

熱的暗黒物質における重要な未探査領域 ～暗黒物質の直接、間接探査の果たす役割～

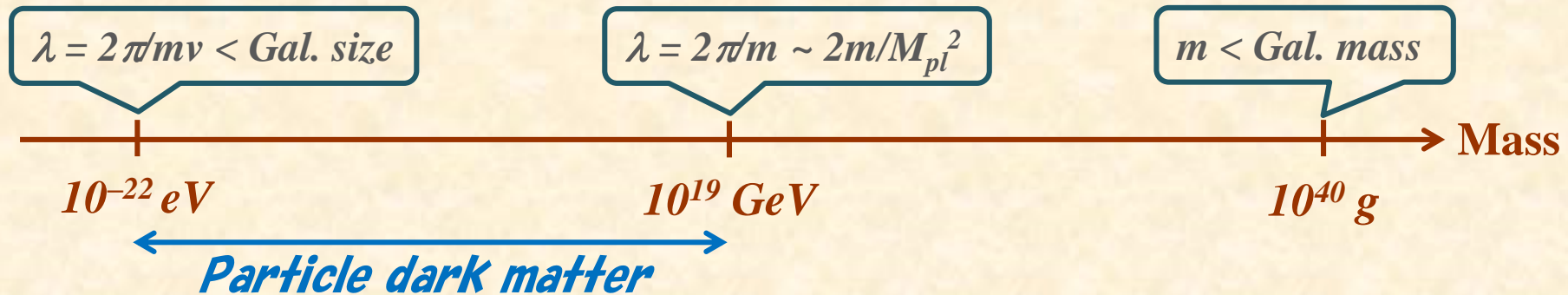
松本 重貴 (Kavli IPMU)

Kavli IPMU Thermal Dark Matter Project

熱的暗黒物質の探査（熱的暗黒物質仮説の検証）の観点から、地下実験における**直接検出**と宇宙・天体観測における**間接検出**が如何に重要な役割を果たすのかについて、これら検出の科学的意義の有無も踏まえ、定量的に現状を議論させていただきます。

暗黒物質と熱的仮説

暗黒物質に関しては得られている情報がまだまだ少なく、様々な候補が提案。

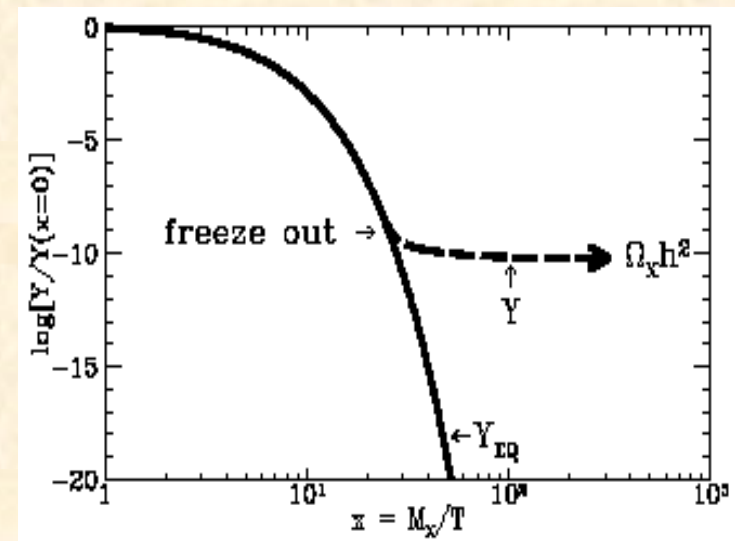


膨大な質量領域を系統的に探査することは難しい為、様々な暗黒物質に関する仮説を立て検証を行っている。(例: WIMP仮説、Axion仮説、pBH仮説等々。)

