

ガス検出器を用いた KK-axion探索実験

2024/5/16

神戸大学 M1 鈴木 啓司

目次

1. KK-axionについて
2. 位置有感型ガス検出器について
3. KK-axion探索実験
4. シミュレーション・解析
5. 結果・まとめと今後の展望

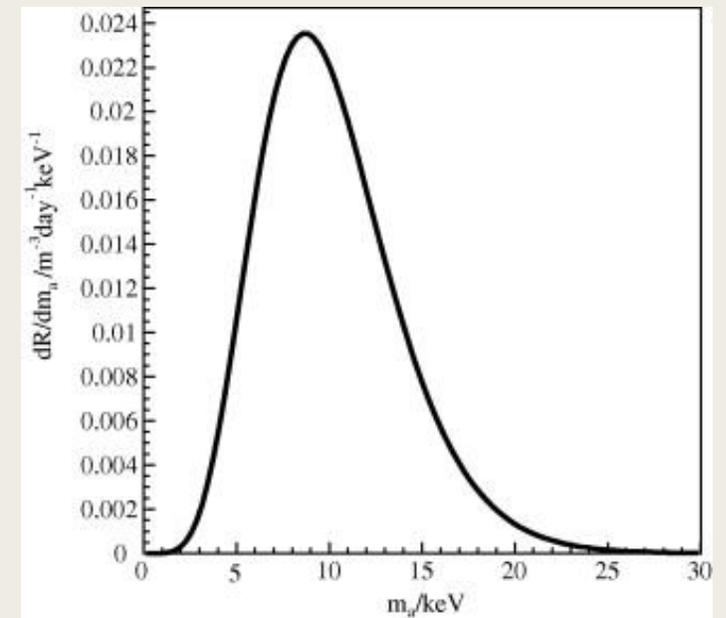
まずKK-axionとは？

- axion...強い相互作用のCP問題を解決する粒子
 - 数々の探索実験で未発見
 - ダークマター候補のひとつでもある
 - $10^{-5}\text{eV} < m_a < 10^{-3}\text{eV}$ の質量
- KK(Kaluza-Klein)粒子...ゲージ階層性問題を解決する粒子
 - 余剰次元理論によって存在が予測されている
- **KK-axion**...余剰次元を伝播するaxion
 - 太陽コロナ問題を解決する可能性がある

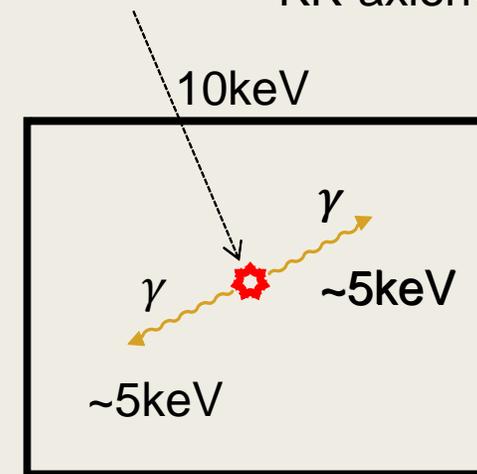
KK-axionの特徴

- 太陽内部で熱的に生成
 - $\gamma + \gamma \rightarrow a$ (Photon Coalescence)
- 地表付近における崩壊スペクトル
 - 10keV付近にピーク
- 崩壊時に2つの光子を放出する
 - 地表付近に到達するものは非相対論的
 - それぞれの光子のエネルギーは5keV程度

- ◎ ガス検出器を用いてこの崩壊をとらえる！
 - メリットがたくさん(詳しくは後ほど)



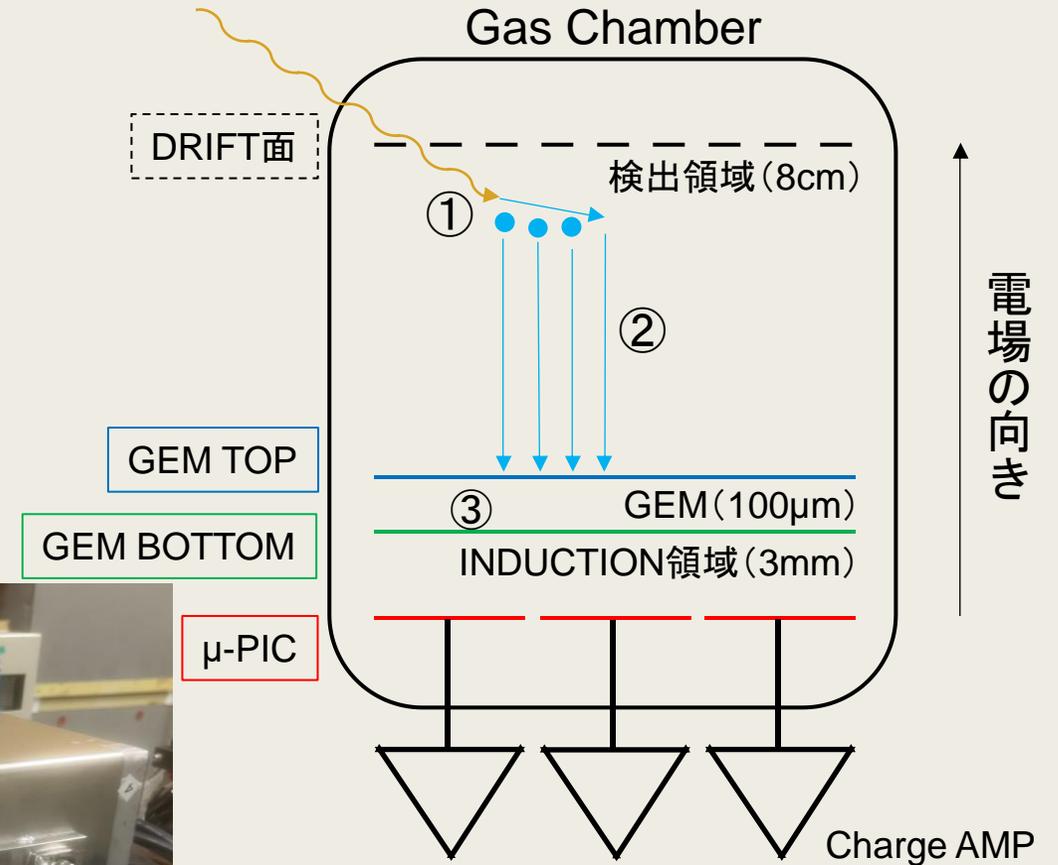
地表付近に到達する
KK-axionの崩壊スペクトル



←KK-axion崩壊
のイメージ図

位置有感型ガス検出器(ガスTPC)

- ① ガス中を荷電粒子が通過するとき、エネルギー損失に比例した数の電子イオン対ができる
- ② 生成された1次電子は、電場によってドリフトする
- ③ 高電場によって電子なだれが起こり、電子数が指数関数的に増える



→KK-axion探索に
使用した検出器
検出領域は
10cm × 10cm × 8cm



↑KK-axion探索に使用した
ガスTPCの概略図

2次元飛跡の再構成

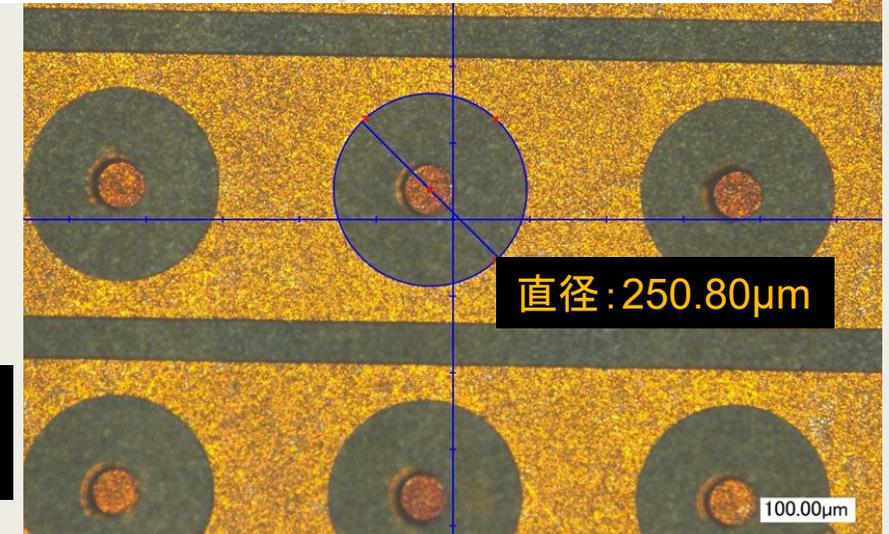
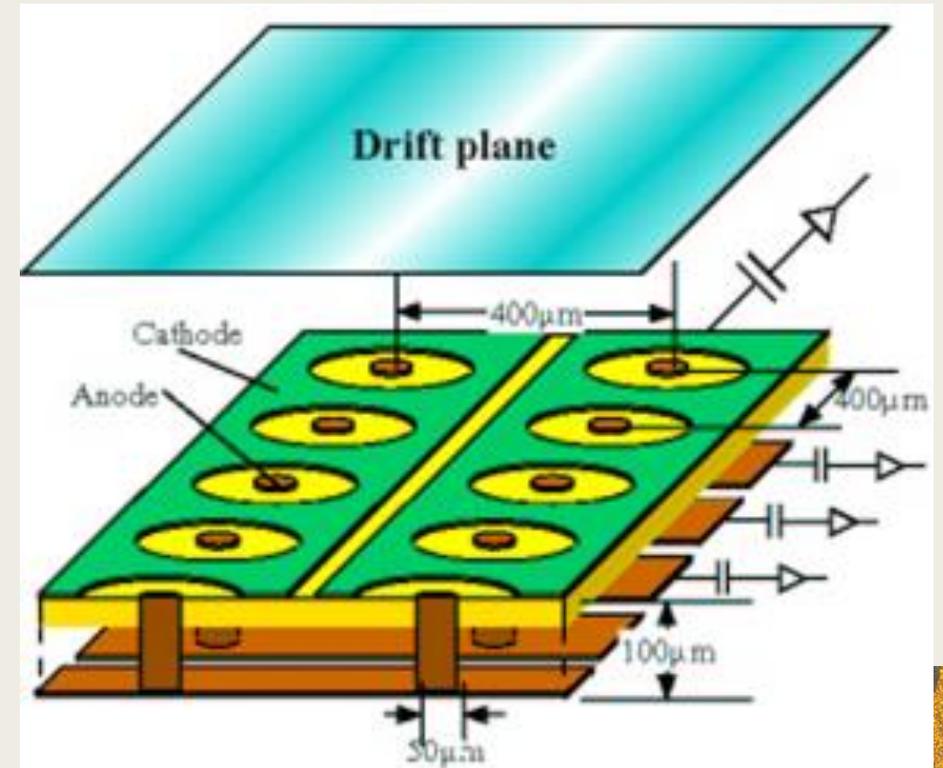
μ -PIC (Micro Pixel Chamber) の役割

