

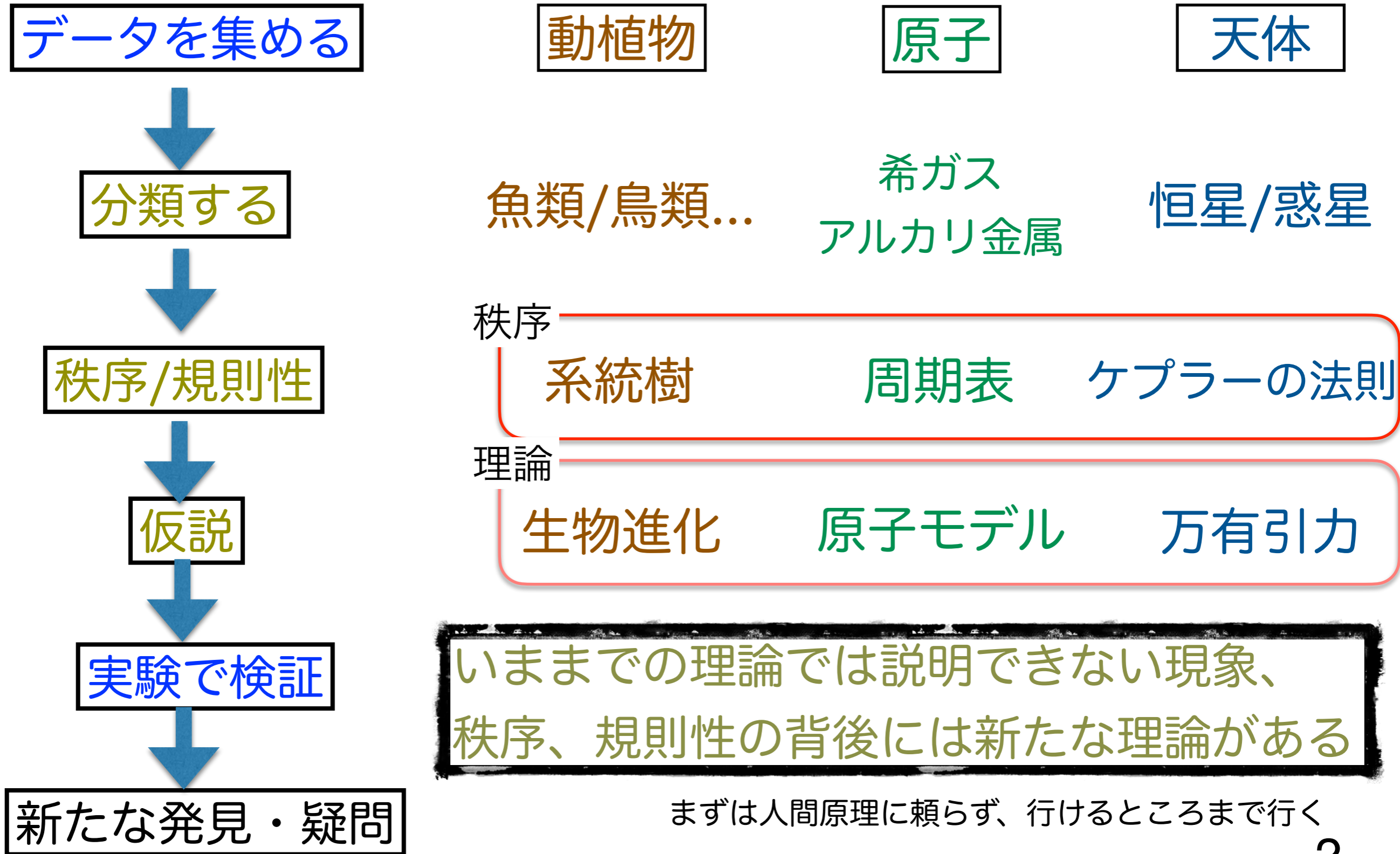
ICEPP学部向け特別セミナー2026

LHCでの新物理探索の最前線

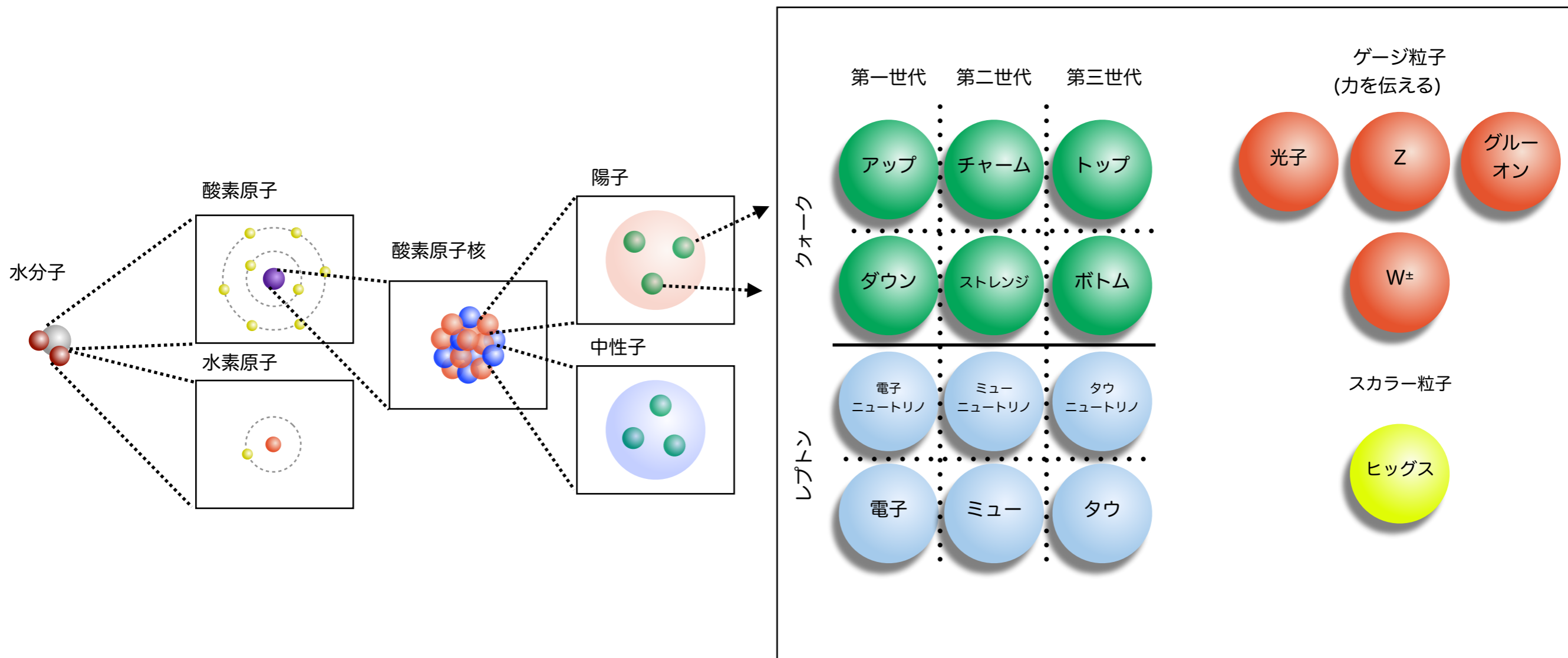
澤田 龍

# 科学の発展

例



分子 → 原子 → 原子核 → 核子 → 素粒子



素粒子にも秩序がある → まだ未確認の理論がある？

- ・ 三つの"コピー"のような世代
- ・ クォークの電荷は、電子のちょうど1/3の倍数
- 身の回り(低エネルギー)では見えていない新秩序がある？
- ・ 物質を構成する粒子と力を伝える粒子の対称性？

標準理論に登場する粒子は全て発見済み、  
これからの素粒子研究は？

いままでの理論では説明できない現象、  
秩序、規則性の背後には新たな理論がある

- 暗黒物質: 標準理論には候補になる粒子がない
  - ・ ニュートリノは軽すぎて天体の構造を作れない
- なぜ宇宙には物質が残っているのか?
- なぜ「素粒子」は3世代の「コピー」があるのか? (原子の周期表みたい)
- 陽子と電子の電荷はなぜ同じ?
  - ・ 標準理論では電荷(正しくはハイパーチャージ)は量子化されないので、正確に一致するしくみはない。
- Higgs粒子はなぜこんなに軽いのか? (階層性問題)

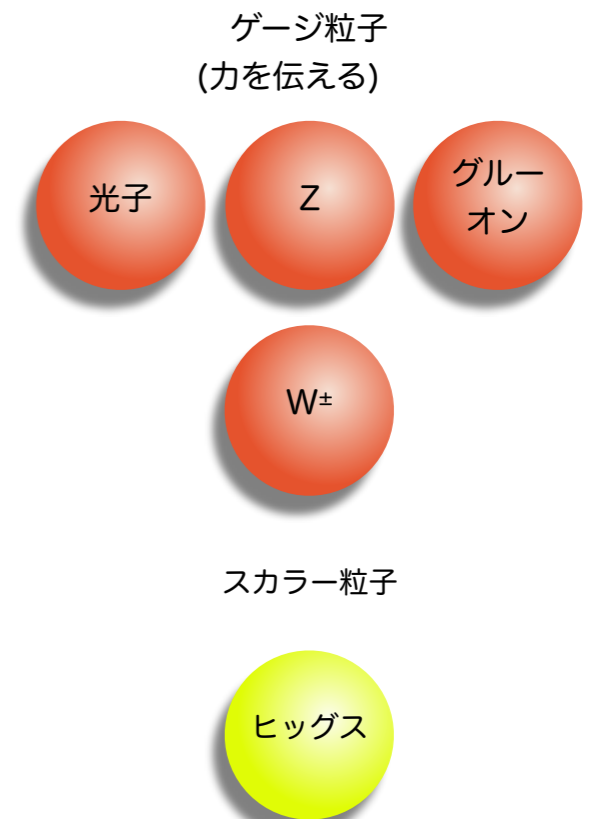
いままでの理論では説明できない現象、秩序、規則性の背後には新たな理論がある



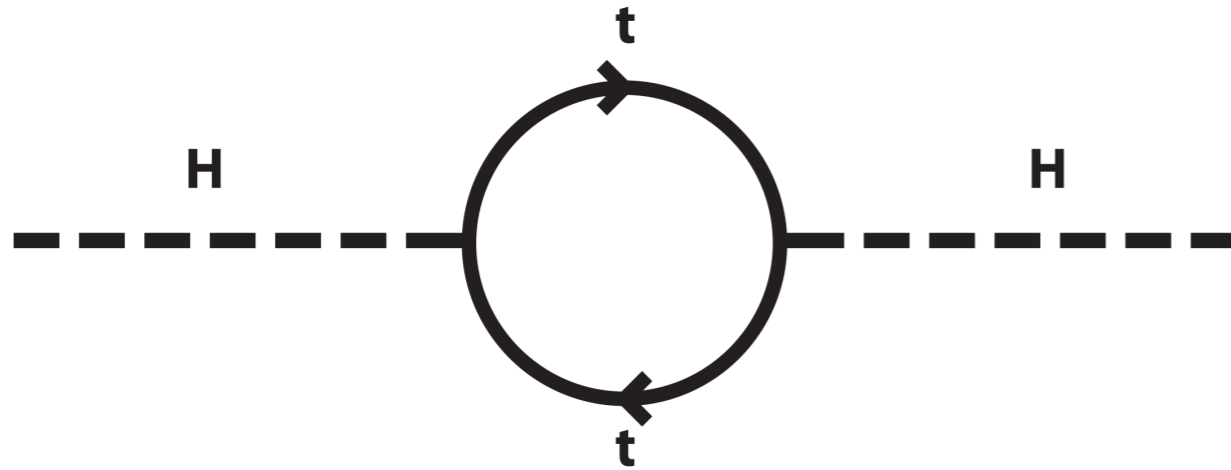
電荷	第一世代	第二世代	第三世代
2/3	アップ	チャーム	トップ
-1/3	ダウン	ストレンジ	ボトム
0	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
-1	電子	ミュー	タウ

クォーク

レプトン



# 標準理論と階層性問題



近くで見ると仮想的な(例えば)トップクォークが飛んで見かけの質量が大きくなる。(量子補正)

