

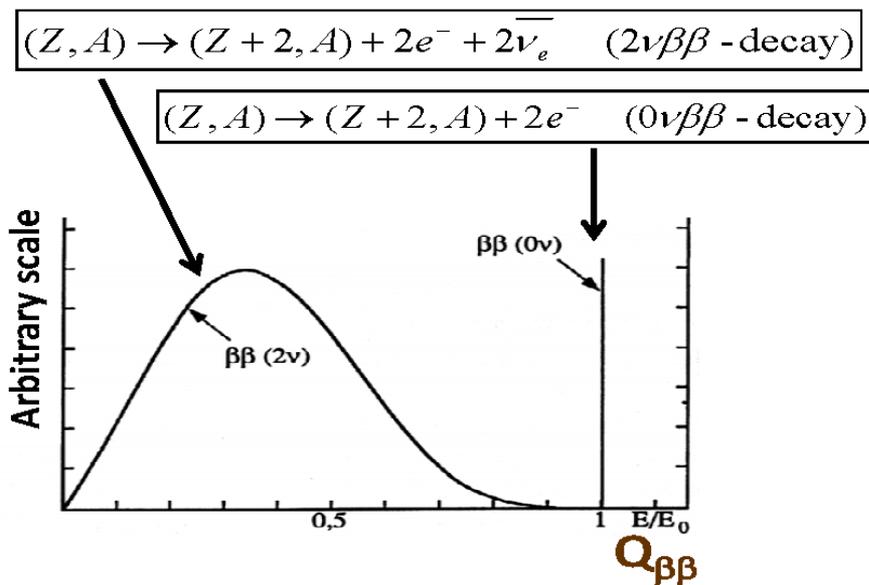
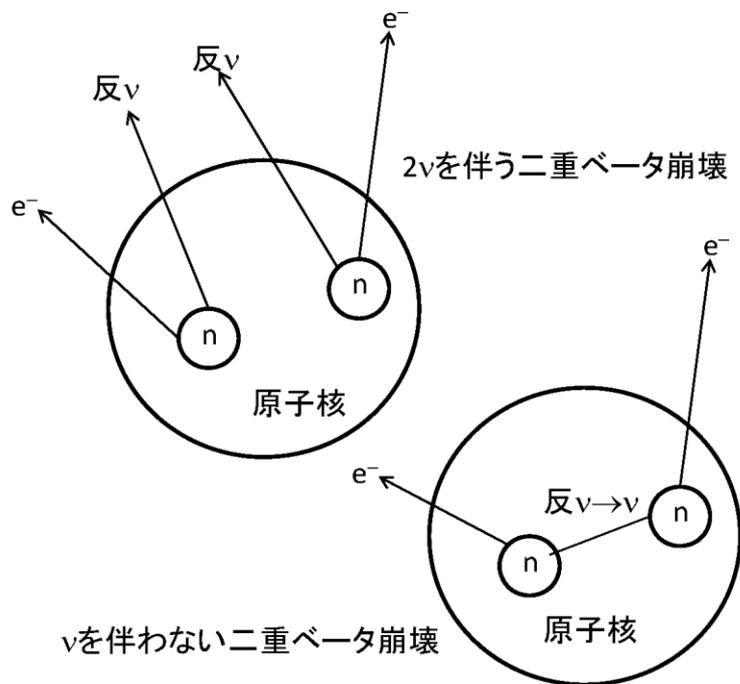
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けた キセノン比例シンチレーション検出器の開発

高エネルギー物理学研究室

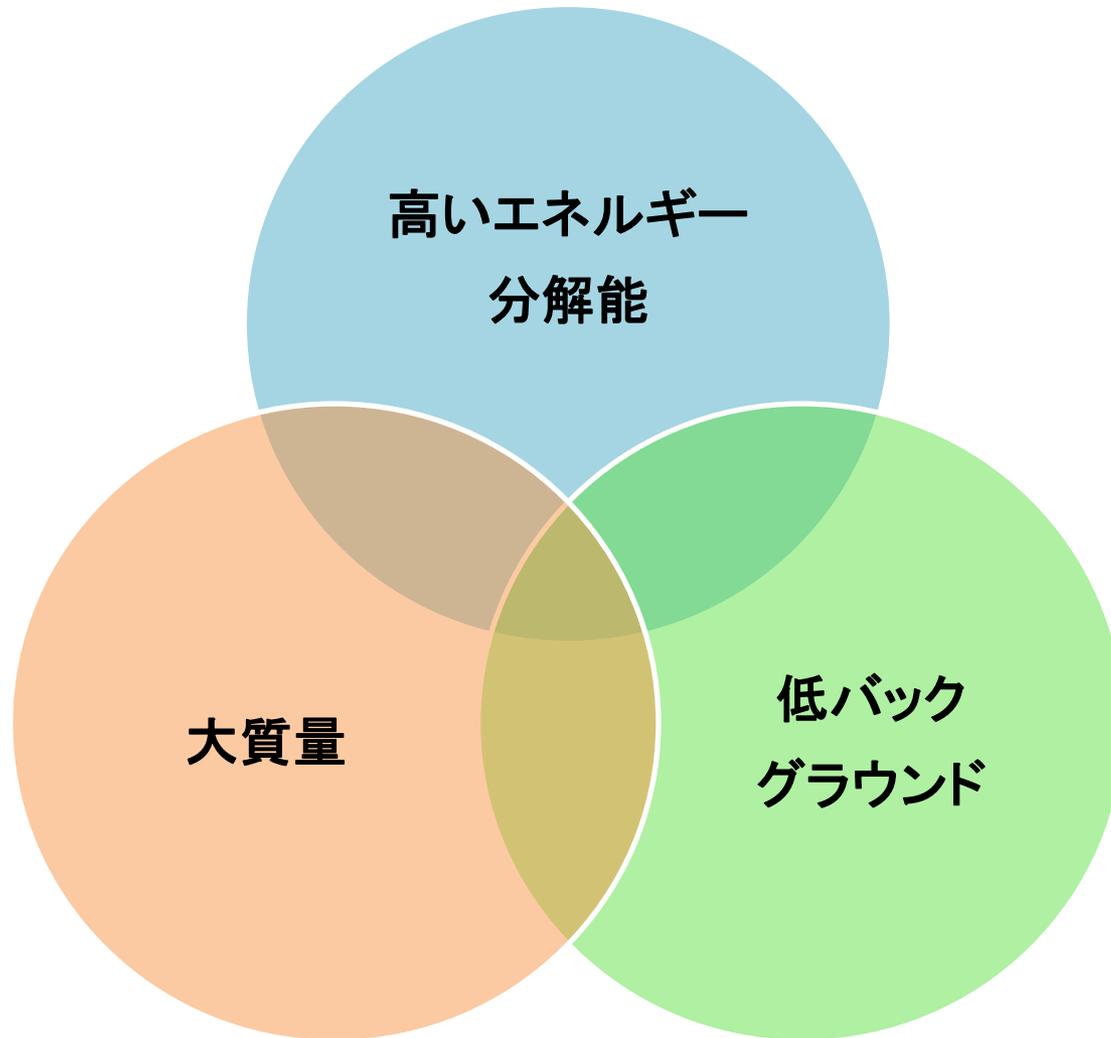
秋山 晋一

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

- ニュートリノがマヨラナ粒子であれば可能
- 非常に稀な事象 (寿命 $> 10^{25}$ 年)
- 放出される2個の電子を検出することで探索



二重ベータ崩壊探索実験の 検出器に必要な要素



これらの要素を兼ね備えた検出器を目指す。

二重ベータ崩壊探索実験

^{76}Ge (GERDA 半導体)

- 利点
 - 高いエネルギー分解能 (FWHM **0.16%** @2039keV)
- 欠点
 - 高価
 - 大型化が困難(漏れ電流、キャリアの捕獲)

^{136}Xe (KamLAND-Zen 液体シンチレータ, EXO 液体キセノン)

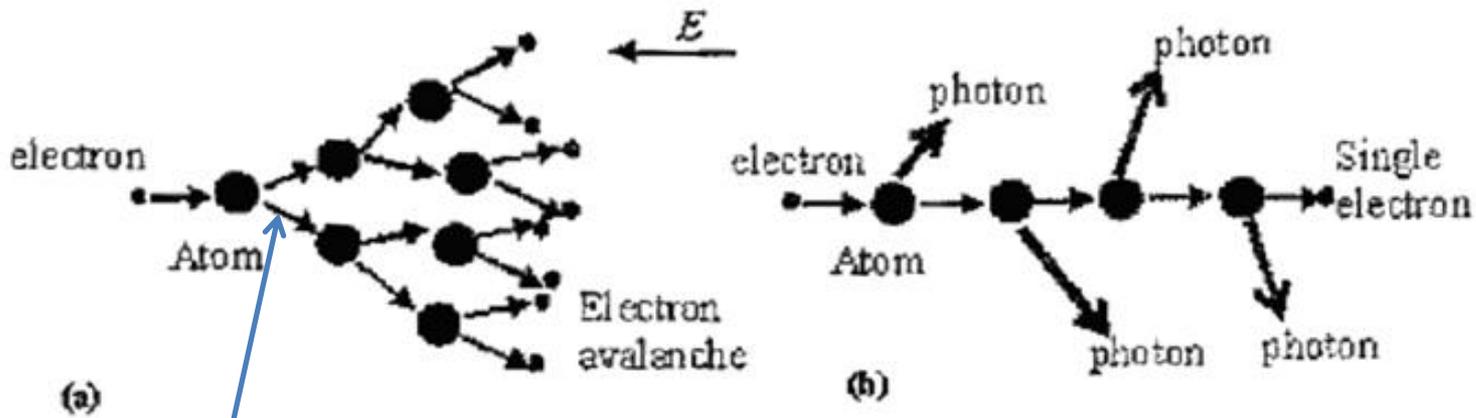
- 利点
 - 比較的安価
 - 繰り返し純化が可能
- 欠点
 - 低いエネルギー分解能
 - KamLAND-Zen FWHM **9.9%** @2459keV
 - EXO FWHM **4.3%** @2459keV

