

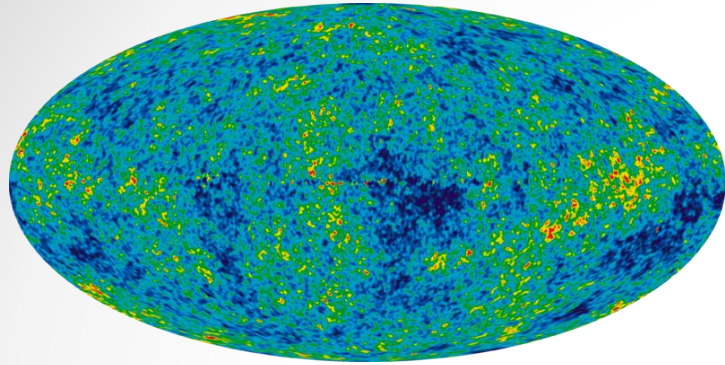
μ -PICによる ダークマターの飛来方向測定

P6DARK班

相澤 俊博

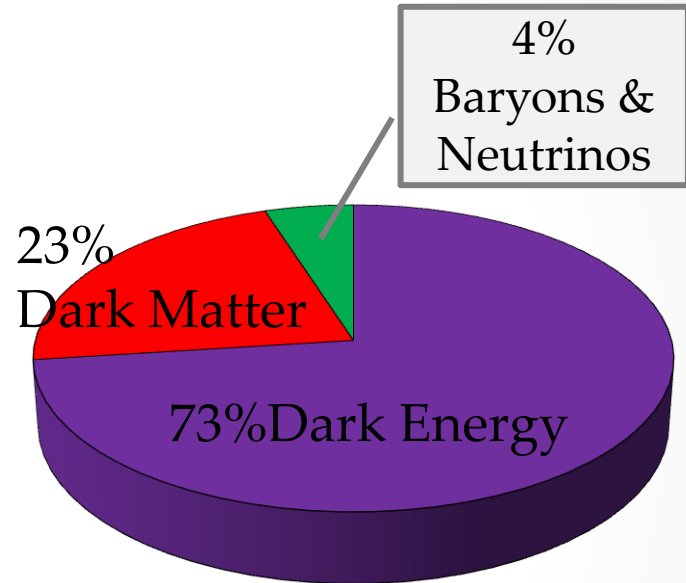
井上 諒

ダークマターとは



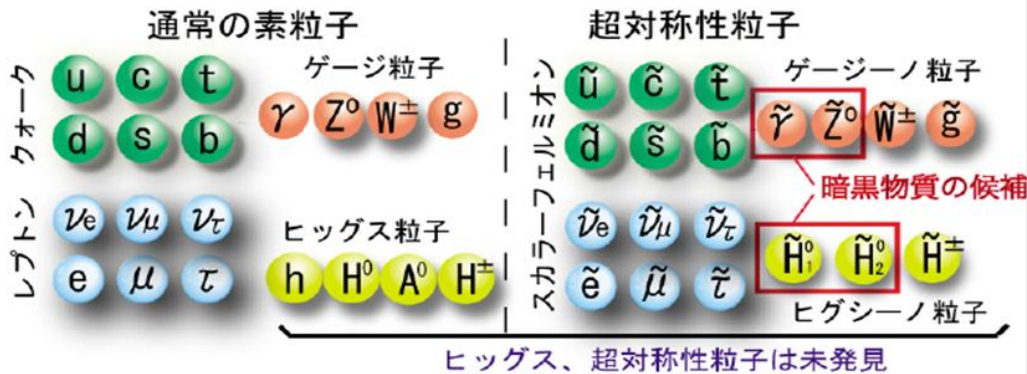
人工衛星WMAPが撮影した
宇宙マイクロ波背景放射

宇宙マイクロ波背景放射をはじめ、
銀河の回転速度や、重力レンズなどが、
その存在の証拠として挙げられる。



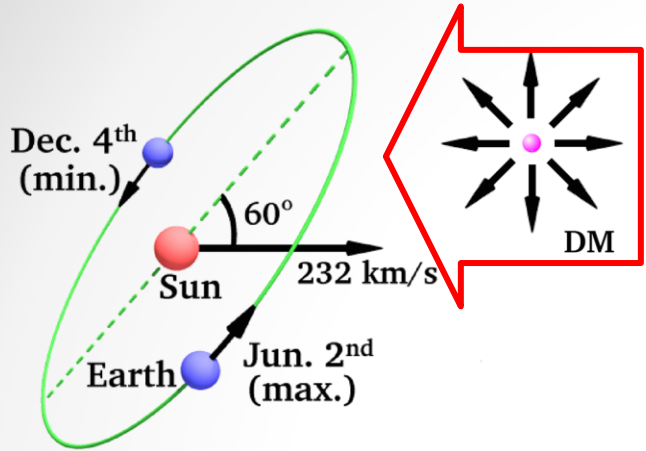
宇宙の組成

さまざまな観測によって、
宇宙の組成のうち、23%がダークマター
であることがわかっている。

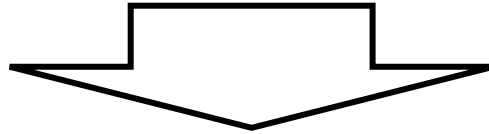


超対称性理論(SUSY)で予言される
WIMP(Weakly Interacting Massive
Particle)が、ダークマターの有力な
候補である。ほかにアクシオン、Q
ボール、ステラエルニュートリノ
等が候補に挙げられる

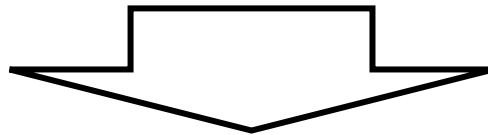
WIMPを観測する方法



WIMPは、宇宙空間をランダムな方向に運動していると考えられているので、銀河内を運動している太陽系に風のように吹きつけてくる。



WIMPに反跳された原子核を検出することができる！



では、どのような信号が期待できるのか...

μ -PICで観測できるダークマター
のスペクトルを計算

...

エネルギースペクトルの式

原子核との散乱は、弾性散乱を仮定

$$E_R = E \frac{4M_D M_N}{(M_D + M_N)^2} \frac{1 - \cos\theta}{2}$$

=rとおく

$$dR = \frac{N_0}{A} \sigma v dn$$

速度分布は、ボルツマン分布を仮定

$\frac{dR}{dE_R}$ を縦軸に

エネルギースペクトル

$$\frac{dR}{dE_R} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{1}{Er} dR(E)$$

$$= \frac{R_0}{E_0 r} e^{-E_R/E_0 r}$$

E_R を横軸に

ダークマターの中心速度、反応断面積、質量などを含む定数

E_R/E	反跳エネルギー/WIMPの運動エネルギー		
E_{max}	実験室系でのWIMPの運動エネルギーの最大値	M_D/M_N	WIMP/標的原子核の質量
E_{min}	標的原子核にエネルギーを渡すことのできる最小エネルギー	R	計数
E_0	$v=v_0$ の時のWIMPの運動エネルギー	σ	反応断面積
v	WIMPの速度	A	標的原子核の原子量
v_0	WIMPの中心速度	N_0	アボガドロ数

^{19}F をターゲットにした時のダークマターの 予想されるエネルギースペクトル

$$0.751 \cdot [0]/[1] \cdot \exp(-0.561 \cdot x/[1])$$

ターゲット;

^{19}F

ダークマターの質量;

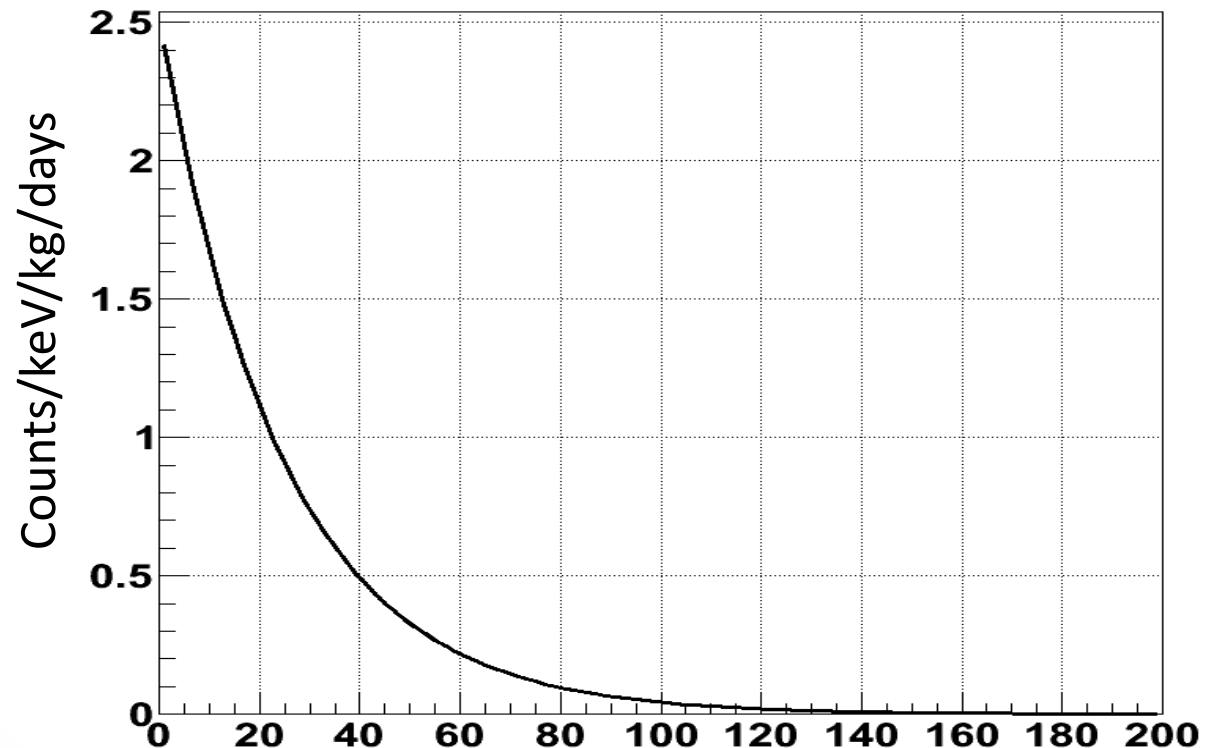
$100\text{GeV}/c^2$

反応断面積;

1pb

ダークマターの中心速度;

220km/s

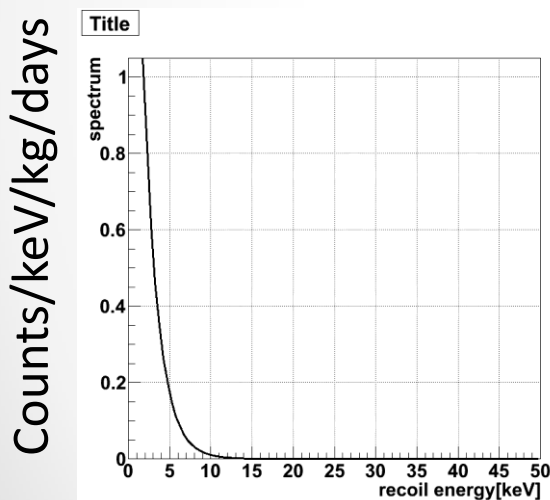


反跳エネルギー [keV]

質量 $100\text{GeV}/c^2$ のダークマターの予想されるスペクトル

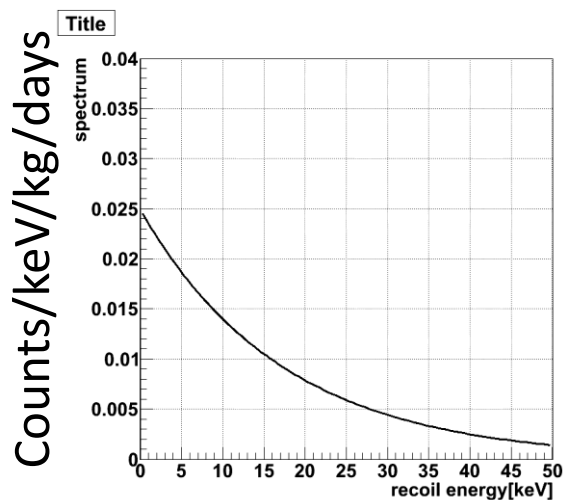
μ -PIC中のガスを組成している元素をターゲットに

Target; H



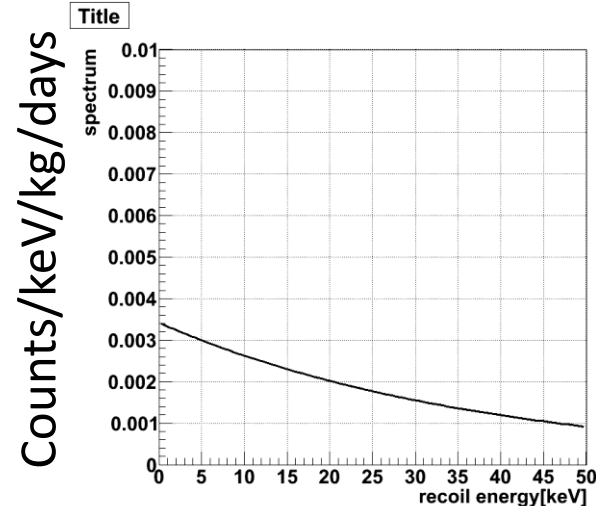
反跳エネルギー [keV]

Target; C



反跳エネルギー [keV]

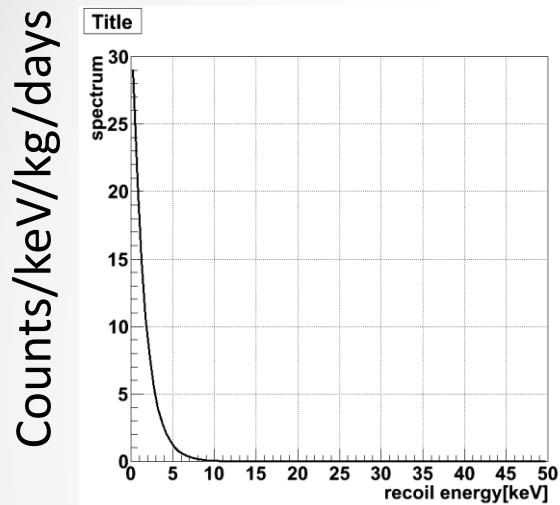
Target; Ar



反跳エネルギー [keV]

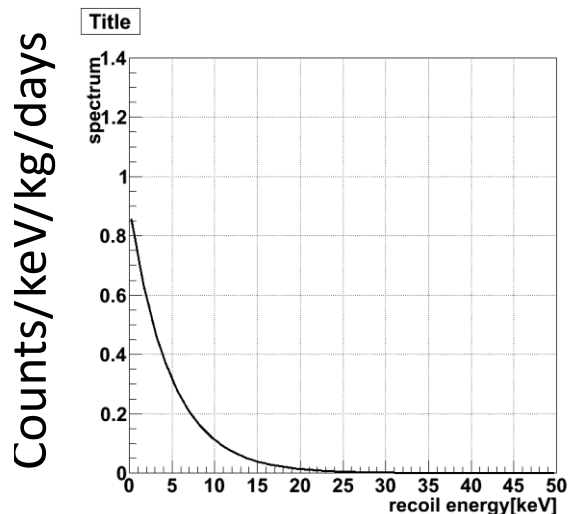
質量 $10\text{GeV}/c^2$ のダークマターの予想されるスペクトル

Target; H



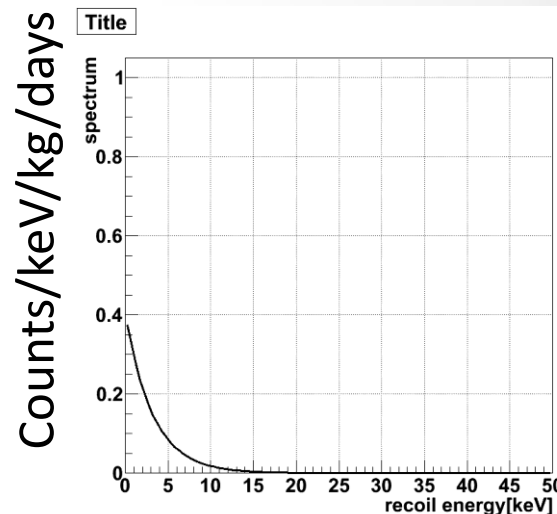
反跳エネルギー [keV]

Target; C



反跳エネルギー [keV]

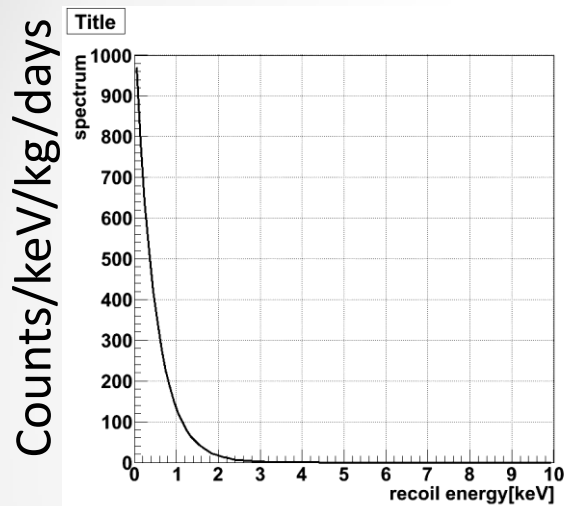
Target; Ar



反跳エネルギー [keV]

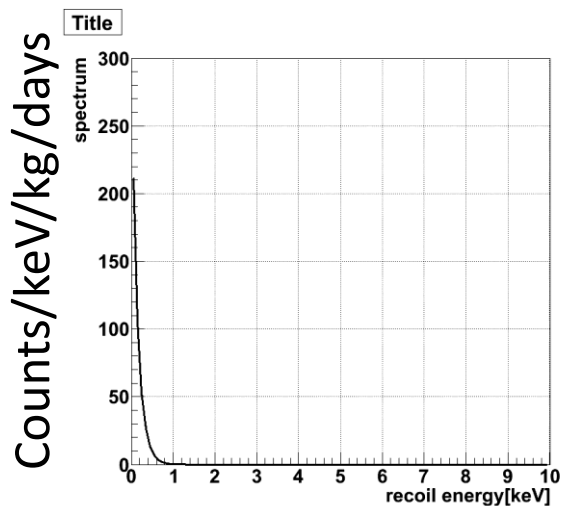
質量 $1\text{GeV}/c^2$ のダークマターの予想されるスペクトル

Target; H



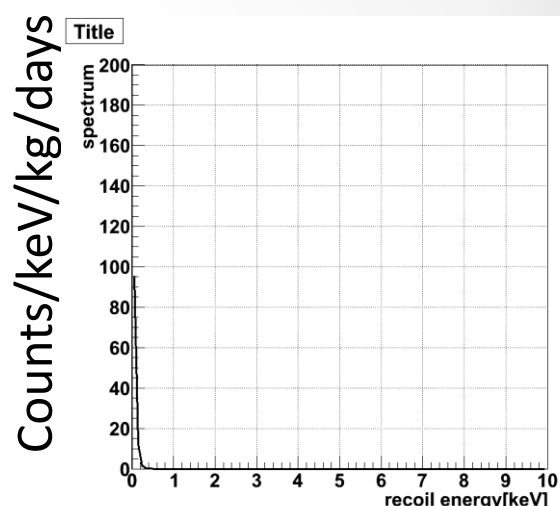
反跳エネルギー [keV]

