

第2回 学術変革「地下稀事象」若手研究会

超対称性理論：動機・展開・そして現在の状況

永田夏海（東京大学）

神戸大学，2026年3月4日

はじめに

超対称性理論の趨勢

LHC実験開始以前は、超対称性の話を聞く機会が非常に多かった。

例) 基研研究会 素粒子物理学の進展2011

3月7日(月)

10:10 - 11:00	平出 克樹 (宇宙線研)	XMASS 実験における暗黒物質探索
11:20 - 12:10	水野 恒史 (広島大)	Fermi 衛星による広がったガンマ線・宇宙線電子の観測と基礎物理学への制限
		Lunch
14:00 - 14:25	佐藤 亮介 (東大理)	Dark matter and sneutrino inflation
14:25 - 14:50	中井 雄一郎 (基研)	Inflation in Gauge Mediated Supersymmetry Breaking and Gravitino Dark Matter
14:50 - 15:15	関口 豊和 (宇宙線研)	場の理論的シミュレーションに基づくアクシオン宇宙ひもの解析
15:15 - 15:40	米倉 和也 (東大理)	Single scale model of SUSY breaking, gauge mediation and dark matter
		Coffee
16:10 - 16:35	鍋島 偉宏 (富山大)	ヒッグスポータル暗黒物質と次世代線形加速器における検証可能性
16:35 - 17:00	阿部 智広 (名大)	スリーサイトヒッグスレスモデルにおけるフレーバーの物理
17:00 - 17:25	浅野 雅樹 (東北大)	Natural Supersymmetry at the LHC
17:25 - 17:50	桑木野 省吾 (名大理)	Heterotic Asymmetric Orbifold and E6 GUT Model

3月8日(火)

9:00 - 9:50	山脇 幸一 (KMI)	Quest for the Dynamical Origin of Mass
10:10 - 11:00	細谷 裕 (大阪大)	Extra Dimensions: Clues at LHC
11:20 - 12:10	柳田 勉 (IPMU)	Supersymmetry (詳細未定)
		Lunch
14:00 - 14:25	藤本 教寛 (神戸大)	Higgs mechanism without Higgs potential in an extra dimension
14:25 - 14:50	酒井 学 (YITP)	(Extra)Ordinary Gaugomaly Mediation
14:50 - 15:15	山下 敏史 (名大理)	grand gauge-Higgs unification
15:15 - 15:40	兼村 晋哉 (富山大)	Physics of extended SUSY Higgs sectors

3月9日(水)

9:00 - 9:50	佐藤 構二 (筑波大)	Tevatron におけるヒッグス粒子探索と新物理探索
10:10 - 11:00	浅井 祥仁 (東大理)	LHC TeVスケールの物理、2010年の結果と今年の展望
11:20 - 12:10	白井 智 (東大理)	Gauge Mediation at Early Stage LHC
		Lunch
14:00 - 14:25	中村 栄太 (東大理)	SUSY Model Discrimination at an Early Stage of LHC
14:25 - 14:50	野尻 美保子 (KEK)	Two jets and missing E_T signature to determine the spins of the new particles
14:50 - 15:15	進藤 哲央 (工学院大)	Rパリティが保存された超対称 2-loop 輻射シーソ一模型のコライダー現象論
15:15 - 15:40	猪木 慶治 (理研)	高エネルギーでのハドロン全断面積の普遍的増加と LHC での pp 全断面積の予言

超対称性理論の趨勢

最近はだいぶ減った...?

例) 基研研究会 素粒子物理学の進展2025

	はじめに バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Kei Yagyu 12:50 - 13:00
13:00	コライダー物理の過去・現在・未来 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Kentarou Mawatari 13:00 - 14:00
14:00	中性子を用いた素粒子物理学実験 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Prof. Kenji Mishima 14:00 - 15:00
15:00	Break バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 15:00 - 15:30
	生成AIによるSS_{4}^{\prime}モジュラーフレーバー模型の解析 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Mr Satsuki Nishimura 15:30 - 16:00
16:00	Pseudo NG bosons from finite modular symmetry バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Junichiro Kawamura 16:00 - 16:30
	Saving protons (and SUSY) with flavor symmetry バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Akifumi Chitose 16:30 - 17:00
17:00	Break バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 17:00 - 17:15
	An Analytic Prescription for St-channel Singularities バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Ryusei Sato 17:15 - 17:45
	カイラルゲージ理論に基づくアクシオン模型とその現象論 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Shonosuke Takeshita 17:45 - 18:15

09:00	Scale invariance vs Conformal invariance for particle theorists バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 YU NAKAYAMA 09:00 - 10:00
10:00	曲がった時空における保存則 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Dr Sinya Aoki 10:00 - 10:30
	Break バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 10:30 - 11:00
11:00	SQCDからQCDの近似を探る バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Dan Kondo 11:00 - 11:30
	Selection rules of topological solitons from non-invertible symmetries in axion electrodynamics バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Ryo Yokokura 11:30 - 12:00
12:00	電弱クロスオーバー中の宇宙磁場 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Fumio Uchida 12:00 - 12:30
	Lunch break バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 12:30 - 13:00
14:00	Semiclassical approaches to confinement: monopole and center vortex バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Yui Hayashi 14:00 - 15:00
15:00	多段階的ゲージ対称性の破れに伴うモノポールの解析 バナソニックホール, 京都大学基礎物理学研究所 Fukutaro Miya 15:00 - 15:30

超対称性理論の趨勢

あからさまに悲觀的な見方を述べる人々もいる。

March 25, 2025 | 6 min read

 Add Us On Google 

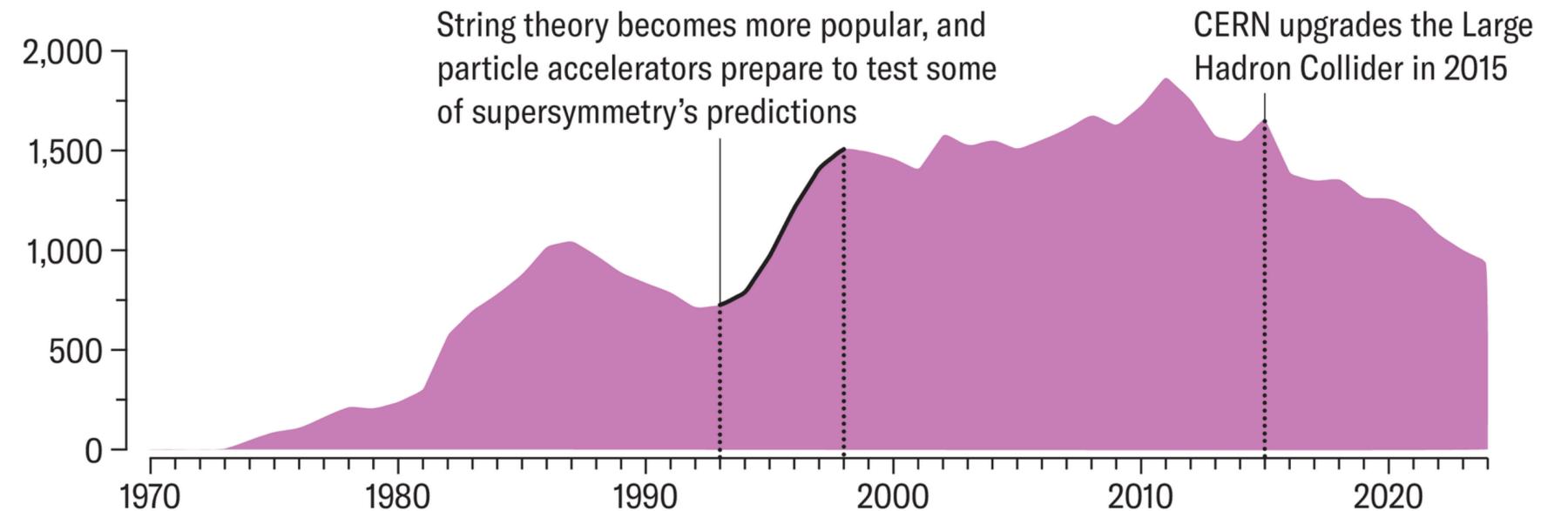
Supersymmetry Washes Out at the Large Hadron Collider

Supersymmetry, long considered the golden child of theoretical physics, has officially lost its luster at the world's reigning particle accelerator

BY ELENI PETRAKOU EDITED BY LEE BILLINGS

SCIENTIFIC
AMERICAN

Annual Number of Papers Focused on Supersymmetry



<https://www.scientificamerican.com/article/supersymmetrys-long-fall-from-grace/>

講義の目標

超対称性理論が今後どうなるといったような予言めいたことは言えないですが、...

自分自身で考えられるようになることを目標に、

- 超対称性理論の動機・特徴
- 超対称性理論が抱える困難・問題点
- 将来の展望

について話したいと思います。

超对称性理論

物理理論の対称性

ある一連の変換のもとで理論の予言が不変である時, その理論はその変換に対応する対称性を持つ.

例)

- ▶ 並進対称性 座標原点の取り方
- ▶ Lorentz対称性 慣性系の取り方
- ▶ 内部対称性

連続的内部対称性の例：アイソスピン

核力が、

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \longrightarrow U \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \quad U : \det(U) = 1 \text{ の } 2 \times 2 \text{ ユニタリー行列}$$

なる変換のもとで（近似的に）不変。

陽子と中性子が混ざり合う変換。

無限小変換

$$\delta N = i\epsilon^a \frac{\tau^a}{2} N \quad N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

ϵ^a : 無限小実パラメーター
 τ^a :パウリ行列

超対称性 (supersymmetry; SUSY)

超対称変換：ボソンとフェルミオンとが混ざり合う変換。

$$\delta\phi = \epsilon\psi$$

スカラー場



フェルミオン場

グラスマン数のパラメーター

このような変換のもとで不変な理論はありうるのだろうか？

超対称性の発見

- P. Ramond; A. Neveu and J. H. Schwarz; J. L. Gervais and B. Sakita (1971)
ストリング理論における2次元世界面上の超対称性を発見.
- Yu. A. Gol'fand and E. P. Likhtman (1971)
4次元の超対称理論を構築.
- D. V. Volkov and V. P. Akulov (1973)
超対称性の自発的破れによって軽いニュートリノを得る模型の構築.
- J. Wess and B. Zumino (1974)
4次元の超対称理論を構築.

Haag-Lopuszanski-Sohniusの定理

R. Haag, J. T. Lopuszanski, and M. Sohnius, Nucl. Phys. **B88**, 257 (1975)

場の量子論において、(質量スケールを持つ理論)

- ▶ 並進対称性
- ▶ Lorentz対称性
- ▶ 内部対称性

(スピン1/2の)

に加えて唯一可能な対称性が超対称性である。

拡張可能な唯一の対称性であることは、超対称性の魅力的な特徴の一つ。

Wess-Zumino 模型

理論がある対称性をもつ。

➔ 対応する対称性変換のもとで作用が不変。

超対称性を持つ理論の例：Wess-Zumino 模型

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{WZ}} = & |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{1}{2} \bar{\psi} \gamma^\mu i \partial_\mu \psi + |F|^2 \\ & + \left(m\phi + \frac{1}{2} \lambda \phi^2 \right) F - \frac{1}{2} m \bar{\psi}_R \psi_L - \frac{1}{2} \lambda \phi \bar{\psi}_R \psi_L + \text{h.c.}\end{aligned}$$

ϕ : 複素スカラー場, ψ : マヨラナ・フェルミオン場, F : 補助場

Wess-Zumino 模型

一連の変換

$$\delta\phi = \bar{\epsilon}_R \psi_L, \quad \psi = -i\gamma^\mu (\partial_\mu \phi^* P_L + \partial_\mu \phi P_R) \epsilon + (F P_L + F^* P_R) \epsilon$$

$$\delta F = -i\bar{\epsilon}_L \gamma^\mu \partial_\mu \psi_L$$

のもとで, \mathcal{L}_{WZ} の変化分は全微分になるとわかる.