■ 増幅

- 陽極 (anode) と陰極 (cathode) の間に高い電位差を与え、電子を増幅させる

■ 2次元飛跡の取得

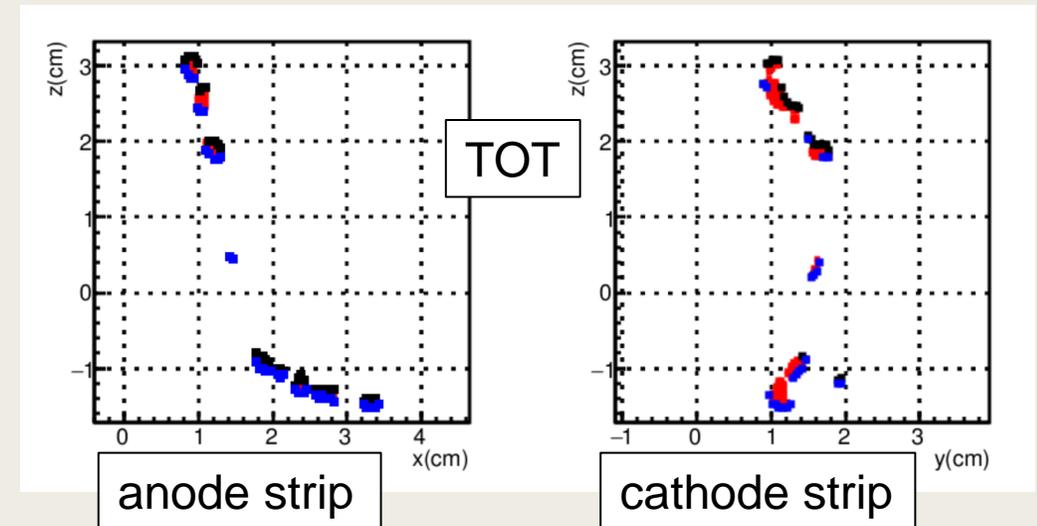
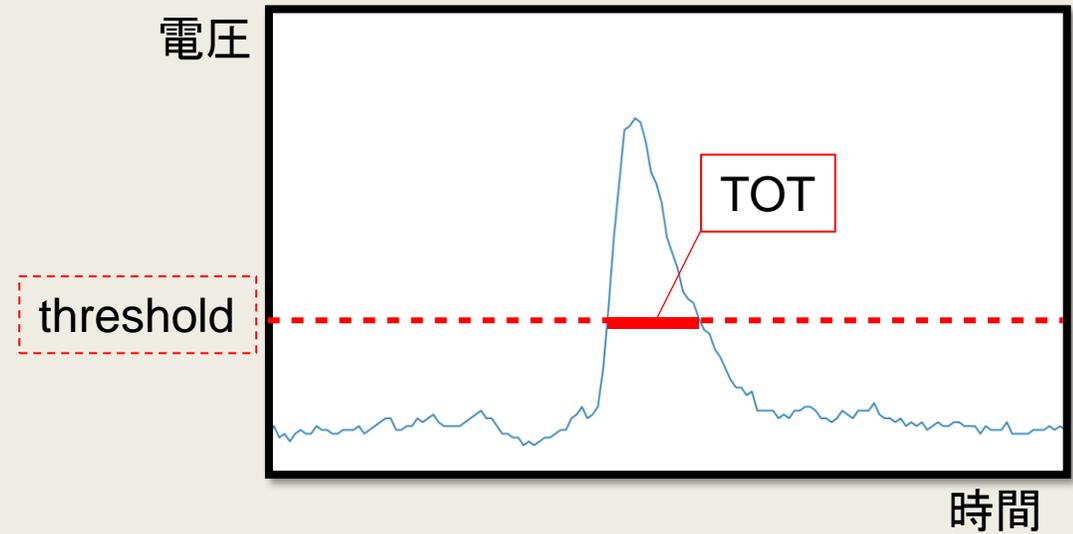
- anodeとcathodeの256本ずつのストリップが直交している
- 各ストリップの波形から荷電粒子の2次元飛跡が再構成できる



→顕微鏡で撮影した
 μ -PICの拡大写真

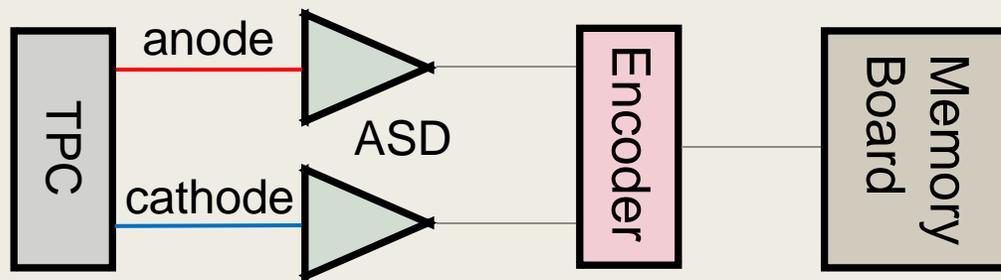
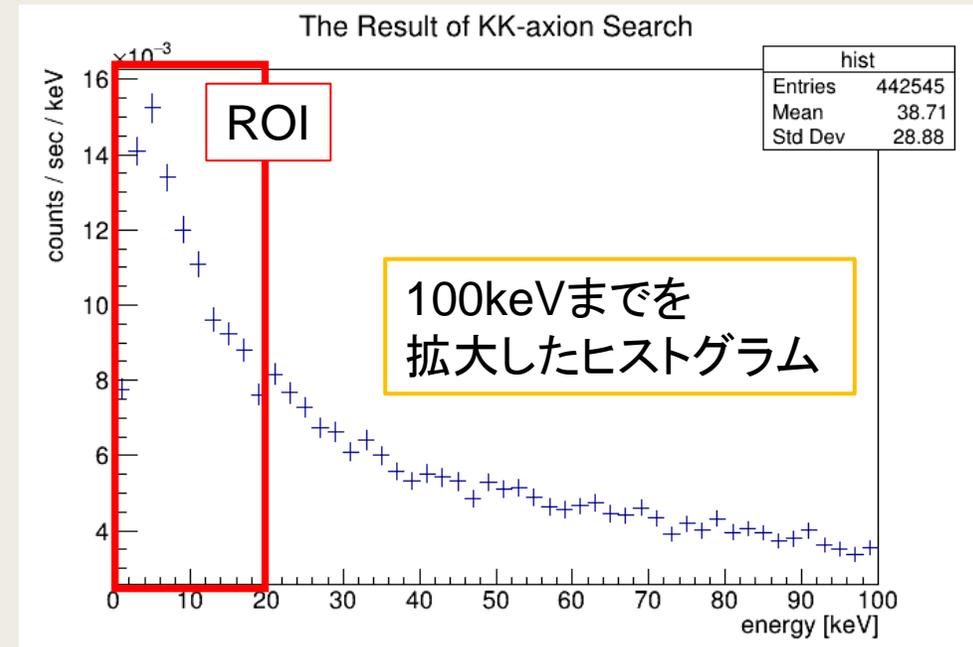
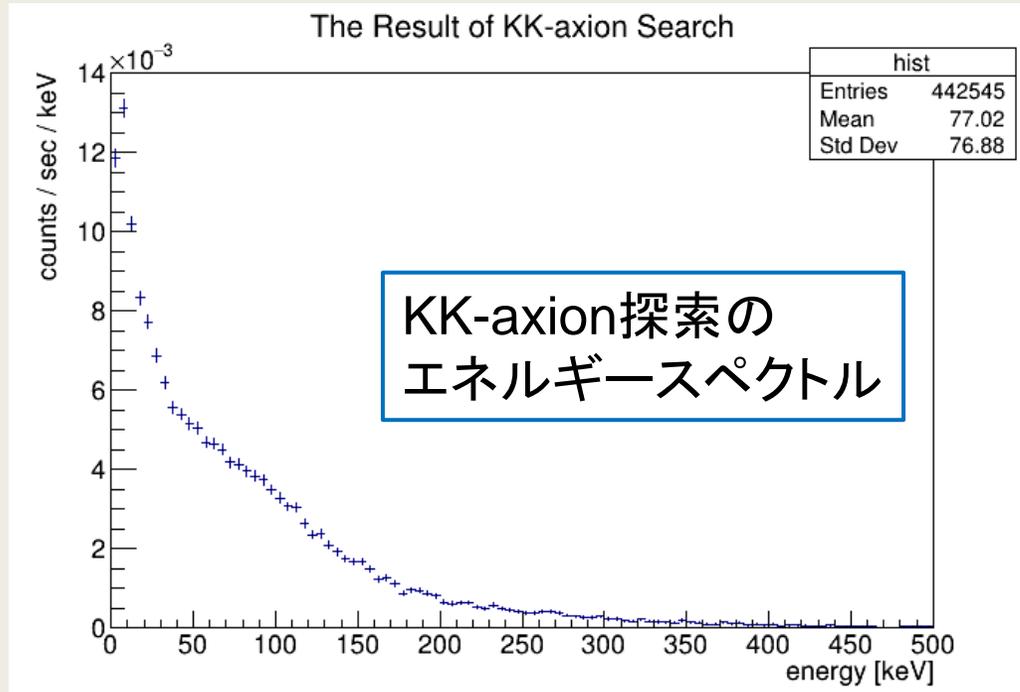
ガスTPCの読み出し