Target; C



反跳エネルギー [keV]

Target; Ar



反跳エネルギー [keV]

100GeV/c² 10GeV/c² 1GeV/c²のダークマターのそれぞれの標的に対するスペクトルを比較

μ-PIC中のガスの質量比に応じて
スペクトルに重みづけ

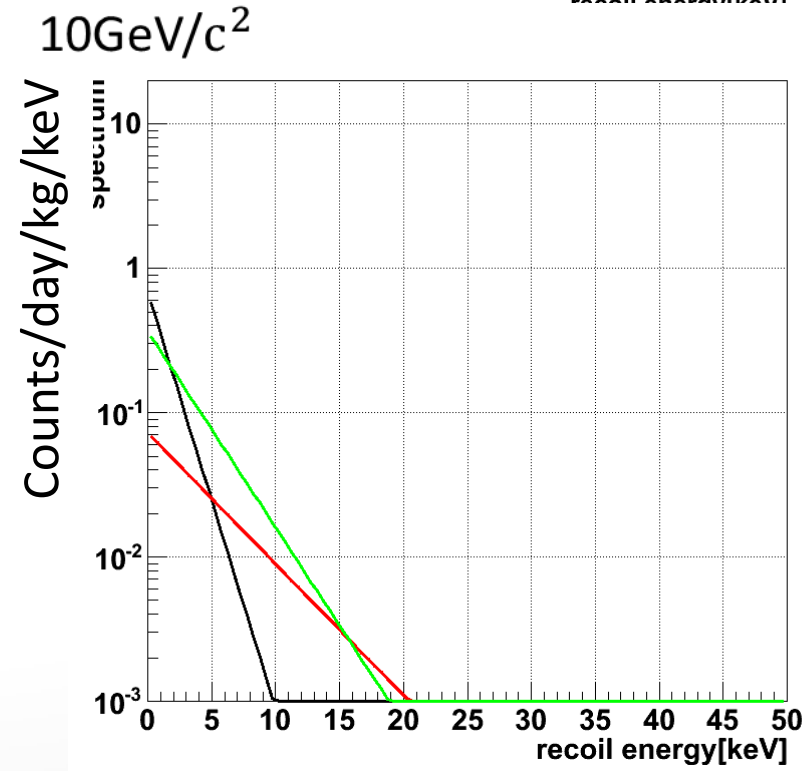
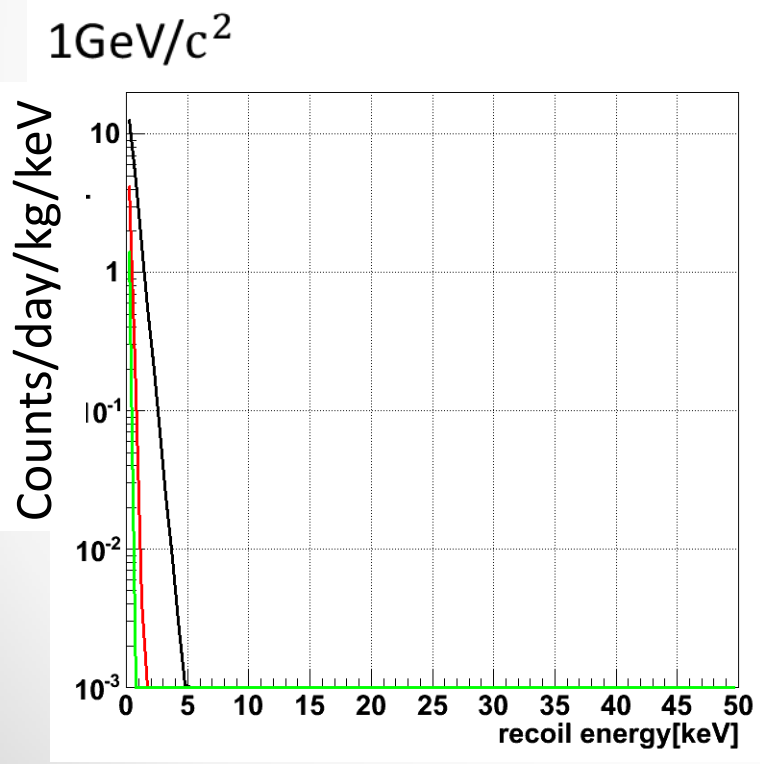
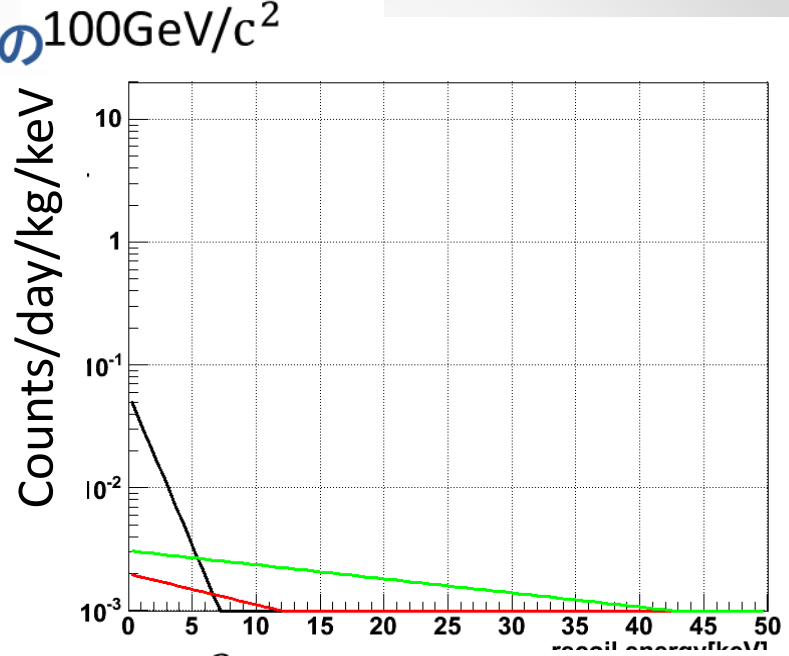
Ar : C₂H₆ = 9 : 1 — H

↓

Ar : C : H = 45 : 4 : 1 — C

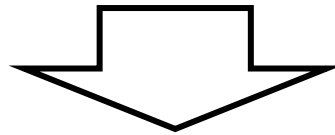
↓

Ar : C : H = 45 : 4 : 1 — Ar



ここまでのまとめ

質量の小さいWIMPに対しては数keVの陽子を検出することが、WIMPの観測に有利になると考えられる。



今回、 μ -PICで陽子の飛跡を検出する実験を行いました。

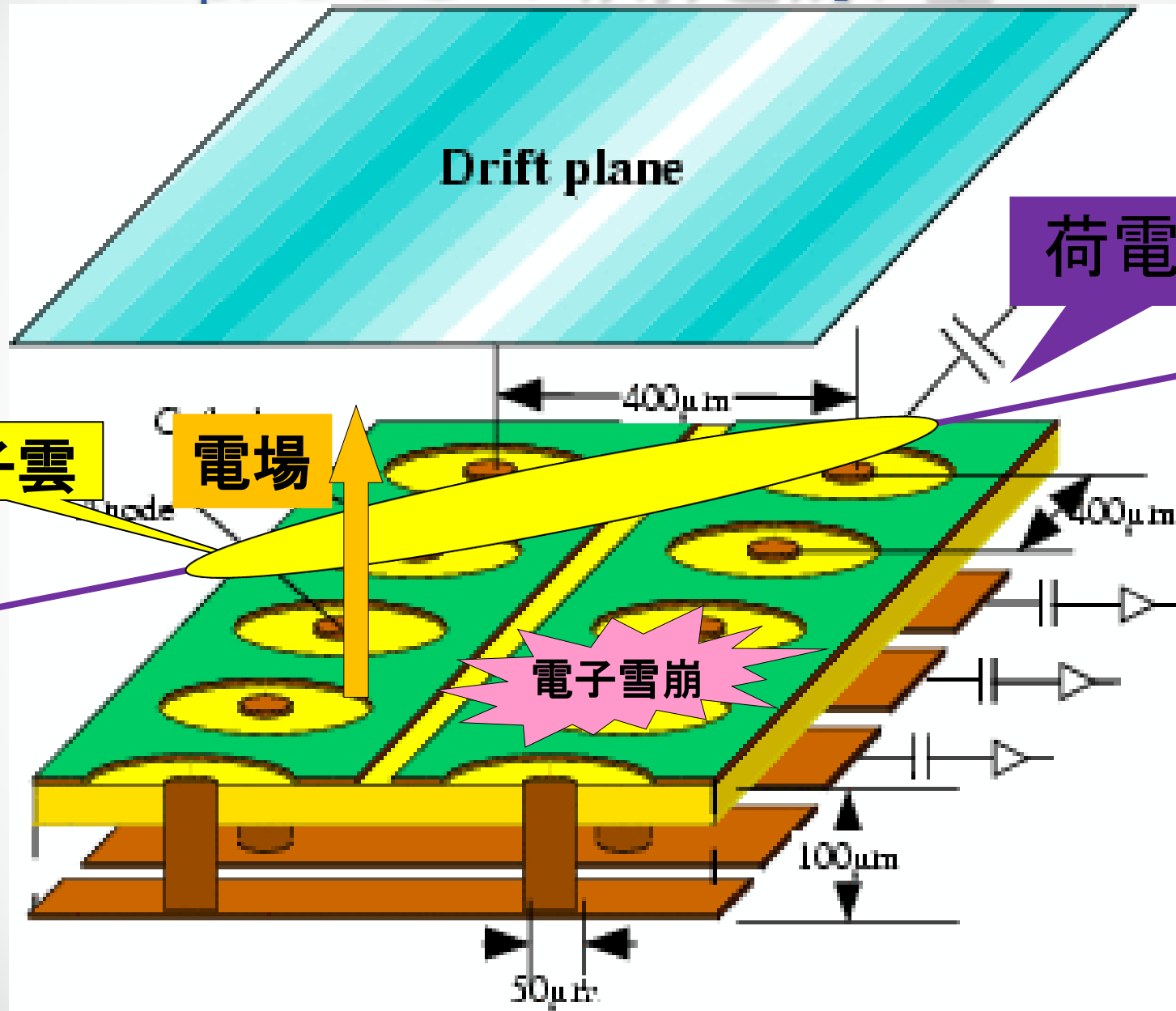
μ-PICでの測定

...

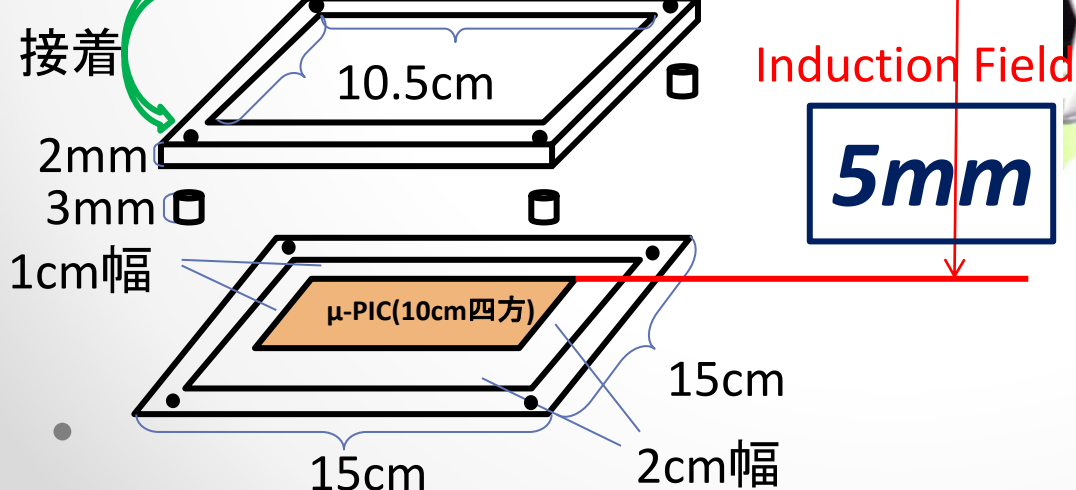
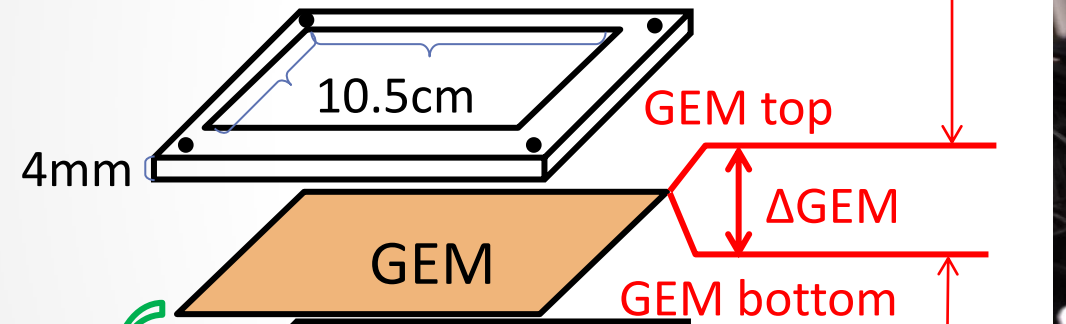
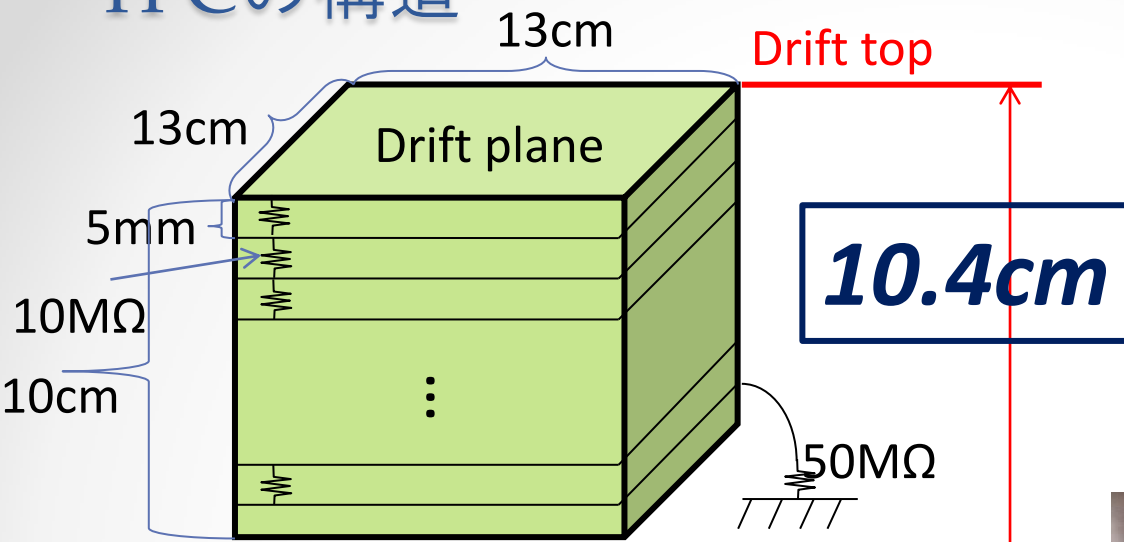
測定原理

