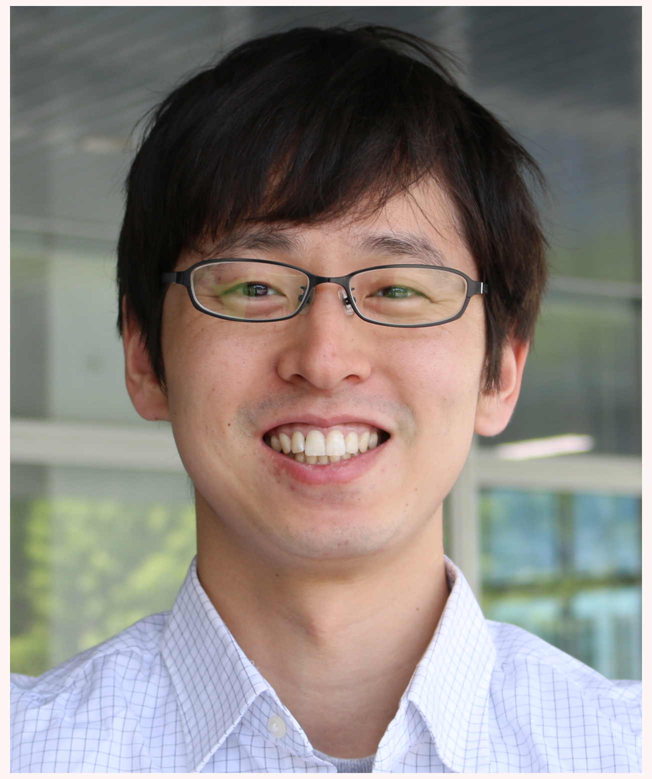
標準模型粒子との散乱が抑制される熱的暗黒物質模型

阿部智広 (東京理科大学)
濱田祐 (KEK)

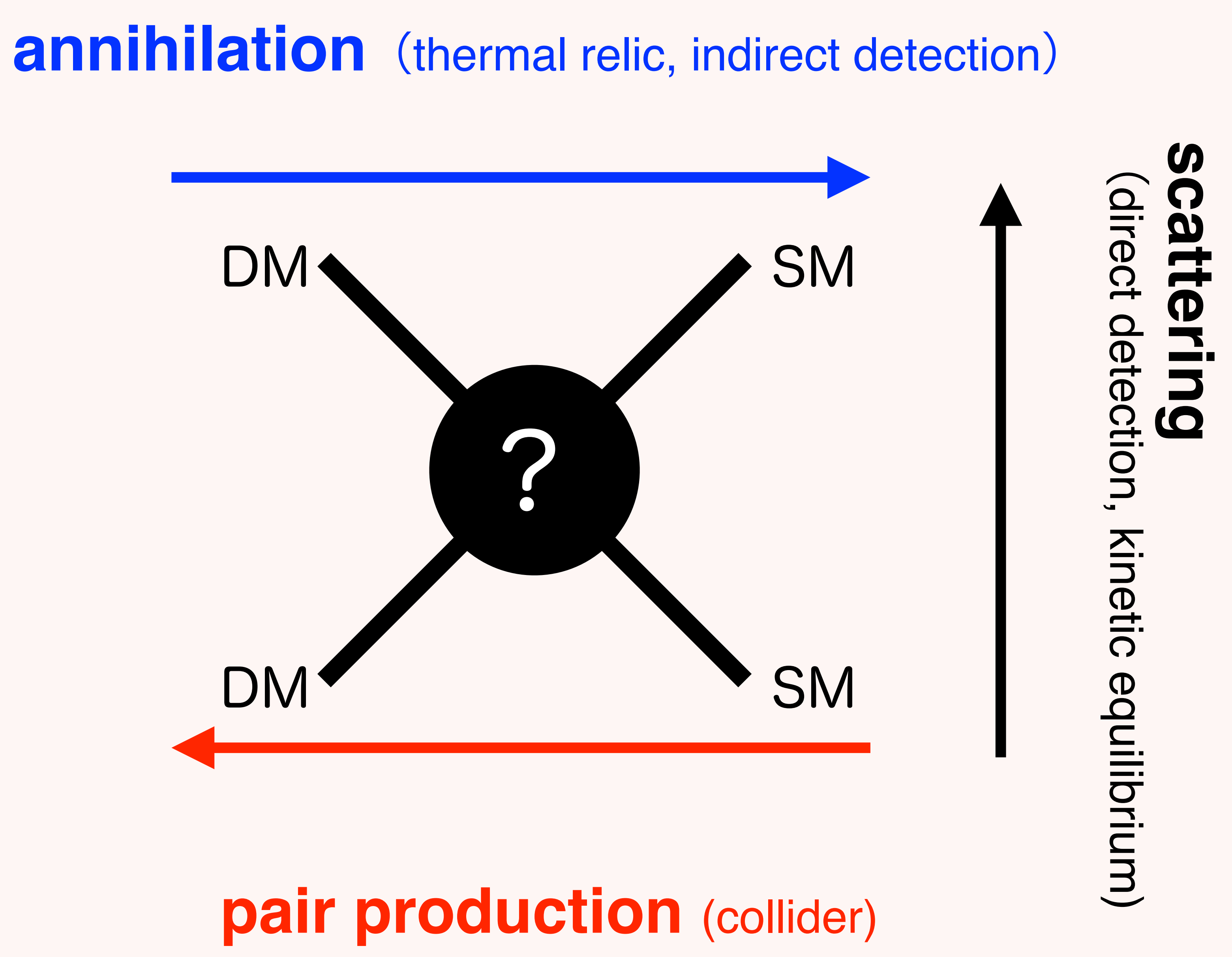
arXiv:2205.11919
published in PTEP



WIMP (or thermal DM)

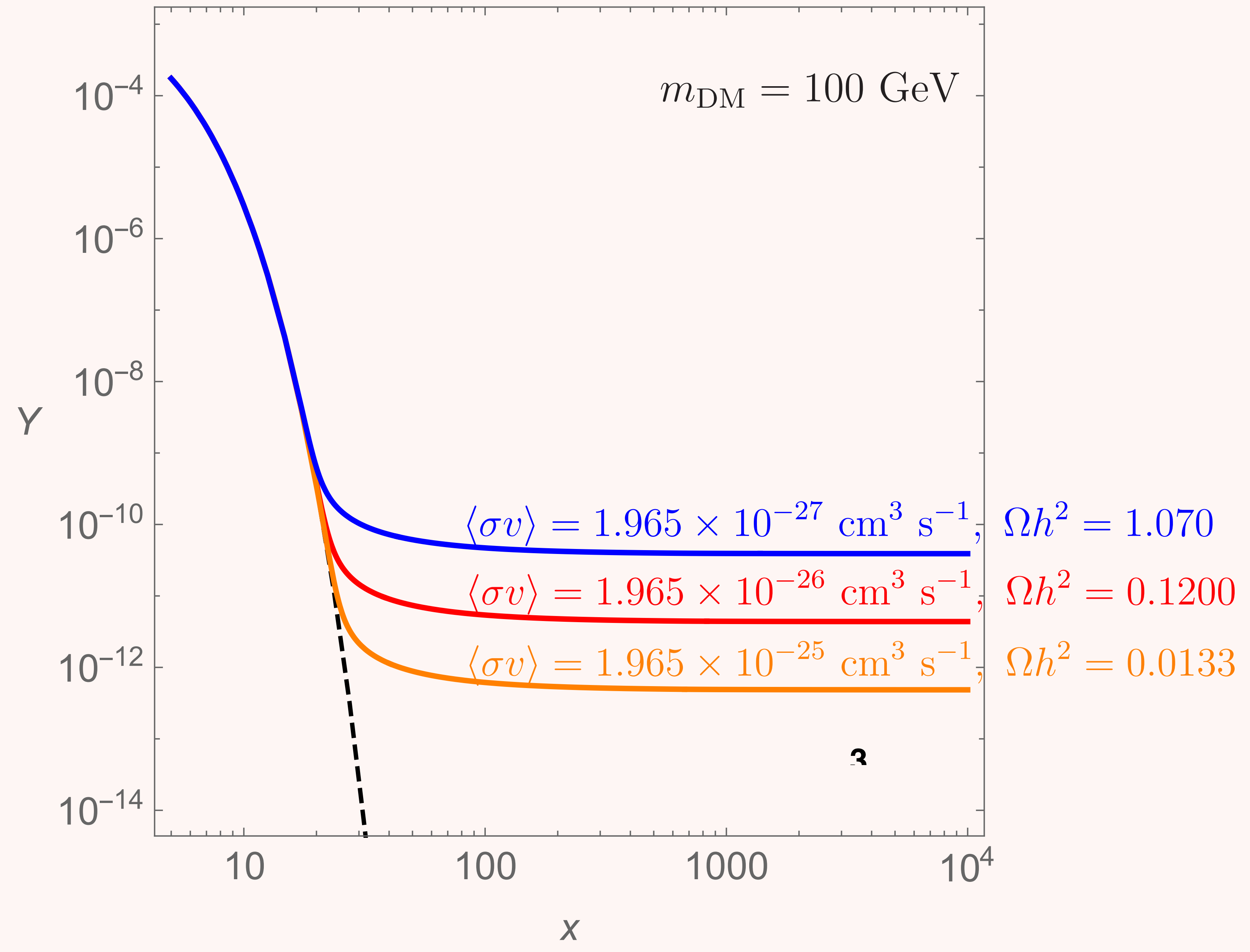
WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)

