

偏極線を用いた Mott散乱による Parity対称性の検証

2004年度 P2 *Mott*グループ

太田 楽原 新宅 西村

2005年6月4日

目的

- 放電しない電極を作る
- 電極により電子のエネルギーを選択する
- 真空を保ったままtargetを操作する
- Mott散乱を確認する
- 前方散乱、後方散乱を捉える
- Parityについて調べる
- 無事生還する

Parity変換とは

$$\begin{aligned}
 P: x^\mu &\rightarrow \Gamma^\mu{}_\nu x^\nu \\
 P: &\rightarrow P \\
 P: \bar{} &\rightarrow \bar{} P^{-1}
 \end{aligned}
 \quad
 \Gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$P^{-1} \gamma^\mu P = \Gamma^\mu{}_\nu \gamma^\nu = (\gamma^0, -\gamma^1, -\gamma^2, -\gamma^3)^t$$

この時、vectorとaxial vectorは次のように変換される

$$\begin{aligned}
 \bar{} \gamma^\mu &\rightarrow \Gamma^\mu{}_\nu \bar{} \gamma^\nu & \bar{} \gamma^5 \gamma^\mu &\rightarrow -\Gamma^\mu{}_\nu \bar{} \gamma^5 \gamma^\nu \\
 \text{vector} && \text{axialvector} &
 \end{aligned}$$

Parity - +

Lagrangianにこの2つの縮約が含まれるとき、
Parity正(VV, AA)、負(VA)が混合する

Mott散乱測定の設定

x-y平面 : target平面上、
電極槽に固定

y軸 : 電子の軌道平面上、
電子の初速度はy正の向き

$= 65^\circ \pm 16^\circ$ 、 $= 14^\circ$ で設置

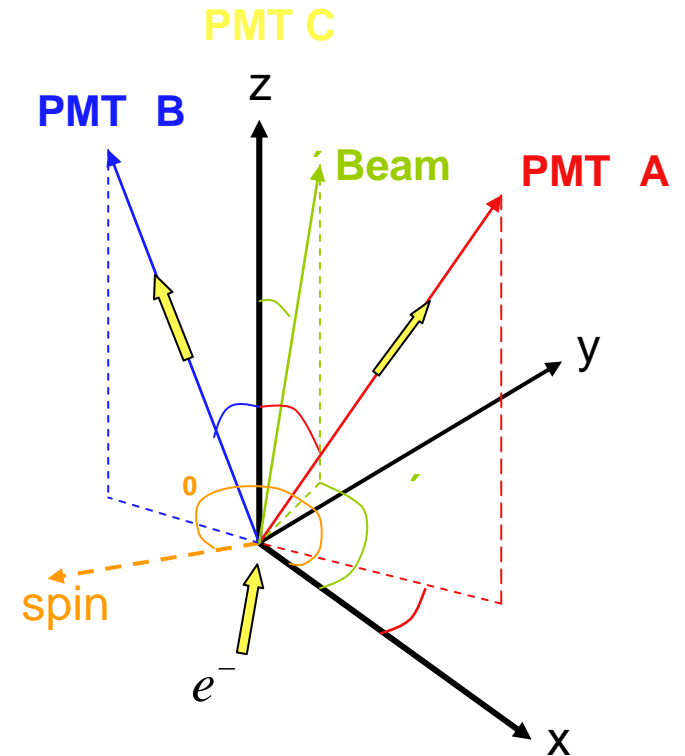
$= 22.5n^\circ$ ($0 \leq n \leq 14$) が可能

理想的には $\theta = 0^\circ$, $\phi = 90^\circ$

この時 Mott散乱では

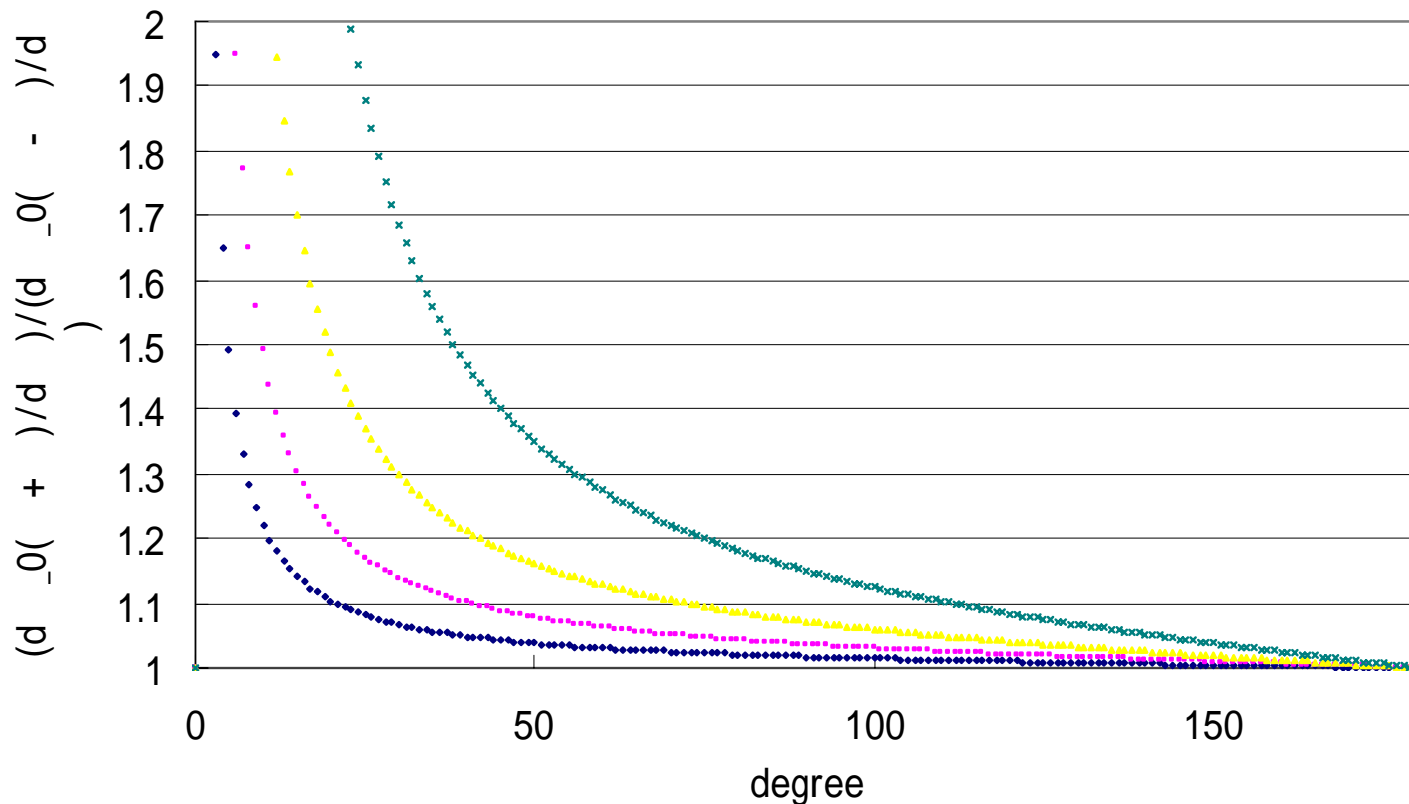
$\text{count} @(\theta, \phi) > \text{count} @(\theta, 0)$ となるはず

ビームのずれはどの程度影響してくるのか？



ビーム入射角のずれ θ による左右の微分断面積の比

下から順に $\theta = 0.25, 0.5, 1, 2$

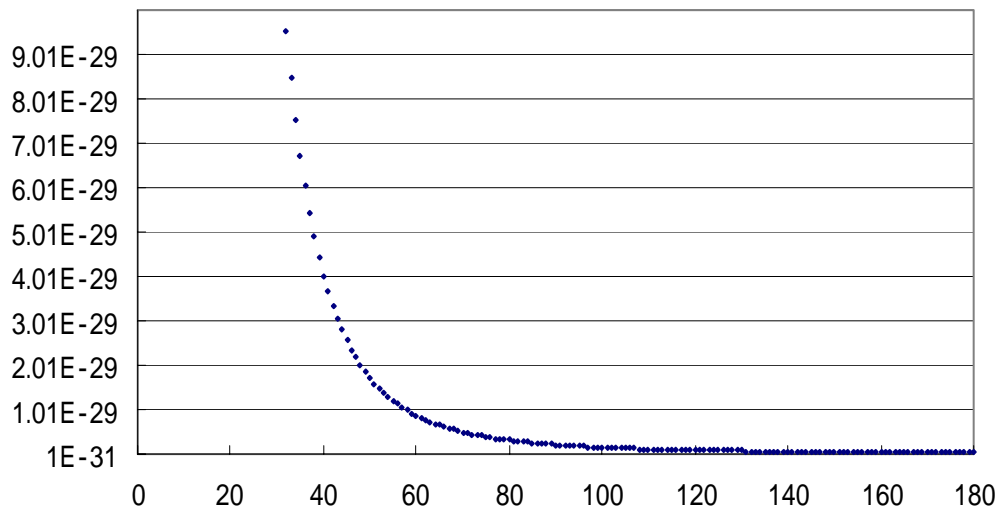


z 軸からのずれ θ が
($\theta = 65^\circ$)

θ	比
0.25	1.028
0.5 °	1.056
1 °	1.116
2 °	1.245

Rutherford散乱の断面積

$$\frac{d\sigma_0(\theta)}{d\Omega} = \frac{(Z\alpha m)^2}{4\vec{p}^4 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$



電磁場を含むDirac方程式

$$(\gamma^\mu (i\partial_\mu - qA_\mu) - m)\psi = 0 \quad \left(\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu} \right)$$

で、spinと相対論を考慮して散乱を考えると

Mott散乱の微分断面積

$$\frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega} = \frac{Z^2 \alpha^2 m^2}{4p^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} [1 - PS(\theta) \sin(\phi - \phi_0)] \quad \phi_0 : P \text{の偏極方向}$$

$$= \frac{d\sigma_0(\theta)}{d\Omega} [1 + \beta S(\theta) \sin(\phi - \phi_0)]$$

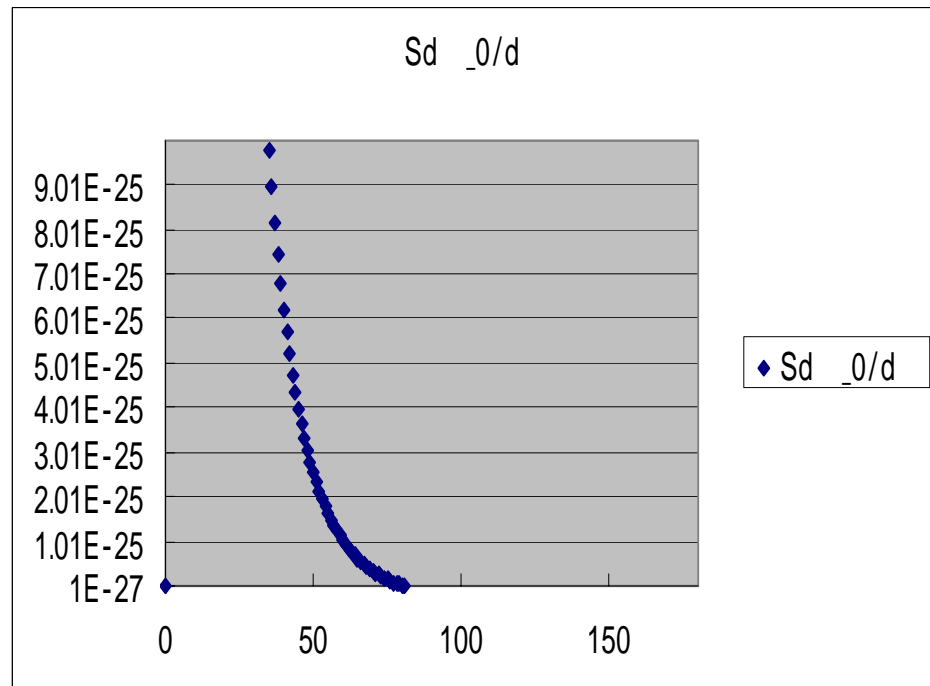
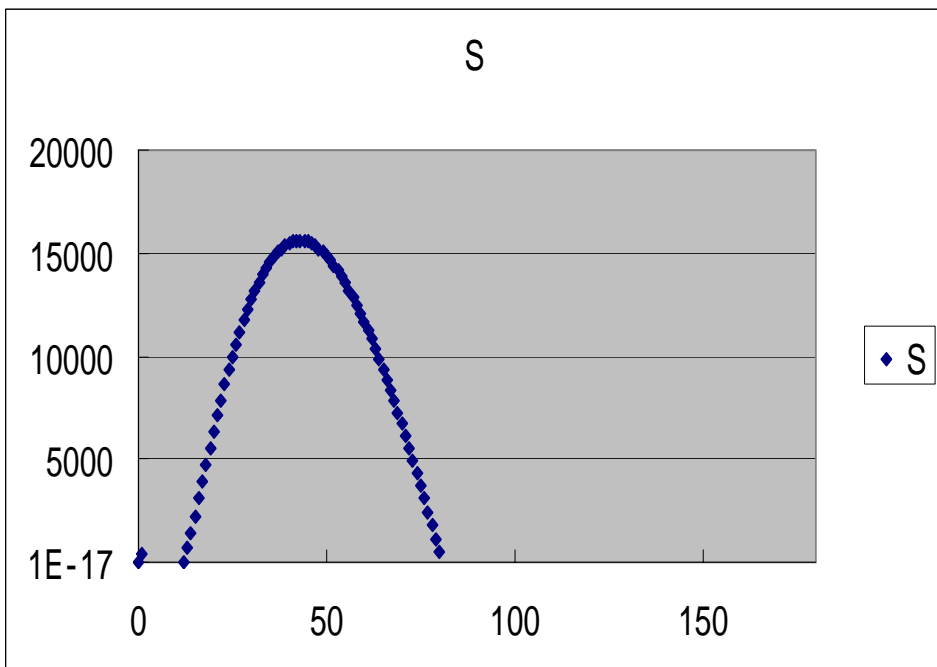
$$S(\theta) = \frac{\lambda^2 Z \alpha}{\beta \gamma \sin \theta \frac{d\sigma_0(\theta)}{d\Omega}} \{F(\theta)G^*(\theta) + F^*(\theta)G(\theta)\} \quad q \equiv \frac{Z\alpha}{\beta}$$

$$F(\theta) = \frac{i}{2} \frac{\Gamma(1-iq)}{\Gamma(1+iq)} \exp\left(iq \ln \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) + \frac{i}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [kD_k + (k+1)D_{k+1}] (-1)^k P_k(\cos \theta)$$

$$G(\theta) = \frac{q}{2} \cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{\Gamma(1-iq)}{\Gamma(1+iq)} \exp\left(iq \ln \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) + \frac{i}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [k^2 D_k - (k+1)^2 D_{k+1}] (-1)^k P_k(\cos \theta)$$

$$D_k = \frac{e^{-i\pi k}}{k+iq} \frac{\Gamma(k-iq)}{\Gamma(k+iq)} - \frac{e^{-i\pi\rho_k}}{\rho_k+iq} \frac{\Gamma(\rho_k-iq)}{\Gamma(\rho_k+iq)} \quad \rho_k = (k^2 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}}$$

近似によるMott散乱の微分断面積



Sの角度依存

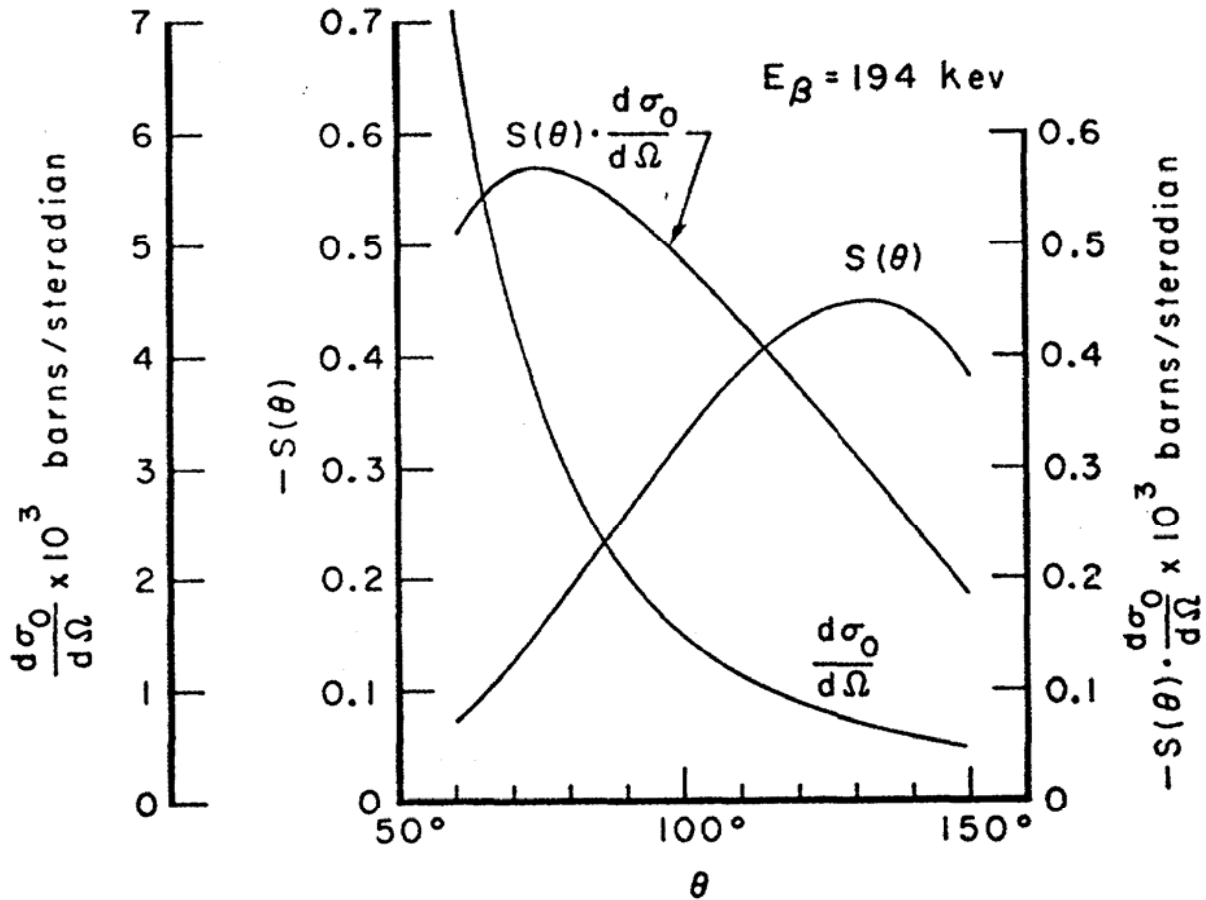
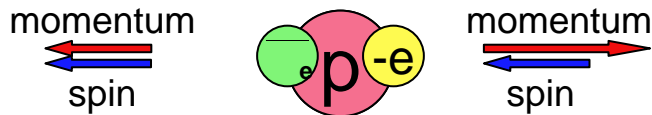
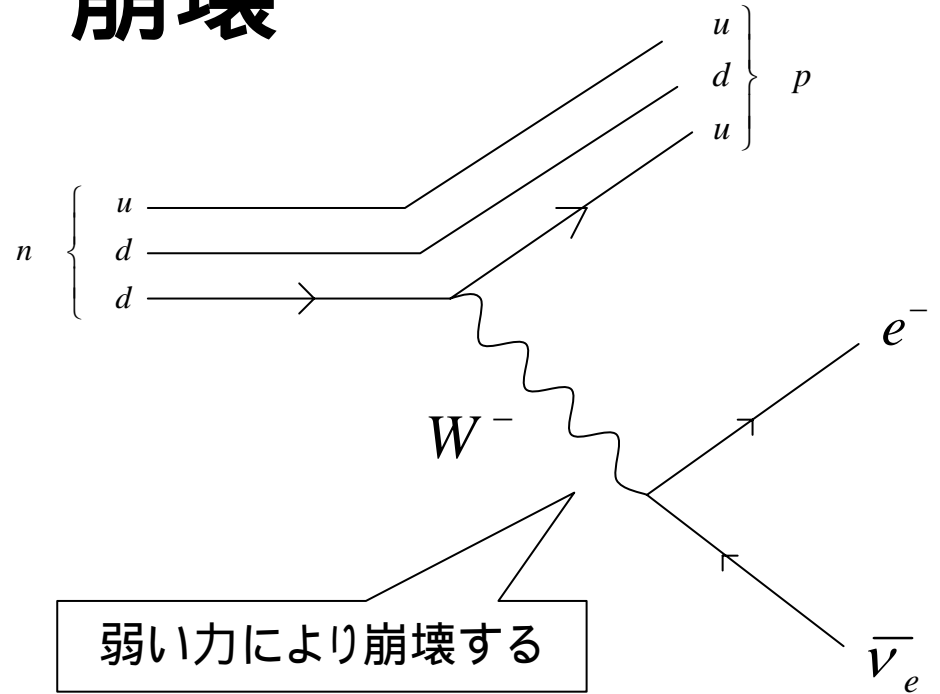


FIG. 3. The asymmetry function $S(\theta)$, and the differential cross section $d\sigma_0(\theta)/d\Omega$ plotted as a function of polar scattering angle θ , for a Au scatterer ($Z=79$) and electron energy $E_\beta=194$ keV.

