

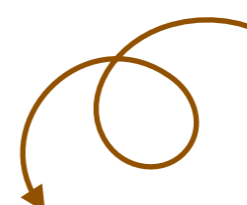
ICEPP学部向け特別セミナー2024

LHCでの新物理探索の最前線（超対称性探索を中心に）

澤田 龍

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 + 量子を含むコンピューティング

スライス・フランス

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

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL C  CrossMark

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



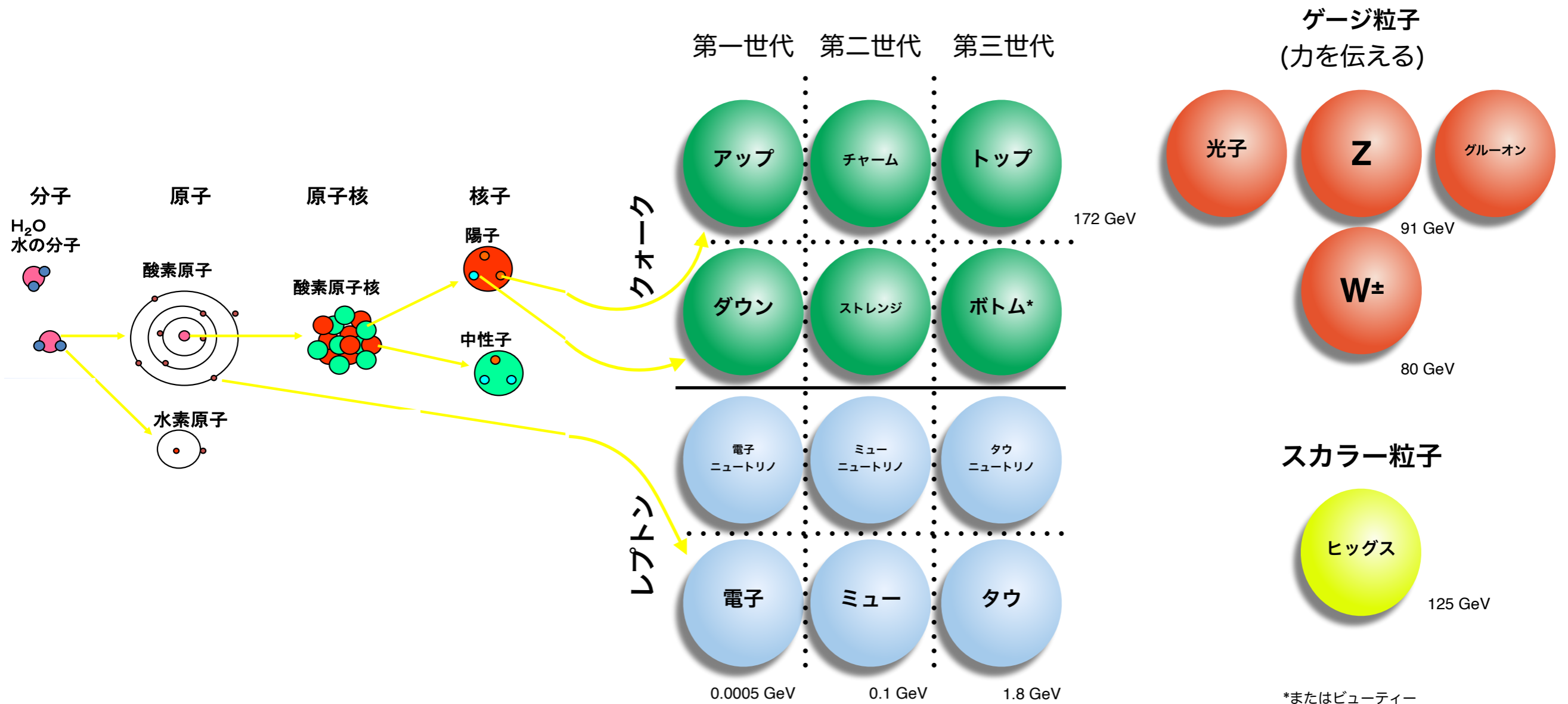
CERN-EP-2021-209
10th January 2022

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

The ATLAS Collaboration

素粒子物理

素粒子



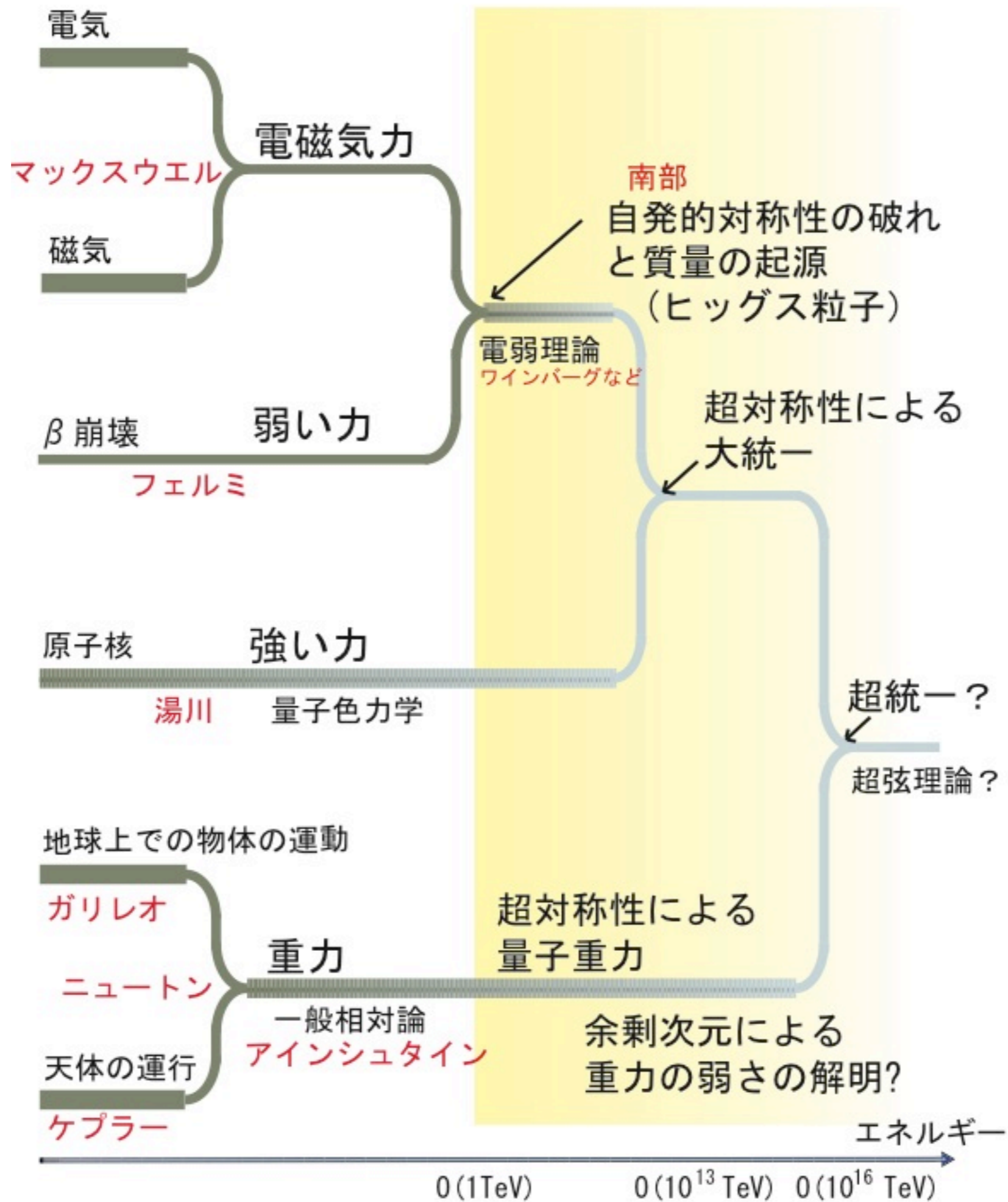
- 電子の発見からはじまり、理論と実験の両輪で「標準理論」を作り上げてきた
- 2012年のHiggs粒子の発見によってひとまず「完成」

素粒子物理(実験)の発展

- 電子とハドロンの発見から始まり、
~100年間**粒子の発見**があった。
 - 初期には宇宙線から、その後は加速器によって粒子を作って発見
 - 粒子測定器とデータ解析をする**計算機の発展**
- 粒子や力の性質の精密測定によって理論を検証
- 場の理論に基づく相互作用の理論とそれに基づく**標準理論の完成**
 - 1897 : 電子
 - 1890年代 : α , β , γ
 - 1917年 : 陽子
 - 1932 : 中性子
 - 1932 : 陽電子
 - 1936 : ミュー粒子
 - 1947 : パイオン
 - 1955 : 反陽子
 - 1943-59 : ストレンジネス
 - 1950- : パリティ非保存
 - 1956 : ニュートリノ
 - 1962 : 電子型とミューオン型のニュートリノ
 - 1964 : CP非保存
 - 1973 : 中性カレント (Z)
 - 1974 : チャーム (J/ ψ)
 - 1975-79 : ジェット、グルーオン
 - 1975 : タウ
 - 1977 : ボトム
 - 1983 : W,Z粒子
 - 1995 : トップクォーク
 - 1998 : ニュートリノ振動 (質量)
 - 1999- : CP対称性についての小林・益川理論の正しさを証明
 - 2012年7月4日 : Higgsの発見

今までの物理進展のパターン

- **今までの理論では説明できない現象や粒子の発見**
 - ニュートリノ
 - ミュー粒子
 - “V粒子” → K中間子
 - たくさんのハドロンの発見 → クォーク模型
- **自然さや簡潔さを求めて、より基本的な法則や模型を探求**
 - 天体の力学と地上の力学の統一 (万有引力): ニュートン
 - 電場と磁場の統一: マクスウェル
 - 電磁場と弱い力の統一: ワインバーグ=サラム理論 → ヒッグス粒子の予言
 - 元素の周期的な性質 → 原子核と電子配置
 - 陽電子の予言
 - チャームクォークの予言



標準理論が「完成」。では、なぜ研究？

- 「標準理論」では、説明できない謎がある
 - なぜニュートリノに質量があるのか？
 - 初期宇宙では何が起きたのか？
 - なぜ宇宙には物質が残っているのか？
 - なぜ「素粒子」はたくさんあって、一定のパターンがあるのか？
 - 宇宙初期には四つの力が統一されていたのか？
 - 陽子と電子の電荷はなぜ同じ？
 - Higgs粒子はなぜこんなに軽いのか？ (階層性問題)
 - 理論と実験のずれ。例: ミュー粒子の異常磁気モーメント
 - ダークマター、ダークエネルギーは何か？

これらを統一的に答えられる究極の理論とは？

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、 τ 、B、ミュー...)
 - 電気双極子測定
 - 陽子崩壊
- ★ ダークマター(候補)の探索 (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
 - ...

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

量子重力

真空・時空

トッパークォーク・
Z・W 精密測定

階層性問題

量子重力

GUT

超対称性の決着？
Compositeの決着？
2nd Higgs？

Higgs 精密測定

次世代コライダー

バリオン
数生成

CPの破れの物理

暗黒セクター

フレーバーの精密測定

暗黒物質

フレーバー・世代起源

量子重力

量子重力

万物の理論

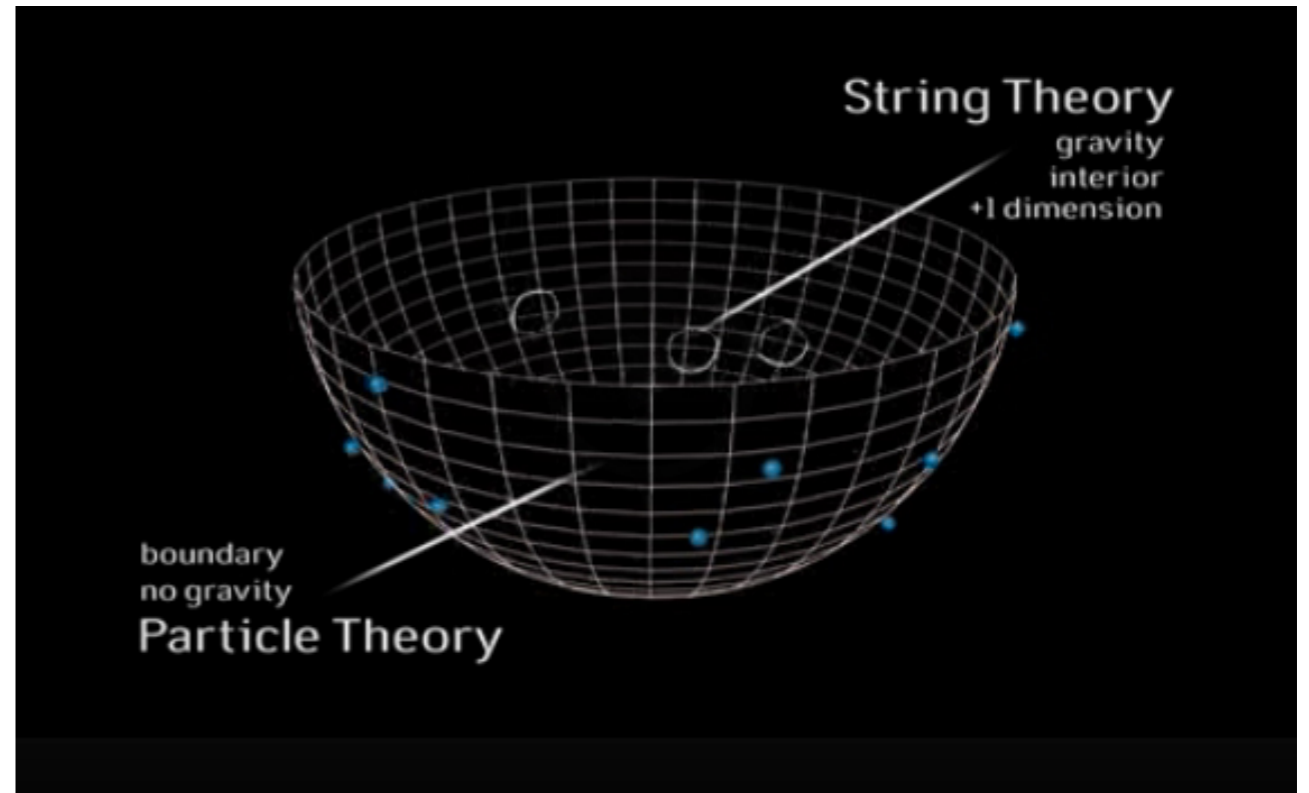


Illustration by [Annenberg Lerner 2013](#)

