

超微粒子原子核乾板を用いた

Multi Component Boosted Dark Matter 探索に向けた計画

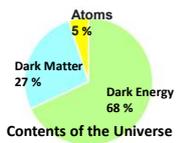
○陳夏姫^A, 中 竜大^B, 浅田貴志^B, 白石卓也^C, 長尾 桂子^D, 他NEWSdm Collaboration^{ABC} (A名古屋大, B東邦大, C神奈川大, D岡山理科大)

暗黒物質

様々な宇宙観測から存在が示唆されているが、未だに直接的な検出がされていない物質

暗黒物質の性質:

- 電氣的に中性
- 重力相互作用をする
- 宇宙年齢より寿命が長く安定
- 宇宙のエネルギー密度の27%を占める
- 非相対論的に運動(Cold DM)



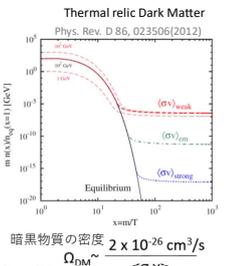
標準型を超える理論で記述される

WIMP探索の現状

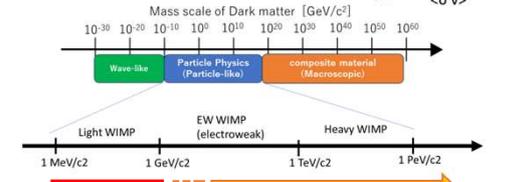
WIMP...

Weakly Interacting Massive Particle
弱く相互作用をする重い暗黒物質モデル

- 凍結機構による暗黒物質の残存量を良く説明できる。
- Thermal relicなWIMPの質量は、理論的には1 MeV/c²~1 PeV/c²まで許されている。



暗黒物質の密度 $2 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$



WIMPとバリオン粒子との相互作用を用いた直接探索は、GeV/c²未満の探索が難しく未検証の領域

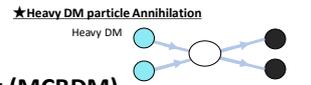
MeV/c²帯の暗黒物質探索が課題
実験的にはモデルに寄らずこのエネルギー帯の探索は意義がある
→新しい暗黒物質モデル

加速された暗黒物質モデル

暗黒物質の加速プロセスは近年活発に議論が行われている

相対論で制限される速度の暗黒物質
→運動エネルギー $\frac{1}{2}(m_{DM})(v_{DM})^2$ が小さい
例: $m_{DM} = 1 \text{ GeV}/c^2, v_{DM} = 230 \text{ km/s}$
 $\frac{1}{2}(m_{DM})(v_{DM})^2 \sim 0.3 \text{ keV}$
→現状の検出器でバリオンとの相互作用を用いた探索は難しい

加速された暗黒物質の存在が理論で提唱
軽い暗黒物質が加速され
検出に十分な運動エネルギーを得る機構



- Cosmic Ray Scattering
Y. Ema, F. Sala, R. Sato 1811.00520
T. Bringmann et al. 1810.10543
CR → DM
- Heavy DM particle Decay
K. Agashe et al. 1405.7370
I. Berger et al. 1410.2246
Heavy DM → Light DM + SM

Multi Component Boosted Dark Matter (MCBDM)

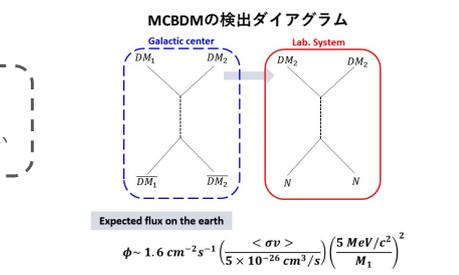
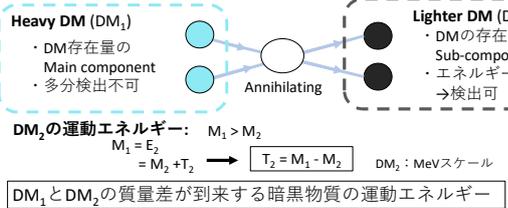
暗黒物質の対消滅プロセスで加速する機構 Keiko I. Nagao, Tatsuhiro Naka, and Takaki Nomura, JCAP04(2025)030, [arXiv:2411.10149v1 15 Nov 2024]

■近年活発に現象論の議論がされている

- "Multistep cascade annihilations of dark matter and the Galactic Center excess", G. Efor, et al., Phys. Rev. D 91 (2015), [arXiv:1503.01773 [hep-ph]].
- "(Indirect Detection of Boosted Dark Matter)", K. Agashe, et al., JCAP 10 (2014), 062, [arXiv:1405.7370 [hep-ph]].
- "Boosted Self-interacting Dark Matter in a Multi-component Dark Matter Model", M. Aoki and T. Toma, JCAP 10 (2018), 020, [arXiv:1806.09154 [hep-ph]].
- "Resonant indirect detection of a secluded dark matter sector", J. Li, T. et al., Phys. Rev. D 108 (2023) no. 3, [arXiv:2302.09839 [hep-ph]].
- "Viability of Boosted Light Dark Matter in a Two-Component Scenario", A. Basu, et al., [arXiv:2310.09349 [hep-ph]].

