

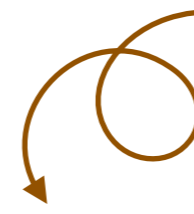
ATLAS実験 学部生向け特別セミナー 2023
～最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！～

超対称性粒子と暗黒物質

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  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



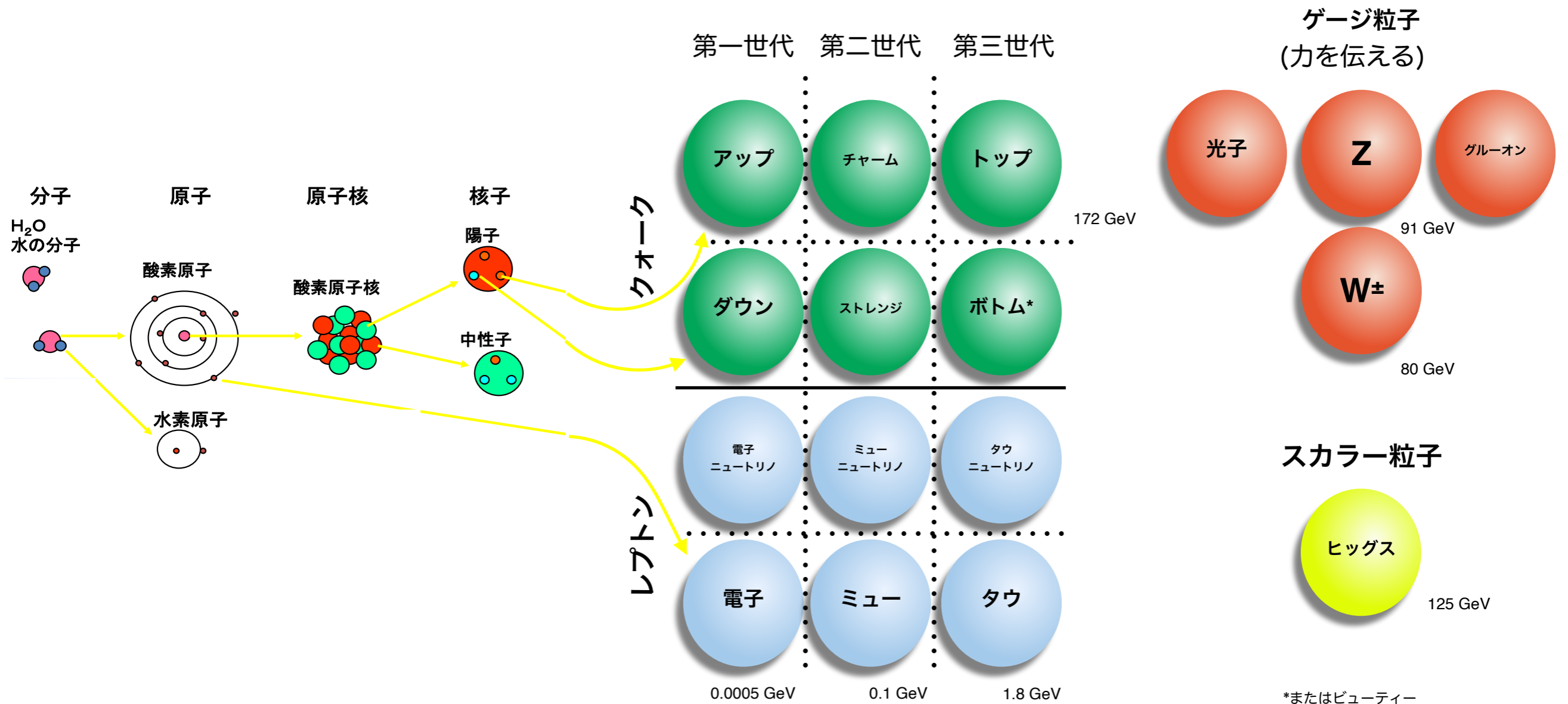
CERN-EP-2021-209
10th January 2022

**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

素粒子物理学

素粒子



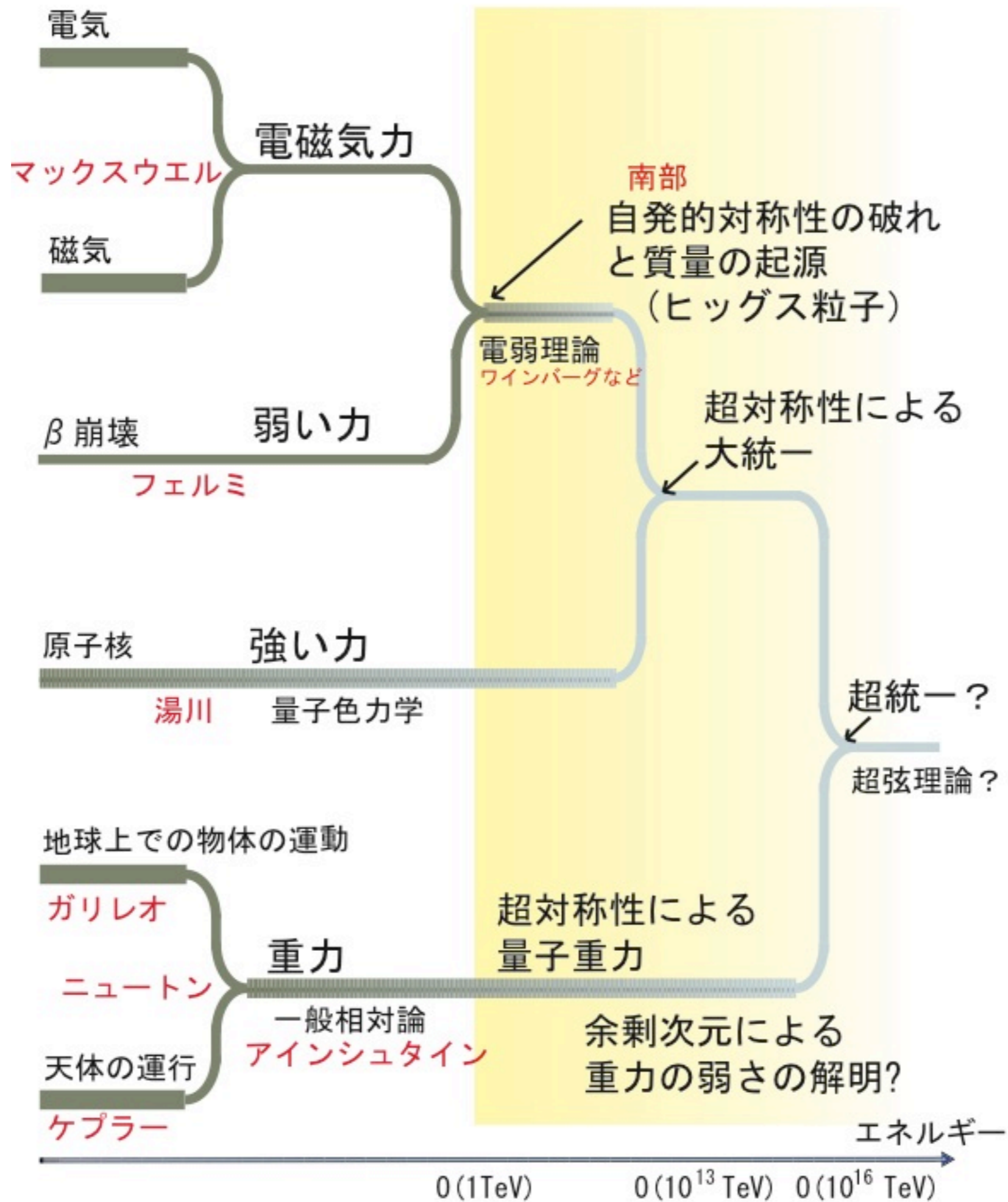
- 電子の発見からはじまり、理論と実験の両輪で「標準理論」を作り上げてきた
- 2012年のHiggs粒子の発見によってひとまず「完成」

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

- 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
 - 元素の周期的な性質 → 原子核と電子配置
 - たくさんのハドロンの発見 → クォーク
 - 陽電子の予言
 - チャームクォークの予言
 - ヒッグス粒子の予言
- 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



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

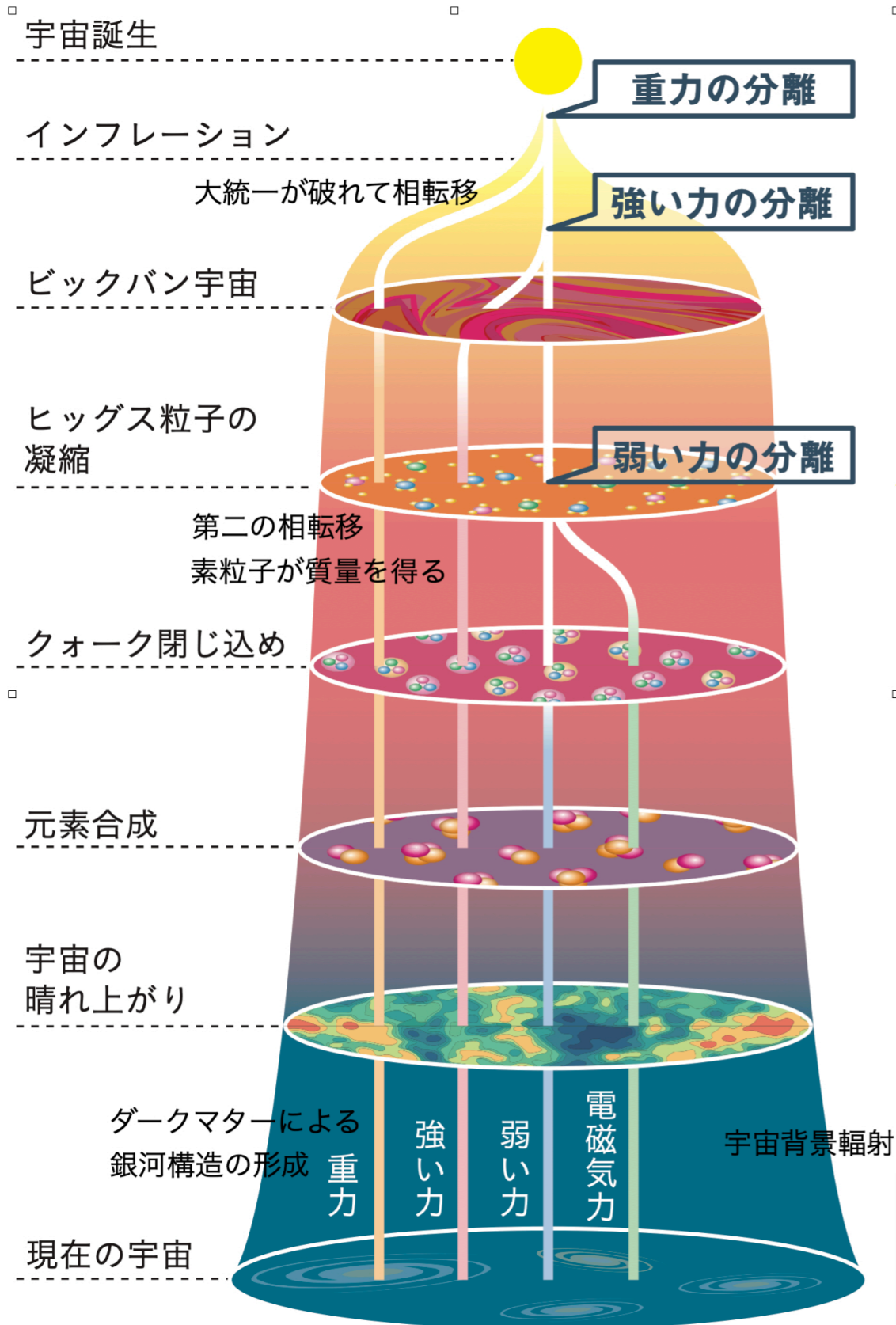
暗黒物質

フレーバー・世代起源

量子重力

量子重力

素粒子を知る = 宇宙を知る



宇宙の進化 (過去や未来)を知るには、
真空や粒子を知る必要がある。

"1兆分の1秒後"

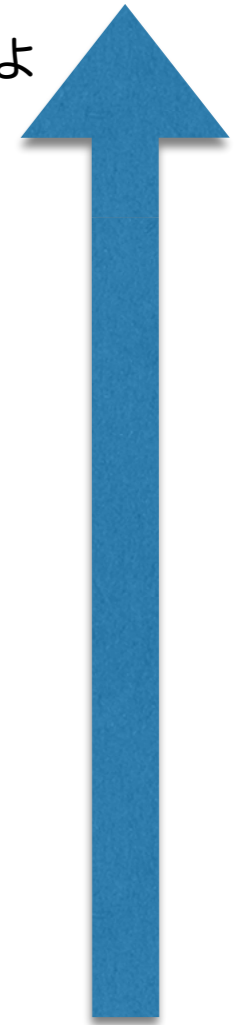
弱い力の分離と同時にヒッグス粒子により、
素粒子が質量を獲得。

LHC

38万年後: 温度が下がり原子が形成される。
光ではこれ以前の事象を観測することはできない。



光による観測



万物の理論

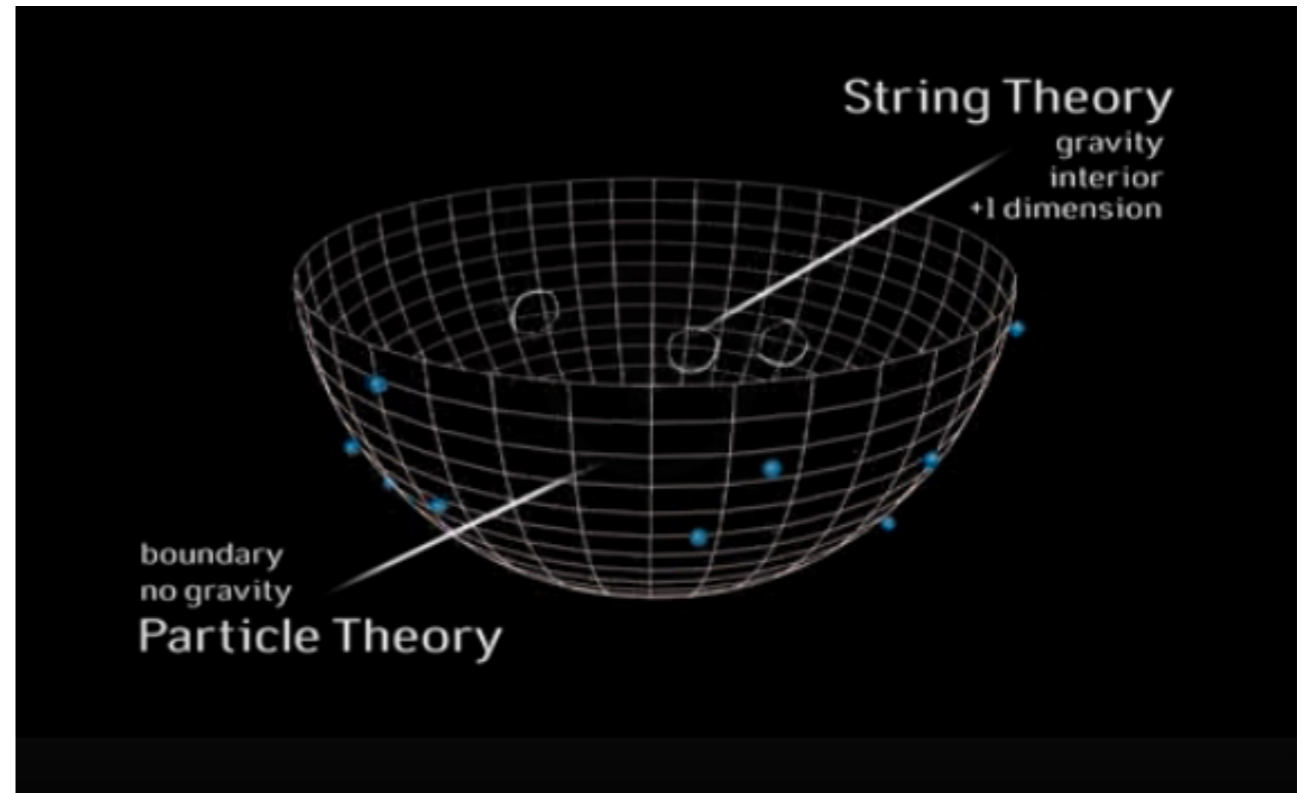
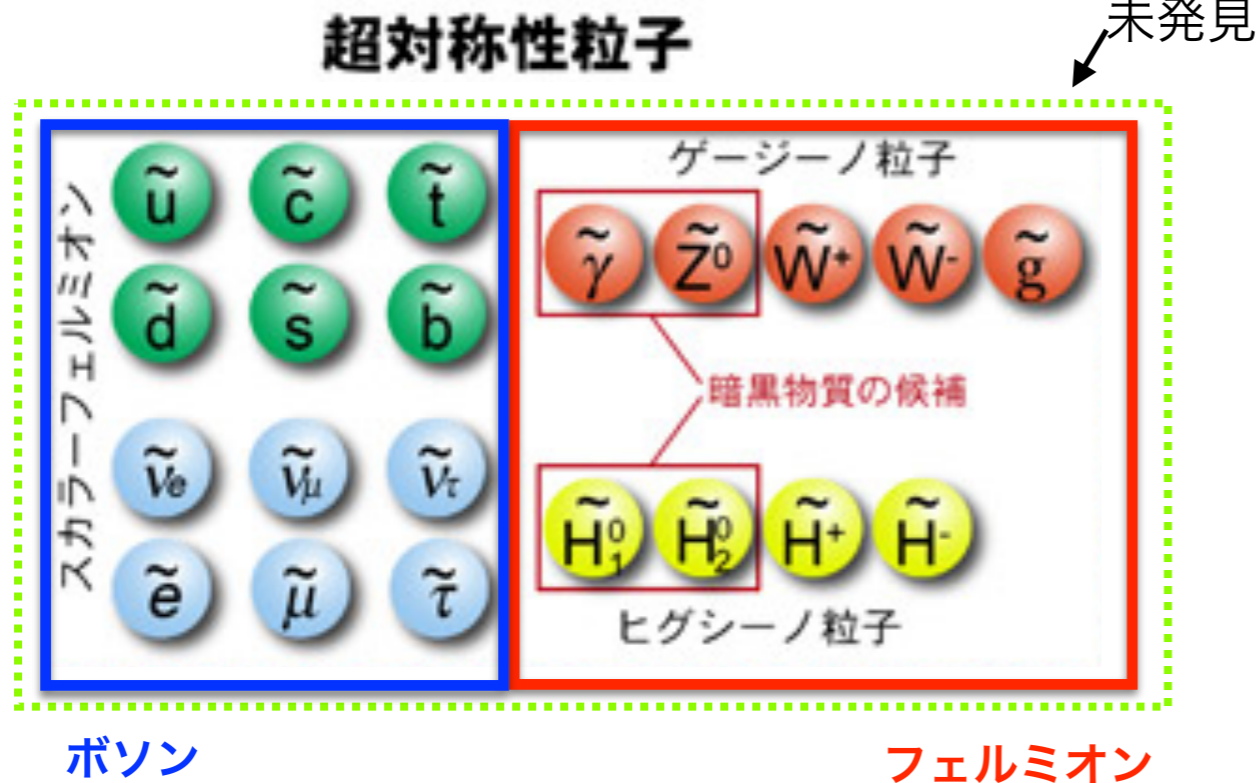
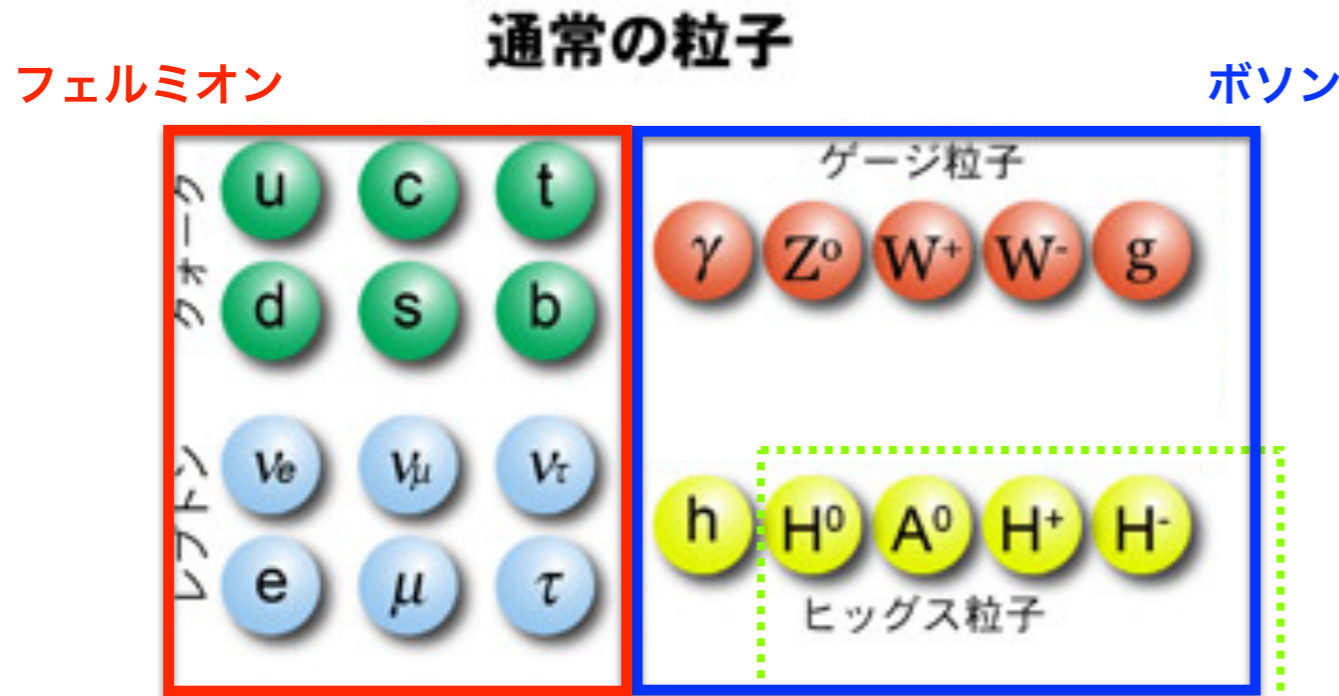