観測されるヒッグスの質量(125 GeV)  
= 裸の質量 - 量子補正



標準理論が高いエネルギーまで有効だとすると...  $\Lambda: 10^{15} - 10^{19} \text{ GeV} ?$

大きな補正の効果を、たまたま裸の質量がちょうど打ち消して、とても小さい (125 GeV) のヒッグス質量を実現している？

さすがに不自然。 → 何か理由 (標準理論を超えた理論) があるはず。

いままでの理論では説明できない現象、秩序、規則性の背後には新たな理論がある

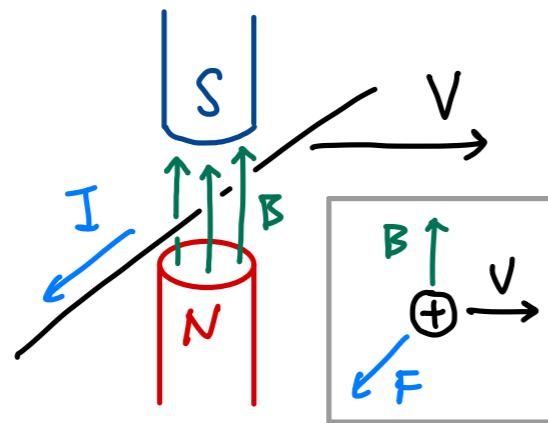
# 力の統一

力の統一 = 力の根源が共通

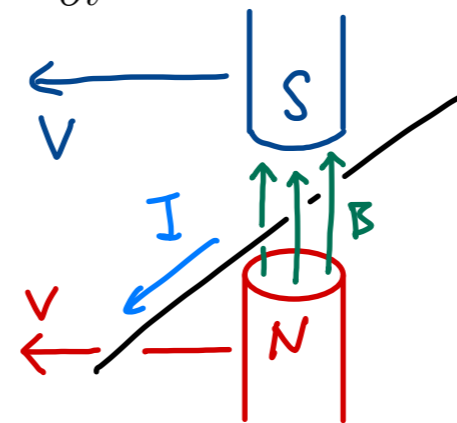
- 天体の運動と地上の物の運動 (根源は質量) → 万有引力
- 電気と磁気 (根源は電荷) → マクスウェル方程式 (慣性系によって混ざる)。特殊相対論

いままでの理論では説明できない現象、秩序、規則性の背後には新たな理論がある

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho, \quad \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} - \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mathbf{j}$$



動く電子が磁力をうける



誘導起電力を電子が感じる

- 慣性力と重力 (慣性質量 = 重力質量?) → アインシュタインの重力。一般相対論
- 電磁気力と弱い力 → 電弱力 (弱い力単独だとゲージ対称にできない)
  - 身の周りのエネルギースケールだと
    - 電磁気力(光子、長距離)と弱い力(W,Z, 短距離)
  - それよりもずっと高いエネルギースケール(初期宇宙)では
    - 電弱力 (B, W<sup>0</sup>, W<sup>1</sup>, W<sup>2</sup>)
    - B, W<sup>0</sup>が混ざって光子とZになる

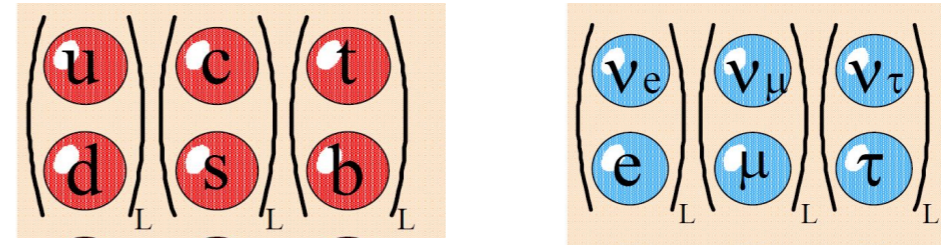
# 大統一

大統一理論: 電弱力と強い力を統一する理論

力を統一するだけではなく、それが作用する粒子 (レプトンとクォーク) をまとめて記述することになる。

例えば、

弱い力は弱アイソスピン二重項に作用



大統一の相互作用はレプトンとクォークを含む多重項に作用。

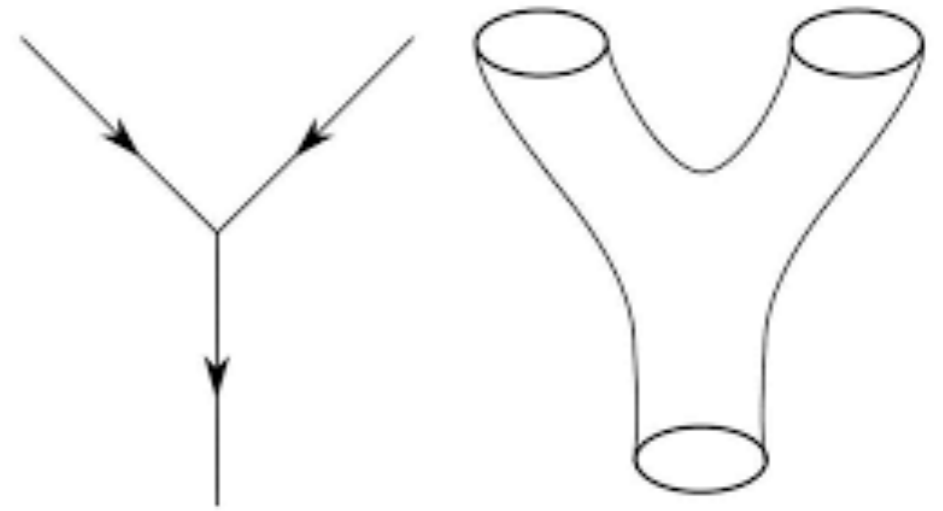
例えばSO(10) GUTだと、一つの世代のフェルミオンと右巻きニュートリノが一つの表現に入る。

クォークとレプトンの電荷に関係性が与えられる。

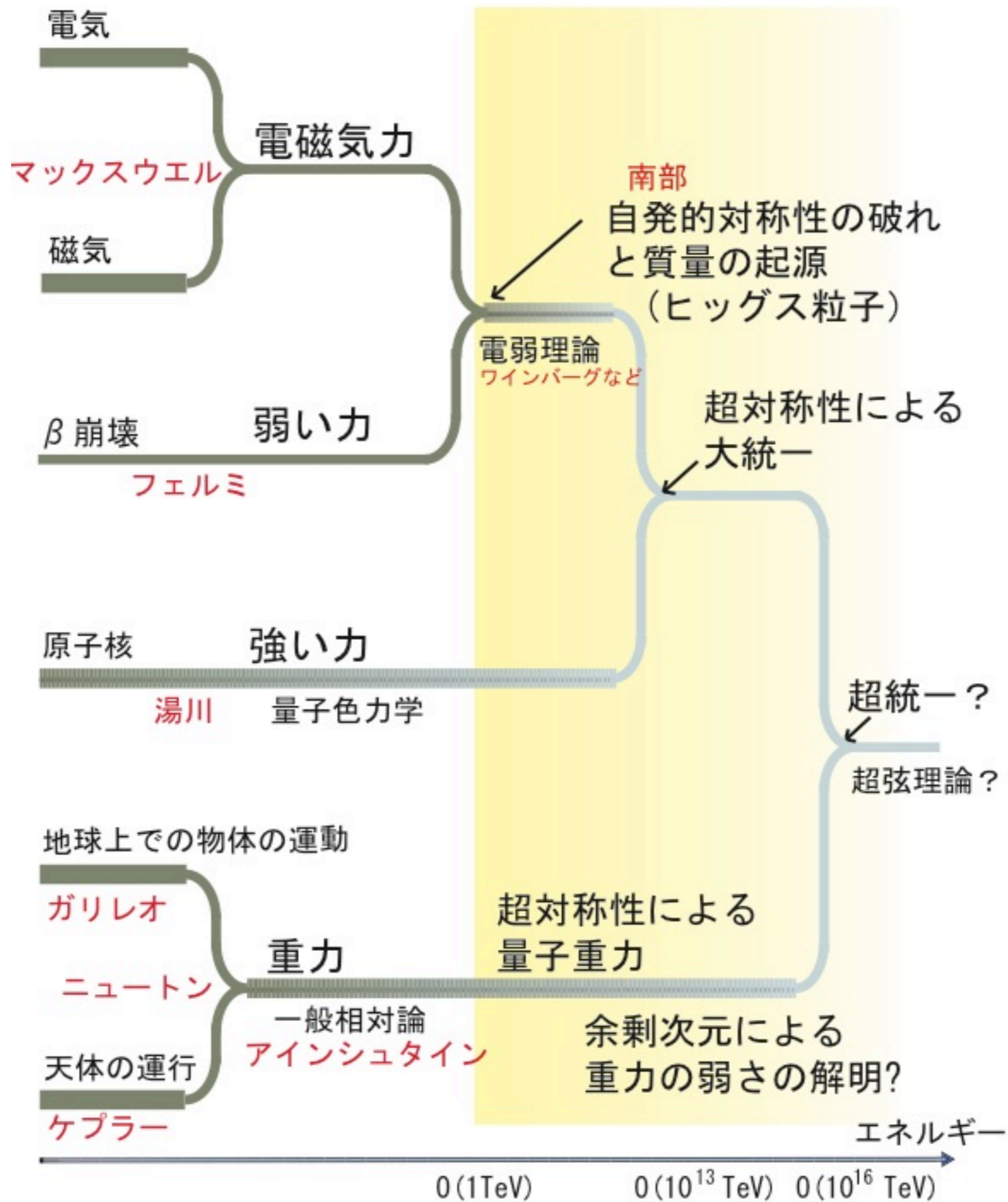
→ 電荷の量子化の謎の説明

# 万物の理論

(さらに重力も扱える理論)

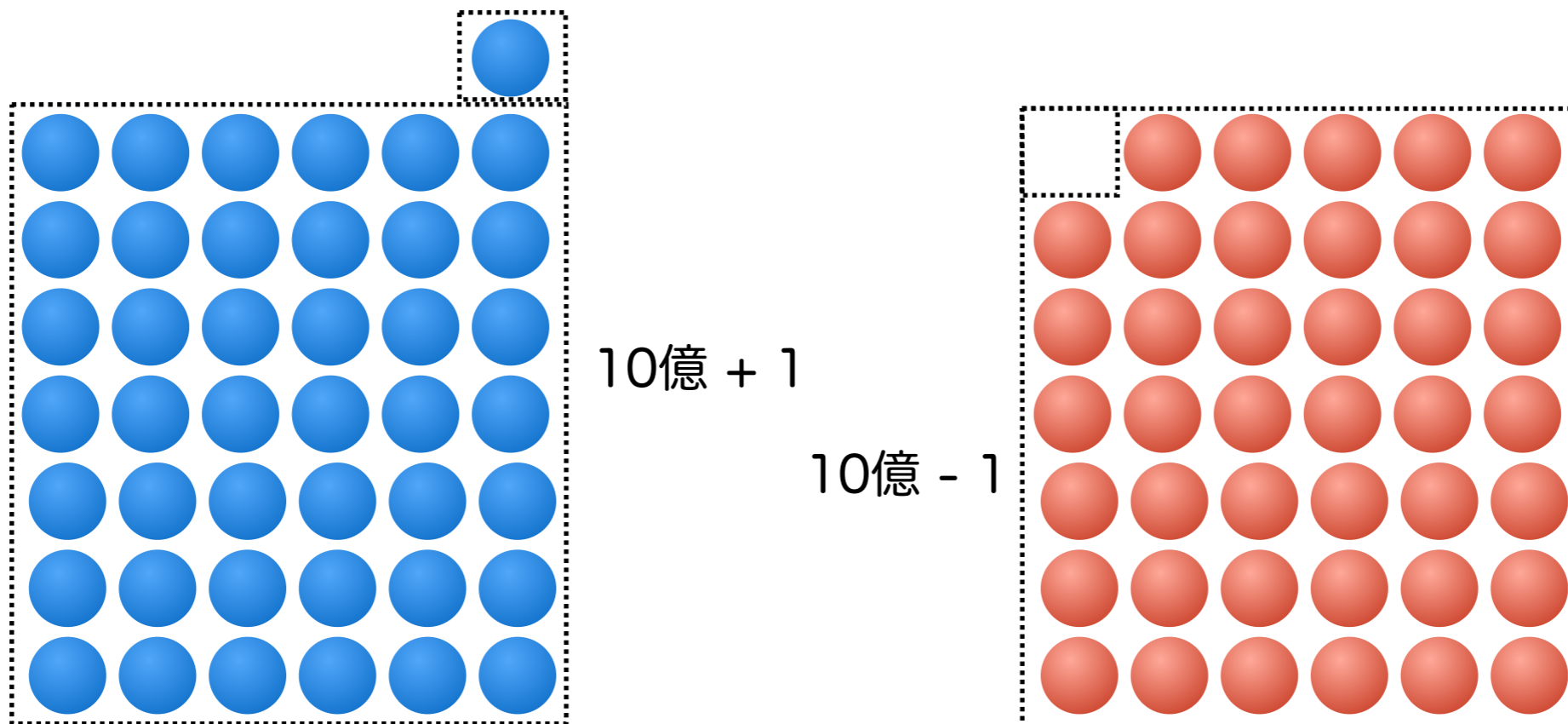


- 宇宙を統一的に説明する究極の理論は、重力と素粒子の両方を説明できるものであるはず。
- 超弦理論の検証
  - 直接検証するにはプランクスケールのエネルギー ( $10^{19}\text{GeV}$ ) → 実験での到達不可能
  - 現代でも可能性のある、間接的なヒント
    - 重力子の発見
    - 素粒子が弦であることの証拠
      - 余剰次元の存在 → カルツァクライン粒子  
(余剰次元の運動が3次元では質量に見える)
      - 超対称性の存在 → 超対称性粒子



# 物質優勢の宇宙

- 素粒子には、“粒子”と電荷が反対の“反粒子”がある。
- “反粒子”でできている物質が“反物質”。例えば反陽子はCERNで人工的に作られる。
- エネルギーからは、基本的には、粒子と反粒子がペアで作られる(対生成)。逆に粒子と反粒子がぶつかると、“対消滅して”エネルギーになってしまう。
- 宇宙の初期には、エネルギーから粒子と反粒子ができたり、その逆の反応が起きていた。
- ではなぜ今の宇宙には物質しかないのか？
  - 10億に一個の粒子・反粒子の違いによって残ったものが今の物質を構成



# やるべき物理の一覧

## 次世代 (2030年-40年代)

- ◆ Higgs 精密測定
- ◆ トップクォーク・Z・W 精密測定
- ◆ 暗黒物質・Axionの物理
- ◆ CPの破れの物理・EDM
- ◆ フレーバー精密測定・陽子崩壊
- ◆ (背景) ニュートリノ精密測定
- ◆ CMB 精密測定・21cm線・ブラックホール
- ◆ 超対称性/Compositeの決着? 2nd Higgs?

