

# Møller散乱の測定による ベータ崩壊における パリティ破れの検証

2021年度 課題研究P2

岩崎 星哉 恩田 直人 成川 佳史 松下 直弥

# 目次

1. 実験の目的
2. 実験原理
3. 実験装置
4. 予備実験
5. 本実験の方法
6. 結果
7. 解析・考察

# 実験の目的

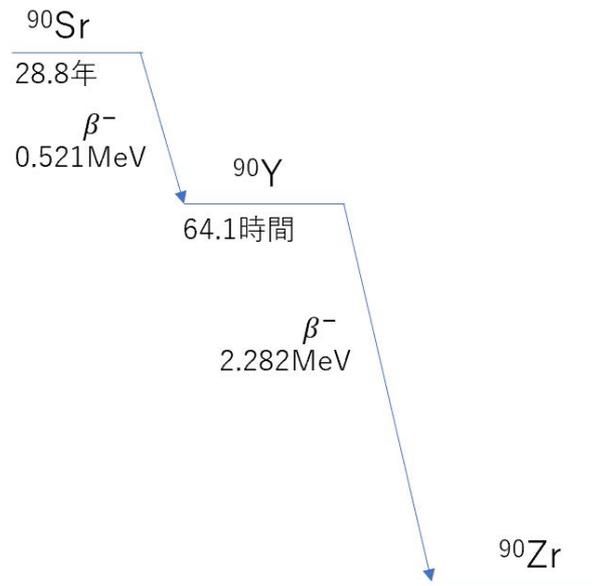
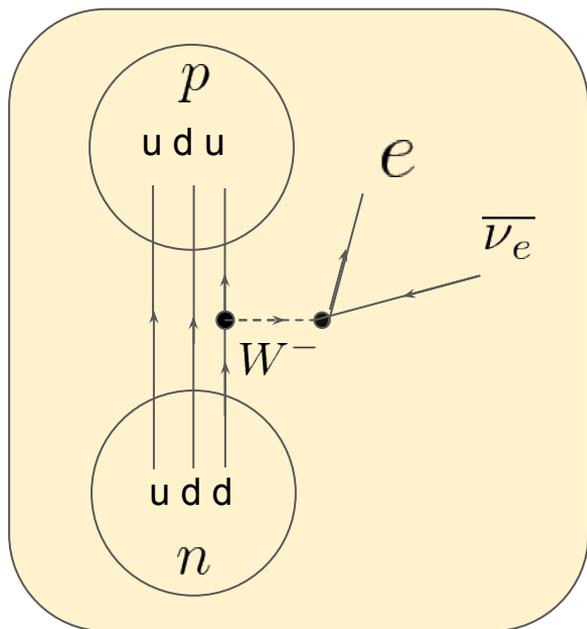
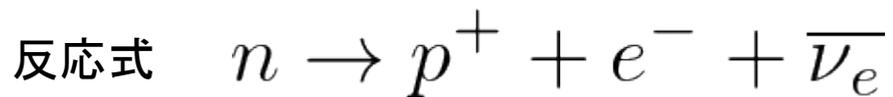
弱相互作用のパリティ対称性の破れから予想される $\beta$ 崩壊電子の helicity の偏極率

$$P_i = -\beta$$

を測定し、自然界のパリティ対称性の破れを実際に観測する。

# 実験原理

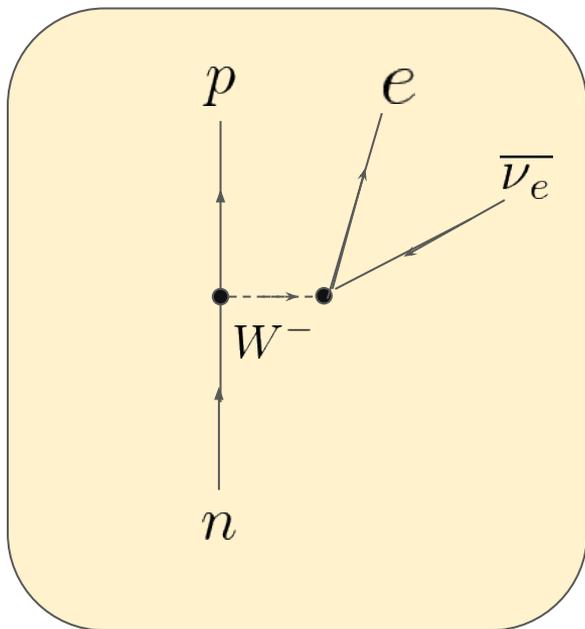
# β崩壊



2009年度 課題研究P2レポートを基に作成

弱い相互作用であり、パリティ対称性が破れている。  
今回は $^{90}\text{Sr}$ を採用した。

# V-A理論



V-A理論はβ崩壊においてパリティが破れていることを示している

不変散乱振幅

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} (\bar{u}_p \gamma_\mu \underbrace{(1 - \gamma^5)}_{\text{Parity violation}} u_n) (\bar{u}_{\bar{\nu}} \gamma^\mu \underbrace{(1 - \gamma^5)}_{\text{Parity violation}} u_e)$$

β崩壊の確率は  $|\mathcal{M}|^2$  に比例

$$|\mathcal{M}|^2 = 64G_F^2 m_p m_n p_{\bar{\nu}0} p_{e0} \left(1 - m_e s \frac{a_0}{p_{e0}}\right)$$

$S$  : 電子スピン  
 $a$  : 偏極ベクトル

# V-A理論とスピン偏極率

偏極ベクトルを電子の運動量ベクトルと空間成分が平行になるようにとる (helicity)

$$a = \left( \frac{|\mathbf{p}_e|}{m}, \frac{p_e^0}{m} \frac{\mathbf{p}_e}{|\mathbf{p}_e|} \right) \quad |\mathcal{M}|^2 = 64G_F^2 m_p m_n p_{\bar{\nu}0} p_{e0} \left( 1 - m_e s \frac{a_0}{p_{e0}} \right)$$

$\beta$ 崩壊の確率  $P$  は  $|\mathcal{M}|^2$  に比例

$$P(s) \propto 1 - m_e s \frac{a_0}{p_{e0}} = 1 - s \frac{|\mathbf{p}_e|}{p_{e0}} = 1 - s\beta$$

偏極率

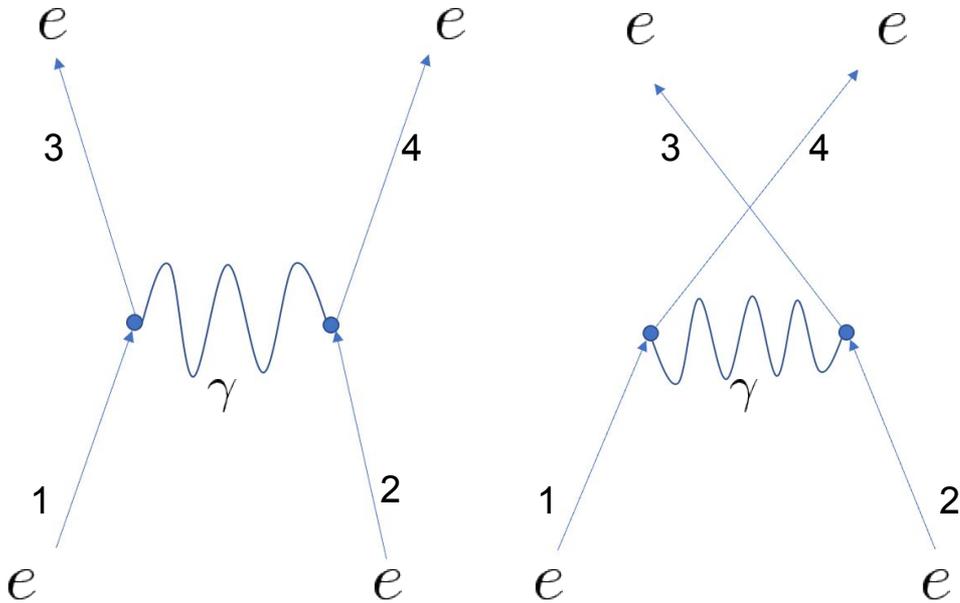
$$P_i = \frac{P(+1) - P(-1)}{P(+1) + P(-1)} = -\beta$$

---

$\beta$ 線はhelicityが負の方が多い。パリティ対称性が破れている！

# Møller散乱

Møller散乱はQEDで計算される  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  こと。摂動最低次を示す。



不変散乱振幅

$$\mathcal{M} = e^2 \left( \frac{1}{(p_3 - p_1)^2} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1) (\bar{u}_4 \gamma_\mu u_2) - \frac{1}{(p_4 - p_1)^2} (\bar{u}_4 \gamma^\mu u_1) (\bar{u}_3 \gamma_\mu u_2) \right)$$

# Møller散乱の散乱断面積

先の不変散乱振幅から散乱断面積の寄与部分はCM系で

$$|\mathcal{M}|^2 = 4e^4 \frac{1}{v^4(1-x^2)^2} \left[ (1+3x^2) + 2v^2(1+3x^2) + v^4(6-3x^2+x^4) \right. \\ \left. + s_1 s_2 \left\{ (1-x^2) + 2v^2(1-x^4) + v^4(4-5x^2+x^4) \right\} \right]$$

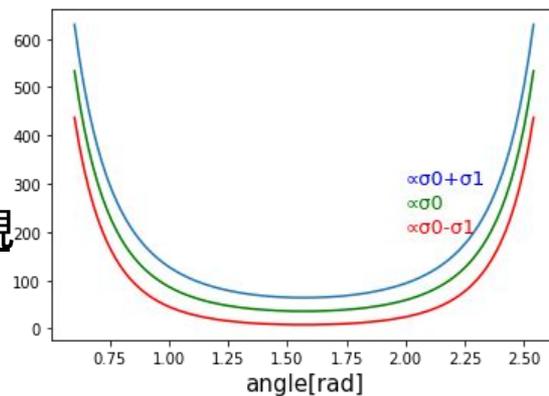
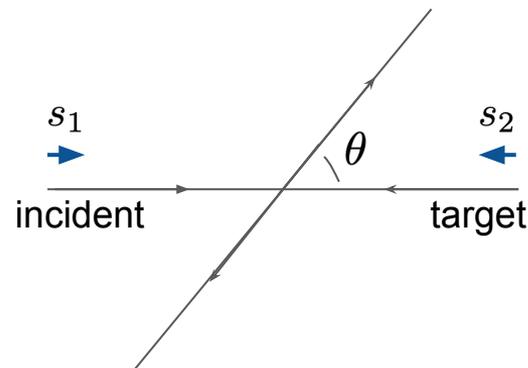
$s_1, s_2$  : helicity

$x = \cos \theta$

$$\underline{|\mathcal{M}|^2 \propto \sigma_0 + s_1 s_2 \sigma_1}$$

片方のhelicityを意図的に操作できれば

入射電子(β崩壊の放出電子)の偏極度が散乱断面積の差に現れる。



# 実験原理

incident electronの偏極率:  $P_i$

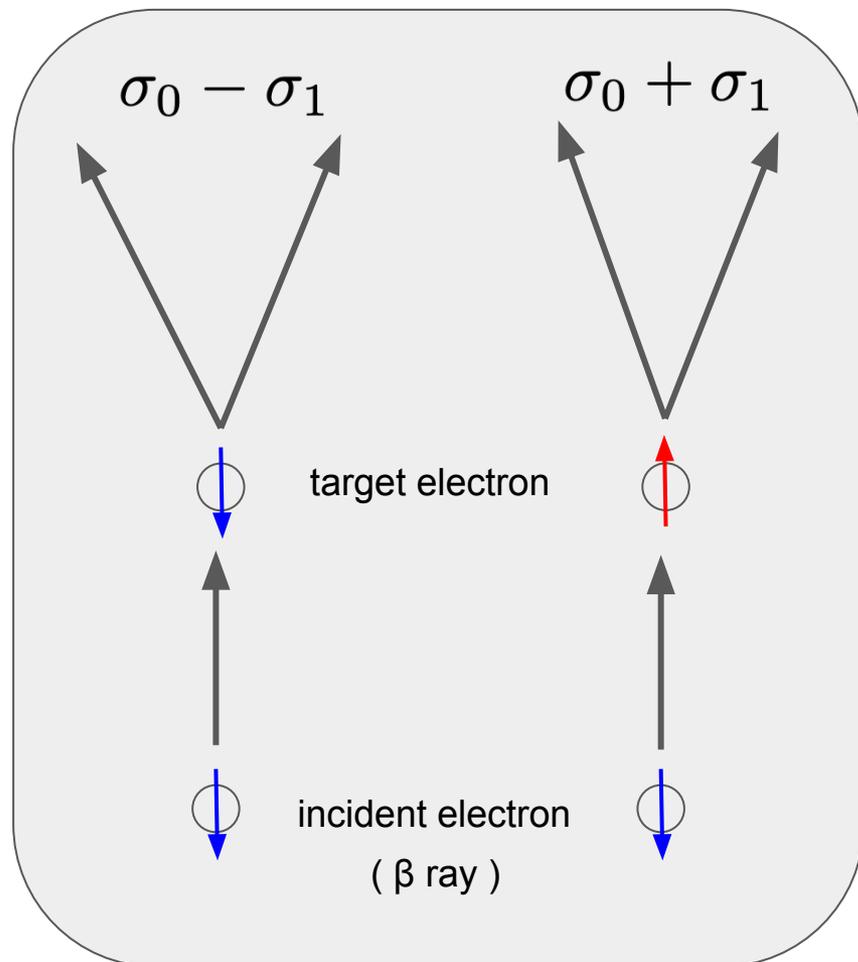
target electronの偏極率:  $P_t$

Møller散乱断面積

$$\sigma = \sigma_0 + P_i P_t \sigma_1$$

incident electron →  $\beta$ 線

target electron → スピンが外部磁場で制御可能な磁性体膜中電子



Spin Anti-Parallelの計数:

$$C_{\text{anti}} \propto \sigma_0 + P_i P_t \sigma_1$$

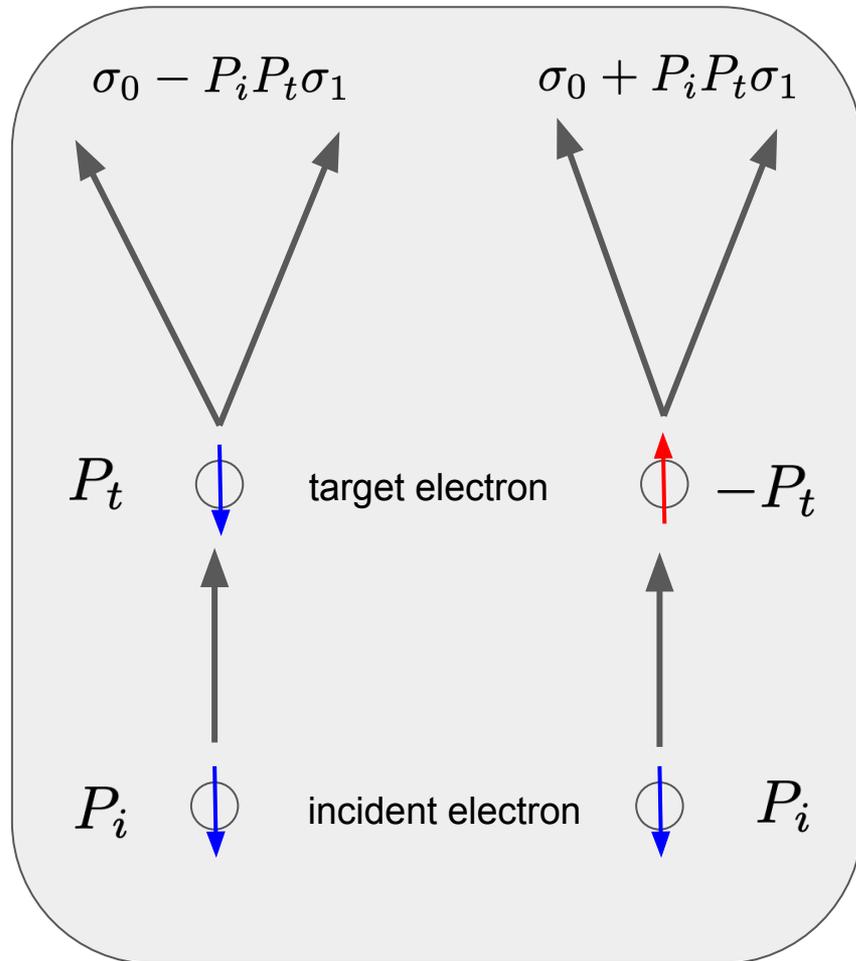
Spin Parallelの計数:

$$C_{\text{para}} \propto \sigma_0 - P_i P_t \sigma_1$$

Asymmetry

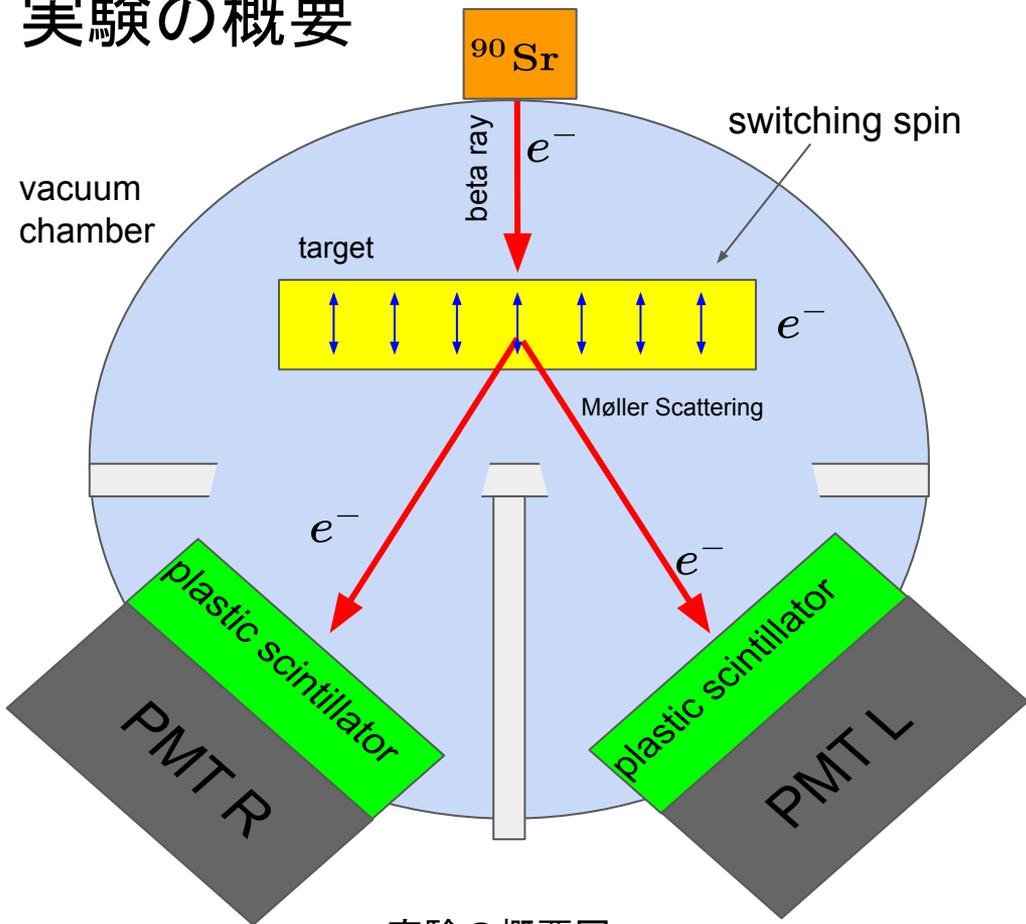
$$A = \frac{C_{\text{anti}} - C_{\text{para}}}{C_{\text{anti}} + C_{\text{para}}} = P_i P_t \frac{\sigma_1}{\sigma_0}$$

$$P_i = \frac{A}{P_t} \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \longrightarrow \text{入射エネルギー別の } P_i$$

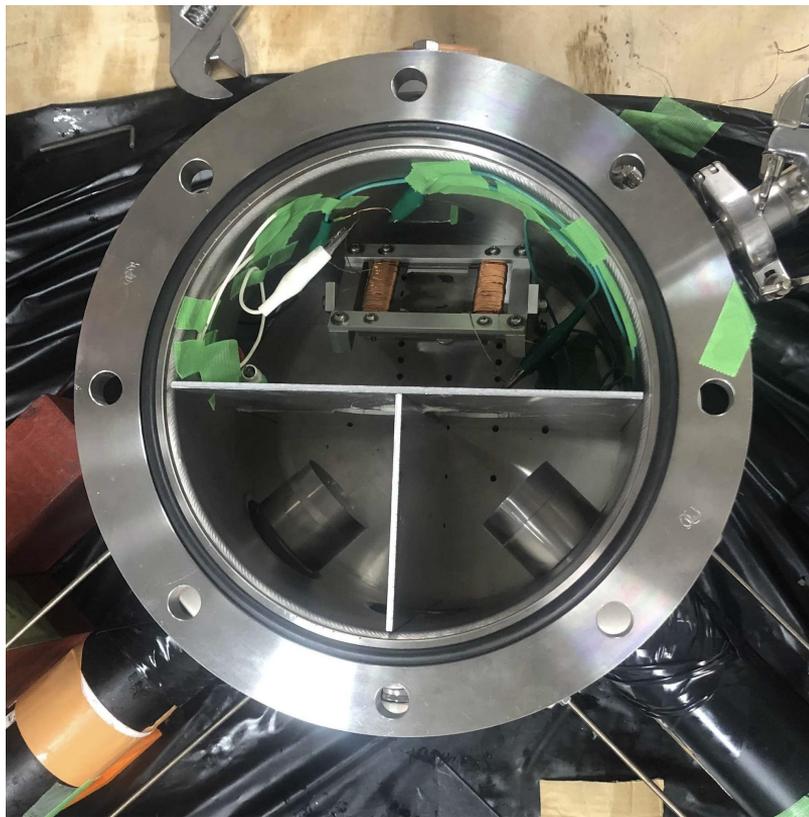


# 実験装置

# 実験の概要



実験の概要図



実際の実験装置

# 過去の同テーマの実験

2002

$\beta$ 線源のエネルギー選択のために巨大な電磁石を作成  
(収束コイル Acceptance 1%, )

target: Fe 20  $\mu\text{m}$

結果: 理論値からの相対誤差 110~150%

2003

収束コイル使用

target: Parmalloy 45 10  $\mu\text{m}$ ,

結果: 理論値からの相対誤差 40~120%

2009

収束コイル使用

target: Ni 5  $\mu\text{m}$

結果: 理論値からの相対誤差 140%

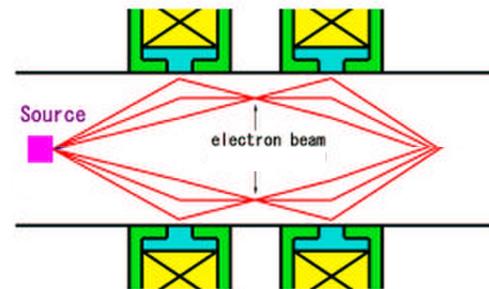


図 12: Spectrometer Magnet によって電子の描く軌道

収束コイル

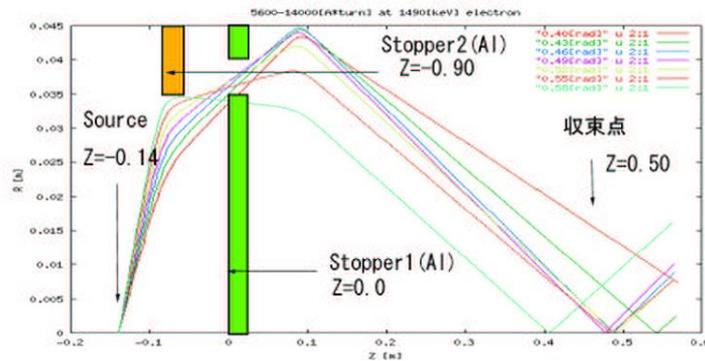


図 14: 14000[A $\cdot$ turn]-5600[A-turn] Spectrometer Magnet で 1490[keV] の electron が示す軌道

# 今回の実験のコンセプト

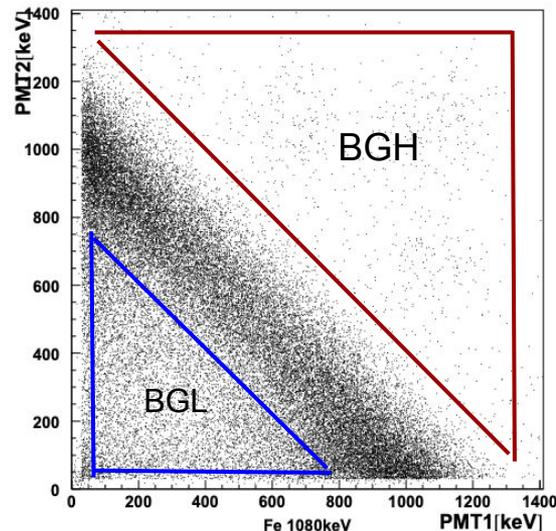
90Srの全てのエネルギー帯を同時に測定し  
~2.3 MeVのベータ線の偏極率を求める。

# 装置の設計

過去の実験では、収束コイルによってエネルギー選択した電子ビームを用いているが、実際のデータでは低エネルギーまで広がっていた。(BGL)

また高エネルギーにおいてもある程度のイベントが確認できる。(BGH)

本実験では、全エネルギーを同時に測定するので、それらBackGroundはエネルギーによるカットによって取り除くことができず、測定精度に直接影響する。



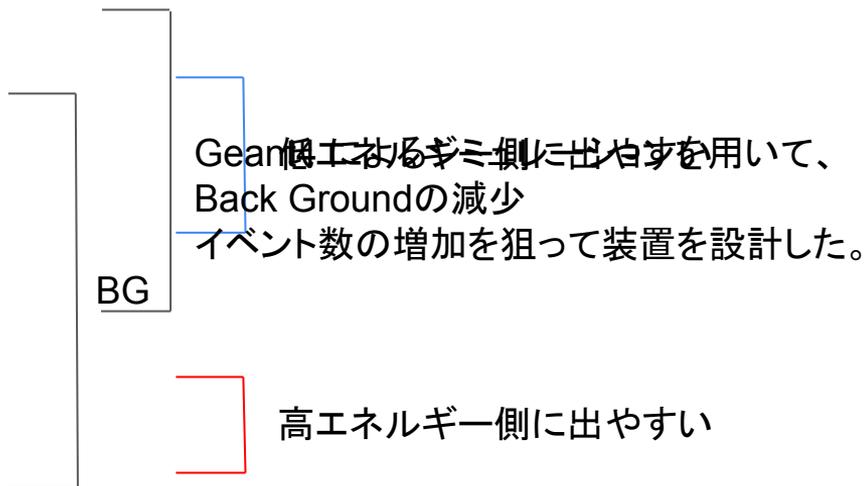
過去の実験データ

2003年度 課題研究P2レポート  
[https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=2021%E5%B9%B4%E5%BA%A6\\_p2moller2003.pdf](https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=2021%E5%B9%B4%E5%BA%A6_p2moller2003.pdf)  
より

# 実験で拾いうる反応の種類

- ・Møller散乱
- ・全エネルギーを落とさずにシンチを掠る
- ・多重Møller散乱
- ・真空槽内での乱反射
- ・target以外の場所でのメラー散乱
- ・宇宙線
- ・数十ns間隔程度で起こった二つの $\beta$ 電子

など

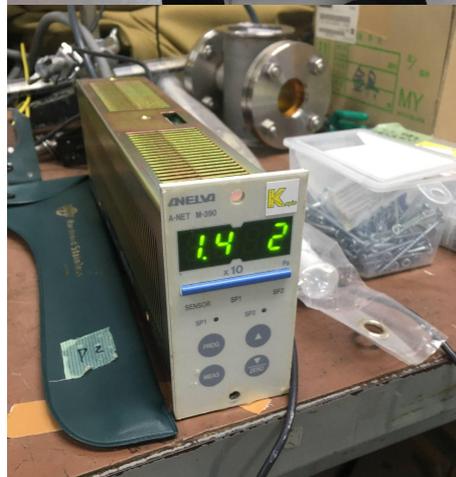
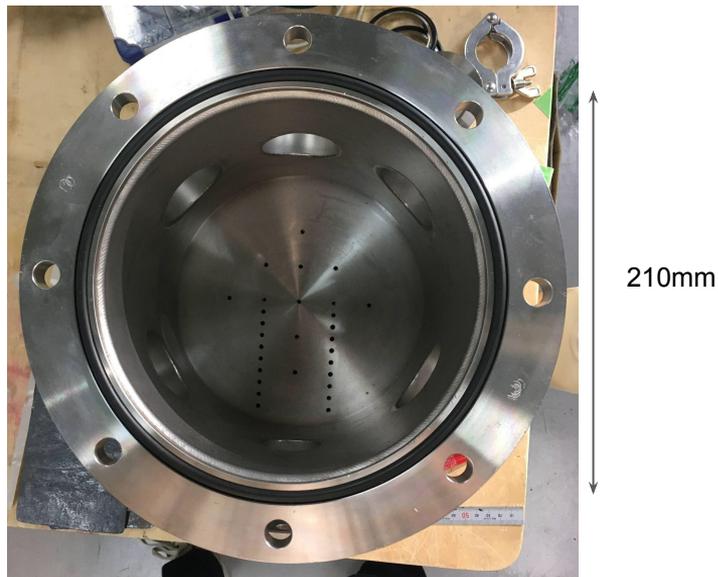


# 真空槽

真空槽は2003, 2009年度と同じものを使用した

真空度は140 Pa

真空度は、空気中での電子のエネルギー損失、空気中でのMøller散乱のおこりやすさに寄与。

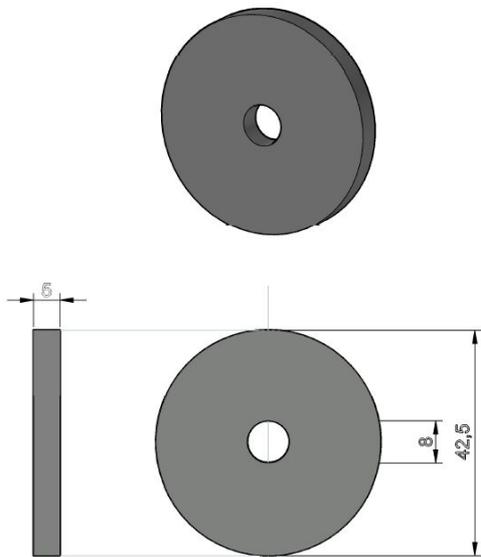


# コリメーターと仕切りf

どちらも材質は、Alで厚さは3mm。

電子が飛ぶ経路制限し、真空槽内での乱反射による

バックグラウンドを軽減する。



[mm]



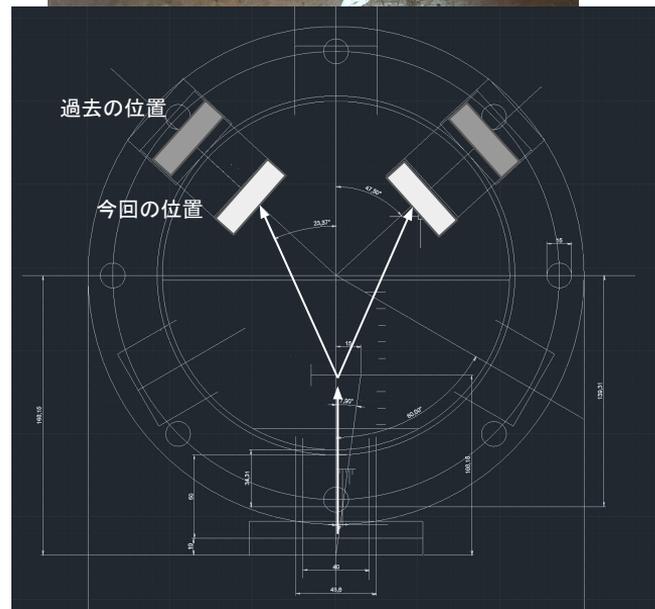
# シンチレーション検出器

電子を捉えるplastic scintillatorを新たに作成。

Light guideの長さを伸ばし、targetからscintiの距離を過去の  
実験に比べて約半分にした。

→散乱電子回収率 約4倍

beamのacceptance (過去: ~1%, 本実験: 0.47%)と合わせて  
も統計の貯まるスピードは倍近くになっているはず



# Target

## 要請

1. 磁化率を大きくするために、小さな外部磁場で大きな磁化を持つもの
2. 多重散乱を防ぐため薄膜 (~10 um)
3. 比較的安価

Permalloy 45 (45% nickel, 55% iron.)

