

暗黒物質直接探索実験ANKOKにおける 電子反跳事象の理解

2017/02/20 @ 23rd ICEPP Symposium

早稲田大学 修士2年

木村 真人

ANKOK Experiment

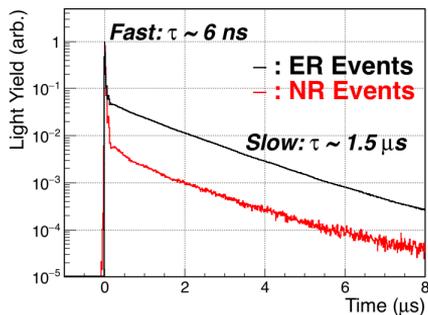
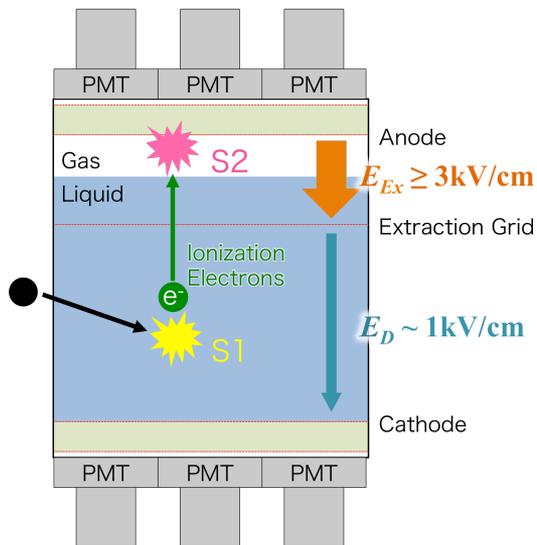
2相型Ar光検出器を用いた低質量暗黒物質直接探索実験。

: Ar (“軽い希ガス元素”)を用いた

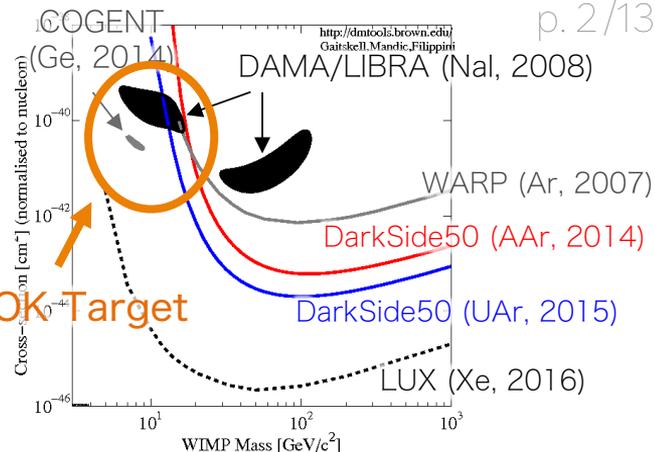
$M_\chi \sim 10 \text{ GeV}/c^2$ のWIMP探索を目指す。

発見 (Na, Ge : 軽い標的核) <-> 棄却 (Xe : 重い希ガス)

