暗黒物質探索のためのCaF_2蛍光熱量検出器の開発

松本朋也、堤智、西川隆博、野田健太、梅原さおり[A]、吉田斉
阪大理、阪大 RCNP[A]

1.導入

暗黒物質 : WIMPs

- 宇宙の約25%を占めている暗黒物質の有力候補の一つ
- Weakly Interacting Massive Particles
- 質量はMeV ~ TeVのオーダー
- 中性かつ安定

→ **WIMPsの直接探索を行うことが最終目標！**

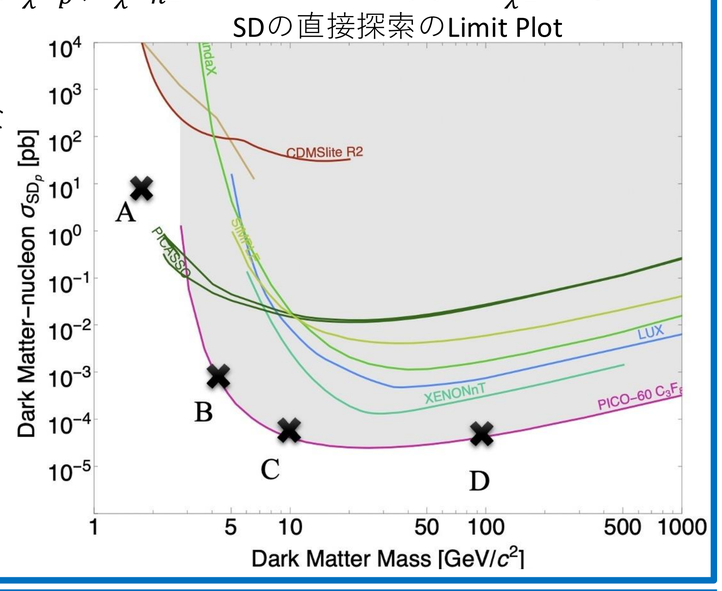
WIMPsの直接探索手法

WIMPsと原子核の散乱には、Spin Independent型とSpin Dependent型がある
→ 特にSpin Dependent （以下SD）に注目
WIMPsと原子核の散乱事象による反跳エネルギースペクトルを測定
→「WIMPs – 核子の反応断面積$\sigma^{SD}_{\chi-p}$, $\sigma^{SD}_{\chi-n}$」や「WIMPsの質量m_χ」を推定

灰色の部分 : 排除領域
　ーWIMPsがないとされている領域
以下の未探索領域 or 近傍で探索可能な検出器を開発したい！

	m_χ [GeV]	$\sigma^{SD}_{\chi-p}$ [pb]
A	2	10^1
B	5	10^{-3}
C	10	10^{-4}
D	100	10^{-4}