ϵ : マヨラナ・スピノルの変換パラメーター

Wess-Zumino 模型

補助場に対し Euler-Lagrange 方程式 を用いると

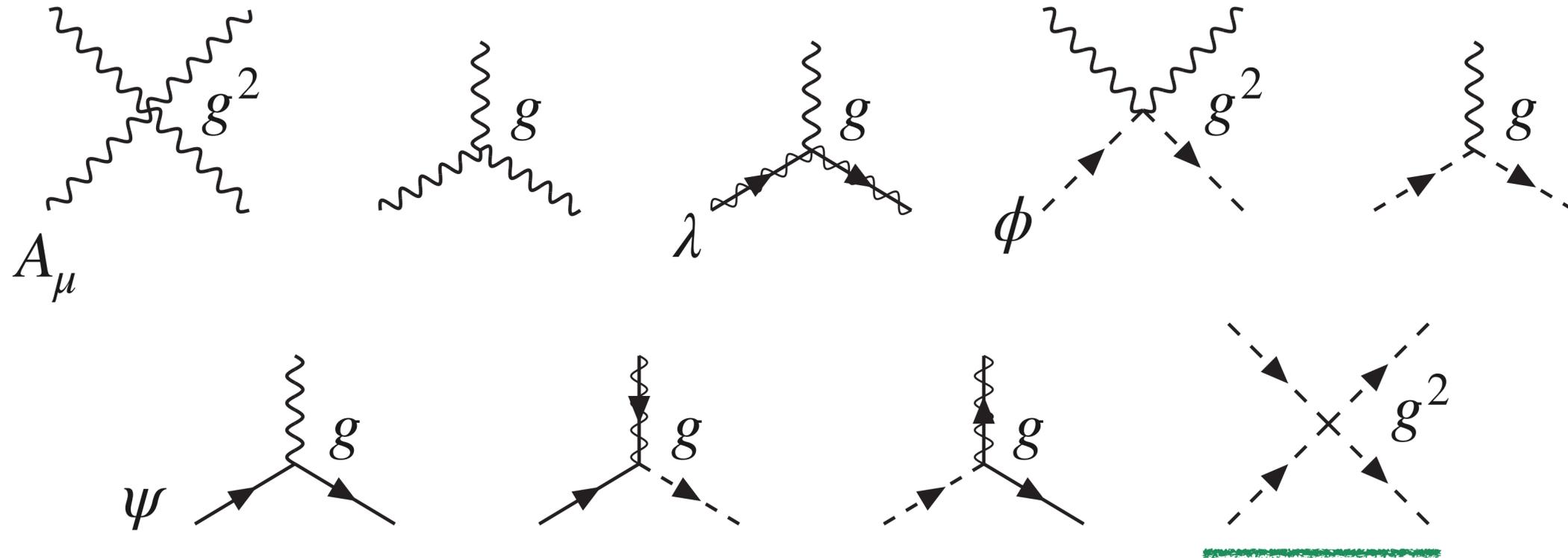
$$F = -m^* \phi^* - \frac{1}{2} \lambda^* \phi^{*2} \quad \text{これをラグランジアンに代入すると}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{WZ}} = & |\partial_\mu \phi|^2 + \frac{1}{2} \bar{\psi} \gamma^\mu i \partial_\mu \psi - |m|^2 |\phi|^2 - \frac{1}{4} |\lambda|^2 |\phi|^4 \\ & - \frac{1}{2} m \bar{\psi}_R \psi_L - \frac{1}{2} \lambda \phi \bar{\psi}_R \psi_L - \frac{1}{2} m \lambda^* \phi \phi^{*2} + \text{h.c.} \end{aligned}$$

- スカラーとフェルミオンの質量が一緒.
- 3点結合, 4点結合, 湯川結合の間に関係がある.
- $\phi \bar{\psi}_R \psi_L$ はあるが $\phi^* \bar{\psi}_R \psi_L$ はない.

超対称ゲージ理論

ゲージ場の超対称パートナーは、スピン1/2のフェルミオン：**ゲージノ**



スカラー場の**4点結合**が生じる

超对称標準模型

階層性問題

現実の理論において超対称性が何らかの役割を果たしていると考えられるようになった最大の動機の一つが、電弱スケールの階層性問題。

- 標準模型の電弱スケール: $\sim m_Z$
- 重力が重要になるスケール (Planck スケール): $M_P \sim 10^{18}$ GeV

$$m_Z \ll M_P$$

何故...? 不自然?

S. Weinberg (1976); L. Susskind (1979); G. 't Hooft (1980); M. J. G. Veltman (1981).

階層性問題

標準模型の電弱スケールは、ヒッグス場の真空期待値で決まる。

$$V(H) = -m_H^2 |H|^2 + \frac{1}{2} \lambda_H |H|^4 \quad \rightarrow \quad \langle H \rangle = \sqrt{\frac{m_H^2}{\lambda_H}} \simeq 174 \text{ GeV}$$

質量くりこみ

場の理論において裸の質量項は、量子補正を打ち消して観測値を再現するようにとられる。

$$\Delta m_H^2 = \frac{3\sqrt{2}G_F}{16\pi^2} (4m_t^2 - 2m_W^2 - m_Z^2 - m_h^2) \Lambda^2$$

$\Lambda \gg 1 \text{ TeV}$ のとき
厳しい微調整が必要。

Λ : 標準模型が有効なエネルギー・スケールの上限; G_F : フェルミ定数

階層性問題

標準模型の他の粒子の場合，対称性により質量項が禁じられている。

- ゲージ粒子：ゲージ対称性
- クォーク・レプトン：カイラル対称性

左巻きと右巻きとで異なる対称性変換. $\rightarrow -m\bar{\psi}_R\psi_L$ が禁じられる。

これらの質量項は，対称性が破れて初めて生じる。

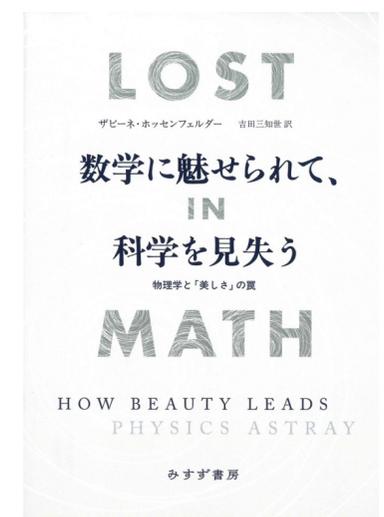
質量が軽く，量子補正によって大きな質量が追加されない理由を，
対称性によって説明できる。

階層性問題に関する注意

階層性問題は、場の量子論としての破綻を意味しているわけではない。

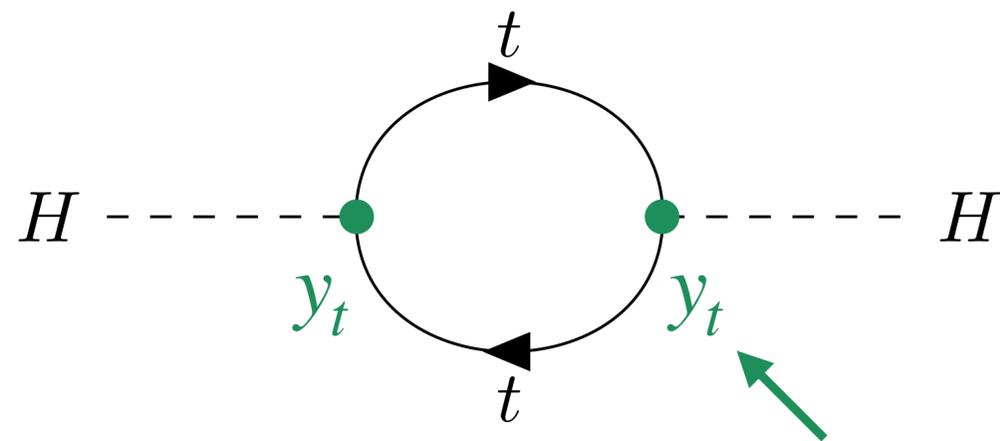
単に美的観点の問題と言う人もいる。

- 最近のレビュー：N. Craig, arXiv:2205.05708
- 理論の『自然さ』に関する美的観点の問題について
 - ▶ スティーブン・ワインバーグ, 究極理論への夢：自然界の最終法則を求めて (ダイヤモンド社)
 - ▶ ザビーネ・ホッセンフェルダー, 数学に魅せられて科学を見失う：物理学と「美しさ」の罠 (みすず書房)



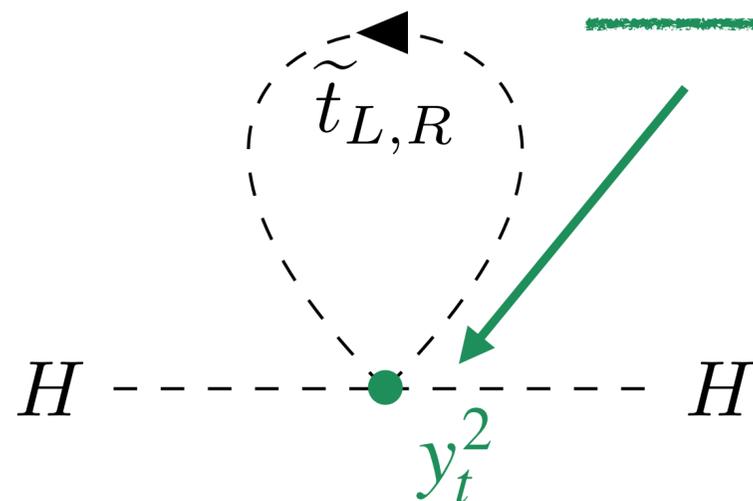
超対称性理論と階層性問題

L. Maiani (1979); E. Witten (1981).



$$\Delta m_H^2 = +\frac{3y_t^2}{8\pi^2} \Lambda^2 + \dots$$

超対称性により同じになる.



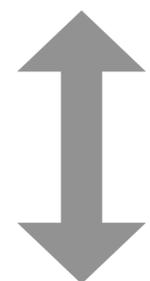
$$\Delta m_H^2 = -\frac{3y_t^2}{8\pi^2} \Lambda^2 + \dots$$

二次発散部分が打ち消し合う.

超対称性理論と階層性問題

フェルミオン

… カイラル対称性により自然と軽くなれる.



超対称性

スカラー

… 超対称性によりフェルミオンと同質量になる.