- 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
 - 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

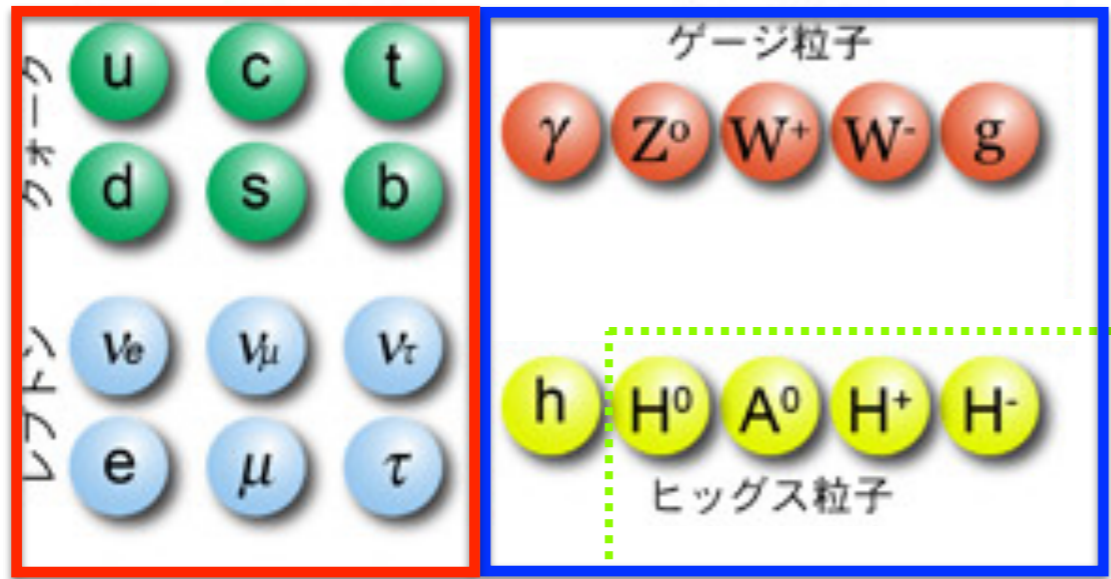
ATLASが探している新粒子

- 超対称性粒子
- カルツァクライン粒子
- 重い (右巻きの) ニュートリノ
- 重いヒッグス粒子
- 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
-

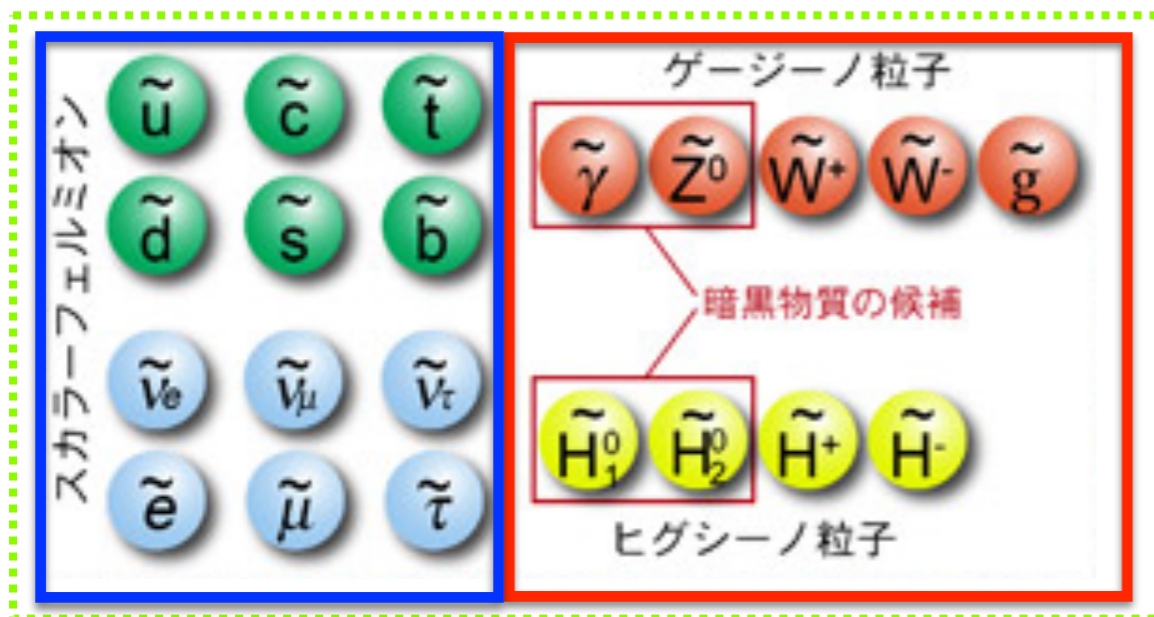
超対称性(SUSY)の導入

フェルミオンとボソンの間の対称性

フェルミオン 通常粒子 ボソン



超対称性粒子



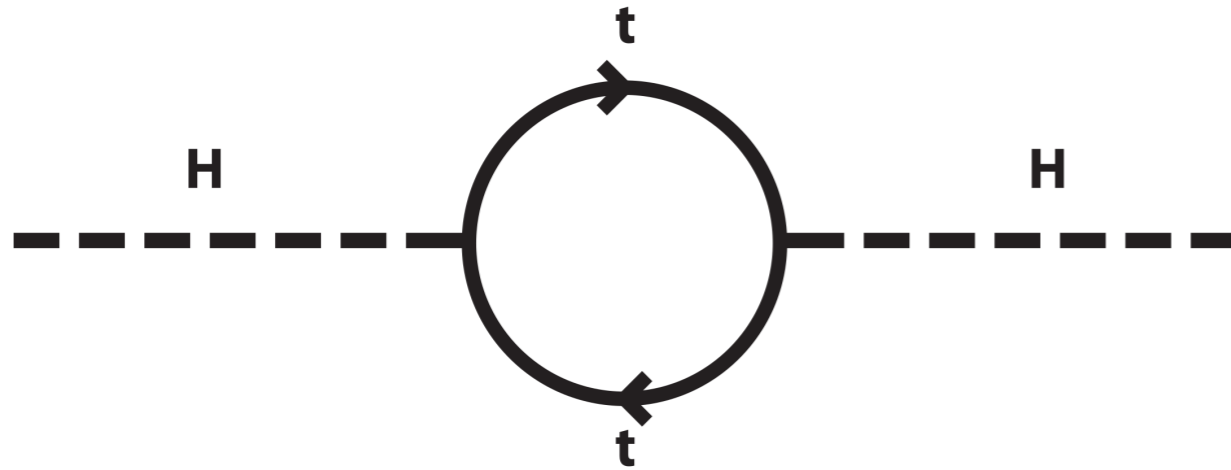
ボソン

フェルミオン

- 超弦理論では、通常の空間の他に、"グラスマン数"軸を持つ空間を持つ「超空間」を考える。
- ボソン: 普通の空間方向の弦の振動
- フェルミオン: グラスマン数方向の振動
- 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。

未発見

標準理論と階層性問題



観測されるヒッグスの質量(125 GeV)

$$= \text{裸の質量} - \text{量子補正}$$

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)



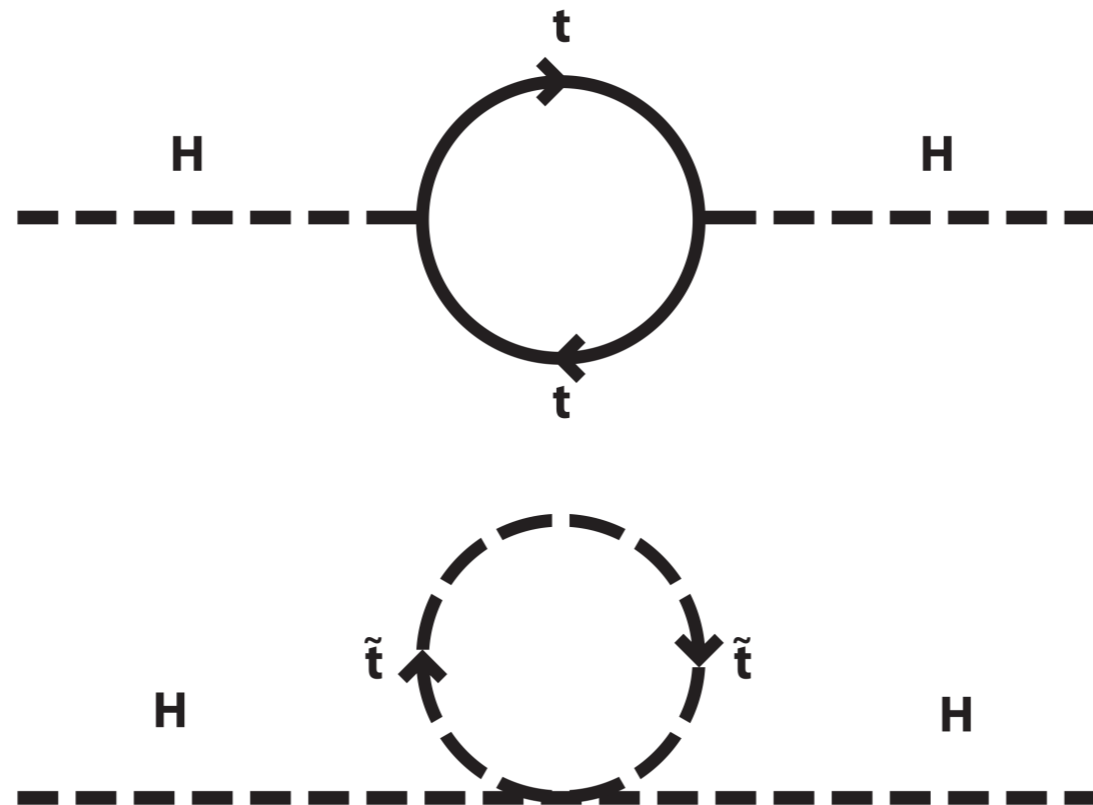
標準理論が高いエネルギーまで有効だとすると... $\Lambda: 10^{15} - 10^{19} \text{ GeV} ?$

