

暗黒物質探査という名の素粒子物理学発展戦略

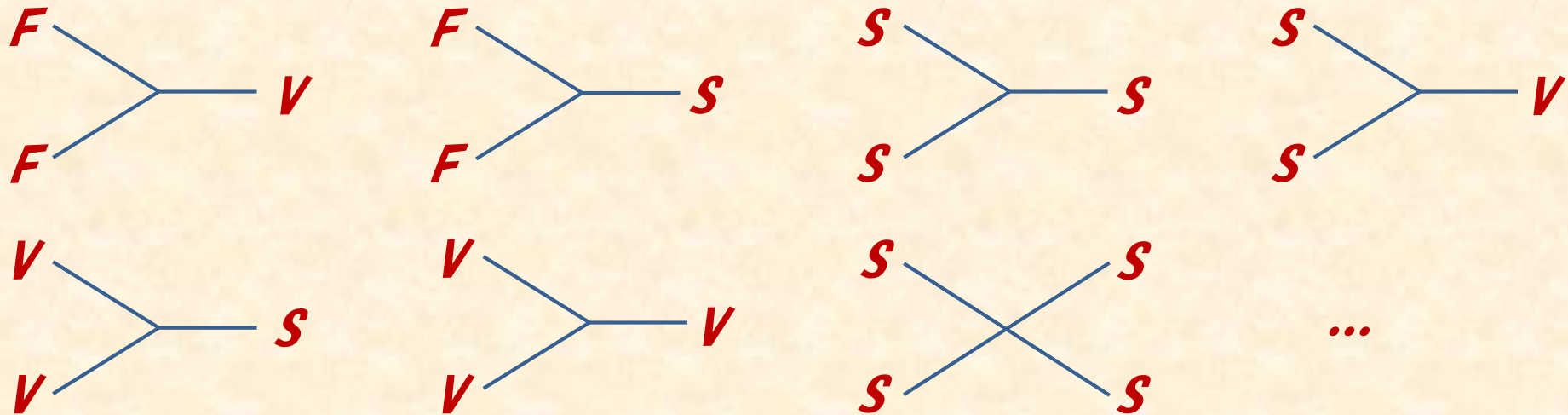
松本 重貴 (Kavli IPMU)

Kavli IPMU Thermal Dark Matter Project

これまで、標準模型を超える新物理構築に向け、**電弱対称性の破れの起源**とそれに付随する「**自然さの問題**」が、**主な指導原理**として用いられてきた。現在は、**暗黒物質の性質解明**が、**新たな指導原理**として台頭しつつある。この変遷や、**新たな指導原理の基での系統的、包括的な研究戦略(の一つ)**について述べる。

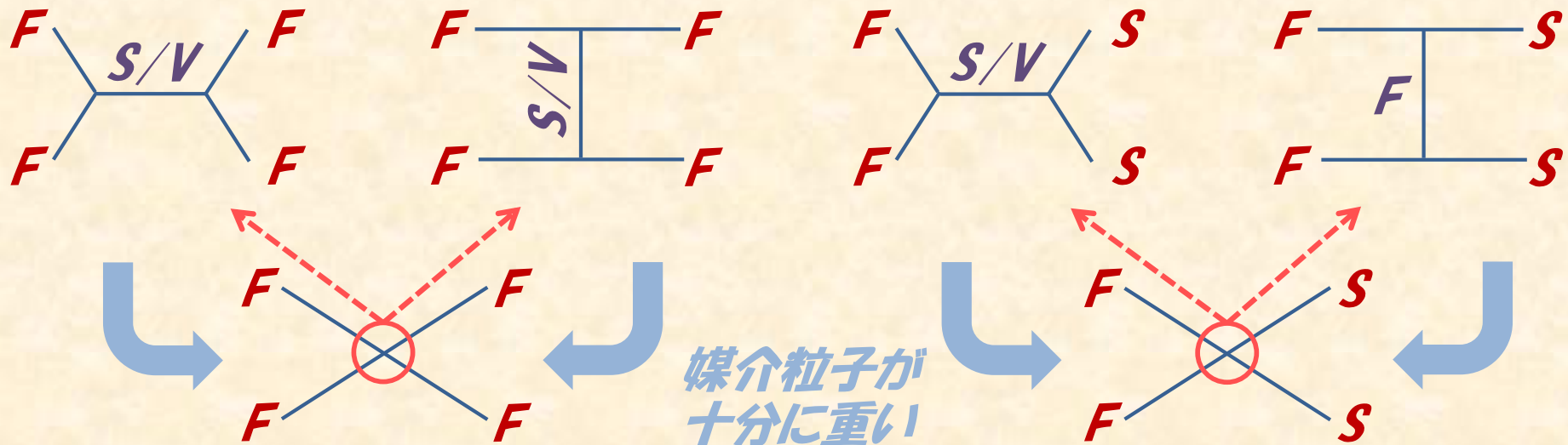
具体的な議論の前の準備1

○ 繰り込み可能な相互作用(有限個であることに注意)



構築される繰り込み可能な最小有効理論は、有限個の相互作用しか含まない!