SDの直接探索のLimit Plot



研究目的
検出器の性能要件をシミュレーションを用いて検証！

検出器と条件

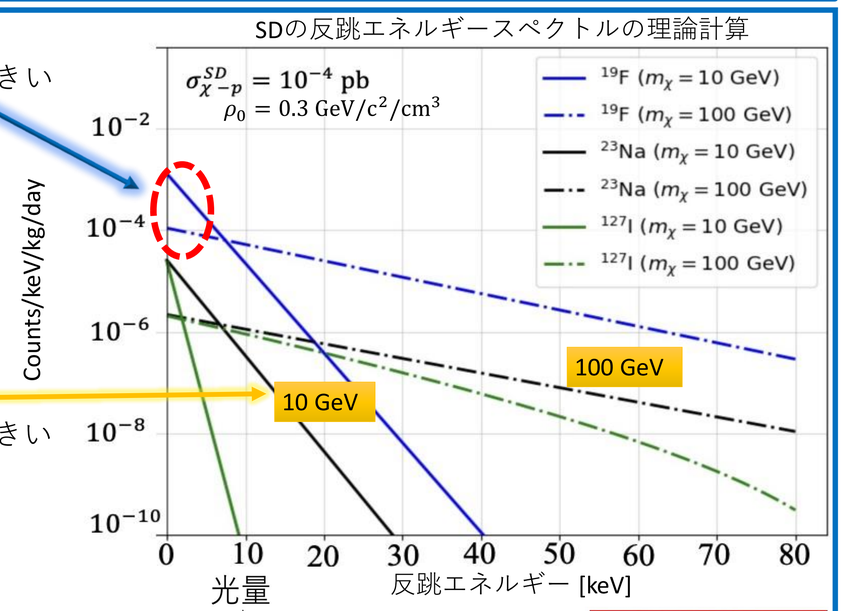
^{19}Fの値が大きい

標的 : ^{19}F

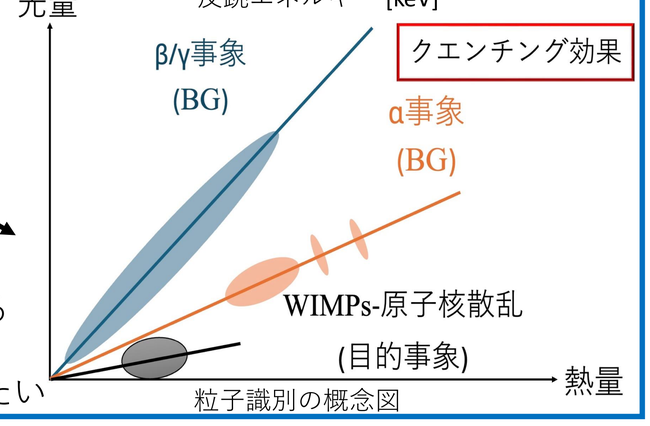
CaF_2蛍光熱量検出器の開発を目指す！

低質量の方が低エネルギー側で値が大きい

SDの反跳エネルギースペクトルの理論計算



利点
- ^{19}Fの質量比が大きい(38/78)
- 高純度・大質量の結晶が入手可能
- 熱量とシンチレーション光の同時測定でWIMPs事象とBG事象の分離が期待



粒子識別の概念図

検出器に求められる条件
①低エネルギー閾値
　ー低いほどより多くのイベントが得られる
②低BG
　ーWIMPs事象は稀事象のためBGは低減したい

2.手法

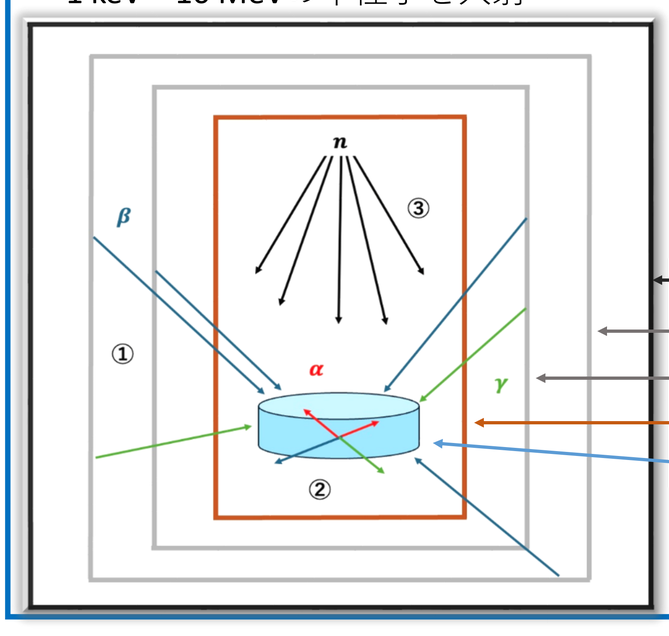
Geant4を用いたBGレートの検証

前提　:
- 冷凍機を使用して測定
　ー真空容器で断熱を行うための多層容器を使用 (左下図)
- 環境γ線は鉛遮蔽で十分低減可能

①検出器周辺
- U系列, Th系列の放射性不純物をそれぞれ1 ppbの濃度で均一にAl缶内に生成

②CaF_2結晶内部
- CaF_2結晶中に10 μBq/kgの濃度で、 U系列・ Th系列の放射性不純物を生成

③環境高速中性子
- 先行研究[1]より環境中性子スペクトル@神岡地下を仮定
- 1 keV ~ 10 MeVの中性子を入射



- SUS CAN : 540 mmϕ × 1143 mm, 3 mm厚
- Al CAN 2: 459 mmϕ × 989 mm, 1.5 mm厚
- Al CAN 1: 412 mmϕ × 765 mm, 1.5 mm厚
- Cu CAN : 359 mmϕ × 594 mm, 1 mm厚
- CaF_2結晶 : 50 mmϕ × 5 mm