- 各ストリップで検出された電荷を、チャージアンプが電圧に変換する
- 波形のTOT (Time over Threshold) と電子のドリフト速度の情報からz軸方向の相対的な位置関係を特定
 - 荷電粒子の飛跡が描ける
- cathodeの波形の積分値は、荷電粒子のエネルギー損失に比例する
 - 宇宙線ミュオンを用いてエネルギー較正を実施



再構成された飛跡の例
(反跳電子と思われる)

KK-axion探索実験



↑KK-axion探索のセットアップ

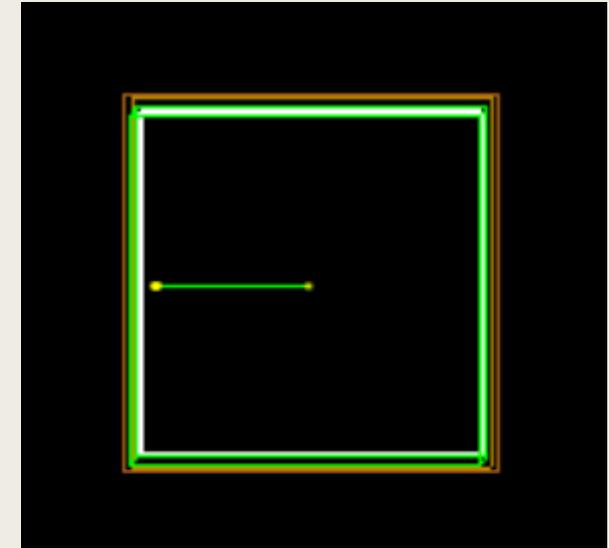
- ガスTPCに電圧をかけて約半日間データ取得
 - Live Time: 5.3×10^4 sec
 - 総事象数: 4.4×10^5
- ◎ 適切なカットをかけて、KK-axionの崩壊による事象のみを残したい！

KK-axionの信号シミュレーション

Geant4シミュレーション

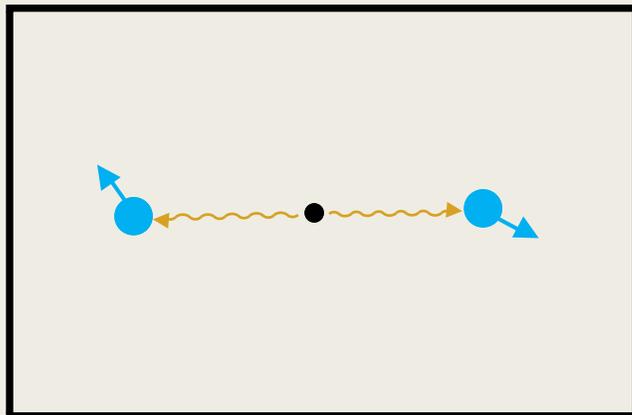
- 封入ガスはAr: C₂H₆ = 9:1 (質量比)
 - 以下Ar - C₂H₆ と呼ぶ
- TPC検出領域の中心部から、5keVの光子を反対方向に1000発ずつ打ち出す
- 2光子の反応点間の距離や、光電子の飛程について解析する

→シミュレーション
のようす
黄色の点が電子の
検出点

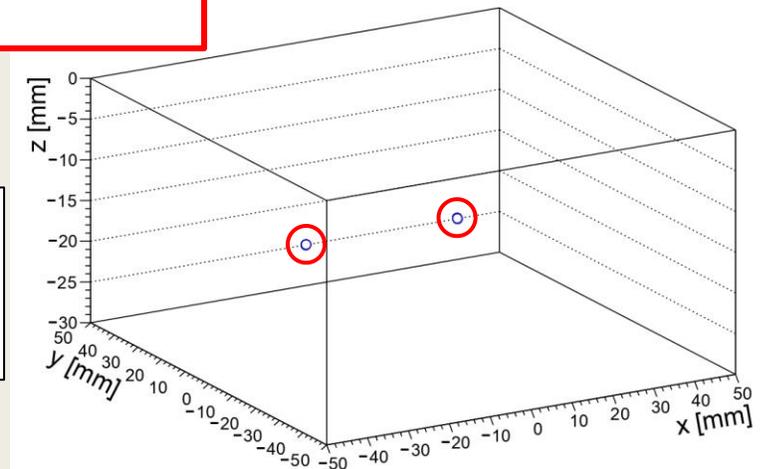


2-Cluster間の距離
3.71cm

Simulation of KK-axion Decay

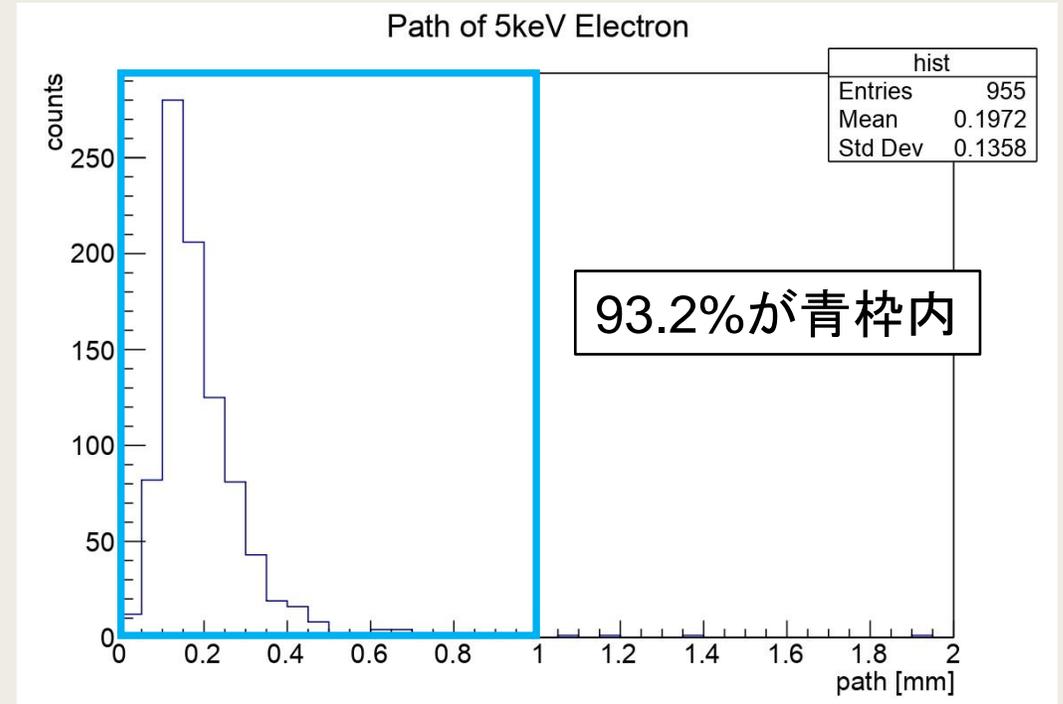
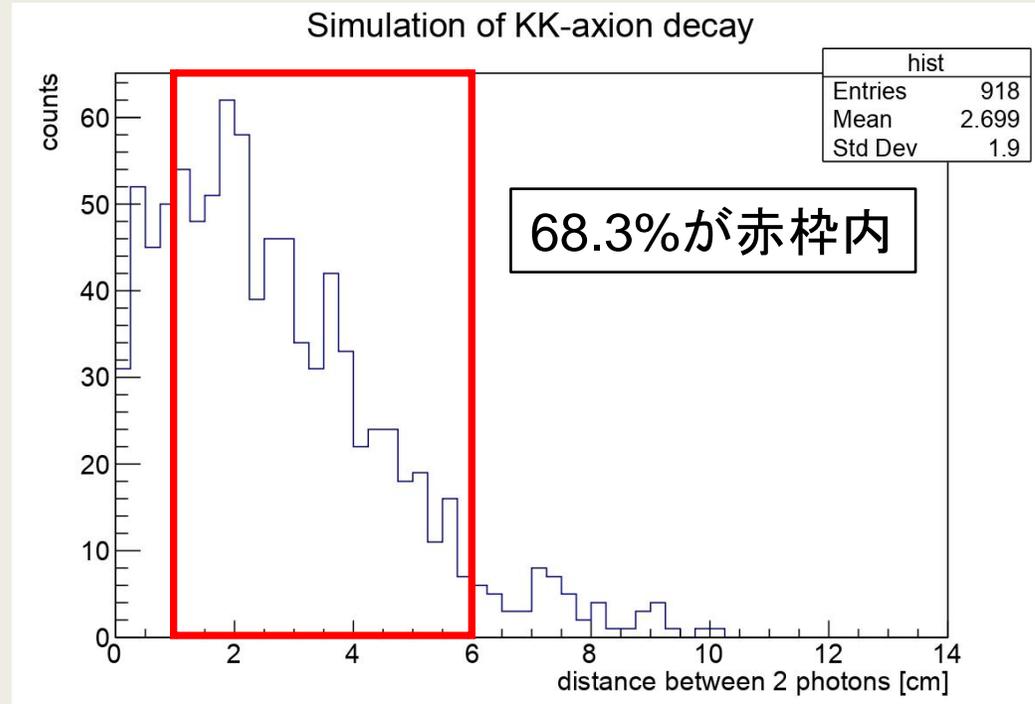