Illustration by [Annenberg Lerner 2013](#)

- 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
 - **超対称性の存在** ← 一番手が届きやすい？

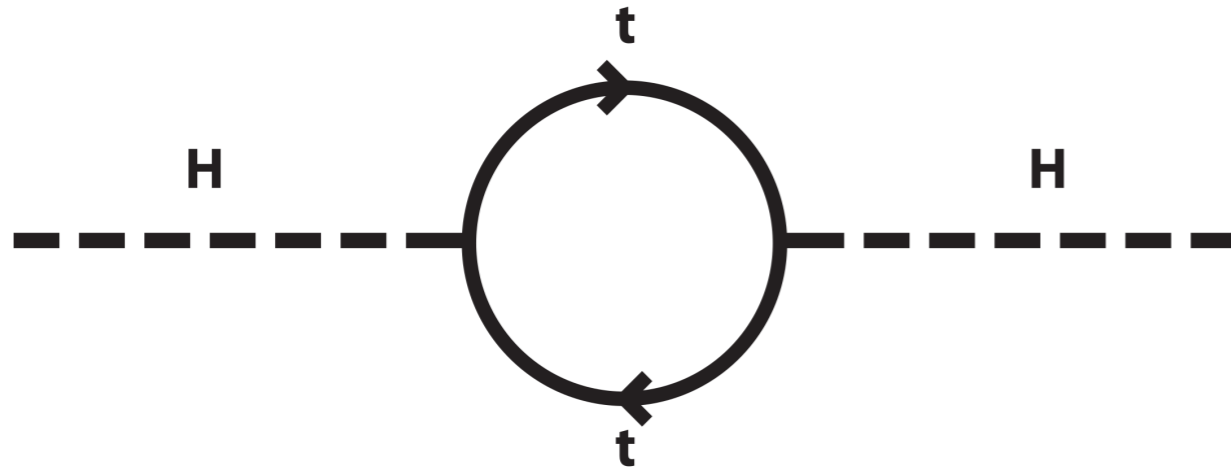
超対称性(SUSY)の導入

フェルミオンとボソンの間の対称性



- 超弦理論では、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。

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)



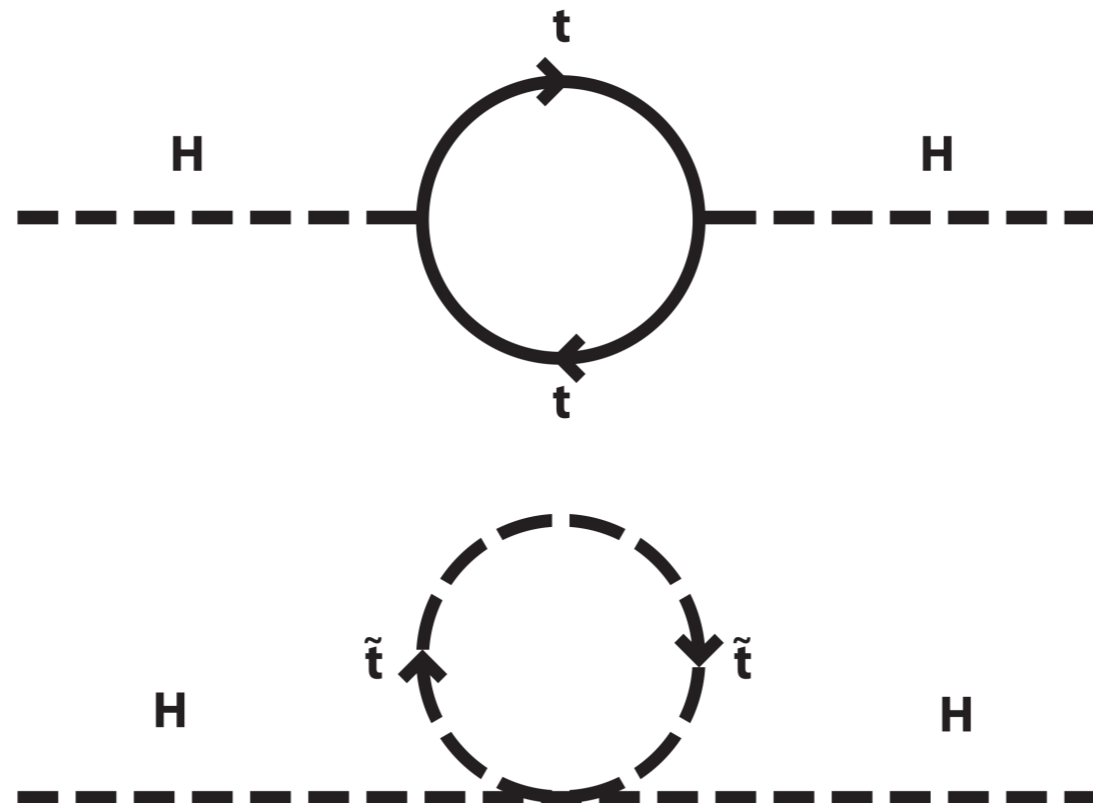
標準理論が高いエネルギーまで有効だとすると... $\Lambda: 10^{15} - 10^{19} \text{ GeV} ?$

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

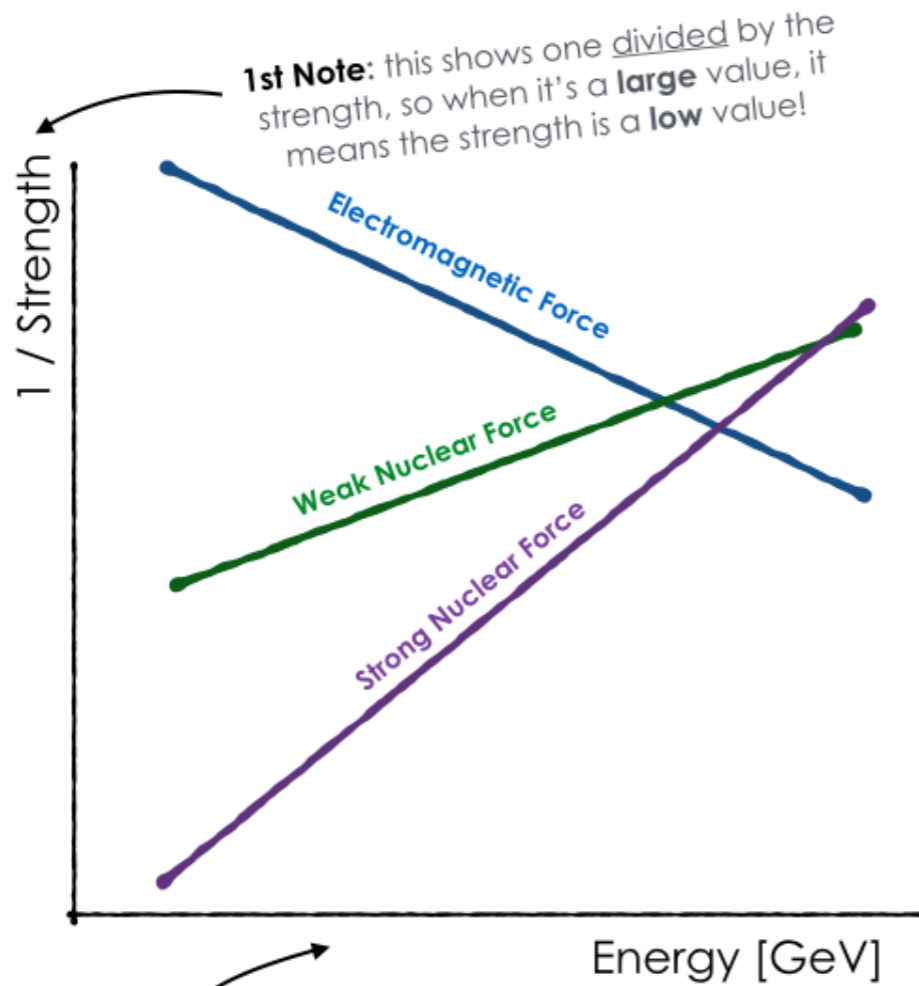
フェルミオンとボソンの間の対称性



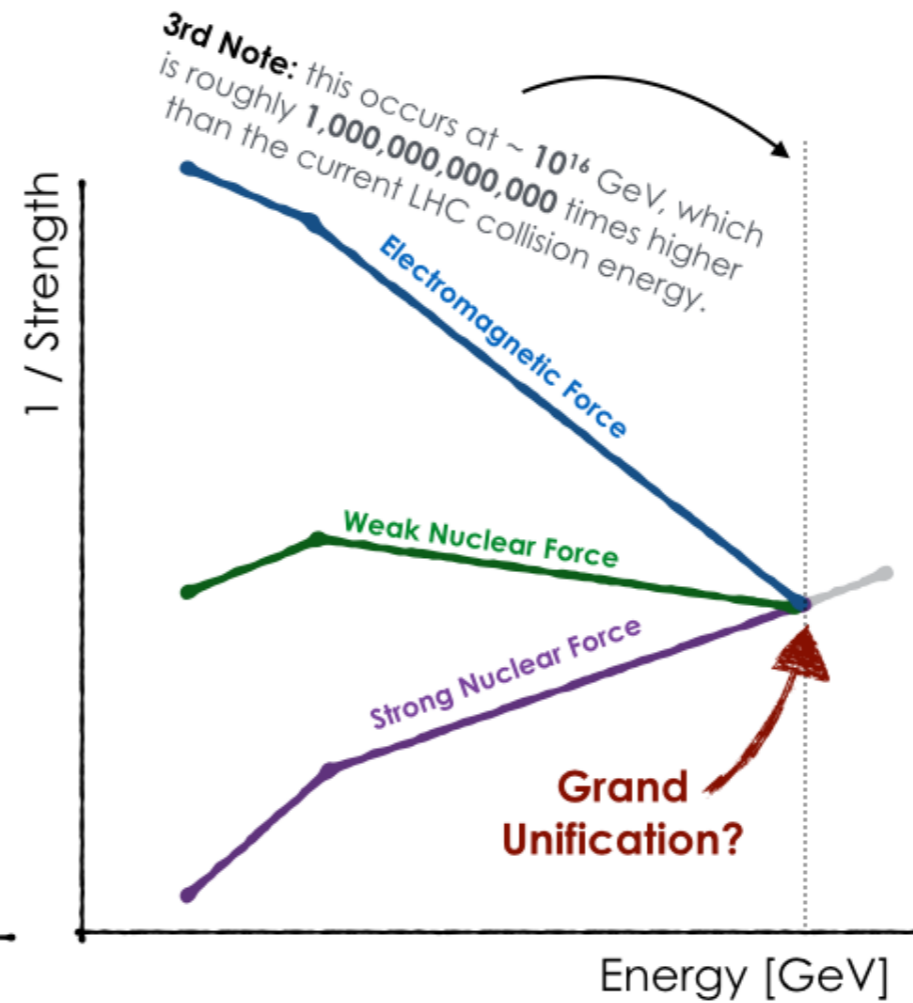
トップクォークと対になるボソンもあると、補正の効果がキャンセルされるて発散を抑えられる。

力の大統一

標準理論



SUSY

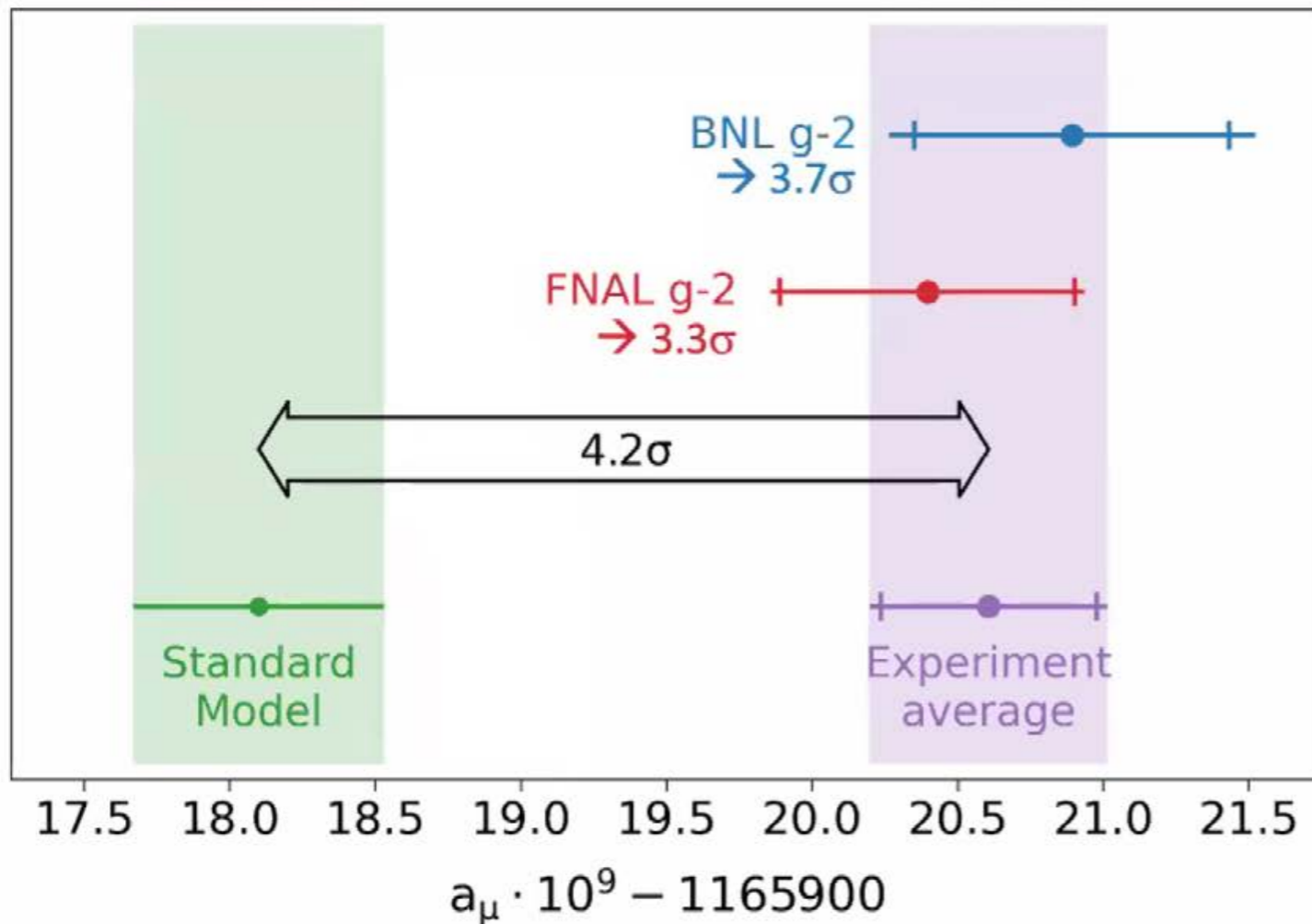


Graphs are sketched out and approximate only (there are no scales anyway), but for more info you check see here:
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/popular.html

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。

ミュー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う
ため、フェルミ研究所で再測定、
2021年に最初の結果を発表。