- 標準模型と何らか弱く相互作用する
- 凍結機構でエネルギー密度が説明される
- 様々な相関があって検証可能性が高いのが魅力

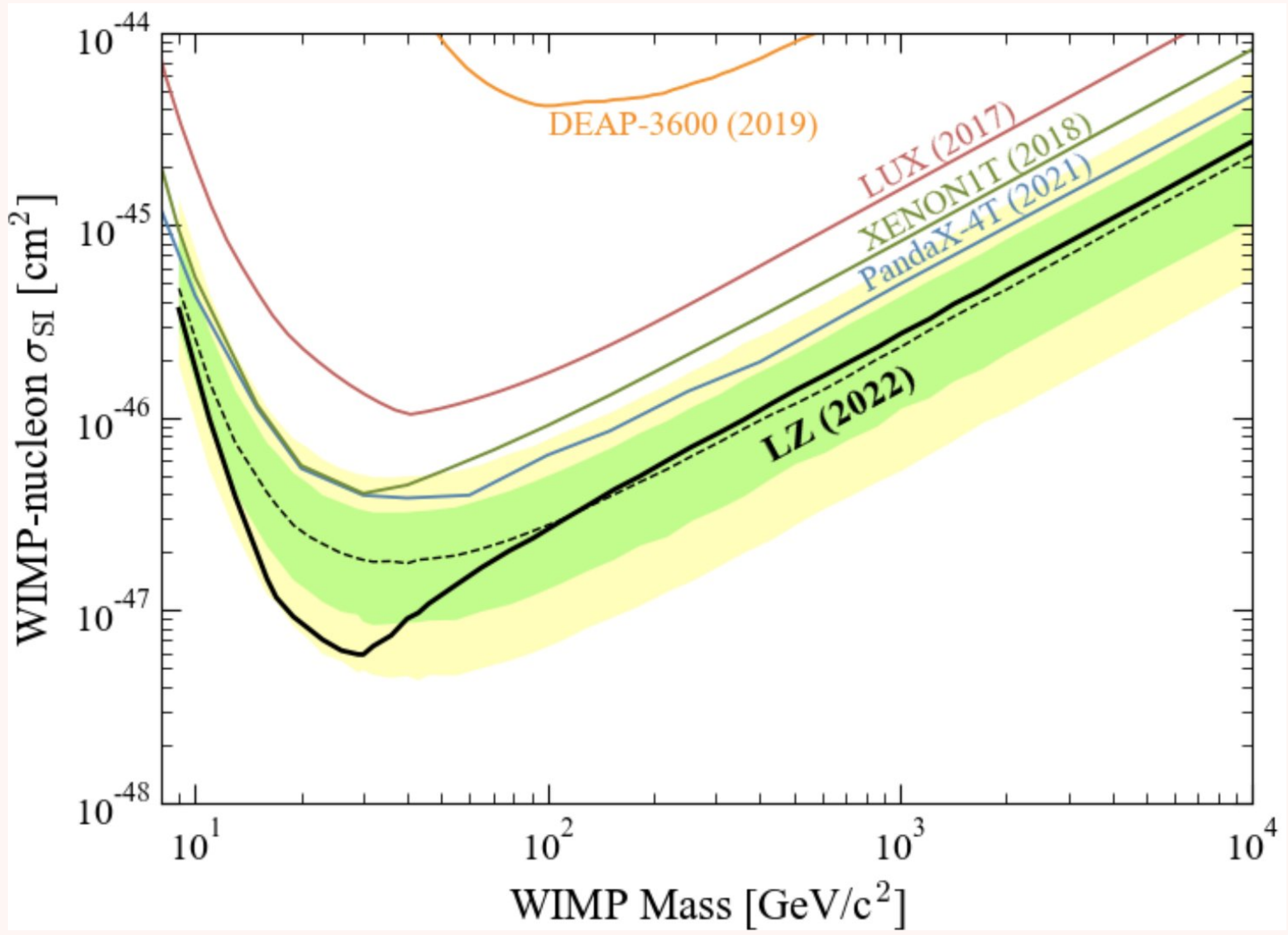


We have to

DMのSMへの対消滅は維持したい
($\langle\sigma v\rangle$ = 10^{-26} cm^3/s)

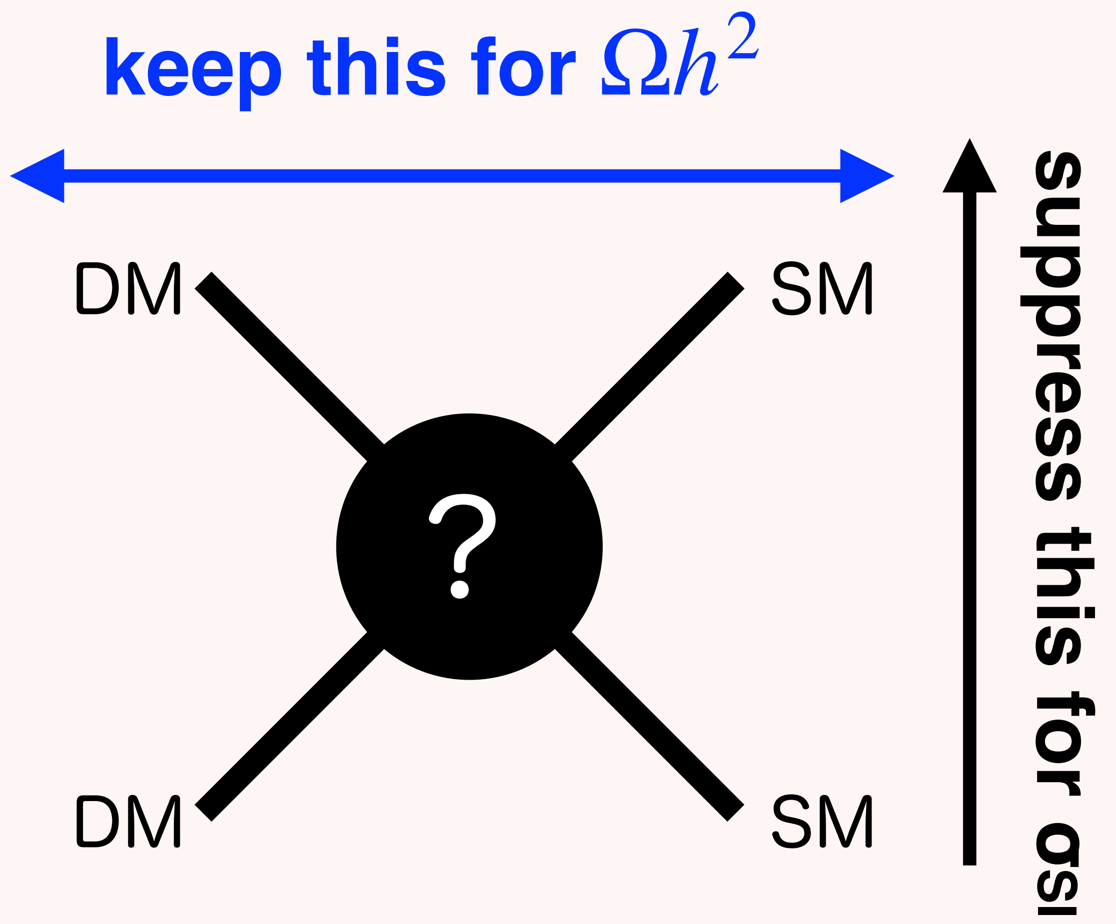


DM-SM散乱は抑制しないといけない
($\sigma_{SI} \ll O(10^{-46})$ cm^2)

