

WIMP 暗黒物質の現状

永田 夏海 (東京大学)

新テラスケール研究会

2018年7月27日

名古屋大学

WIMP

Weakly-Interacting Massive Particles (WIMPs)

- ▶ 電氣的に中性かつカラー荷を持たない
- ▶ 安定
- ▶ 電弱スケール程度の質量
- ▶ 電弱相互作用程度の強さの相互作用を持つ



暗黒物質密度の観測値を熱残存量で自然に説明できる。

TeV-scale physics and WIMP

WIMP暗黒物質はテラスケールの新物理を予言した。

暗黒物質残存量

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma_{\text{ann}} v_{\text{rel}} \rangle}$$

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.12$$



$$\langle \sigma_{\text{ann}} v_{\text{rel}} \rangle \simeq 10^{-9} \text{GeV}^{-2}$$

例)

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v_{\text{rel}} \rangle \simeq \frac{\alpha^2}{m_{\text{DM}}^2} \quad \begin{array}{l} \alpha \simeq 0.01 \\ m_{\text{DM}} \simeq 300 \text{ GeV} \end{array}$$

階層性問題等に動機づけられたモデルにしばしば自然に登場する。

これらのモデル共々LHCにて検証されることが期待されていた。

Goal of the talk

- これまで考えられてきたテラスケールの物理模型に現れる暗黒物質候補は大分制限されてきている。

まだまだ有力候補は残っているが。

- 一方、熱残存シナリオに動機づけられた**WIMP**暗黒物質は未だに多くが未検証のまま。

今後重要なターゲットとなる。

Outline

- 超対称標準模型における暗黒物質候補の現状
- **WIMP暗黒物質の現状**
- その他, まとめ

超対称標準模型と暗黒物質

Supersymmetry (SUSY)

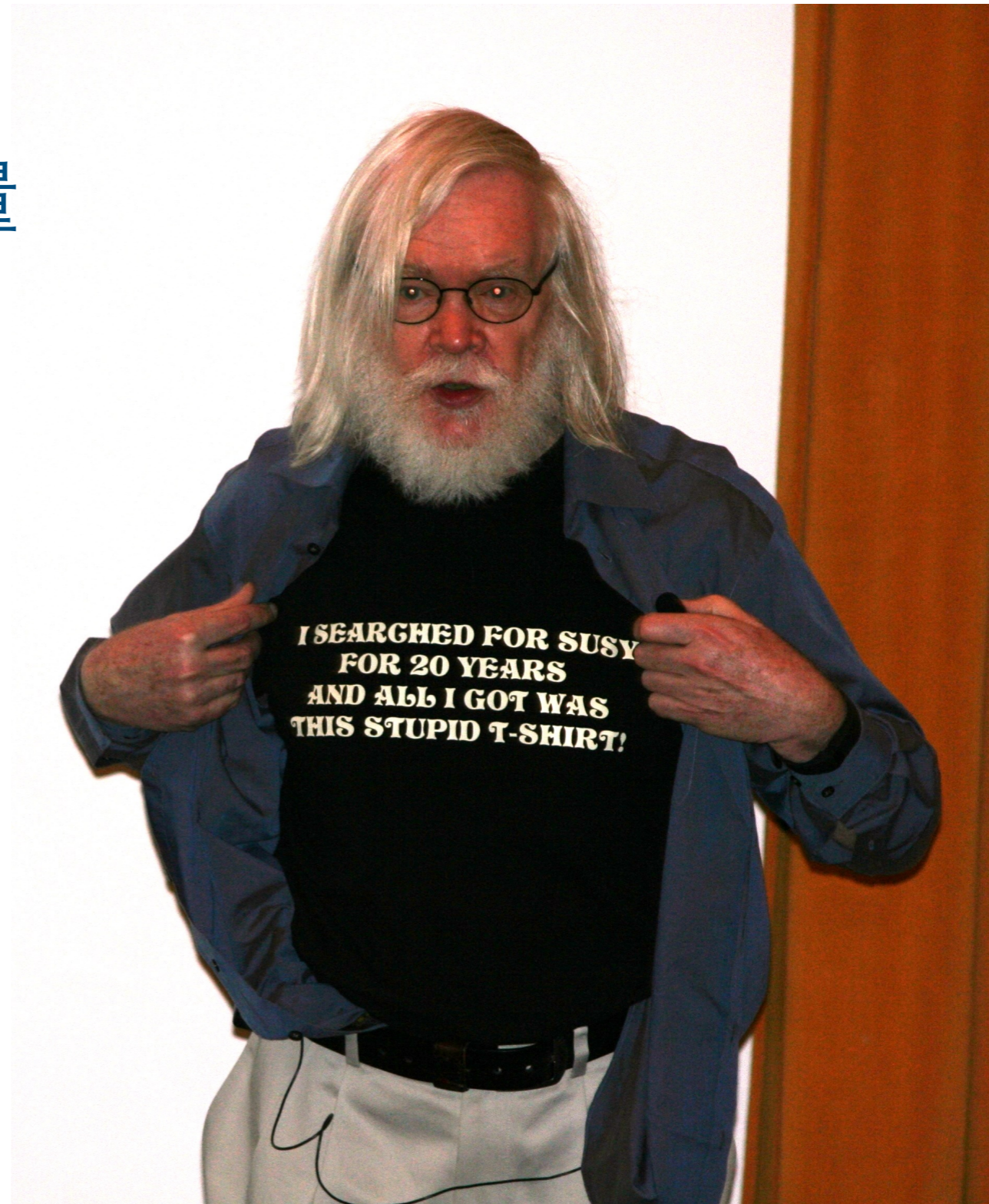
現時点までのLHCの結果

- 超対称粒子への制限
- 125 GeV ヒッグス質量

を考慮して

- 低スケールだが複雑
- 簡潔だが高スケール
- 『自然さ』の見直し

といった方針が探られている。



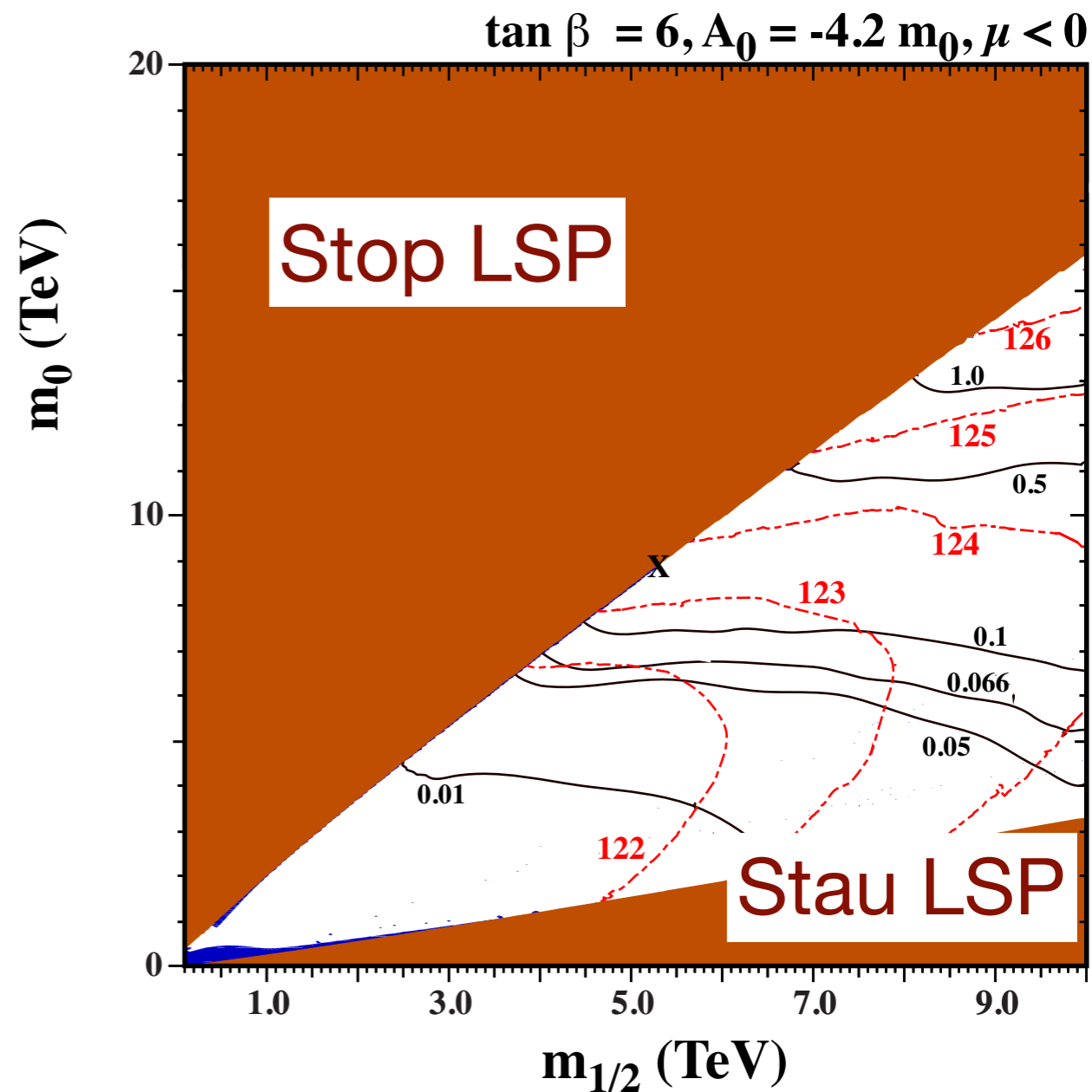
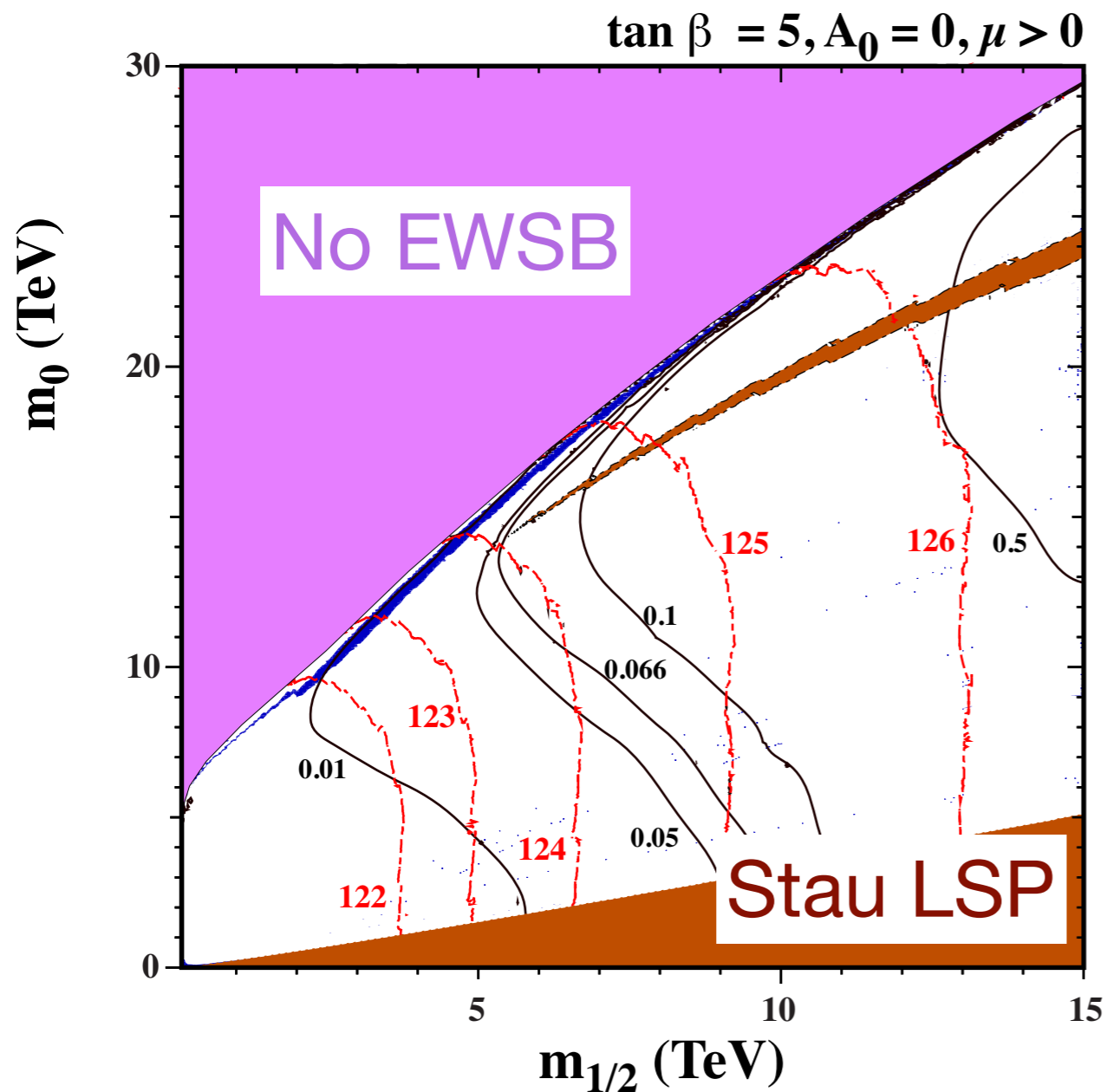
Constrained MSSM (CMSSM)

大統一スケールにおいてパラメーターに一致条件を課した、
伝統的なベンチマーク模型。

$$m_0, m_{1/2}, A_0, \tan \beta, \text{sign}(\mu)$$

低エネルギー領域のパラメーターはくりこみ群方程式を
通して得られる。

DM in CMSSM

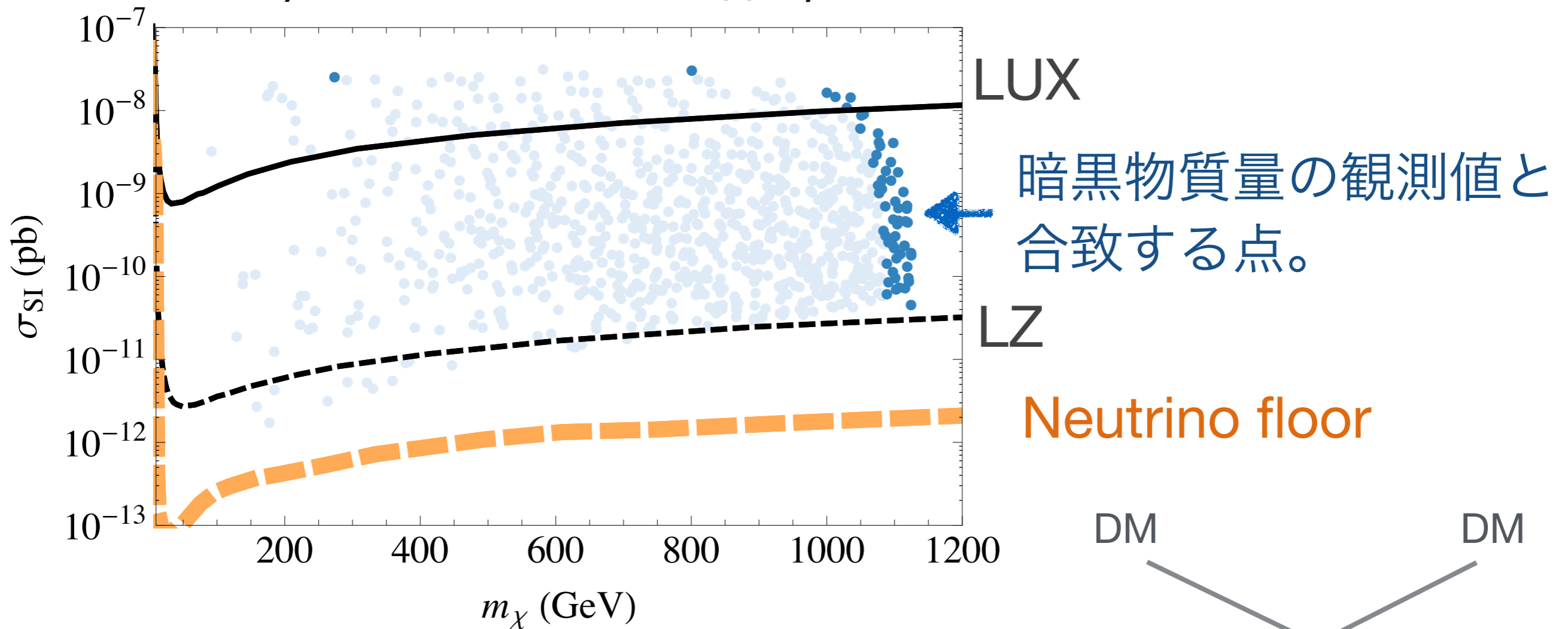


— $\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.12$
- - - - - Higgs mass [GeV]
— Proton lifetime [10^{35} yrs]