2相型Ar光検出器



- S1波形 (PSD)
 - ➔ - S2/S1 (電離蛍光比)
- の2手法により, NR事象(Signal)とER事象(BG)を分離。

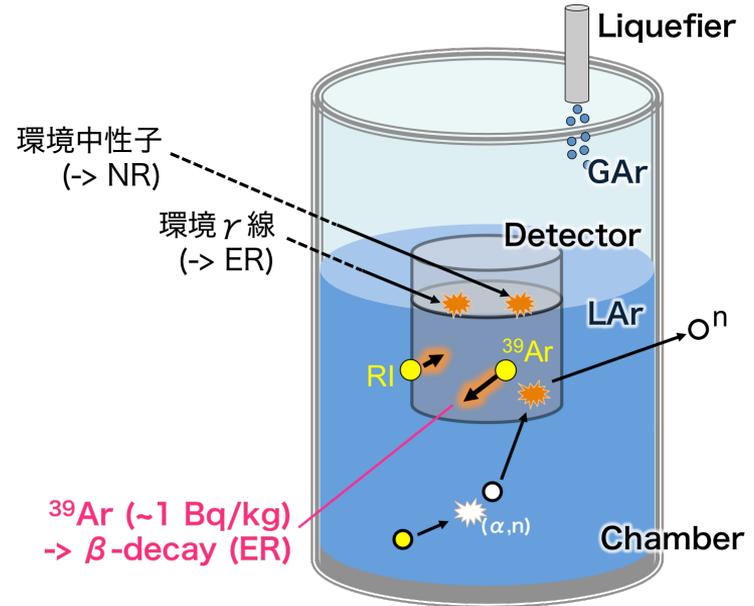


ANKOK実験における Background Source

WIMP事象 (*ANKOK Target*) :
 $N < 1$ events/day, $E_{Recoil} < 20$ keV

Background Source

- 環境放射線 (γ) 事象
 ... Shieldを設置し遮蔽。
- 環境中性子事象
 ... 地下実験施設 (神岡等) で実験遂行し遮蔽。
- 内部放射性不純物起因事象
 ... 検出器部材の選定による除去,
 発光位置同定による分離。
- ^{39}Ar 起因事象
 (Ar放射性同位体, β -decay ~ 1 Bq/kg)
 ... 解析的に分離するほかない。



WIMP探索達成のためには,
電子反跳 (ER) 背景事象の解析的な分離能力が必須。

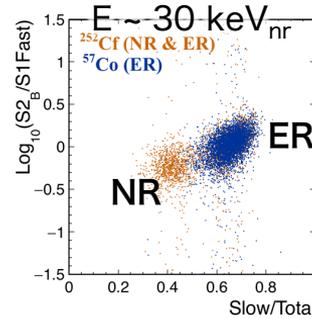
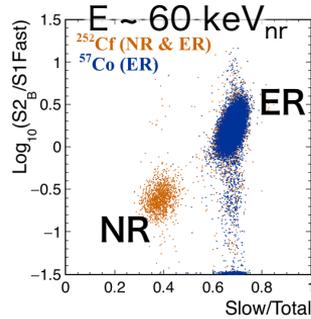
WIMP探索に向けた研究課題

- 有効質量 ~1 kgのプロトタイプ検出器によるR&D。
 - ： 高感度 (~ 10 p.e./keV_{ee}) 検出器の構築。
 - ： 線源データによる検出器応答理解と事象分離能力の評価。

⁵⁷Co/²⁵²Cf線源による
NR/ER分離能力評価

[目標]

