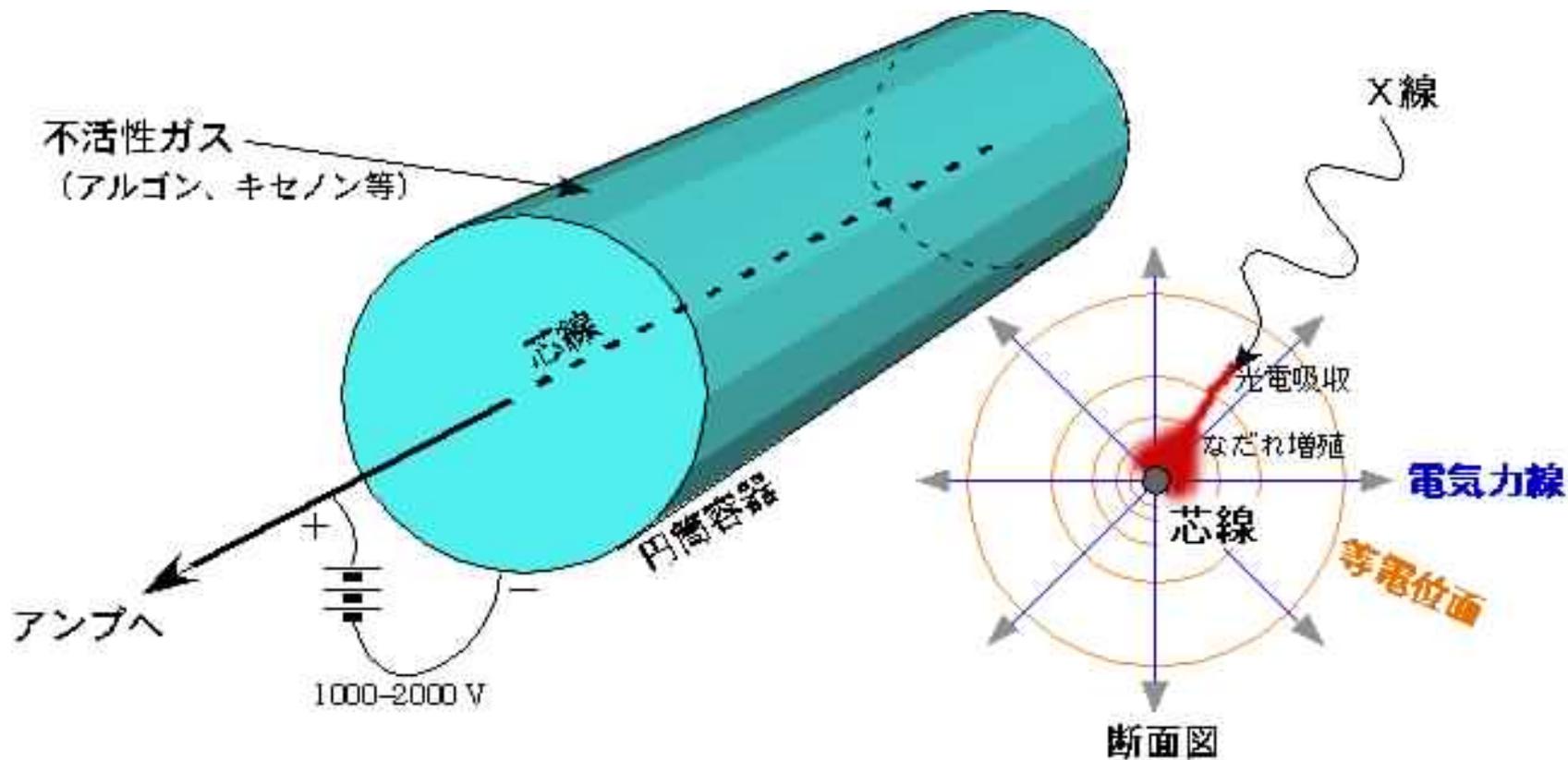


ワイヤーチェンバーの空間電荷効果 による増幅率低下の検証

Y.Kato, N.Nagakura, K.Fujii
The University of Tokyo

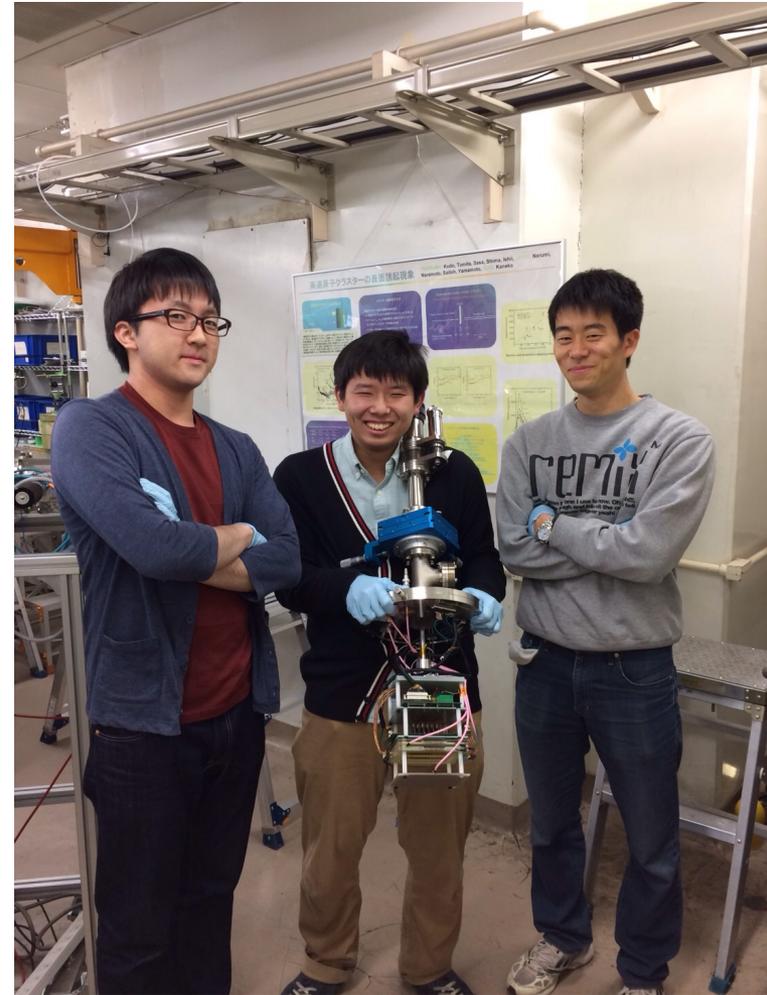
ワイヤーチェンバーとは



ある条件下で致命的な問題がある！

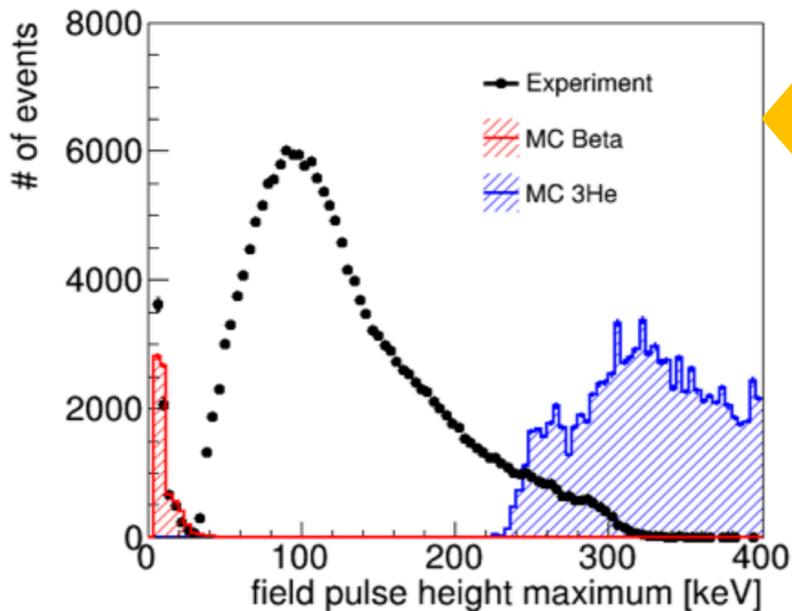
概要

- ワイヤーチェンバーのサチュレーション(増幅率低下)現象を定量的に理解したい
- 原因は“空間電荷効果”ではないか？
→ 増幅率低下モデル式を構築
- 小型 Time Projection Chamber を製作し、
モデル式の検証実験を行った
- 現在までに得られた成果を報告



サチュレーション現象とは

- ▶ ワイヤーチェンバーをある程度高い増幅率で動作させて電離損失密度の高い信号を測定する際、増幅率が低下してエネルギーの線形性が失われてしまう現象



← J-PARC/MLFの中性子ビームラインで遂行中の中性子寿命精密測定実験で得られた一例

Beta : 中性子の β 崩壊事象 (エネルギー損失小)
 ^3He : ^3He 吸収事象 (エネルギー損失大)

サチュレーション現象を定量的に理解したい！

※中性子寿命精密測定実験の詳細が気になる方 → Appendix

増幅率低下モデル式を構築

➤ サチュレーション現象の原因を

増倍過程で発生した多数の陽イオンによる

“空間電荷効果”だと考えて、以下の**増幅率低下モデル式**を構築

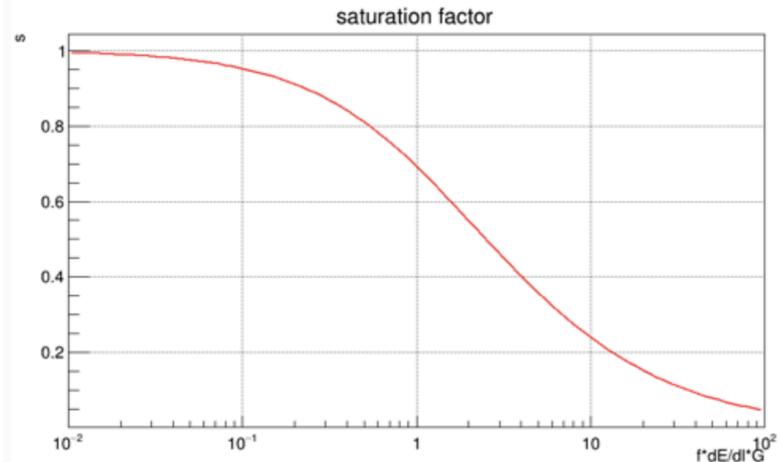
$$s = \frac{\log \left(1 + f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0 \right)}{f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0}$$

s : 増幅率低下量 $[0 < s \leq 1]$

f : 未知のパラメータ

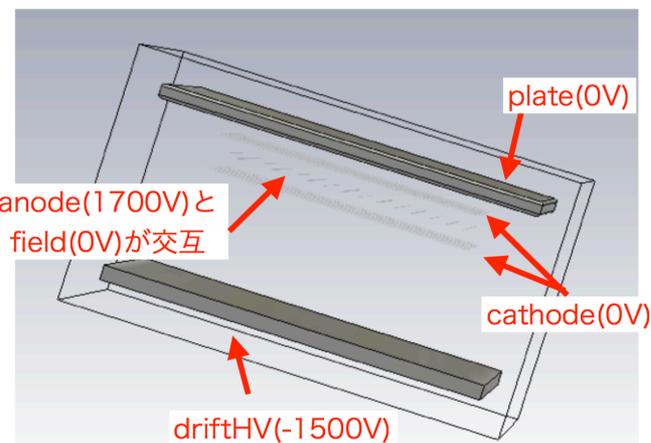
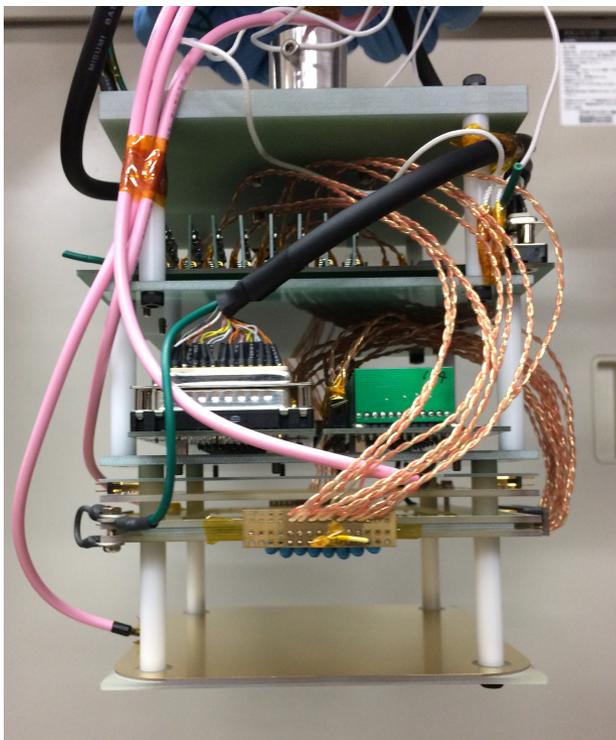
$d(\Delta E)/dl$: ワイヤー長あたりのエネルギー損失密度