崩壊

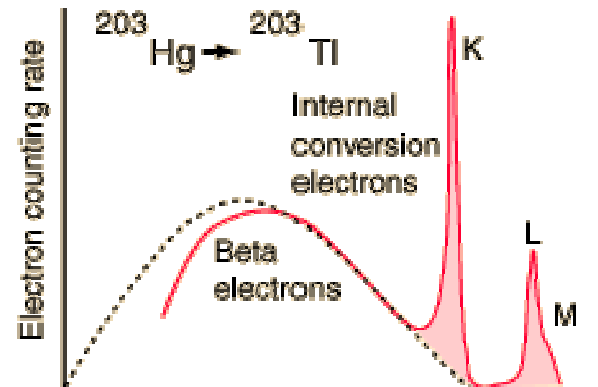
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

反ニュートリノは(質量0ならば)
helicity = +1/2 の 右巻き粒子



電子は運動方向に偏極している
(縦偏極)

Sourceからの 線のうち、
偏極している電子を用いたい



Electron emissions from the Hg-203 to Tl-203 decay, measured by A. H. Wapstra, et al., Physica 20, 169 (1954).

崩壊での偏極

偏極度

$$P \equiv \frac{N(\uparrow) - N(\downarrow)}{N(\uparrow) + N(\downarrow)}$$

Lagrangian密度の相互作用項(崩壊)

$$L_{\text{int}} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} j_\mu^\dagger j^\mu \quad (j^\mu = \bar{e} \gamma^\mu (1 + \alpha \gamma^5) \nu + \bar{p} \gamma^\mu (1 + \alpha \gamma^5) n)$$

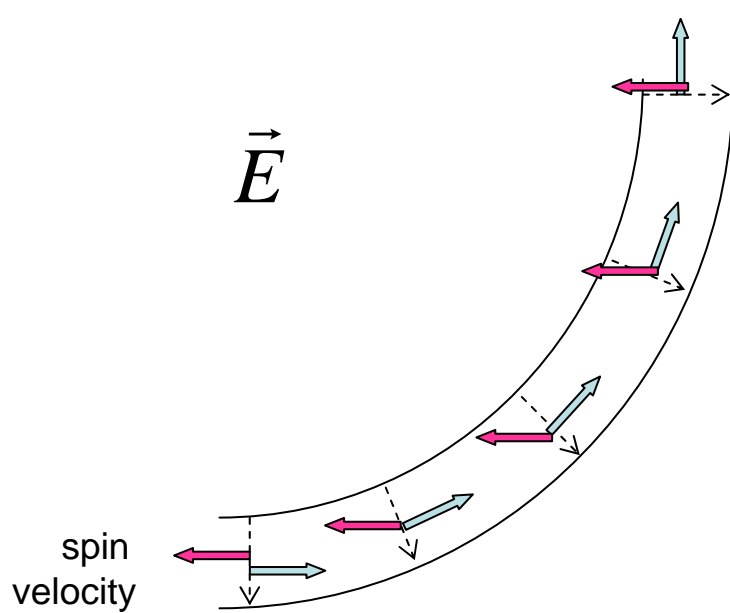
縦偏極

$$P = \frac{\alpha + \alpha^*}{1 + |\alpha|^2} \beta$$

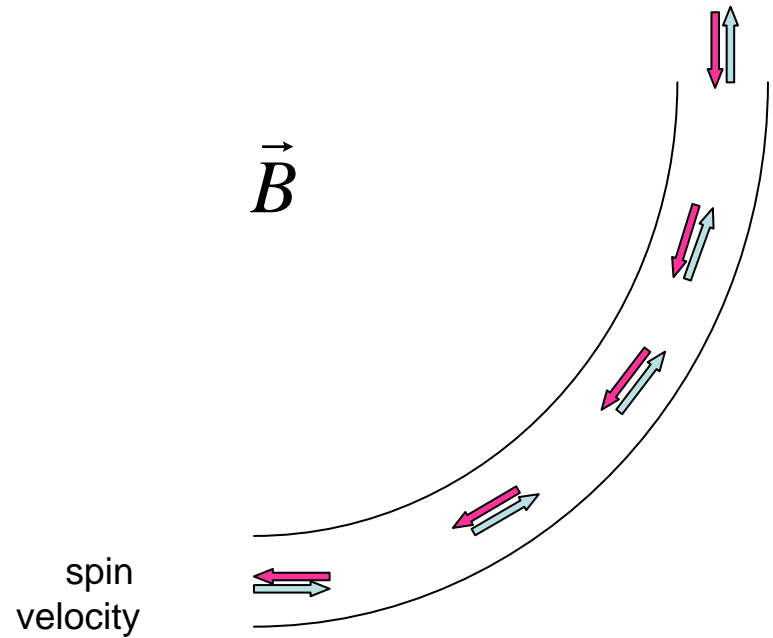
V - A 型 current ($\alpha = -1$) の場合、 $P = -\beta$

電磁場中でのspinの変化

非相対論的な場合



電場中の電子の運動



磁場中の電子の運動

相対論を考慮すると、spinの時間変化は次のThomasの式に従う

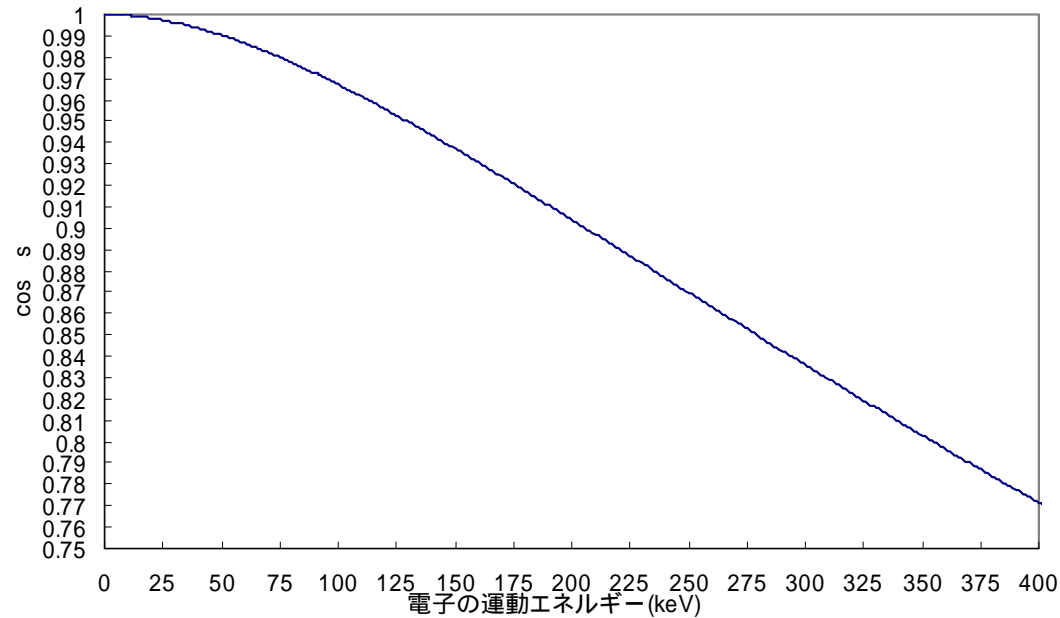
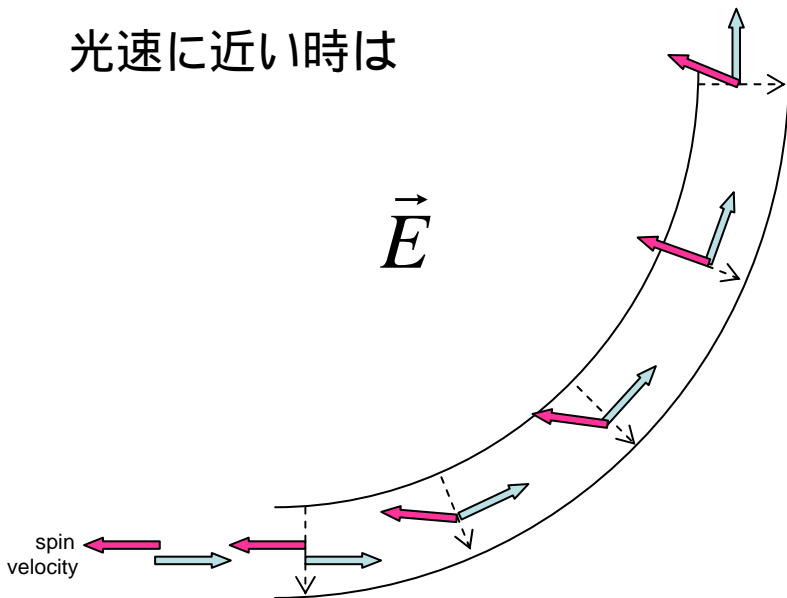
$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \frac{e\vec{s}}{mc} \times \left\{ \left(\frac{g}{2} - 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \vec{B} - \left(\frac{g}{2} - 1 \right) \frac{\gamma}{\gamma - 1} (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \vec{\beta} - \left(\frac{g}{2} - \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} \right\}$$

相対論的なspin効果

電場中では、
$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \frac{e}{mc} \frac{1}{\gamma+1} \vec{s} \times (\vec{E} \times \vec{\beta})$$

電子が90°曲がる時、運動平面上で電子の回転と逆向きに $\theta_s = \frac{\pi}{2} \frac{\gamma-1}{\gamma}$ だけspinが回転する

光速に近い時は



偏極度を補正

$$P = -\beta \Rightarrow -\beta \cos \theta_s$$

電極の設計及びそのテスト

発表の流れ

- 真空中の放電の特徴
- シミュレーション及び設計
- 問題点と解決方法
- 得られた 線のenergy

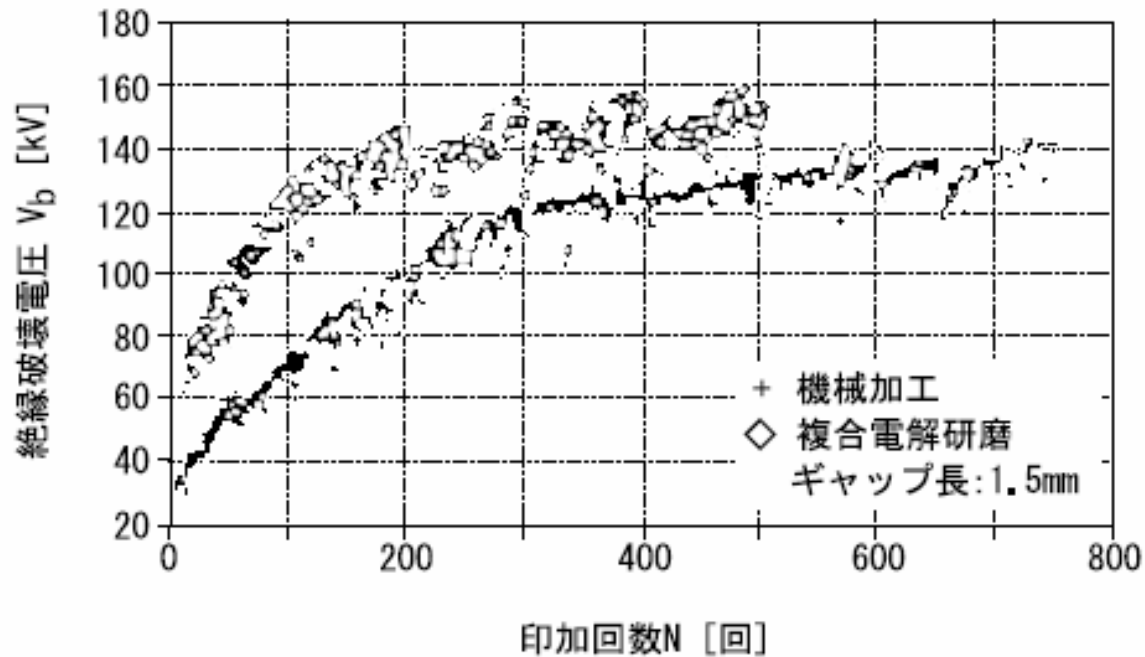
1st: 状態依存性

2nd: 材質依存性

3rd: 圧力依存性

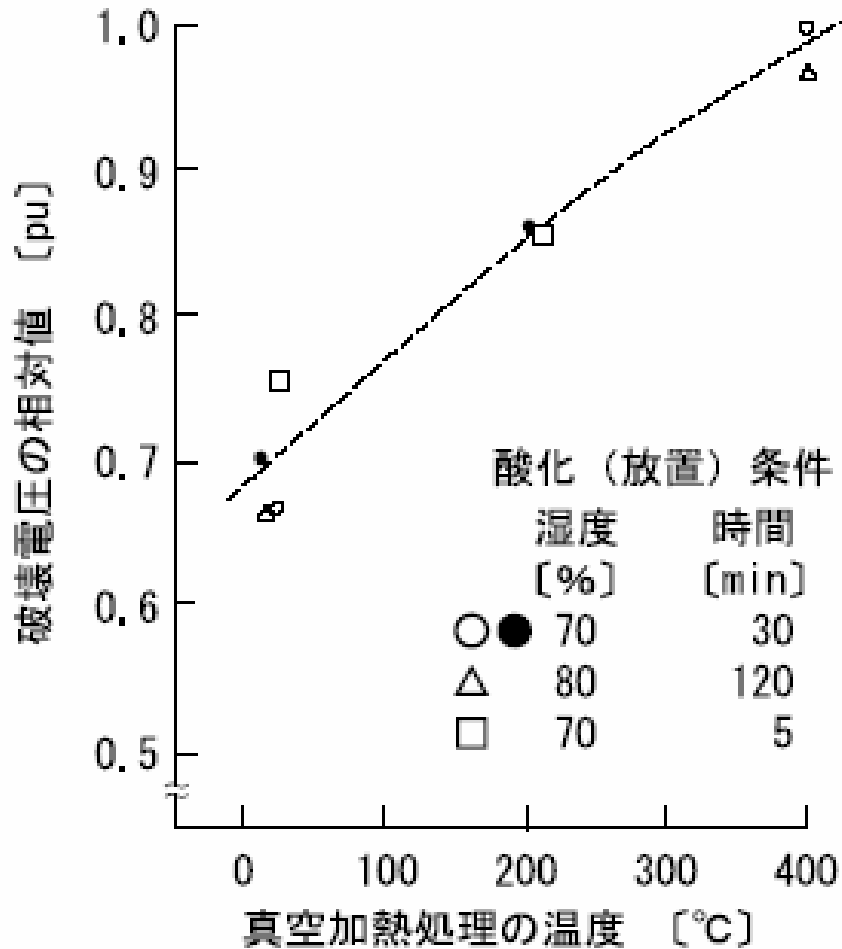
状態依存性

・金属表面の形状



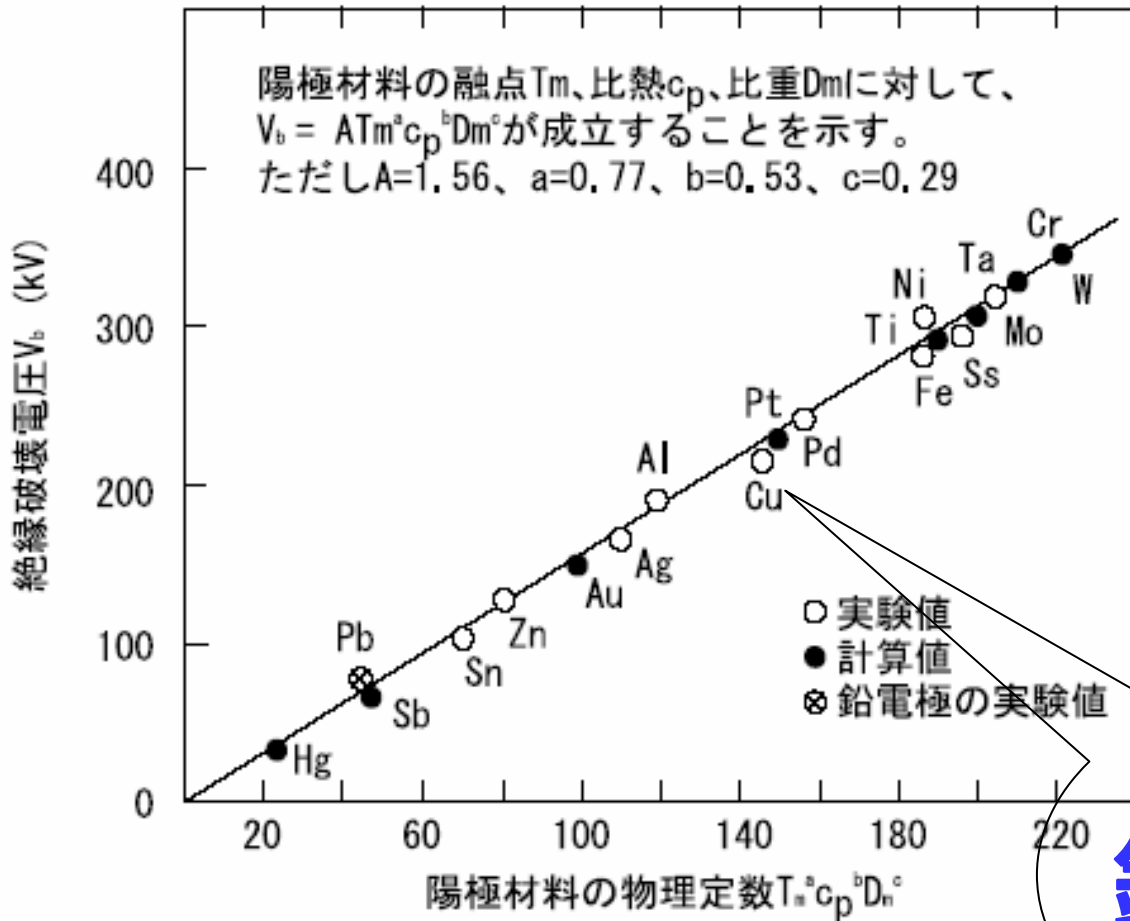
表面を削った回数と、電圧の関係

・酸化などの化学的影響



加熱によって表面の酸化皮膜を焼いたときの温度と電圧の関係

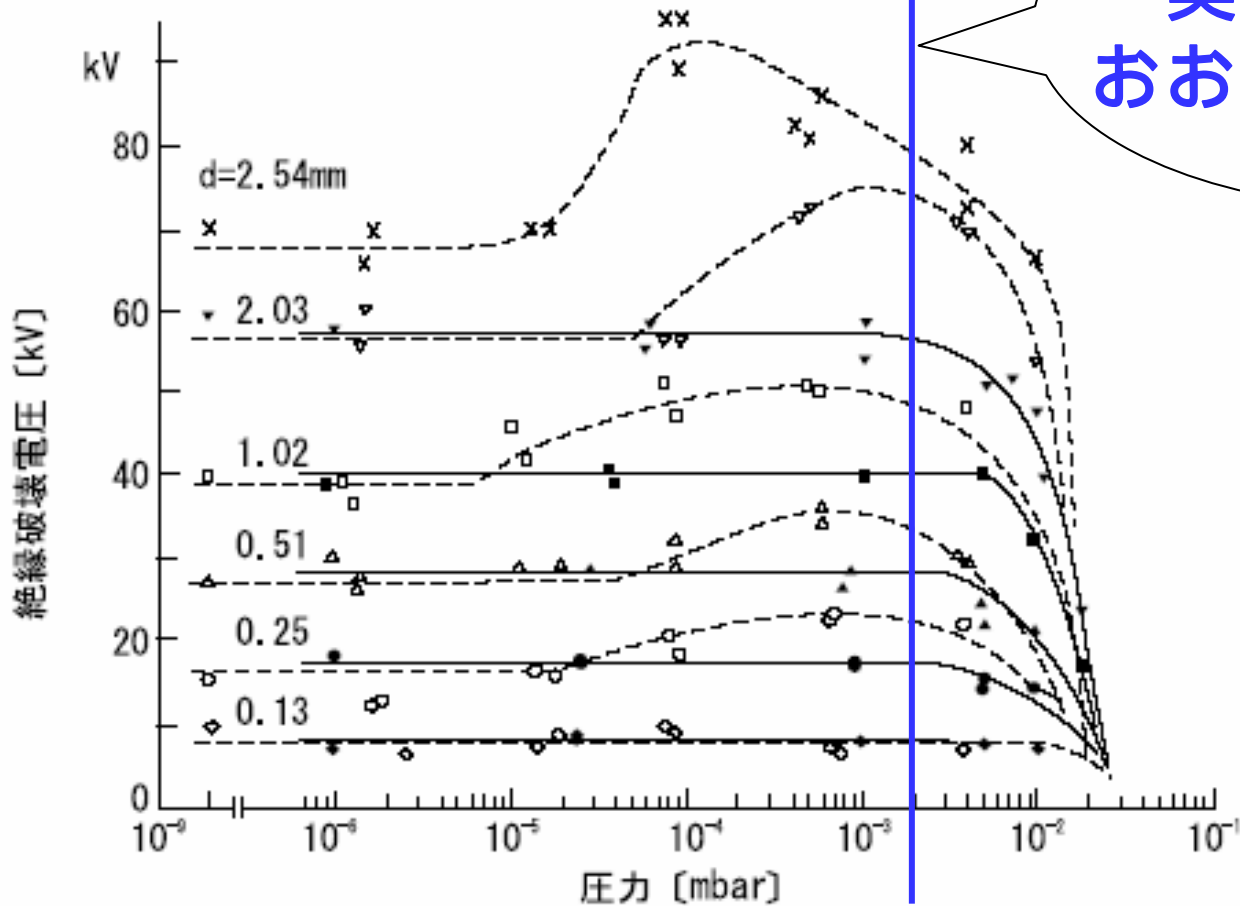
材質依存性



一般に硬度が高く
融点が高い物質の
方が、電圧を高く
かけられる

銅を使用

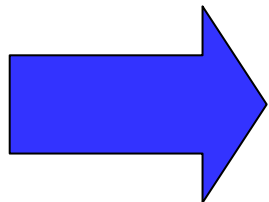
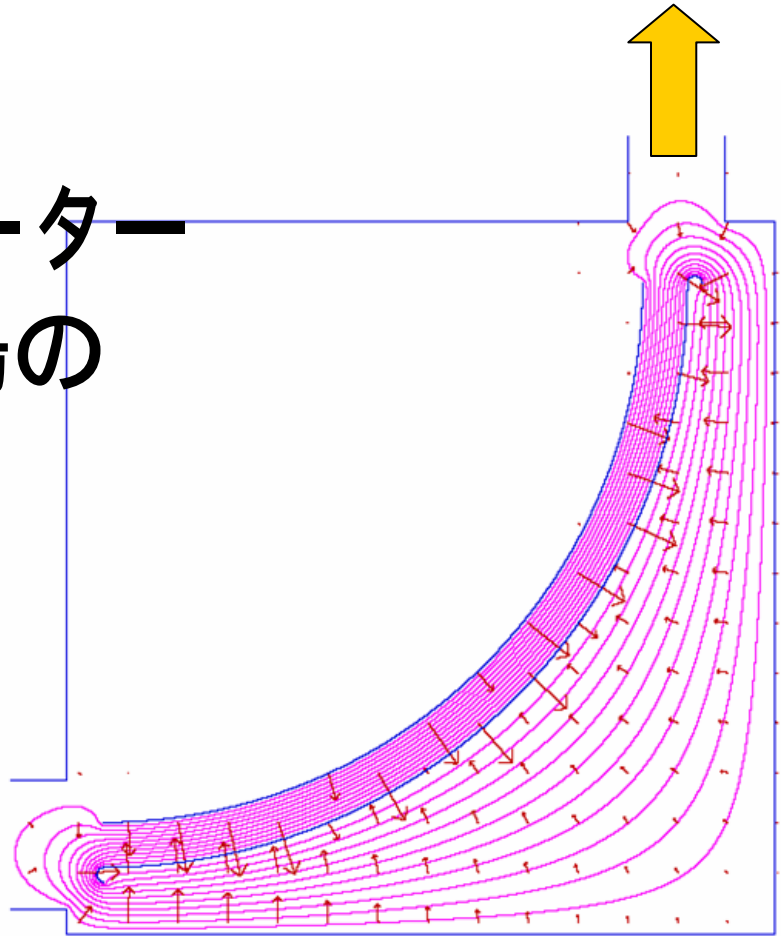
圧力依存性