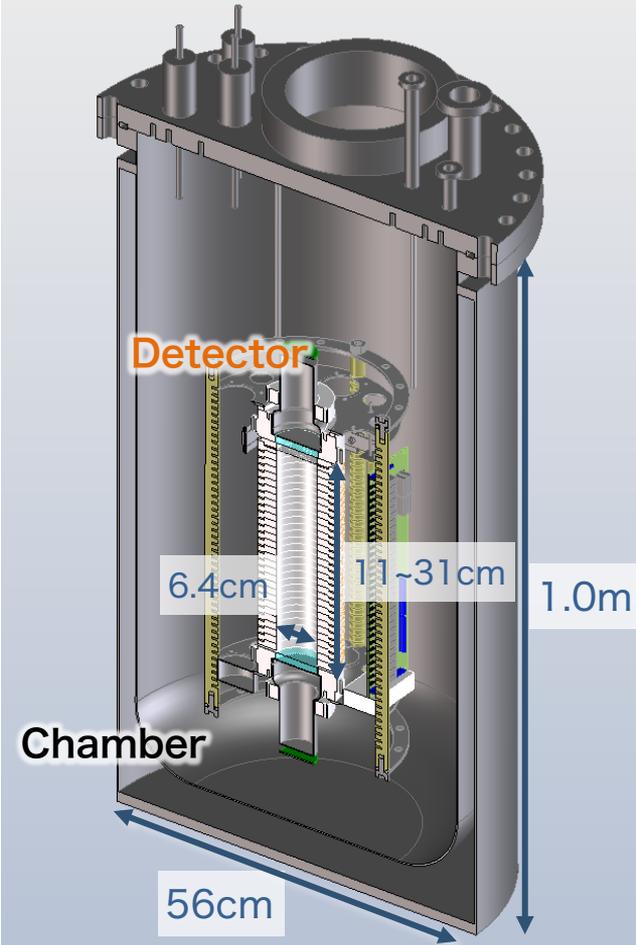
R ~ 10⁵ (/keV_{nr})
@ 20 keV_{nr}



- 探索実験遂行に向け、有効質量 ~30 kgの検出器製作、背景事象分離能力の理解と向上に取り組む。

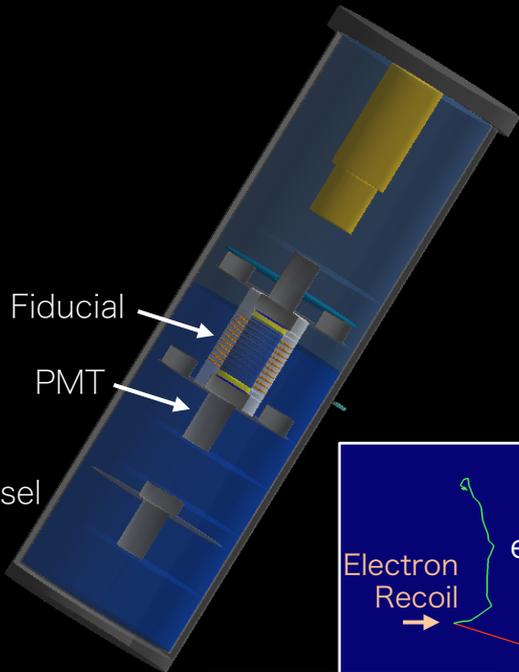
本発表

- ： 検出器シミュレーションの構築
- ： ER背景事象分離能力向上のための、シミュレーションとデータの双方を用いたLAr応答の理解



ANKOK Detector Simulation

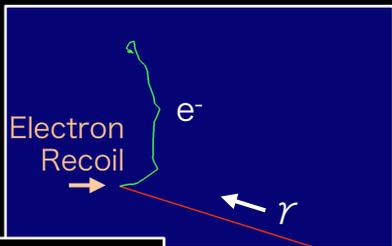
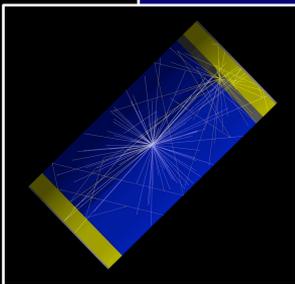
- CERN Geant4.10.0 (粒子輸送シミュレーション) に基いて構築。
- 入射粒子や2次粒子の挙動をGeant4が刻む”step”ごとに追い、検出器内でのエネルギー損失を算出。
- 粒子入射から信号出力 (FADC波形) までを、1つのFramework内で再現。