大きな補正の効果で、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。**

超対称性(SUSY)の導入

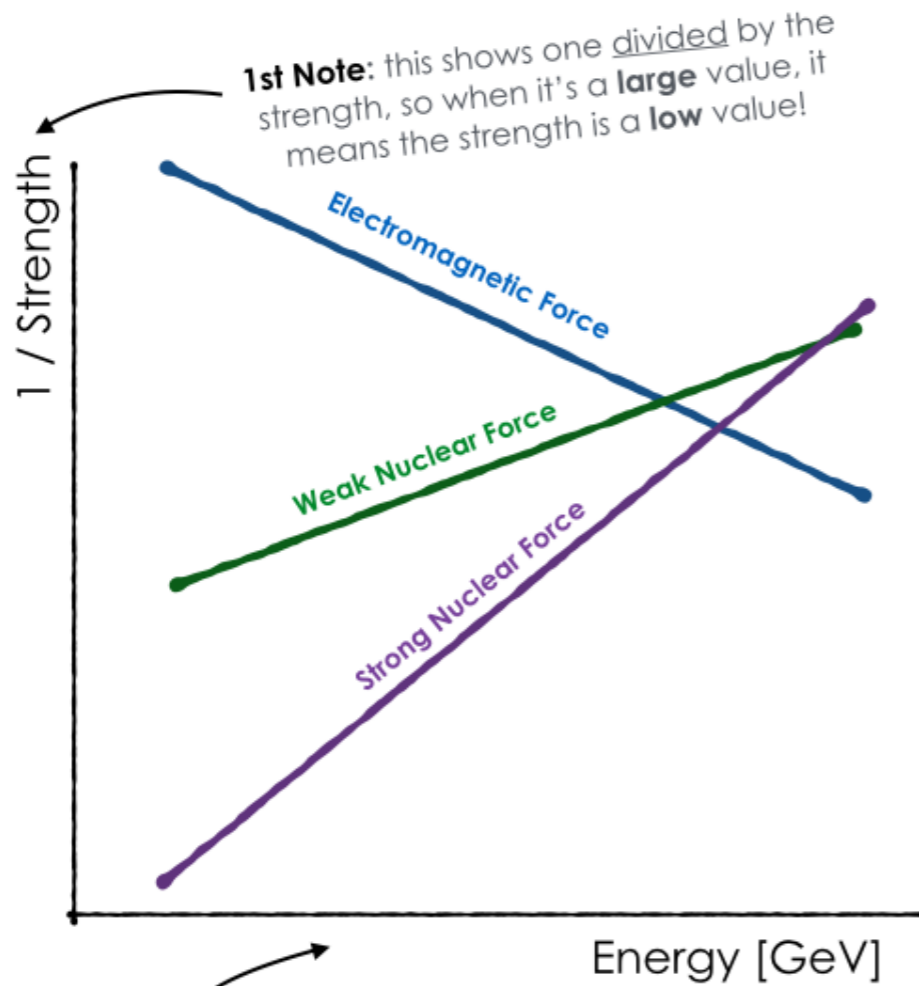
フェルミオンとボソンの間の対称性



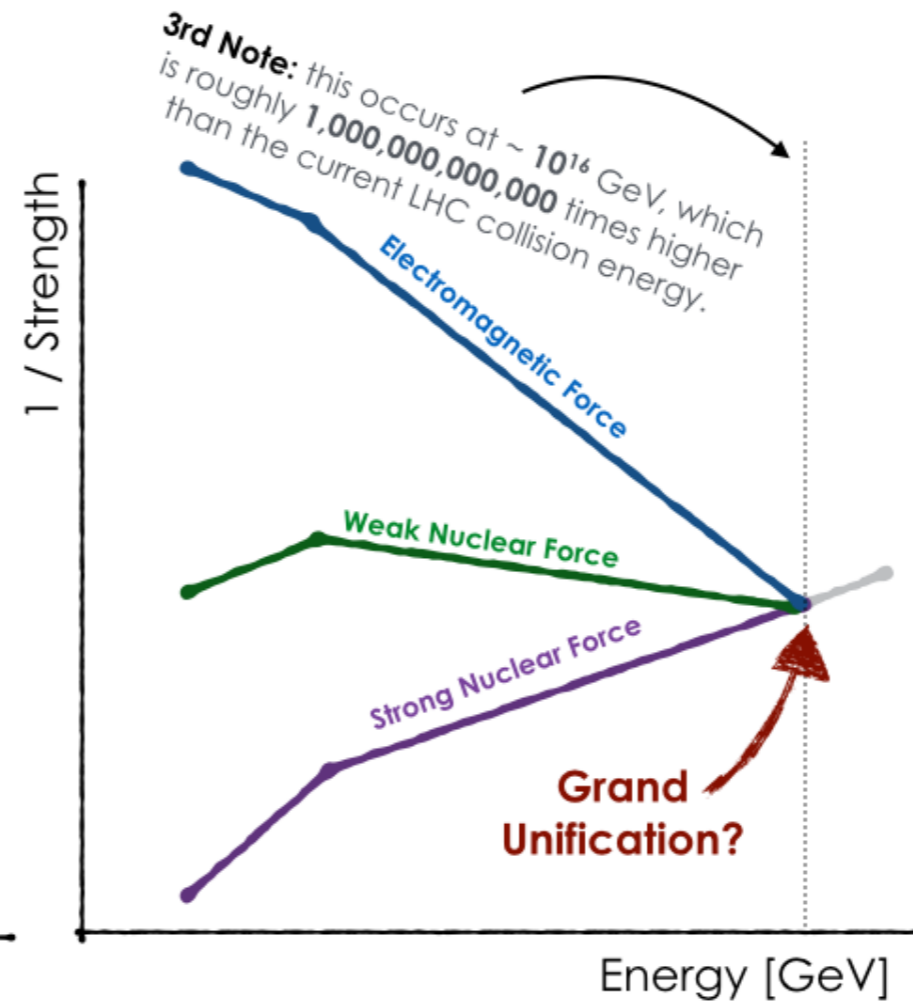
トップクォークと対になるボソンもあると、補正の効果がキャンセルされるで発散を抑えられる。

力の大統一

標準理論



SUSY

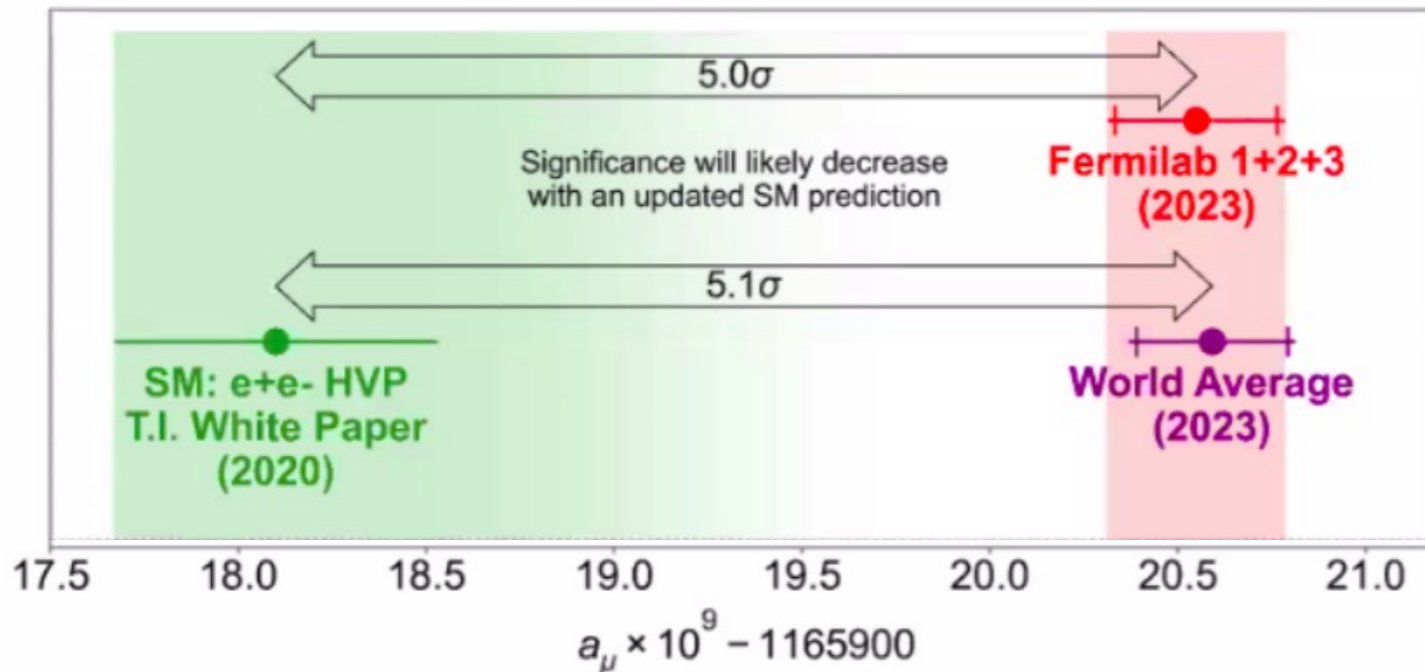


Graphs are sketched out and approximate only (there are no scales anyway), but for more info you check see here:
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/popular.html