超対称パートナー

● クォーク・レプトン Q_L, u_R, d_R, L_L, e_R

➔ スピン0のスクォーク・スレプトン $\tilde{Q}_L, \tilde{u}_R, \tilde{d}_R, \tilde{L}_L, \tilde{e}_R$

● ゲージ場 G_μ^A, W_μ^a, B_μ

➔ スピン1/2のゲージーノ

▶ グルイーノ \tilde{g}^A

▶ ウィーノ \tilde{W}^a

▶ ビーノ \tilde{B}

超対称パートナー粒子は
~ をつけて表すのが一般的.

ヒッグス場

超対称性理論において、ヒッグス二重項は2つ必要。

$$H_u = \begin{pmatrix} H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix} \quad H_d = \begin{pmatrix} H_d^0 \\ H_d^- \end{pmatrix}$$

理由: Wess-Zumino 模型で、 $\phi \bar{\psi}_R \psi_L$ が許されて $\phi^* \bar{\psi}_R \psi_L$ が許されなかったように、 $H \bar{u}_R Q_L$ と $H^* \bar{d}_R Q_L$ とは共に存在できない。

これらの超対称パートナー粒子はヒッグシーノと呼ばれる。

$$\tilde{H}_u = \begin{pmatrix} \tilde{H}_u^+ \\ \tilde{H}_u^0 \end{pmatrix} \quad \tilde{H}_d = \begin{pmatrix} \tilde{H}_d^0 \\ \tilde{H}_d^- \end{pmatrix}$$

この場合、ゲージ・アノマリーは生じない。

最小超対称標準模型

以上の場を導入して標準模型を超対称性理論へと拡張した理論を

最小超対称標準模型

Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)

と呼ぶ。

超対称性の破れ

現実では超対称性は破れてなければならない。

MSSMにおいて超対称性を自発的に破るのはうまくいかない。

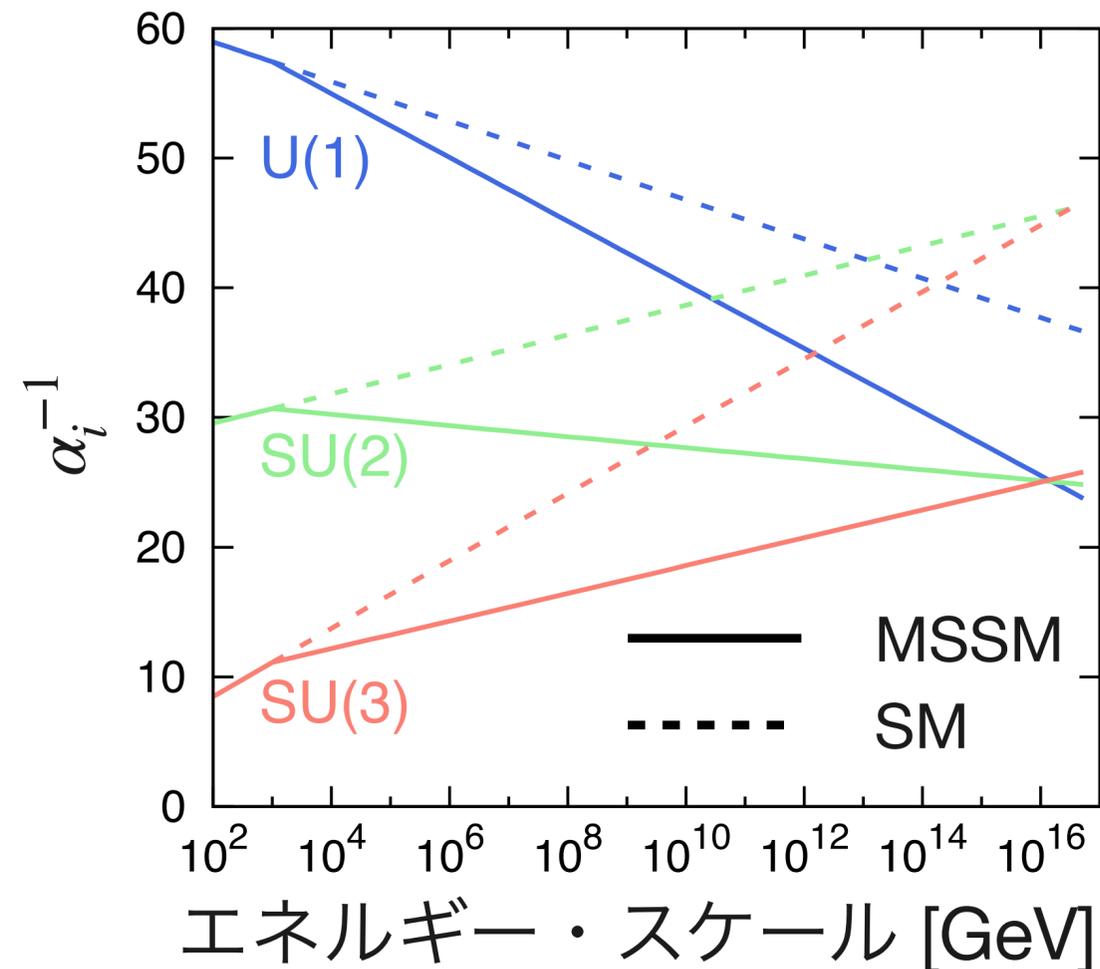
超対称性の破れの構造



超対称性の破れの伝わり方がMSSMの現象論を左右する。

ゲージ結合定数の統一

TeV スケール程度に超対称粒子があると，非常に高いスケールで標準模型のゲージ結合定数が非常に近い値をとる。



$$\alpha_i \equiv \frac{g_i^2}{4\pi}, \quad g_1 \equiv \sqrt{\frac{5}{3}}g'$$

超対称大統一理論を示唆している？

超対称性の存在を暗示する状況証拠として受け取られた。

バリオン数・レプトン数の破れ

標準模型の場合，ゲージ対称性による制約から自動的にバリオン数・レプトン数の保存が従った。

超対称標準模型の場合，これらの保存則を破る相互作用が書けてしまう。

例 H_d と \tilde{L} の量子数と一緒にあることから

$$H_d \bar{d}_R Q_L \rightarrow \tilde{L} \bar{d}_R Q_L \quad \text{レプトン数を破る}$$

このように，バリオン数・レプトン数を破る相互作用が色々生じる。

これらは実験により非常に強く制限されている。

R パリティ

バリオン数・レプトン数を破るくりこみ可能な相互作用は全て、
R パリティ保存を課すことで禁止することができる。

$$P_R = (-1)^{3(B-L)+2s}$$

B : バリオン数; L : レプトン数
 s : スピン

- 標準模型粒子, ヒッグス場: $P_R = +1$
- 超対称粒子: $P_R = -1$

この時, 最も軽い超対称粒子は標準模型粒子に崩壊できず, 安定になる。

Lightest SUSY particle (LSP)

超対称暗黒物質

最も軽い超対称粒子が中性の場合、**暗黒物質候補**となる。

例

- ビーノ
- 中性ウィーノ
- 中性ヒッグシーノ

これらは、電弱対称性が破れた後に混ざり合う



ニュートラリーノ

これらは、**Weakly-Interacting Massive Particles (WIMPs)** と呼ばれる暗黒物質候補の一種である。

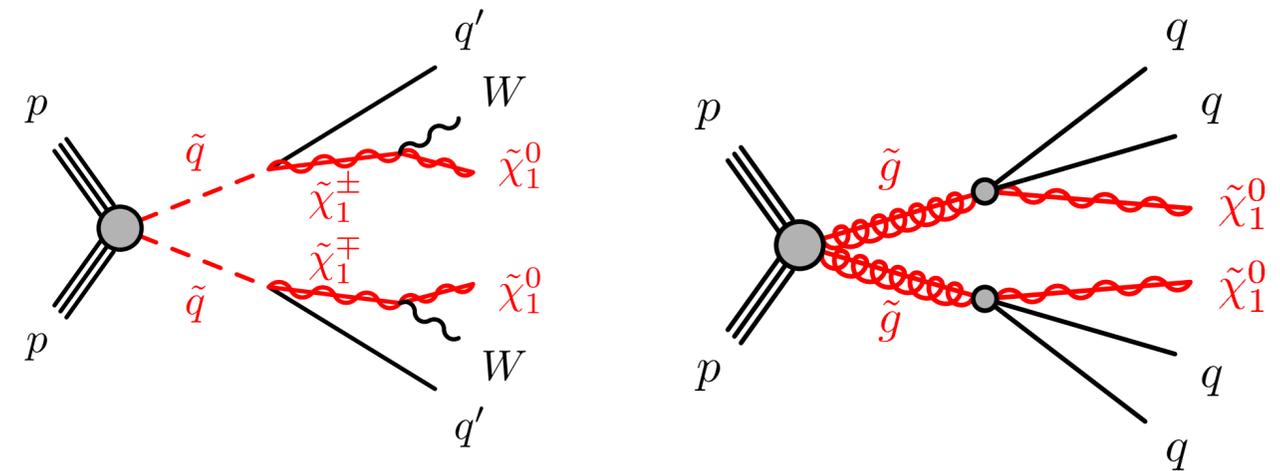
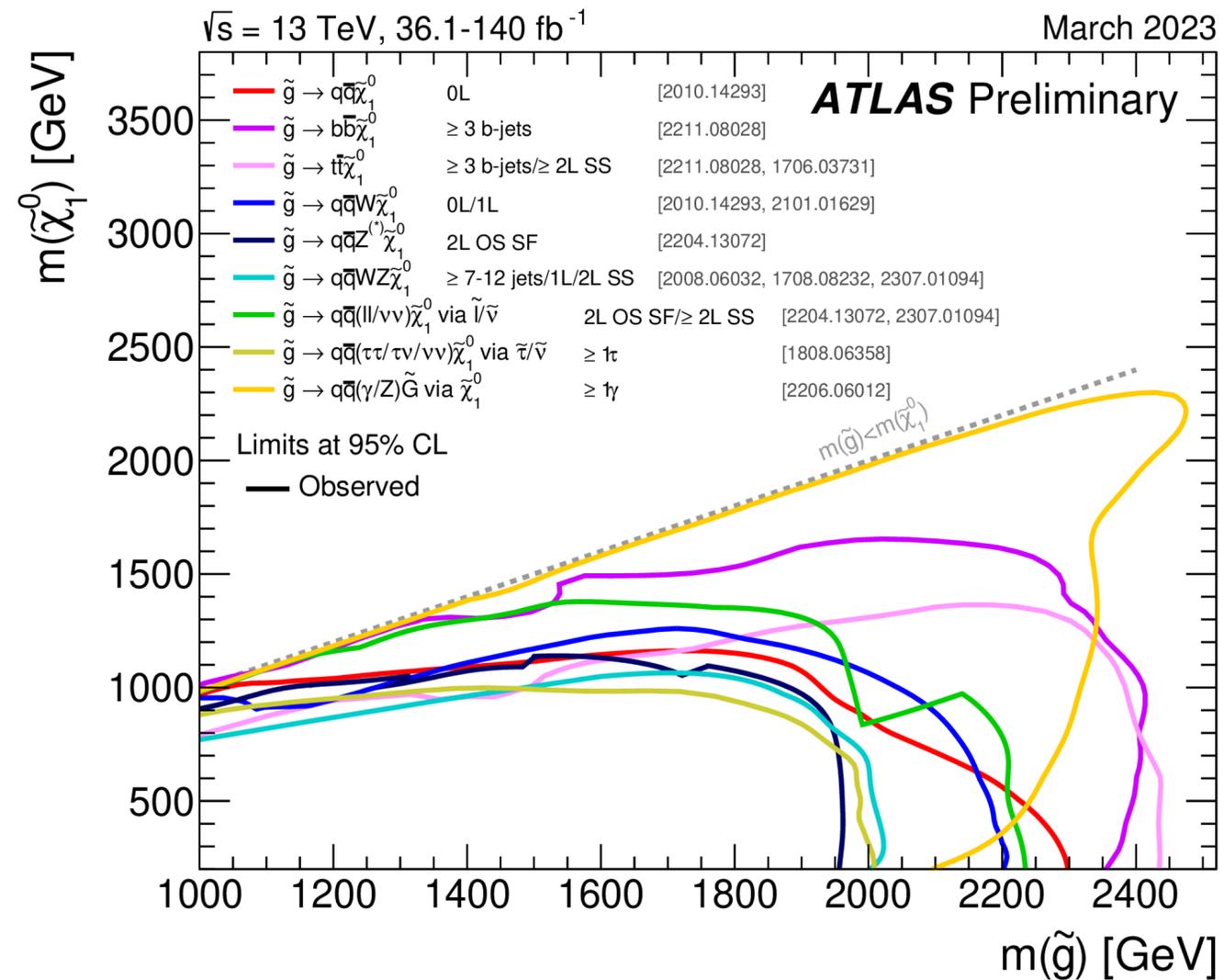
ここまでのまとめ：超対称性理論の特徴