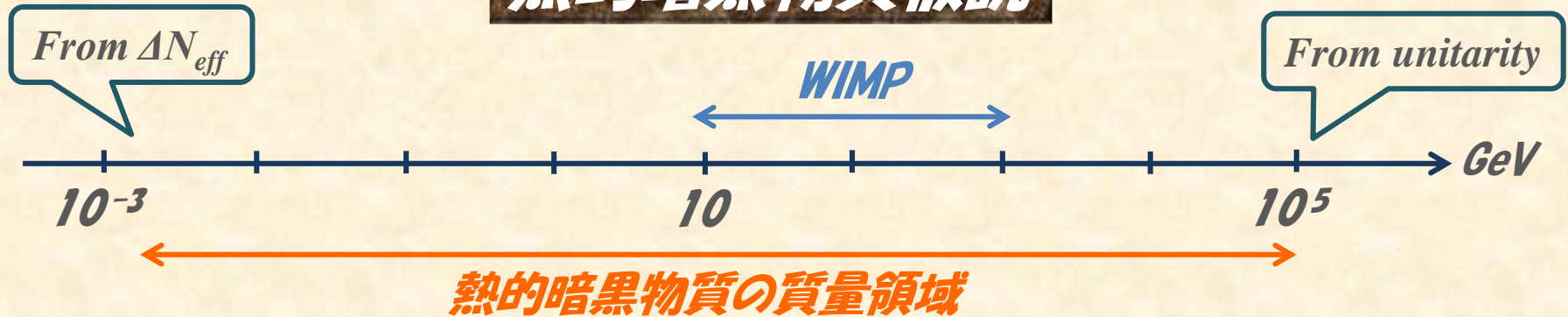
熱的暗黒物質(WIMP)仮説

暗黒物質は(素)粒子であり、初期宇宙における凍結機構により現在の残存量が決まった。

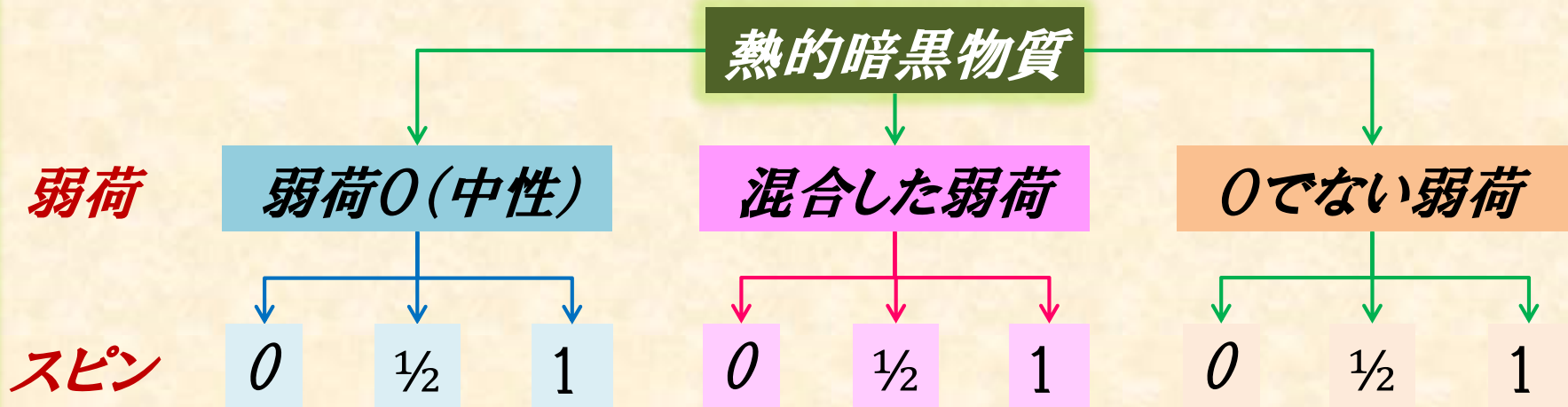
凍結機構 (例: 軽元素合成、再結合等々)
 平衡にあった系で、その平衡を保つ反応率が宇宙の膨張率を下回ることにより脱平衡が起こり、その残存量が決まる、とする機構。