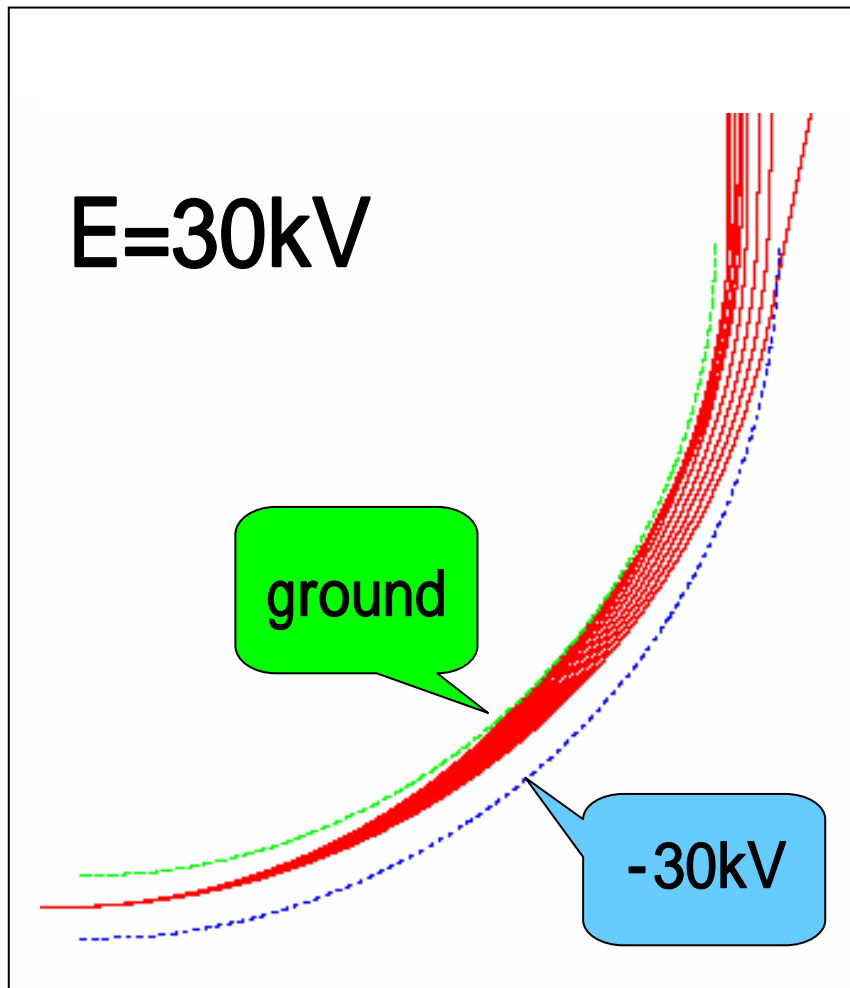
実験で行った
おおよその真空値

2次元電場シミュレーター
poissonにより、電場の
データを作った

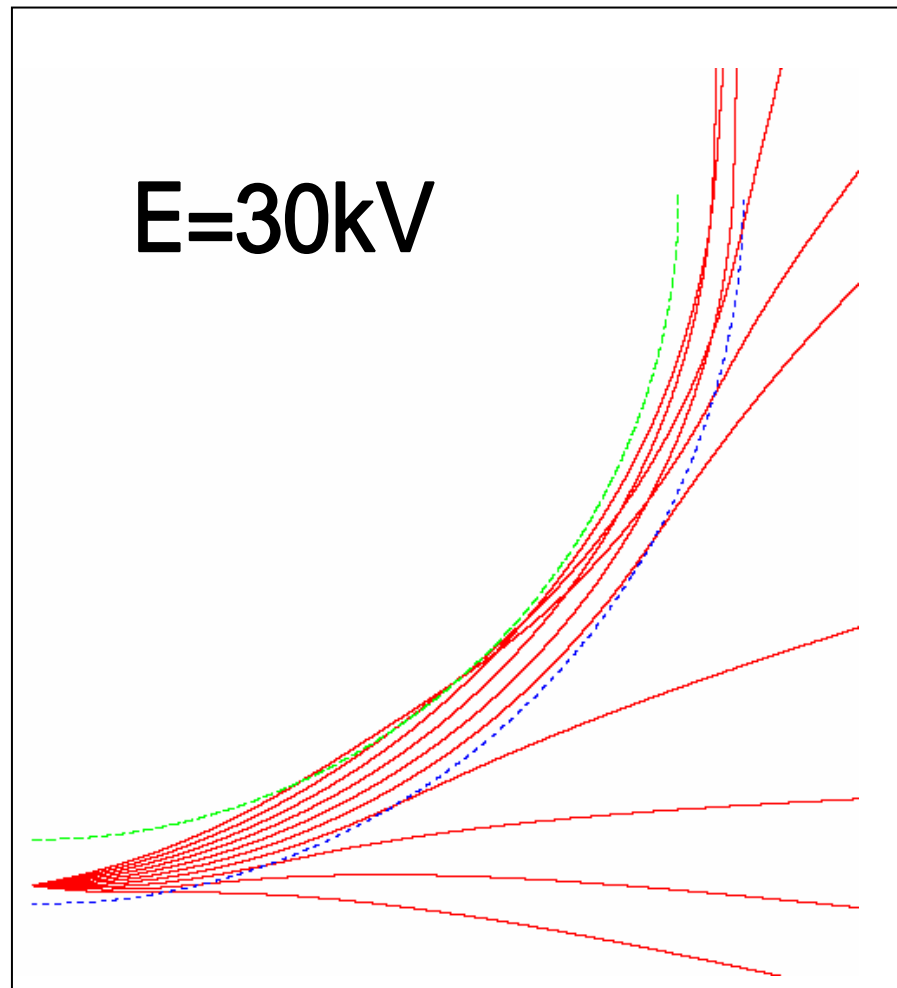
線



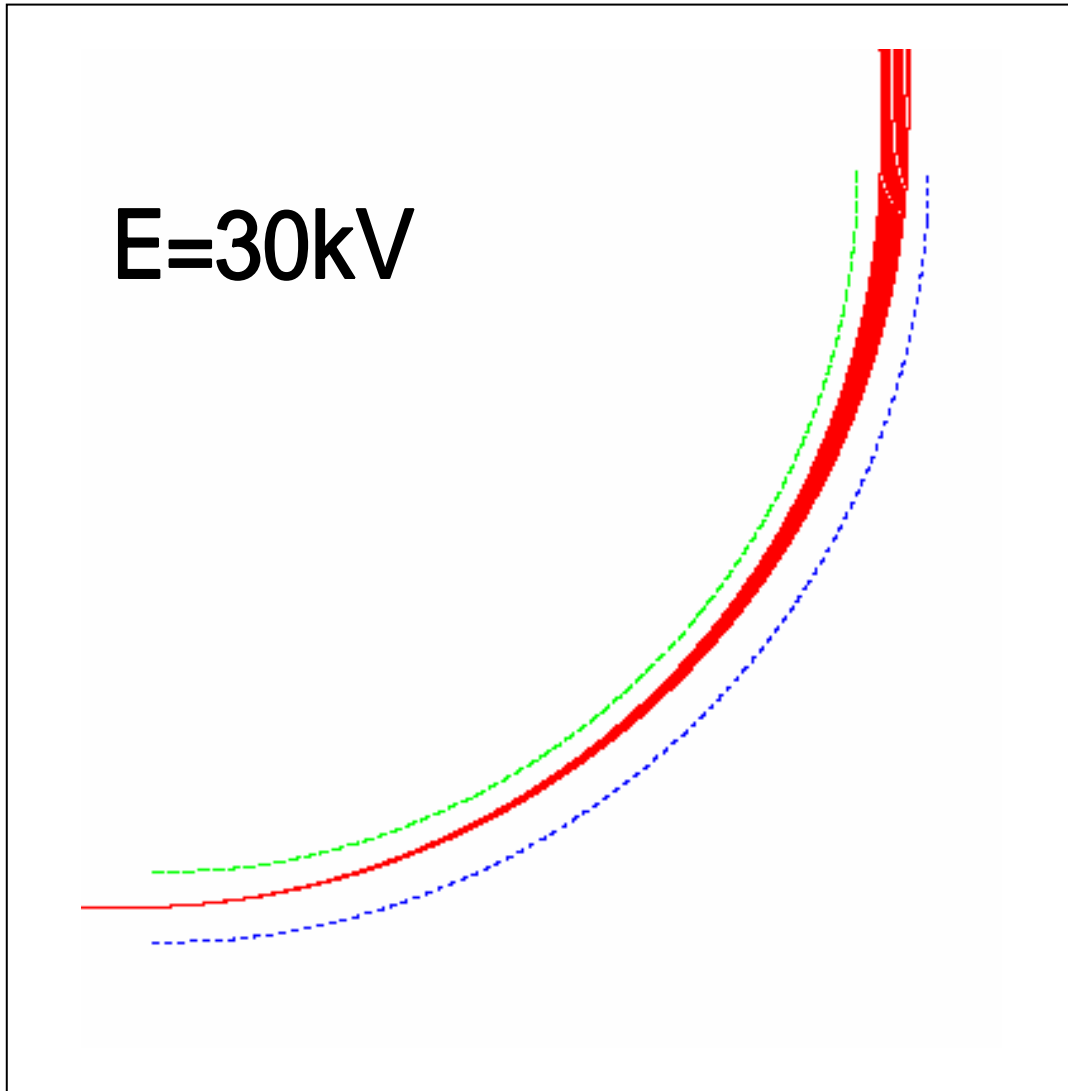
このデータを用いて 線の軌道
シミュレーション



0.67 0.71
= 0°



= 0.69
 -10° 10°

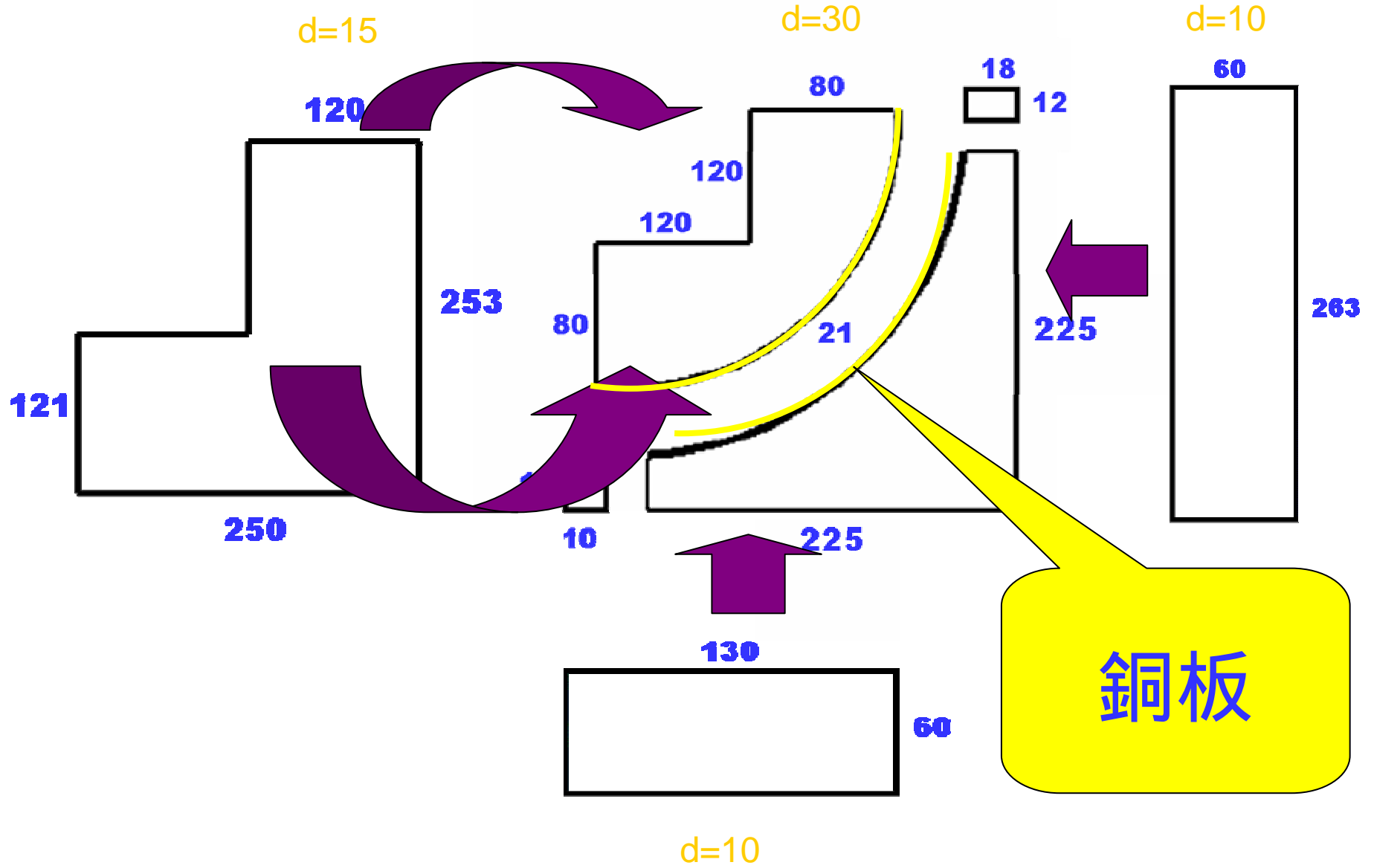


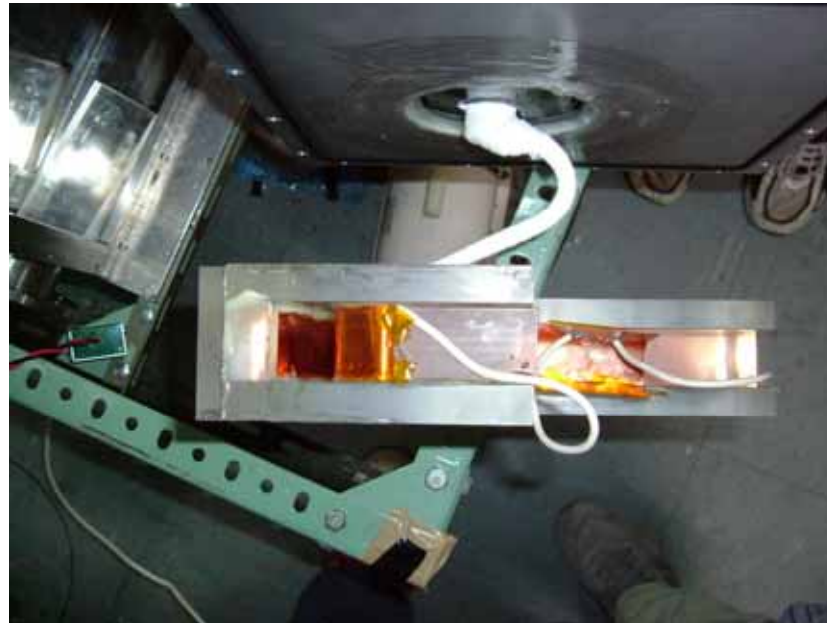
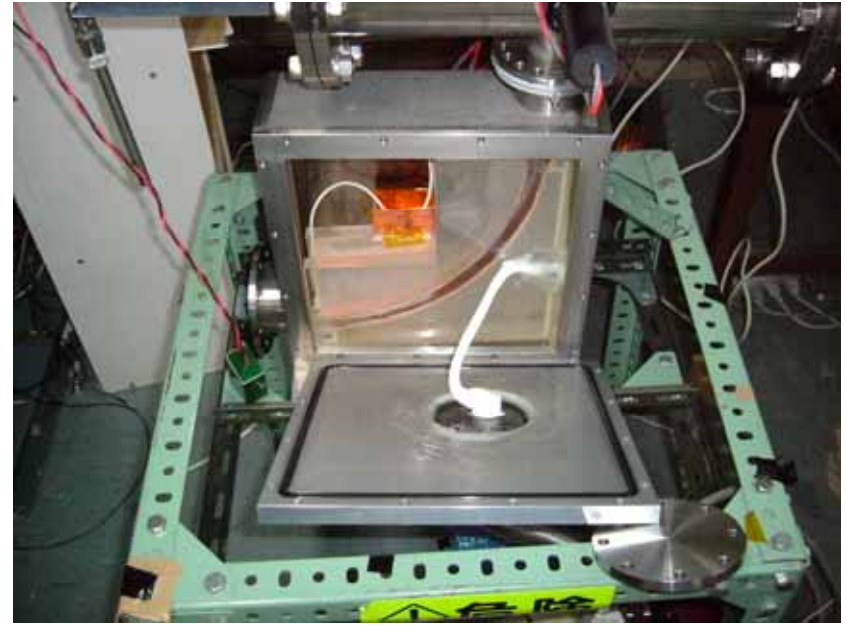
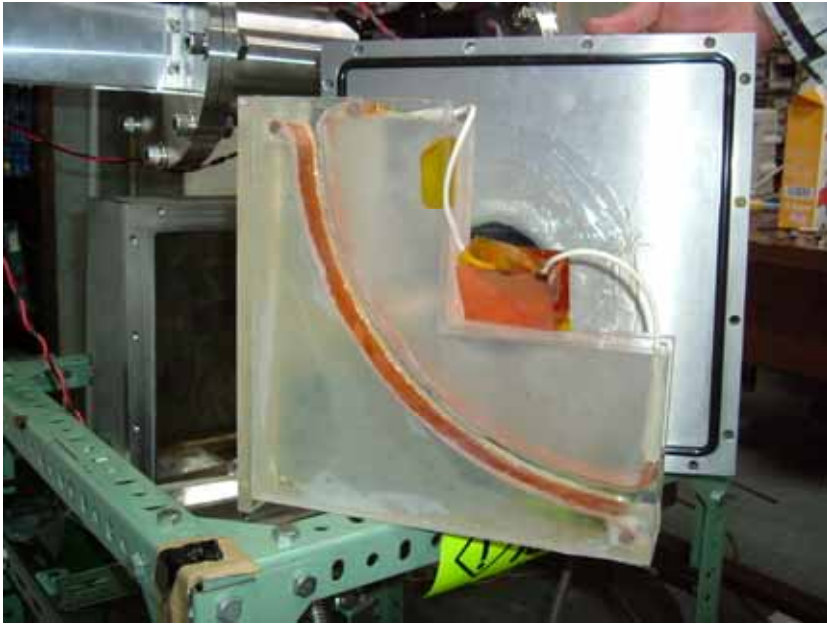
0.69