→ ブルックヘブンとほぼ同じ結果。

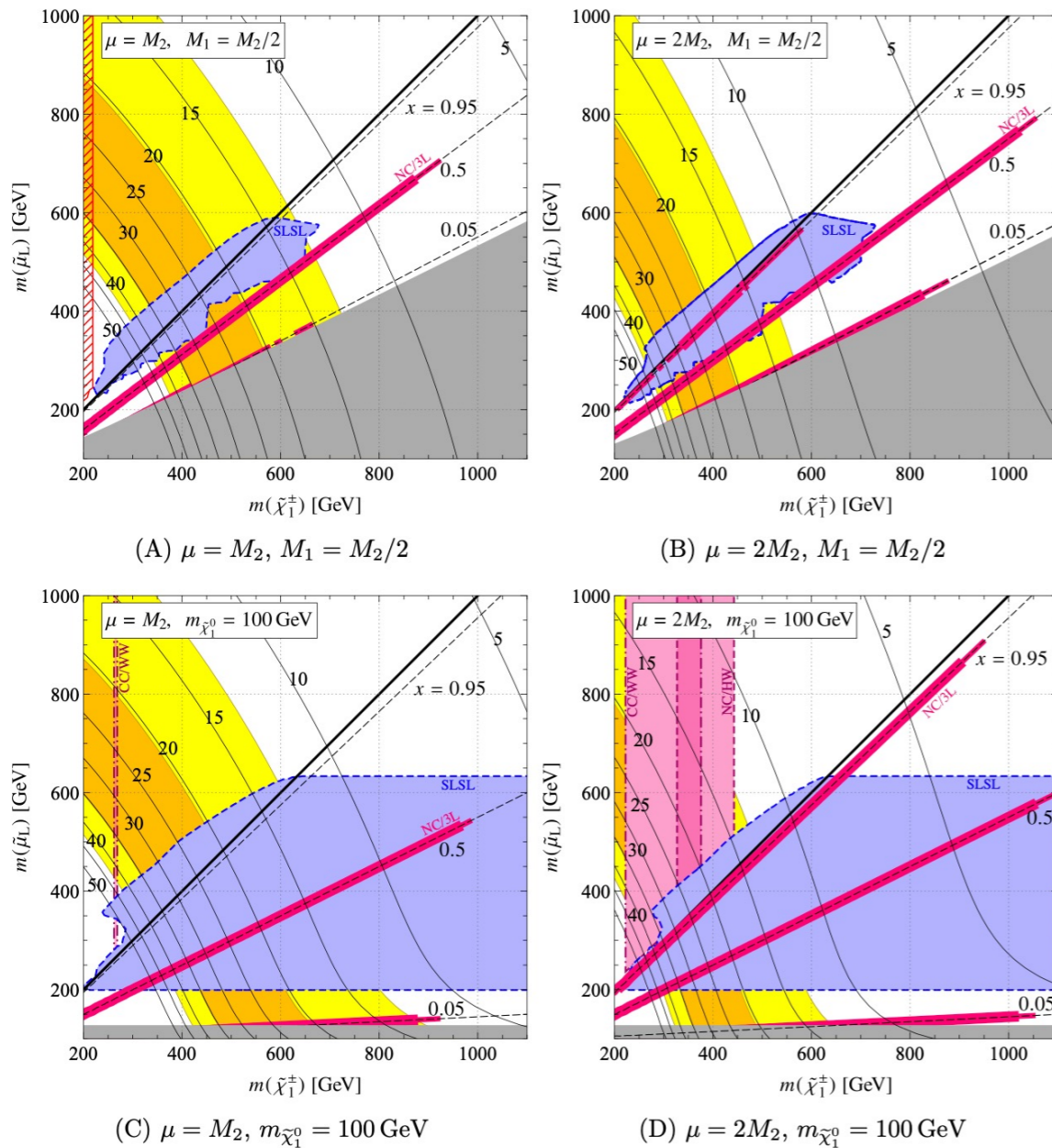
標準理論だけでこの結果を得る確率は
~1 / 75,000

→ **やっぱり新物理がある？**



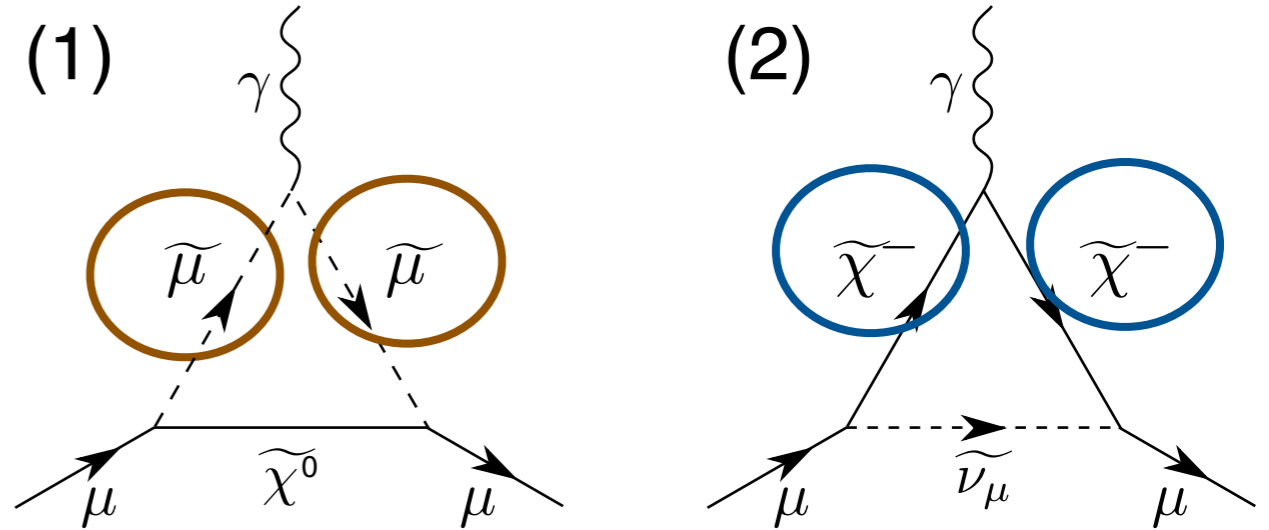
ミュオン異常磁気モーメント

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

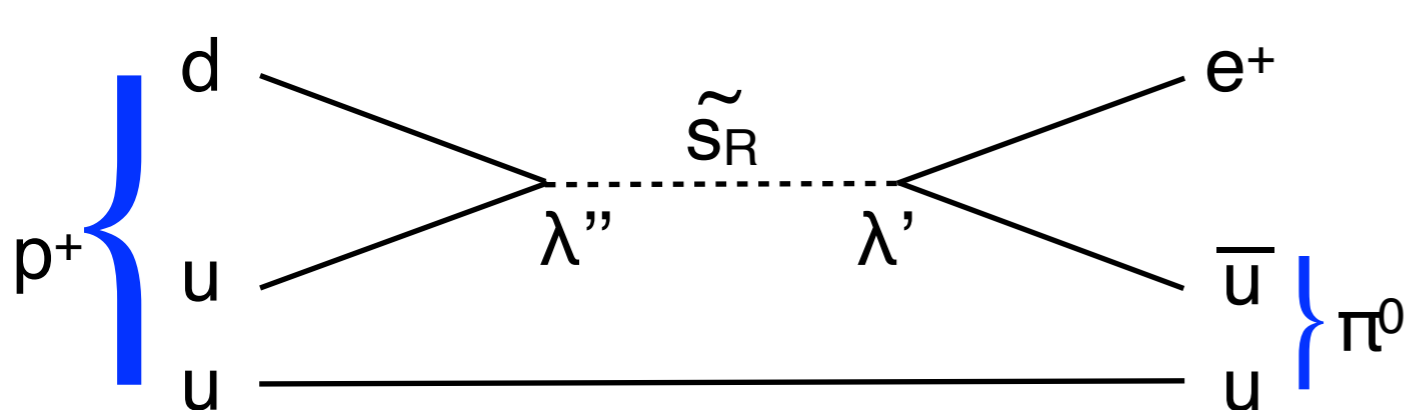
超対称性模型でズレを説明できる

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。

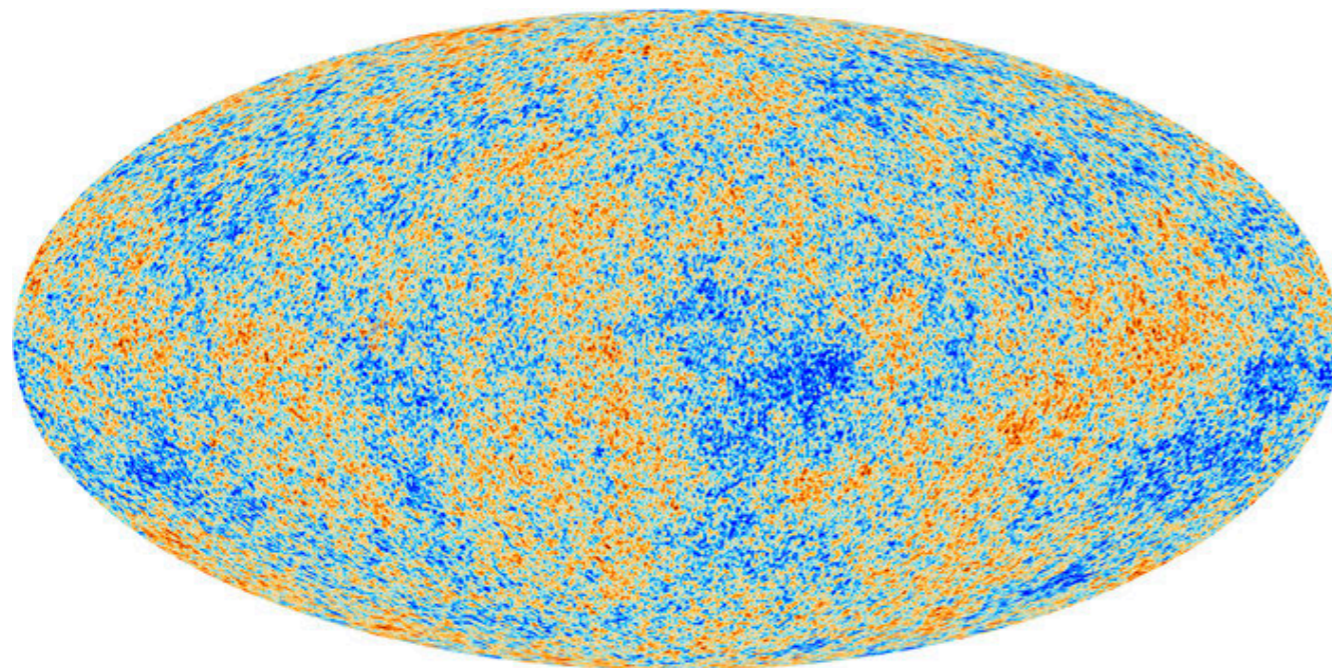
結果として、

- 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**

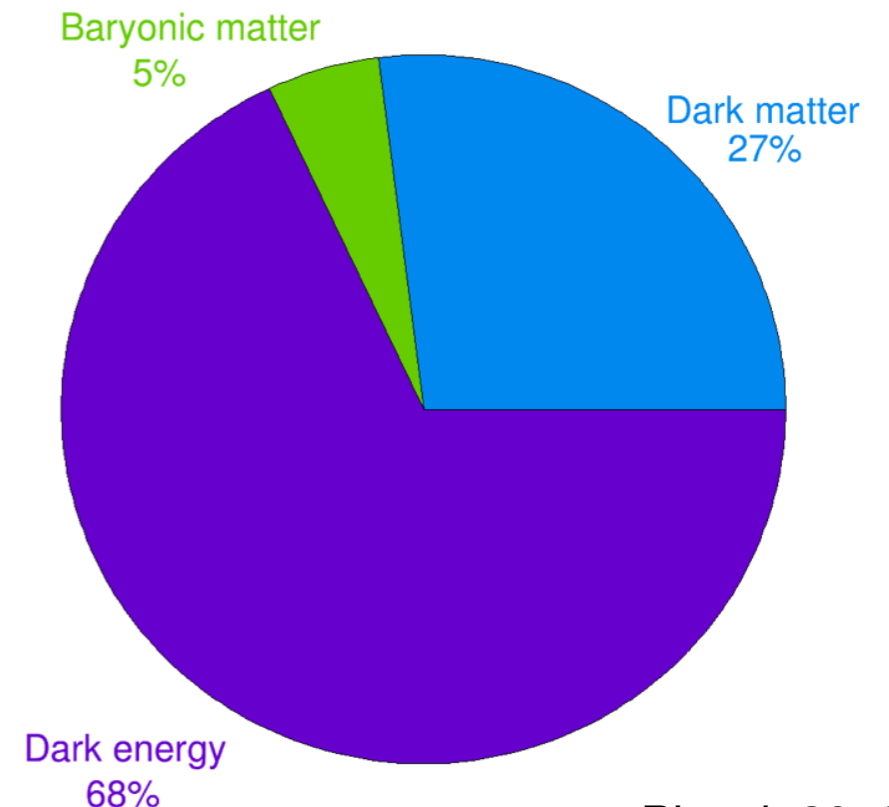
暗黒物質：ダークマター

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。



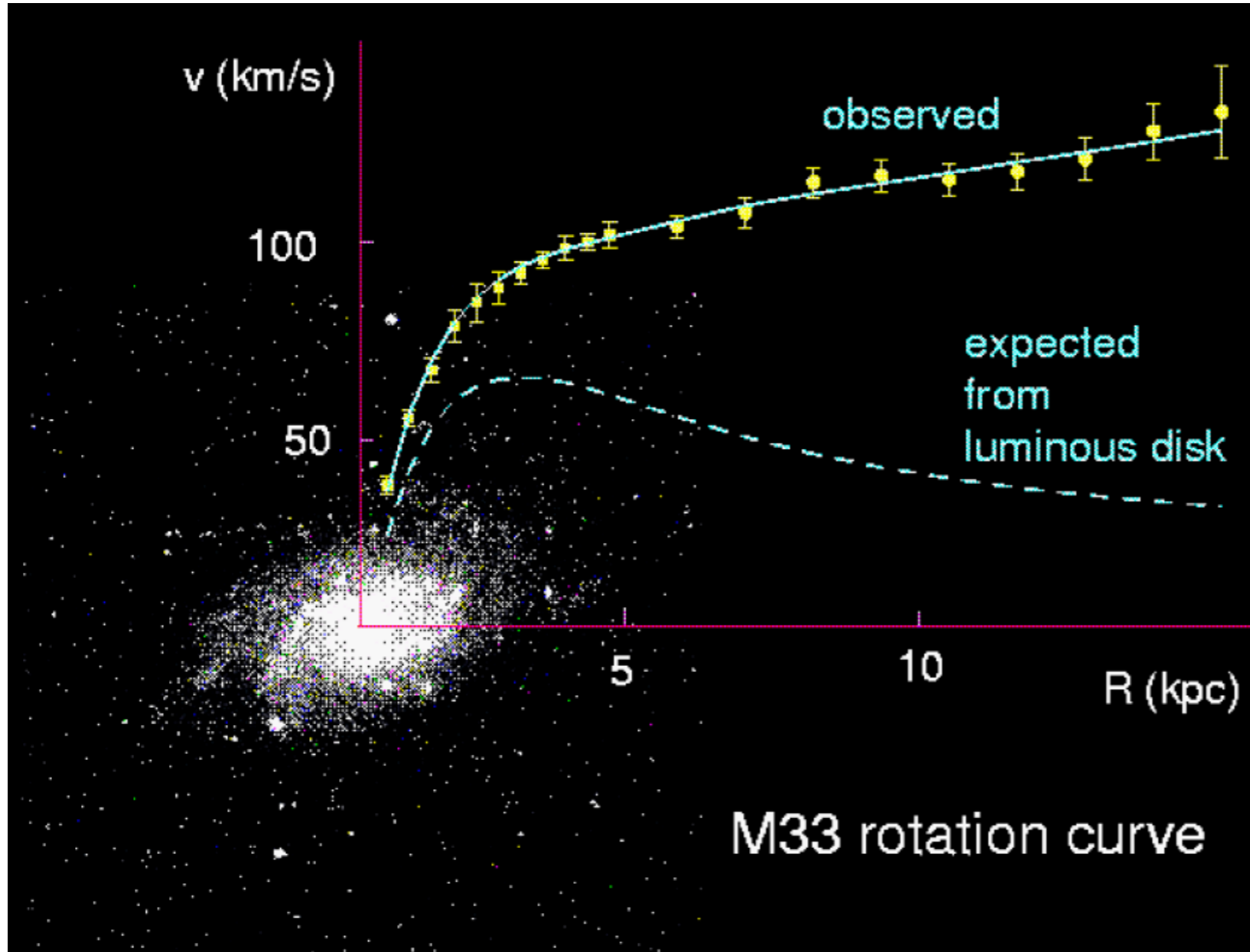
プランク衛星によるCMBマップ



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。

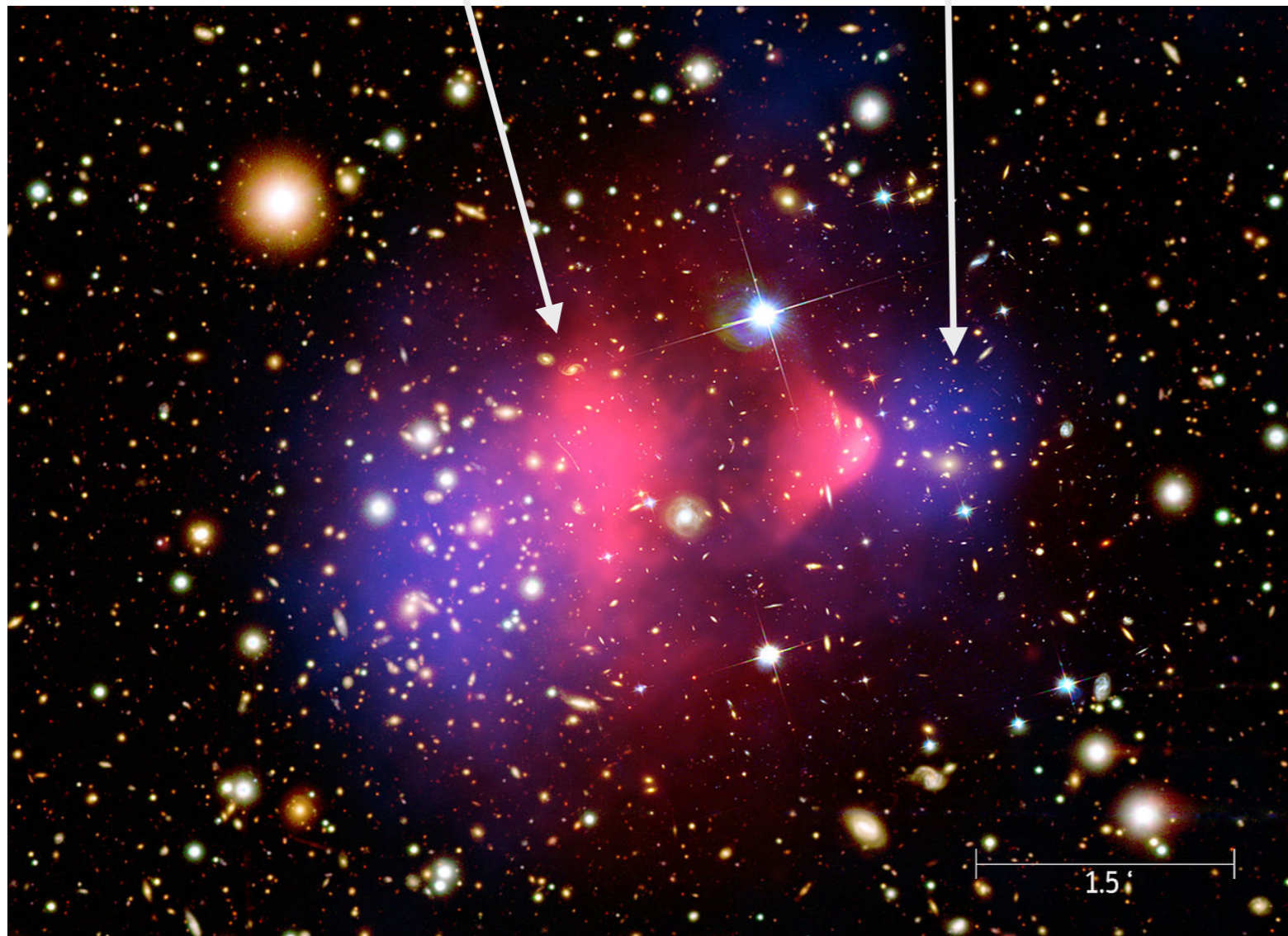
(他の天体から存在が予言された例: 海王星)

重力理論が間違っているだけでは？

距離が長くなると重力が予想よりも強くなる？

ガス

ダークマター



銀河団の衝突後の写真

(2004年4月、チャンドラ)

ガスの分布:

プラズマからのX線で場所がわかる
(銀河のハドロンの85%ぐらいはガス)

重力源 (ダークマター)の分布:

重力レンズからわかる

普通の物質の分布と重力源の分布がずれている

→ **重力理論の変更では説明できない。**

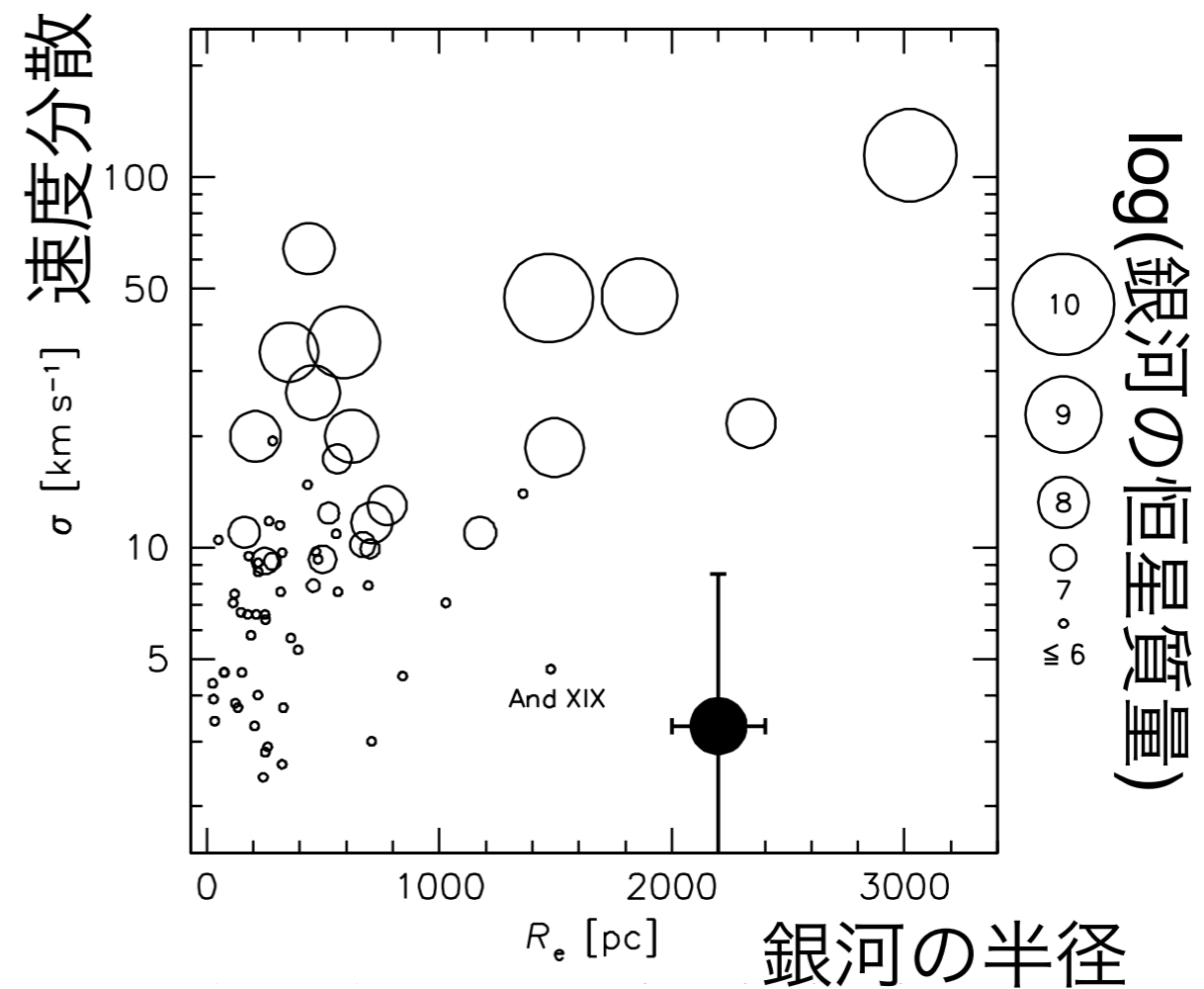
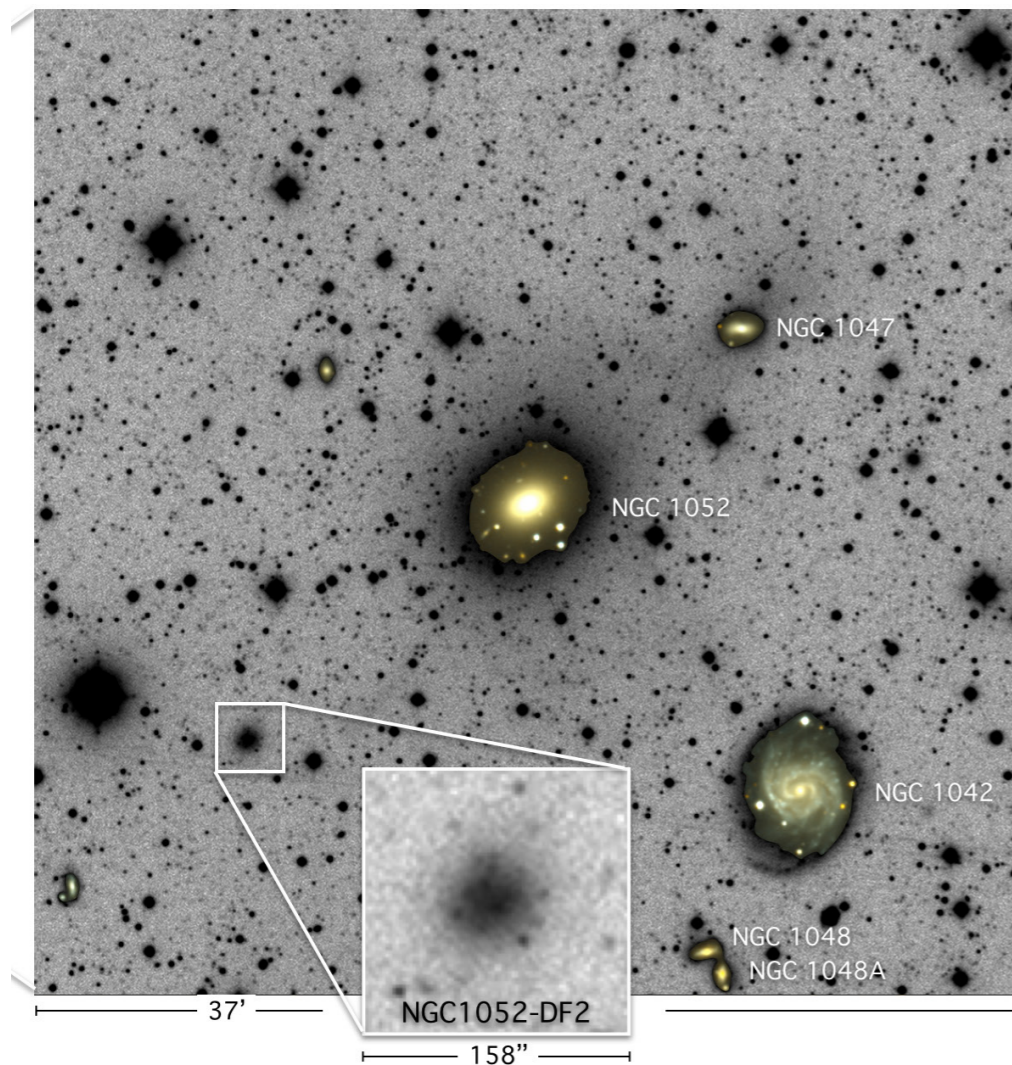
ダークマターがない銀河の発見

Nature 555, 629-632
(2018)

ダークマターが無い銀河の発見

→ ダークマターの含有量は銀河毎に違う。

→ (重力理論が宇宙で共通だとするなら) 重力理論の変更では説明つかない。

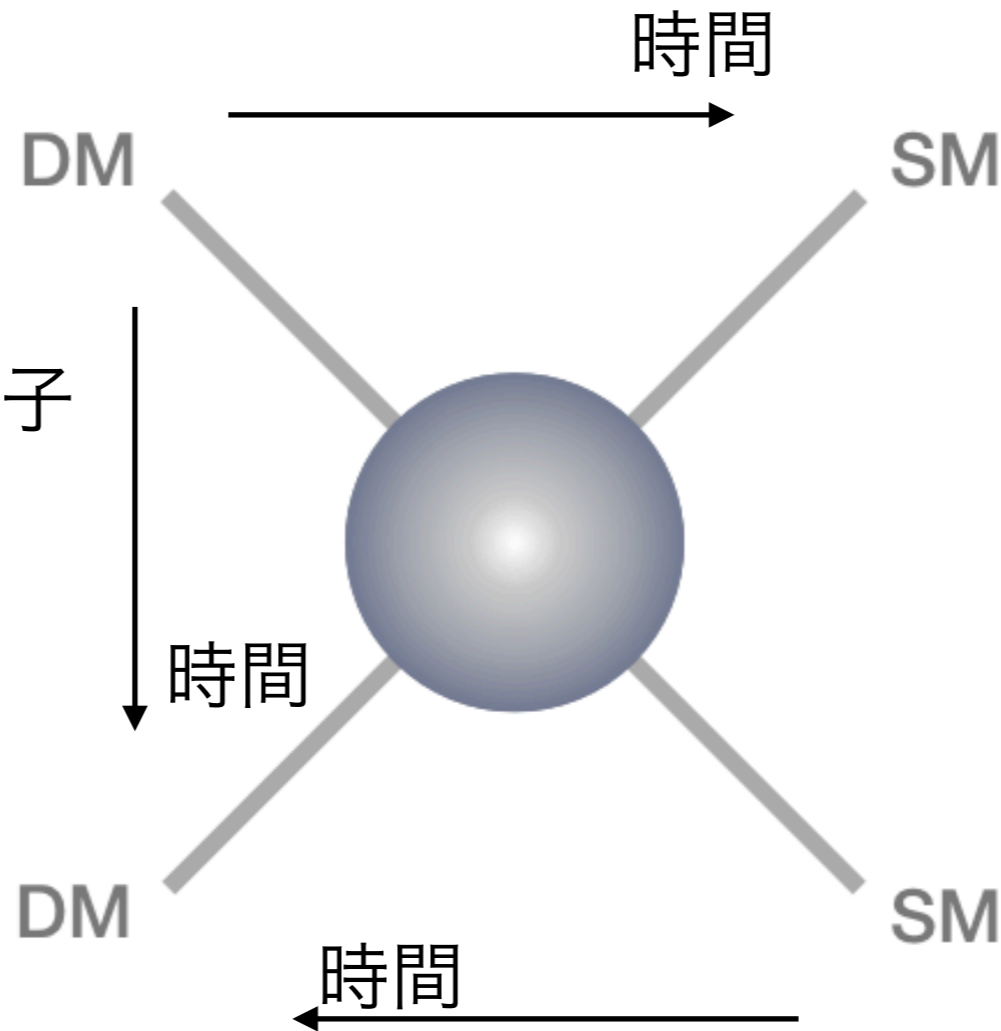


ダークマターがない銀河の発見が、ダークマターの存在の証拠！

ダークマターの探し方

ダークマターの対消滅で発生する標準理論粒子(反粒子の超過)を探す。(間接探索)

ダークマターが標準理論粒子を反跳する事象を探す。
(直接探索)



標準理論粒子からダークマターを作る(LHC)

DM直接探索

ダークマターの制限

世界のDM直接探索実験 (少し古いですが)

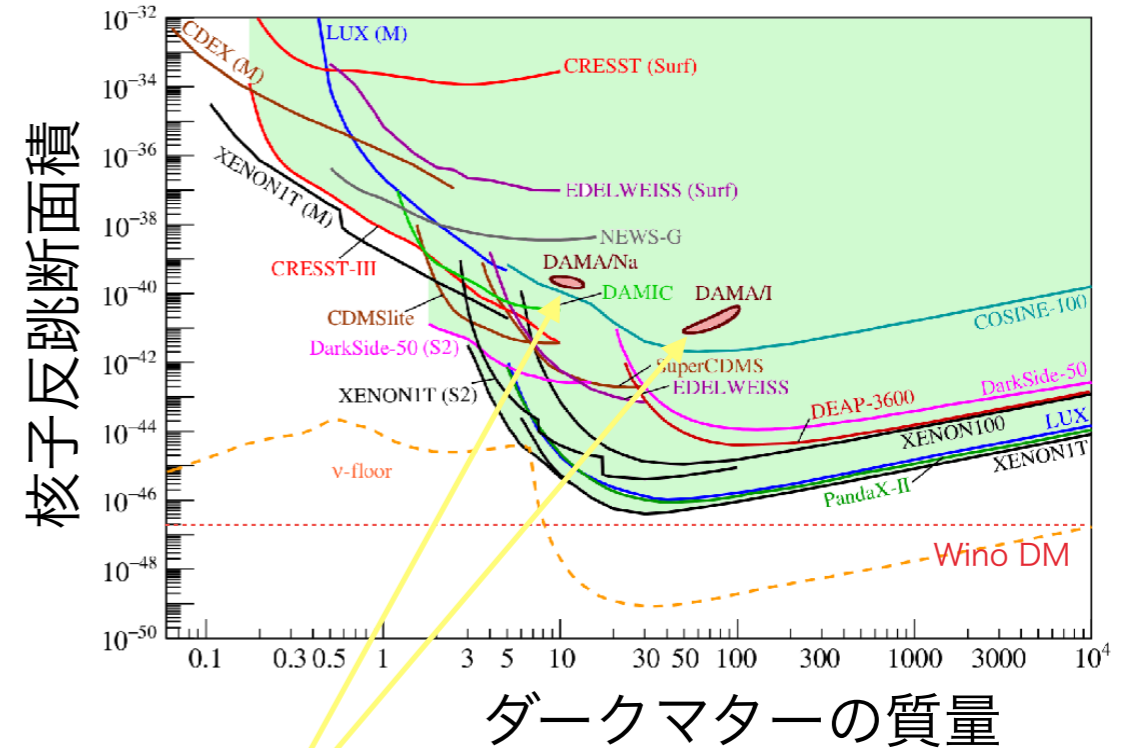
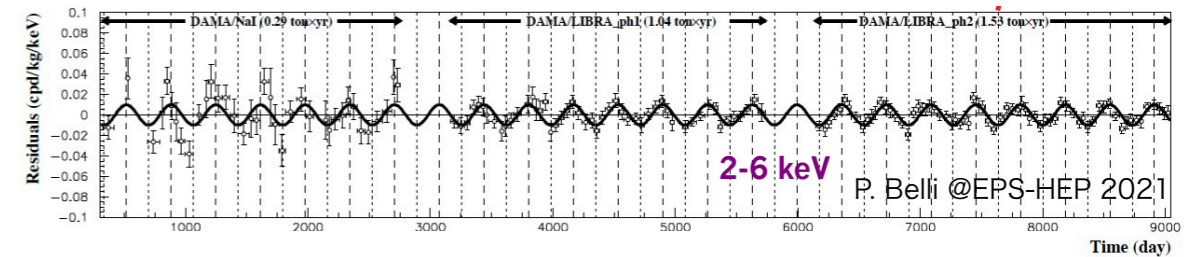


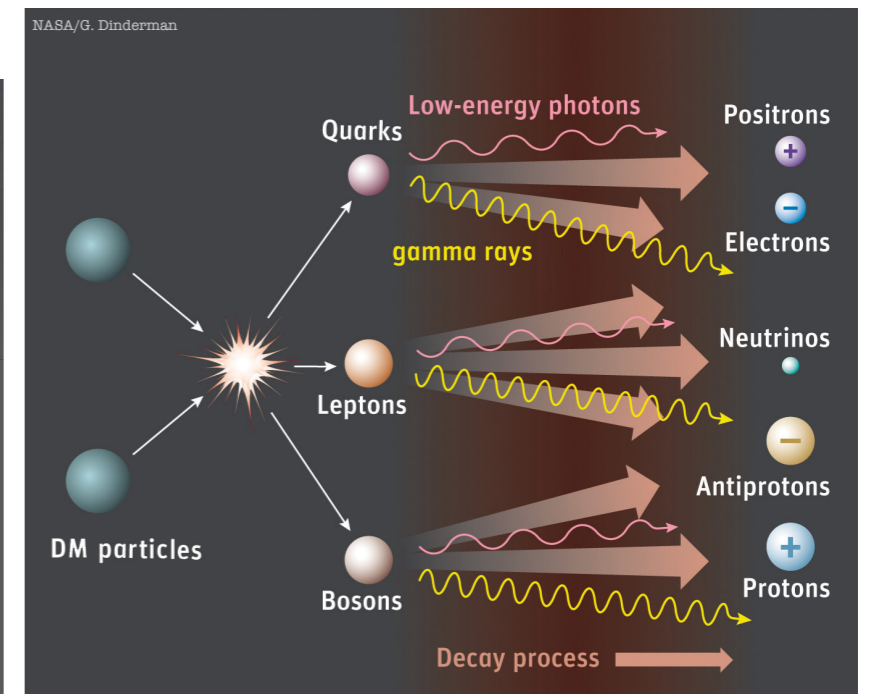
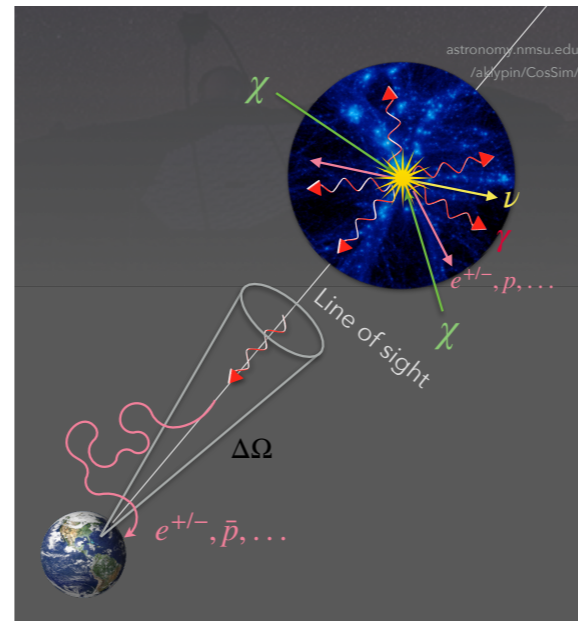
Figure: APPEC DM Report: <https://indico.cern.ch/event/982757/overview>



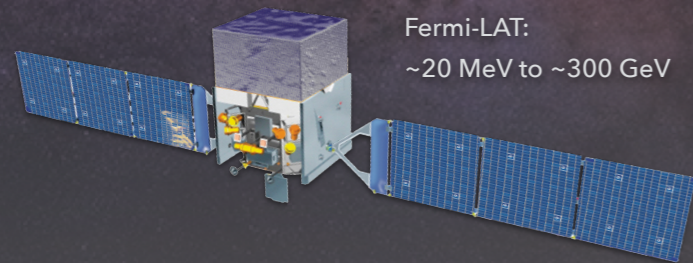
DAMA/LIBRAでは信号の年周期がはっきり見えているが、他の実験では確認されていない。

- ダークマターが地球の周りにも平均的に分布していると仮定すると、 $O(100\text{GeV})$ のダークマターが 6×10^4 個/cm²/sec通過している。
- 液体キセノンやNaI等の検出器を地下において、反跳される信号を探す。

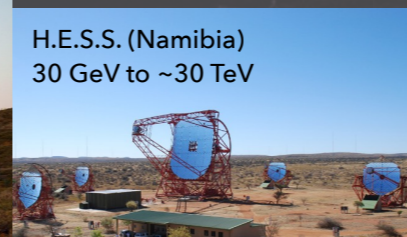
DM間接探索



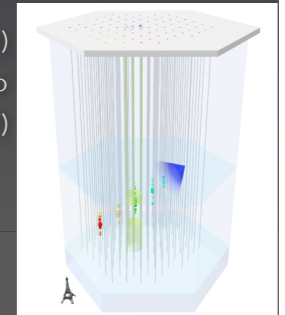
Indirect detection instruments



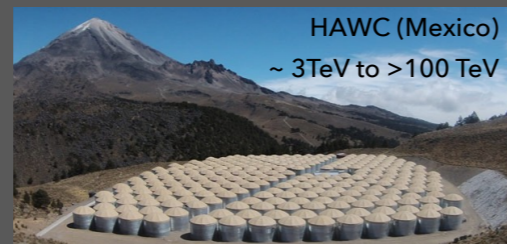
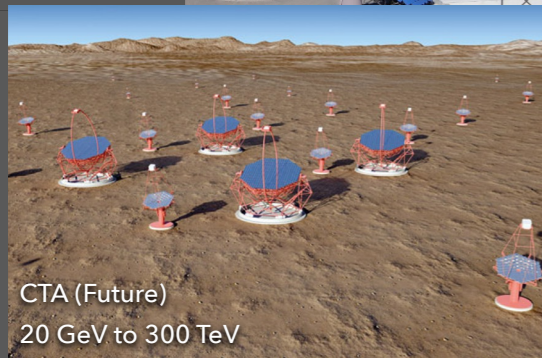
Energy



IceCube (South Pole)
Neutrinos (~100 GeV to >PeV)



