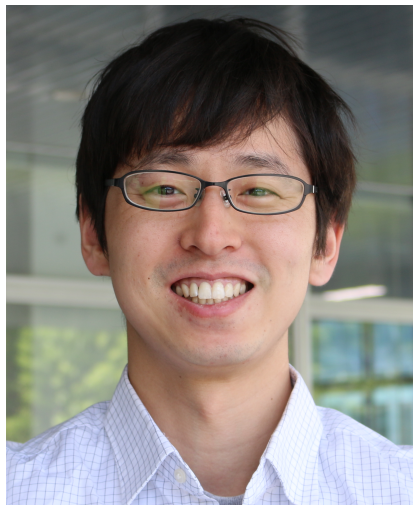


Loop corrections to dark matter direct detection in a pseudoscalar mediator dark matter model



Tomohiro Abe

Institute for Advanced Research,
KMI, Nagoya U.



名古屋大学



Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of Particles and the Universe

in collaboration with

Junji Hisano

Nagoya U, KMI, Kavli IPMU



Motoko Fujiwara

Nagoya U.



Yutaro Shoji

KMI, Nagoya U.



This talk is based on **JHEP 1902 (2019) 028** (arXiv:1810.01039) and an ongoing project

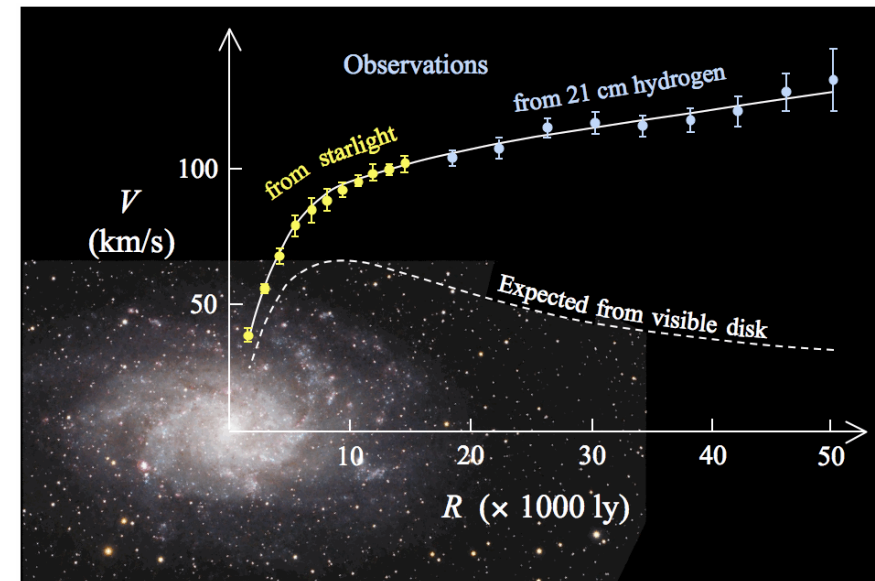
暗黒物質

証拠はたくさんある

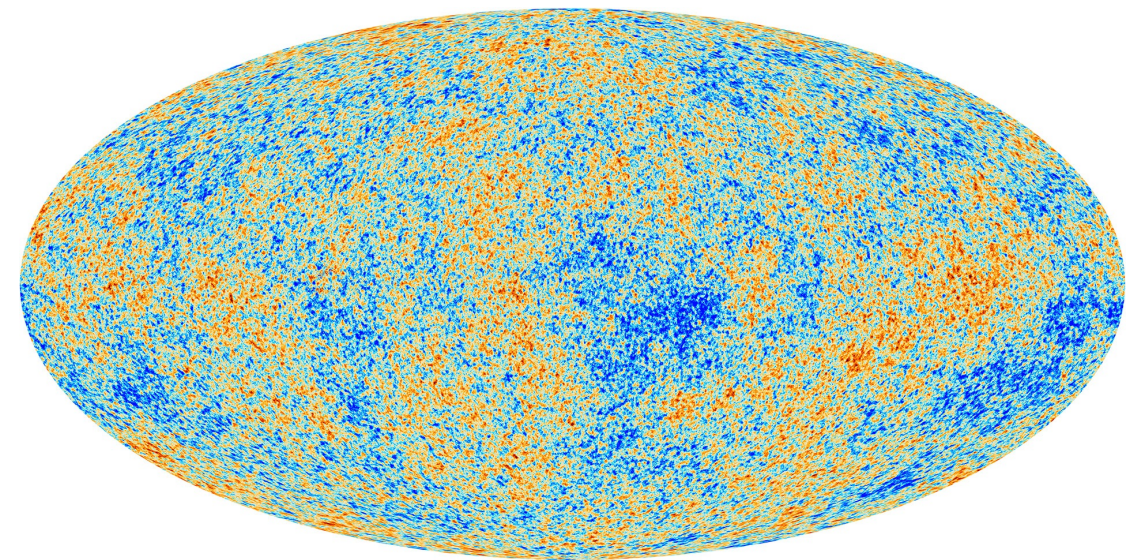
- 回転曲線
- 弾丸クラスター
- CMB
- ...



slide from a talk by Ibarra at SI2016



Galaxy rotation curve [Wikipedia]



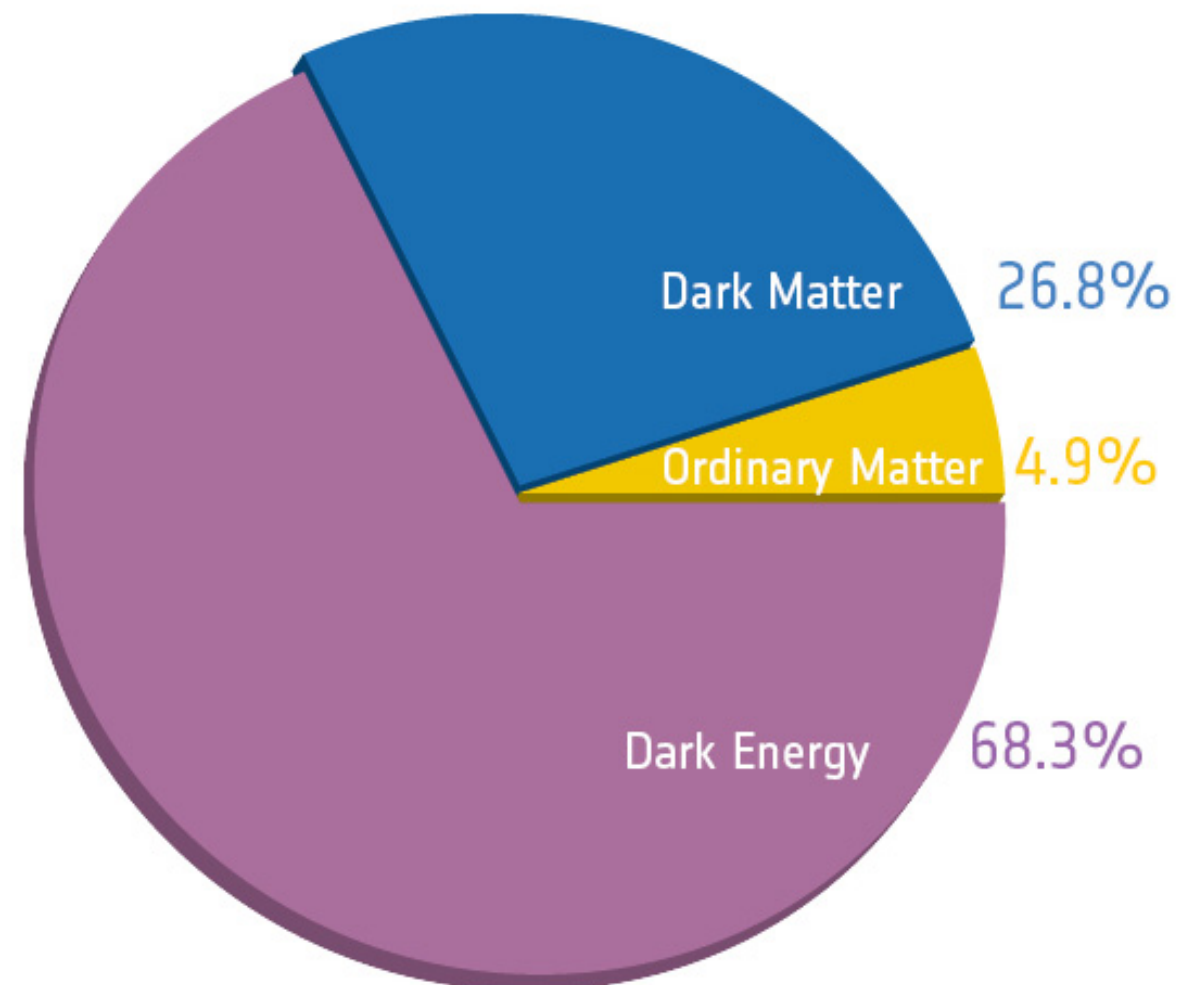
Planck

あんまりわかってない

相互作用

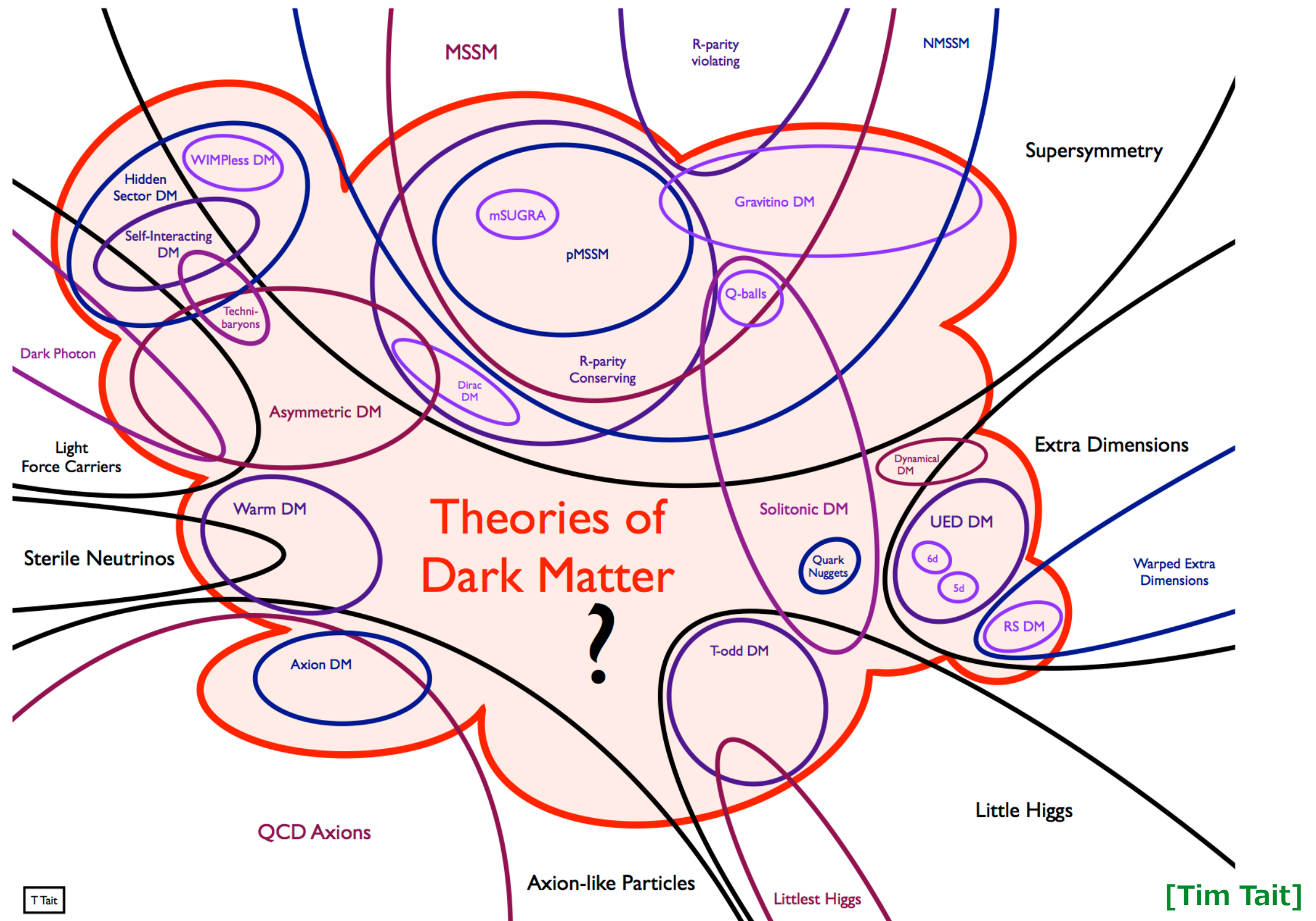
- ★ DM は重力を感じる
- ★ 電荷、色荷をもたない
- ★ それ以外の相互作用をするのかは未知