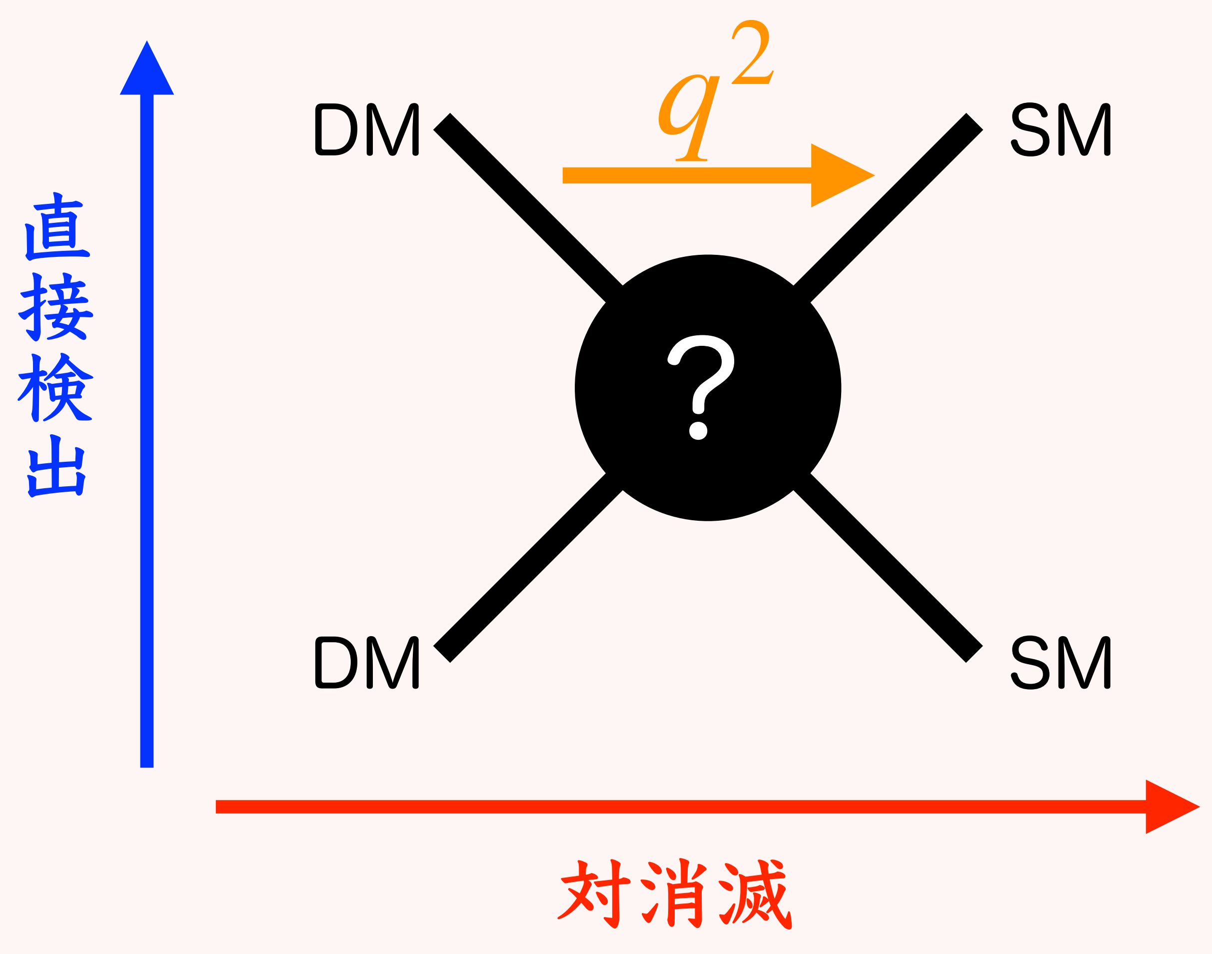


[LZ ('21)]

素朴には両立しないので何かアイデアが必要



振幅が運動量依存するなら



$\simeq q^2$

- $t = q^2 \simeq 0$ @直接検出実験
- $s = q^2 \simeq 4m_\chi^2$ @DMの対消滅

振幅が運動量依存するなら

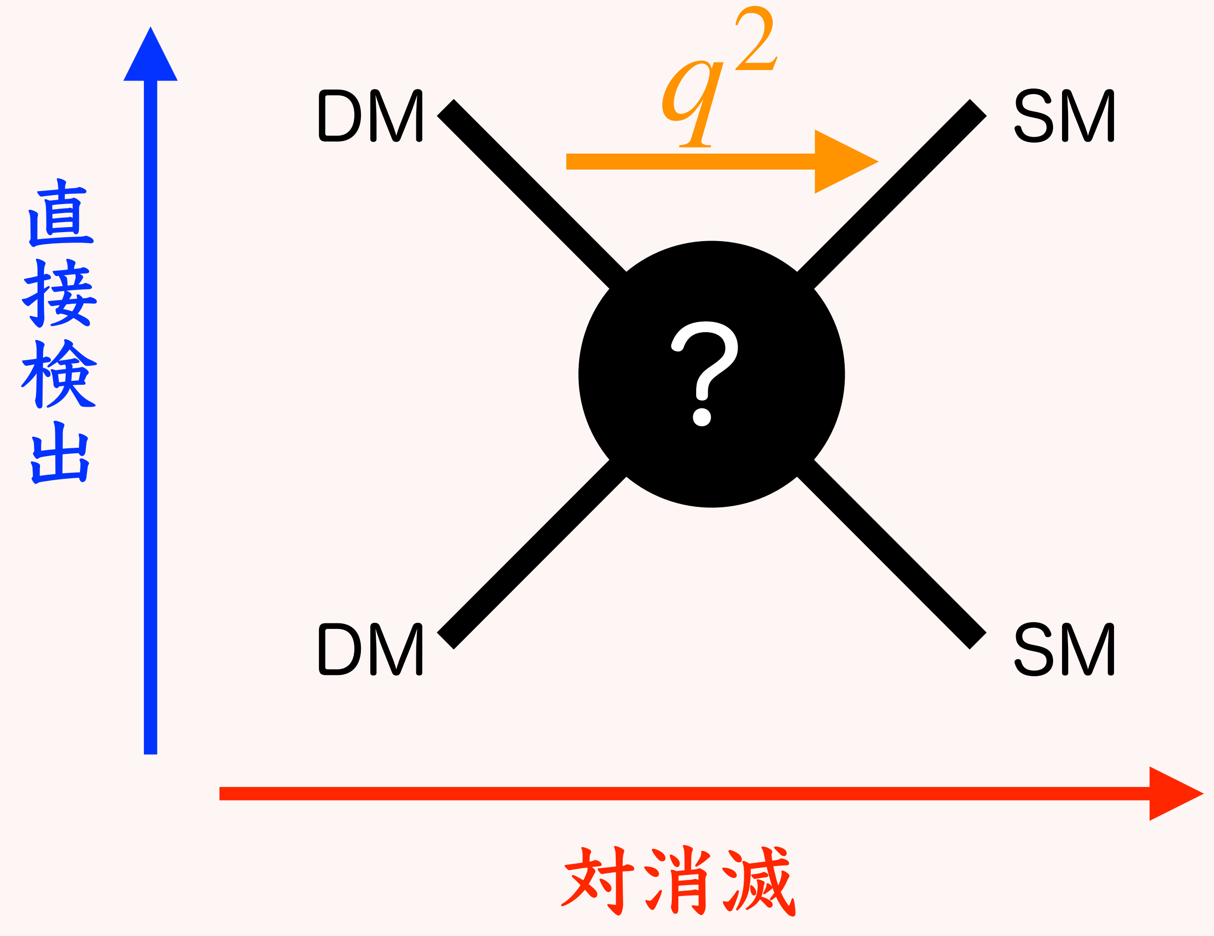
- DM-SM散乱（直接検出）の断面積は消える
- 対消滅断面積は残る

➡ 凍結機構を使いつつ直接検出実験の結果を説明可能

擬南部ゴールドストンDM

擬南部ゴールドストン暗黒物質 (pNG DM) [Gross-Lebedev-Toma ('17)]