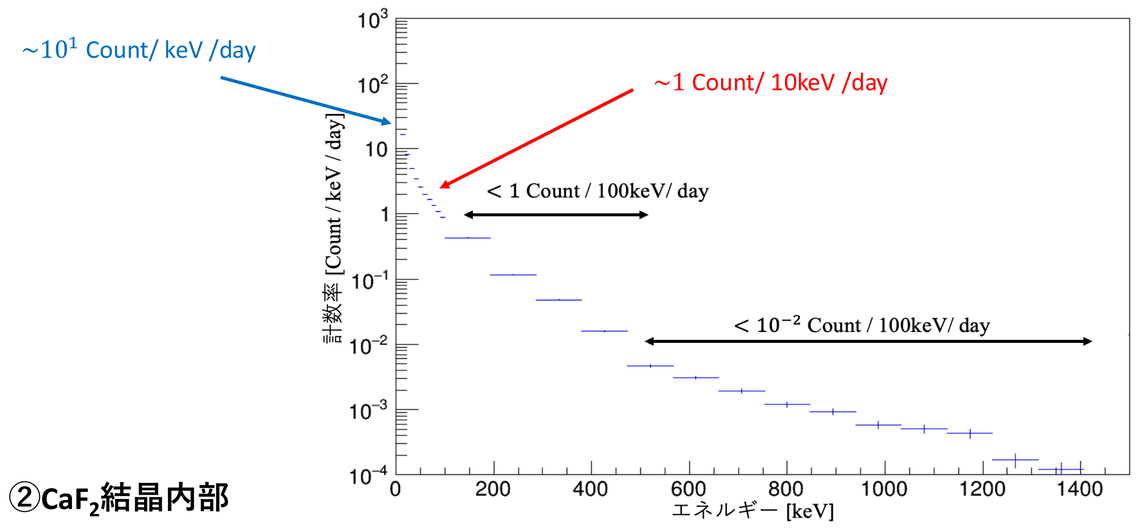
[1] Keita Mizukoshi. CANDLES検出器エネルギー応答評価および地下環境中性子背景事象の研究. Master's thesis, 大阪大学, 2019.

3.結果・考察

各シミュレーションの結果

①検出器周辺

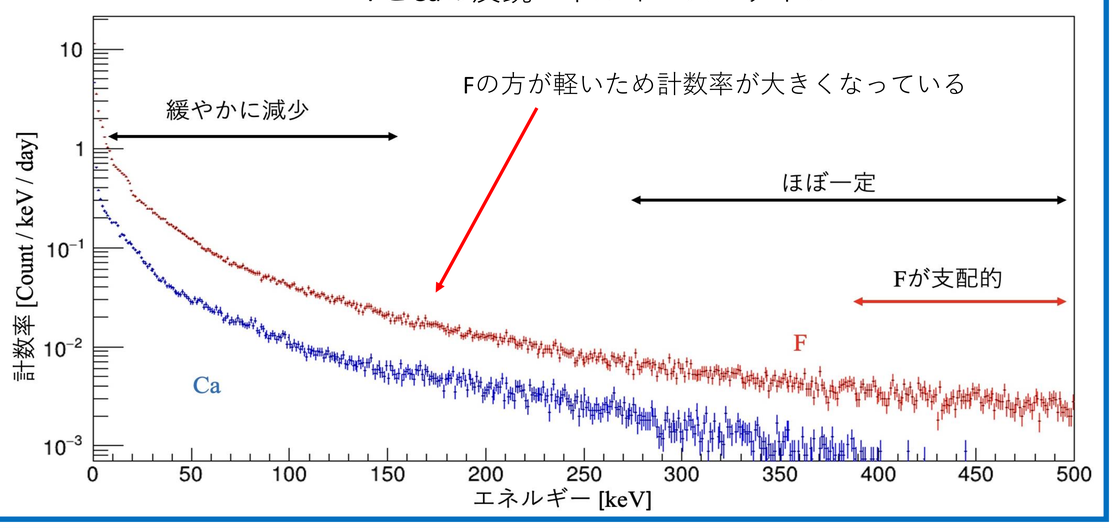
Alの缶から一様に発生
検出器周辺由来のBGのエネルギースペクトル



②CaF_2結晶内部
~1000 keVの領域で、~10^{-2} Count/keV/dayとなった
→ 影響としては無視できる
　内部のバルクのBGしか考慮しておらず、
　表面汚染によるBGは今後の検討する必要あり