→信号シミュレーション
のある1つのイベントを
描画したもの



信号シミュレーションの結果

2光子間の距離(上)と
光電子の飛程(下)



- 2-Cluster間の距離は2cm付近にピークをもつ
 - 2光子それぞれの信号を分離できることを確認
- 光電子はAr - C₂H₆ 中では1mm程度で止まる

KK-axion Criteria (KC) の設定

■ 信号シミュレーションの結果から、以下の3つの条件を設定

- ① 検出領域におけるエネルギー損失が5keVから15keV
- ② 2-Cluster間の距離が1cmから6cm
- ③ 光電子の飛程は5mm以内(電子のDiffusionを考慮)

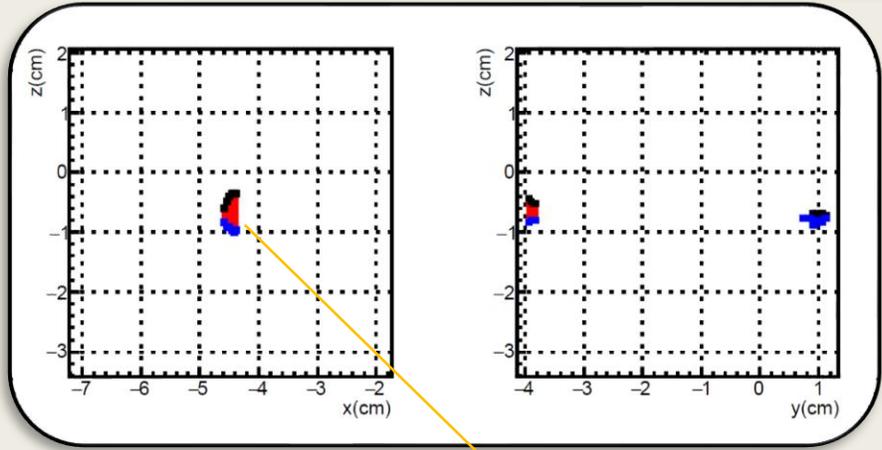
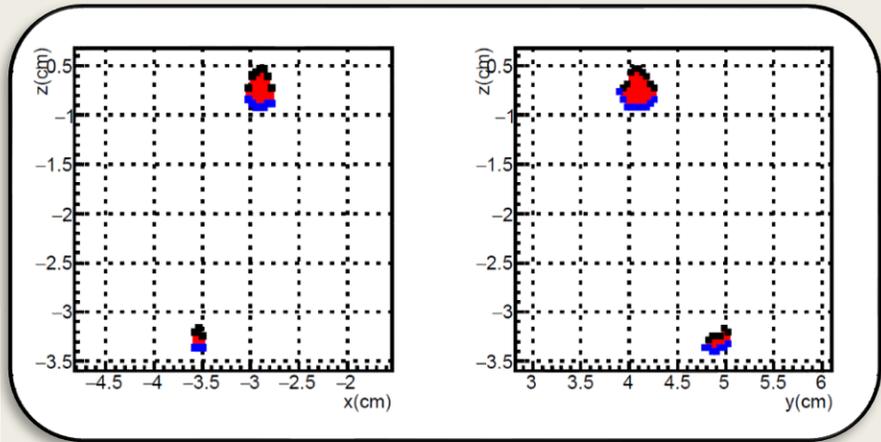
◎ これら3つの条件をまとめて**KC**と呼ぶ

➤ KCを満たすものを信号事象とみなす

KK-axion探索の解析

- 各事象におけるエネルギーと飛跡の情報をもとに、KCに従ってカットをかけていく
 - (17 ± 4)事象がKCを満たす
- 17事象がすべてKK-axionの信号であるとは限らない
 - KCを満たすBG事象について考察する必要がある
 - 環境ガンマ線

KCを満たす
2事象の飛跡



2-Clusterがxz平面で重なって見えている

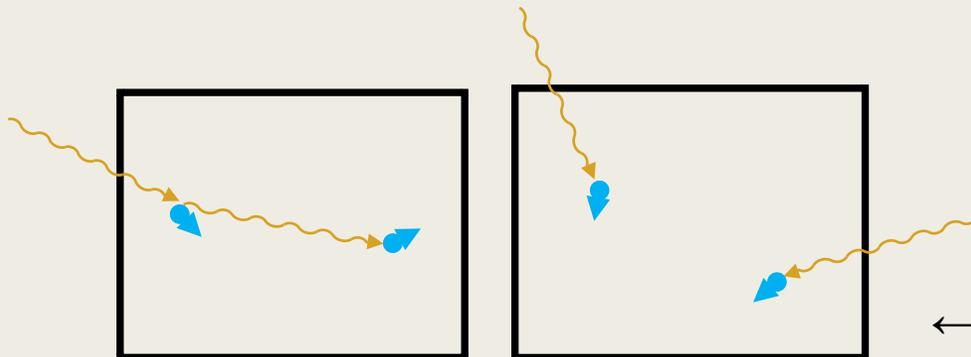
Energy Cut Track Cut

Cut	Nothing	KC①	KC②・③
Events	4.4×10^5	6.1×10^4	17

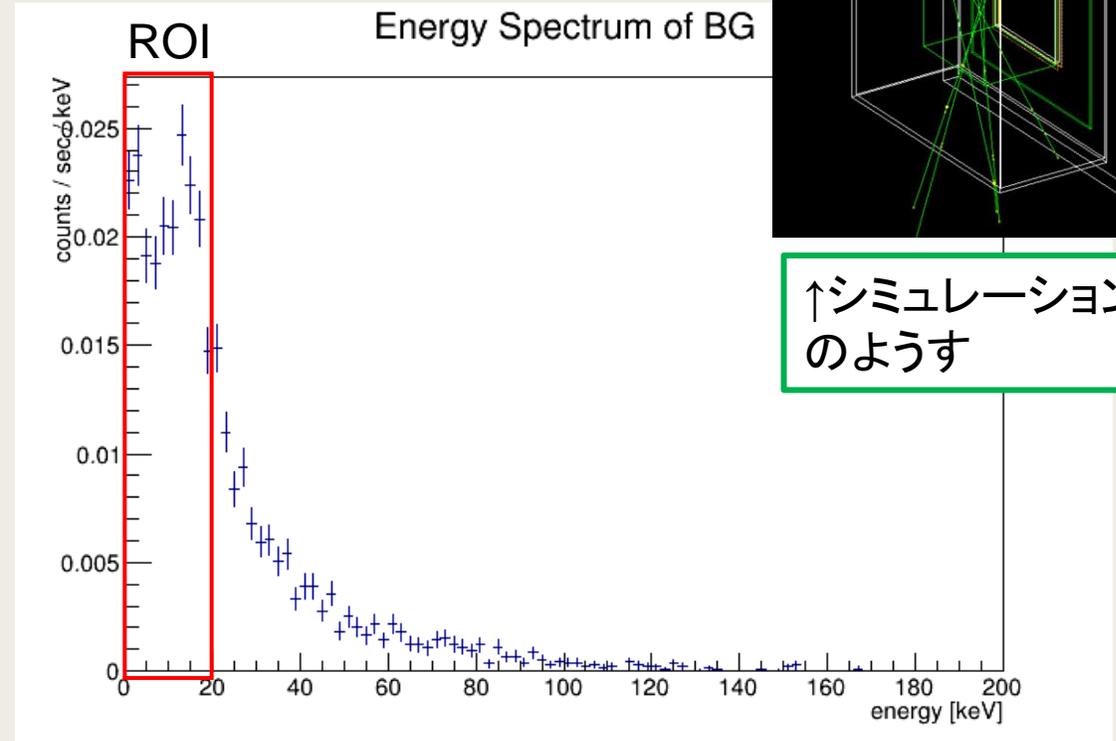
←適用したカットと通過した事象数

環境ガンマ線シミュレーション

- 5種類のアイソトープ由来のガンマ線と連続成分をTPCに照射
 - NaIシンチレータを用いた環境ガンマ線測定の結果を用いた
- KCを満たす主なBGとして、以下の2つを考える
 - **Double Compton Scattering**
 - **Random Coincidence**
 - **Single × 2**