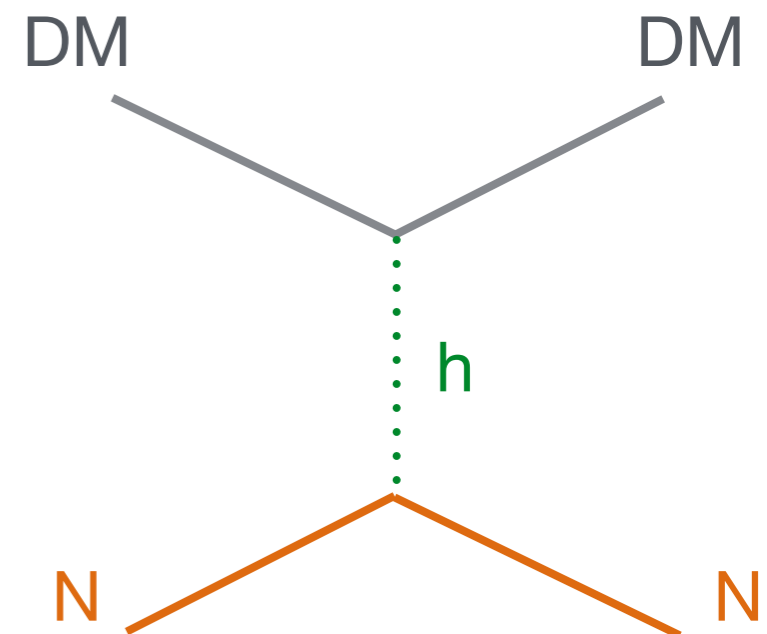
- ヒッグシーノLSP (1 TeV)
- ビーノLSPでcoannihilation (stop, stau)

Higgsino-like LSP in CMSSM

$\tan\beta=5, A_0/m_0=0, M_{\text{in}}=M_{\text{GUT}}, \mu>0$



将来の暗黒物質直接探索実験
において検証可能。



High-scale SUSY

L. J. Hall, Y. Nomura, S. Shirai (2012)

M. Ibe, S. Matsumoto, T. T. Yanagida (2012)

A. Arvanitaki, N. Craig, S. Dimopoulos, G. Villadoro (2012)

N. Arkani-Hamed, A. Gupta, D. E. Kaplan, N. Weiner, and T. Zorawski (2012)

超対称性を破る場がシングレットであると仮定。

Gravitino



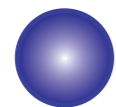
Scalar Particles



Higgsinos



Gauginos



Gluino



Bino



Wino

余分に対称性があるとこれも軽くなりうる。

ゲージノ質量は量子補正で生じる。

例) アノマリー媒介機構

L. Randall and R. Sundrum (1998)

G. F. Giudice, M. A. Luty, H. Murayama, and R. Rattazzi (1998)

High-scale SUSY

L. J. Hall, Y. Nomura, S. Shirai (2012)

M. Ibe, S. Matsumoto, T. T. Yanagida (2012)

A. Arvanitaki, N. Craig, S. Dimopoulos, G. Villadoro (2012)

N. Arkani-Hamed, A. Gupta, D. E. Kaplan, N. Weiner, and T. Zorawski (2012)

超対称性を破る場がシングレットであると仮定。

Gravitino



Scalar Particles



Higgsinos



$O(10^{(2-5)})$ TeV



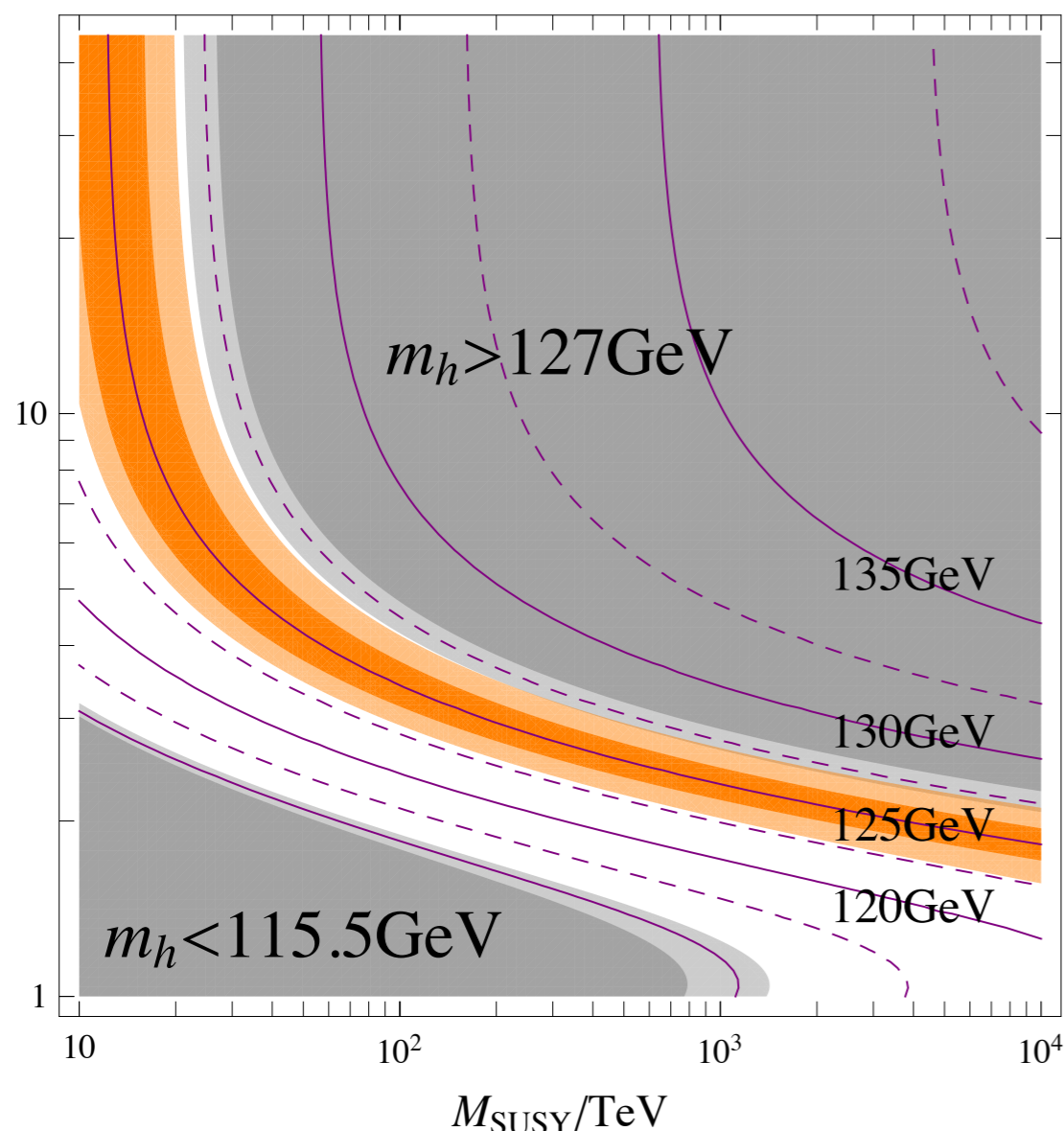
$m_h = 125$ GeV

$O(1)$ TeV

Wino



ヒッグス質量を説明するには、
比較的高いスケールが望ましい。



M. Ibe, S. Matsumoto, T. T. Yanagida (2012).

High-scale SUSY

L. J. Hall, Y. Nomura, S. Shirai (2012)

M. Ibe, S. Matsumoto, T. T. Yanagida (2012)

A. Arvanitaki, N. Craig, S. Dimopoulos, G. Villadoro (2012)

N. Arkani-Hamed, A. Gupta, D. E. Kaplan, N. Weiner, and T. Zorawski (2012)

超対称性を破る場がシングレットであると仮定。

Gravitino



Scalar Particles



Higgsinos



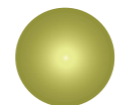
$O(10^{(2-5)})$ TeV



Gauginos



Gluino



Bino



Wino

$O(1)$ TeV

ウィーノ暗黒物質

$$m_h = 125 \text{ GeV}$$

現象論的にとても都合の良いスペクトルが実現される。

敷居補正の大きさ等によって異なる暗黒物質が実現。

DM candidates in High-scale SUSY

- ▶ ウィーノ [3 TeV]
- ▶ ヒッグシーノ [1 TeV]
- ▶ Coannihilation [bino-gluino, bino-wino, etc]
 - LSPと縮退している。
 - NLSPが長寿命になる傾向。

陳さんのトーク

Bino-gluino

- 質量差 $O(100)$ GeV
- 崩壊長: $O(1)$ cm

Bino-wino

- 質量差 $O(10)$ GeV
- 崩壊長: 1 cm – 1m

Displaced vertex, dE/dx などを用いた長寿命粒子探索が有用。

Electroweak naturalness

低エネルギーでの超対称パラメーターの値だけに着目して

『自然さ』の指標を定義する:

『自然』であるための必要条件。

$$\frac{m_Z^2}{2} \simeq -\mu^2 - m_{H_u}^2 + (\text{Loop correction})$$

くりこみ群の効果はとりあえず考えない。

右辺の各項の絶対値のうち最大のものを左辺で割って得られる量, Δ_{EW} を指標とする。

H. Baer, V. Barger, P. Huang, A. Mustafayev, and X. Tata (2012).

- Δ_{EW} が小さいほど『自然』。
- μ は小さくなくてはならない。

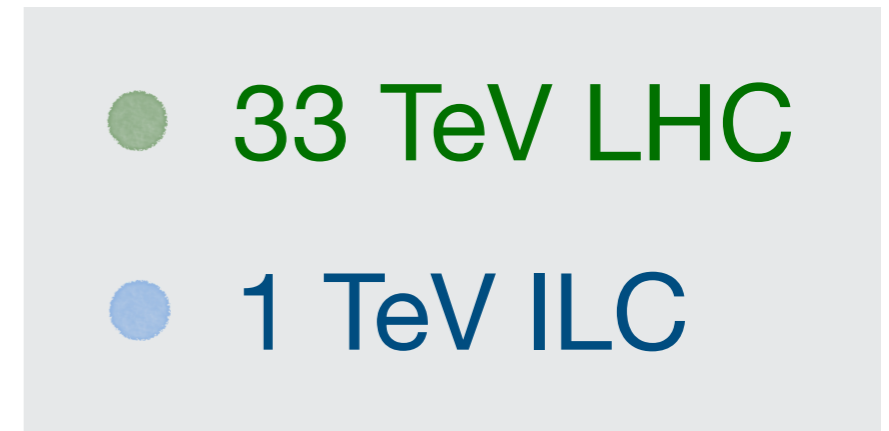
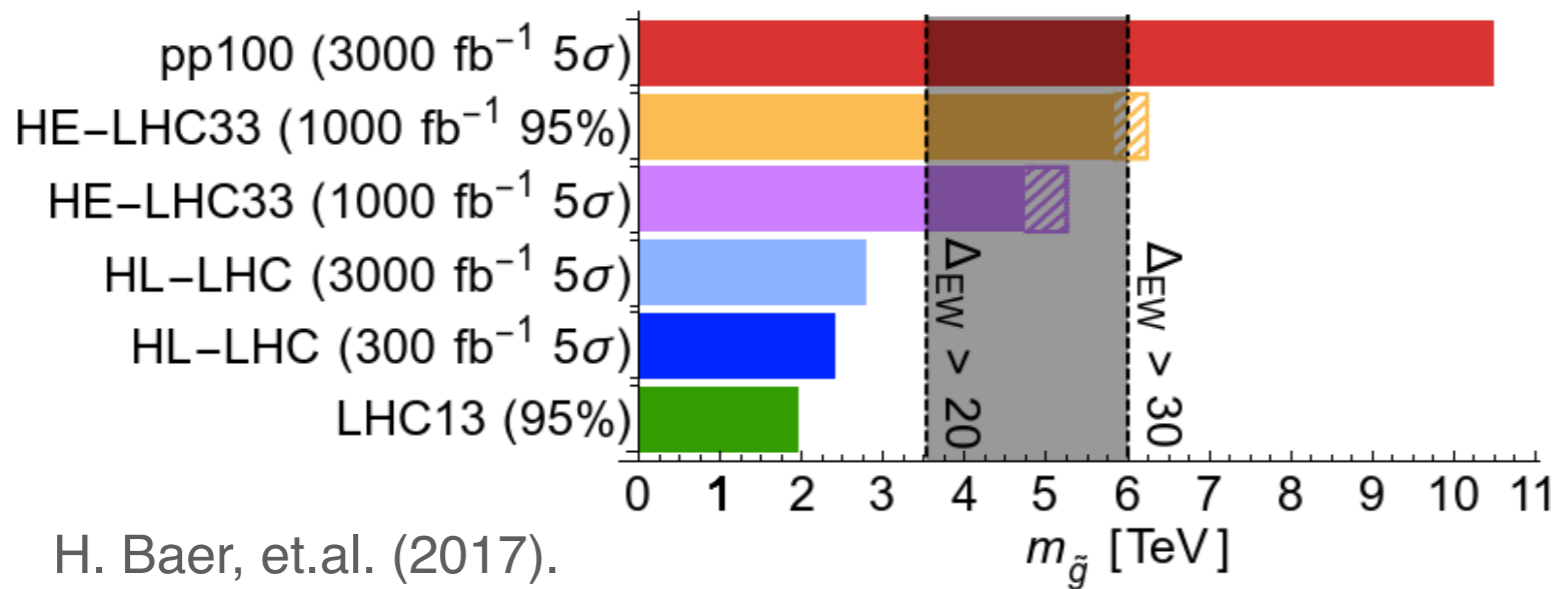
軽いHiggsino LSP