本研究

- キセノンガスを用いた検出器
- Electroluminescence (比例シンチレーション)という現象を用いることで高いエネルギー分解能を達成できる。
- 読み出し部に工夫をこらし、飛跡検出能力を持たせる。
- 将来的にはエネルギー分解能 0.5%(FWHM)、1ton(30気圧、直径1.7m、高さ2m)での実験を目指す

Electroluminescence

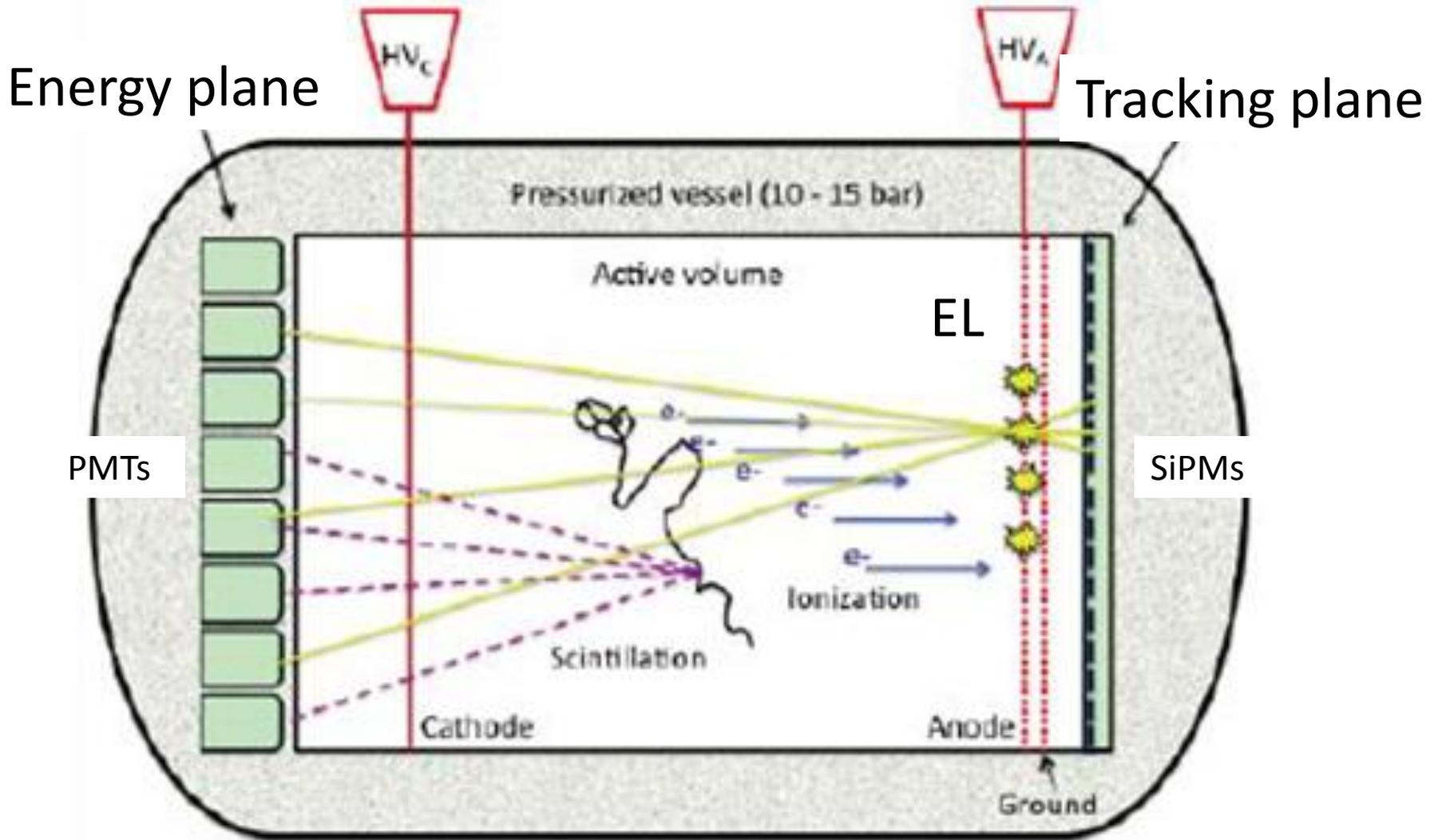
- 高電場で加速された電子がキセノン原子に次々と衝突し、励起することによる脱励起光(波長~170nm)
- 線形増幅過程
→ 増幅のゆらぎが小さい



電子のなだれ増幅
特に初段の増幅のゆらぎが
大きく影響する

エレクトロルミネッセンス

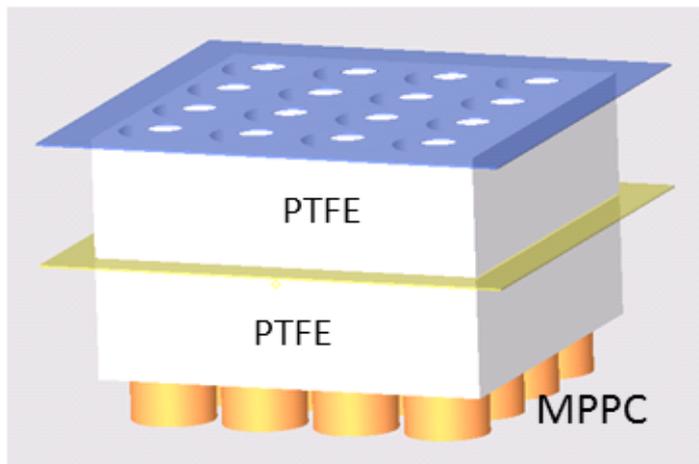
vs NEXT



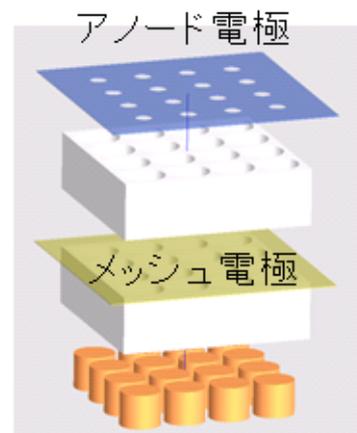
エネルギー測定面が増幅部から離れており、
光量の発光位置依存性がある。

Electroluminescence light collection cell (ELCC)

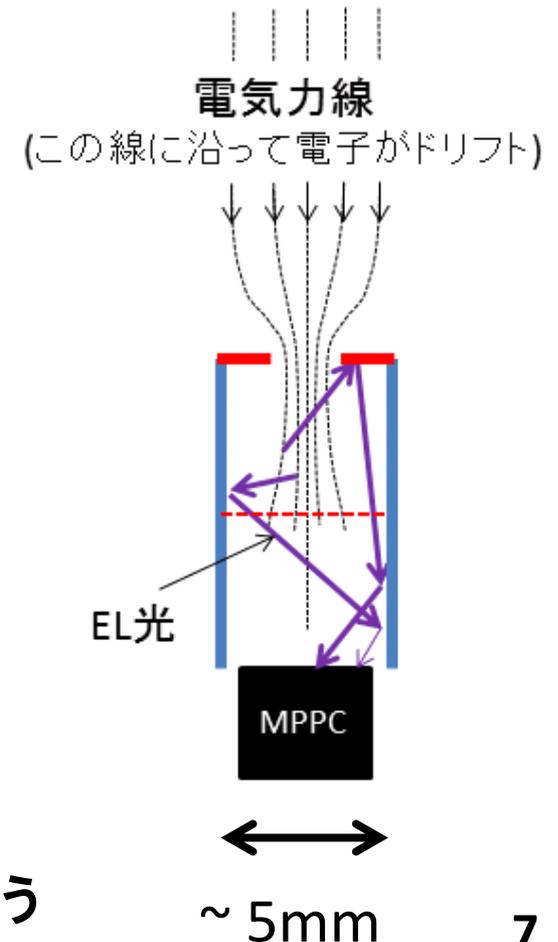
- 電離電子をドリフトさせた終端での読み出し部
- セル構造内でEL増幅を行い、下部のMPPC(PMT)で検出
 - 光量の発光位置依存性の低減
 - エネルギー、飛跡検出を1つの面で行う