宇宙のエネルギー密度

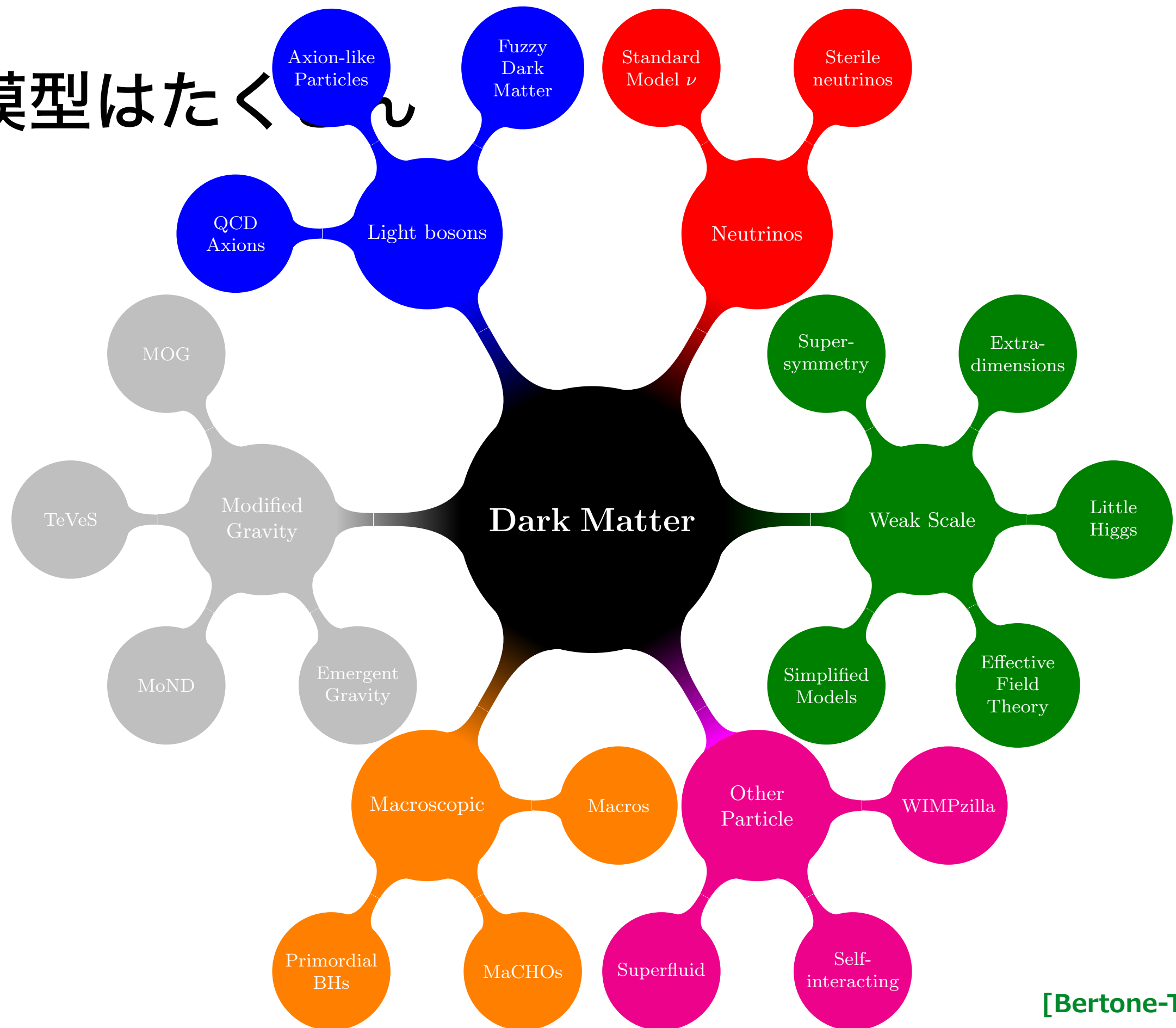


[Planck Mission]

模型はたくさん



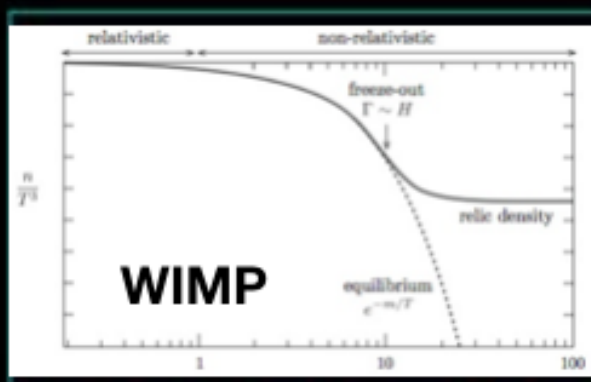
模型はたくさん



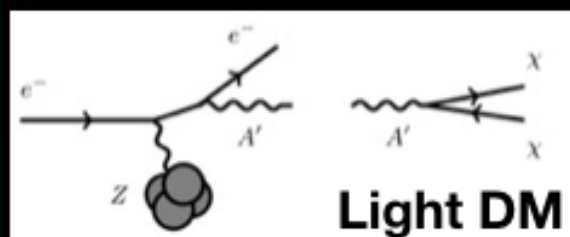
[Bertone-Tait ('18)]

模型はたくさん

[twitter で拾ったが 作者不詳]



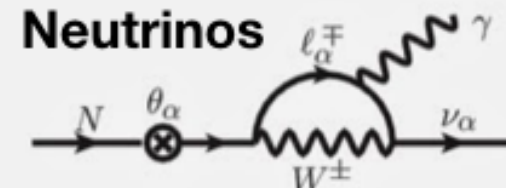
LAWFUL GOOD



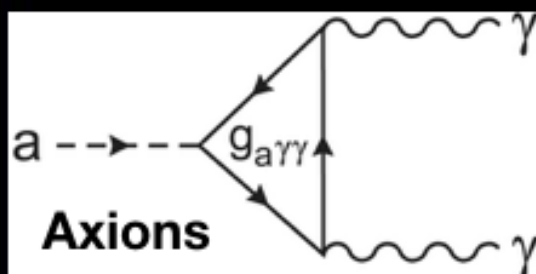
Light DM

NEUTRAL GOOD

Sterile Neutrinos

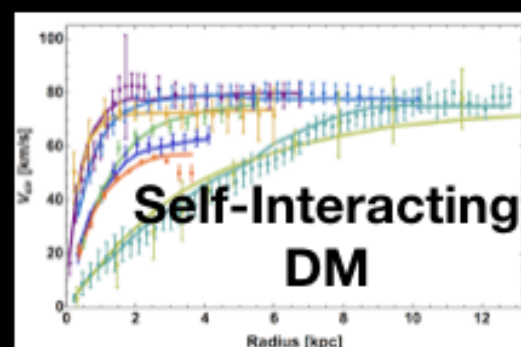


CHAOTIC GOOD



Axions

LAWFUL NEUTRAL



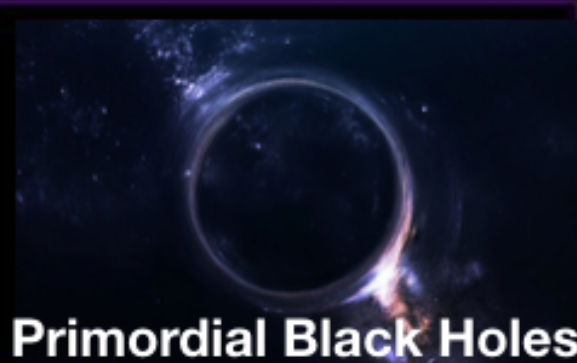
Self-Interacting DM

TRUE NEUTRAL

Sexaquarks



CHAOTIC NEUTRAL



Primordial Black Holes

LAWFUL EVIL

Macroscopic DM



NEUTRAL EVIL

$$a = \begin{cases} a_N & a \gg a_0 \\ \sqrt{a_0 a_N} & a \ll a_0 \end{cases}$$

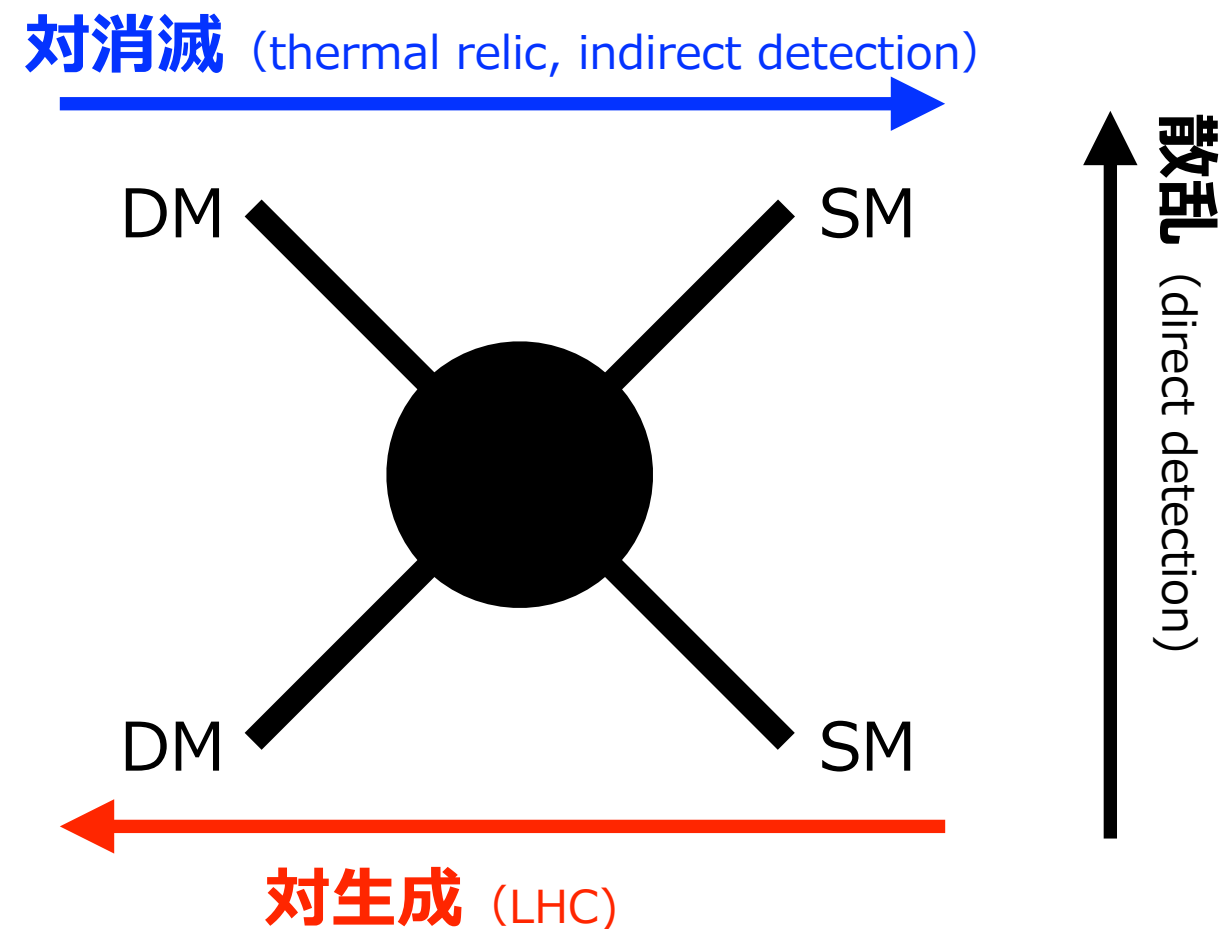
Modified Newtonian Dynamics

CHAOTIC EVIL

WIMP 暗黒物質

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)

- 標準模型粒子と短距離の相互作用をする (W, Z, h, new particles ...)
- freezeout mechanism でエネルギー密度を説明する
- いろんな過程に相関がある



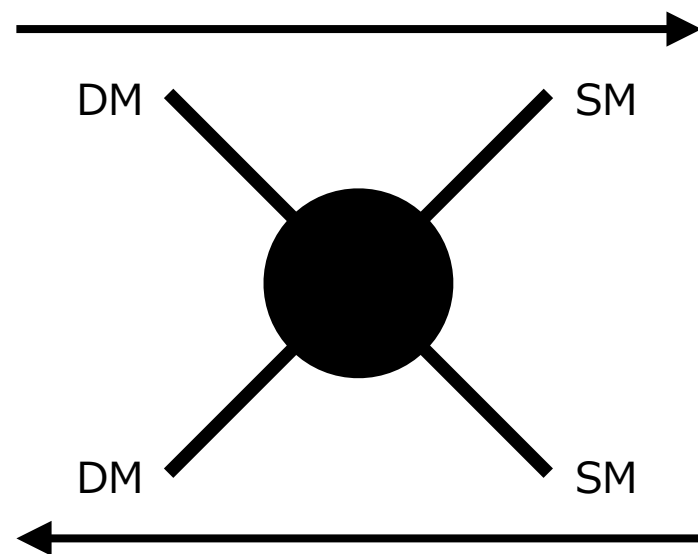
Freezeout mechanism

$$\frac{dn}{dt} + 3Hn = -\langle\sigma v\rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2)$$