## 将来 (100年の計)

- ◆ GUT・Planck scaleの物理
- ◆ 真空・時空構造の理解
- ◆ QCDの解明・Strong CP問題の解決
- ◆ 階層性問題の解明
- ◆ バリオン数生成の物理
- ◆ フレーバー・世代数起源の解明
- ◆ インフレーションの解明
- ◆ 量子重力(超弦理論)・暗黒エネルギーの理解

# 疑問に答えるために有効な研究

★ : 高エネルギー衝突型加速器実験

- ★ ヒッグス粒子の精密測定
- ★ 標準模型粒子の精密測定 (トップクォーク、W/Z、 $\tau$ 、B、ミュー…)
  - 電気双極子測定
  - 陽子崩壊
- ★ ダークマター(候補)等の新粒子探索 (重いダーク、アクシオン、暗黒光)
  - ニュートリノ
  - 宇宙背景放射、原始重力波
  - …

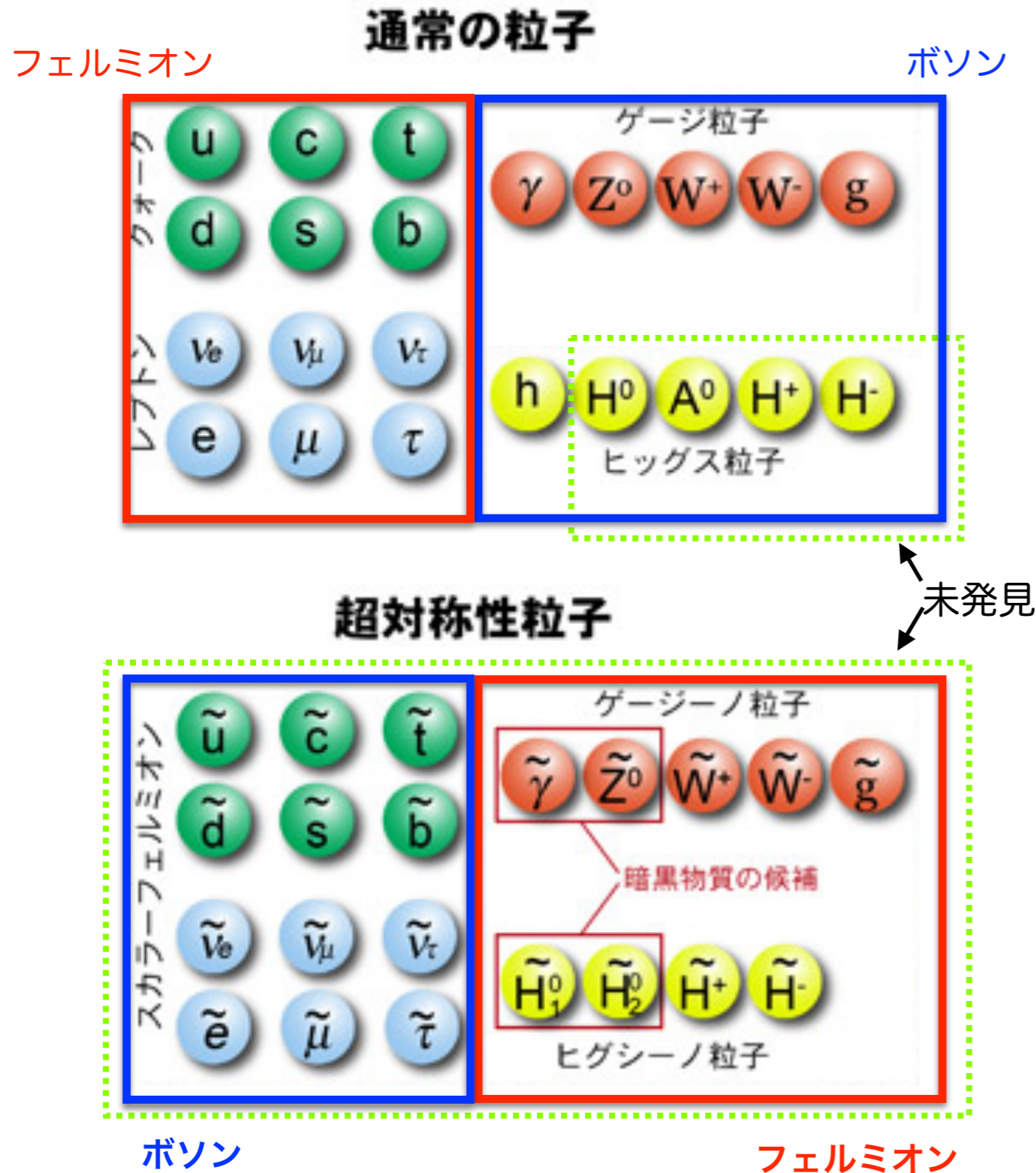
このトークの内容

# ATLASが探している新粒子

- 超対称性粒子
- カルツァクライン粒子 (余剰次元)
- 重い (右巻きの) ニュートリノ
- 標準模型以外のヒッグス粒子
- レプトクォーク
- アクシオン様粒子
- ダークセクター粒子
- 重いZやW
- ブラックホール (粒子ではありませんが。。。)
- …

# 超対称性(SUSY)の導入

フェルミオンとボソンの間の対称性

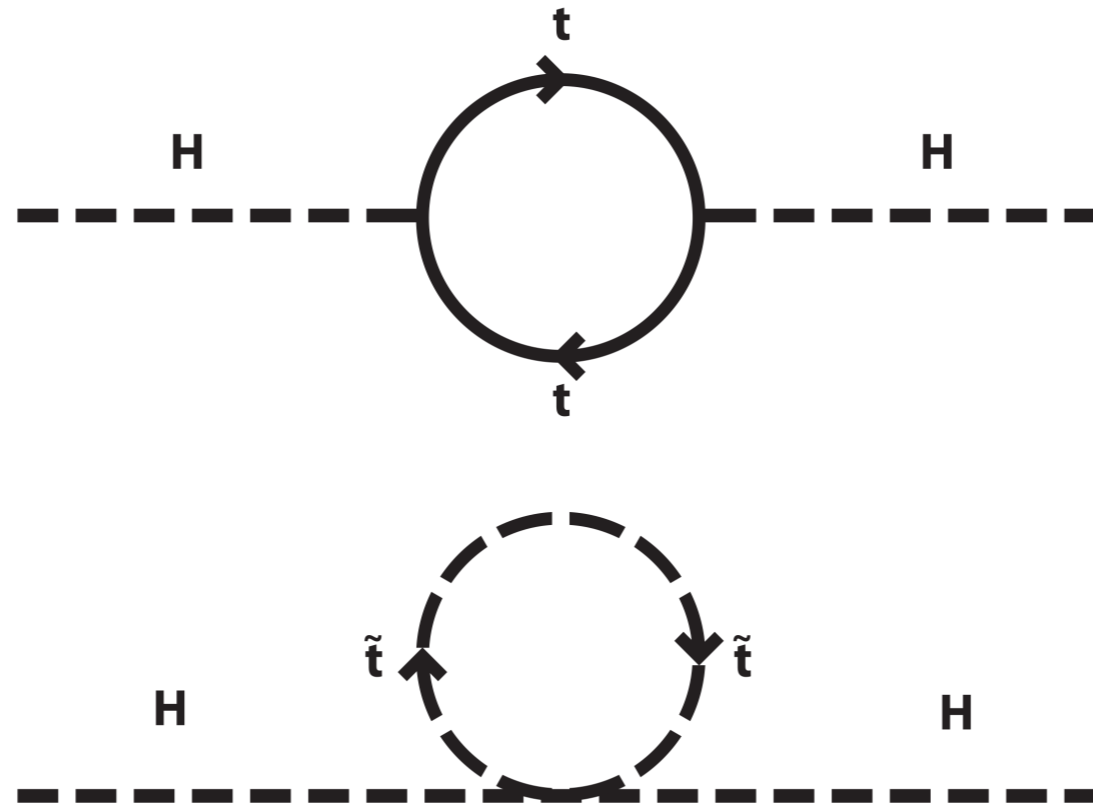


- 超弦理論ではフェルミオンを作るために、通常の空間の他に「超空間」を考える。
- 超空間の空間対称性 = 超対称性
- 素粒子物理の枠組みでは、超対称性粒子として現れるはず。