トラッキング・プレーン



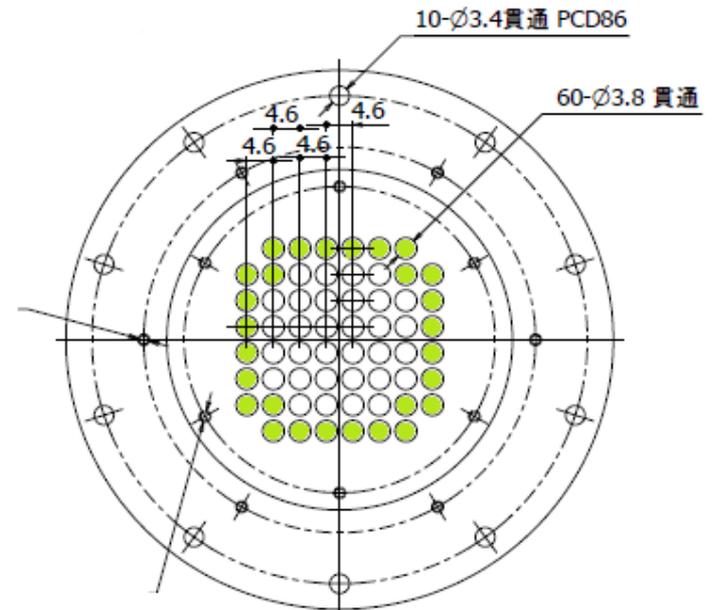
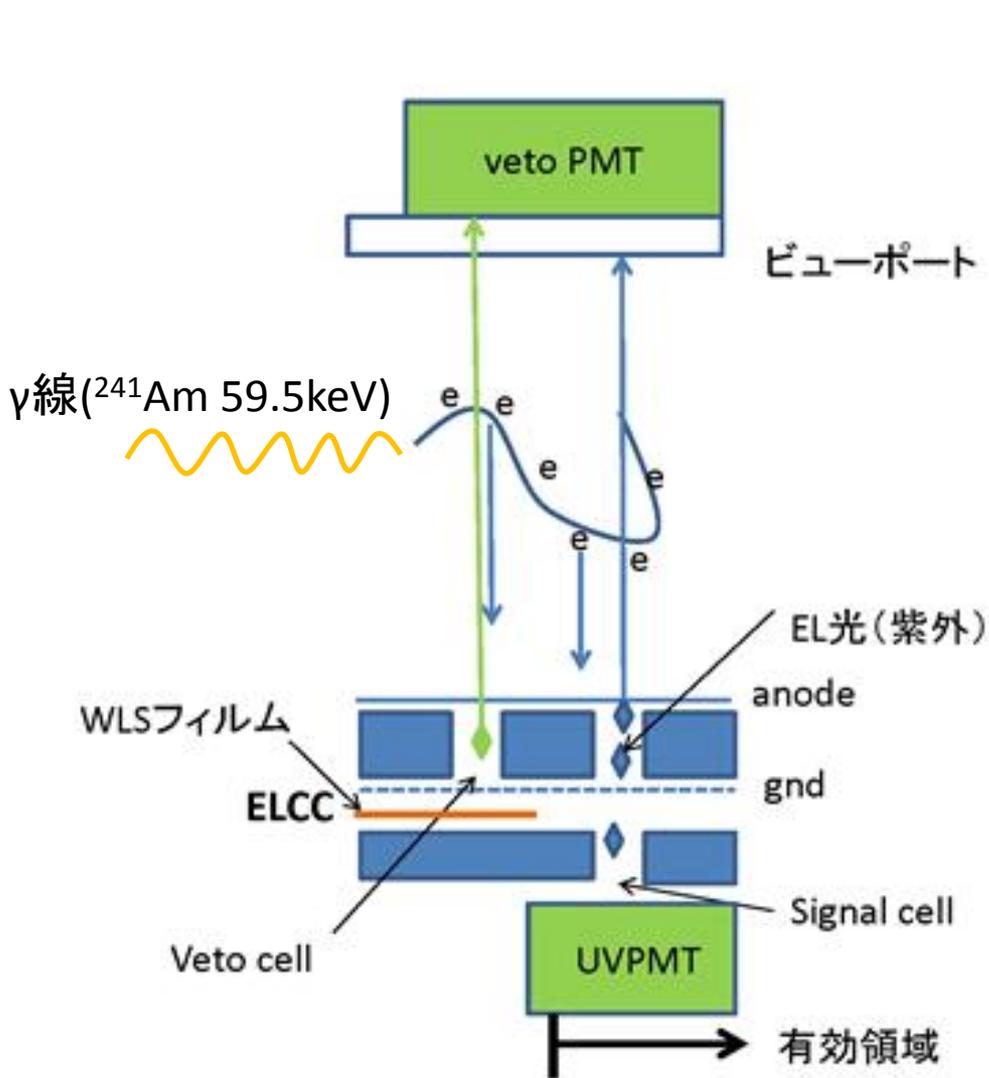
展開図



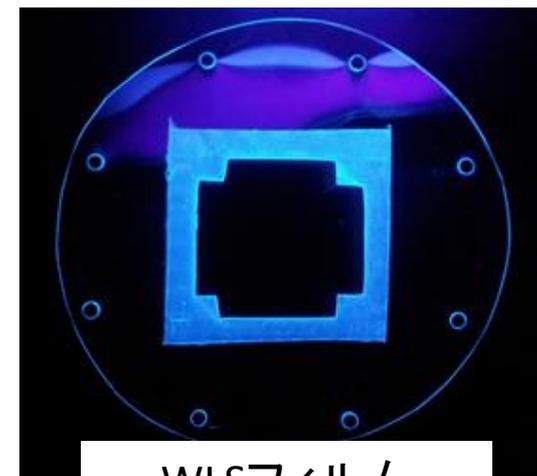
本研究では、試作機を製作し、

- エネルギー分解能の評価
- セルごとの読み出し(飛跡検出の第一歩)を行う

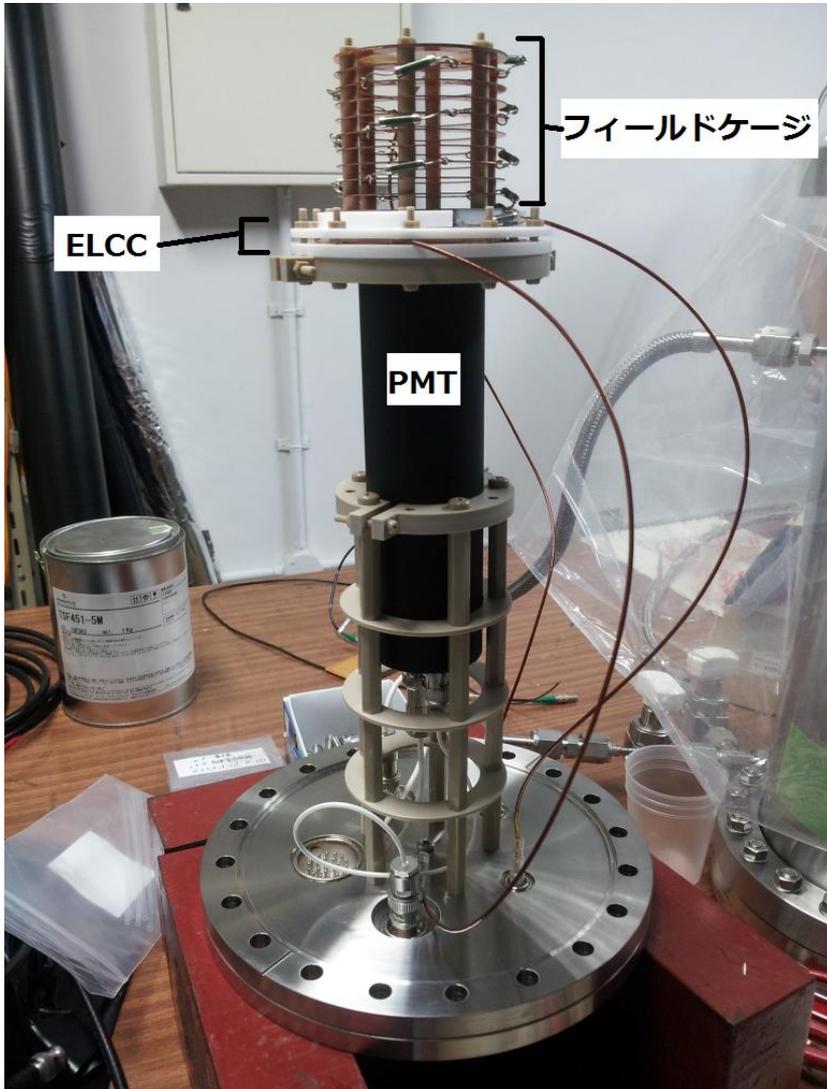
測定の原理とVETO



VETO cell の配置



試作機の製作



- 現在までに3つの試作機を製作
 - 1号機
 - EL増幅の確認のため製作
 - セル数16
 - 放電対策が不十分
 - 2号機
 - セル数60
 - 放電対策
 - アノード穴径が小さく電子をすべて収集できない
 - アウトガス対策が不十分(はんだ)
 - 3号機
 - セル数60
 - アノード穴径を広げ、電子をすべて収集できるよう改良

測定方法と使用したPMT

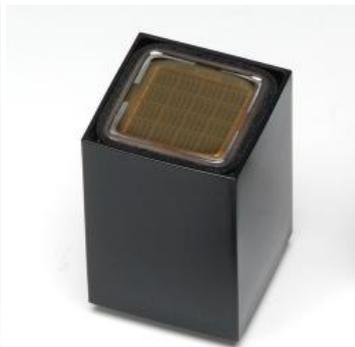
- Flash ADC V1724 (帯域幅40MHz, 100MHzサンプリング)で波形情報を取得。
- ELCCの読み出しにはPMTを使用
 - H3178-51Q(UVPMT)
 - 窓材に合成石英を使用(紫外光に感度あり)
 - アウトガス対策(ポッティング材、通気孔)
 - H8711-406(MAPMT)
 - 一辺4.2mmの受光面が4x4 ch 並んでいる
 - 窓材は合成石英
 - アウトガス対策(ポッティング材、通気孔)