←Double (左)とRandom (右)のイメージ図



TPCにおける環境ガンマ線のエネルギー損失

BG事象数の見積もり

主なBG事象とその計数は以下の通り

■ Double

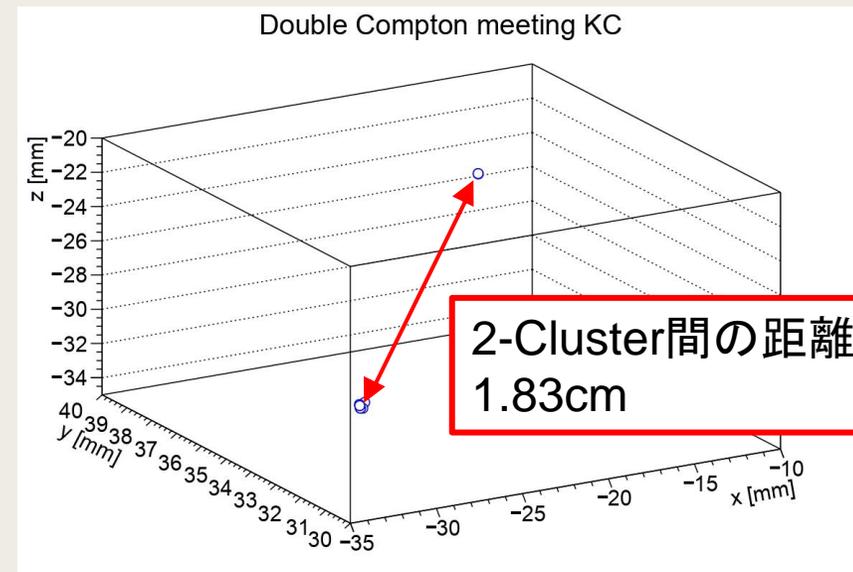
- $1.9 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \times 5.3 \times 10^4 \text{s} \approx 10$ (事象)

■ Random

- 「同時」の幅を $2\mu\text{s}$ とすると、計数率は $(1.3 \times 10^{-2} \text{s}^{-1})^2 \times 2 \times 10^{-6} \text{s} \approx 3.6 \times 10^{-10} \text{s}^{-1}$
- よって求める事象数は、 $3.6 \times 10^{-10} \text{s}^{-1} \times 5.3 \times 10^4 \text{s} \approx 1.9 \times 10^{-5}$ (事象)

測定に関するデータ

- Live Time: $5.3 \times 10^4 \text{sec}$



↑KCを満たすDoubleの
3次元飛跡の例

↓BGと計数率をまとめた表

BG	Double	Single	Random
Rate [s^{-1}]	1.9×10^{-4}	1.3×10^{-2}	3.6×10^{-10}

KK-axionの崩壊率の上限値

- 右の表のとおり、信号は (7 ± 6) 事象
 - 誤差を考慮して、上限値の設定にとどめておく

- 崩壊率の上限値 R_{upp} を求めると、

$$R_{upp} = \frac{7 + 1.64 \times 6}{0.0008 \text{m}^3 \times 0.612 \text{day}} \approx 3.4 \times 10^4 \text{m}^{-3} \text{day}^{-1}$$

- $R = (2.5 \times 10^{11} \text{m}^{-3} \text{day}^{-1}) \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{\text{GeV}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{n_a}{\text{m}^{-3}} \right)$
 - $g_{a\gamma\gamma}$...KK-axionと光子の結合定数 [GeV^{-1}]
 - n_a ...KK-axionの数密度 [m^{-3}]

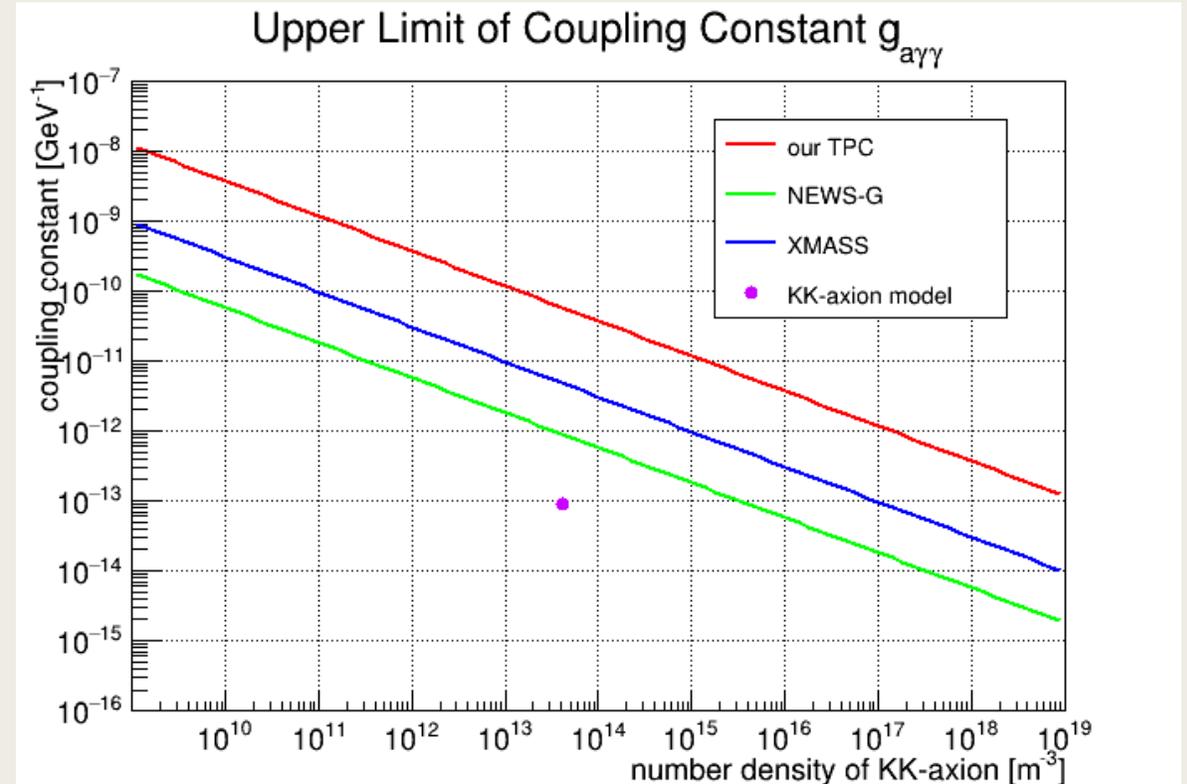
から、 $g_{a\gamma\gamma}$ に対する制限曲線を描くことができる

事象名	事象数
Observed	17 ± 4
BG	10 ± 4
Signal	7 ± 6

解析結果をまとめた表
(統計誤差のみを考慮)

$g_{a\gamma\gamma}$ の上限値(信頼度90%)

- 右図の赤線は、本実験で得られた制限曲線
 - $n_a = 4.0 \times 10^{13} \text{m}^{-3}$ に対して、 $g_{a\gamma\gamma} < 5.9 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$
- 青線と緑線は先行実験の制限曲線
- ◎ 測定時間と有効体積(**Exposure**)を増やす必要がある
 - シールド(鉛や銅)の設置や低圧ガスの使用によるBGの低減化も同時に進めていく



$g_{a\gamma\gamma}$ に対する制限曲線

まとめと今後の展望

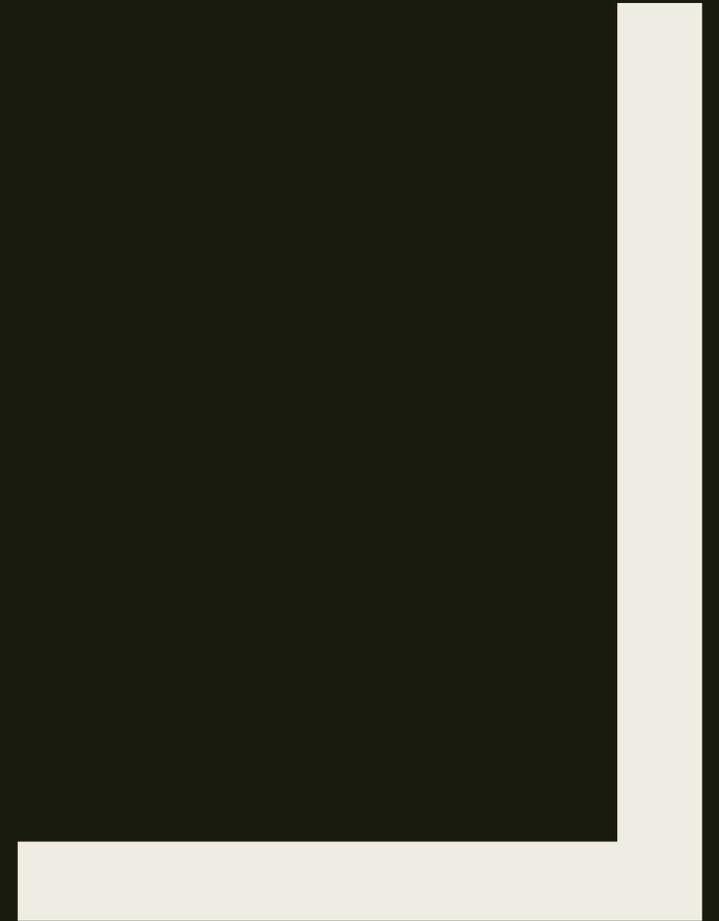
まとめ

- ◎ ガスTPCは、KK-axion探索に適している！
- ① KK-axionの崩壊シミュレーション→カットのための条件(KC)を設定
- ② 環境ガンマ線シミュレーション→KCを満たすBGの事象数を予測
- ③ ①・②の結果を用いて、 $g_{a\gamma\gamma}$ の上限値を設定