G_0 : (初期状態の)増幅率

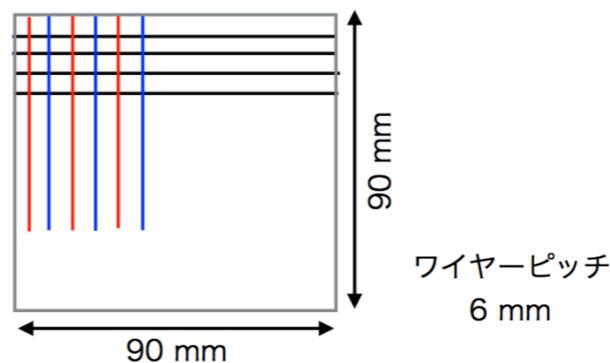


※モデル式導出の
詳細が気になる方 → Appendix

小型 Time Projection Chamber を製作



ワイヤーのジオメトリー

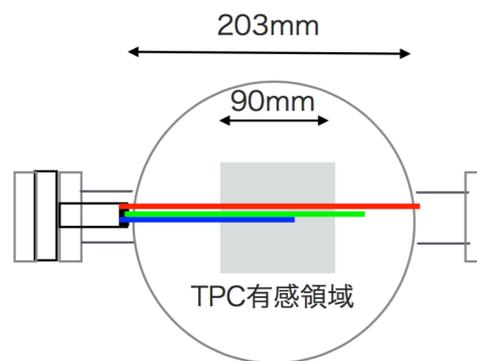
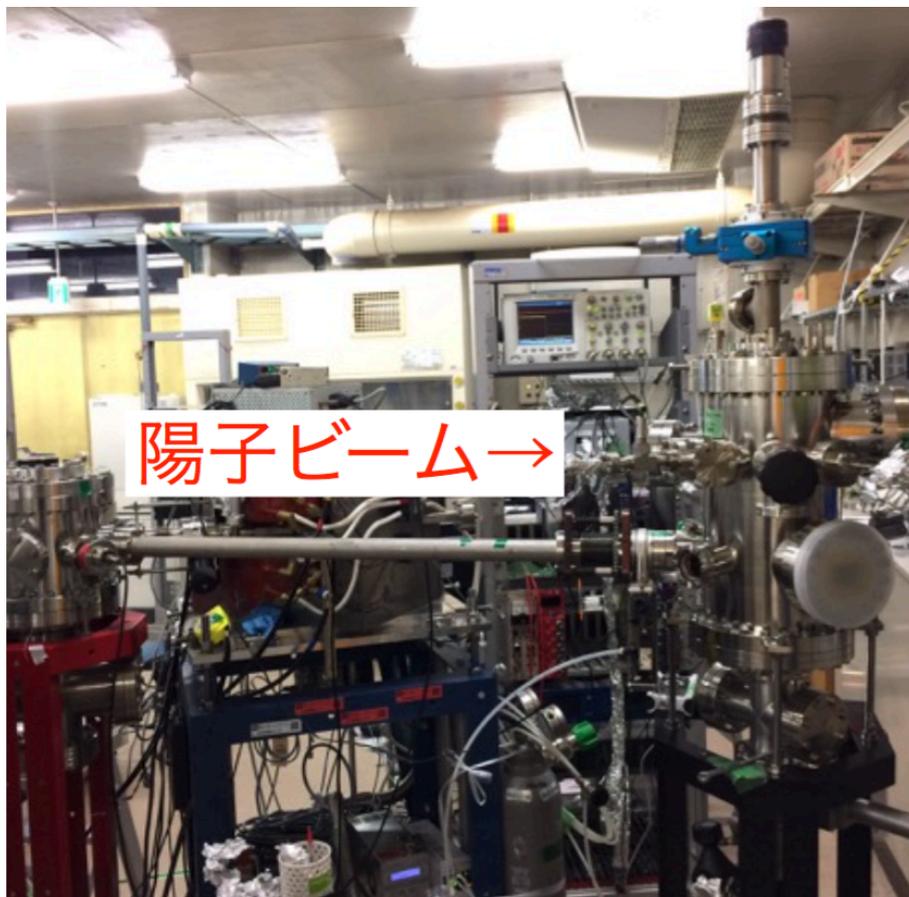


- 全体サイズ : 約13cm × 13cm × 20cm
- 有感領域 : 9cm × 9cm × 4cm
- ドリフト電場 : 300V/cm
- ガス : He+CO₂=85:15混合ガス1atm
- ゲイン : ~10⁴ (anode 1700V)

- アノード(略称A、φ20um, 1720 V) × 8本
- フィールド(略称F、φ50um, 0V) × 7本
- カソード(略称C、φ50um, 0V) × 15*2本

モデル式検証実験

筑波大 1 MVタンデトロン加速器の陽子ビームを使用



赤 : 2.00MeV
緑 : 1.68MeV
青 : 1.35MeV

TPC@タンデトロン Dコース

モデル式検証実験 検証方法

$$s = \frac{\log \left(1 + f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0 \right)}{f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0}$$

- モデル式を検証するため、以下の3種のパラメータを変えて測定
 1. 陽子のエネルギー [1.35, 1.68, 2.0 MeV]
 2. アノード電圧 [1300 ~ 1800V]
 3. TPC角度 (ワイヤーに対するビームの入射角度) [40 ~ 90°]

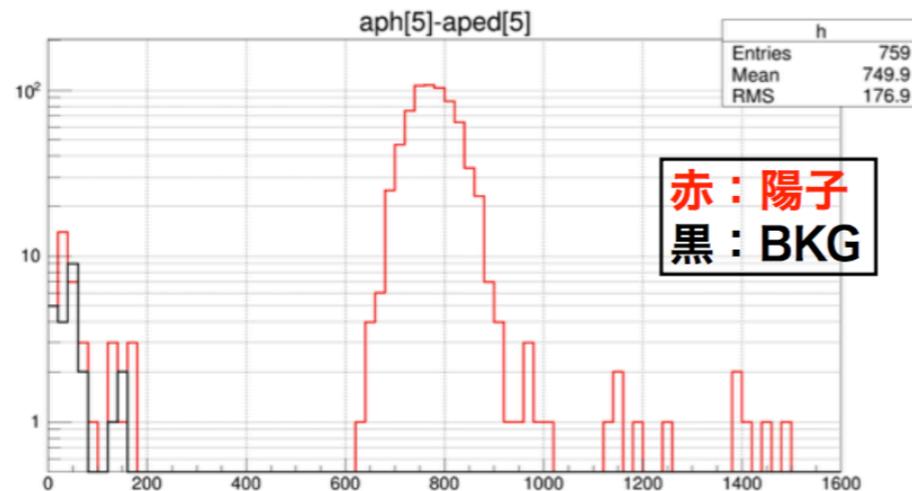
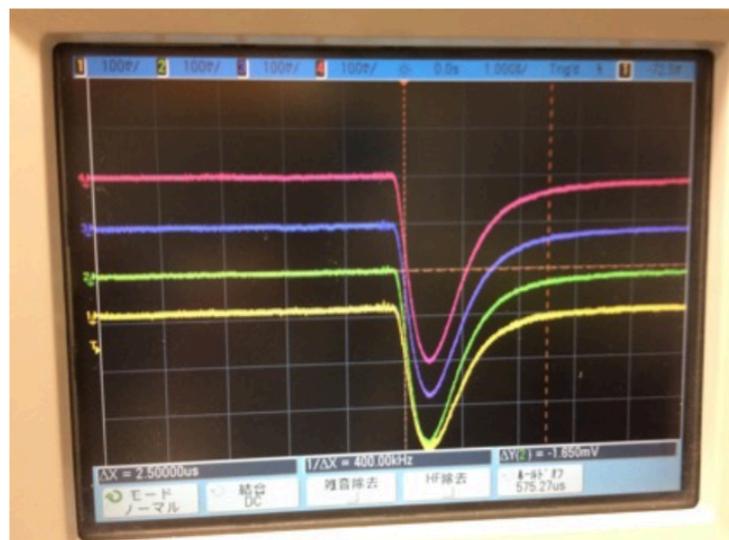
- 解析アルゴリズム
 1. ^{55}Fe 線源(X線5.9keV)でエネルギーキャリブレーション
 2. 増幅率低下がないときのエネルギーデポジットをモンテカルロ(MC)で計算
 3. MCのエネルギーと実測エネルギーの比(s)を計算
 4. アノードワイヤーと角度ごとの“ s ”を求め、2次元ヒストグラムを作成
 5. 様々な未知パラメータ f の結果と4.の分布を比較し、 f を決定する

解析結果

低電圧データ

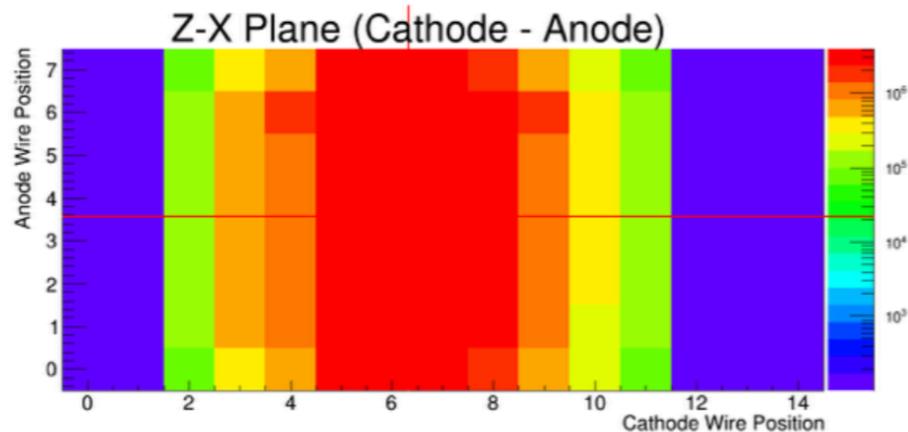
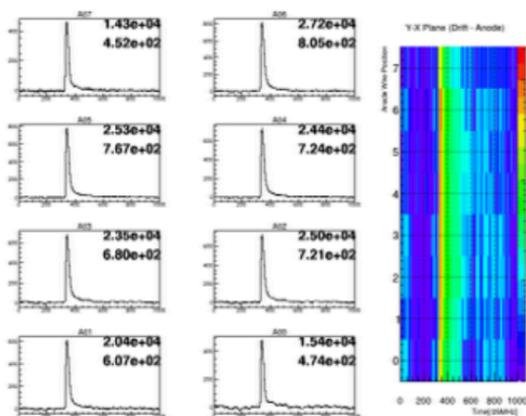
目的：saturationが起きてない低い電圧で、EXとMCでエネルギーデポジットの分布が合うことを確認する。

※低電圧では鉄のピークは見えない

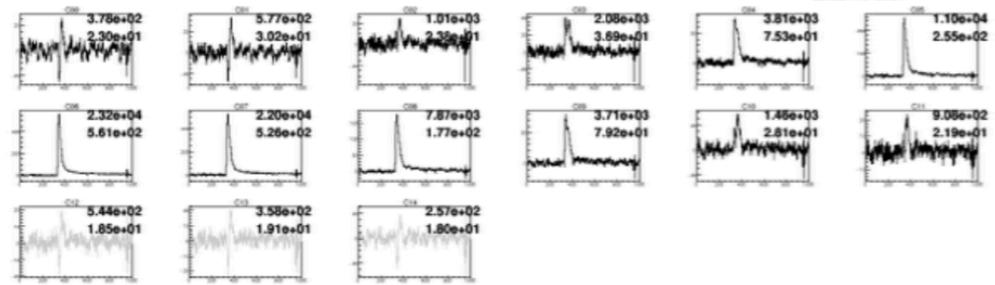
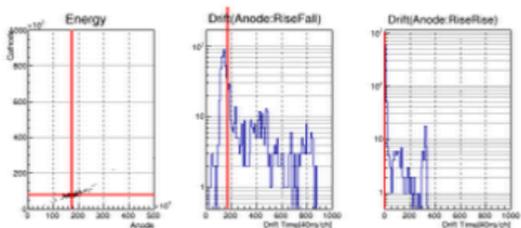
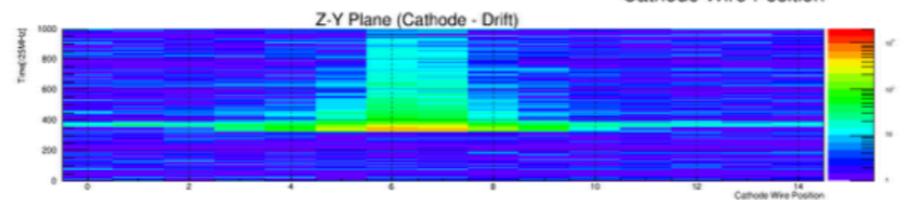


低電圧測定での典型的なEvent Display

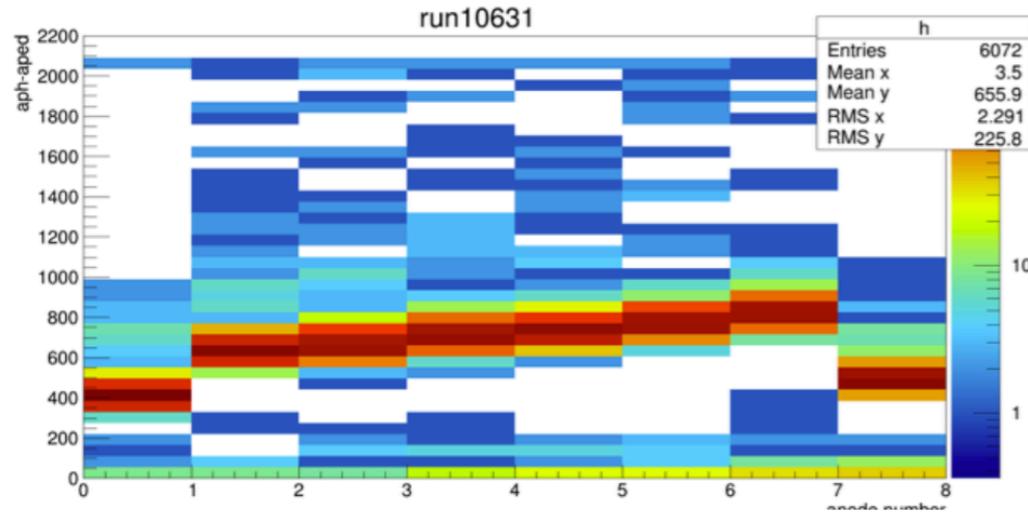
$E_p=2.00\text{MeV}$ 、 $\text{anode}=1350\text{V}$ 、 $\phi=90^\circ$ の場合



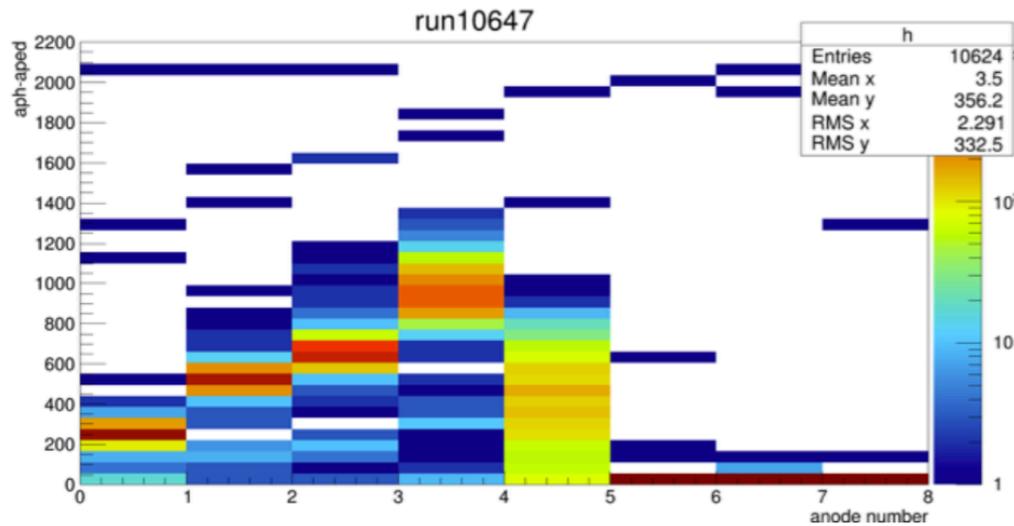
```
run: 10631, event: 00000004
asum: 1.754e+05
fsum: 4.044e+04
csum: 7.800e+04
na:8, nf:7, nc:12
ace:3.58, fce:3.10, cce:6.32
```