全暗黒物質量を説明できるわけではない。

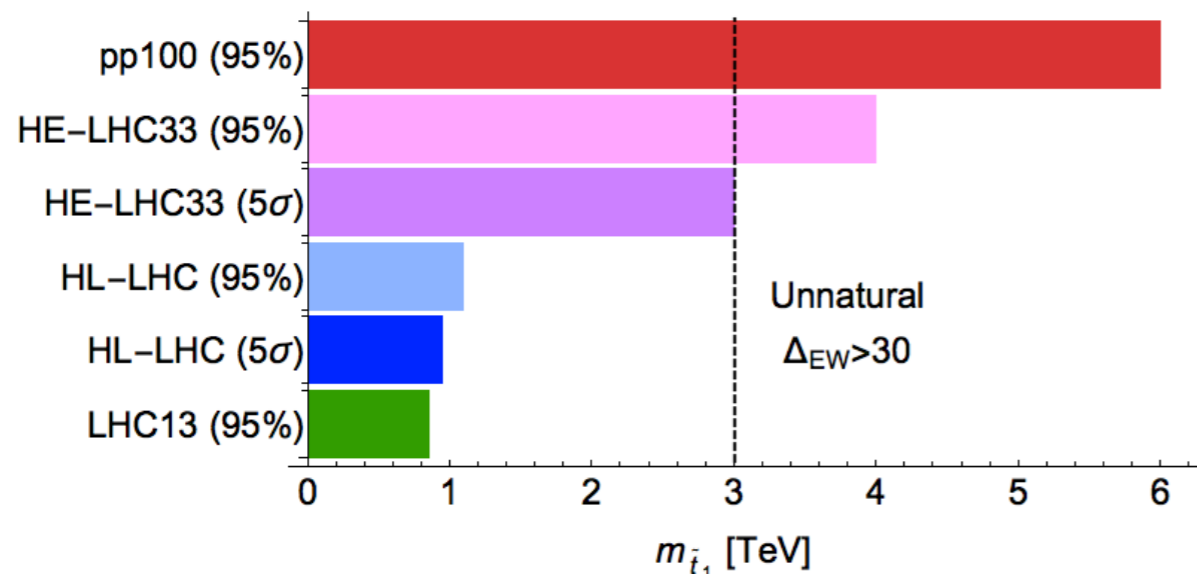
Test of natural SUSY

『自然さ』の指標 Δ_{EW} が小さいパラメーター領域は、様々な方法で検証可能。

Glucino search

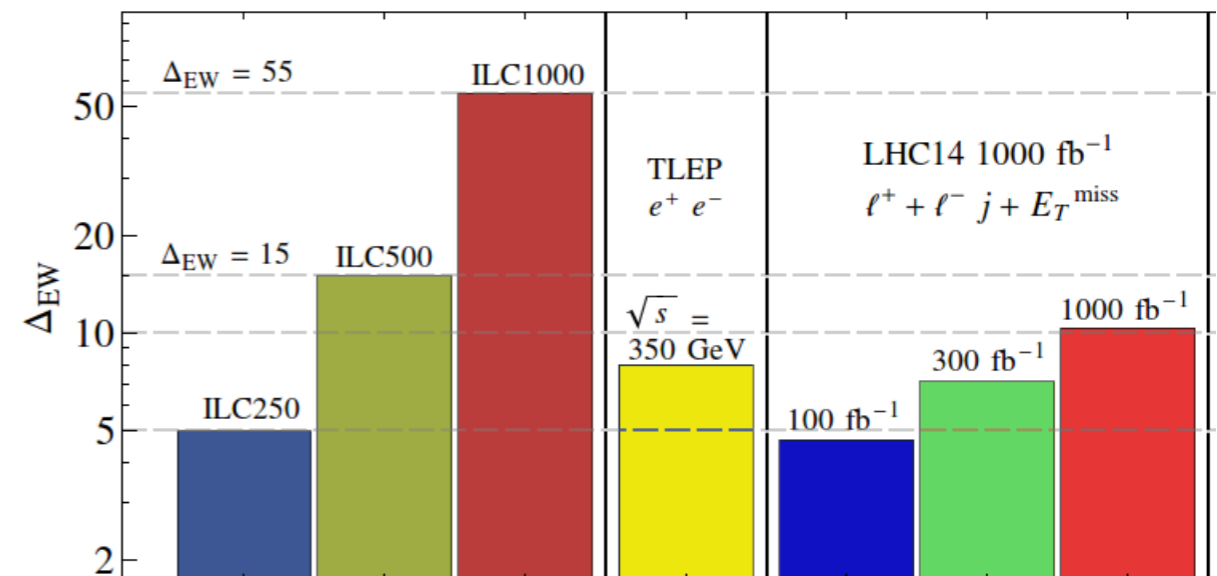


Stop search



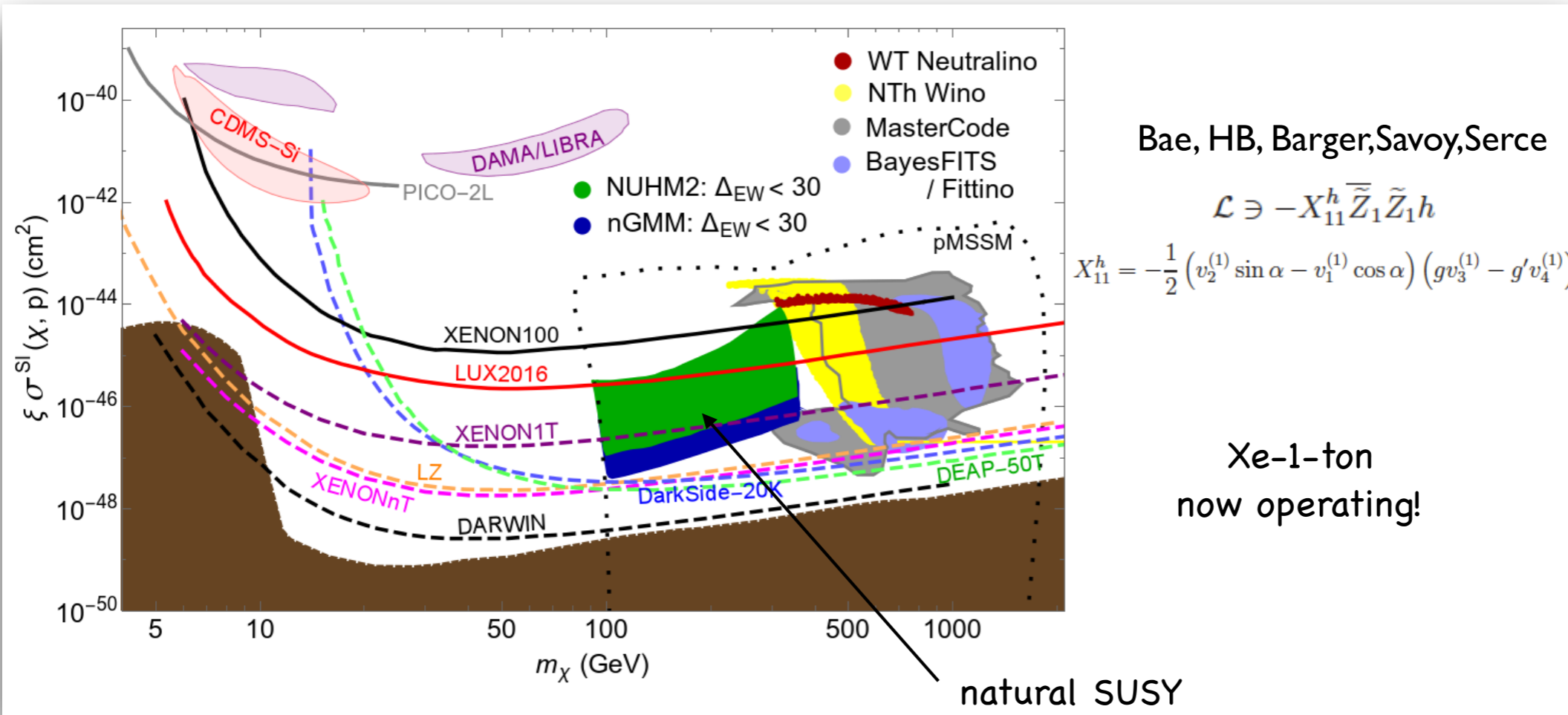
H. Baer, V. Barger, N. Nagata, M. Savoy (2016).

Higgsino search



K. J. Bae, H. Baer, N. Nagata, H. Serce (2015).

Test of natural SUSY



Bae, HB, Barger, Savoy, Serce

$$\mathcal{L} \ni -X_{11}^h \bar{\tilde{Z}}_1 \tilde{Z}_1 h$$

$$X_{11}^h = -\frac{1}{2} (v_2^{(1)} \sin \alpha - v_1^{(1)} \cos \alpha) (g v_3^{(1)} - g' v_4^{(1)})$$

Xe-1-ton
now operating!



- naturalness -> upper bounds on sparticle masses
- when to give up on SUSY?
- no WIMPs at Xe-n-ton/LZ
- no higgsinos at ILC
- no gluinos/top-squarks at LHC33

Summary of DM in SUSY models

- CMSSM etc.

- ▶ Higgsino-like DM [~ 1 TeV]

暗黒物質直接探索

- ▶ Bino-stop/stau coannihilation

??

- High-scale SUSY

- ▶ Wino [3 TeV]

以下で議論

- ▶ Higgsino [1 TeV]

- ▶ Bino-gluino/wino coannihilation

長寿命粒子探索

- “Natural” SUSY

- ▶ Light higgsino

暗黒物質直接探索

33 TeV LHC

1 TeV ILC

WINP暗黒物質の現状

Quantum numbers of DM

暗黒物質はカラー量子数を持たず電氣的に中性。しかし、この条件だけだとまだ多くの可能性が残されている。

- 粒子の種類は？

- 実/複素スカラー
- マヨラナ/ディラック・フェルミオン
- ベクトル場 etc.

- $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 電荷？

$(1, 0), (2, \pm 1/2), (3, 0), (3, \pm 1), (4, \pm 1/2), \dots$

Quantum numbers of DM

暗黒物質はカラー量子数を持たず電氣的に中性。しかし、この条件だけだとまだ多くの可能性が残されている。

● 粒子の種類は？

- 実/複素スカラー
- マヨラナ/ディラック・フェルミオン
- ベクトル場 etc.

● $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 電荷？

$(1, 0), (2, \pm 1/2), (3, 0), (3, \pm 1), (4, \pm 1/2), \dots$

シングレット・スカラー暗黒物質

Singlet scalar DM

V. Silveira and A. Zee (1985);

J. McDonald (1994);

C. P. Burgess, M. Pospelov, and T. ter Veldhuis (2001).

標準模型に中性スカラー場を足しただけの超簡単な模型。

ラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -\frac{1}{2}m^2 S^2 - \frac{1}{2}\lambda_{SH} S^2 |H|^2 - \frac{1}{4!}\lambda_S S^4$$

▶ 安定性

ラグランジアンは Z_2 対称性を持つ: $S \rightarrow -S$ (奇); SM (偶) .

▶ 残存量

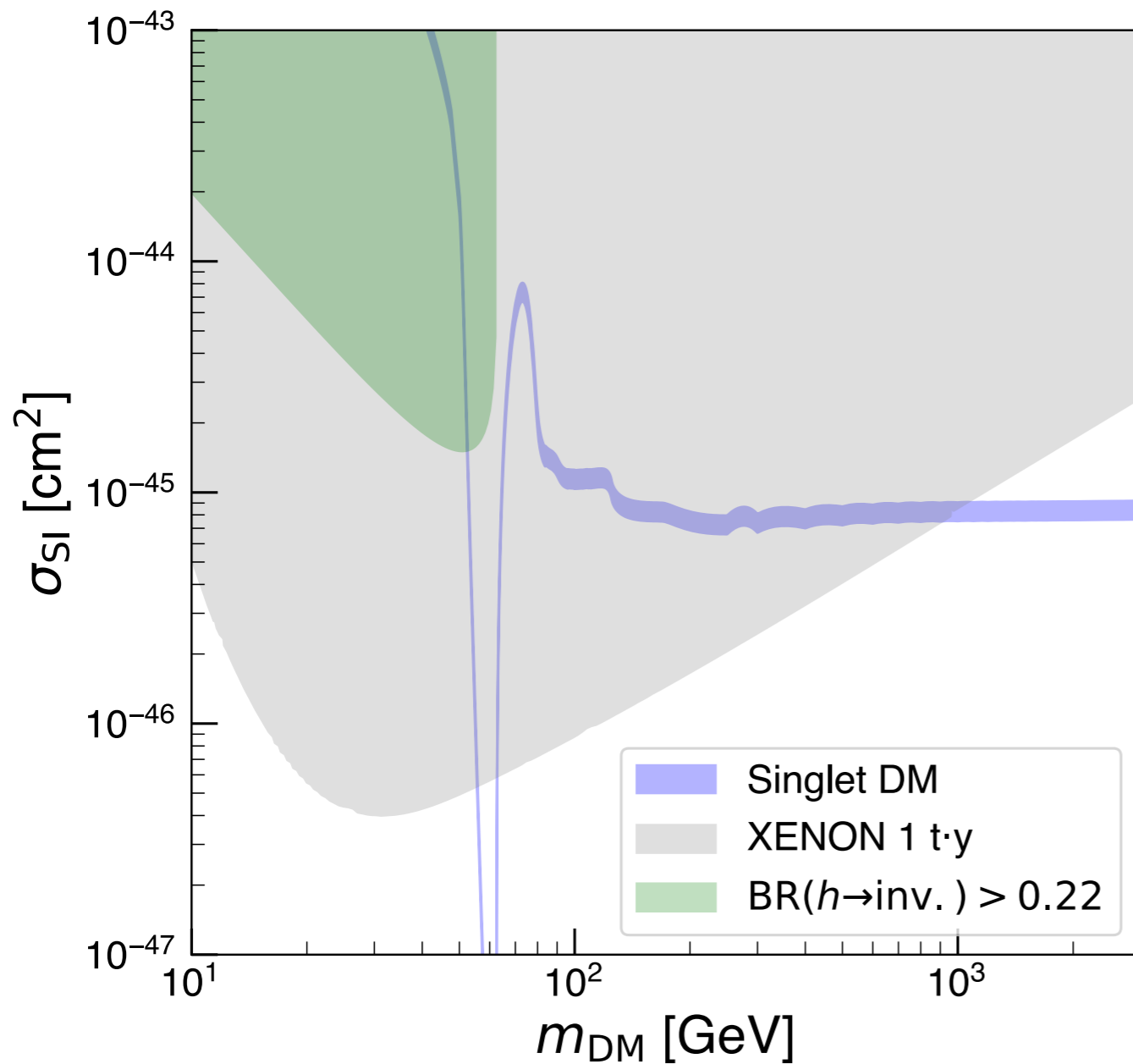
$$\sigma_{\text{ann}} v_{\text{rel}} \simeq \frac{\lambda_{sH}^2}{16\pi m_{\text{DM}}^2}$$

($m_{\text{DM}} > \text{weak scale}$)

$$m_{\text{DM}} \simeq 3.3\lambda_{SH} \text{ TeV}$$

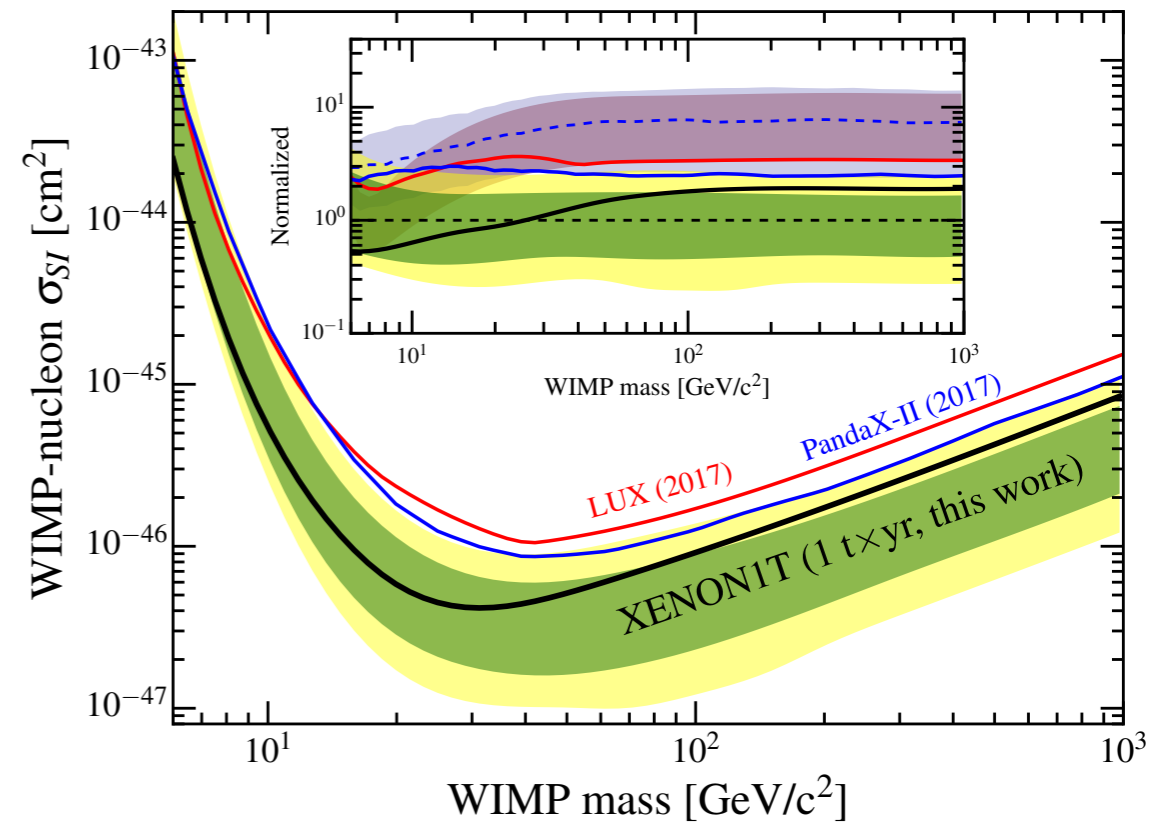
のとき暗黒物質量の観測値を説明できる。

Singlet scalar DM

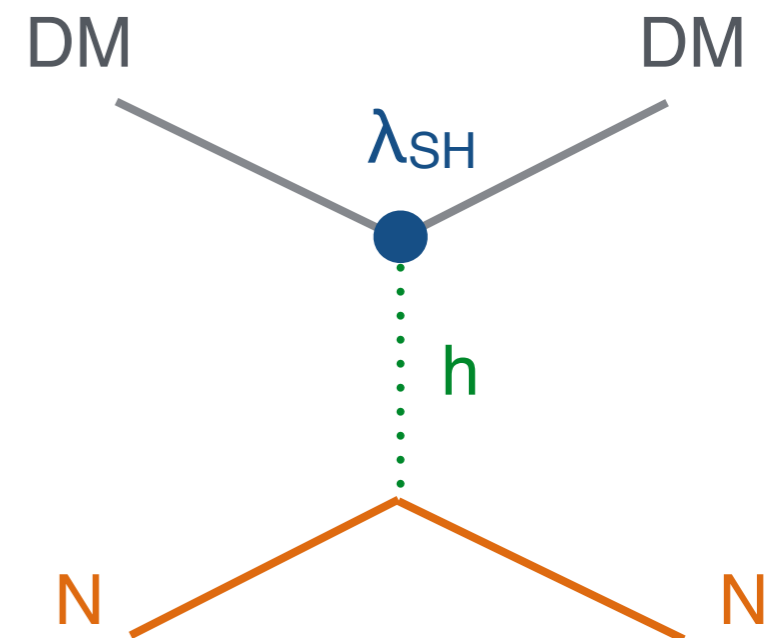


1 TeVくらいまで制限されている。

風間さんのトーク



XENON Collaboration, arXiv:1805.12562.