Tibet ASγ (China): > 1 TeV



間接探索

国際宇宙ステーション等の衛星搭載実験、地下や水中に設置したニュートリノ検出器、地上の望遠鏡アレイ

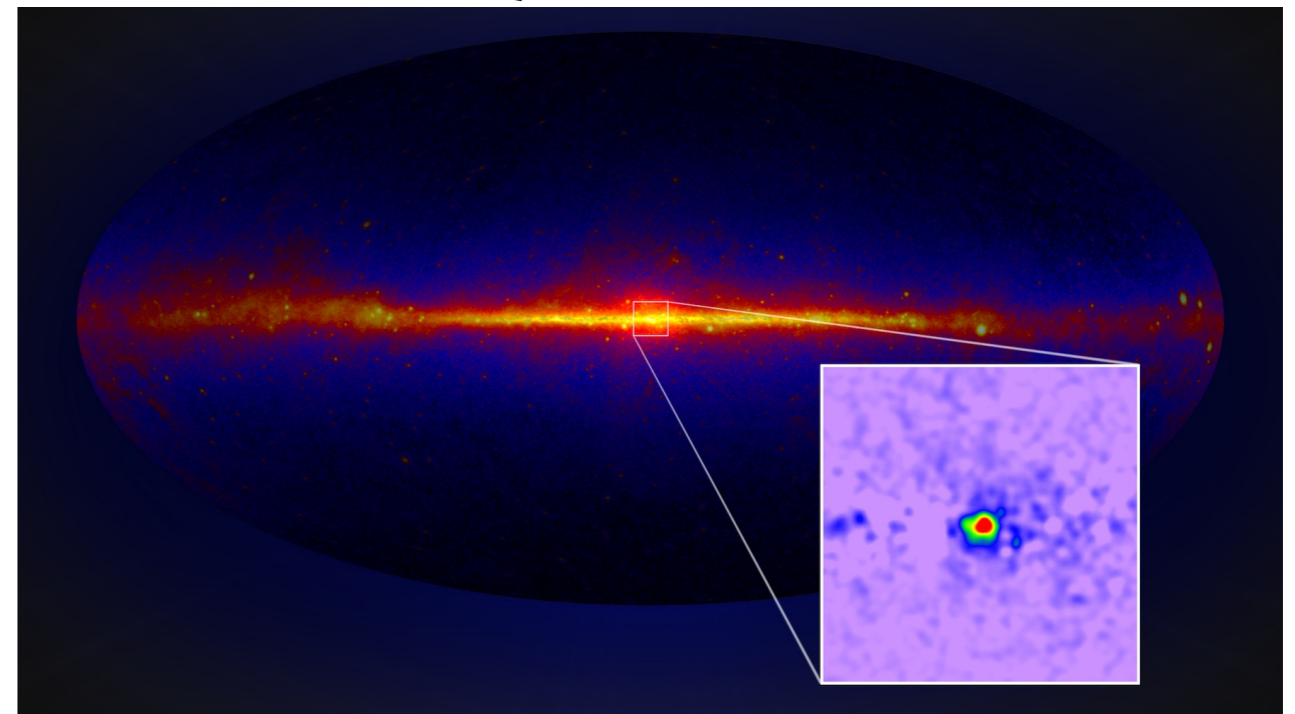
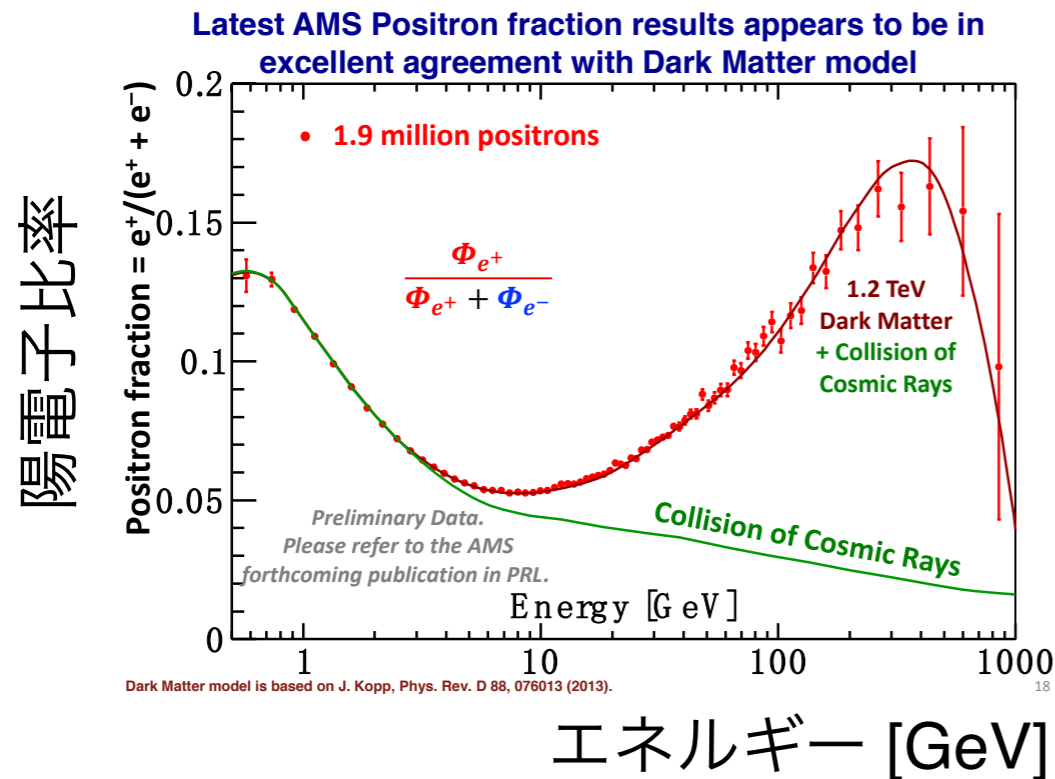
方法: ダークマターの対消滅からの反粒子、ガンマ線、ニュートリノ等の検出。

(宇宙線の生成や輸送、ダークマター分布に不定性が難点)

AMS実験が観測した陽電子の超過。
1.2 TeVのダークマターと合いがいい。

Fermi/LAT実験が観測した γ 線の超過。

四角の中は背景ガンマ線を差し引いた分布



間接探索

国際宇宙ステーション等の衛星搭載実験、地下や水中に設置したニュートリノ検出器、地上の望遠鏡アレー

方法: ダークマターの対消滅からの反粒子、ガンマ線、ニュートリノ等の検出。

(宇宙線の生成や輸送、ダークマター分布に不定性が難点)

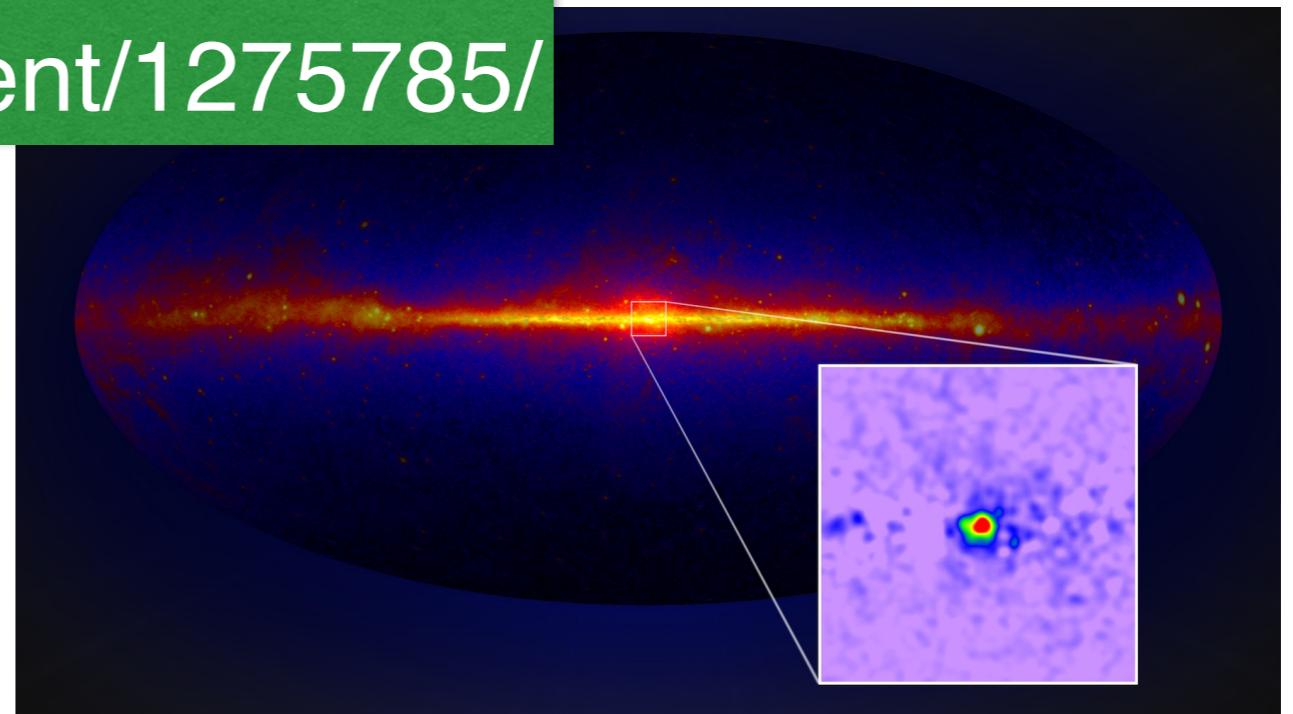
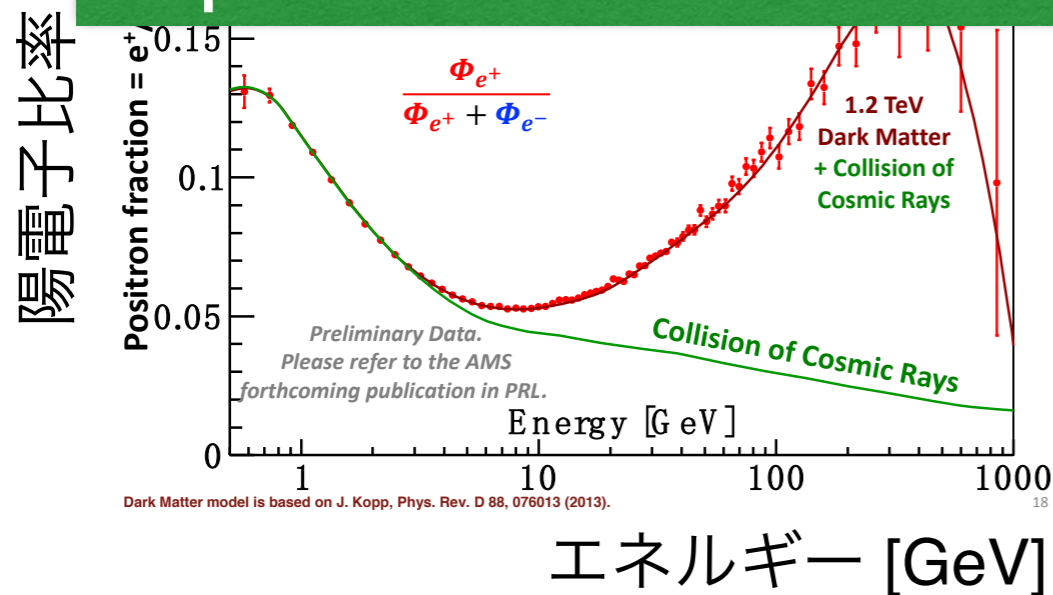
AMS実験が観測した陽電子の超過。
1.2 TeVのダークマターと合いがいい。

Fermi/LAT実験が観測した γ 線の超過。

今週の金曜日に最新結果発表

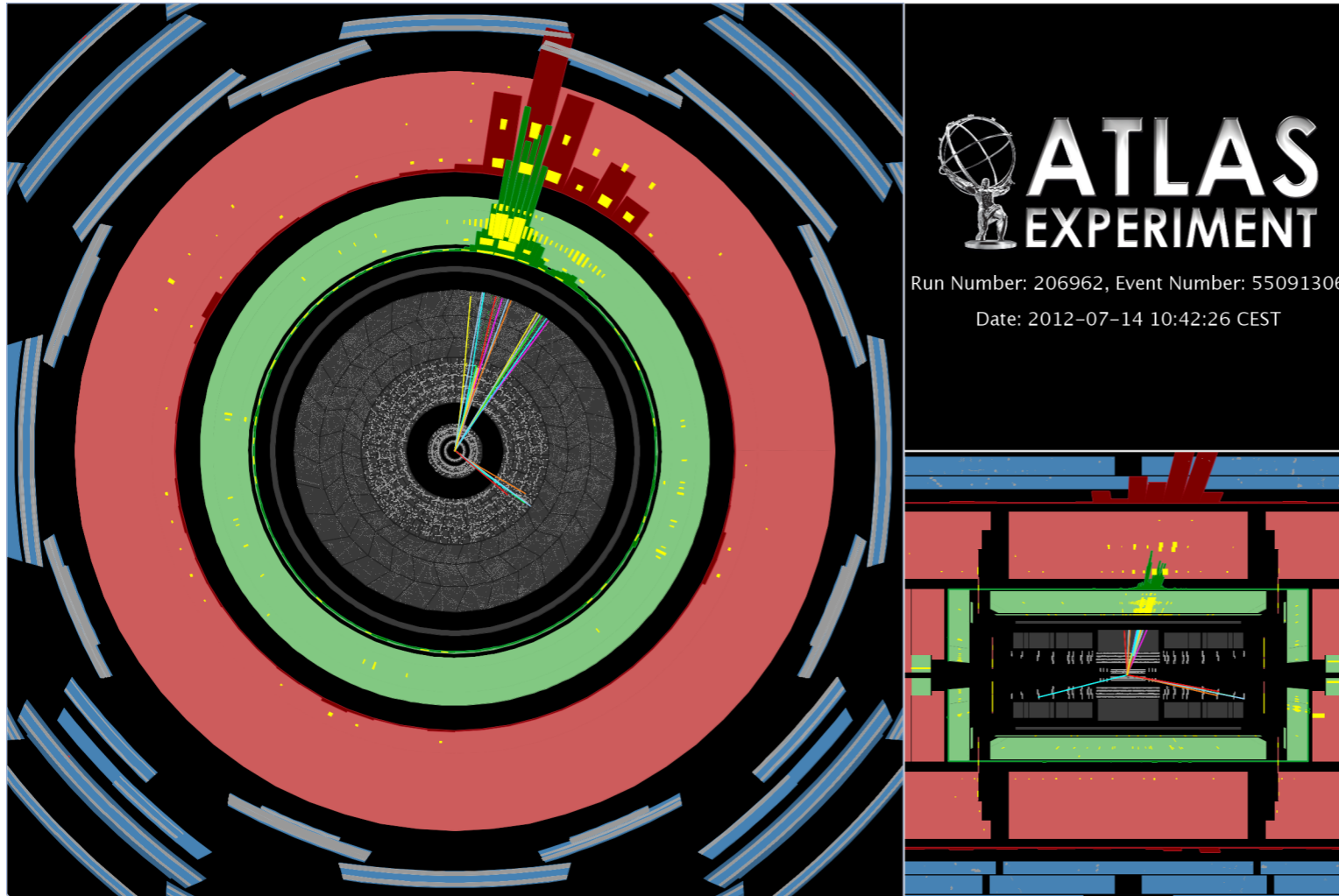
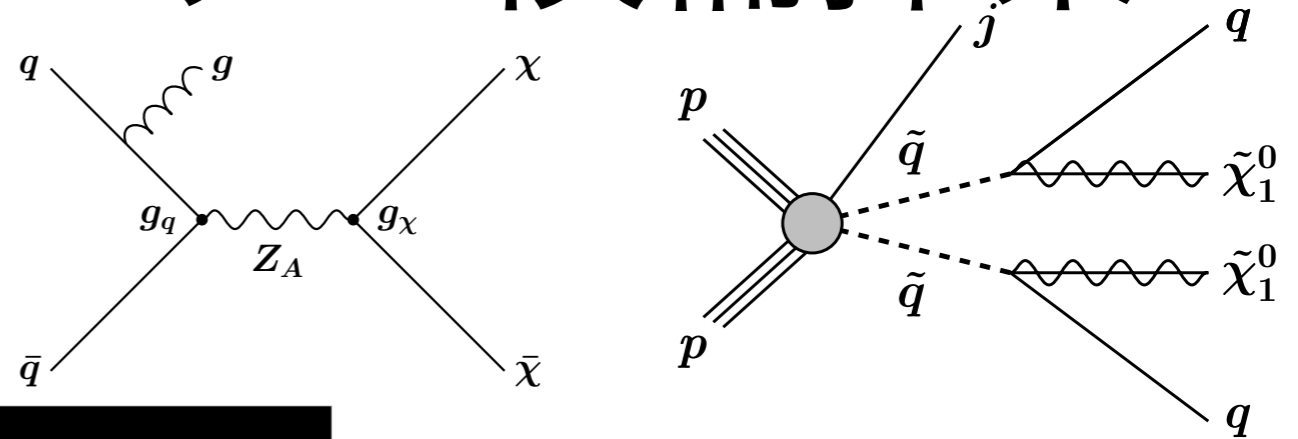
の中は背景ガンマ線を差しいた分布

<https://indico.cern.ch/event/1275785/>

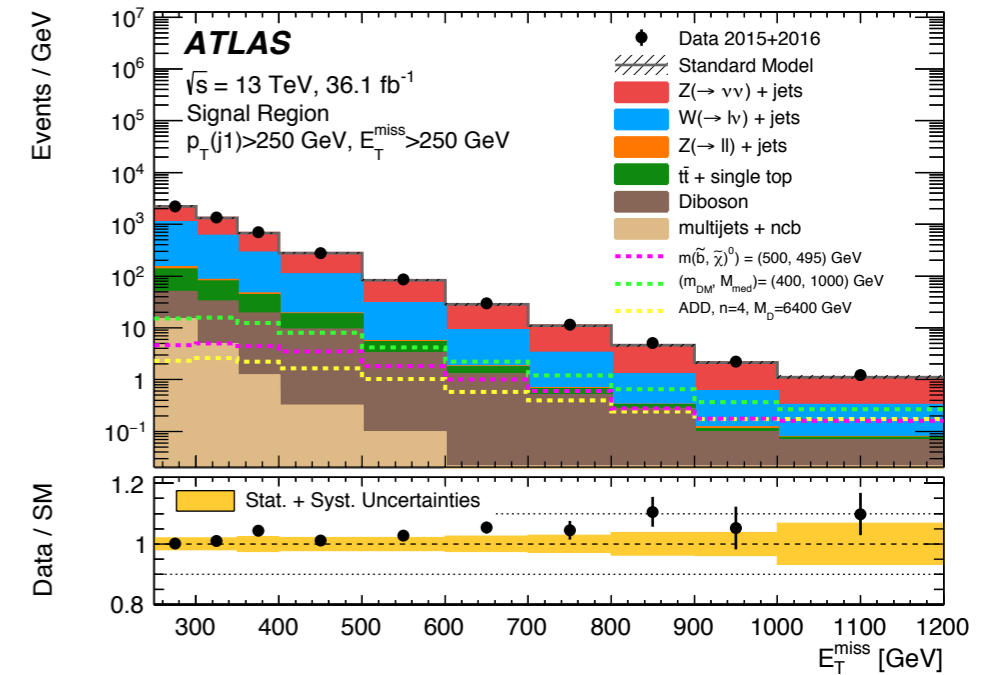


典型的な LHCでのダークマター候補探索

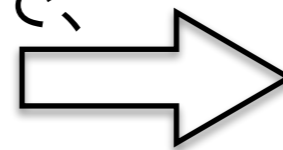
高い消失運動量とジェットを持つ事象の超過を探す。



消失横運動量分布



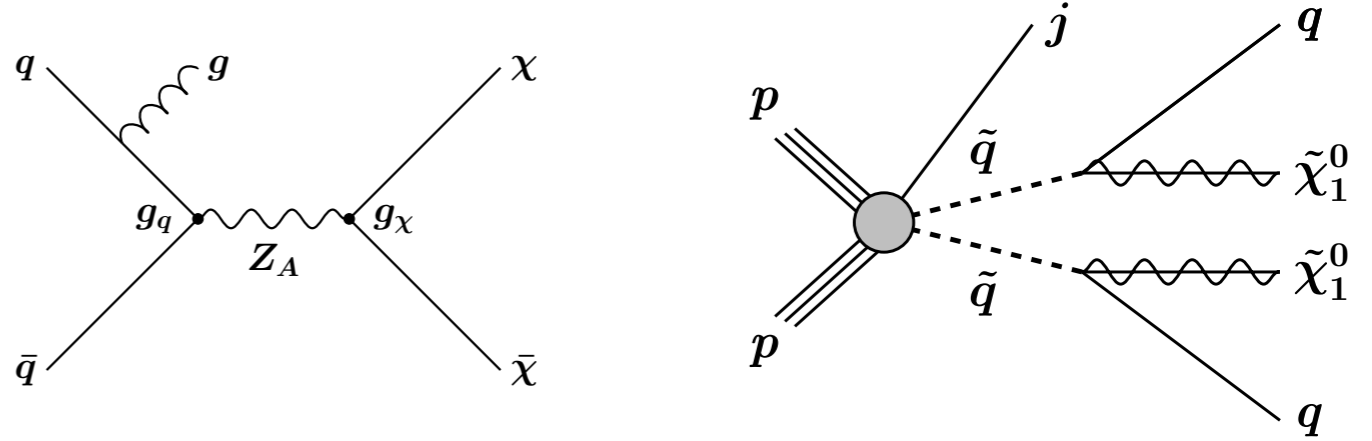
衝突前の陽子ビームは横運動量を持たないので、
衝突後の横運動量の総和は0になるはず。