エネルギー分布の様子 ($\phi=90^\circ$)

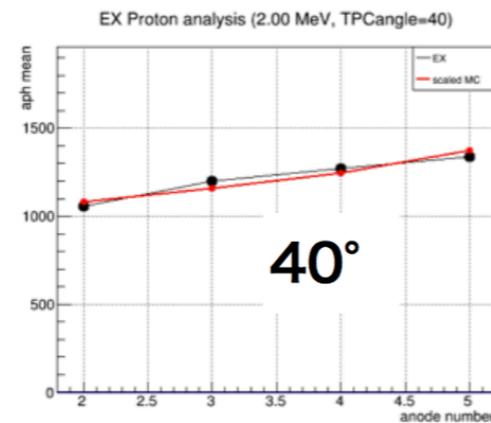
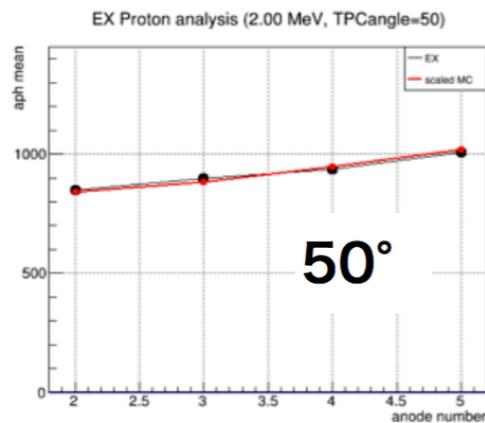
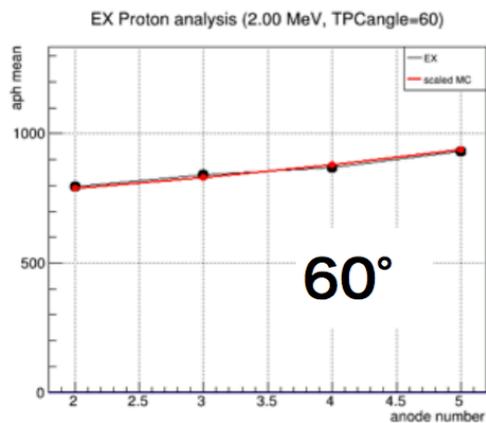
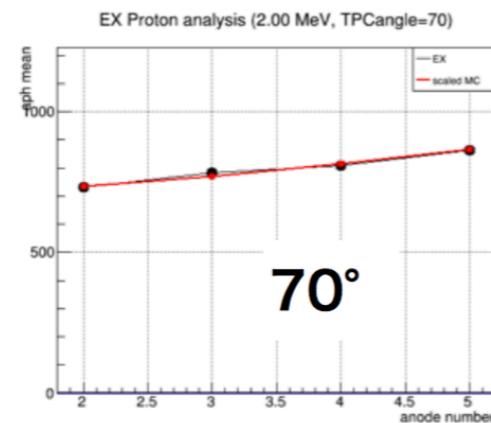
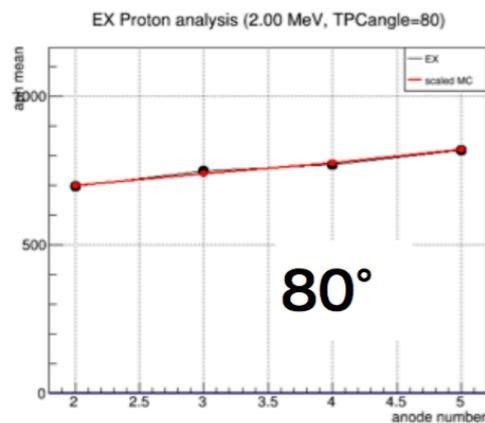
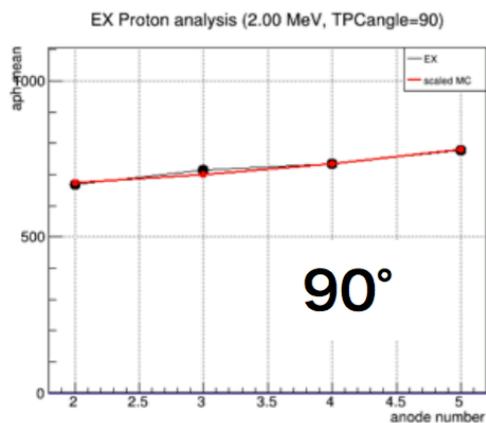


$E_p=2.00\text{MeV}$



$E_p=1.35\text{MeV}$

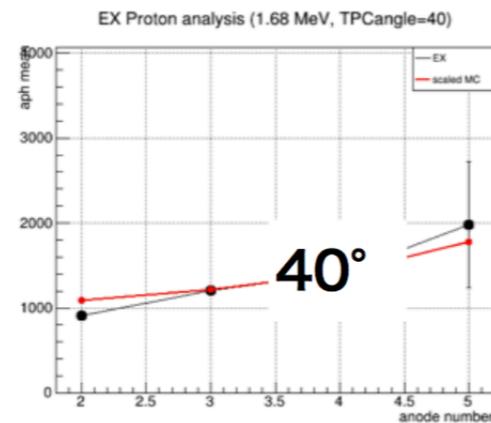
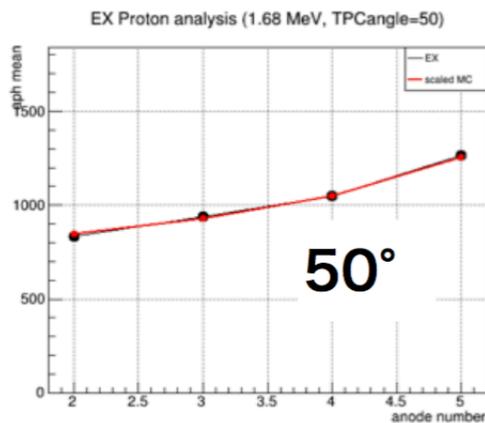
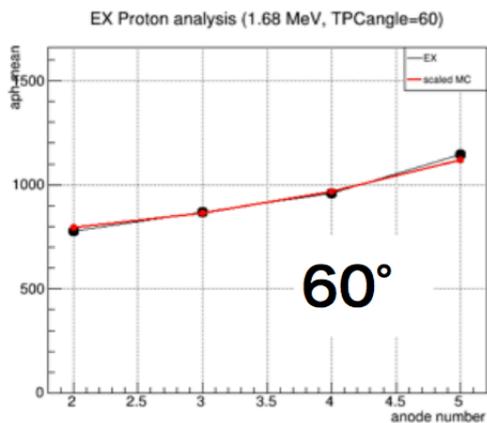
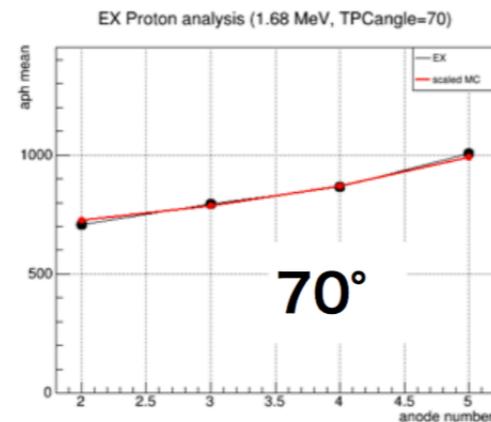
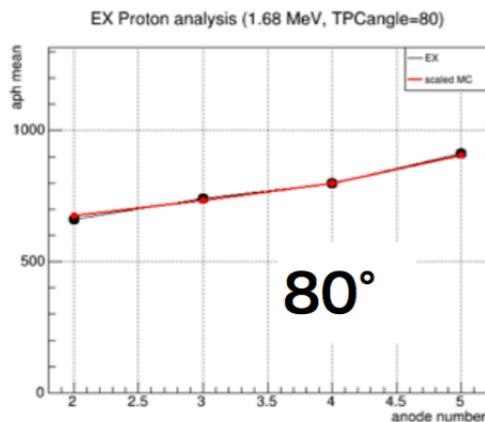
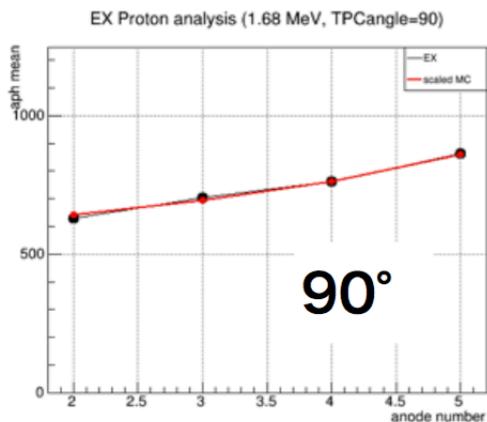
低電圧 EX/MC比較 (Ep=2.00MeV)



黒：実験データ

赤：全体のスケールを合わせたMC

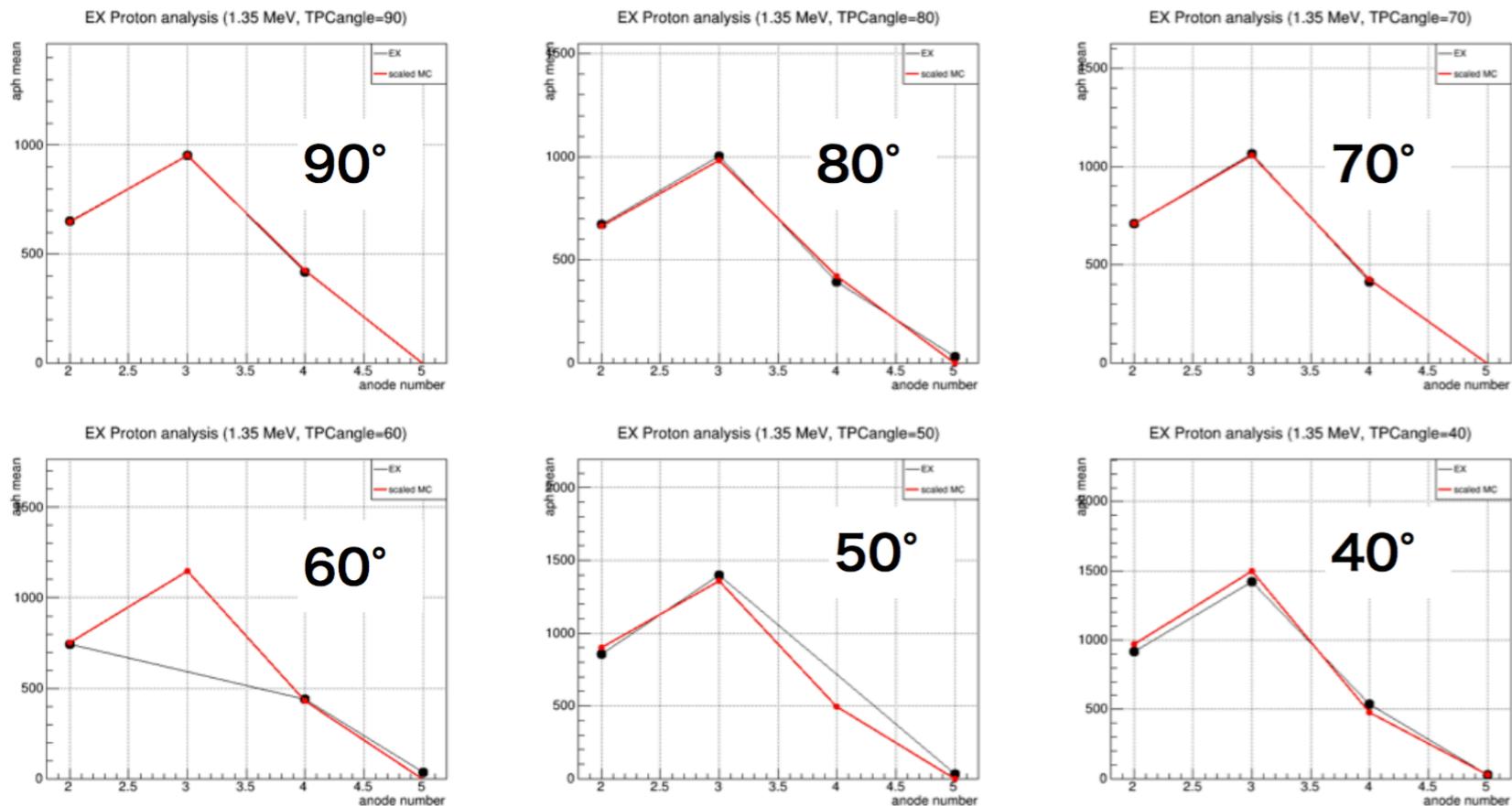
低電圧 EX/MC比較 (Ep=1.68MeV)



黒：実験データ

赤：全体のスケールを合わせたMC

低電圧 EX/MC比較 (Ep=1.35MeV)

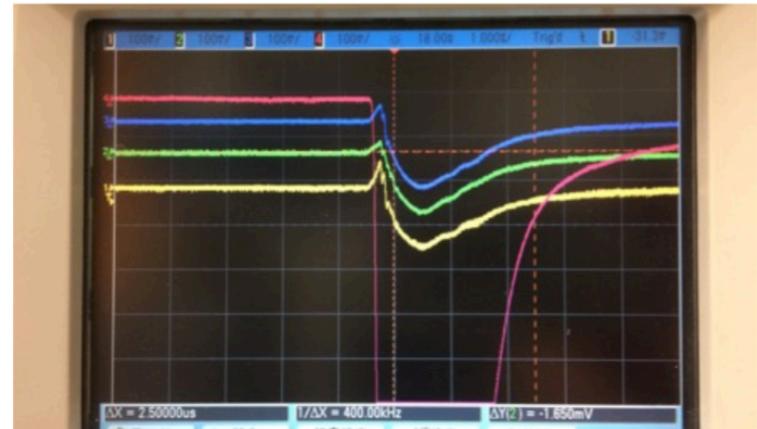
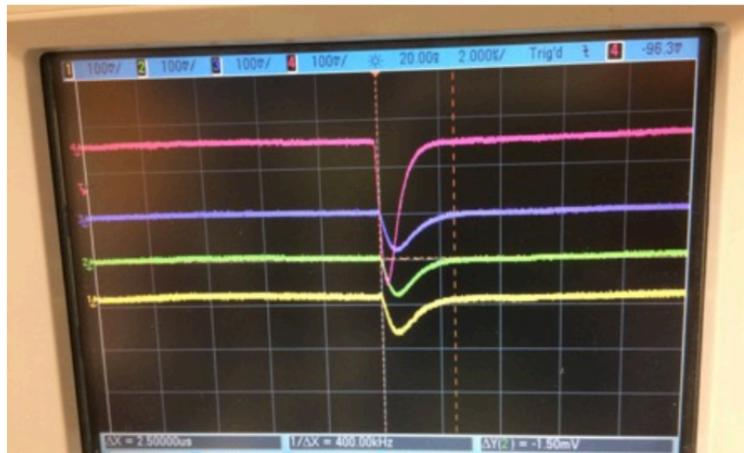


