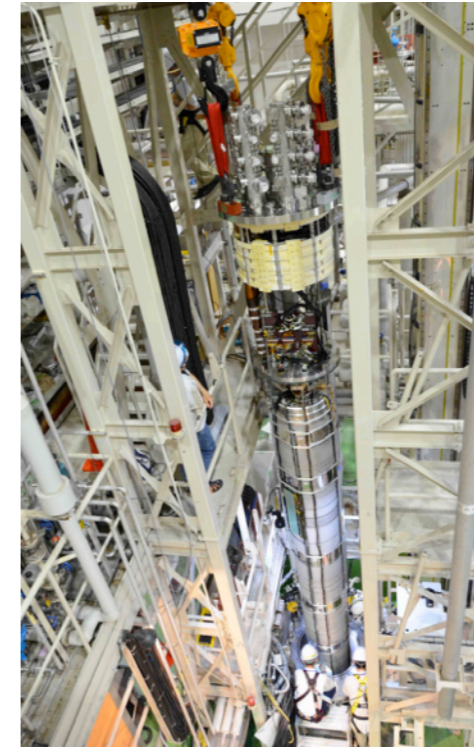


日本の活躍

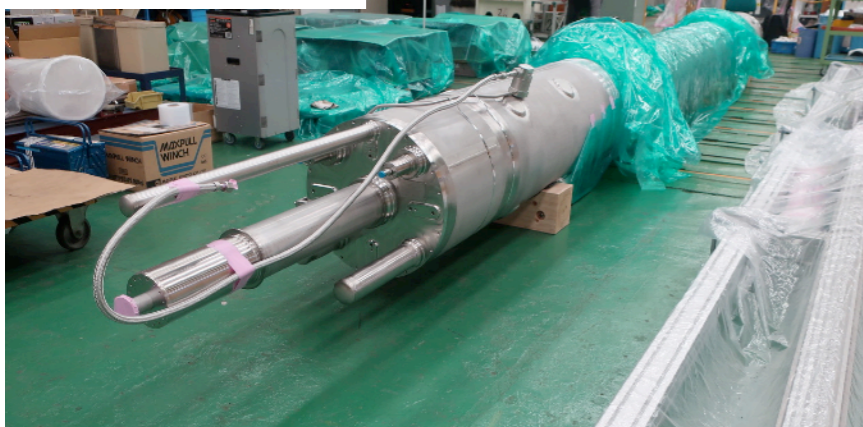
加速器アップグレード：ビーム分離用超伝導双極磁石（D1磁石）



実証機の冷却励磁試験



完成した実証機



実機磁石のコイル製造



内部飛跡検出器

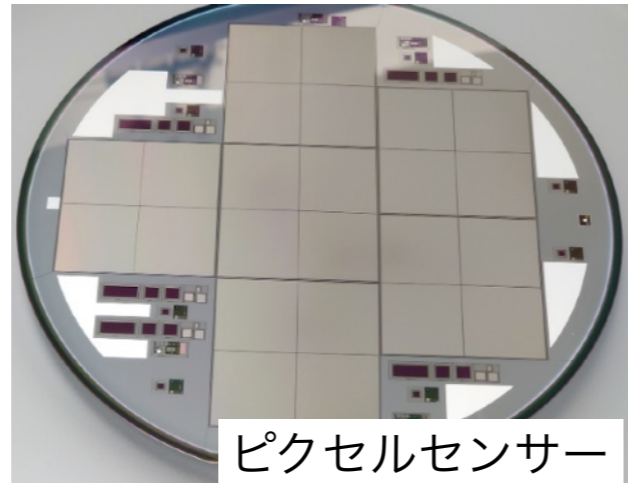
- strip sensor (約7,000枚)
- pixel sensor+module (約2,200枚)

エンドキャップ ミューオントリガー

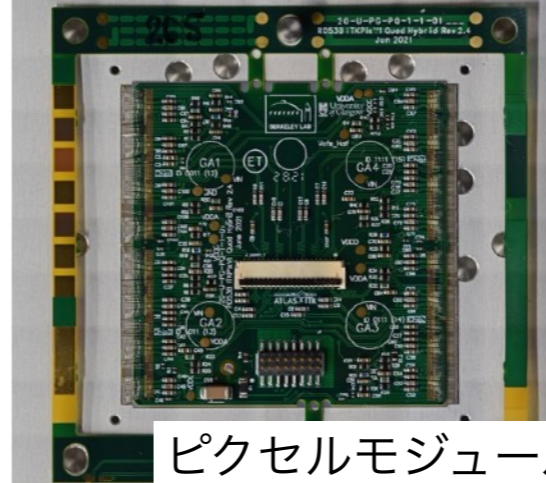
- 2種類の前段回路 (約1500枚、150枚)
- 後段プロセッサ回路 (約50枚)