- SUSYの電弱フェルミオン
  - ビーノ, ウィーノ, ヒッグシーノ
- 質量固有状態を電荷ある無しで、チャージーノとニュトラリーノと呼ぶ

# 超対称性(SUSY)の導入

フェルミオンとボソンの間の対称性

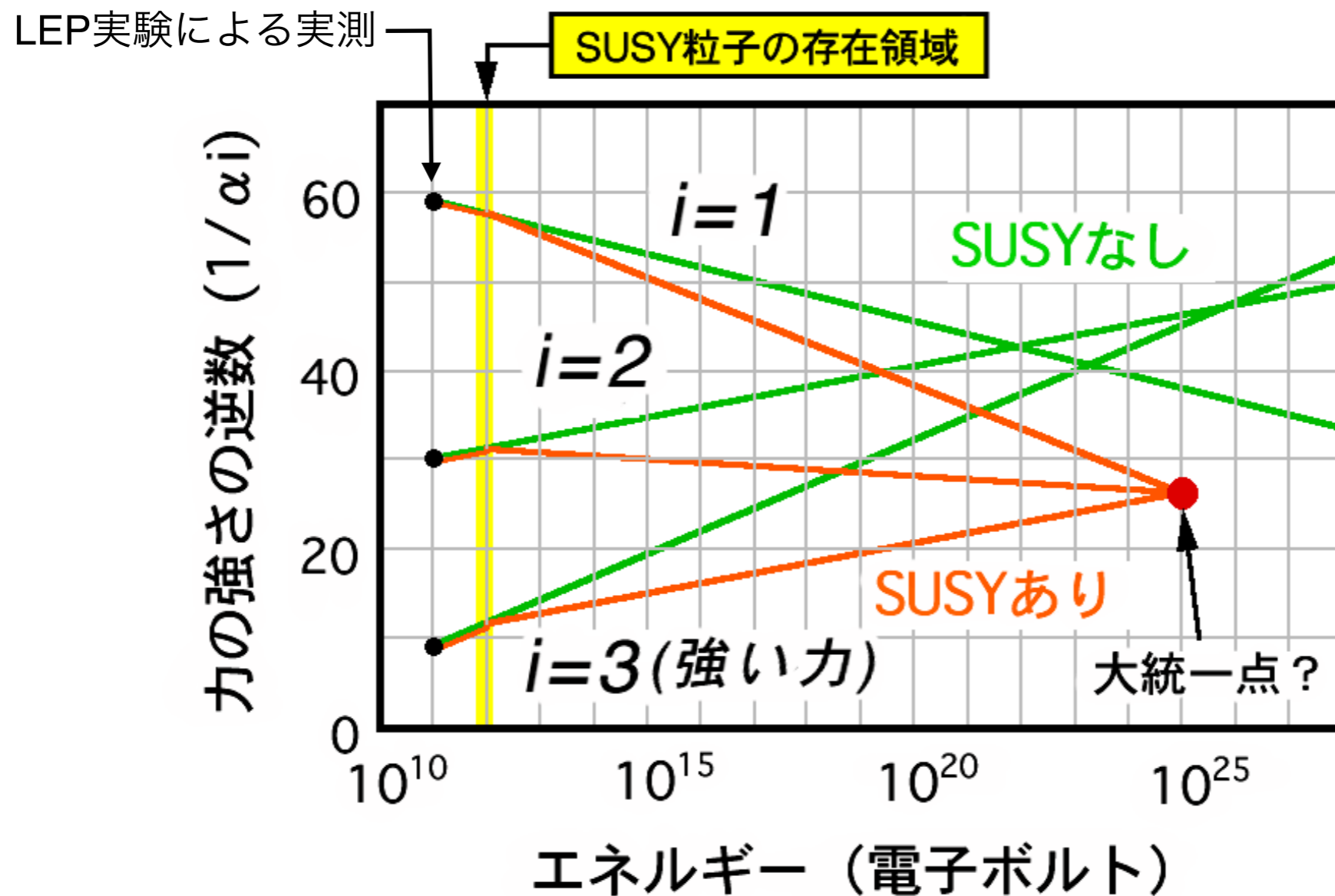


トップクォークと対になるボソンもあると、補正の効果がキャンセルされるて発散を抑えられる。

いままでの理論では説明できない現象、  
秩序、規則性の背後には新たな理論がある

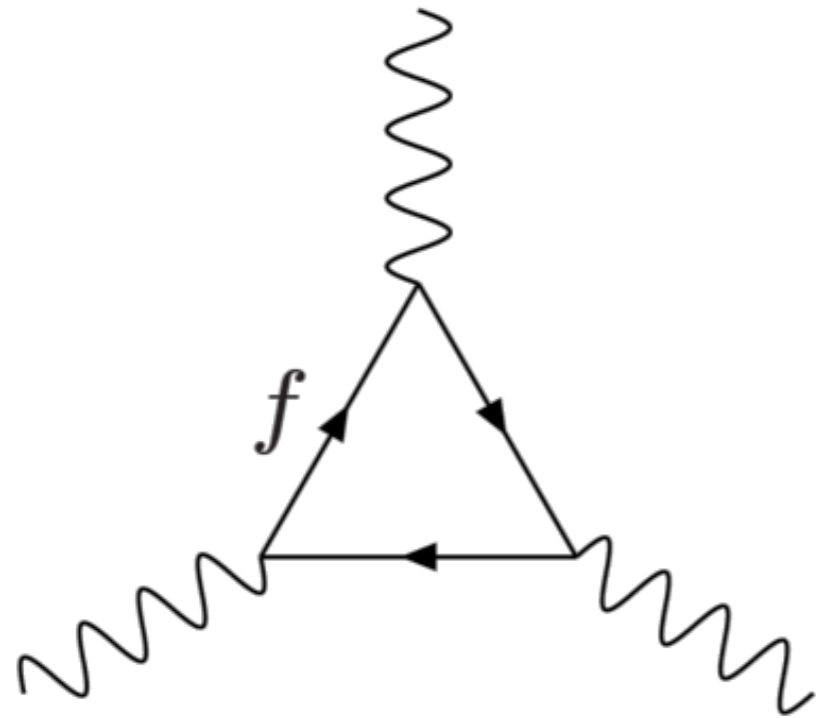
SUSYを考えると、偶然の一致がなくなる  
("自然さ"を回復)

# 力の大統一



超対称性粒子がO(TeV)だと三つの力が統一することを示唆。

# SUSYのヒッグスセクター



ゲージ場と相互作用するフェルミオンのチャージは合計すると0にならないといけない。(0でないと、確率密度が発散する)

例えば、SMの電荷をあわせて0

$$3 \times \frac{2}{3} + 3 \times \left(-\frac{1}{3}\right) + 0 + (-1) = 0$$

クォークの色の数

u電荷

d電荷

$\nu$ 電荷

e電荷

ヒッグシーノはフェルミオン

- ヒッグス粒子が一つしかない、ヒッグシーノも一つしかなくてチャージをもてない
- (ハイパーチャージが逆の)ヒッグス二重項が二つあると問題ない

SUSYがあると、他にもヒッグス粒子がある

(実際は4個増える)

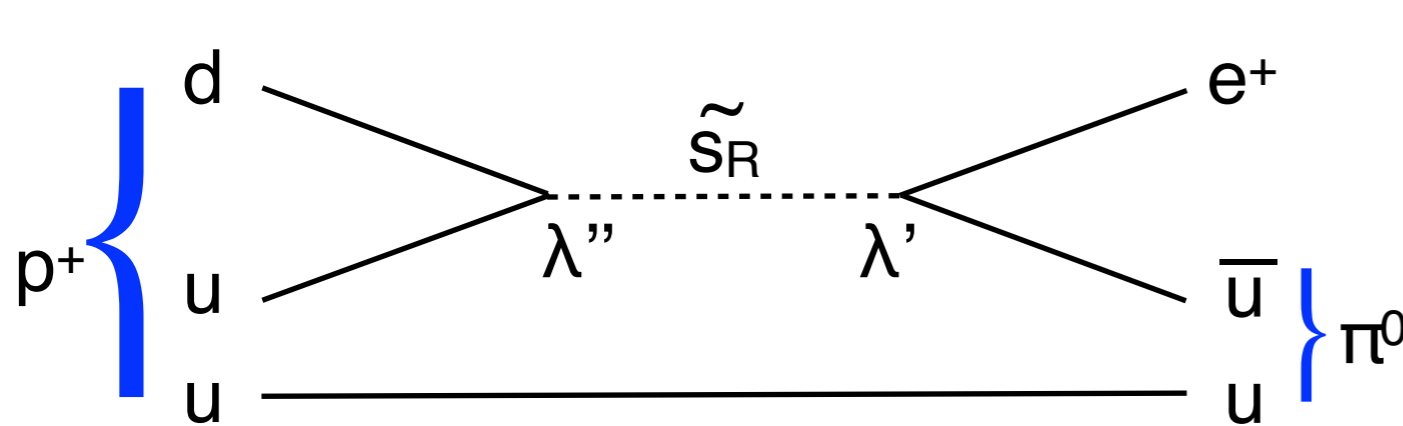
# R パリティの導入

単純に超対称性粒子を導入するだけだと、スカラー-SUSY粒子と標準理論のフェルミオンの間の湯川相互作用で、陽子崩壊やフレーバー非保存のレプトン崩壊( $\mu \rightarrow e \gamma$ )が起きて観測と矛盾する。

→ これを抑制するために、 $R = (-1)^{2S+3B-L}$ を導入。

標準理論粒子は $R=+1$ , SUSY粒子は $R=-1$ となる。

$$\frac{1}{2}\lambda^{ijk} L_i L_j \bar{e}_k + \lambda'^{ijk} L_i Q_j \bar{d}_k + \mu^i L_i H_u + \frac{1}{2}\lambda''^{ijk} \bar{u}_i \bar{d}_j \bar{d}_k$$



Rパリティが保存する場合は $\lambda'$ と $\lambda''$ は0になって、陽子崩壊を抑制できる。

結果として、

- ・ SUSY粒子は対生成され、対消滅する (単体では崩壊しない)
- ・ もっとも軽い中性SUSY粒子は安定になる。 → 暗黒物質候補

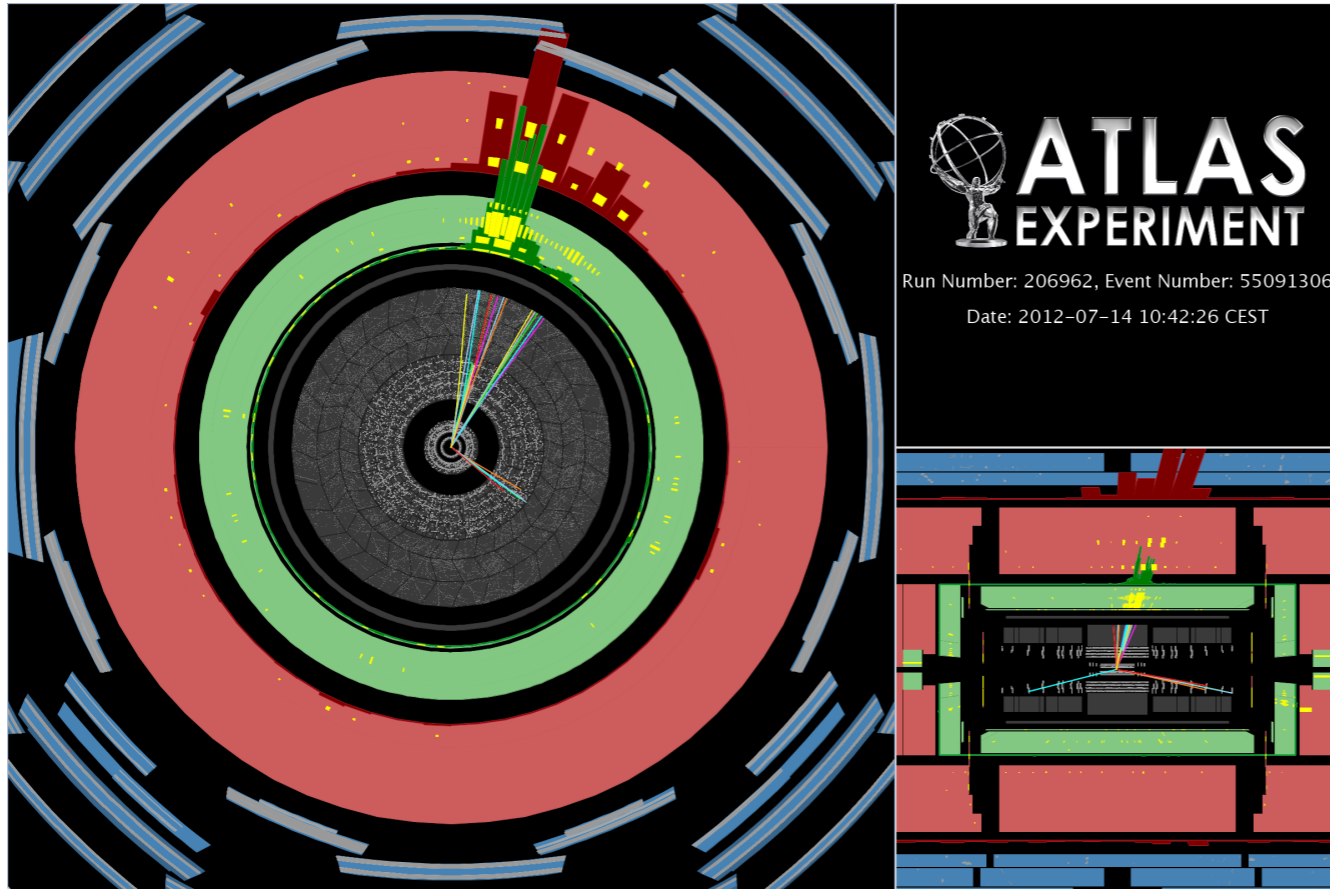
$O(100\text{GeV}-1\text{TeV})$ で、弱い相互作用する粒子(WIMPs)は有力候補