スケール因子	a
体積	a^3
粒子数	na^3
ハッブル定数	$H = \frac{1}{a} \frac{da}{dt}$

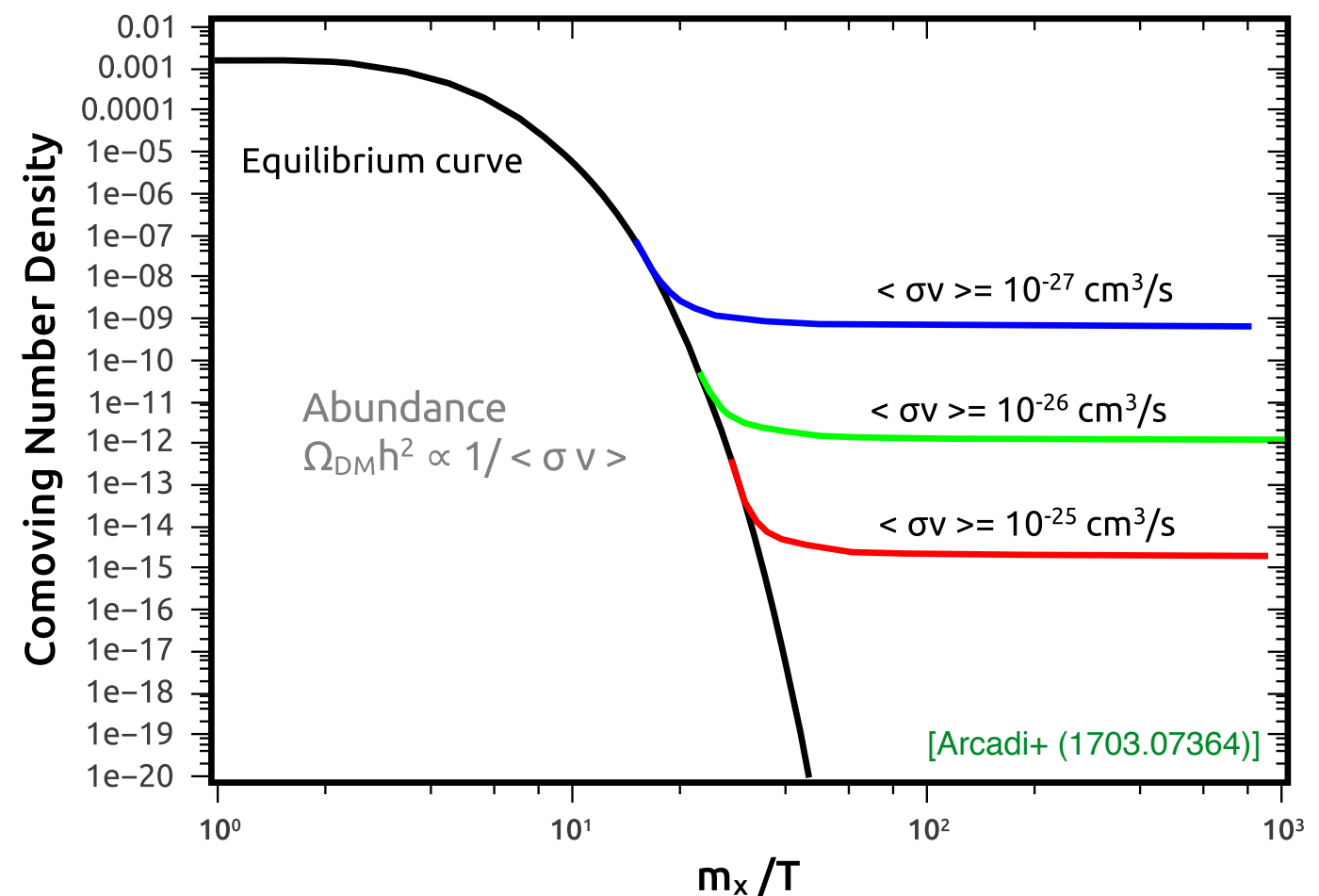
対消滅

膨張率に負けると止まる



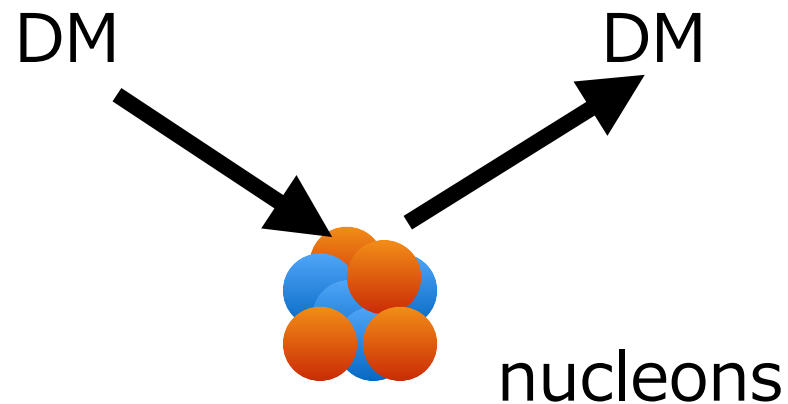
creation

宇宙の温度が下がるとDM をつくるだけのエネルギーを、SM粒子が持てなくなる

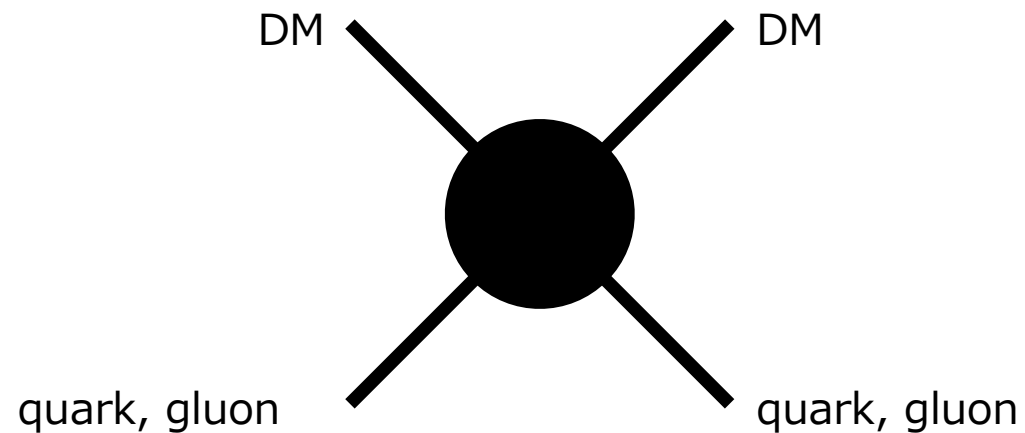


直接検出実験

暗黒物質と核子との散乱



素過程は DM とクォーク/グルーオンとの散乱

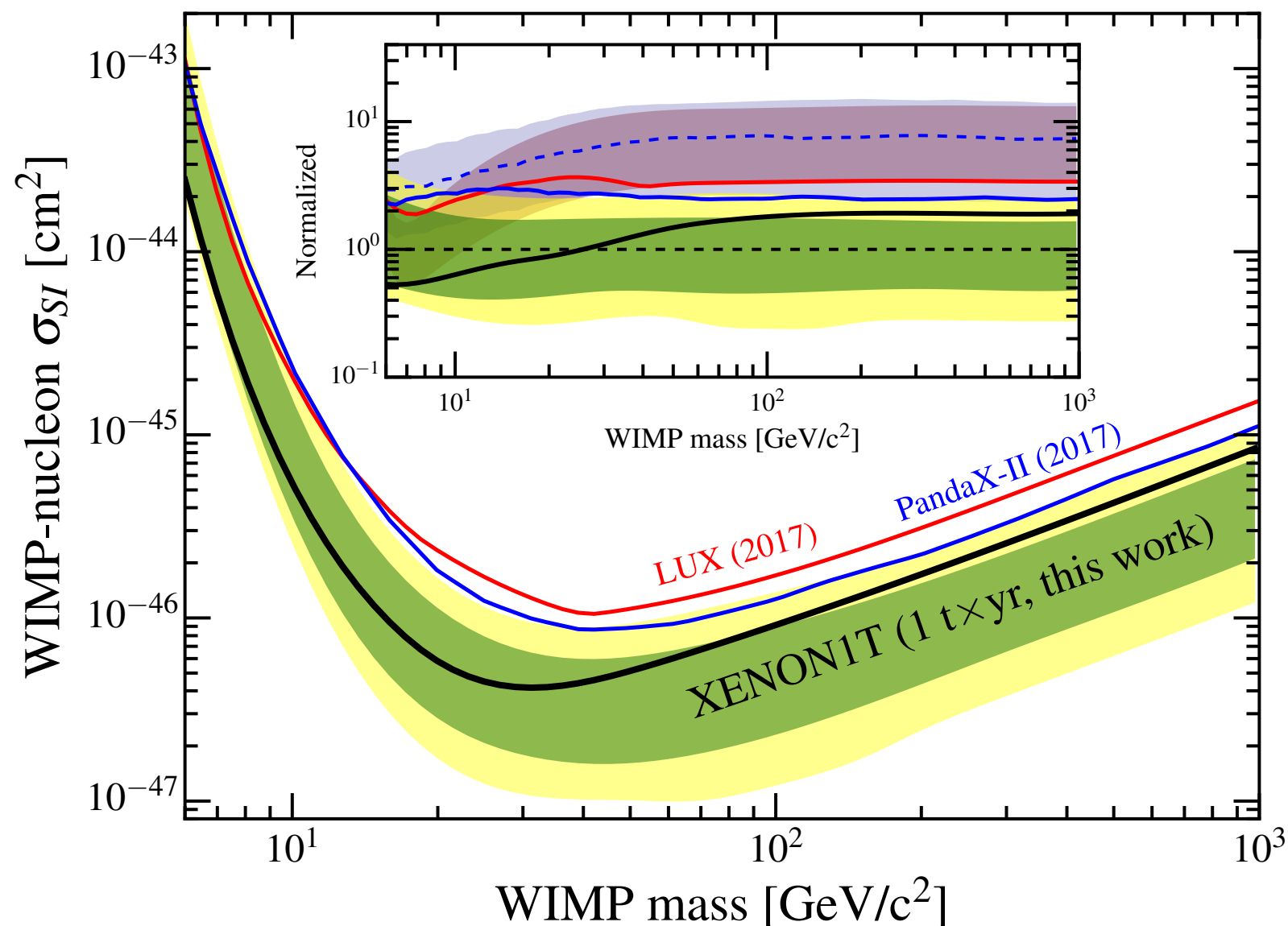


$$\langle N | m_q \bar{q}q | N \rangle = m_N f_{T_q}^{(N)}$$
$$-\frac{9\alpha_s}{8\pi} \langle N | G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} | N \rangle = m_N f_{T_G}^{(N)}$$

Matrix elements

- for quarks: $f_{T_q} = O(10^{-2})$
- for gluons: $f_{T_g} = O(1)$
- 1-loop factor in the gluon term is absorbed into the form factor

直接検出実験からの制限



[XENON1T (2018)]

- WIMP は厳しく制限されている
- この強い制限を逃れるアイデアが必要

もくじ

1. 導入

2. Xenon1T の制限をどう逃れるか

3. Two-Higgs doublet + a

4. ループ計算と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

5. 電弱真空の安定性と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano Shoji (on-going)]

6. まとめ

もくじ

1. 導入

2. Xenon1T の制限をどう逃れるか

3. Two-Higgs doublet + a

4. ループ計算と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

5. 電弱真空の安定性と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano Shoji (on-going)]

6. まとめ

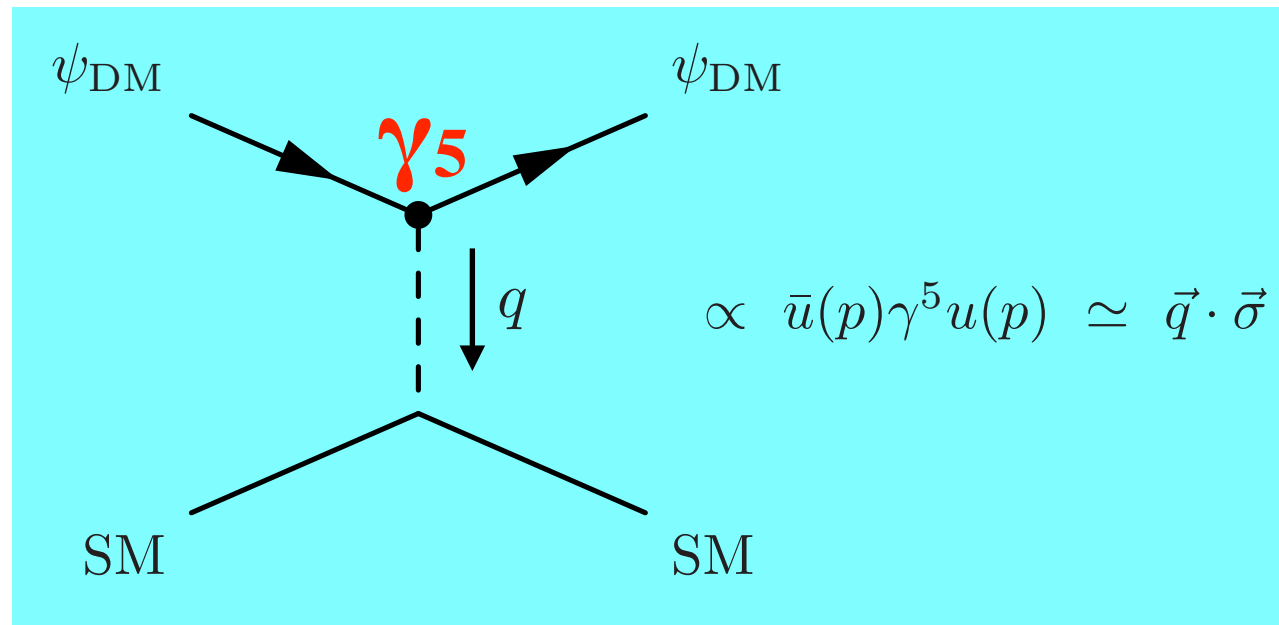
擬スカラー相互作用を使おう

もしも暗黒物質がスピン1/2 で擬スカラー相互作用を持つなら

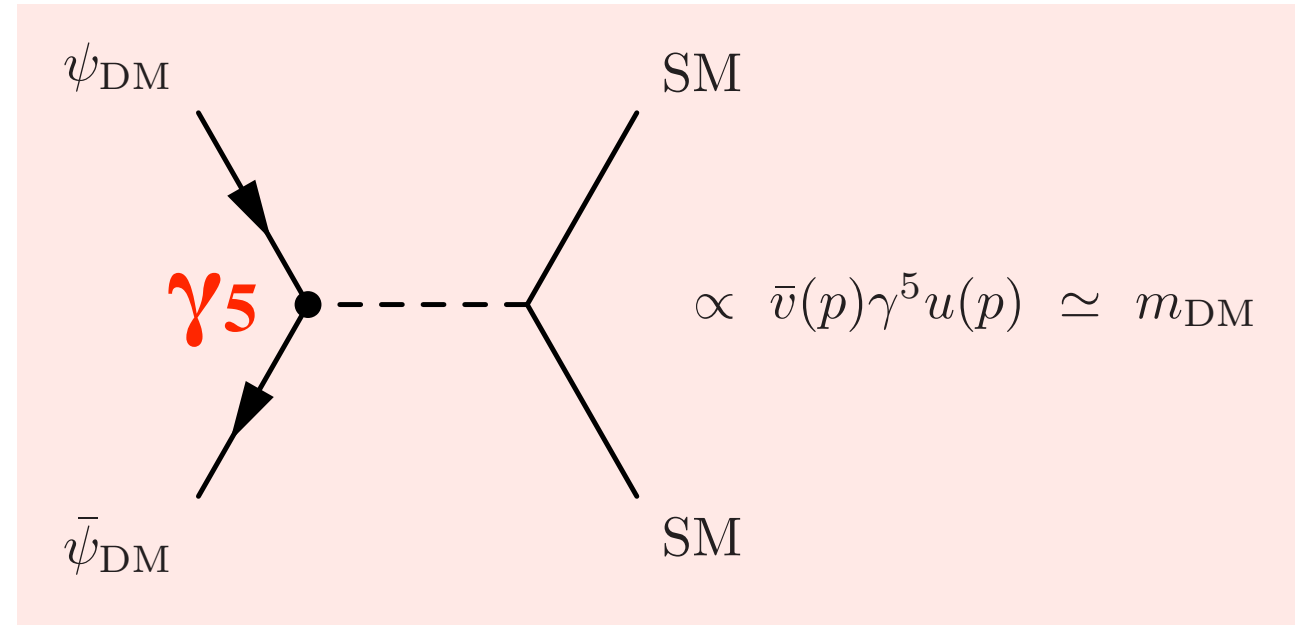
$$\mathcal{L} \supset \bar{\psi} i \gamma_5 \psi a \quad \psi = \text{暗黒物質、} \quad a = \text{スカラー場}$$

フリーズアウト機構を維持しつつ、直接検出実験の制限を逃れられる！

直接検出実験の散乱過程は抑制される



対消滅過程は抑制されない



$$\psi = \sum_s \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3 \sqrt{2E_p}} (a_{p,s} u_s(p) e^{-ipx} + b_{p,s}^\dagger v_s(p) e^{ipx})$$

結合を小さくするのではなく、ローレンツの構造で散乱断面積を小さくするのがポイント

擬スカラー相互作用をどう実現するか

擬スカラーを導入する (暗黒物質の物理は CP 対称性を尊重)

$$c_p \bar{\chi} i \gamma^5 \chi a_0$$

- 素朴に実現
- スカラーセクターの拡張が必要
- “THDM + a” で実現可能 [Ipek, McKeen, Nelson ('14)]
- (他のモデルは [Baek, Ko, Li ('17); Ghorbani ('15)])

もくじ

1. 導入

2. Xenon1T の制限をどう逃れるか

3. Two-Higgs doublet + a

4. ループ計算と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

5. 電弱真空の安定性と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano Shoji (on-going)]