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。

なぜ陽子と電子の電荷の大きさが同じなのかも説明できてしまう。

ミュオン異常磁気モーメント



ブルックヘブン研究所の測定 (1997-2001年)で、理論予想と測定にズレが見えていた。

→ 新物理の兆候？

同じ測定をさらに高い精度で行い
5 σ 以上の優位度で確認

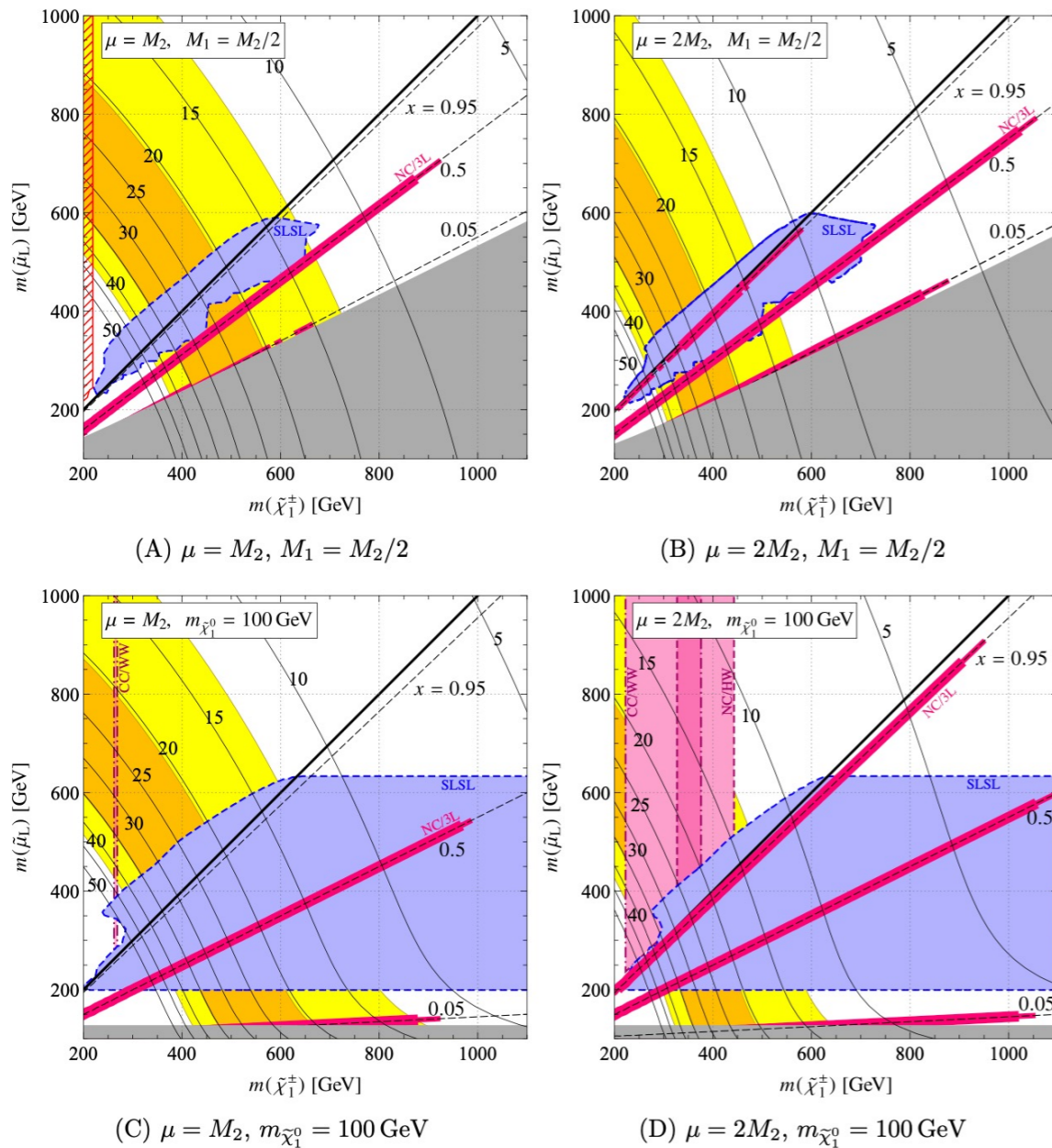
標準理論だけでこの結果を得る確率は
1 / 1,000,000 以下

→ **やっぱり新物理がある？**



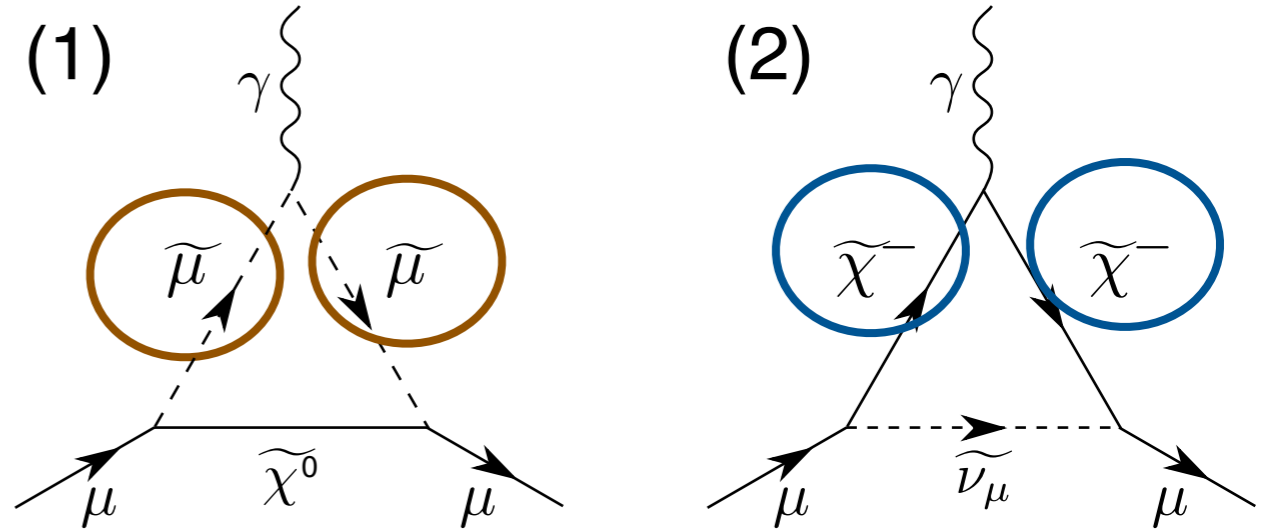
ミュオン異常磁気モーメント

磁気モーメント測定と、超対称性模型の関係



arXiv:2104.03217

緑と黄色: 測定されたズレを説明できる領域
グレー、赤、青: LHCの測定等から除外される領域



(1) ミュオン止スカラーのSUSYパートナーが200-300 GeVの質量の場合

(2) 荷電ウィーノのパートナーが300-350 GeVの質量の場合

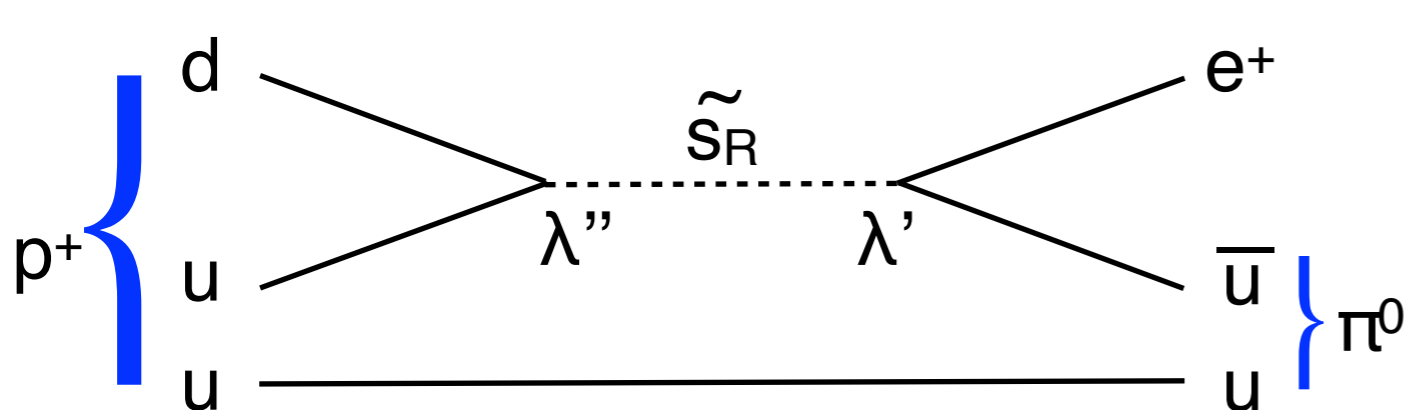
超対称性模型でズレを説明できる

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。



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

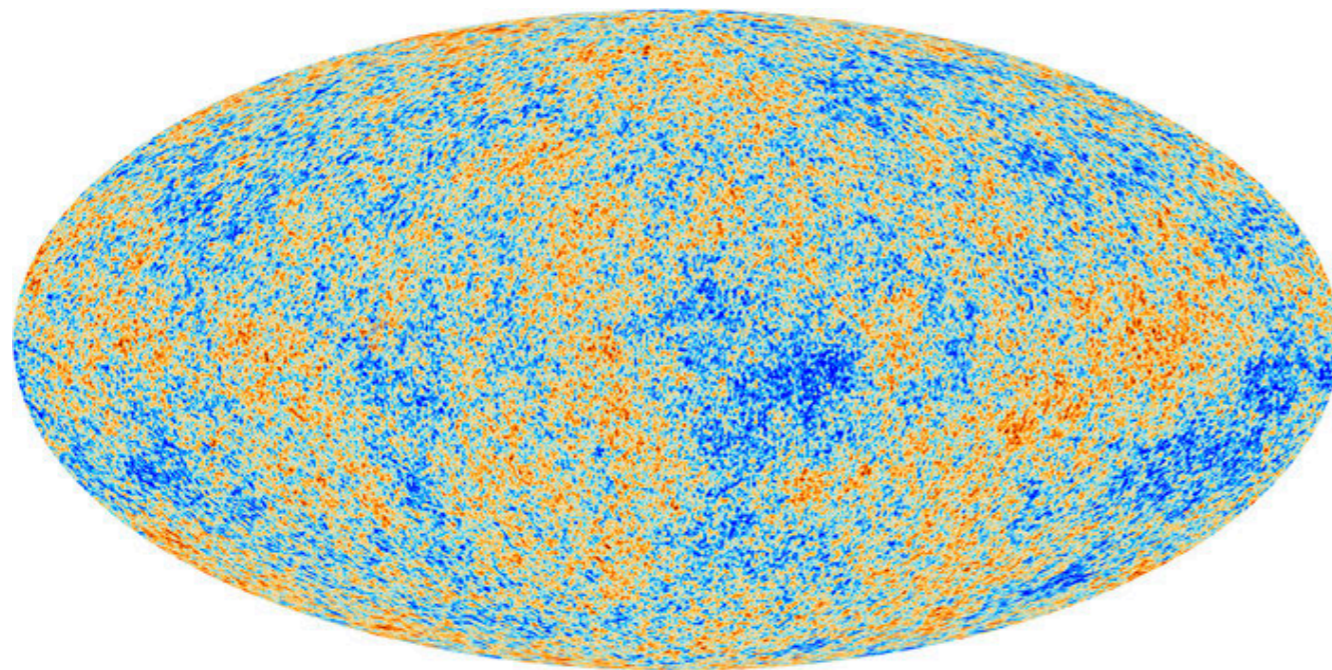
結果として、

- SUSY粒子がLHCでできる時には対生成される。
- もっとも軽い中性SUSY粒子は安定になる。 → **暗黒物質候補**

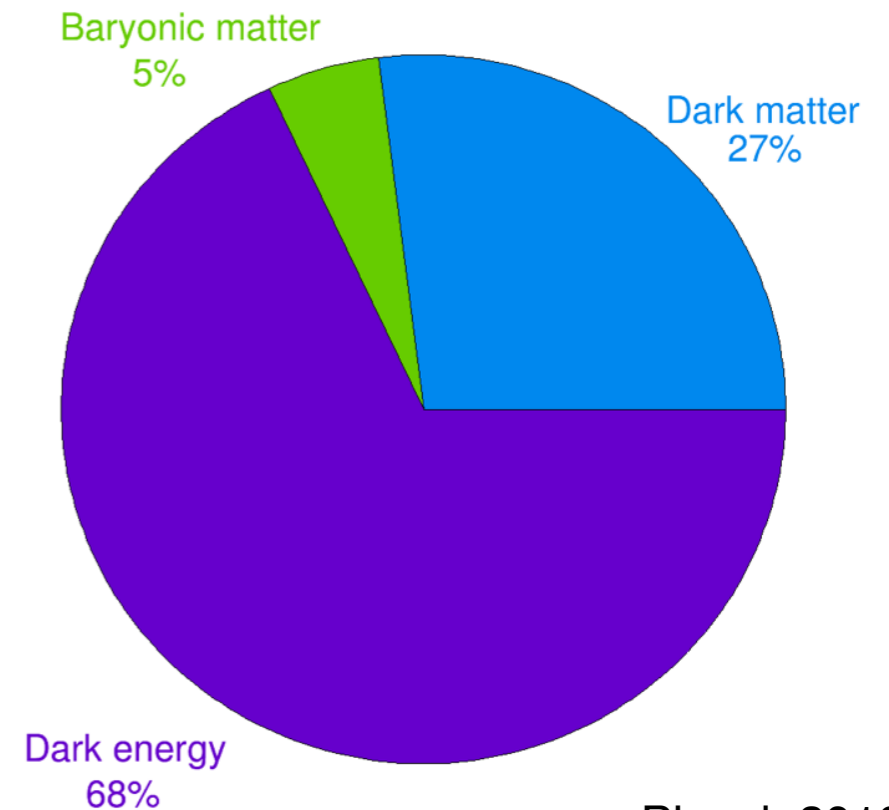
暗黒物質：ダークマター

1884年にはすでにケルビンが天の川銀河の星の速度分散から、大部分の質量は黒体である指摘。
1933年にツビッキーが銀河団中の銀河速度分散が、銀河数と明るさからの予想より大きすぎることから、ダークマターの存在を予想。