ということで

超対称性粒子が $O(100\text{GeV}-\text{TeV})$ にあるといろんな問題が解決できる。

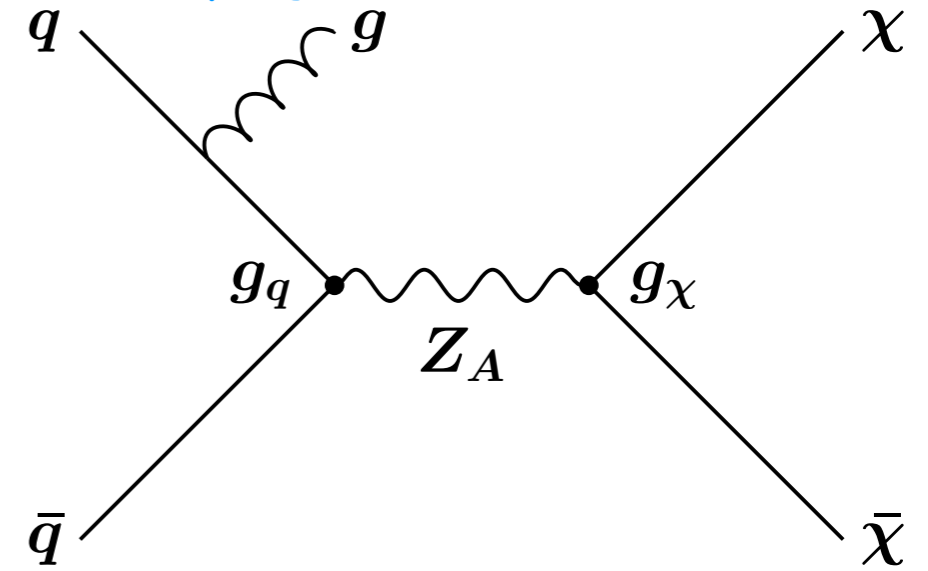
# 典型的な LHCでのダークマター候補探索

高い"消失運動量"とジェットを持つ事象の超過を探す。



グルーオン  
輻射

暗黒物質  
粒子



陽子の中の  
クォーク

- 重い粒子ができる時 = 入射粒子の運動量が大きい
- グルーオン輻射が持てる運動量空間が広い
- 大きな輻射が出る確率が高まる

衝突前の陽子ビームは横運動量を持たないので、衝突後の横運動量の総和は0になるはず。 → 見えない粒子の横運動の和を計算できる。

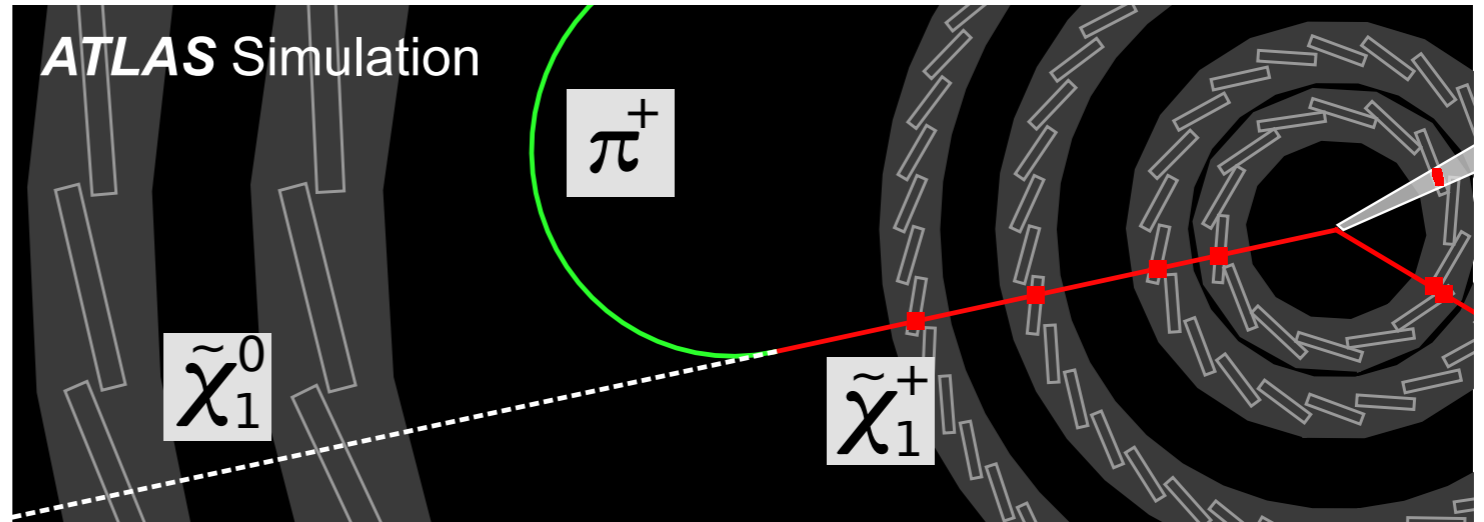
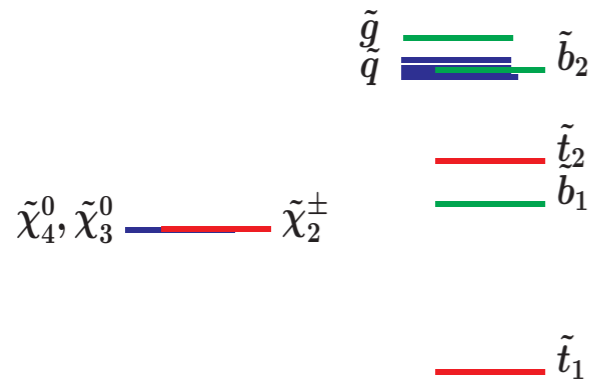
ただし、これだけだと背景事象が多いので、追加の条件をつける (SUSYもモデルに依存)

# 長寿命ウィーノ探索

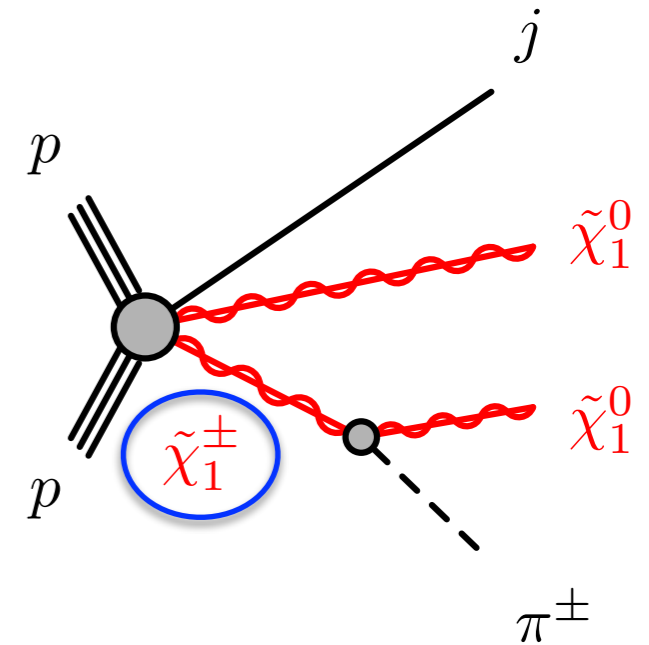
消失飛跡探索

(超対称性粒子のひとつ)

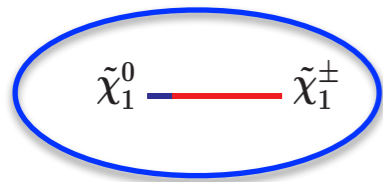
AMSB SUSY



ウィーノが暗黒物質の場合、荷電ウィーノとの質量差が小さくなって、荷電ウィーノが長寿命 (0.2 ns ~ 6cm)。



$\tilde{\chi}_2^0$  —



チャージーノ  
ニュートラリーノ

- ・ 暗黒物質粒子の直接生成
- ・ 新粒子を直接検出器で見る特別な解析。

ATLASでは、1 TeV付近を探索中

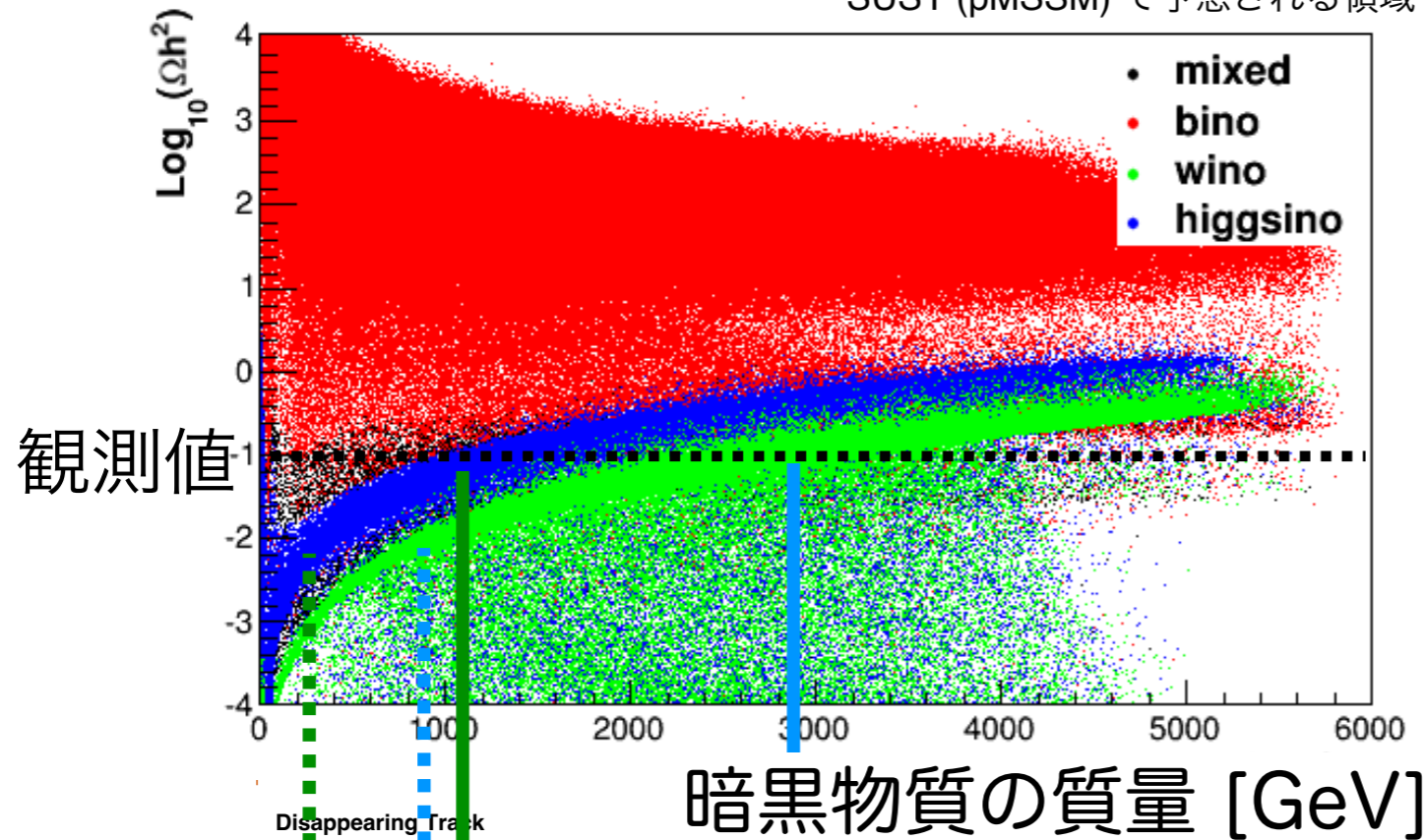
# 暗黒物質粒子を発見できるか？

将来円形加速器構想 (FCC)