6. まとめ

Two-Higgs-Doublet Model + a

[Ipek et. al (2014)]

暗黒物質とスカラーセクター

		spin	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$	Z_2
DM	χ	1/2	1	0	-1
CP-odd mediator	a_0	0	1	0	1
two-Higgs doublets	H_1	0	2	1/2	1
	H_2	0	2	1/2	1

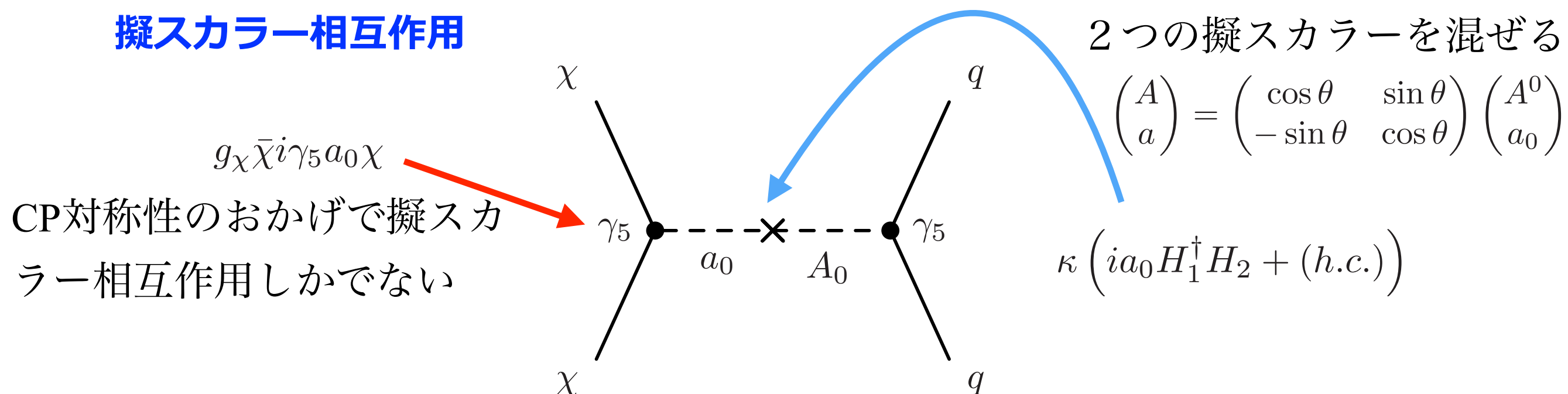
see a white paper for more details

[1810.09420]

仮定

- CP 対称性が暗黒物質とスカラーのセクターにあることを仮定
- $\langle a_0 \rangle = 0$

擬スカラー相互作用



ラグランジアンの一部

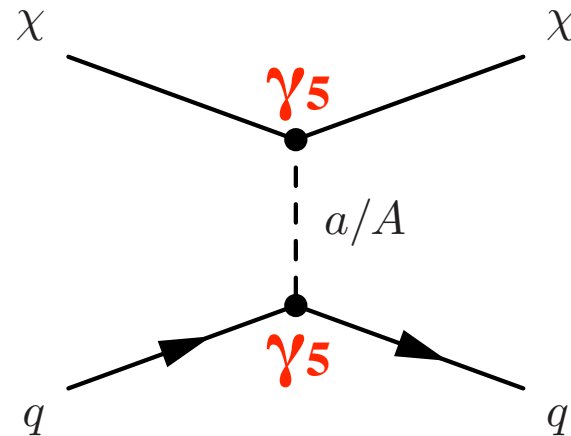
g_χ を調整することで暗黒物質のエネルギー密度を測定値に一致させる ($\Omega h^2 = 0.12$)

$$\begin{aligned}\mathcal{L} \supset & + \frac{1}{2} \bar{\chi} (i \not{\partial} - m_\chi) \chi + \frac{g_\chi}{2} a_0 \bar{\chi} i \gamma^5 \chi \\ & + \frac{1}{2} \partial^\mu a_0 \partial_\mu a_0 - \frac{m_{a_0}^2}{2} a_0^2 - \frac{\lambda_a}{4} a_0^4 \\ & - \kappa \left(i a_0 H_1^\dagger H_2 + (h.c.) \right) - c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 - c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2\end{aligned}$$

c_1 と c_2 はこの後のトークで重要

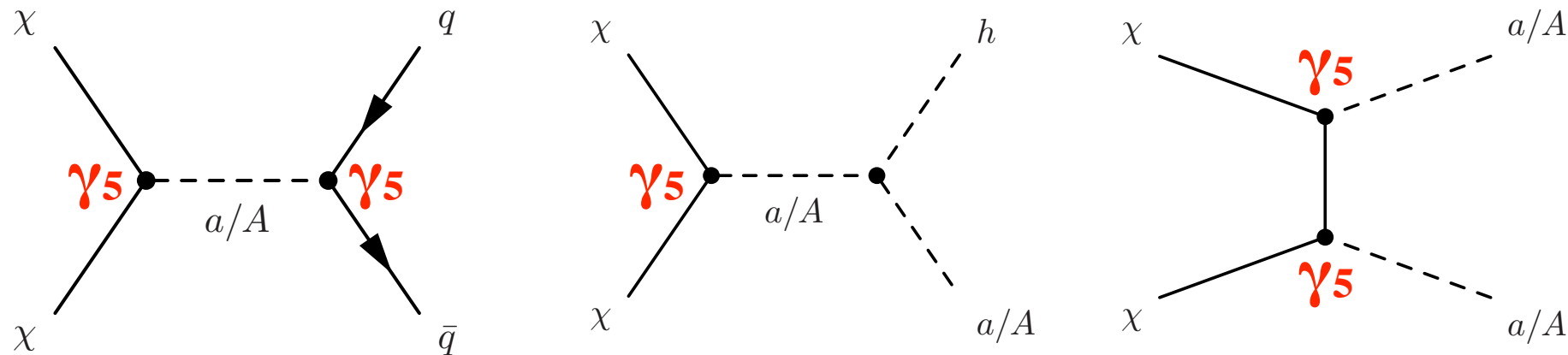
ツリーレベル

直接検出実験



- 運動量移行で抑制
- $\sigma_{\text{SI}} \sim 0$
- Xenon1T からの制限を逃れられる

暗黒物質のエネルギー密度

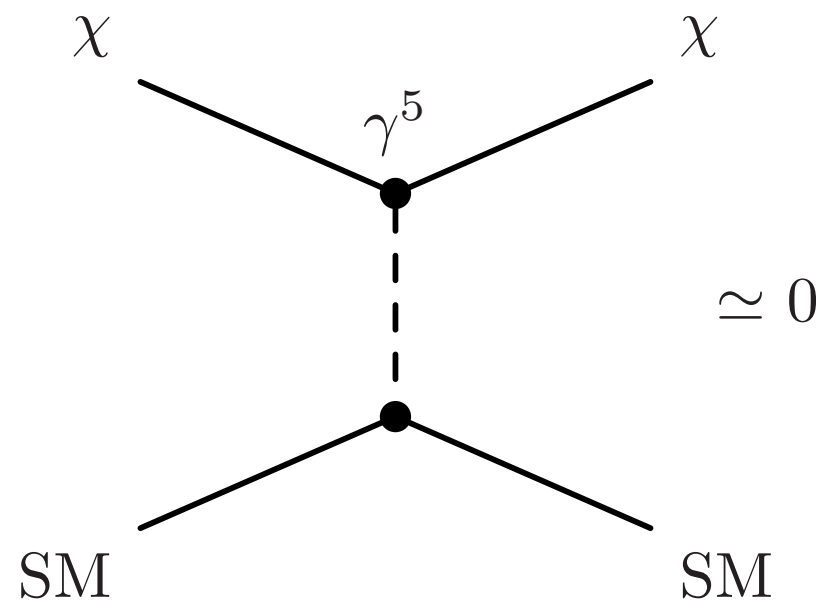


+ more

- 対消滅過程は抑制されない
- freeze out mechanism で暗黒物質のエネルギー密度を説明可能

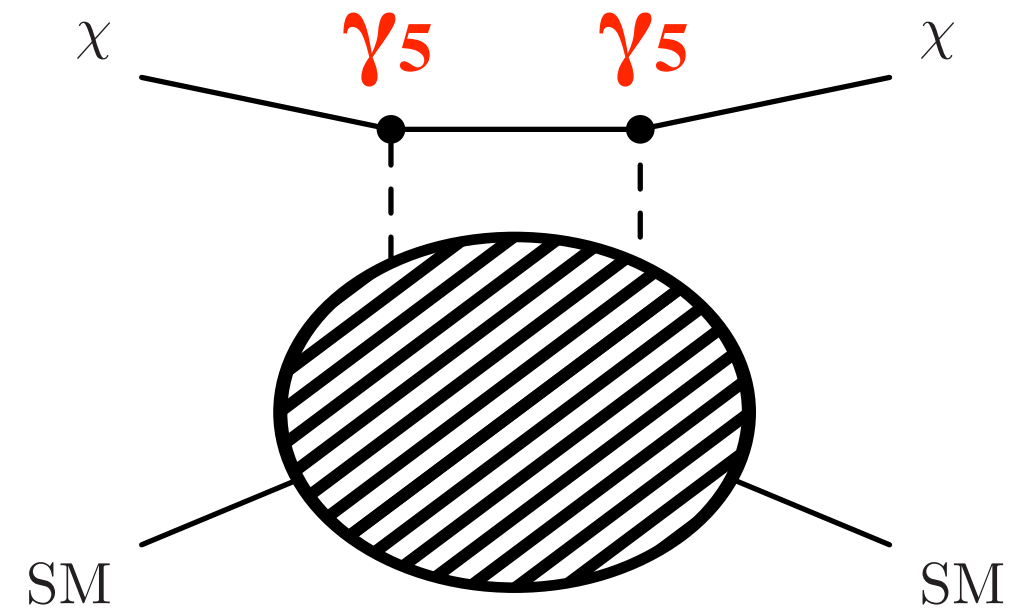
ループ補正が重要

ツリーレベルでは $\sigma_{\text{SI}} = 0$



$$(\bar{\chi}\gamma^5\chi)\mathcal{O}_{\text{SM}}$$

ループ補正を入れると $\sigma_{\text{SI}} > 0$



$$(\bar{\chi}\chi)\mathcal{O}_{\text{SM}}$$

$$(\gamma_5)^2 = 1$$

ツリーレベルで $\sigma_{\text{SI}} = 0$ となるモデルではループ補正が最低次の寄与！

もくじ

1. 導入

2. Xenon1T の制限をどう逃れるか

3. Two-Higgs doublet + a

4. ループ計算と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

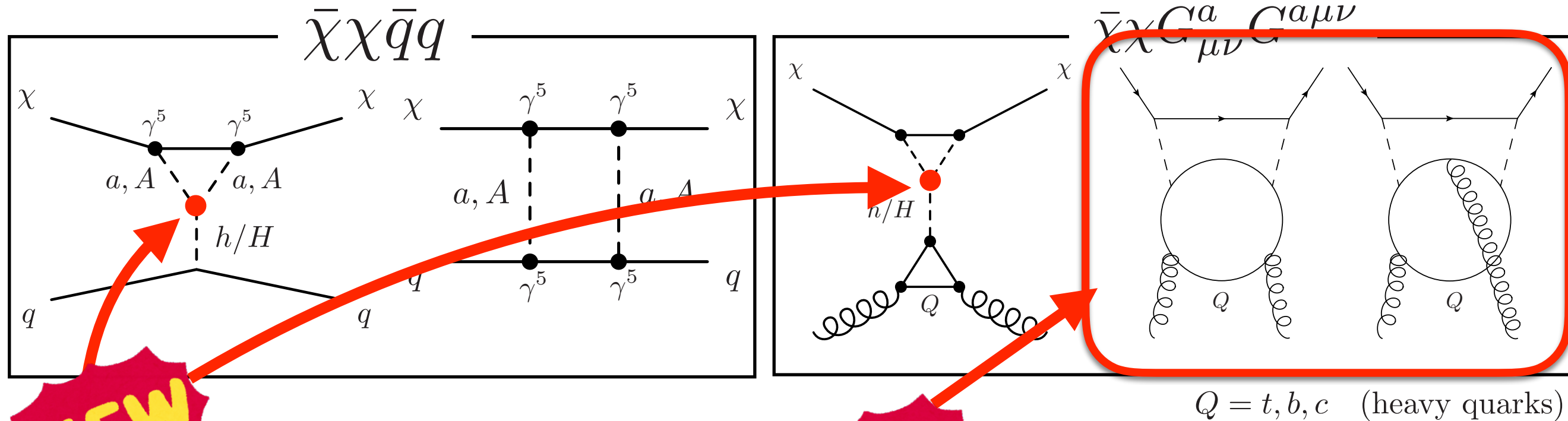
5. 電弱真空の安定性と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano Shoji (on-going)]

6. まとめ

ループ計算は不完全だった

- 計算されていないグラフがあったり、ある種の相互作用が無視されていたりした
- 我々は全部真面目に計算した



NEW

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

三角形を含むダイアグラムの計算
に **c_1 と c_2 が重要**

$$V \supset c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 + c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2$$

(多くの先行研究では $c_1 = c_2 = 0$)

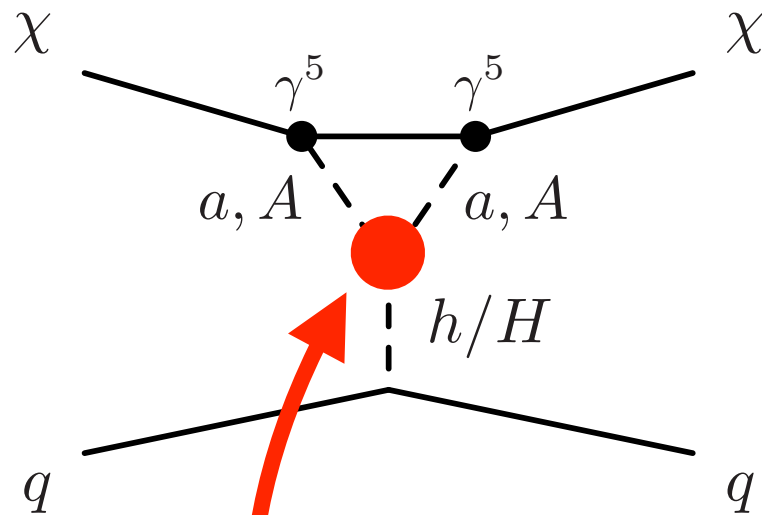
NEW

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

この two-loop diagrams を計算した

see also [Ertas, Kahlhoefer ('19)]

c₂ はスカラー三点結合に効く



The scalar cubic couplings for $s_{\beta-\alpha} = 1$ and $M = m_A = m_H = m_{H^\pm}$