プランク衛星による宇宙マイクロ波背景放射からダークマターは普通の物質の約5倍あることが分かっている。



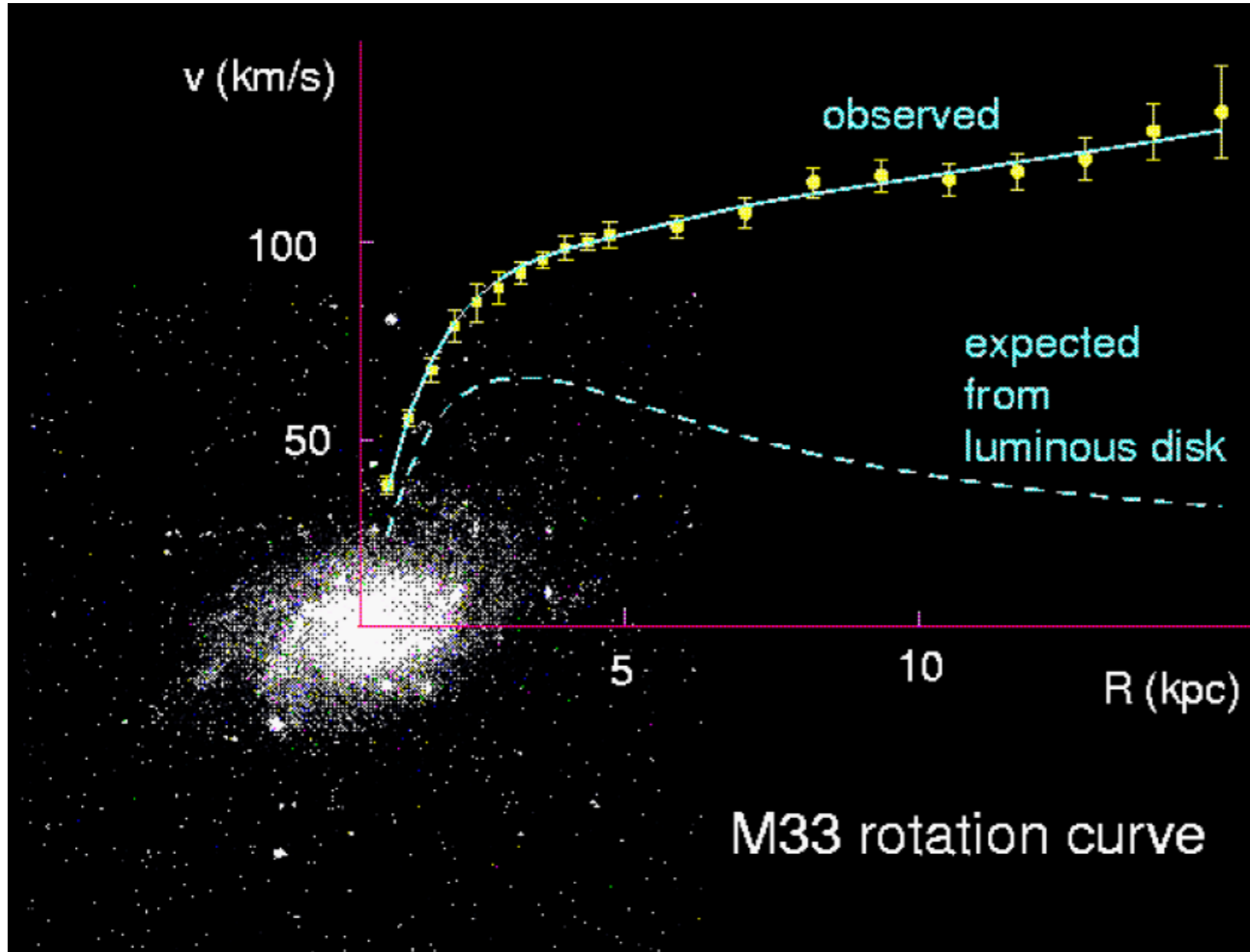
プランク衛星によるCMBマップ



Planck 2018

ダークマターの証拠

銀河の天体の速度が外に行くほど速い。
見えている物質だけだと説明できない。



$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Vera Rubin 1970's

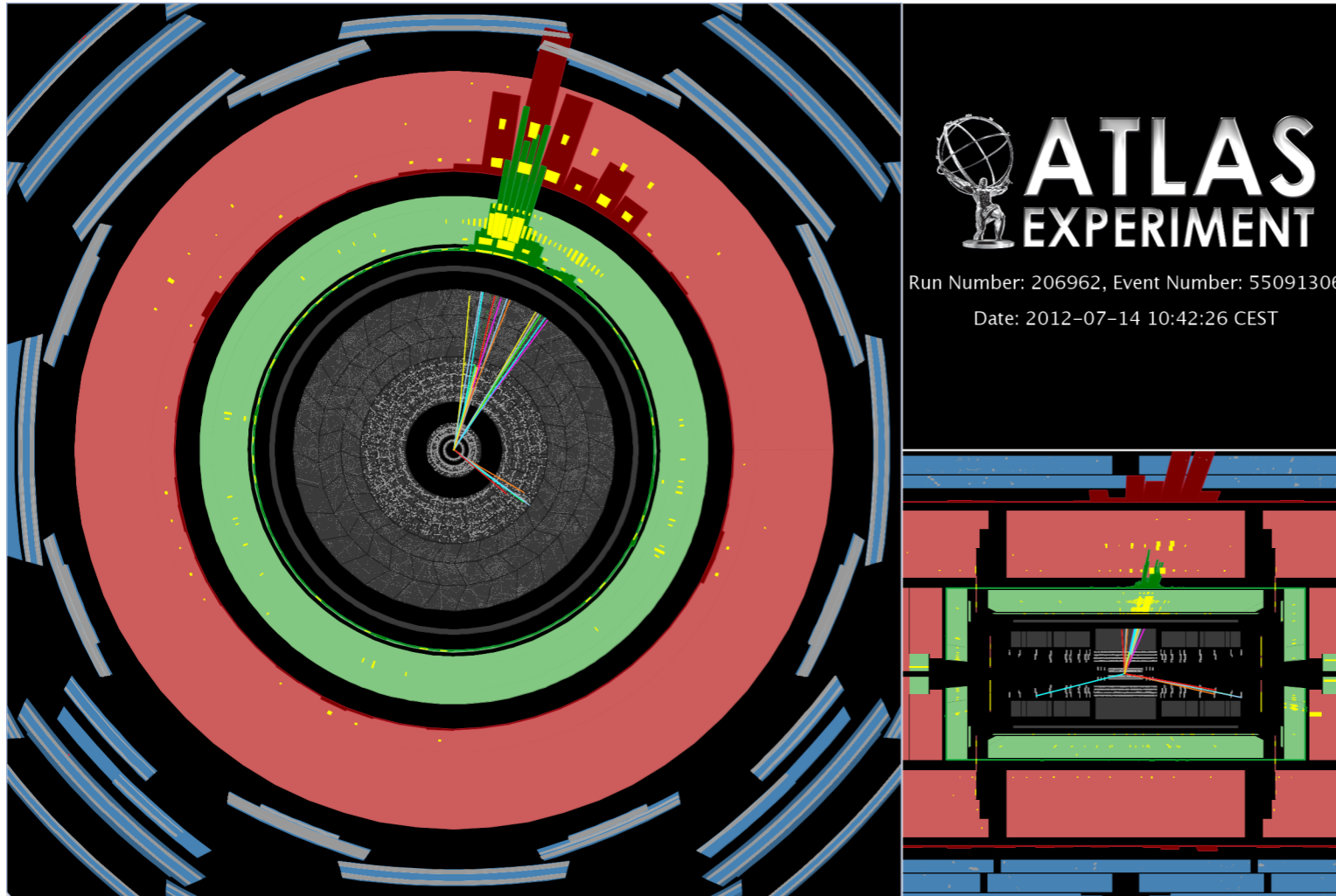
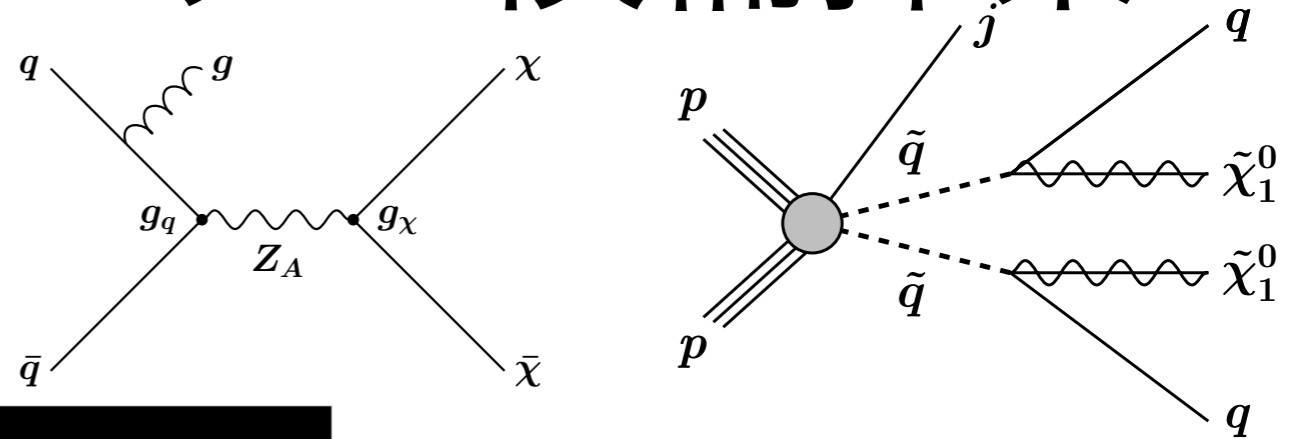


$M(r) \sim r$ のような物質があれば説明できる。

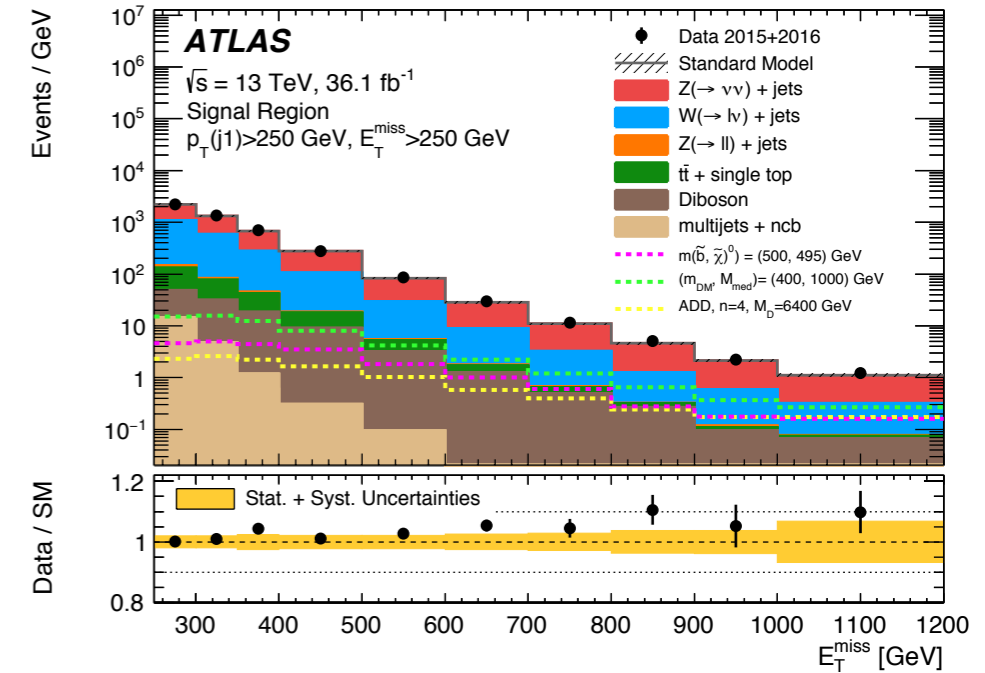
(他の天体から存在が予言された例: 海王星)