熱的暗黒物質仮説



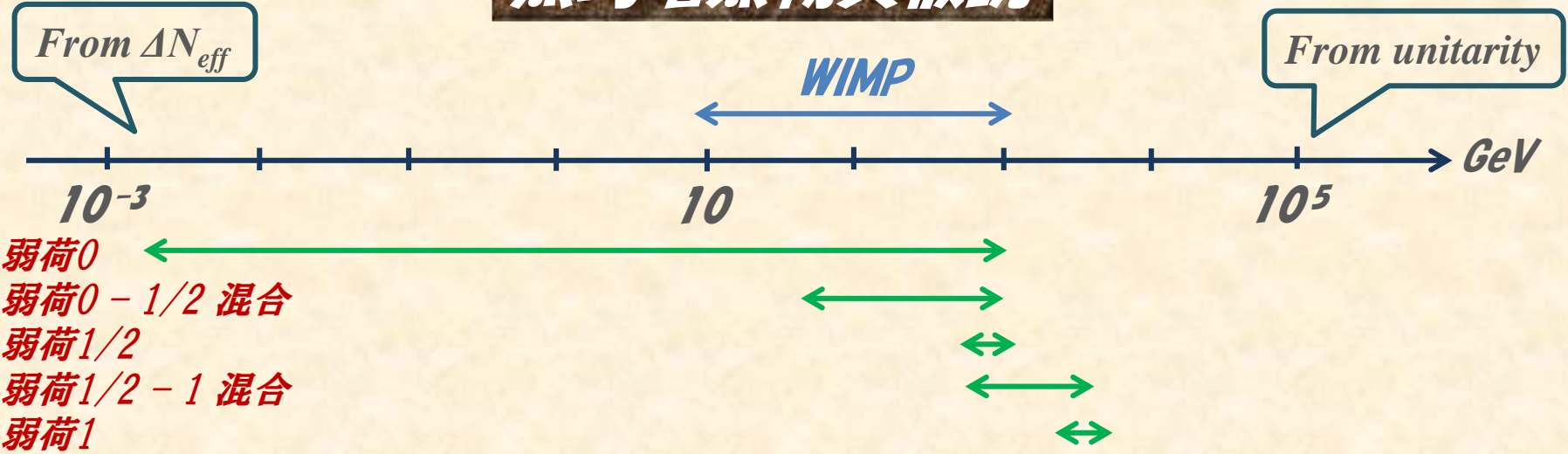
熱的暗黒物質の多様性！素粒子標準模型のどの素粒子と主に反応するのか？



熱的暗黒物質は電荷とカラー荷を持たないため、弱荷とスピンの系統的に分類。

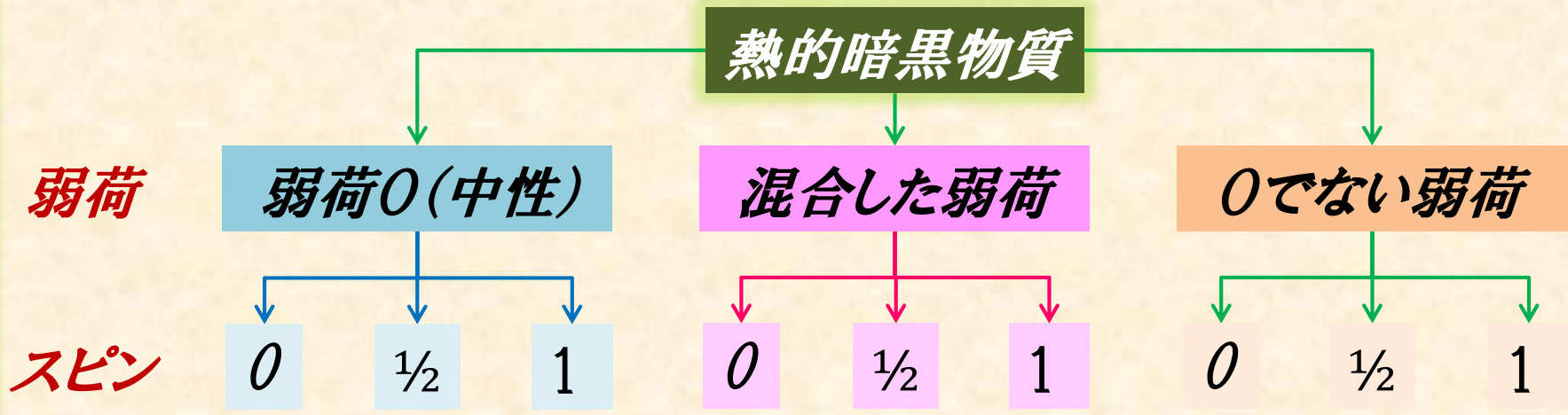
1. 各量子数の熱的暗黒物質に対し、最小のラグランジアン(有効理論)を構成。
2. 熱的残存量が観測と一致するとの条件より質量等パラメータ領域を確定。
3. これまでの探査結果や、理論的に動機づけのある領域を上述領域に反映。

熱的暗黒物質仮説



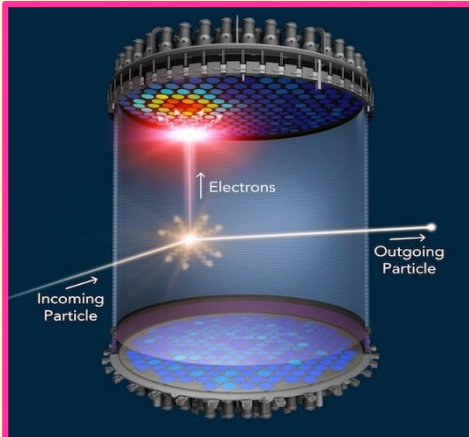
(熱的暗黒物質をフェルミオンとしてミニマムな相互作用シナリオを仮定した場合。)