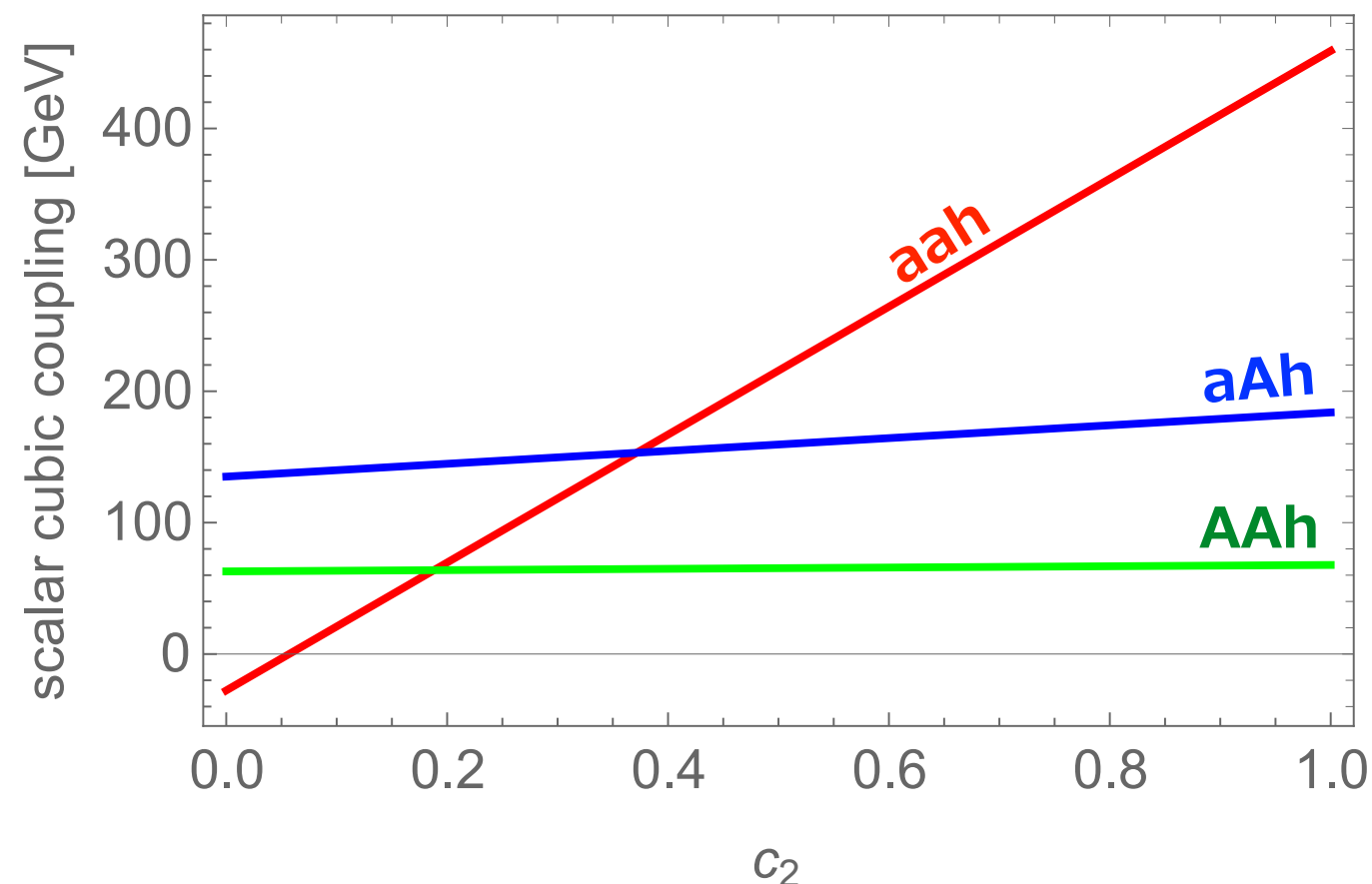
$$g_{aah} = s_\theta^2 \left(\frac{2m_a^2 + m_h^2 - 2m_A^2}{v} \right) + 2vc_\theta^2 \left(\frac{c_1 + c_2 t_\beta^2}{1 + t_\beta^2} \right),$$

$$g_{aAh} = s_\theta c_\theta v \left(\frac{m_A^2 - m_a^2 - m_h^2}{v^2} + 2 \frac{c_1 + c_2 t_\beta^2}{1 + t_\beta^2} \right),$$

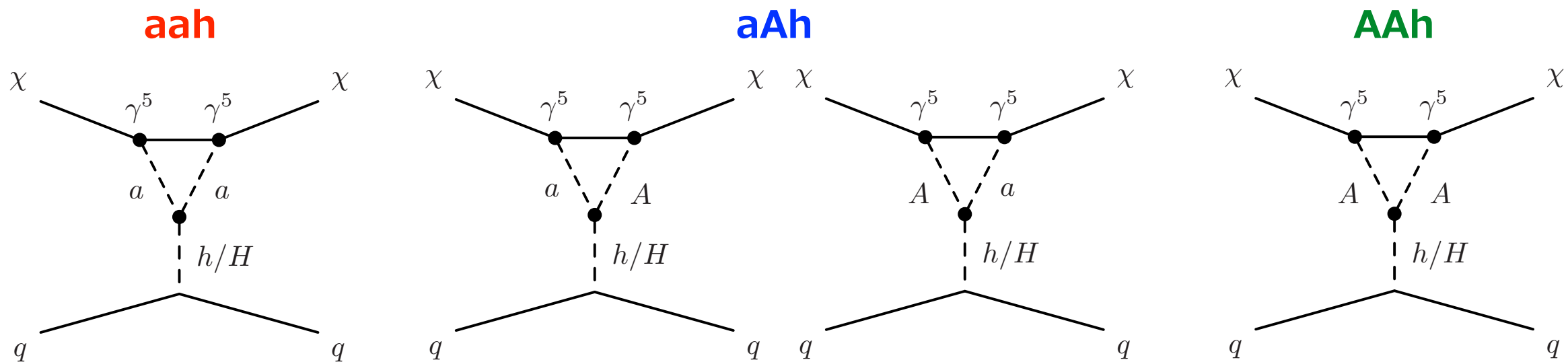
$$g_{AAh} = \frac{m_h^2 c_\theta^2}{v} + 2vs_\theta^2 \frac{c_1 + c_2 t_\beta^2}{1 + t_\beta^2},$$

$$m_a = 100 \text{ GeV}, m_A = m_H = m_{H^\pm} = 600 \text{ GeV}$$

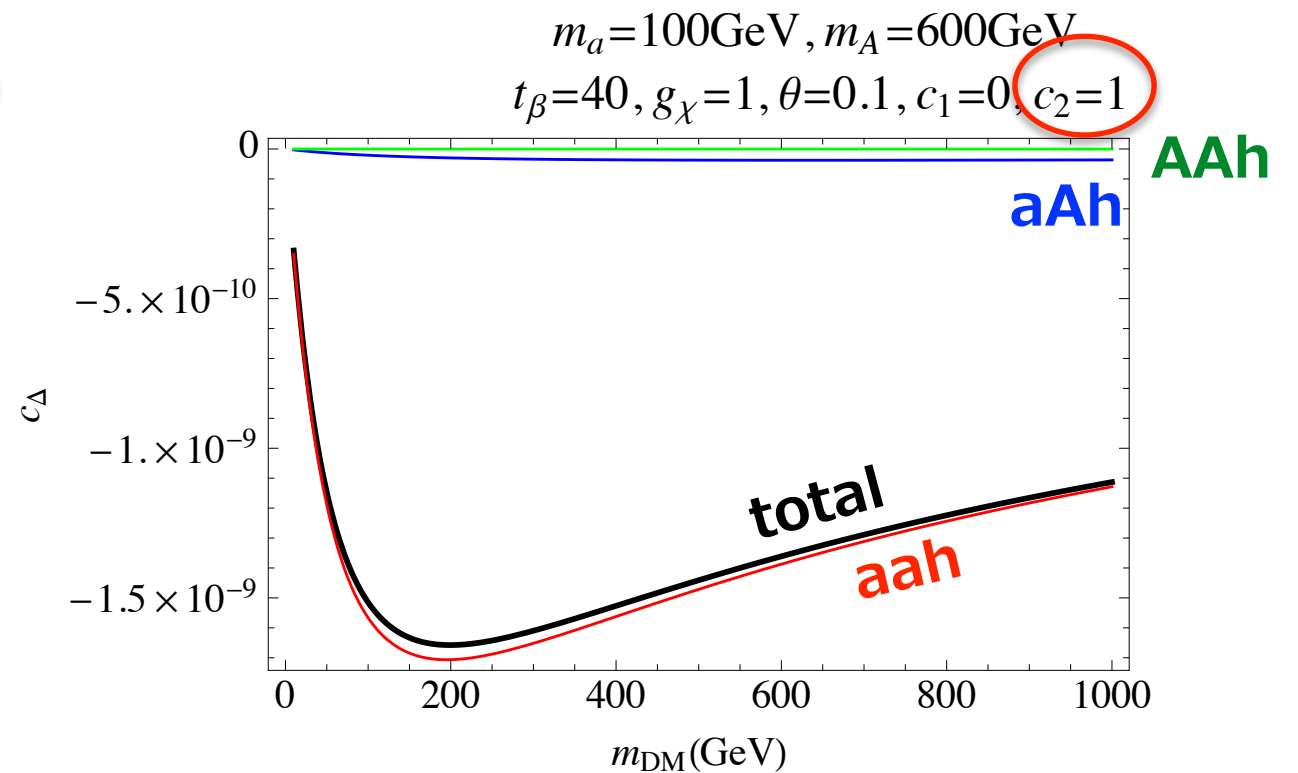
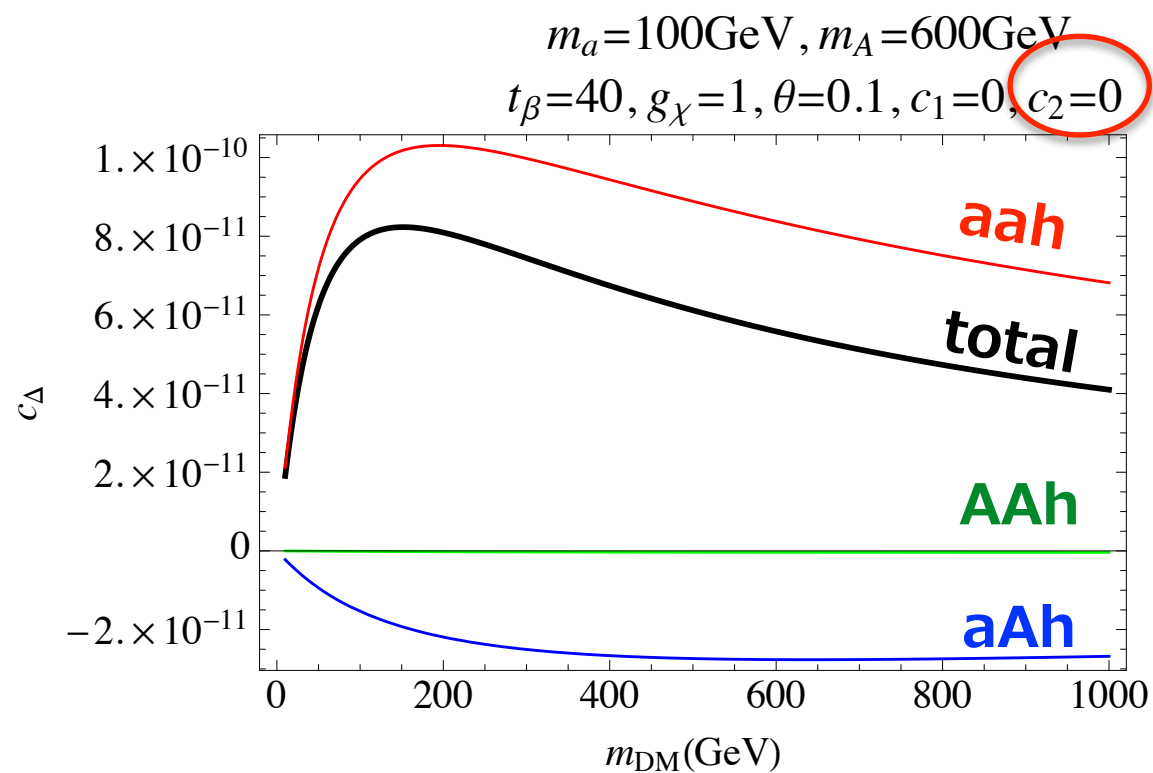
$$t_\beta = 40, \theta = 0.1$$



I-loop への c_2 の影響

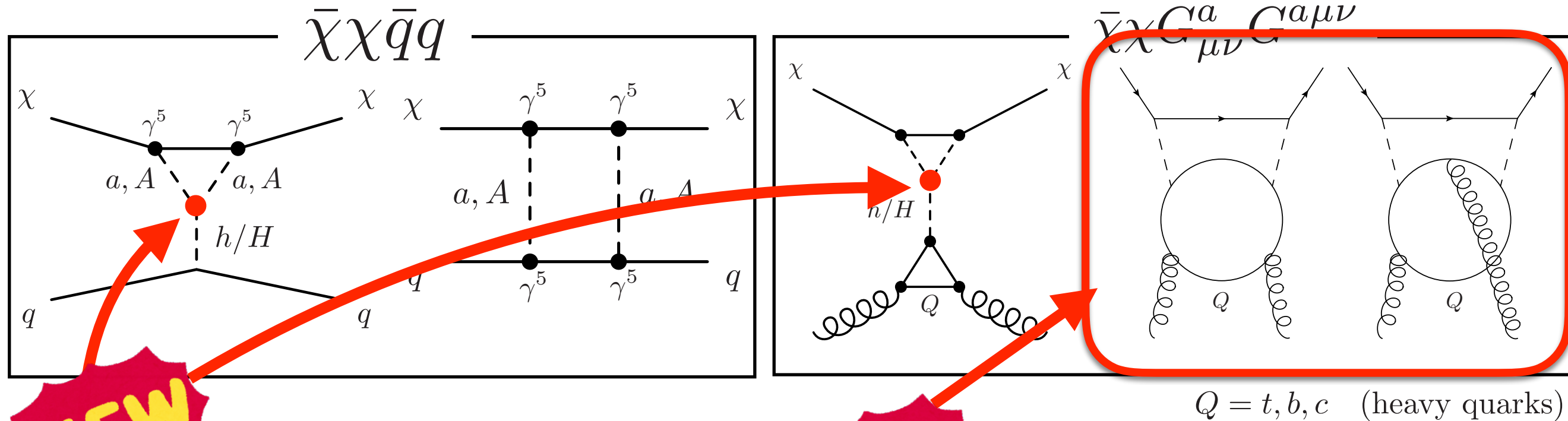


we calculate $\frac{c_\Delta}{2} \bar{\chi} \chi (m_q \bar{q} q)$



ループ計算は不完全だった

- 計算されていないグラフがあったり、ある種の相互作用が無視されていたりした
- 我々は全部真面目に計算した



NEW

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

三角形を含むダイアグラムの計算
に **c_1 と c_2 が重要**

$$V \supset c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 + c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2$$