一般名称	初(比)透磁率	最大(比)透磁率	最大磁束密度	保磁力
78%パーマロイ P C	60,000	180,000	0.72T	0.8A/m
45%パーマロイ P B	5,000	50,000	1.55T	12A/m

ref: <https://www.ohtama.co.jp/faq.html>

# 磁気回路

磁気回路の設計は3次元磁場解析ソフトFemtetを利用

回路材料 : Fe

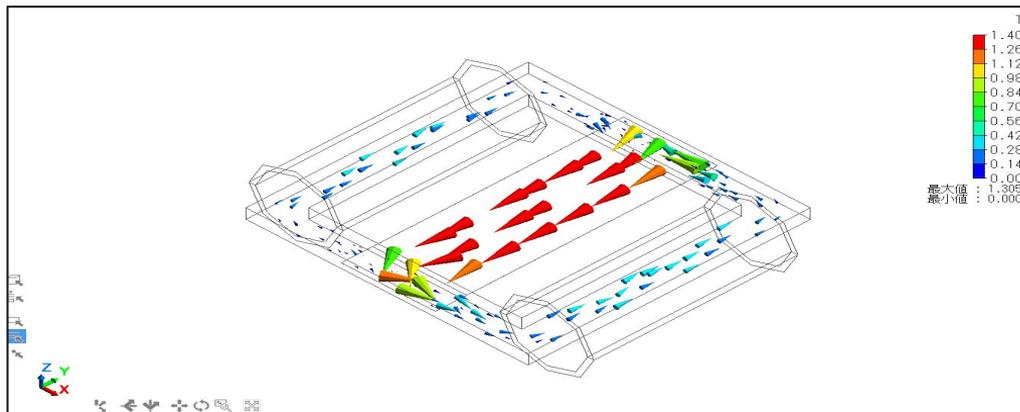
outer coil巻数 :  $70 \times 2$

電流 : 1.0 A

→ターゲットの磁化を飽和させ $M = \sim 1$  Tを得られる。



実際の磁化は、予備実験で決定

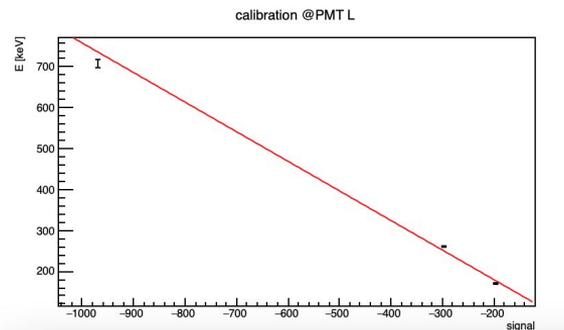
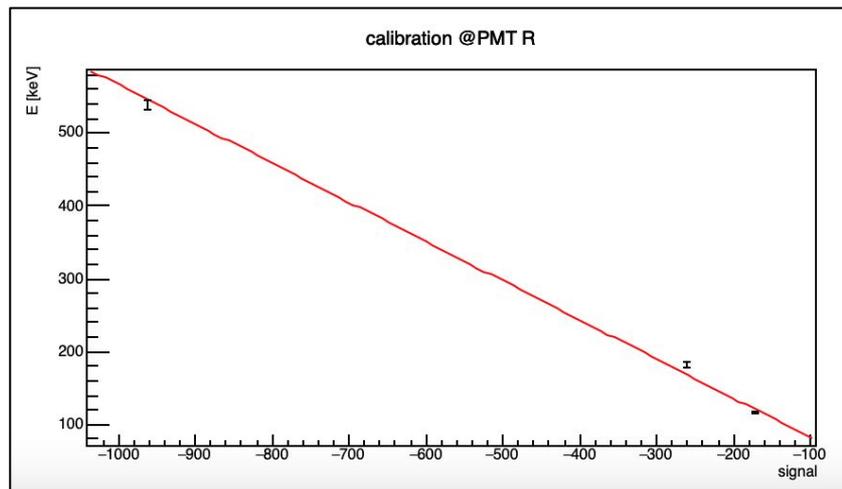
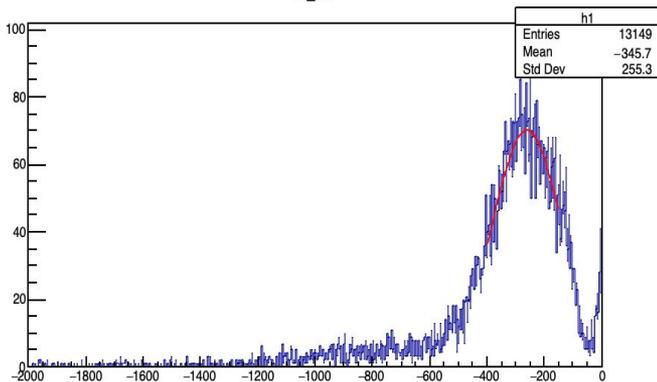
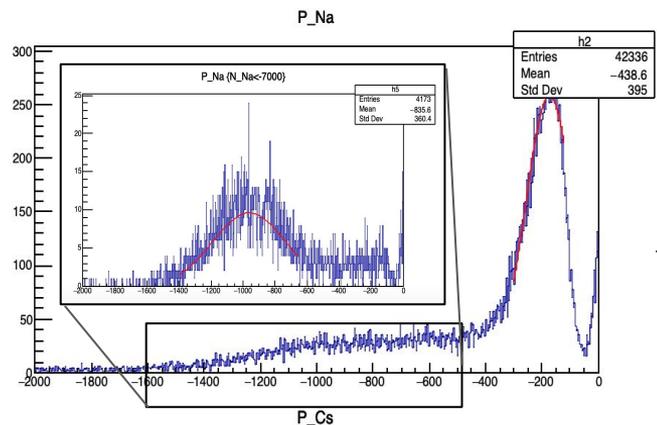


Femtetによるシミュレーション

# 予備実験 1

## PMT較正

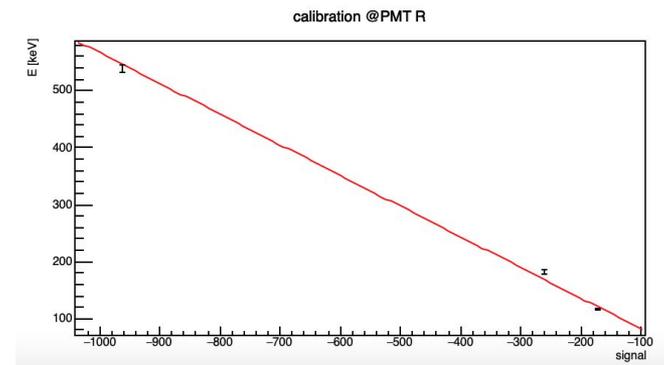
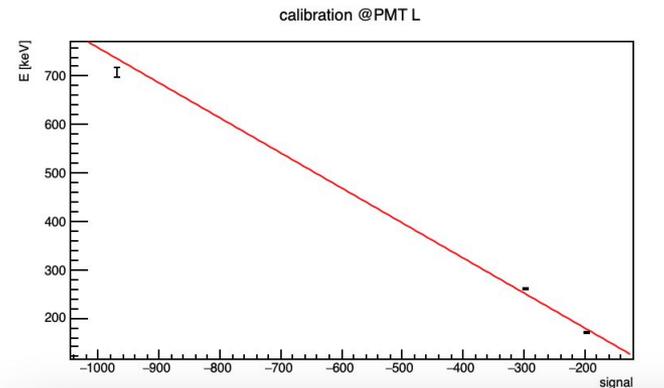
# L/R PMTキャリブレーション



# PMTキャリブレーション結果

$$\text{Energy} = p0 + p1 * \text{signal}$$

	p1	p1標準偏差	p0	p0標準偏差
PMT L	-0.538	0.008	28.1	2.5
PMT R	-0.564	0.012	8.1	3.3

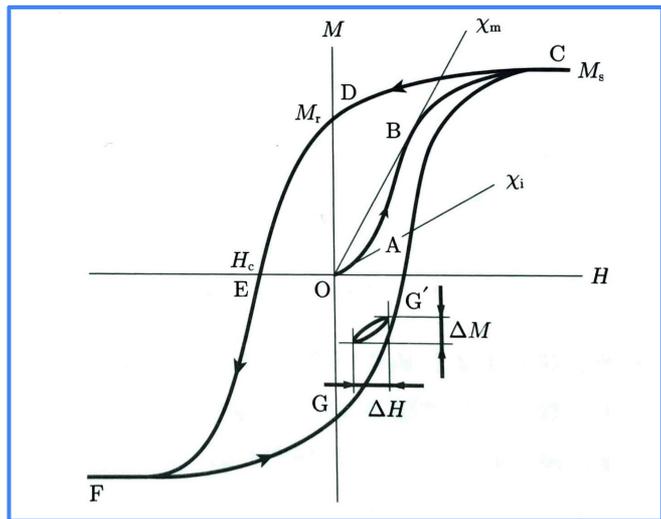


# 予備実験 2

## targetの磁化率の測定

# 測定対象:ヒステリシス曲線(B-H曲線)

- 磁化発生用の外部コイルに流す電流とtargetの磁化率の関係(どれだけtargetの偏極率が得られるか)

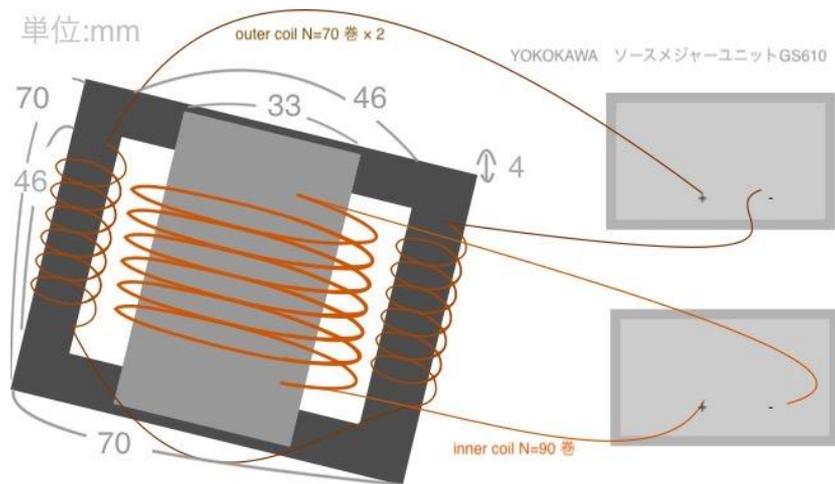


強磁性体の典型的な磁気ヒステリシス曲線

## 知りたいこと

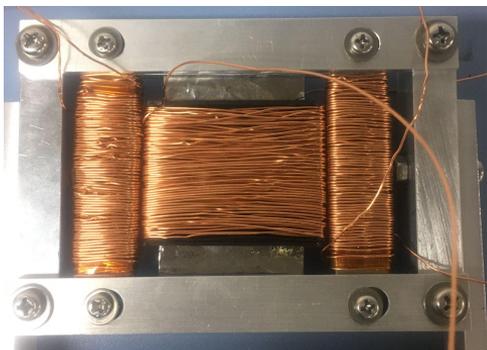
1. targetの飽和に必要な電流  
→測定時の電流決定
2. targetの磁化の測定

# 磁化の測り方



・磁気回路に巻いたouter coilに電流  $I_{\text{coil}}$  を流し磁束を発生させる。

・ターゲットを通過した磁束の変化量をターゲットに巻いたinner coil の誘導起電力  $V_{\text{in}}$  として測定する。



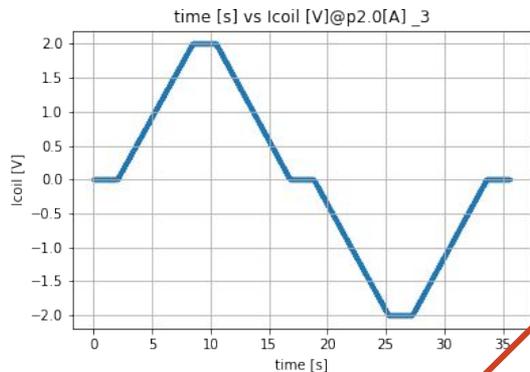
$$V_{\text{in}} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \dots(1)$$

$$\Delta\Phi = \Phi(t) - \Phi(0) = -\int_0^t V_{\text{in}} dt \quad \dots(2)$$

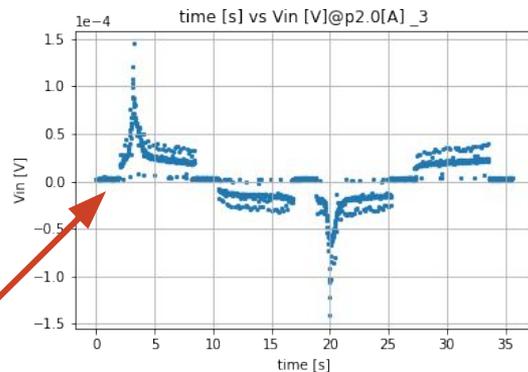
# 磁化測定の前備実験

$$V_{in} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

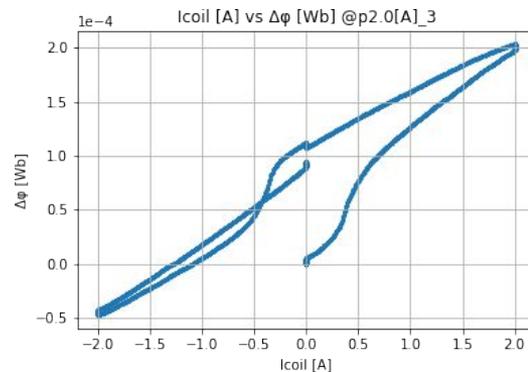
$$\Delta\Phi = \Phi(t) - \Phi(0) = -\int_0^t V_{in} dt$$