Flash ADC と NIMモジュール

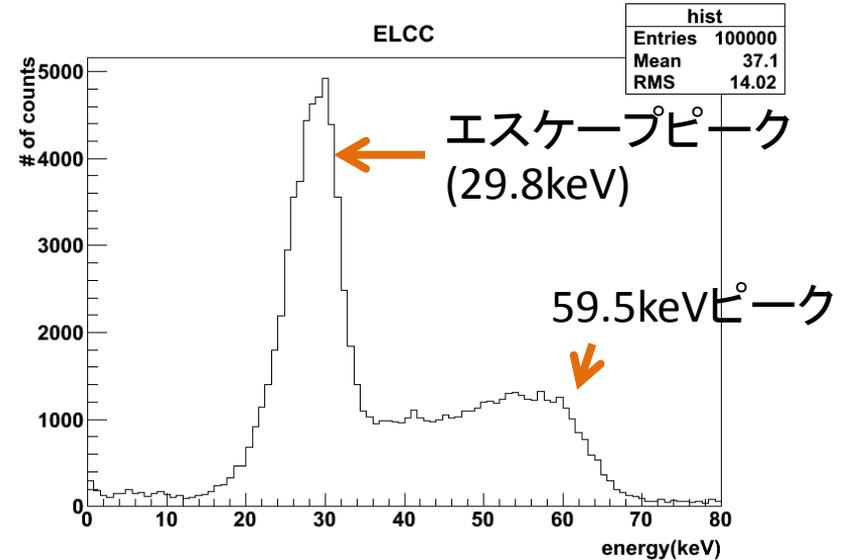
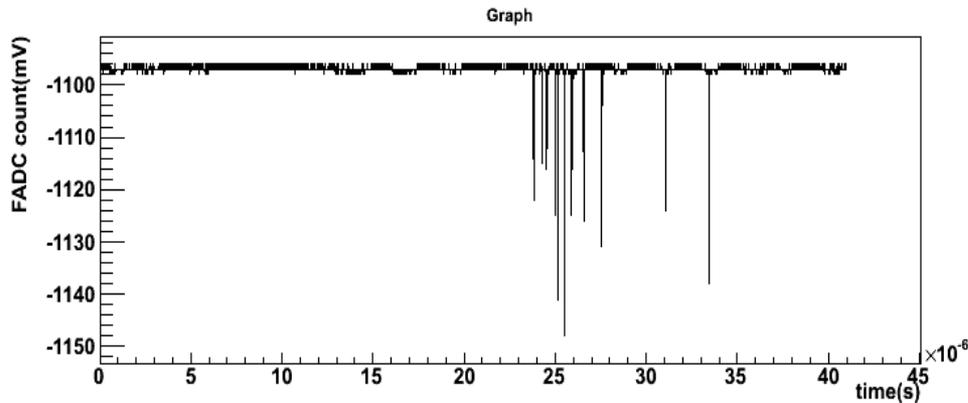
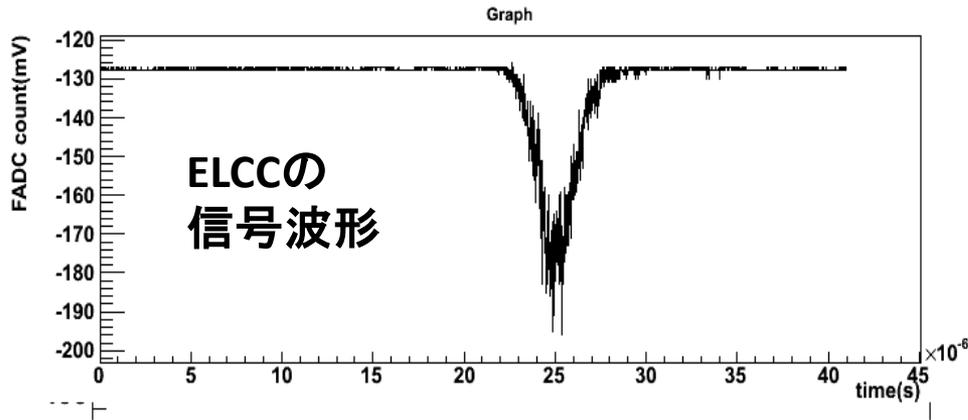


UVPMT

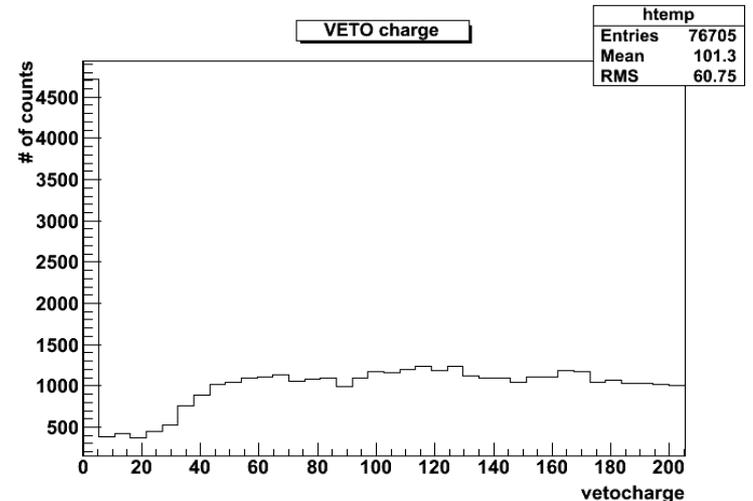


MAPMT

信号波形とその積分



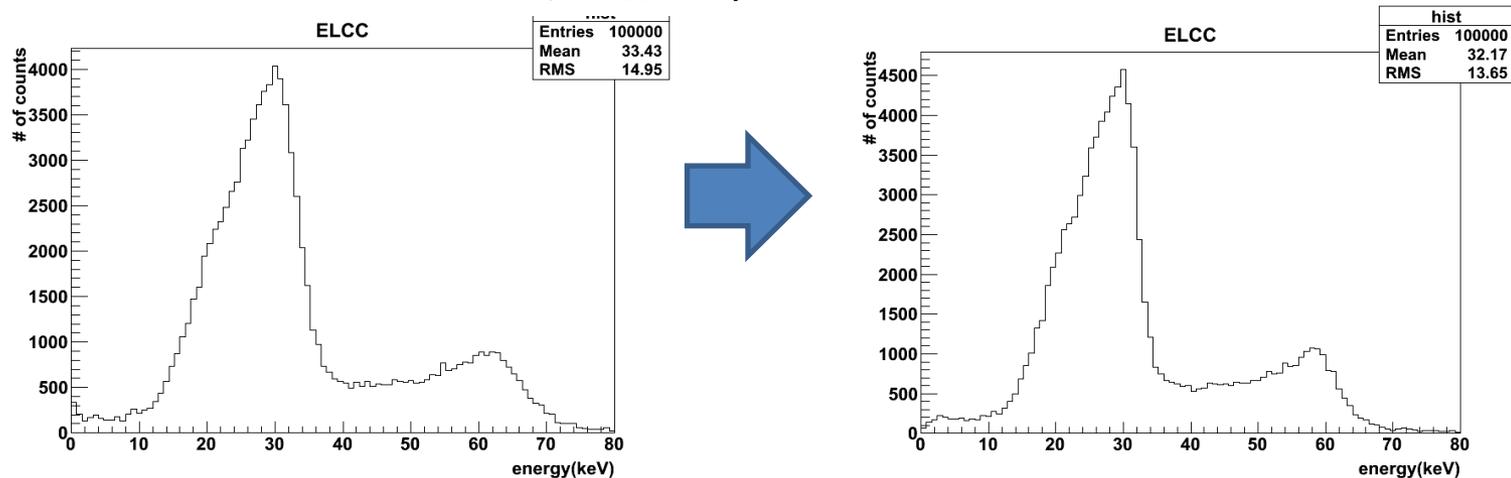
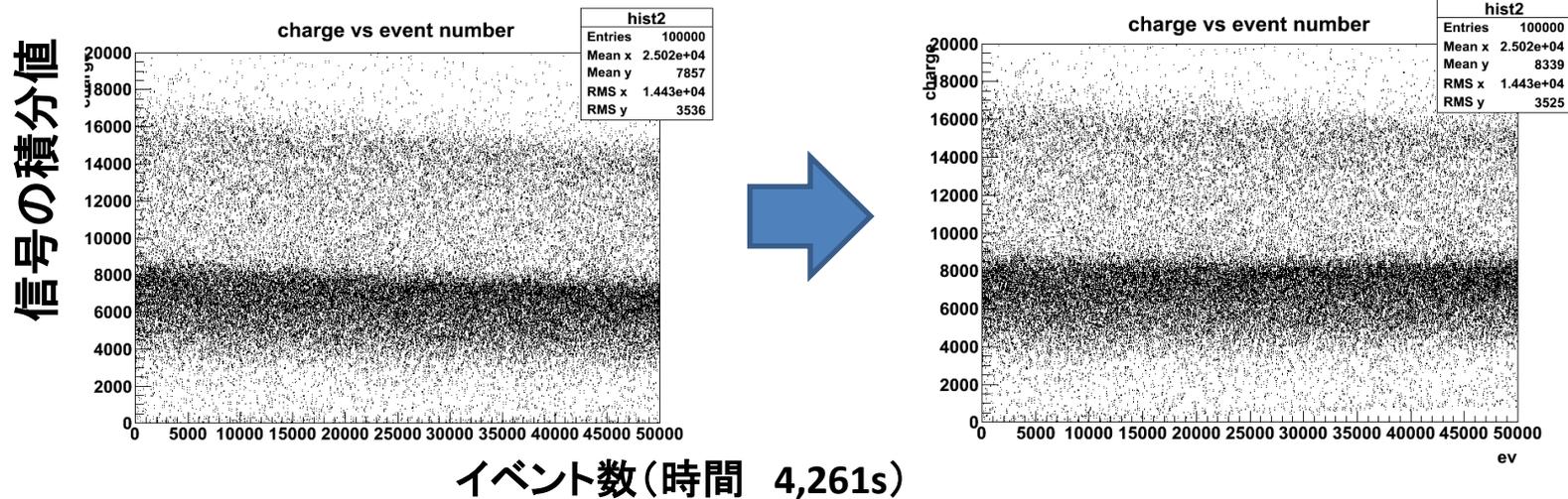
ELCCの信号波形を積分したヒストグラム



VETOPMTの信号波形を積分したヒストグラム

光量の補正

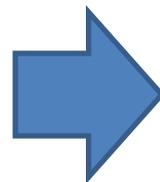
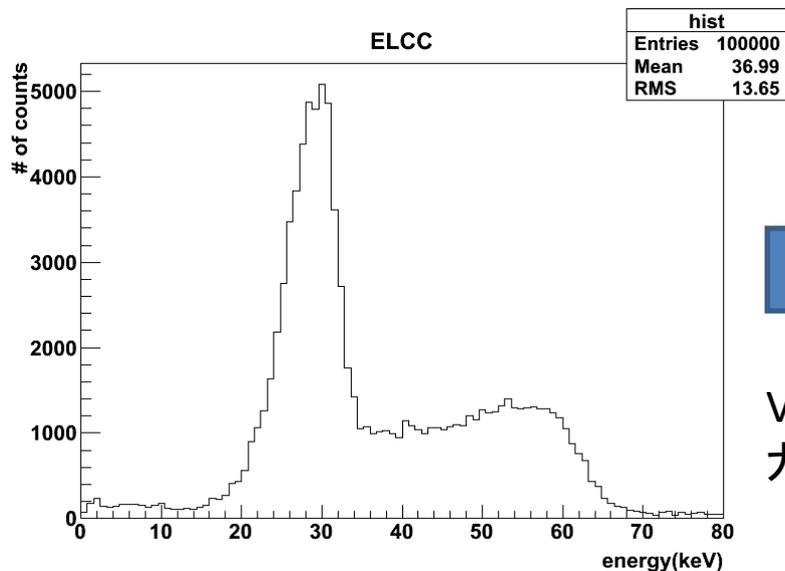
- 測定中に、チェンバー内の構造物からガスが放出され、電離電子が吸着されてしまうため、信号が小さくなってゆく効果を補正する。