Quantum numbers of DM

暗黒物質はカラー量子数を持たず電氣的に中性。しかし、この条件だけだとまだ多くの可能性が残されている。

● 粒子の種類は？

- 実/複素スカラー
- マヨラナ/ディラック・フェルミオン
- ベクトル場 etc.

● $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 電荷？

$(1, 0), (2, \pm 1/2), (3, 0), (3, \pm 1), (4, \pm 1/2), \dots$

シングレット・フェルミオン暗黒物質

Singlet fermion DM

安定なシングレット・フェルミオン暗黒物質は標準模型粒子とくりこみ可能な相互作用を持ってない。



熱残存量シナリオ

▶ シングレット・スカラーを加える

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -f\psi\psi S + \text{h.c.} + \mathcal{L}(S, H)$$

▶ ダブルレット・フェルミオンを加える

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -f\psi\psi_D H + \text{h.c.}$$

▶ クォーク・レプトンのスカラー・パートナーを加える

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -f\psi Q \tilde{Q} + \text{h.c.}$$

▶ ゲージ相互作用を加える

模型ごとの解析が必要となる。

Singlet Dirac fermion DM

DM がディラック・フェルミオンの場合，マヨラナの場合と全く異なる現象が生じうる。

ディラック・フェルミオン暗黒物質が実現されるシナリオ例

- ▶ 暗黒物質が隠れたゲージ対称性の電荷を持つ場合。
- ▶ Asymmetric Dark Matter
- ▶ Baryonic Dark Matter

e.g.) R. Huo, S. Matsumoto, Y. L. S. Tsai, T. T. Yanagida, JHEP. **1609**, 162 (2016).

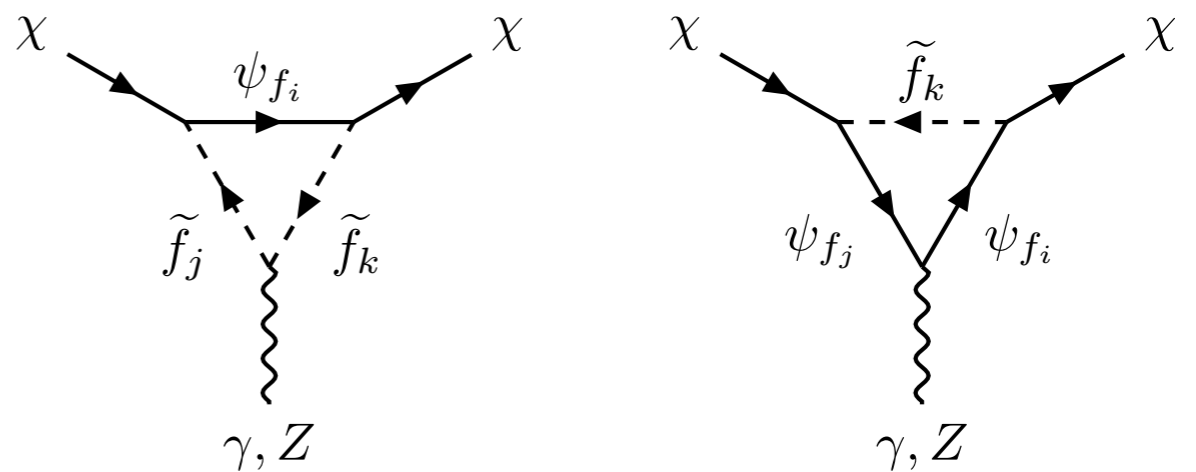
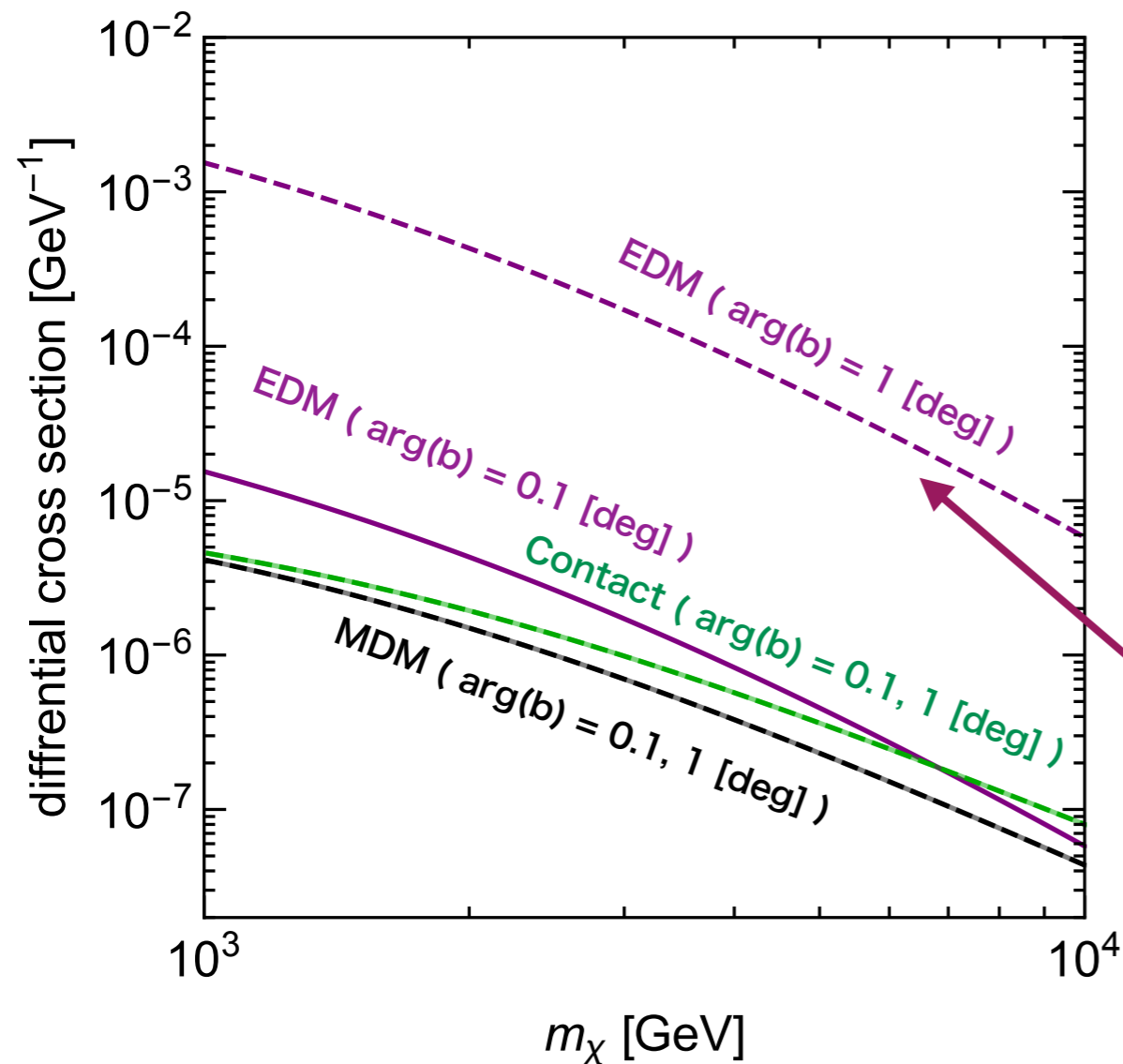
現象論的特徴

- ▶ カイラリティの抑制を受けることなくS波の消滅過程が生じうる。
[大きな消滅断面積・重い暗黒物質質量]
- ▶ 暗黒物質の電気・磁気双極子モーメント，荷電半径, etc.

Singlet Dirac fermion DM

Singlet Dirac DM が新たな重いクォーク・スカラークォークを通じて標準模型セクターと相互作用するモデルを考察してみた。

J. Hisano, R. Nagai, N. Nagata, to appear.



CP 位相がある場合DMのEDMが生じ、断面積が増大する。

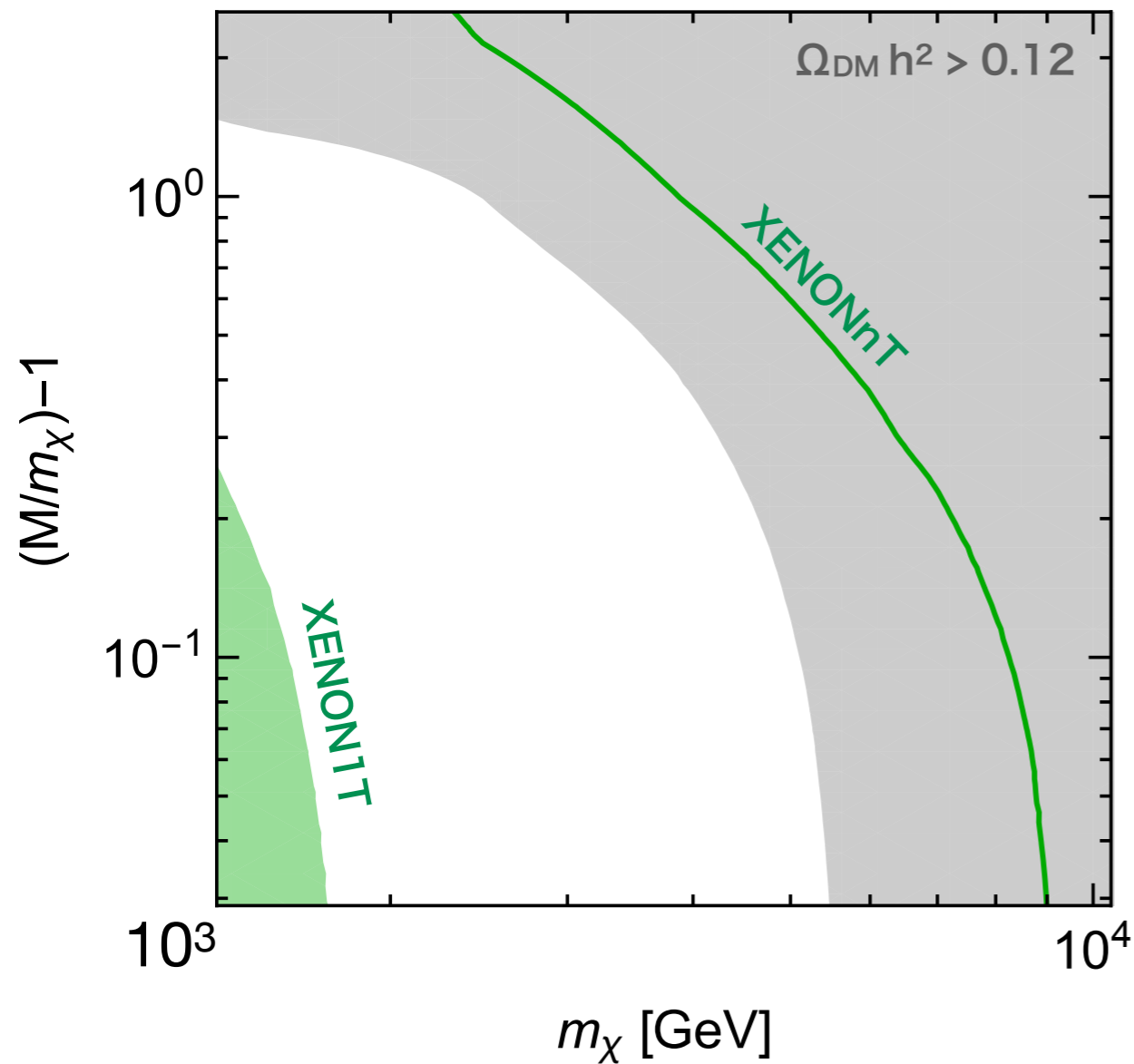
$$\left. \frac{d\sigma}{dE_R} \right|_{\text{MDM}} = \mathcal{O}(v_{\text{rel}}^{-2})$$

$$\left. \frac{d\sigma}{dE_R} \right|_{\text{EDM}} = \mathcal{O}(v_{\text{rel}}^{-4})$$

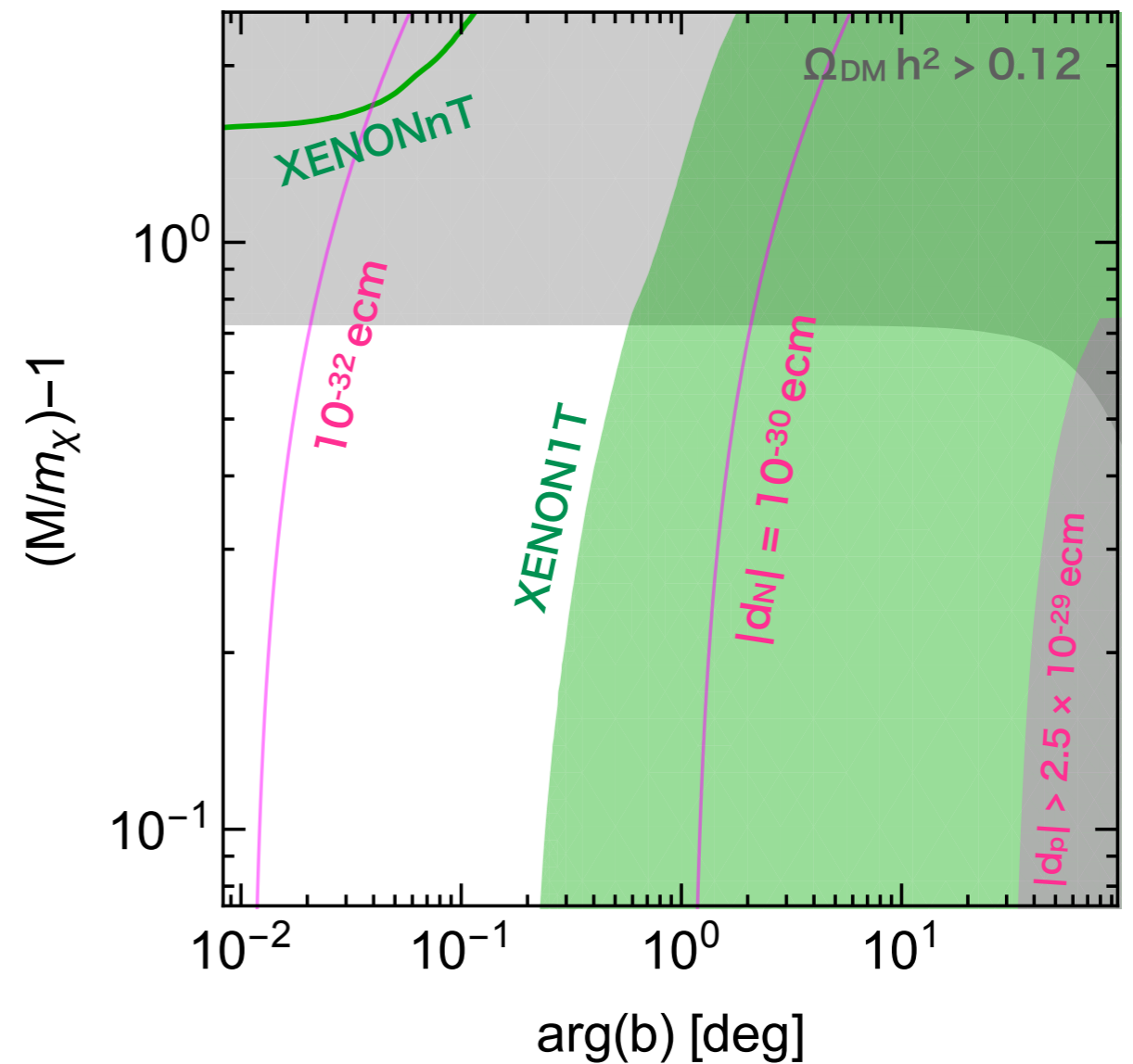
$$\left. \frac{d\sigma}{dE_R} \right|_{\text{contact}} = \mathcal{O}(v_{\text{rel}}^{-2})$$