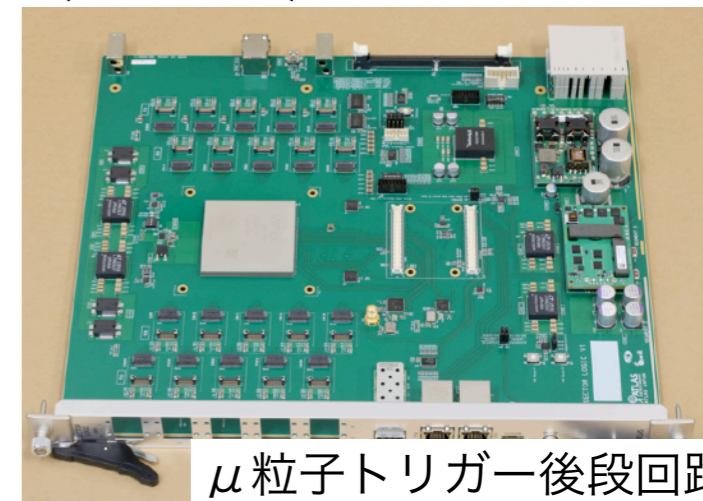
ストリップセンサー



ピクセルセンサー



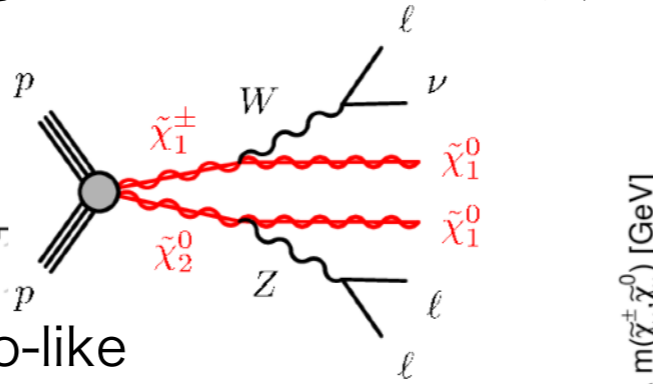
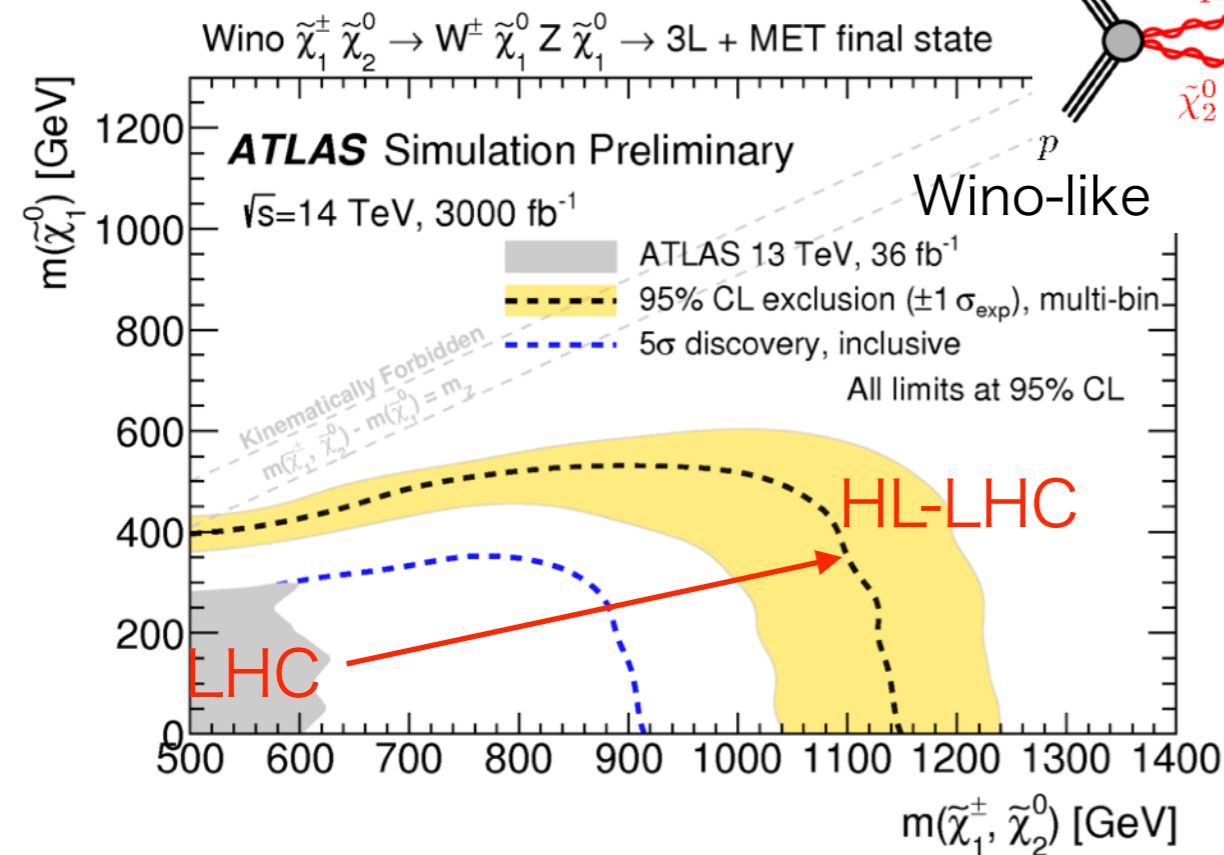
ピクセルモジュール