Vessel

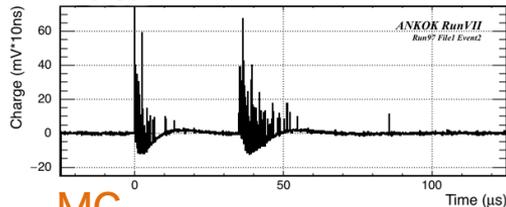
Fiducial

PMT

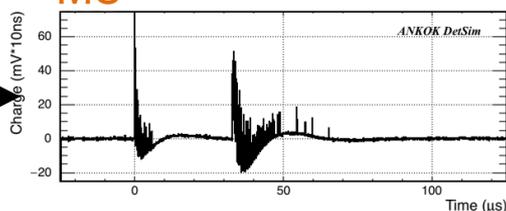
Electron
Recoil e^- γ 

Signal Output

Data



MC



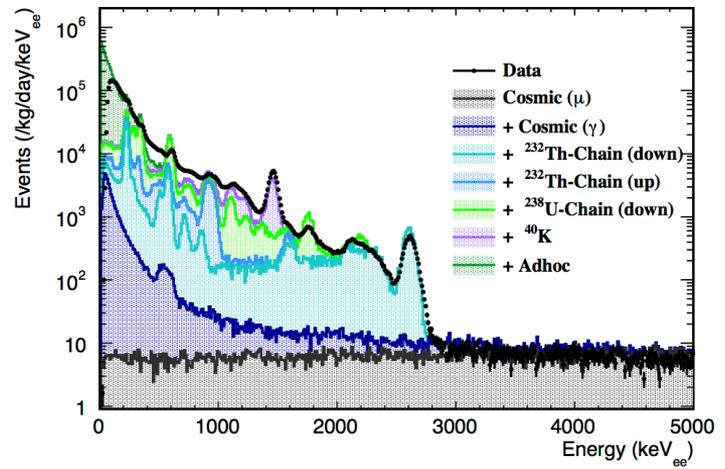
実際に得られる波形を、
検出器シミュレーション上
にモデル化し実装。

→ データとまったく同様の
波形解析が可能。

Background Dataの理解

- LAr検出器で観測されるBackground Dataを、NaI(Tl)による独立な測定と検出器シミュレーションを用いて予測。

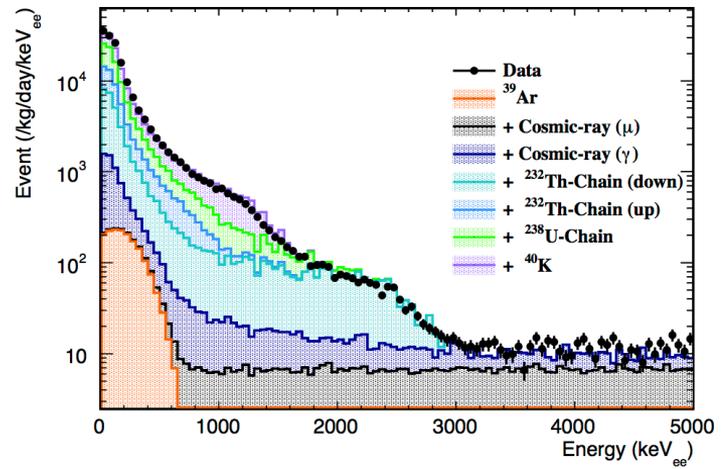
● NaI(Tl)シンチレータ



- 粒子輸送計算ソフトPHITS^[1]により、 γ 線に対するNaI (Tl) 検出器応答を算出。
- データにFitすることで各線源束量を決定。

Input
➔

● 2相型Ar光検出器 (小型プロトタイプ)

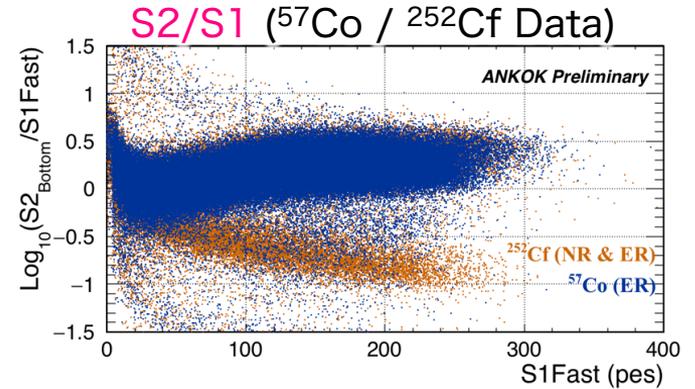


2相型Ar光検出器におけるBackground Dataを、検出器シミュレーションにより概ね説明。

[1] T.Sato et. al., J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913 (2013)

分離能力向上へ向けた取り組み

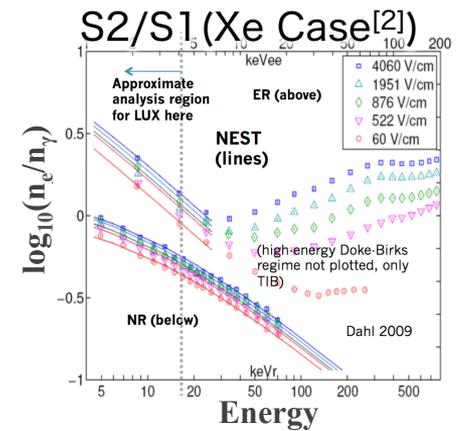
- 低エネルギー領域におけるER背景事象分離能力が $M_\chi = 10 \text{ GeV}/c^2$ 領域探索の肝となる。
- ← LAr検出器の電場やエネルギーに対する依存性は十分に理解されていない。
 - 光量, PSD, 電離蛍光比 (S2/S1), ...



- 2相形Xe検出器によるWIMP探索実験
 - : Xe応答の電場/エネルギー依存性の詳細理解が進む。
 - : 高い背景事象分離能力と検出器低閾値化を達成。

2相形Ar検出器における事象分離能力向上へ向け、荷電粒子に対するLAr応答の詳細理解に取り組む。

- - プロトタイプ検出器を用いたER事象データの取得と解析,
 - シミュレーションによるLAr応答のモデル化とその評価。



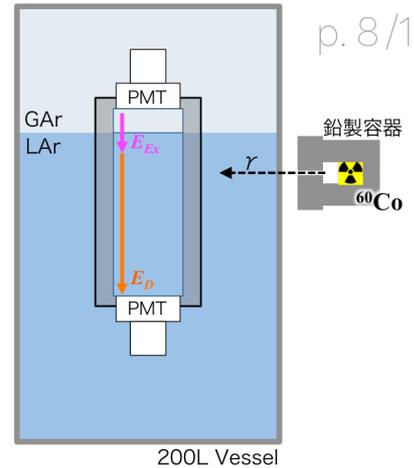
[2] Matthew Szydagis @ University of Connecticut (12/09/13)

