



東京大学
素粒子物理国際研究センター
International Center for Elementary Particle Physics
The University of Tokyo

学部生向け特別セミナー

最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！

CERN における国際協力加速器実験 **LHC-ATLAS 実験** の
スペシャリストである教員による連続特別セミナー&座談会

素粒子物理、物理実験の面白さ・難しさ、加速器実験、ビッグサイエンス、計測技術、
高速データ処理回路、データ解析、計算機科学、機械学習、量子コンピューティング等
の**ホットピック**を最前線で活躍する研究者から直接聞けるチャンスです。

学部生・大学院生・学内外問わず大歓迎

事前登録が必要です。素粒子物理国際センターのウェブページより詳細をご確認ください。

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

日時： **6月7日 (月), 6月11日 (金) 5限目** (16:50)

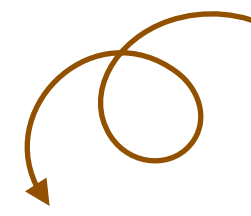
場所：オンラインでの開催となります。事前登録により接続方法の情報をお知らせします。

内容：

6月7日	「ヒッグス粒子の物理」	田中純一 (素粒子物理国際研究センター・教授)
	「超対称性粒子と暗黒物質」	澤田龍 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
	「素粒子物理と量子コンピューティング」	寺師弘二 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
6月11日	「LHC で探る余剰次元」	奥村恭幸 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
	「加速器・検出器の最先端技術」	石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授)
	(6月11日は、セミナー後「座談会」としてフリーディスカッションの時間を設けます)	

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

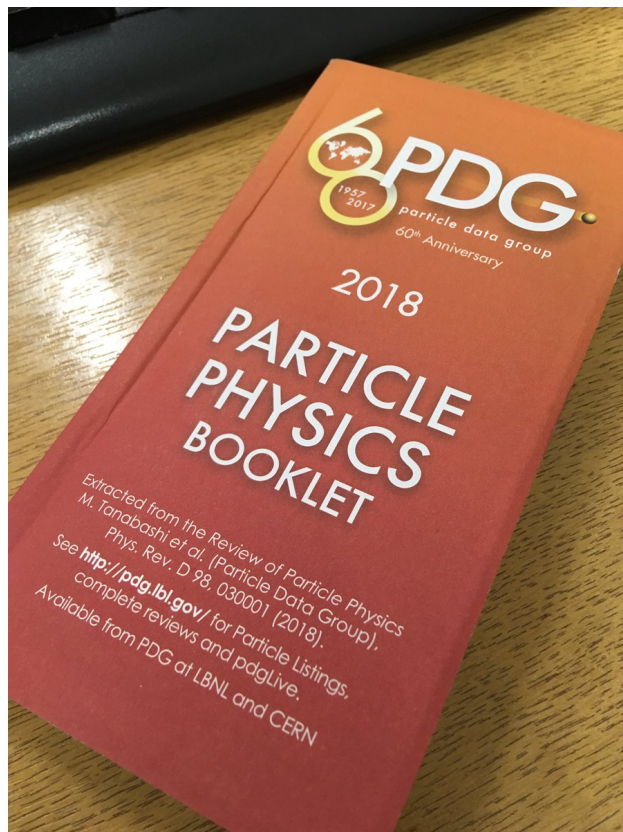
→ 研究員としてもMEGで第1期実験の最終結果を出す

→ 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 + コンピューティング

スミス・フランス

研究員までの仕事の成果



μ^- DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)	
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$	$\approx 100\%$		53	
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$	[d] $(6.0 \pm 0.5) \times 10^{-8}$		53	
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu e^+ e^-$	[e] $(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$		53	
Lepton/Family number (LF) violating modes				
$e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	LF [f] < 1.2	%	90%	53
$e^- \gamma$	LF < 4.2	$\times 10^{-13}$	90%	53
$e^- e^+ e^-$	LF < 1.0	$\times 10^{-12}$	90%	53
$e^- 2\gamma$	LF < 7.2	$\times 10^{-11}$	90%	53

物理学と対称性

物理学における対称性: ある変換のもとで、系が不変なこと

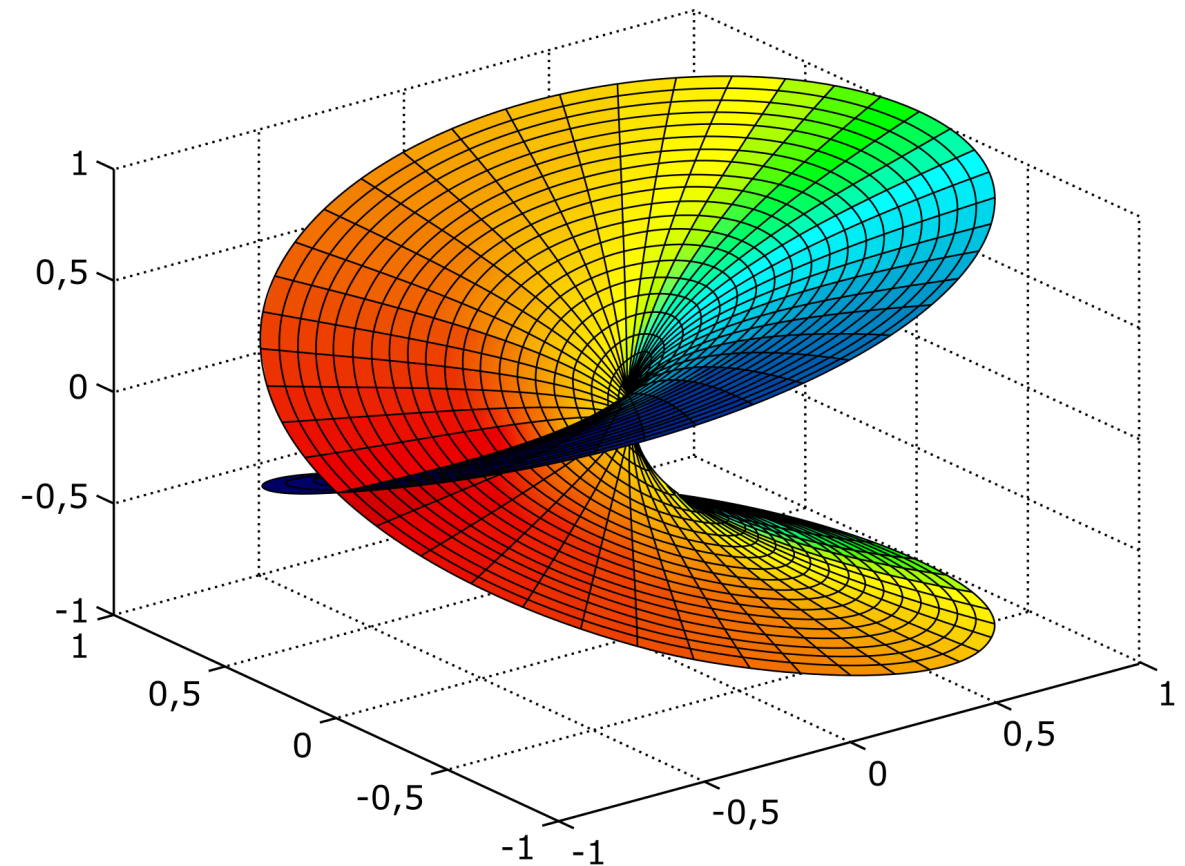
- **連続的な時空の対称性:** 宇宙には絶対的な時空の基準点は存在しない。
 - 時間並進 → エネルギー保存
 - 空間並進 → 運動量保存
 - 空間回転 → 角運動量保存
- **離散的な時空の対称性**
 - C (荷電共役)、P (座標反転)、T (時間反転)
- **内部対称性:** ゲージ変換
 - $U(1)$ 、 $SU(2)$ 、 $SU(3)$ → 標準模型の相互作用 (電磁気、弱い力、強い力)

フェルミオンとボソン

- **ボソン**: 光やグルーオンなど力を媒介する粒子と、ヒッグス粒子。
スピンの整数 (0、1、...)
- **フェルミオン**: 電子やクォークなど、物質の元になる粒子。
スピンの半整数 ($1/2$ 、 $3/2$ 、...)

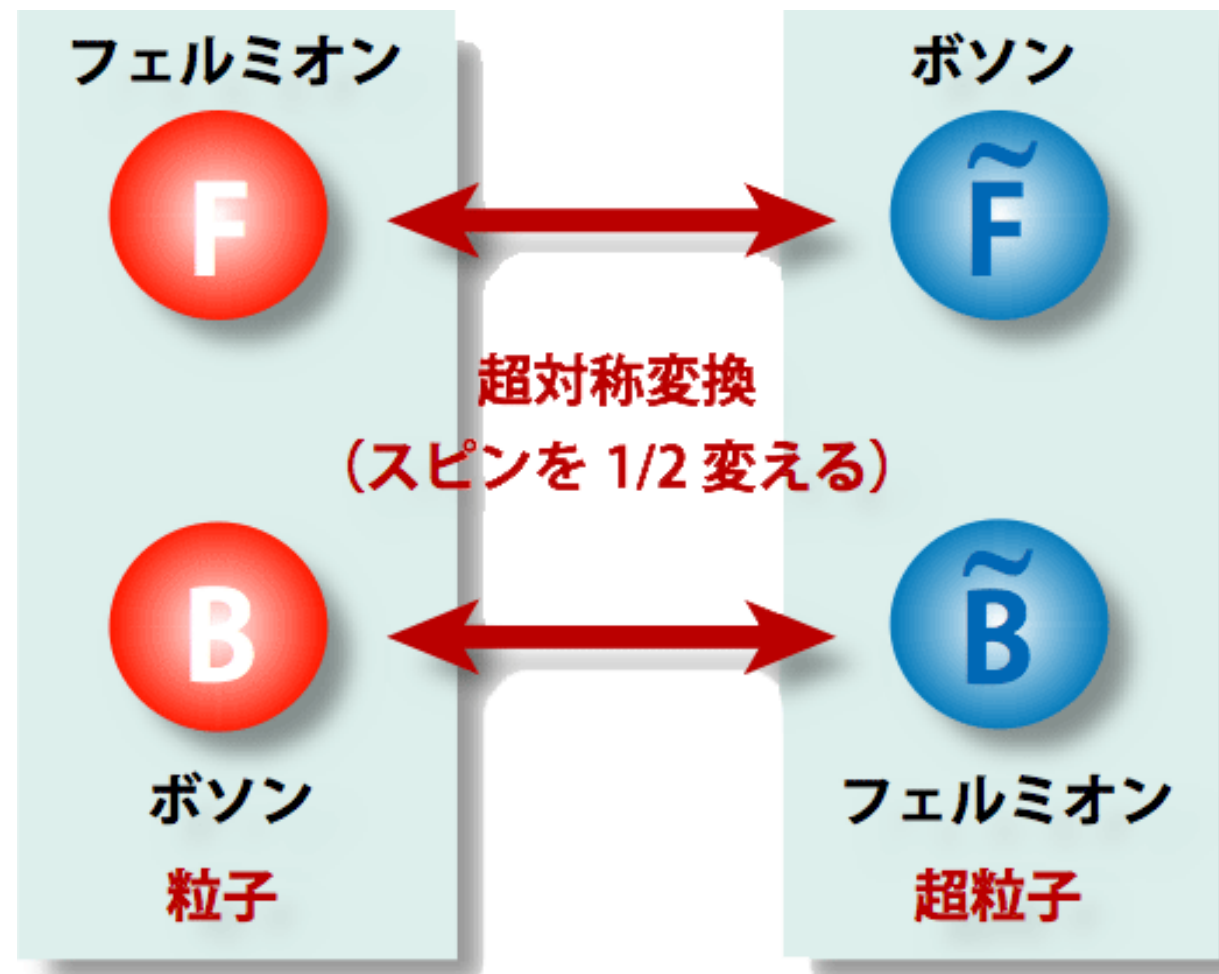
スピンは720度回すと、やっと元に戻るような**内部空間**に住んでいる

場の量子論では、フェルミオンの入れ替えに対して、波動関数が反対称
→ パウリの排他律に従う
→ 電子が最低エネルギー準位に落ち込まずに、原子が形を保てる



超対称性

- 4次元時空の場の量子論に超対称性を含むように拡張すると、フェルミオンとボソンに変換する演算子(スピンを1/2変える)を、2回作用させると時空を並行移動することになる。
- 通常の4次元空間にフェルミオンの座標を加えた超空間での変換と考える。



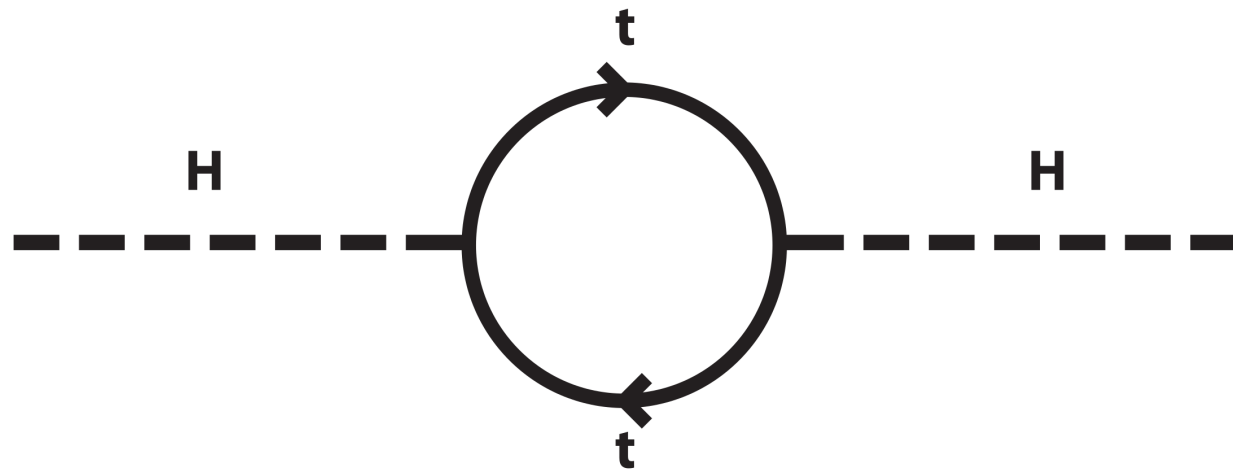
万物の理論

- 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。
- 超対称性を含む超弦理論は有力な候補
- 超弦理論の実証
 - 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？

なぜ新物理があると考えられるか

- 階層性問題
- 力の大統一
- 理論と測定はずれ: 例としてミュー粒子の異常磁気モーメント
- 暗黒物質

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)