Singlet Dirac fermion DM

複素位相なし



複素位相あり



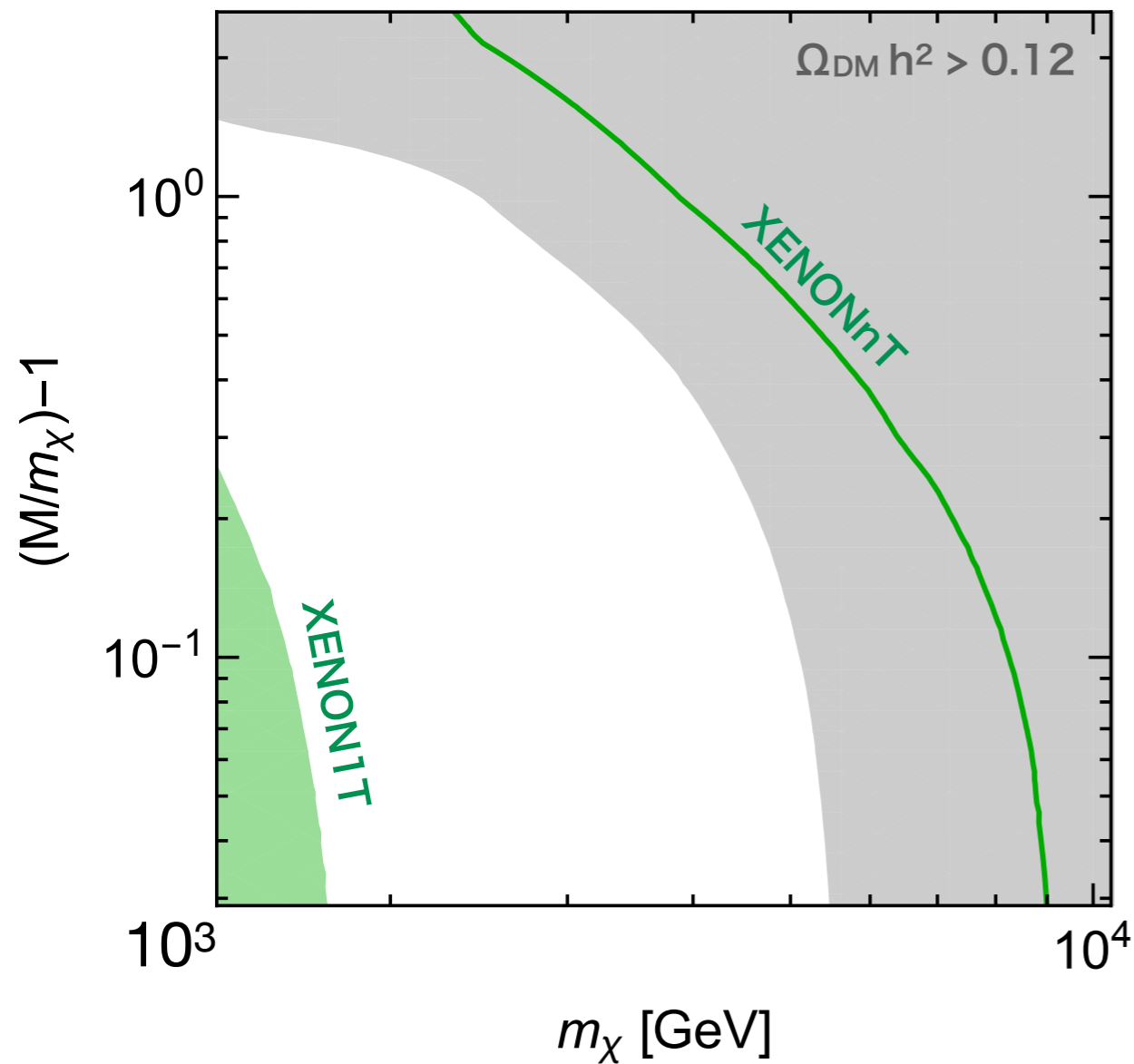
▶ 直接探索で検証可能

▶ O(1) TeV の重いフェルミオン・スカラー @ LHC

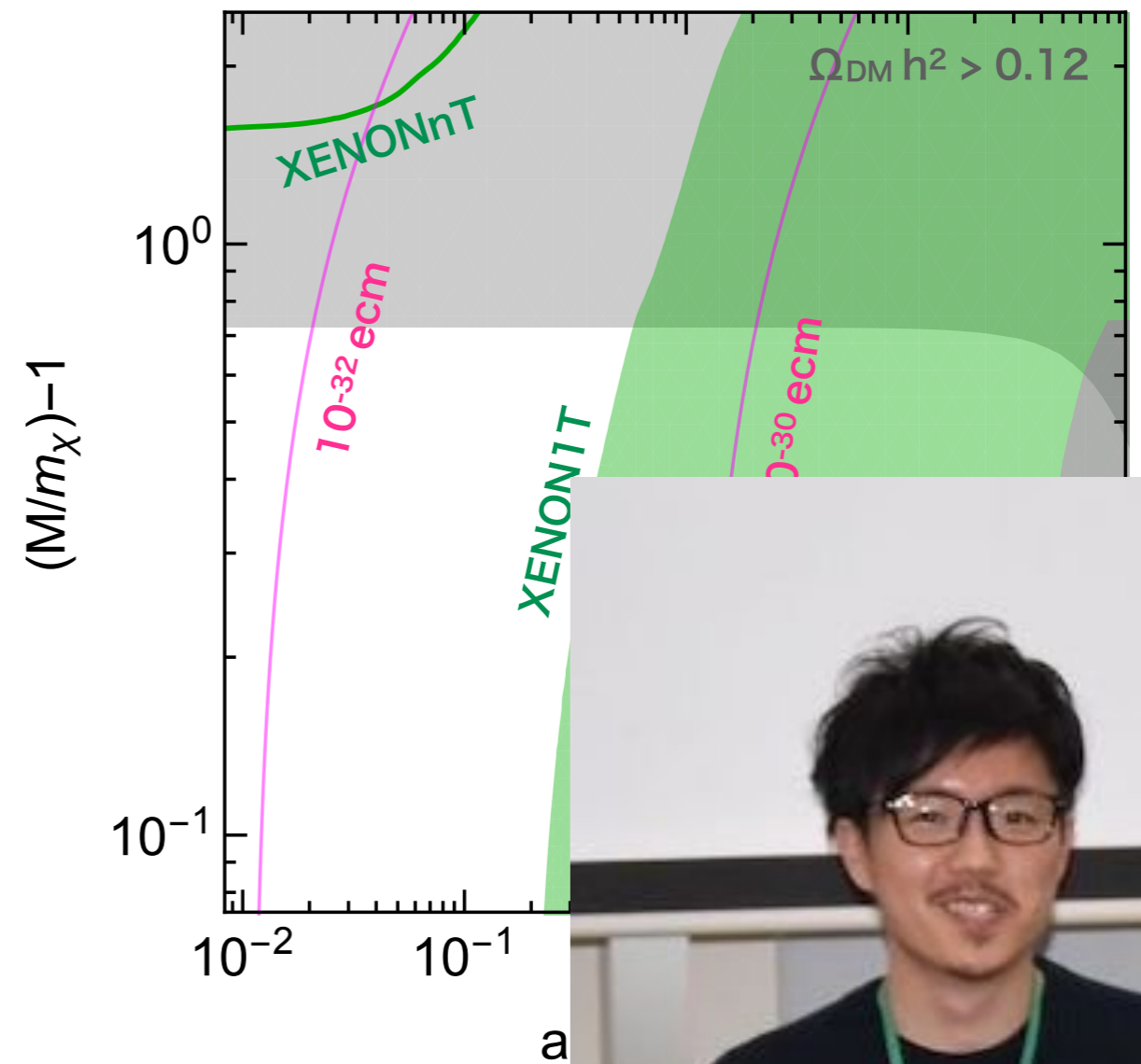
$m_\chi = 3 \text{ TeV}$

Singlet Dirac fermion DM

複素位相なし



複素位相あり



▶ 直接探索で検証可能

▶ O(1) TeV の重いフェルミオン・スカラー @ LHC

Quantum numbers of DM

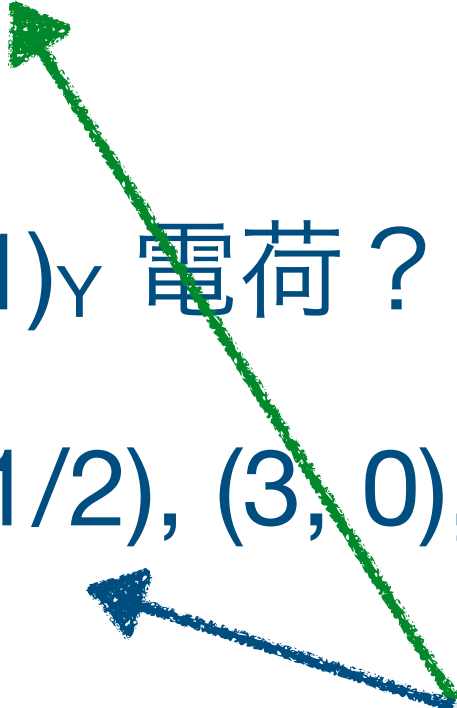
暗黒物質はカラー量子数を持たず電氣的に中性。しかし、この条件だけだとまだ多くの可能性が残されている。

● 粒子の種類は？

- 実/複素スカラー
- マヨラナ/ディラック・フェルミオン
- ベクトル場 etc.

● $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 電荷？

$(1, 0), (2, \pm 1/2), (3, 0), (3, \pm 1), (4, \pm 1/2), \dots$



電弱相互作用を行う暗黒物質

Electroweak-Interacting DM

ハイパーチャージ Y を持つ $SU(2)_L$ n 重項の中性成分が暗黒物質となっている場合。

相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{g_2}{4} \sqrt{n^2 - (2Y - 1)^2} \overline{\chi^+} W^+ \chi^0 + \frac{g_2}{4} \sqrt{n^2 - (2Y + 1)^2} \overline{\chi^0} W^+ \chi^- + \text{h.c.} \\ + ig_Z Y \overline{\chi^0} \cancel{Z} \eta^0 .$$

例

- $n = 2, Y = 1/2$ (ヒッグシーノ)
- $n = 3, Y = 0$ (ウィーノ)
- $n = 5, Y = 0$ (Minimal Dark Matter)

M. Cirelli, N. Fornengo, A. Strumia, Nucl. Phys. **B753**, 178 (2006).

これらの暗黒物質の物理は、ゲージ相互作用で（**ほぼ**）決まる。

スカラーの場合はヒッグスとの結合を無視した場合。

Electroweak-Interacting DM

Quantum numbers			DM could	DM mass	$m_{\text{DM}^\pm} - m_{\text{DM}}$	Finite naturalness	σ_{SI} in
$\text{SU}(2)_L$	$\text{U}(1)_Y$	Spin	decay into	in TeV	in MeV	bound in TeV	10^{-46} cm^2
2	1/2	0	EL	0.54	350	$0.4 \times \sqrt{\Delta}$	$(0.4 \pm 0.6) 10^{-3}$
2	1/2	1/2	EH	1.1	341	$1.9 \times \sqrt{\Delta}$	$(0.25 \pm 0.56) 10^{-3}$
3	0	0	HH^*	$2.0 \rightarrow 2.5$	166	$0.22 \times \sqrt{\Delta}$	0.12 ± 0.03
3	0	1/2	LH	$2.4 \rightarrow 2.7$	166	$1.0 \times \sqrt{\Delta}$	0.12 ± 0.03
3	1	0	HH, LL	$1.6 \rightarrow ?$	540	$0.22 \times \sqrt{\Delta}$	$(1.3 \pm 1.1) 10^{-2}$
3	1	1/2	LH	$1.9 \rightarrow ?$	526	$1.0 \times \sqrt{\Delta}$	$(1.3 \pm 1.1) 10^{-2}$
4	1/2	0	HHH^*	$2.4 \rightarrow ?$	353	$0.14 \times \sqrt{\Delta}$	0.27 ± 0.08
4	1/2	1/2	(LHH^*)	$2.4 \rightarrow ?$	347	$0.6 \times \sqrt{\Delta}$	0.27 ± 0.08
4	3/2	0	HHH	$2.9 \rightarrow ?$	729	$0.14 \times \sqrt{\Delta}$	0.15 ± 0.07
4	3/2	1/2	(LHH)	$2.6 \rightarrow ?$	712	$0.6 \times \sqrt{\Delta}$	0.15 ± 0.07
5	0	0	(HHH^*H^*)	$5.0 \rightarrow 9.4$	166	$0.10 \times \sqrt{\Delta}$	1.0 ± 0.2
5	0	1/2	stable	$4.4 \rightarrow 10$	166	$0.4 \times \sqrt{\Delta}$	1.0 ± 0.2
7	0	0	stable	$8 \rightarrow 25$	166	$0.06 \times \sqrt{\Delta}$	4 ± 1

(\rightarrow : ゾンマーフェルト効果)

M. Farina, D. Pappadopulo, A. Strumia, JHEP **1308** (2013) 022.

特徴

- 残存量計算により、比較的重い質量が予言される。
- 量子補正で生じるため、多重項間の質量差は小さい。

Advertisement

SO(10) 大統一理論での (シンプルな) WIMP暗黒物質模型を
リストアップした。

UV completion!

Weakly-interacting massive particles in
non-supersymmetric SO(10) grand unified models



Natsumi Nagata, ^{a,b} Keith A. Olive^a and Jiaming Zheng^a

JHEP **1510**, 193 (2015).