μ 粒子トリガー後段回路

期待できる成果

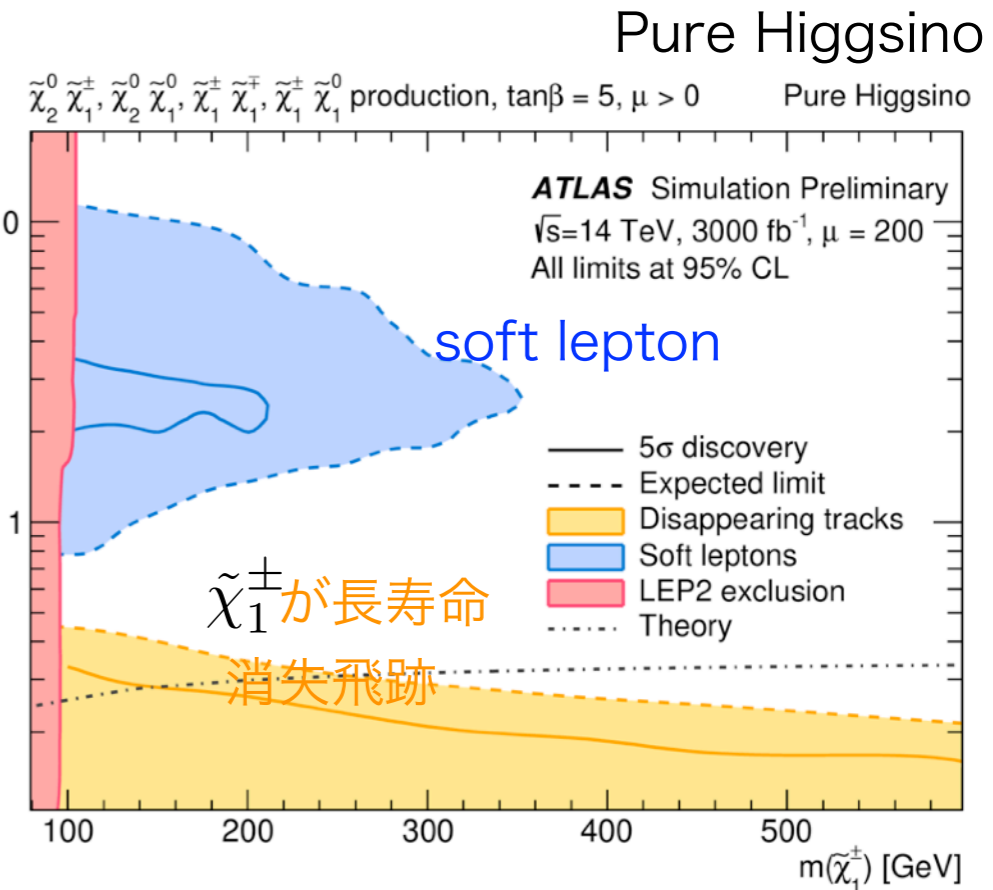
超対称性粒子探索



質量 大

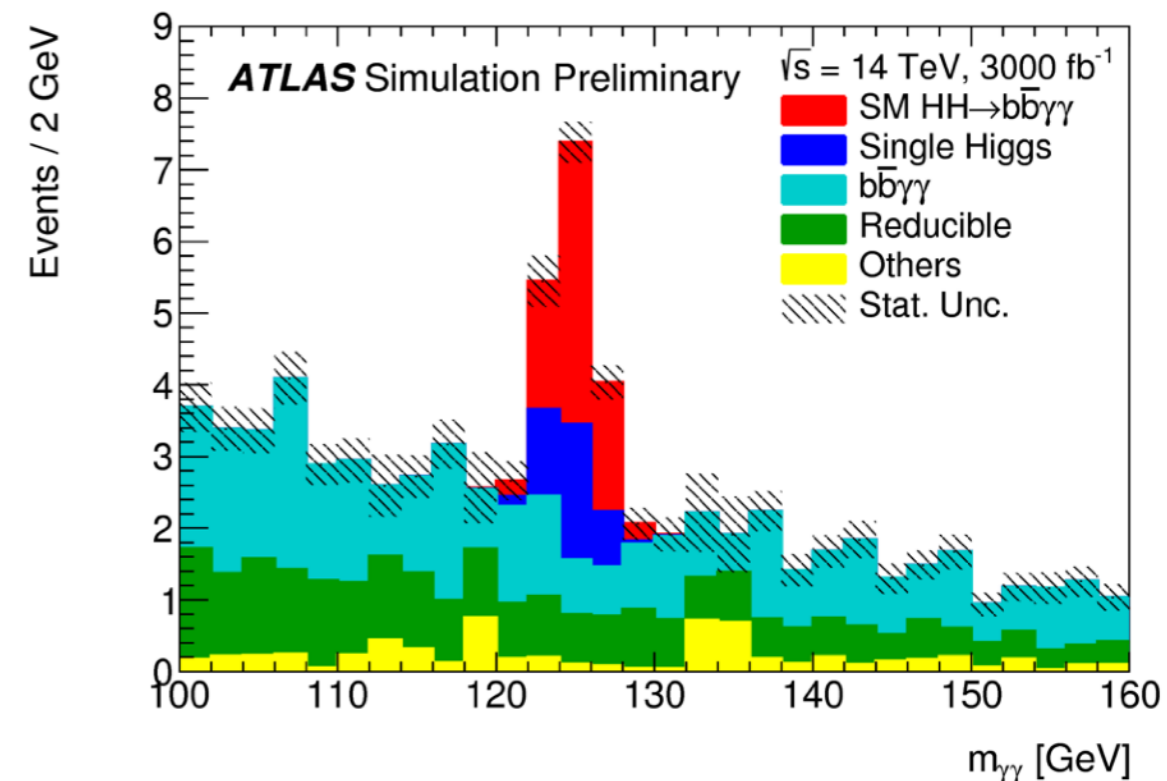