0.70

$=0^\circ$

シミュレーション及び設計






電極間の放電を抑えたい

 テープを張ることにより解決

電極板の端、コネクターからの放電

 接着剤で絶縁

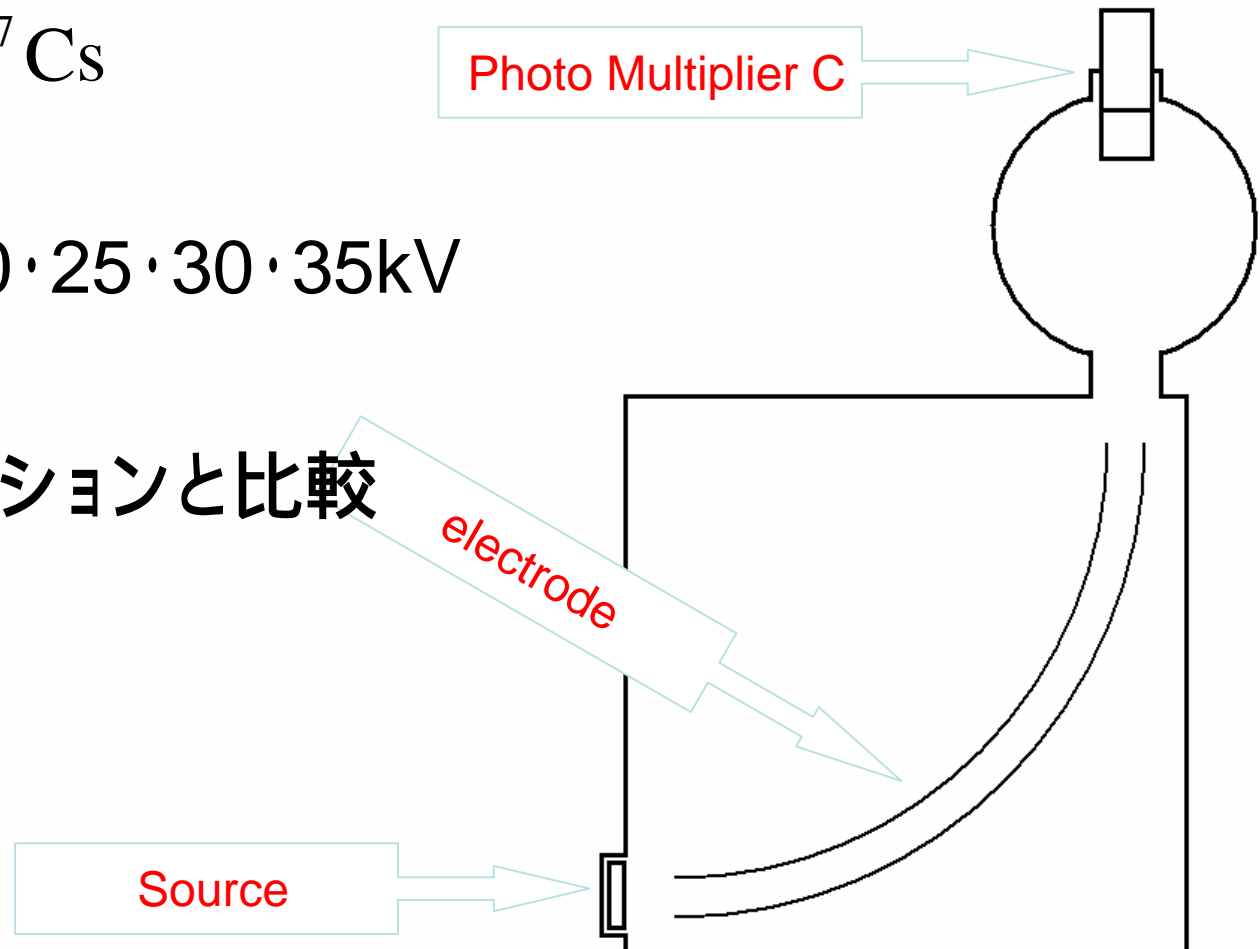
ケーブルの耐電圧が20kVしかない

 絶縁テープで補強

 これにより、30kVでの連続運転に成功！！

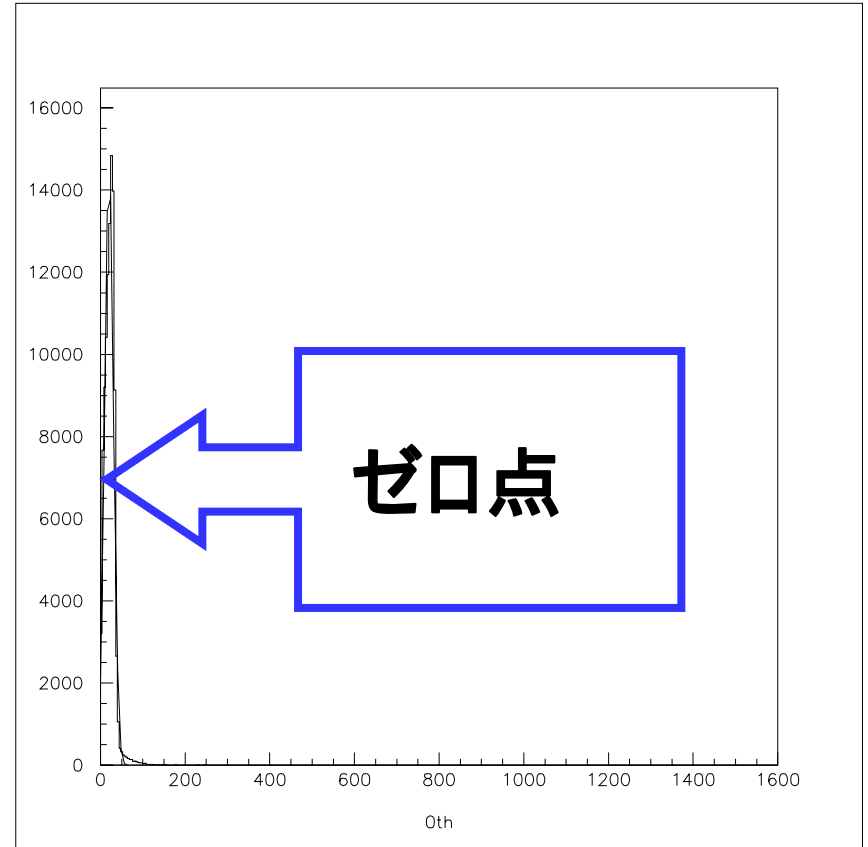
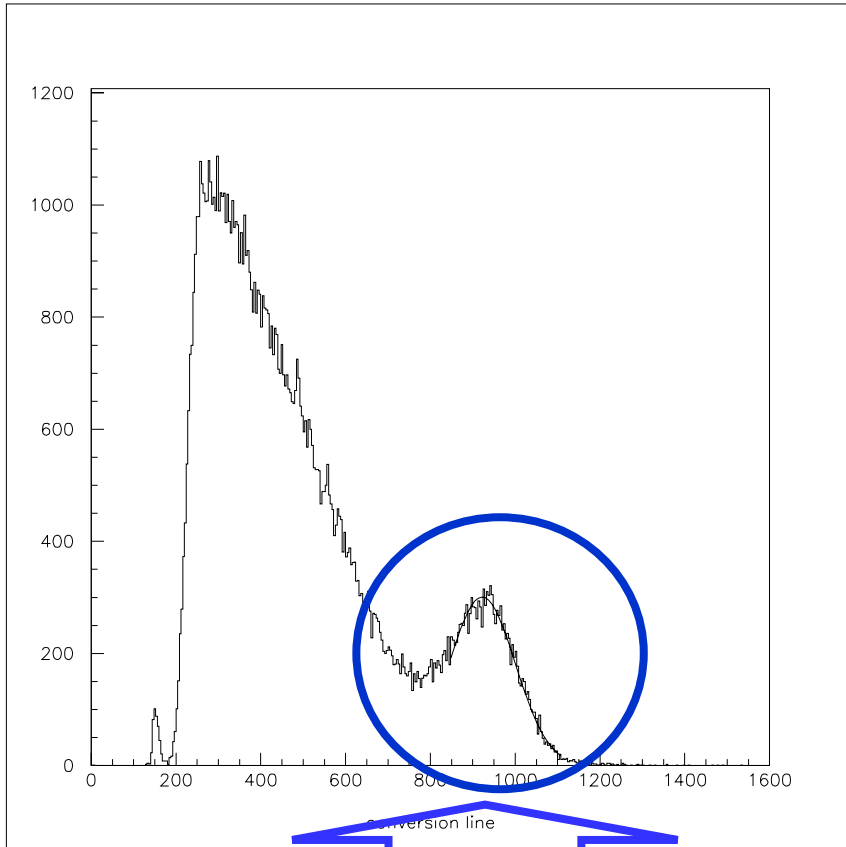
得られた 線のエネルギー

- Source ^{137}Cs
- 電圧 20・25・30・35kV
- シミュレーションと比較



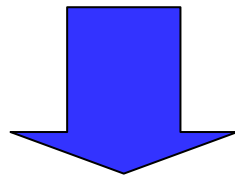
得られた 線のエネルギー

^{137}Cs によるキャリブレーション



コンバージョンライン

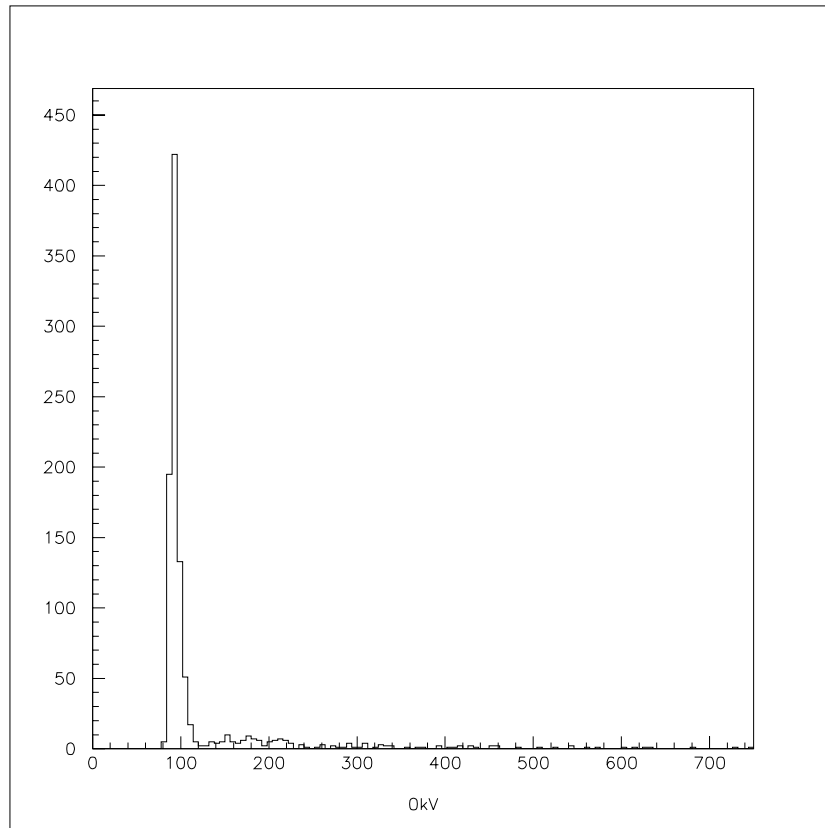
energy (keV)	Mean (ch)	Sigma (ch)
629	922.3 (± 77.9)	77.9 (± 1.1)
0	20.5 (± 10.3)	10.3 (± 0.0)



$0.697 (\pm 0.061) \text{ keV/ch}$

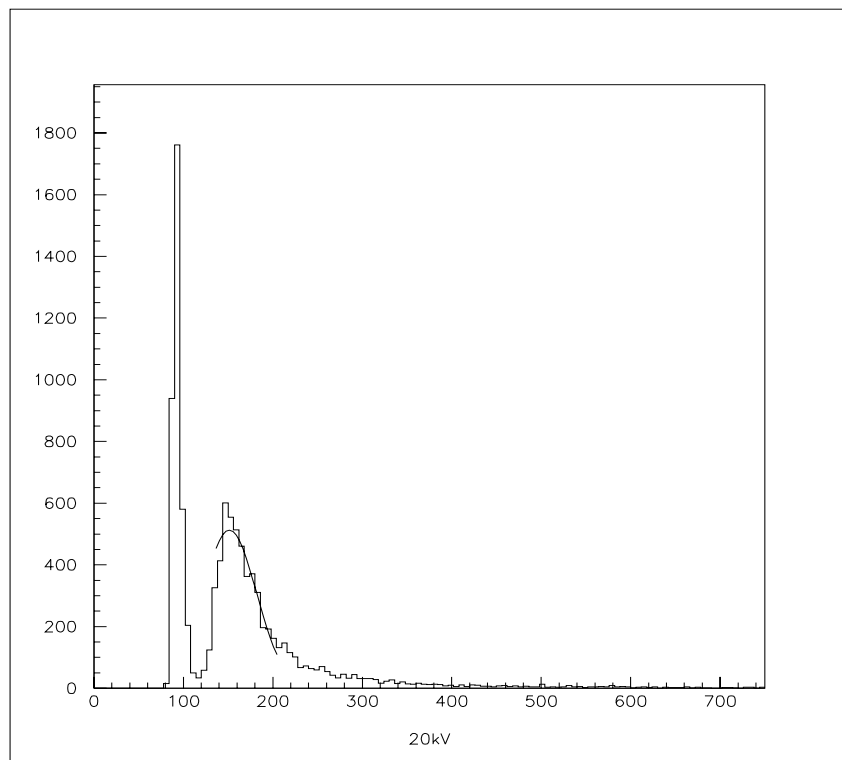
0keVのチャンネル
= 14.3 (± 7.4) ch

得られた 線のエネルギー

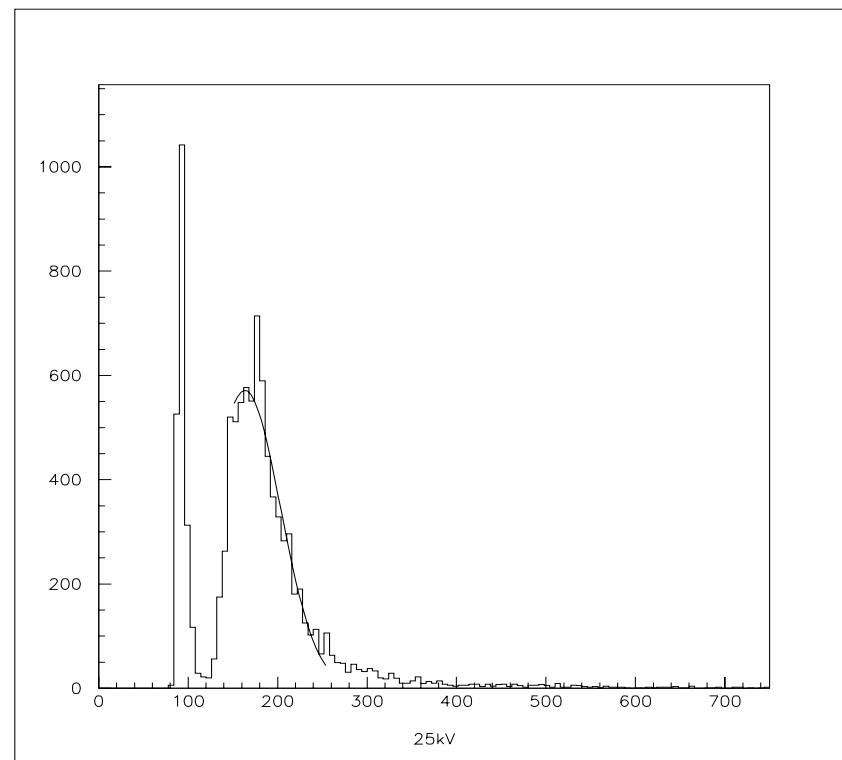


電圧0kV

得られた線のエネルギー

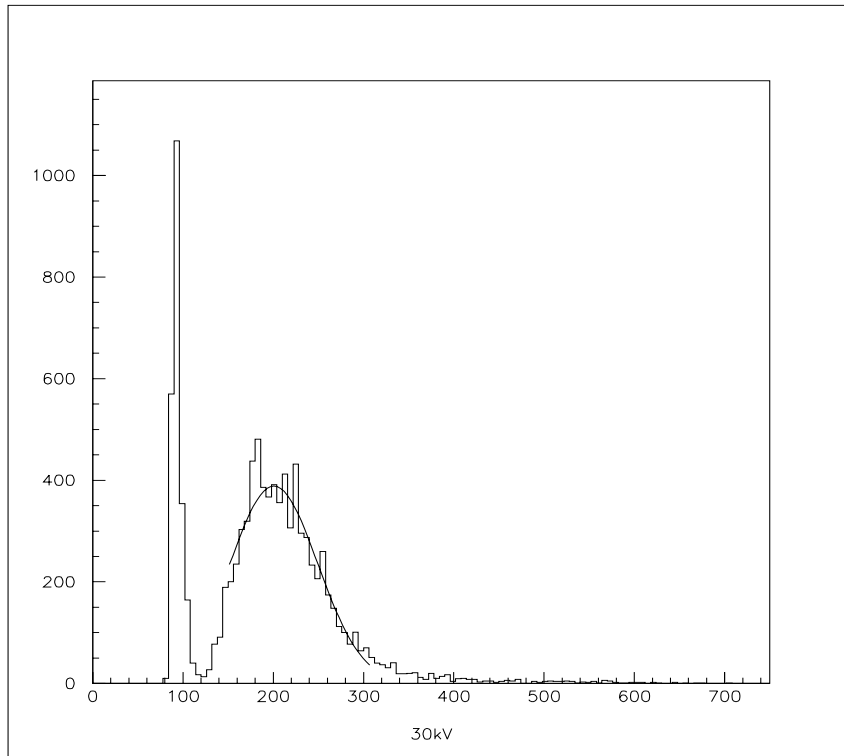


電圧20kV

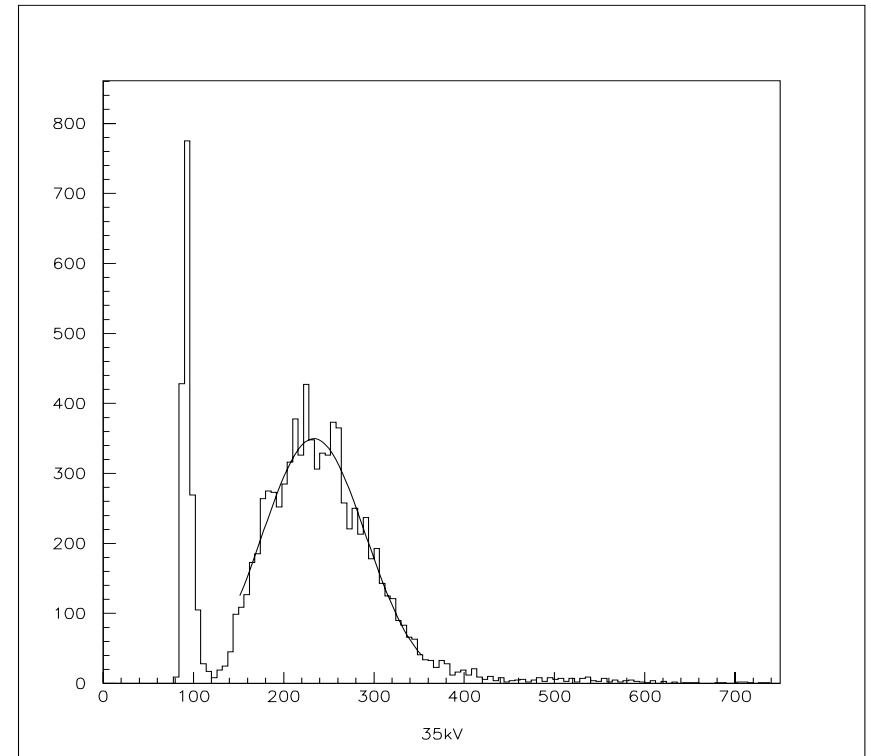


電圧25kV

得られた線のエネルギー



電圧30kV



電圧35kV

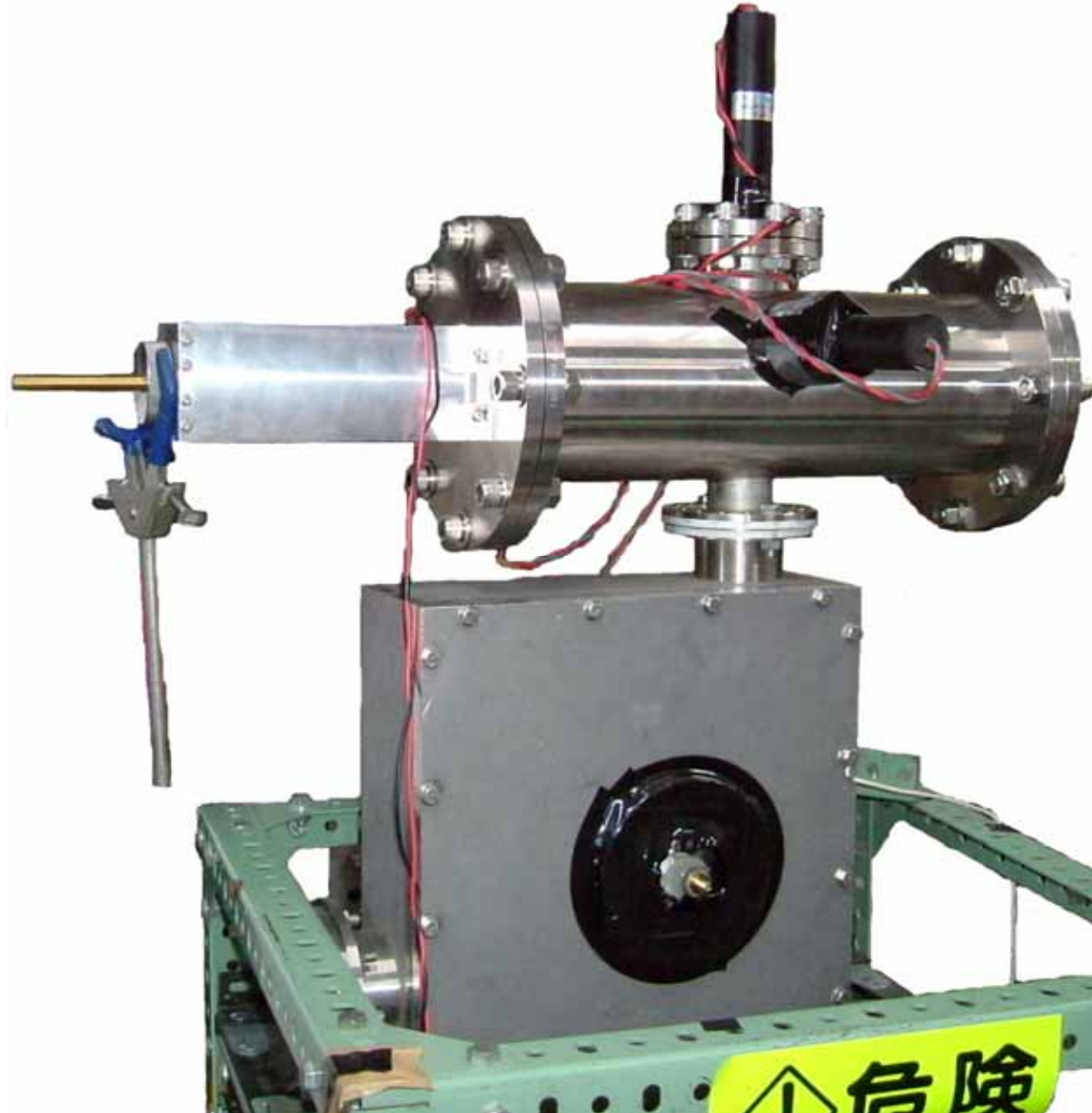
得られた 線のエネルギー

Voltage (kV)	Mean (keV)	Sigma (keV)	シミュレーション (keV)
20	151(± 2)	30.2(± 1.4)	129
25	163(± 2)	39.8(± 1.4)	165
30	201(± 1)	48.7(± 1.0)	194
35	234(± 1)	57.3(± 0.8)	242