ER事象の取得, LAr応答の解析

小型プロトタイプ検出器により, 印加電場 E_D を変化させデータ取得。

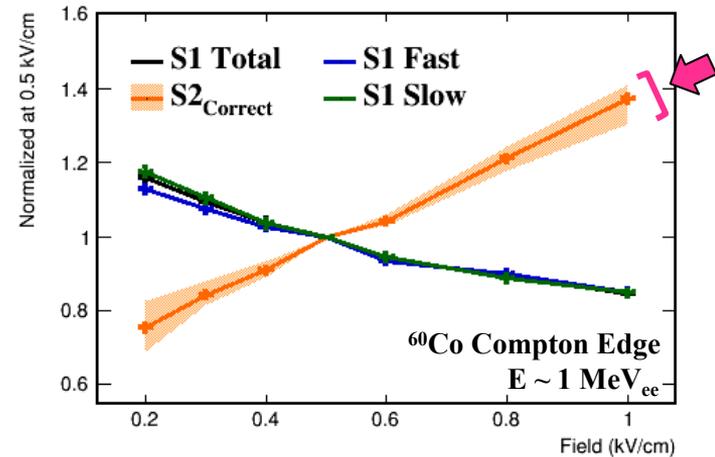
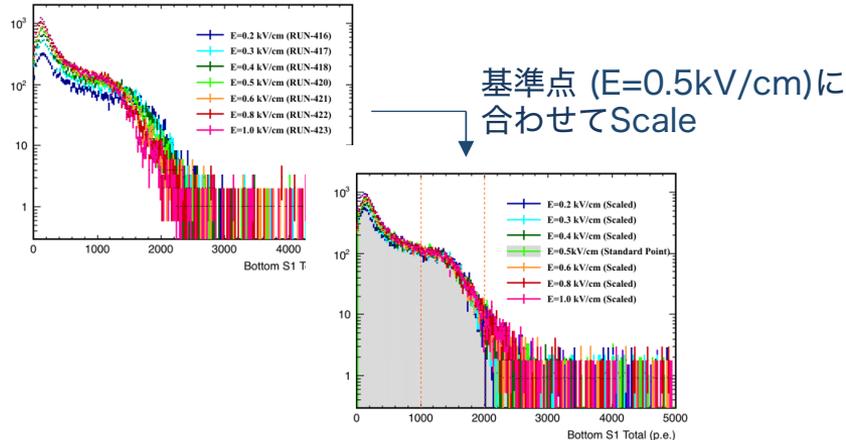
: ^{60}Co 線源を用いてチェンバー外から γ 線を入射。

: コリメータを用いることで, 純度の高いER事象を取得・解析。



電場依存性の算出

各電場下における光量分布の”形”を用いて, 光量の比を決定。



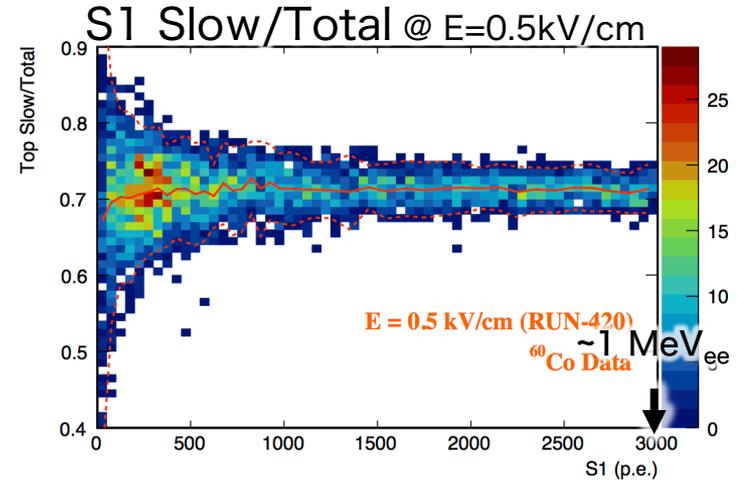
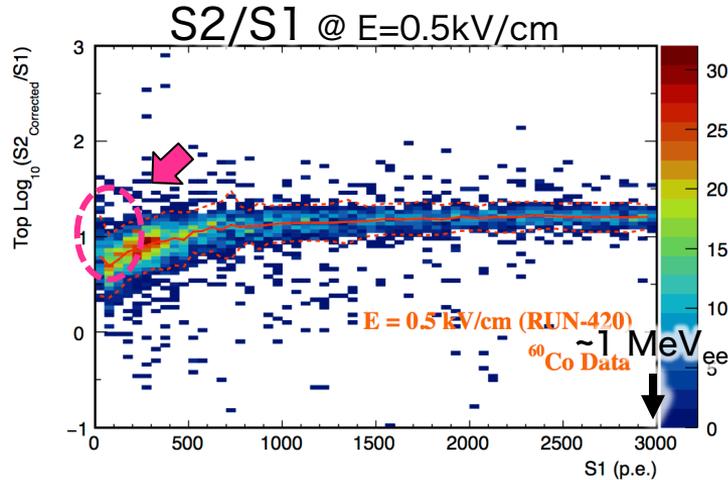
電場に対する各光量成分の変化を算出