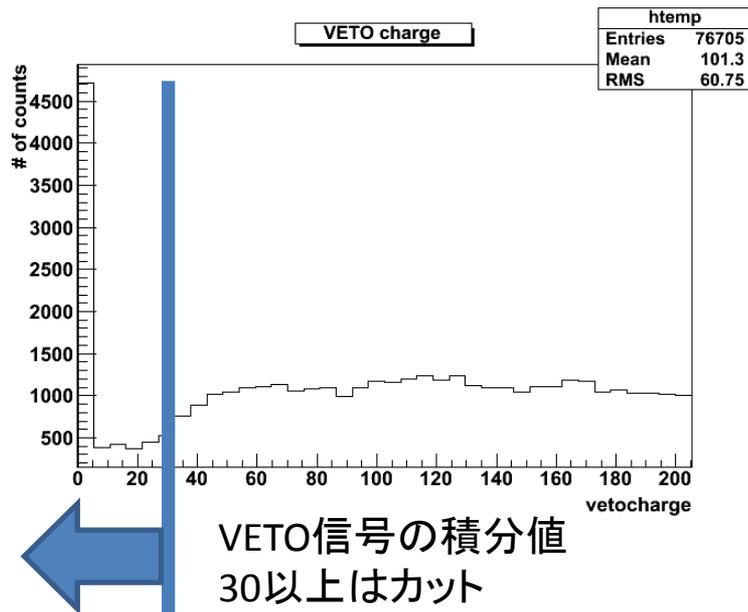
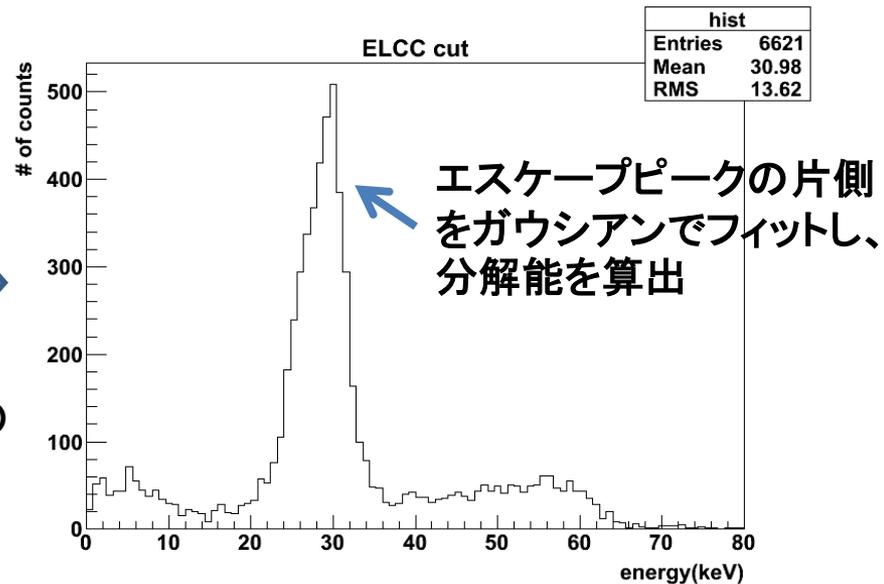
測定

- エネルギー分解能の測定
 - UVPMT + 2号機 (アノード穴径 小)
 - UVPMT + 3号機 (アノード穴径 大)
- セルごとの読み出し
 - MAPMT + 3号機

分解能の評価 (UVPMT、二号機)



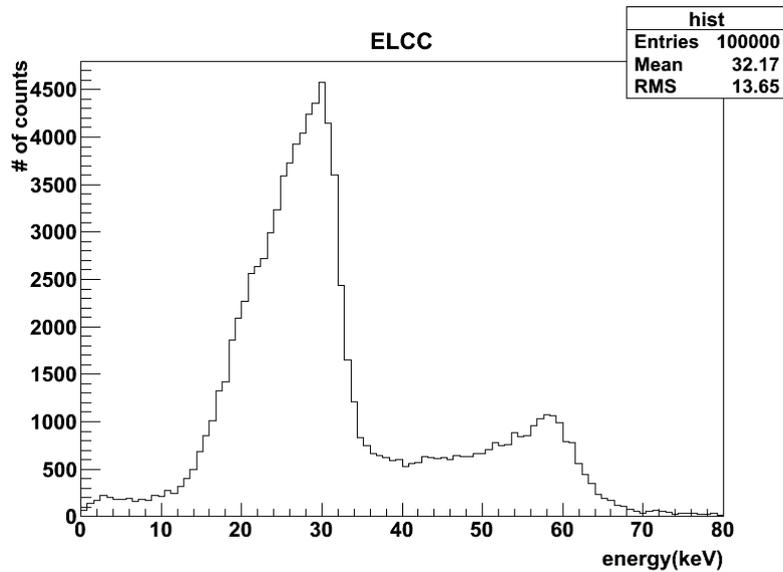
VETOの
カット



分解能 (FWHM)	カット前	カット後
29.8keV ピーク	18.1%	13.8%
2459keV換算	2.0%	1.5%

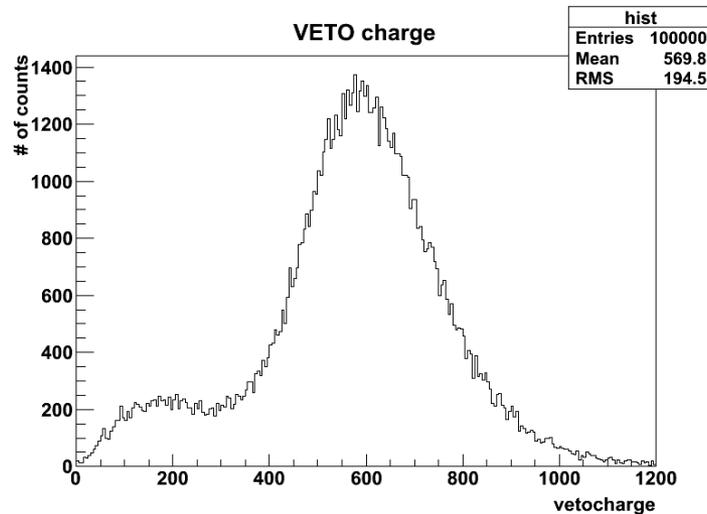
KamLAND-Zen 9.9%, EXO 4.3%
に比べ高いエネルギー分解能
VETOカットにより、分解能は向上

分解能の評価 (UVPMT、三号機)



VETO信号の積分にペDESTAL(積分値0)が存在せず、カットが機能しない

->VETOPMTが光漏れしていた可能性
再度評価が必要



分解能 (FWHM)	カット前	カット後
29.8keV ピーク	19.1%	×
2459keV換算	2.1%	×

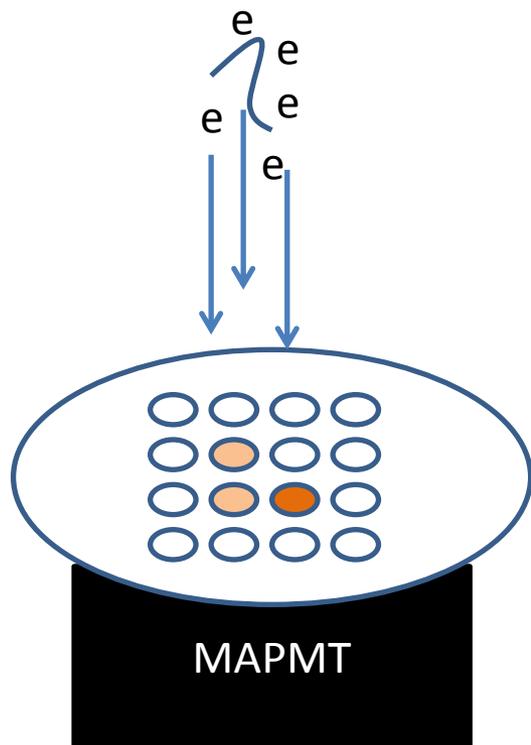
分解能の評価

分解能 (FWHM)	二号機 カット前	二号機 カット後	三号機 カット前	三号機 カット後
29.8keV ピーク	18.1%	13.8%	19.1%	×
2459keV換算	2.0%	1.5%	2.1%	×

- 二号機から三号機では電子の収集効率は向上しているが、分解能は改善せず。
- 飛跡が有効領域に収まっていない影響が大きい可能性がある。-> 今後、より大きな検出器で評価する