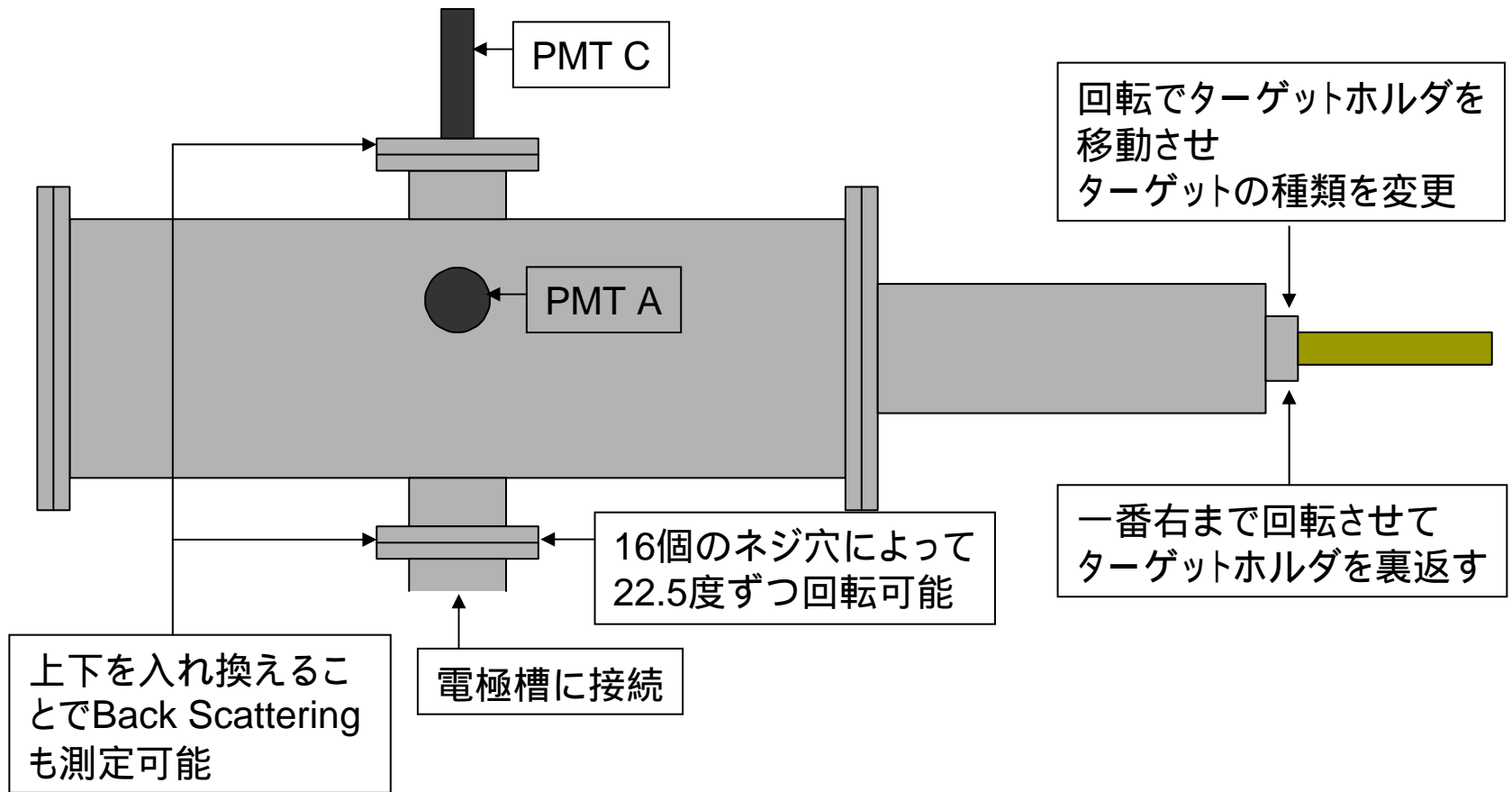


分解能は 0.24

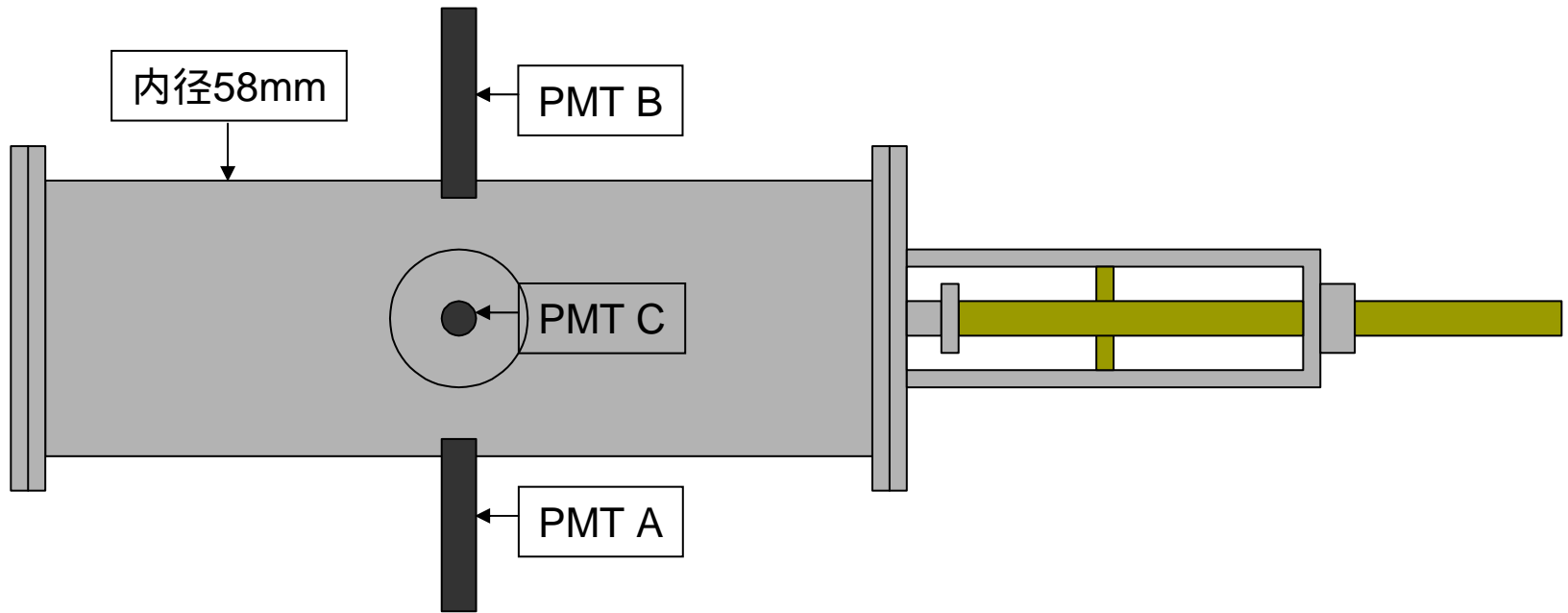
ターゲット槽の構造



前面図



上面図



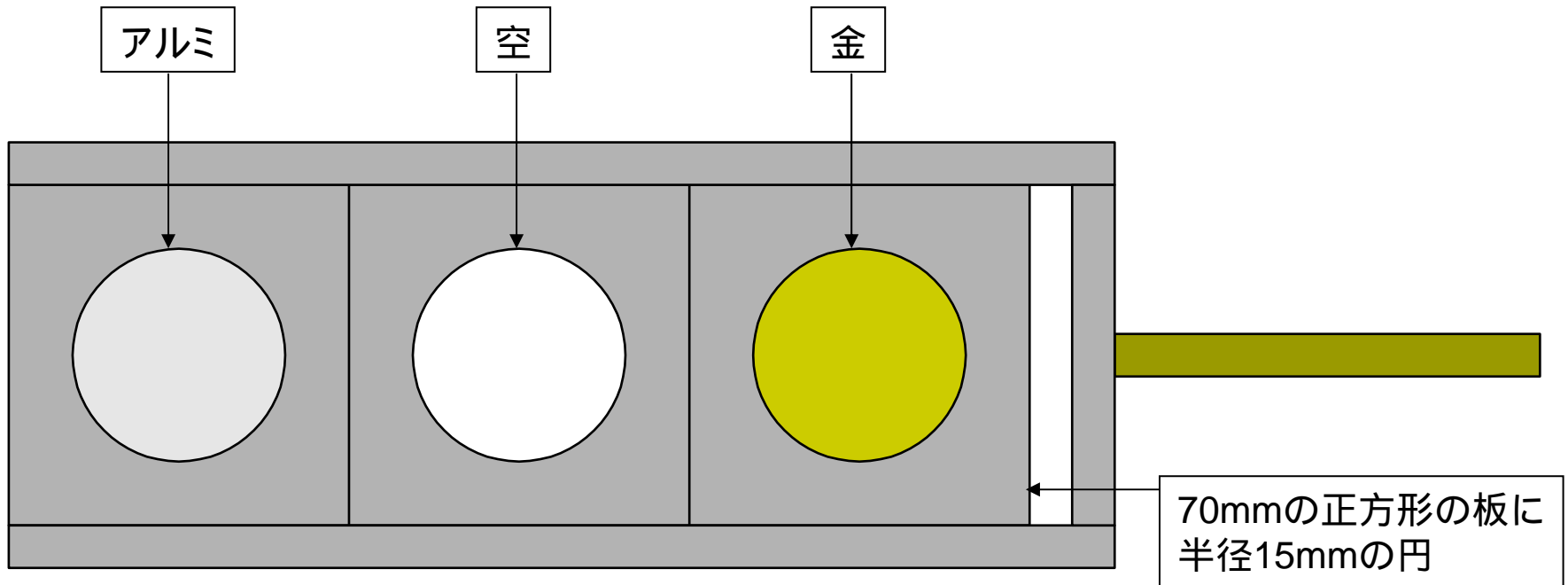
PMT A,B

上から見た角度 65° に設置
散乱された粒子のカウントレートを測定
Scintillatorは厚さ0.25mmのプラスチックを使用
ターゲットからの立体角は0.210ほどで
全体の1.67%ほど
裏側にアルミ箔
PMTの周りを鉛でシールド

PMT C

Scintillatorの厚さは5mm
エネルギーを測定するのに使用

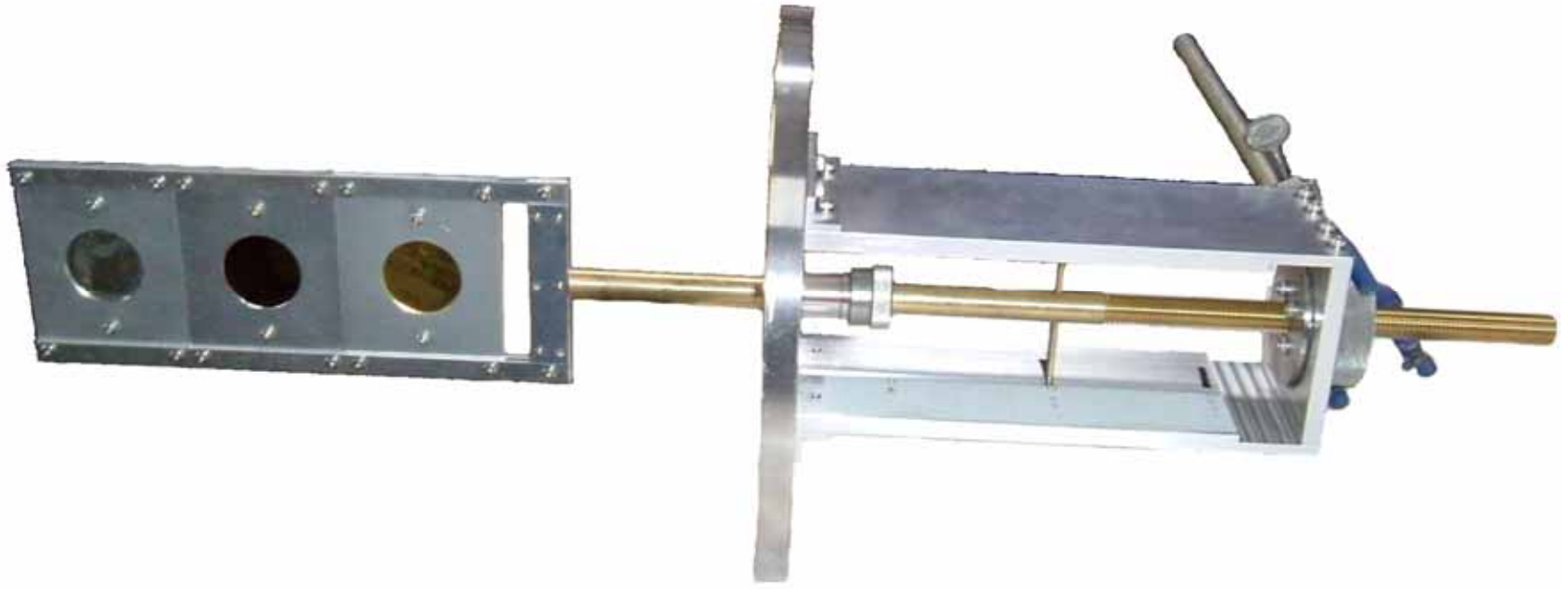
ターゲットホルダ



Null Asymmetry
厚さ0.01mm

Background

Asymmetry
厚さ0.0025mm



ソースについて

密封線源¹³⁷Csを使用

半減期 30.2y

- 0.514 MeV 94%

1.176 MeV 6%

0.662 MeV 85%

実験方法

1. ターゲット槽の角度を 0° にする
2. 真空ポンプで真空を引き 0.5Pa 以下にする
3. 電極間に 30kV の電圧をかける
4. AMP, Discriminator, ADCの電源を入れPMTに 1kV の電圧をかける
5. ターゲットを金,空,アルミにしてCount Rateをそれぞれ2時間を測定
(ComputerでPMT AとPMT BのCount Rateを同時に測定)
6. ターゲットを裏返して同様に測定
7. ターゲット槽の角度を 90° , 180° , 270° にして2～6を繰り返す

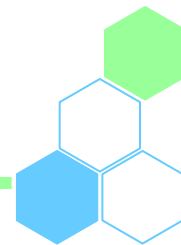
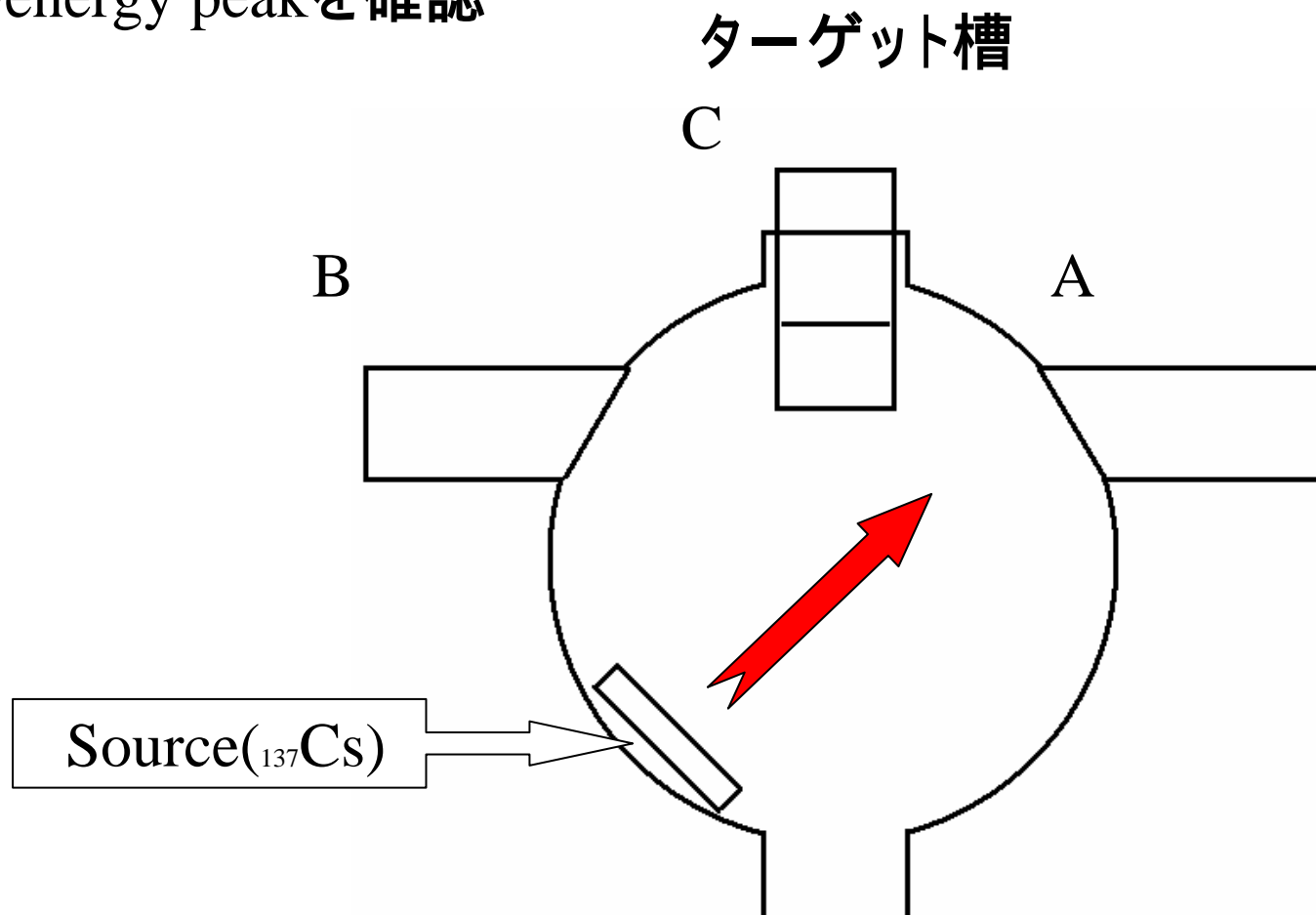