- S2光量不定性: LAr充填時の種々要因に起因

ER事象の取得, LAr応答の解析

エネルギー依存性の算出

S2/S1 (電離蛍光比) と S1 Slow/Total (PSDパラメータ) を用いてエネルギー依存性を評価。



低エネルギー領域でのS2/S1比の変化を確認

↔ S1 Slow/Totalはエネルギー依存性を持たない

- 超低光量事象ではトリガーによるバイアスがかかっている可能性が示唆

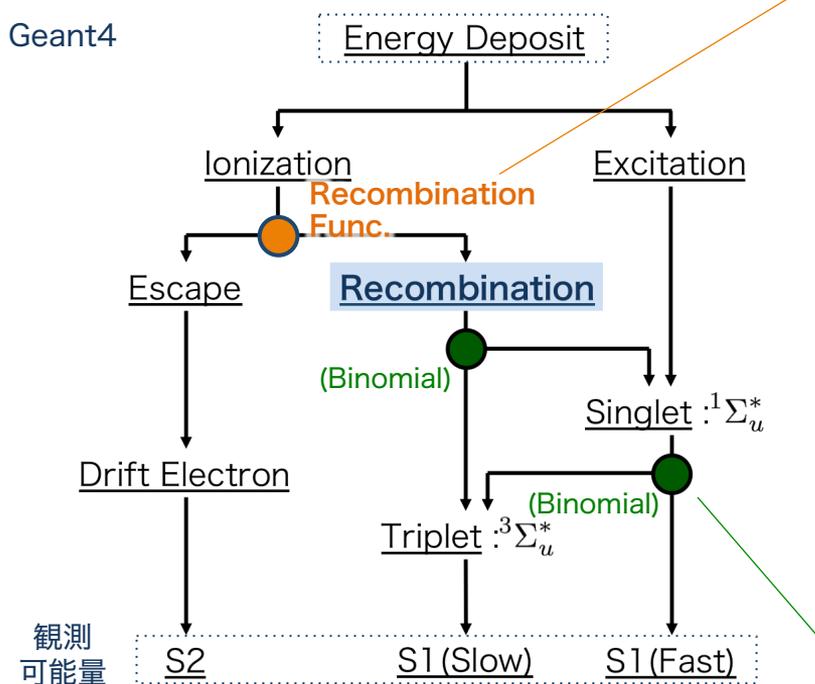
データから得られたこれらの知見を基に, LAr応答を考察する。

Liquid Argon Response Model

- 先行研究を参考に、反跳電子に対する応答をモデル化^{[3][4]}。
- 検出器シミュレーションにおいて、Geant4により計算された各trackや各stepごとに、このモデルを用いた演算を実行。

Original Response Model

Geant4

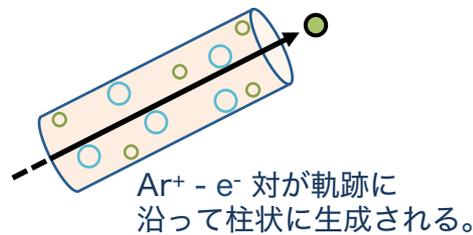


- 生成された2次粒子ごとにエネルギーを判別し、異なるRecombination Functionを適応する。

Birks' Law (ICARUS)

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{A}{1 + k/\rho E \frac{dE}{dx}}$$

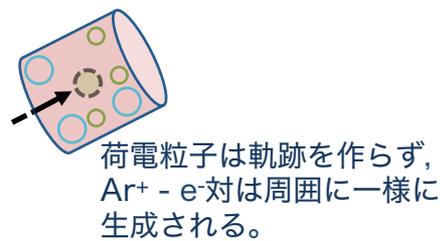
再結合確率がE-FieldとdE/dxに依存。



Thomas-Imel Box Model

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{1}{\xi} \ln(1 + \xi), \xi = \frac{\alpha N_i}{E}$$