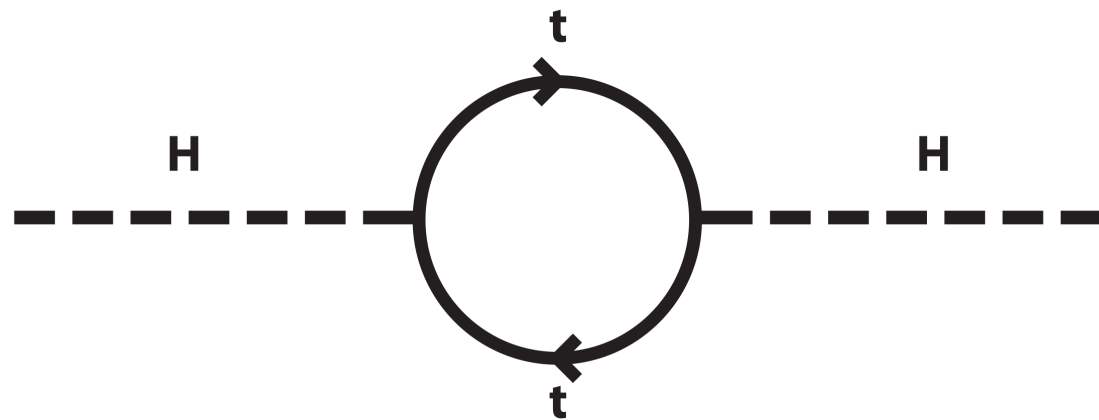
$\Lambda: 10^{15} - 10^{19} \text{ GeV} ?$

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。

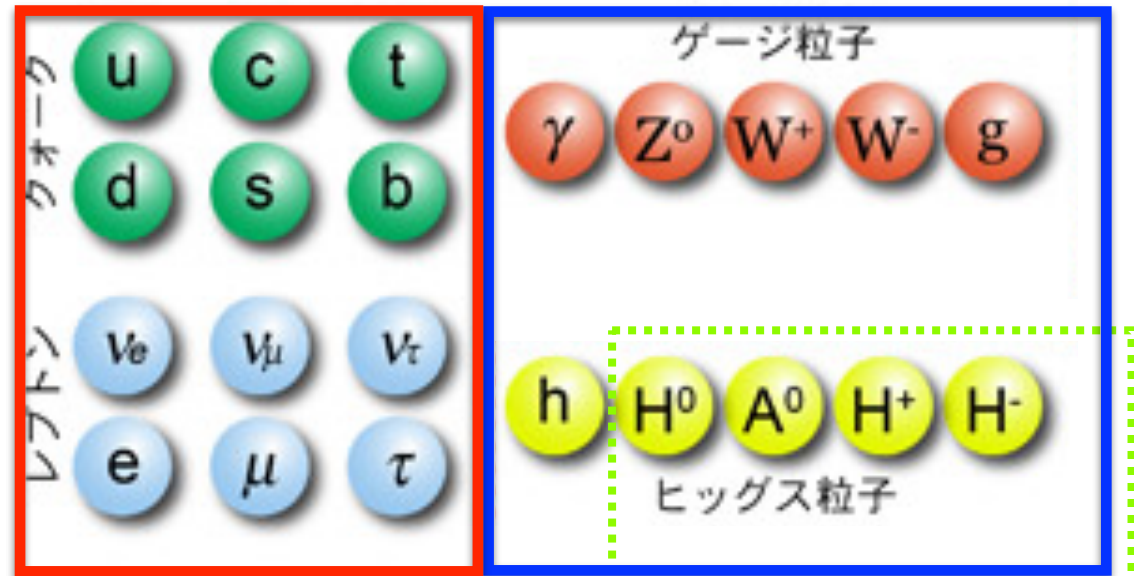
超対称性(SUSY)の導入

フェルミオンとボソンの間の対称性



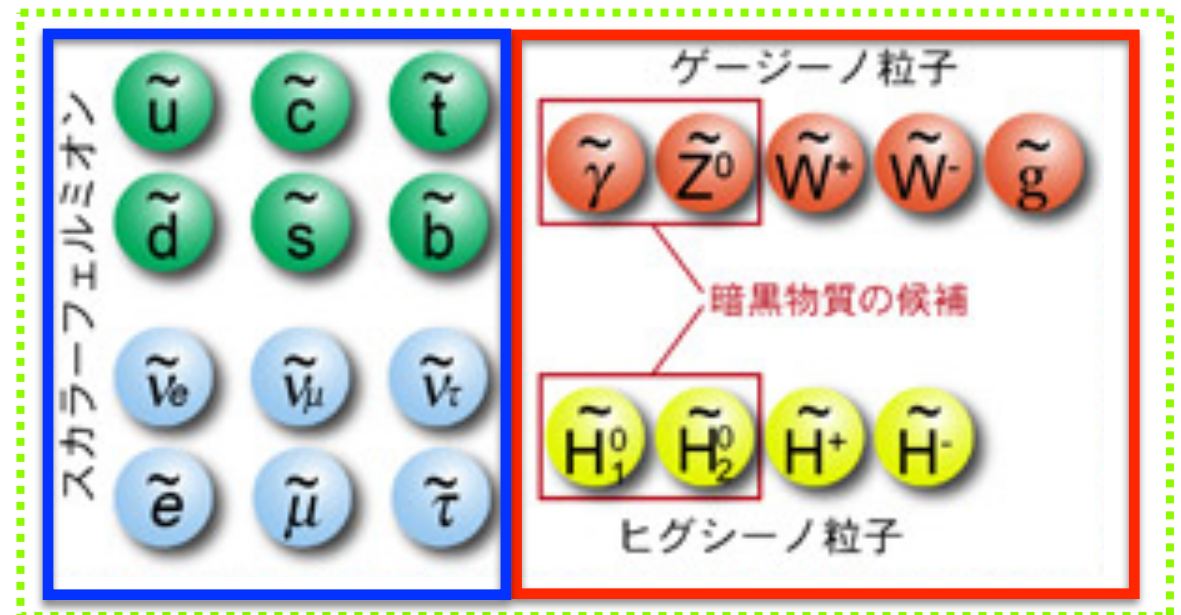
トップクォークと対になるボソンもあると、補正の効果がキャンセルされる。

フェルミオン 通常の粒子 ボソン



未発見

超対称性粒子



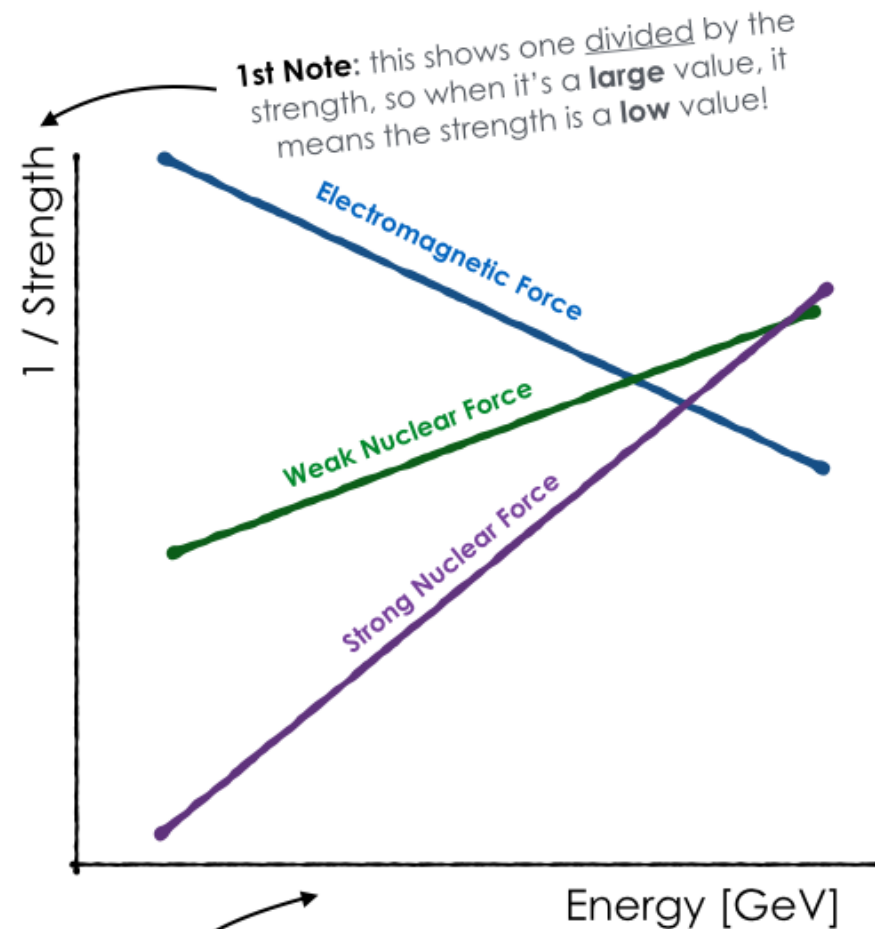
暗黒物質の候補

ボソン

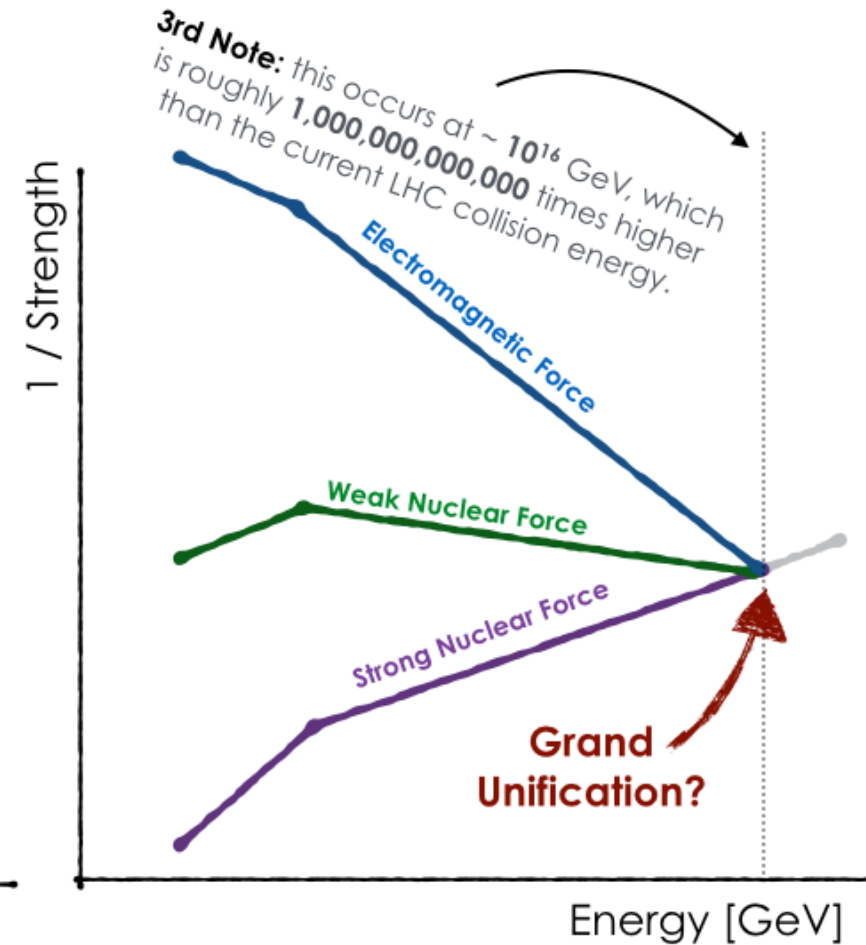
フェルミオン

力の大統一

標準理論



SUSY



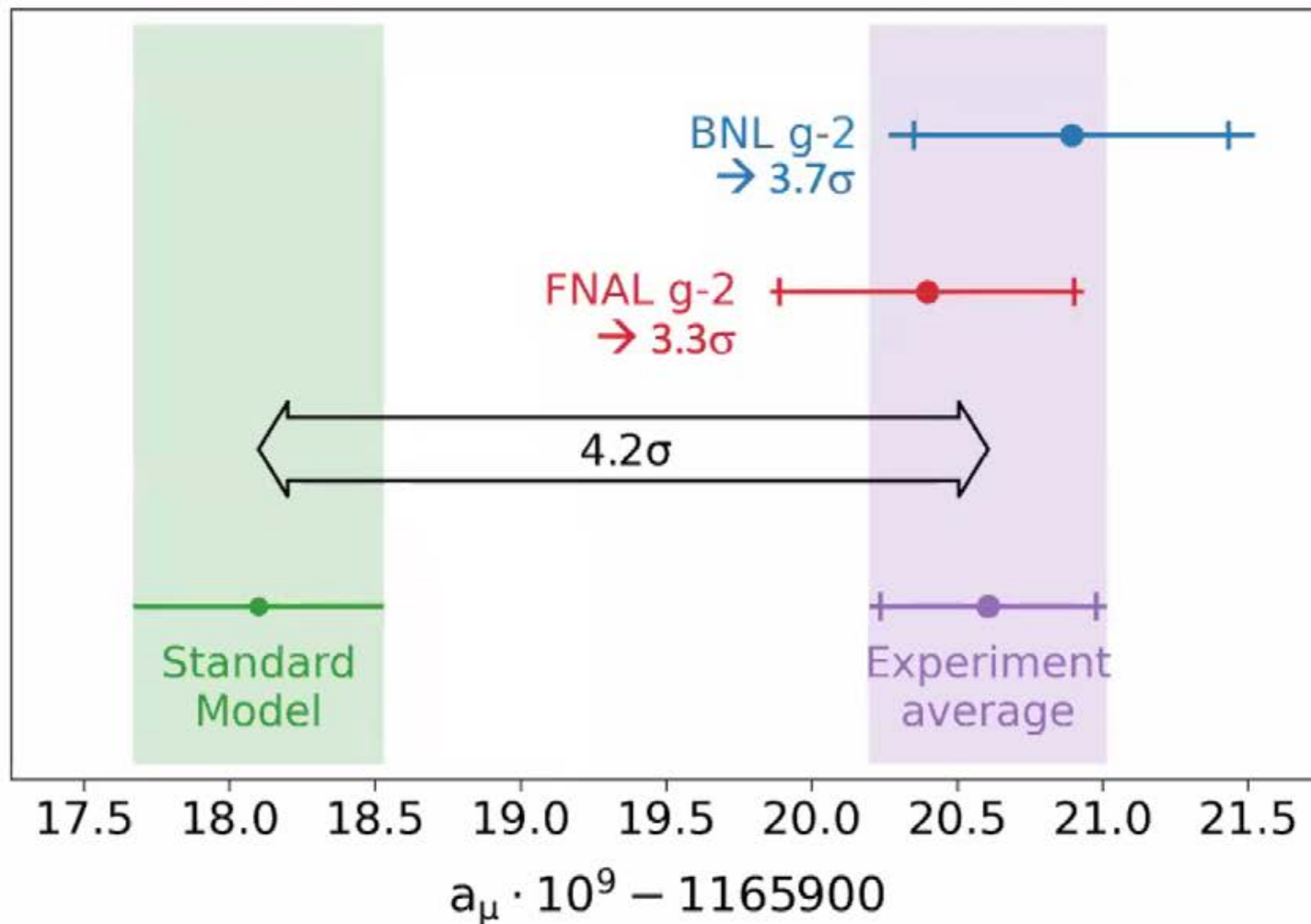
Graphs are sketched out and approximate only (there are no scales anyway), but for more info you check see here:

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。

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。

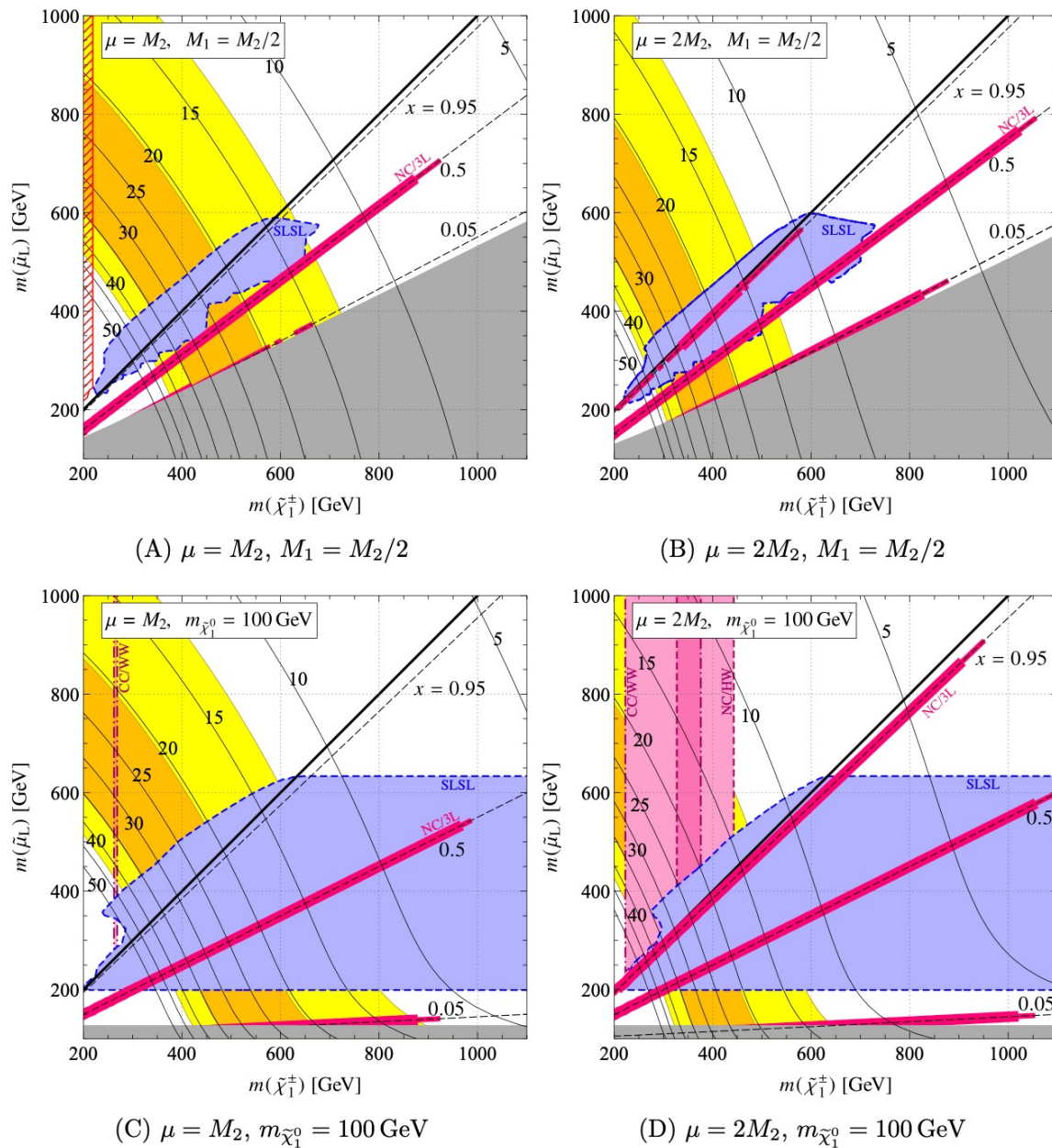
標準理論だけでこの結果を得る確率は
~1 / 75,000

→ やっぱり新物理がある？



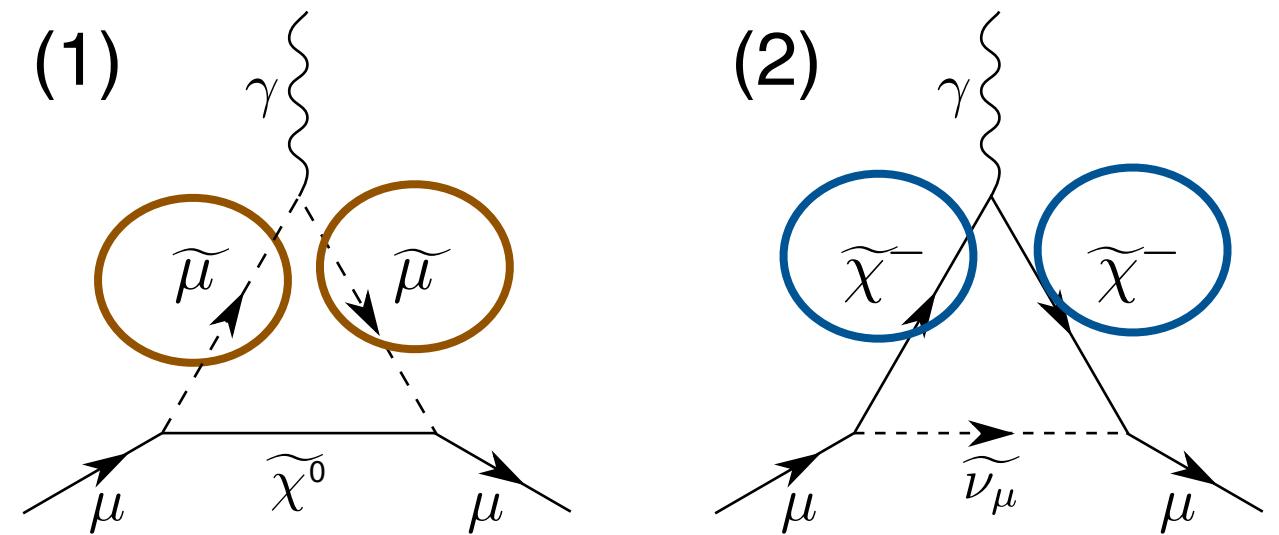
ミューオン異常磁気モーメント

磁気モーメント測定と、超対称性模型の関係



arXiv:2104.03217

超対称性模型でズレを説明できる



(1) ミューオンの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

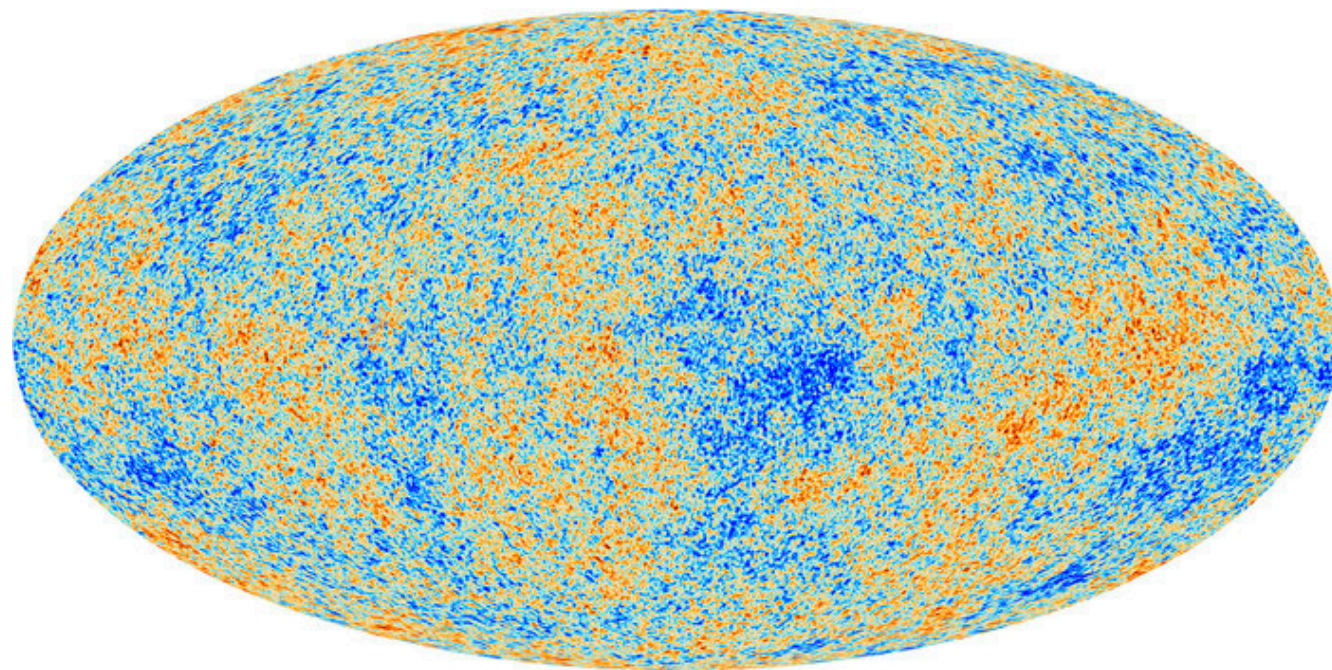
緑と黄色: 測定されたズレを説明できる領域

グレー、赤、青: LHCの測定等から除外される領域

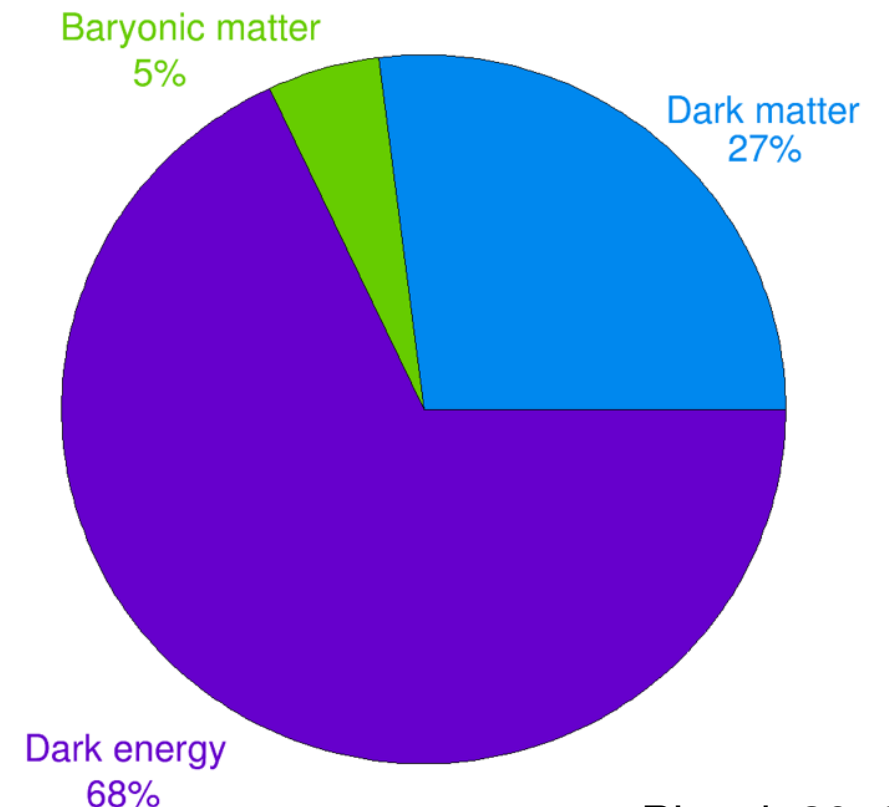
暗黒物質：ダークマター

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。

最新の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。



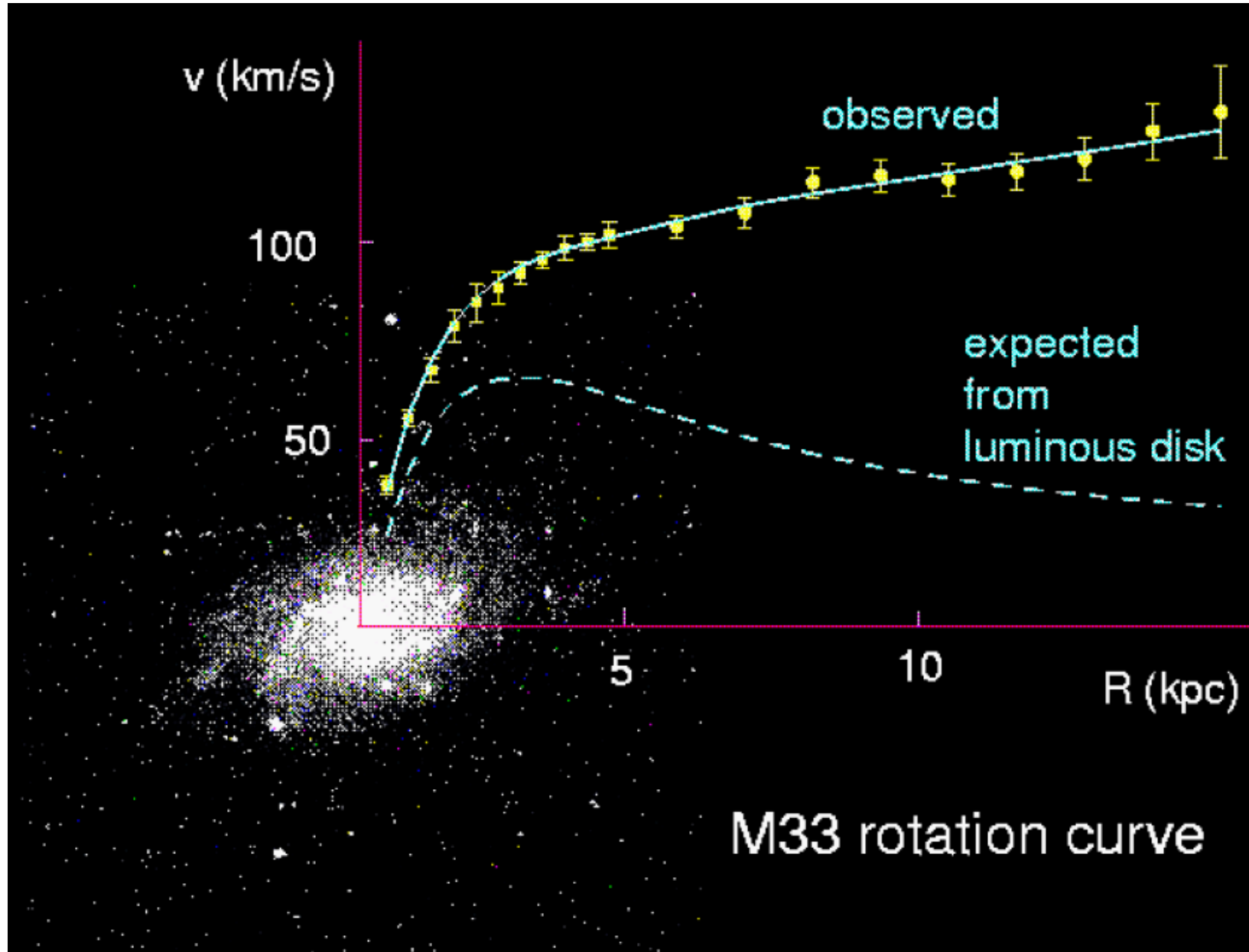
プランク衛星によるCMBマップ