MCのエネルギーを1.32MeVにすると実測と一致

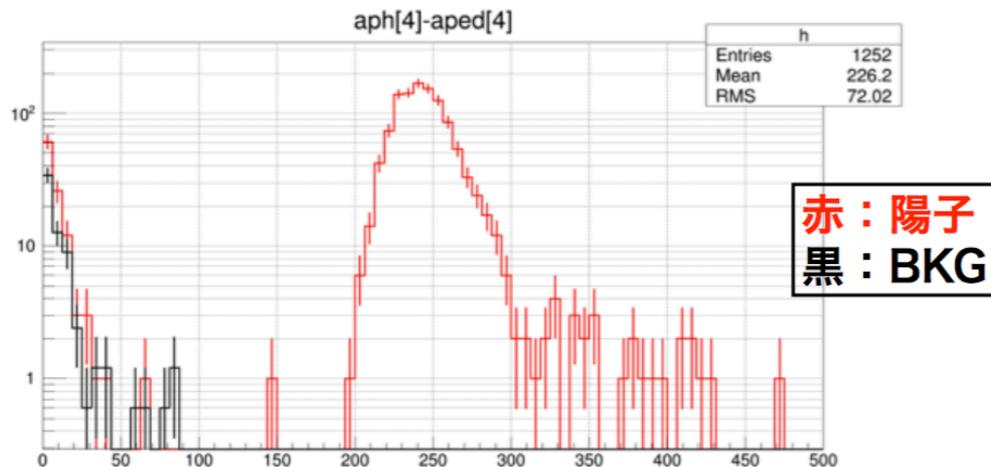
黒：実験データ

赤：全体のスケールを合わせたMC

高電圧での陽子ビーム測定

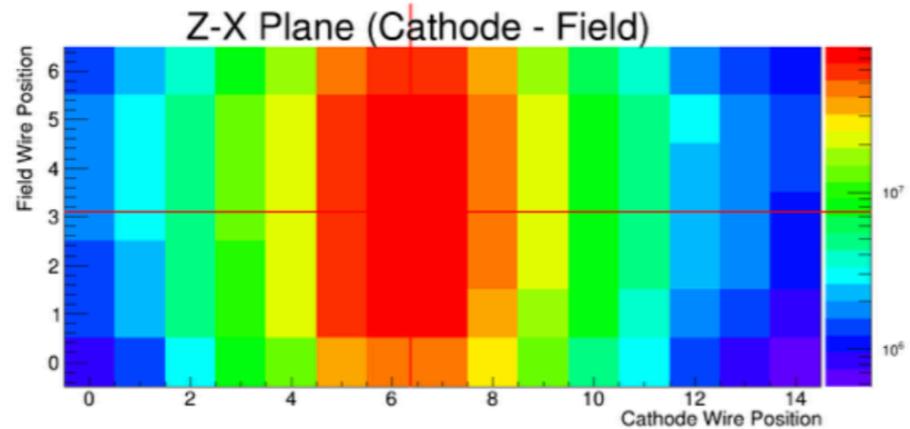
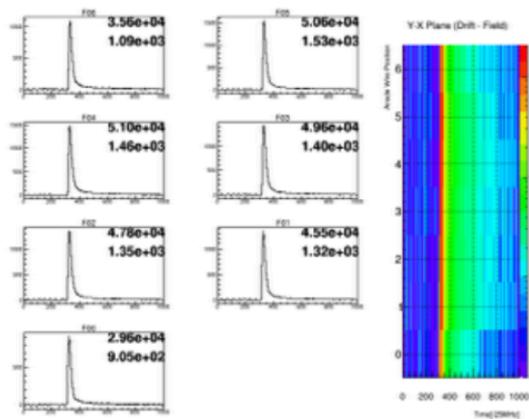


A05のワイヤーだけゲインが高いので波形が大きく見える

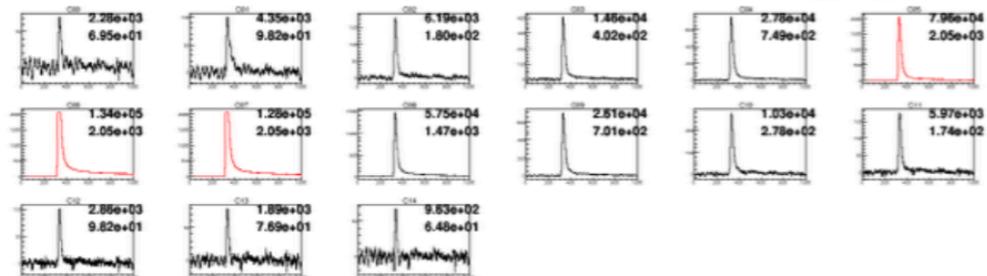
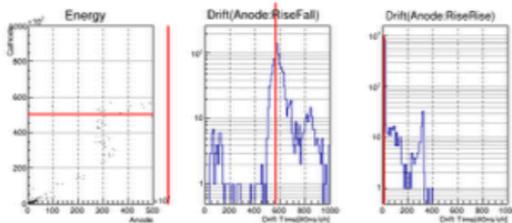
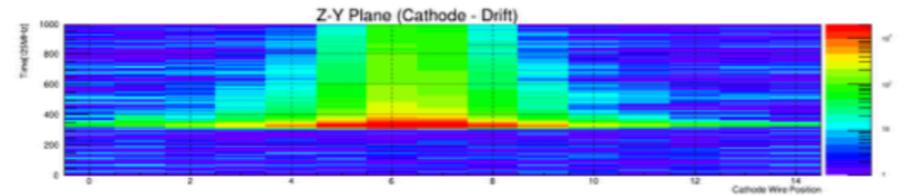


高電圧でのEvent Display

$E_p=2.00\text{MeV}$ 、 $\text{anode}=1700\text{V}$ 、 $\phi=90^\circ$ の場合

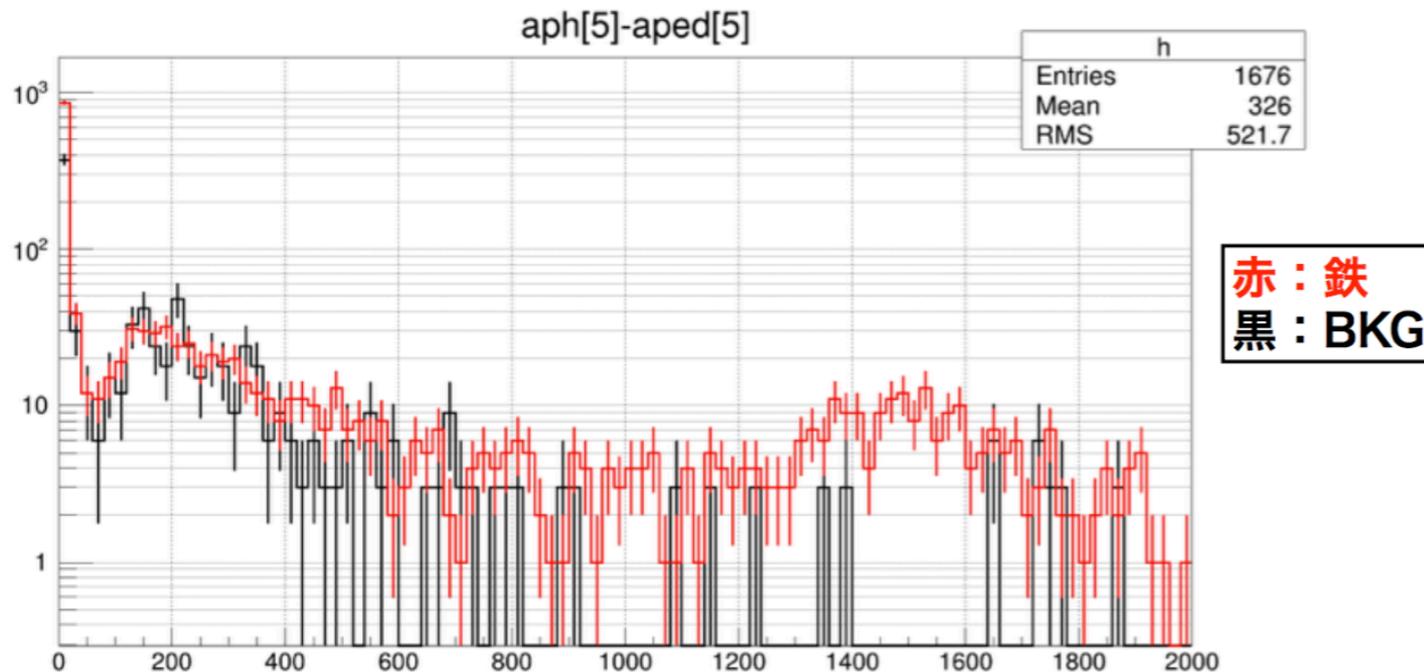


```
run: 10674, event: 00000006
asum: 5.622e+05
fsum: 3.097e+05
csum: 5.022e+05
na:8, nf:7, nc:15
ace:4.06, fce:3.10, cce:6.38
```