- 並進, Lorentz, 内部対称性に加えて許容しうる**唯一の対称性**.
- **階層性問題**を解決しうる.
- 高エネルギー・スケールにおいて**ゲージ結合定数の統一**が実現する.
- くりこみ可能な相互作用によってバリオン数・レプトン数の破れが生じうるが, これらは **R パリティ**によって禁じられる.
- この場合, **暗黒物質**候補が提供される.

実験制限

LHC

LHCにおける探索で、超対称粒子は見つかっていない。



特に、スクォーク、グルイーノなどカラーを持った粒子の質量に厳しい下限が課せられている。

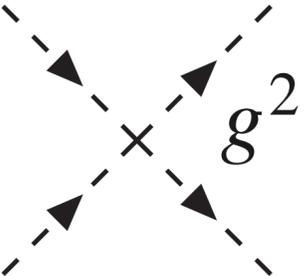
ヒッグス質量

MSSMにおいて、125 GeV のヒッグス質量も超対称粒子（特にストップ）の質量に対し下限を与える。

4点結合とヒッグス質量

$$V(H) = -m_H^2 |H|^2 + \frac{1}{2} \lambda_H |H|^4 \quad \rightarrow \quad m_h^2 = \lambda_H v^2$$

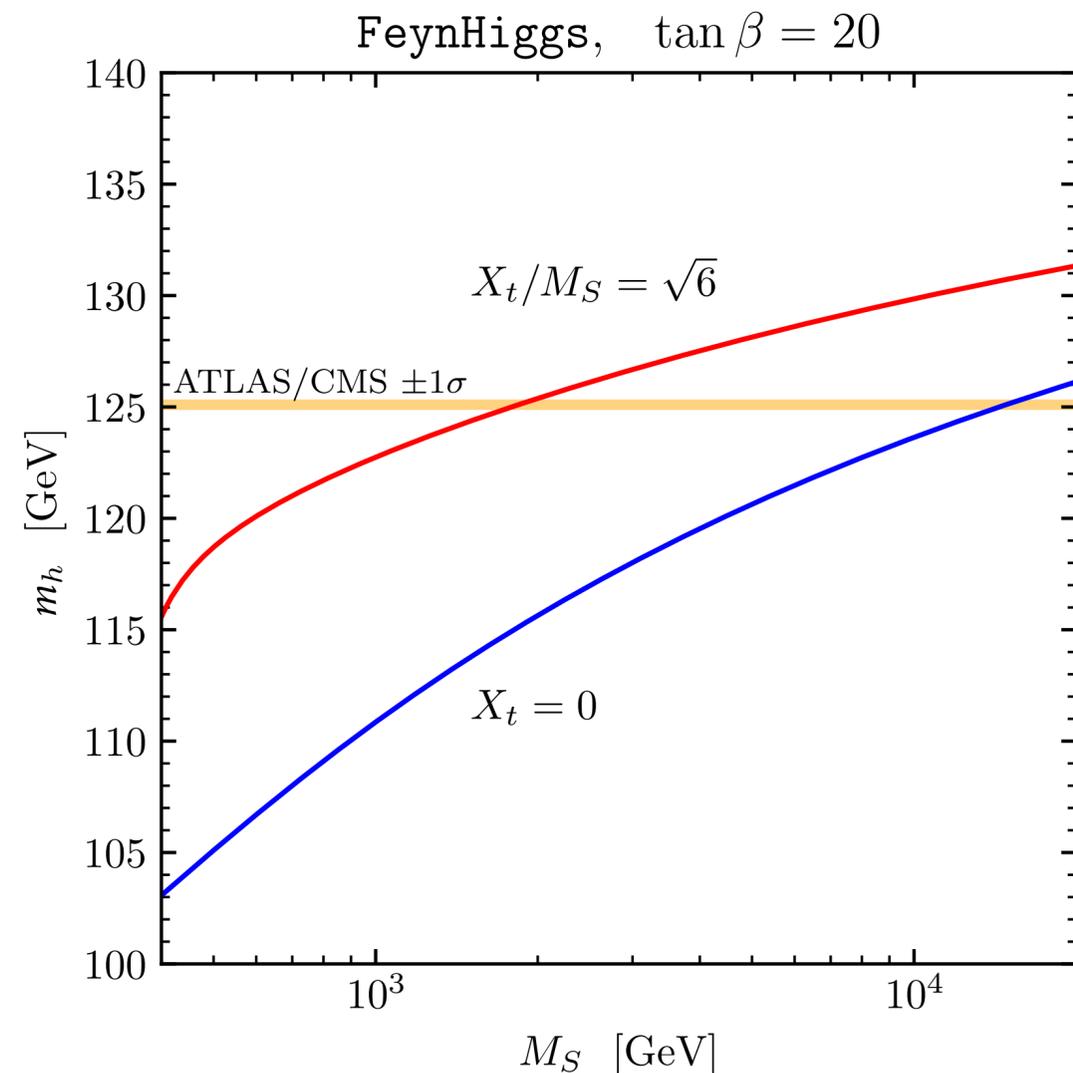
超対称性による関係式 (MSSM)


$$\lambda_H = \frac{1}{4} (g^2 + g'^2) \cos^2 2\beta \quad \rightarrow \quad m_h < m_Z$$

$\tan \beta \equiv \langle H_u^0 \rangle / \langle H_d^0 \rangle$

ヒッグス質量

超対称性の破れの効果が、量子補正を通じてヒッグス質量に寄与する。



$$\tan \beta \equiv \langle H_u^0 \rangle / \langle H_d^0 \rangle$$

M_S : 超対称粒子の質量スケール

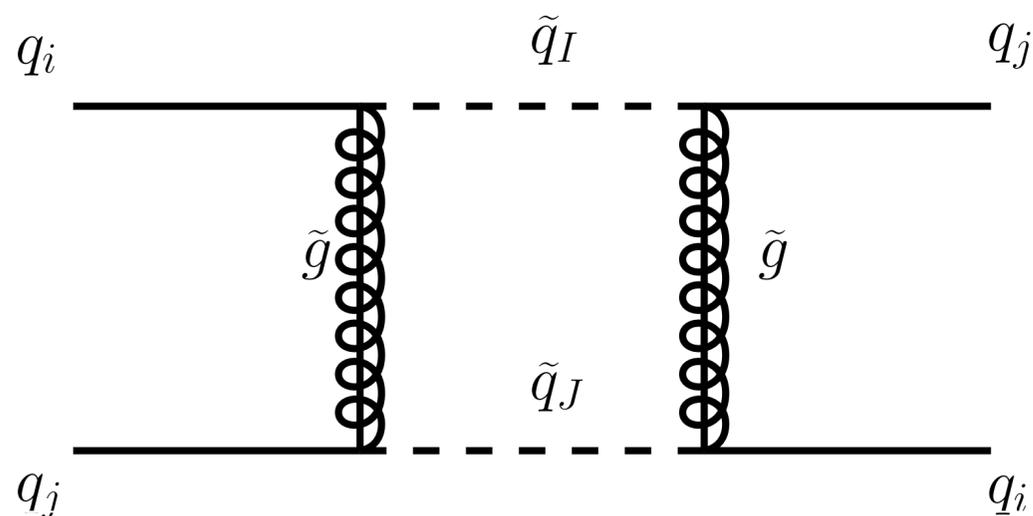
$m_t X_t$: ストップ質量行列の非対角項

観測値を説明するには、超対称性の破れの効果が大きい必要がある。

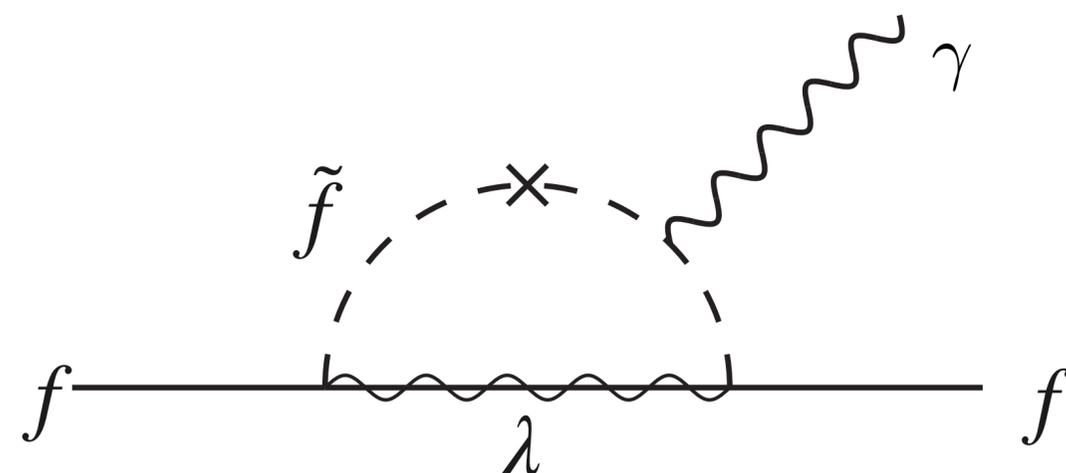
➔ 超対称粒子の質量が TeV 以上

フレーバー・CPの物理

超対称性粒子は、フレーバー・CP対称性を破る過程を誘導しうる。



- ▶ $K^0 - \bar{K}^0$ 混合
- ▶ $D^0 - \bar{D}^0$ 混合
- ▶ $B_{d,s}^0 - \bar{B}_{d,s}^0$ 混合