(多くの先行研究では $c_1 = c_2 = 0$)

NEW

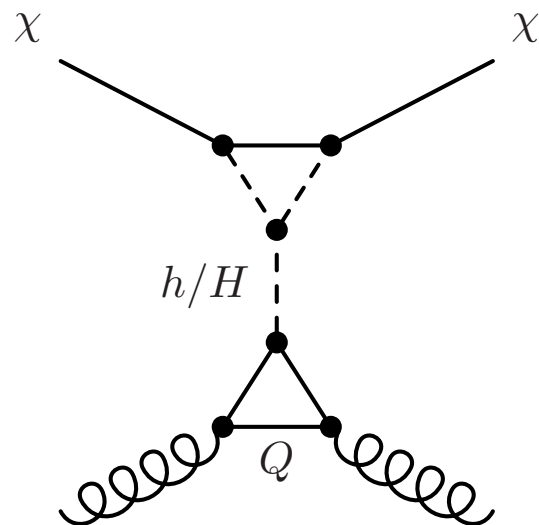
[TA Fujiwara Hisano ('19)]

この two-loop diagrams を計算した

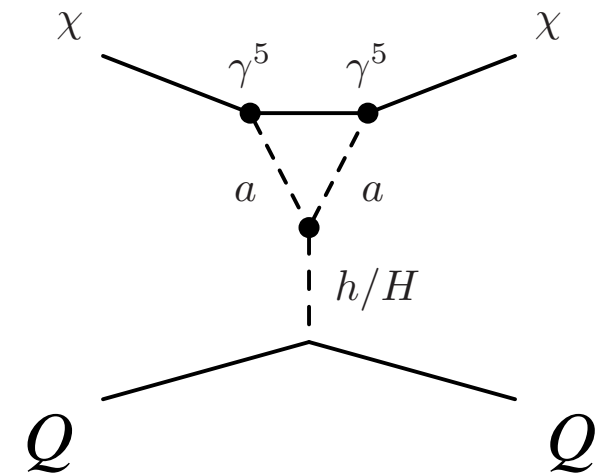
see also [Ertas, Kahlhoefer ('19)]

2 ループ計算

- 三角形を含む図の計算は簡単だしよく知られている



$$\bar{\chi}\chi G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

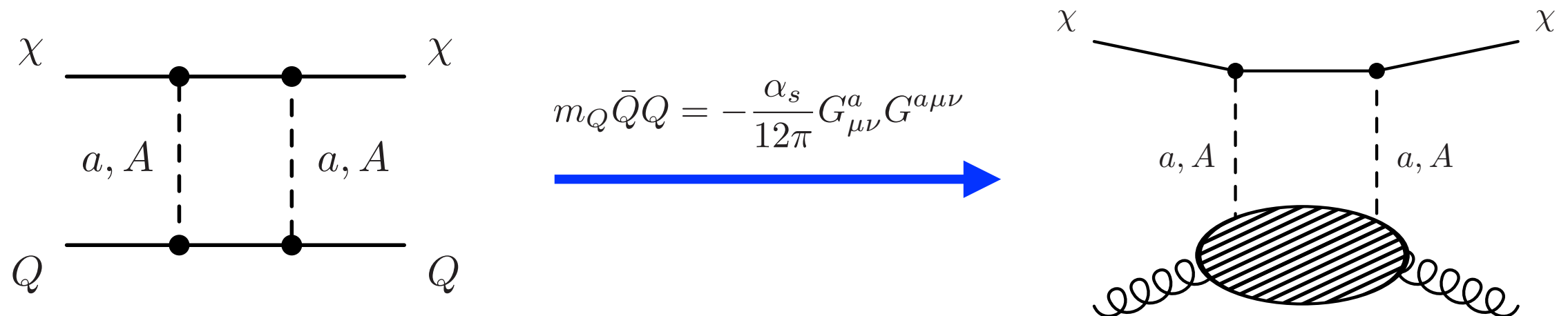


$$\bar{\chi}\chi\bar{Q}Q$$

$$m_Q\bar{Q}Q = -\frac{\alpha_s}{12\pi}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

Our work (1) : two-loop calc for box-gluon

this replacement cannot be justified but used in [Arcadi et. al (2018)]



2-loop diagrams should be calculated!

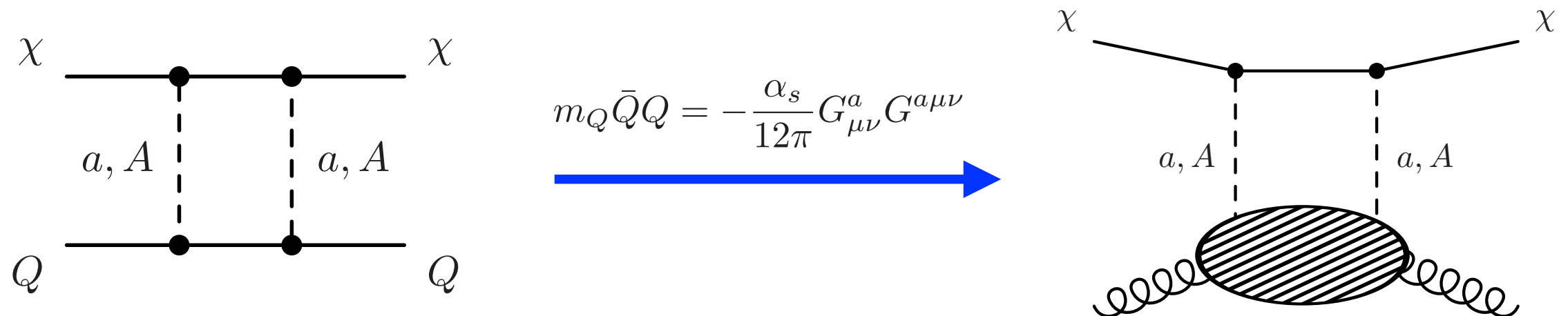
[Arcadi et. al (2018)]

This procedure is justified if the loop that generates the four-fermion interaction and the loop that relates the quarks to the gluon-condensate factorize. While this assumption is reasonable for heavy new physics which can be integrated out at energies above the top mass, it is not fully appropriate in the scenario under scrutiny here since we are interested in $m_a < m_t$. In this case, the correct top mass dependence of the effective dark matter gluon interaction is only recovered by a two-loop computation of the effective dark matter gluon interaction [57] which is beyond the scope of this work.

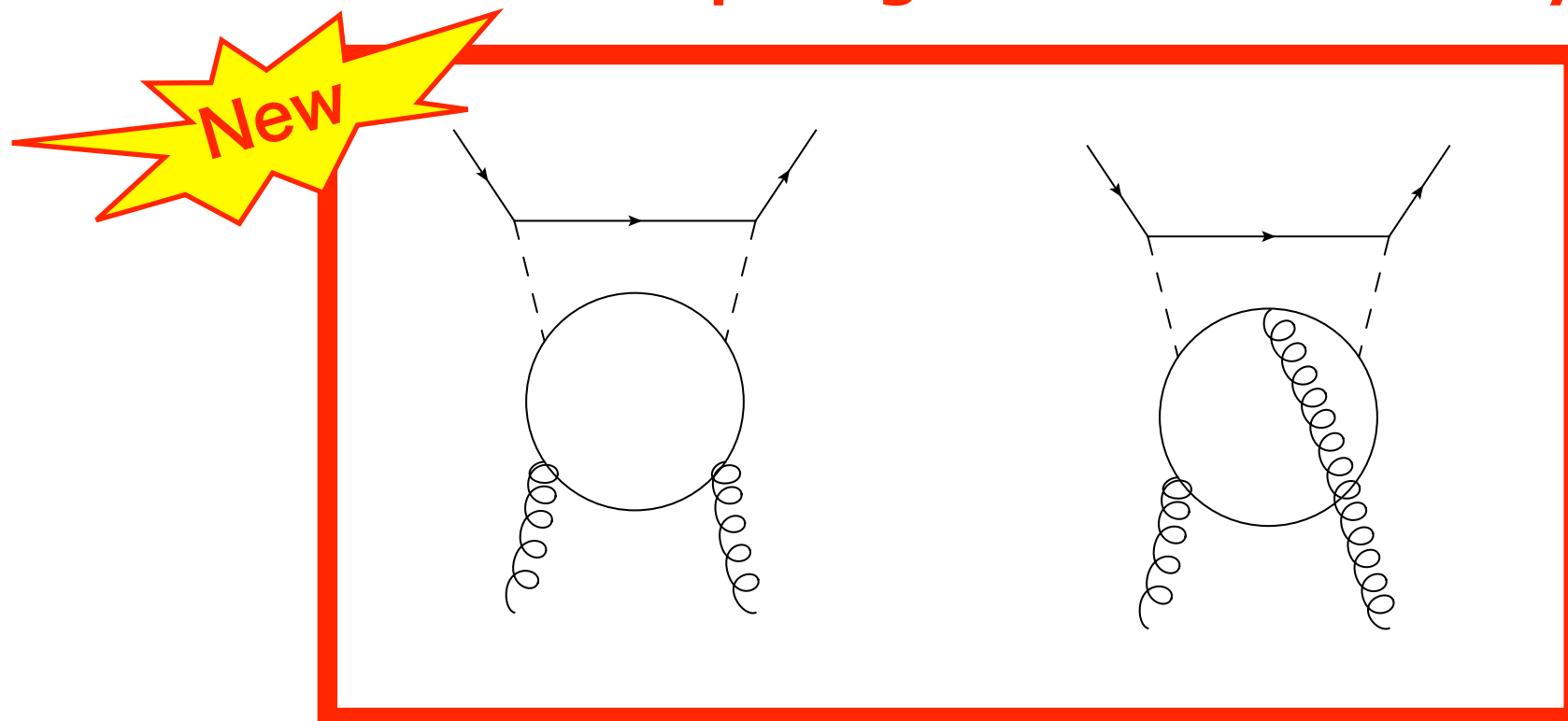
two-loop computation is the scope of our work

Our work (1) : two-loop calc for box-gluon

this replacement cannot be justified but used in [Arcadi et. al (2018)]



We calculate full two-loop diagrams for the box type diagrams

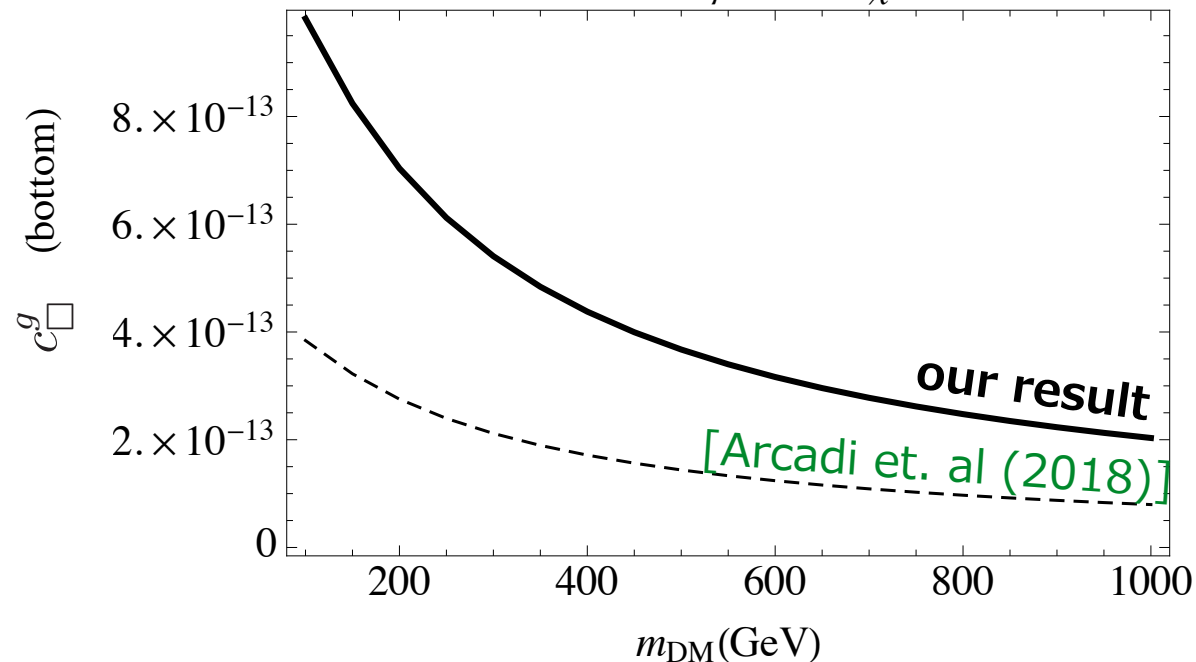


Comparison with the previous works

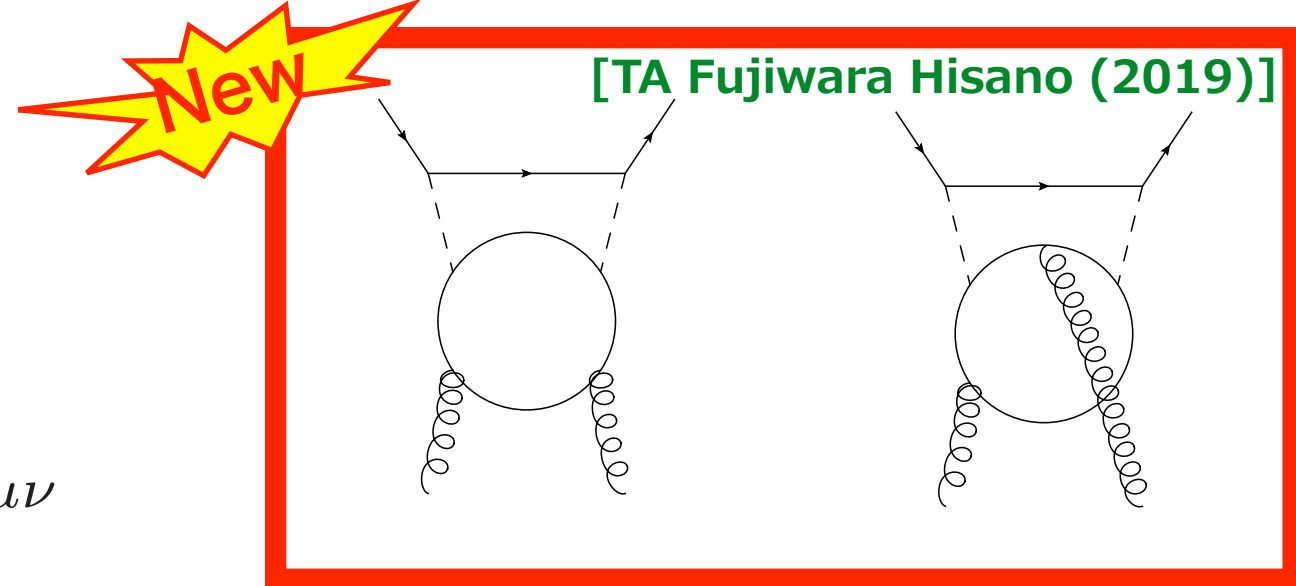
$$\mathcal{L}_{eff.} \supset -\frac{9\alpha_s}{8\pi} c_{\square}^g \bar{\chi}\chi G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