今後の展望

- Exposureを増やす→より厳しい上限値の設定
- シールドの設置・低圧ガスの使用→BG低減
- シミュレーション・KCの最適化

BACK UP

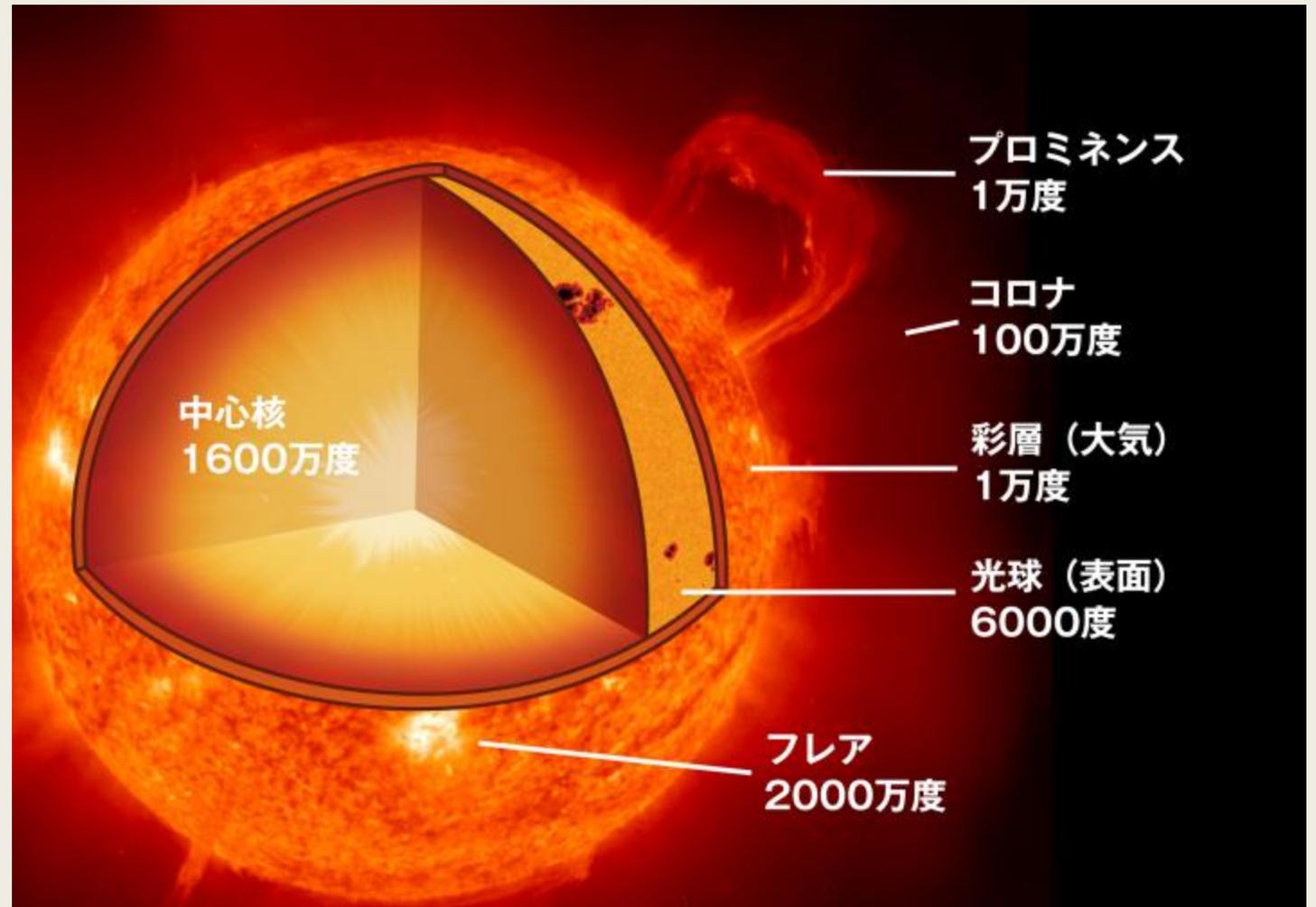


参考文献

- Observational evidence for gravitationally trapped massive axion(-like) particles
<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207073v1>
- Searches for solar Kaluza-Klein axions with gas TPCs
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650505000034?via%3Dihub>
- Search for solar Kaluza–Klein axions with the XMASS-I detector
<https://academic.oup.com/ptep/article/2017/10/103C01/4582918>
- Solar Kaluza-Klein axion search with NEWS-G
<https://arxiv.org/abs/2109.03562>

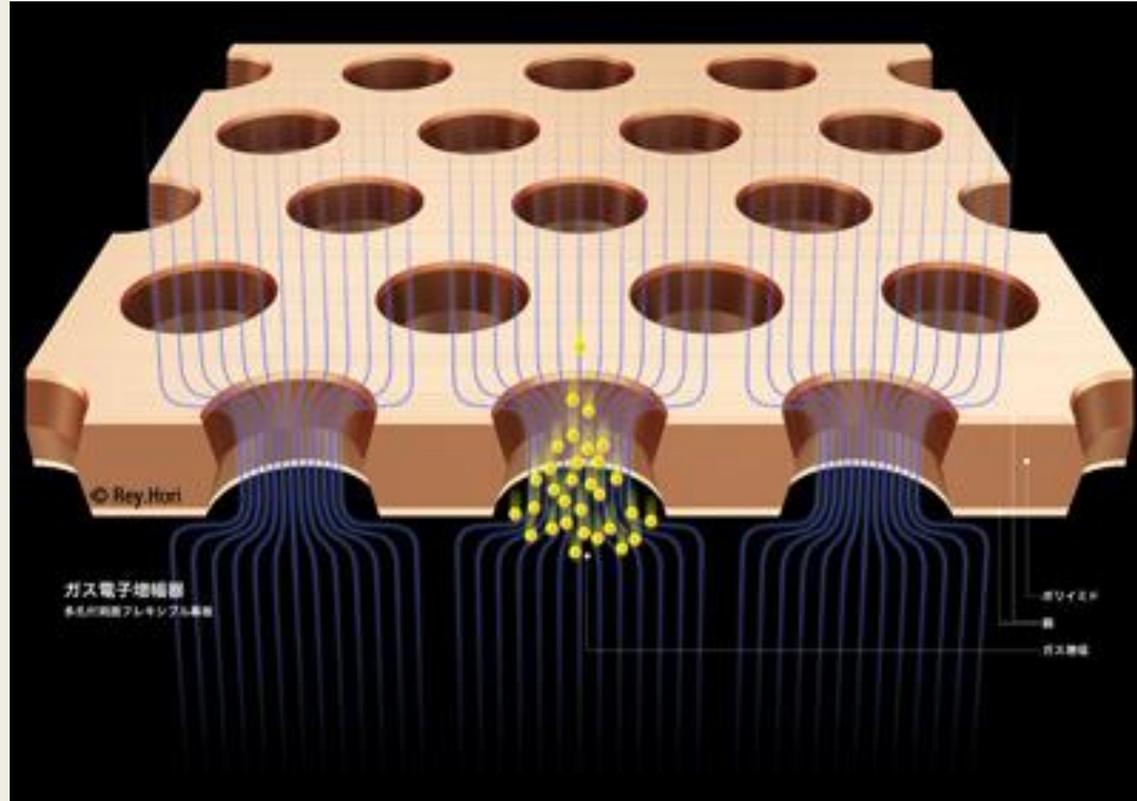
太陽コロナ問題

- エネルギーは中心核で生み出されるが、太陽大気は外層ほど高温になっている
- ◎ この謎は「太陽コロナ問題」と呼ばれている
- 詳しくは[こちら](#)



太陽大気の構造と温度

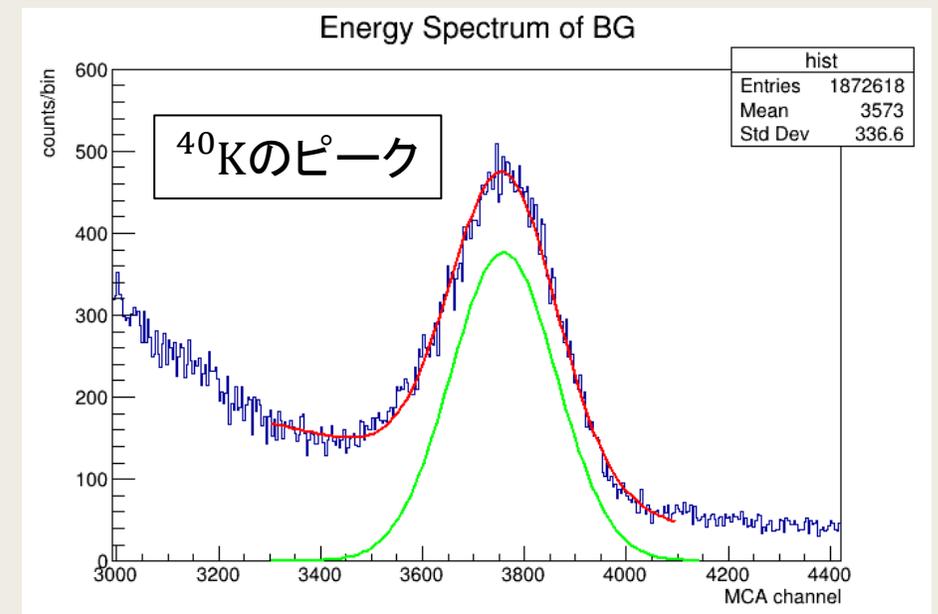
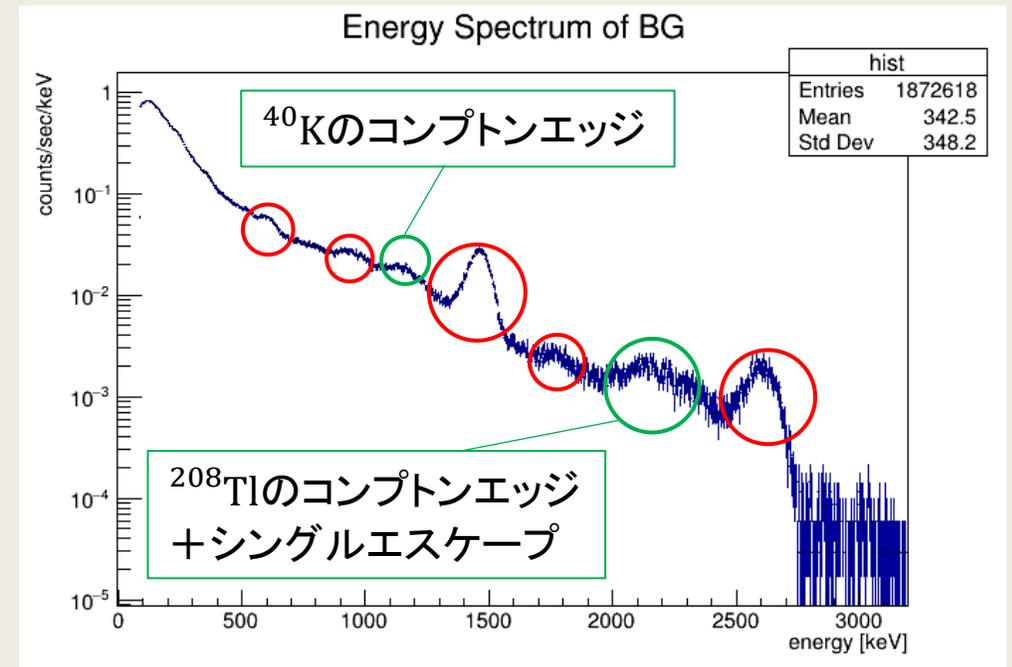
GEMにおける電子増幅のようす