○ 繰り込み不可能な相互作用と場の積分



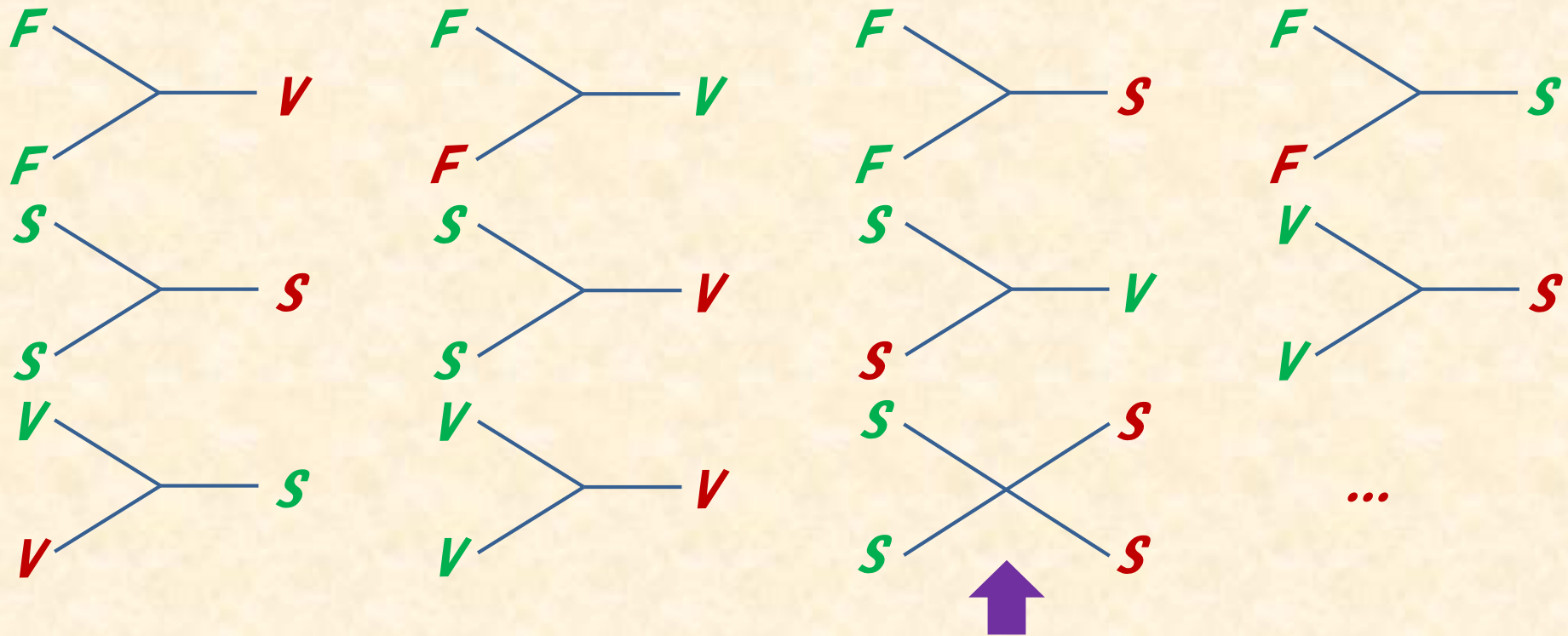
具体的な議論の前の準備2

○ 暗黒物質の安定性を保証する Z_2 対称性について (由来@白板)

$SM(x) \rightarrow SM(x)$
 $DM(x) \rightarrow -DM(x)$

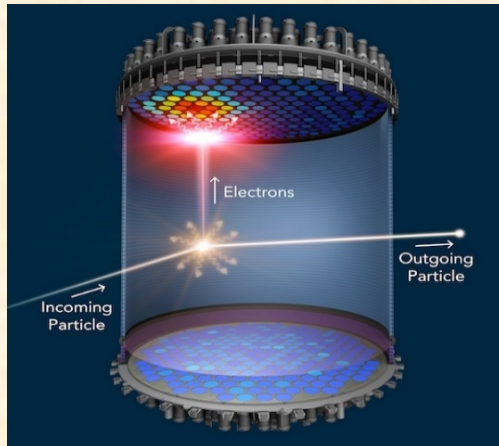

 暗黒物質は標準模型の粒子達に崩壊できない!
 各相互作用は暗黒物質(Z_2 奇粒子)を偶数含む。

○ Z_2 奇粒子を含む繰り込み可能な相互作用 (緑字は Z_2 奇粒子、茶字は Z_2 偶粒子)



暗黒物質がスカラー粒子のとき、その弱荷に依らずヒッグスと繰り込み可能な相互作用を持つ! このことは、直接検出における探査に重要な意味を持つ。

暗黒物質探査の3つの柱: 直接探査 @ 地下実験



地下実験施設において、核子との散乱により放出されるエネルギーを捉えることにより、暗黒物質の探査を行う。

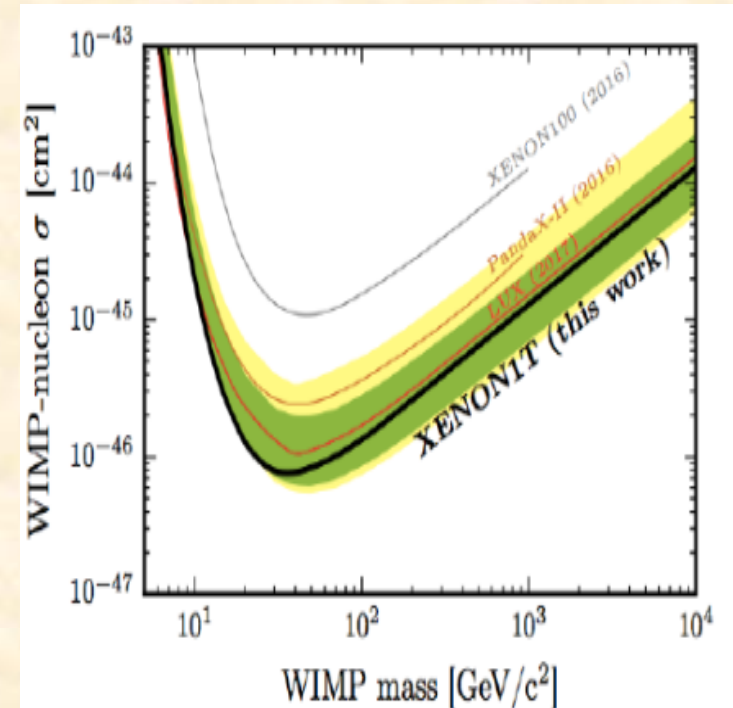
暗黒物質とクォーク(グルーオン)、ヒッグス、Zボソンとの相互作用の検出に高い感度を持つ探査実験と言える。

太陽系近傍の暗黒物質分布についても知る必要有り。

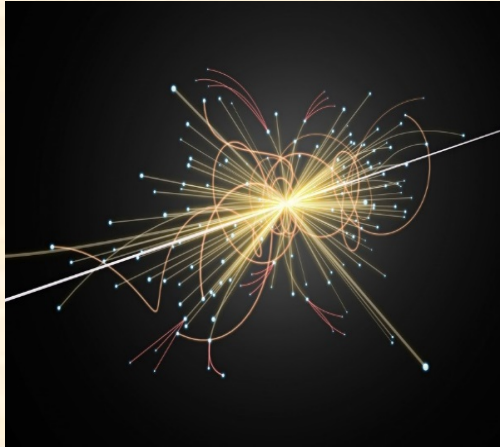
○ 暗黒物質と核子のコヒーレント散乱

各散乱での運動量移行が小さいため(ド・ブロイ波長 $\lambda >$ 原子核)、原子核内の各核子との振幅位相が揃うと、暗黒物質と原子核はコヒーレント散乱を起こし、その断面積は原子核内の核子数の2乗に比例する。(ラザフォード散乱と同じ。)

暗黒物質と原子核の散乱がヒッグスを(スカラー結合で)交換することにより起こる際は、必ず上記のコヒーレント散乱となる。(前スライド参照)