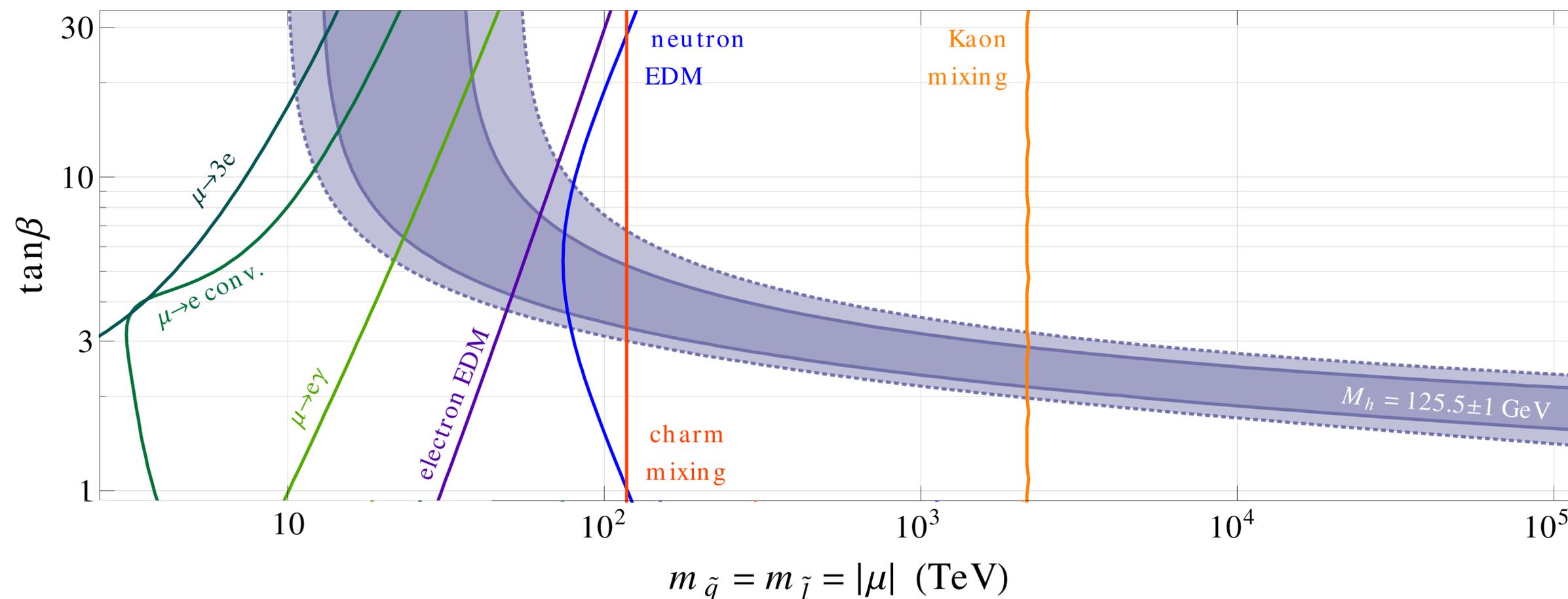


- ▶ $\mu \rightarrow e\gamma$
- ▶ 電気双極子モーメント

これらは標準模型では非常に抑制されている。

フレーバー・CP問題

$$|m_{\tilde{B}}| = |m_{\tilde{W}}| = 3 \text{ TeV}, |m_{\tilde{g}}| = 10 \text{ TeV}$$



フレーバー・CP対称性の破れを抑制する構造が無い場合，超対称粒子の質量は非常に重くなくてはならない。

超対称性と電弱スケールの自然さ

MSSMにおいて、ヒッグス質量パラメーターは

$$\underline{m_H^2 \simeq |\mu|^2 + m_{H_u}^2 + \Delta m_H^2} \quad \mu: \text{ヒッグシーノ質量}$$

のように与えられる。ここで、 Δm_H^2 は量子補正を表す：

$$\Delta m_H^2 \simeq \underbrace{-\frac{3y_t^2}{16\pi^2} \left(m_{\tilde{Q}_{L3}}^2 + m_{\tilde{u}_{R3}}^2 + |A_t|^2 \right)}_{\text{ストップ}} \ln \left(\frac{\Lambda^2}{Q^2} \right) - \underbrace{\frac{g_3^2 y_t^2}{16\pi^4} |M_3|^2 \left(\ln \frac{\Lambda^2}{Q^2} \right)^2}_{\text{グルイーノ}}$$

(Λ : インプット・スケール; Q : 超対称スケール)

ヒッグシーノ、ストップ、グルイーノが重くなるほど微調整が必要。

将来の展望

小さな階層性問題

実験が示唆するように超対称性スケールが電弱スケールよりも高いとすると、(小さな) 階層性問題が再び生じてしまうように思われる。

Little hierarchy problem

- 超対称性がTeV スケールくらいに現れ、MSSMよりも複雑なシナリオ？
 - ▶ 実験回避・ヒッグス質量の説明が巧妙な形で行われる？
 - ▶ 電弱スケールが“自然に”説明される？
- 単純な構造のまま、超対称性がTeV スケールよりもはるかに高い？

高いスケールの超対称性

- 超対称スカラー粒子の質量は TeV よりはるかに重い。
 - ▶ ヒッグス質量を説明できる。
 - ▶ フレーバー・CP物理からの制限も回避。
- 近似的カイラル対称性により超対称フェルミオン粒子は比較的軽い。
ゲージーノ・ヒッグシーノ
 - ▶ 暗黒物質候補
 - ▶ ゲージ結合定数の統一