ICEPPも参加

暗黒物質残存量

SUSY (pMSSM) で予想される領域

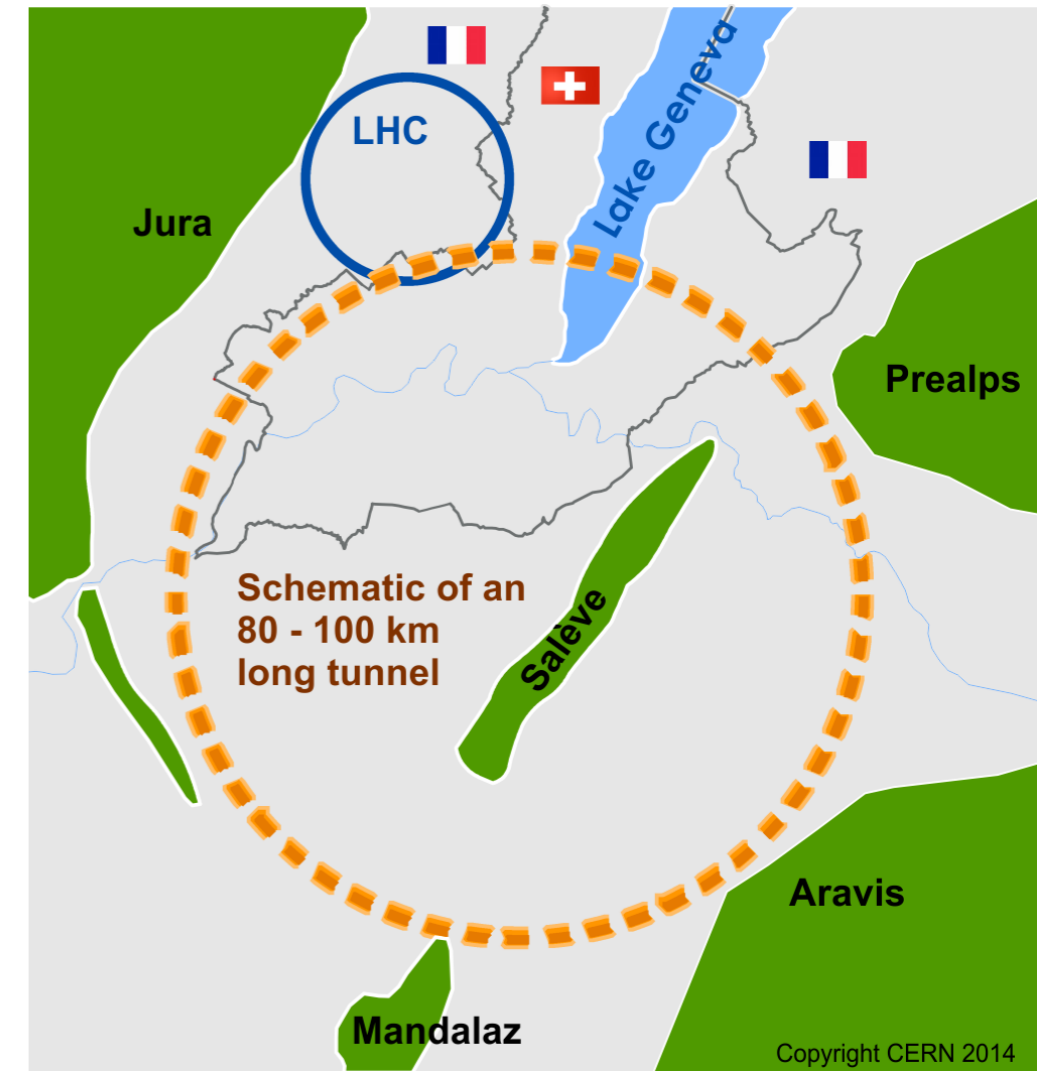
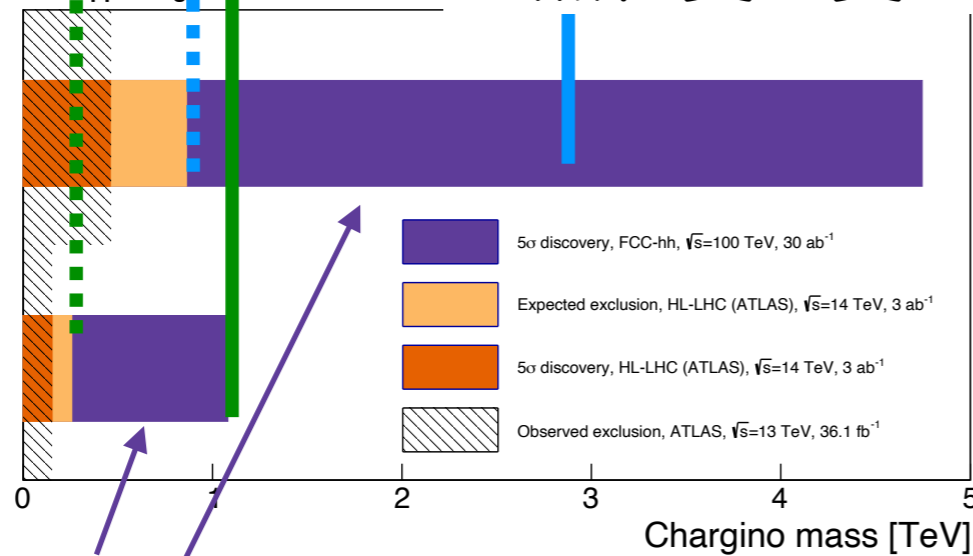


暗黒物質の質量 [GeV]

ウィーノ

ヒッグシーノ

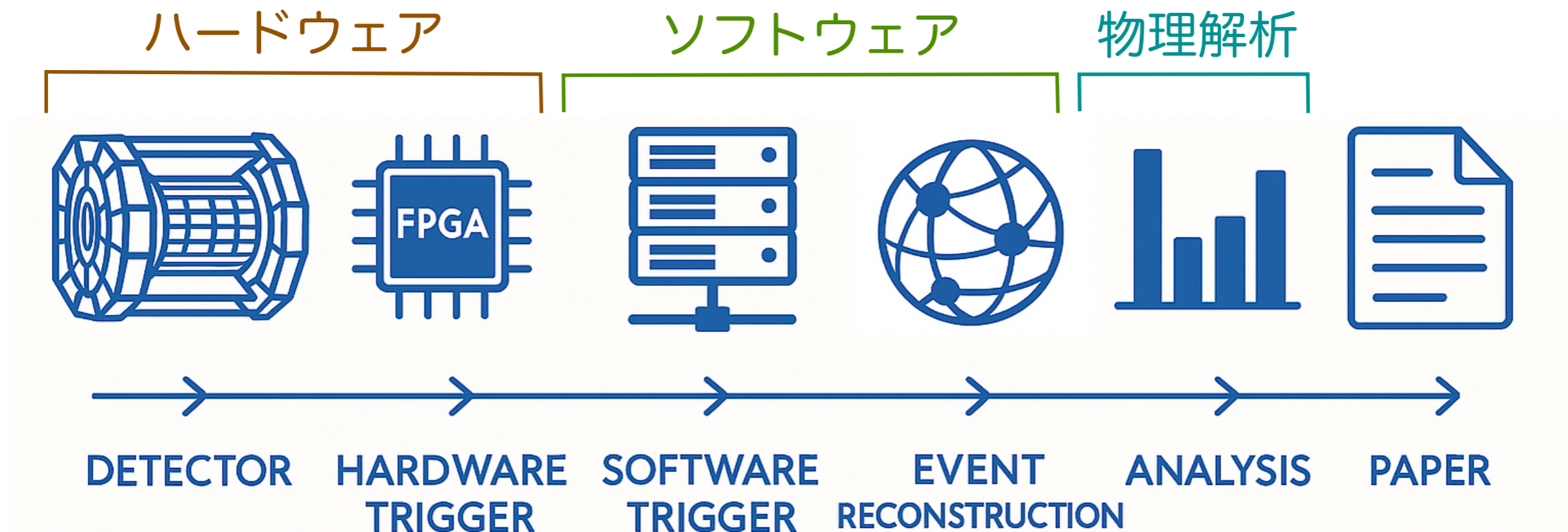
FCCでの感度



ピュアな  
ウィーノやヒッグシーノ  
は確実に発見できる

# 研究室の宣伝 1: ATLAS

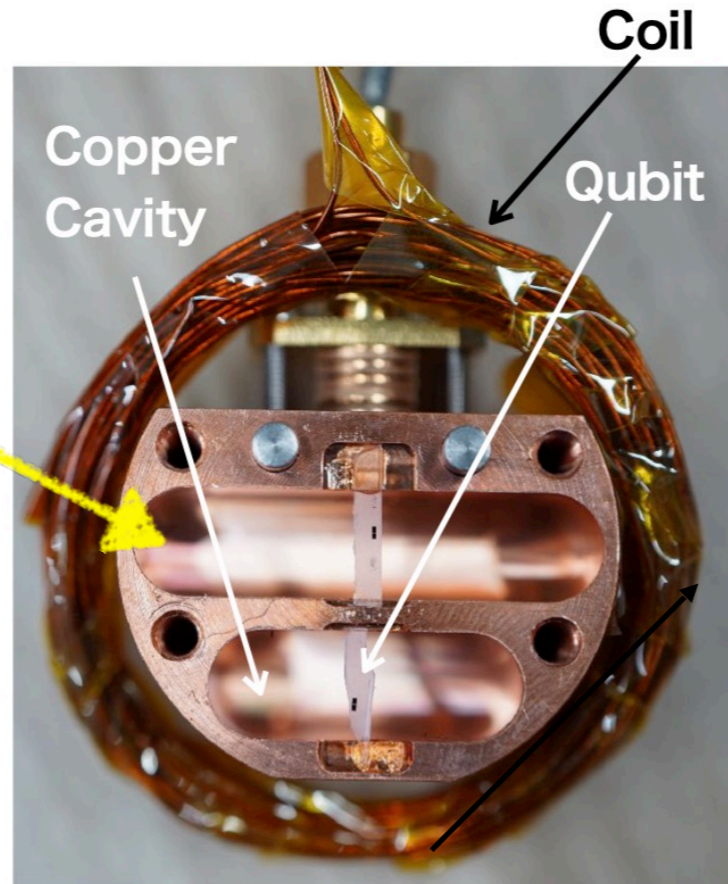
- 修士課程では [ソフトウェア](#) を使った研究
  - 超対称性粒子のウィーノを探すための、"短い飛跡"をHL-LHCで使えるようにする。新しい検出器の特徴を使った最適化。
  - HL-LHCでは 新たにGPUをトリガーに利用する。GPUを使った飛跡再構成を整備して、新物理を捉えるアルゴリズムを開発
- 博士課程では (修士研究で作ったものを使った) [ATLASの実データを用いた物理解析](#) (Higgs, 新粒子探索...)



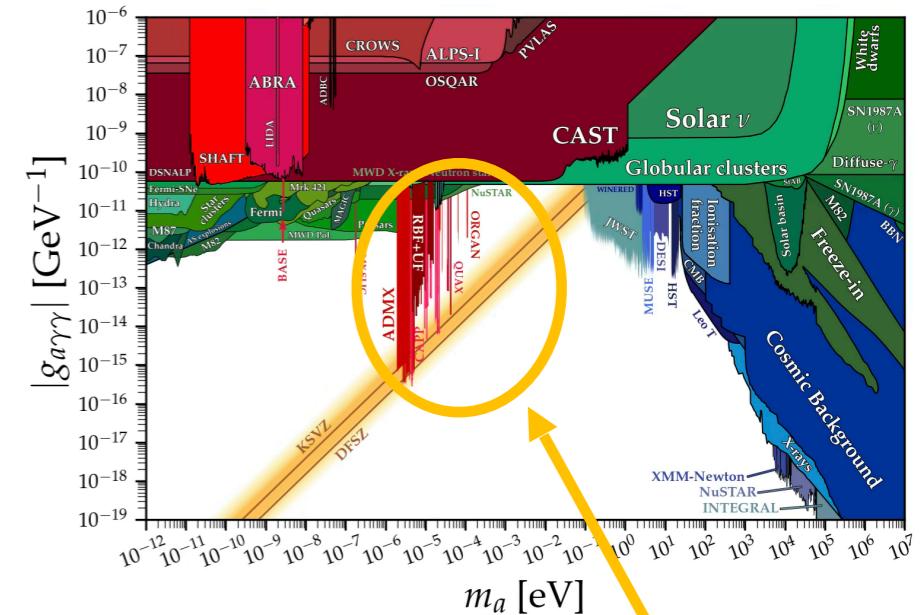
# 研究室の宣伝 2: DarQ実験

電場

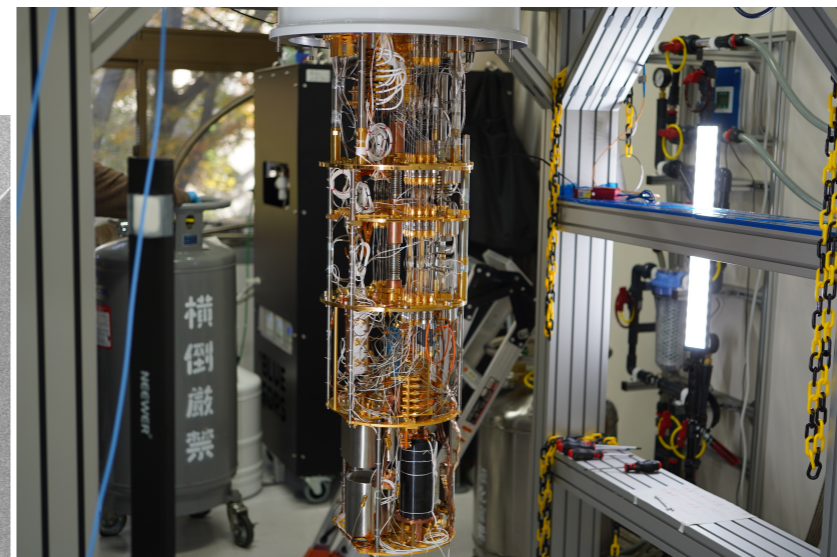
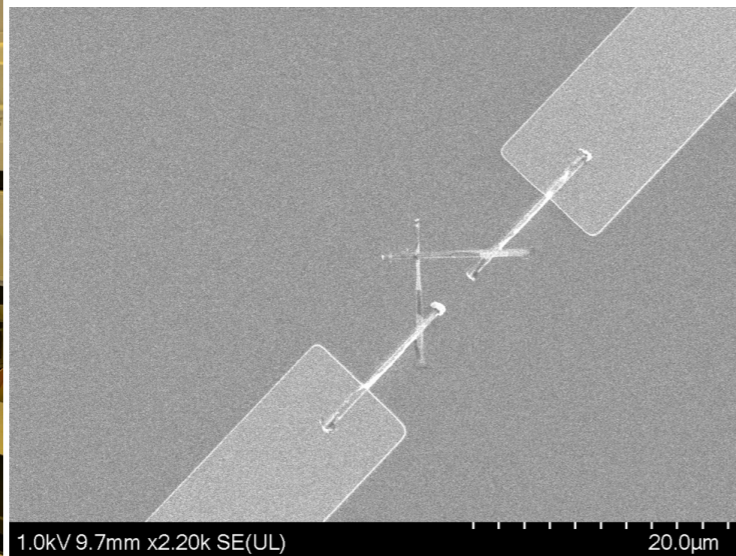
ダークマター