暗黒物質探査の3つの柱: 加速器探査



加速器施設において、直接生成や様々な素過程への間接的な寄与(輻射補正)を通じ、暗黒物質の探査を行う。

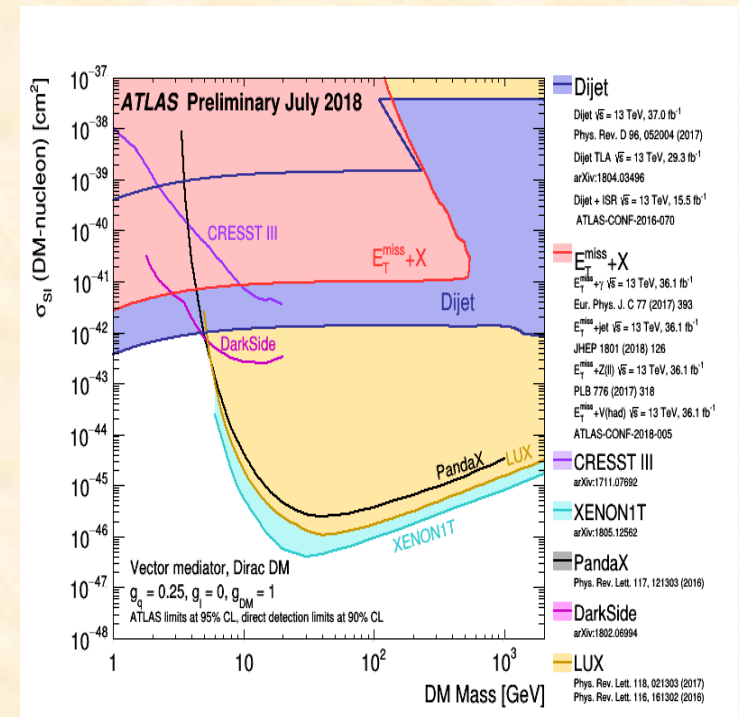
LHCにおいては、暗黒物質とクォーク(グルーオン)、ヒッグス、W、Zボソンとの相互作用の検出に高い感度を持つ。

他の二つの柱と異なり、天文学的な不定性を被らない!

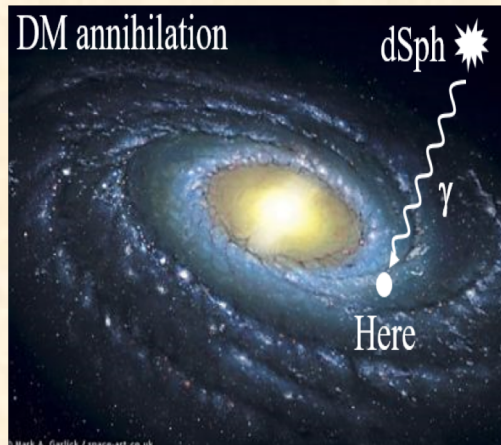
○ 直接探査@ 地下実験との相補性

加速器探査は、一見、直接探査と被るように思えるが、以下の理由により高い相補性を持つ。

- ✓ 直接探査では10GeV程度より軽い暗黒物質に感度はなく、加速器における探査が必要。
- ✓ 直接探査ではある種の相互作用(例:ヒッグスとの擬スカラー結合等)に全く感度がない!
- ✓ レフトン加速器による探査はとても相補的。



暗黒物質探査の3つの柱: 間接探査 @ 宇宙観測



我々の銀河やその近傍において、暗黒物質対消滅からの高エネルギー粒子線を捉え、暗黒物質の探査を行う。

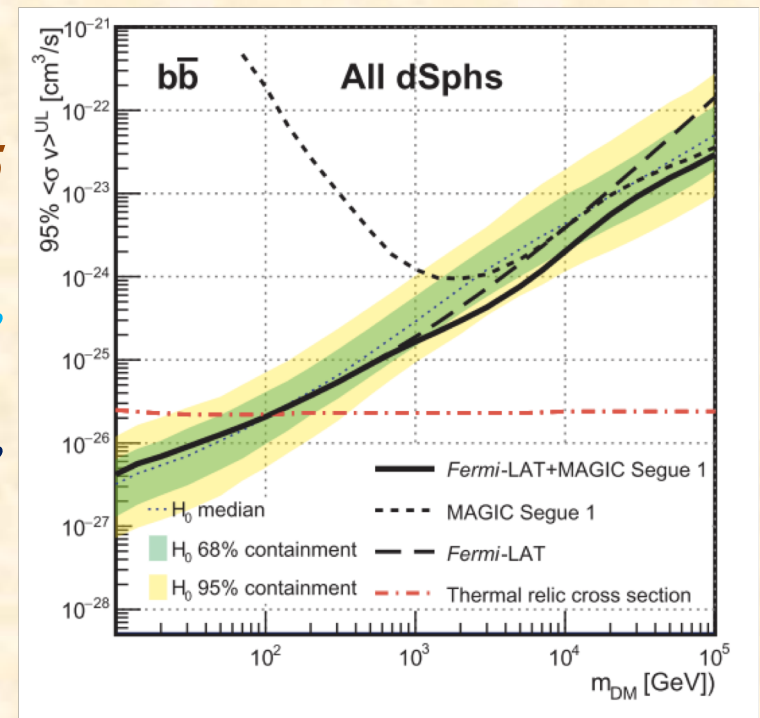
暗黒物質の対消滅断面積が大きく抑制されない限り、多くの標準模型素粒子との相互作用に感動を持つ。

普遍的な探査手法を供するが注意点有(以下参照他)。

○ 間接探査 @ 宇宙観測の注意点

初期宇宙において、暗黒物質対消滅断面積はある程度の大きさを持つことが保証されているが、現在の宇宙で同様な大きさを持つとは限らない！非相対論極限における対消滅断面積の相対速度依存性の為。増大する場合も減少する場合も。

間接検出における暗黒物質探査を高感度で行うためには、我々の銀河やその近傍に暗黒物質がどの様に分布しているのかを知る必要が有る。



暗黒物質探査の3つの柱：間接探査 @ 宇宙観測

対消滅により、中間生成物はさておき、様々な粒子線(γ , ν , p , e , ...)が生成。

中性粒子線(γ , ν): 銀河内を直進する為、どの方向を観測するのが大事。
対消滅で γ と ν が同程度放出されるのなら、 γ が有利。

荷電粒子線(p , e , ...): 銀河内で磁場等の影響を受け、伝搬を考慮する必要有。
高精度データに相対し単純拡散モデルの改良の要求。

○ ガンマ線を用いた間接検出のターゲット天体

最良の物件は、シグナル強度が高く、DM分布が精度よく決まり、BG強度が小さい又は良く理解されていて、現在・将来に高感度観測が予定されているもの。

	シグナル強度	DM分布	BG(強度)	BG(モデル)	観測装置
銀河中心	○○	×	×	×	○○
近傍銀河	○	○	○	○	○
銀河団	×	○	△	△	○
拡散 γ 線	○	△	○	△	×