Split SUSY

LHC後

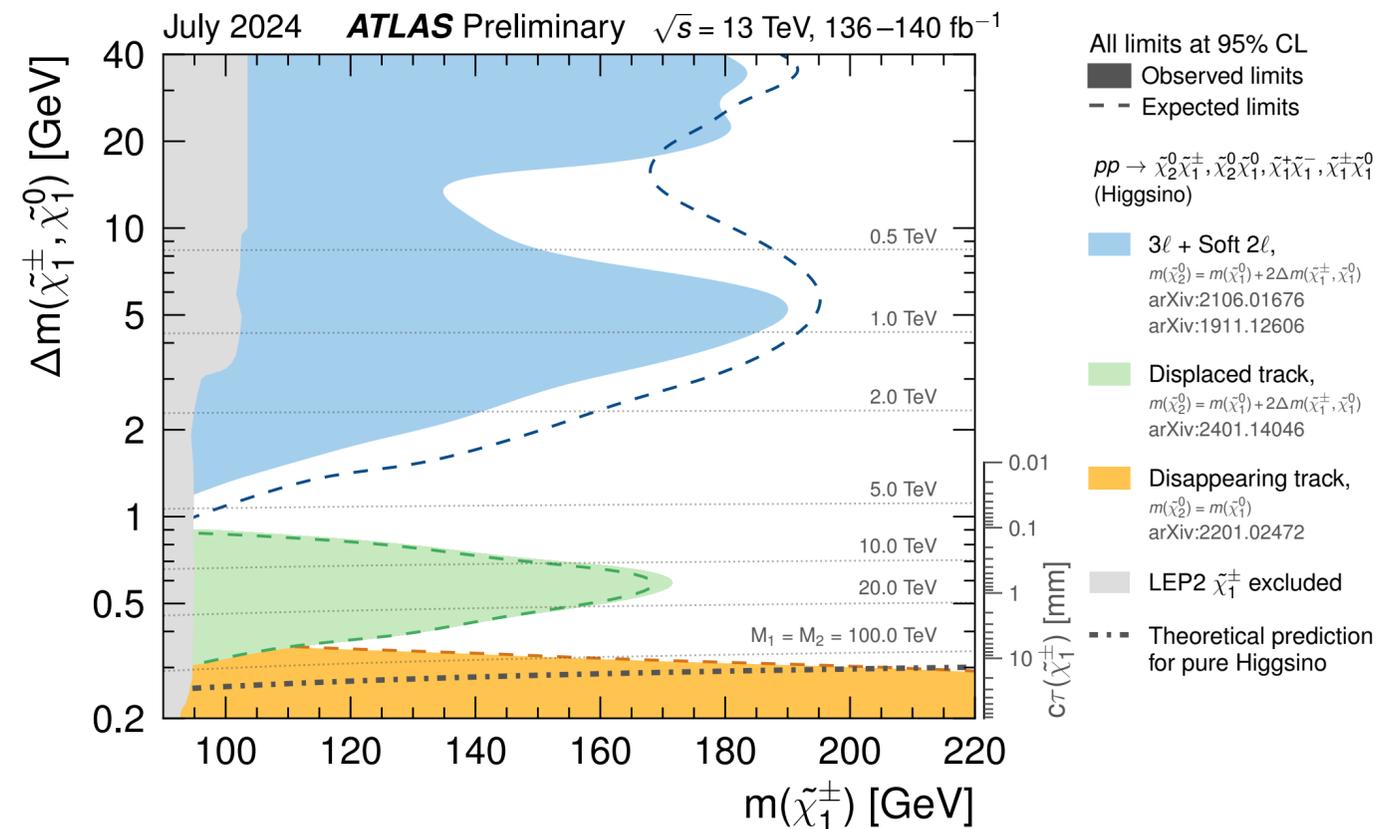


Spread SUSY
Pure Gravity Mediation
Mini-Split SUSY
Simply Unnatural SUSY

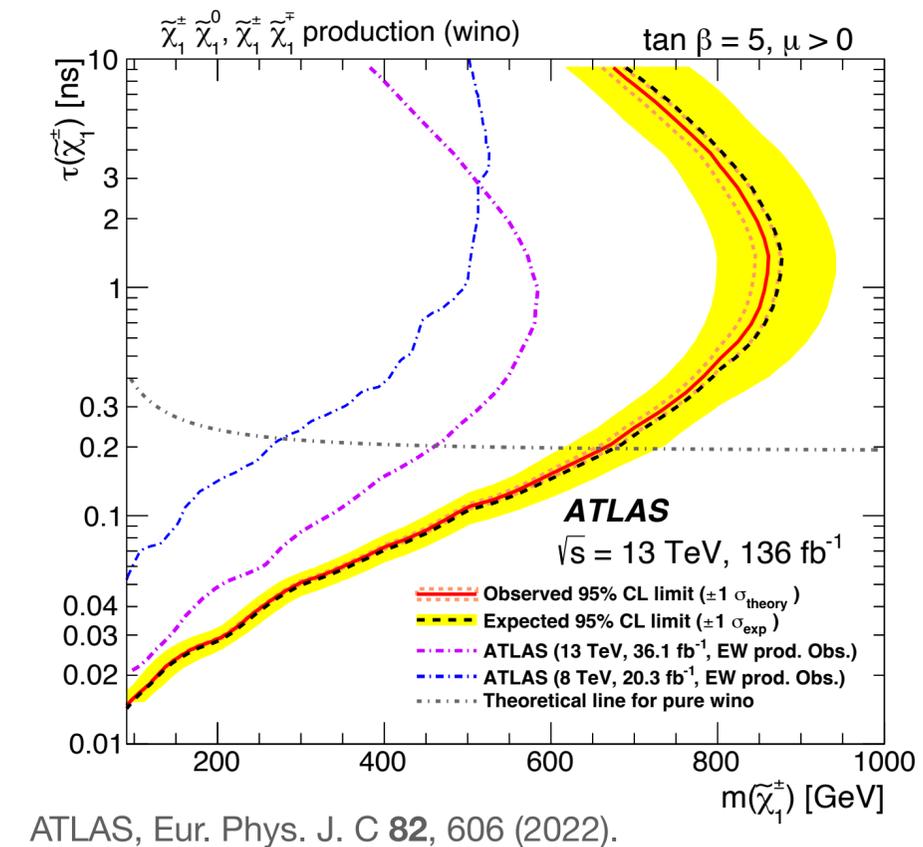
超対称フェルミオン探索

暗黒物質候補にもなる，電弱相互作用のみを行う超対称フェルミオンが有望な探索標的となる。

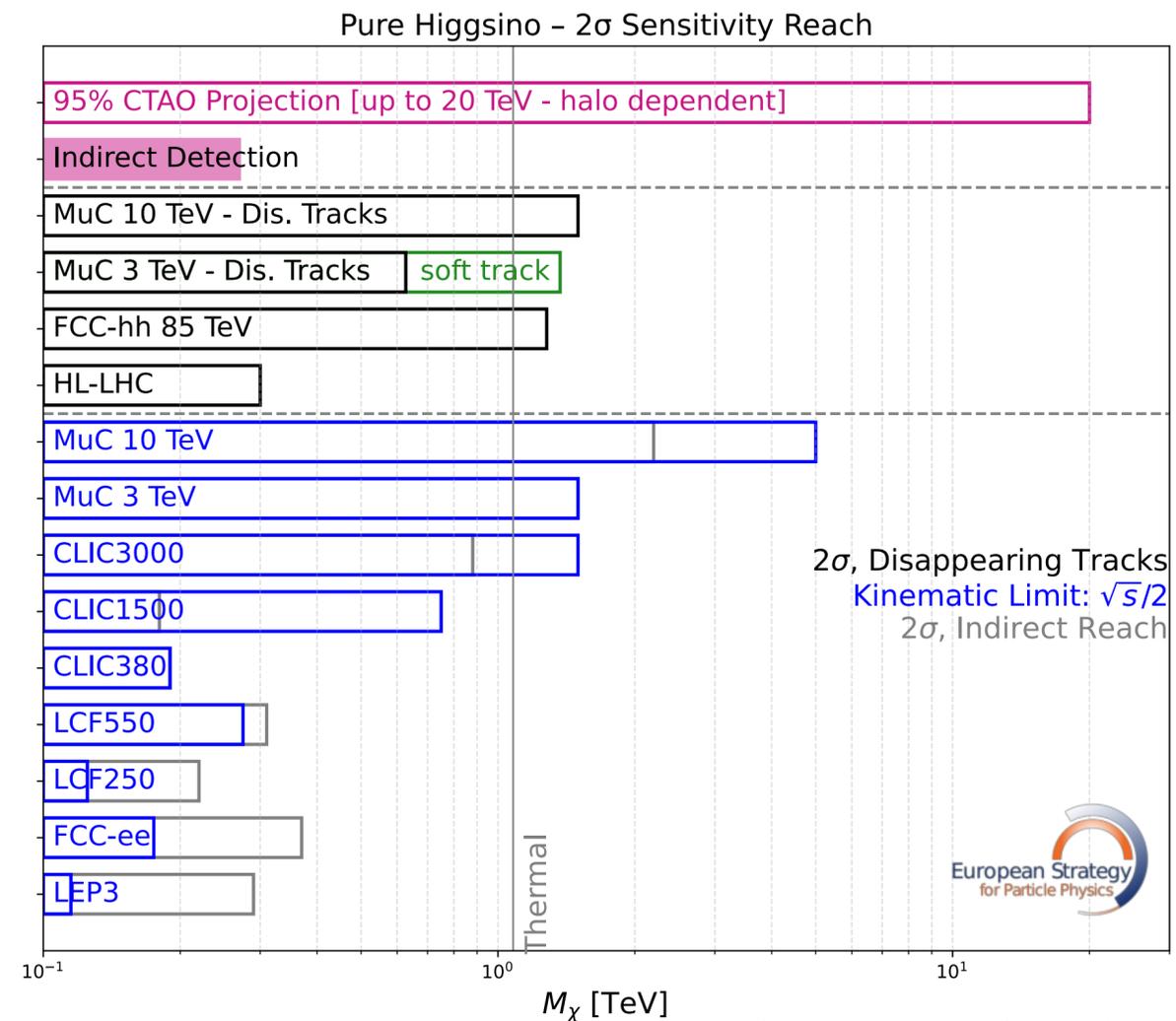
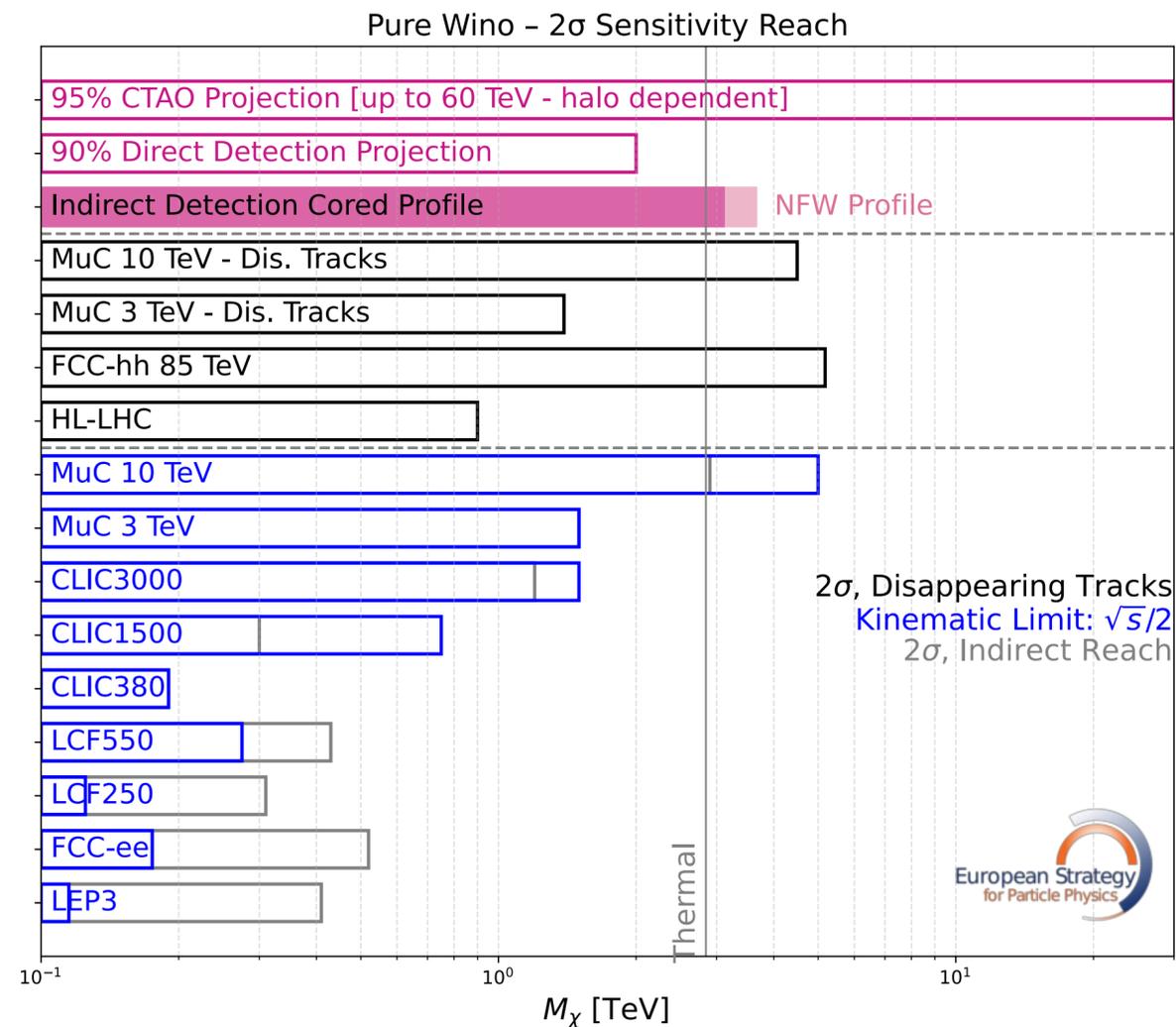
ヒッグシーノ



ウィーノ



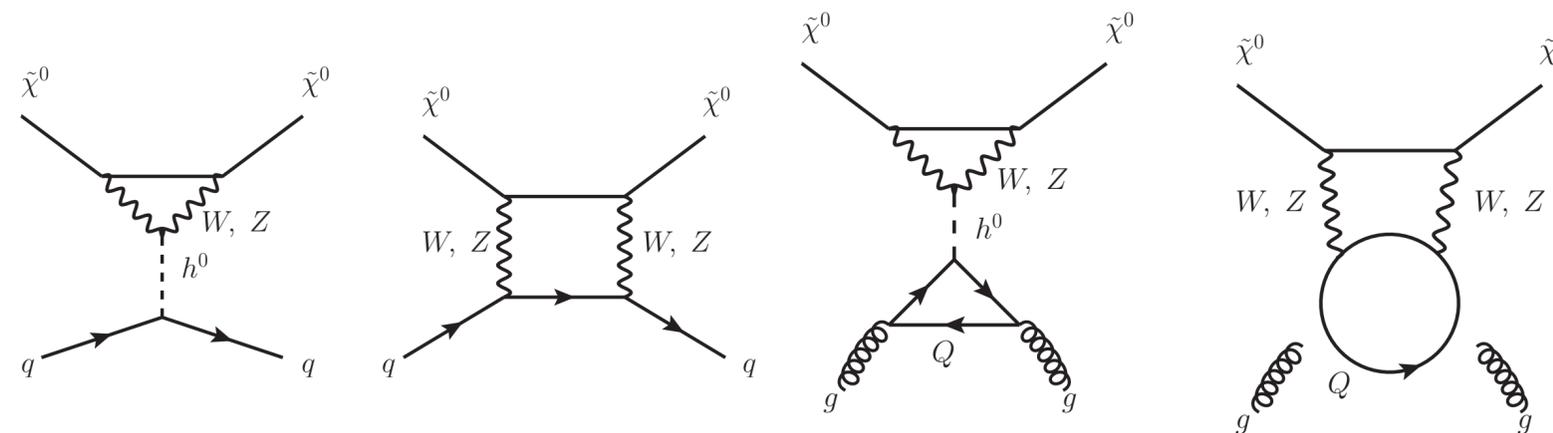
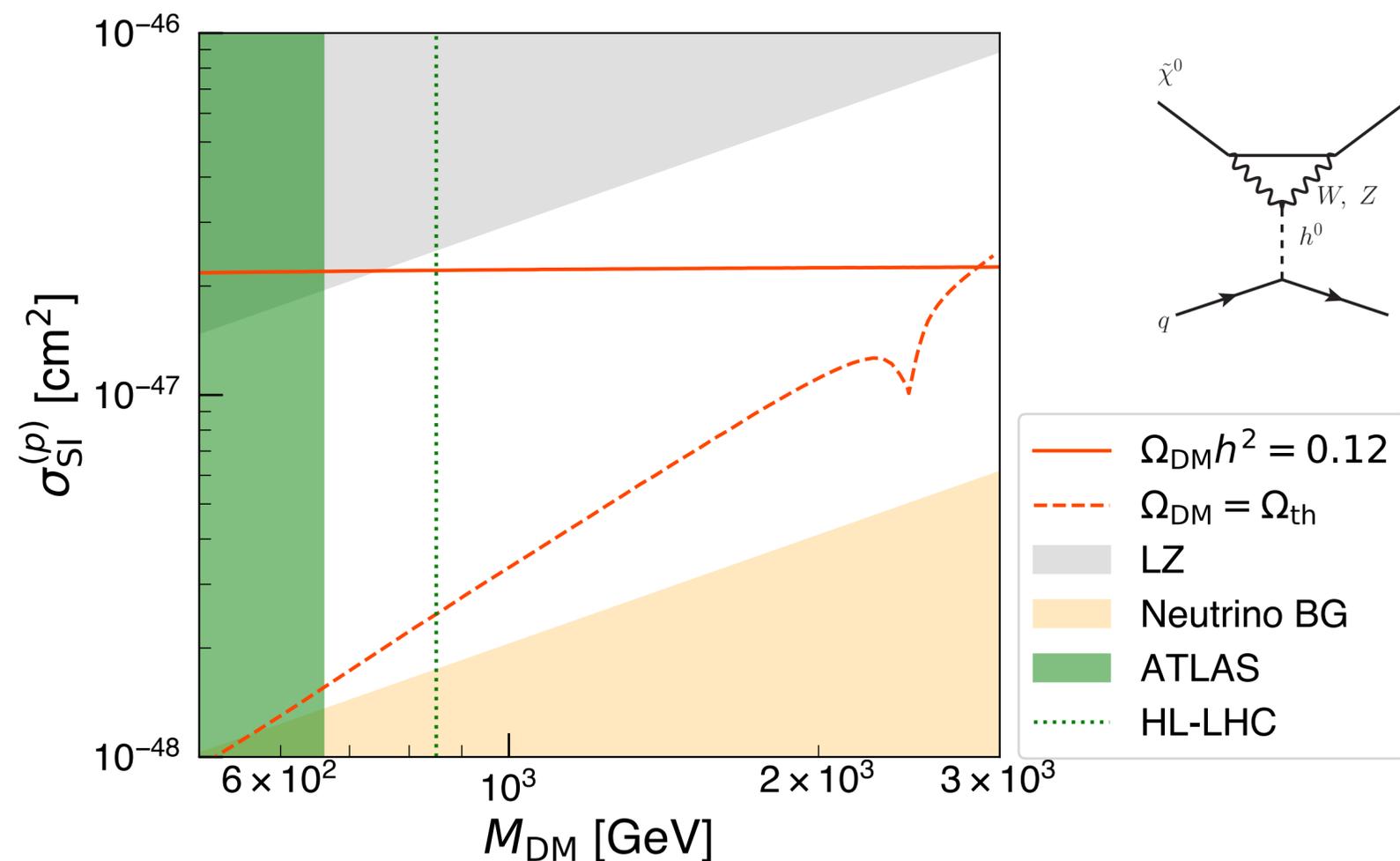
超対称フェルミオン探索