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。

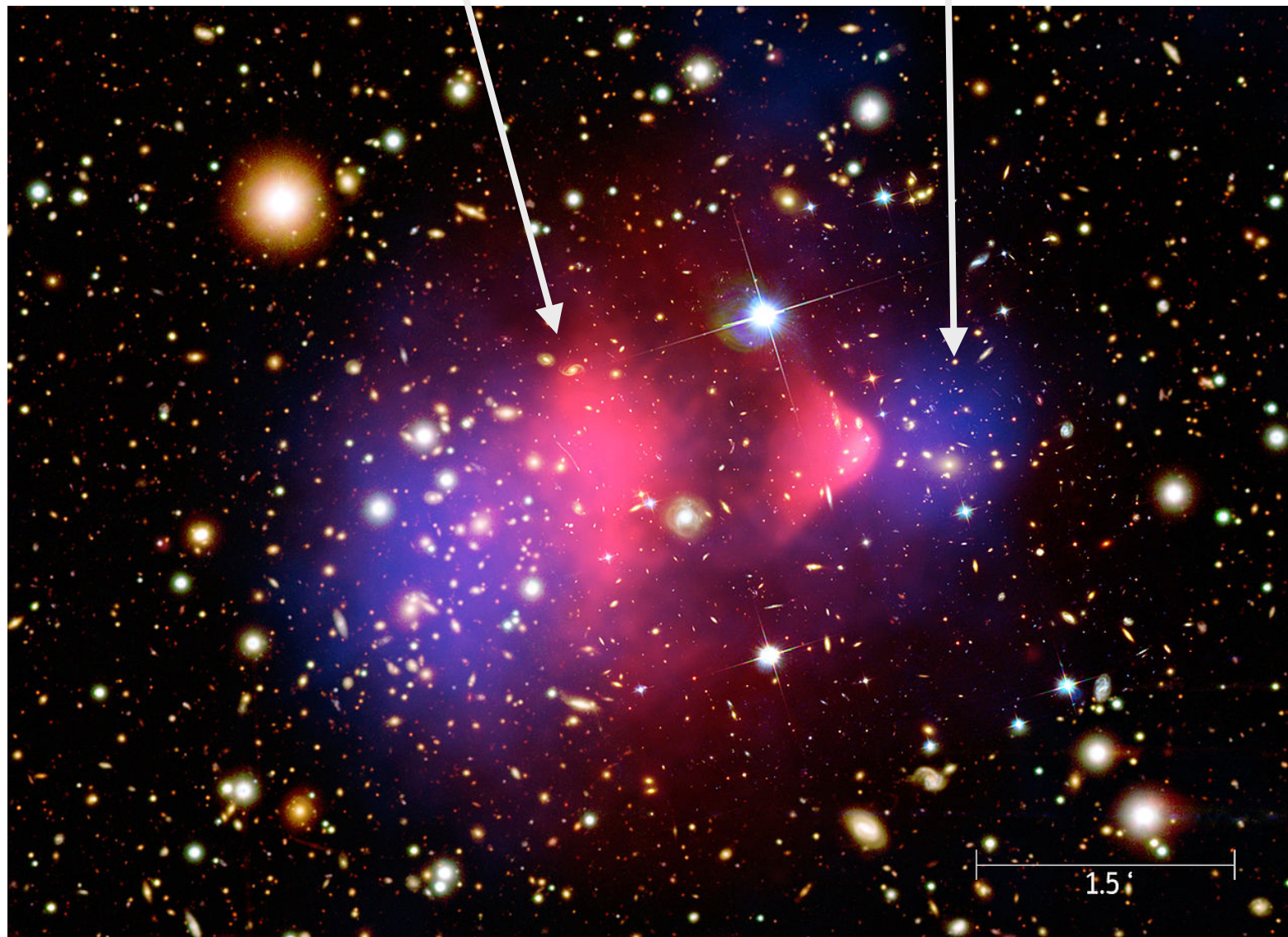
(他の天体から存在が予言された例: 海王星)

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。**

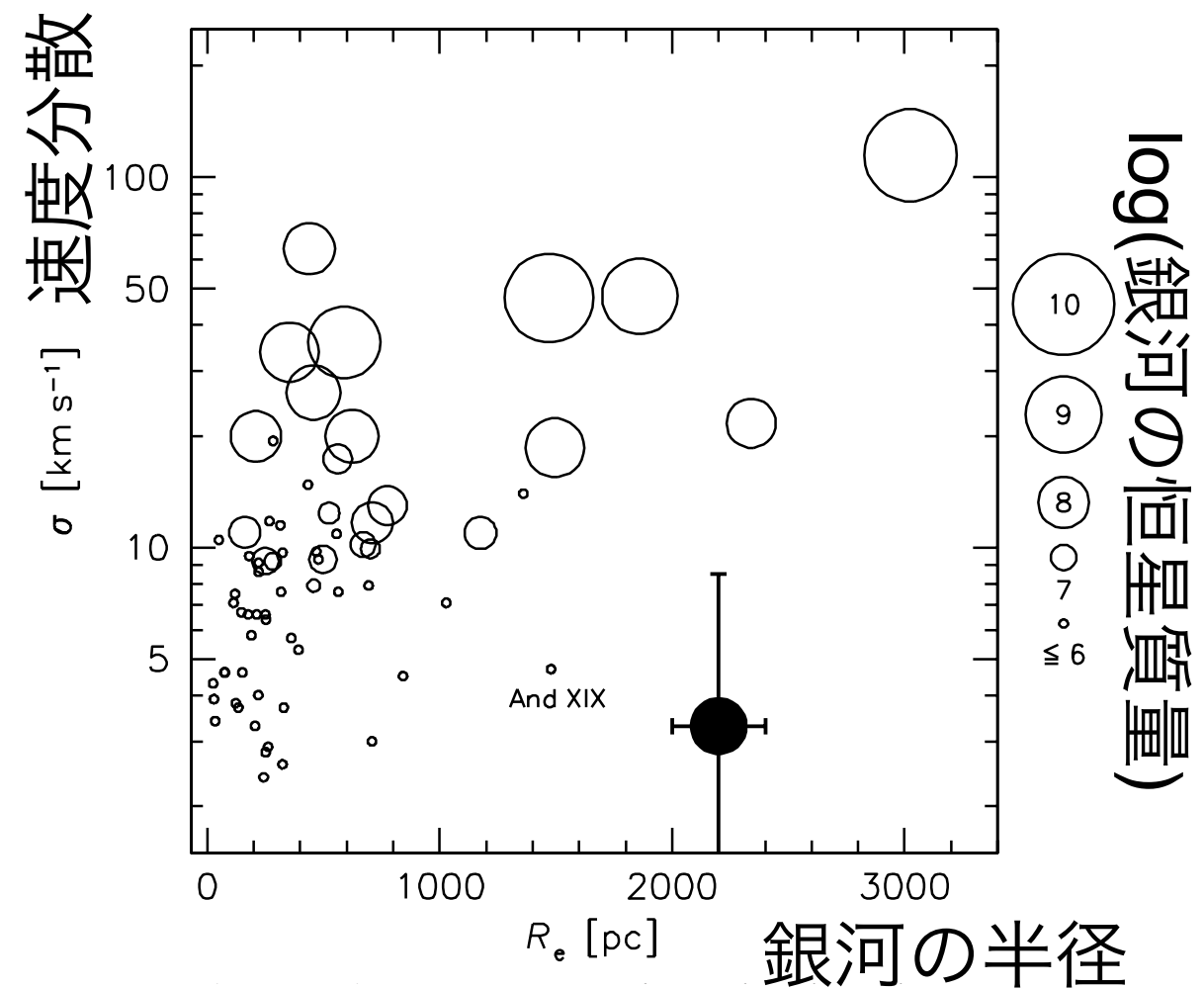
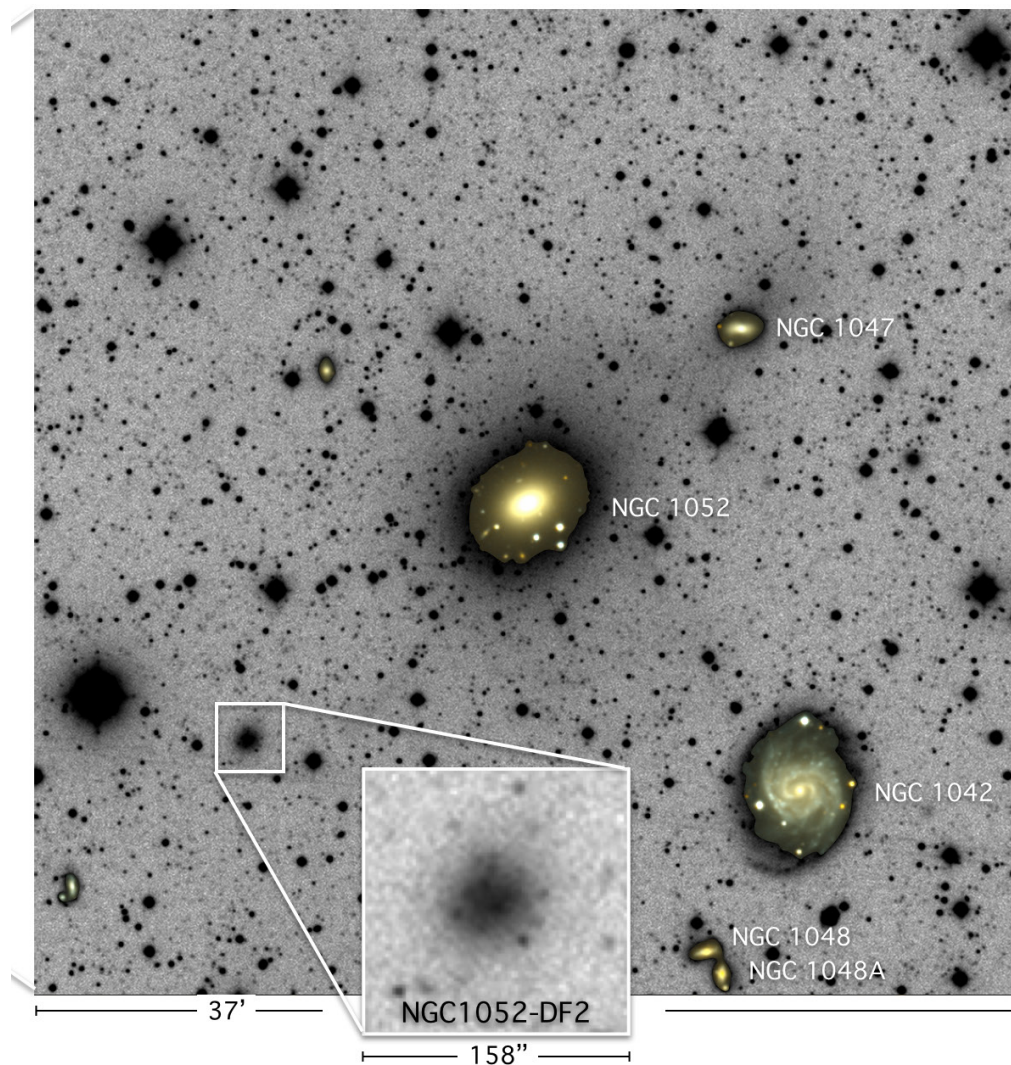
ダークマターがない銀河の発見

Nature 555, 629-632
(2018)

ダークマターが無い銀河の発見

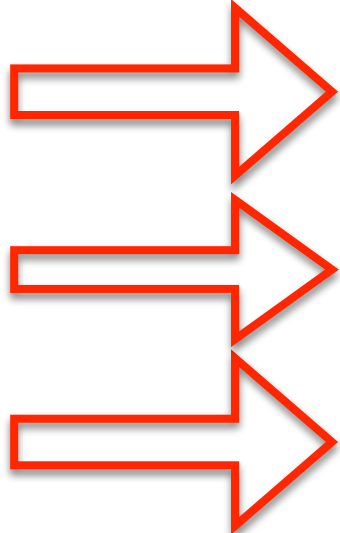
→ ダークマターの含有量は銀河毎に違う。

→ (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！

ダークマター候補

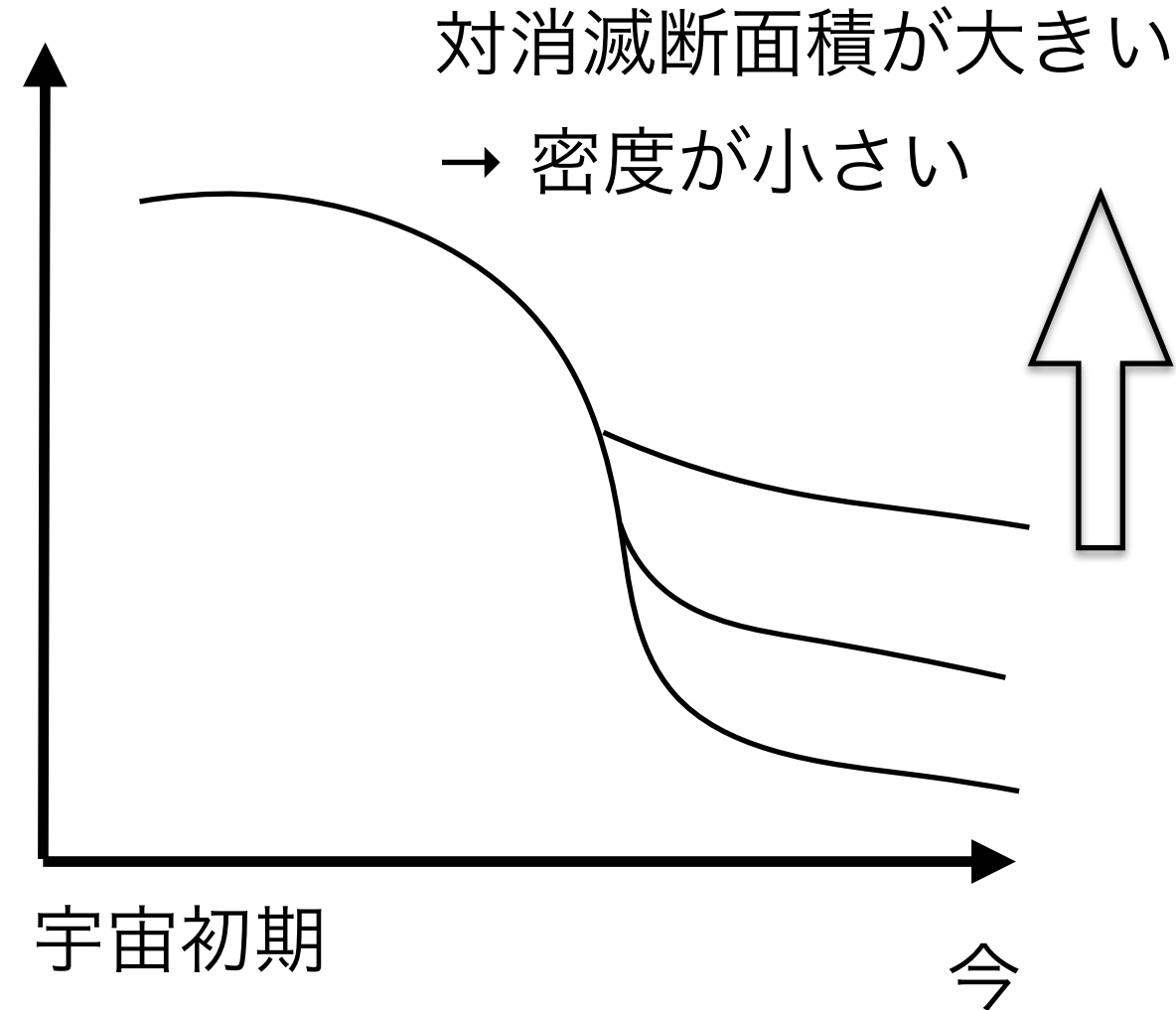
- 知られている物質や粒子
 - 光らない星
 - 星間物質 (ガス)
 - ニュートリノ
 - 原始ブラックホール
 - 新粒子
 - Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)
(e.g. SUSYニュートラリーノ)
 - アクシオン
 - 重いニュートリノ
 - ...
- 
- 宇宙の元素合成モデルと合わない
- 宇宙の大規模構造を説明できない
- 重力レンズの効果の観測に合わない