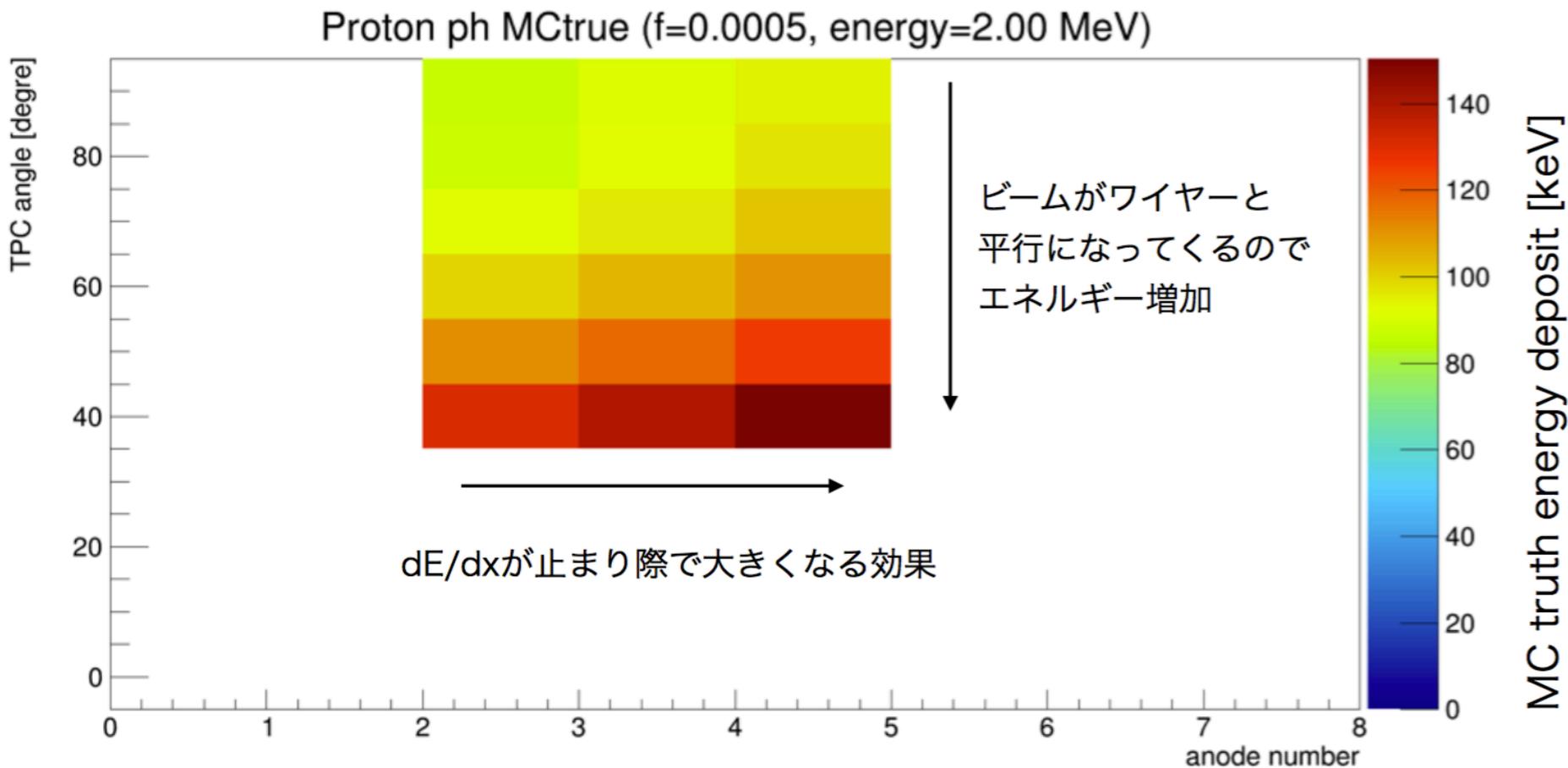


エネルギーキャリブレーション

55Feの5.9keVのX線を、near(ドリフト距離1cm)とfar(ドリフト距離3cm)で測定
陽子測定開始前、測定中、測定終了後 の3回測定している。



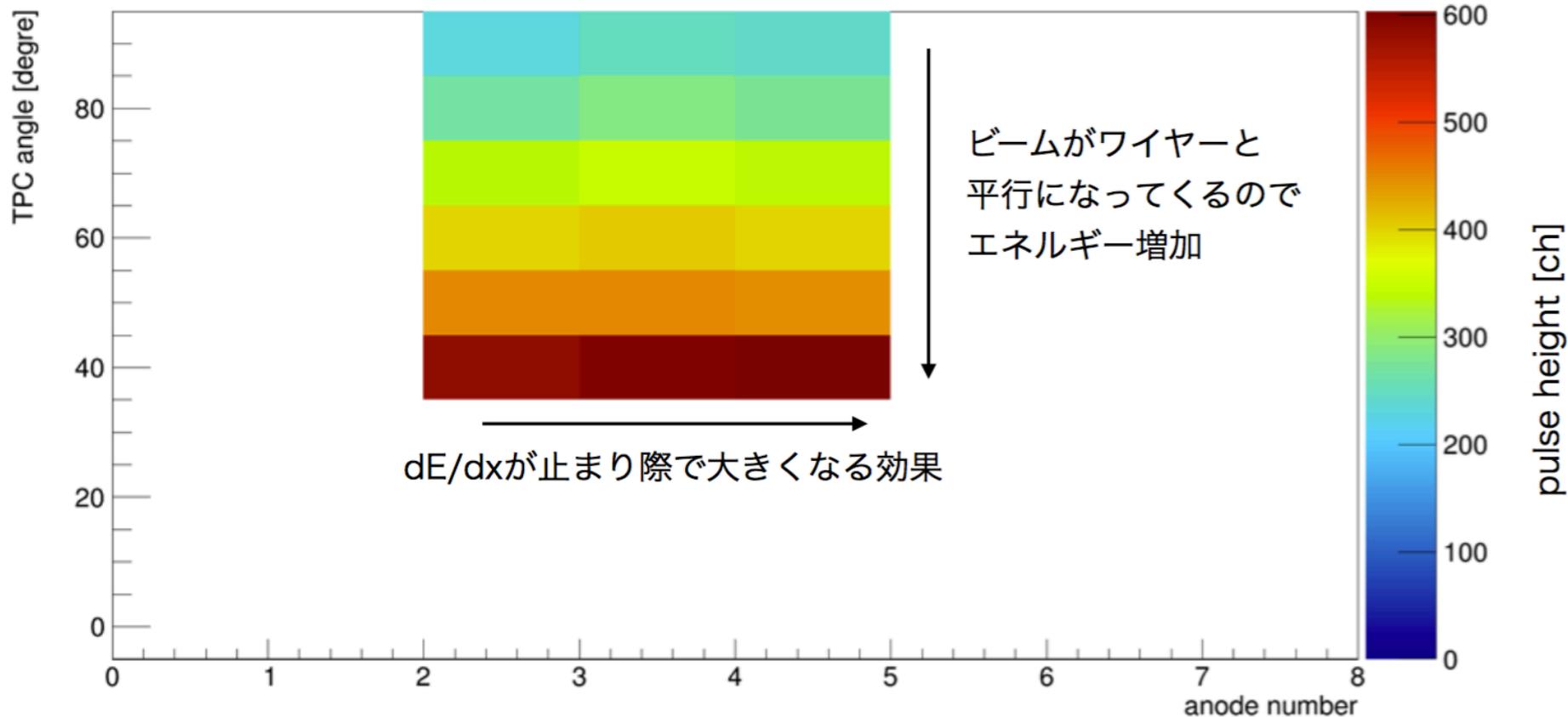
MCtrueでのエネルギーデポジット分布 ($E_p=2.00\text{MeV}$)



アノード高電圧データ

測定されたエネルギープロットの分布 ($E_p=2.00\text{MeV}$, anode=1700V)

Proton EX ph deposit ($f=0.0005$, energy=2.00 MeV)

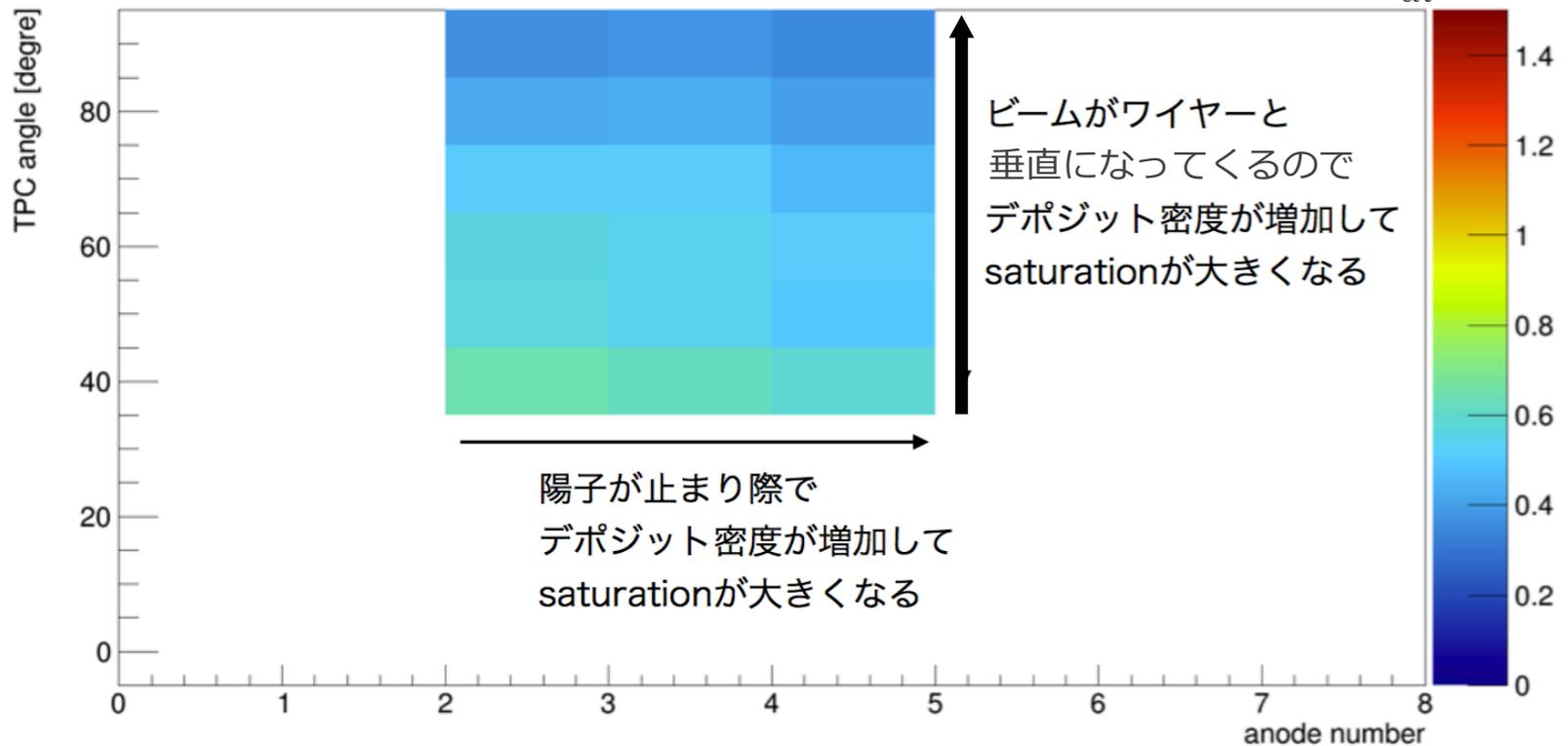


saturation factorの分布 (Ep=2.00MeV、anode=1700V)

saturation factor = EXの実際の波高/saturationがない時に予想される波高
と定義した。

$$s = \frac{\log \left(1 + f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0 \right)}{f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0}$$

Proton EX phratio (f=0.0005, energy=2.00 MeV)



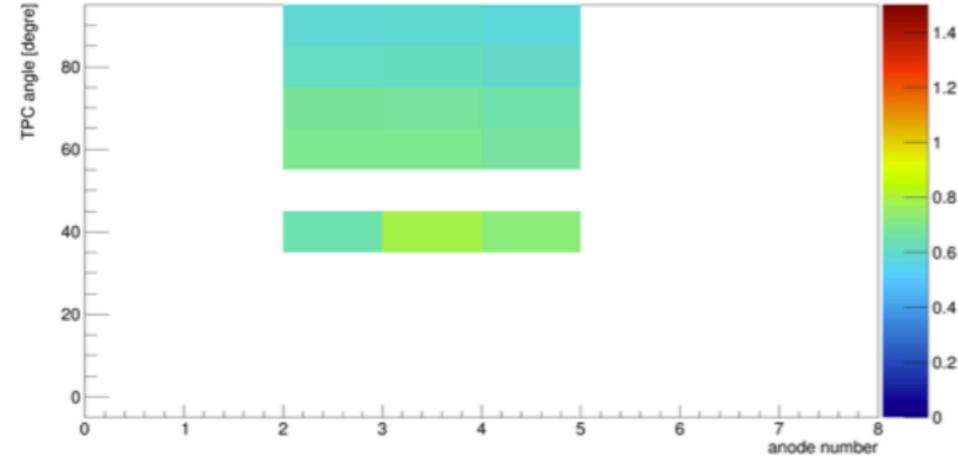
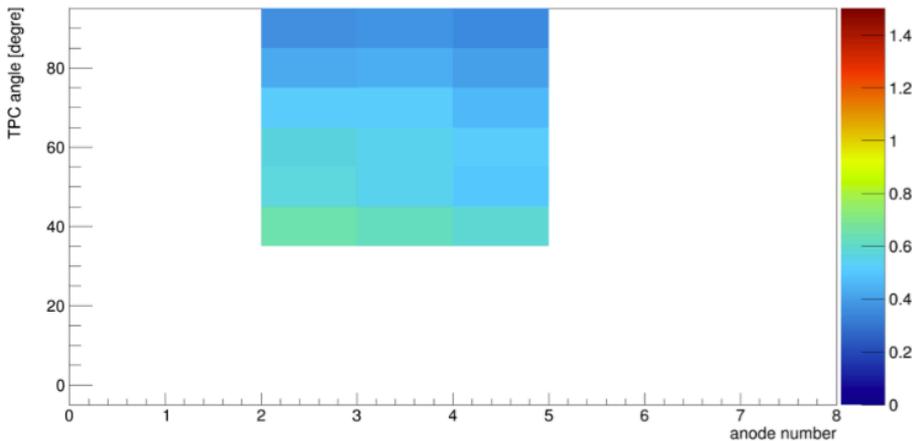
電圧を変えた時のsaturationの分布 ($E_p=2.00\text{MeV}$)

Anode1700V

Anode1570V

Proton EX phratio (f=0.0005, energy=2.00 MeV)

Proton EX phratio (f=0.0005, energy=2.00 MeV)



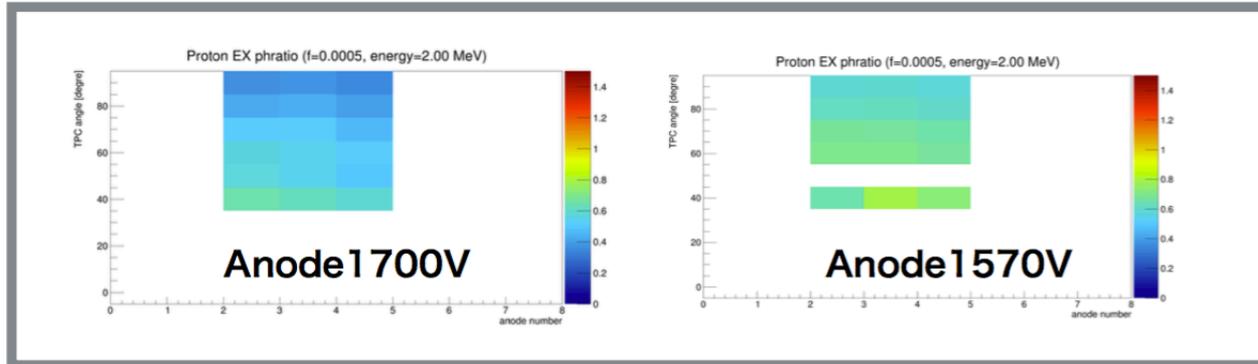
$$S = \frac{\log \left(1 + f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0 \right)}{f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0}$$

アノード電圧を下げる（ゲインを下げる）とゲイン低下量は小さくなることが確認できた

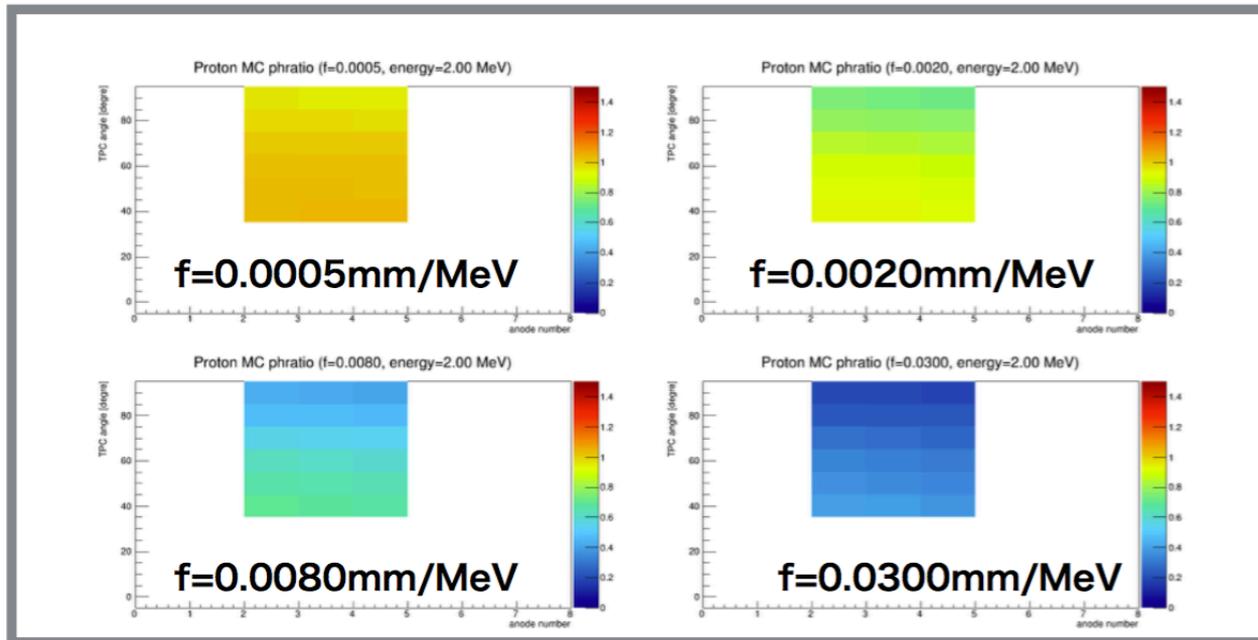
EXとMCの比較

$$S = \frac{\log \left(1 + f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0 \right)}{f \frac{d(\Delta E)}{dl} G_0}$$