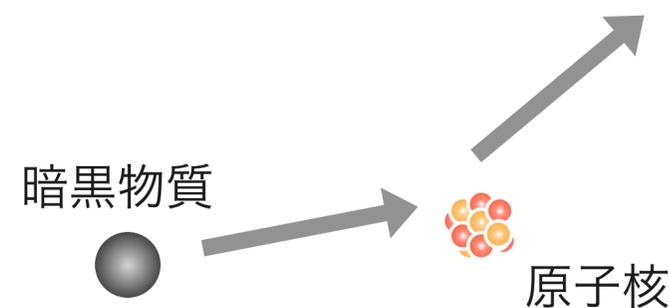
Physics Briefing Book, arXiv:2511.03883

TeV まで実験で探索するには, 100 TeV pp / O(1) TeV e/ μ 加速器が必要.

ウィーノ暗黒物質直接検出

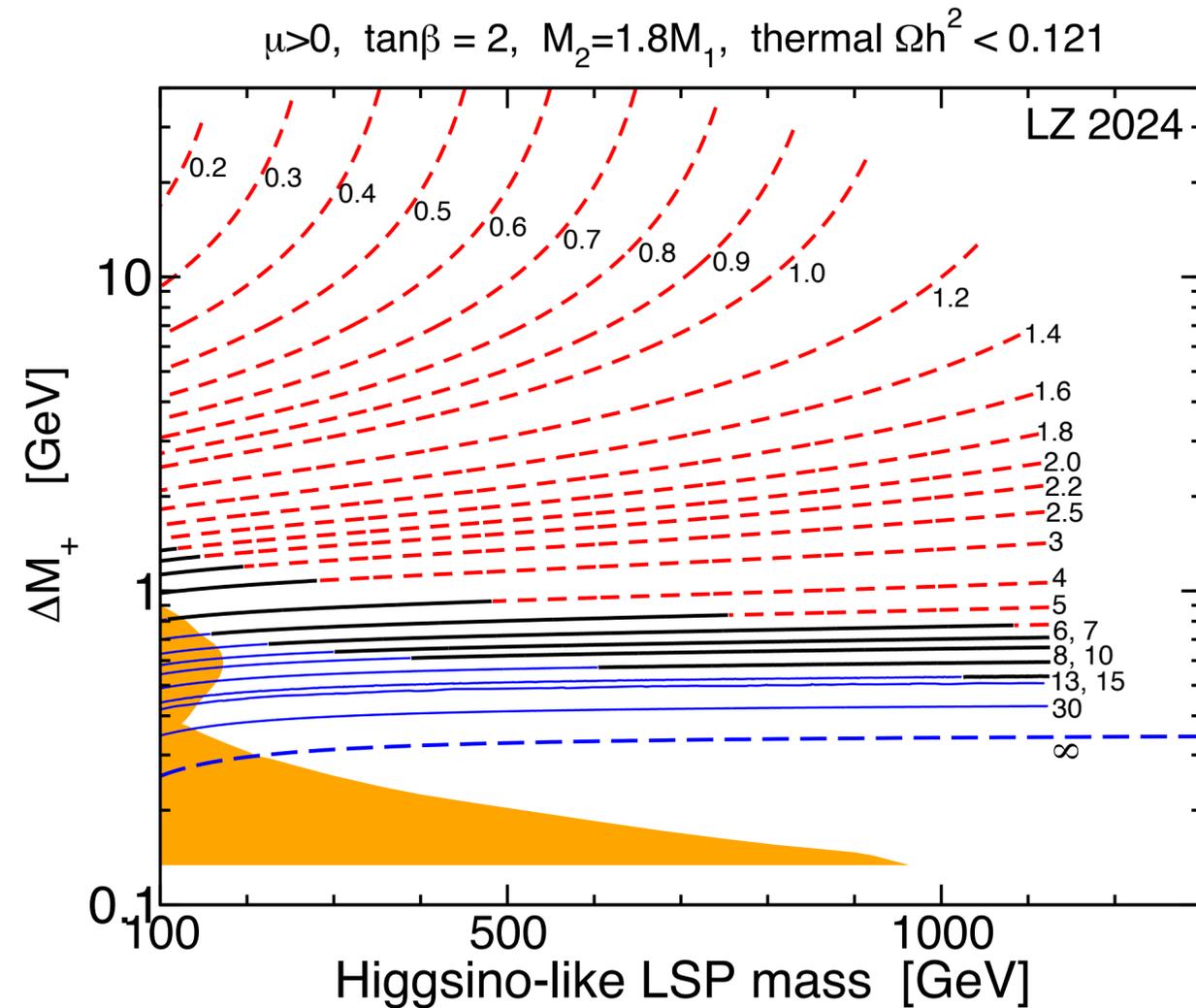


J. Hisano, K. Ishiwata, N. Nagata, JHEP **1506**, 097 (2015).



- 高次の量子補正で散乱が生じるため，散乱断面積は小さい。
- 次世代，次次世代くらいにはウィーノ暗黒物質を検証できるかも。

ヒッグシーノ暗黒物質直接検出



S. P. Martin, Phys. Rev. D **111**, 075004 (2025).

ゲージノとの混合が大きいほど

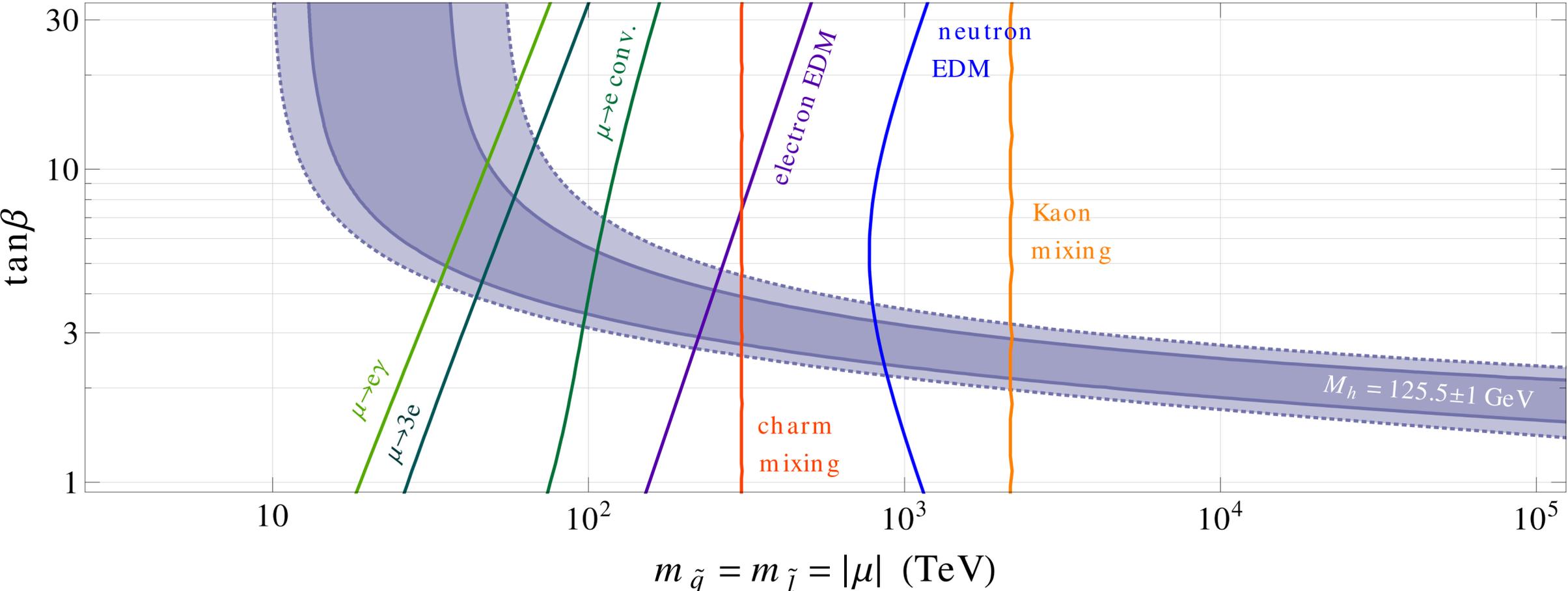
- 暗黒物質検出率
- 荷電・中性成分の質量差

が大きくなる。

直接検出実験はヒッグシーノ暗黒物質探索に重要な役割を果たすが、探れない部分もある。

フレーバー・CPの物理

$|m_{\tilde{B}}| = |m_{\tilde{W}}| = 3 \text{ TeV}, |m_{\tilde{g}}| = 10 \text{ TeV}$



