

AXEL

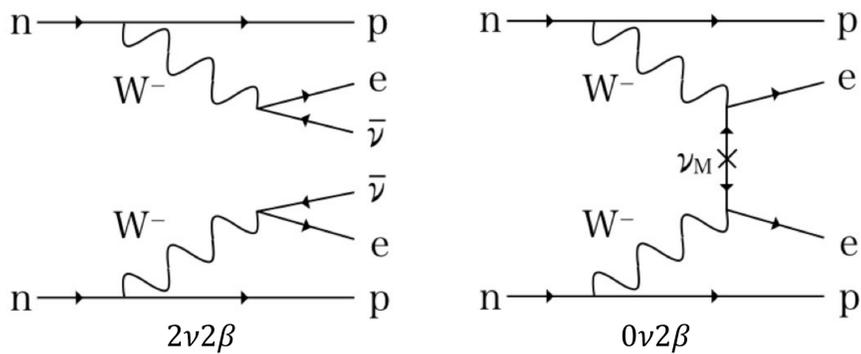
0ν2β探索実験AXELにおける次世代検出器用DAQの開発状況

東北大学大学院理学研究科 素粒子実験(加速器)研究室
修士2年 初見聡太



1. Neutrinoless Double Beta Decay

二重ベータ崩壊で出てきたニュートリノ同士が対消滅し、2つの電子のみが放出される事象
ニュートリノが粒子と反粒子が同一(マヨラナ粒子)であれば起こる

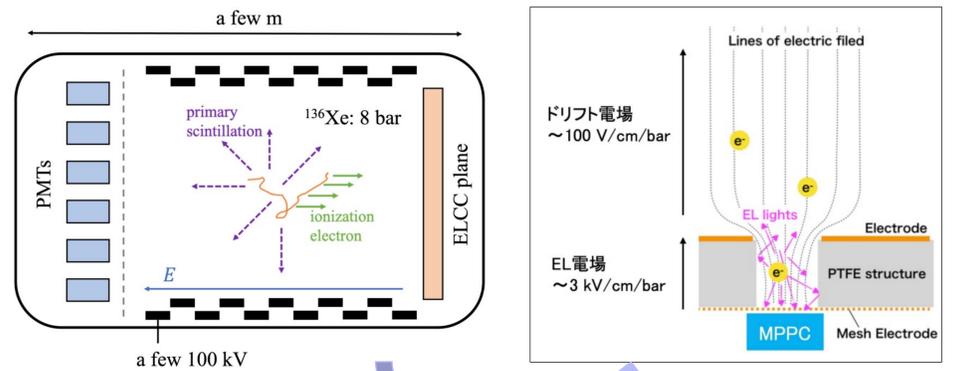


発見されれば

- ✓ ニュートリノが極めて軽い理由
 - ✓ 物質優勢宇宙の起源
- が説明できるようになると期待されている非常に稀な事象
- ✓ 半減期 > 3.8×10²⁶年:¹³⁶Xe (90%信頼度) [1]

2. AXEL Experiment

A Xenon ElectroLuminescence detector (AXEL)

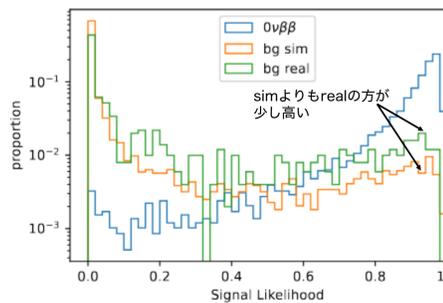
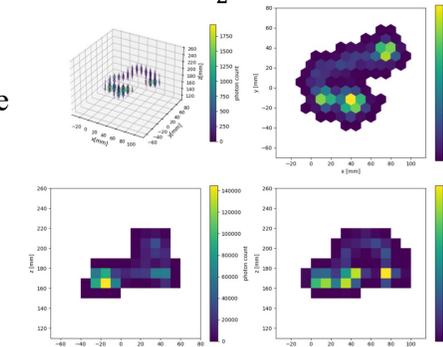
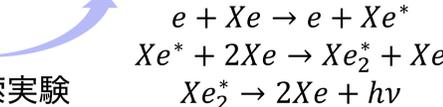


高圧¹³⁶XeガスTPCを用いた0ν2β探索実験

- ✓ 高圧キセノンガスによる測定
→ **大質量**
- ✓ ドリフト電子をElectroLuminescence (EL)過程にて線形増幅
→ **高エネルギー分解能**
- ✓ 飛跡再構成による背景事象の除去
→ **低バックグラウンド**

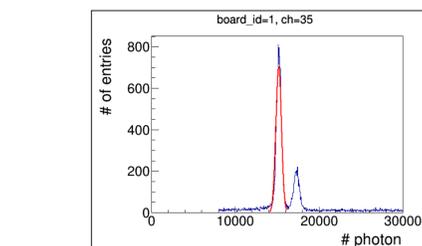
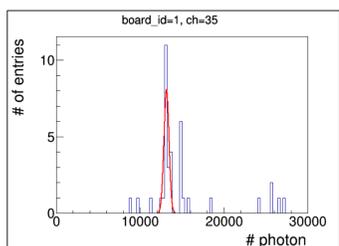
機械学習による事象弁別

- ✓ シミュレーションデータでは92.8%の精度で弁別できる
- ✓ 実データ(バックグラウンド)ではシミュレーションよりも高くシグナルと判別してしまう
- ✓ データ取得時のVeto設定により実データでは飛跡量が小さくなり(0ν2βに類似)バイアスが発生