熱的暗黒物質の多様性！素粒子標準模型のどの素粒子と主に反応するのか？



熱的暗黒物質は電荷とカラー荷を持たないため、弱荷とスピンの系統的に分類。

熱的暗黒物質探査の3+1つの柱



直接検出探査

暗黒物質と核子その散乱を利用した探査。

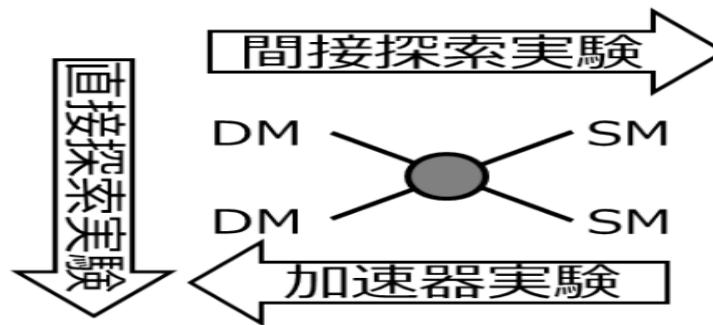
クォーク、ヒッグス等との相互作用に感度。

間接検出探査

暗黒物質の対消滅から生成される粒子を観測することによる探査。

暗黒物質対消滅断面積が十分な限り、様々な種類相互作用に感度。

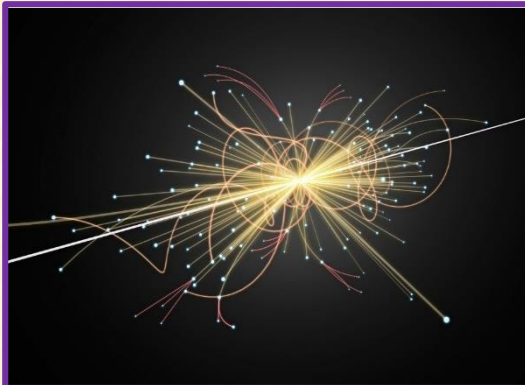
DM annihilation



暗黒物質の分布

暗黒物質の密度、速度分布を知る必要有。

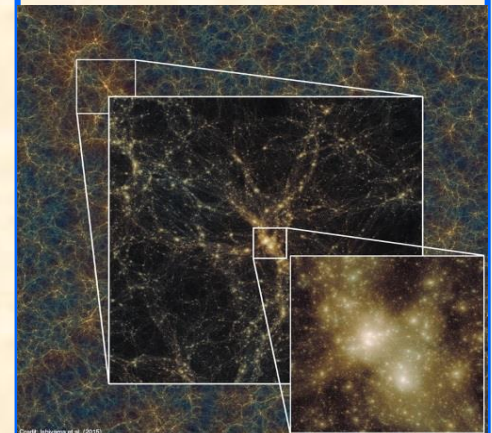
特に太陽系近傍、銀河中心、近傍銀河で。



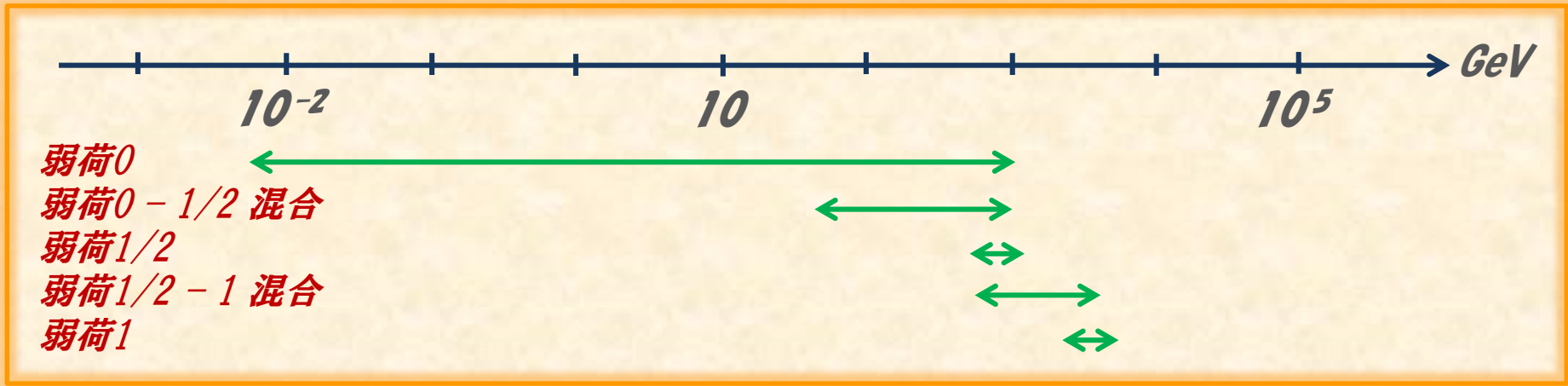