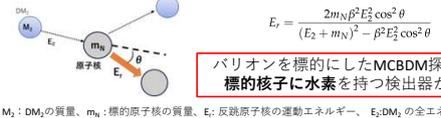
■到来方向: 暗黒物質の密度が高い銀河中心

・重い暗黒物質(Ψ_1, DM_1)がより軽い暗黒物質(Ψ_2, DM_2)に対消滅、バリオンと相互作用をする



MeV帯の粒子と標的核子との散乱エネルギー

バリオン粒子を標的にしたMeV/c²スケールの暗黒物質直接探索
→最も軽い原子核である水素が反跳エネルギー最大

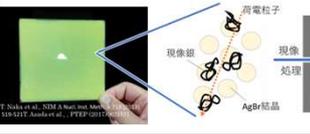


バリオンを標的にしたMCBDM探索には標的核子に水素を持つ検出器が最適

超微粒子原子核乾板(NIT)*

*T. Asada et al., PTEP, 2017, (2017) 063H01 Nano Imaging Tracker

- ゼラチンにAgBrが分散した検出器
 - AgBr結晶一つ一つが検出素子(結晶サイズ70 nm)
 - sub-micronレベルの世界最高の空間分解能
- keVオーダーの荷電粒子による飛跡長: 固体検出器: ~10² nm
荷電粒子による飛跡長: ガス検出器: ~10⁵ nm



メリット

- ・標的に重い原子核と軽い原子核を含む、水素を含む
→幅広い質量帯の暗黒物質探索に利用可能
 - ・NIT密度: 3.1 g/cm³
→ガス検出器より3桁大きい
 - ・飛跡を検出器内に3次元情報として保存可能
 - ・大スケール化が容易
- デメリット
・時間分解能がない
→赤道儀を利用した方向探索

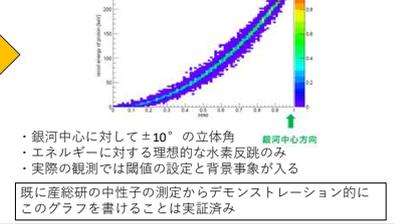
- ・標的核子に水素をもつ
- ・方向感度を持った探索が可能

NITの含有元素

Element	Atomic fraction [%]
Ag	8.4
Br	Heavier DM 8.1
I	0.3
C	22.7
N	Main Target 5.2
O	12.5
H	Lighter, Boosted DM 42.8

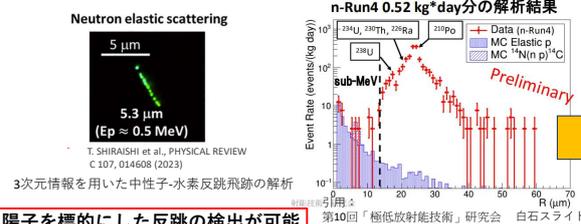
方向感度を持ったMCBDM探索

方向感度をもった観測で銀河中心からの信号は下図のように観測されると予測される
→WIMPよりもポイントソース



Sub-MeV帯の地下中性子観測を参考にしたMCBDMの探索可能性

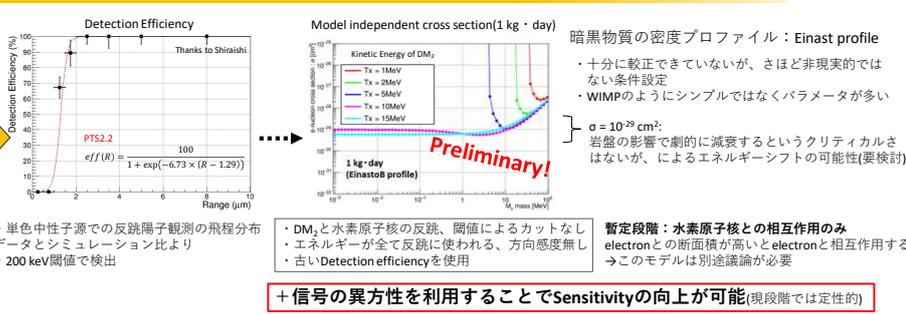
Sub-MeV帯の地下中性子観測



陽子を標的にした反跳の検出が可能

- ・反跳エネルギー100 keV(1μm以上)を閾値(CNNを用いた解析、BGフリー)
- ・地下中性子が見えるレベルまで背景事象を落としてきた
- ・Sub-MeV帯に限ると電子背景事象を識別、除去可能

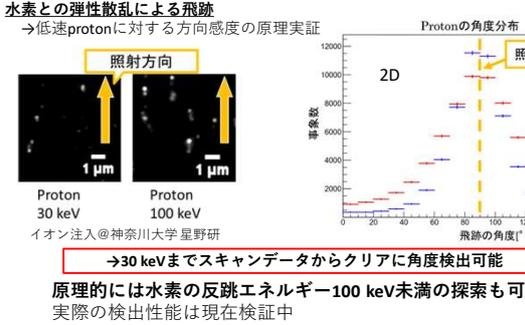
地下環境中性子測定から予測されるMCBDM探索の感度曲線(暫定)



検出閾値を下げる原理実証

100 keV以下のProton 観測の原理実証

検出閾値を下げることでDM₁, DM₂の質量差の小さい縮退したMCBDMの観測が可能



MCBDMの地下探索計画