典型的な LHCでのダークマター候補探索

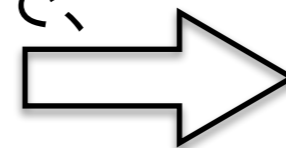
高い消失運動量とジェットを持つ事象の超過を探す。



消失横運動量分布



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。

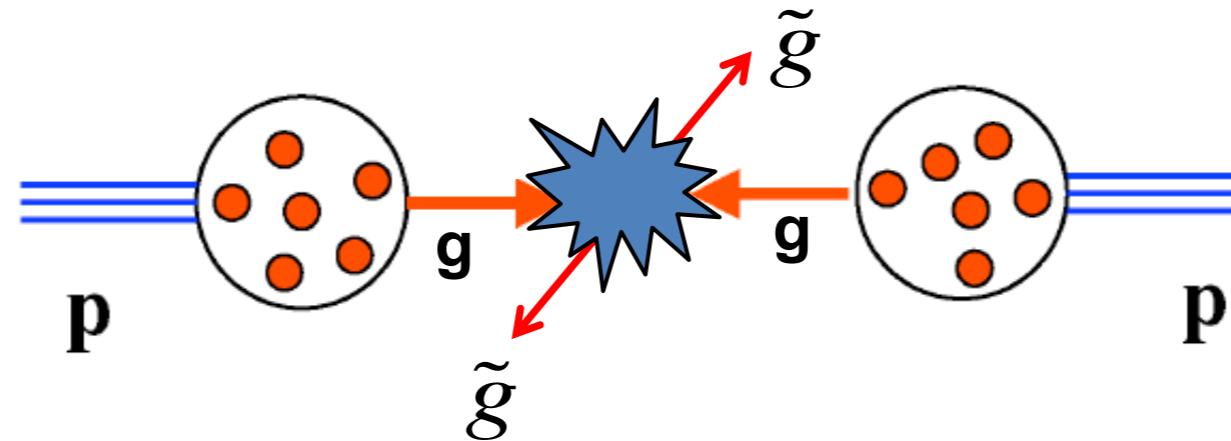


見えない粒子の横運動の和
 を計算できる。

LHCでの超対称粒子生成

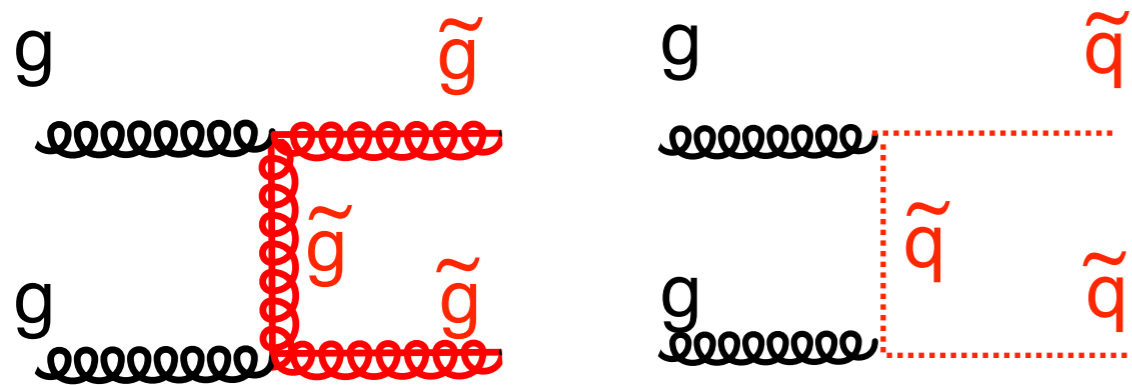
一番軽い中性SUSY粒子はダークマター候補

→ ほとんど全てのSUSY探索はダークマター候補探しと言える

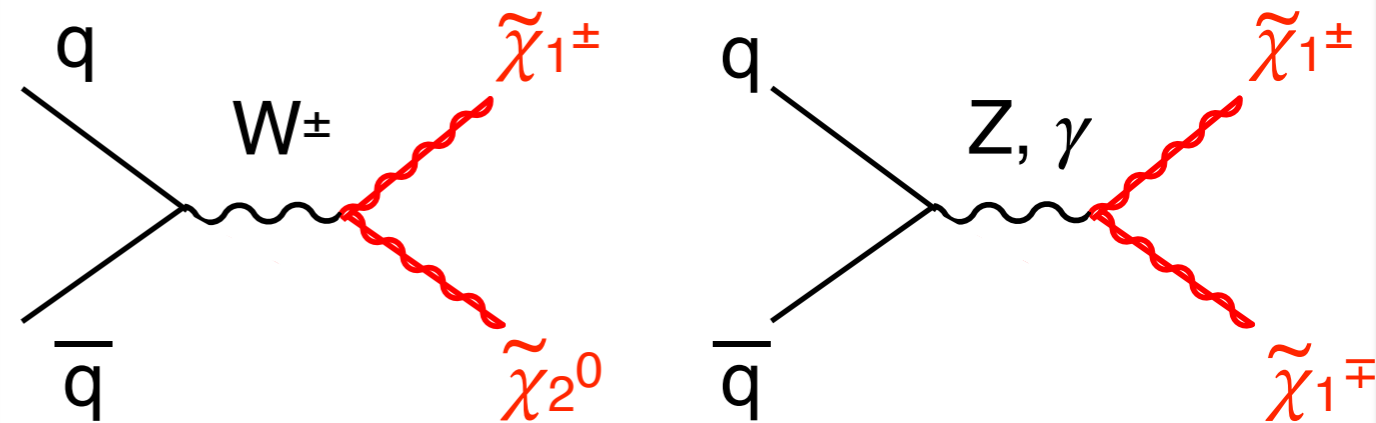


ここに示したのは代表的なダイアグラムのみ。
他のチャンネルもある。

スクォーク、グルイーノ生成

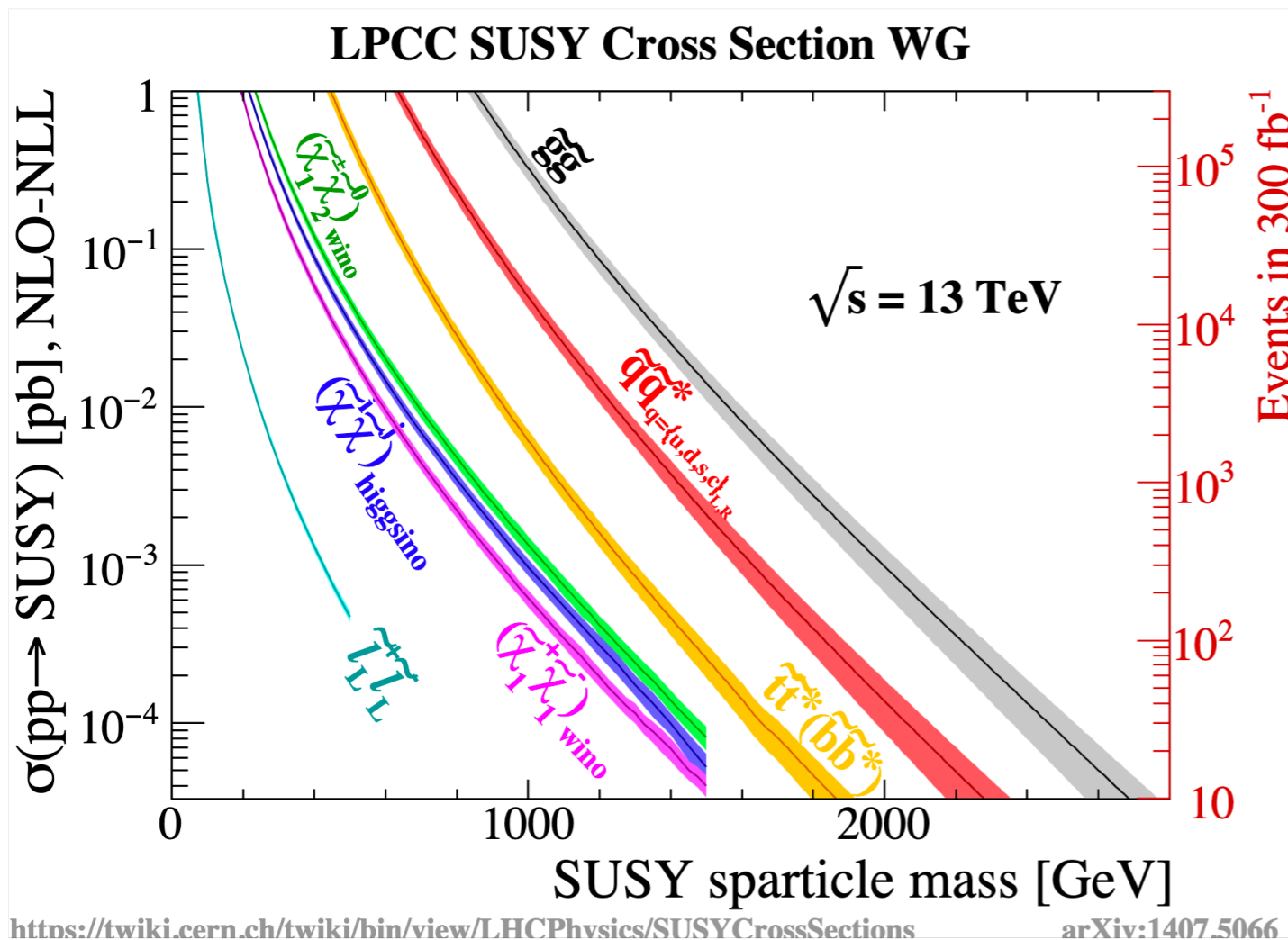


ゲージーノ、ヒッグシーノ生成



LHCは高エネルギー(“グルイーノコライダー”)なので、左の断面積が高い

SUSY粒子の生成数



生成数 = 断面積 × ルミノシティ

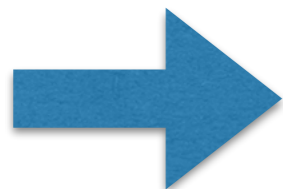
ルミノシティ (予定)

- 2025年まで約250fb⁻¹
- 2040年まで約3000fb⁻¹

同じSUSYでも生成する粒子によって数が違う

例えば、300fb⁻¹で、1TeVの
 グルイーノなら10万ペア、
 ウィーノなら100ペア程度

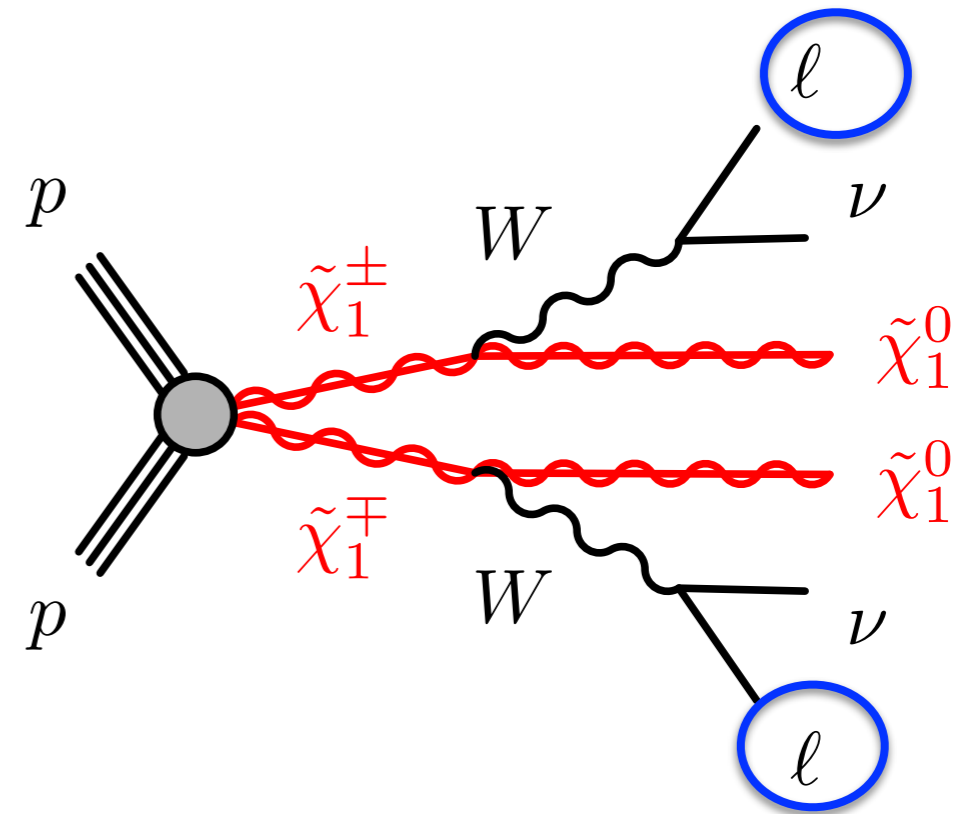
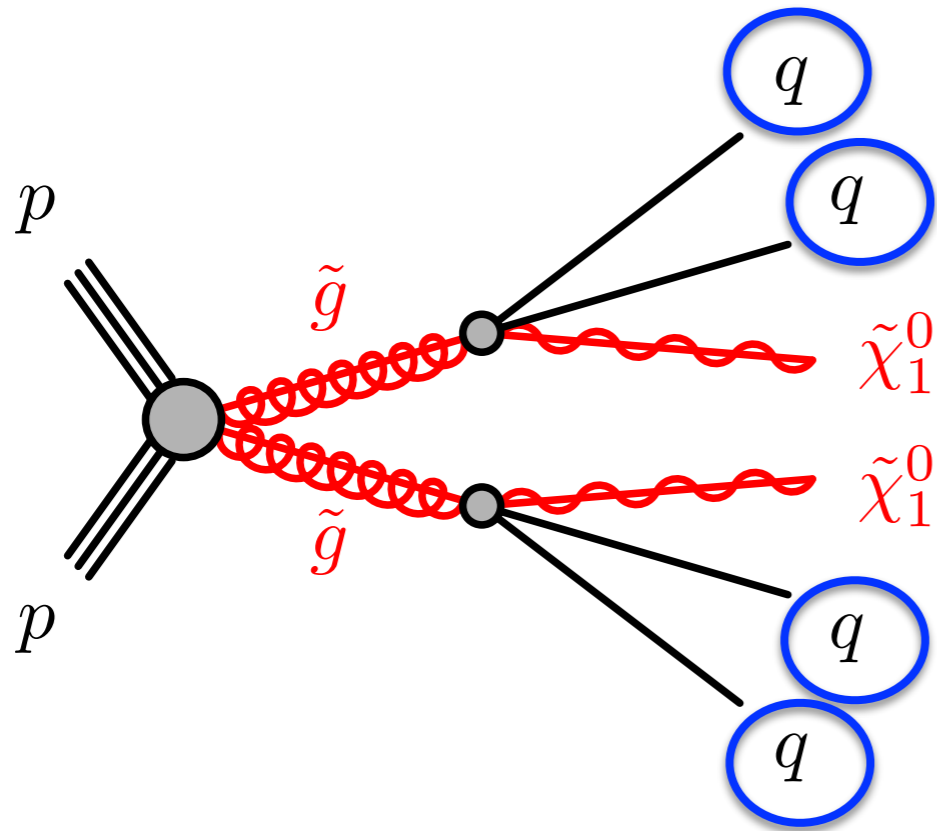
SUSY粒子が重いほど数が少なくなる



- データをたくさん取ると
- より重い粒子を発見できる
- 断面積の小さい粒子(ウィーノ etc)が発見できる

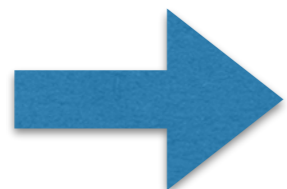
SUSY粒子の探索

- 大きな消失横運動量という条件だけだと背景事象が多すぎるので、探索するチャンネルに応じて追加の条件をつける。
- SUSY粒子の質量階層はモデルにより様々、例えば