I\_coil の時間変化

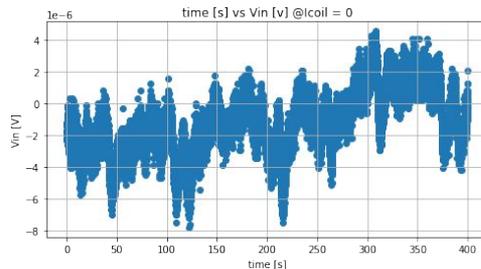


測定された誘導起電力



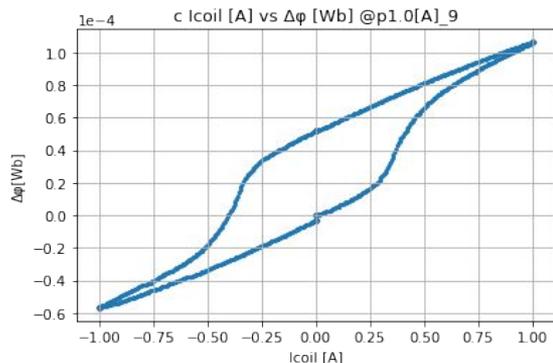
2A でのヒステリシス曲線

電圧計のベースラインが0でない  
→ヒステリシス一周での  $\Delta\Phi \neq 0$

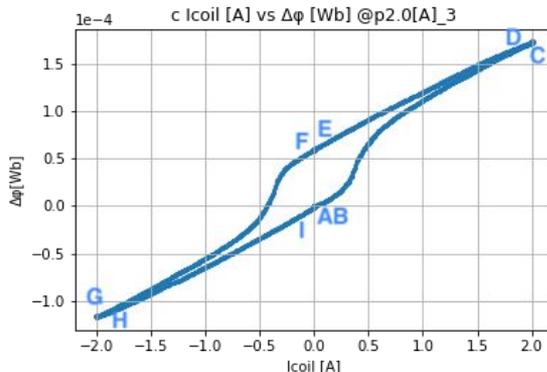


ベースライン変動の様子

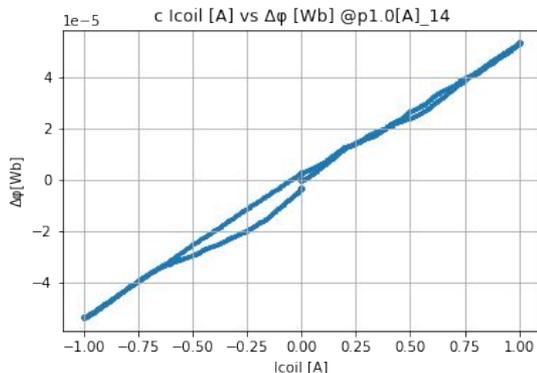
# 流す電流と磁場の強さ



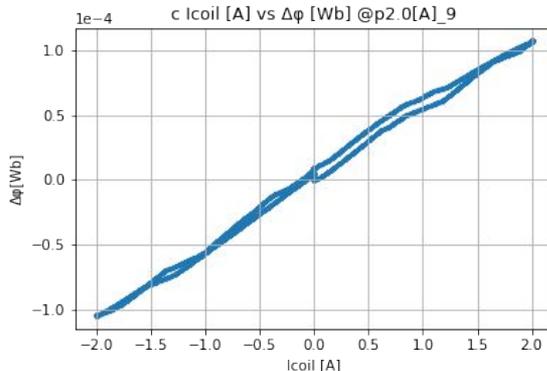
ターゲットあり 1 A



ターゲットあり 2 A



ターゲットなし 1A



ターゲットなし 2 A

- ・E ターゲットありで残留磁化

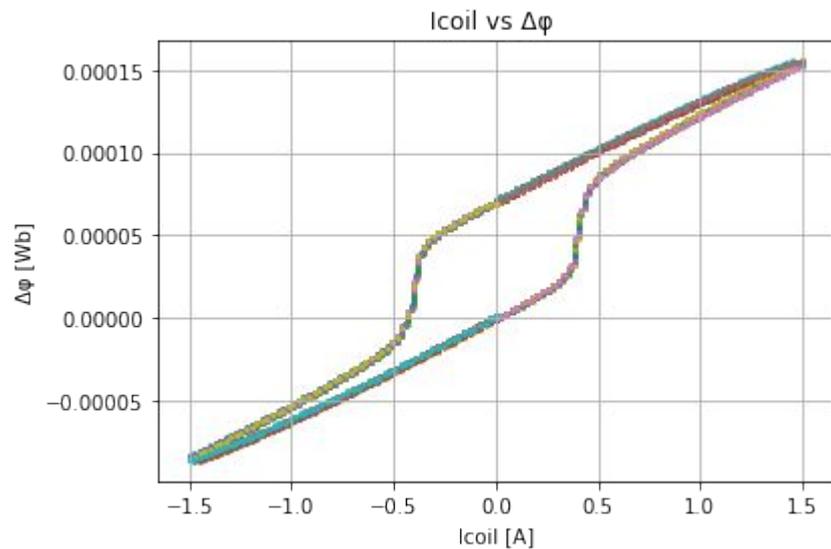
- ・ターゲットなし傾き一定

- ・ > 1 Aでは傾き一定 (ターゲットなしと傾きと一致)

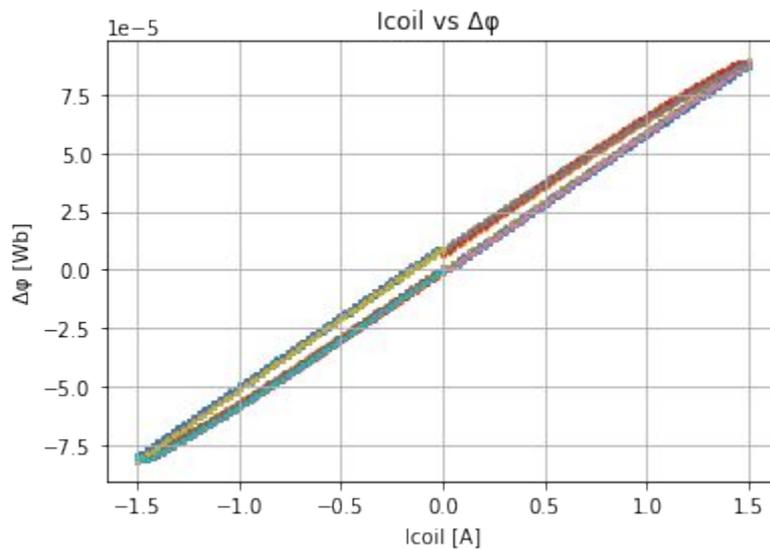
→1 A 付近で飽和磁化

→本測定では1.5 A流し飽和のち0.5 Aに決定

# 1.5 A ループ 30回測定結果



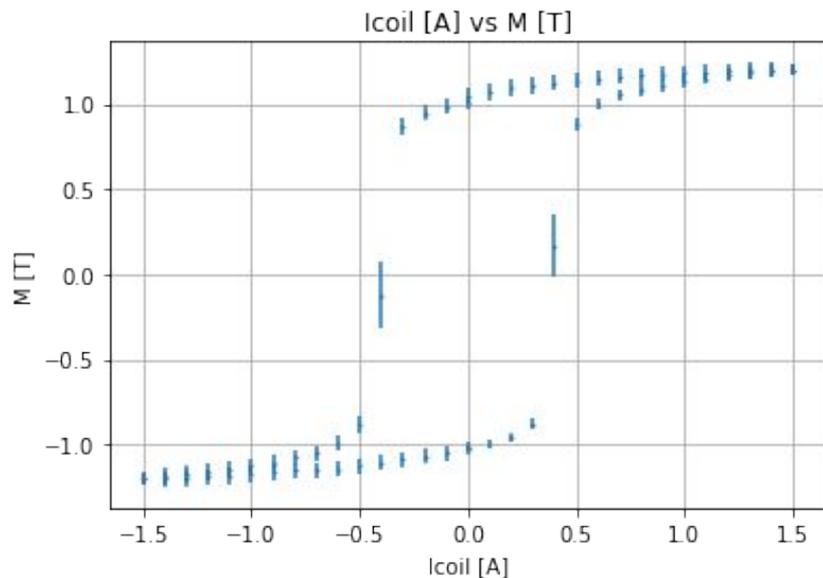
ターゲットあり



ターゲットなし

↑ 1回の測定で得られるヒステリシス曲線を 30回分重ねたもの

# 結果



- ・ターゲットあり,なしの結果を差し引き。

- ・30回データの平均と標準偏差

- ・磁束を磁束密度に変換

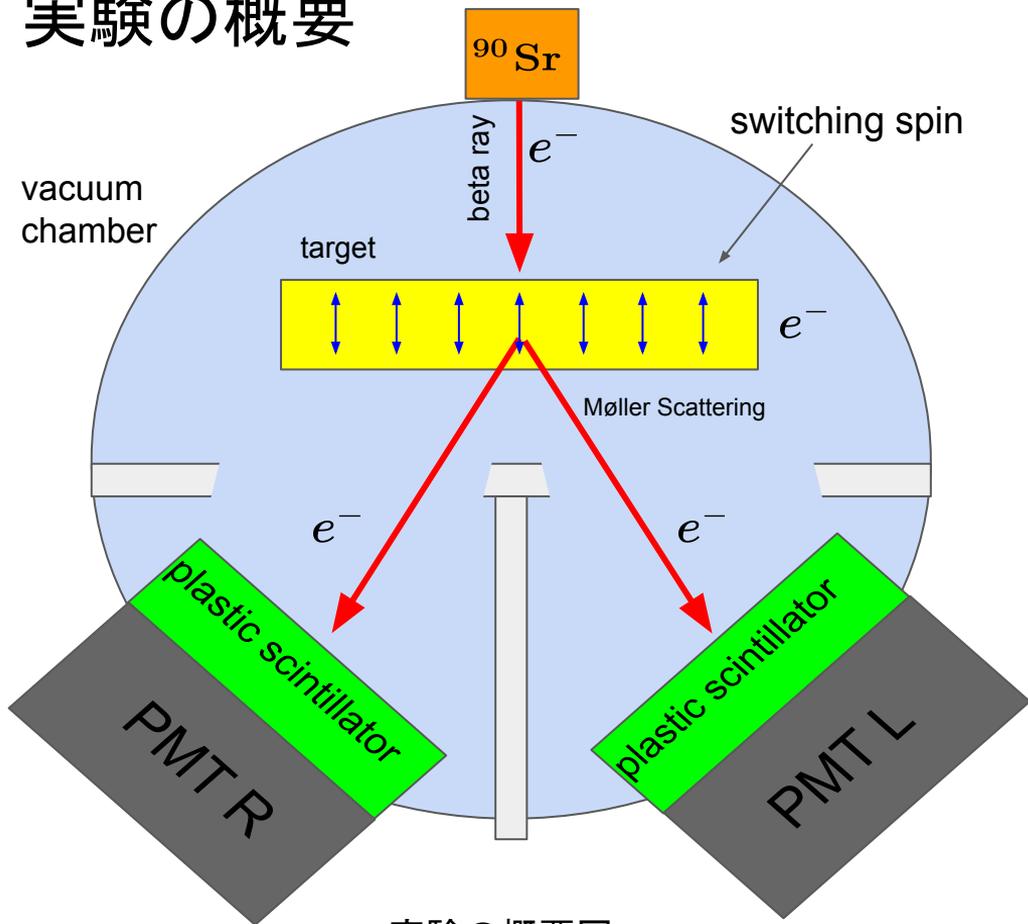
$$B [T] = \frac{\Phi [\text{Wb}]}{S [\text{m}^2]N[\text{巻}]}$$

得られたパーマロイのヒステリシス曲線

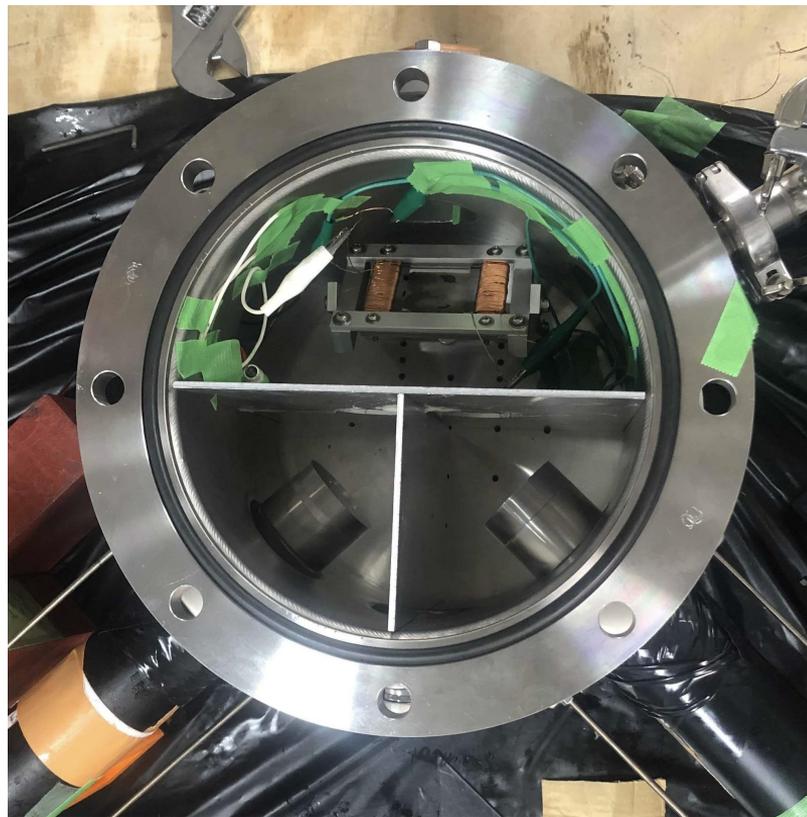
$I_{\text{coil}} [\text{A}]$	磁化 $M [\text{T}]$	磁化の誤差 [T]	偏極率 $P_i$	偏極率の誤差
0.5 A	1.138	0.0467	0.041	0.002
-0.5 A	-1.129	0.0411	0.041	0.002

# 本実験の方法

# 実験の概要



実験の概要図



実際の実験装置

# 実験方法

Vacuum chamber [140 Pa]