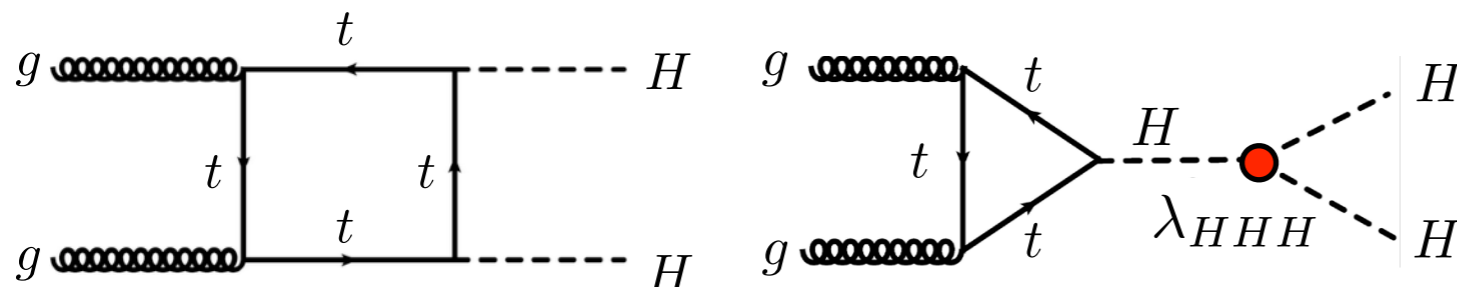
$$\begin{array}{c} \tilde{\chi}_2^0 \\ \hline \tilde{\chi}_1^\pm \\ \hline \tilde{\chi}_1^0 \end{array} \quad \Delta m$$