WIMP仮説

宇宙初期の高密度環境で対消滅していた
ダークマターが、密度が小さくなると対消滅の確率が下がって残っている。

残存量から対消滅断面積は
 $\langle\sigma v\rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

ダークマターの
個数密度

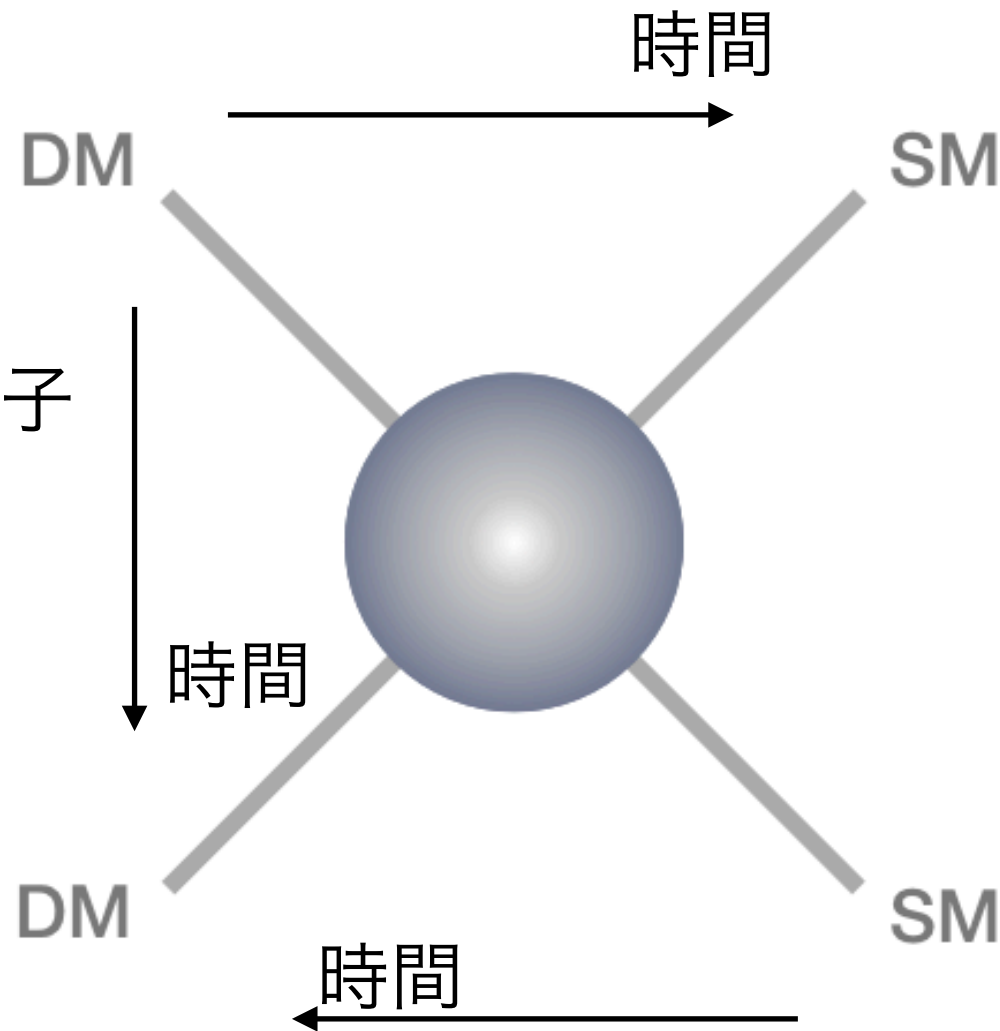


弱い相互作用をする質量 100 GeV – 10 TeV の粒子で説明できる。
SUSYのニュートラリーノがまさにこれに該当する。

ダークマターの探し方

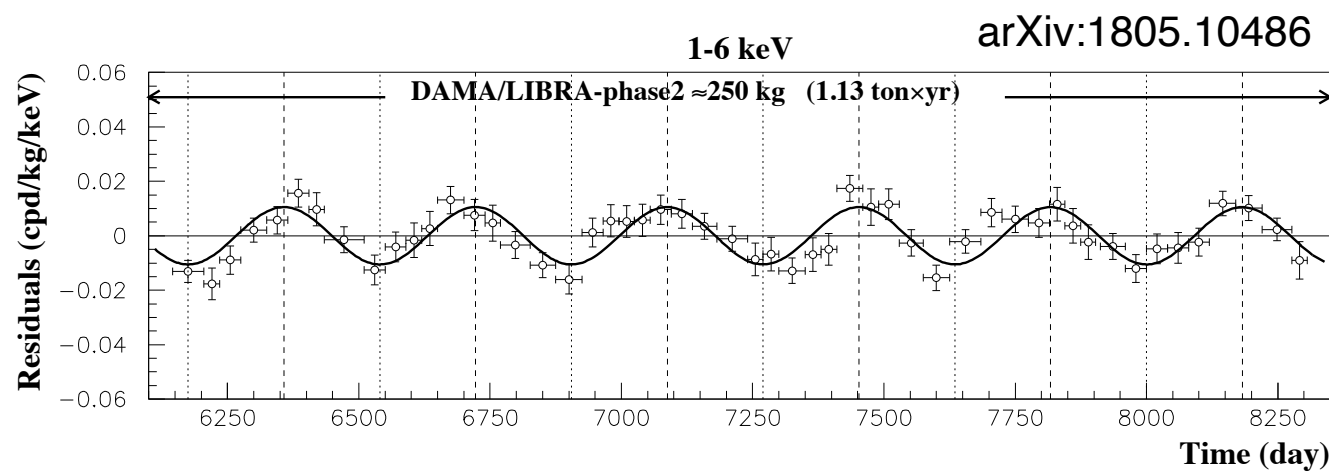
ダークマターの対消滅で発生する標準理論粒子(反粒子の超過)を探す。(間接探索)

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)

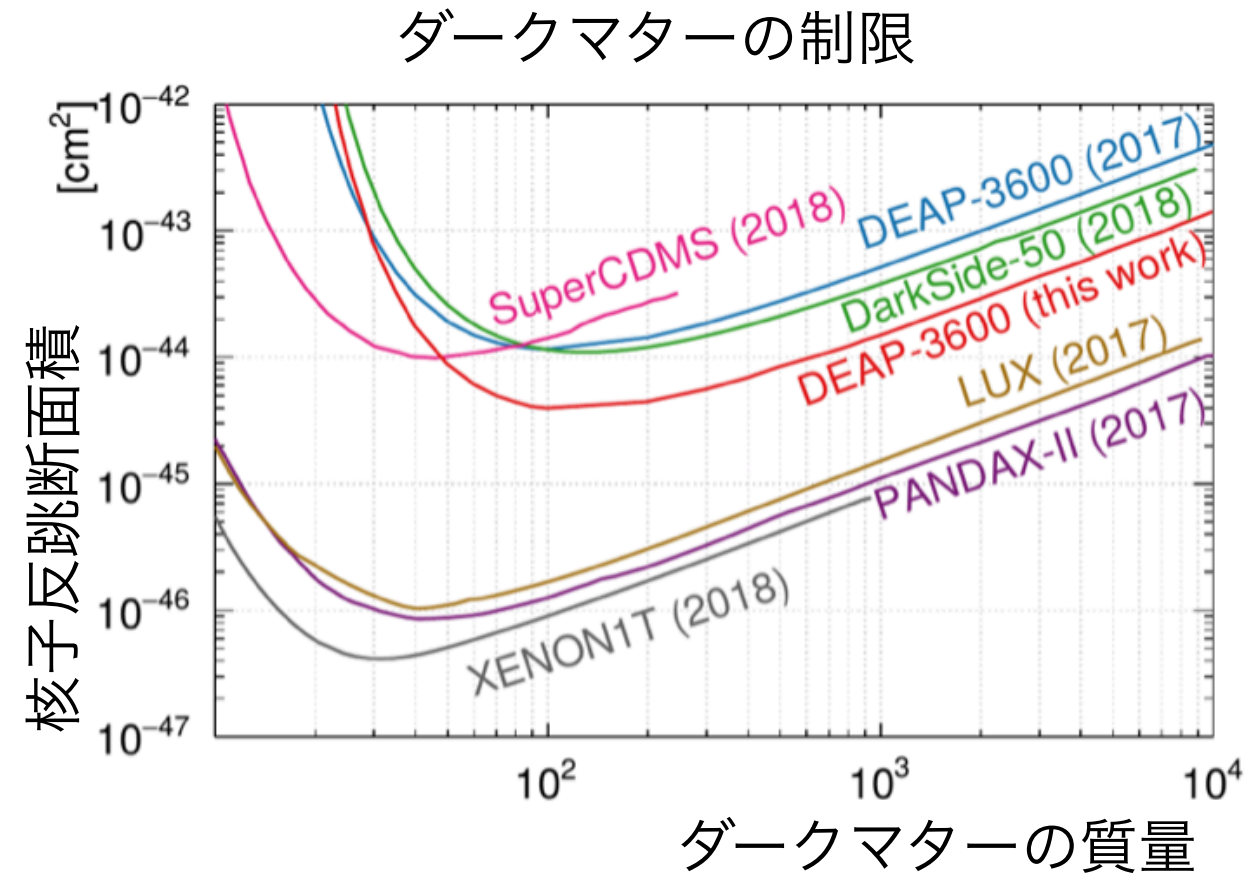


標準理論粒子からダークマターを作る(LHC)

直接探索



DAMA/LIBRAでは信号の年周期 (2010-2017年データ) 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。
 - 質量が軽い方は検出器の観測閾値のため、重い方は通過する個数が少ないため感度が悪い。
 - 軽いダークマター探索(低いエネルギー閾値)や、方向に感度にある検出器などの研究も盛んに行われている。
 - 重い方も検出器の大型化で感度が上がっている。

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

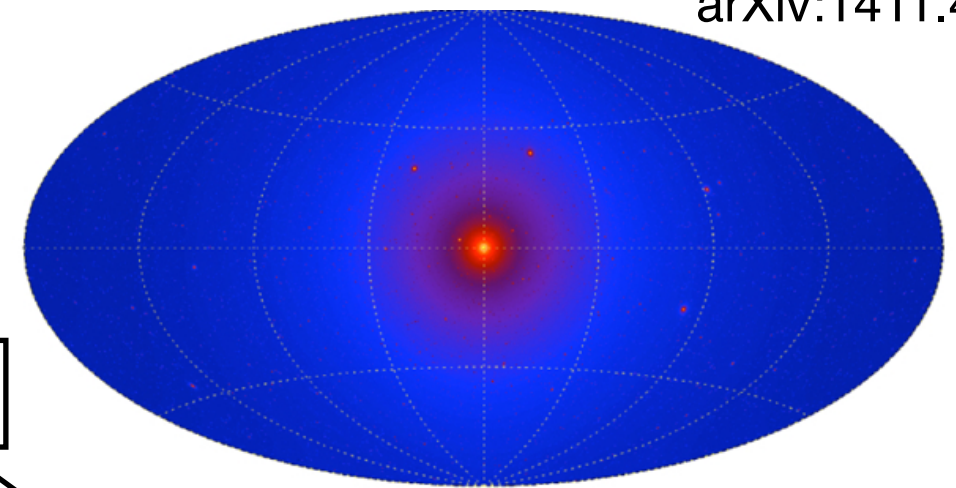
方法: ダークマターの対消滅からの反粒子、ガンマ線、ニュートリノ等の検出。

(宇宙線の生成や輸送、ダークマター分布に不定性が難点)