暗黒物質探査の3つの柱: 間接探査 @ 宇宙観測

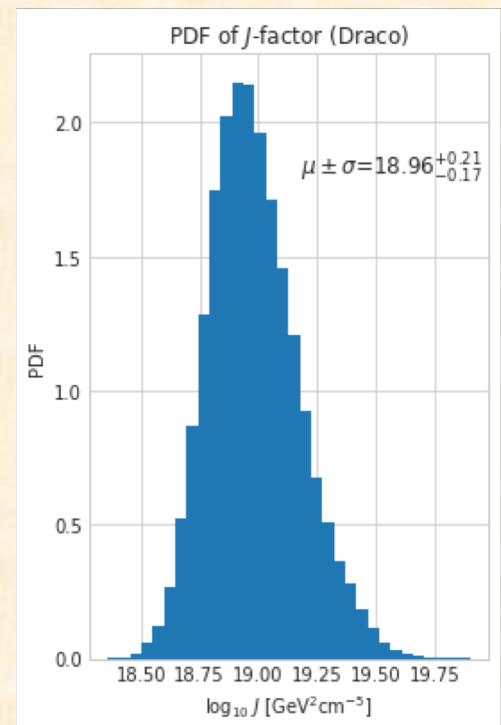
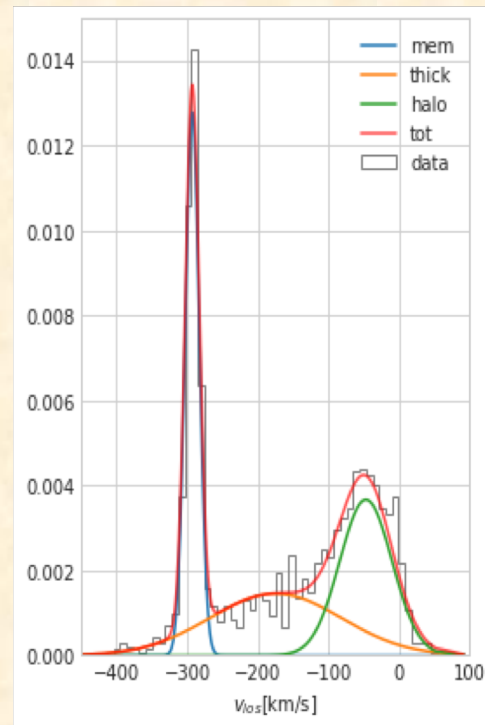
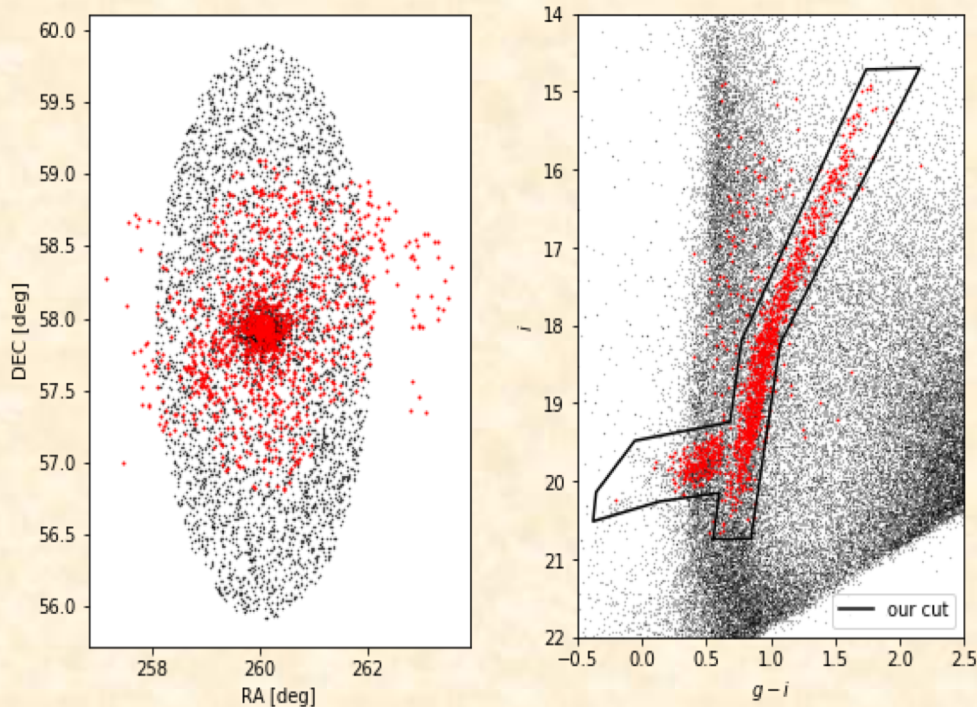
近傍銀河で最有力は矮小楕円体銀河達 (*dSphs*)。この銀河からのフラックスは、

$$\Phi(E, \Delta\Omega) = \left[\frac{\langle \sigma v \rangle}{8\pi m_{DM}^2} \sum_f b_f \frac{dN_\gamma}{dE} \right] \int_{\Delta\Omega} \int_{l.o.s} dl d\Omega \rho^2(l, \Omega) \leftarrow J\text{因子}$$

理論モデル (*Jean* の方程式)
DM potential 中の星の運動

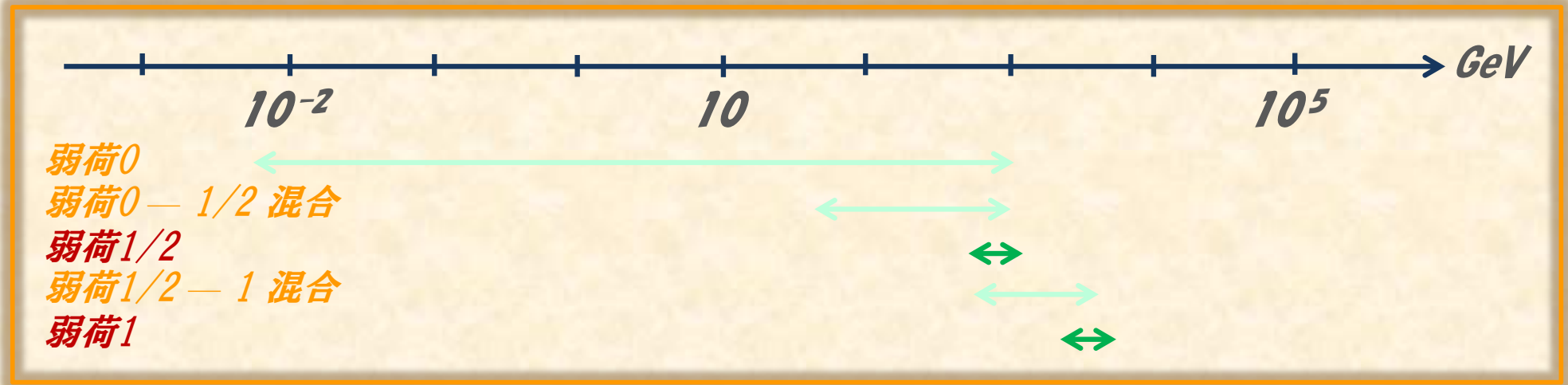
解析

測光観測 (星の分布 & 色や等級等)
分光観測 (視線速度 & 化学組成等)



ドラコ (*Draco*) と呼ばれている矮小楕円体銀河 (*dSph*) を例に。

弱荷を持つ熱的暗黒物質: $I_W = 1$ を例に



○ 暗黒物質としての質量固有状態は、 $|DM\rangle \simeq "SU(2)_L$ の固有状態" となる。

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{2} \bar{T} (\not{D} - M_T) T$$