各WIMP暗黒物質模型を
低エネルギーで与える
SO(10)大統一理論の一覧

SO(10) の対称性をうまく破ることで暗黒物質の
安定性を説明するシナリオ。

Electroweak-Interacting DM

探索方法

- 消滅断面積が大きいいため、**間接探索**が有用。

→ 松本さんのトーク

- LHC探索も重要。 → 陳さんのトーク

- ▶ 生成断面積は大きくはない。

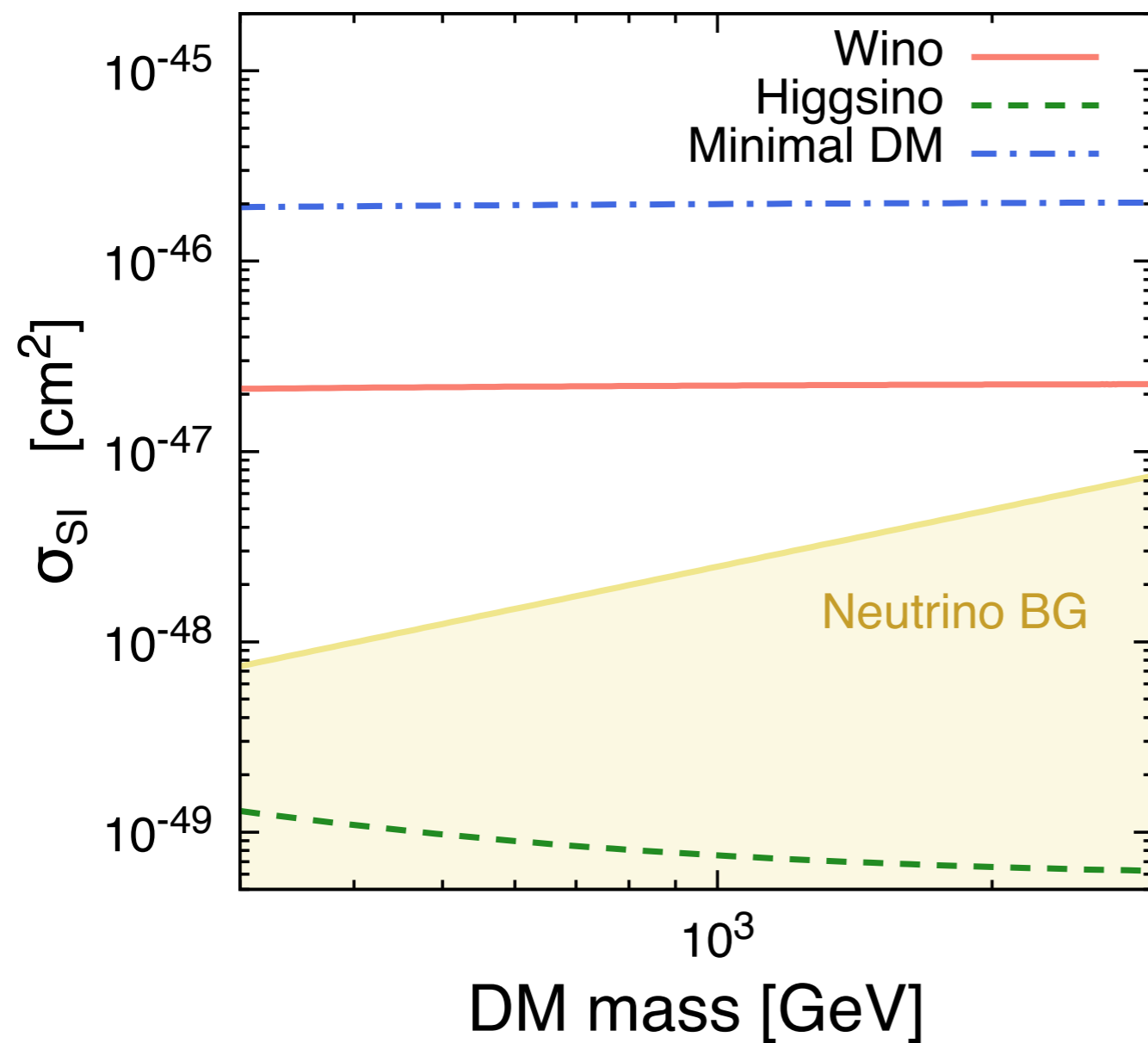
- ▶ 小さい質量差のため、終状態は検出しにくい。

- Disappearing track search (+ α)
- 量子補正を通じた間接探索。

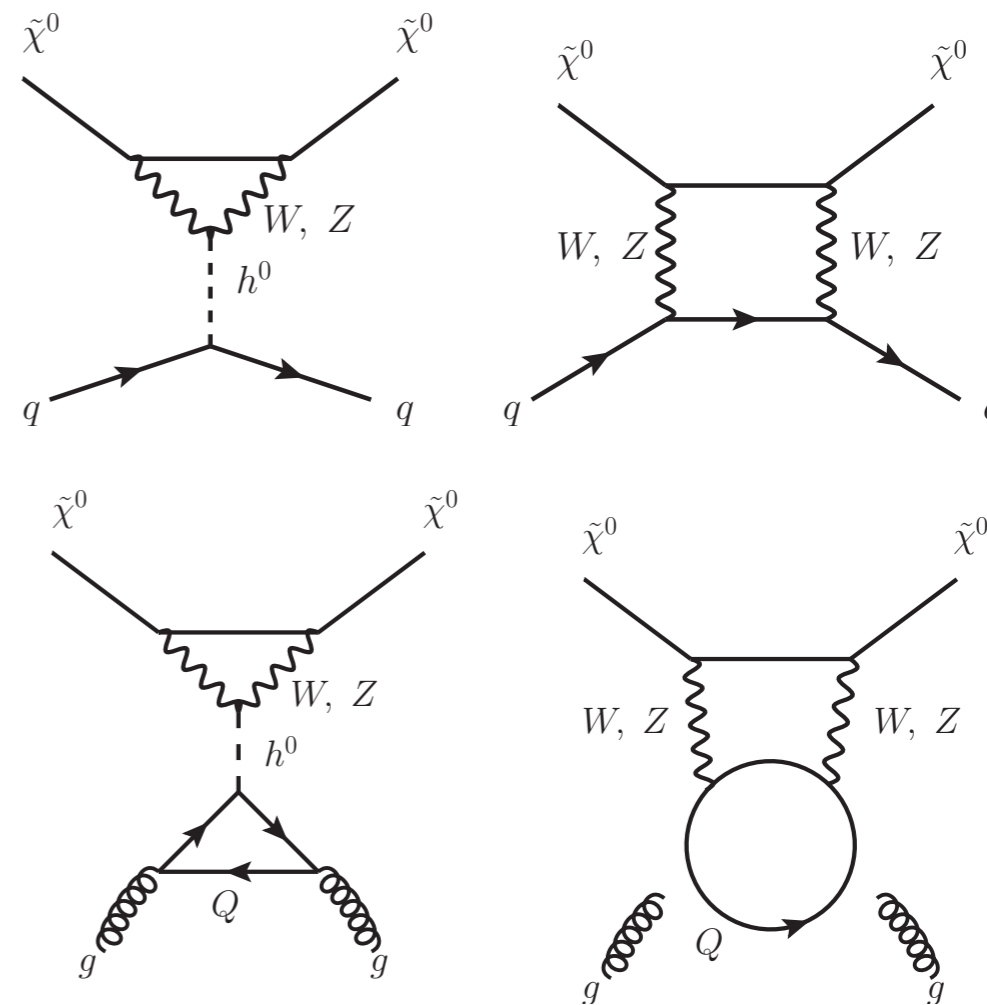
S. Matsumoto, S. Shirai, M. Takeuchi, JHEP 1806, 049 (2018).

- **直接探索実験**も有望。

Electroweak interacting DM



Diagrams



- ▶ 三重項（ウィーノ）, Minimal DM は検証可能。
- ▶ 二重項（ヒッグシーノ）を探るのは難しそう。

Conclusion

Conclusion

- 超対称標準模型における暗黒物質候補は絞られてきている。

- ▶ Wino [3 TeV]

- ▶ Higgsino [< 1000 GeV]

- ▶ Coannihilation [bino-stop/gluino/wino/stau]

- WIMP暗黒物質は未だに多くが未検証のまま。

様々な場合を系統的に調べ、探っていくことが重要だろう。

Backup

Velocity dependence

MDM

$$\mathcal{M} \propto \frac{1}{q^2} \cdot \epsilon_{ijk} q^i p^j \xi_\chi^\dagger \sigma^k \xi_\chi \xi_N^\dagger \xi_N$$

q: 運動量移行

p: 暗黒物質運動量

$$|q^2|, |\mathbf{q}|, |\mathbf{p}| : \mathcal{O}(v_{\text{rel}}^2)$$

EDM

$$\mathcal{M} \propto \frac{1}{q^2} \cdot q^i \xi_\chi^\dagger \sigma^i \xi_\chi \xi_N^\dagger \xi_N$$