EX



MC



まとめ

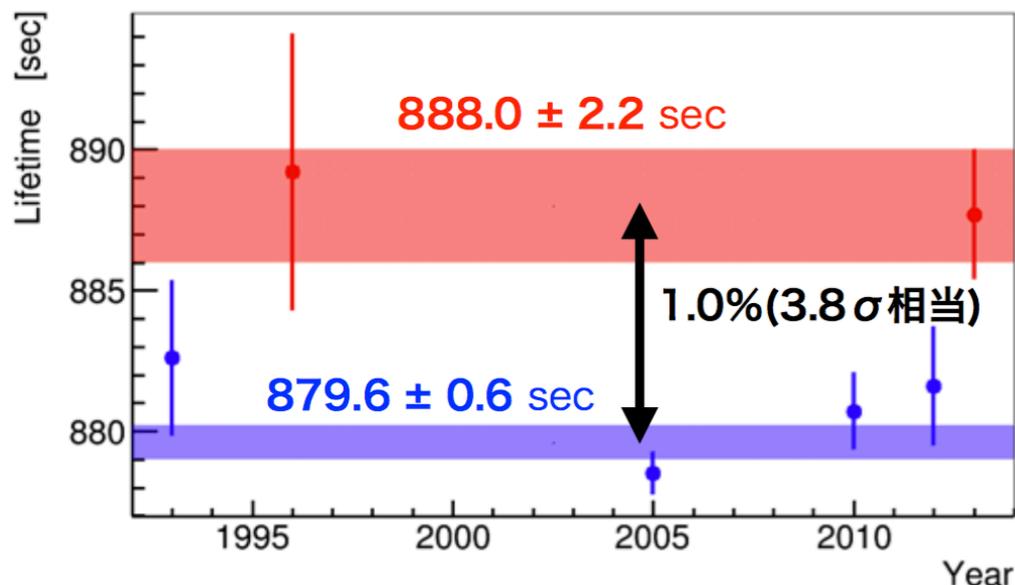
- ワイヤーチェンバーのサチュレーション (増幅率低下)現象を定量的に理解したい
- 原因は“空間電荷効果”ではないか？ → 増幅率低下モデル式を構築
- 小型 Time Projection Chamber を製作し、モデル式の検証実験を行った
- 解析結果
 - 低電圧データ：測定結果とモンテカルロが一致した
 - 高電圧データ：定性的なふるまいの一致が確認できた
今後より詳細な解析をすすめていく予定
- 改善課題
 - アノード高電圧データの波形の乱れ → 回路上の問題？プリアンプ？
 - 時間経過に伴う増幅率低下の原因解明 → ワイヤーに何かが蓄積している？
 - TPCの位置・角度精度の向上
 - 有感アノードの増加

Appendix

中性子寿命の精密測定実験

中性子寿命の測定目的

ビッグバン元素合成モデルやCKMのunitary検証に感度があるパラメータ
2つの測定手法間に**1.0%(3.8 σ)の乖離**が存在



陽子計数法

中性子を容器に入射し、崩壊した陽子を計数する

中性子蓄積法

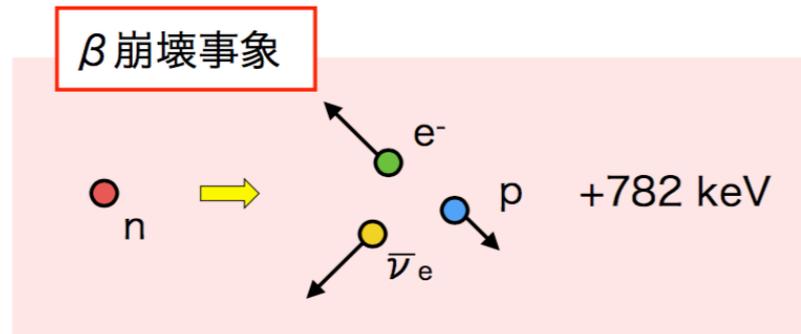
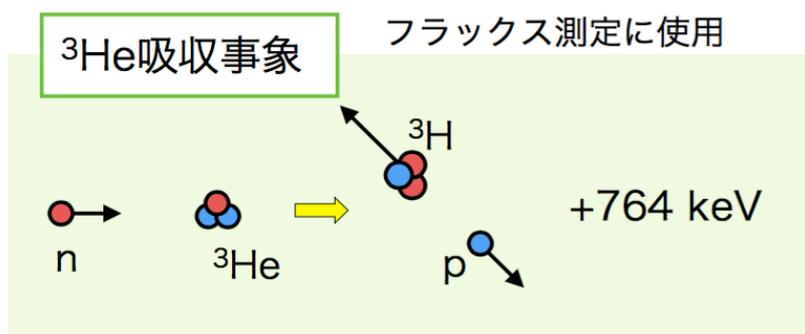
超冷中性子を容器に蓄積し、残存する中性子数を計数する

Particle Data Group 2015

我々は先行実験とは異なる手法で**中性子寿命を0.1%の精度で測定する**
実験がJ-PARC/MLFの中性子ビームラインで遂行中

原理

検出器 (Time Projection Chamber: TPC) で、 ^3He 吸収事象と β 崩壊事象の両イベント数を測定



$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_0 v_0 \rho} \frac{\left(\frac{N_{^3\text{He}}}{\varepsilon_{^3\text{He}}} \right)}{\left(\frac{N_\beta}{\varepsilon_\beta} \right)}$$

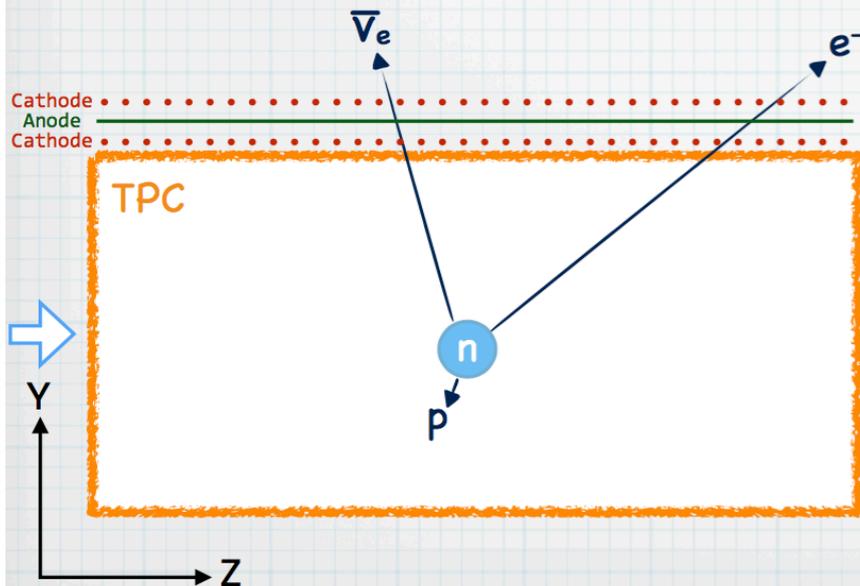
により寿命を導出

σ_0	2200 m/s 中性子に対する ^3He 吸収反応の断面積
v_0	2200 m/s
ρ	^3He の個数密度
N_β	β 崩壊事象の検出イベント数
$N_{^3\text{He}}$	^3He 吸収事象の検出イベント数
ε	検出効率

β 崩壊事象 と ${}^3\text{He}$ 吸収事象

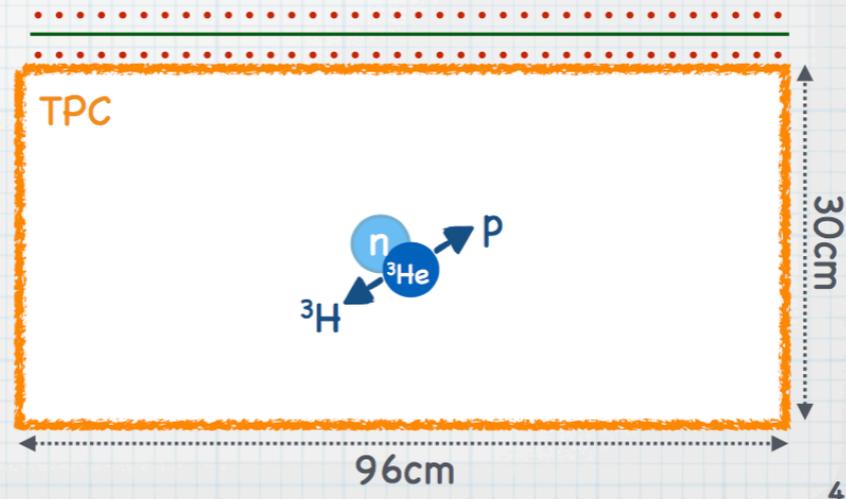
β 崩壊事象

- ▶ 中性子バンチの存在する時刻に発生
- ▶ ビーム軸上から発生
- ▶ 飛程が長い (TPC外へ)
- ▶ デポジットエネルギーが小さい (<200 keV)



${}^3\text{He}$ 吸収事象

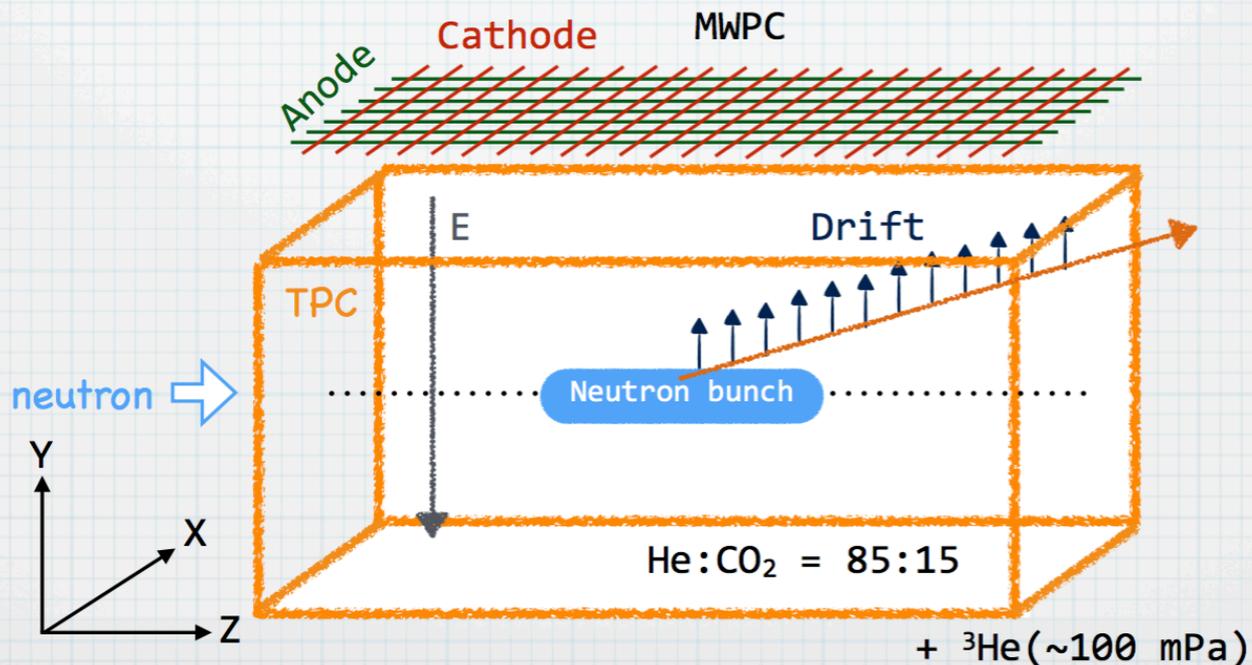
- ▶ 中性子バンチの存在する時刻に発生
- ▶ ビーム軸上から発生
- ▶ 飛程が短い (~5cm)
- ▶ デポジットエネルギーが大きい (~770 keV)



Time Projection Chamber (TPC)

ドリフト部 と MWPC面 (Multi Wire Proportional Chamber) の2つからなる。

- ▶ ドリフト部を荷電粒子が通過するとTPCの動作ガスが電離される。
- ▶ 電離された電子が鉛直にかかる電場で上方にドリフトされる。
- ▶ MWPC面まで到達した電子はアノードでカスケードを起こし増幅される。
- ▶ カスケードで発生したイオンはカソードに回収される。



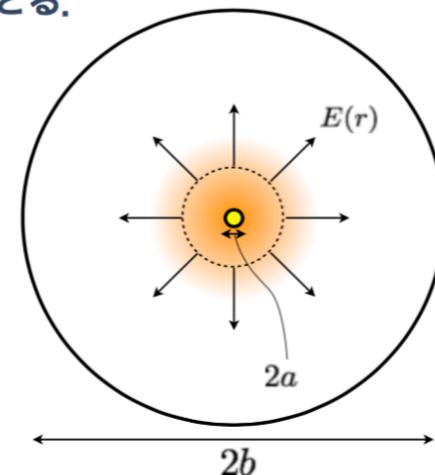
増幅率低下モデル式の 導出

静電場の計算（2次元）

簡単のためワイヤー半径 a 、外径 b のシングルワイヤードリフトチューブを例にとる。
静電気学におけるガウスの法則

$$2\pi r \epsilon E(r) d = e \sigma d \int_a^r dr' \int_0^d dz' 2\pi r' N(r')$$

境界条件 $\int_b^a dr E(r) = V$



放射線によってイオン化された電子の総数 N のうち
 n 個までがすでに増倍を終了している段階を考える

$\bar{\rho}(r)$: 増倍によって発生する平均的な
空間電荷の密度分布をゲインで規格化したもの

ゲインが変わっても各増倍についての密度分布は大きな変更を受けないとする

$$N(r) = \sum_{j=0}^{n-1} G_j \times \bar{\rho}(r)$$

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} + \frac{e}{r \epsilon d} \left(\sum_{j=0}^{n-1} G_j \right) \left[-\frac{1}{\ln(b/a)} \int_a^b \frac{\bar{\rho}(r')}{r'} dr' + \bar{\rho}(r) \right]$$

電場とゲインの関係

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} + \frac{e}{r\epsilon d} \left(\sum_{j=0}^{n-1} G_j \right) \left[-\frac{1}{\ln(b/a)} \int_a^b \frac{\bar{\rho}(r')}{r'} dr' + \bar{\rho}(r) \right]$$