内部構造

μ -PICの測定原理

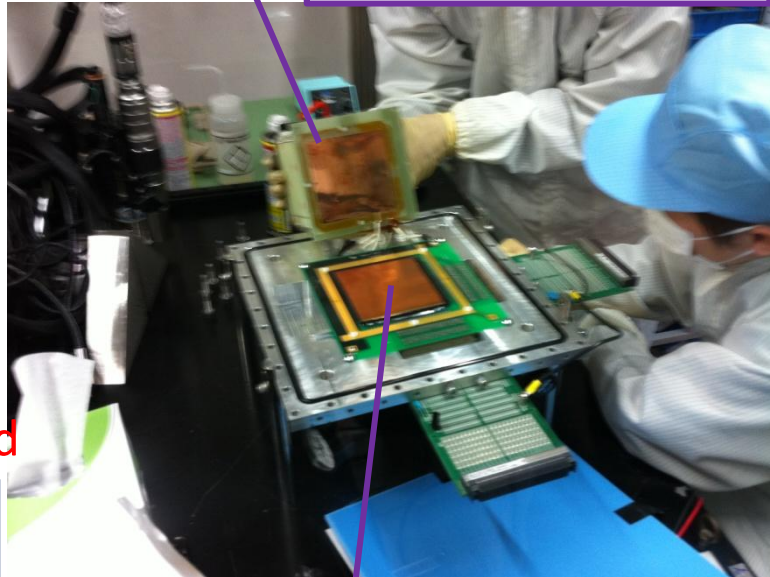


TPCの構造

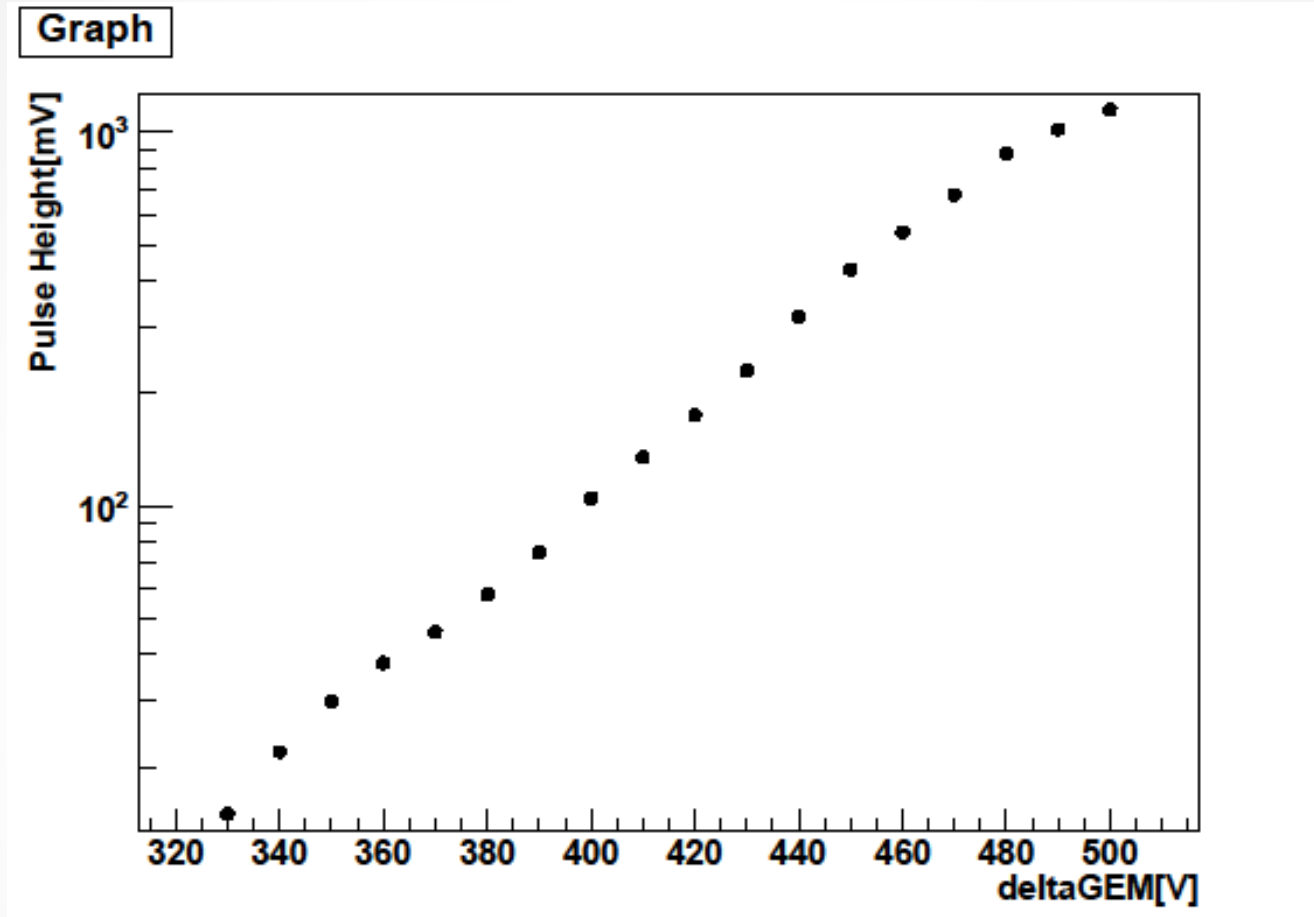


旧GEM
10cm角50 μ m厚

新GEM; S/N542
10cm角 125 μ m厚



Δ GEMのオシロでの動作確認



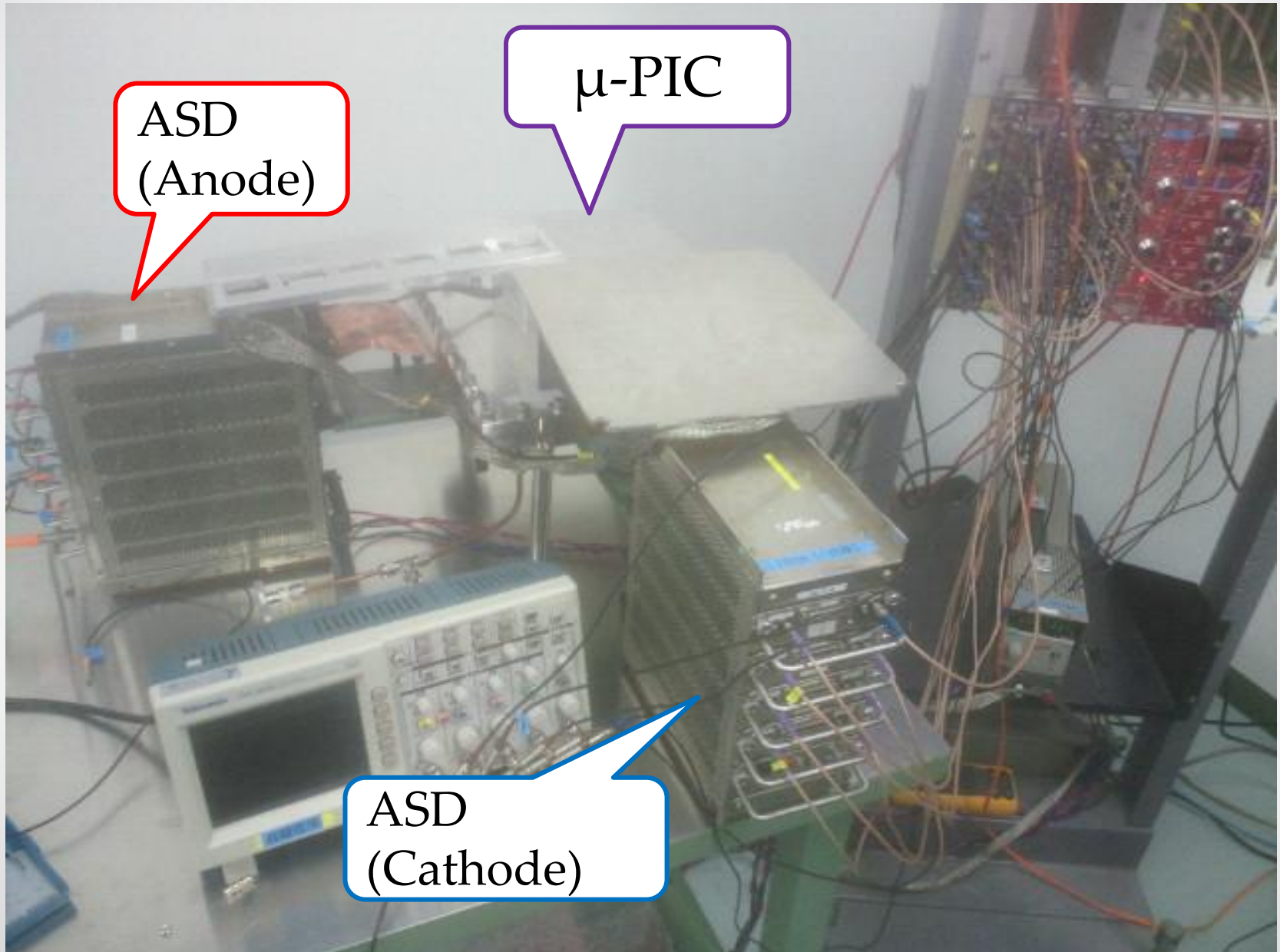
→ちゃんと動くことが確認できた！

Drift t; -3217V ,Anode;470V ,使用線源 ^{109}Cd

スペクトル取得 Gain測定

...

セットアップ

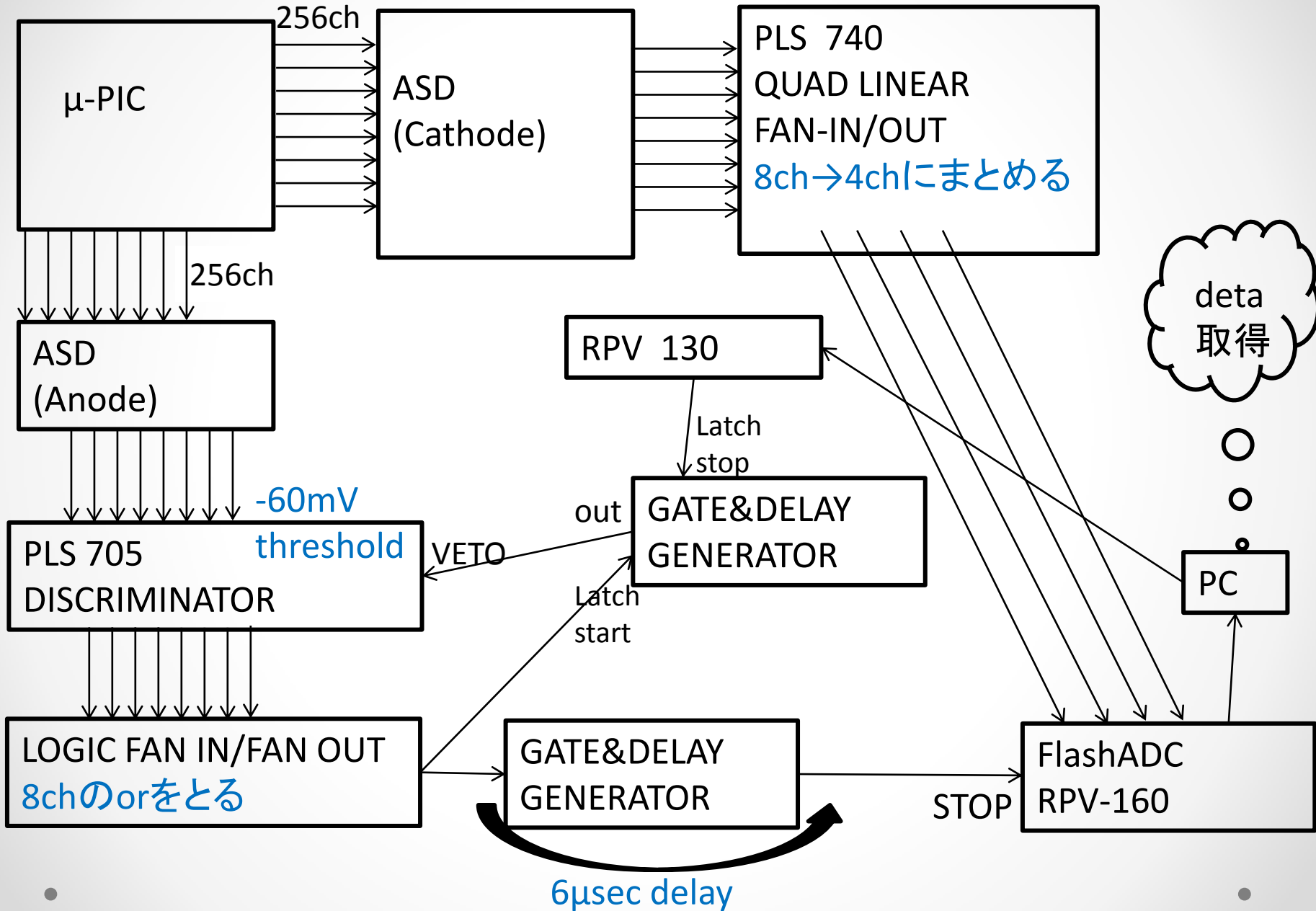


ASD
(Anode)

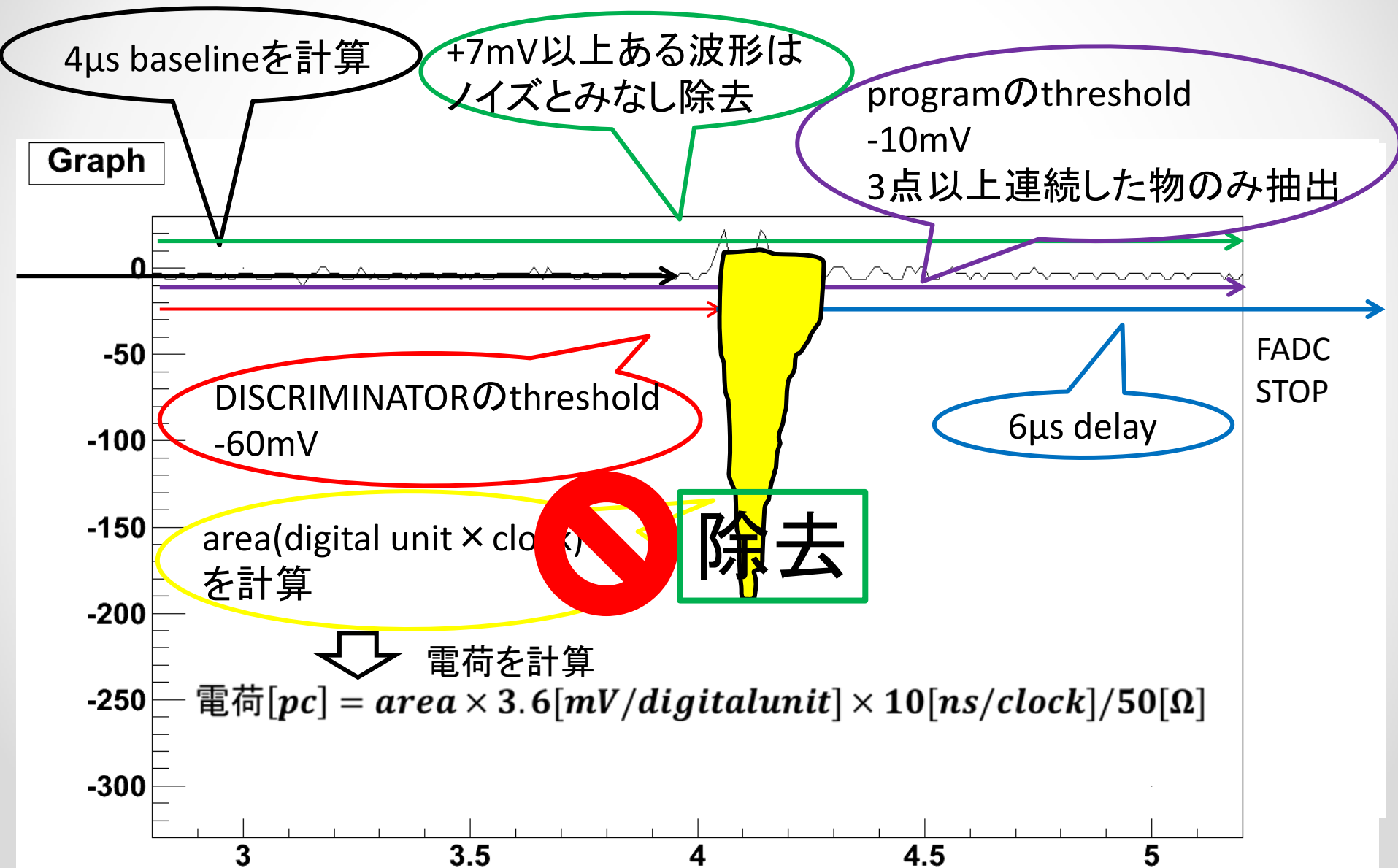
μ-PIC

ASD
(Cathode)

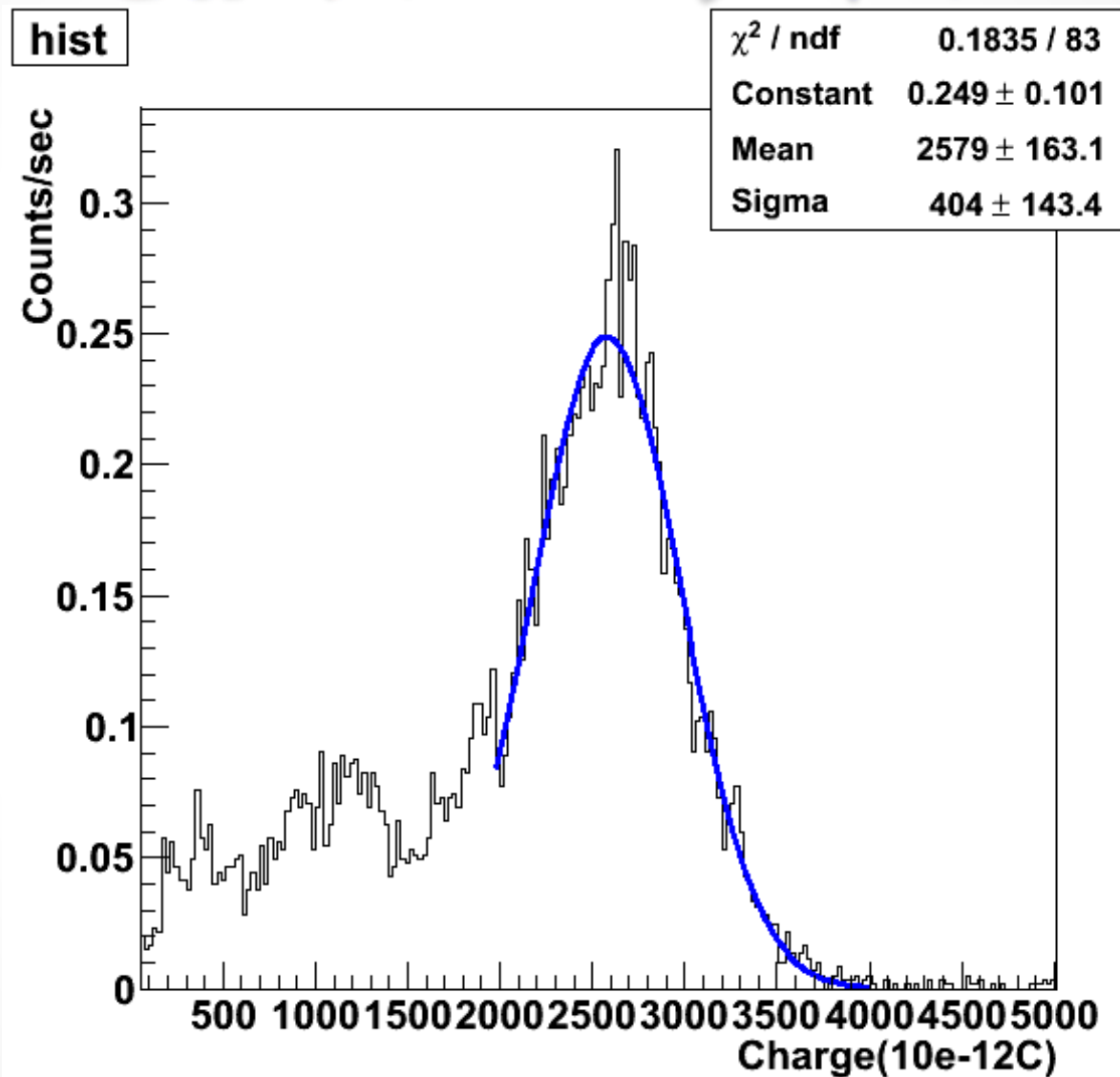
データ収集系



波形取得説明



^{109}Cd のスペクトル



- Drift top; -3217V , GEM T; -800V , GEM B ; -300V , Anode ; 460Vで測定 •

Gainの計算

Drift top;-3217V ,GEM T;-800V ,GEM B ;-300V ,Anode ;460Vの場合

Ar + C ₂ H ₆ のW値	23.6eV
エネルギーと電荷の比例定数	0.0086keV/pC
素電荷量	1.6 × 10 ⁻⁷ pC

を用いると、全体の増幅率は

$$\frac{1}{0.0086} [pC/keV] \times \frac{23.6 \times 10^{-3} [keV]}{1.6 \times 10^{-7} [pC]} = 1.7 \times 10^7$$