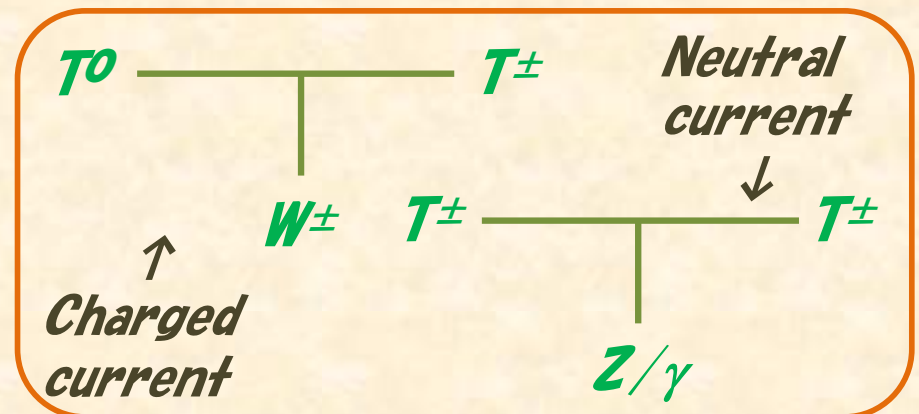


- ✓ 新物理パラメータは、質量 M_T のみ。
- ✓ 暗黒物質の物理は、弱い力、つまり $SU(2)_L$ のゲージ相互作用にて支配。暗黒物質は W とのみ相互作用する。

$T = (T^+, T^0, T^-)$ で、 T^0 が暗黒物質、 T^+, T^- の組合わせで荷電パートナー。ちなみに $I_W = 1/2$ の場合は…白板で。

T^\pm と T^0 の質量差は、160 MeV 程度。 T^\pm は T^0 より必ず重い。 T^\pm の崩壊長は、 M_T に依らず、約 10 cm 弱となる。

[M. Ibe, S. M., R. Sato, PLB721, 2013]



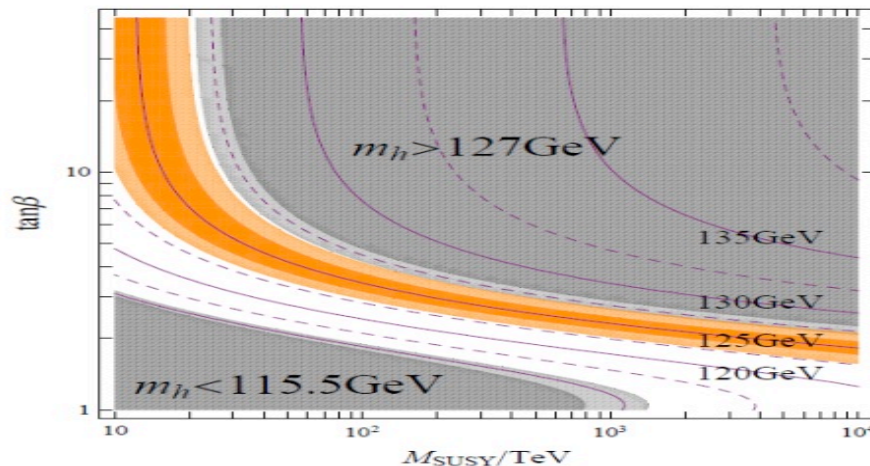
弱荷を持つ熱的暗黒物質: $I_W = 1$ を例に

更なる動機 **AMSB!** [L. Randall, R. Sundrum; G. Giudice, M. Luty, H. Murayama, R. Rattazzi, 1998]

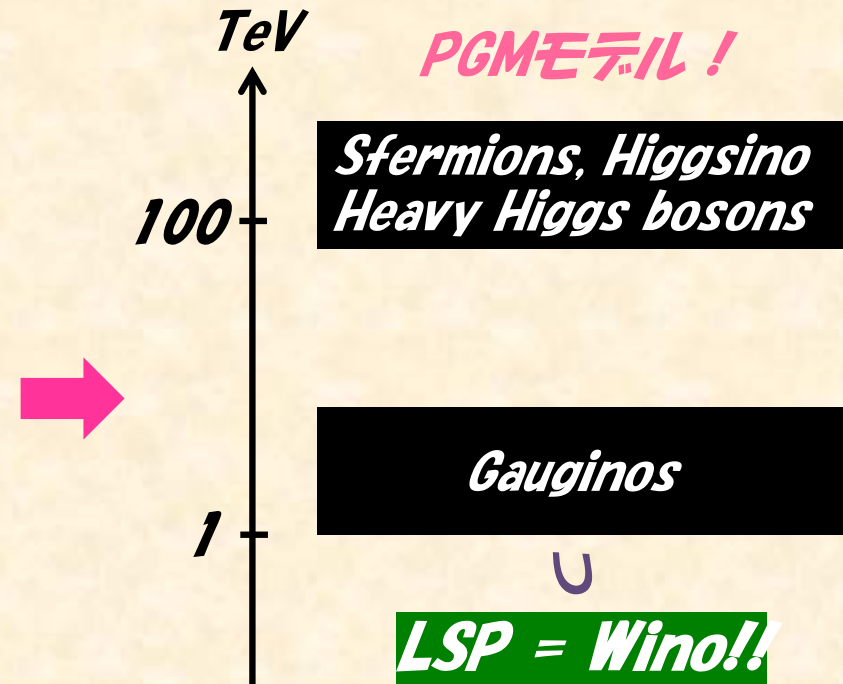
最もシンプルで、宇宙論とも非常に相性が良い SUSYモデルとして知られている。

MSSM $\xrightarrow{\text{"Gravity" mediation}}$ SUSY
 $w/o \text{ singlet}$

- ✓ LSPはウィーノ、つまりSU(2)_L3重項。
- ✓ その質量は、約3TeVと予言される。
[Hisano, S. M., Nagai, Saito, Senami, 2006]
- ✓ その為、所謂 M_{SUSY} は $O(100)$ TeV。



[M. Ibe, S.M., T. T. Yanagida, PRD85, 2012]



- ✓ ヒッグス質量は、約125GeVと予言。
- ✓ 深刻なフレーバー問題も回避可能。
- ✓ 深刻な宇宙論との問題を持たない!
(グラビティーノ、ポロニー問題等)
- ✓ 最小の大統一模型で、問題がない!