空間電荷がないときの電場
空間電荷によるワイヤー電場のスクリーニング
空間電荷によるクーロン引力

これまでの増倍による空間電荷の蓄積量

- r 依存性を全部考えて電場からゲインを決めると複雑
- 大まかには電場「分布」に対してゲインの大きさを決める「スケール」があるとする

このようなスケールの近似として例えばr=aにおける値を採用して、

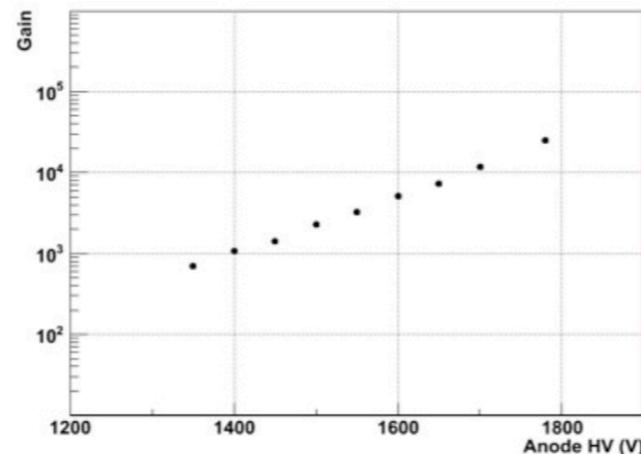
55Fe(5.9keV)に対するゲインカーブ

$$E_n = E_n(r = a) = \frac{V}{a \ln(b/a)} - \frac{eC}{\epsilon ad} \left(\sum_{j=0}^{n-1} G_j \right)$$

という電場のスケール E_n に対して、ゲインが

$$G_n = \exp(A + BE_n)$$

という関係で決定されると考える



再帰的なゲインの低下（漸化式）

- 空間電荷効果はそれまでに起きた増倍の蓄積で決まる

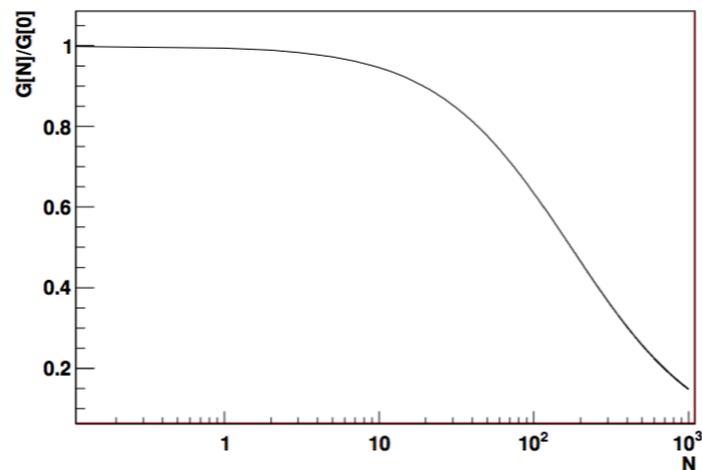
$$E_n = E_n(r = a) = \frac{V}{a \ln(b/a)} - \frac{eC}{\epsilon a d} \left(\sum_{j=0}^{n-1} G_j \right)$$

- ゲインは電場に対して指数関数的

$$G_n = \exp(A + B E_n)$$

$$G_n = G_{n-1} \exp \left(- \frac{eBC}{\epsilon a d} G_{n-1} \right)$$

$$\alpha G_0 \equiv \frac{eBC}{\epsilon a d} G_0 \ll 1 \quad \frac{G_n}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha G_0 n}$$



実測との比較のために

$$\frac{G_n}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha G_0 n}$$

実測では決まった ΔE のもとで n が固定され、ゲインの関数とすると便利。
サチュレーションの量をゲインの関数として書くと、

$$s(G_0) \equiv \frac{1}{nG_0} \left(\sum_{j=0}^{n-1} G_j \right) = \frac{\ln(1 + \alpha n G_0)}{\alpha n G_0} = \frac{\ln(1 + f \Delta E G_0)}{f \Delta E G_0}$$

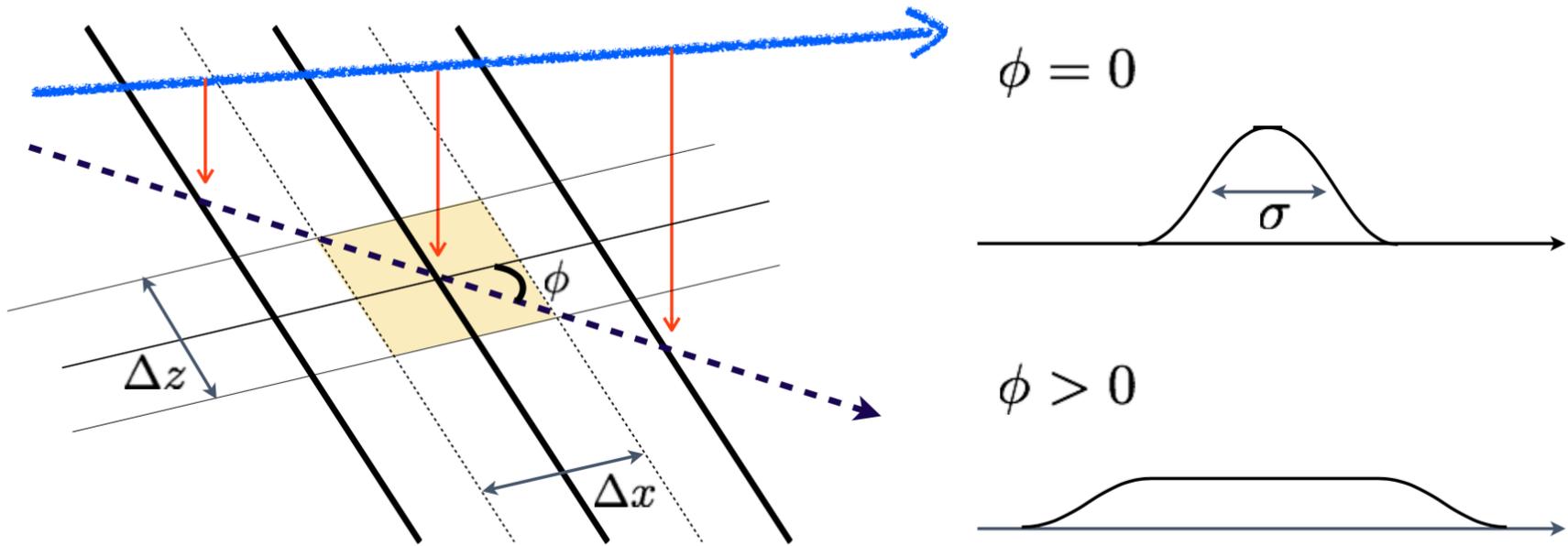
(f [MeV⁻¹] $\equiv \alpha n / \Delta E = \alpha / W$) : サチュレーション係数

ゲインに対してサチュレーションをプロットしていくことで
量 $f \Delta E$ を求めることができる。



ΔE が決まればサチュレーション係数を決定できる

ワイヤー軸方向についての考察

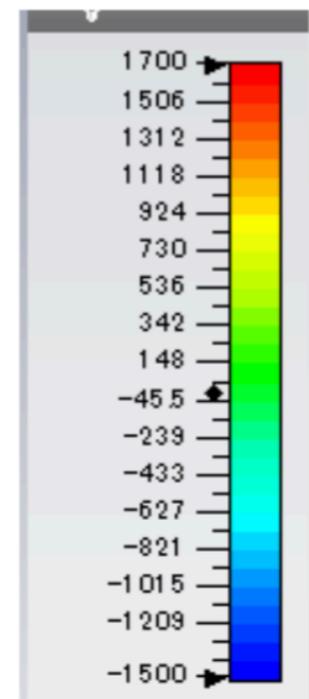
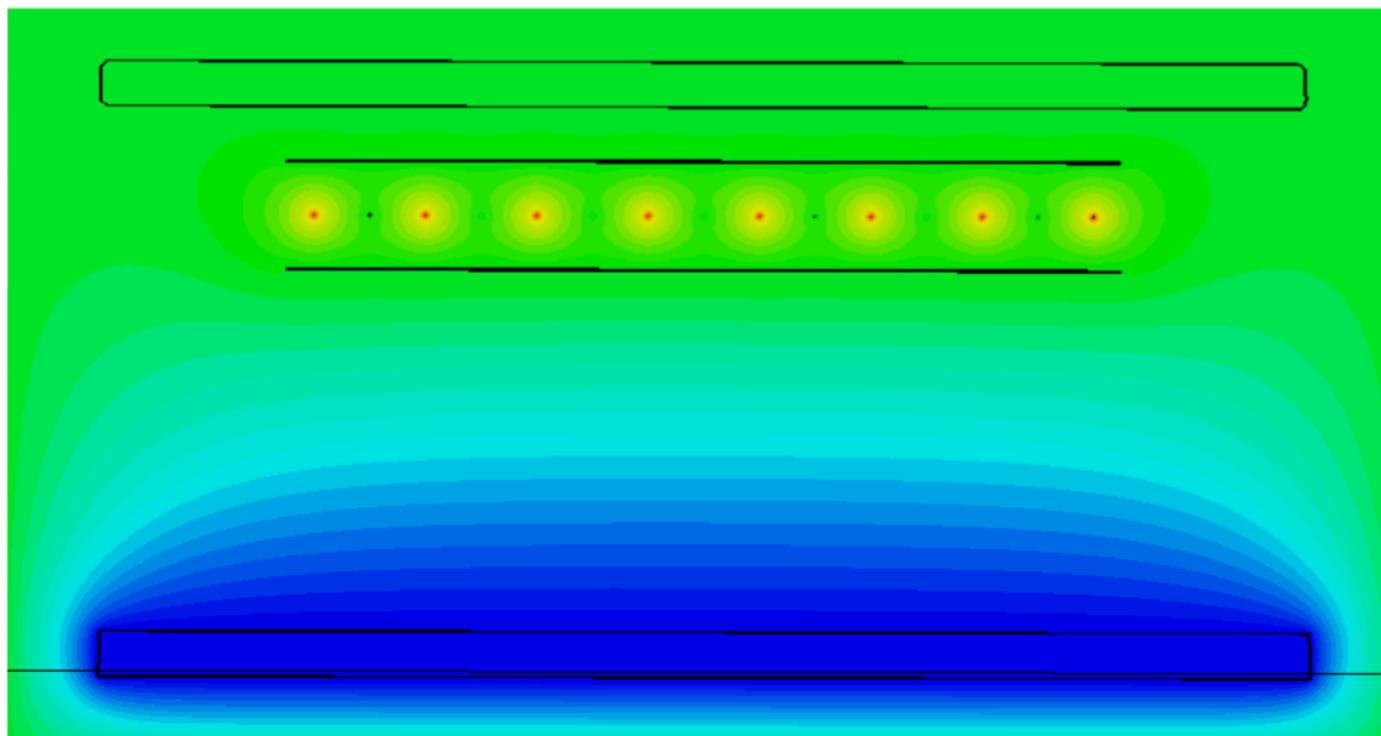


ΔE あたりで規格化したときに、トラックのワイヤー面への射影とワイヤーが垂直をなすとき ($\phi = 0$) に最もmultiplicityが高い。
この場合でも有限の滲み σ があると仮定すると、 $\phi = 0$ のときの値 f_0 に対して相対的にサチュレーション係数が決まる。

$$f(\phi) = f_0 \frac{\sigma}{\sigma + \Delta x \tan \phi}$$

データ etc.

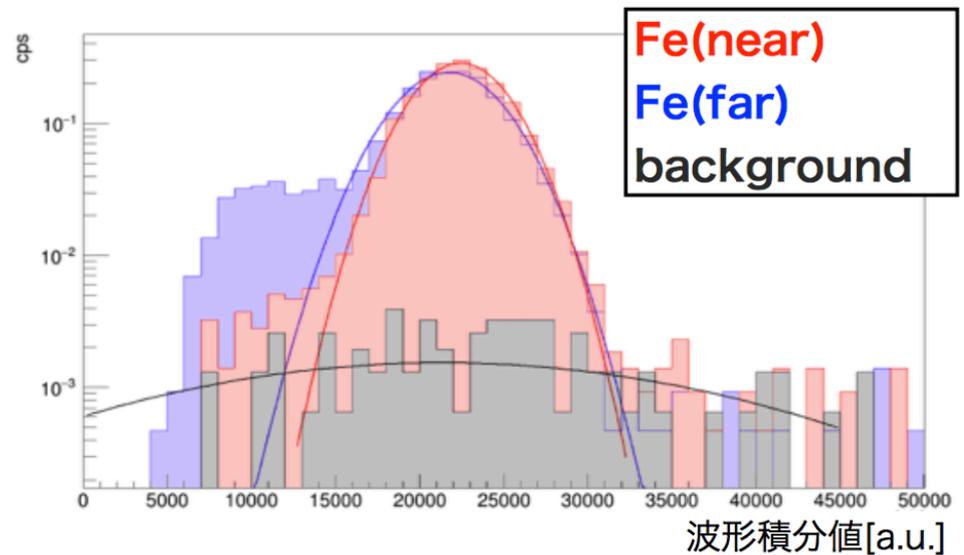
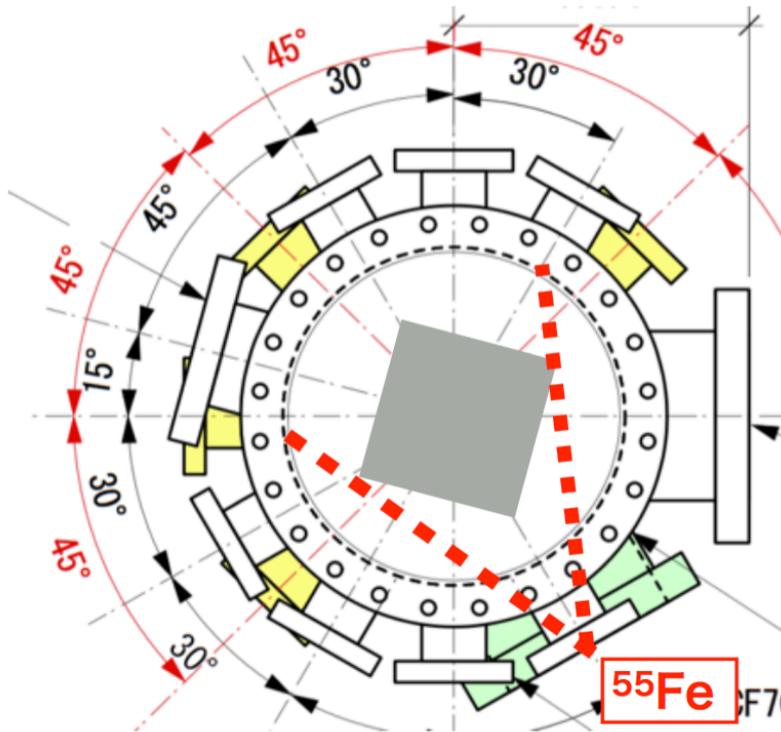
TPC内の電位分布