となる。

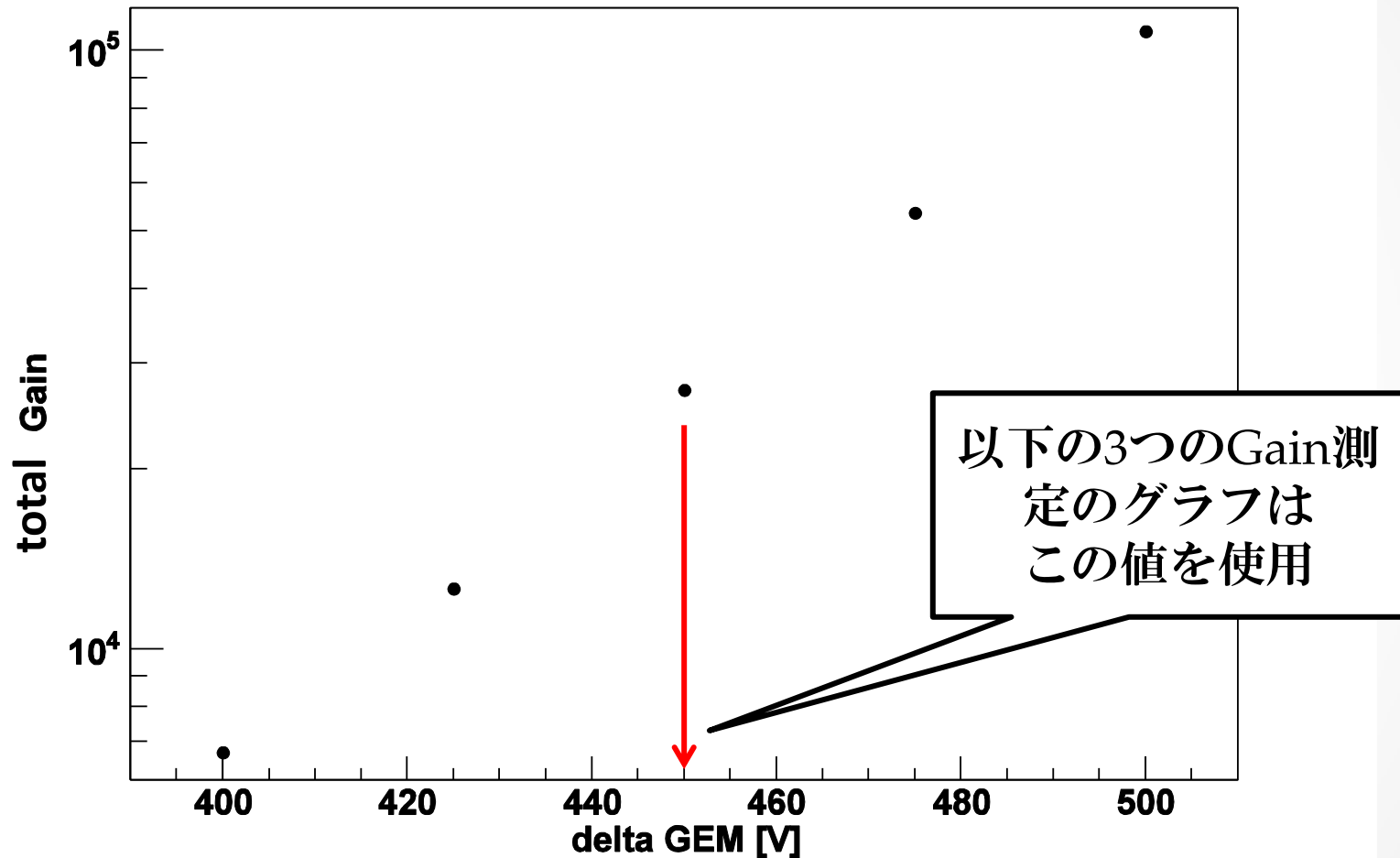
ASDの増幅率を160(既知)とすると、μ-PICとGEMの増幅率は

$$\frac{1.7 \times 10^7}{160} = 1.08 \times 10^5$$

よって、μ-PICとGEMの増幅率の合計は約10万倍である。

Δ GEMとtotal gainの関係を測定

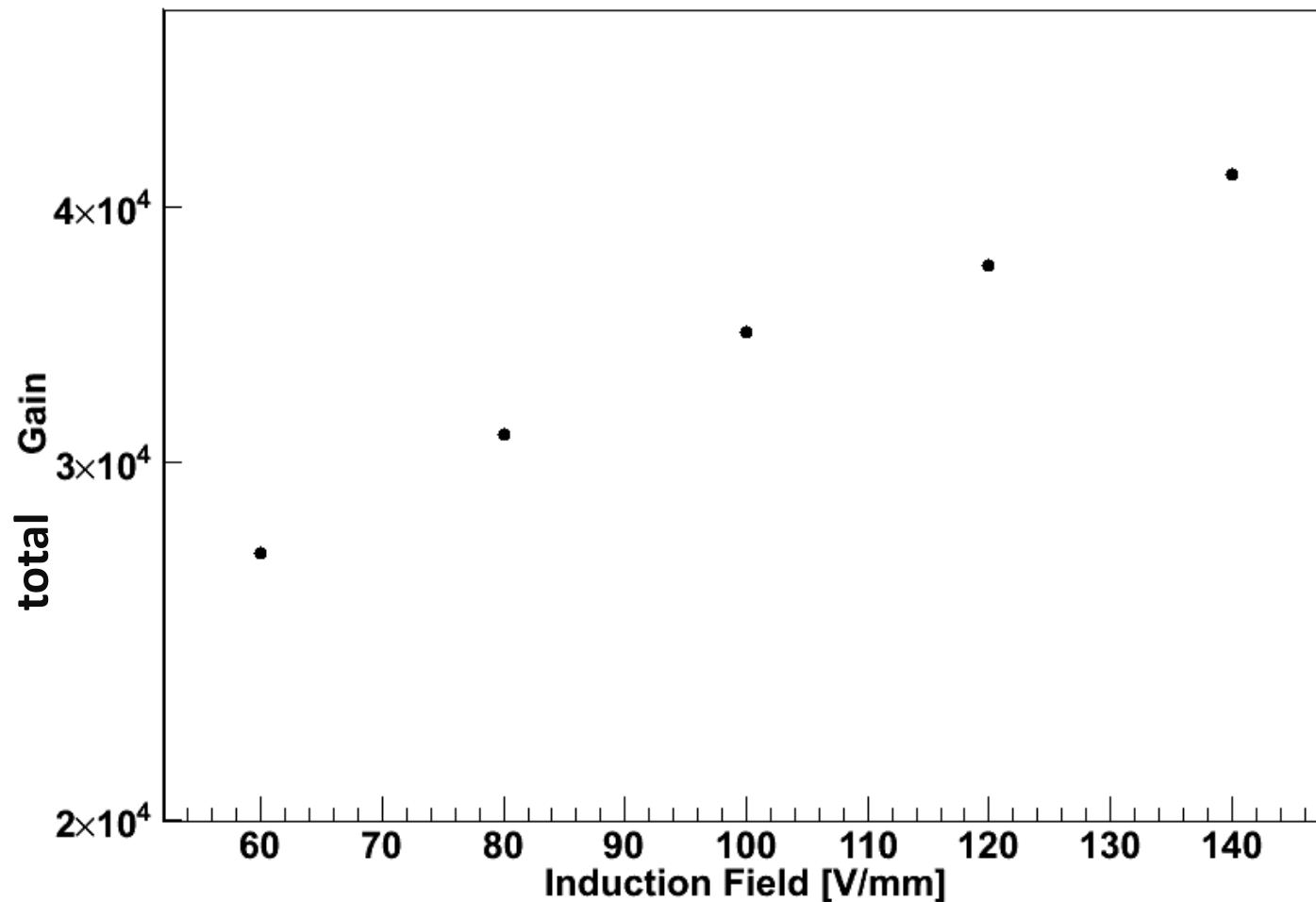
Graph



Drift top; -3217V , GEM B ; -300V , Anode ; 460Vで測定

GEM bottom と total gain の関係を測定

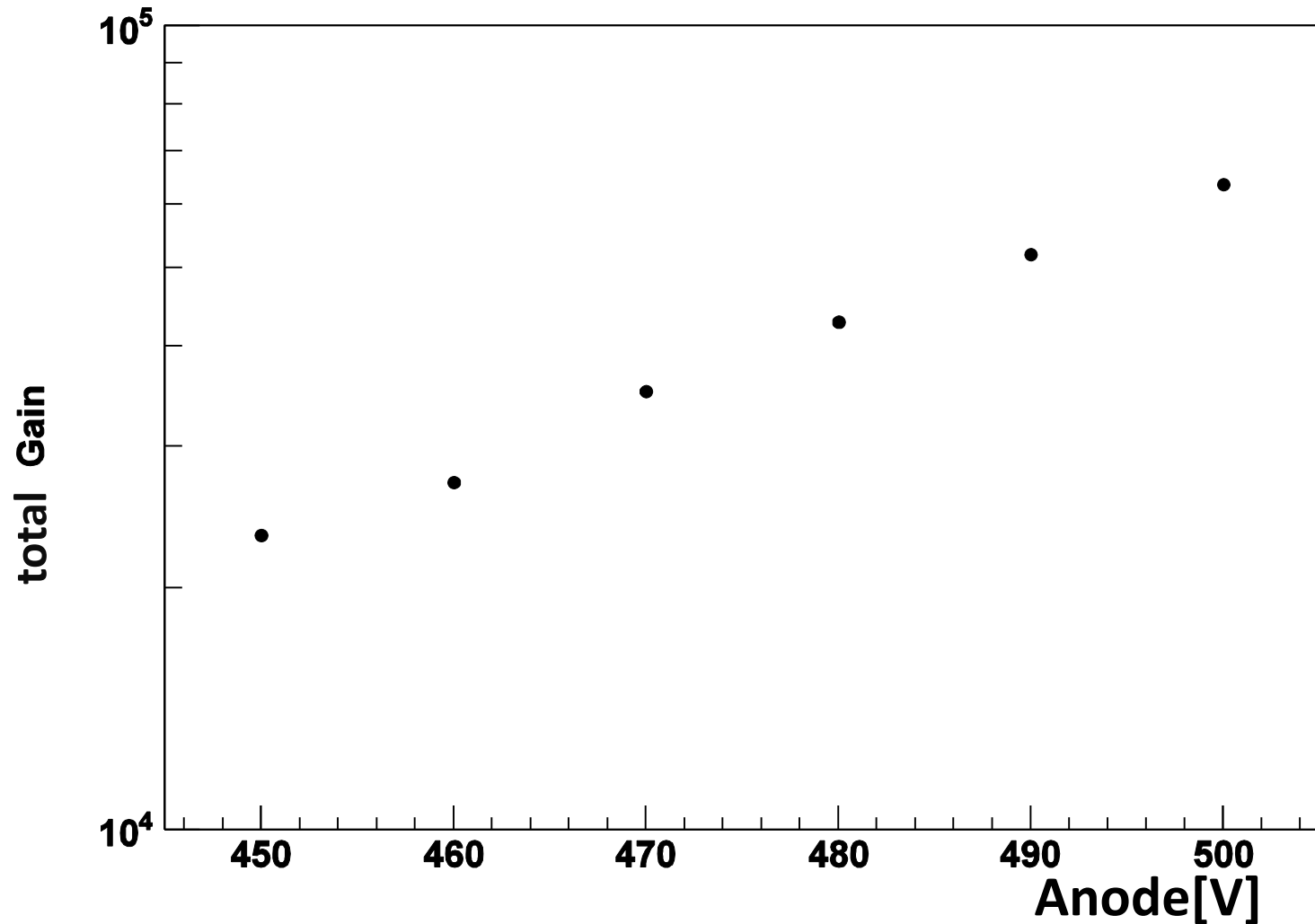
Graph



Drift top; -3217V , Anode; 460V , Δ GEM; 450v で測定

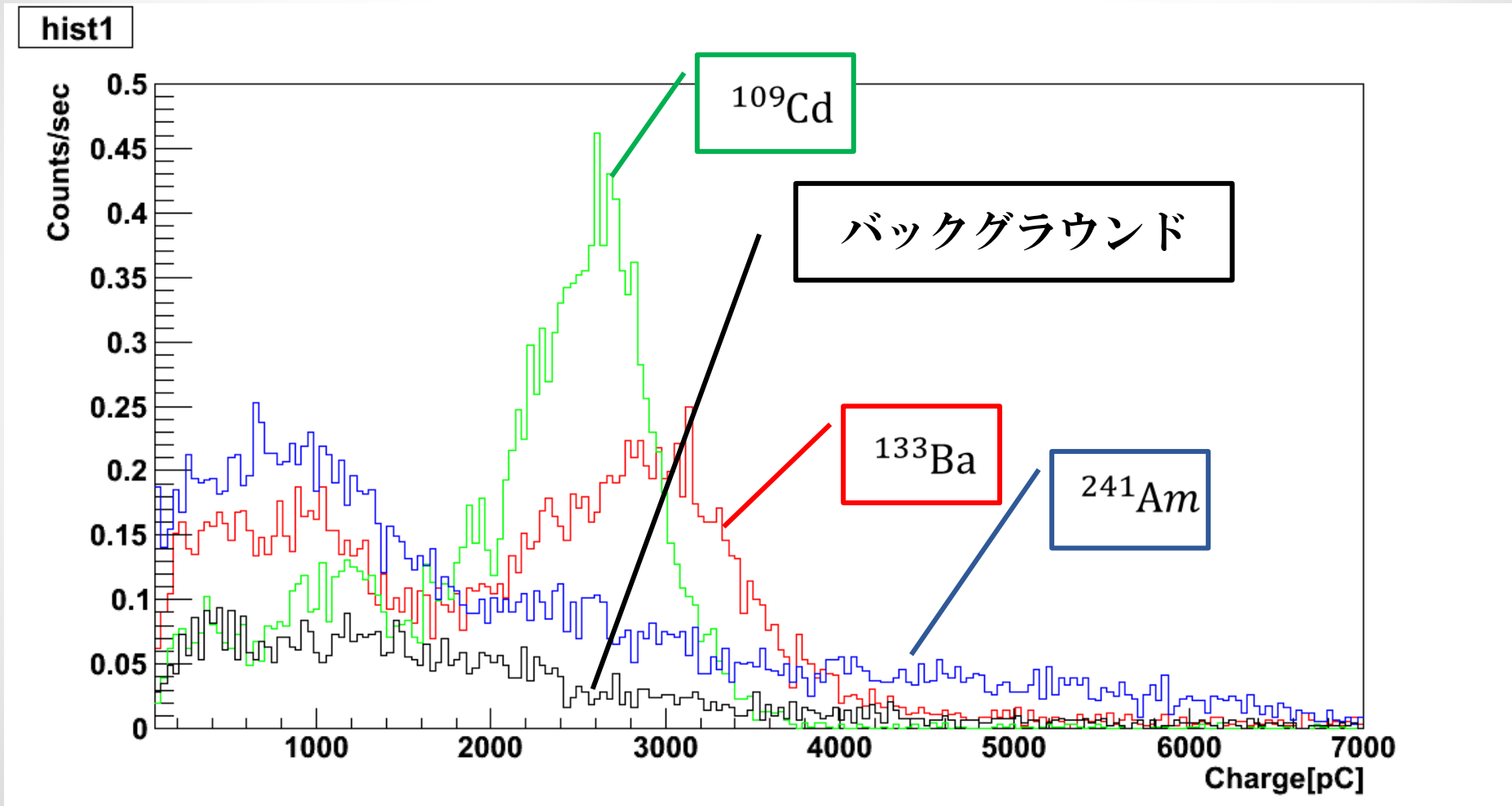
Anode と total gain の関係

Graph



Drift top; -3217V , GEM t; 750V , GEM b; 300V で測定

その他の線源のスペクトルを取得



Drift top; -3217V , GEM T; -800V , GEM B ; -300V , Anode ; 460Vで測定

- サチった波形は除去

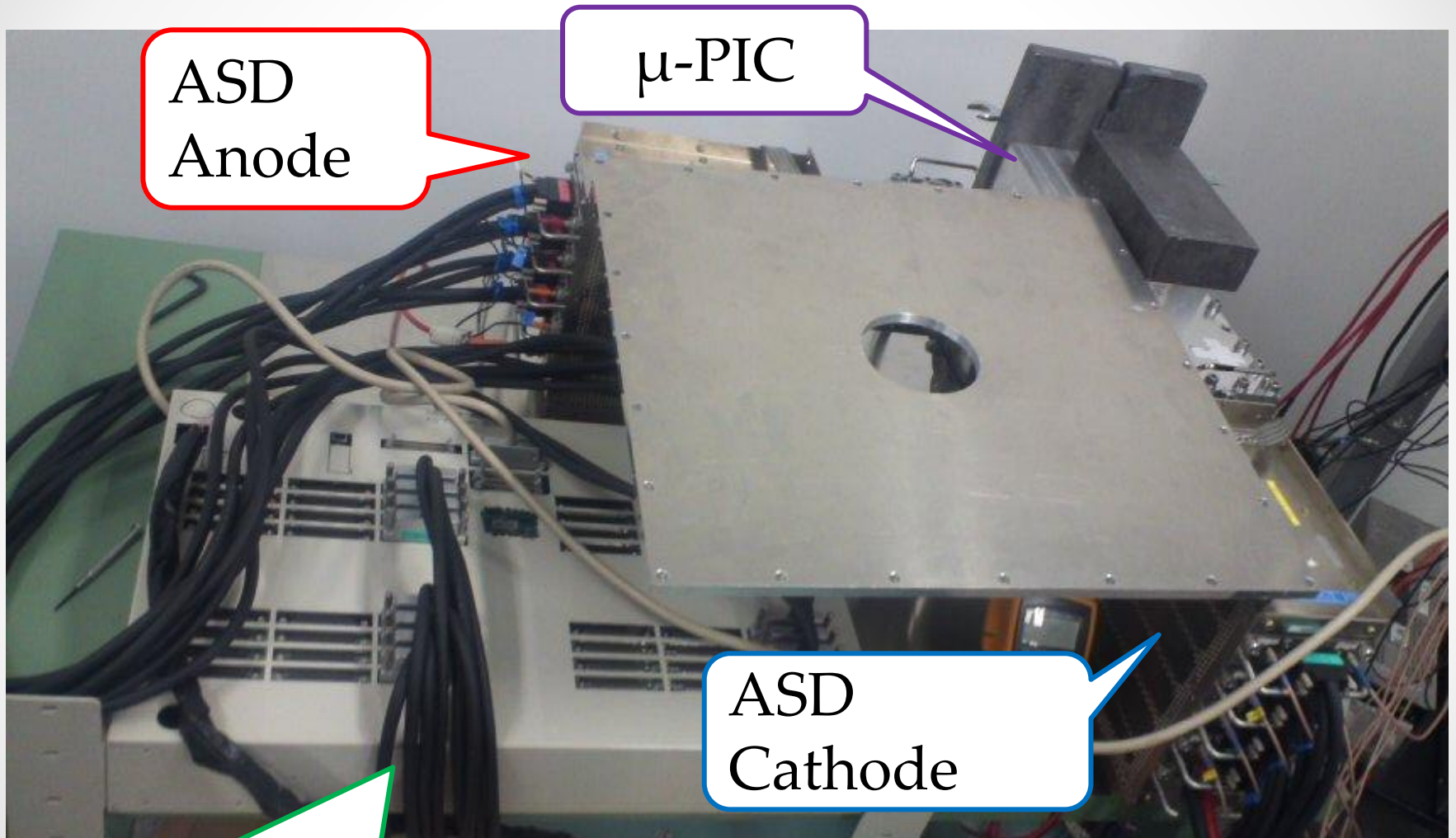
2Dイメージング

...