- ・ ハードウェアを扱いたい人向け
- ・ 少人数 (自分の実験)
- ・ 新技術



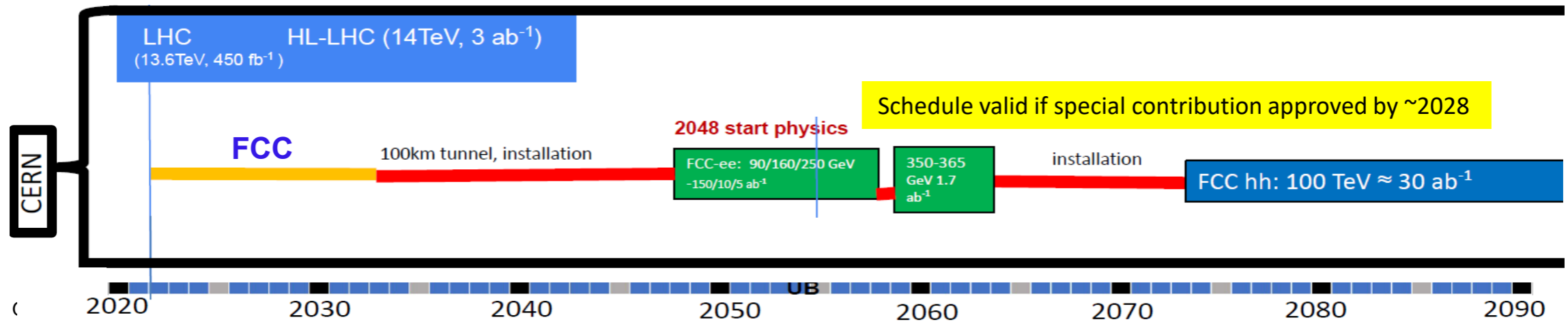
暗黒物質探索用の  
量子ビットを自作



「強いCP問題」を解決するアクシオンの発見を目指す

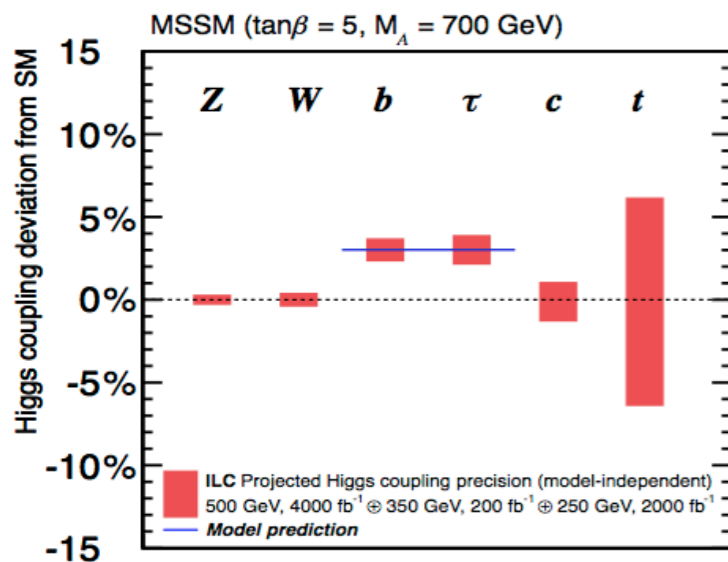
量子コンピューター技術を活用した実験装置で暗黒物質を探索

# 研究室の宣伝 3: FCC計画

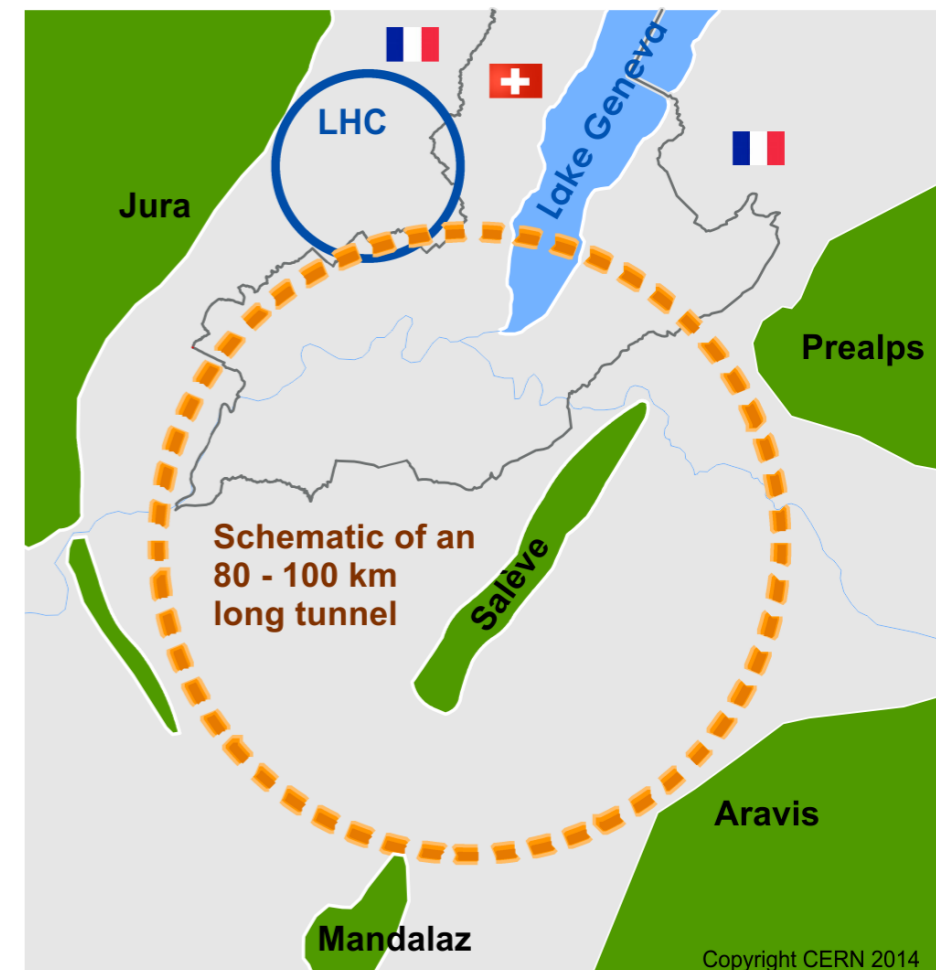
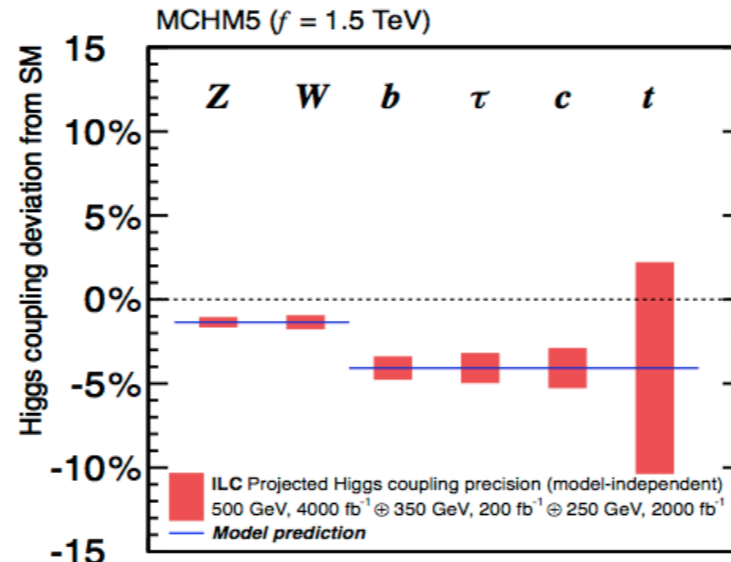


- HL-LHCの次の世界的な旗艦計画はヒッグスファクトリー
- ヨーロッパはFCC-eeを推進
  - 2048年頃のスタートに向けて研究中
  - ヒッグス粒子の精密測定で新物理を探す

**Supersymmetry (MSSM)**



**Composite Higgs (MCHM5)**



さらにその先には ~100 TeV の計画 (FCC-hh)

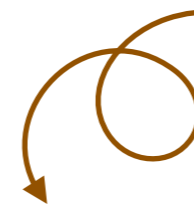
# まとめ

- ヒッグスは発見して標準理論は完成した様に見えるけれど、説明できないことが多いすぎる
  - ・ 標準理論を超える、より深い物理理論があるはず。
  - ・ 超対称性理論は多くの問題は解決できる有力な理論。O(100GeV-TeV)に新粒子があること示唆がある。
- 実験研究の醍醐味は、今まで誰も見たことがないデータを解析し、発見するチャンスがあること。
- (宣伝) 当研究室では三つのアプローチで新物理を探求
  - ・ 1. ATLAS実験で重い(100GeV-TeV)新粒子探索
  - ・ 2. DarQ実験で軽い( $\mu$ eV)新粒子探索
  - ・ 3. 将来計画を推進し、ヒッグス粒子の精密測定から間接探索  
さらにその先には  $\sim 100$  TeV の計画 (FCC-hh)

バックアップ

# 自己紹介

ICEPPの現行実験のひとつ



→ 学部・修士は早稲田。学部4年生でMEG実験を始める。 (同研究室では暗黒物質探索も)

→ 博士で東大に入学し、MEG(最初のフル検出器データ)で博士論文

→ 研究員としてもMEGで第1期実験の最終結果を出す

→ ATLAS に移って超対称性粒子探索 + コンピューティング

→ 現在: 日本で、ATLASの超対称性粒子探索 + 量子センサーで暗黒物質探索 + 将来実験を少し

スミス・フランク

Eur. Phys. J. C (2016) 76:434  
DOI 10.1140/epjc/s10052-016-4271-x

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL C



Regular Article - Experimental Physics

**Search for the lepton flavour violating decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$   
with the full dataset of the MEG experiment**

MEG Collaboration

EUROPEAN ORGANISATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)



