

富山大理

古川楓*

共同研究者：藤原素子 中野佑樹

(*s2240141@ems.u-toyama.ac.jp, motoko@sci.u-toyama.ac.jp, ynakano@sci.u-toyama.ac.jp)

2026年3月6日第2回学術変革「地下稀事象」若手研究会@神戸大学

24K21202 24K00654

概要

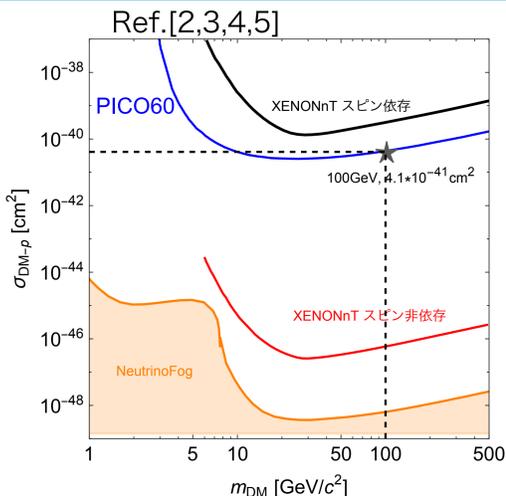
現在、スピンの依存する暗黒物質と核子の散乱の探索手段として、フッ素を標的とした実験が稼働しており、その大型化が検討されている。一方、フッ素は大きな電子ニュートリノ吸収反応率を持つため、その過程から暗黒物質散乱と類似した背景事象が予想される。本研究では、暗黒物質の相互作用数と太陽ニュートリノの吸収反応数を理論的に計算し、暗黒物質の信号と太陽ニュートリノの信号が重複する可能性を見積もった。

1.背景

- 直接探索実験: 暗黒物質(WIMP)を原子核反跳を通して探索
- 1 kton位のCF₄の標的で
- スピン依存する散乱を観測したい
(気体のCF₄のシンチレーション発光は確認済み[1])

フッ素を用いる利点

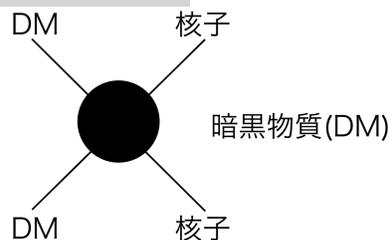
- 自然存在比が大きい
- ランデ因子が大きい



フッ素化合物：暗黒物質のスピンの依存する散乱に感度大

(暗黒物質と核子の散乱断面積) $\propto \lambda^2 J(J+1)$
 λ : ランデ因子 J : 原子核のスピンの

同位体	¹⁹ F	¹²⁹ Xe	¹³¹ Xe
J	1/2	1/2	3/2
$\lambda^2 J(J+1)$	0.647	0.124	0.055



	フッ素の特徴	利点
ランデ因子	大	断面積大
自然存在比	ほぼ100%が ¹⁹ F	自身の同位体による背景事象小

2.問題点

太陽ニュートリノによる反応

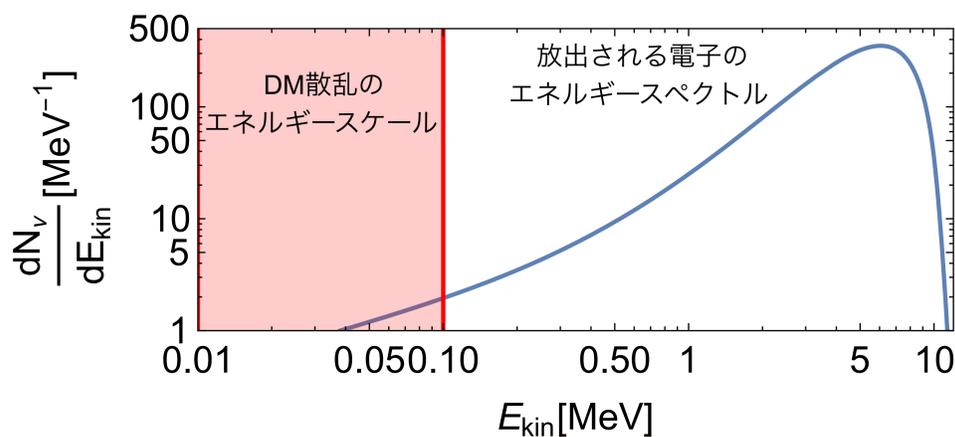
$^{19}\text{F} + \nu_e \rightarrow ^{19}\text{Ne} + e^-$ (閾値 3.238 MeV) ^B太陽ニュートリノのみ吸収反応に寄与
 $^{19}\text{Ne} \rightarrow ^{19}\text{F} + e^+ + \nu_e$ (Q値 2.2 MeV, 寿命19秒)