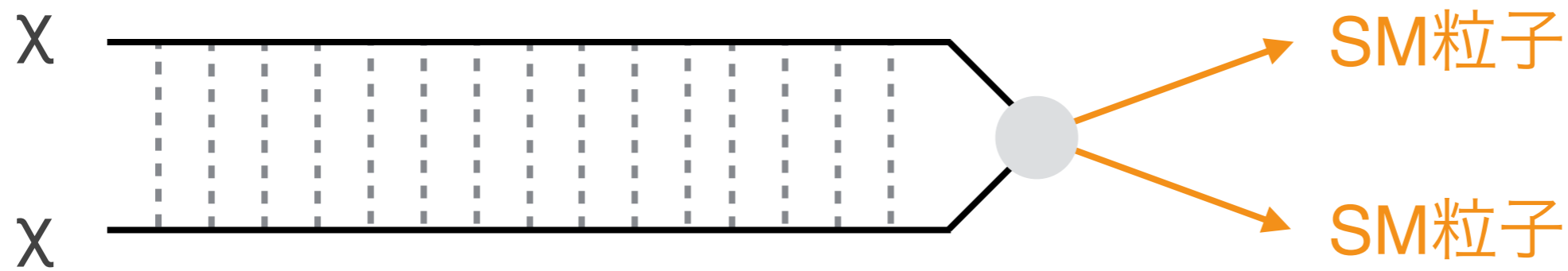
Contact

$$\mathcal{M} \propto \xi_\chi^\dagger \xi_\chi \xi_N^\dagger \xi_N$$

Sommerfeld effects

J. Hisano, S. Matsumoto, and M. M. Nojiri, Phys. Rev. Lett. **92**, 031303 (2004).

Electroweak-interacting DMは、電弱相互作用により自己相互作用を行う。



長距離自己相互作用により波動関数が平面波からずれる効果。

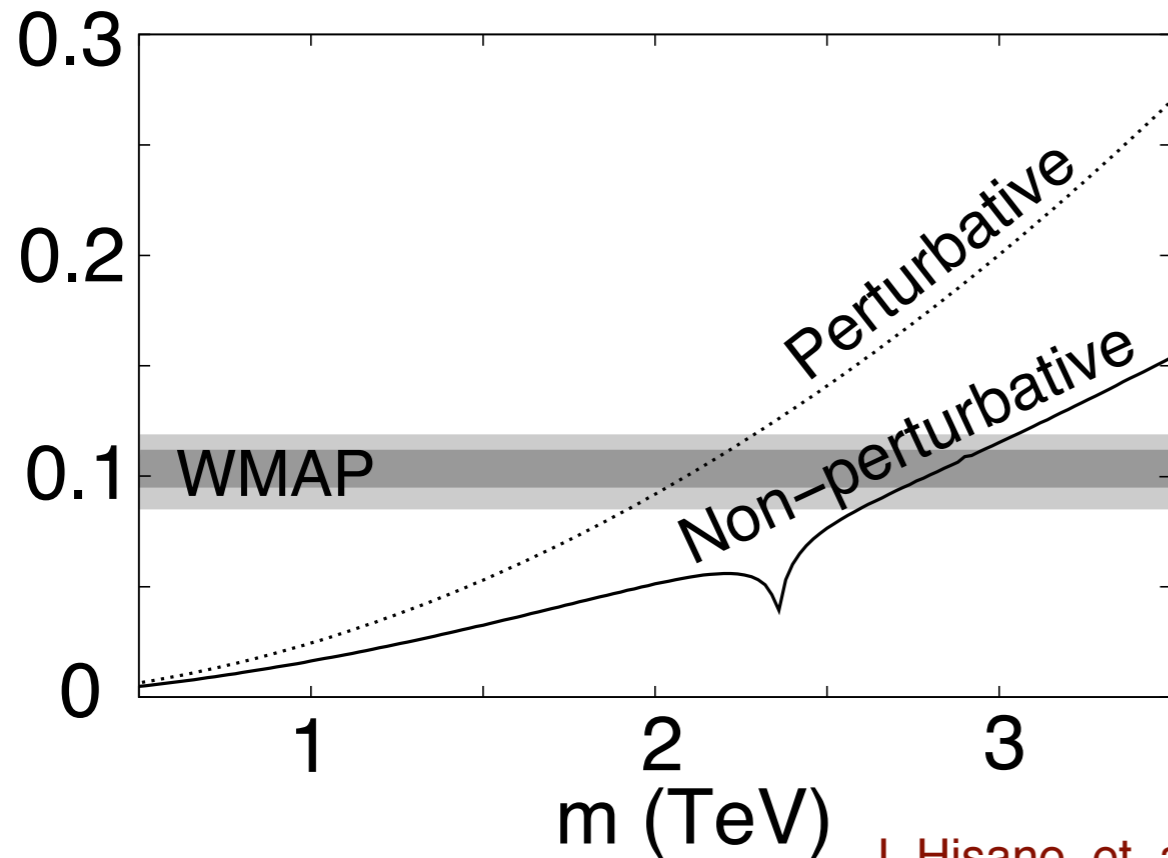
➡ ゾンマーフェルト効果

相互作用の到達距離がボア半径よりも大きくなると効き始める。

$$\frac{1}{m_W} \gtrsim \frac{1}{\alpha_2 m_{\text{DM}}}$$

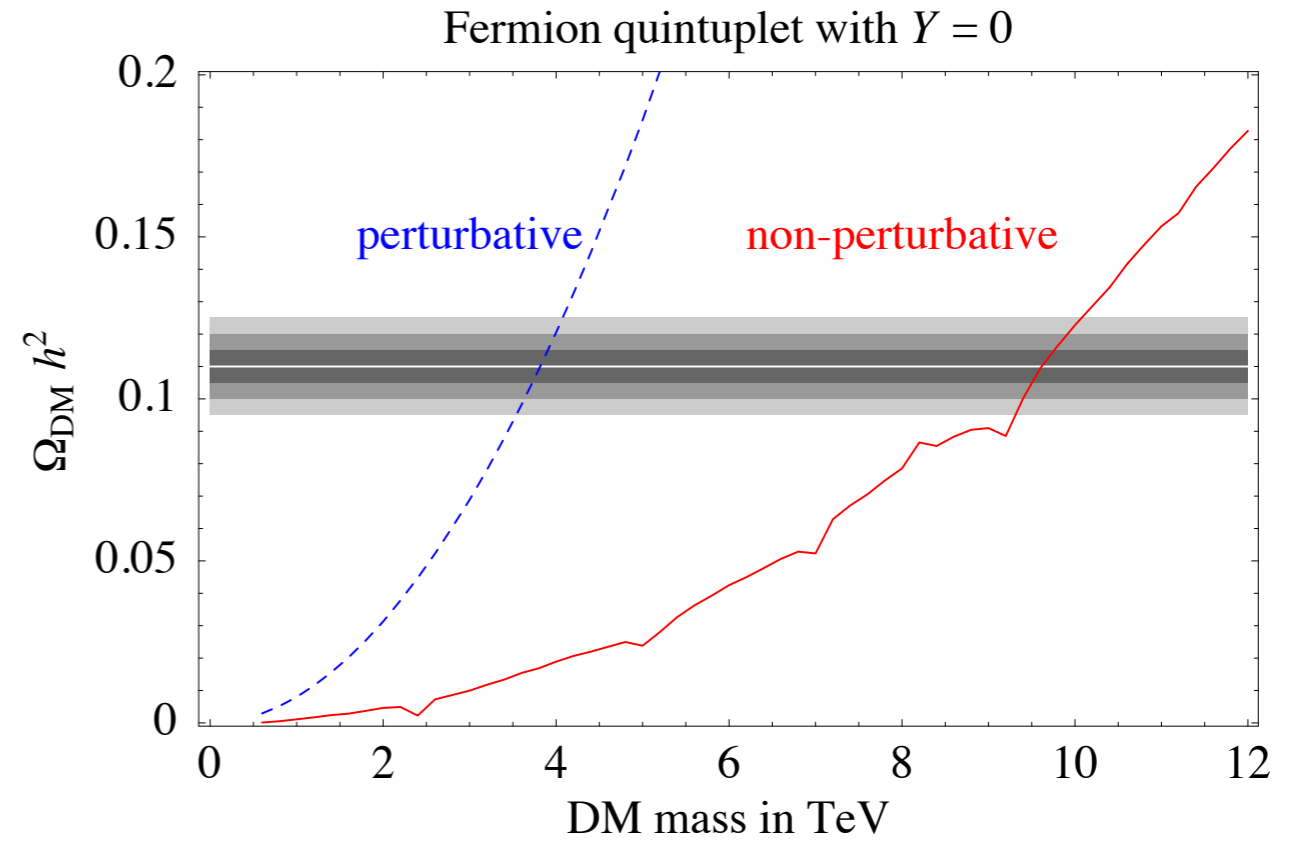
Sommerfeld effects

三重項



J. Hisano, et. al., (2006).

五重項



M. Cirelli, et. al., (2007).

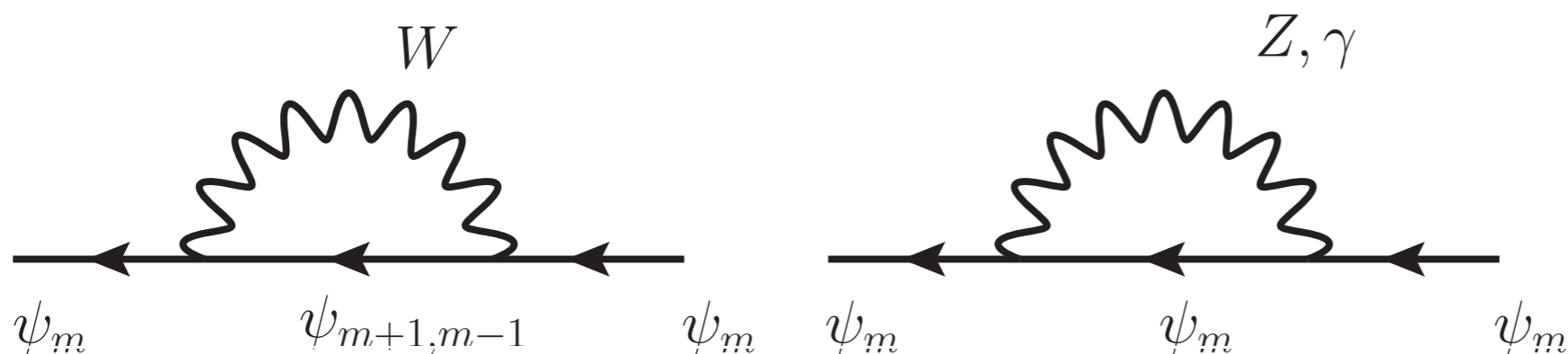
ゾンマーフェルト効果は消滅断面積を増大させる。

➡ 質量の大きい側に予言がずれる。

暗黒物質質量をきちんと予言するためにはこの効果を入れることが重要。

Mass splitting

多重項間の質量差は量子補正の赤外の寄与により生じる。



電荷 ± 1 と0成分の間の質量差

$$\Delta M = \frac{\alpha_2}{4\pi} M \left[(1 - 2Y) f\left(\frac{m_W}{M}\right) - (\cos^2 \theta_W - 2Y) f\left(\frac{m_Z}{M}\right) \right]$$

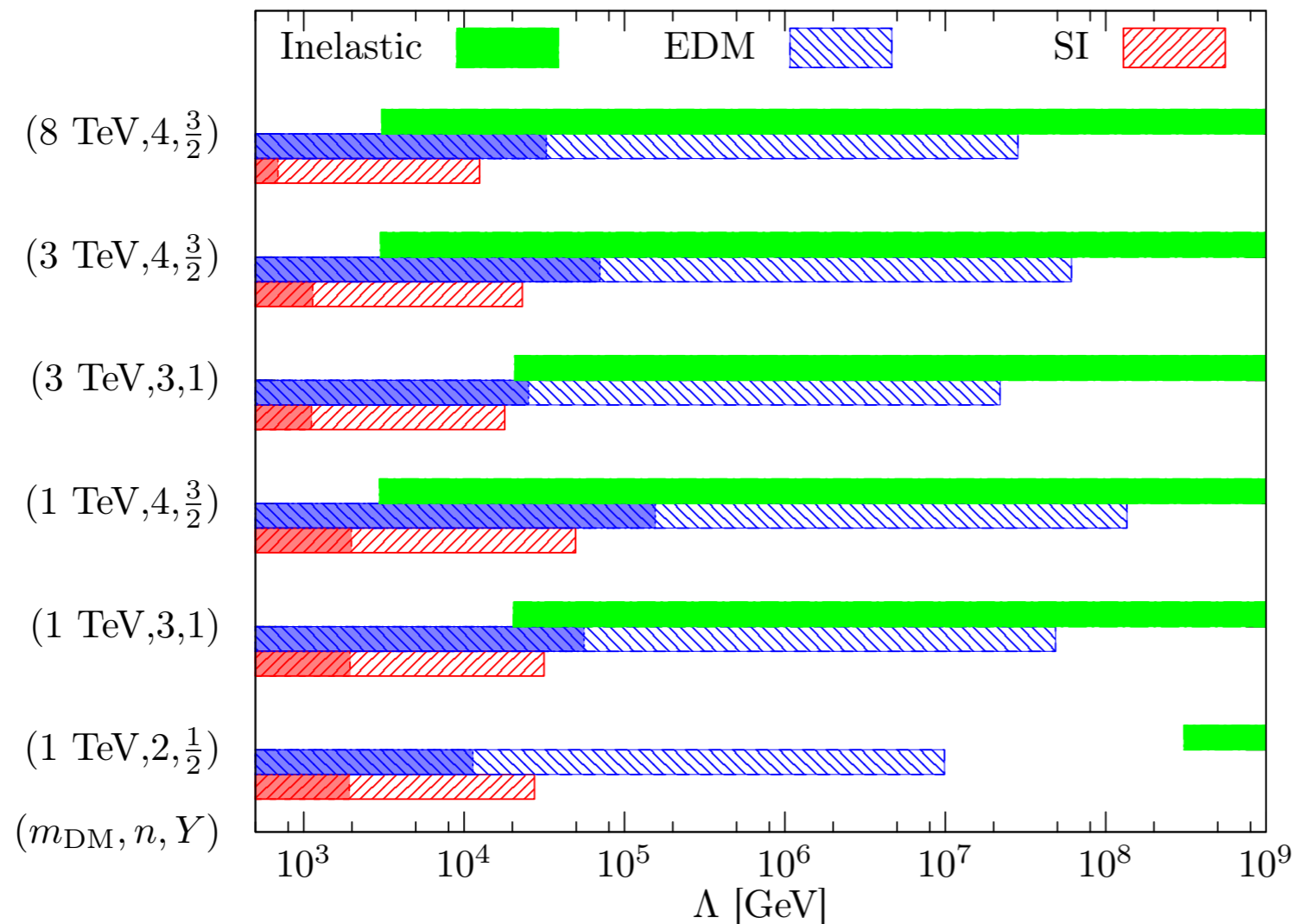


$$f(x) \simeq 2\pi x - 3x^2 + \frac{3\pi}{4}x^3 + \dots$$

$$\Delta M \simeq \alpha_2 m_W \sin^2 \frac{\theta_W}{2} + \alpha_2 Y m_W \left(\frac{1}{\cos \theta_W} - 1 \right)$$

典型的に $O(100)$ MeV.

Constraints and prospects



Current bound

$$|d_e| < 8.7 \times 10^{-29} e \cdot \text{cm} \quad [\text{ACME}]$$

LUX

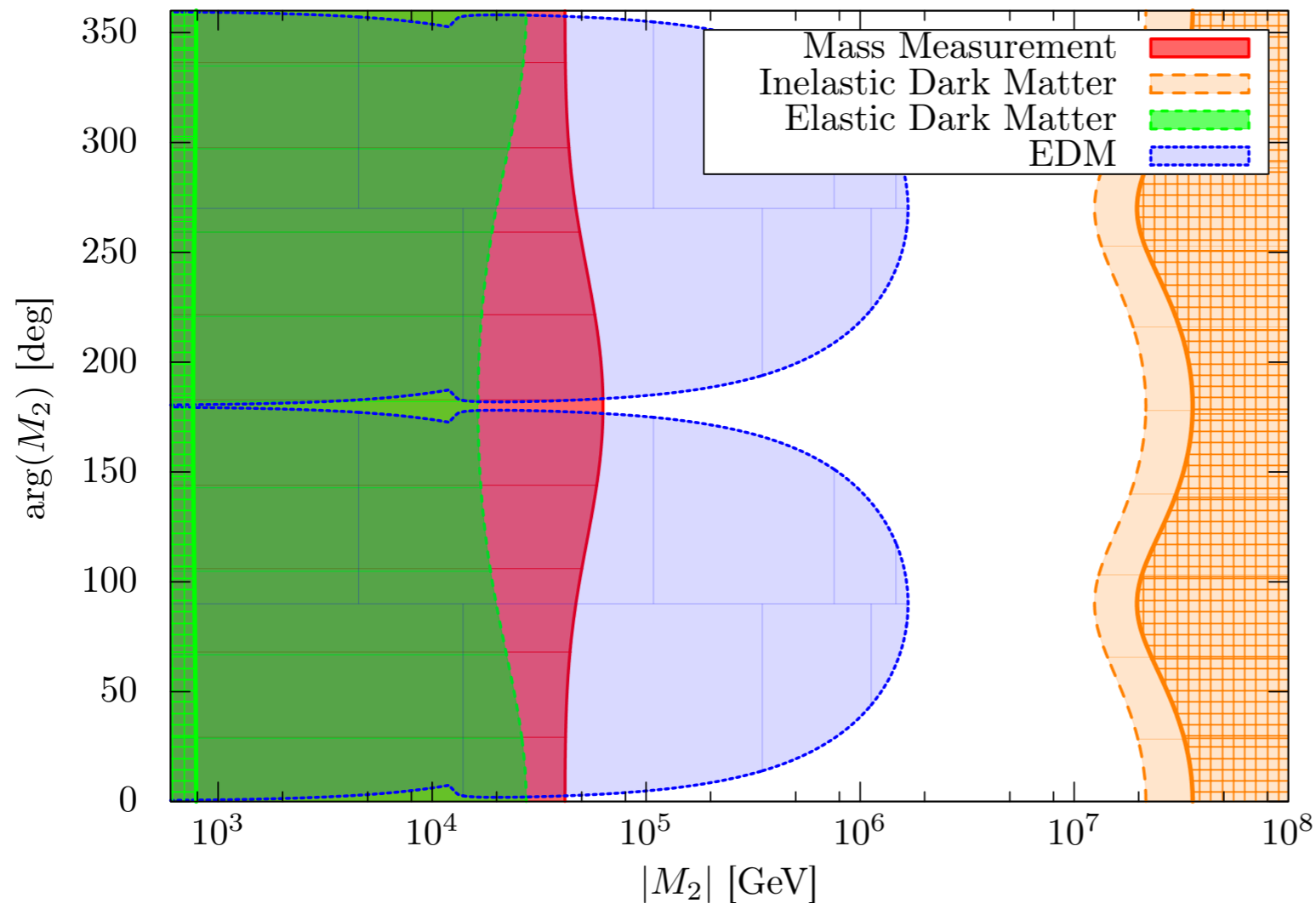
Future prospects

$$|d_e| < 10^{-31} e \cdot \text{cm}$$

Xenon 10 ton-year

- $Y = 3/2$ の場合は既にかなりつらい。
- 将来実験にて $Y = 1$ の場合は探れそう。
- スカラーの場合でも $Y = 3/2$ は大分厳しい。

Higgsino in high-scale SUSY



Parameters

$$\mu = 500 \text{ GeV}$$

$$\tilde{m} = M_1 = M_2 = M_3$$

A-terms: 0

Higgs mass $\rightarrow \tan\beta$

Future prospects

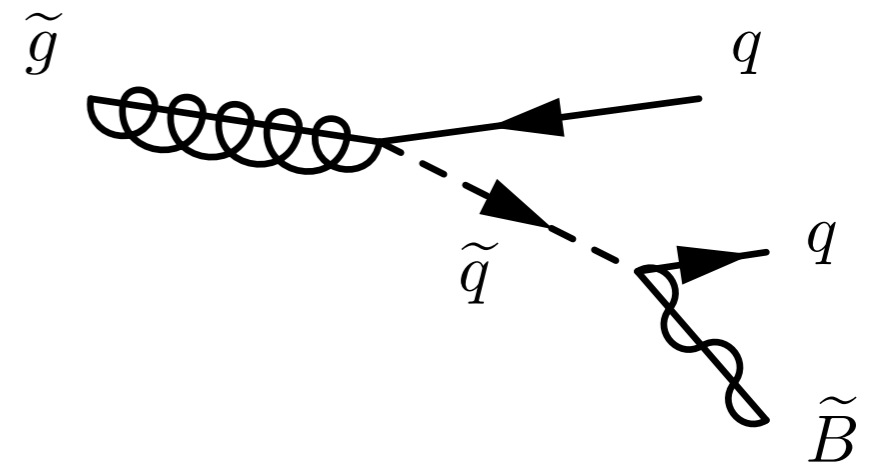
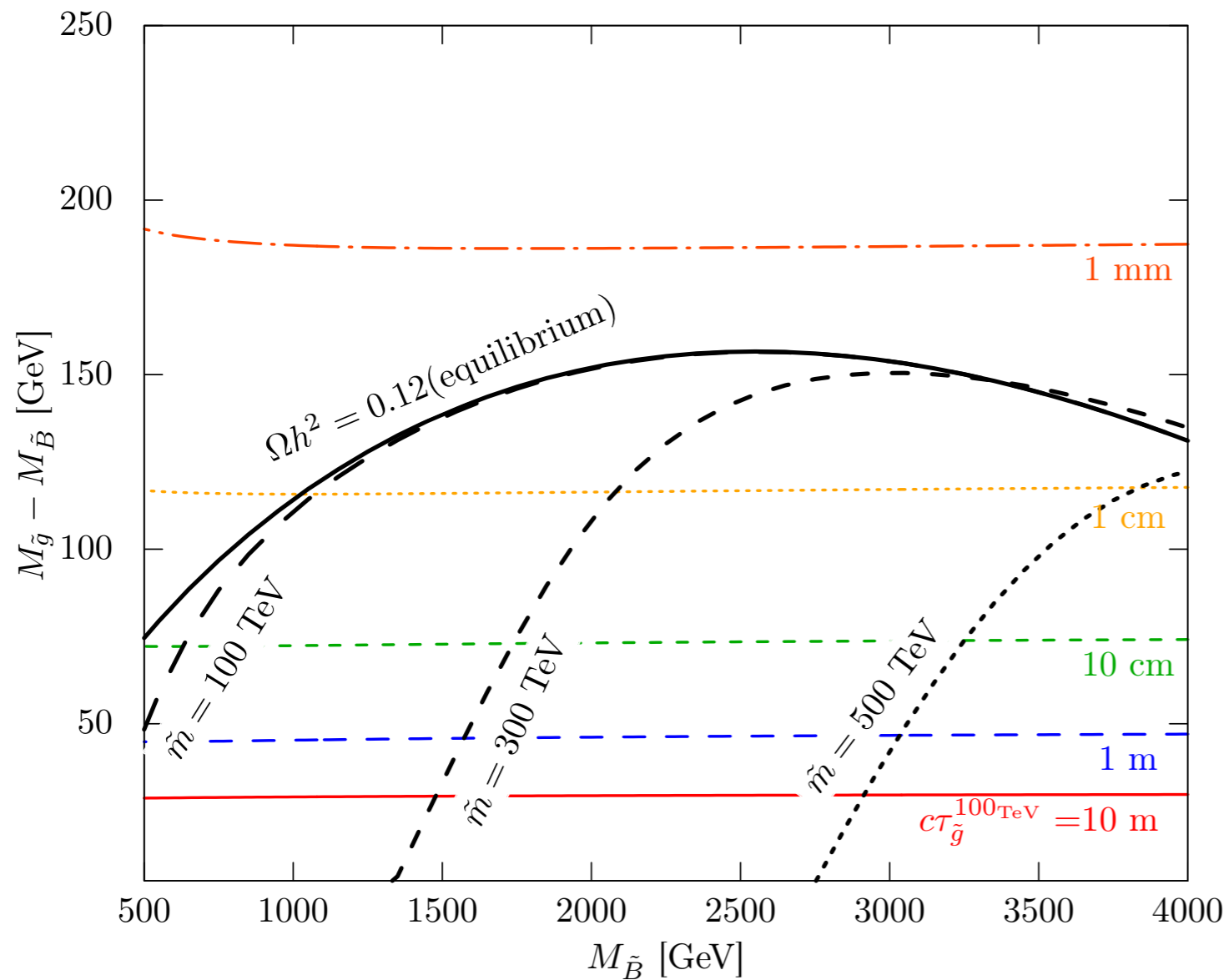
$$|d_e| < 10^{-31} e \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{\text{SI}} < 10^{-48} \text{ cm}^2$$