セットアップ

全面照射

セットアップの様子



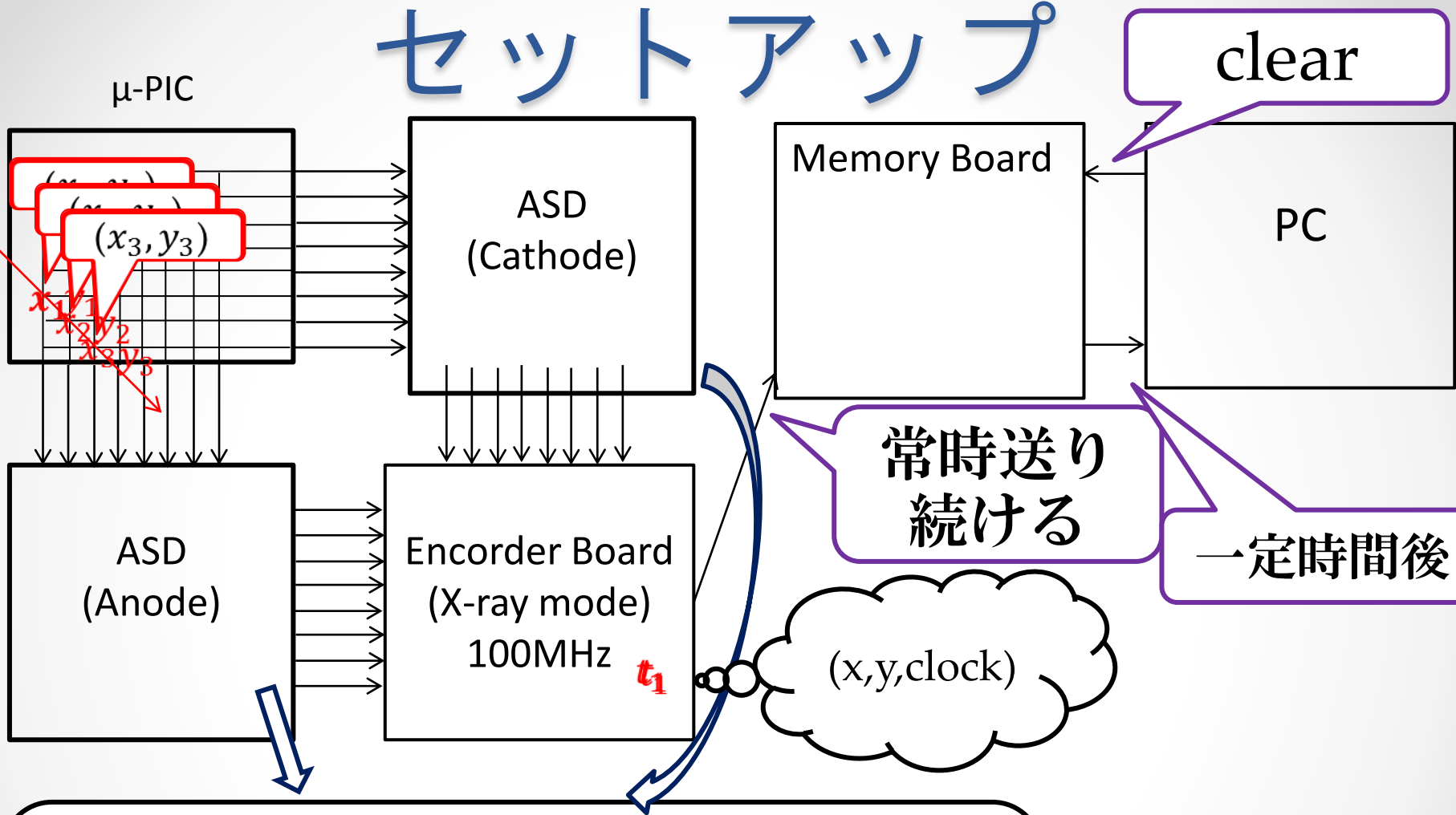
ASD
Anode

μ -PIC

ASD
Cathode

Encodrer Board

セットアップ



clear

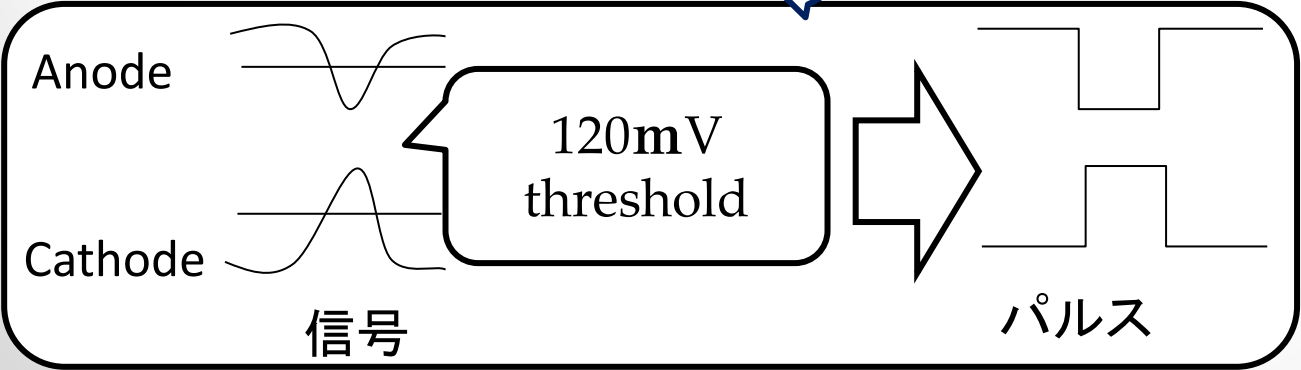
Memory Board

PC

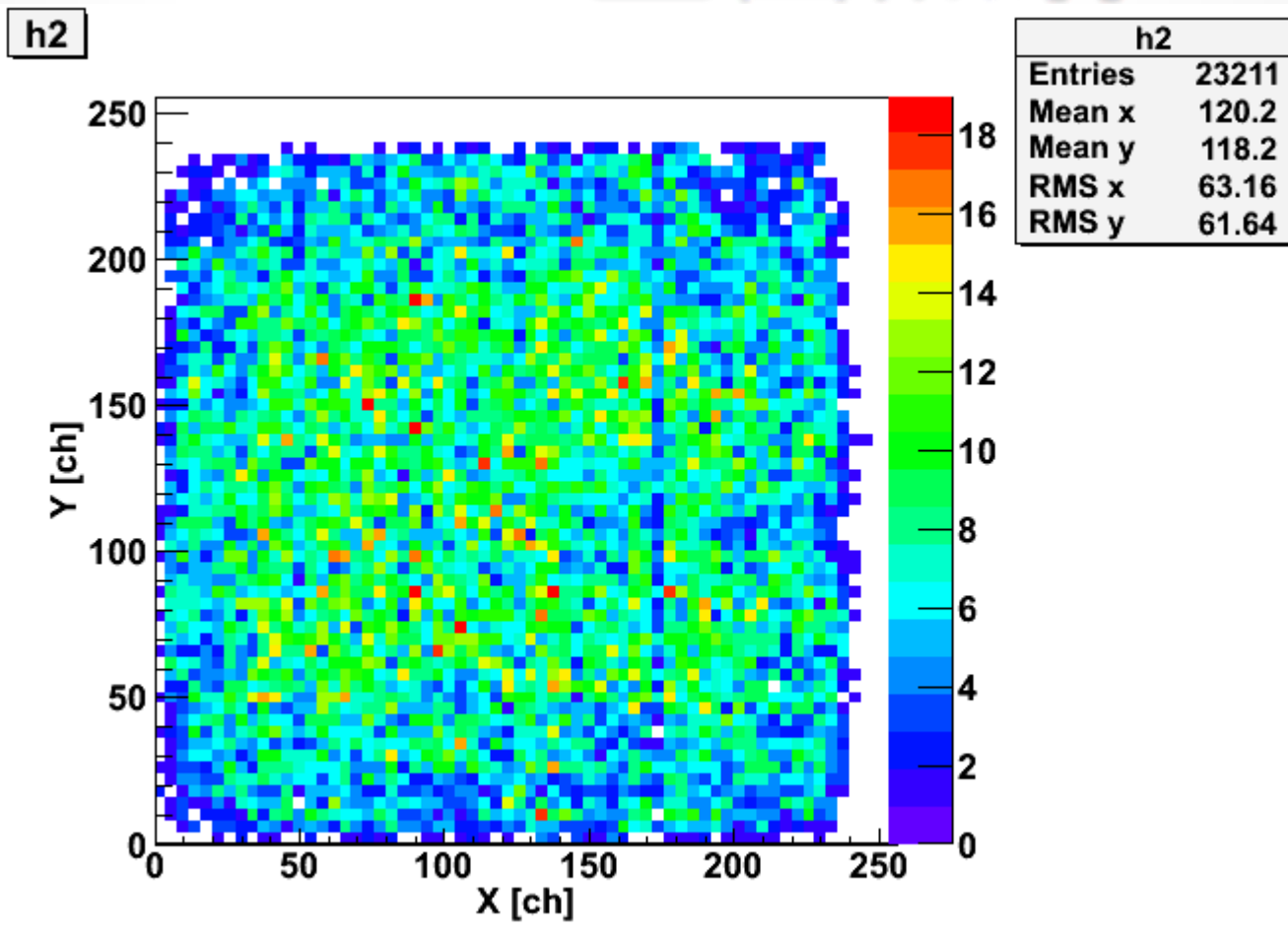
常時送り
続ける

一定時間後

(x, y, clock)

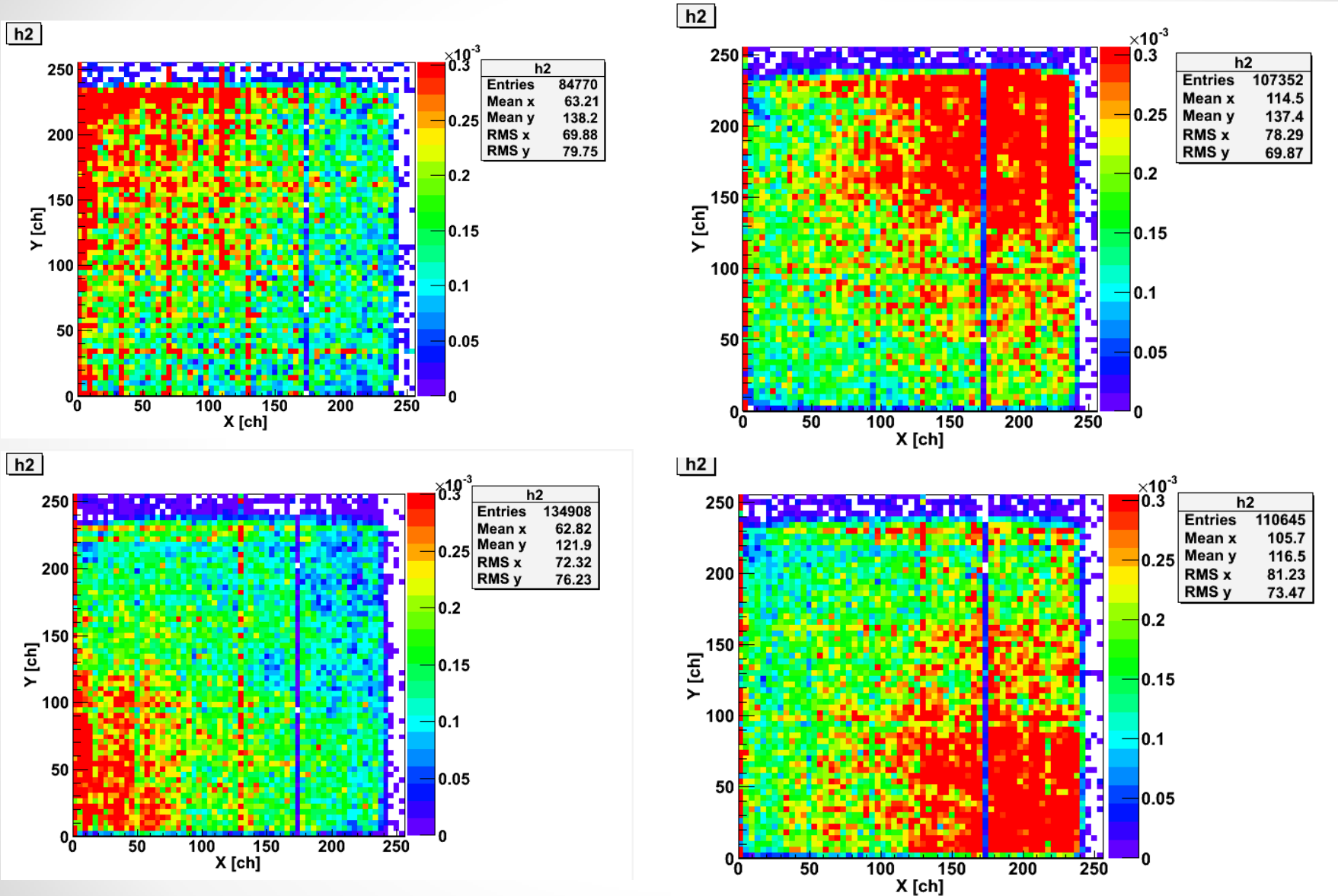


^{133}Ba の全面照射



ちゃんと動作していることを確認

^{133}Ba を $\mu\text{-PIC}$ の四隅に置いて、2次元イメージを書く



- 視覚的な位置と、座表面上の位置が合っていることを確認

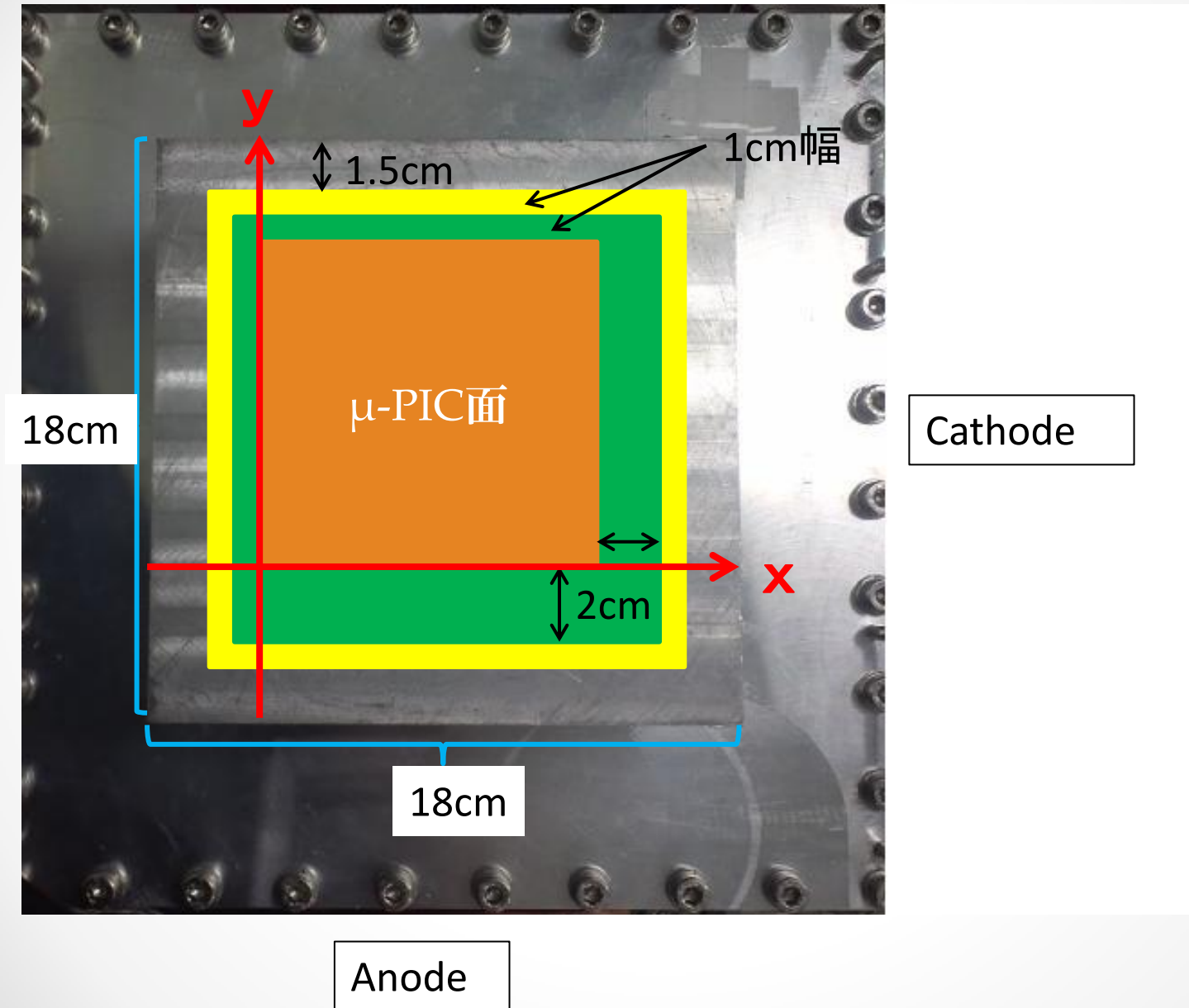
2Dイメージング続き

...