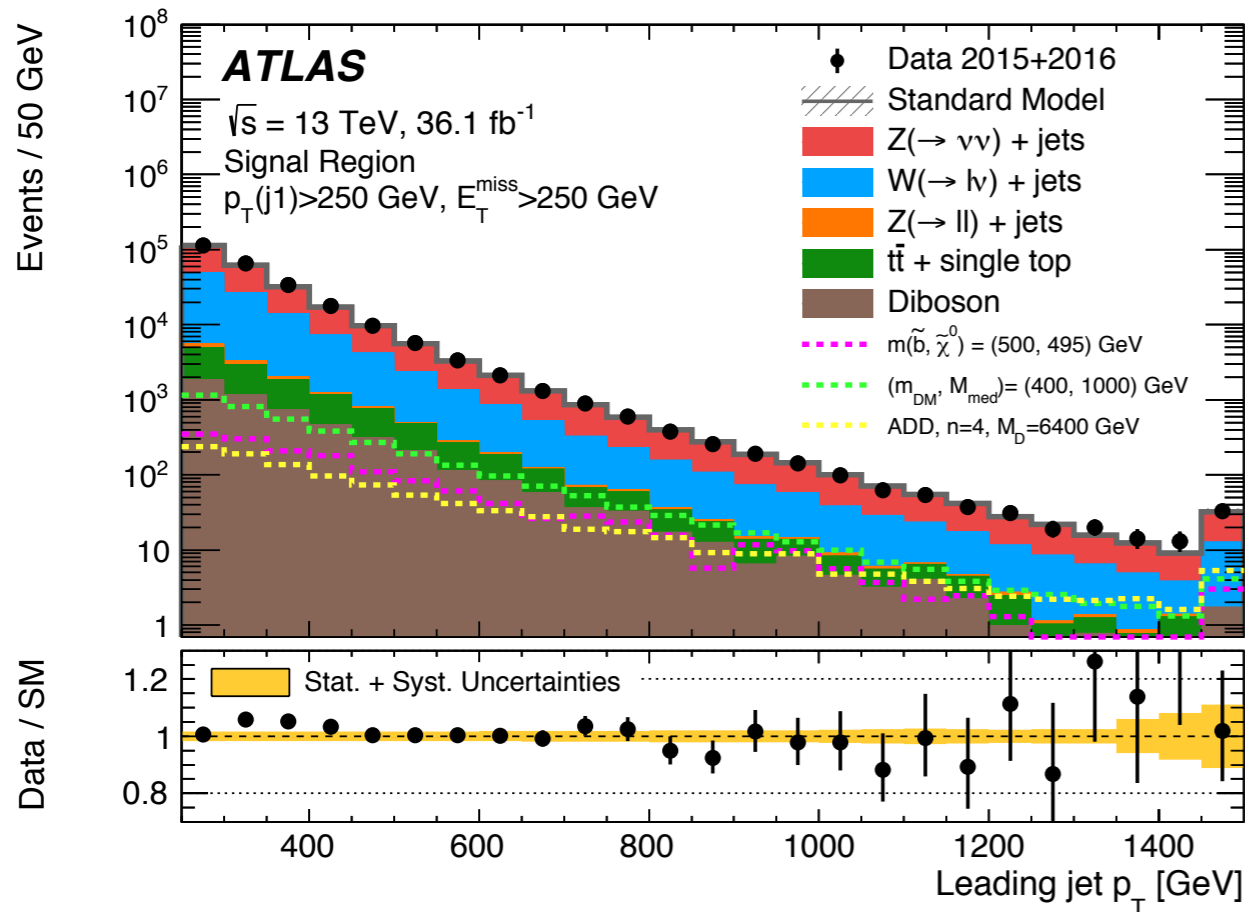
見えない粒子の横運動の和
を計算できる。

典型的な LHCでのダークマター探索

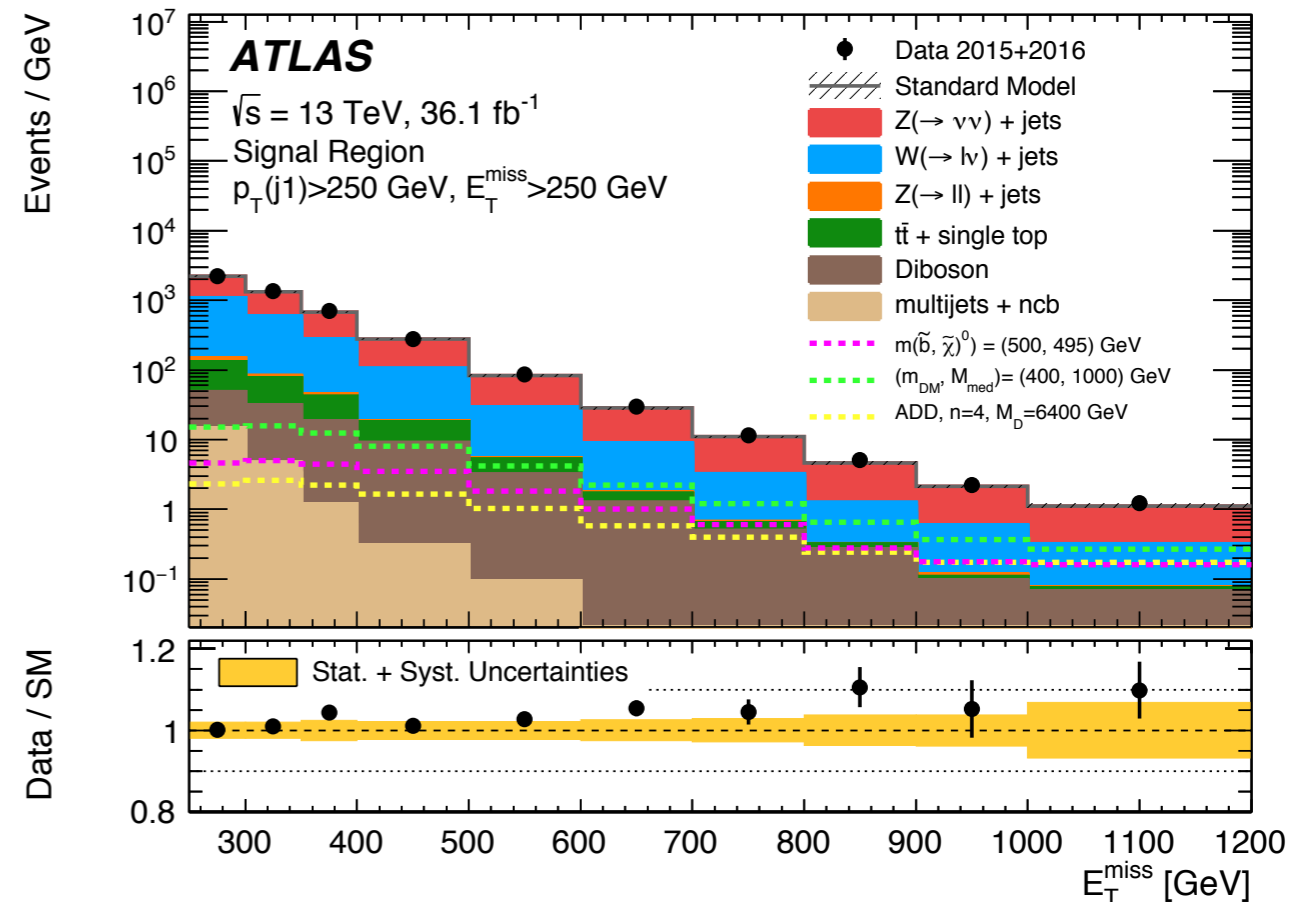
高い消失運動量とジェットを持つ事象での超過を探す。



ジェットの横運動量



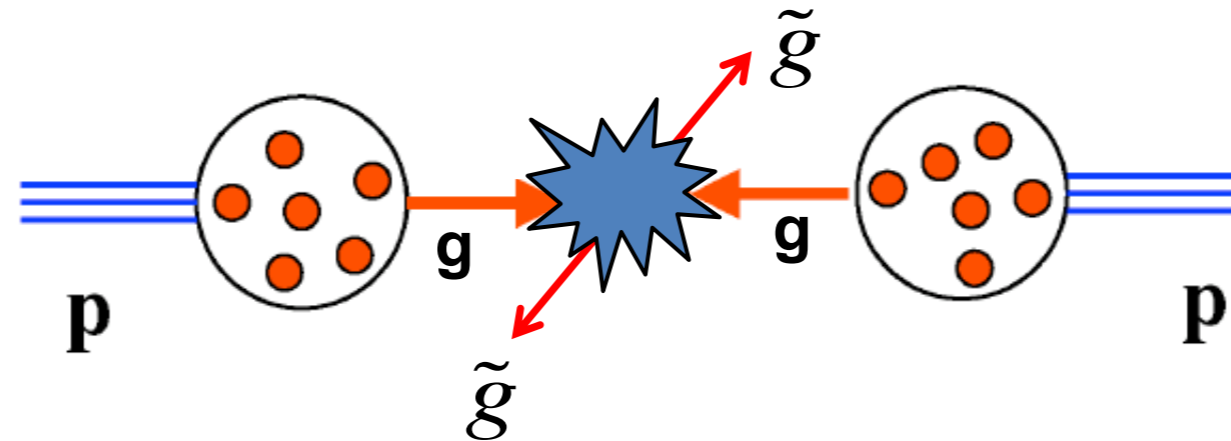
消失横運動量



LHCでの超対称粒子生成

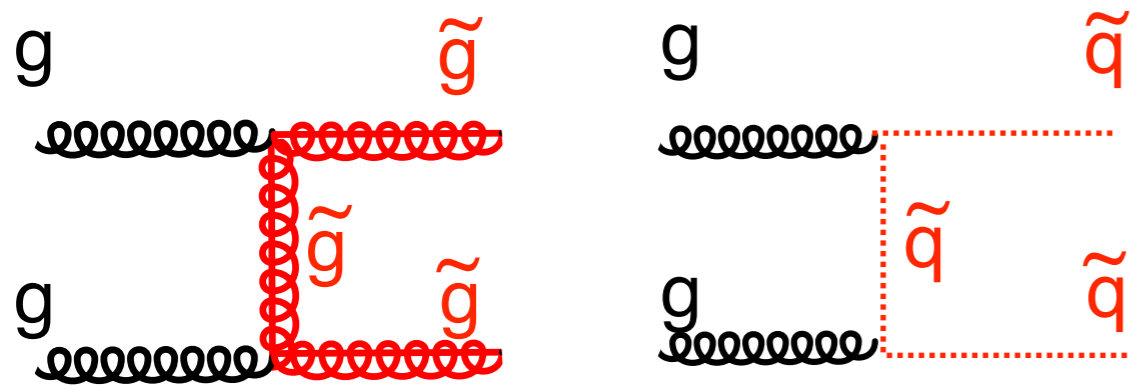
一番軽い中性SUSY粒子はダークマター候補

→ 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

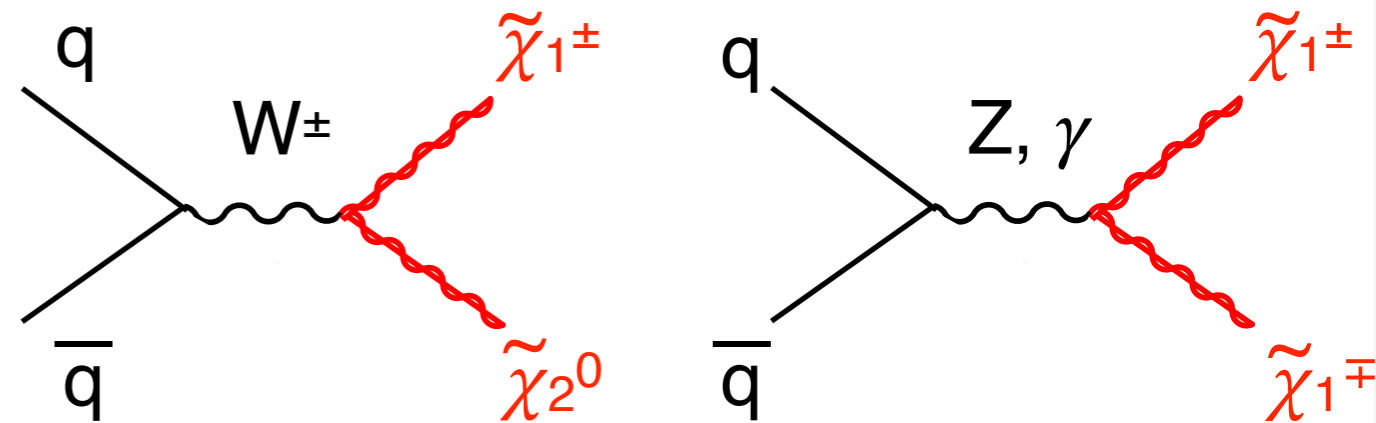


ここに示したのは代表的なダイアグラムのみ。
他のチャンネルもある。

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



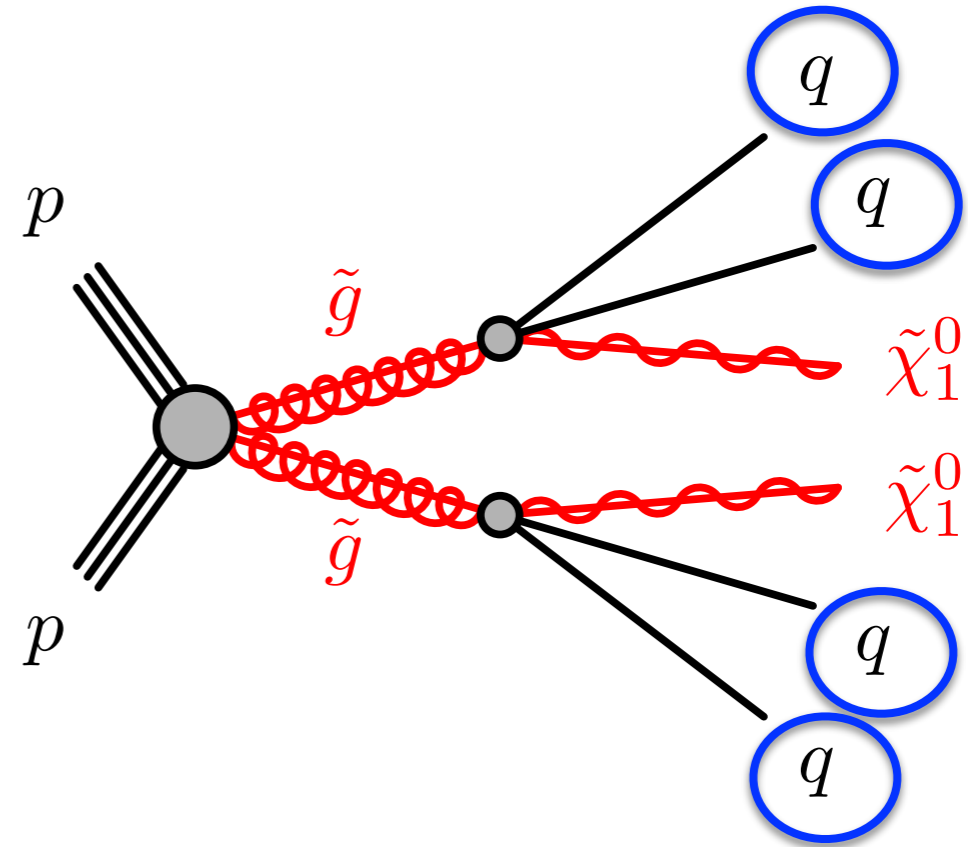
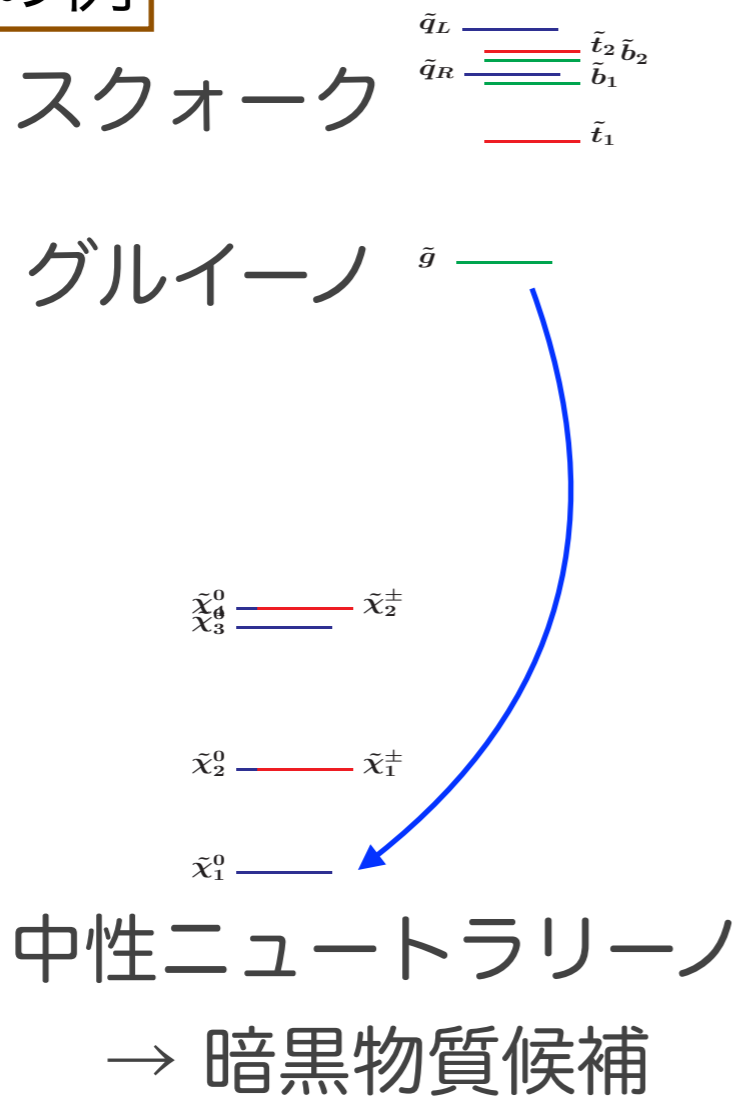
LHCは高エネルギー(“グルイーノコライダー”)なので、左の断面積が高い