- NGボソンは散乱振幅が運動量の2乗に比例する
- 対称性を破る項を入れて質量を与える
- 次元２の項で対称性を破るなら直接実験は抑制される



$\simeq q^2$

- $t = q^2 \simeq 0$ @直接検出実験
- $s = q^2 \simeq 4m_\chi^2$ @DMの対消滅

先行研究

SM + a gauge singlet complex scalar (S) [Gross-Lebedev-Toma ('17)]

- $U(1)_{\rm global}$ を要求 ($S \to e^{i\theta} S$, SMは singlet)
- $U(1)_{\rm global}$ の自発的破れで NG boson（$S = v_s + \sigma + i\chi$ の χ ）
- $U(1)_{\rm global}$ を explicit に破る項 (S^2+h.c) を入れておいて pNG にする
- $S \to S^\dagger$ を仮定 (dark sector の CPを仮定)
    - $\sigma \to \sigma, \chi \to -\chi$ となるので χ が安定化し DM 候補となる
- いっけんよさそうだが…

scalar potential

$$V = -\frac{\mu_H^2}{2}H^\dagger H + \frac{\lambda_H}{2}(H^\dagger H)^2 - \frac{\mu_S^2}{2}|S|^2 + \frac{\lambda_S}{2}|S|^4 + \lambda_{HS}H^\dagger H|S|^2 + \left(-\frac{\mu_S'^2}{4}S^2 + (h.c.)\right)$$

SM Higgs

U(1) global symmetric

explicit U(1) breaking

模型の問題点

- 次元1, 3 の explicit に破る項 $(S, S^3, SH^\dagger H, \cdots)$ は0だと**「仮定」**する
  （あると NG boson の性質が失われ，直接検出実験で模型が棄却される）
- Z_2 対称性 $(S \to -S)$ を自発的に破るのでドメインウォールの問題がある

→ 問題のない模型を構築しなければならない

問題のない pNG DM の例

次元 1 でも $U(1)_{\text{global}}$ をやぶる　**(曺さん出川さんのトーク参照)**

[S. Abe, Cho, Mawatari ('21)]
[Cho, Idegawa, Senaha ('21, '22)]
[Cho, Idegawa, Sugihara ('23)]

- $S + S^\dagger$ をいれる
- $S \to -S$ なる対称性がないので domain-wall problem は無い
- NG boson の性質も失われるので直接検出で制限 → 縮退スカラーシナリオ

$U(1)_{\text{global}}$ x [gauged $U(1)_{\text{B-L}}$] にする

[Y. Abe, Toma, Tsumura ('20)]
[Y. Abe, Toma, Tsumura, Yamatsu ('21)]
[Okada, Raut, Shafi ('21)]
[Okada, Raut, Shafi, Thapa ('21)]

- ゲージ対称性のために S の 1次や3次は禁止できる
- DM が崩壊する
- 長寿命にするために $U(1)_{\text{global}}$ を破る VEV $\ll$ $U(1)_{\text{B-L}}$ を破る VEV とする

疑問：ゲージ対称性を利用した模型でVEV の hierarchy の無いようにできるか？

できる [T. Abe, Hamada ('23)]

模型

やりたいこと

以下のルールで pNG 模型を構築する

- 都合の悪い項はゲージ対称性で禁止したい
- 離散対称性を自発的に破らないようにしたい
- SMにくらべて新しく導入される VEV は1つまで

DMセクターの対称性

global $\quad$ gauge $\quad$ global

$$SU(2)_g \times U(1)_X \xrightarrow{\langle\phi\rangle} U(1)_D$$

explicit breaking $\longrightarrow U(1)_g$

DM の安定性

3 NGBs
= 1 would-be NGB
+ 2 NGBs
$\longrightarrow$ pNGBs

doublet field ϕ $\qquad \phi \to e^{iT^a\theta_g^a} e^{i\frac{1}{2}\theta_X(x)}\phi.$

$$U(1)_D \qquad \phi \to e^{iT^3\theta_D} e^{i\frac{1}{2}\theta_D}\phi = \begin{pmatrix} e^{i\theta_D} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\phi$$

ポテンシャル

H はSM Higgs

$$V_{\rm BSM} = \mu_\phi^2 \phi^\dagger \phi + \lambda_\phi \left(\phi^\dagger \phi\right)^2 + \lambda_{H\phi}(H^\dagger H)\left(\phi^\dagger \phi\right) + \mu_\chi^2 \left(\phi^\dagger T^3 \phi\right)$$

$SU(2)_g \times U(1)_X$ $\quad$ $U(1)_g \times U(1)_X$

- SU(2)$_g$ を U(1)$_g$ に explicit にソフトに破る
- U(1)$_X$ ゲージのために soft な explicit breaking の項は最後の項のみ
- 次元１，３の項はゲージ対称性で禁止される（先行研究では手で落としていた）

新粒子

pNG DM

$$H = \begin{pmatrix} i\pi_{W^+} \\ \frac{v+\sigma-i\pi_Z}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \quad \phi = \begin{pmatrix} i\chi \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\left(v_s + s - i\chi_V\right) \end{pmatrix}$$

V_μ に食べられる

混ざって h と h' になる

新粒子

χ : pNG boson (DM)

h' : extra scalar (DMセクターと SMセクターを繋ぐ)

V_μ : gauge boson

DMセクターに荷電共役対称性を課す

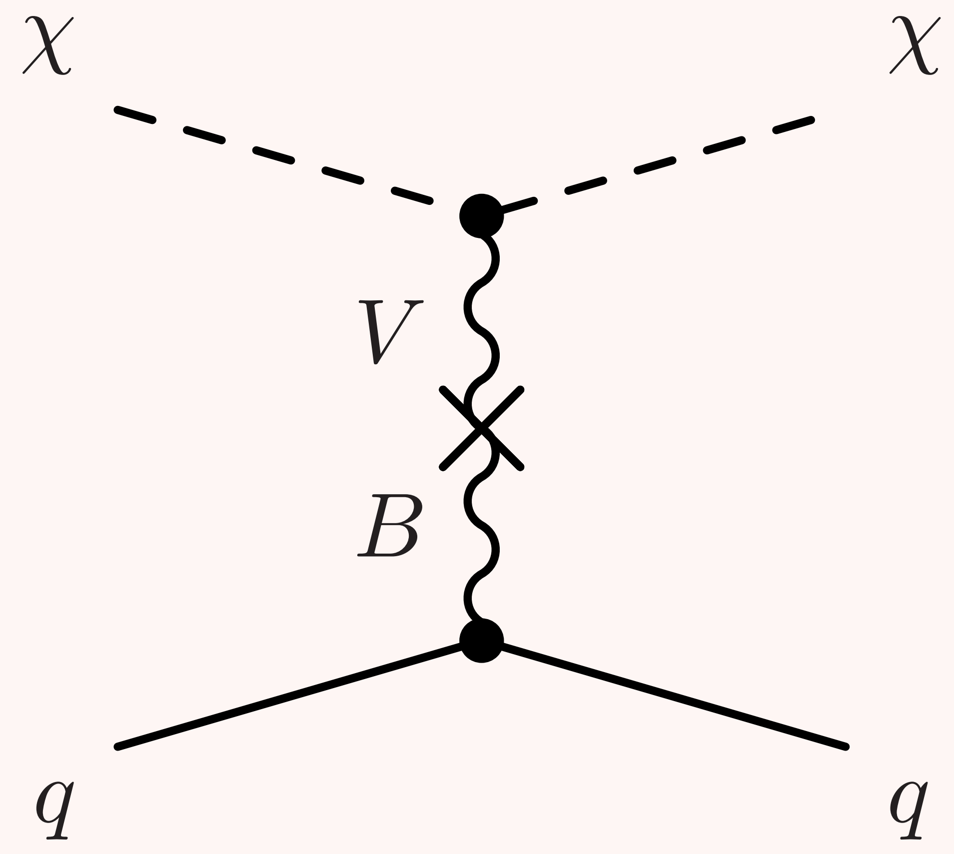
$$\phi \to \phi^*, \ V_\mu \to -V_\mu$$

V_μ はU(1)x のゲージ場

kinetic mixing が禁止できる

$$-\frac{1}{4}B^{\mu\nu}B_{\mu\nu} - \frac{1}{4}V^{\mu\nu}V_{\mu\nu} - \cancel{\frac{\kappa}{2}B^{\mu\nu}V_{\mu\nu}}$$