本実験

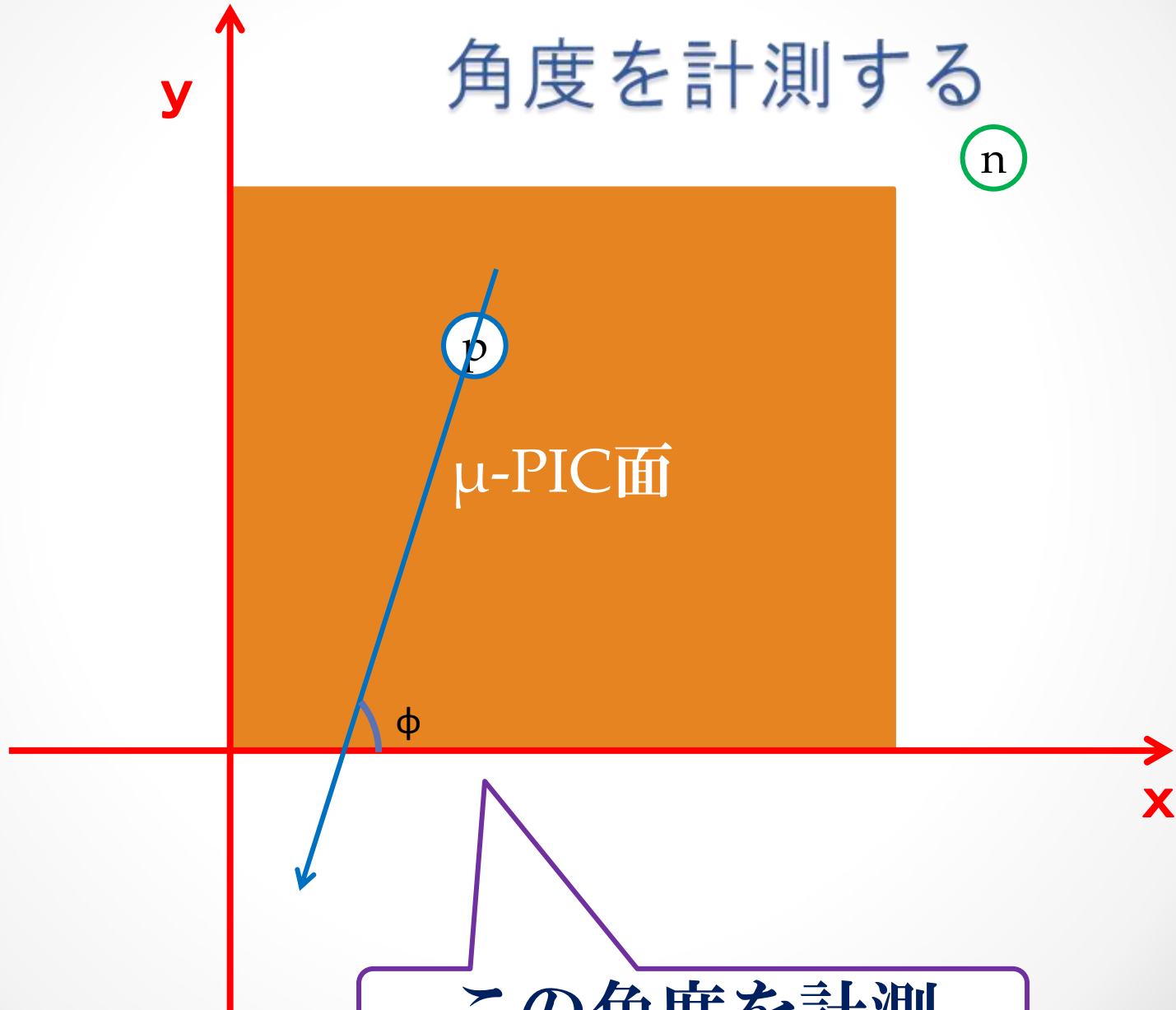
散乱角のヒストグラム作成

μ -PICの位置を確認し、X軸、Y軸をとる



x軸との角度を θ ($-90^\circ < \theta < 90^\circ$)として、

角度を計測する

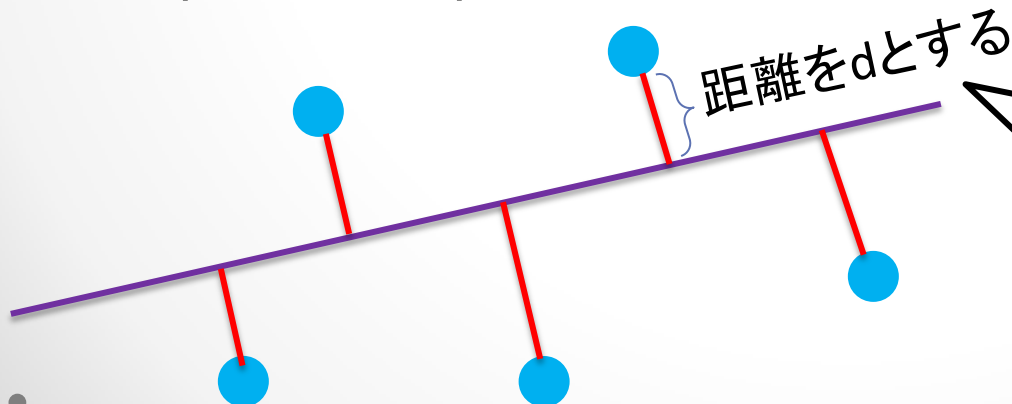
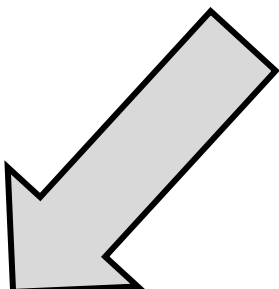
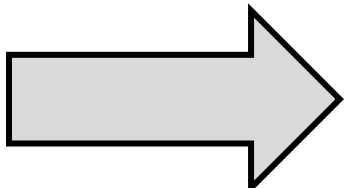
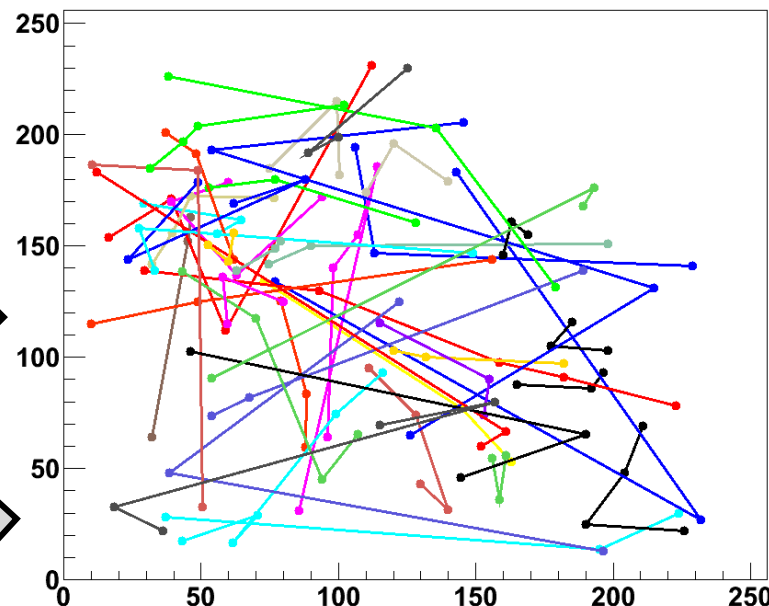


この角度を計測

飛跡のfittingと抽出方法

同じクロックにあるデータを同じイベントとしてプロット

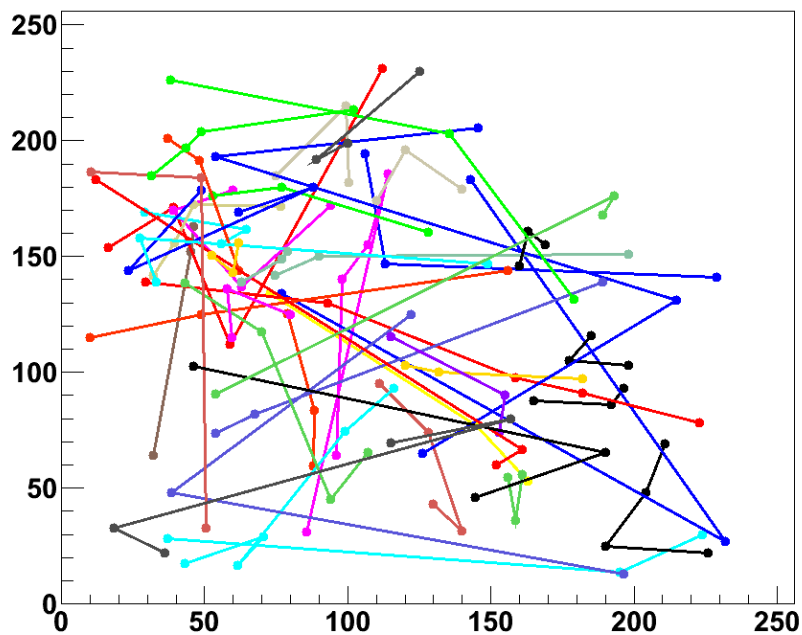
x	y	clock(約2msec単位)
380	106	52
148	202	52
146	372	61
132	356	61
107	307	61
90	272	61
384	291	65
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮



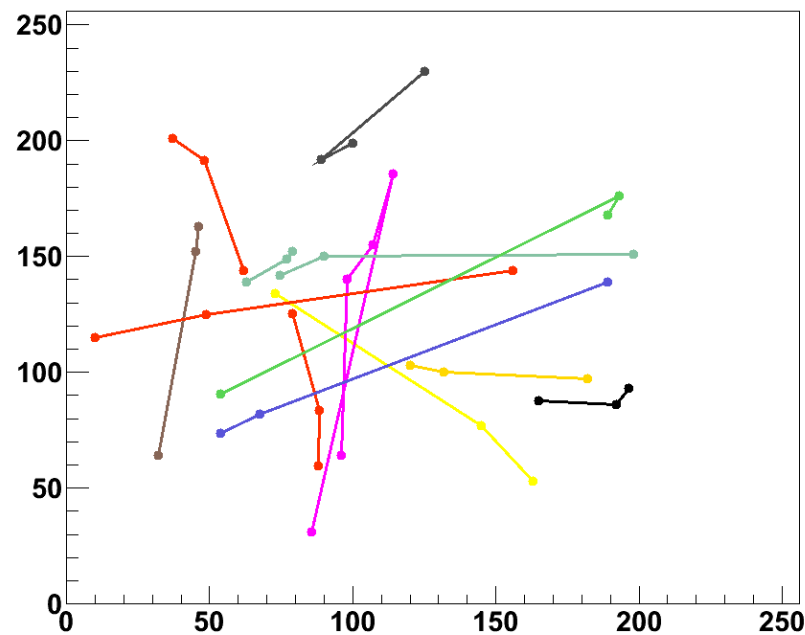
Hit数が3点以上で
 d の平均が0.12cm以下の物
をデータとして抽出

平均距離での抽出前と抽出後を比較

Before



After



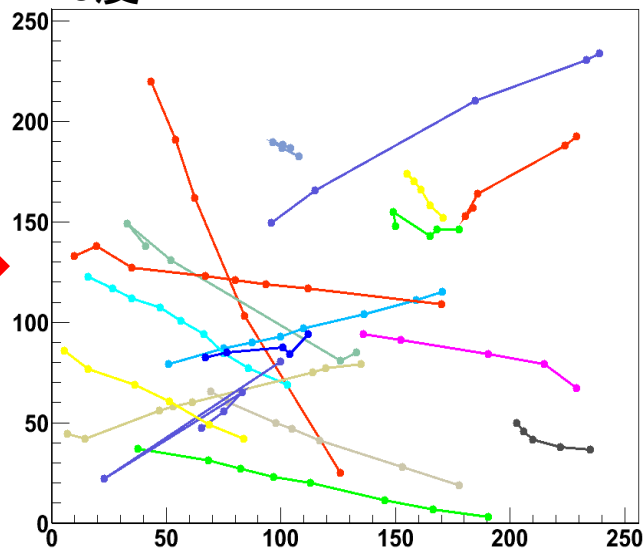
直線に近い形のもののみが抽出されていることがわかる

角度を変えて中性子線源

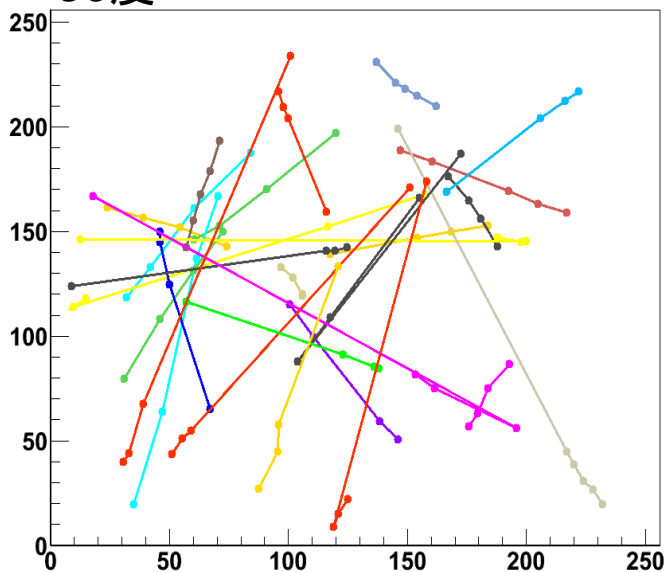
を当ててみる

中性子線源 ^{252}Cf

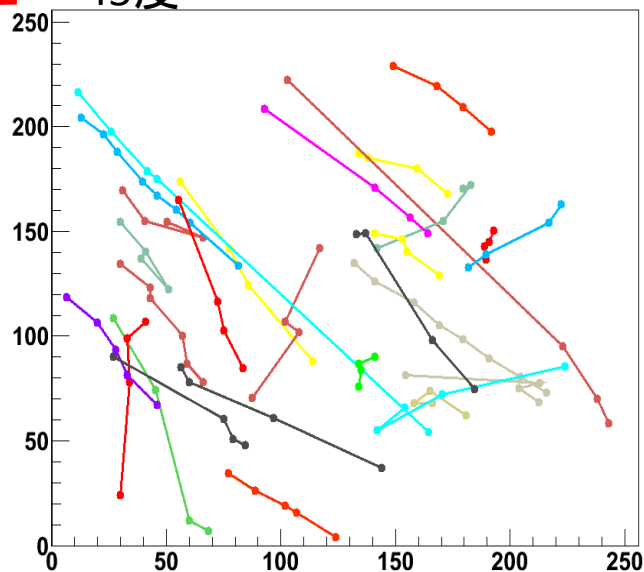
0度



90度



-45度



(参考)Ar中の陽子の飛程 5cm(1.6MeV) 10cm(2.5MeV) (SRIMによる計算)

角度のスペクトル

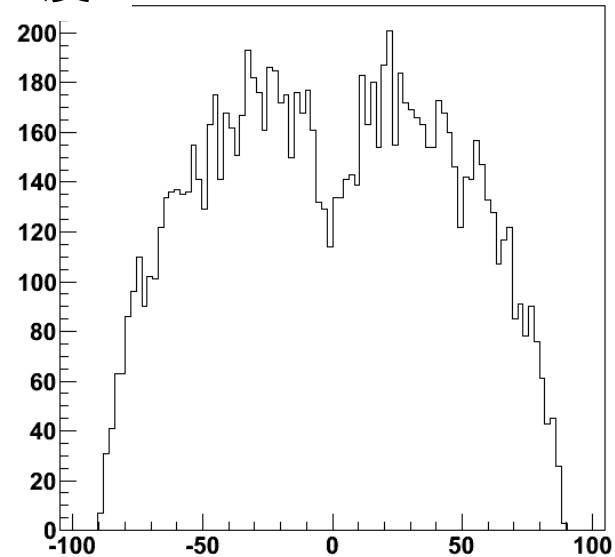
大体期待していたものに近いのだが、
0° 付近のヒストグラムがおかしい。



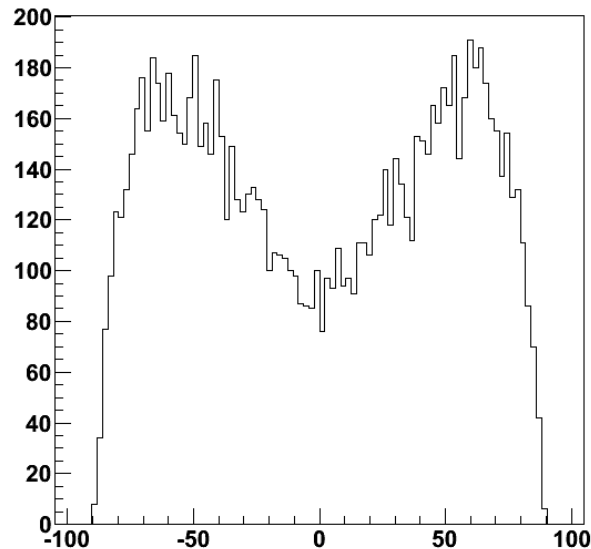
μ-PICの特性？

arctanで傾きを処理しているので、90
度は見えない←改善の余地あり

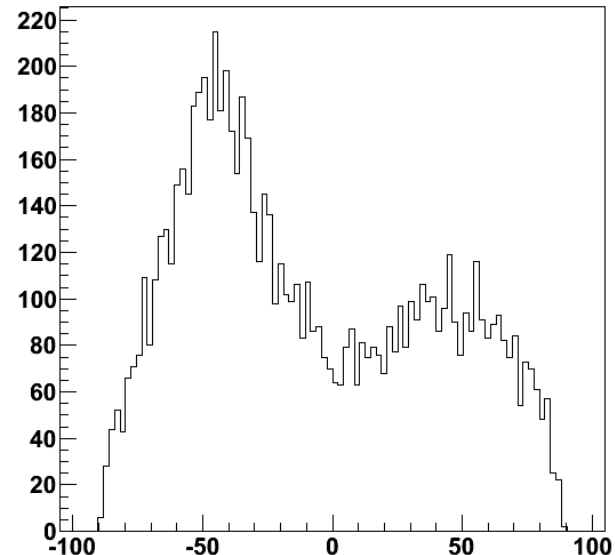
0度



90度



-45度



ガス容器から
の距離; 5cm

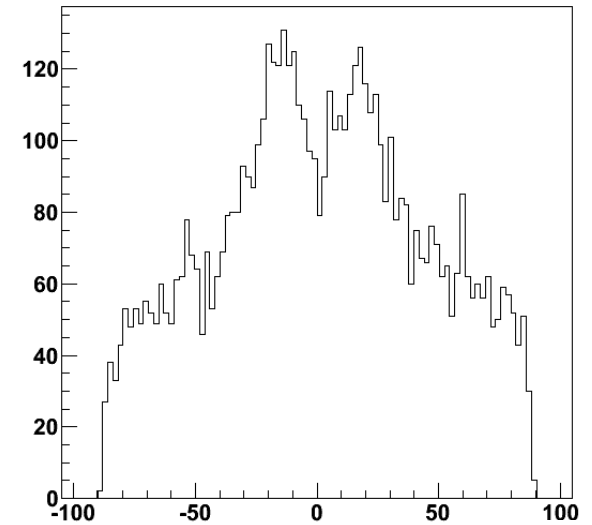
5cm以上の飛跡のみを抽出

飛跡が長い原子核は、中性子源からもらうエネルギーが大きい、つまり散乱角が小さいはずなので飛跡が長いもののみを抽出してみた。

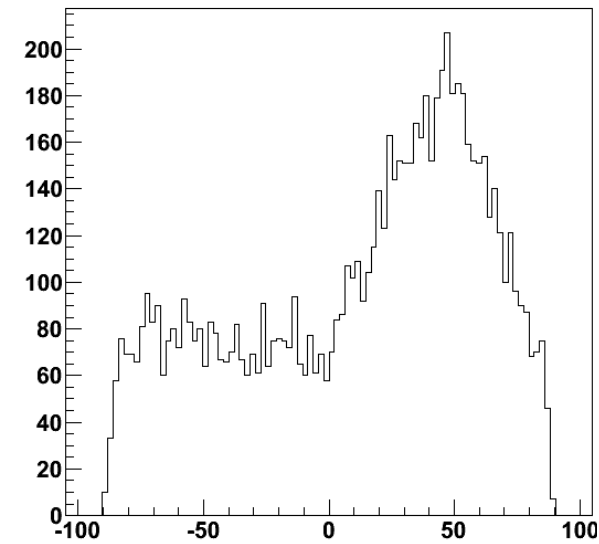


飛跡の長さによる抽出で明らかに改善されている。観測したい物質の反跳エネルギーに応じて飛跡の長さで抽出することは有効なようだ。

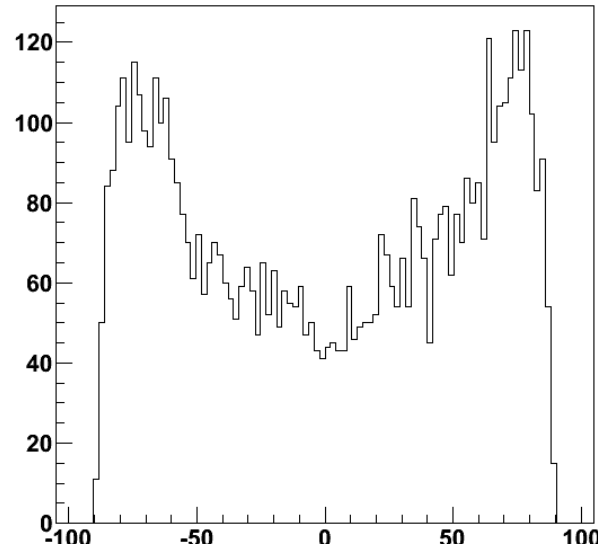
0度



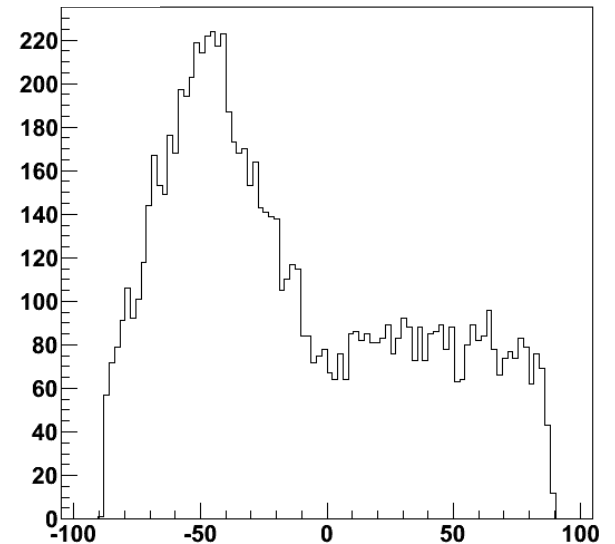
45度



90度



-45度



結論

できたこと

- ✓ μ -PICの基本的な性能評価
(大まかなGainの評価、波形取得、スペクトル取得)
- ✓ GEMの交換という貴重な体験
- ✓ 2Dイメージング
- ✓ μ -PICによる中性子の飛来方向測定