再結合確率がE-FieldとTotal Energy Depositionに依存。



- 2つの単純な二項分布により、S1光量分布を決定。

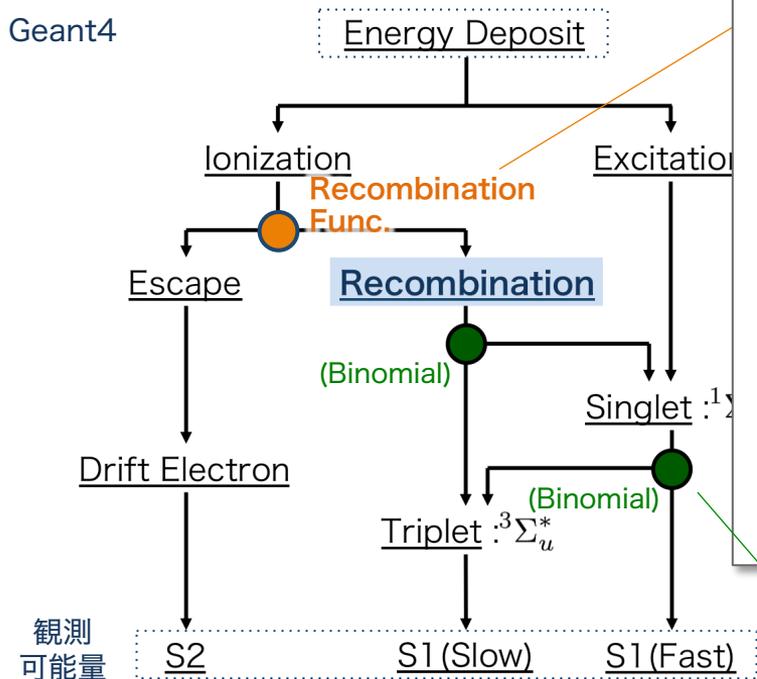
[3] M.Suzuki et al., NIM 192 565 (1982), [4] Szydagis et al., JINST 6 P10002 (2011)

Liquid Argon Response Model

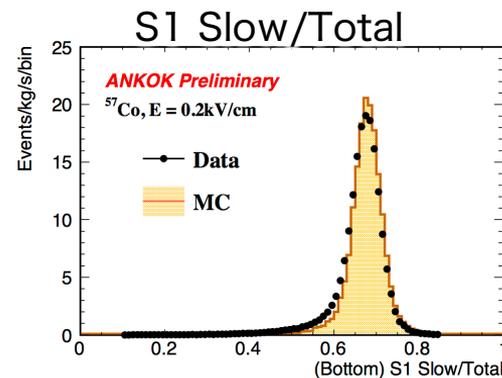
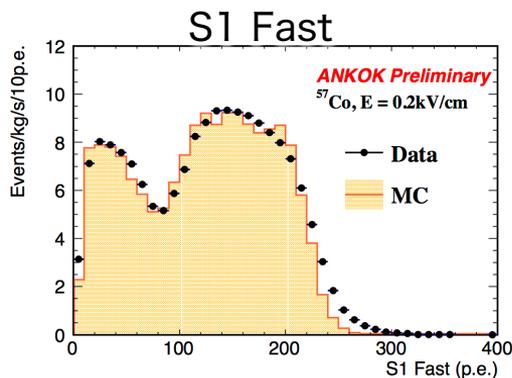
- 先行研究を参考に、反跳電子に対する応答をモデル化^{[3][4]}。
- 検出器シミュレーションにおいて、Geant4により計算された各trackや各stepごとに、このモデルを用いた演算を実行。