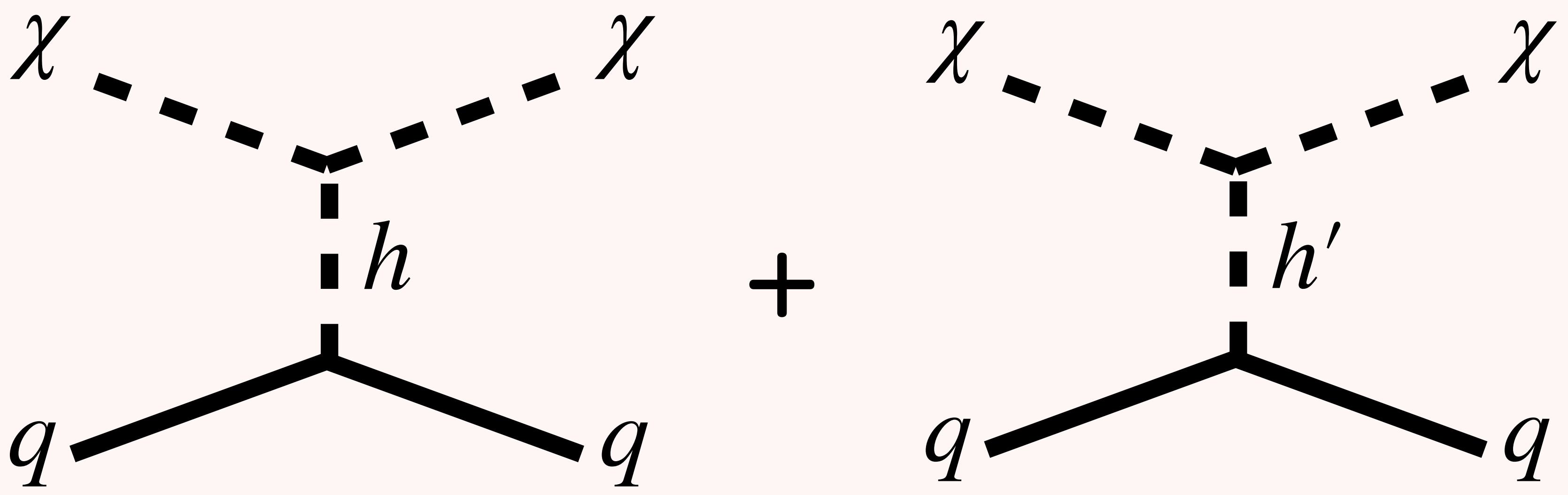
kinetic mixing あると直接検出で排除されるので禁止する



V も安定になりうる

- $V \to \chi\chi^\dagger$ でのみ崩壊する
- $m_V > 2m_\chi$ なら χ のみが DM
- $m_V < 2m_\chi$ なら χ も V も DM
- V が DM だと直接検出で排除される

散乱振幅



$$= -i\frac{m_q}{v v_s} s_{\theta_h} c_{\theta_h} \bar{u}u \left(-\frac{1}{t-m_h^2}+\frac{1}{t-m_{h'}^2}\right) t$$

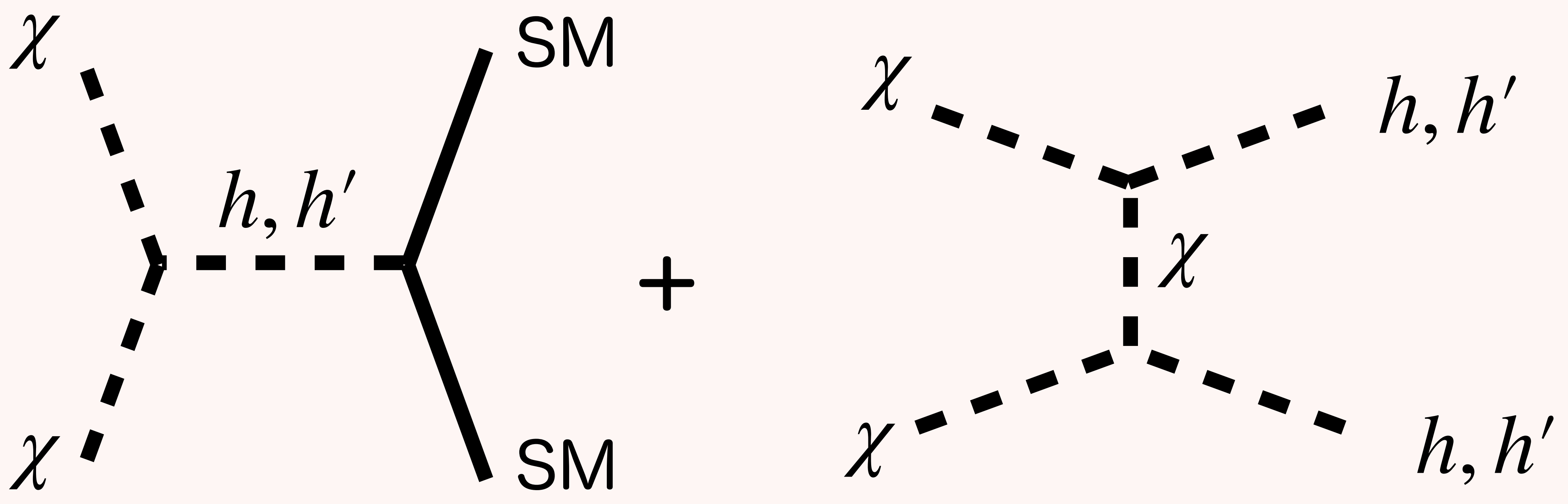
DM-SM 散乱は抑制される

- $t \simeq 0$ @直接検出実験
- 対消滅は上の式で $t \to s \simeq 4m_\chi^2$ となるので抑制されない
- freeze-out の範囲で直接検出実験の null result を説明可能