Al wall

target [permalloy45]

plastic scinti

45°

PMT

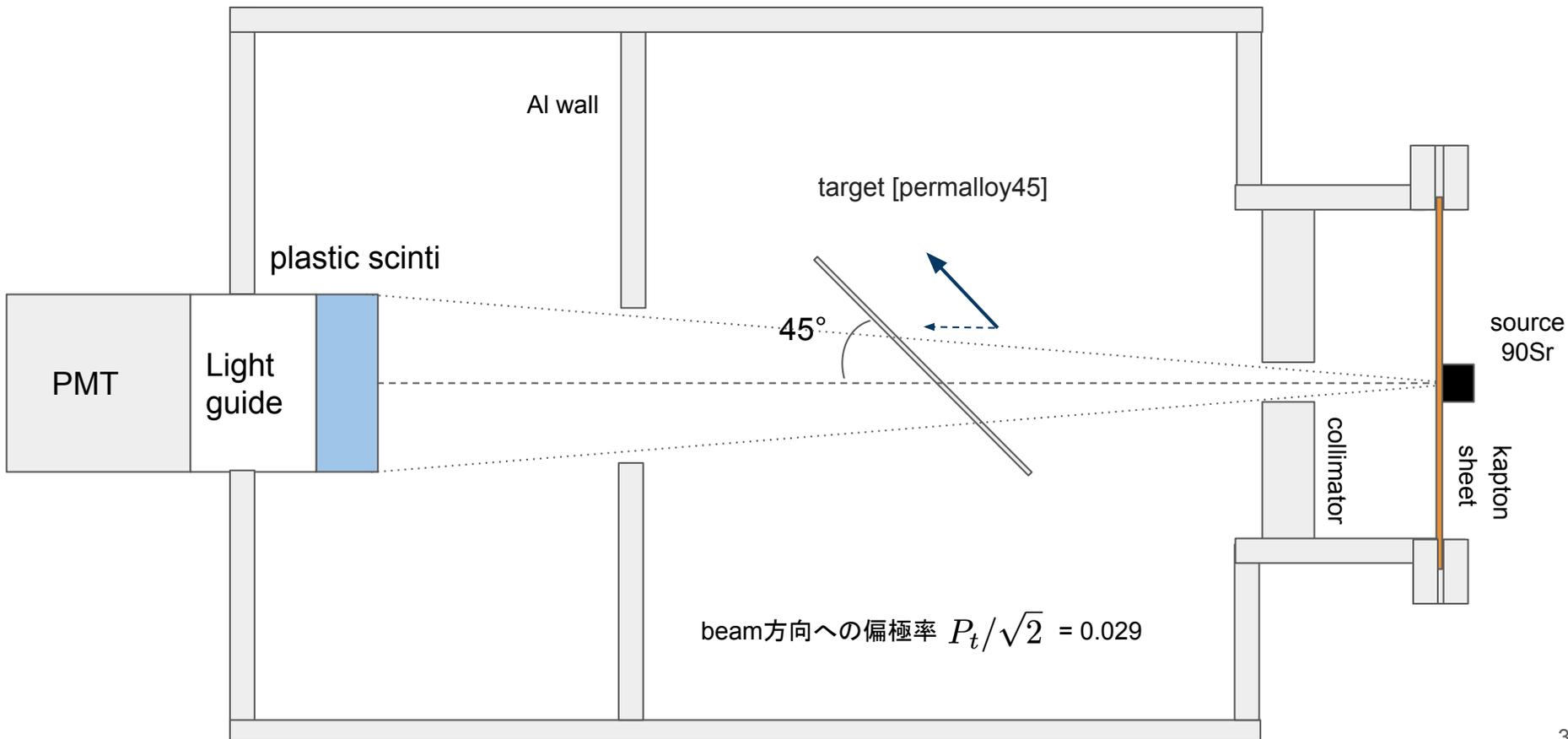
Light guide

source  
90Sr

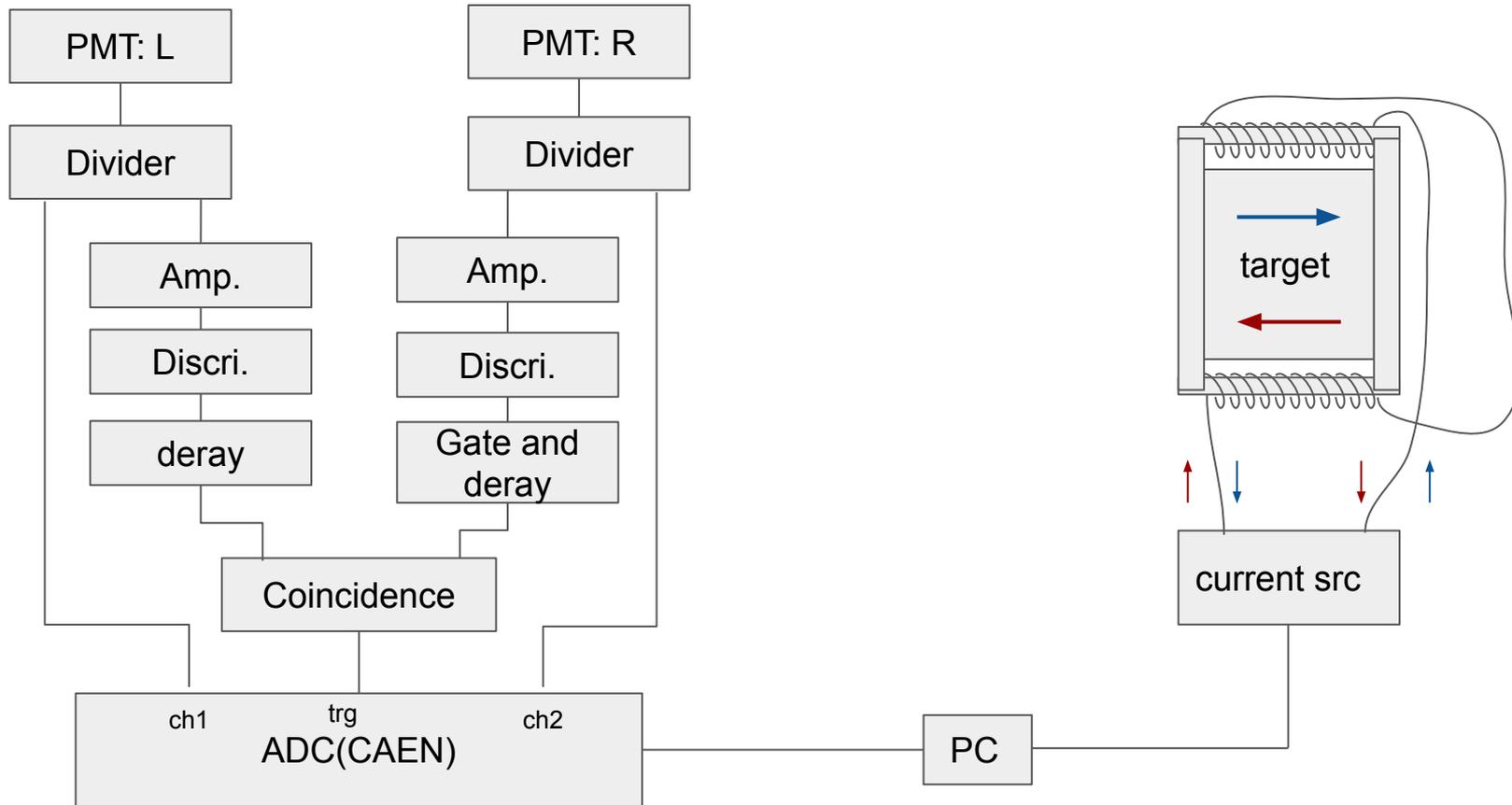
collimator

kapton  
sheet

beam方向への偏極率  $P_t/\sqrt{2} = 0.029$

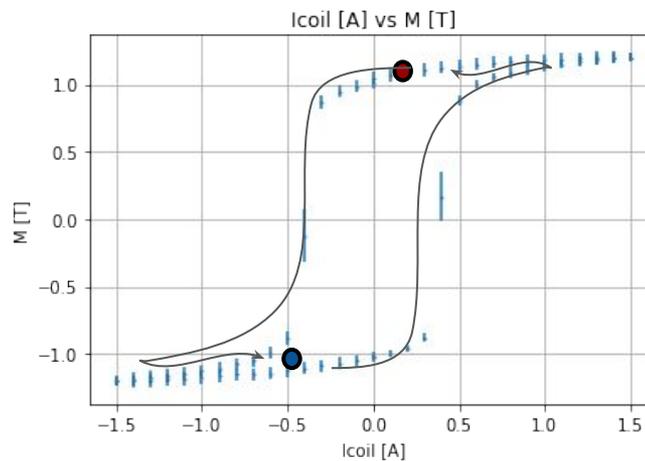
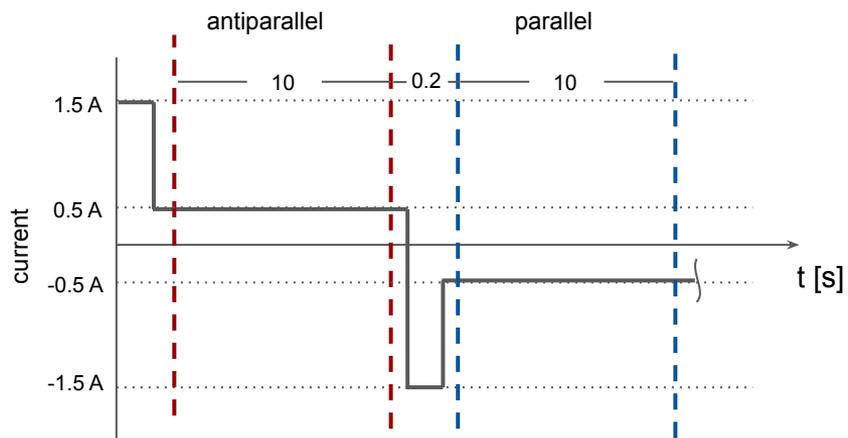


# 回路図



# 測定タイムライン

コイルの発熱を抑えるためデータ取得は  $\pm 0.5$  A



# 統計量

## 必要な統計量

メラー散乱は稀な反応(今回のジオメトリーでは1電子につき5e-5%)

→統計量を稼ぐのに時間がかかる

これまでのメラー散乱実験での電子の偏極率 $P_i$ の誤差は2003年の25%、2009年の40%とあまり良い結果は得られていない。

$$\sigma_{P_i} = \frac{P_i}{\sqrt{2NA}}$$

$P_i$ 誤差0.1を目標

## 必要な統計量

$$\sigma_{P_i} = \frac{P_i}{\sqrt{2NA}}$$

$$N = \frac{1}{2\sigma_{P_i}^2 P_t^2} \left( \frac{\sigma_0(\cos\theta, \beta)}{\sigma_1(\cos\theta, \beta)} \right)^2$$

要請される統計量  $N \propto 1/A^2 \propto 1/P_t^2$

$P_t$ は飽和 ( $\sim 0.04$ )。かつNはビームのAcceptanceにも比例するのでAcceptanceも最大化した方がいい。しかしビームを広げすぎるとBackGroundが大きくなってアシンメトリーが見えにくくなる

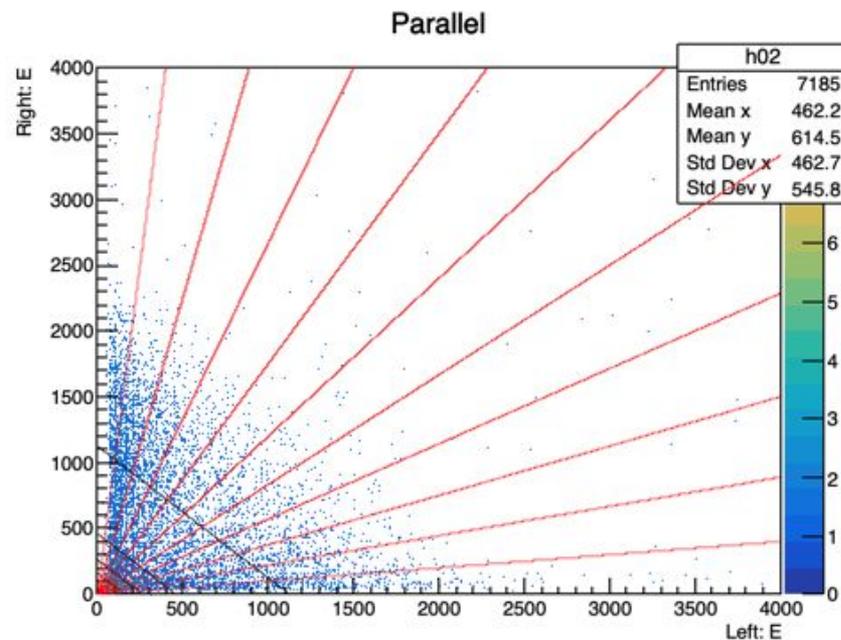
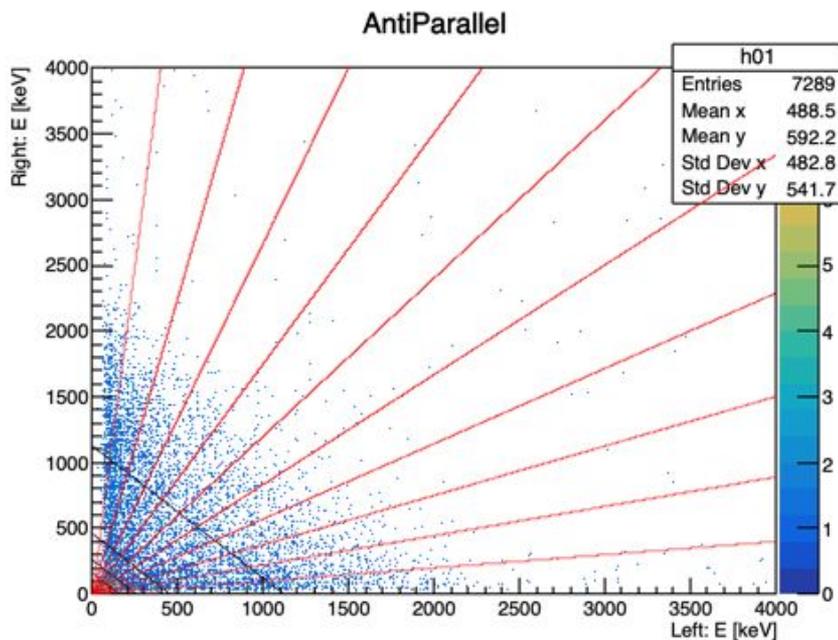
コリメーターは狭くAcceptanceは0.47%として、

シンチレーターを近付けることで回収率を上げた

# 要請される計測期間

本実験setupで19 h測定

Antiparallel	7289 events
Parallel	7185 events



# 要請される計測期間

Pi誤差0.1を達成するための計測期間を外挿

要請される計測期間 [day]

解析に使える 散乱角範囲	$ \cos  < 0.05$	$ \cos  < 0.15$	$ \cos  < 0.25$	$ \cos  < 0.35$	$ \cos  < 0.55$	$ \cos  < 0.75$	$ \cos  < 0.95$
$\beta = 0.95$	374	125	78	58	42	36	34
$\beta = 0.85$	936	307	187	134	93	82	82
$\beta = 0.75$	784	296	184	135	108	103	103
$\beta = 0.65$	561	216	155	129	116	115	114

無理そう

# 要請される計測期間

Pi誤差0.2を達成するための計測期間を外挿

要請される計測期間 [day]

解析に使える 散乱角範囲	$ \cos  < 0.05$	$ \cos  < 0.15$	$ \cos  < 0.25$	$ \cos  < 0.35$	$ \cos  < 0.55$	$ \cos  < 0.75$	$ \cos  < 0.95$
$\beta = 0.95$	94	31	20	15	11	9	9
$\beta = 0.85$	234	77	47	34	23	20	20
$\beta = 0.75$	196	74	46	34	27	26	26
$\beta = 0.65$	140	54	39	32	29	29	29

# 解析方法

# 解析方法

CM系での散乱角とFT系での2電子運動E、T1,T2との関係

$$\cos\theta = \frac{1-R}{1+R} \quad R = \frac{T_2}{T_1}$$

で0.1ずつ20分割。 $\beta$ は

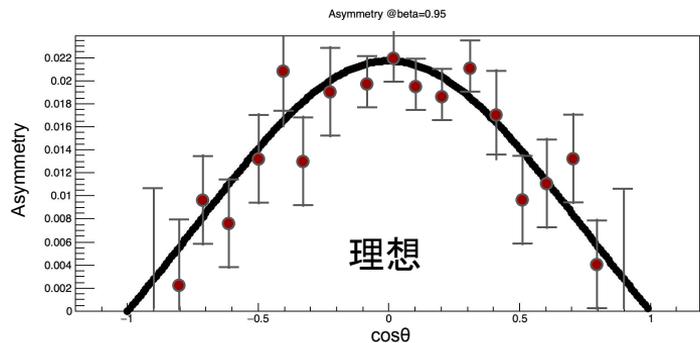
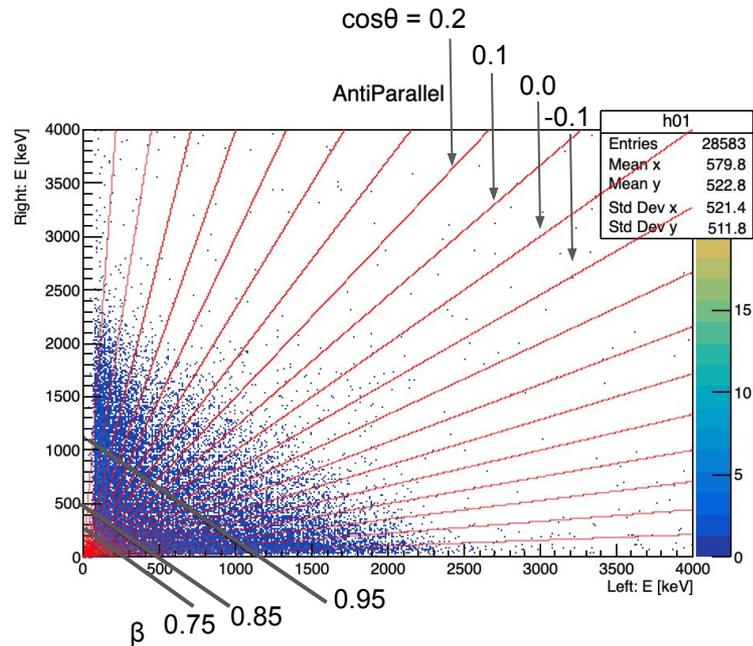
(0.6, 7.0), (7.0, 8.0), (8.0, 9.0), (9.0, 1.0)の4領域でそれぞれ