Original Response Model

Geant4



● ⁵⁷Co Data (~100 keV_{ee})による検証



二項分布により、観測されるS1分布を説明。

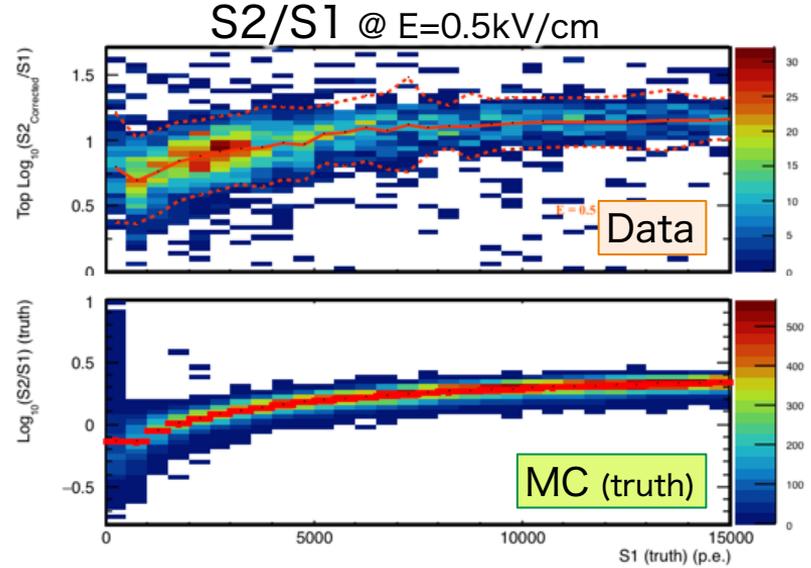
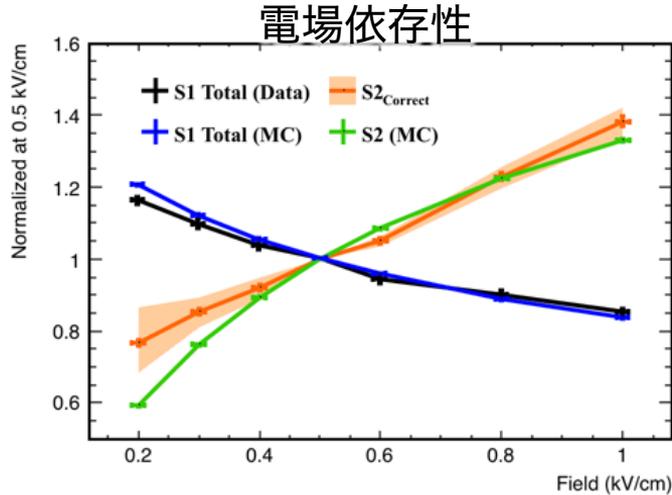
生成される。

- 2つの単純な二項分布により、S1光量分布を決定。

[3] M.Suzuki et al., NIM 192 565 (1982), [4] Szydagis et al., JINST 6 P10002 (2011)

シミュレーションによる LAr Responseの詳細理解

検出器シミュレーションを実行し、
構築したResponse Modelの妥当性を検証。



LAr Response Modelにより、データと無矛盾な傾向が得られることを確認。

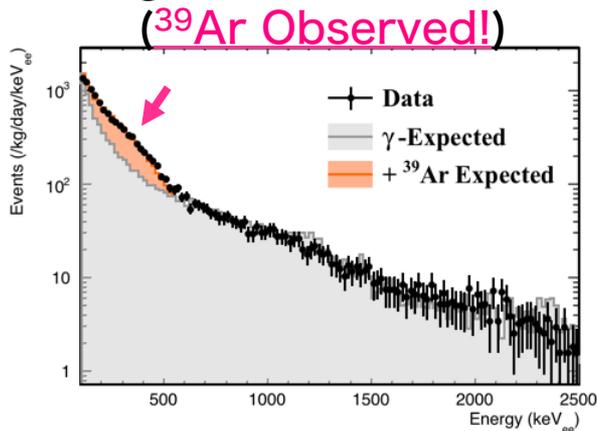
→ 更なるデータ取得とパラメータ設定の最適化により、
Response Modelによる検出器応答の詳細な理解が見込まれる。

**2/23~
RUN開始予定**

まとめ

- : 背景事象の理解やWIMP探索実験 (Physics Run) に向け、検出器シミュレーションを構築した。
 - プロトタイプ検出器により取得されたBackground Run Dataの予測に成功した。
- : 独自のArgon Response Modelを構築し、シミュレーションへ実装した。これを通じて、電子反跳背景事象に対する検出器応答について一定の理解を得た。

Background Run w/ Shield



今後の展望

- : 更なるデータ取得とResponse Modelの妥当性の評価、各パラメータ値の最適化を進める。
 - 広い電場/エネルギー領域におけるデータの理解が期待される。
- : データ、シミュレーション、Response Modelを用いて背景事象分離能力を最大化、暗黒物質探索感度の評価と向上を行う。

---> ³⁹Arを倒し、"Arによる $M_\chi \sim 10 \text{ GeV}/c^2$ WIMP直接探索"を目指す。