弱荷を持つ熱的暗黒物質: $I_W = 1$ を例に

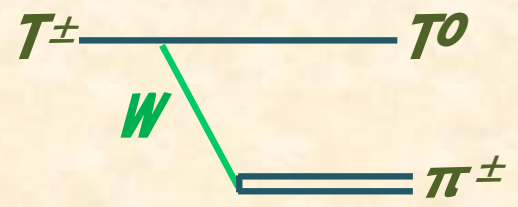
直接探査



抑制された散乱

[Hisano, S.M., Nojiri, Saito, 2005]

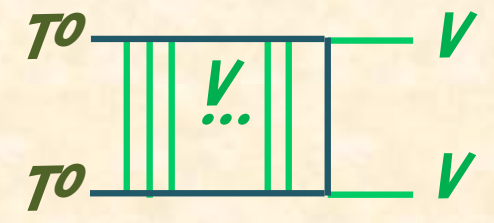
間接探査



長寿命粒子の探査

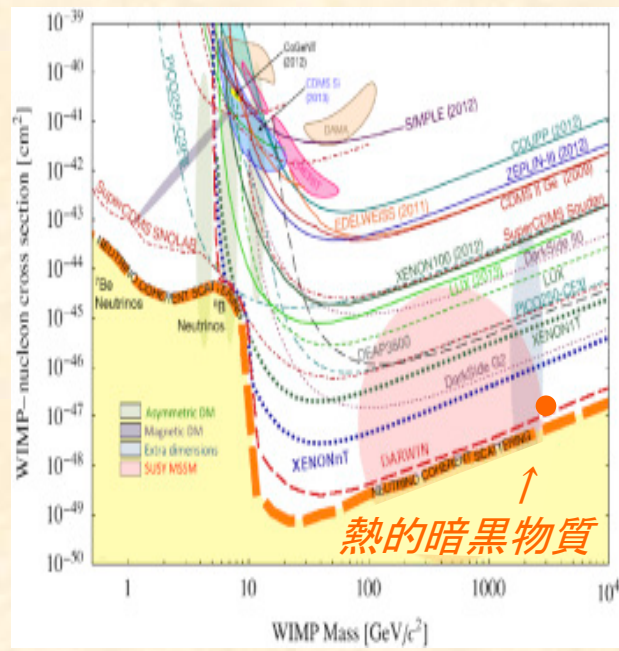
[Asai, Moroi, Yanagida, 2008]

加速器探査

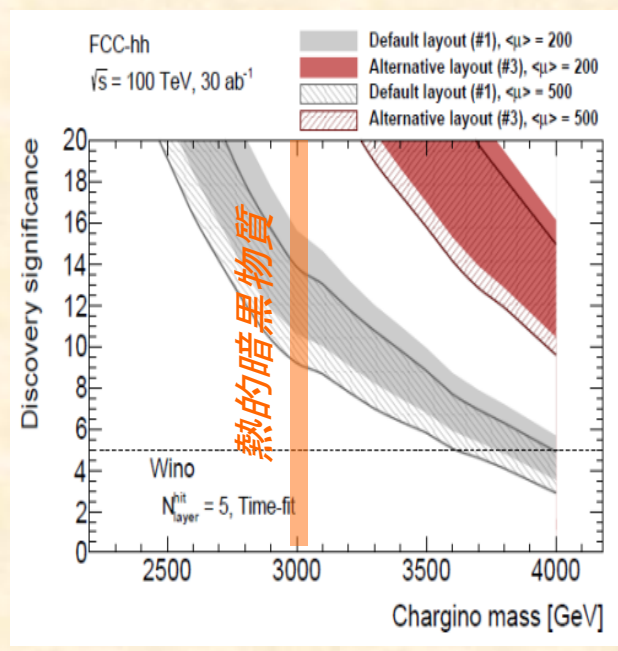


フーストされた対消滅

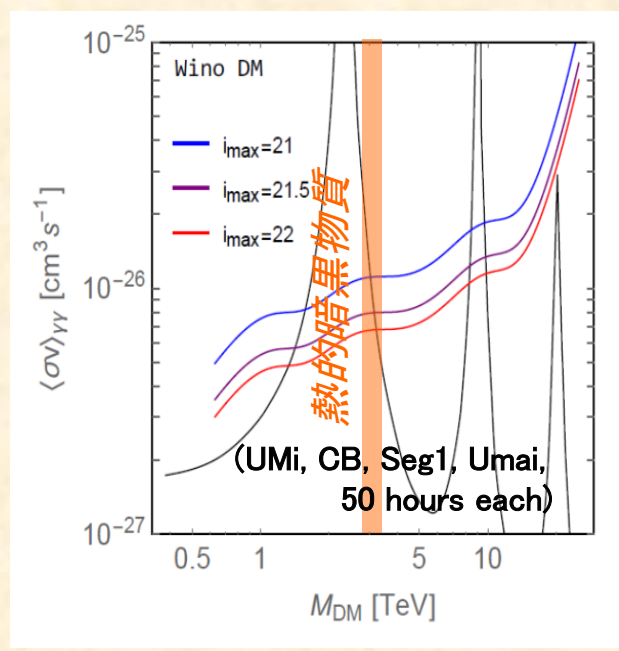
[Hisano, S.M., Nojiri, 2004]



[Hisano, Ishiwata, Nagata, 2015]



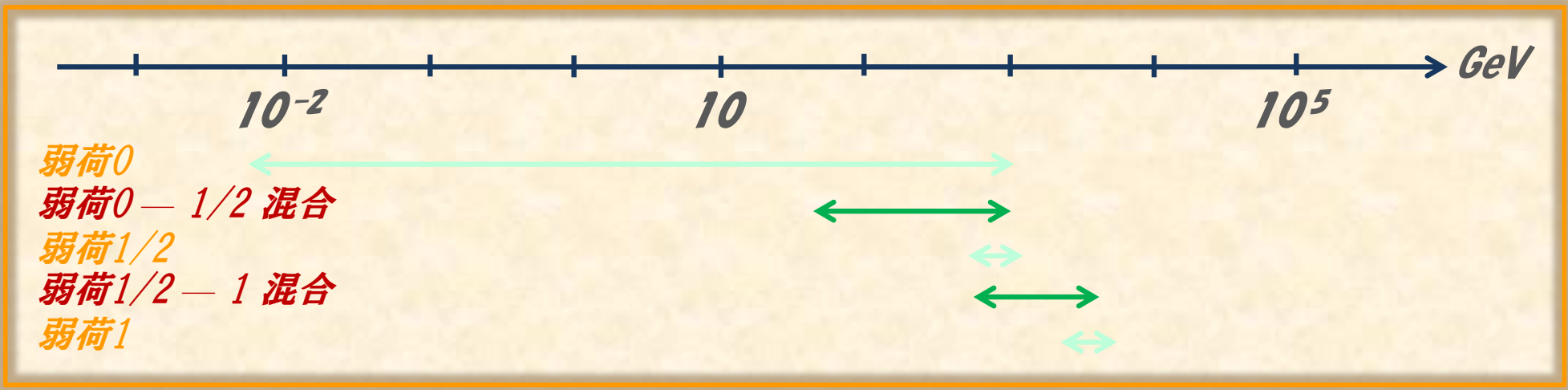
[Saito, Sawada, Terashi, Asai, 2019]



[Ichikawa, Horigome, Ishigaki, S. M., Ibe, Sugai, Hayashi, 2018]