$$\Delta m < 300 \text{ keV}$$

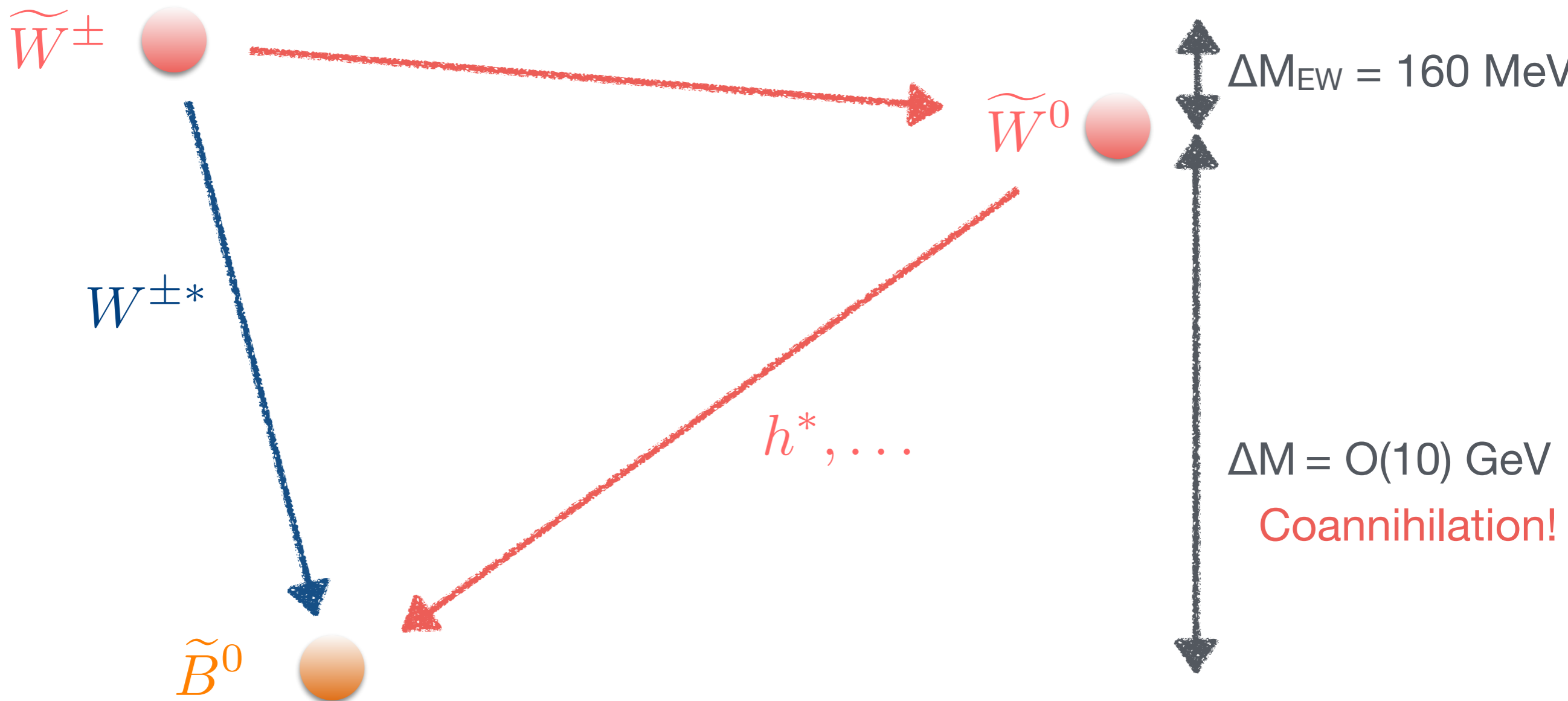
$$\Delta m_{+}|_{\text{tree}} > 0.2 \Delta m_{+}|_{\text{rad}}$$

Gluino decay length



$$c\tau_{\tilde{g}} \simeq \left(\frac{\Delta M}{100 \text{ GeV}} \right)^{-5} \left(\frac{\tilde{m}}{100 \text{ TeV}} \right)^4 \text{ cm}$$

Mass spectrum and decay chains



Prompt decay



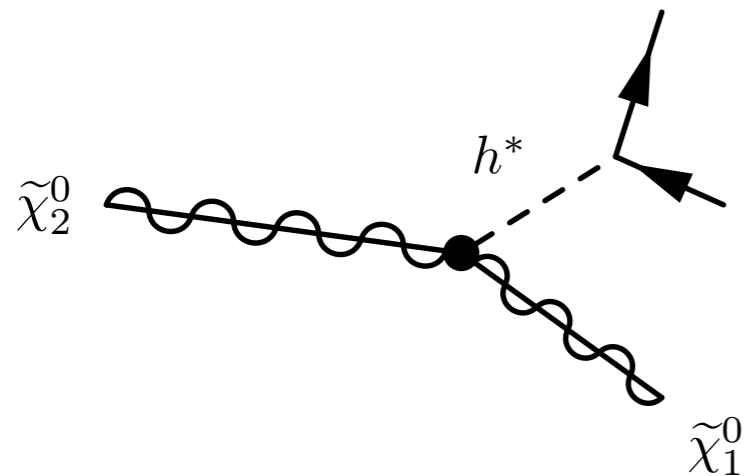
Long-lived!

Neutral wino decay

中性ウィーノは、ヒッグシーノとの混合を通じてビーノに崩壊する。

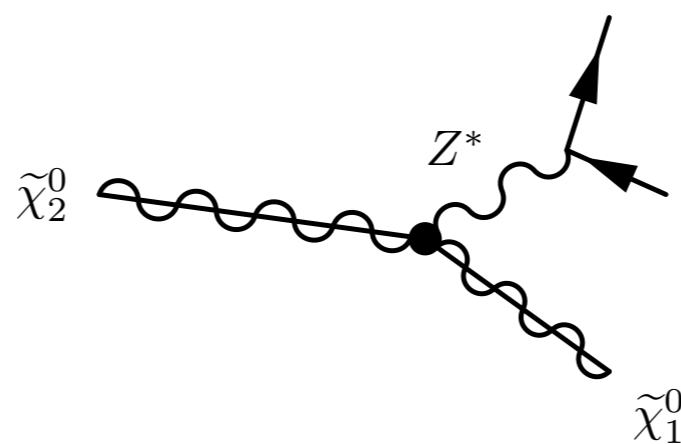
→ 崩壊率はヒッグシーノ質量で抑制される。

Dominant diagram

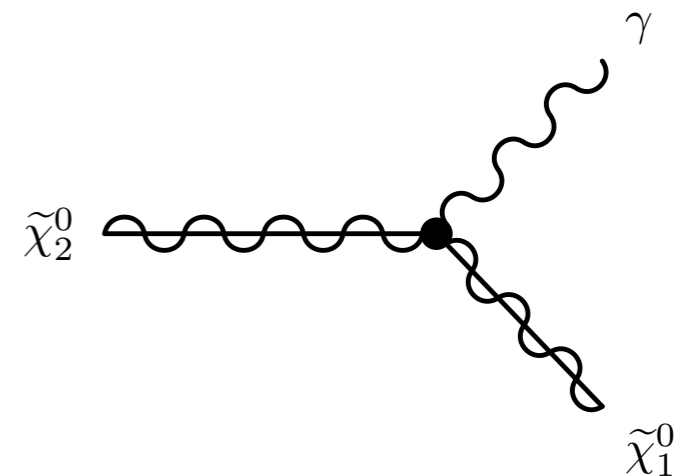


$$\propto y_f \sin(2\beta) \frac{m_W}{\mu}$$

Sub-dominant diagrams



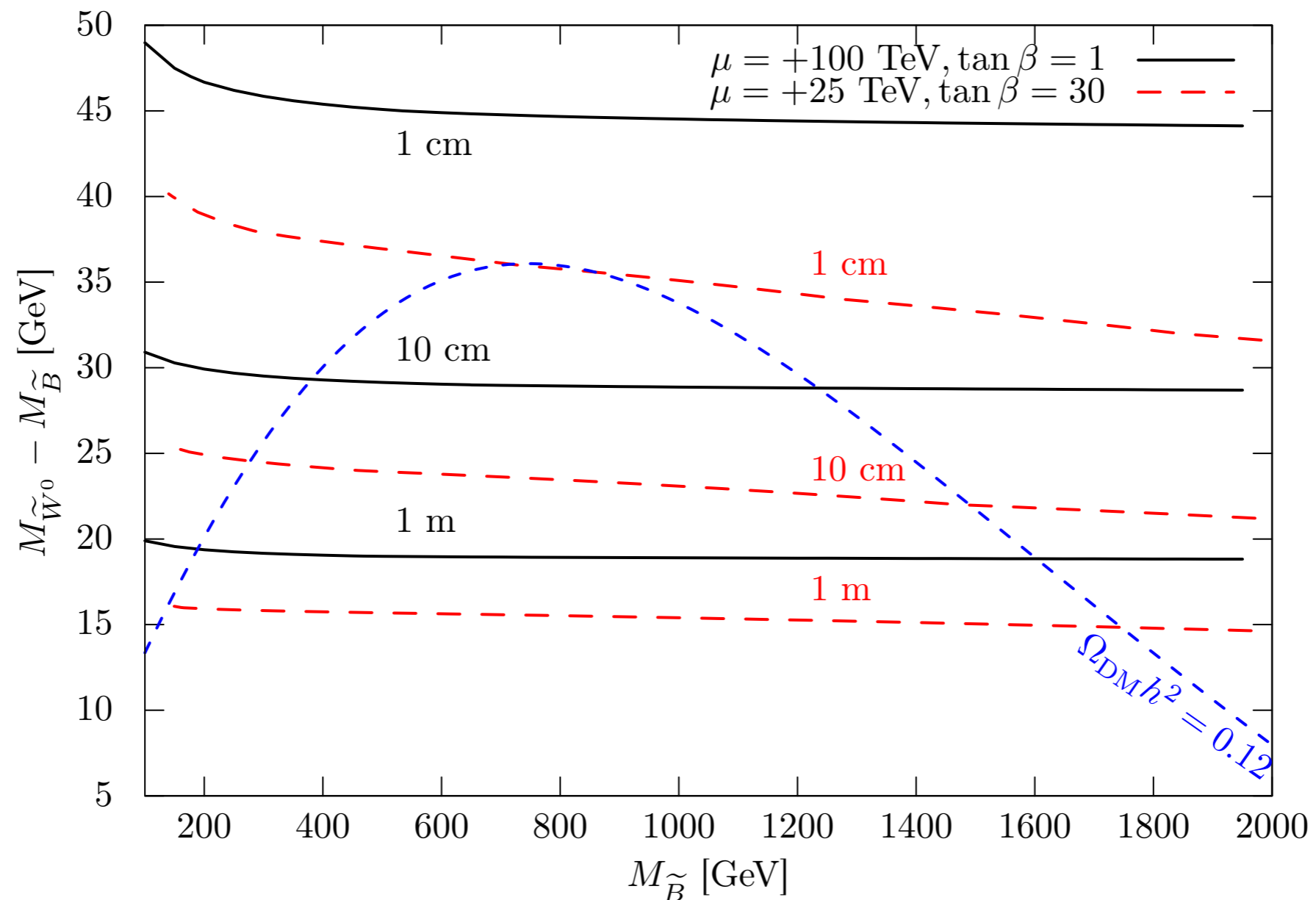
$$\propto \cos(2\beta) \frac{m_Z^2}{|\mu|^2}$$



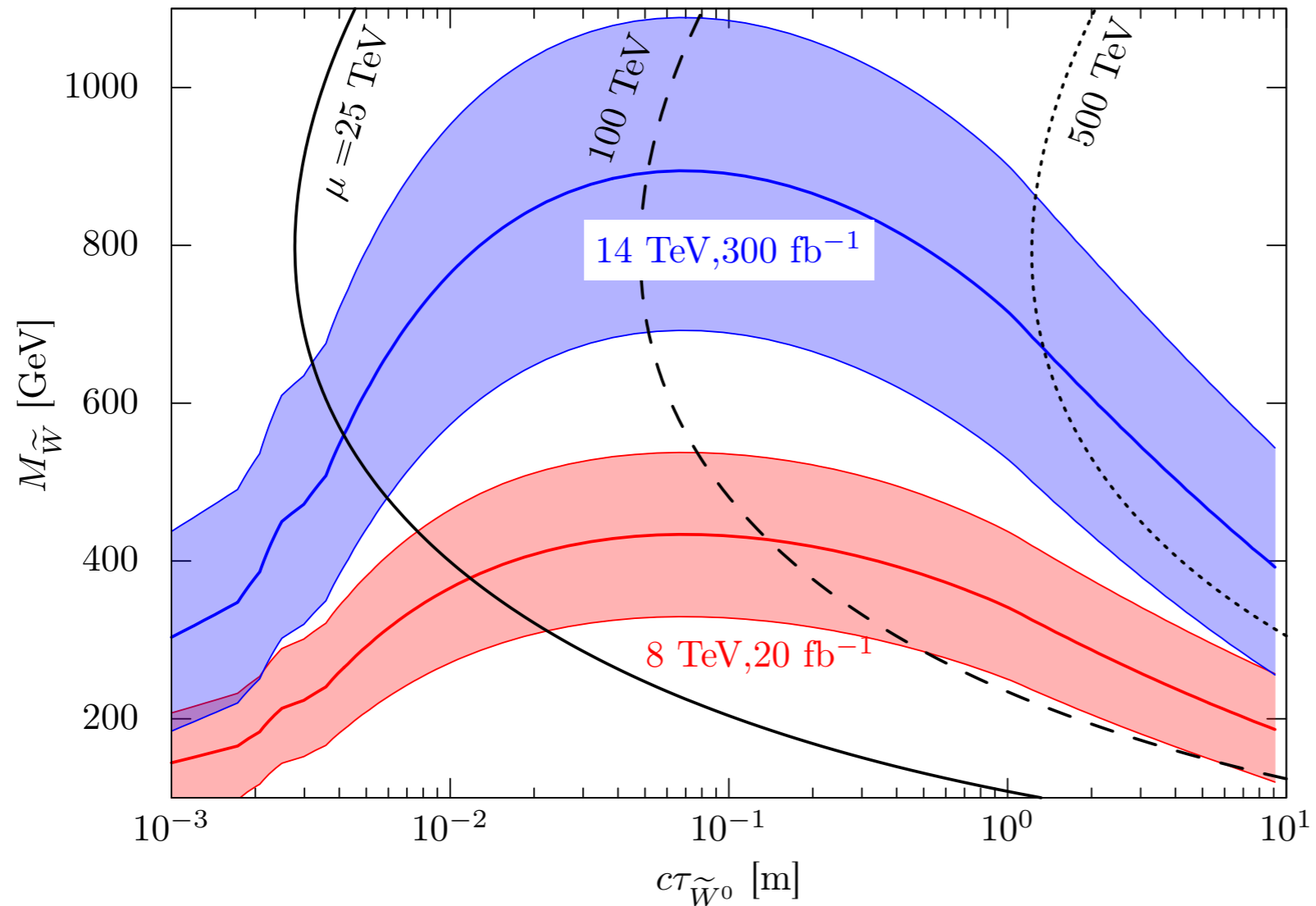
$$\propto \cos(2\beta) \frac{M_{\tilde{\chi}^0}}{16\pi^2 |\mu|^2}$$

ヒッグシーノ質量が非常に大きい場合、中性ウィーノ \tilde{W}^0 が長寿命になる。

Decay length of neutral wino



Prospects for the long-lived wino search



$\Delta M = 30$ GeV
 $\tan\beta = 2$

Acceptance rate is varied by a factor of three.

400 GeV (**800 GeV**) wino can be probed at **8** (**14**) TeV LHC.