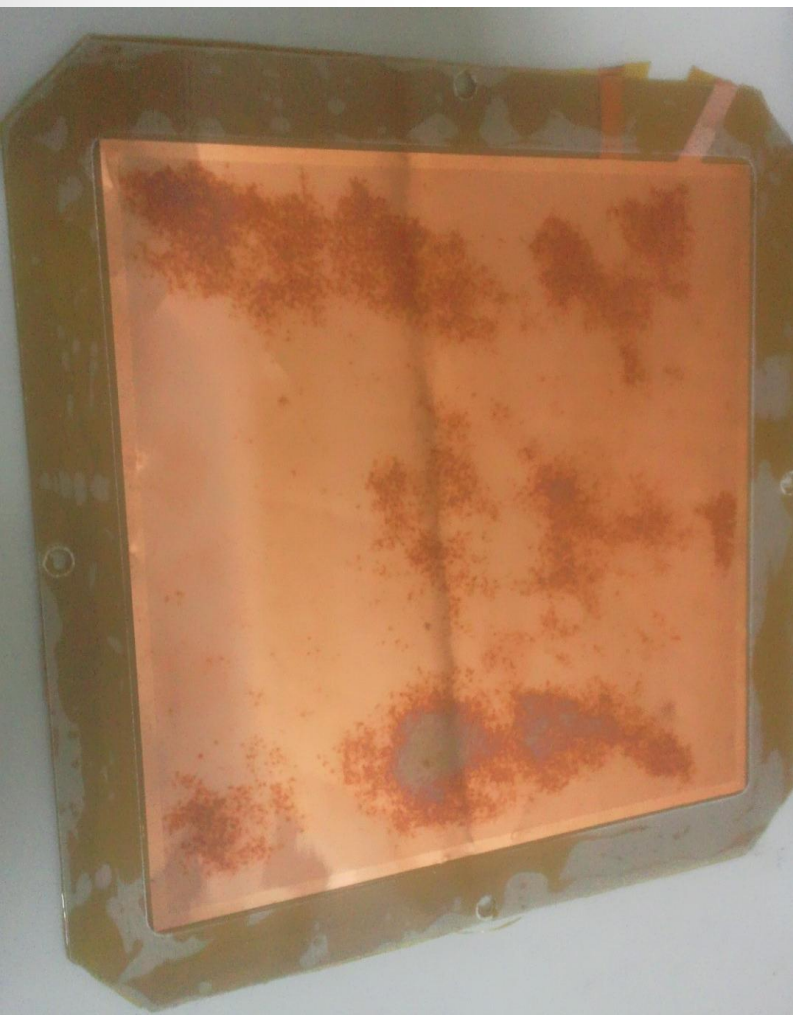
時間があればやりたかったこと

- 中性子線源とガス容器の距離と方向測定精度の関係
- 3Dトラッキング
- 中性子に反跳されたプロトンのエネルギー測定
- 0度、90度付近での角度分布の対処

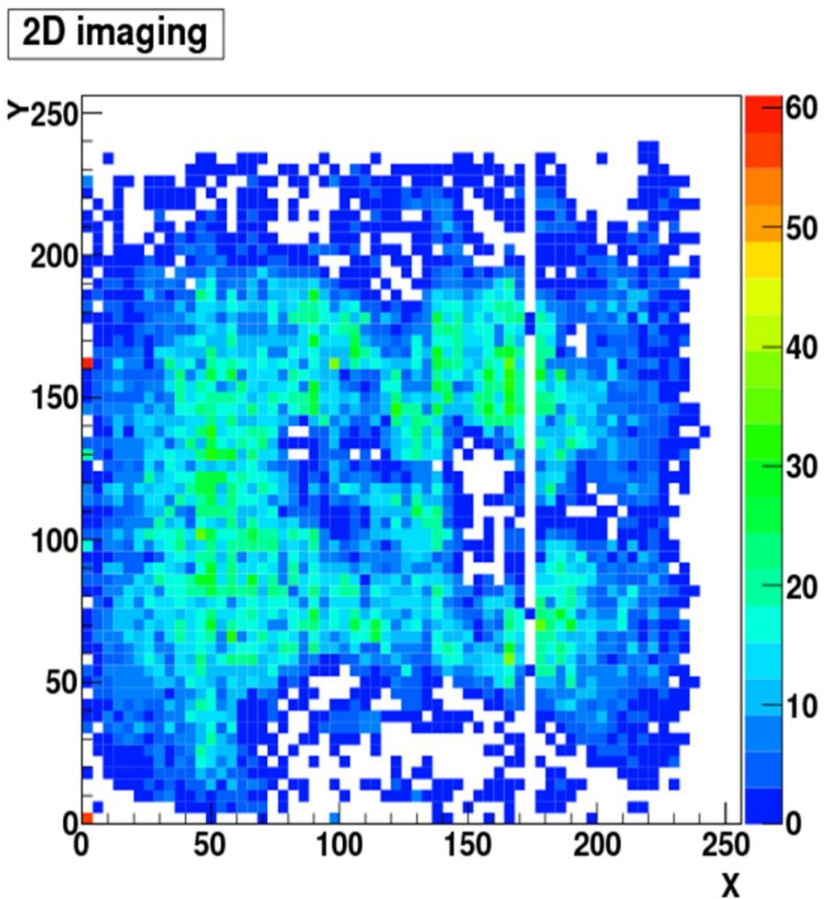
おまけ

...

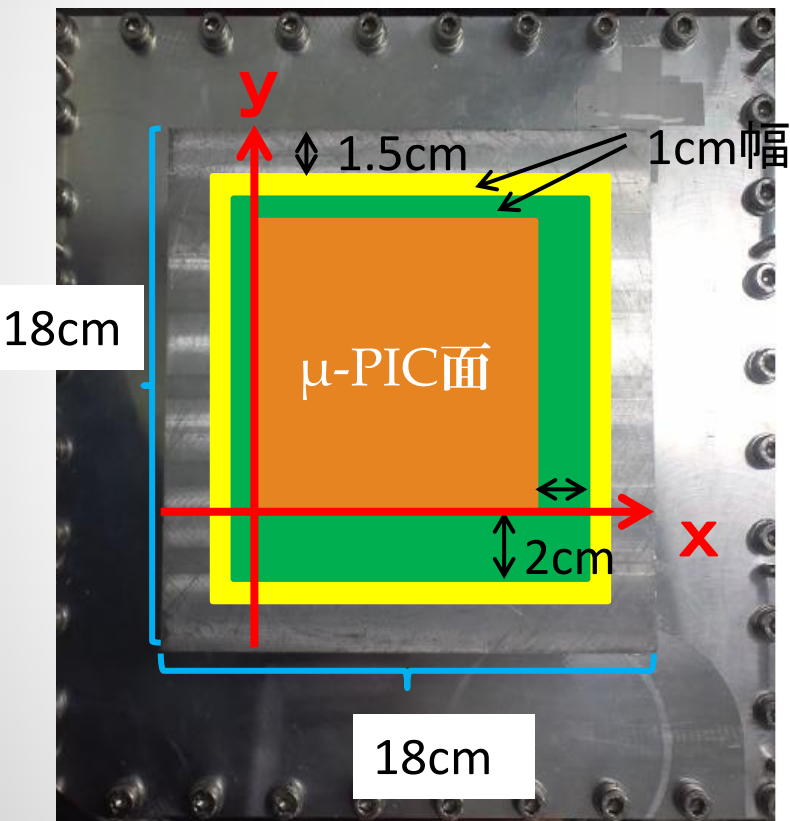
取り出した旧GEM



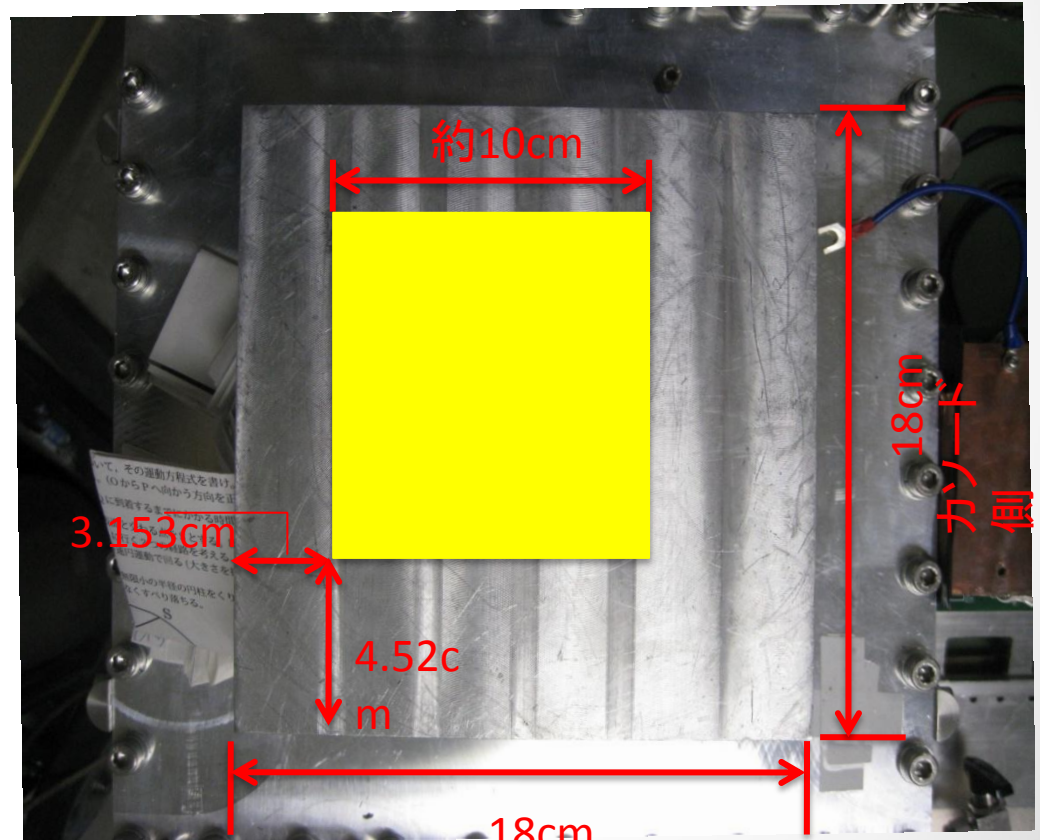
去年度の栗本さん、松岡さんの班による
2Dイメージング



去年度の栗本さん、松岡さんの班による μ -PICの位置の調査



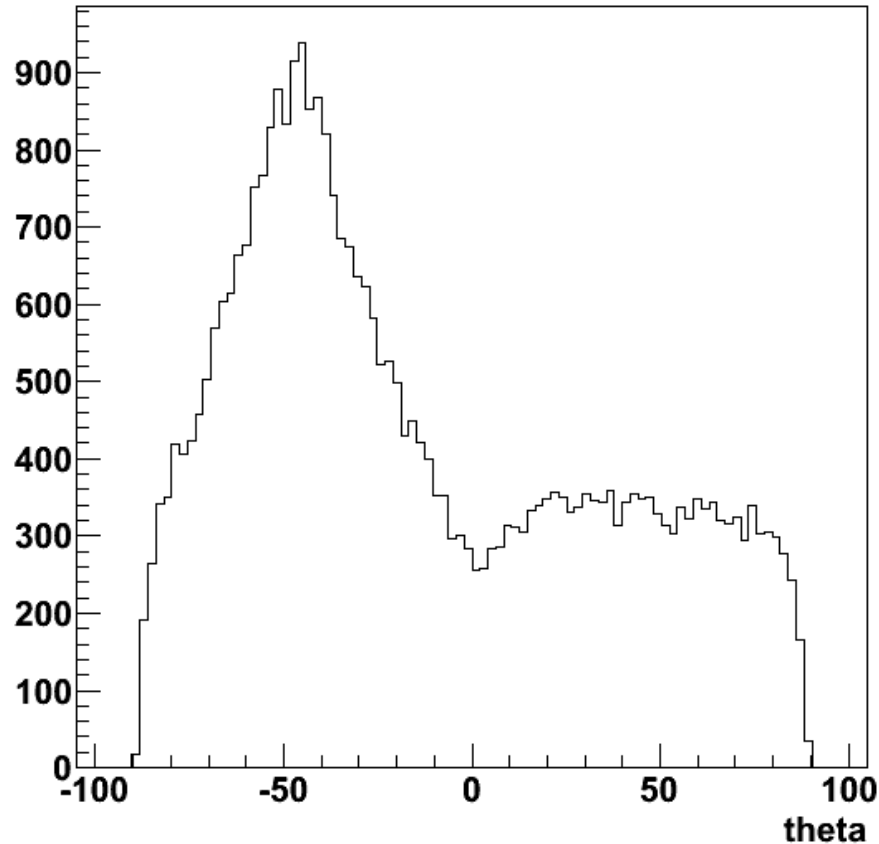
Anode



18cm
アノード側

件数をかなり多くして計測してみた

-45度



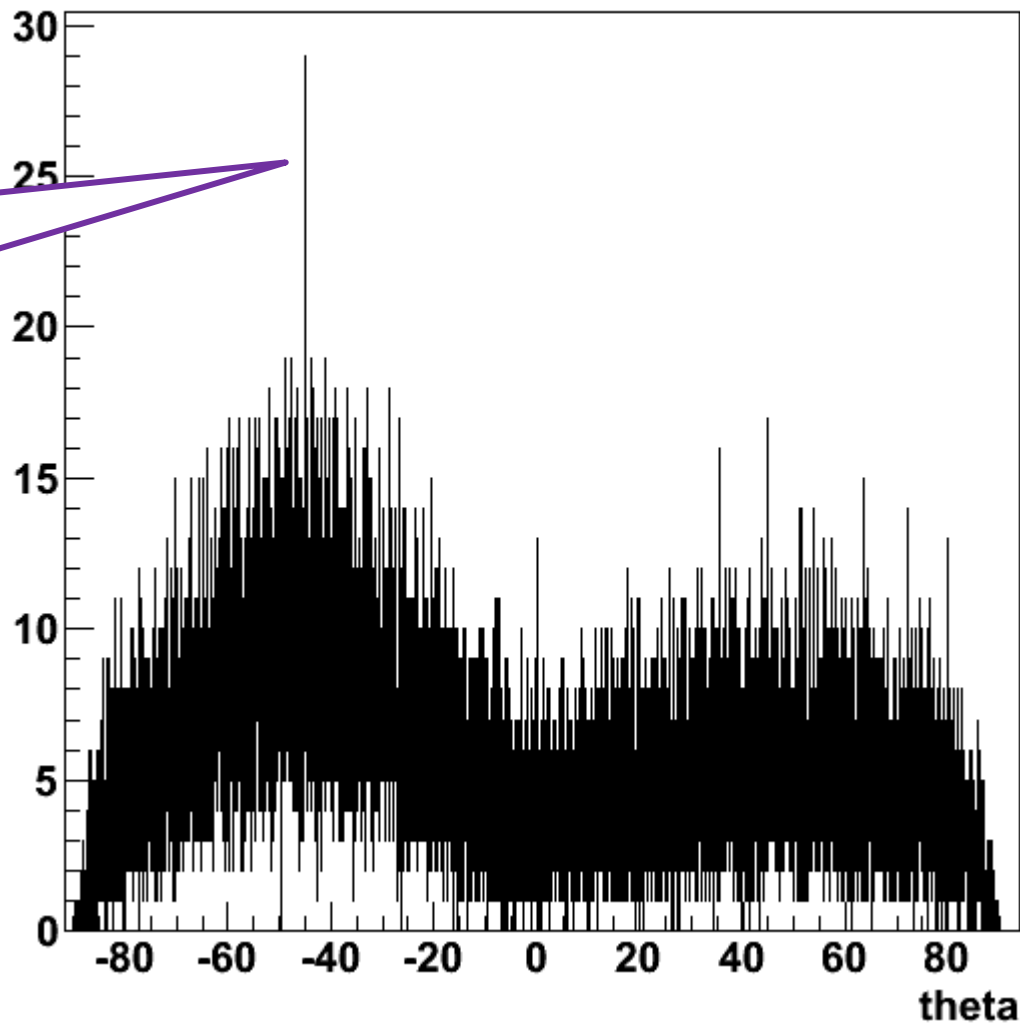
飛跡の距離による抽出済み

きれいだけど、時間の関係で他の角度は計測できず...

BINを細かくしてみた

45度

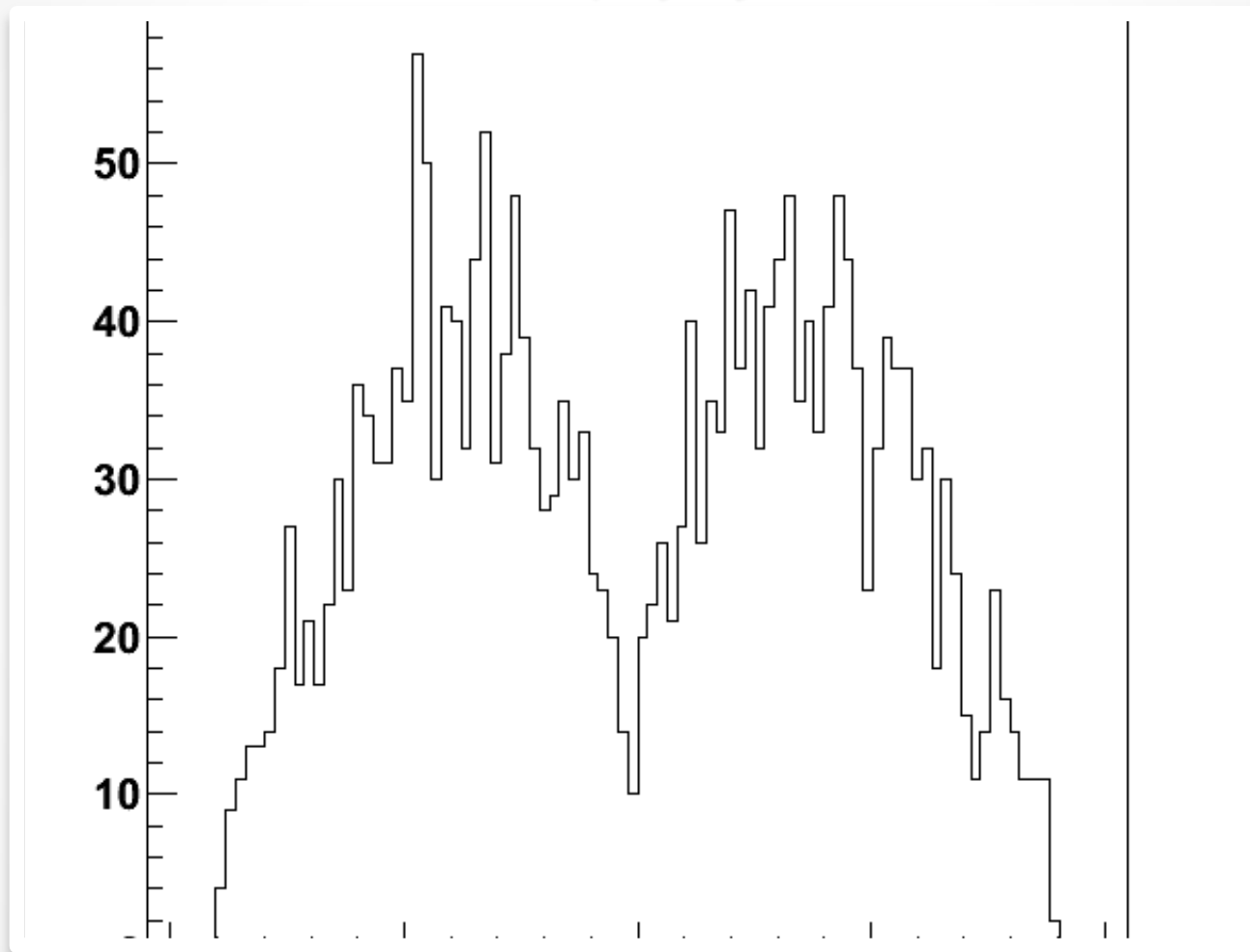
ぴったり
45度です



プロトンのエネルギーとアルゴン中の飛跡の長さの関係

Ion Energy	dE/dx Elec.	dE/dx Nuclear	Projected Range	Longitudinal Straggling	Lateral Straggling
1.00 MeV	1.491E-01	1.040E-04	24.37 mm	1.24 mm	1.66 mm
1.10 MeV	1.413E-01	9.592E-05	28.21 mm	1.41 mm	1.89 mm
1.20 MeV	1.336E-01	8.911E-05	32.26 mm	1.58 mm	2.13 mm
1.30 MeV	1.270E-01	8.326E-05	36.54 mm	1.76 mm	2.38 mm
1.40 MeV	1.213E-01	7.818E-05	41.02 mm	1.93 mm	2.64 mm
1.50 MeV	1.161E-01	7.372E-05	45.72 mm	2.11 mm	2.90 mm
1.60 MeV	1.114E-01	6.977E-05	50.62 mm	2.29 mm	3.18 mm
1.70 MeV	1.071E-01	6.624E-05	55.72 mm	2.47 mm	3.47 mm
1.80 MeV	1.032E-01	6.308E-05	61.02 mm	2.66 mm	3.77 mm
2.00 MeV	9.631E-02	5.763E-05	72.21 mm	3.23 mm	4.39 mm
2.25 MeV	8.904E-02	5.208E-05	87.27 mm	4.04 mm	5.22 mm
2.50 MeV	8.294E-02	4.756E-05	103.49 mm	4.82 mm	6.11 mm
2.75 MeV	7.772E-02	4.380E-05	120.87 mm	5.60 mm	7.04 mm
3.00 MeV	7.320E-02	4.062E-05	139.36 mm	6.37 mm	8.03 mm

平均距離0.2mm以下のみ抽出した ヒストグラム



飛跡の距離による抽出が有効であることがわかる。

おわり

予備スライド

...