$\beta = 0.65, 0.75, 0.85, 0.95$ の点を代表。

各 $\beta$ についてcosの20領域に対してのAsymmetry

$$A = \frac{C_{\text{anti}} - C_{\text{para}}}{C_{\text{anti}} + C_{\text{para}}} = P_i P_t \frac{\sigma_1}{\sigma_0}$$

から  $P_i$ を20点計算。

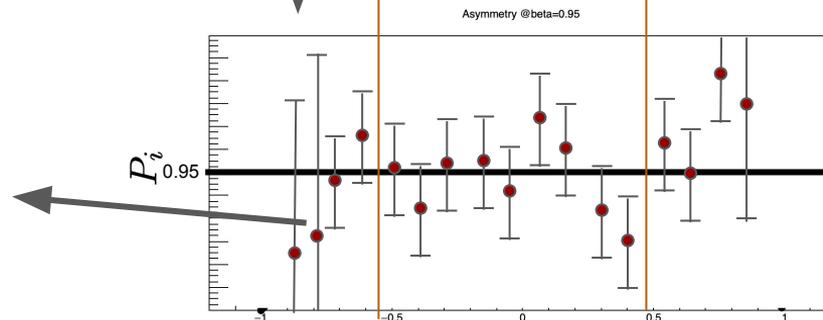
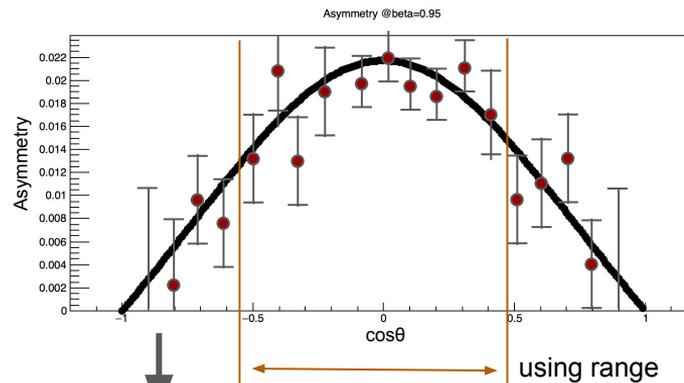
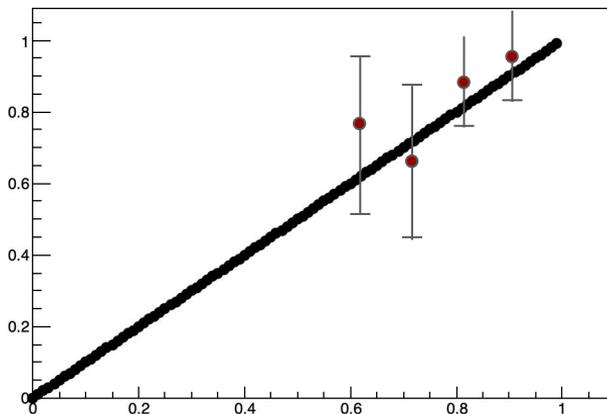


# 解析方法

有効なcosineの点を抽出して重み付け平均

$$P_i = \frac{\sum(P_i(\cos\theta)/\sigma_{P_i}^2(\cos\theta))}{\sum(1/\sigma_{P_i}^2(\cos\theta))}$$
$$\sigma_{P_i} = \frac{1}{\sqrt{\sum(1/\sigma_{P_i}^2(\cos\theta))}}$$

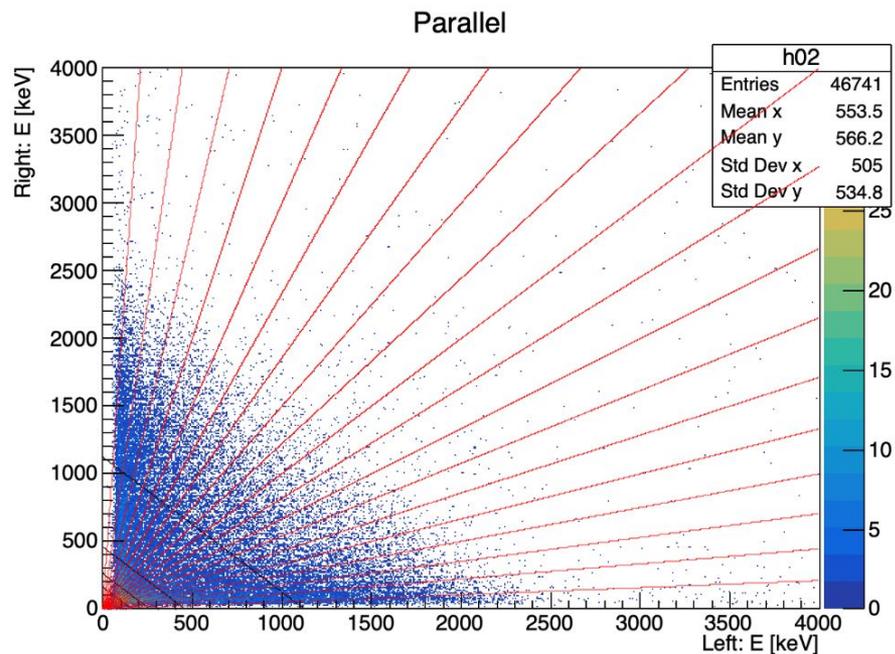
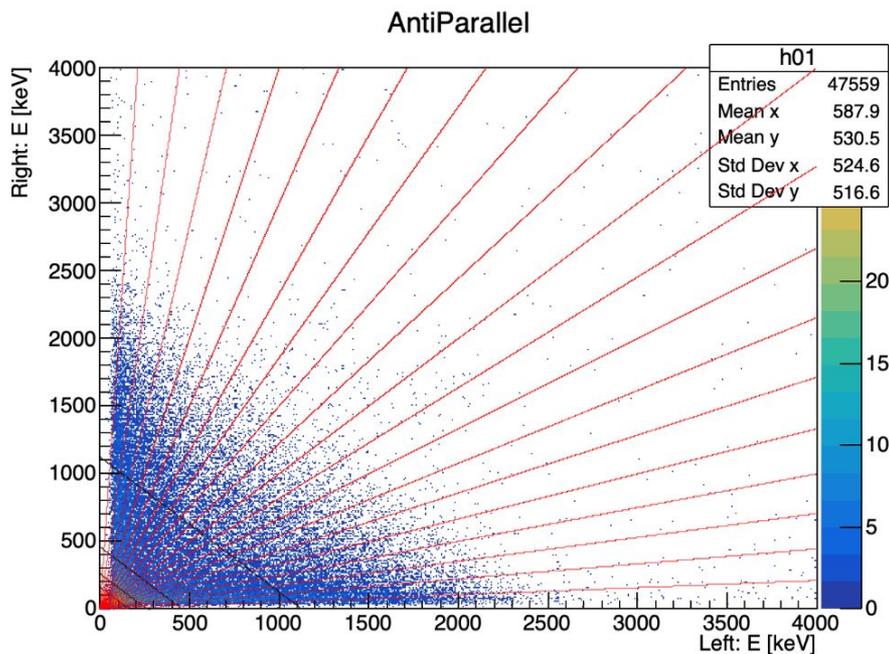
IPil



# 結果

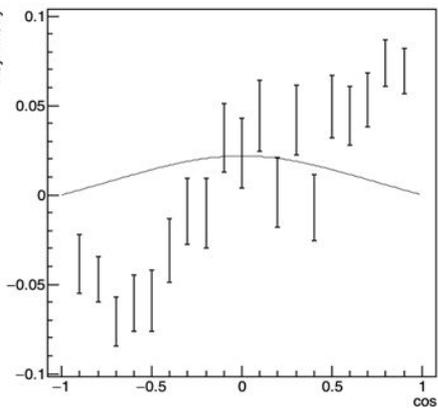
# 結果

実験開始が遅れ発表現在までで統計は約 7日分。計数差はでた

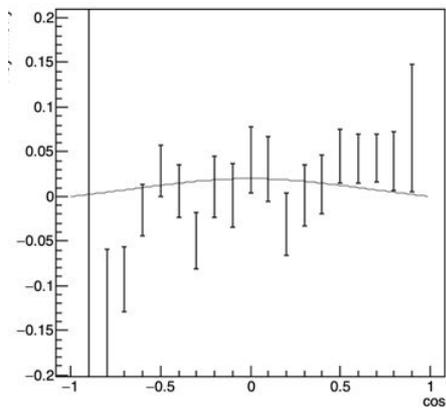


# 結果

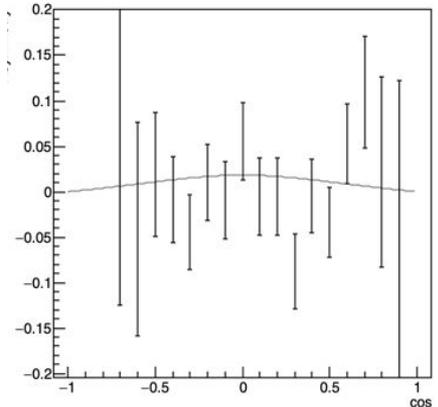
beta = 0.95



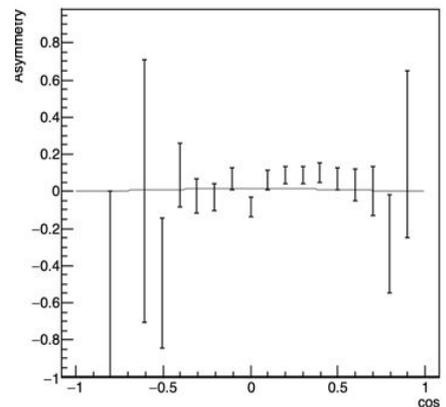
beta = 0.85



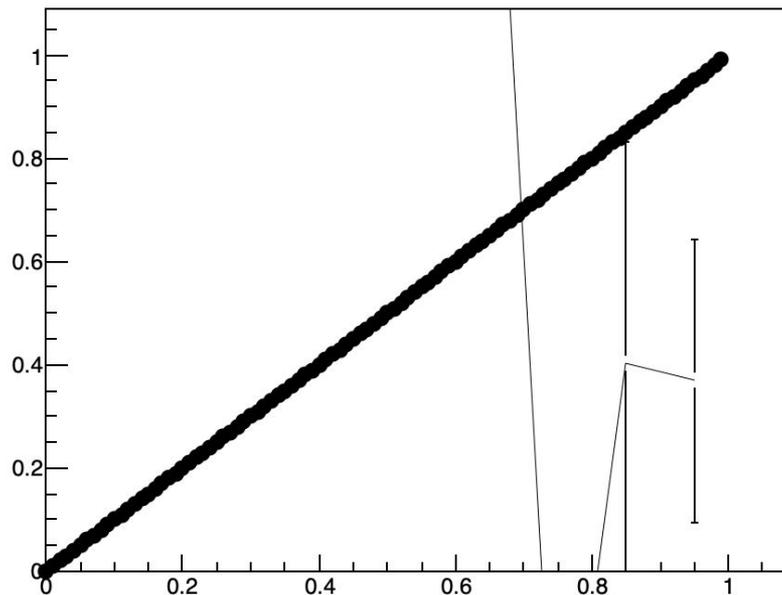
beta = 0.75



beta = 0.65



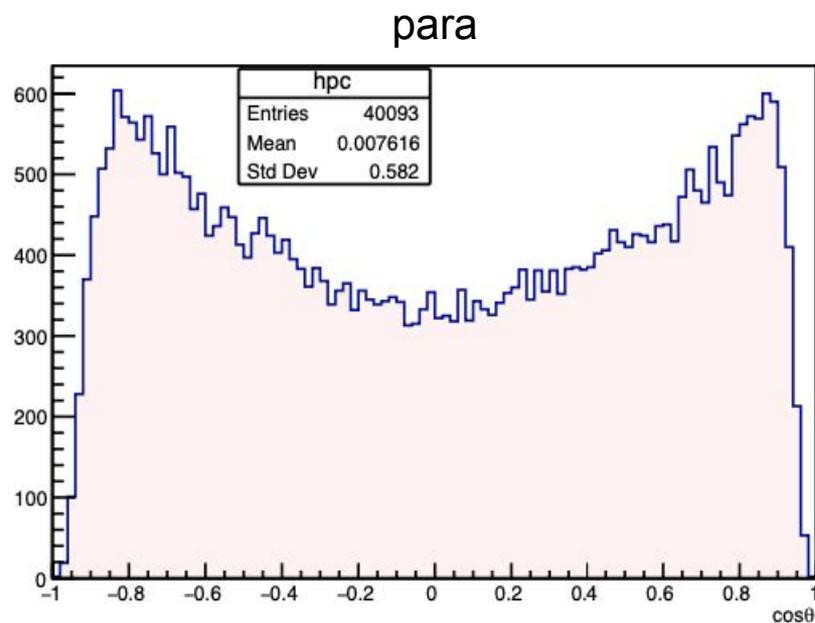
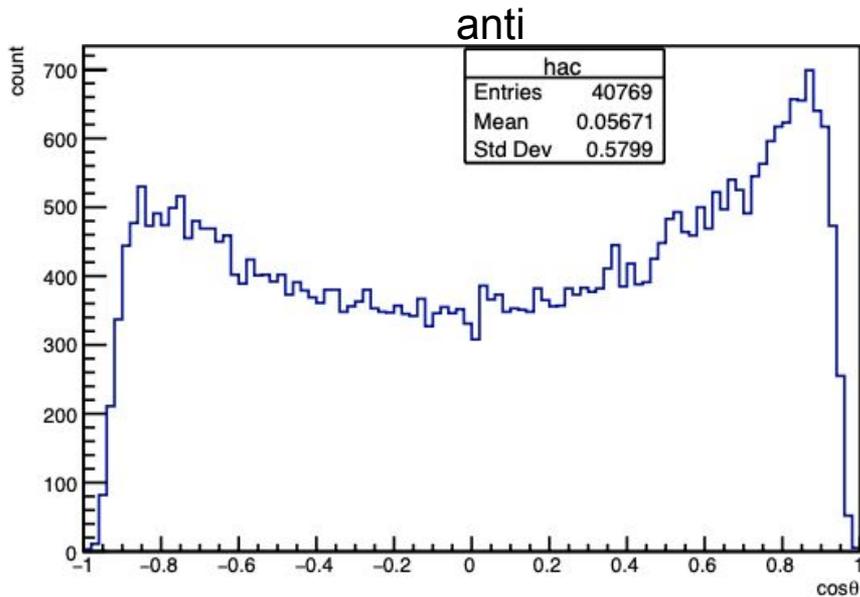
IPil



# 解析・考察

# 問題: 左右非対称

全エネルギーでのカウント数



断面積は  $\cos^2\theta$  の関数

→  $\cos\theta$  の  $\pm$  で対称になるはずだが...