Photo Multiplier A & B threshold の決定

ターゲット槽内にSourceを置き、
PMT A & B のenergy peakを確認



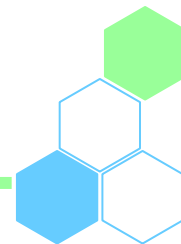
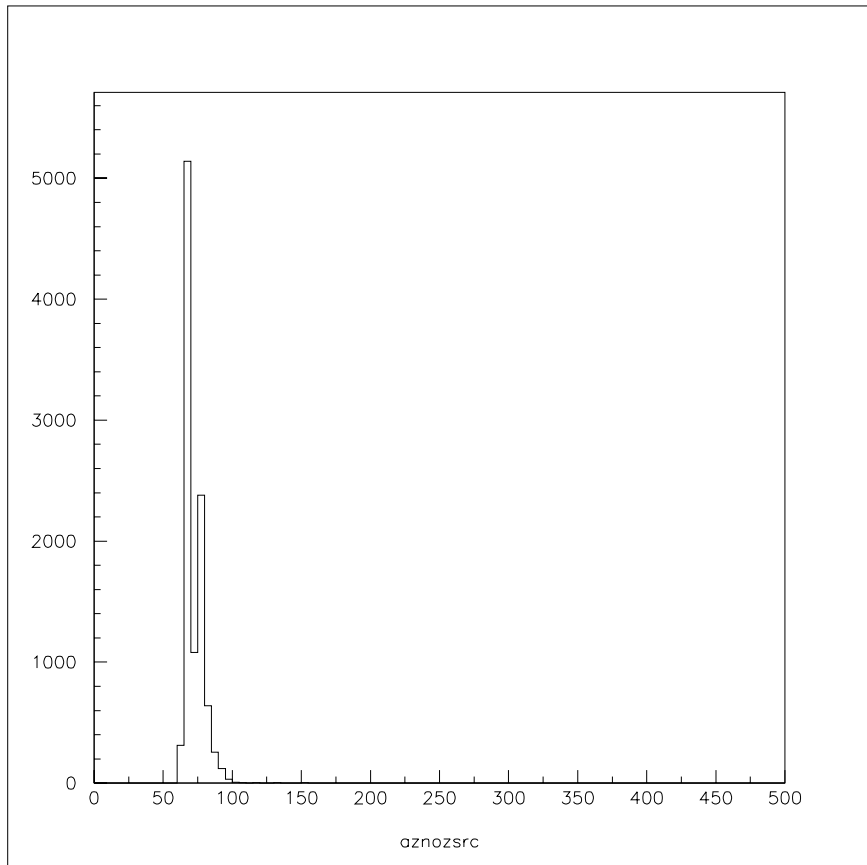
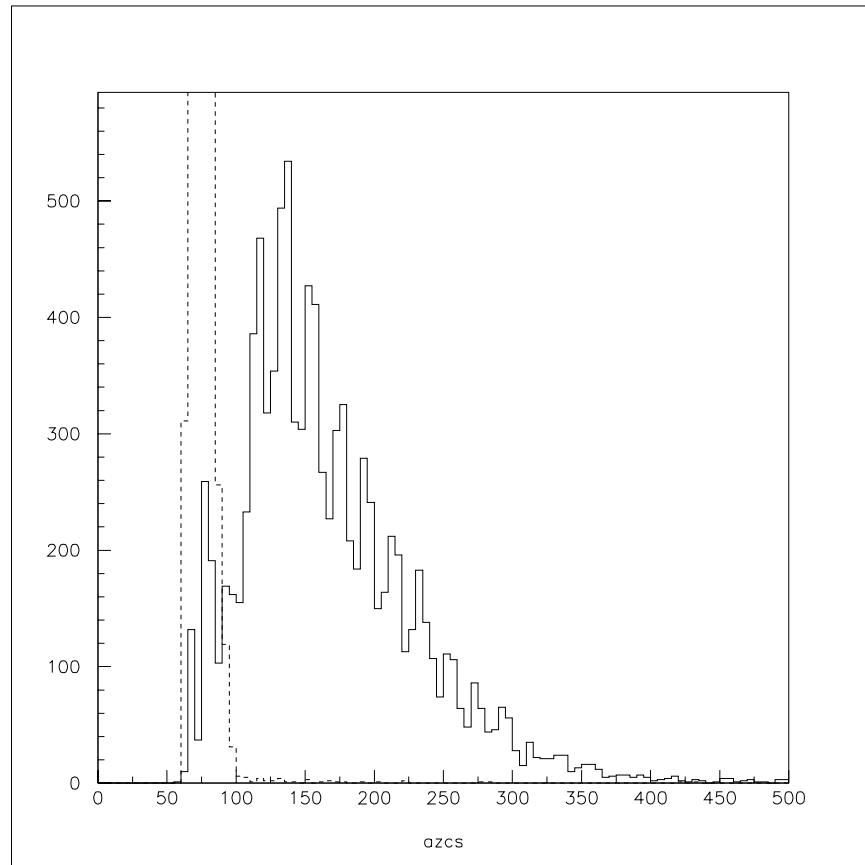


Photo Multiplier A & B threshold の決定

Photo multiplier A



Source なし



^{137}Cs

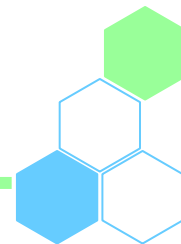
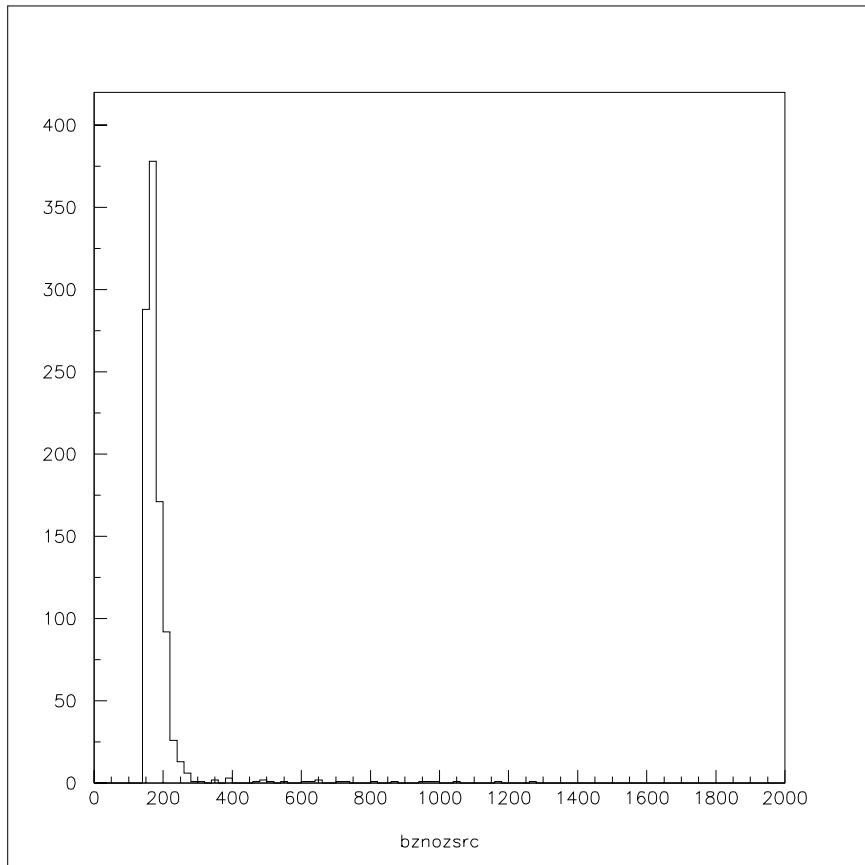
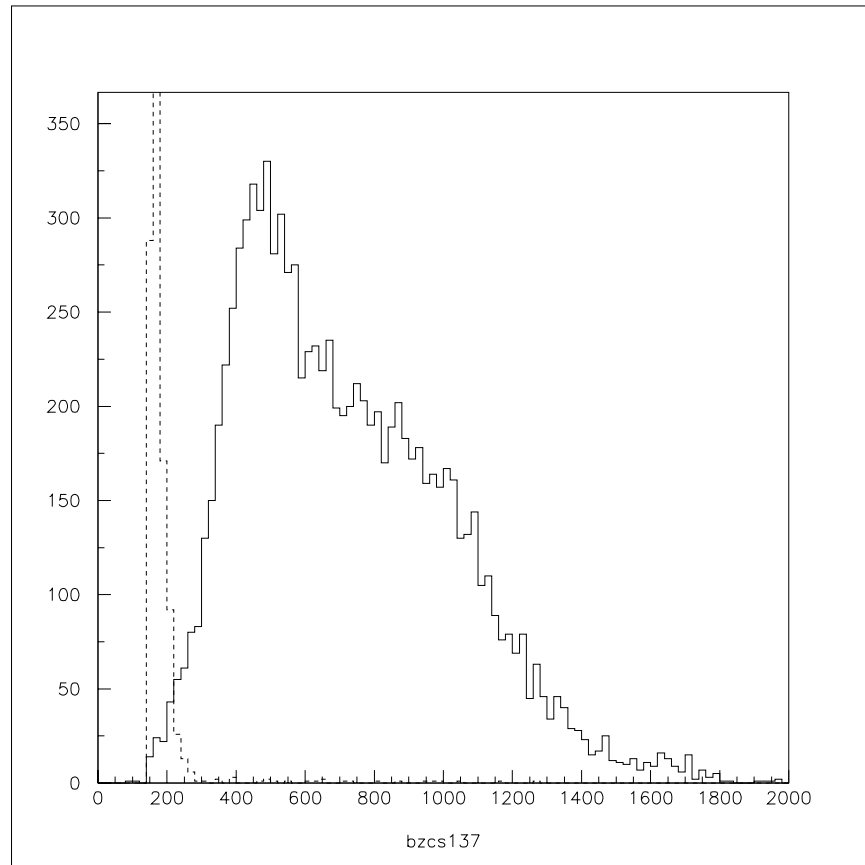


Photo Multiplier A & B threshold の決定

Photo multiplier B



Source なし



^{137}Cs

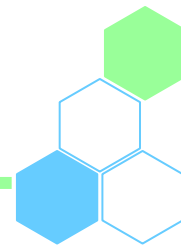


Photo Multiplier A & B threshold の決定

実際に電圧をかけ、
PMT A & B で
線を観測し、
Thresholdを決定

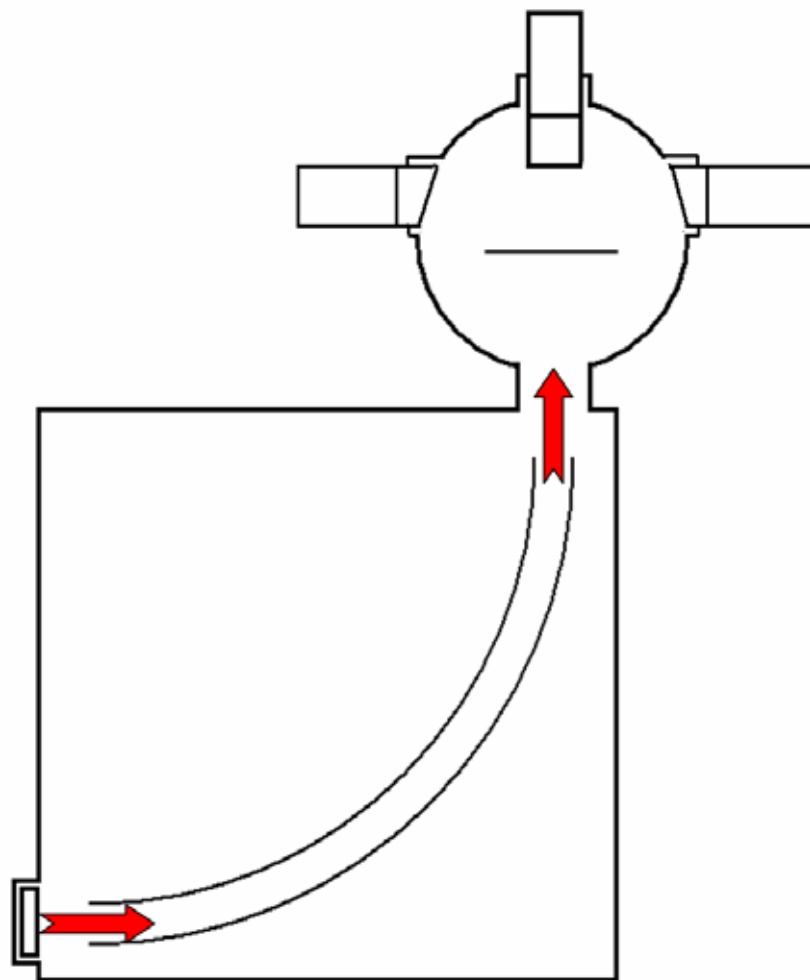
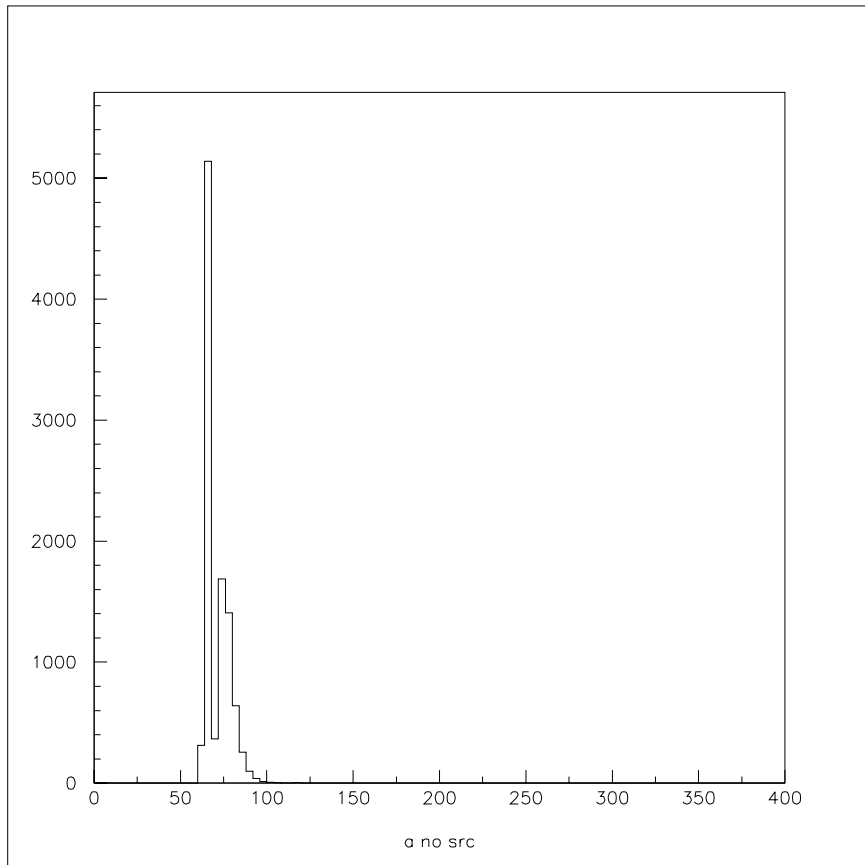


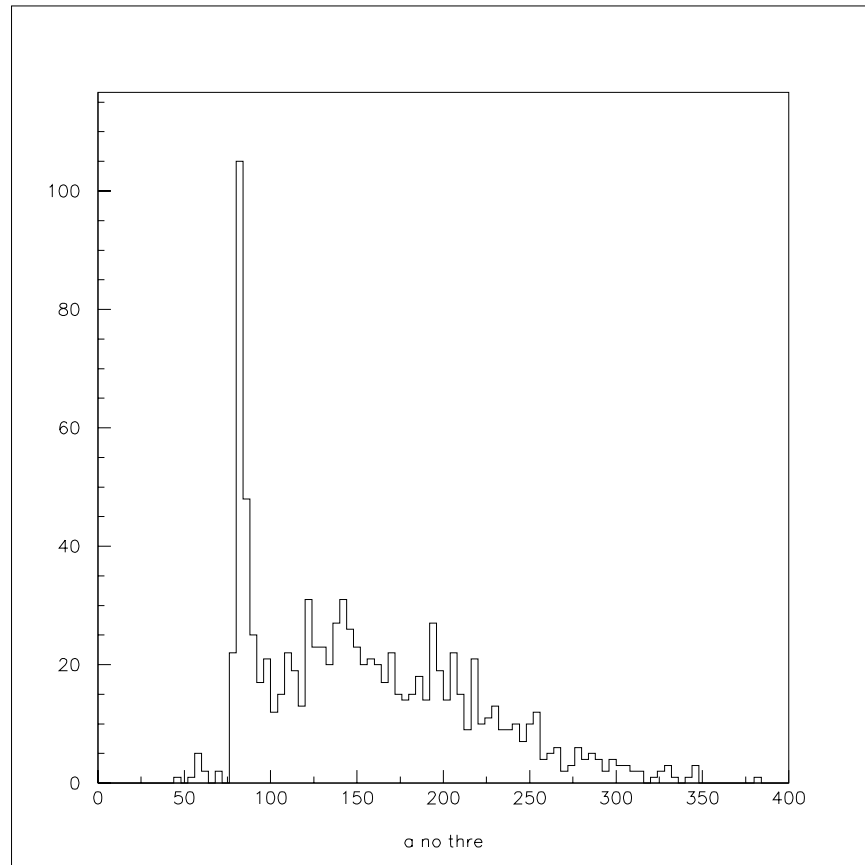


Photo Multiplier A & B threshold の決定

Photo multiplier A



Source なし



^{137}Cs

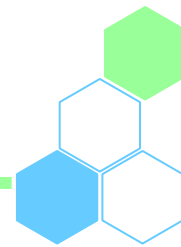
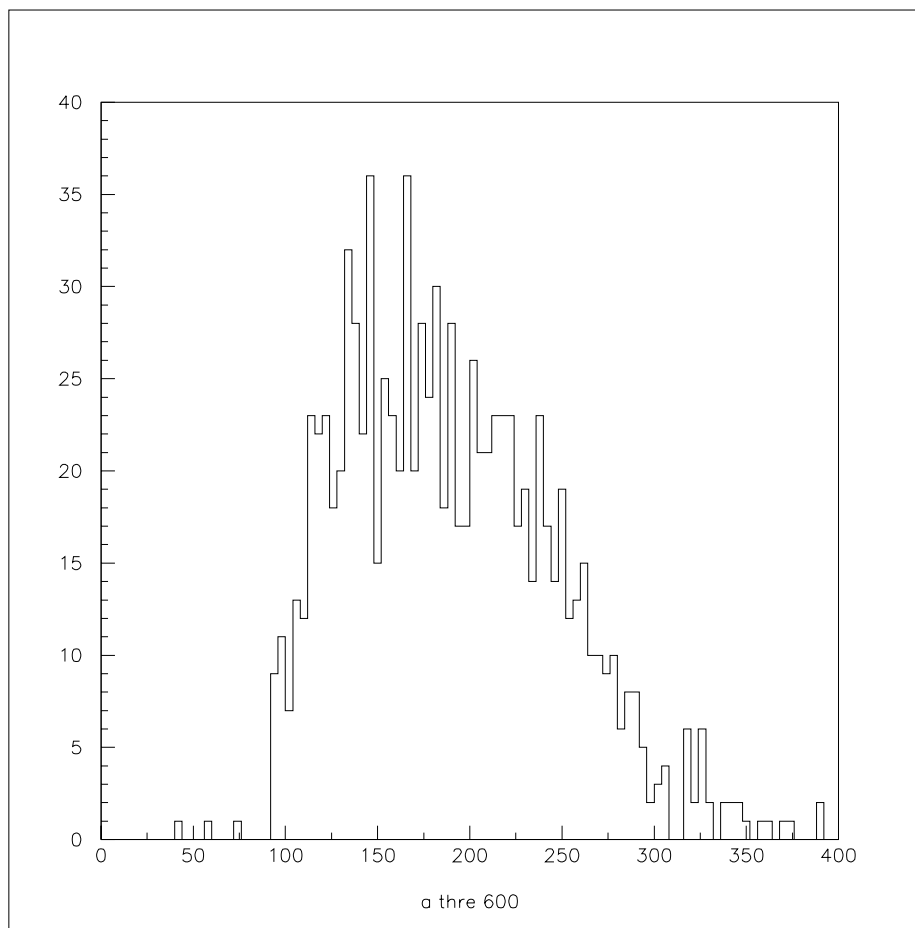