relic abundance

暗黒物質の対消滅過程

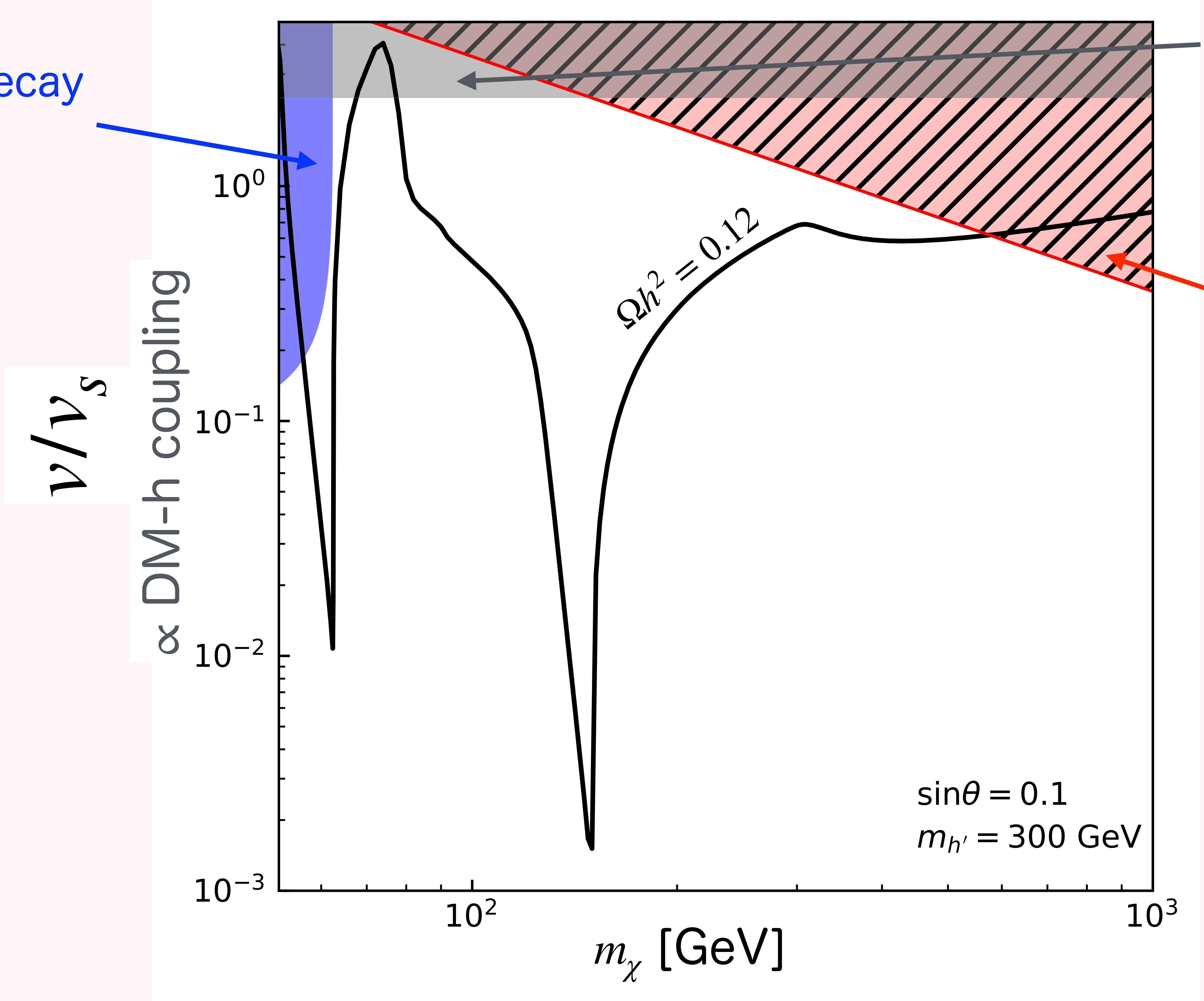
$$\frac{\mathrm{d}n_\chi}{\mathrm{d}t} + 3Hn_\chi = -\langle \sigma v \rangle \left(n_\chi^2 - n_{\chi,eq}^2\right)$$



- DM-SM 散乱と異なり抑制されない
- $m_\chi \simeq m_h/2$ および $m_\chi \simeq m_{h'}/2$ では，共鳴現象で $\langle \sigma v \rangle$ が大きくなる
  - 共鳴の起こる領域では $\chi\chi h$ 結合を小さくして $\Omega h^2 = 0.12$ を説明する

$\Omega h^2 = 0.12$ となるパラメータ

Higgs invisible decay
探索@LHCで排除

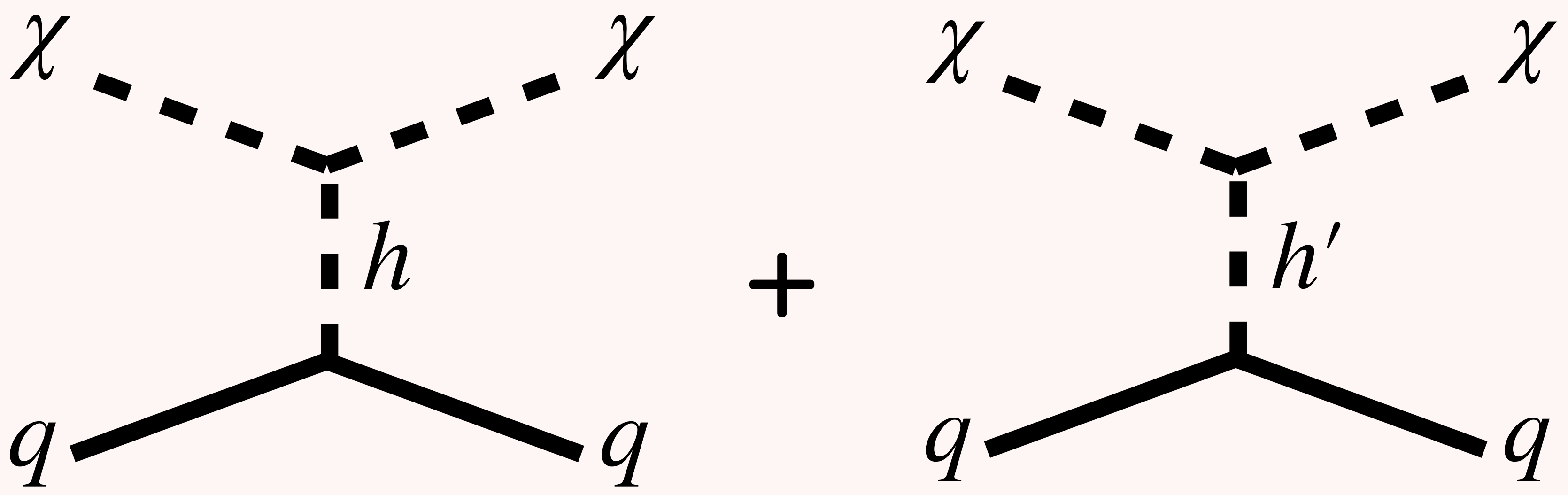


perturbative Unitarity bound
(scalar quartic coupings) に
抵触

perturbative Unitarity bound
(gauge coupling) に抵触
（ここでは $m_V = 3m_\chi$ を仮定）

beyond the tree level analysis

散乱振幅

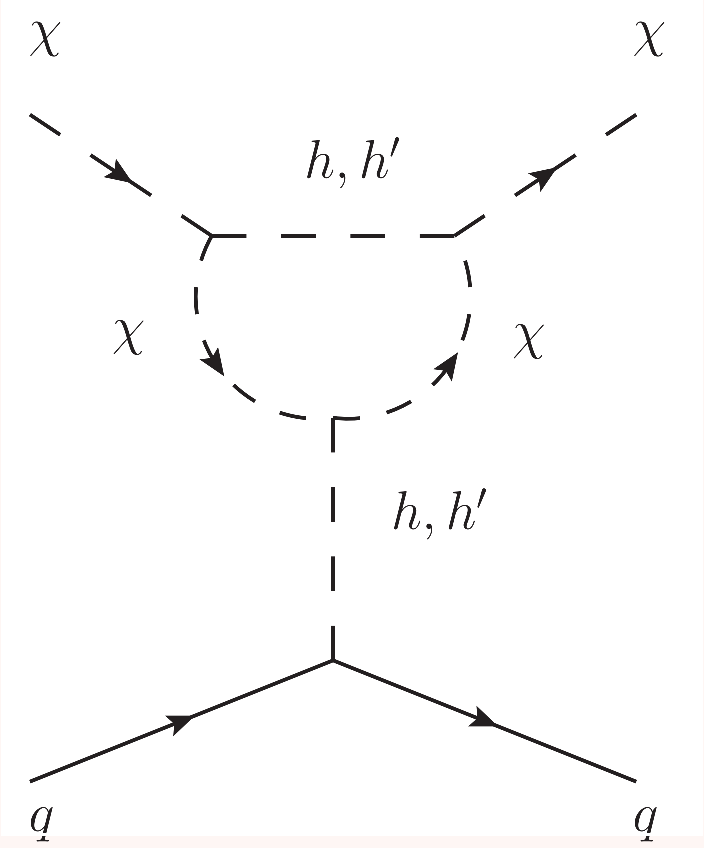


$$= -i\frac{m_q}{v v_s} s_{\theta_h} c_{\theta_h} \bar{u} u \left(-\frac{1}{t - m_h^2} + \frac{1}{t - m_{h'}^2} \right) t$$