超対称性粒子探索

といっても、たくさんの解析がある

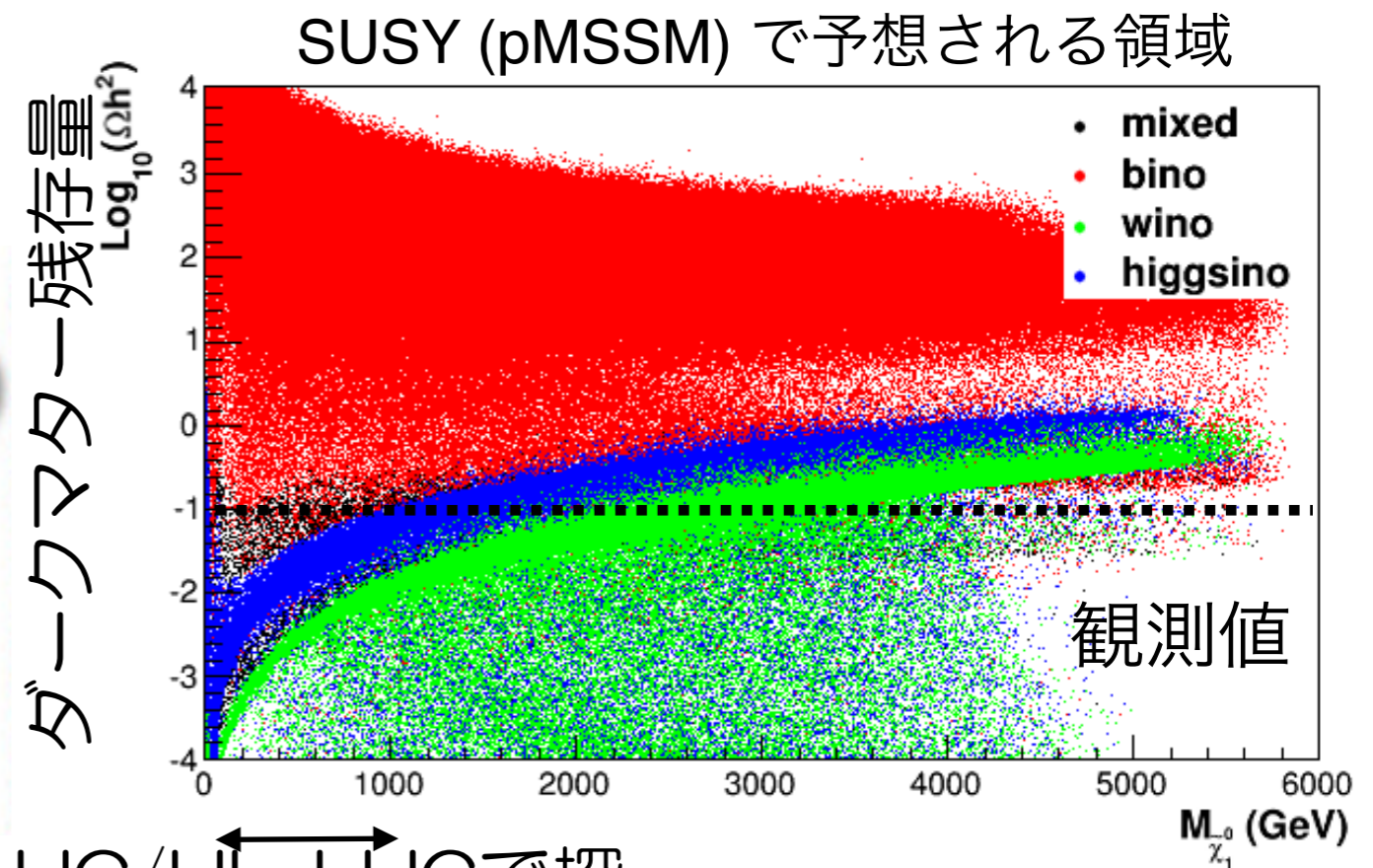
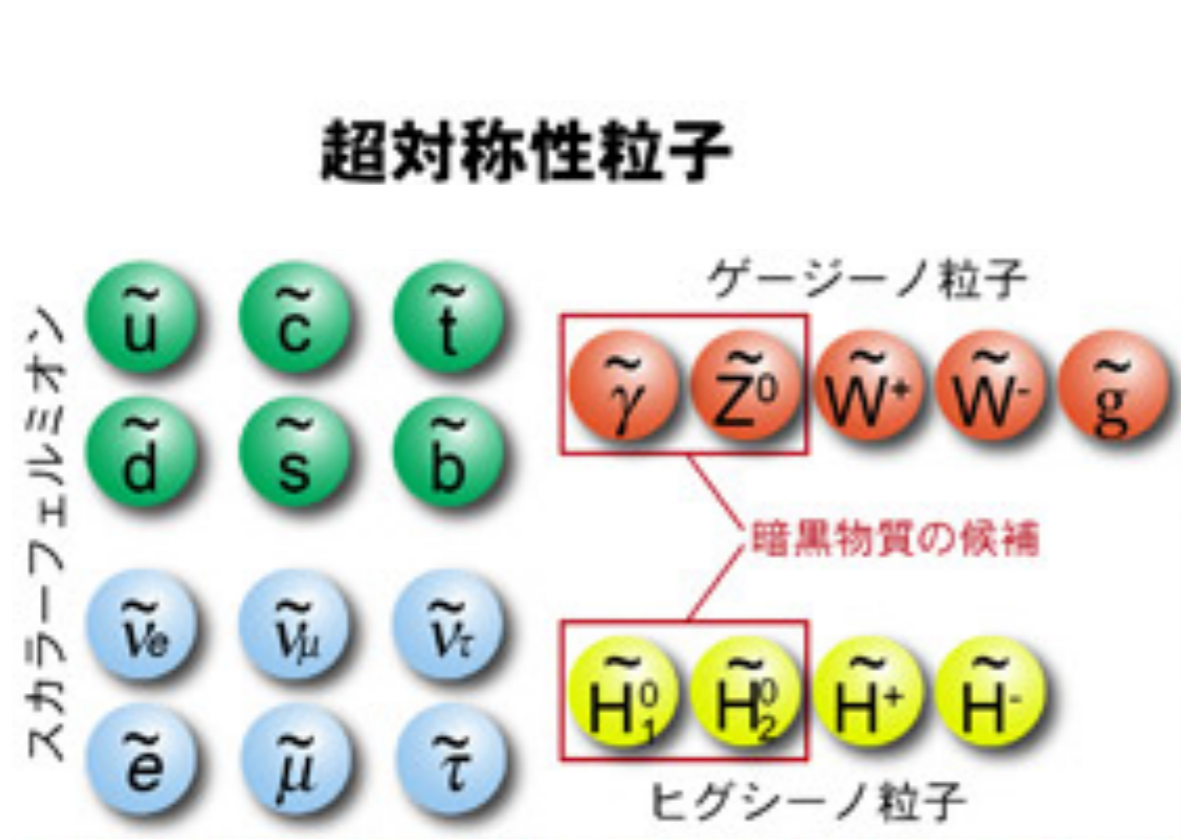
- 大きな消失横運動量という条件だけだと背景事象が多すぎるので、探索するチャンネルに応じて追加の条件をつける。
- SUSY粒子の質量階層はモデルにより様々

質量階層の例



グルイーノが重いので、高エネルギーのジェットが複数でる。

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

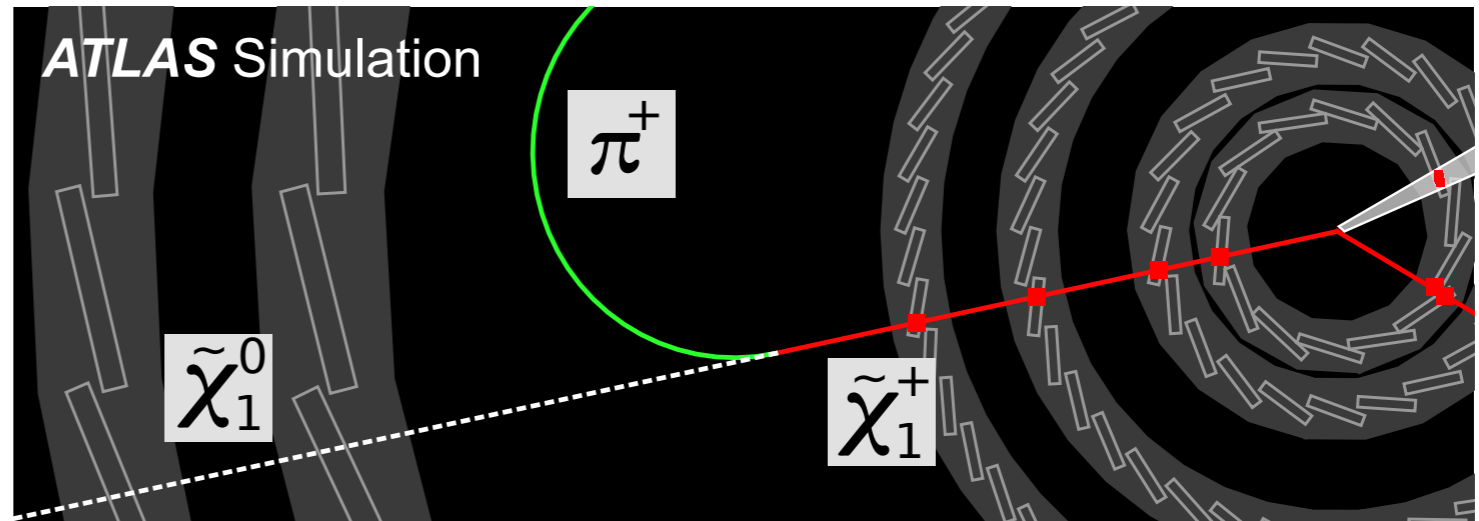
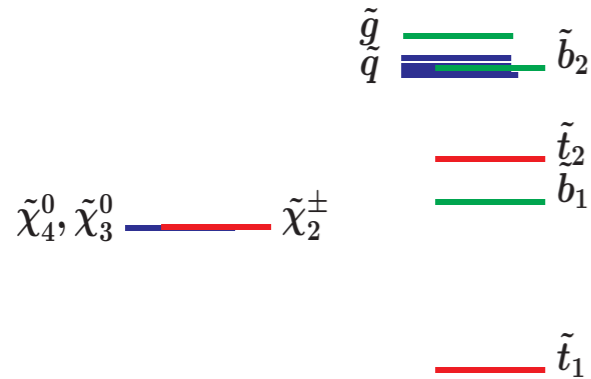
ウィーノとヒッグシーノ: 観測された残存量を実現できる。ダークマター全部がこれの場合の質量はそれぞれ**3TeV** (ウィーノ), **1TeV** (ヒッグシーノ)と予想される。他のもの(アクシオン等)もある場合はこれよりも軽くなる。

TeV領域のダークマターをLHCで作れる?