加速器による探査

加速器にて暗黒物質生成や、様々な素過程への間接寄与を用いた探査。

陽子加速器ではクォークと、電子加速器ではレプトンとの相互作用に感度。

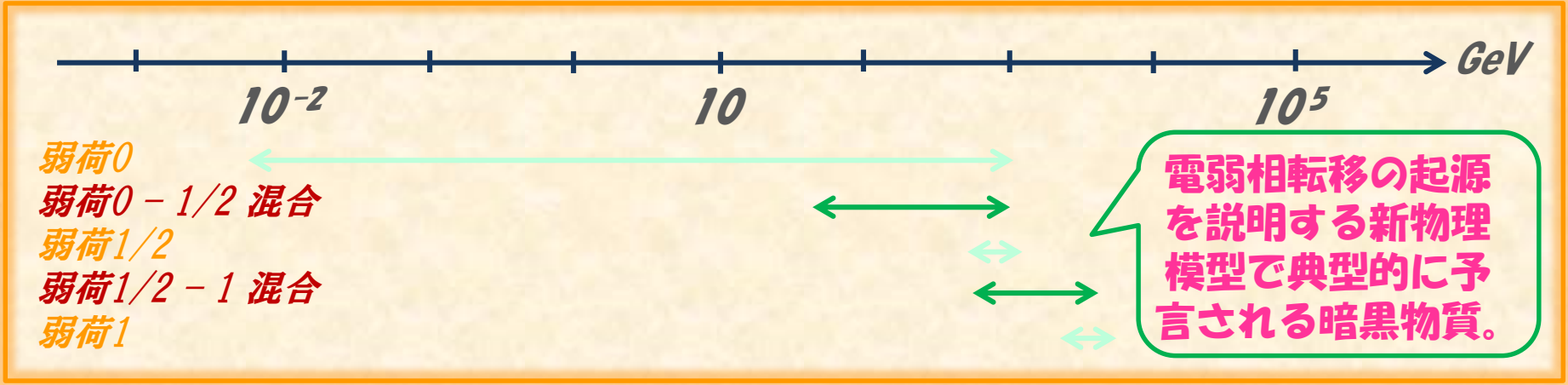


熱的暗黒物質の現状と未探査領域

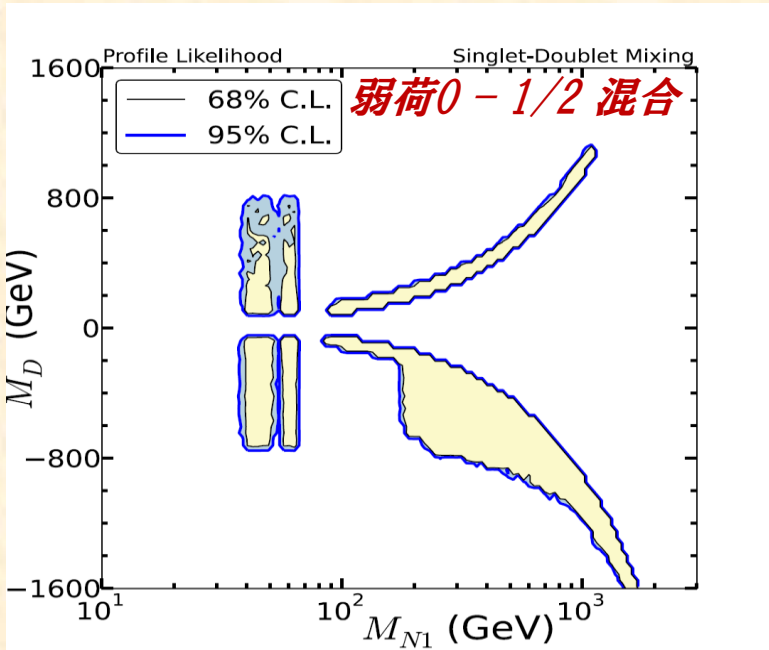


(熱的暗黒物質をフェルミオンとしてミニマムな相互作用シナリオを仮定した場合。)

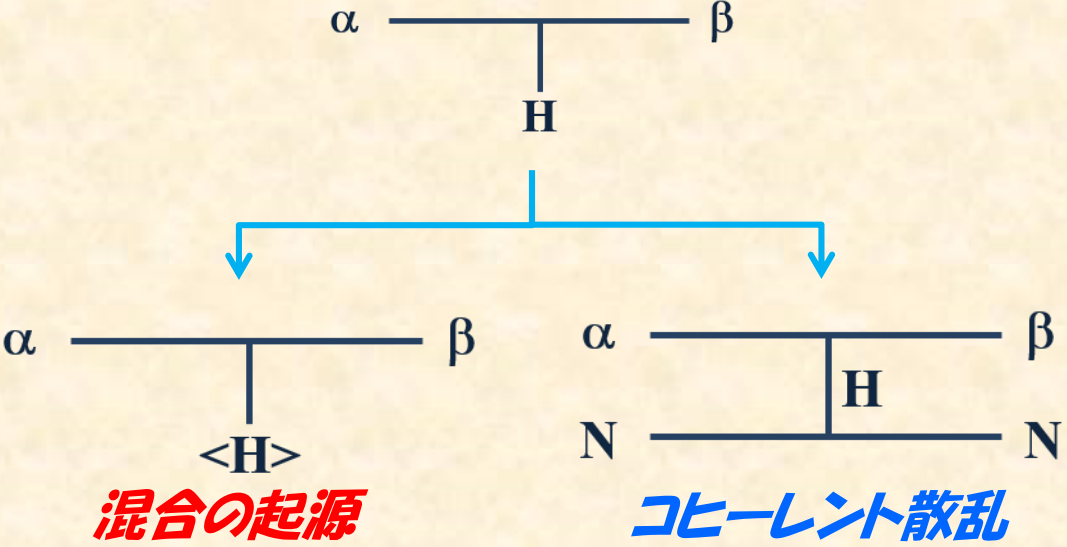
熱的暗黒物質の現状と未探査領域



例1: 熱的暗黒物質が混合した弱荷を持つ場合。 ($|\text{DM}\rangle = z_a |\alpha\rangle + z_b |\beta\rangle$)

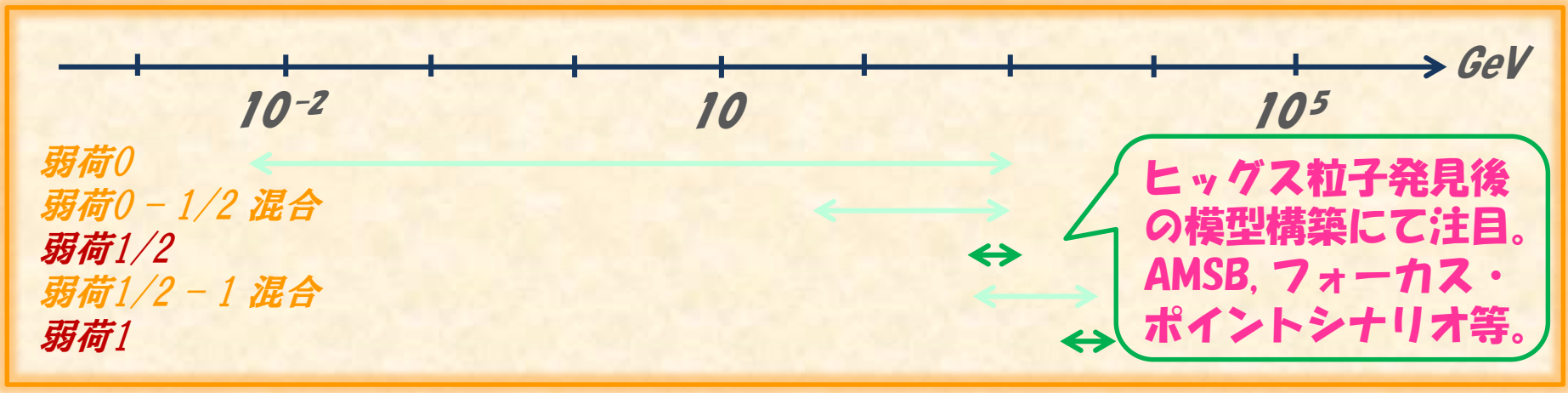


[Banerjee, S. M., Mukaida, Sming, 2016]