エネルギースペクトルの式

原子核との散乱は、弾性散乱を仮定

$$E_R = E \frac{4M_D M_N}{(M_D + M_N)^2} \frac{1 - \cos\theta}{2}$$

=rとおく

$$dR = \frac{N_0}{A} \sigma v dn$$

速度分布は、ボルツマン分布を仮定

$$= R_0 \frac{k_0}{k} \frac{1}{2\pi v_0^4} \int v f(v, v_E) d^3 v$$

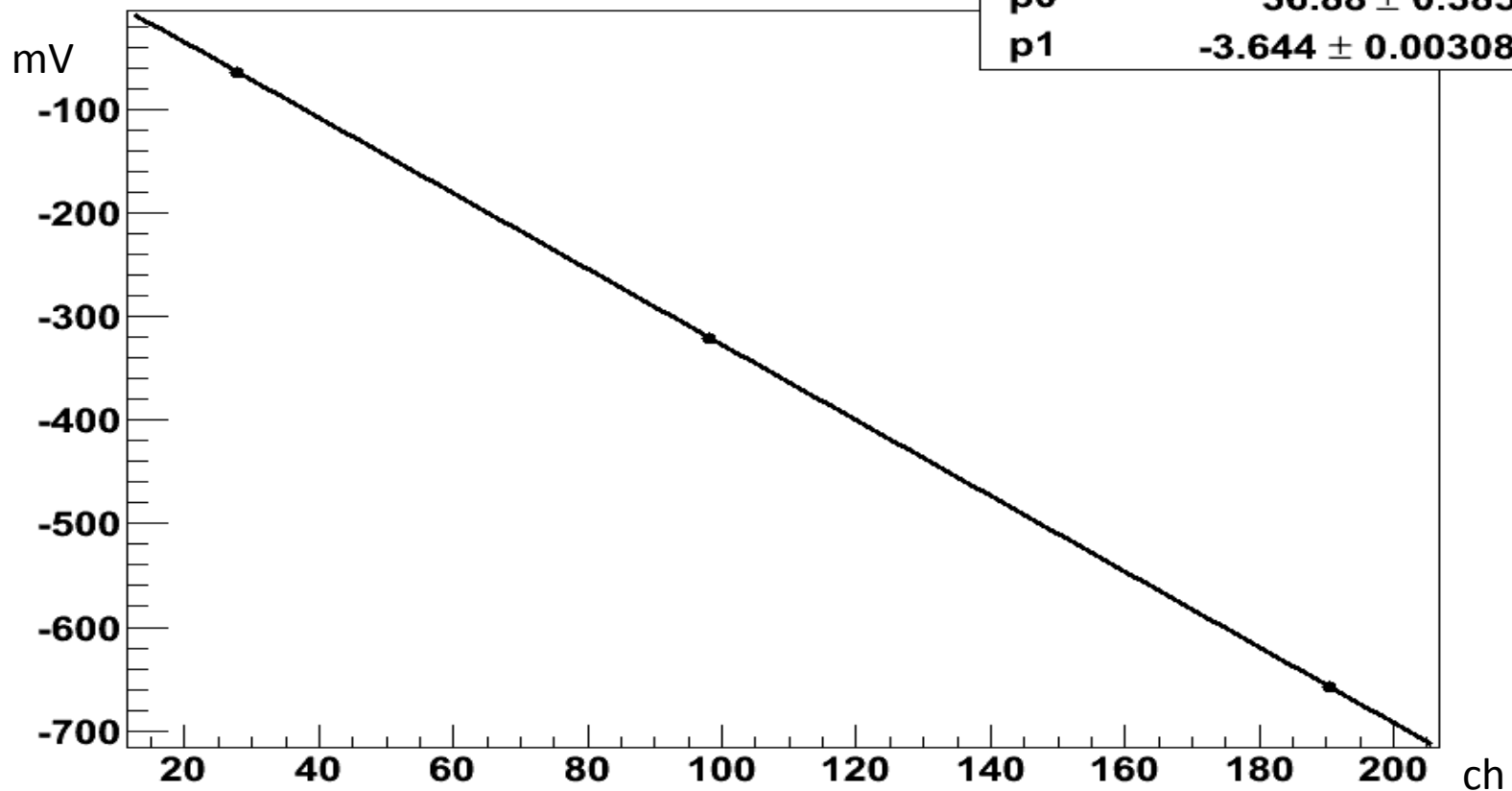
エネルギースペクトル

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dE_R} &= \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{1}{Er} dR(E) \\ &= \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{v_0^2}{v^2} dR(v) \\ &= \frac{R_0}{E_0 r} \frac{k_0}{k} \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{1}{v} f(v, v_E) d^3 v \\ &= \frac{R_0}{E_0 r} e^{-E_R/E_0 r} \end{aligned}$$

R	係数率	v_E	検出器とWIMPの相対速度
E_R/E	反跳エネルギー/WIMPの運動エネルギー	M_D/M_N	WIMP/標的原子核の質量
E_{max}	実験室系でのWIMPの運動エネルギーの最大値	k	規格化定数
E_{min}	標的原子核にエネルギーを渡すことのできる最小エネルギー	σ	反応断面積
E_0	$v=v_0$ の時のWIMPの運動エネルギー	A	標的原子核の原子量
v	WIMPの速度	N_0	アボガドロ数
v_0	WIMPの中心速度		

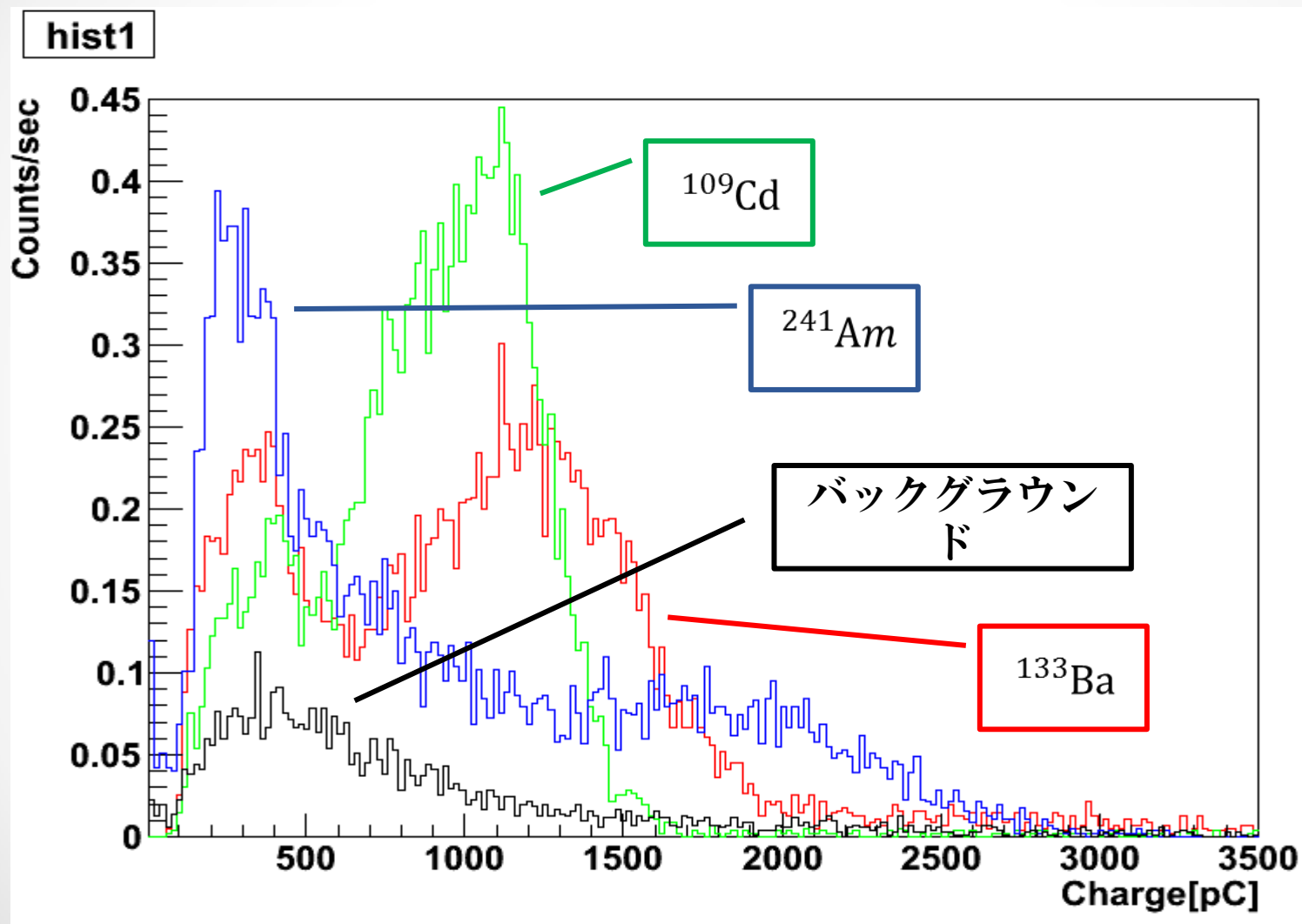
FADCの電圧較正

Graph



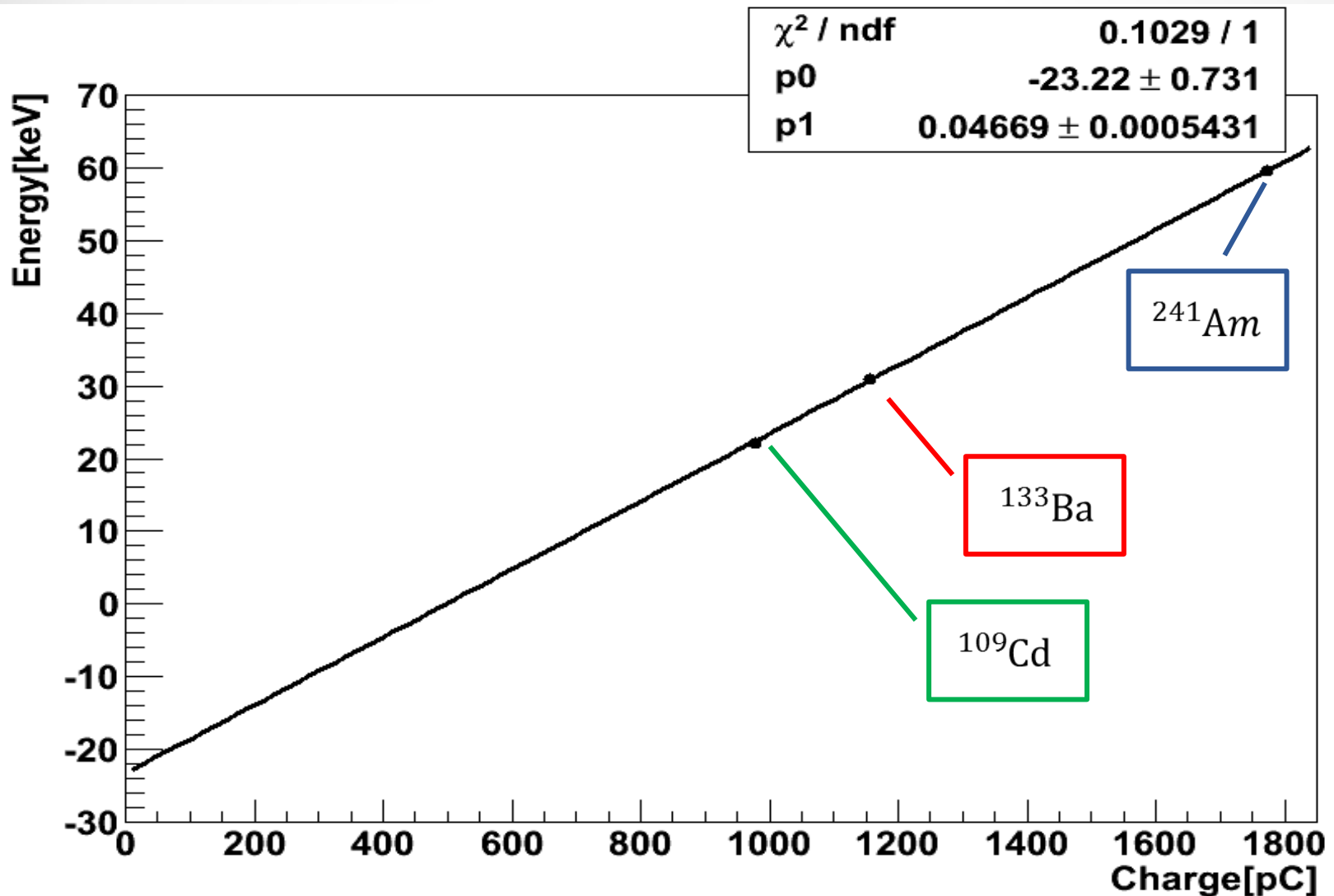
ch0の測定結果

それぞれの線源のスペクトルを取得



● Drift top; -3217V , GEM T; -760V , GEM B ; -300V , Anode ; 460Vで測定 ●

キャリブレーション



● Drift top; -3217V , GEM T; -760V , GEM B ; -300V , Anode ; 460Vで測定 ●

Gainの計算

Drift top;-3217V ,GEM T;-760V ,GEM B ;-300V ,Anode ;460Vの場合

Ar + C ₂ H ₆ のW値	23.6eV
エネルギーと電荷の比例定数	0.047keV/pC
素電荷量	1.6 × 10 ⁻⁷ pC

を用いると、全体の増幅率は

$$\frac{1}{0.047} [pC/keV] \times \frac{23.6 \times 10^{-3} [keV]}{1.6 \times 10^{-7} [pC]} = 3.14 \times 10^6$$

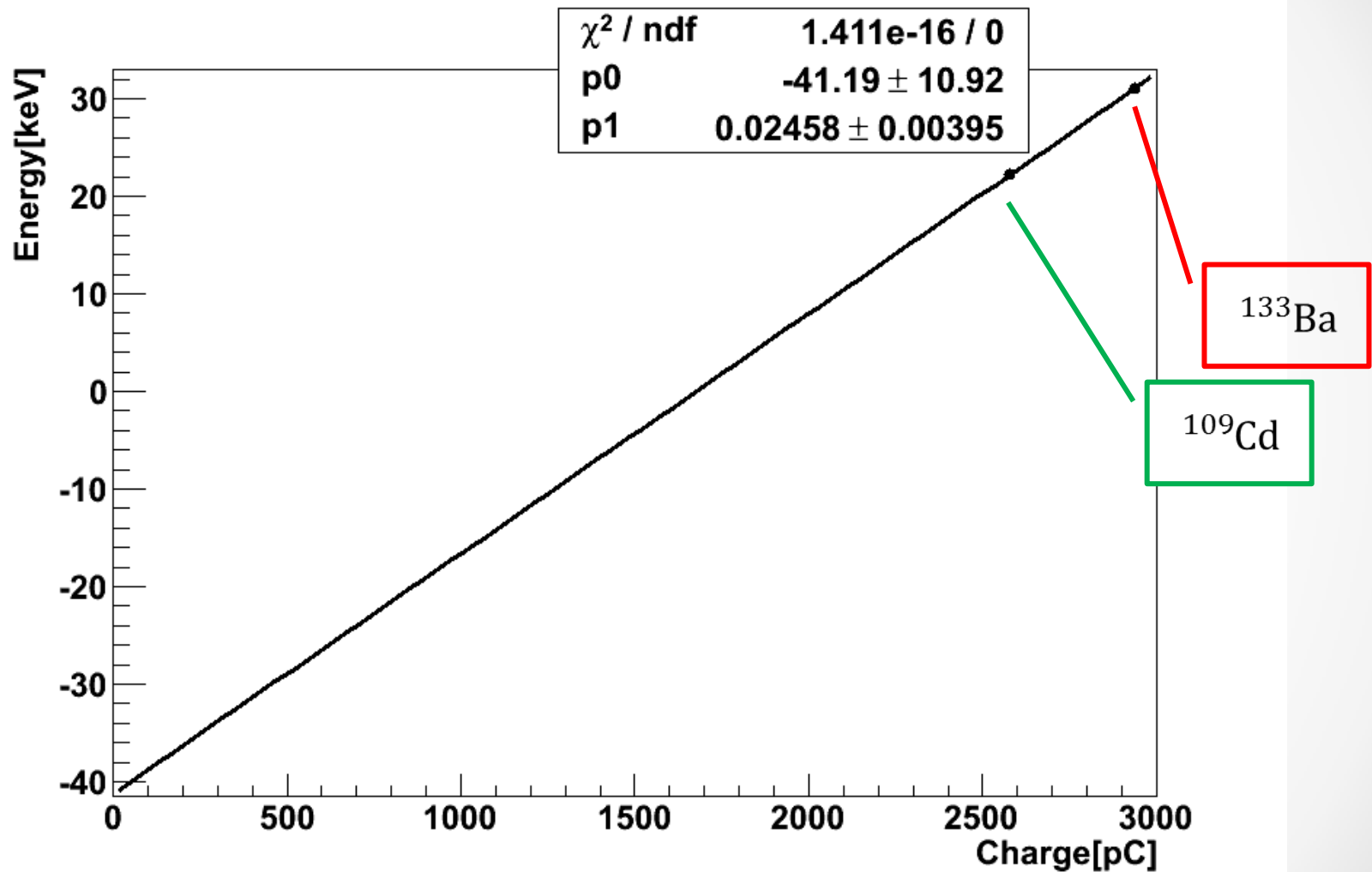
となる。

ASDの増幅率を160(既知)とすると、μ-PICとGEMの増幅率は

$$\frac{3.14 \times 10^6}{160} = 1.96 \times 10^4$$

よって、μ-PICとGEMの増幅率の合計は約20000倍である。

キャリブレーション



● Drift top; -3217V , GEM T; -800V , GEM B ; -300V , Anode ; 460Vで測定 ●