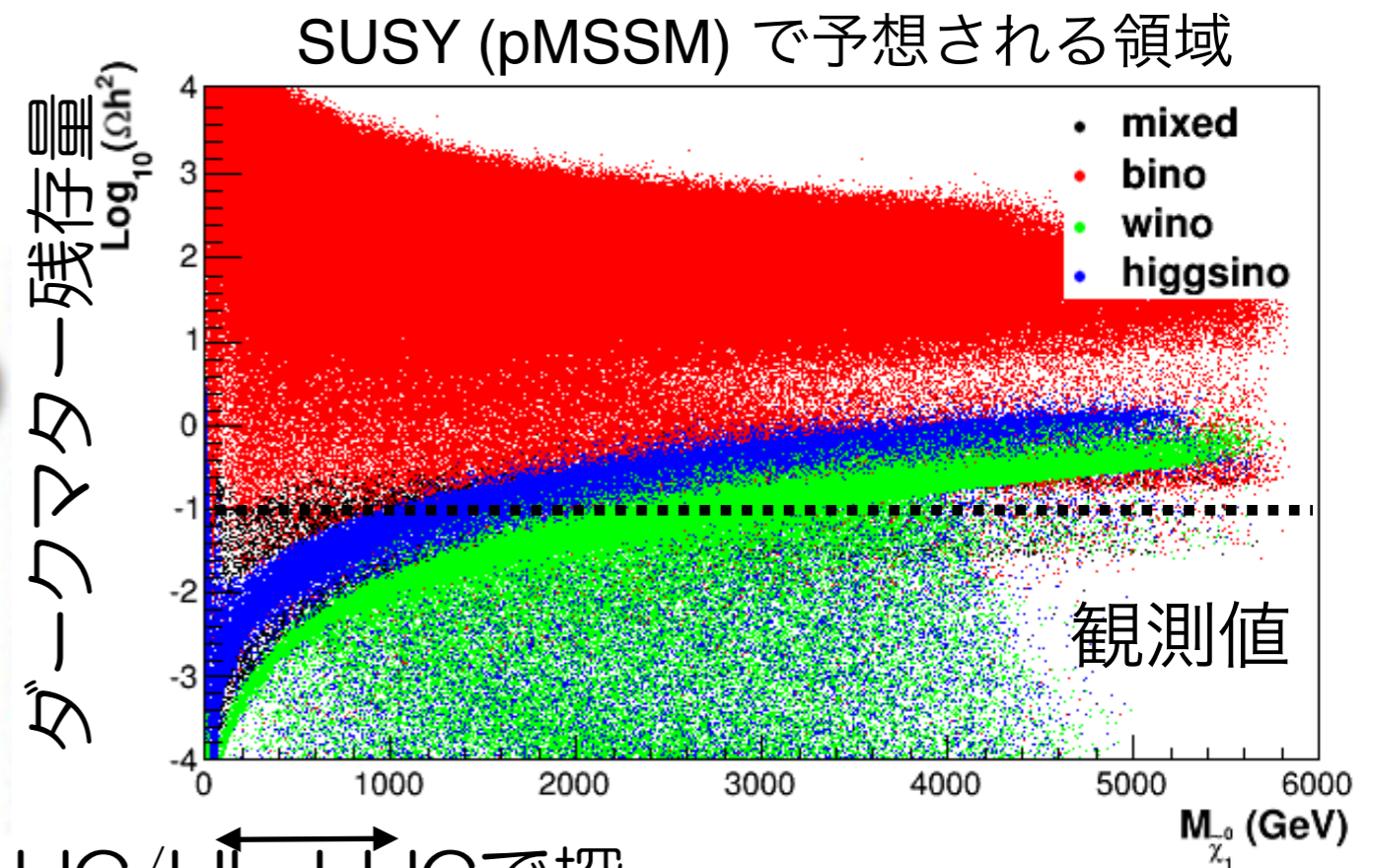
グルイーノ生成では、高エネルギーのジェットが複数でる。

ウィーノ生成では、一つか二つの電子かミュー粒子がでる崩壊がある



たくさんの解析によって、様々なモデルを探索

ニュートラリーノ



LHC/HL-LHCで探索可能な領域

ダークマター質量

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

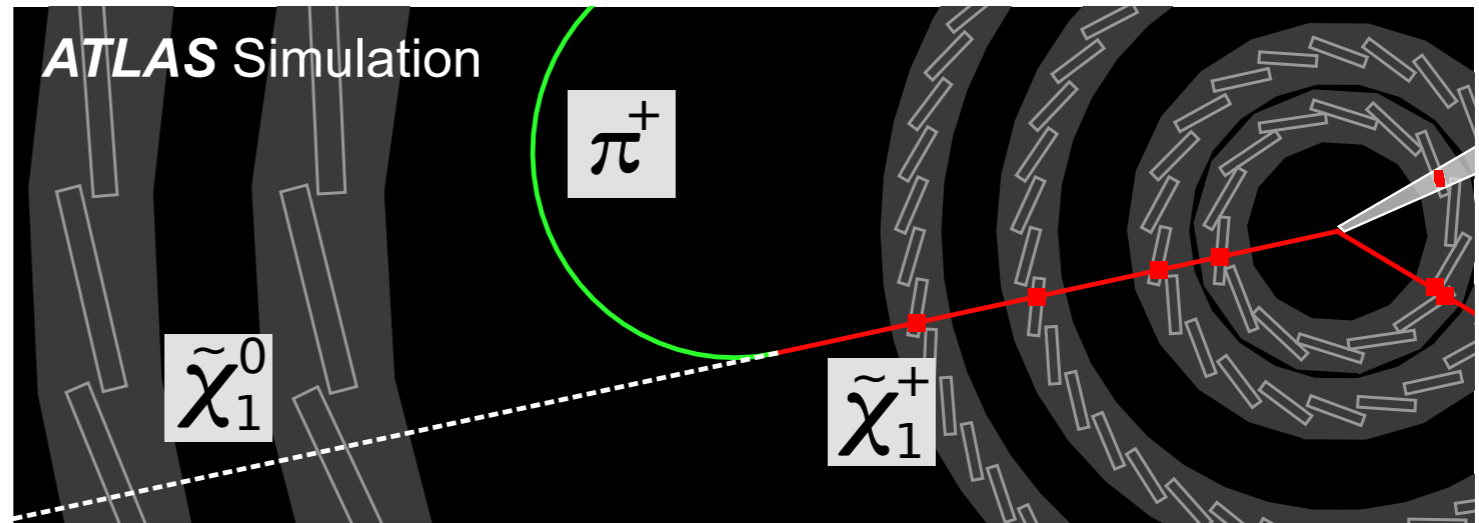
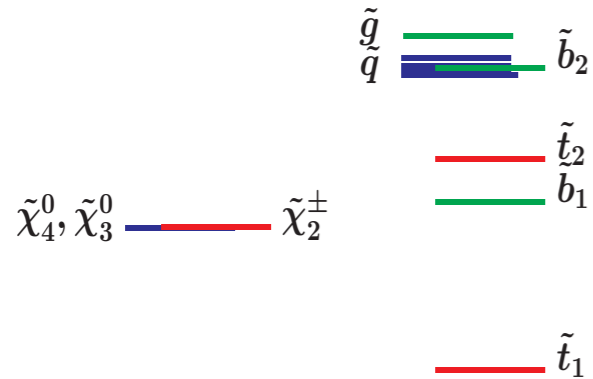
ウィーノとヒッグシーノ: 観測された残存量を実現できる。ダークマター全部がこれの場合の質量はそれぞれ**3TeV** (ウィーノ), **1TeV** (ヒッグシーノ)と予想される。他のもの(アクシオン等)もある場合はこれよりも軽くなる。

TeV領域のダークマターをLHCで作れる?

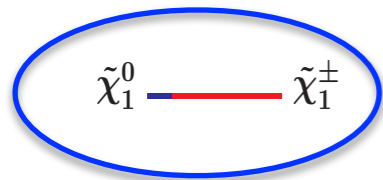
長寿命ウィーノ探索

消失飛跡探索

AMSB SUSY

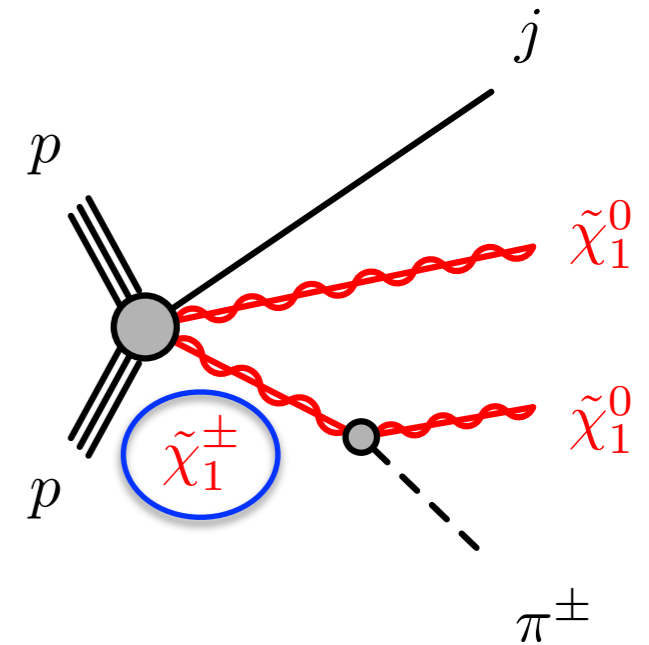


$\tilde{\chi}_2^0$ —



チャージーノ
ニュートラリーノ

ウィーノがダークマターの場合、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)。



- ・ ダークマター粒子の直接生成
- ・ 新粒子を直接検出器で見る特別な解析。

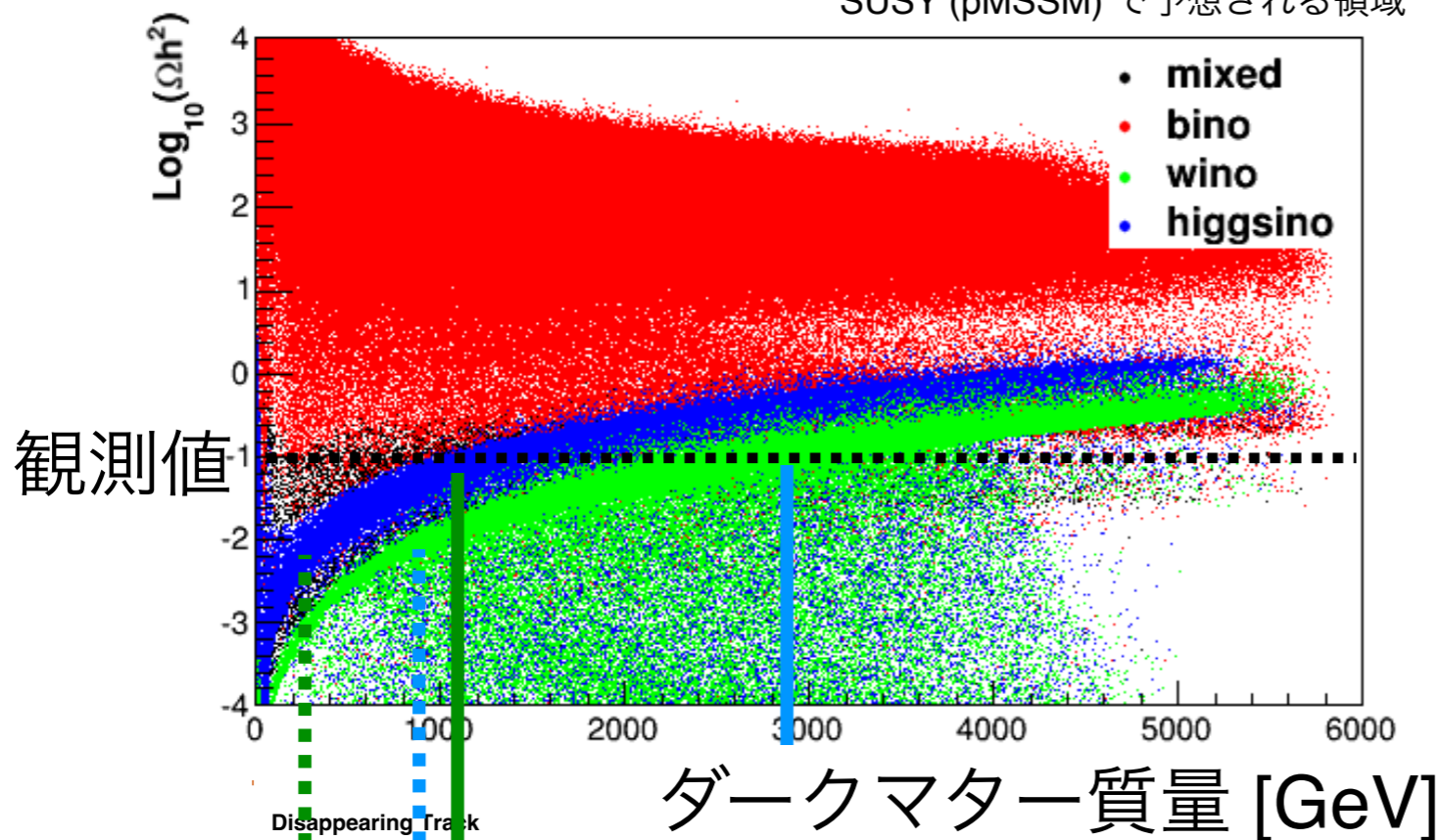
Run2フルデータの結果で660 GeVよりも重いことがわかった。

ダークマターを発見できるか？

将来円形加速器構想 (FCC)