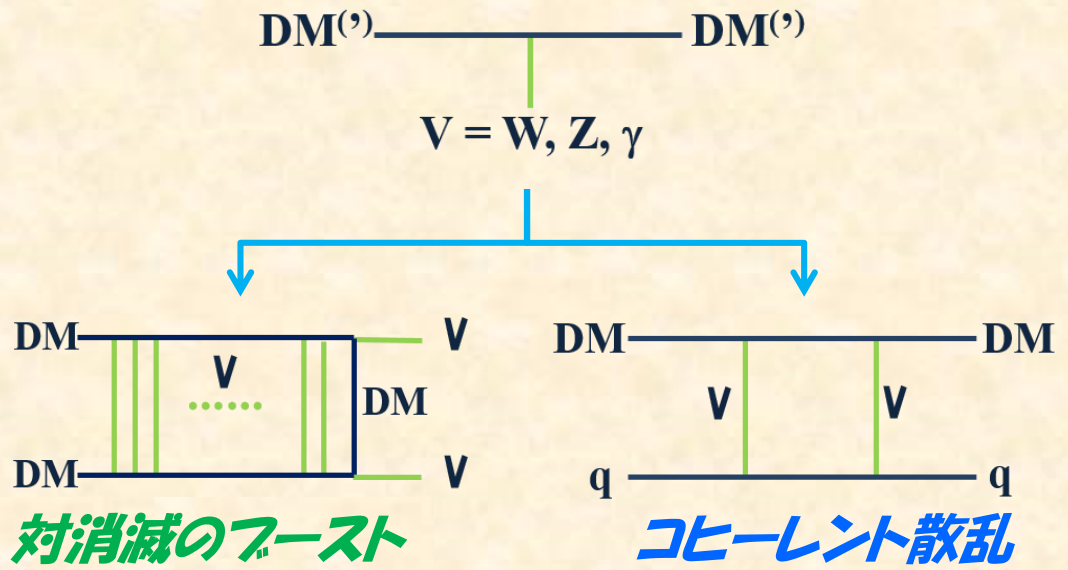
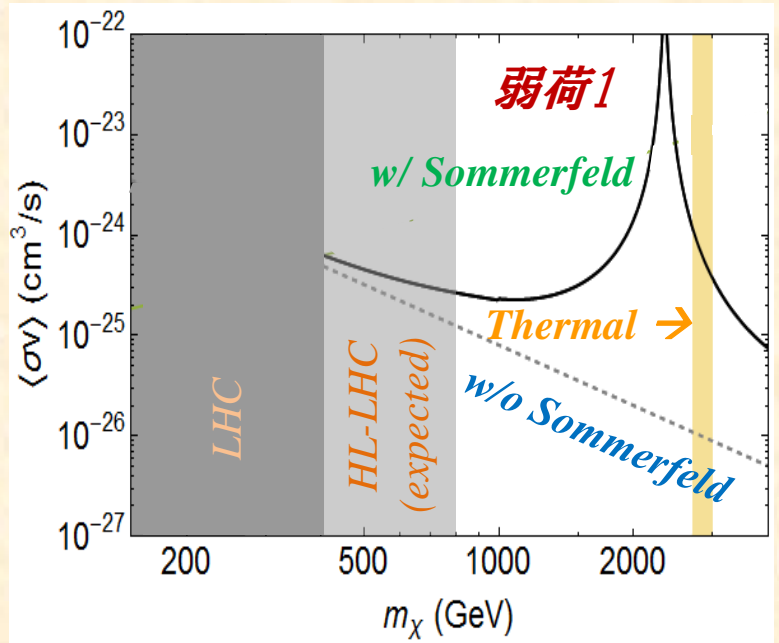