EL補正

- ✓ 検出チャンネルごとにgain(1電子あたりのELの検出数)が異なる
- ✓ それぞれのチャンネルでXeの30keV特性X線をFittingしエネルギー較正することで全チャンネルのgainを一様に補正
- ✓ 時間変動の補正を行った後に全期間のデータを組み合わせて再度補正することで高精度化



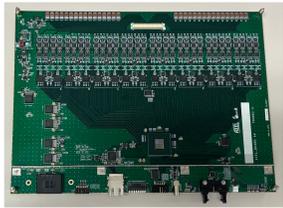
時間変動補正前: 短いrunごとのデータ

時間変動補正後: 高統計な全期間でのデータ

3. Firmware Development

次世代検出器用に読み出しボードが開発された(56ch→64ch)
それに伴い新たなファームウェアの開発が必要に
FPGA搭載ファームウェアをVivadoを用いて
前世代のものを参考に0から開発

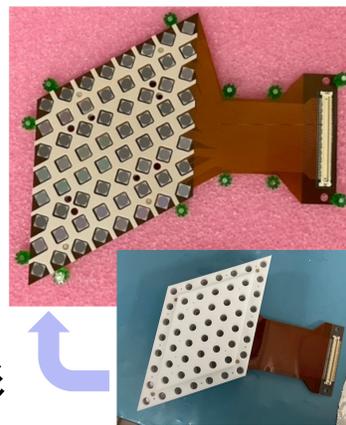
- 実装してきた機能
- ✓ 状態のLED表示
 - ✓ FPGAとMPPCの電圧・電流値の計測
 - ✓ PCとのTCP/UDP通信
 - ✓ ADC・DACのコントロール
 - ✓ High/Low gainデータ取得



4. MPPC Waveform Readout

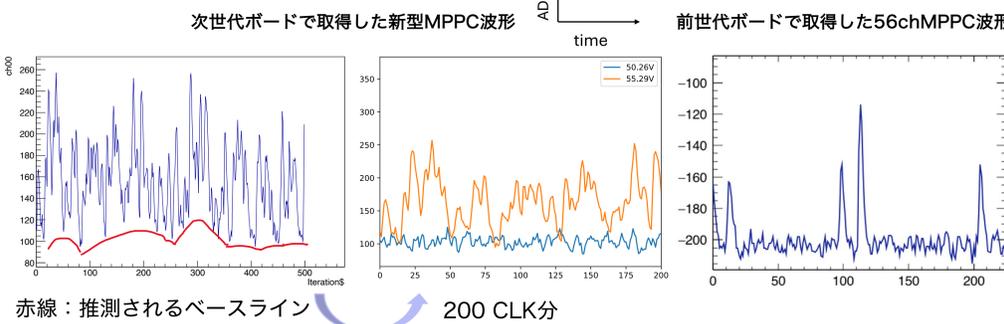
- 光量増加を目的として開発された
浜松ホトニクス製MPPC(S16860-01(ES1))
- ✓ チャンネル数が56chから64chへ
 - ✓ MPPCの受光面が大型化
(3mm角→4.7mmφ: 1.93倍)
 - ✓ MPPCチップを直接回路に実装
浜ホトから暗電流が多いと報告を受けている
規格(2.2uA, ~5Mcps)を超過、Max 9.2uA

新型64chユニットMPPC



新型64chユニットMPPC波形

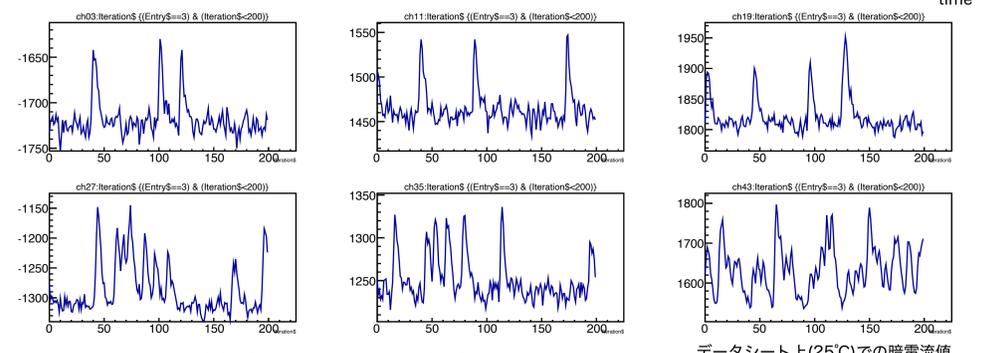
High gainによる波形評価を実施



- 赤線: 推測されるベースライン
- ブレイクダウン前後(青, オレンジ)でピークの有無が確認できる
従来型は綺麗なピークが見えているのに対し、新型は分解能が悪い
新型はベースラインの変動が大きい
現在は1photoのピークを用いてMPPCのgainを一様にしている
→次世代ボードではMPPC gainを一様化することが難しい

MPPCの冷却

MPPCを恒温器で5°Cまで冷却
S/N分離ができた一方で、暗電流が大きいchは5°Cでも厳しい



データシート上(25°C)での暗電流値

MPPC ch	暗電流[uA]
3	3.1
11	2.8
19	2.7
27	4.2
35	2.7
43	9.2
51	3.0
59	2.9

5. Summary

AXEL実験: 高圧¹³⁶XeガスTPCを用いた0ν2β探索実験
光量増加を目的として受光面が大型化した新型64chユニットMPPCが開発された
新型MPPCは暗電流が多く、1p.e.ピークを明確に区別することが難しかったが冷却によって改善することが判明した

[1]KamLAND-Zen Collaboration, arXiv:2406.11438