ダークマター残存量

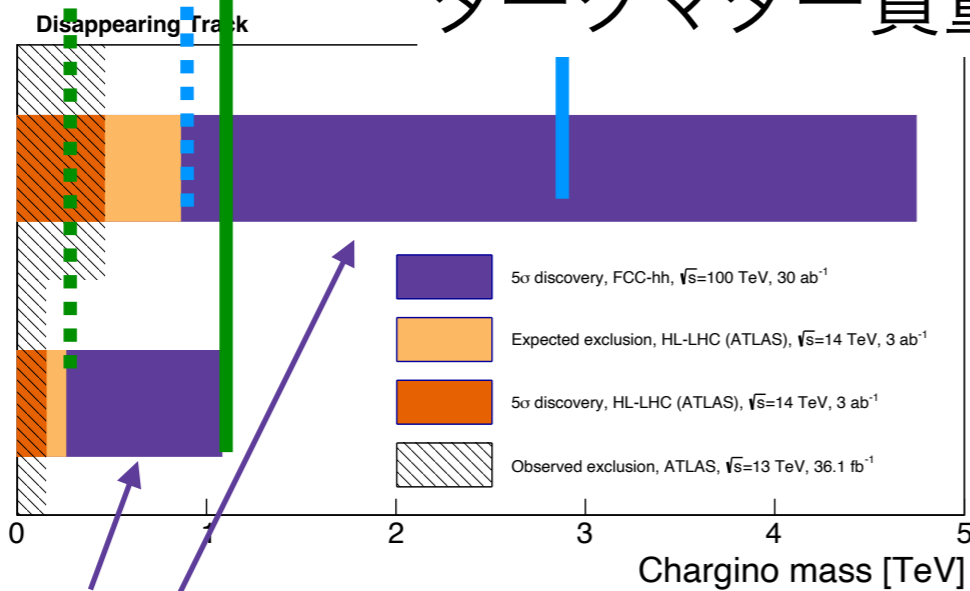
SUSY (pMSSM) で予想される領域



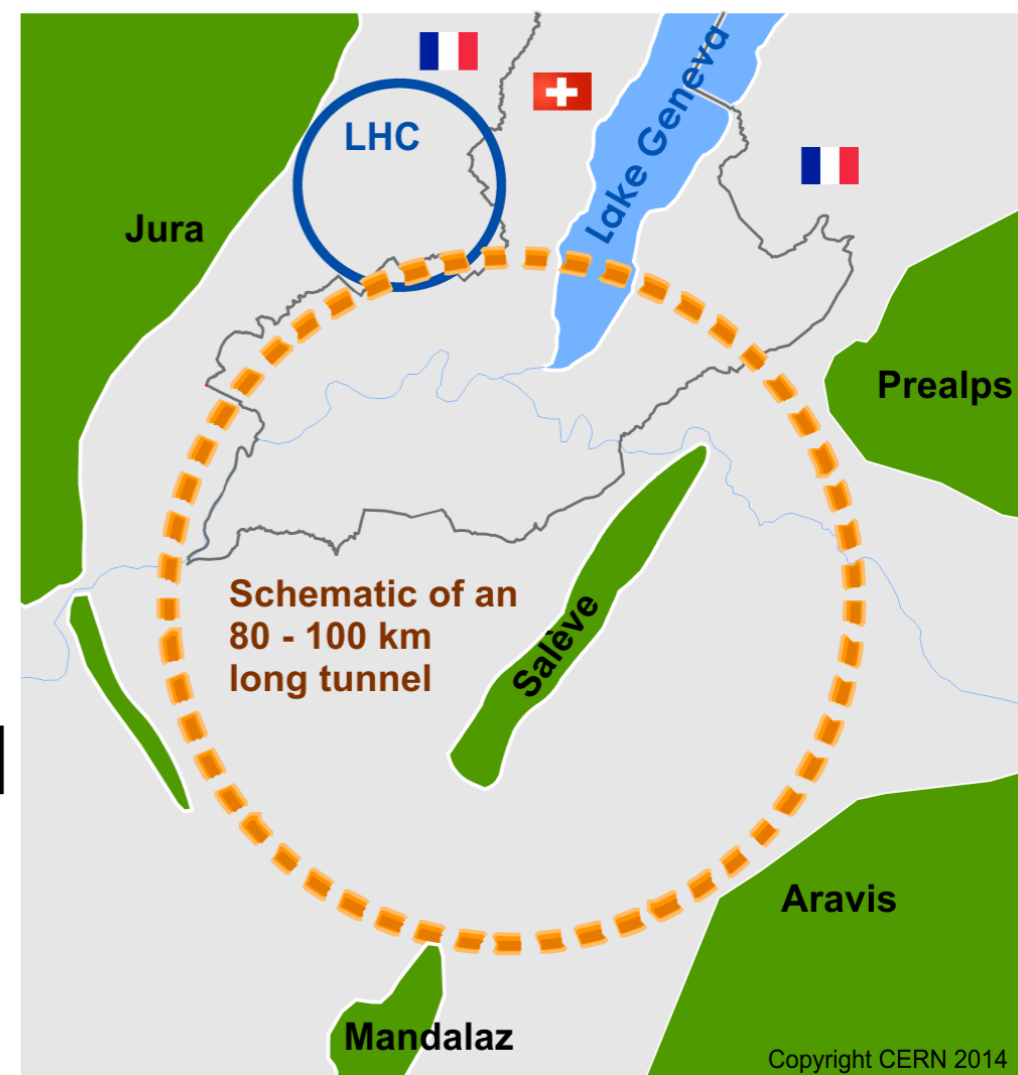
ウィーノ

ヒッグシーノ

FCCでの感度



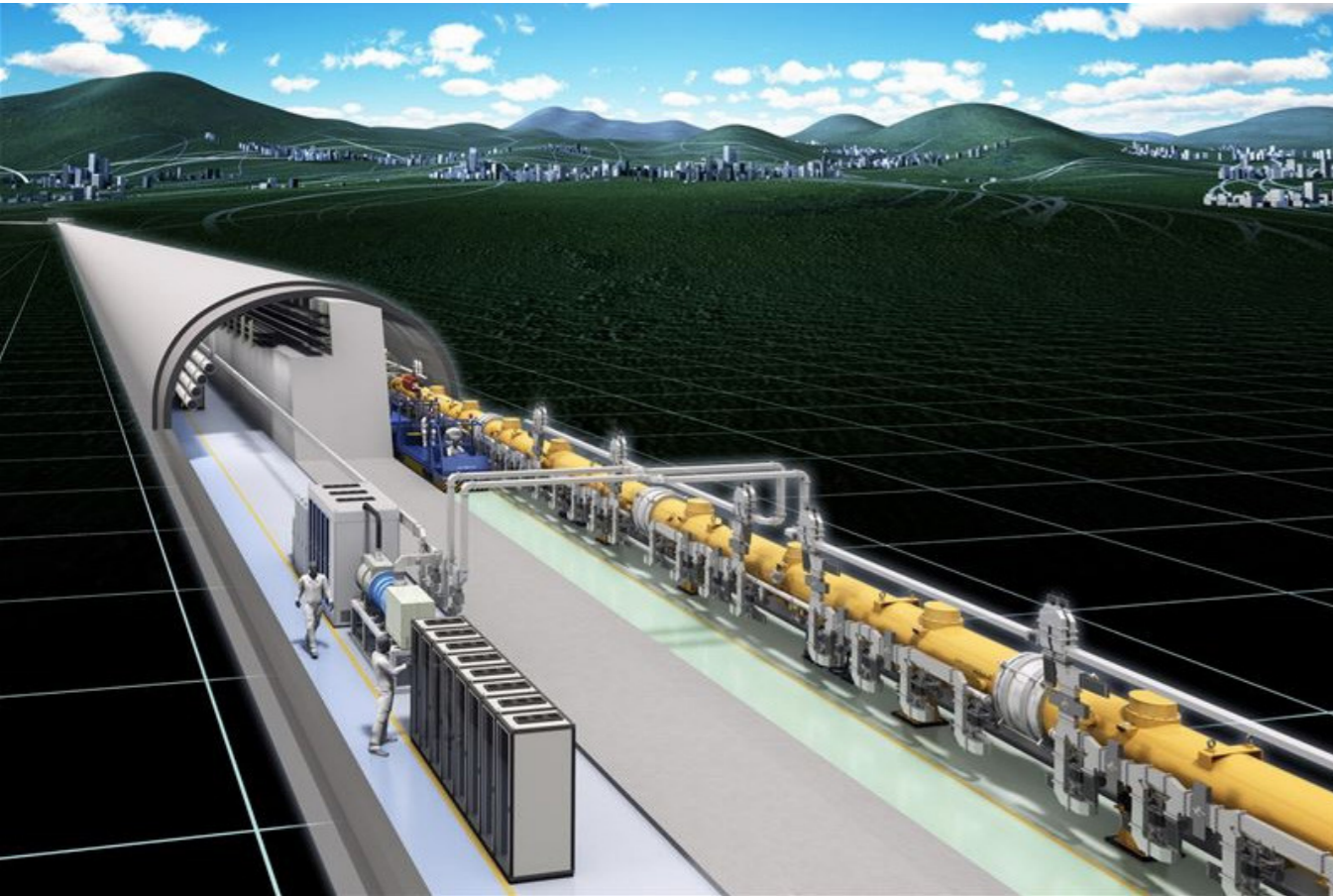
ICEPPも参加



ピュアな

WIMPダークマターは確実に発見できる

国際リニアコライダー ILC

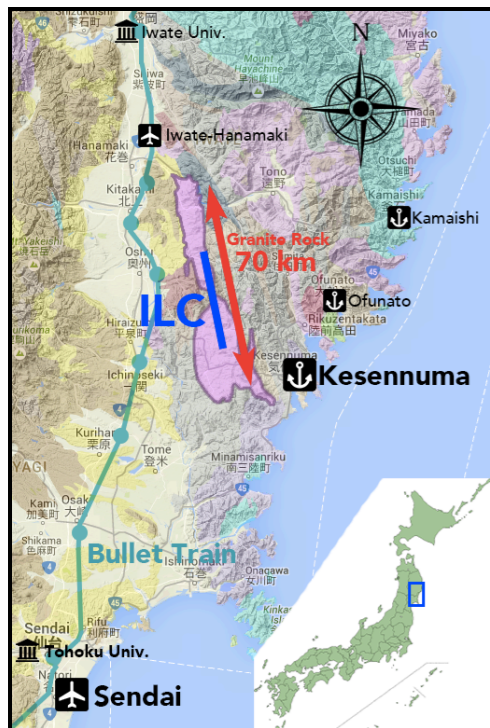


KEK(Belle)やJ-PARCとは何が違うの？

エネルギーが高いのでヒッグス粒子を大量に作れる。(現状ヒッグスを作れるのはLHCだけ)

LHCとは何が違うの？

電子と陽電子 (両方素粒子) の衝突なので、出てくる”ゴミ”粒子数が少ないので、精密な研究ができる。



- ・ ベースラインは250GeVでHiggs精密測定
- ・ アップグレードでエネルギーをあげればダークマター候補になる超対称性も狙える!?

(現在は国際的な議論が進行中)

近隣の研究との違い (私見)

- 宇宙研究との違い

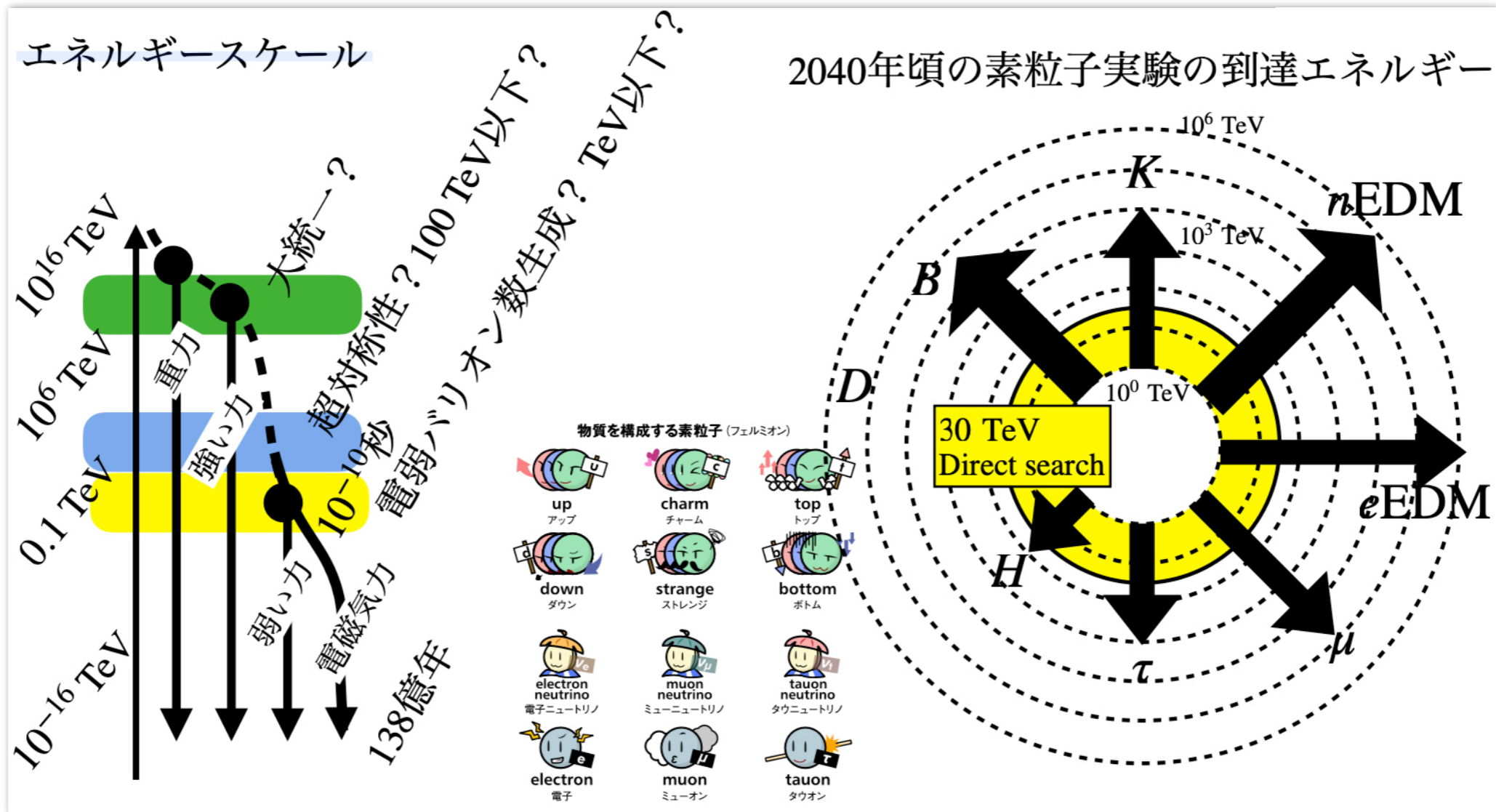
- 宇宙線は初期条件を手で設定はできない (宇宙は作れない、様々な系統誤差)
- コライダー実験は手で設定をして、繰り返して検証ができる。
- 宇宙線実験に比べてエネルギーは低いが、「手堅い」科学的な手法で「実験」ができる。
- コライダーで質量と断面積が測れるので、暗黒物質の残存量とあうかどうかを調べる。
- コライダー実験では寿命が測れないので、宇宙年齢とくらべて十分長いかどうかまでは言えない。

近隣の研究との違い (私見)

目的を絞った実験(多くの場合小中規模)との違い

- 目的を絞った実験: 特定のパラメータやモデルをより感度よく探索
- 多目的実験 (e.g. ATLAS): ビームエネルギーの範囲で逃さず探索。

発見後に新物理モデルの正体をさぐる。



最後に

学部の授業からは、”物理理論は完成されたもの” と思う(?)かもしれませんが、

物理の標準理論では説明できない現象 (e.g. 暗黒物質) や、理論の不自然さがあるため、新しい物理があると研究者には思われています。

究極的には、全ての素粒子と相互作用を統一的に扱って、宇宙の始まりから説明できる究極の理論に到達したいけれど、

まず次の目標としては、

- **新しい物理の証拠**を見つける (どんなモデルなのかのヒント)
- **暗黒物質の正体**を探る

ことが基礎物理で最も重要(私見)なことだと思います。

- 「新粒子の発見」 = 「その背後にある物理法則の証拠」
- より本質的な理論へ近づくための、次の研究の方向性

素粒子物理の発展は**技術の発展** (加速器、検出器、計算機)によって実現されているので、技術開発、**新しいことに挑戦**しています。