将来の直接検出で、完全にテスト可能と期待。近傍のDM密度/速度分布の決定精度に依る。

熱的暗黒物質の現状と未探査領域



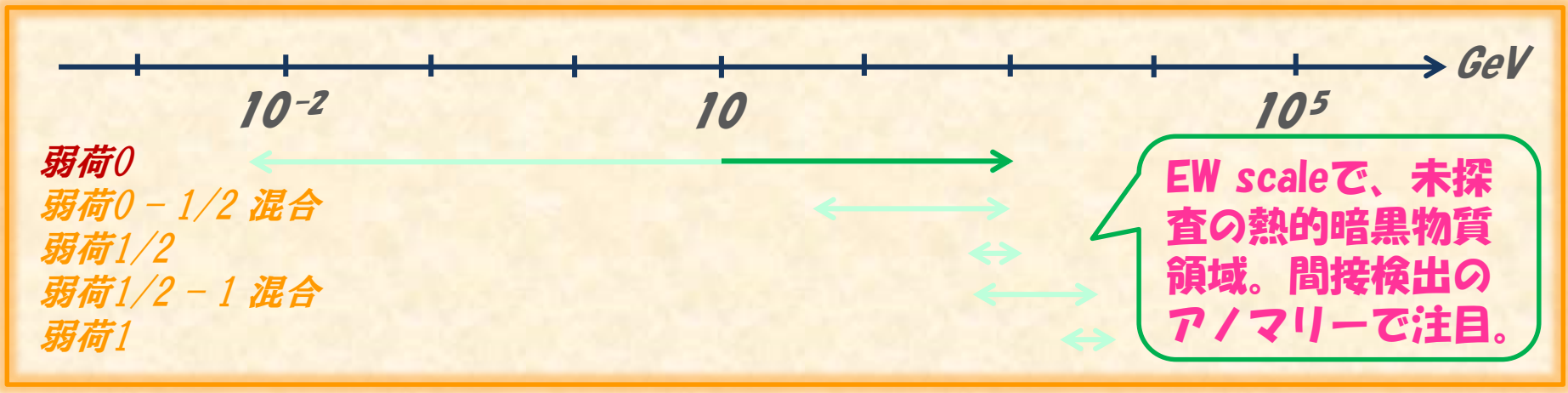
例2: 熱的暗黒物質が零でない弱荷を持つ場合。 ($\langle DM \rangle \simeq SU(2)_L$ 固有状態)



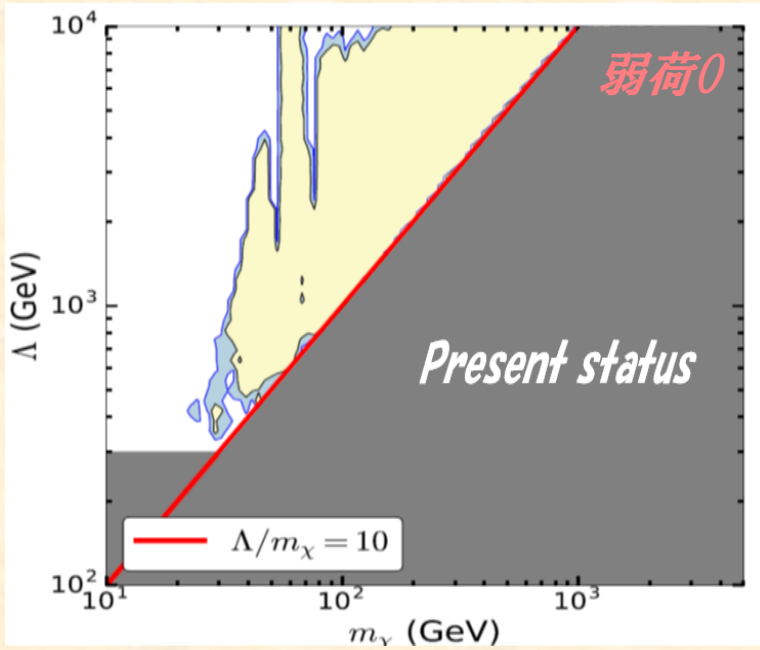
間接: 近傍銀河の暗黒物質密度の決定精度。
 直接: 近傍のDM密度/速度分布の決定精度。

[Hisano, S.M., Nojiri, 2004 (Sommerfeld effect)]

熱的暗黒物質の現状と未探査領域

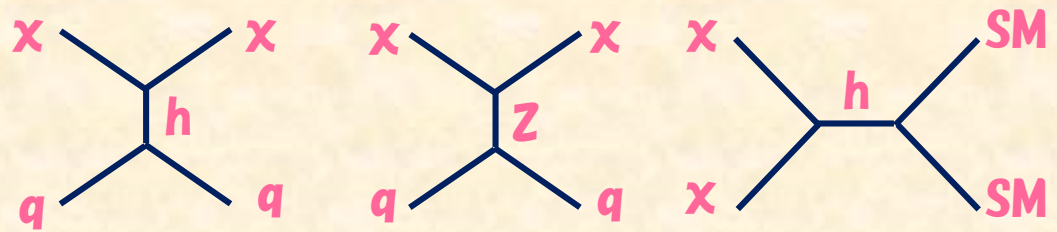


例3: 標準模型の力を(殆ど)感じない熱的暗黒物質 ($\langle DM \rangle \simeq SM$ singlet).