③環境高速中性子

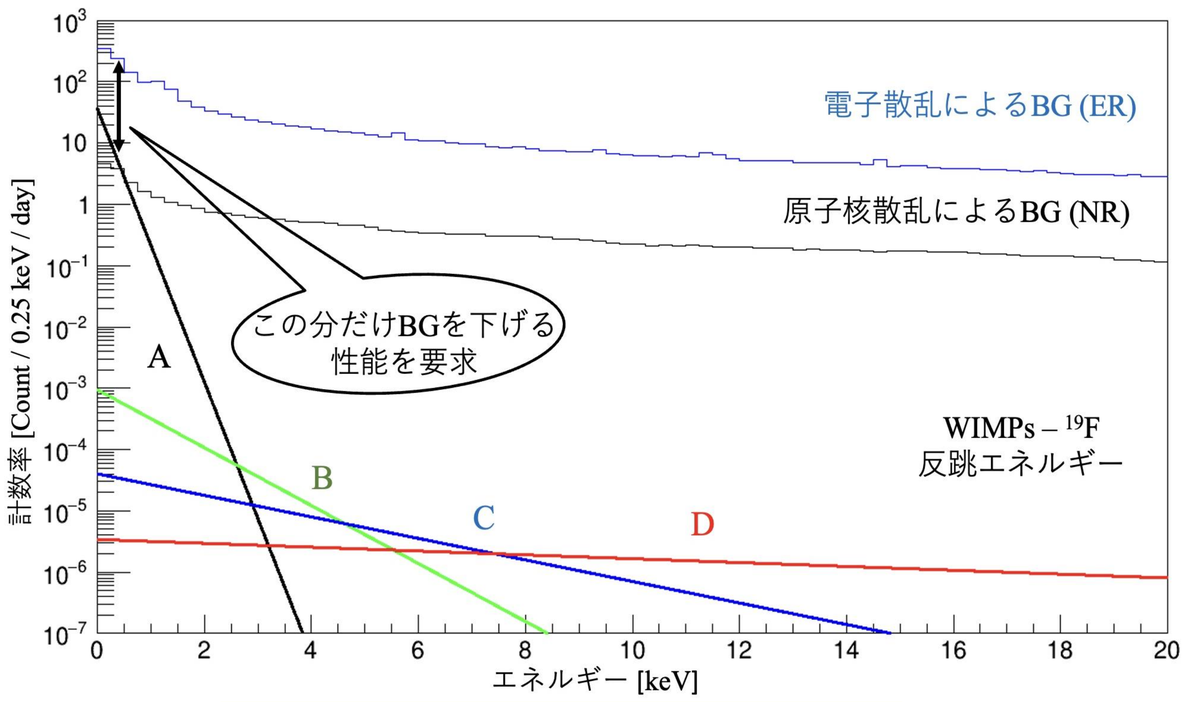
FとCaの反跳エネルギースペクトル



低エネルギー領域のエネルギースペクトル

シミュレーションの結果のうち、0 ~ 20 keVまでを拡大

NR + ERのエネルギースペクトルとWIMPs - 原子核の反跳エネルギースペクトル



→ **この結果から検出器の性能要件を検証！**

検出器性能要件の検証

ER由来のβ/γ除去能
中性子の遮蔽能　を仮定

	β/γ除去能	中性子遮蔽能	エネルギー閾値 [keV]
A	~10^{-1}	ー	**0.25**
B	**~10^{-5}**	**~10^{-3}**	**1.5**
C	**~10^{-6}**	**~10^{-4}**	2 ~ 3
D	**~10^{-7}**	**~10^{-5}**	~ 10

→ エネルギー閾値を決定

4.まとめ・今後の展望

まとめ
- WIMPsの直接探索のためにCaF_2を用いた蛍光熱量検出器を開発中
- Geant4でのシミュレーションを行いBGレートを検証
- 得られた結果から、WIMPsの直接探索を行う検出器に必要なエネルギー閾値とBG除去能・中性子遮蔽能を決定

今後の課題
- 検出器での測定を通して、今回のシミュレーションとの比較を行う
- 今回は結晶のサイズを固定していたため、今後はシミュレーションによる結晶のサイズの最適化を行う