セルごとの読み出し

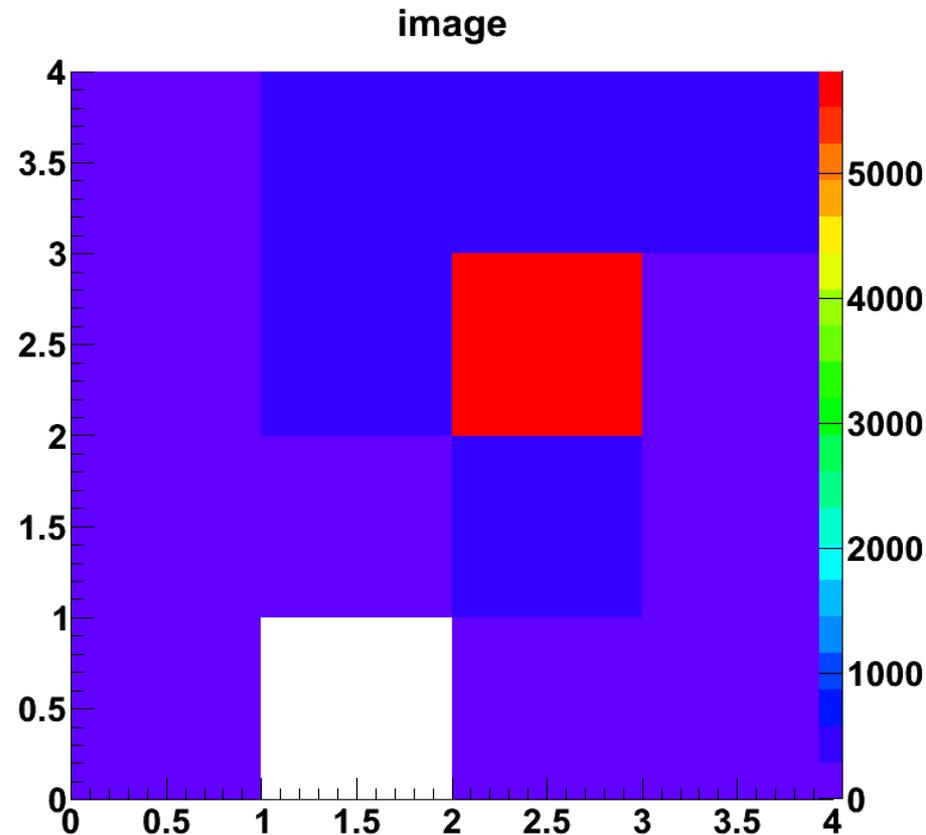
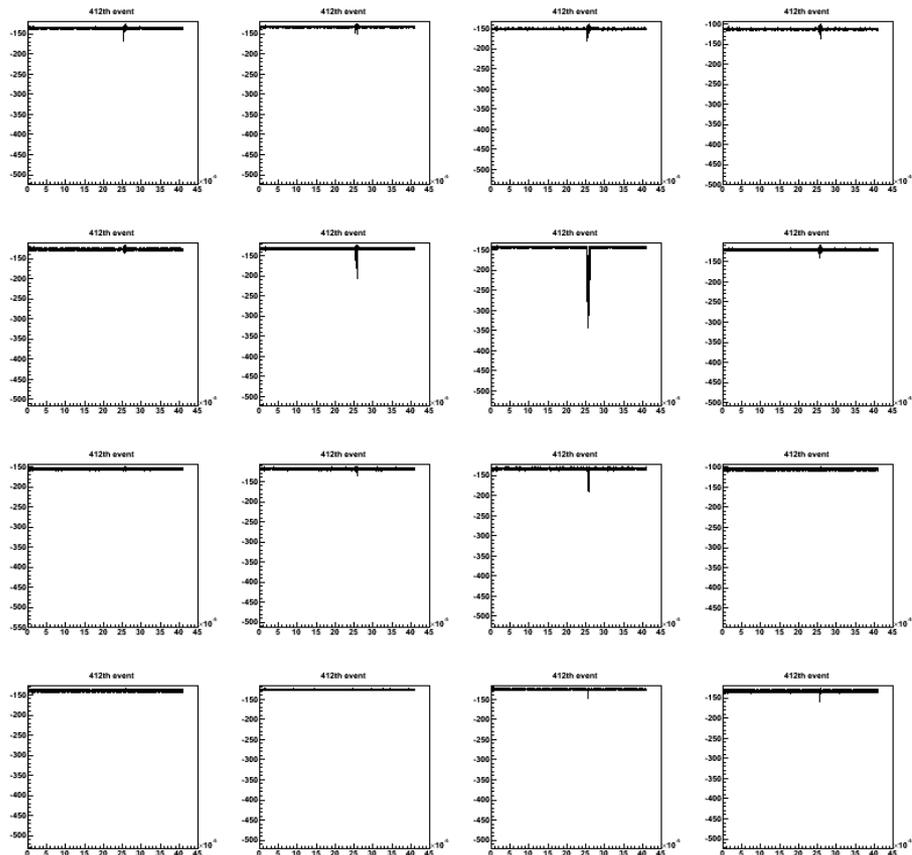
- ELCCの飛跡検出能力検証の第一歩として、MAPMTを用いてセルごとの読み出しを行った。



29.8keV の電子の1気圧キセノン中での飛程は $\sim 1\text{cm}$ 。飛跡は曲がっており、三次元的に広がるため、二次元方向の広がりはこれより短い。

ELCCのセル間隔は4.6mm
-> 1 or 2 セルが大きく光っているイベントがあると考えられる。

セルごとの読み出し



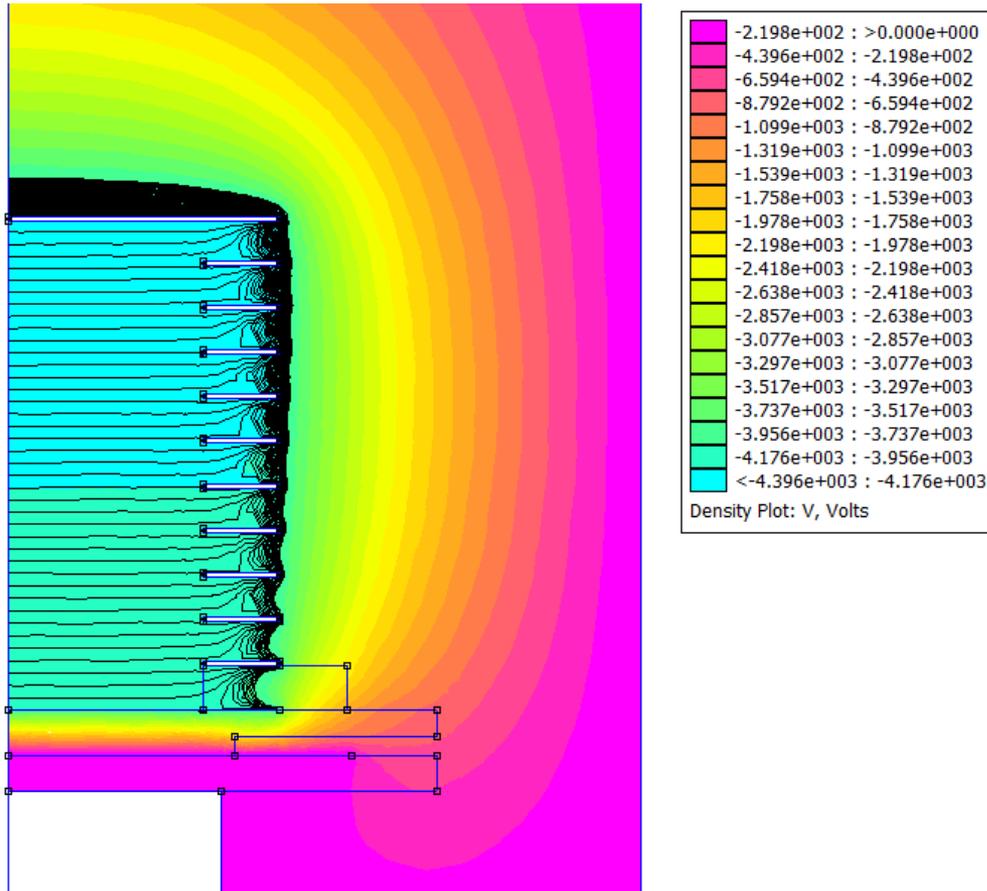
MAPMTの各チャンネルの波形(左)と積分値を二次元ヒストグラムに詰めたもの(右)
電離電子の広がりが1~2セル(数mm~1cm)であることがわかる。

まとめ

- キセノンガスを用いた二重ベータ崩壊探索実験を目標として、信号に比例シンチレーションを用いた、高エネルギー分解能、飛跡検出能力をもつ検出器の開発を行った。
- 最良の分解能としてキセノンの二重ベータ崩壊のQ値 2459keV に換算して、1.5%(FWHM)を得た。
KamLAND-Zen 9.9%, EXO 4.3% に比較して高い分解能が得られることを確認した。
- 飛跡検出能力の検証の第一歩として、MAPMTを用いてELCCのセルごとの読み出しを行い、特定のセルのみが光るイベントがあることを確認した。

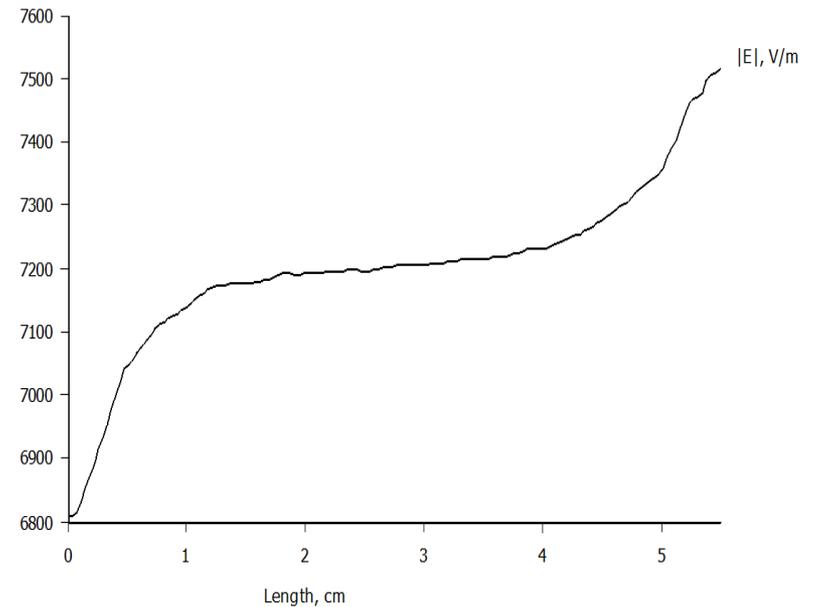
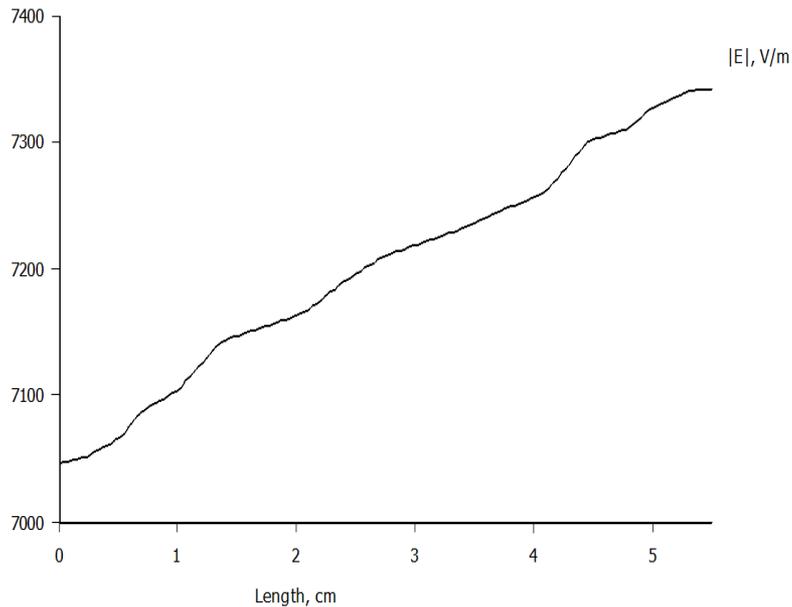
バックアップ