単純なDM+SM系に繰り込み可能な相互作用なし。

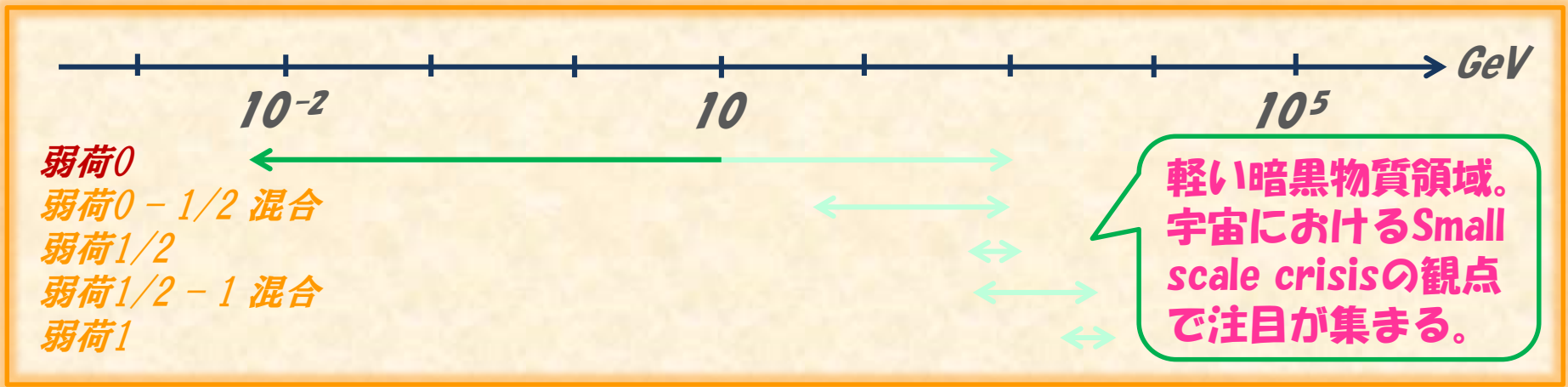
$$\frac{c_S}{2\Lambda} (\bar{\chi}\chi)|H|^2 \quad \frac{c_H}{2\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma_5\chi)(H^\dagger i\overleftrightarrow{D}_\mu H) \quad \frac{c_P}{2\Lambda} (\bar{\chi}i\gamma_5\chi)|H|^2$$



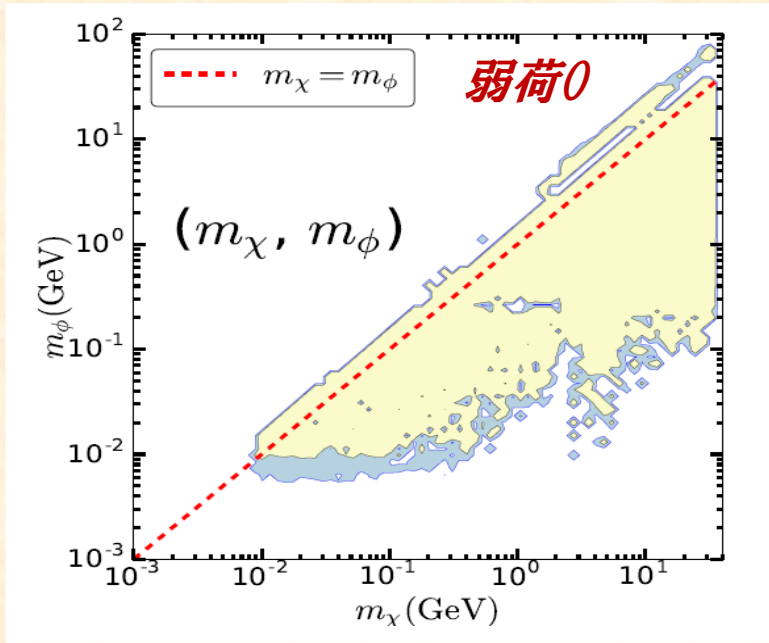
前者2領域は直接検出で完全にテスト可能。
後者の領域は間接検出でのみでテスト可能。

[S.M., S. Mukhopadhyay, Sming, 2014]

熱的暗黒物質の現状と未探査領域

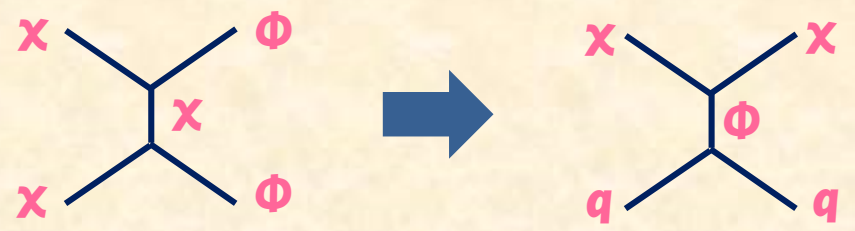


例4: (弱荷を(殆ど)持たない)軽い熱的暗黒物質領域。 ($\langle DM \rangle \simeq SM \text{ singlet}$).



単純なDM+SM系に繰り込み可能な相互作用なし。

- 熱的残存量の条件より、軽い媒介粒子が必要。
- 媒介粒子はSM singletで、ボソンである必要。



軽いIDM領域における直接探査が鍵を握る。近傍のDM速度分布の正確な情報は必須。

[S.M., Y. L. S. Tsai, Sming, 2018]

まとめ

暗黒物質の有力な候補である熱的暗黒物質について、地下実験における**直接探査**と宇宙・天体観測における**間接探査**の科学的意義の観点から、系統的かつ包括的な研究を行った。結果、重要な未探査領域は以下の通りにまとめられる。

重要な未探査領域	直接探査	間接探査	更なる科学的意義
✓ 混合弱荷を持つ領域	○		伝統的なTeV領域BSM
✓ 弱荷を持つTeV領域	△	○	ヒッグス発見後のBSM
✓ 弱荷持ためEW領域	○	○	間接検出のアノマリー
✓ 弱荷持ため軽い領域	○		Small scale crisis

必須情報: DMの密度・速度分布、DMと核子の散乱、QCD相転移付近のEoS.

注意事項:

上記の結果は、各量子数を持つ熱的暗黒物質において、最小の有効理論を用いて得られたものである。この最小性(ミニマリティ)を緩和することにより、直接及び間接検出の観点から、更なる魅力的な熱的暗黒物質領域は存在する。