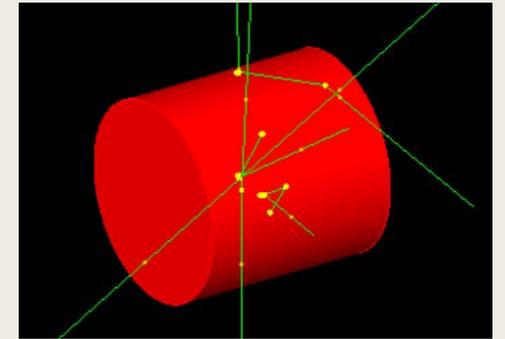
- 図の青線はGEM孔内の電気力線を表す
 - 孔内の強い電場によって電子数が指数関数的に増えていることがわかる

環境ガンマ線測定

- ◎ 環境ガンマ線はKK-axion探索のBG源
→フラックスを調べておく
- NaIシンチレータとPMTを用いて、環境ガンマ線を測定(3時間)
 - 5つのピークが確認できる
- このスペクトルは、アイソトープ由来の成分と連続成分の足し合わせ
 - ピークはガウシアン+1次関数でフィット(右図の赤線)
 - ガウシアン(緑線)を積分して計数を求める
 - 連続成分は指数関数の足し算でフィット

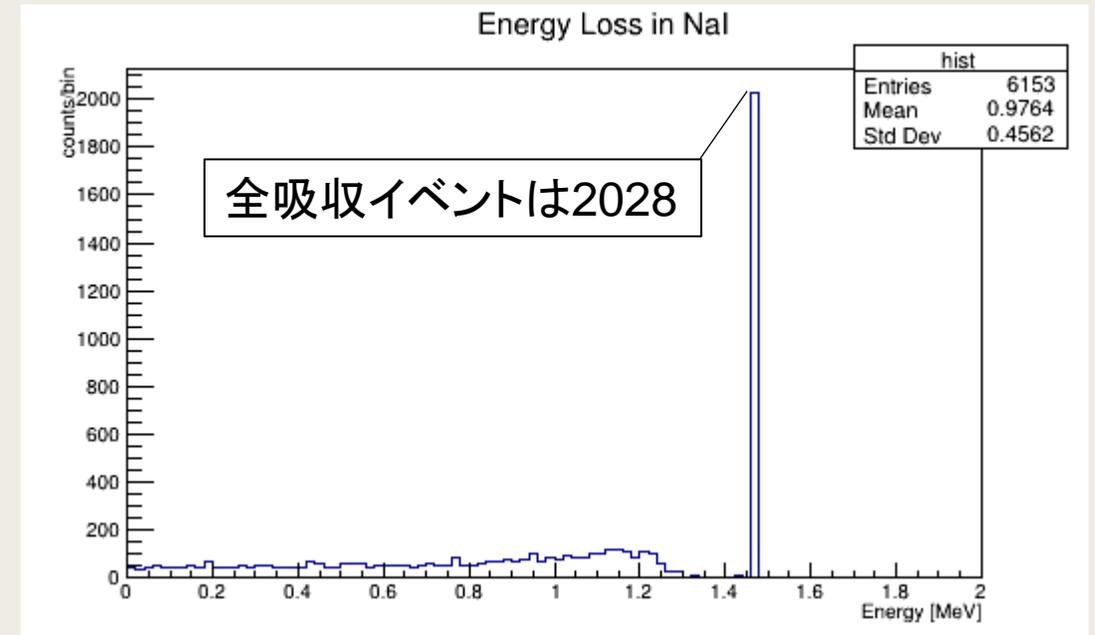


環境ガンマ線のフラックス



→シミュレーション
のようす

- ピークの計数→フラックスの手順
- ① 5種類のアイトープについて、10000発のガンマ線を、NaIへ照射する(シミュレーション)
- ② ピークの計数を全吸収イベントの割合で割ると、NaIに入射した数が求められる
- ③ Live TimeとNaIの表面積を用いて、フラックスを求める



^{40}K (1.46MeV) のエネルギースペクトル

↓フラックスの一覧

アイトープ	^{214}Bi	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	^{208}Tl
Flux [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1.44×10^{-3}	4.21×10^{-3}	3.37×10^{-2}	1.33×10^{-3}	5.85×10^{-3}

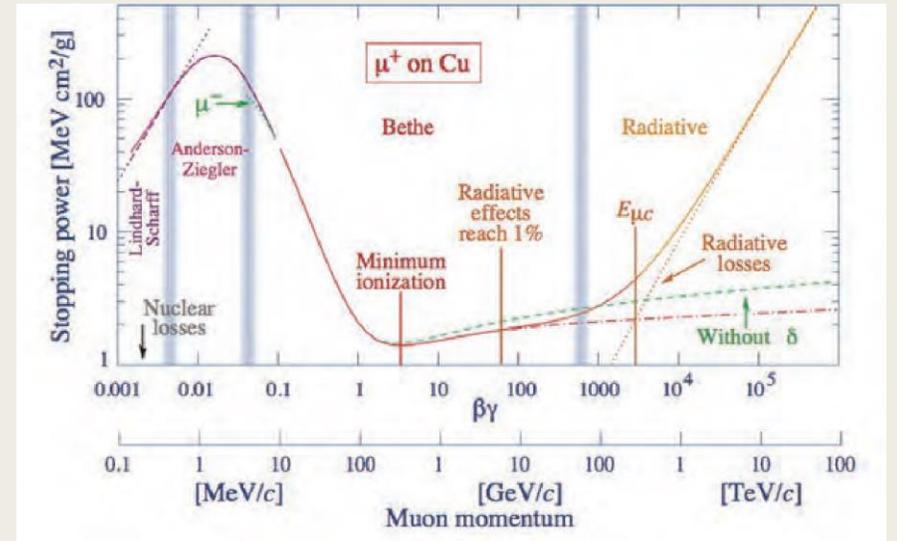
TPCのエネルギー較正

◎ 検出した電荷量と、荷電粒子が落としたエネルギーを対応づける必要がある

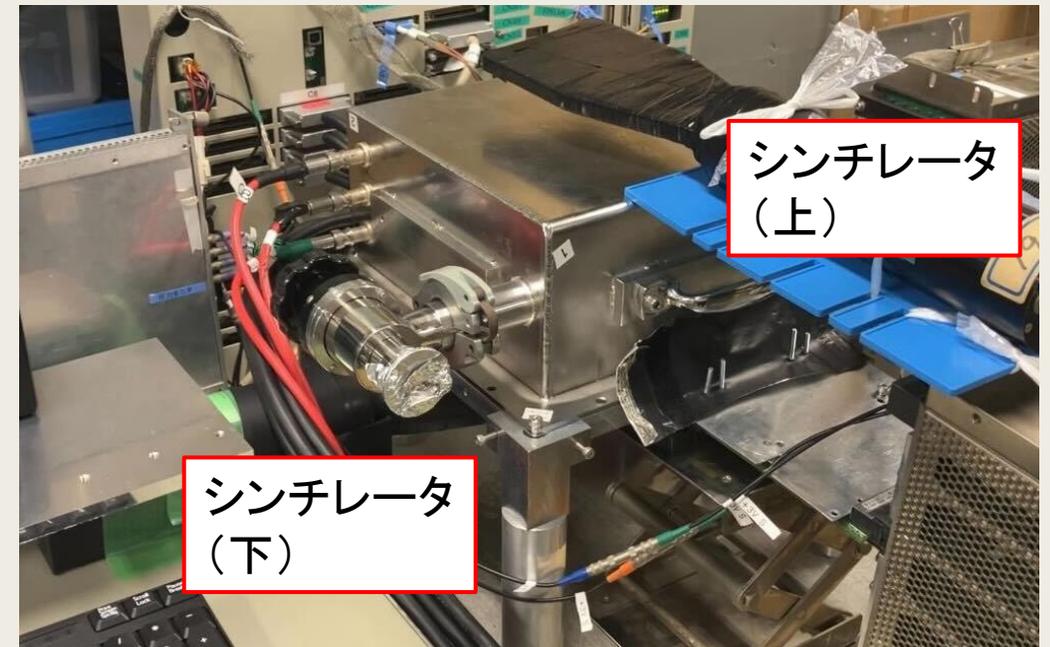
→今回は宇宙線ミュオンを用いる

- TPCの上下に挟んだ2枚のシンチレータのコインシデンスをトリガーとする
- ミュオンがAr - C₂H₆ 中で落とすエネルギーは3.5 keV/cm
 - $\frac{dE}{dx} \sim 2 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ (MIP)
 - Ar - C₂H₆の密度は $1.8 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