フレーバー・CP対称性を破る物理過程は、非常に高い超対称スケールにまで感度を持つ。

W. Altmannshofer, R. Harnik, J. Zupan, JHEP **1311**, 202 (2013).

まとめ

まとめ

- 超対称性理論の動機・特徴
 - ▶ 階層性問題の解決
 - ▶ ゲージ結合定数の統一
 - ▶ 暗黒物質
- 超対称性理論が抱える困難・問題点
 - ▶ 超対称粒子の質量がだいぶ重そう
 - ▶ フレーバー・CP問題
 - ▶ 小さな階層性問題？

Backup

超対称性

超対称性という言葉が初めて使われたのは、ICHEP 1974のB. Zuminoのトークであったようだ。

FERMI-BOSE SUPERSYMMETRY
(SUPERGAUGE SYMMETRY IN FOUR DIMENSIONS)

B. Zumino

CERN -- Geneva

Review talk

given at the XVII International Conference on High-Energy Physics,
1-10 July 1974, Imperial College, London

A. Salam and J. Strathdee, Phys. Lett. B **51**, 353 (1974) でも使われている。

超対称代数 $(N = 1)$

超対称性に伴う保存量 Q は次の代数を満たす：

$$\{Q, \bar{Q}\} = 2\gamma^\mu P_\mu ,$$

$$[P^\mu, Q] = 0 ,$$

$$[J^{\mu\nu}, Q] = -\frac{1}{2}\Sigma^{\mu\nu}Q$$

Q : マヨラナ・フェルミオン

P^μ : 運動量演算子

$J^{\mu\nu}$: 角運動量演算子

$$\{A, B\} \equiv AB + BA \quad [A, B] \equiv AB - BA$$

$$\Sigma^{\mu\nu} \equiv \frac{i}{2} [\gamma^\mu, \gamma^\nu] = \begin{pmatrix} \sigma^{\mu\nu} & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}^{\mu\nu} \end{pmatrix}$$

超対称性を破る項

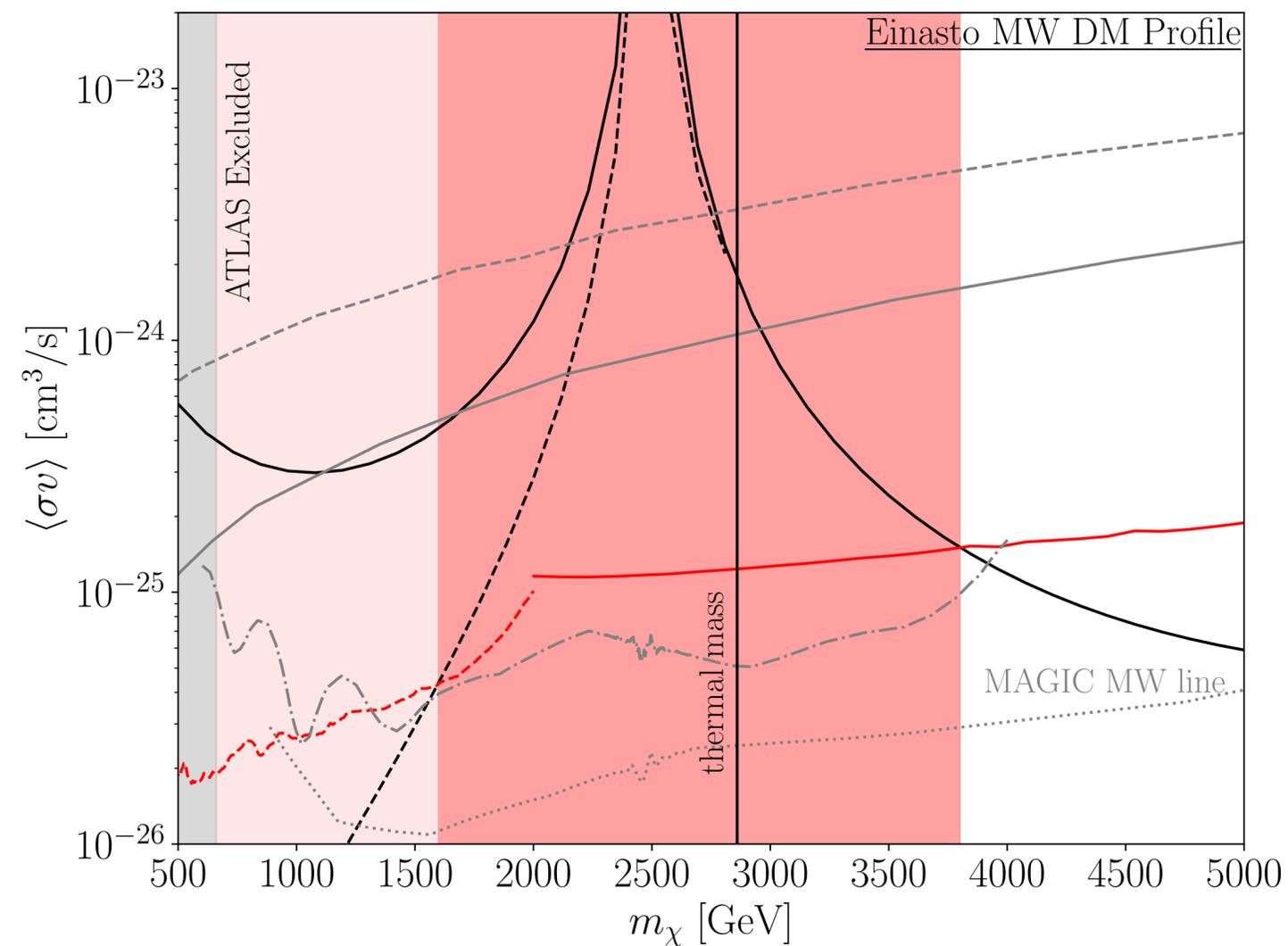
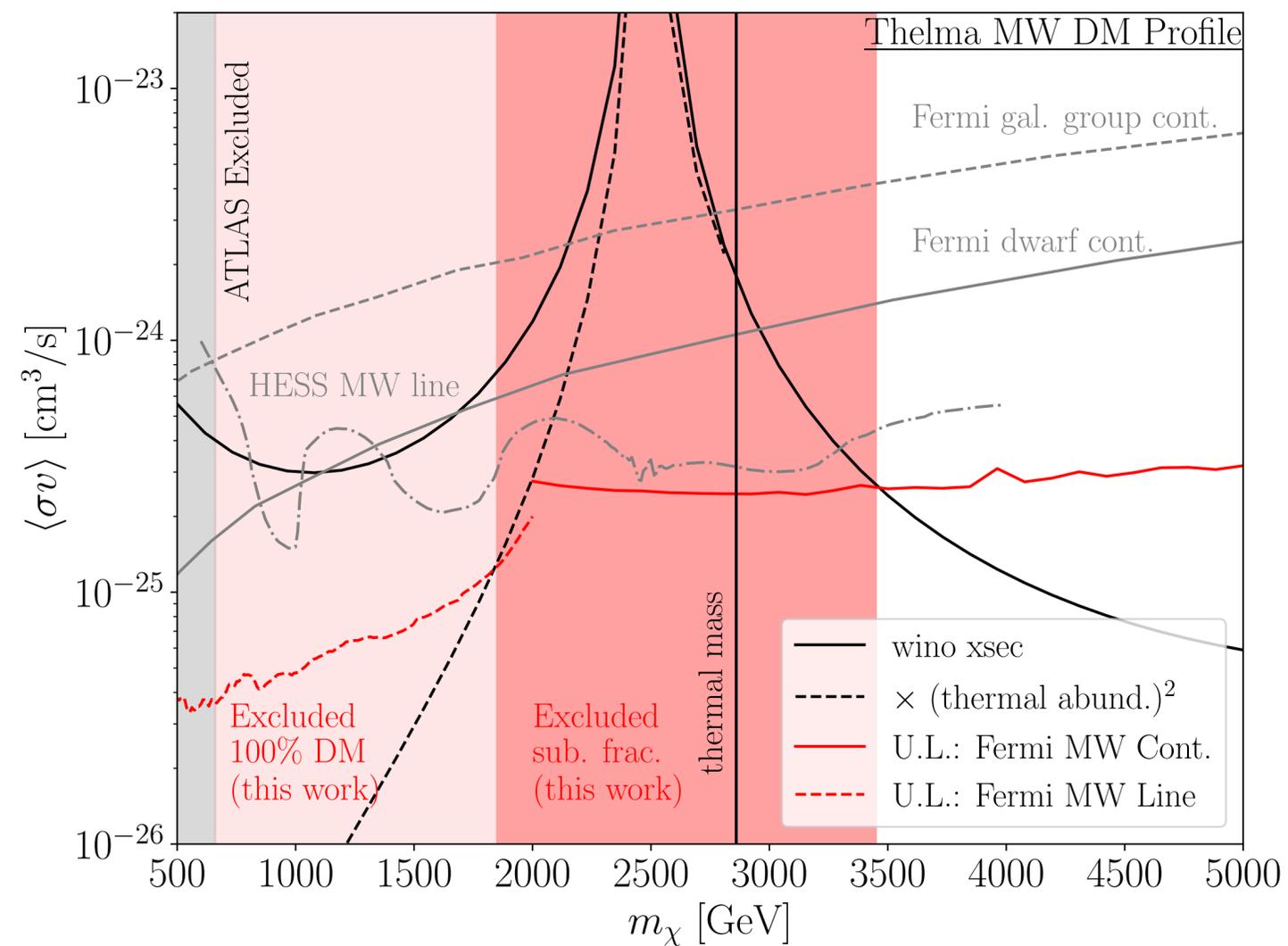
超対称性の破れの効果は、質量次元を持つパラメーターに現れる。

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{soft}} = & -\frac{1}{2}(M_1\tilde{B}\tilde{B} + M_2\tilde{W}^a\tilde{W}^a + M_3\tilde{g}^A\tilde{g}^A + \text{h.c.}) \\ & - (\hat{a}_u^{ij}(\tilde{Q}_{Li} \cdot H_u)\tilde{u}_{Rj}^* - \hat{a}_d^{ij}(\tilde{Q}_{Li} \cdot H_d)\tilde{d}_{Rj}^* - \hat{a}_e^{ij}(\tilde{L}_{Li} \cdot H_d)\tilde{e}_{Rj}^* + \text{h.c.}) \\ & - \tilde{Q}_{Li}^*(\hat{m}_{\tilde{Q}_L}^2)_{ij}\tilde{Q}_{Lj} - \tilde{L}_{Li}^*(\hat{m}_{\tilde{L}_L}^2)_{ij}\tilde{L}_{Lj} - \tilde{u}_{Ri}(\hat{m}_{\tilde{u}_R}^2)_{ij}\tilde{u}_{Rj}^* - \tilde{d}_{Ri}(\hat{m}_{\tilde{d}_R}^2)_{ij}\tilde{d}_{Rj}^* - \tilde{e}_{Ri}(\hat{m}_{\tilde{e}_R}^2)_{ij}\tilde{e}_{Rj}^* \\ & - m_{H_u}^2 H_u^{*\alpha} H_{u\alpha} - m_{H_d}^2 H_d^{*\alpha} H_{d\alpha} - (B\mu(H_u \cdot H_d) + \text{h.c.}) .\end{aligned}$$

超対称性をソフトに破る項と呼ばれる。

ヒッグス質量項に対する二次発散の打ち消しを損なわない破り方。

ウィーノ暗黒物質間接探索



B. R. Safdi and W. L. Xu, arXiv:2507.15934