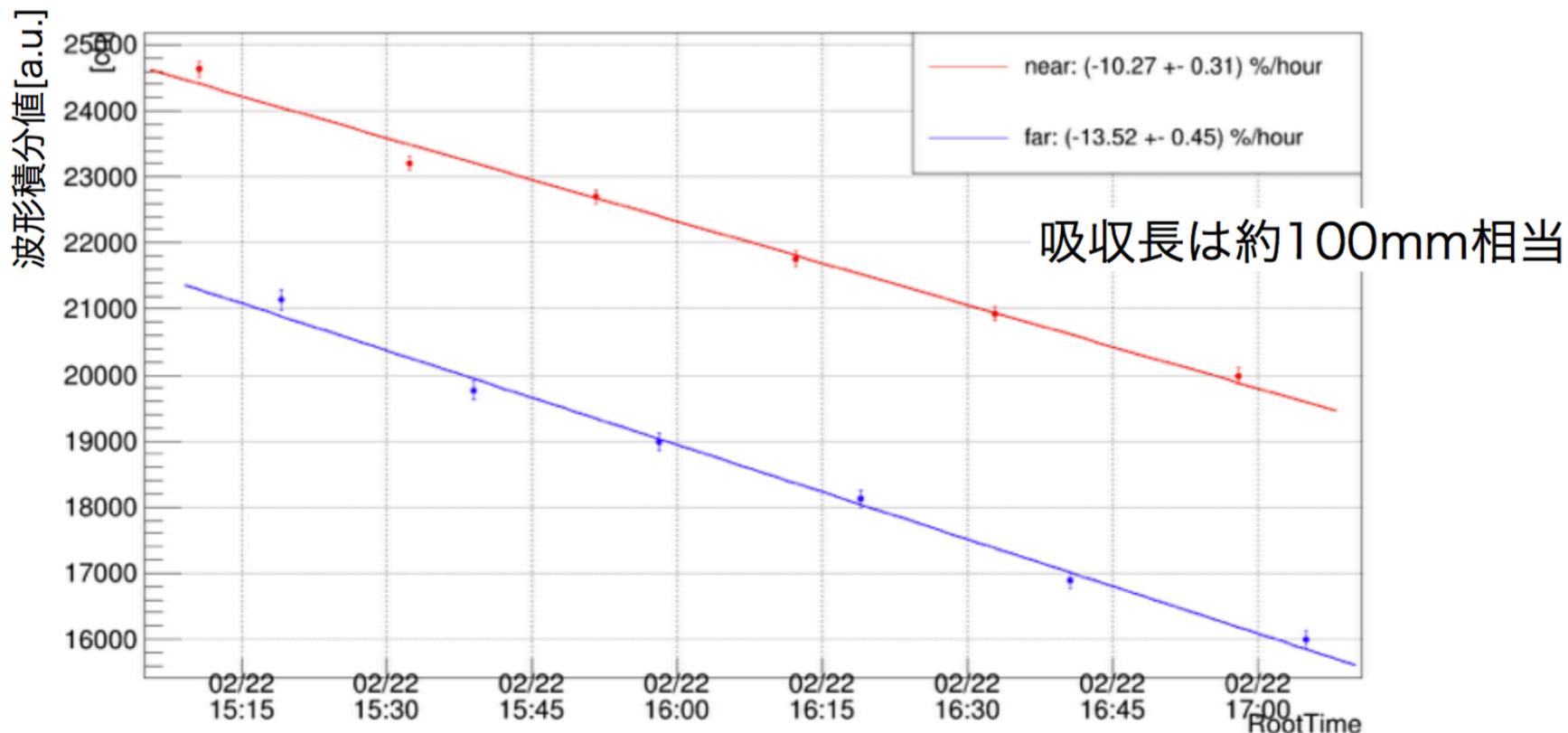
エネルギーキャリブレーション

^{55}Fe からの**5.9keV**のX線を12um厚のカプトン膜（吸収率1.5%）を通して導入し、エネルギーキャリブレーション

電子のドリフト距離を変えることで、ドリフトの吸収係数をonlineで測定する「Fe near」と「Fe far」と呼んでいる

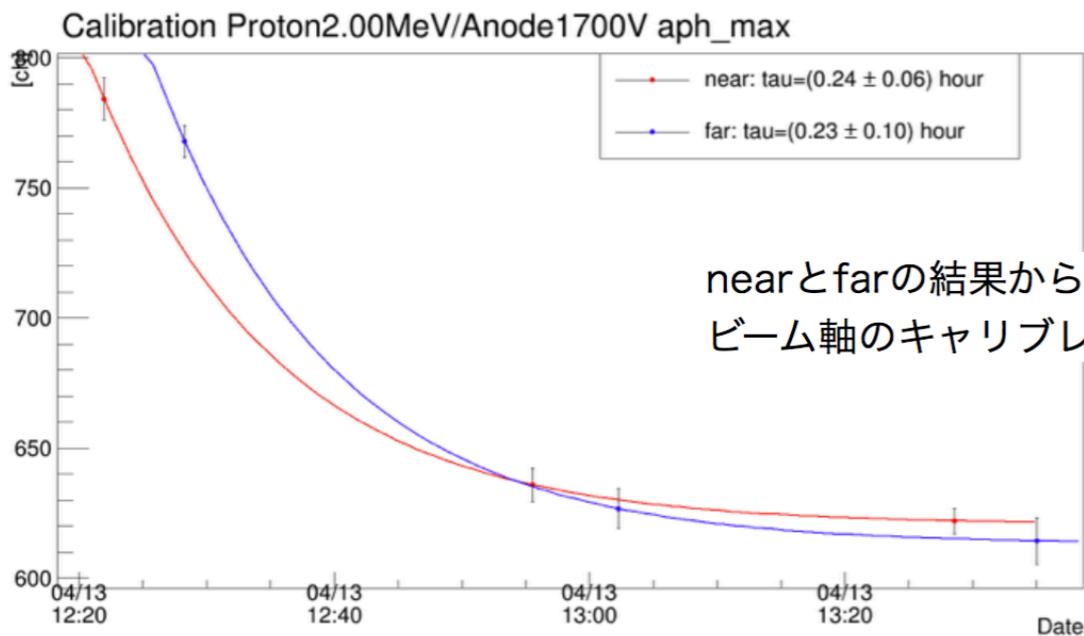
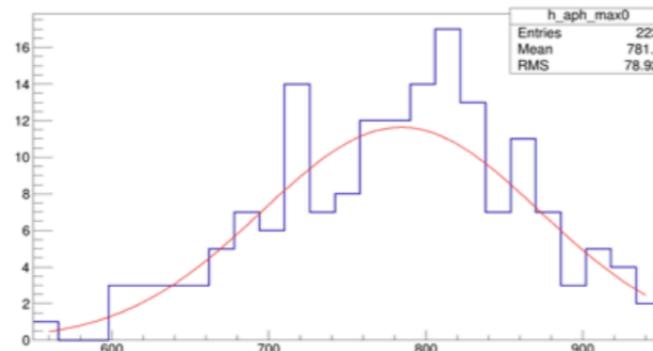


時間経過に伴う増幅率低下



ゲイン変動の補正

測定前、測定中、測定後の3回55Feのデータを取得
各点の統計量が寂しい..



nearとfarの結果から、陽子測定時刻における
ビーム軸のキャリブレーション値を導出

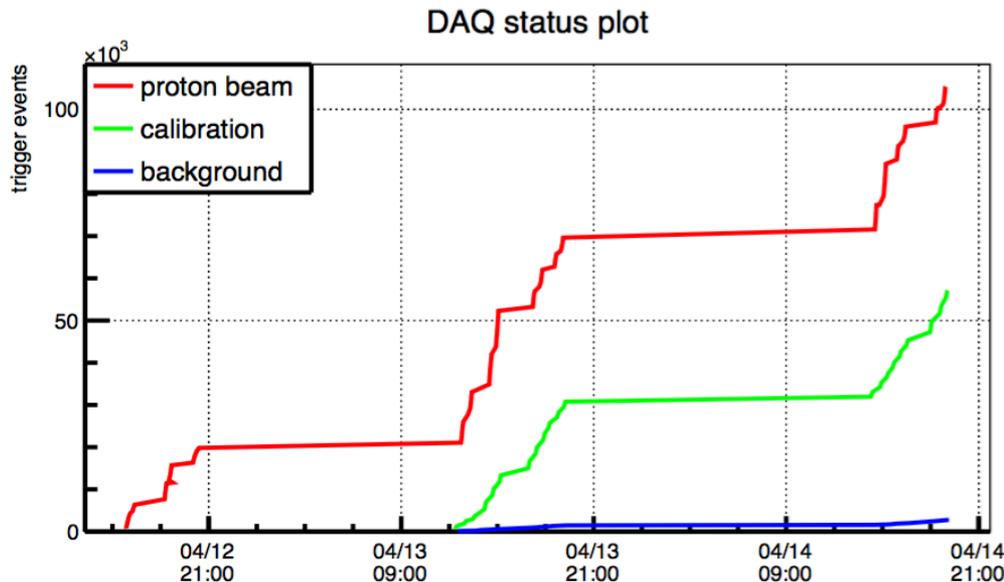
データ取得サイクル(4/12-14)

低電圧

- ・ 陽子 (90°) : 60s
- ・ 陽子 (80°) : 60s
- ・ ...
- ・ 陽子(0°) : 60s
- ・ BKG : 60s

高電圧

- ・ 鉄(near, far) : 各300s
- ・ BKG : 100s
- ・ 陽子 (90°) : 60s
- ・ 陽子 (80°) : 60s
- ・ ...
- ・ 陽子(50°) : 60s
- ・ 鉄(near, far) : 各300s
- ・ 陽子(40°) : 60s
- ・ ...
- ・ 陽子(0°) : 60s
- ・ 鉄(near, far) : 各300s
- ・ BKG : 100s



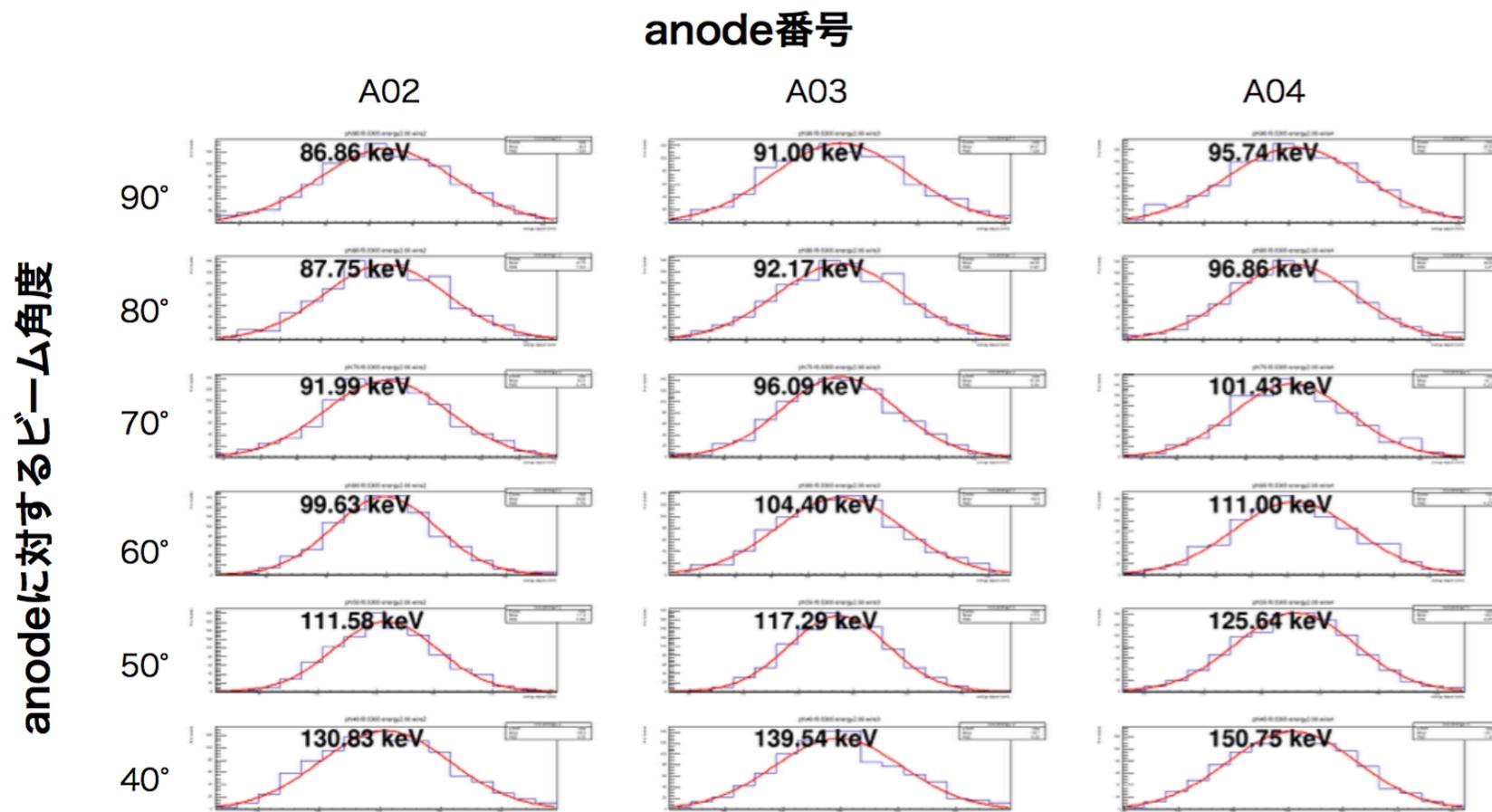
陽子 : 105.372 events

鉄 : 57,086 events

BKG : 2763 events

アノード高電圧データ

MCtrueでのエネルギーデポジット ($E_p=2.00\text{MeV}$, $\text{anode}=1700\text{V}$)



各ヒストごとにfittingしてエネルギー中心値を導出

測定されたエネルギープロット ($E_p=2.00\text{MeV}$, $\text{anode}=1700\text{V}$)

anode番号

A02

A03

A04

anodeに対するビーム角度