フィールドドケージ



- FEMMでのシミュレーション
- ドリフト電場の一様性は中心部($r=0$)で約2%、有感領域の端($r=16$)で、約5.5%

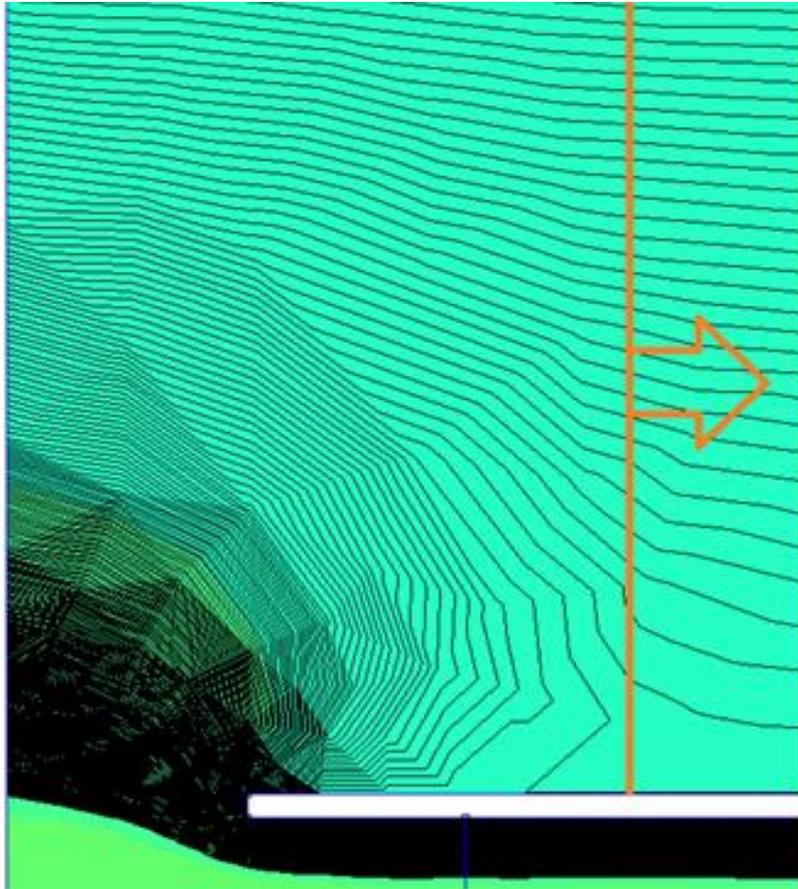
ドリフト電場



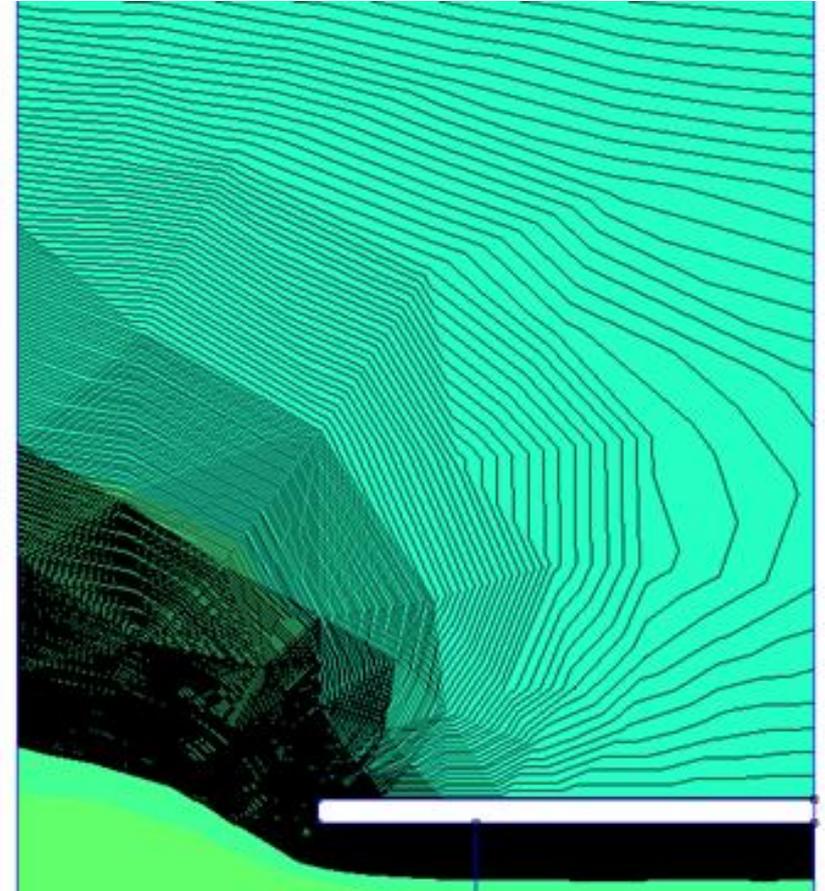
フィールドケージ内でのドリフト電場強度(縦軸)とz方向の距離(横軸)の関係
アノード面を $z=0$ とする。

中心部 $r=0$ (左)と、有感領域の端 $r=16$ (右)

二号機と三号機のELCC開口率



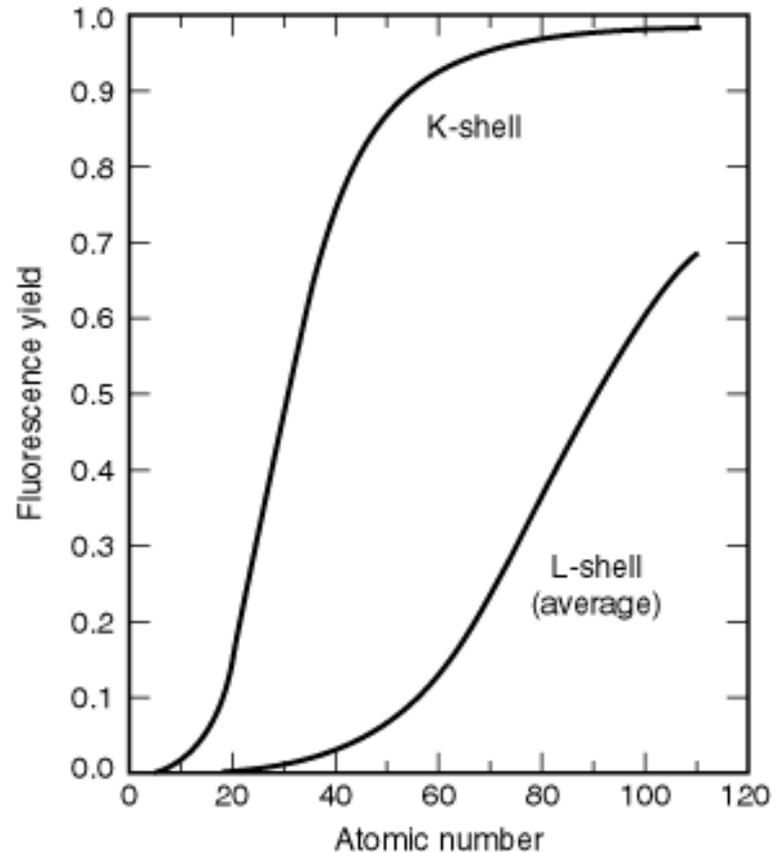
二号機、ELCC anode穴付近の等ポテンシャル面。赤矢印の領域の電子は収集されない