→ミュオン測定時のセットアップ



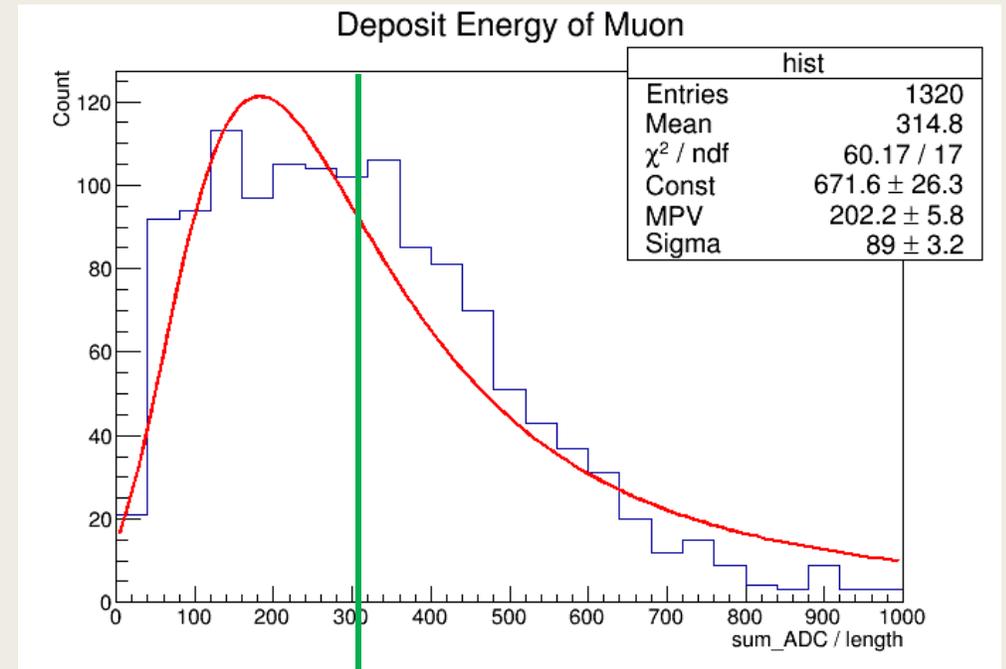
↑物質中におけるミュオンのエネルギー損失



TPCのエネルギー較正

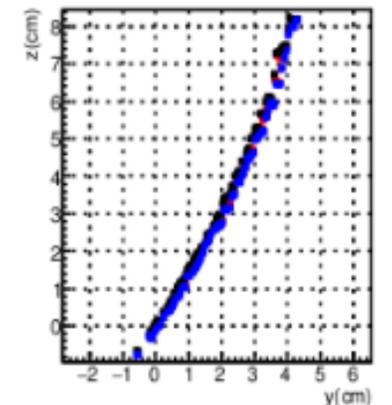
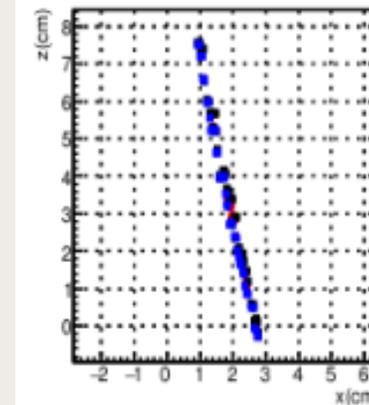
- 高速荷電粒子の物質中でのエネルギー損失はランダウ分布に従う
- 単位長さあたりのエネルギー損失に比例する値 ($\Sigma\text{ADC}/\text{cm}$) のヒストグラムをランダウ分布でフィット
 - mean (図の緑線) の値が3.5keVに対応しているとして、変換係数 (CF) を求める

$$\textcircled{C} CF = \frac{3.5 \text{ keV} \cdot \text{cm}^{-1}}{312.8 \text{ cm}^{-1}} \approx 0.0112 \text{ keV}$$



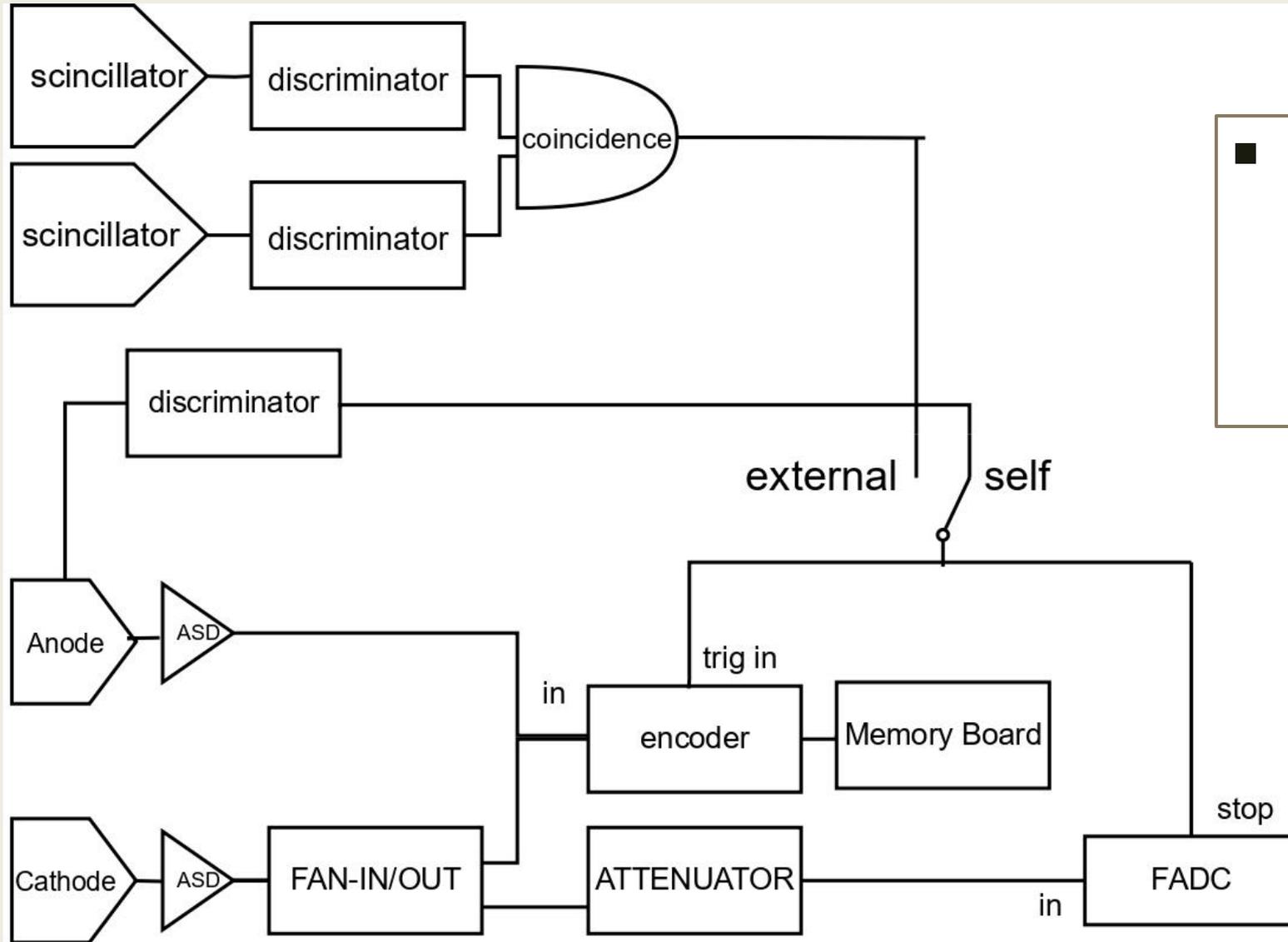
312.8

飛跡の歪みは電場の歪みの影響？



→ミューオンの飛跡の例

TPCの読み出し回路



- KK-axion探索のセットアップ
 - ミューオン測定時はスイッチをexternalに切り替える

シミュレーションの詳細

source	^{214}Bi	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	^{208}Tl	continuous	sum
gamma [keV]	609.3	911	1460.8	1764.5	2614.5	—	—
beam number	10^5	10^5	10^5	10^5	10^5	6×10^6	—
entries	277	412	6081	712	1061	13438	—
double	0	0	0	0	0	6	—
single	1	2	15	3	1	383	—
counts/sec	1.85	5.27	42.3	15.6	7.32	191	2.6×10^2
single/sec	1.8×10^{-5}	1.1×10^{-4}	6.3×10^{-4}	4.7×10^{-4}	7.3×10^{-5}	1.2×10^{-2}	1.3×10^{-2}
double/sec	0	0	0	0	0	1.9×10^{-4}	1.9×10^{-4}
random/sec	6.8×10^{-16}	2.2×10^{-14}	8.3×10^{-13}	4.4×10^{-13}	1.1×10^{-14}	3.0×10^{-10}	3.6×10^{-10}