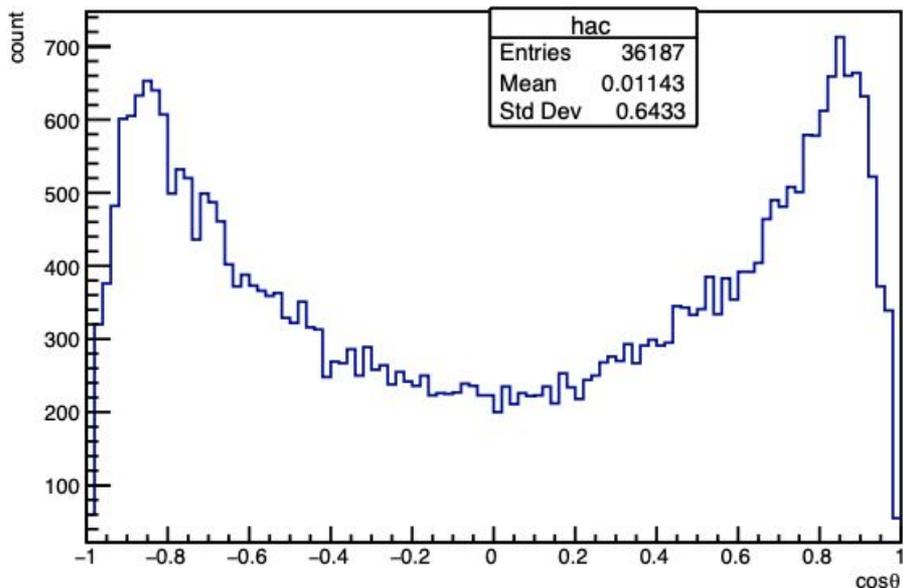
さらに anti/para で増減逆転してる

→ Asymmetry に大きな影響

# ちなみにGEANT4でも磁場を加えると・・・

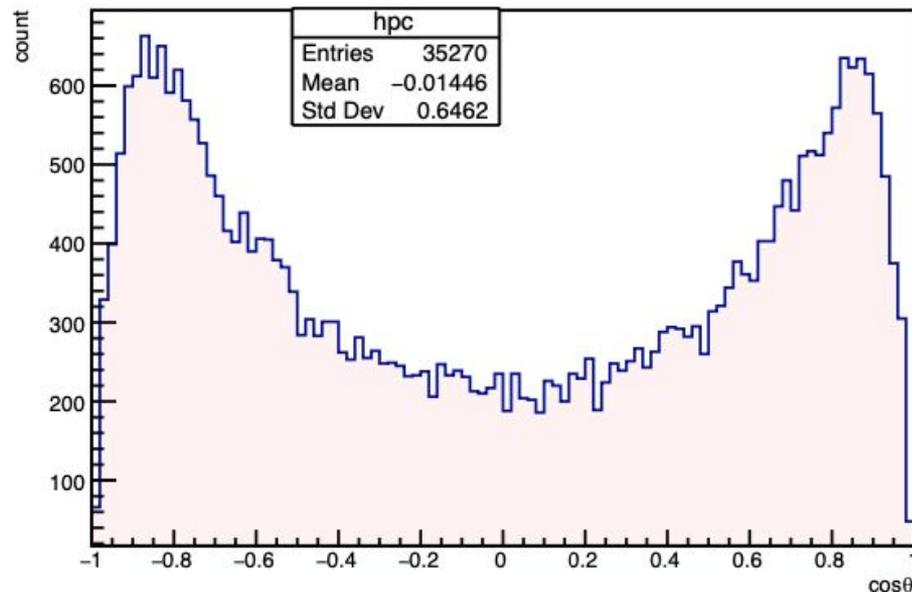
全エネルギーでのカウント数

anti



anti  $\cos\theta > 0$  多

para



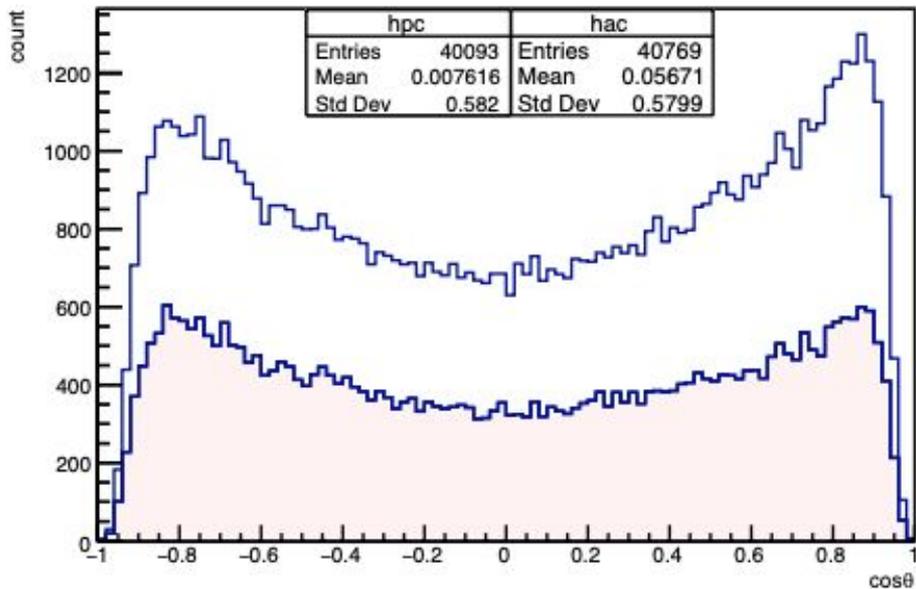
para  $\cos\theta < 0$  多

実際の測定と同じ傾向

# antiとpara足してみると

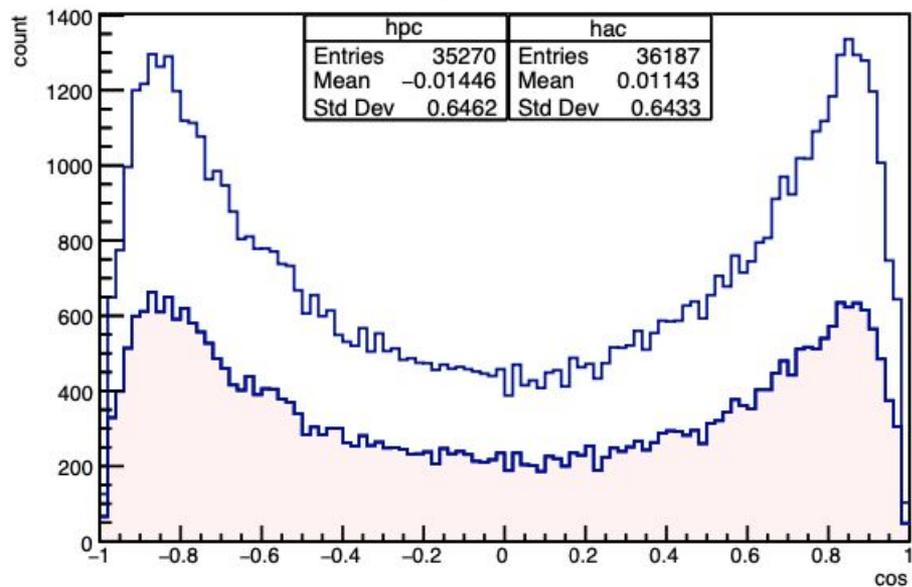
全エネルギーでのカウント数 anti+para

測定値



- ・足しても左右差
- 磁場の影響+セットアップの左右差

GEANT4



- ・足したら左右差ない
- 磁場の影響のみ

# 漏れ磁場

target stageの周囲は~1 mT程度の磁場が漏れ出ている

→大角度散乱での遅い電子は曲げられやすい

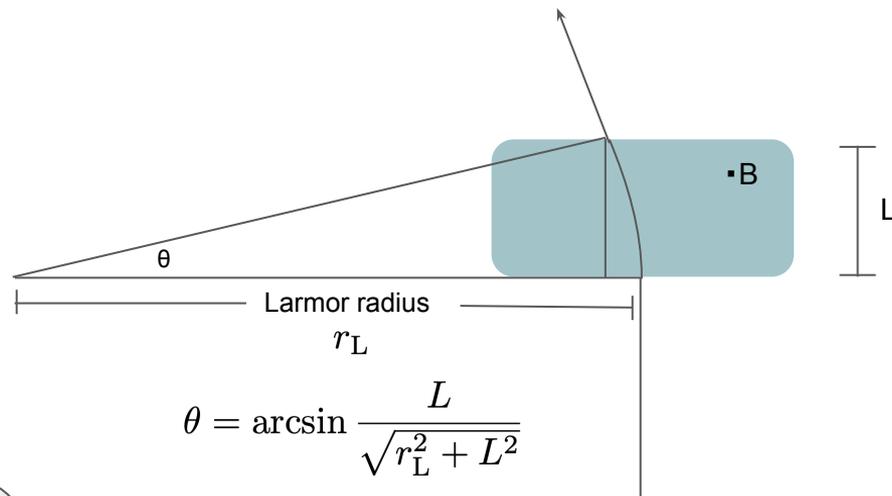
磁場が存在することで電子の収集率に散乱角度依存が出る

$$\text{Larmor半径} \frac{mc\beta\gamma}{eB} \quad \theta (L \sim 0.05 \text{ m})$$

$$\beta = 0.7 (205 \text{ keV}) \rightarrow 1.67 \text{ m} \rightarrow 1.715^\circ$$

$$\beta = 0.8 (341 \text{ keV}) \rightarrow 2.28 \text{ m} \rightarrow 1.256^\circ$$

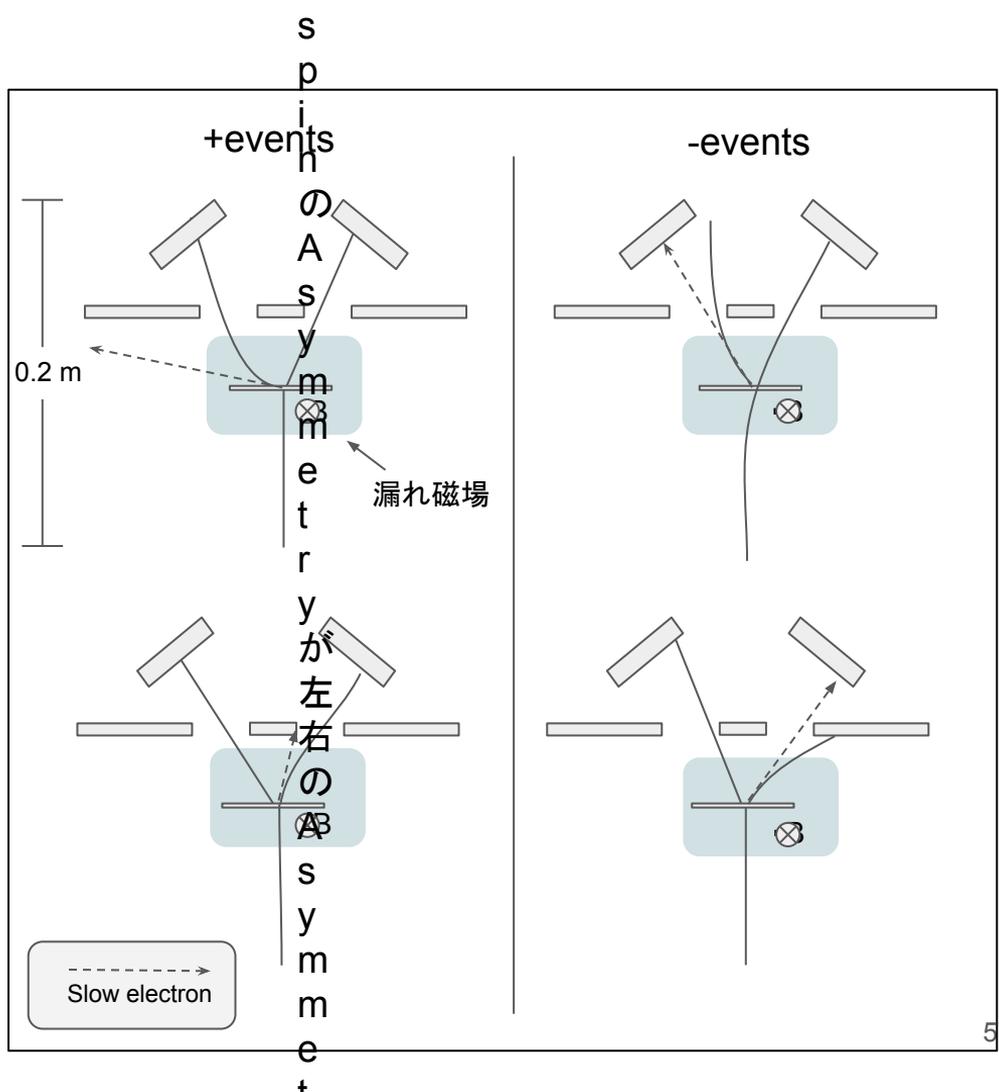
$$\beta = 0.9 (661 \text{ keV}) \rightarrow 3.52 \text{ m} \rightarrow 0.814^\circ$$



# 漏れ磁場

	Bなし	Bあり	Bなし	Bあり
PMT L	×	○	○	×
PMT R	○	○	○	○
PMT L	○	○	○	○
PMT R	×	○	○	×

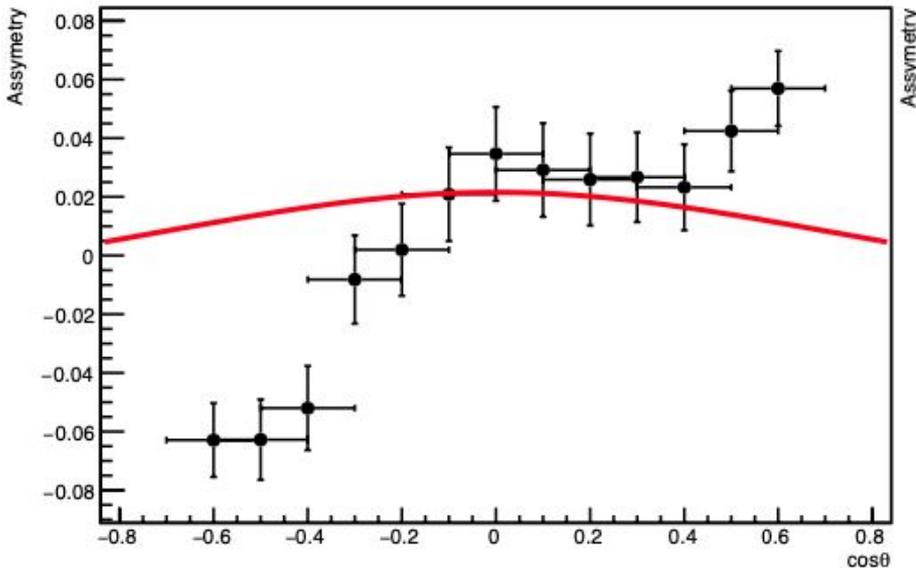
いろいろなイベントの回収率が外部磁場によって変わる(特に大散乱角の遅い電子)