$$m_a=100\text{GeV}, m_A=600\text{GeV}$$

$$t_\beta=40, g_\chi=1, \theta=0.1$$

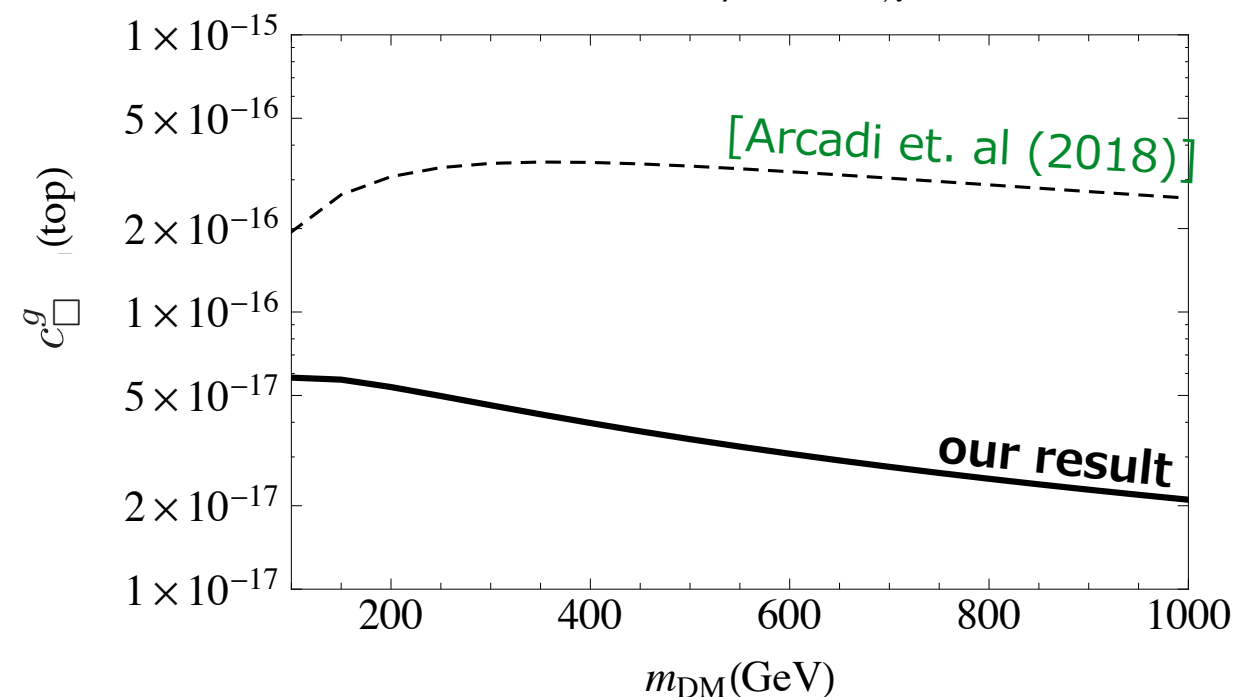


The bottom contribution is underestimated in the previous work



$$m_a=100\text{GeV}, m_A=600\text{GeV}$$

$$t_\beta=40, g_\chi=1, \theta=0.1$$



The top contribution is overestimated in the previous work

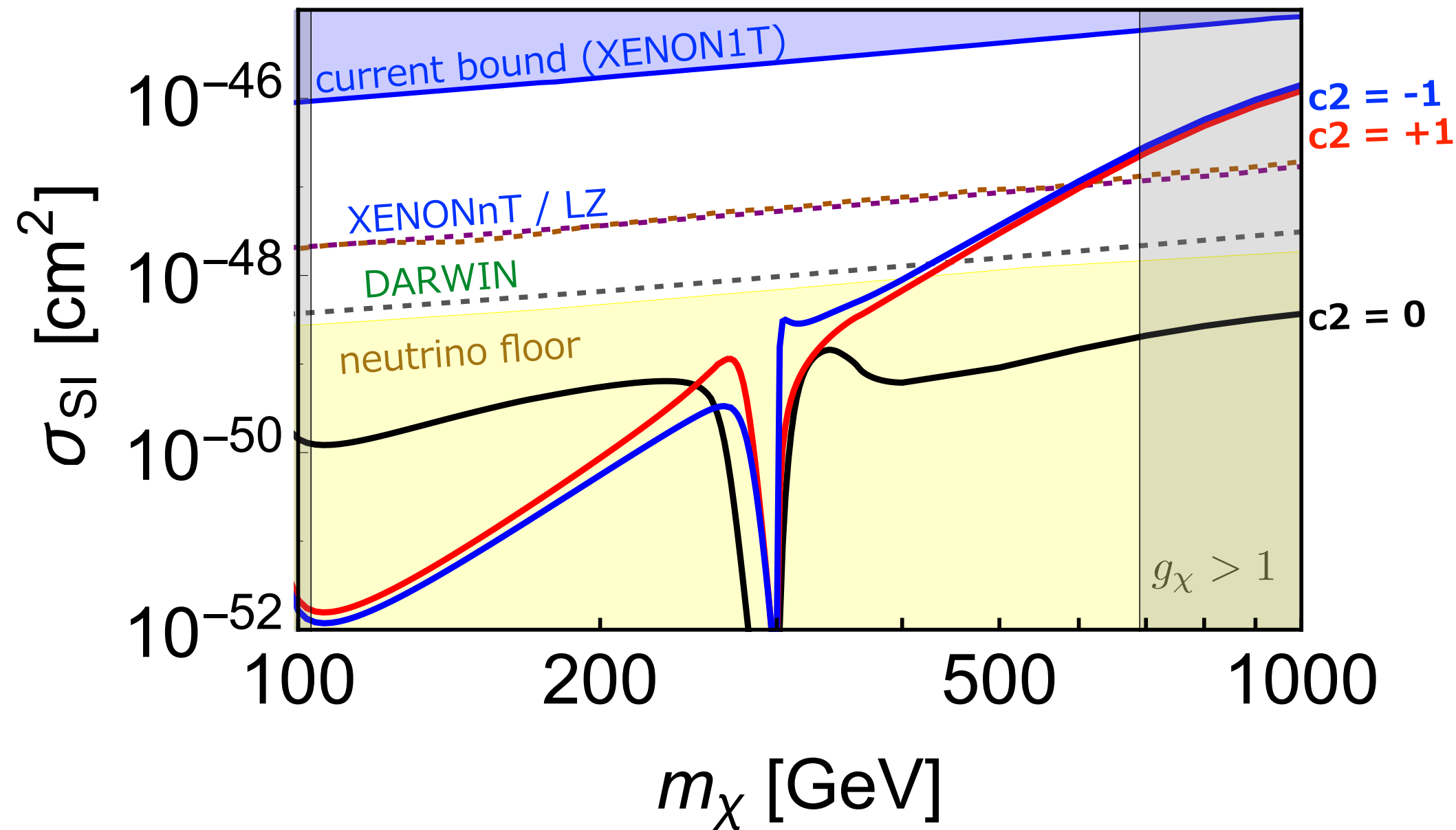
σ_{SI} の予言に C_2 が重要

$$c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 + c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2$$

$$m_a = 70 \text{ GeV}$$

$$m_A = 600 \text{ GeV},$$

$$\theta = 0.1, t_\beta = 10, c_1 = 0$$



large c_2 とスカラーポテンシャル

大きい c_2 の良し悪し

- 良い点： σ_{SI} を大きくして模型を直接検出実験での検証を可能にする
- 悪い点：ヒッグスポテンシャルをめちゃくちゃにしうる

$$\kappa(ia_0 H_1^\dagger H_2 + \text{h.c.}) + c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 + c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2$$

現在 c_1 と c_2 の上限・下限を求めています

- ポテンシャルが下から抑えられていることを要求
- 我々の真空（電弱真空）が安定であることを要求
- 摂動論的ユニタリティーを要求
- ...

もくじ

1. 導入

2. Xenon1T の制限をどう逃れるか

3. Two-Higgs doublet + a

4. ループ計算と直接検出実験

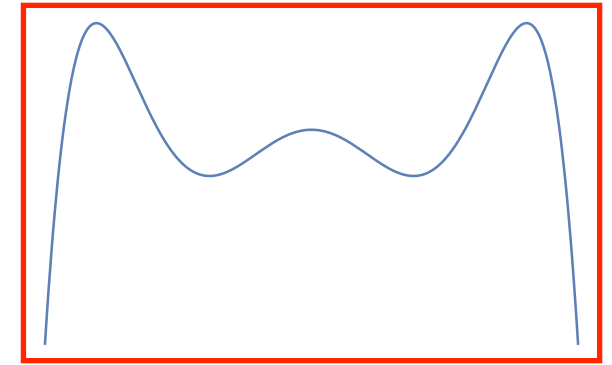
[TA Fujiwara Hisano ('19)]

5. 電弱真空の安定性と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano Shoji (on-going)]

6. まとめ

ポテンシャルが下から抑えられる条件



やり方

遠くで $V > 0$ を要求

結果

$$\lambda_1 > 0,$$

$$\lambda_2 > 0,$$

$$\lambda_a > 0,$$

$$\sqrt{\lambda_1 \lambda_2} + \lambda_3 + \min(0, \lambda_4 - |\lambda_5|) > 0,$$

$$\sqrt{\frac{\lambda_1 \lambda_a}{2}} + c_1 > 0,$$

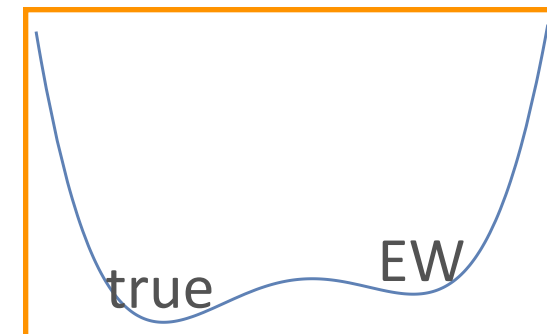
$$\sqrt{\frac{\lambda_2 \lambda_a}{2}} + c_2 > 0,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\lambda_1} c_2 + \sqrt{\lambda_2} c_1 \geq 0, \\ \text{or} \\ \sqrt{\lambda_1} c_2 + \sqrt{\lambda_2} c_1 < 0 \text{ and } \frac{\lambda_a \tilde{\lambda}_3}{2} - c_1 c_2 + \sqrt{\left(\frac{\lambda_a \lambda_1}{2} - c_1^2\right) \left(\frac{\lambda_a \lambda_2}{2} - c_2^2\right)} > 0. \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} V|_{\text{quartic}} = & + \frac{1}{2} \lambda_1 (H_1^\dagger H_1)^2 + \frac{1}{2} \lambda_2 (H_2^\dagger H_2)^2 + \lambda_3 (H_1^\dagger H_1)(H_2^\dagger H_2) \\ & + \lambda_4 (H_1^\dagger H_2)(H_2^\dagger H_1) + \frac{1}{2} \lambda_5 \left((H_1^\dagger H_2)^2 + (h.c.) \right) \\ & + \frac{\lambda_a}{4} a_0^4 + c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 + c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2 \end{aligned}$$

These gives lower bound on c_1 and c_2

電弱真空と大局的極小値



方針

- 次が global minimum となることを要求

$$\langle a_0 \rangle = 0, \quad \langle H_j \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_j \end{pmatrix}$$

- 条件式が解析的に求められなかったなので数値的に調べる

大きい c_1 と c_2 は $\langle a_0 \rangle \neq 0$ を導く

$$m_{a_0}^2 = c_\theta^2 m_a^2 + m_A^2 s_\theta^2 - \frac{c_1 + c_2 t_\beta^2}{1 + t_\beta^2} v^2.$$