(近い) 将来における探査は十分に見込み有り。更なる精密計算へと研究は進む。

混合弱荷を持つ熱的暗黒物質: $I_W = 0-1$ を例に

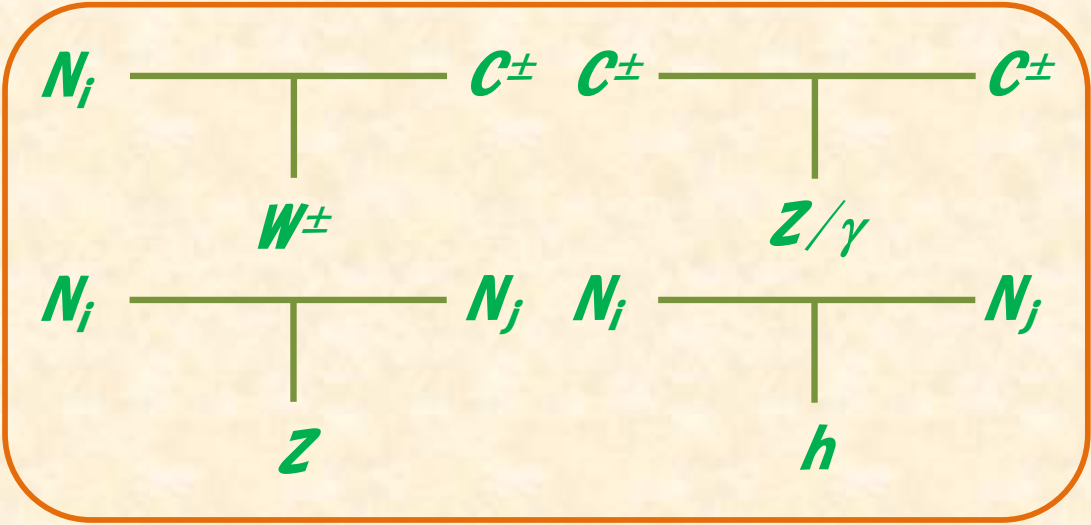


○ 暗黒物質としての質量固有状態は、 $|DM\rangle = z_a |\alpha\rangle + z_b |\beta\rangle$ と混合する。

$$\mathcal{L}_{SD} = \mathcal{L}_{kin} - \left[\frac{1}{2} M_S SS + M_D D_1 \cdot D_2 + y_1 SD_1 \cdot \tilde{H} + y_2 SD_2 \cdot H + H.c. \right]$$

新粒子として3つの中性マヨラナ粒子、1つの荷電ディラック粒子。
(Bino-Higgsino DM in SUSY.)

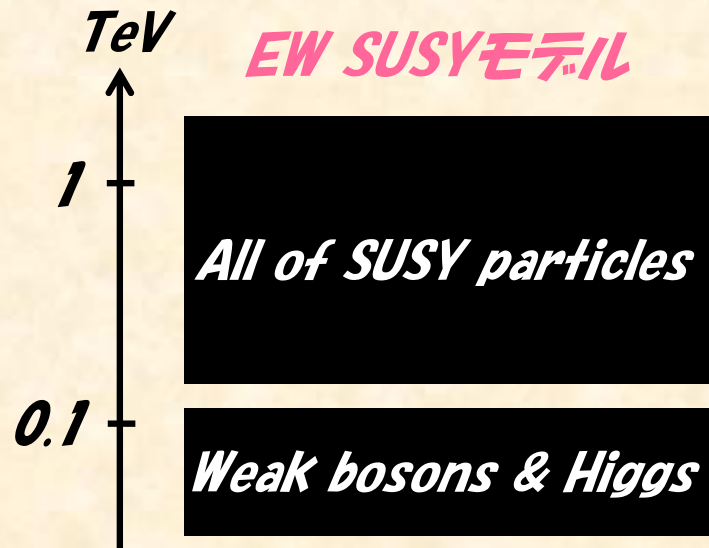
新物理パラメータは、暗黒物質質量 M_{N_j} 、荷電パートナーの質量 M_D 、湯川結合 $(y_1^2 + y_2^2)^{1/2}$ 、湯川結合の比 $\tan\theta = y_2/y_1$ 。



混合弱荷を持つ熱的暗黒物質: $I_W = 0-1$ を例に

更なる動機? *Conventional SUSY!*

[ATLAS website (Electroweakino searches)]



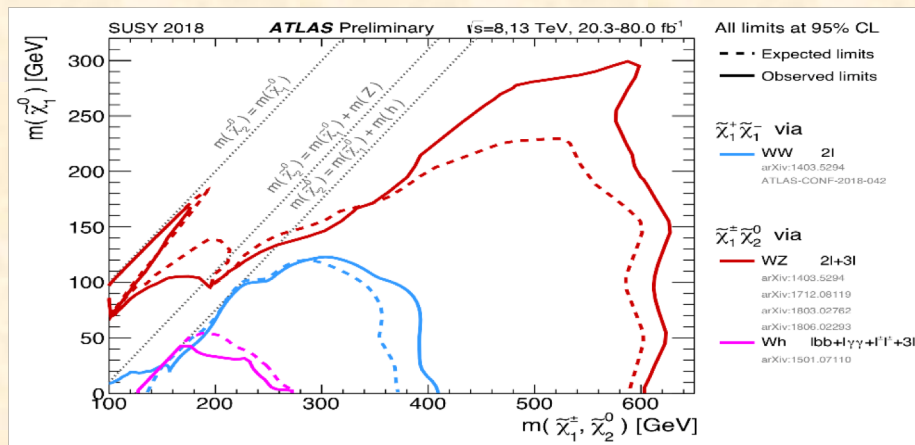
中性新粒子の質量行列について

$$\mathcal{L}_N = -\frac{1}{2}(S, D_1^0, D_2^0) M_N \begin{pmatrix} S \\ D_1^0 \\ D_2^0 \end{pmatrix} + \text{H.c.},$$

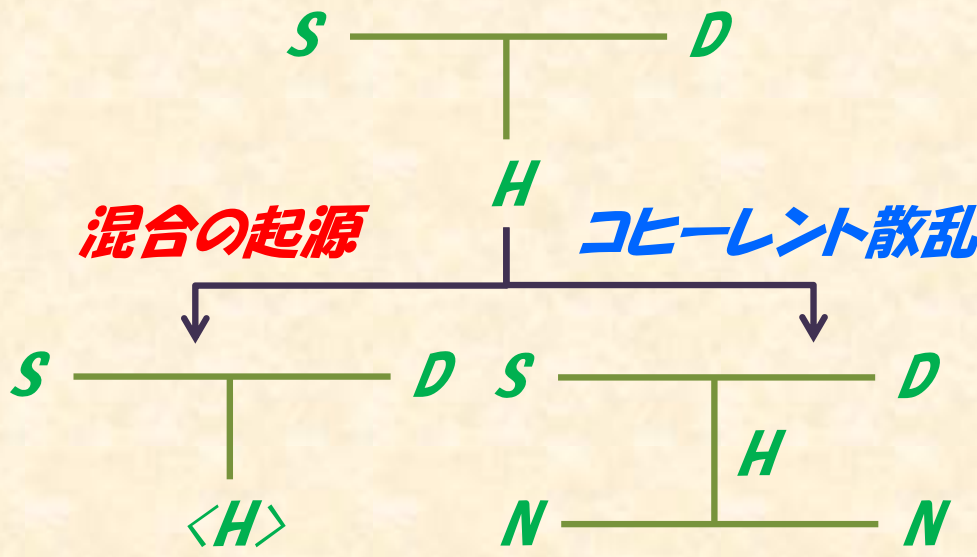
$$M_N \equiv \begin{pmatrix} M_S & -y_1 v / \sqrt{2} & y_2 v / \sqrt{2} \\ -y_1 v / \sqrt{2} & 0 & -M_D \\ y_2 v / \sqrt{2} & -M_D & 0 \end{pmatrix}$$