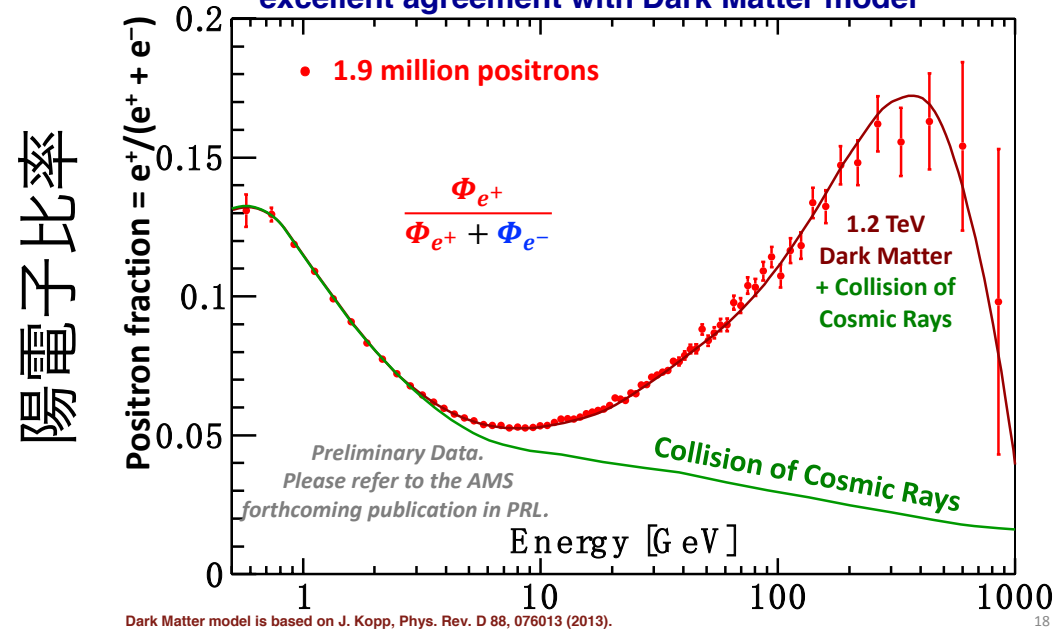
AMS実験が観測した陽電子の超過。
1.2 TeVのダークマターと合いがいい。

Fermi/LAT実験が観測したγ線の超過。

arXiv:1411.4647

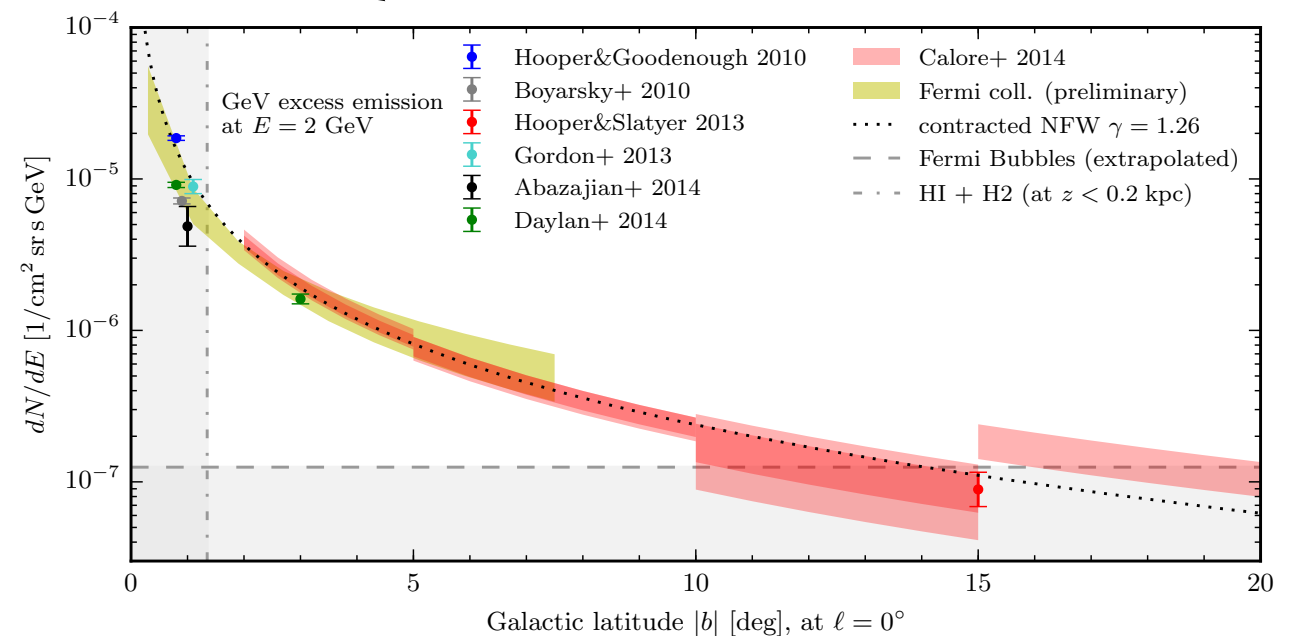


Latest AMS Positron fraction results appears to be in excellent agreement with Dark Matter model



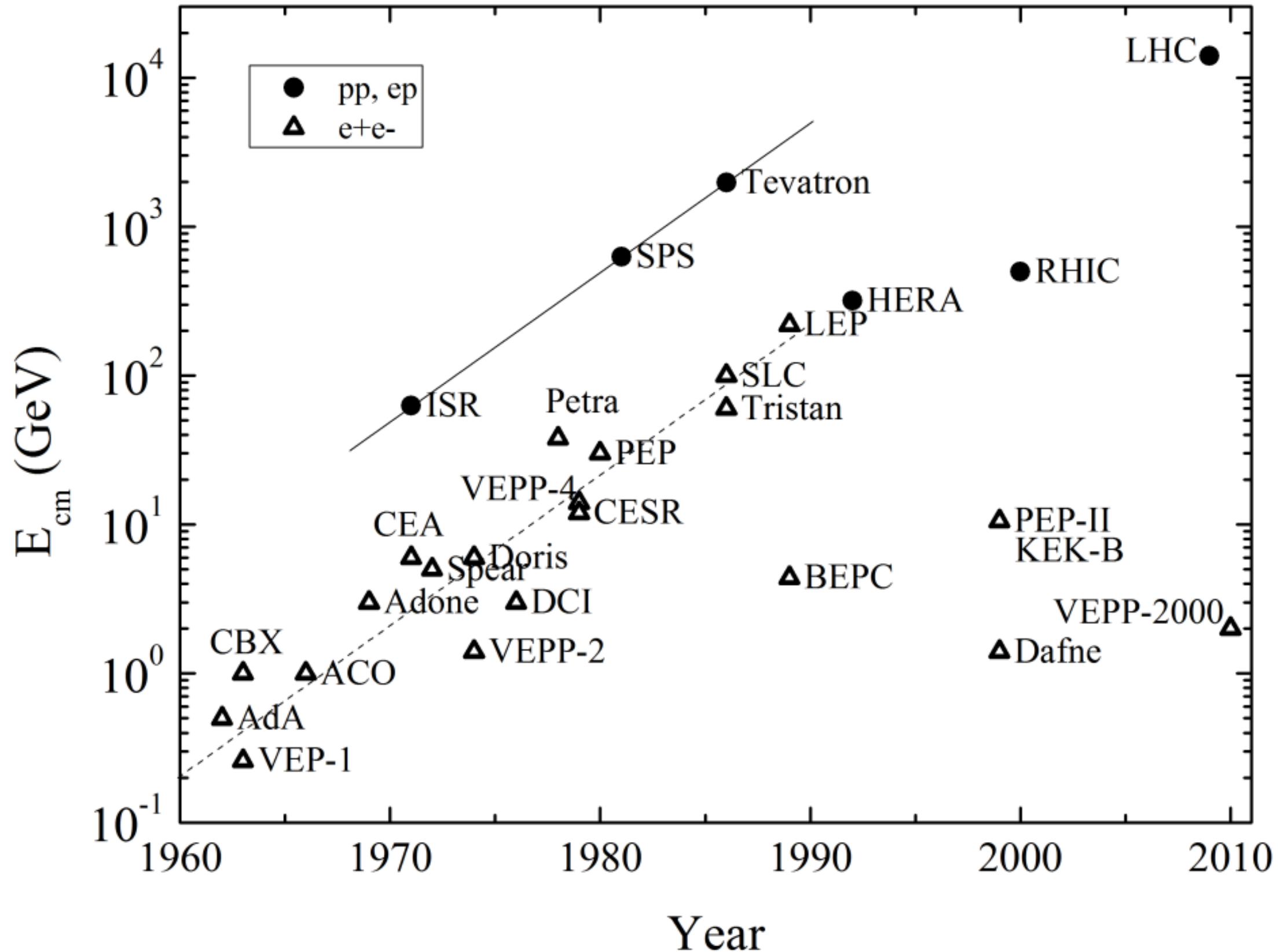
エネルギー [GeV]

γ線の超過



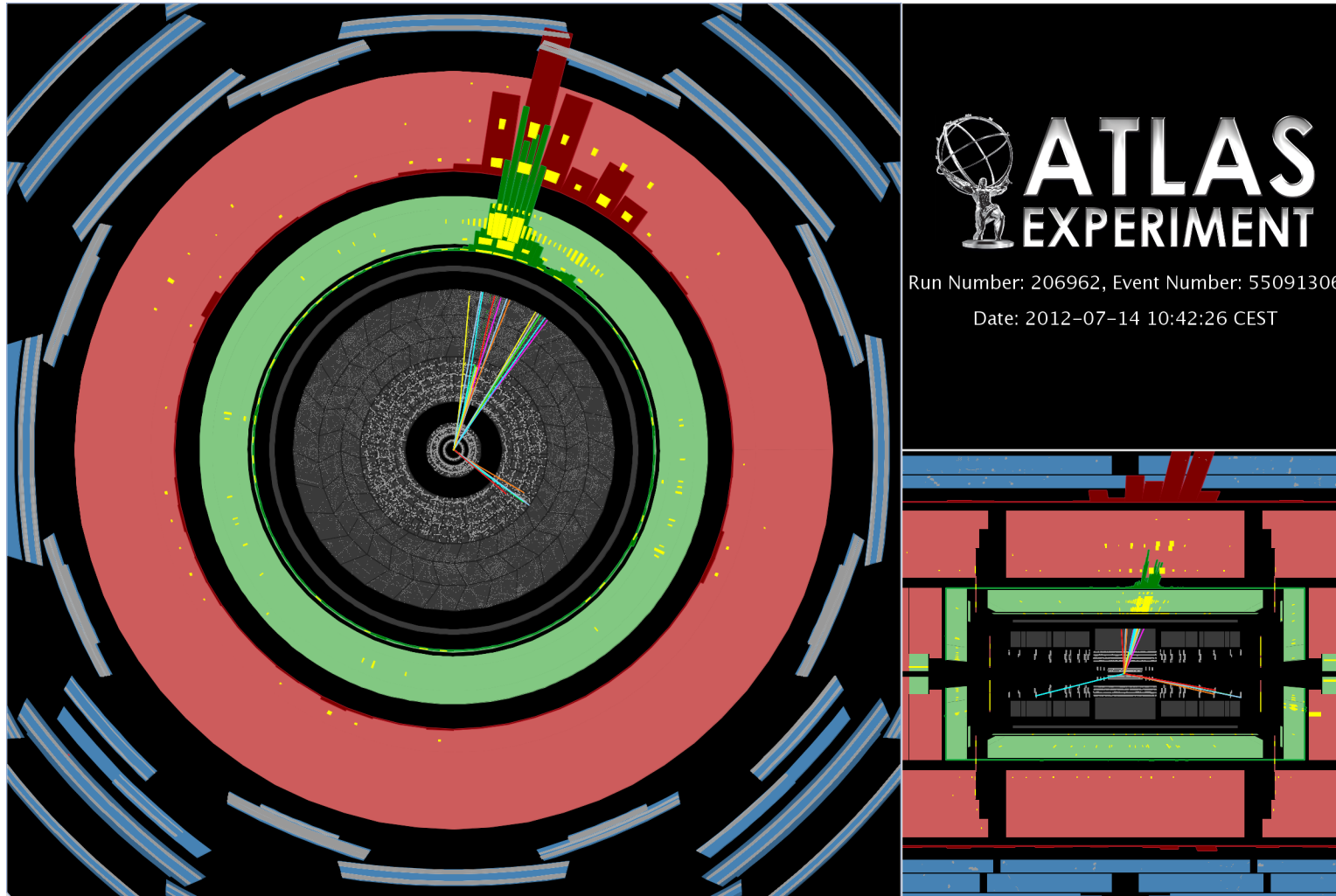
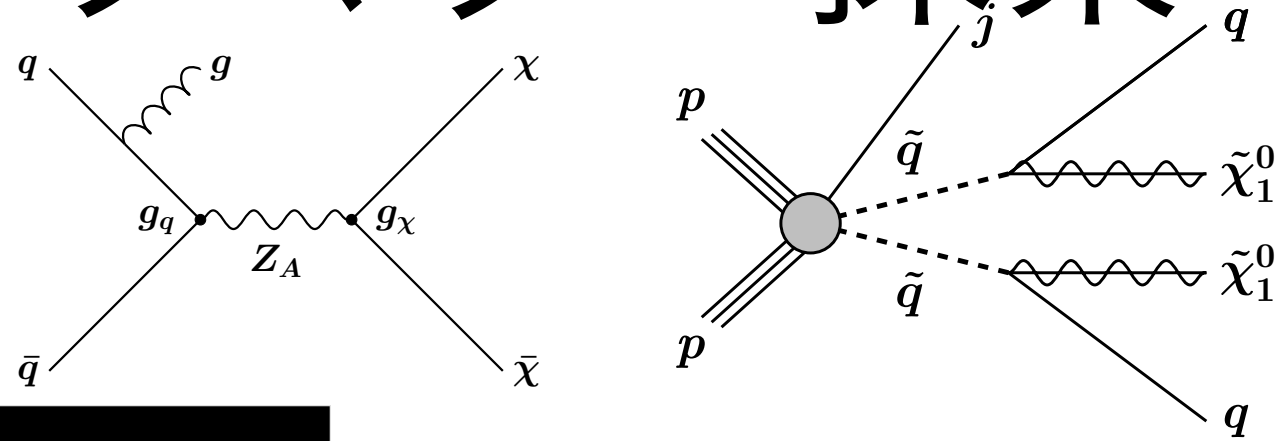
銀河中心からの距離