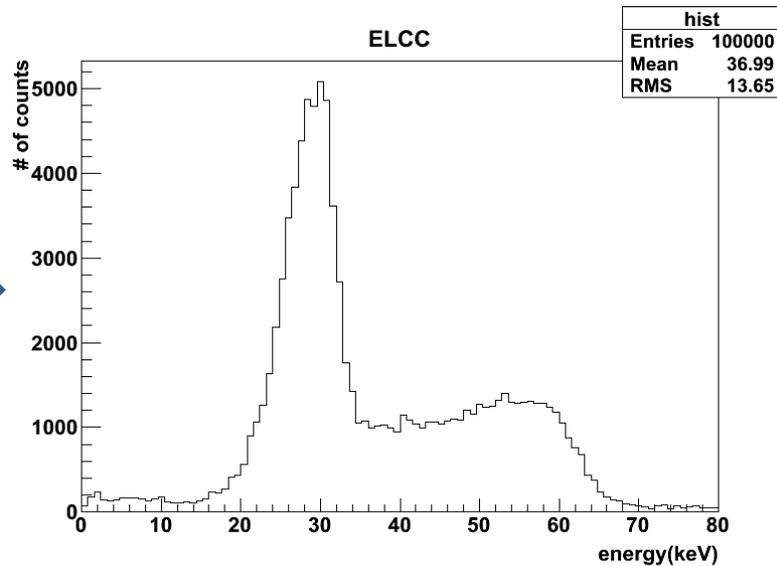
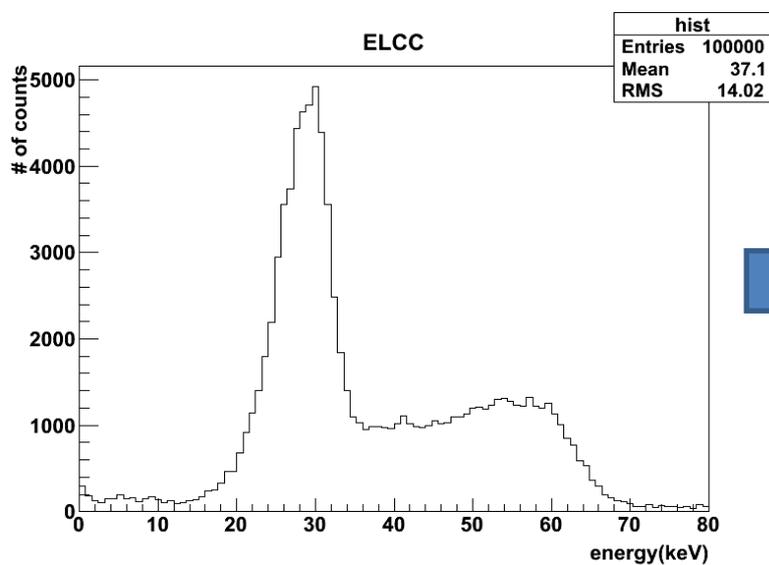
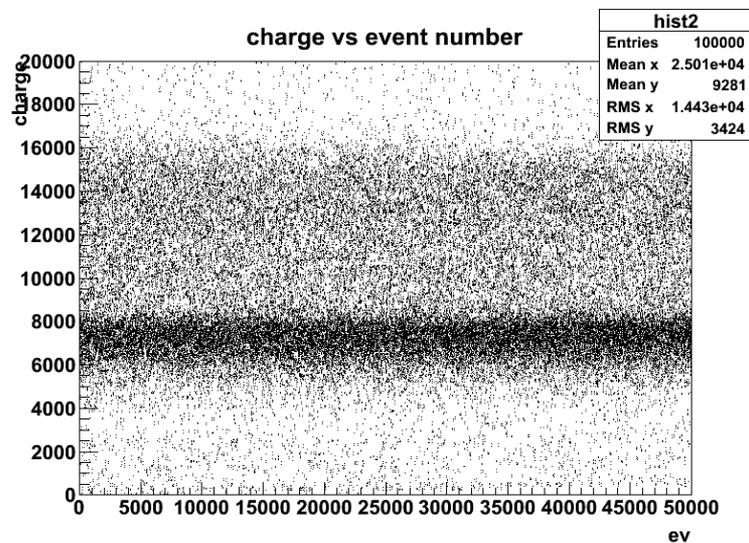
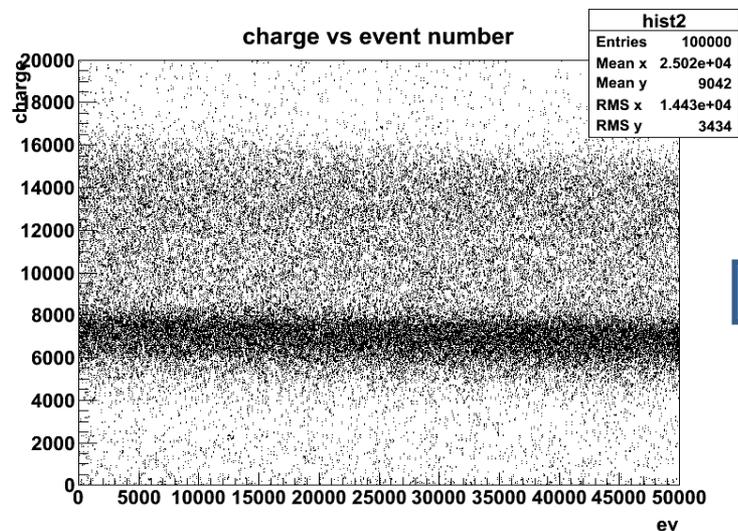
三号機、ELCC anode穴付近の等ポテンシャル面。全領域で電子が収集される。

エスケープピーク

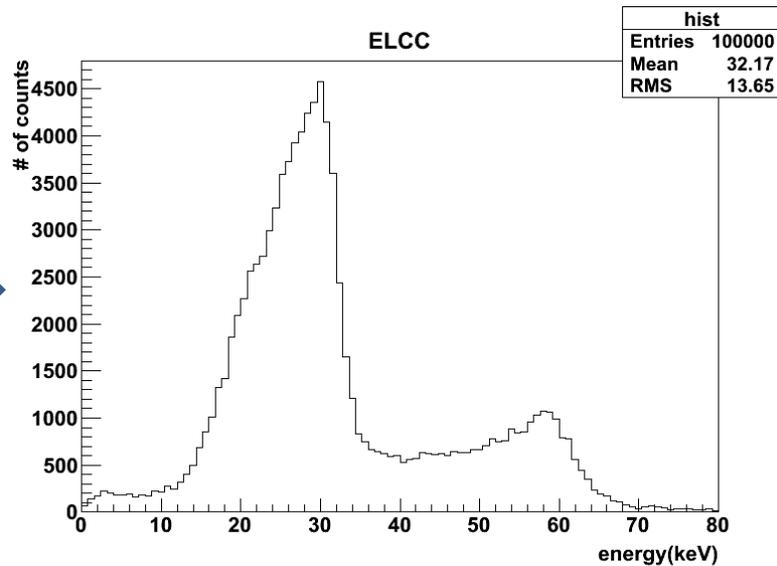
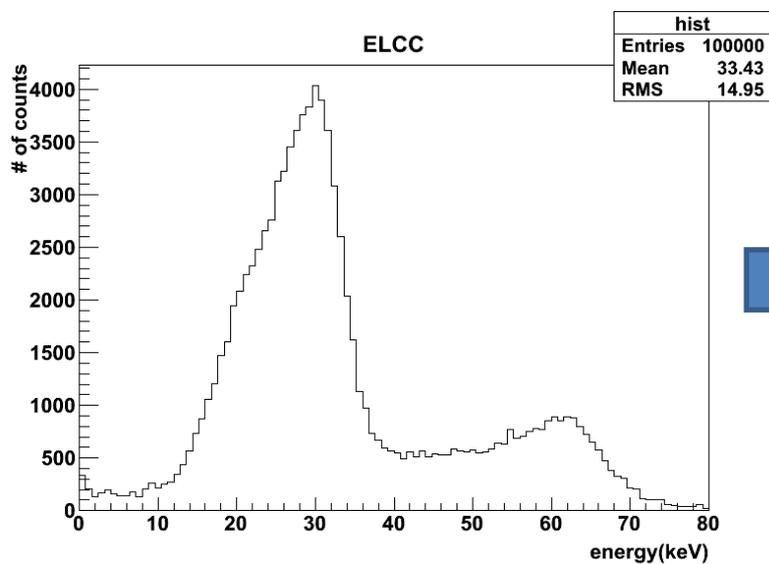
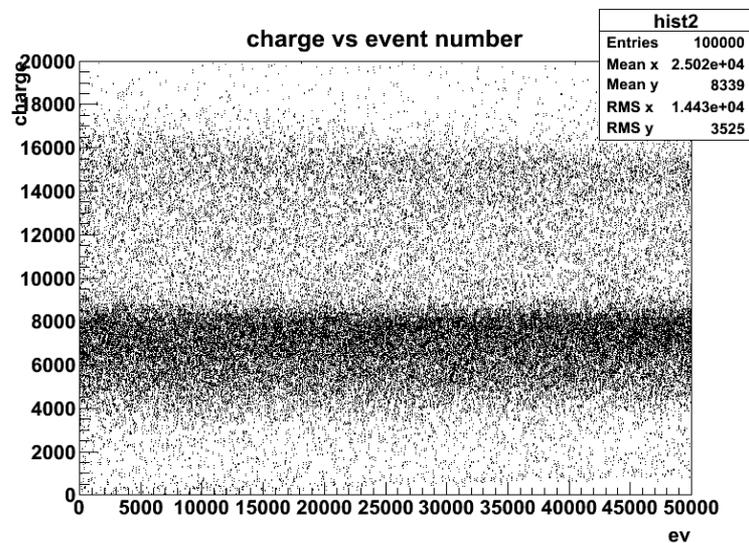
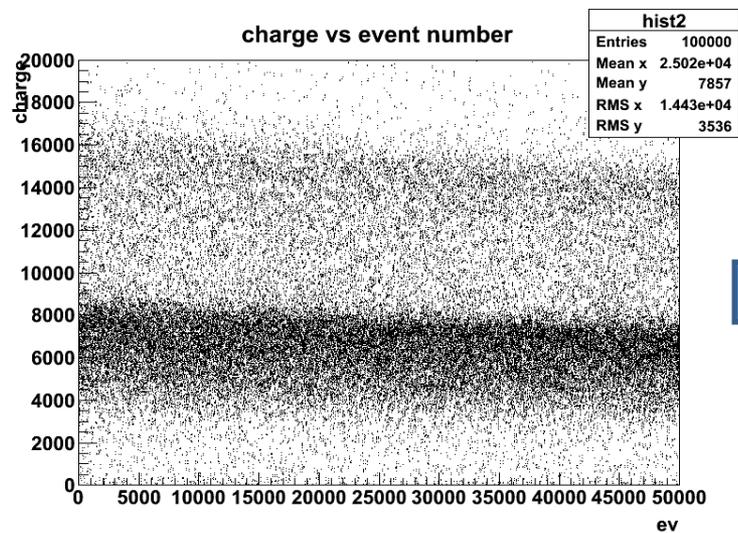
- ガンマ線の光電吸収に続いて、特性X線が放射される割合を蛍光収率と呼ぶ。
- キセノンでは87.5%



光量の補正 (UVPMT、二号機)



光量の補正 (UVPMT、三号機)



アウトガスのデータ

1. チェンバーのフィードスルーのついたフランジをブランクフランジに変更したもの（中には何も入らない）
2. フィードスルーフランジのみ（中には何も入らない）
3. フィードスルーフランジ+ UVPMT とフランジから支える治具
4. フィードスルーフランジ+ UVPMT とフランジから支える治具+ ELCC + フィールドケージ（二号機）
5. フィードスルーフランジ+ MEGPMT とフランジから支える治具

表 4.7 にそれぞれの到達圧力、平均単位時間アウトガス量を示す。

	到達圧力 (Pa)	平均単位時間アウトガス量 (Pa/s)
1.	3.3×10^{-5}	1.77×10^{-5}
2.	2.4×10^{-5}	3.43×10^{-5}
3.	3.8×10^{-4}	1.22×10^{-2}
4.	9.4×10^{-4}	1.96×10^{-2}
5.	1.2×10^{-4}	2.72×10^{-3}

表 4.7: チェンバー内に入れたものと到達圧力、平均単位時間アウトガス量の関係