Submitted to: EPJC

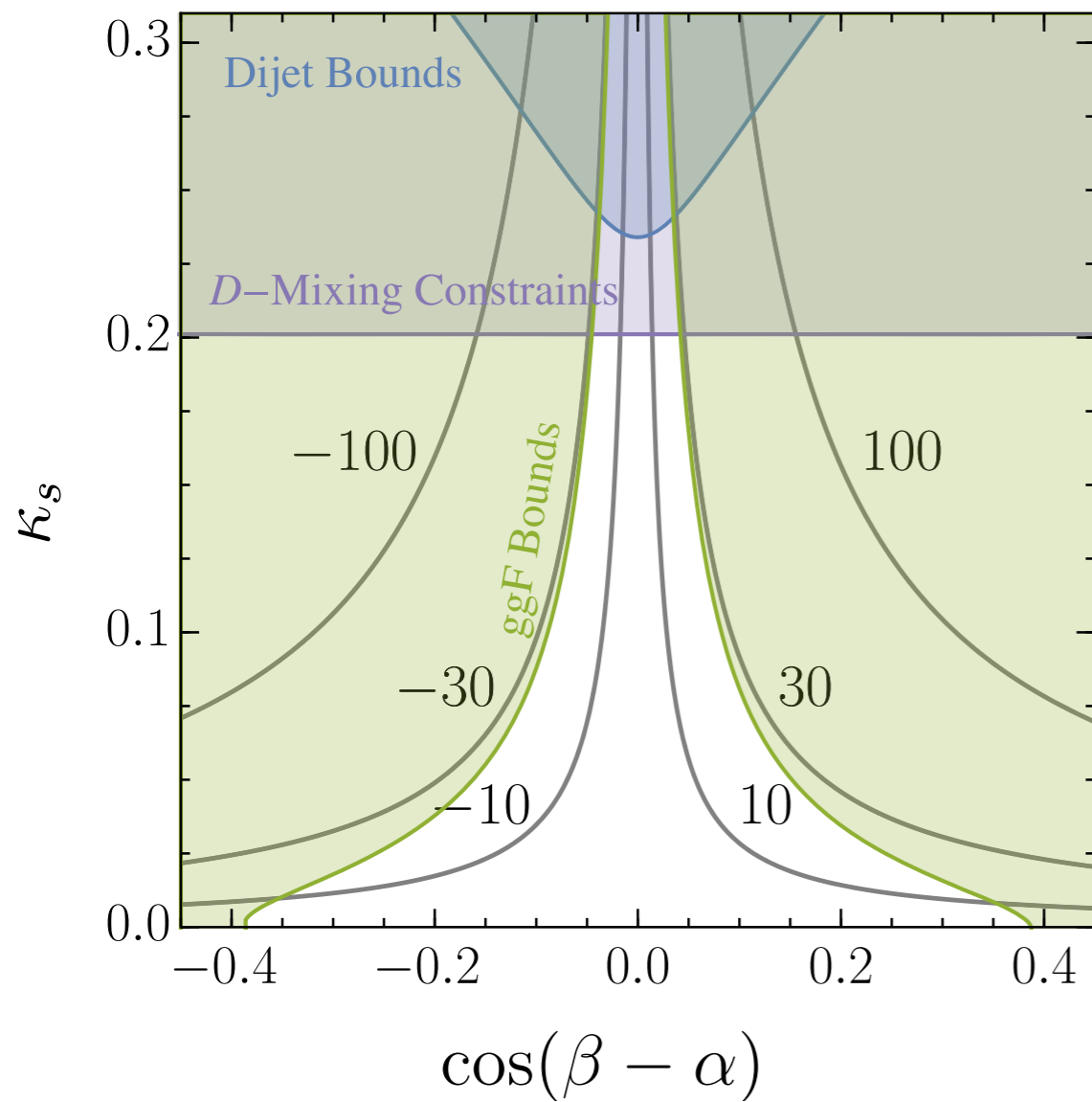


CERN-EP-2021-209  
10th January 2022

**Search for long-lived charginos based on a  
disappearing-track signature using  $136 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$   
collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  with the ATLAS detector**

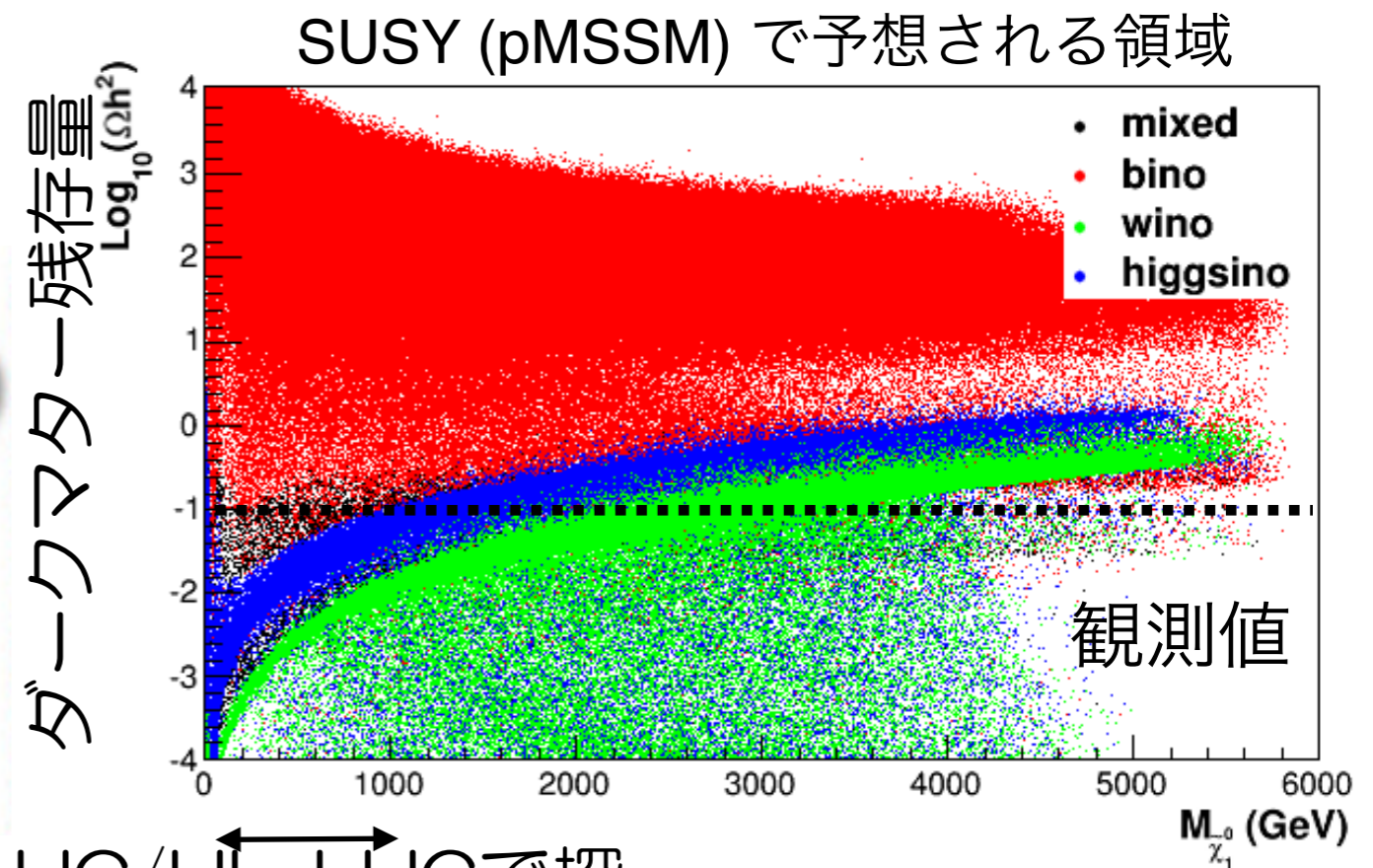
The ATLAS Collaboration

$$\lambda_{s\bar{s}}^h / \lambda_{s\bar{s}}^{h\text{SM}}$$



2HDMでは  $H \rightarrow s\bar{s}$  崩壊分岐比が  
標準理論の10倍以上になりえる

# ニュートラリーノ



ニュートラリーノ:

中性の強い相互作用をしないフェルミオンSUSY粒子

ビーノ: 対消滅断面積が小さいので、ダークマターが残りすぎる

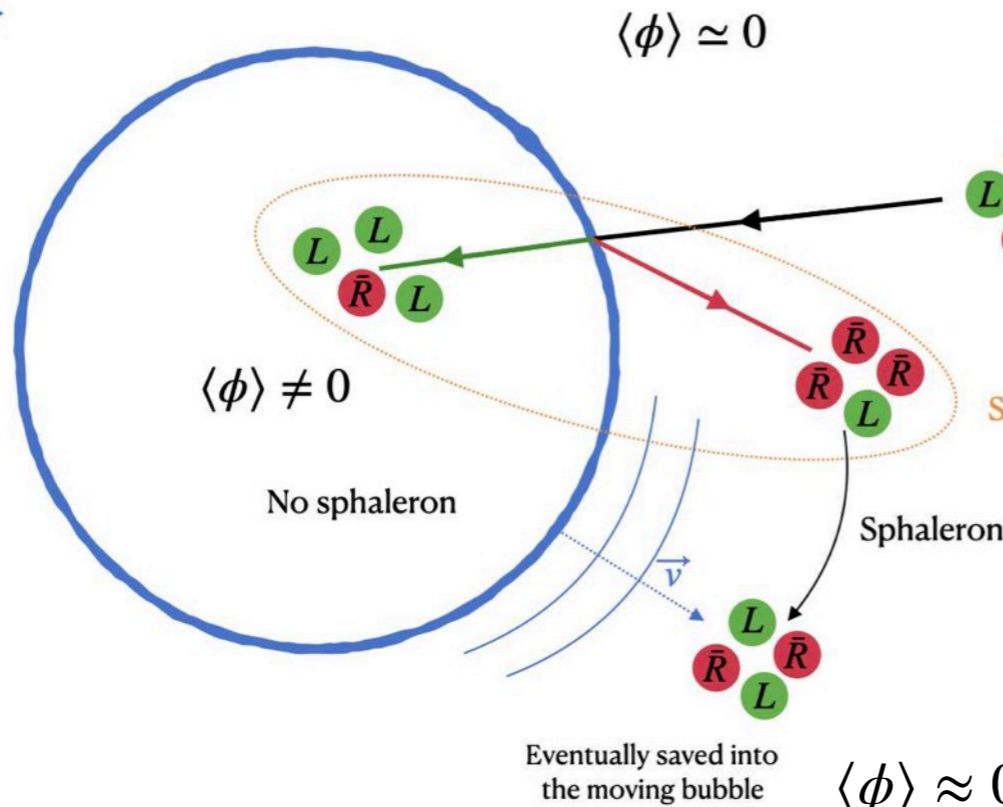
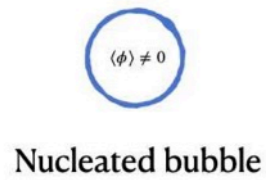
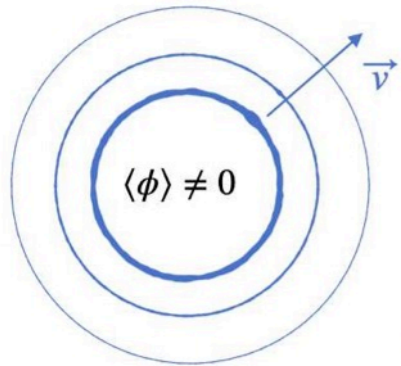
ウィーノとヒッグシーノ: 観測された残存量を実現できる。ダークマター全部がこれの場合の質量はそれぞれ**3TeV** (ウィーノ), **1TeV** (ヒッグシーノ)と予想される。他のもの(アクシオン等)もある場合はこれよりも軽くなる。

**TeV領域のダークマターをLHCで作れる?**

# 電弱バリオジェネシス

— 物質優勢の宇宙を説明するシナリオのうち近い将来検証可能なシナリオ —

Growing bubble



• サハロフの3条件

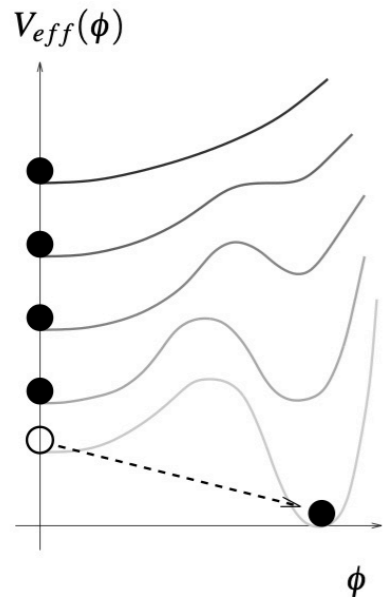
1. バリオン数の破れ
2. C対称性とCP対称性の破れ
3. 非平衡の実現:  $A \rightarrow B$  と  $B \rightarrow A$  の確率が異なる

左巻き粒子と右巻き反粒子からスタート  
(反対の組は関与しないモデル)

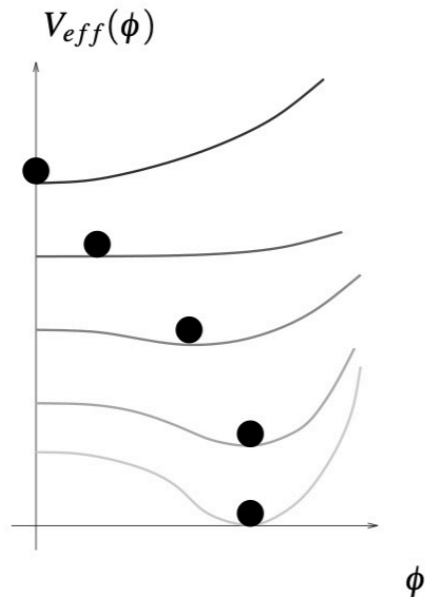
ヒッグスがある真空では、バリオン数が保存。ヒッグスが  
ない真空ではバリオン数が破れる過程 (スファレ  
ロンプロセス) が起こる。

CP対称性の破れで、粒子と反粒子で壁での”透過率”、  
反射率”が違う

$\langle \phi \rangle \approx 0$  の領域と  $\langle \phi \rangle \neq 0$  の間に「壁」が必要。



1st order



2nd order

一次相転移 (左の図) が必要。

標準理論では、このシナリオはおきない

- 観測されているCP対称性(CKM)は小さすぎる
- ヒッグスが重すぎる

**観測されたヒッグス以外にスカラー粒子が必要**