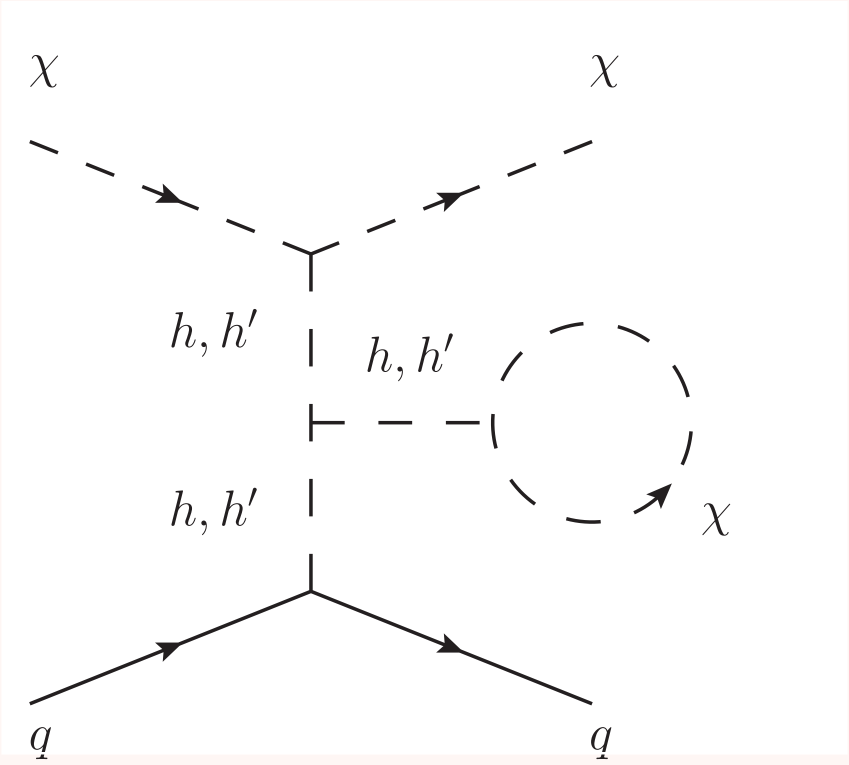
- DM-SM 散乱は抑制されるのはツリーレベルの結果
- soft breaking term (= DM mass)のために NG ボソンの性質はなくなる
- DM mass に依存するループ補正によって DM-SM 散乱が運動量移行に抑制しなくなる [Ishiwata, Toma, Tsumura ('18), Azevedo et al ('19), Glaus et al ('20)]
- ゲージ結合が大きところはループ補正が大きい可能性あり → 計算しよう