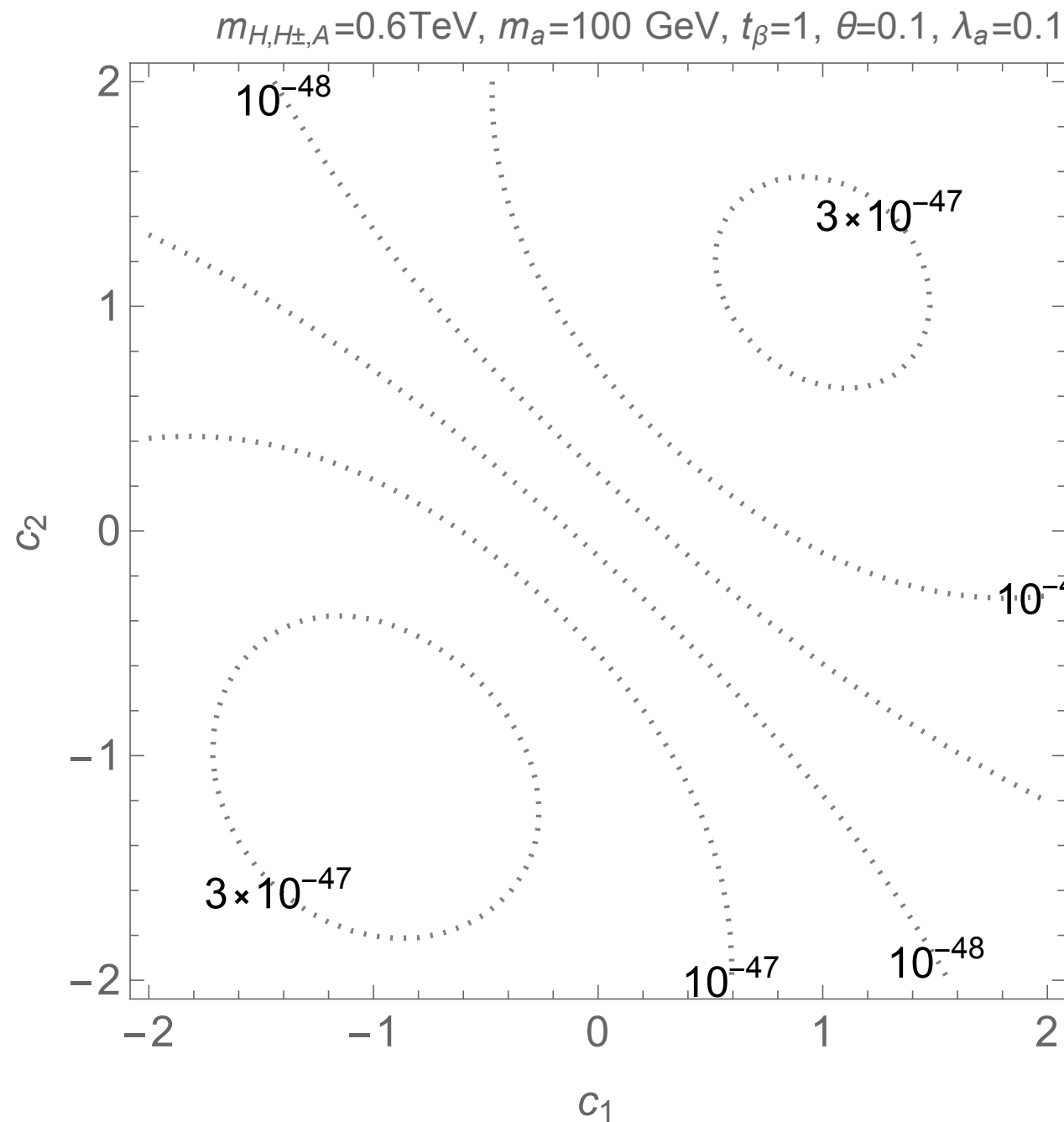
スカラーポテンシャル
の質量パラメータ
(負になれる)

粒子の質量 (正の値)

$$\begin{aligned} s_x &= \sin x \\ c_x &= \cos x \\ t_x &= \tan x \end{aligned}$$

- 大きな c_1 と c_2 は $m_{a_0}^2$ を負にする
- 負の $m_{a_0}^2$ は $\langle a_0 \rangle \neq 0$ となる真空をつくる

C_1 and C_2 vs scalar potential

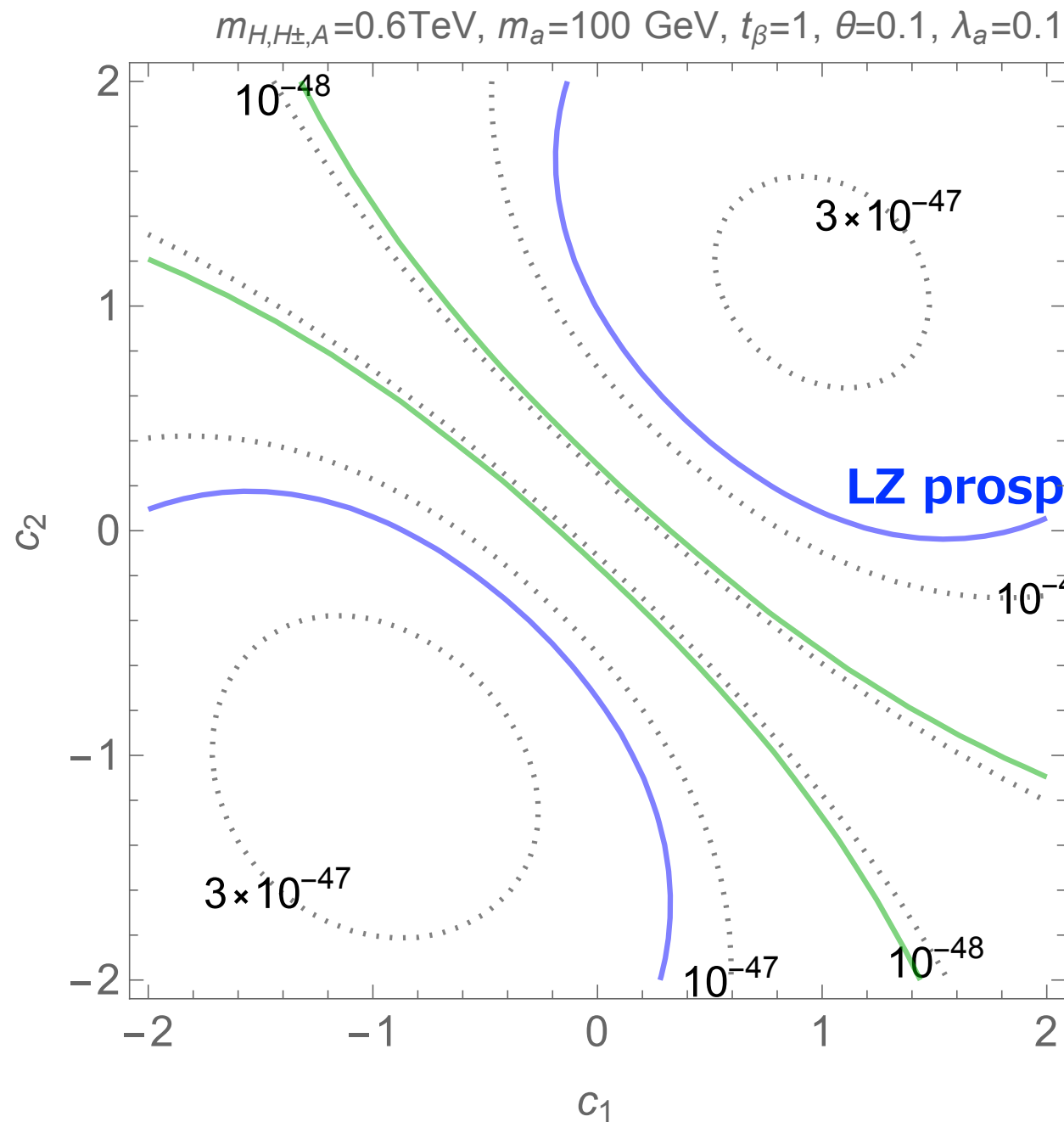


σ_{SI} [cm^2] の等高線

- σ_{SI} は大きな $|c_1|$ or $|c_2|$ のところで大きくなる
- $m_{\text{DM}} = 800\text{ GeV}$
- $\Omega h^2 = 0.12$ は g_X の調整で実現
- この平面上では $\sigma_{\text{SI}} < 3.9 \times 10^{-47}\text{ cm}^2$
- $\sigma_{\text{SI}} < 6.9 \times 10^{-46}\text{ cm}^2$ (Xenon1T)

[Preliminary]

large C_1 and C_2 vs scalar potential



$\sigma_{\text{SI}} [\text{cm}^2]$ の等高線

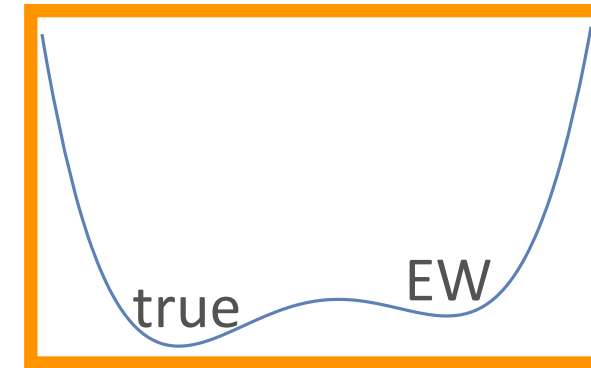
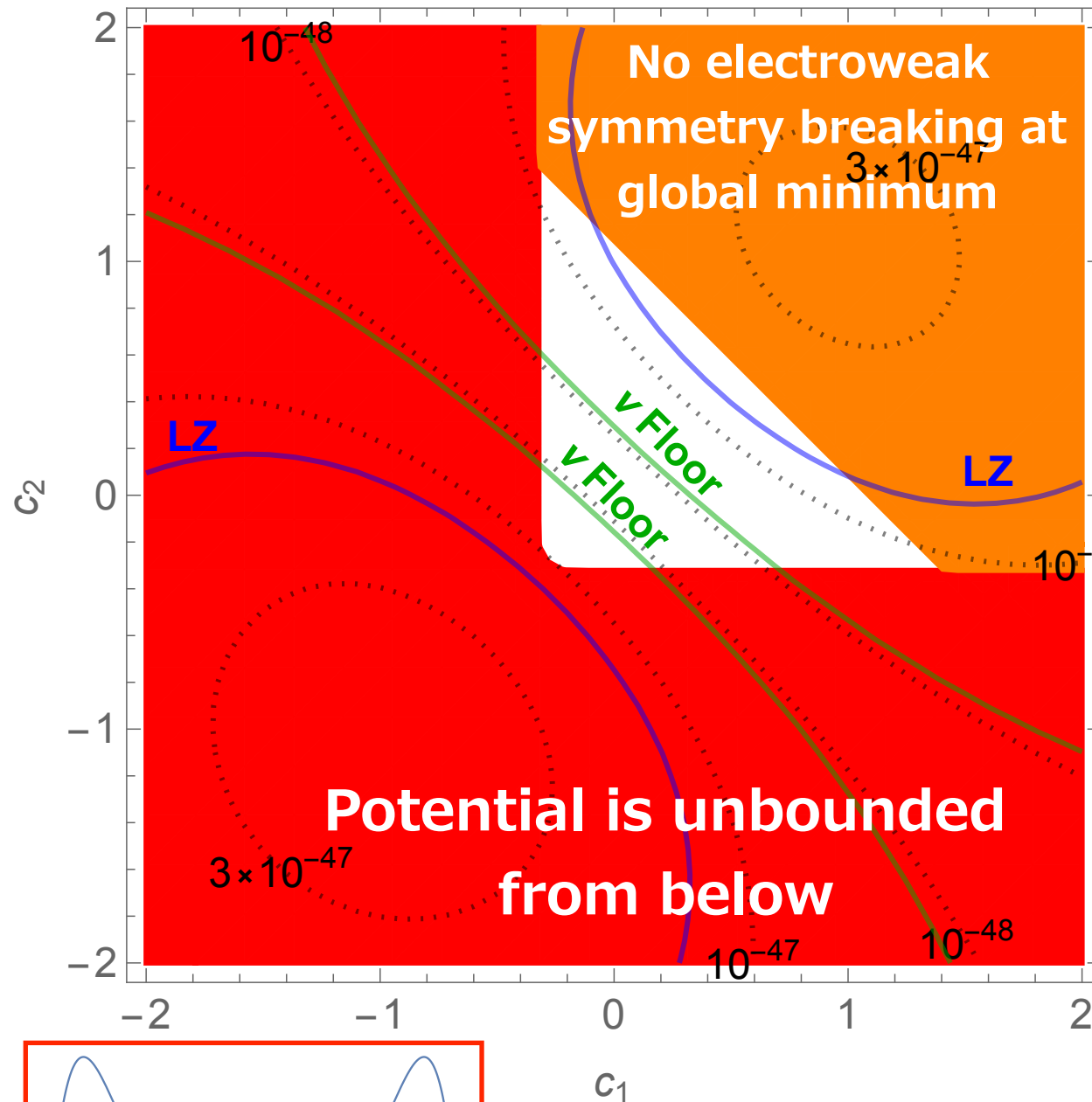
- σ_{SI} は大きな $|c_1|$ or $|c_2|$ のところで大きくなる
- $m_{\text{DM}} = 800\text{ GeV}$
- $\Omega h^2 = 0.12$ は g_X の調整で実現
- この平面上では $\sigma_{\text{SI}} < 3.9 \times 10^{-47}\text{ cm}^2$
- $\sigma_{\text{SI}} < 6.9 \times 10^{-46}\text{ cm}^2$ (Xenon1T)

neutrino floor

[Preliminary]

large C_1 and C_2 vs scalar potential

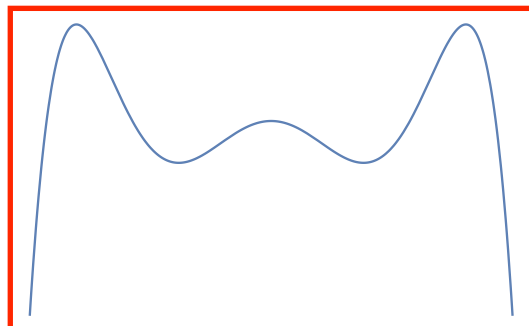
$m_{\text{DM}}=800$ GeV, $m_{H,H^\pm,A}=600$ GeV, $m_a=100$ GeV, $t_\beta=1$, $\theta=0.1$, $\lambda_a=1$



upper bound on c_1 and c_2

理論からの制限が c_1 と c_2 に上限・加減を与える

- σ_{SI} の最大値は LZ prospect のちょっと上
- DM のシグナルが近い将来に見える可能性は残されている



lower bound on c_1 and c_2

もくじ

1. 導入

2. Xenon1T の制限をどう逃れるか

3. Two-Higgs doublet + a

4. ループ計算と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano ('19)]

5. 電弱真空の安定性と直接検出実験

[TA Fujiwara Hisano Shoji (on-going)]

6. まとめ

まとめ

two-Higgs doublet model + fermion DM + a_0

- freeze-out mechanism works
- σ_{SI} is suppressed at the tree level
- loop calculation is needed

We complete loop calculations

- the effect of quartic couplings (c_1 and c_2) are important

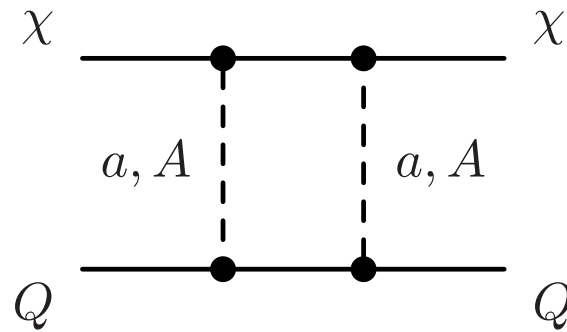
$$c_1 a_0^2 H_1^\dagger H_1 + c_2 a_0^2 H_2^\dagger H_2$$

We are trying to find upper/lower bounds on c_1 and c_2

- large c_1 and c_2 make σ_{SI} large
- too large c_1 and c_2 predicts electroweak symmetry is not broken at the global minimum
- potential is unbounded if c_1 and c_2 are negative

yet another reason why it is not justified

even if $m_Q < m_a$, we miss some two-loop diagrams



$$m_Q \bar{Q}Q = -\frac{\alpha_s}{12\pi} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

We cannot obtain