暗黒物質の信号と太陽ニュートリノの信号は観測されるエネルギーが異なるが

- 太陽ニュートリノの吸収反応: 年 1.9×10^3 イベント(ニュートリノ振動を仮定, フッ素1 kton)
- エネルギー分布はkeV領域まで広がりうる

➡ 暗黒物質散乱と識別しにくい信号が検出される可能性あり

➡ 暗黒物質散乱とニュートリノ吸収反応の、観測されるエネルギースペクトルを理論計算し、**両者を識別できるか検討**



3.結果

暗黒物質散乱・ニュートリノ吸収のイベント分布を理論計算し比較(¹⁹F 1 kton・観測時間1年を仮定)

● 暗黒物質散乱

$$N_{DM} = (\text{観測時間}) \times (\text{標的数}) \times \frac{\rho_{DM}}{m_{DM}} v_{DM} \left[\sigma_{SD}^p \times \lambda^2 J(J+1) \right] \times \epsilon$$

暗黒物質による原子核の反跳エネルギー: 10-100 keV

ρ_{DM}	暗黒物質の密度	0.3 GeV/cm ³
m_{DM}	暗黒物質の質量	100 GeV
v_{DM}	暗黒物質と標的の相対速度	230 km/s
σ_{SD}^p	暗黒物質と核子の散乱断面積(スピン依存)	4.1×10^{-41} cm ²
ϵ	観測効率	0.1

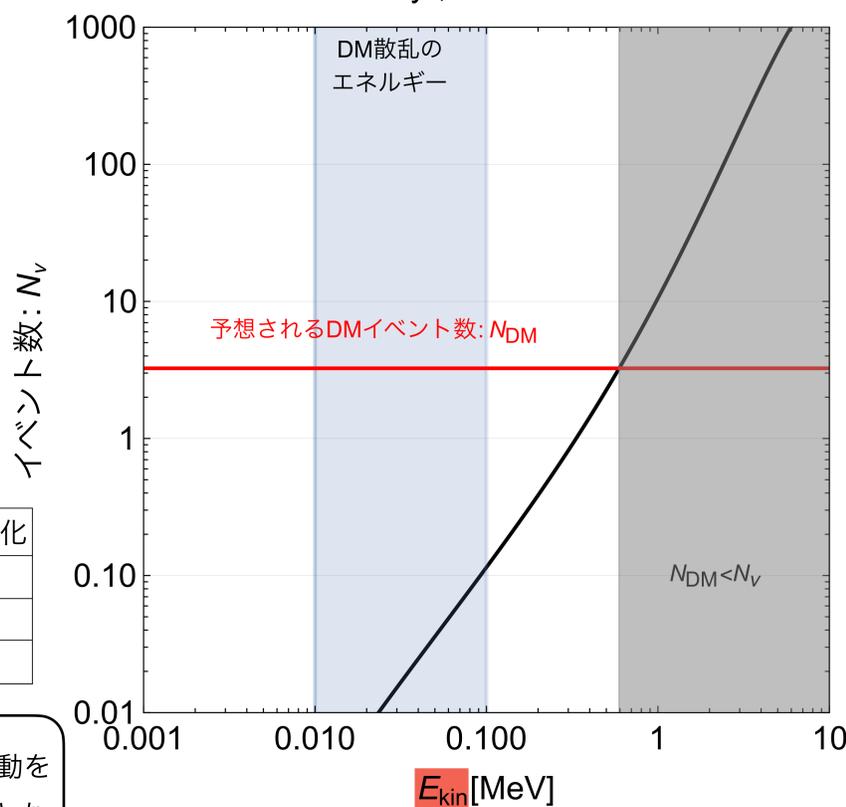
● ニュートリノ吸収

$$N_\nu(E_{kin}) = (\text{観測時間}) \times (\text{標的数}) \times \sigma_0 \times \frac{1}{3} \times \int_1^{1+\frac{E_{kin}}{m_e c^2}} dw_e w_e (w_e^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \times \frac{d\Phi_e}{dw_e}$$

E_{kin}	放出される電子の運動エネルギー	設定する観測閾値によってイベント数が増減
σ_0	ニュートリノ吸収の断面積	7.085×10^{-45} cm ²
w_e	電子のエネルギー(電子質量単位)	
Φ_e	生成される電子の量	太陽ニュートリノフラックスから計算

まとめと今後

フッ素と太陽ニュートリノの相互作用数は、¹⁹F 1 kton・観測時間1年で、ニュートリノ振動を仮定すると 1.9×10^3 事象程度である。そのうち、暗黒物質の信号と重複するのは1事象程度となることがわかった。今後はNeのβ崩壊由来の陽電子の効果も計算し、¹⁹Fだけでなく¹³Cとの相互作用も含めて計算する。[5]

1 yr, 1 kton ¹⁹F

参考文献 [1] K.Mizukoshi et al, JINST, 16, P12033, (2021)

[2] C. Amole et al, Phys. Rev. D 100, 022001 (2019)

[3] E. Aprile et al, Phys. Rev. Lett. 131, 041003 (2023)

[4] Ciaran A. J. O'Hare, Phys. Rev. Lett. 127, 251802 (2021)

[5] M. Abreu et al, Phys. Rev. Lett. 135, 241803, (2025)