散乱振幅 @ loop level

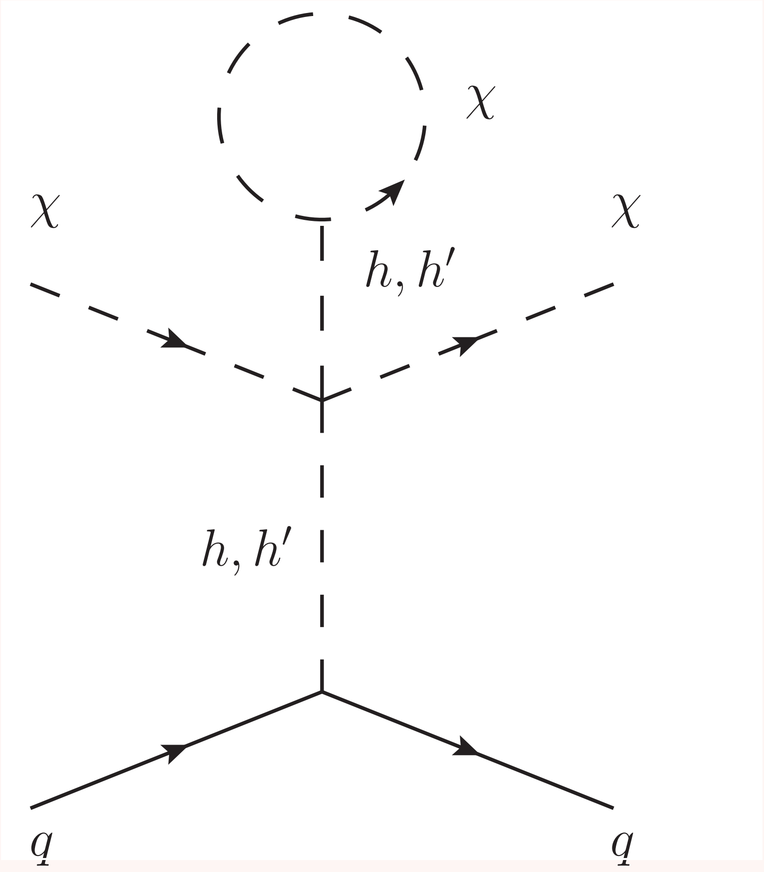
$iM(m_\chi) =$



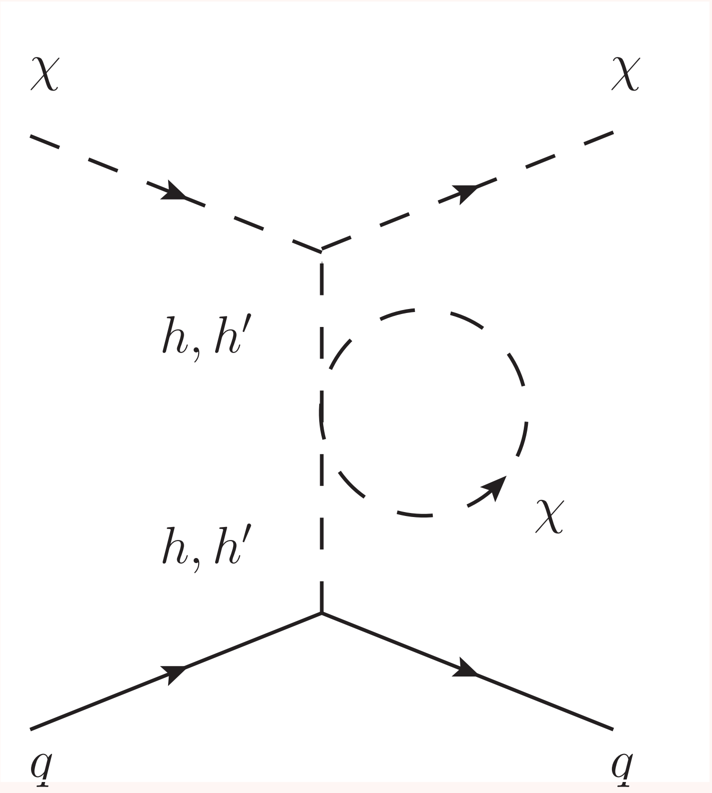
$+$



$+$



$+$



$+ \cdots$

- たくさんのダイアグラム
- キャンセルしたりする
- 効率よく計算したい → NG boson の性質を使う

散乱振幅 @ loop level

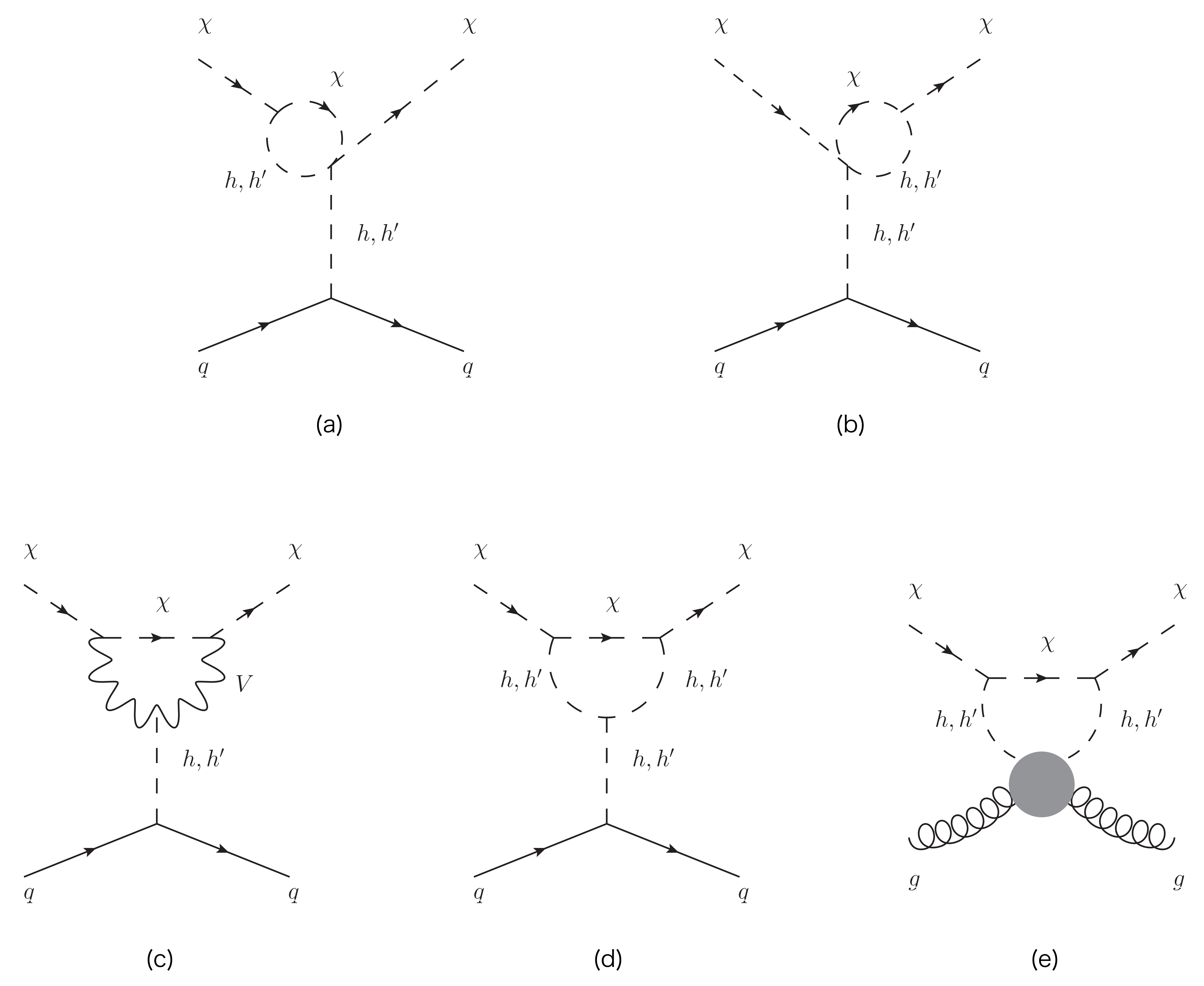
- NG boson にならら，移行運動量0極限で振幅は消える（ツリーレベル参照）
- NG boson になる極限 = explicit breaking term が消える極限 = massless DM極限

散乱振幅 $\mathcal{M}(m_\chi)$ は $\mathcal{M}(0) = 0$ を満たす

$$
\begin{aligned}
\mathcal{M}(m_\chi) =& \mathcal{M}(m_\chi) - \mathcal{M}(0) \\
=& \sum_j \left(\mathcal{M}_j(m_\chi) - \mathcal{M}_j(0) \right)
\end{aligned}
$$

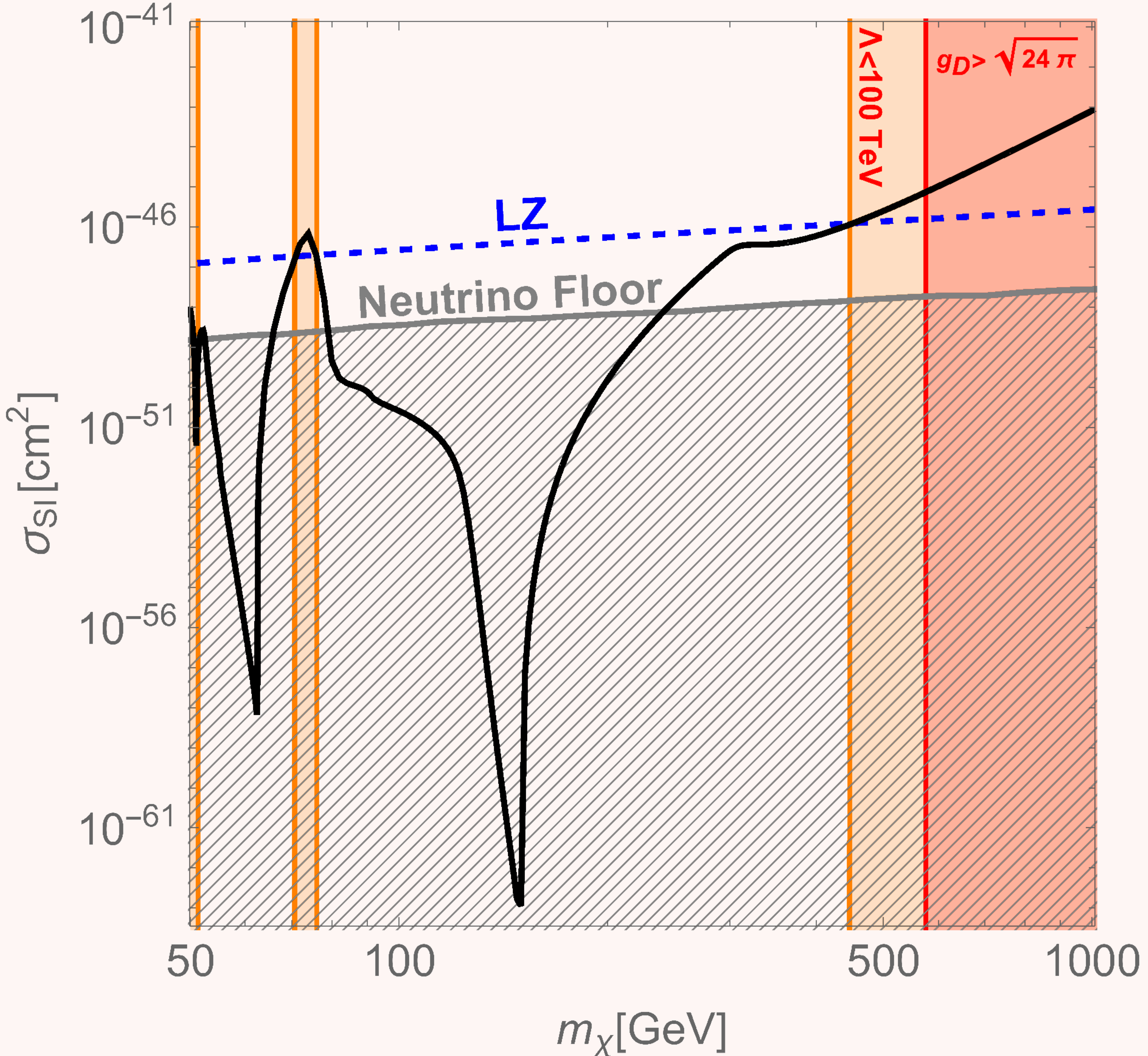
- ダイアグラムごとに m_χ に依存しない項を差っ引けば良い
- 内線に χ が現れないダイアグラムは計算しなくて良い

計算すべきダイアグラム



- 計算すべきダイアグラムの数はだいぶ減る
- 手計算でも十分できる
- 結果はごちゃごちゃするので略
- 数値を次で見せる
- ゲージが飛ぶ寄与以外は無視していいほど小さい
- ゲージ結合がでかいところだけ重要

σ SI @ 1-loop



- σ SI は現在の制限（LZ実験）よりも小さい
- 大きいところはゲージ結合が大きいのでそもそも摂動計算が破綻している
- 大抵の領域は ν floor 以下なので従来の直接検出による検証は難しい

Summary

まとめ

$SU(2)_g \times U(1)_X \to U(1)_D$ によるpNG DMを提案した

- $SU(2)_g$ は大域的で $U(1)_g$ に陽に破れている
- $U(1)_X$ はゲージ対称性
- $U(1)_D$ とDMセクターの荷電共役対称性で DM は安定
- 先行研究では手で落としていた項が，この模型では $U(1)_X$ゲージ対称性で禁止できる
- ドメインウォール問題もない
- 直接検出実験の結果と矛盾せず $\Omega h^2 = 0.12$ となる