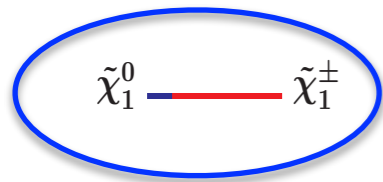
長寿命ウィーノ探索

消失飛跡探索

AMSB SUSY

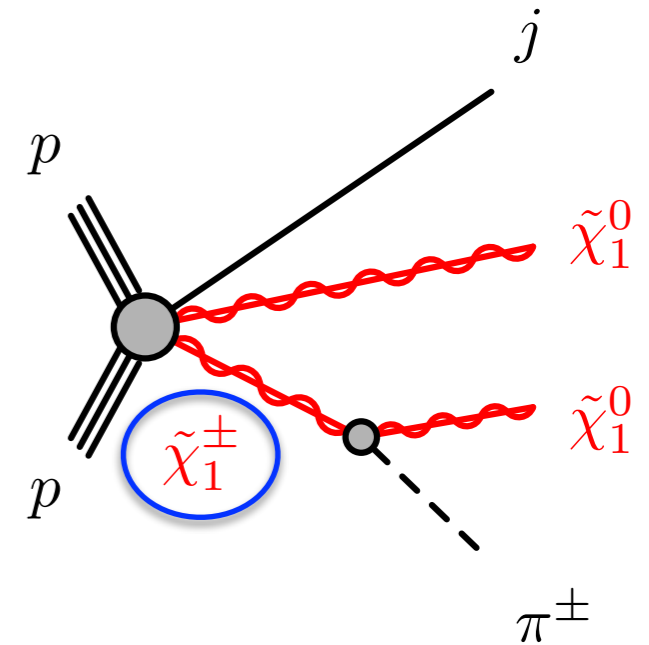


$\tilde{\chi}_2^0$ —



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。

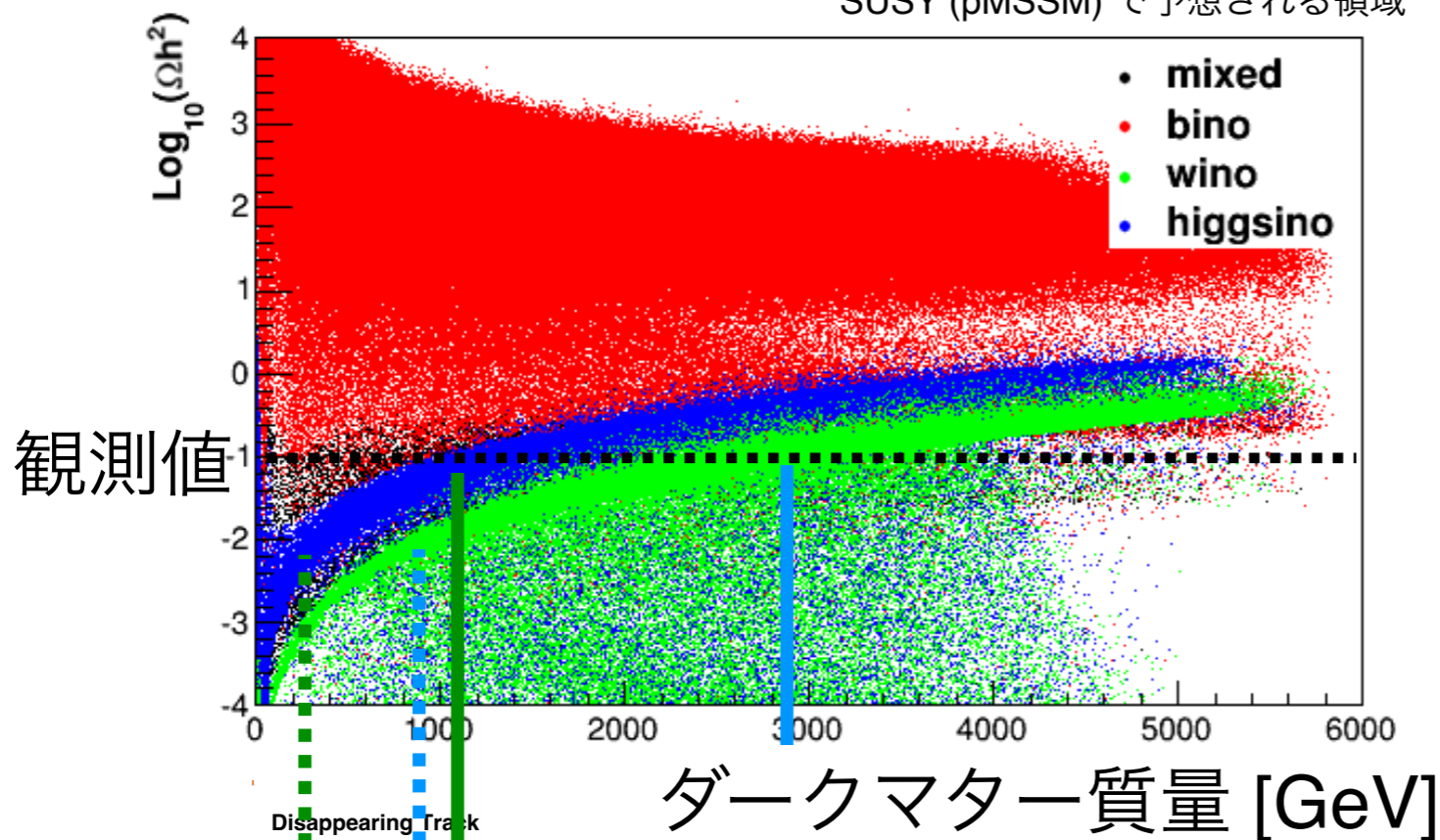
Run2フルデータの結果で660 GeVよりも重いことがわかった。

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

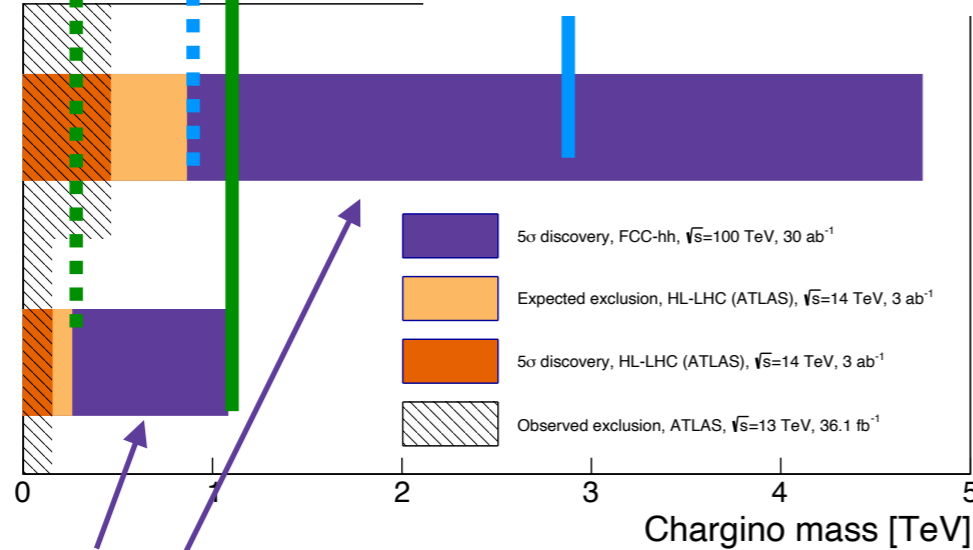
SUSY (pMSSM) で予想される領域



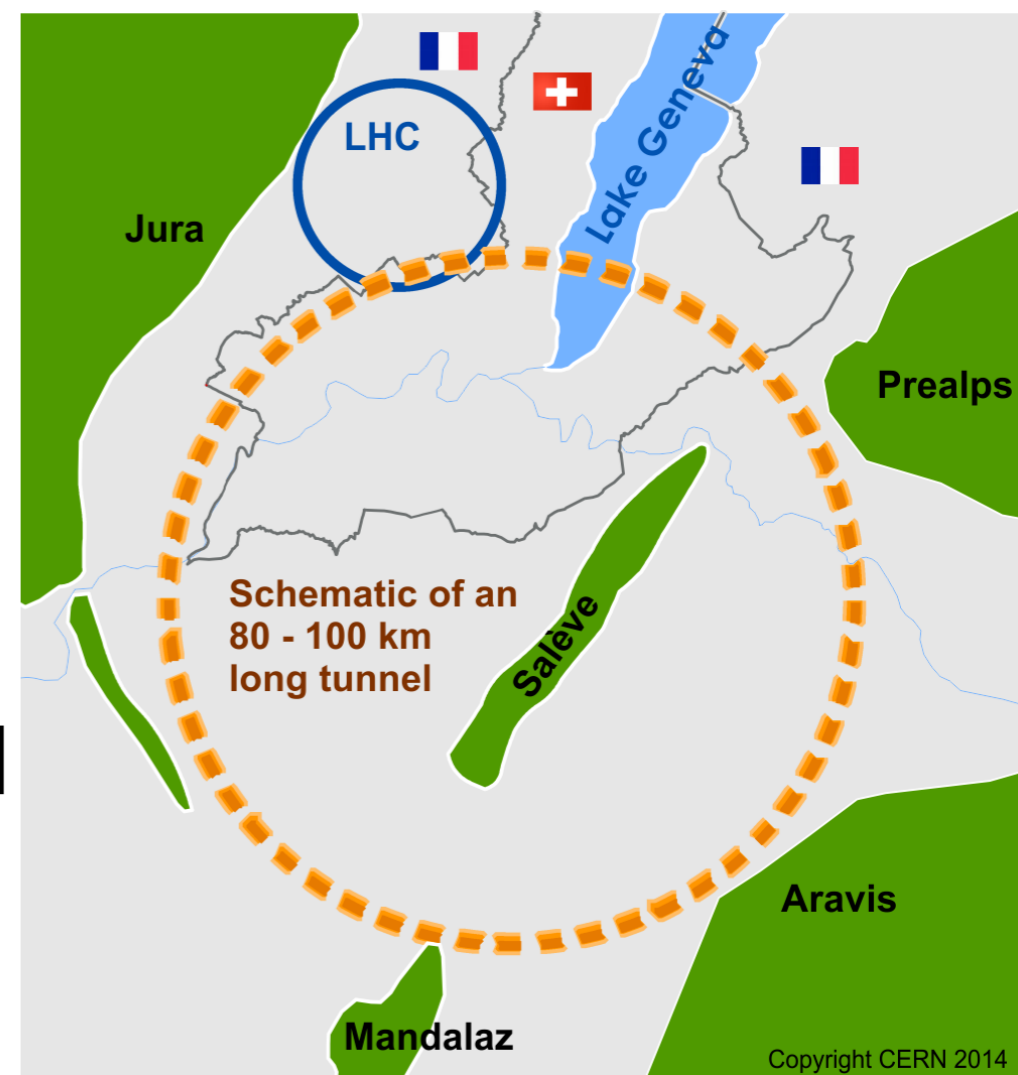
ウィーノ

ヒッグシーノ

FCCでの感度



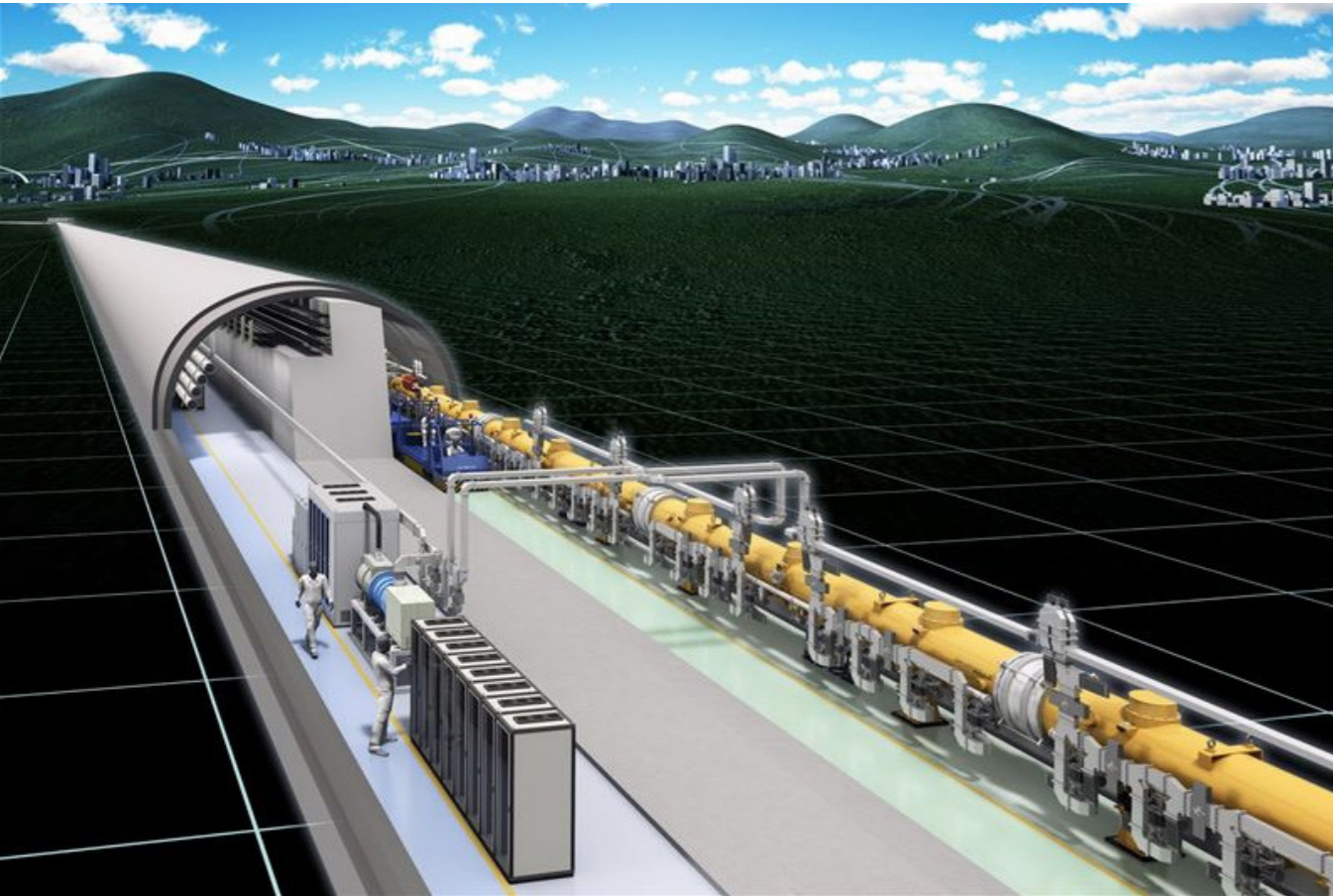
ICEPPも参加



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

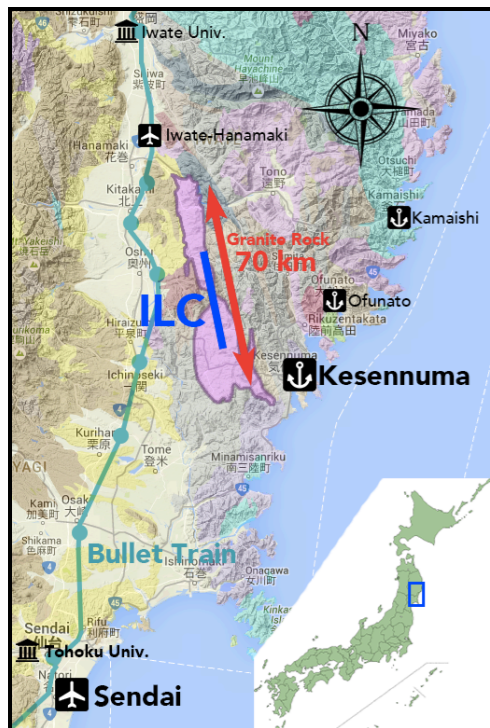


KEK(Belle)やJ-PARCとは何が違うの？

エネルギーが高いため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？

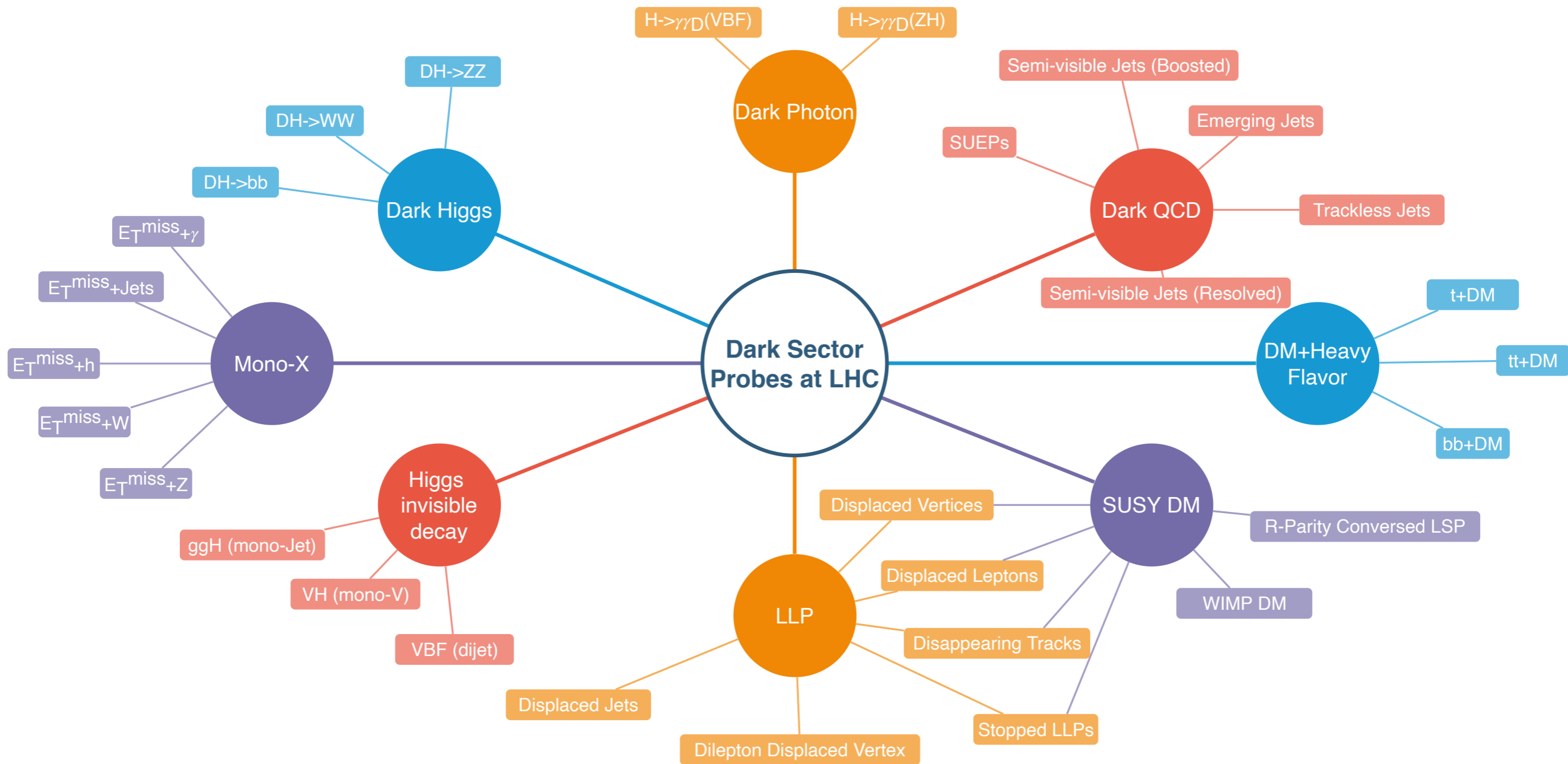
電子と陽電子 (両方素粒子) の衝突なので、出てくる”ゴミ”粒子数が少ないので、精密な研究ができる。



- ・ 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)

近年は超対称性模型以外の様々なダークマター候補を網羅的に探索



L. Wang@Blois'22

軽いダークマター

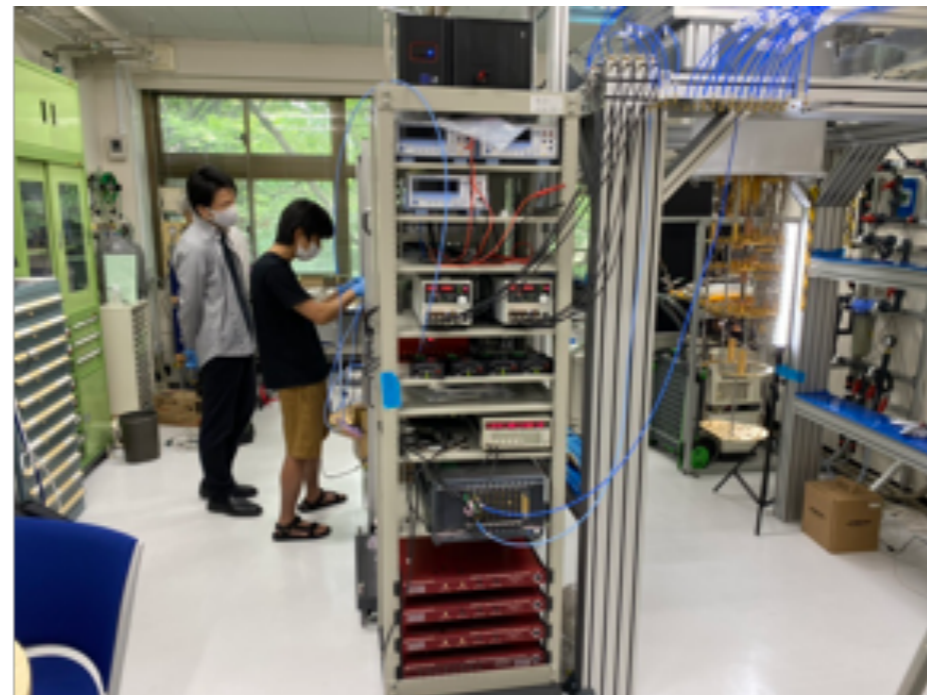
- ダークフォトン: 現理論的現象論において導出されるらしい
- アクシオン: なぜ強い相互作用にCP対称性があるのか(強いCP問題)を説明するモデルに含まれる粒子

の二つもダークマターの候補。

宇宙論的には μeV から meV (周波数でいうと $0.1\text{--}100\text{GHz}$)が好ましい。

ダークフォトンもアクシオンも光信号としてみえる。

これぐらいの周波数の信号を読み出すには量子ビットが適している。



ICEPPで作っている量子ビット

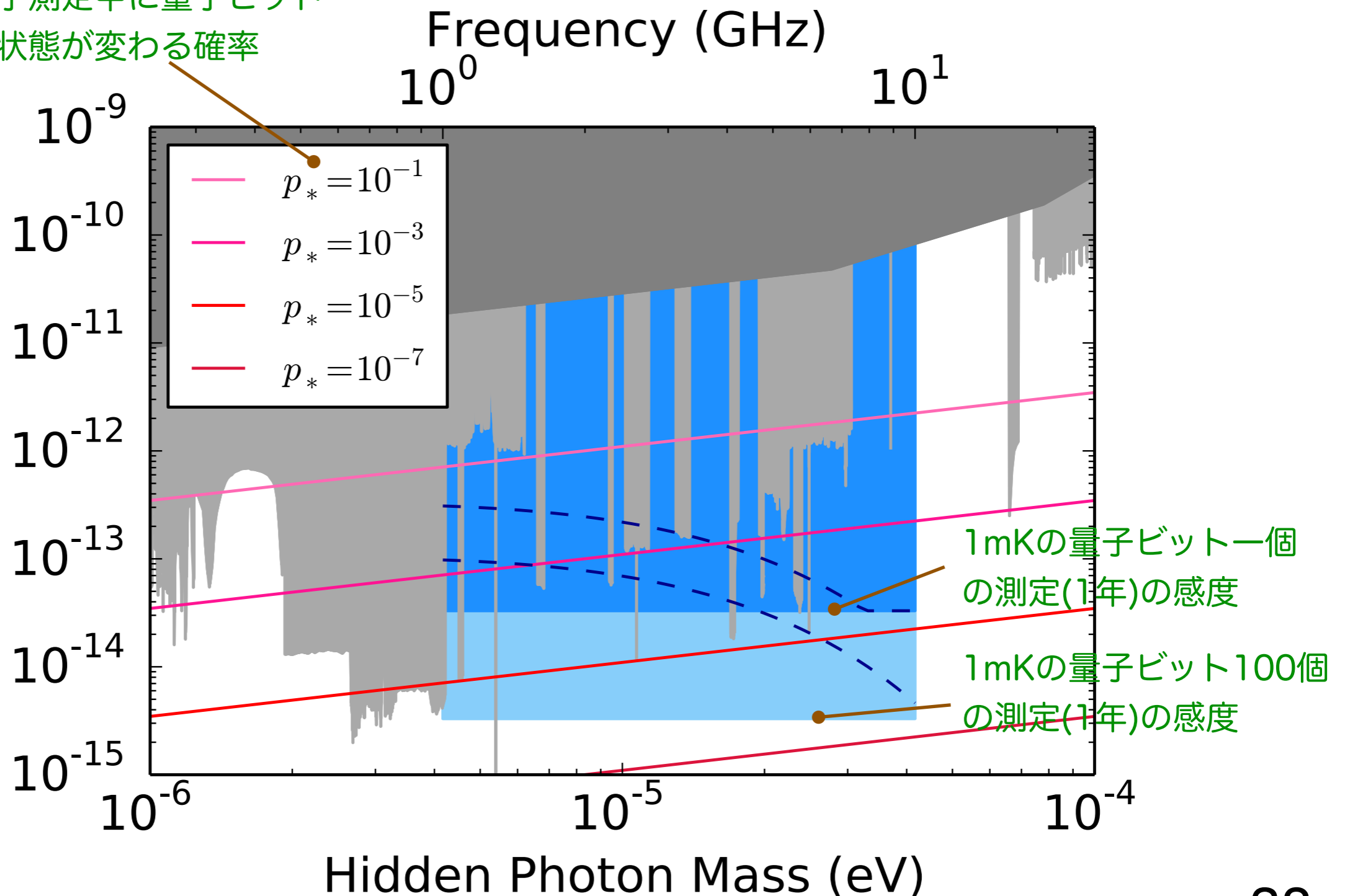
量子ビットを使った軽いダークマター探索

の予想感度

arXiv:2212.03884

量子測定中に量子ビット
の状態が変わる確率

ダークフォトンと
光の混ざり具合 ω



近隣の研究との違い (私見)

- 宇宙研究との違い

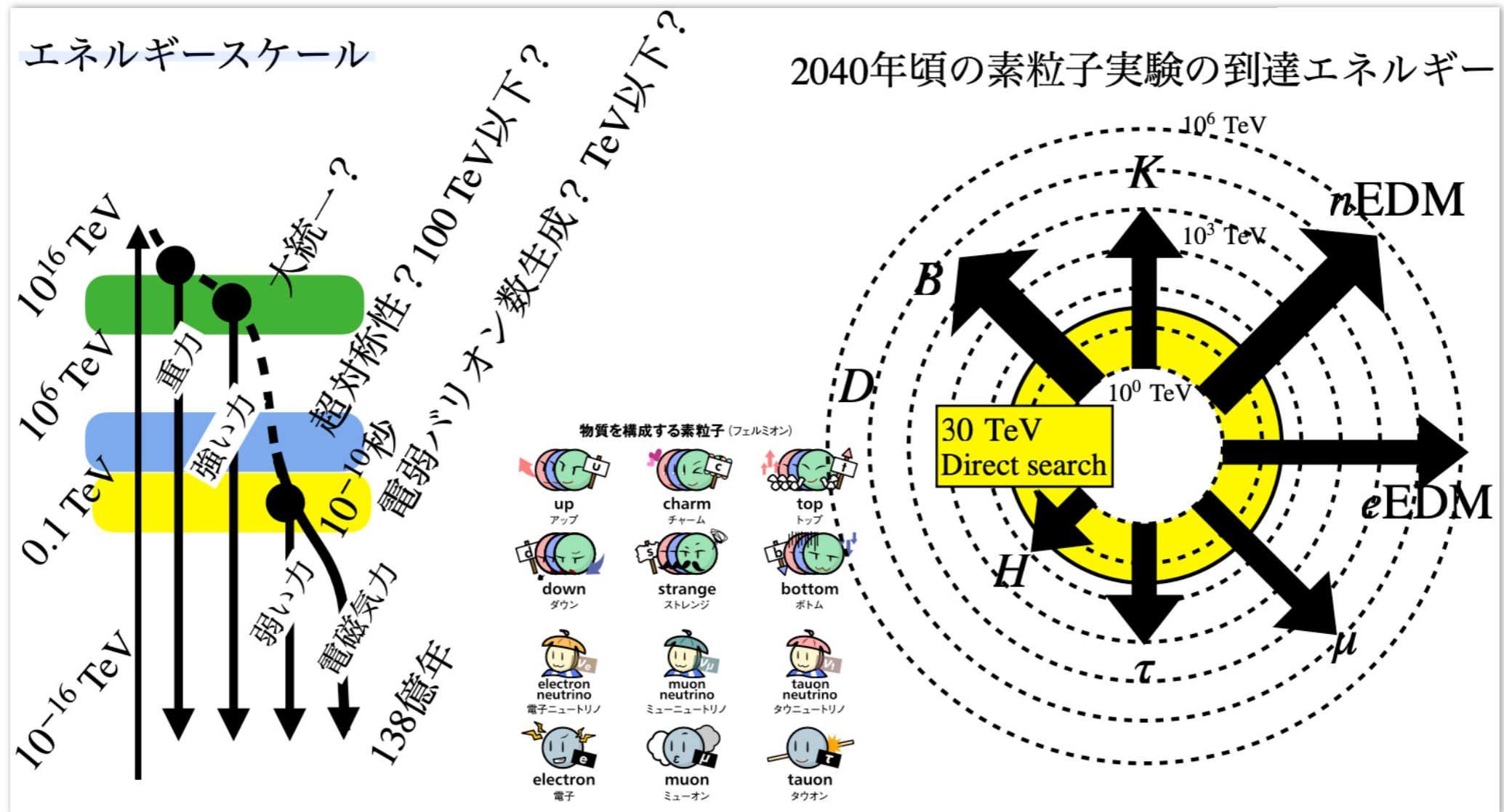
- 宇宙線は初期条件を手で設定はできない (宇宙は作れない、様々な系統誤差)
- コライダー実験は手で設定をして、繰り返して検証ができる。
- 宇宙線実験に比べてエネルギーは低いが、「手堅い」科学的な手法で「実験」ができる。
- コライダーで質量と断面積が測れるので、暗黒物質の残存量とあうかどうかを調べる。
- コライダー実験では寿命が測れないので、宇宙年齢とくらべて十分長いかどうかまでは言えない。

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。