ラージハドロンコライダー：LHC

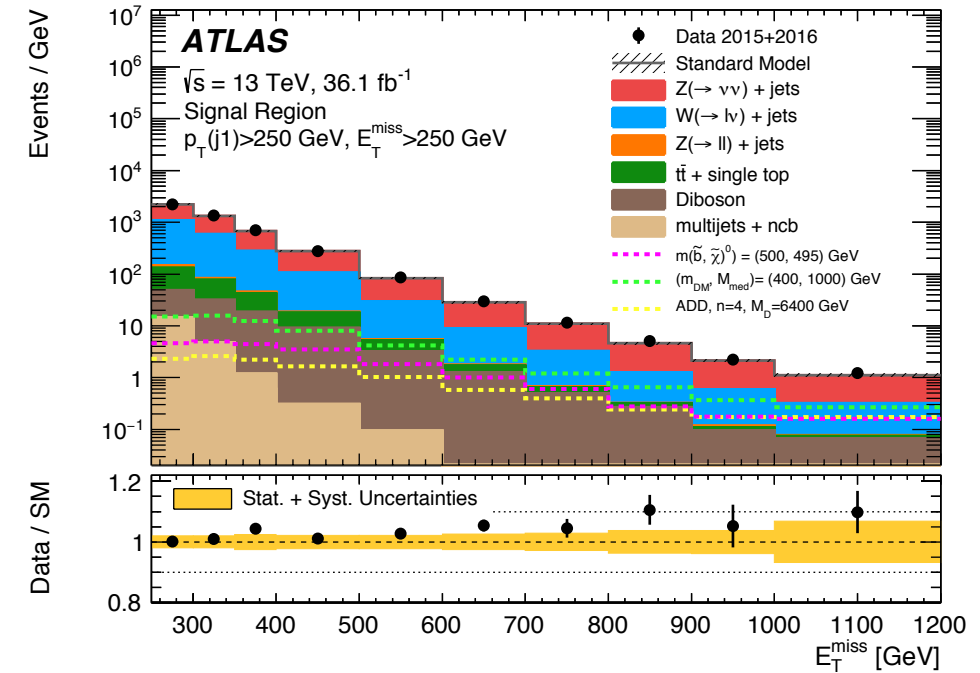


典型的な LHCでのダークマター探索

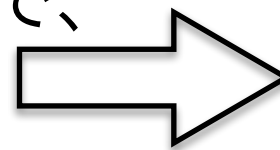
高い消失運動量とジェットを持つ事象の超過を探す。



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。

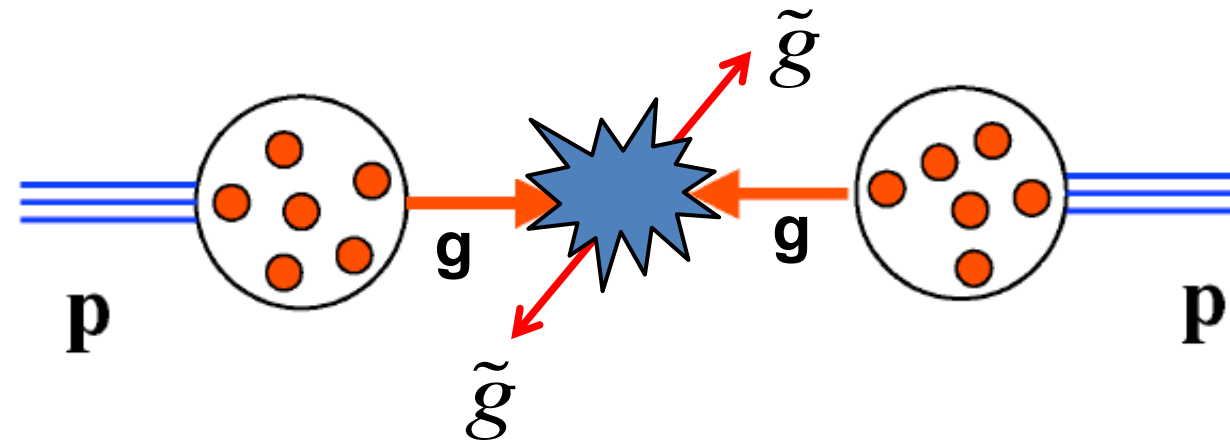


見えない粒子の横運動の和を計算できる。

LHCでの超対称粒子生成

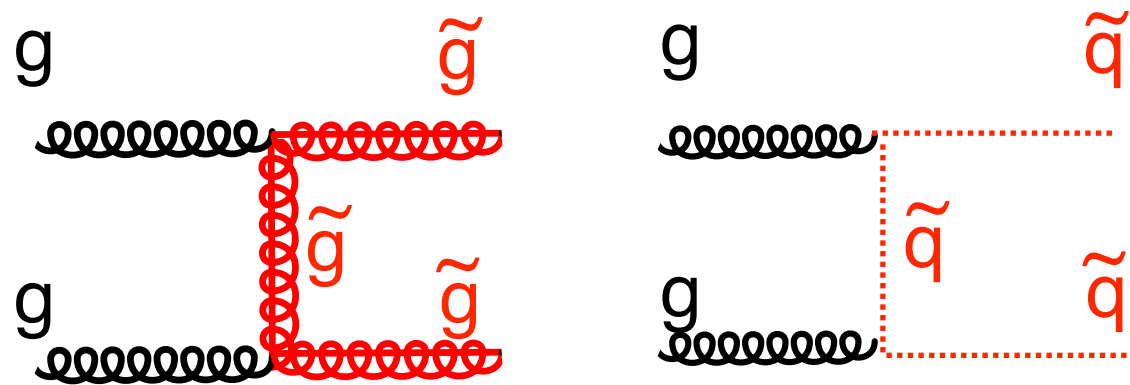
一番軽い中性SUSY粒子はダークマター候補

→ ほとんど全てのSUSY探索はダークマター探しと言える

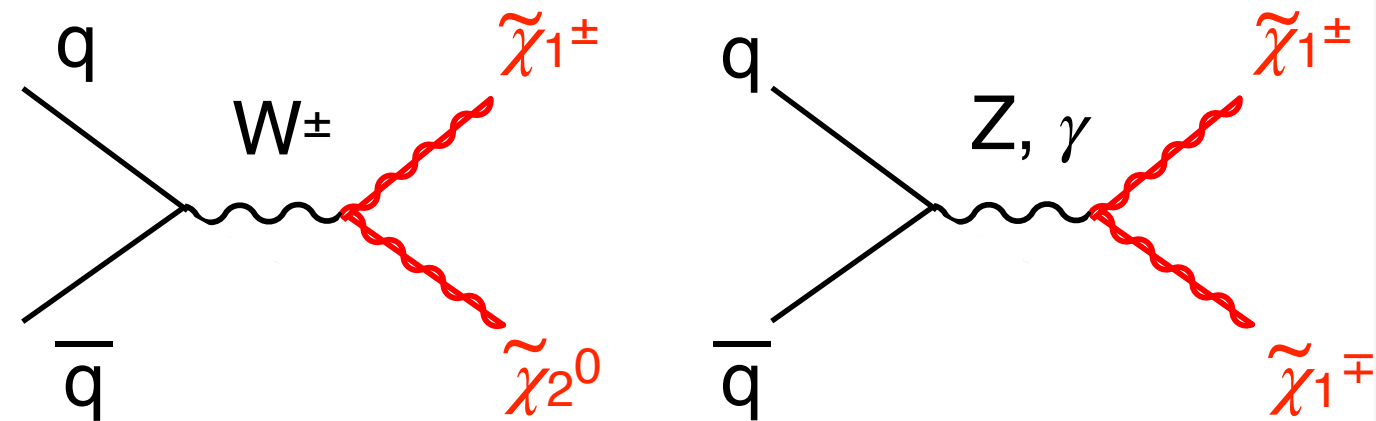


ここに示したのは代表的なダイアグラムのみ。
他のチャンネルもある。

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

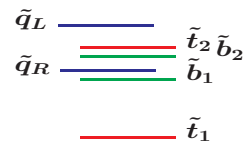
超対称性粒子探索

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

スクォーク

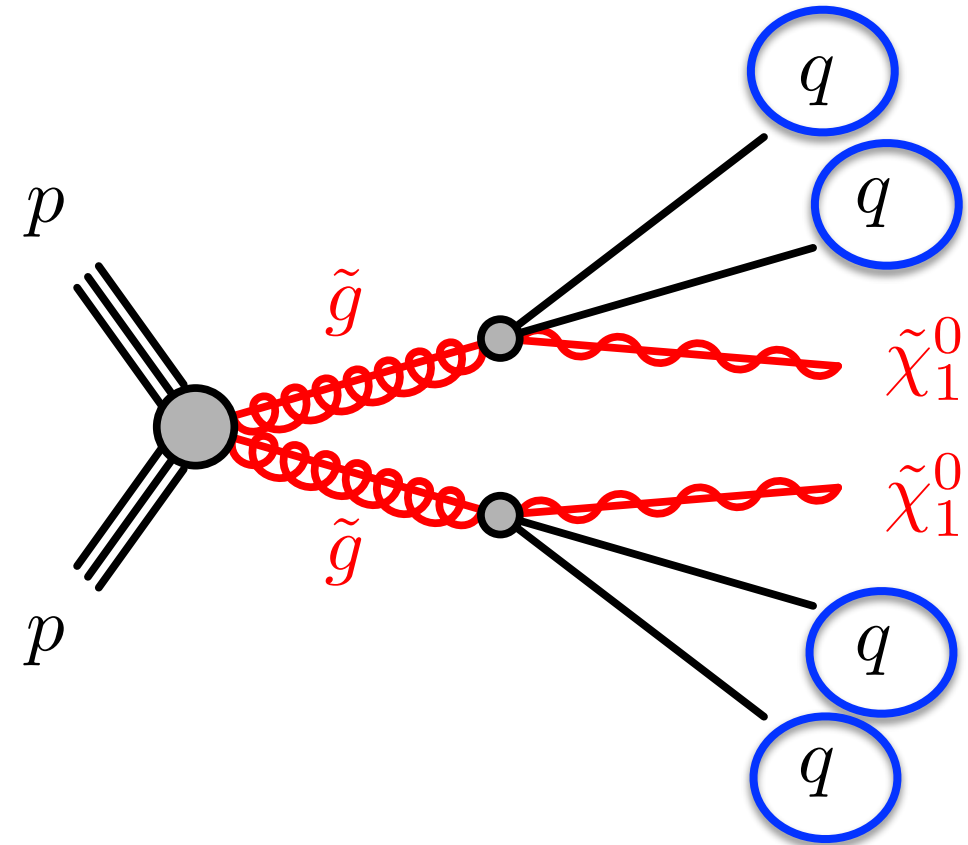


グルイーノ



中性ニュートラリーノ

→ 暗黒物質候補

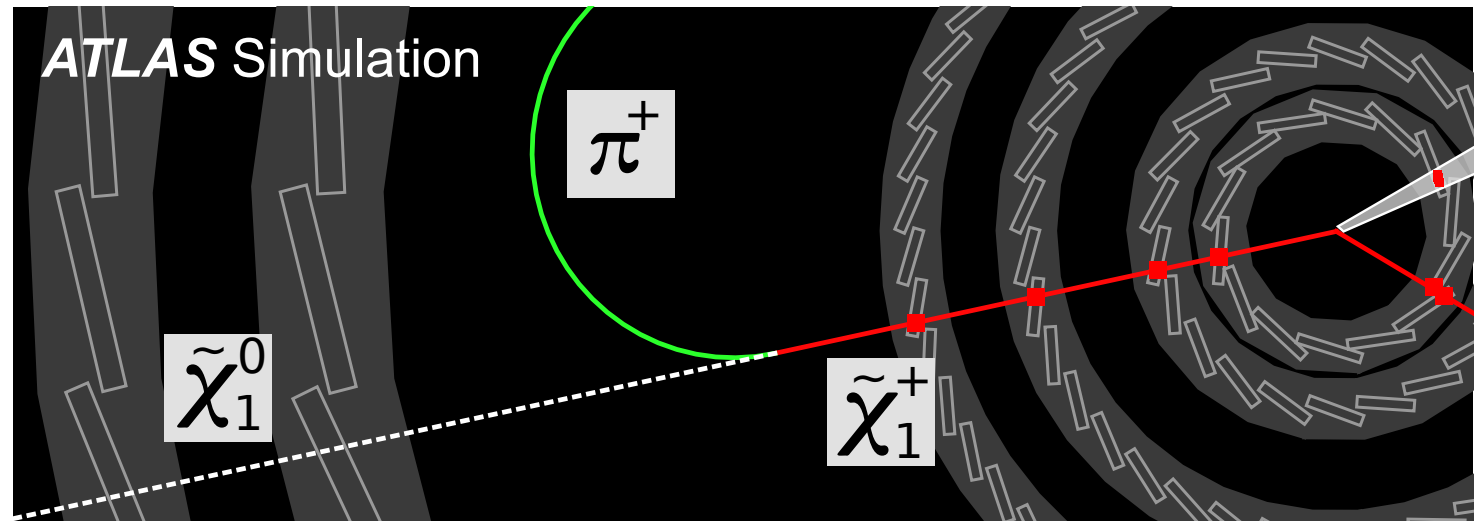
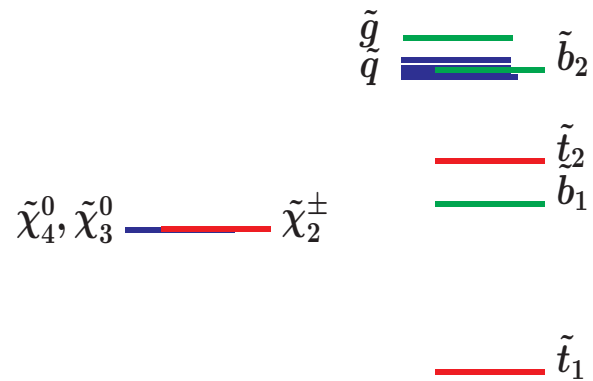


グルイーノが重いので、高エネルギーのジェットが複数でる。

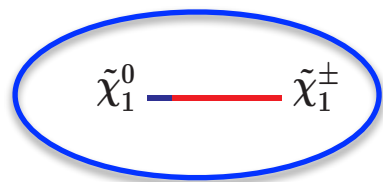
長寿命ウィーノ探索

消失飛跡探索

AMSB SUSY



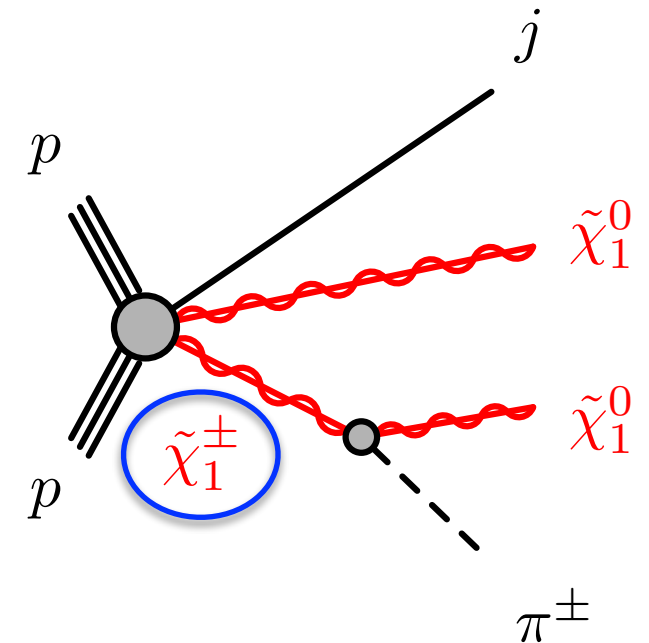
$\tilde{\chi}_2^0$ —



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。

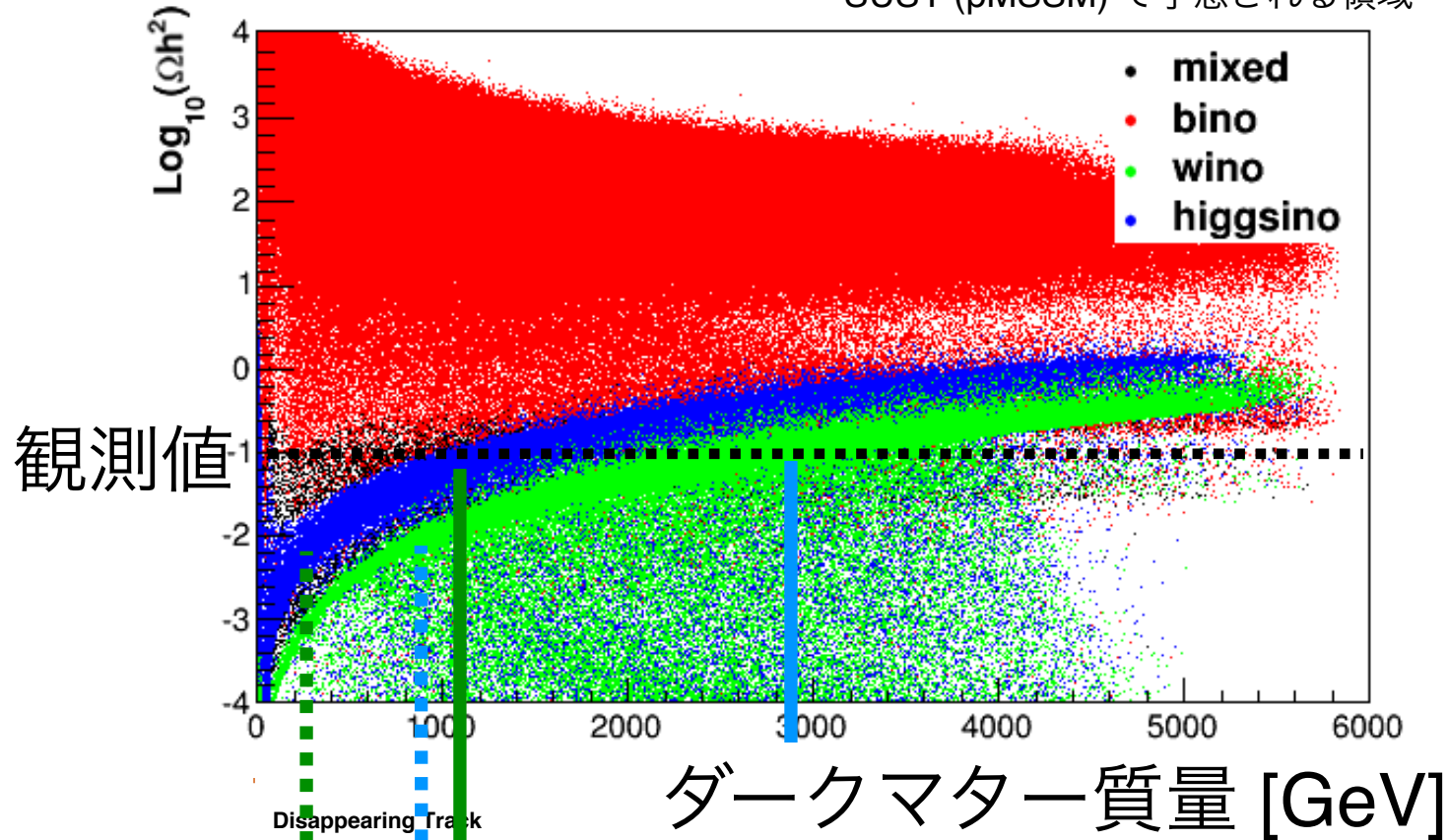
Run2フルデータの結果で660 GeVよりも重いことがわかった。

ダークマターを発見できるか？

将来円形加速器構想 (FCC)