Photo Multiplier A & B threshold の決定

Photo multiplier A - threshold 60mV



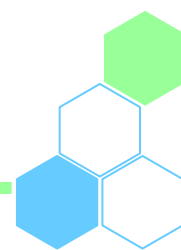
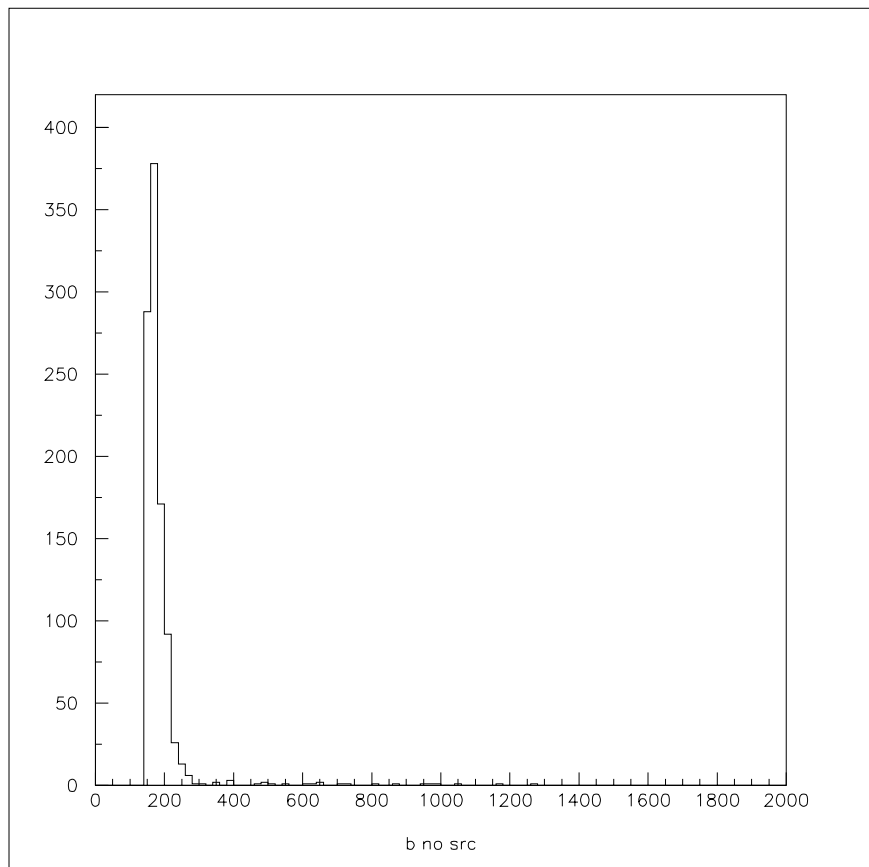
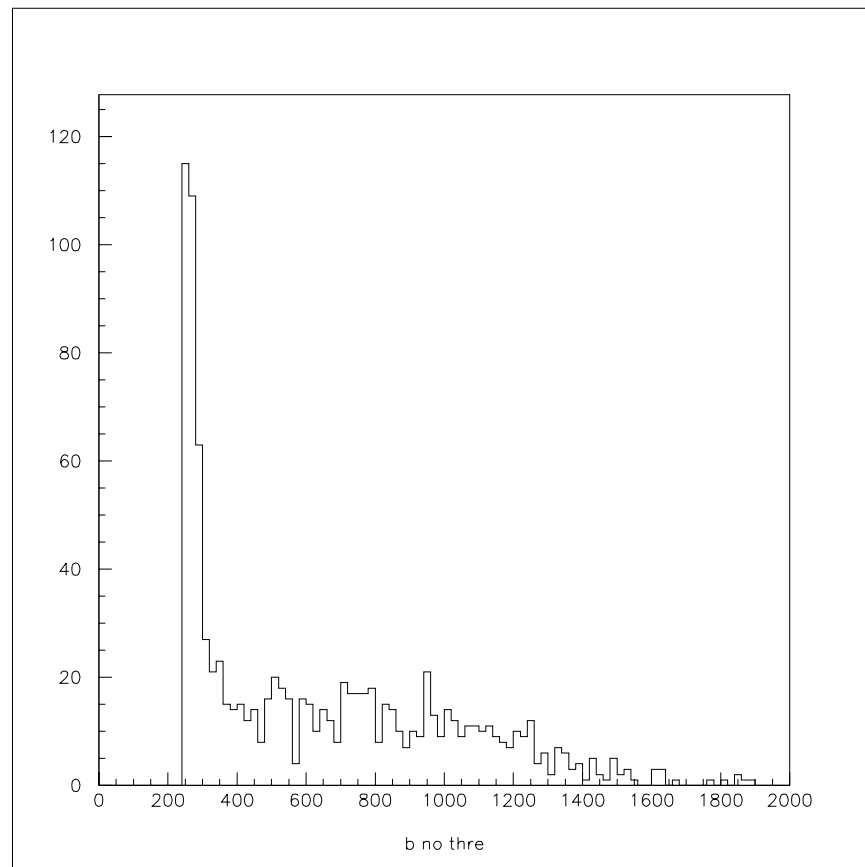


Photo Multiplier A & B threshold の決定

Photo multiplier B



Source なし

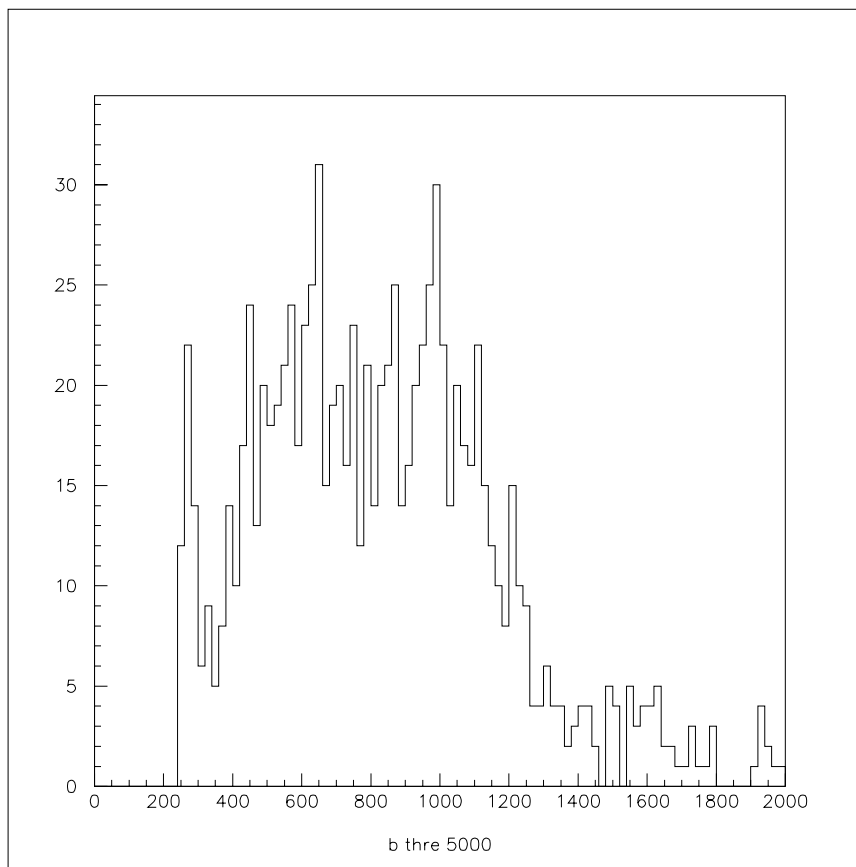


^{137}Cs

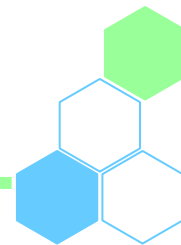
Photo Multiplier A & B threshold の決定



Photo multiplier B - threshold 500mV



Mott散乱の測定

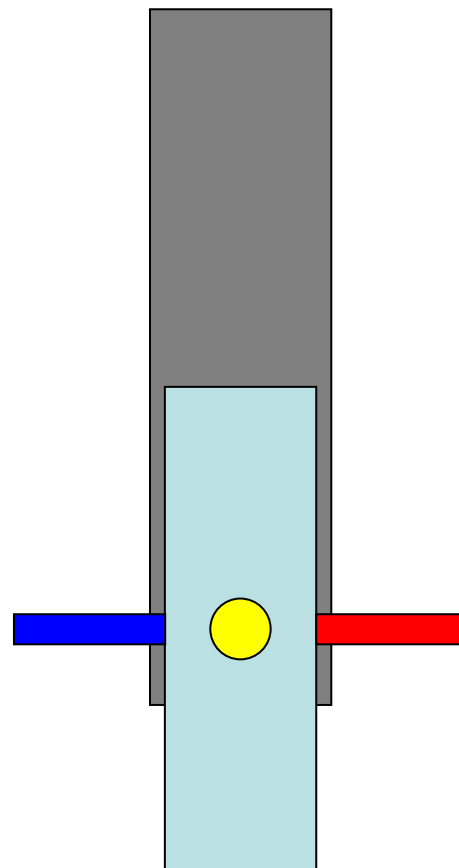


: 0,90,180,270 °

0 °

ターゲット : Au, Al,
それぞれ表,裏

赤 : PM A
青 : PM B
黄 : PM C



Mott散乱の測定

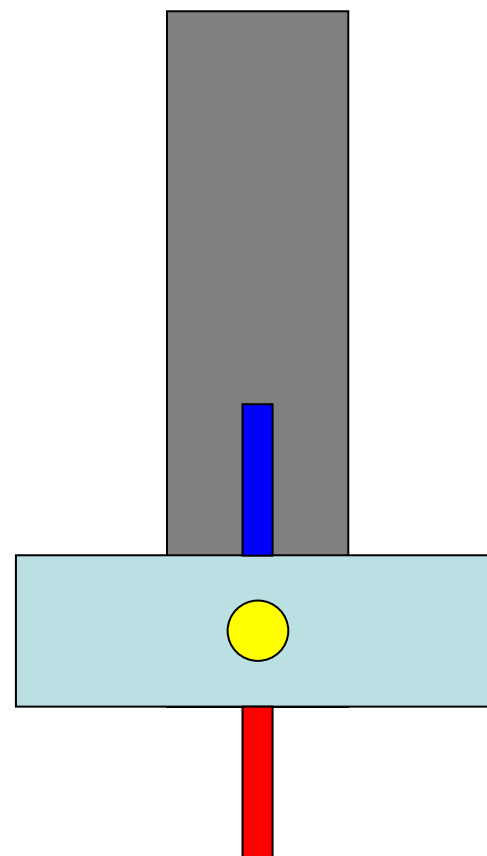


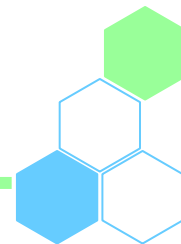
: 0,90,180,270 °

90 °

ターゲット : Au, Al,
それぞれ表,裏

赤 : PM A
青 : PM B
黄 : PM C





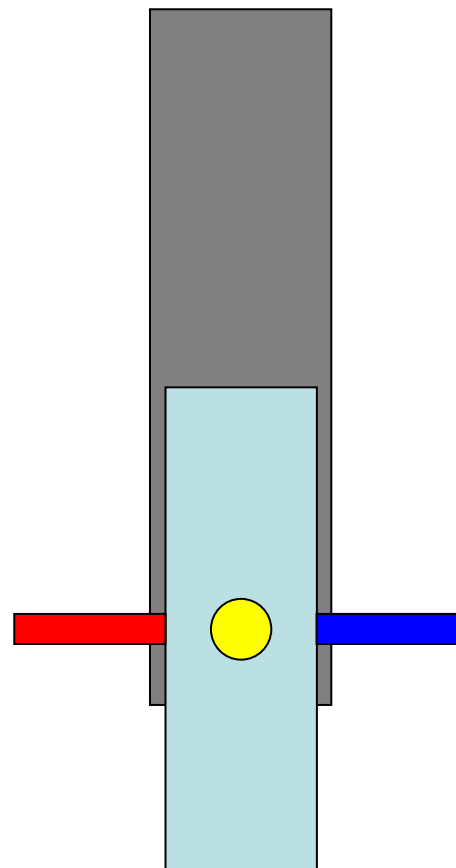
Mott散乱の測定

: 0,90,180,270 °

180 °

ターゲット : Au, Al,
それぞれ表,裏

赤 : PM A
青 : PM B
黄 : PM C



Mott散乱の測定

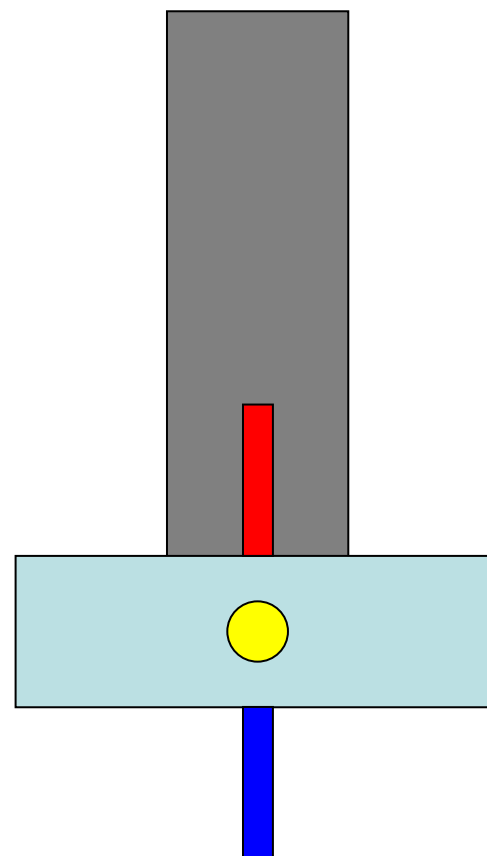


: 0,90,180,270 °

270 °

ターゲット : Au, Al,
それぞれ表,裏

赤 : PM A
青 : PM B
黄 : PM C



Mott散乱の測定



電極電圧 : 30kV

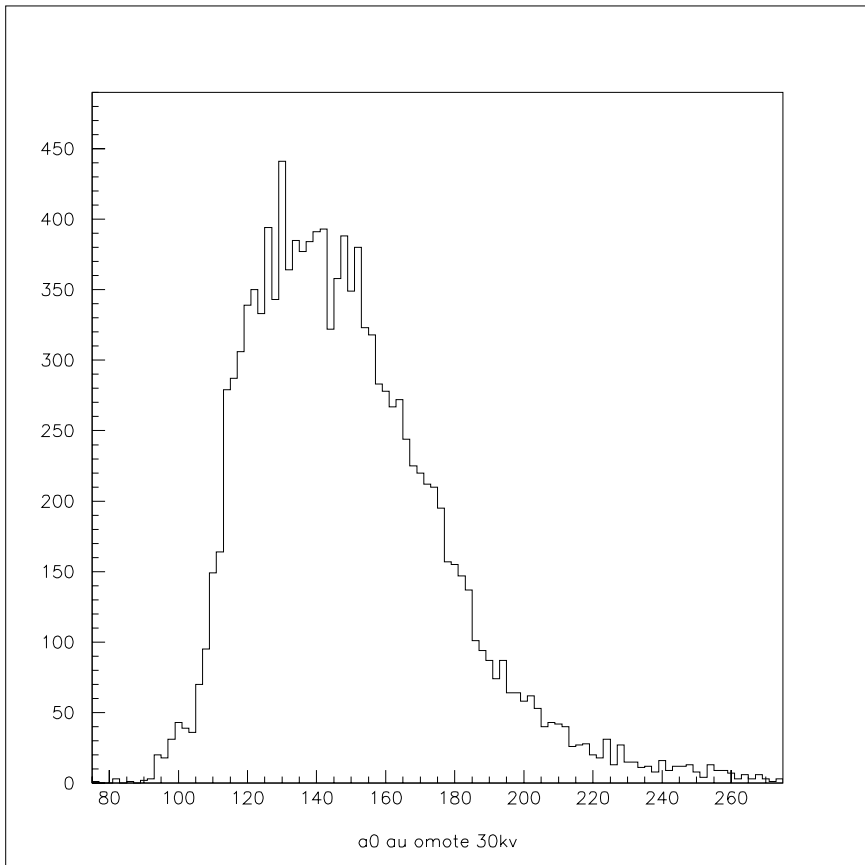
測定時間 : 2.0h (計 48h)

Mott散乱 = ターゲットあり(Au, Al) ターゲットなし()