naturalness、暗黒物質 etc. の理解に向けて

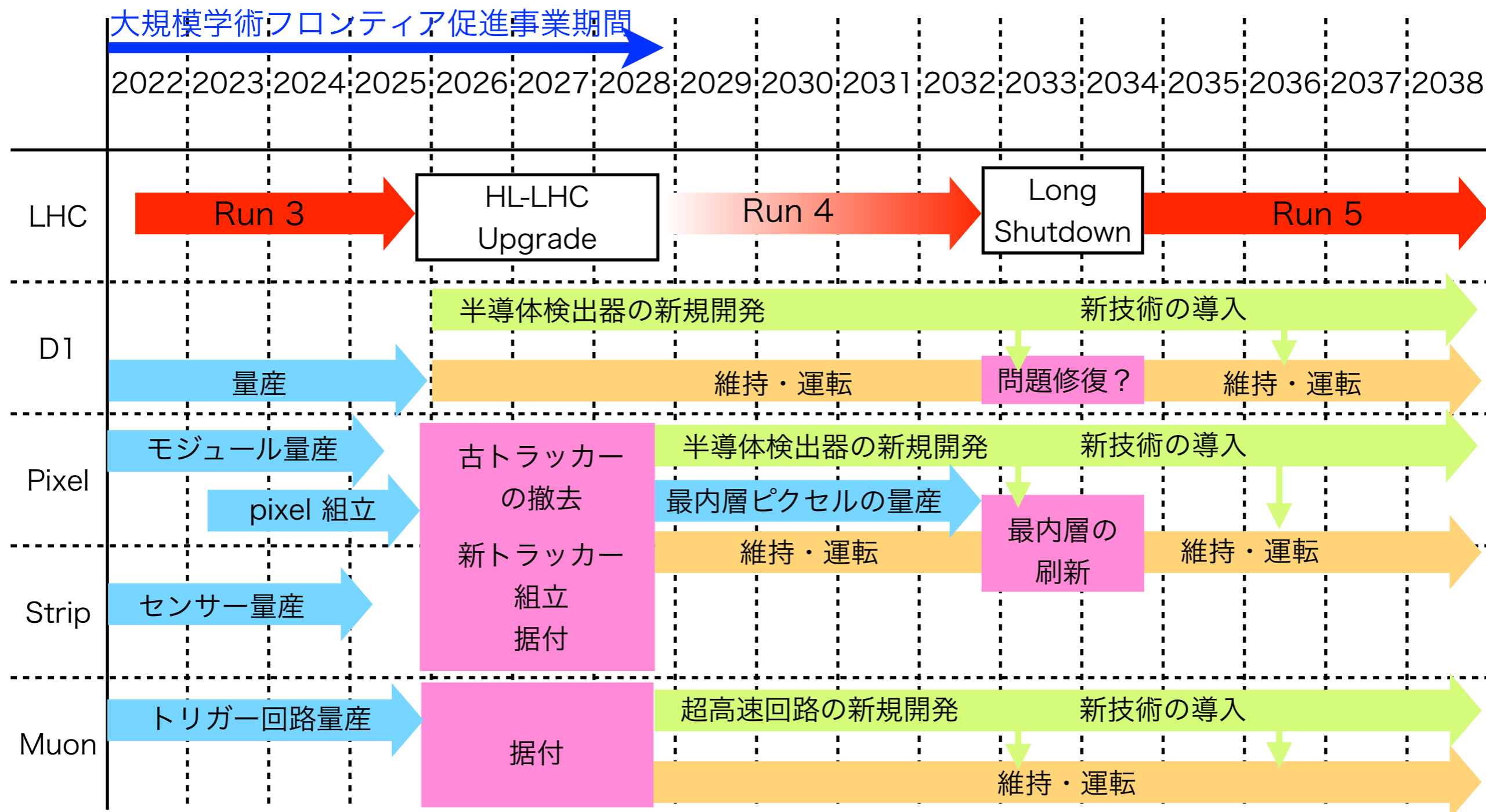


ヒッグス粒子3点自己結合

- まずは、ヒッグス粒子対生成の発見を目指す
- λ_{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、ヒッグスポ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、 μ 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