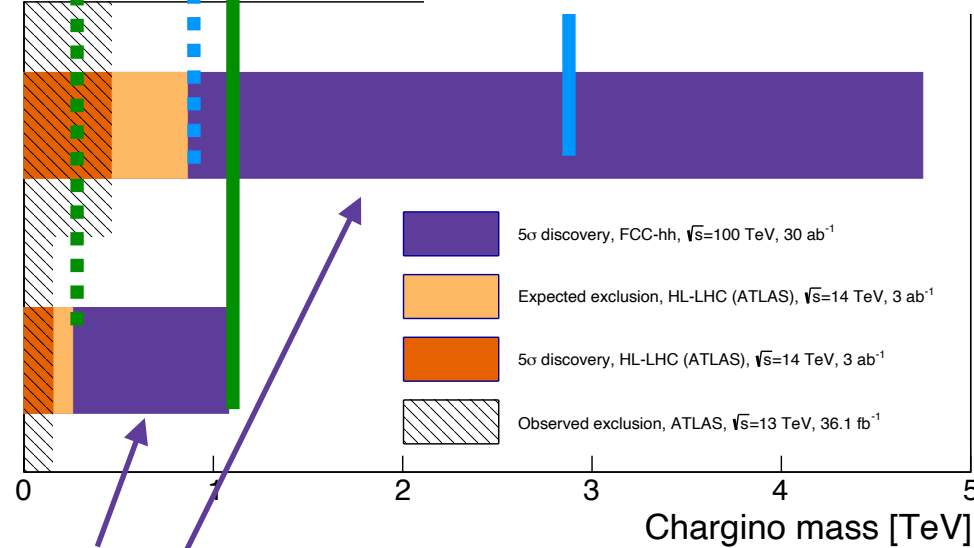
ダークマター残存量

SUSY (pMSSM) で予想される領域



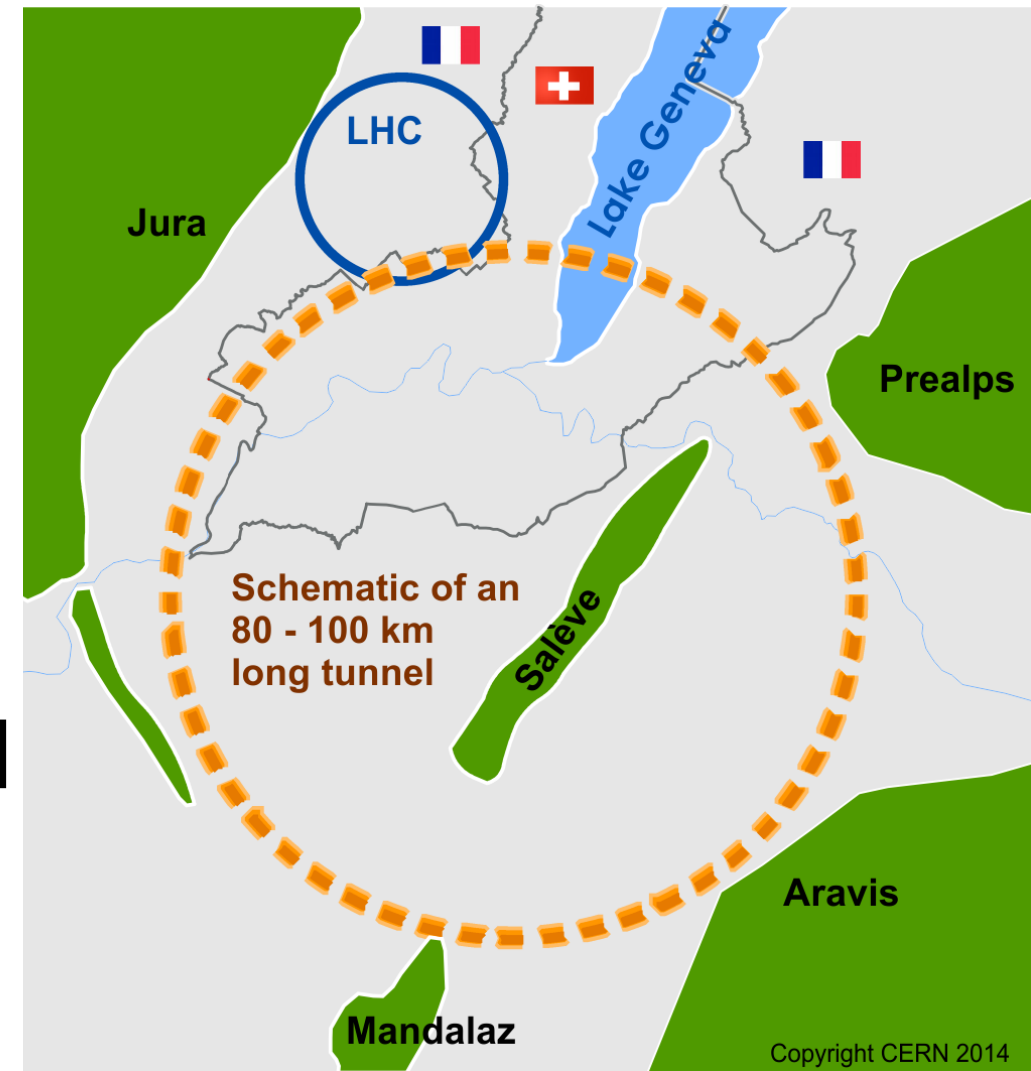
ウィーノ

ヒッグシーノ



FCCでの感度

ICEPPも参加



ピュアな

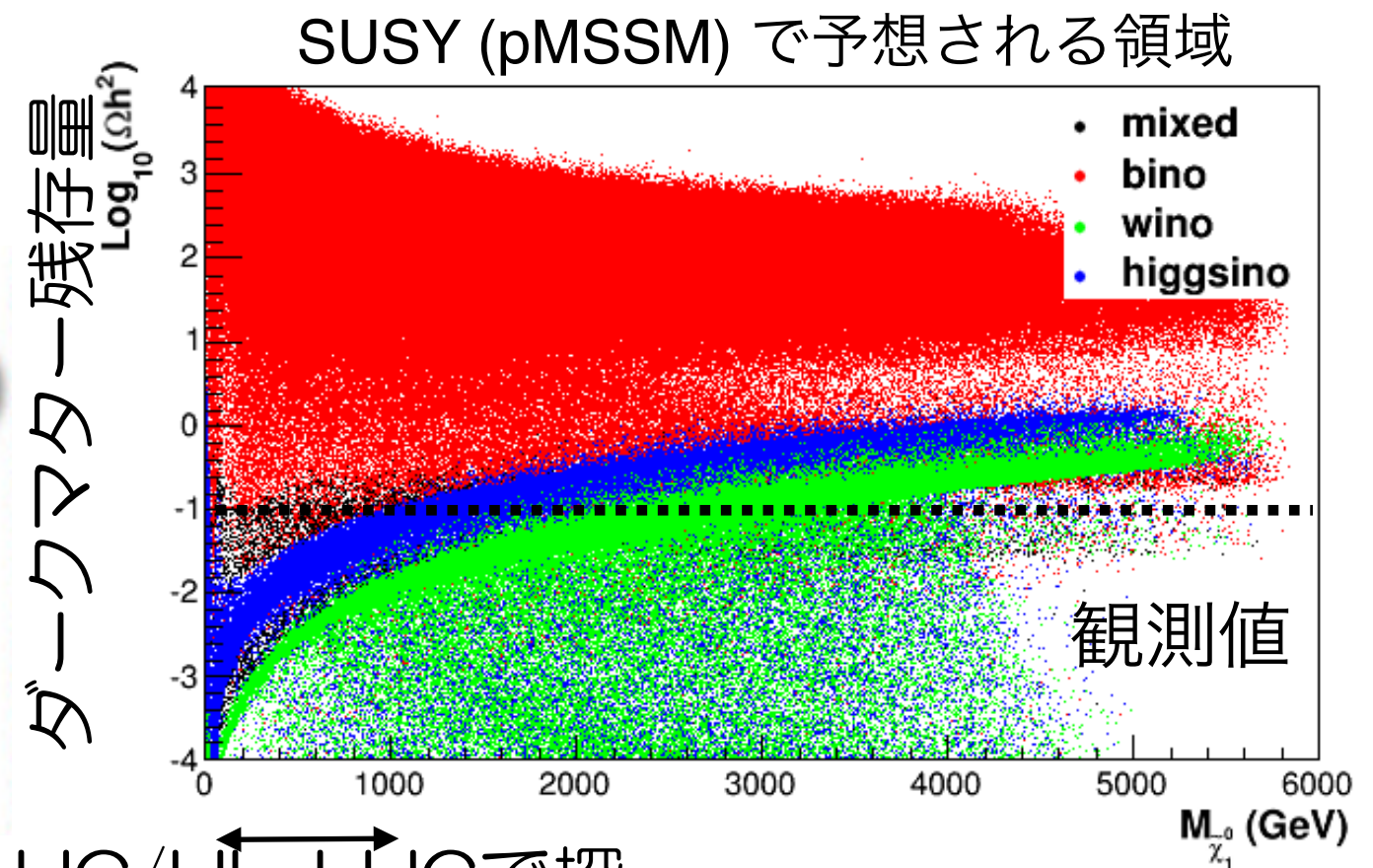
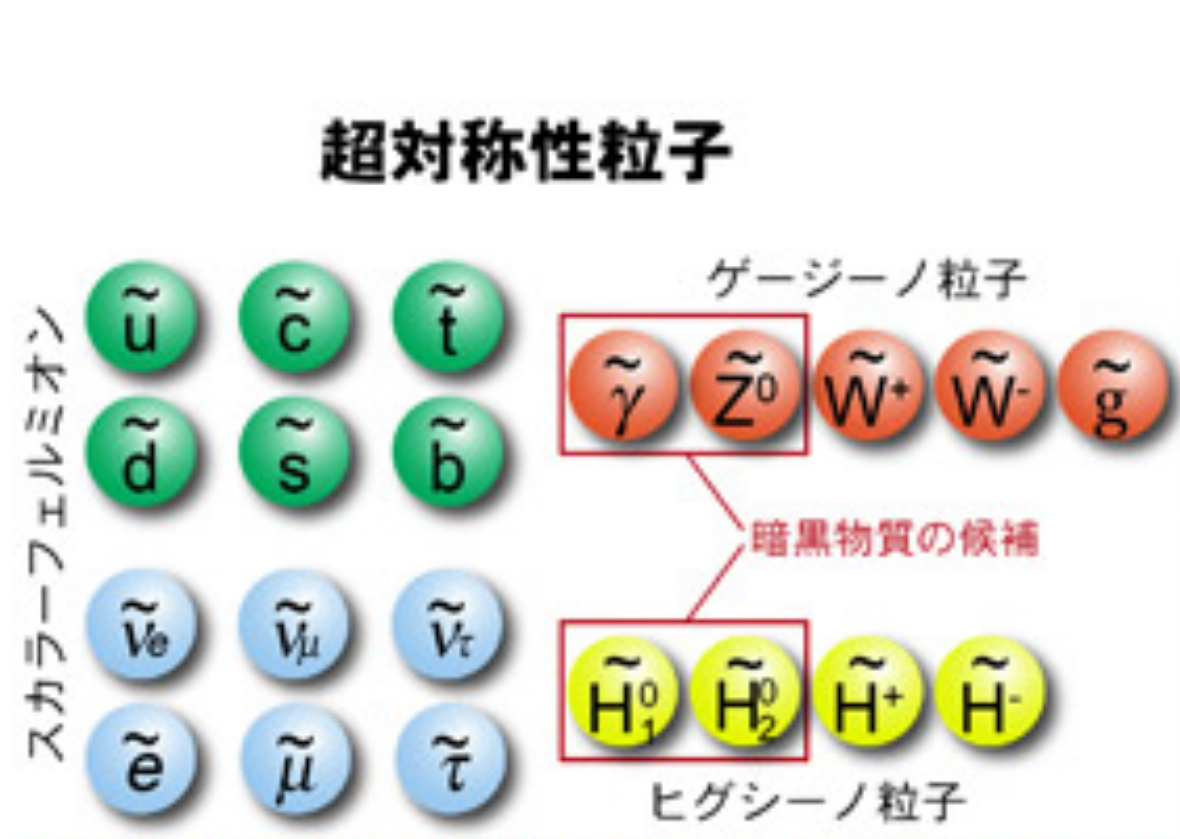
WIMPダークマターは確実に発見できる

さいごに

- 宇宙のなぞである **暗黒物質** の謎をとく鍵(の一つ)が、素粒子物理である **超対称性** であることをみました。
 - 超対称性は、他にも、階層性問題、力の大統一、観測されている理論からのズレを説明できる有力な理論です。
- ここでみたように、素粒子の研究者が本当にやりたいことは、「新粒子の発見」では**ありません**。
- 新粒子の発見はその背後にある物理法則の証拠になると同時に、より広い適応範囲を持つ、より本質的な理論を見つけるための方向性を示すものになります。

バックアップ

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?