同スケールに多数の新粒子!!

弱荷混合の条件は $0(M_S) \sim 0(M_D)$!!



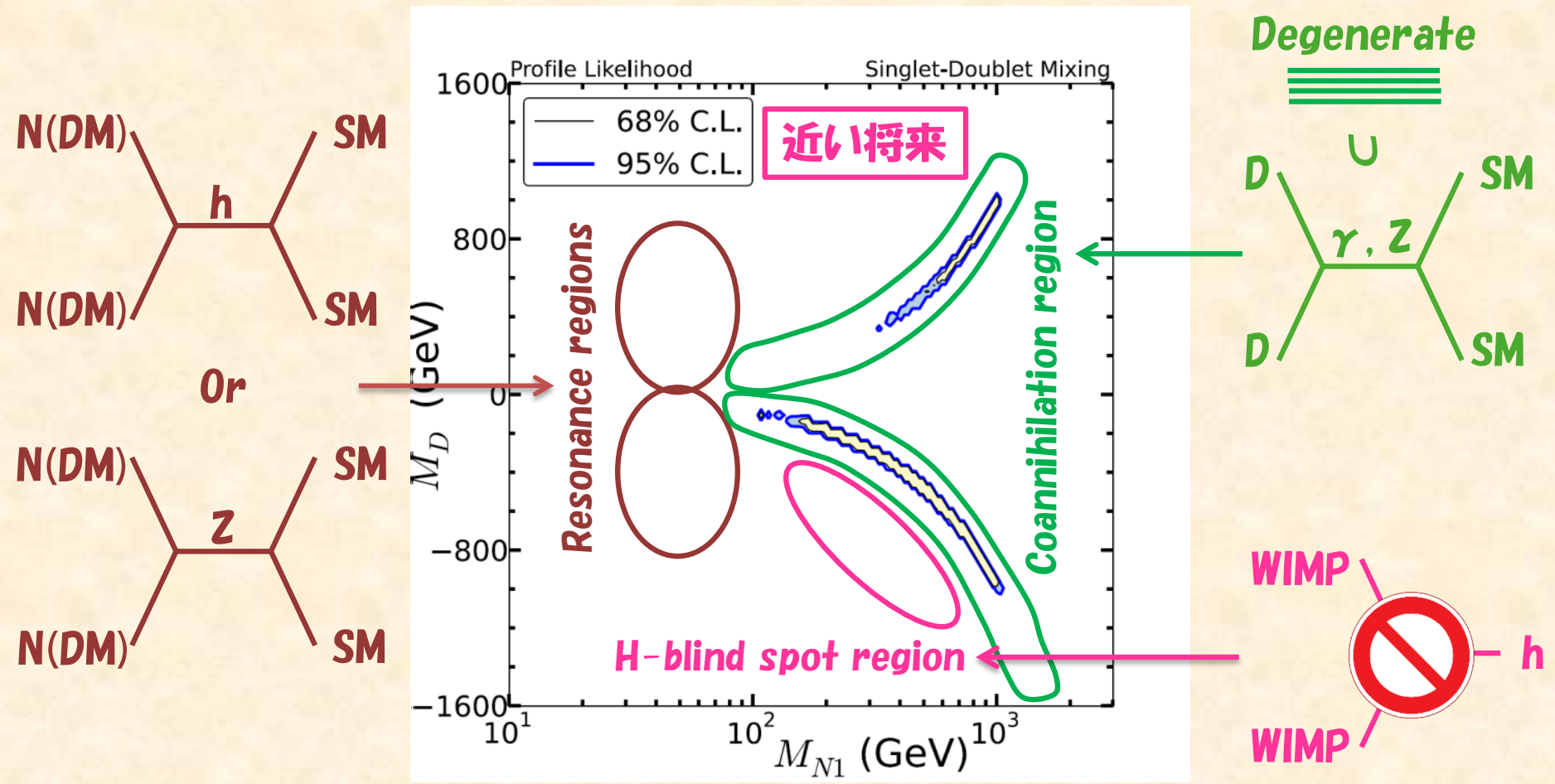
LHCでの探査 @ $|M_S - M_D| > m_{W/Z}$



混合弱荷を持つ熱的暗黒物質: $I_W = 0-1$ を例に

様々な条件(熱的残存量)や制限(直接探査&加速器探査)を考慮し、最小有効理論(全スライド)の全パラメータ空間をスキャン(|結合定数| < 1は過程)

[S. Banerjee, S. M., K. Mukaida and Y. L. S. Tsai, JHEP16111]



(近い)将来における直接探査@地下実験で全パラメータ領域を探査可能!!

まとめ2

量子数による分類に基づいた系統的な熱的暗黒物質の戦略的研究について。
各量子数を持つ熱的暗黒物質ごとに最小有効作用を構築、解析、議論する。



熱的暗黒物質の探査は、**直接探査@地下実験**、**加速器探査**、**間接探査@宇宙観測**の3つの柱で構成されており、各々が相補的な役割を果たしている。特に間接探査は、近い将来に精密天文学(**銀河考古学**)の発展が見込まれ、他の探査(**直接探査**、**加速器探査**)と同レベルの信頼度で暗黒物質探査が可能となる。

混合を(殆ど)しない非零の弱荷を持つ熱的暗黒物質は必然的に**TeVスケール**の質量を予言し、それを生成する為に**高エネルギー加速器(Fcc-hh)**が必要となる。**直接探査**や**間接探査でのシグナル発見**が本加速器構築の推進に大きな役割を果たす。その際、**高エネルギー加速器での新粒子の発見**が保証される。

混合した弱荷を持つ熱的暗黒物質は、近い将来の**直接探査@地下実験**で**効率的に探査が可能**である。それら探査でシグナルが発見されれば、**LHC実験**やその後継実験が重要な役割を果たす。つまりこれらの実験における**新粒子の発見**が保証されるが、同時に**縮退気味のスペクトル**を持つ**新粒子探査**が要求される。