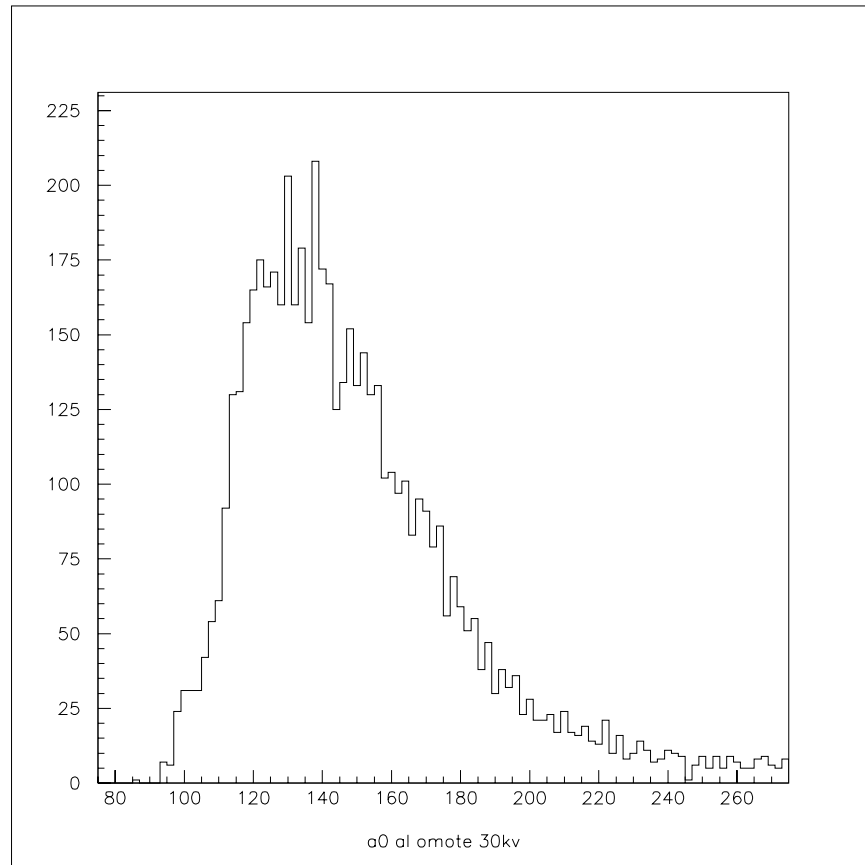
Mott散乱の測定



PM A = 0°

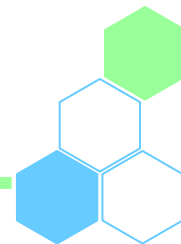


Au 表

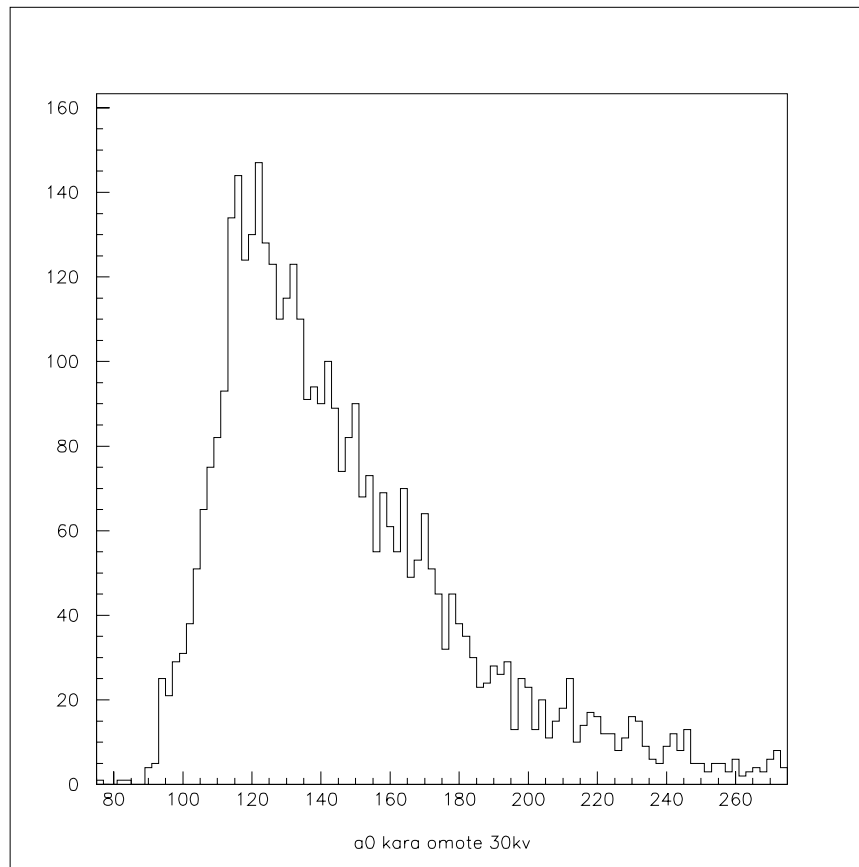


Al 表

Mott散乱の測定

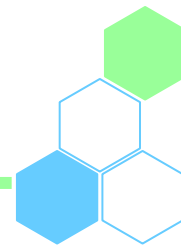


PM A = 0°

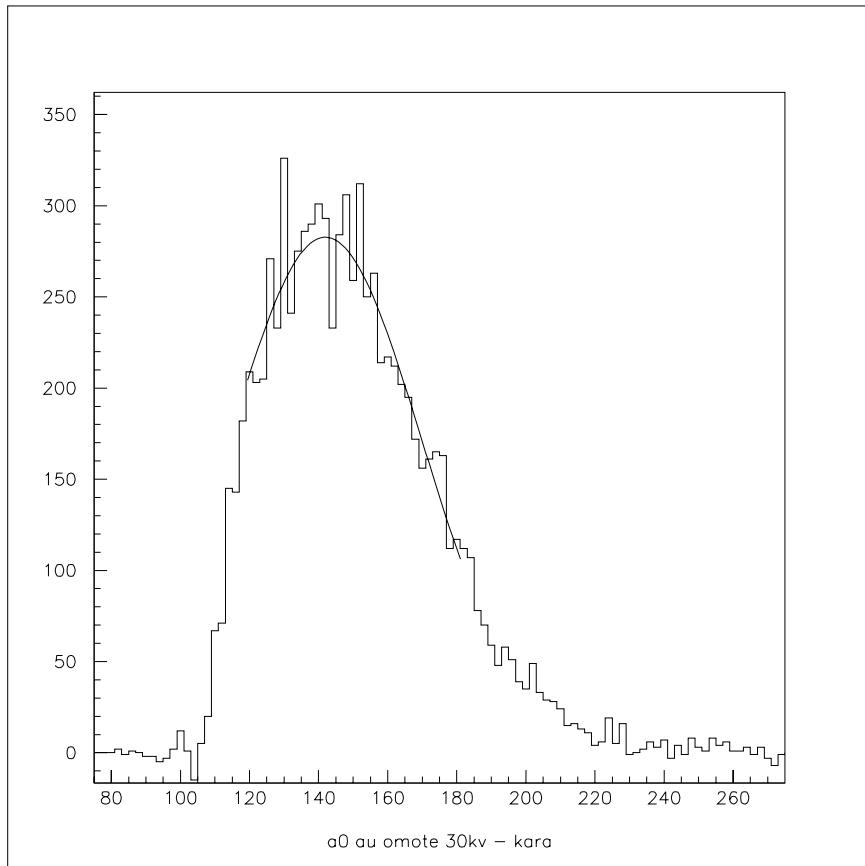


表

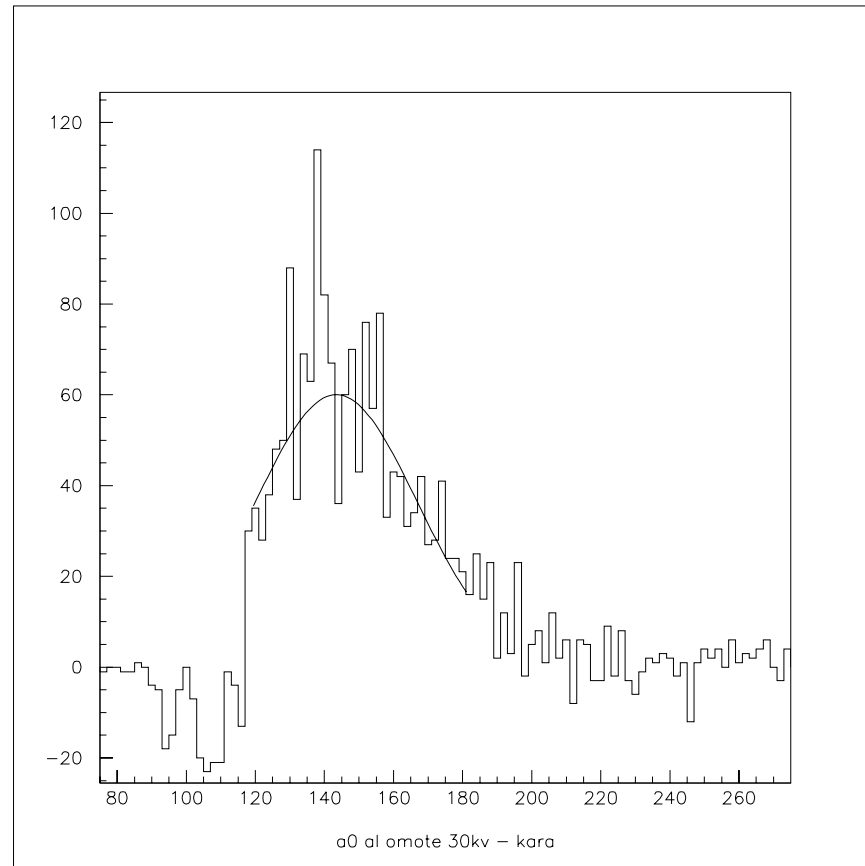
Mott散乱の測定



PM A = 0° を引く



Au 表

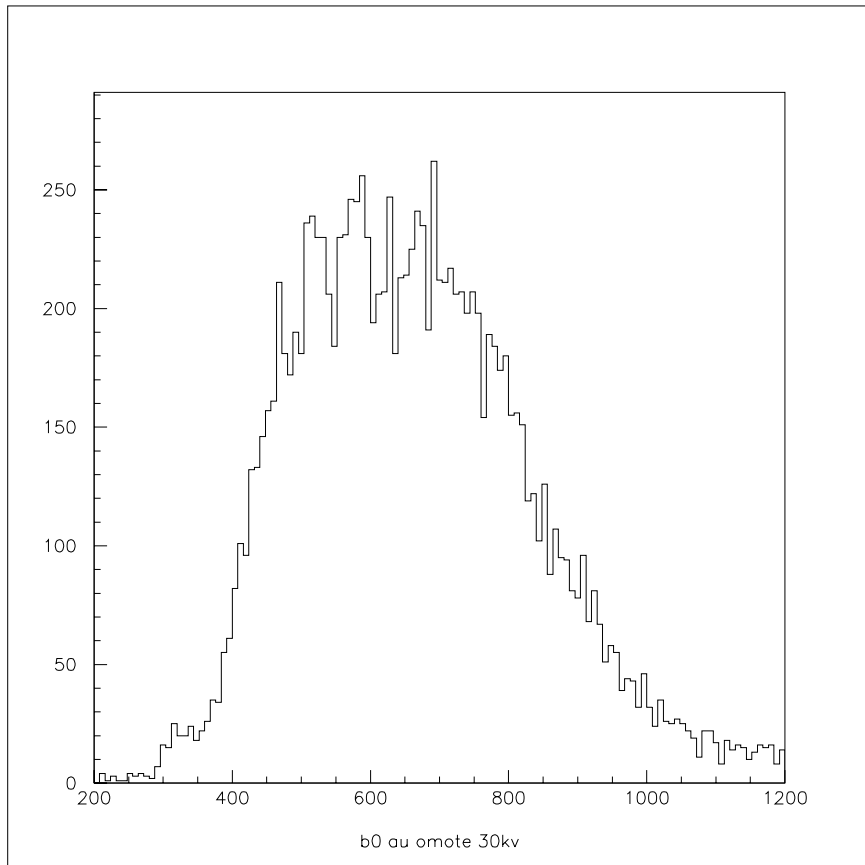


Al 表

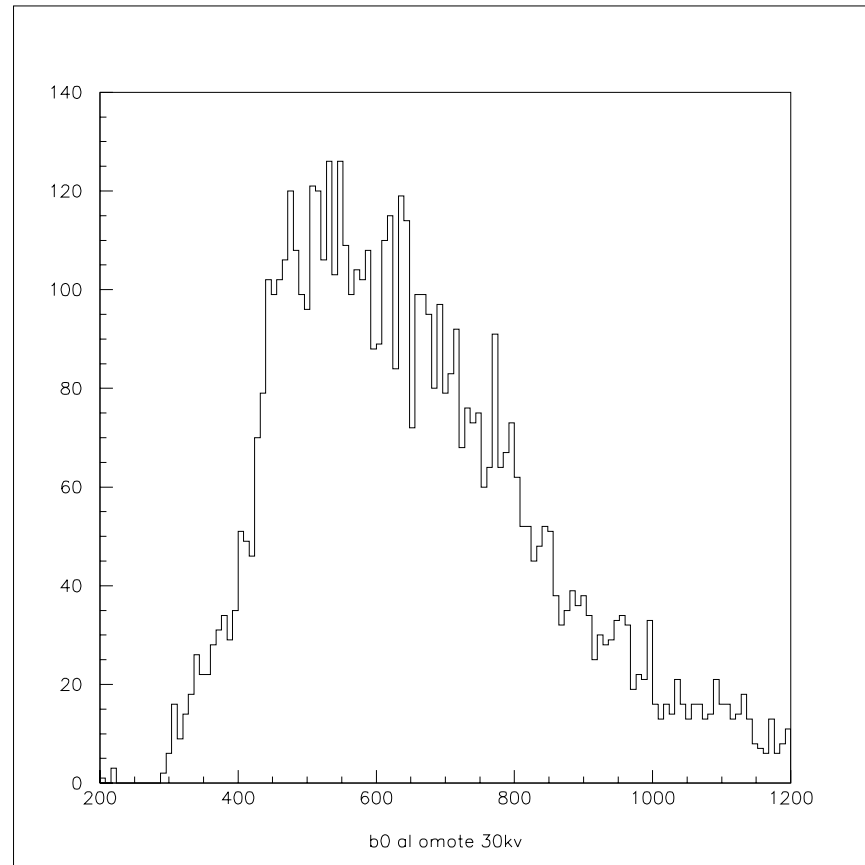
Mott散乱の測定



PM B = 0°



Au 表

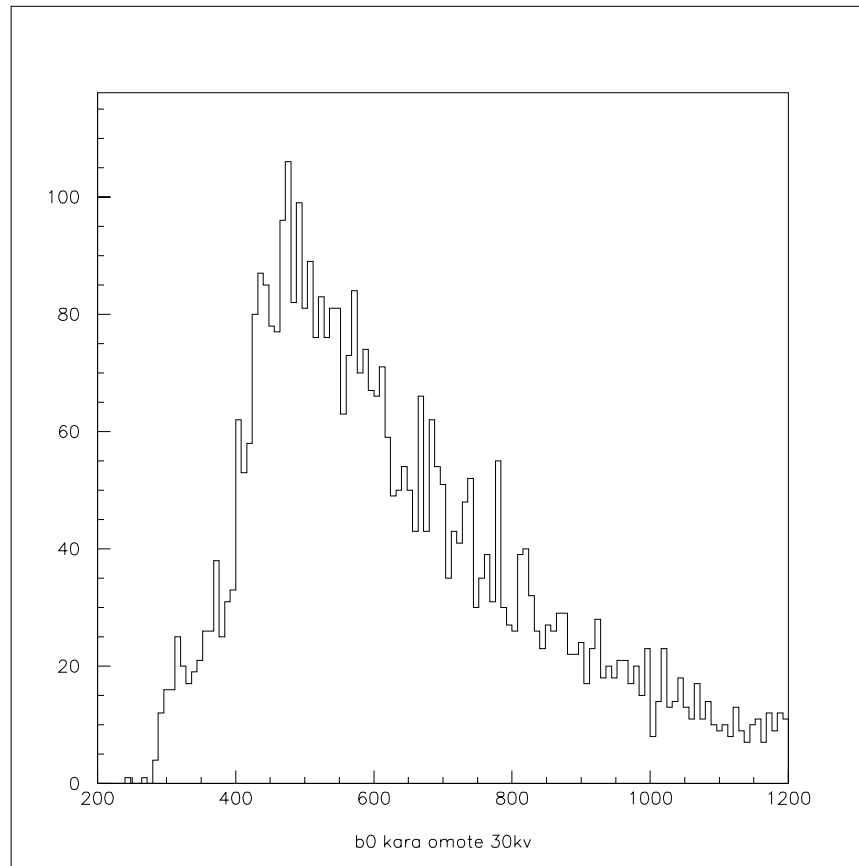


Al 表

Mott散乱の測定

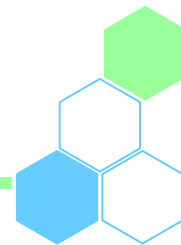


PM B = 0 °

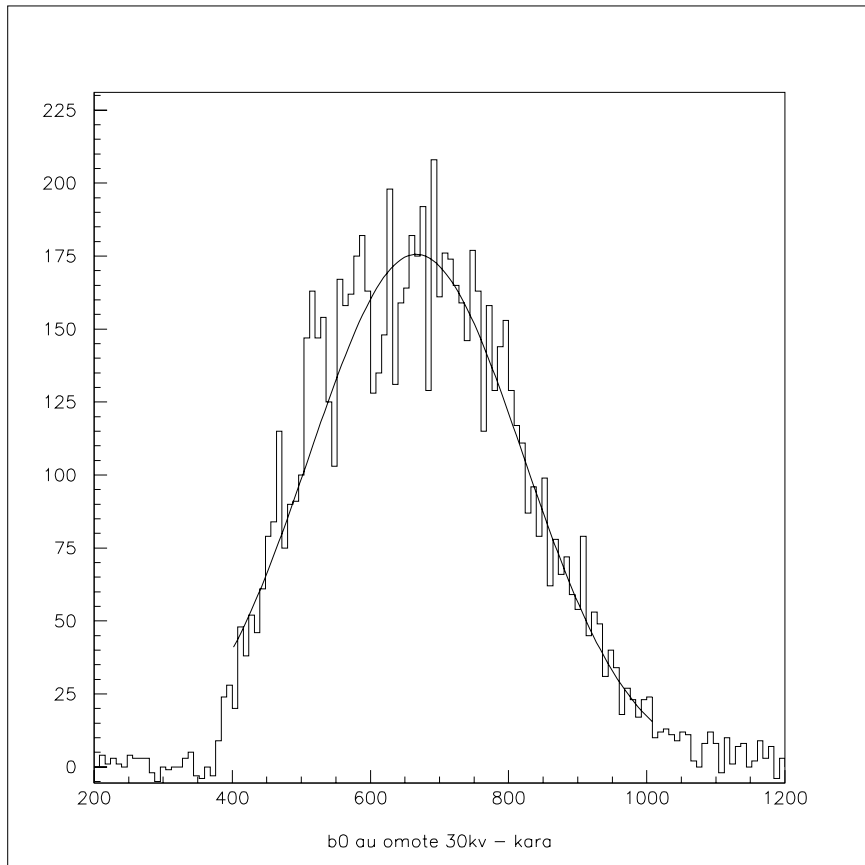


表

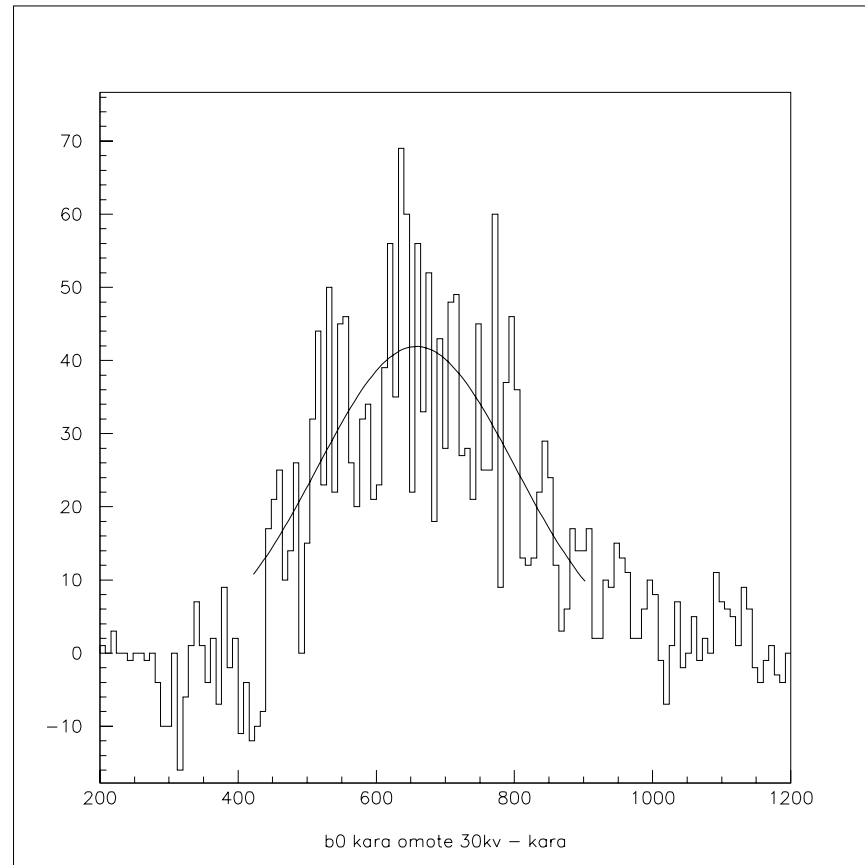
Mott散乱の測定



PM B = 0° を引く



Au 表



Al 表

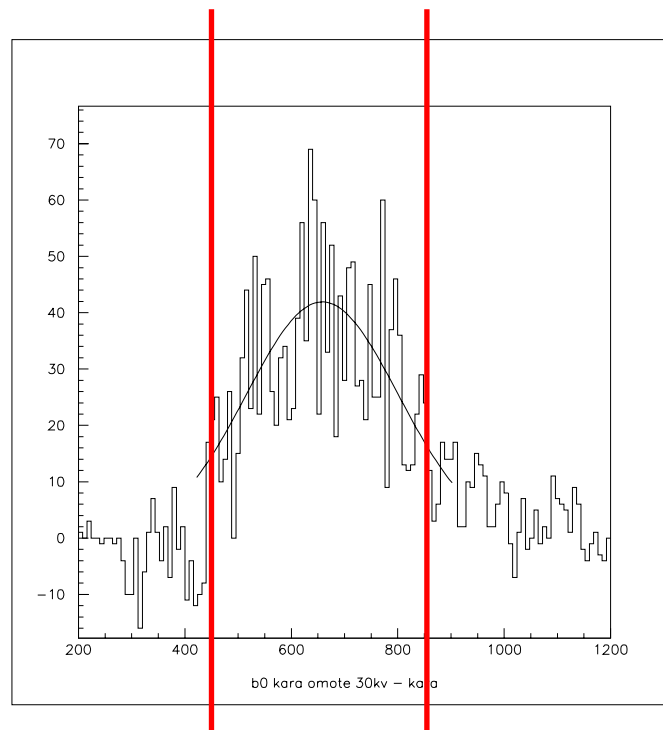
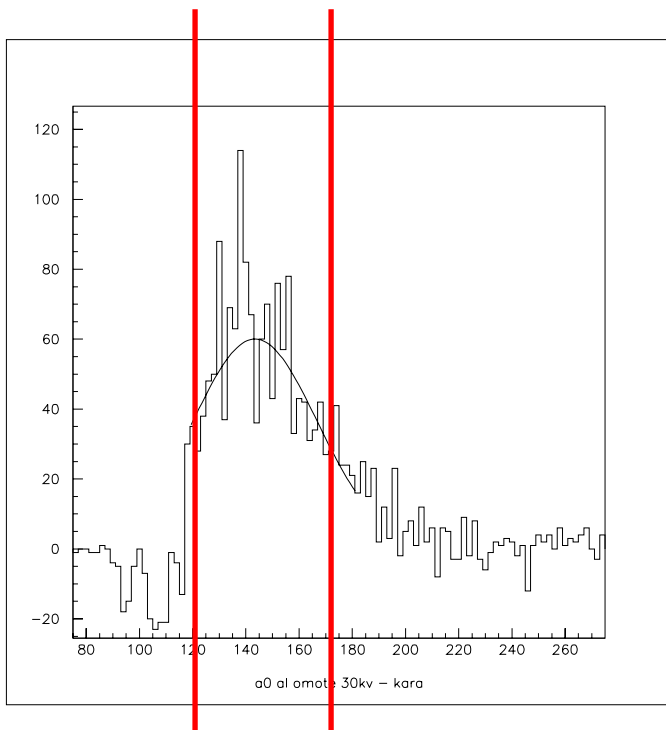


Mott散乱の測定

ピーク周りのデータのみを使用。

A : 120ch ~ 170ch

B : 450ch ~ 850ch

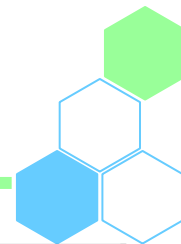


Mott散乱の測定



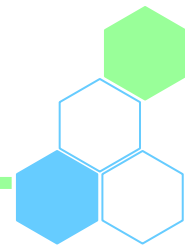
	A			B		
	Au	Al		Au	Al	
0 ° (表)	8382	3539	2183	10007	4497	2912
0 ° (裏)	8580	3844	2128	9606	4574	3164
180 ° (表)	8658	3413	2464	10075	4568	2954
180 ° (裏)	8874	3685	2197	9767	4517	3334

Mott散乱の測定



	A			B		
	Au	Al		Au	Al	
90° (表)	7983	3563	2088	10180	4195	2590
90° (裏)	8023	3468	2125	9659	3702	2814
270° (表)	8532	3574	2282	10021	4629	3023
270° (裏)	9253	3645	1499	9561	4462	3016

Asymmetry



装置自身によるAsymmetryが邪魔

AIのAsymmetryはAuの1/10程度。

$$As(Au) \quad As(AI) \neq 0 \quad (\quad = 0, 180^\circ)$$

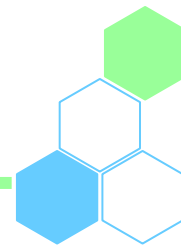
$$As(Au) \quad As(AI) = 0 \quad (\quad = 90, 270^\circ)$$

を確かめたい。

As(Au) : AuのAsymmetry

As(AI) : AIのAsymmetry

Asymmetry



PM A

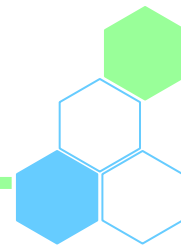
	Asymmetry	As(Au) – As(Al)
Au(0,180 °)	0.01 ± 0.01	-0.12 ± 0.03
Al(0,180 °)	0.12 ± 0.03	
Au(90,270 °)	0.00 ± 0.01	-0.03 ± 0.04
Al(90,270 °)	-0.03 ± 0.04	

Asymmetry



PM B

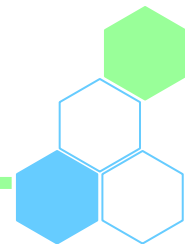
	Asymmetry	As(Au) – As(Al)
Au(0,180 °)	-0.09 ± 0.01	0.01 ± 0.03
Al(0,180 °)	-0.10 ± 0.02	
Au(90,270 °)	-0.03 ± 0.01	-0.13 ± 0.03
Al(90,270 °)	0.10 ± 0.03	



Asymmetry

	Asymmetry	As(Au) – As(Al)
Au(0,180 °)	0.00 ± 0.00	-0.04 ± 0.02
Al(0,180 °)	0.04 ± 0.02	
Au(90,270 °)	-0.06 ± 0.00	-0.05 ± 0.02
Al(90,270 °)	-0.01 ± 0.02	

結論



パリティが破れているとは言えない。

謝辞



笹尾さん、畑さん、野村さんありがとうございました