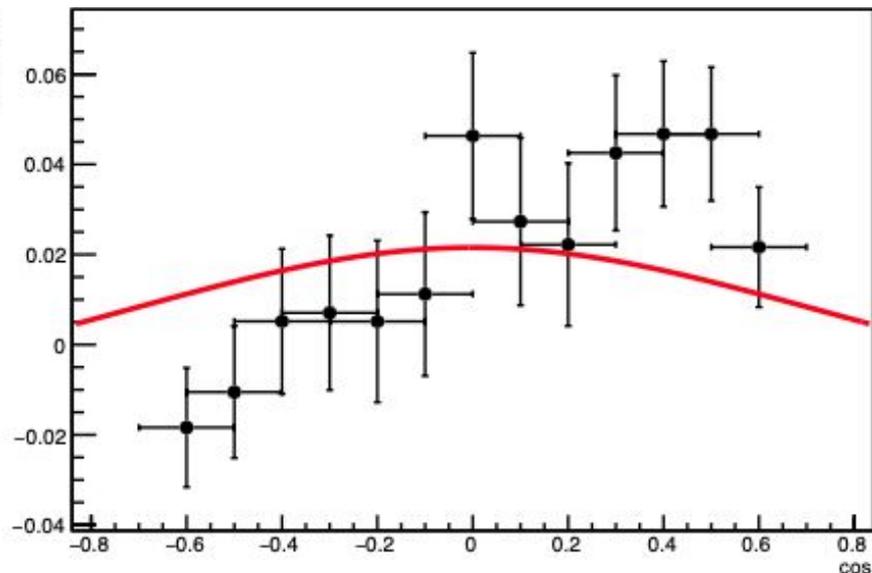
# 補正前のAsymmetry

$$\beta = 0.94 \pm 0.05$$

測定値



GEANT4

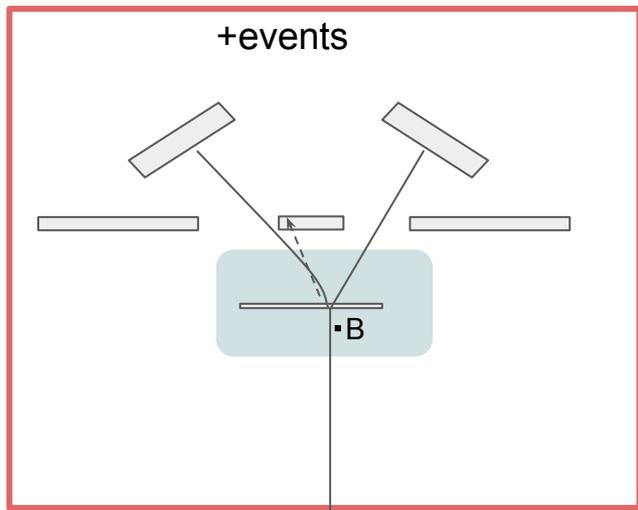


磁場による左右Asymmetryに大きすぎてスピン由来のAsymmetry見えない

→補正できないか

仮定1:  $+event(anti/para) = -event(anti/para)$

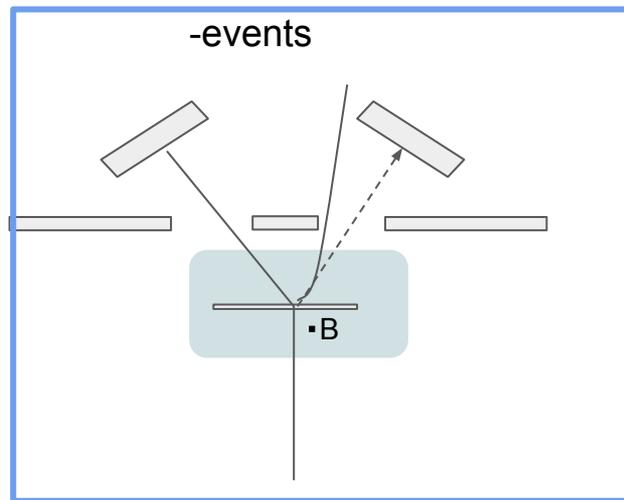
anti  $\cos\theta > 0$



+events

=

anti  $\cos\theta < 0$



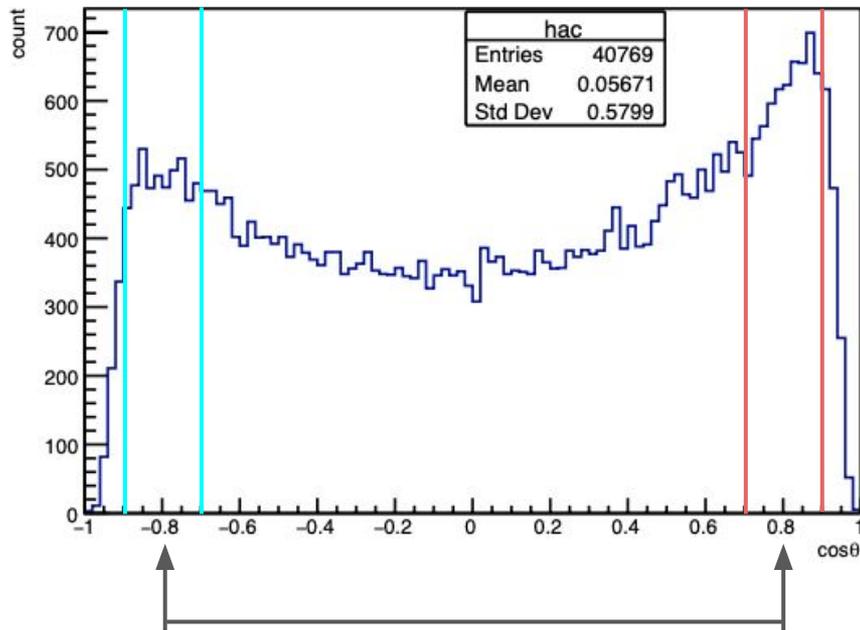
-events

anti/para磁場によって

入るようになるイベント数 = 入らなくなるイベント数

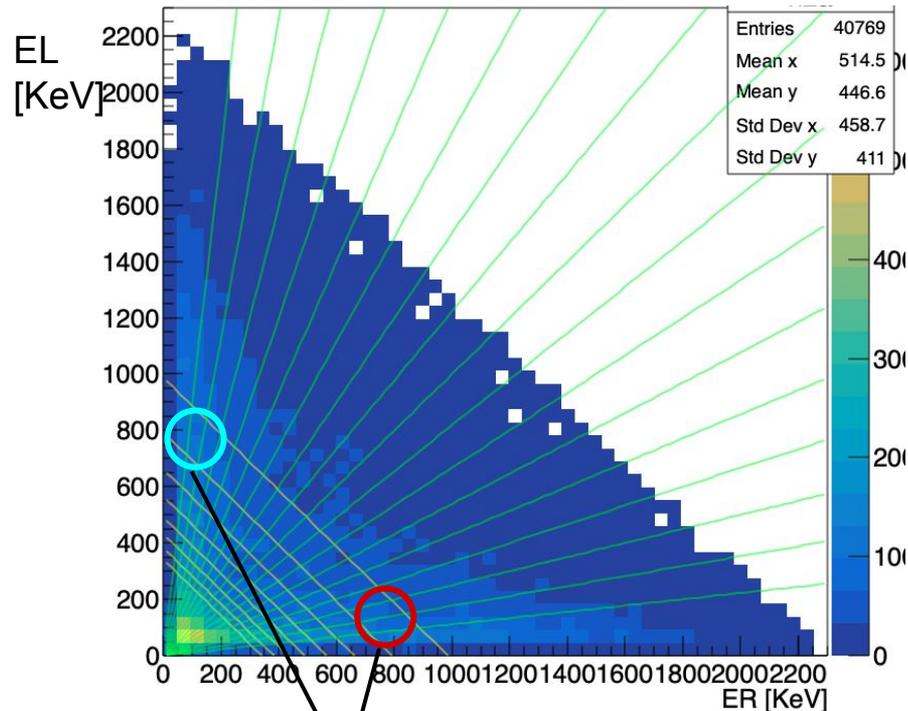
# 仮定1:補正

全エネルギーでのカウント数 para



足して平均化

anti ER [KeV] vs EL [KeV]

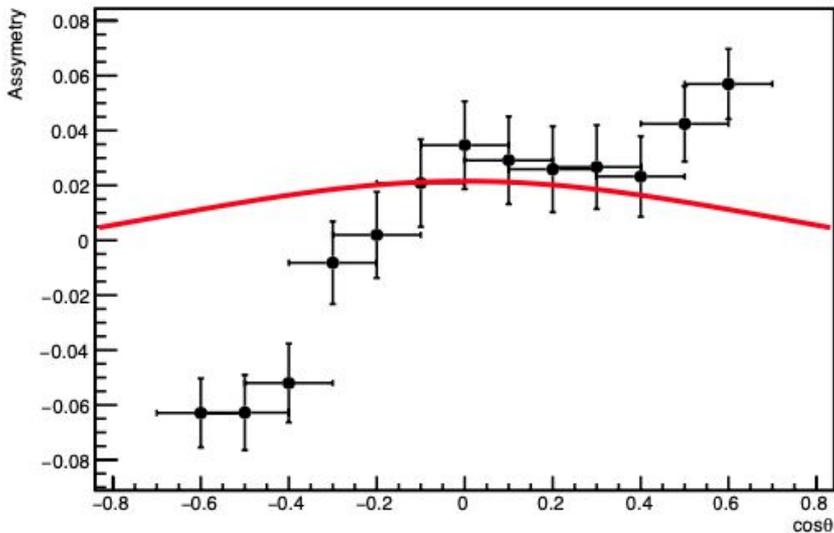


平均化

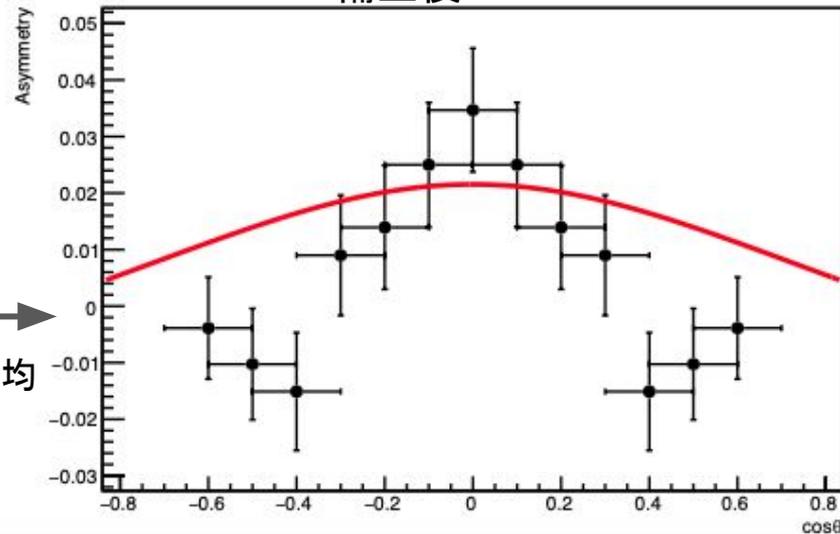
# 仮定1: Assymetry補正

beta =  $0.94 \pm 0.05$ におけるAsymmetryの様子

補正前



補正後



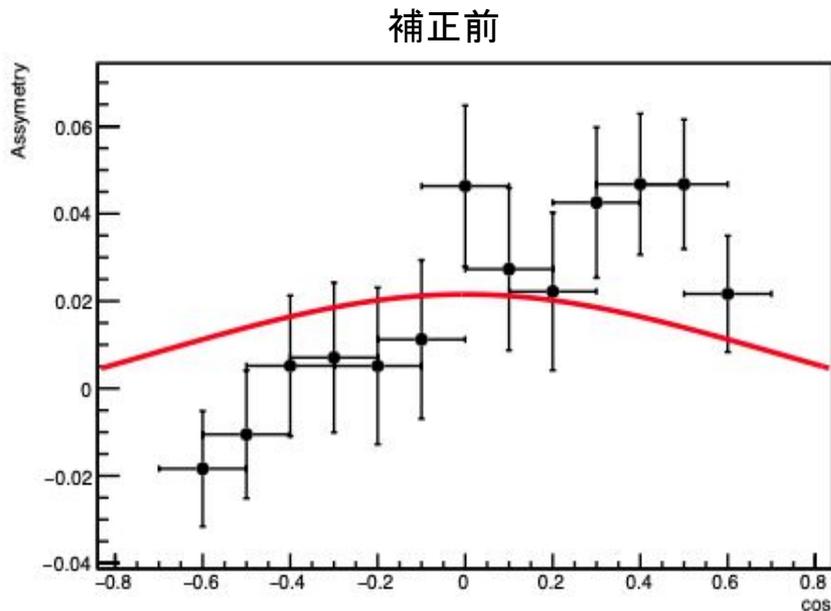
左右平均

平均化により絶対値は理論値に近づくが...

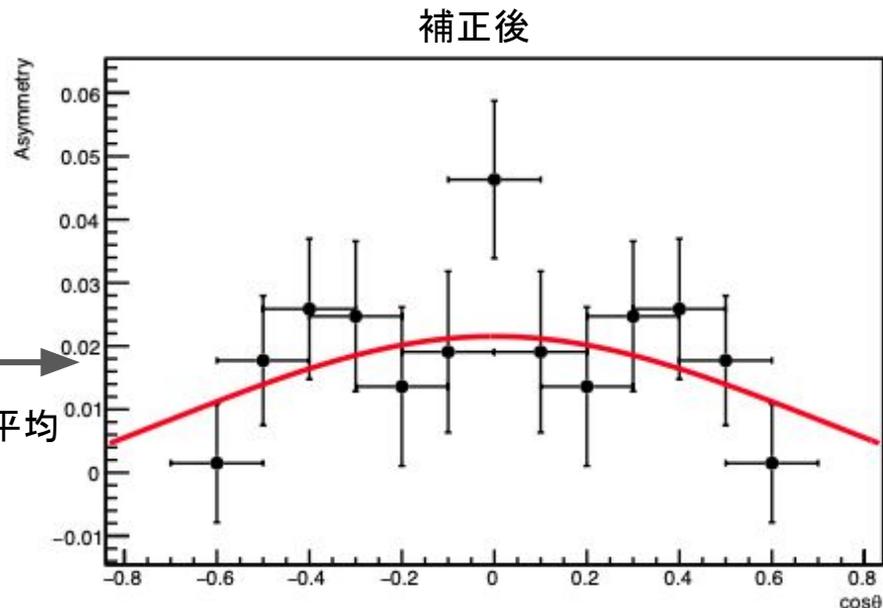
理論とのズレが特に大きい範囲に引っ張られ補正しきれない

# 仮定1: GEANT4では...

$\beta = 0.94 \pm 0.05$ におけるAsymmetryの様子

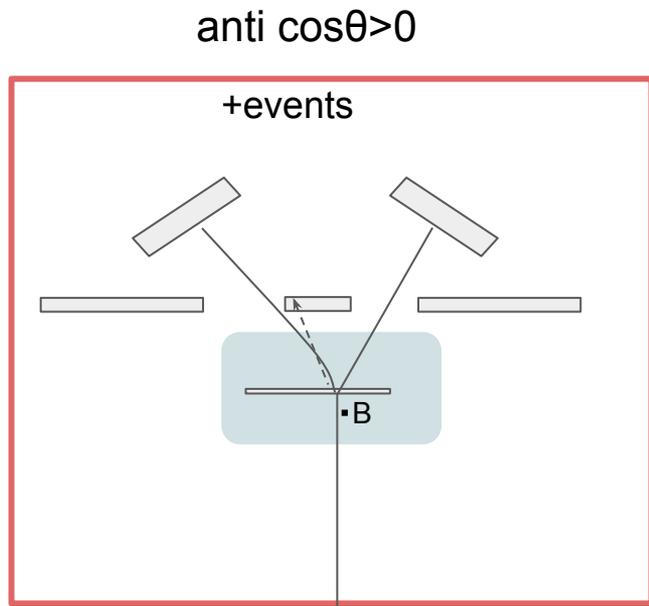


左右平均

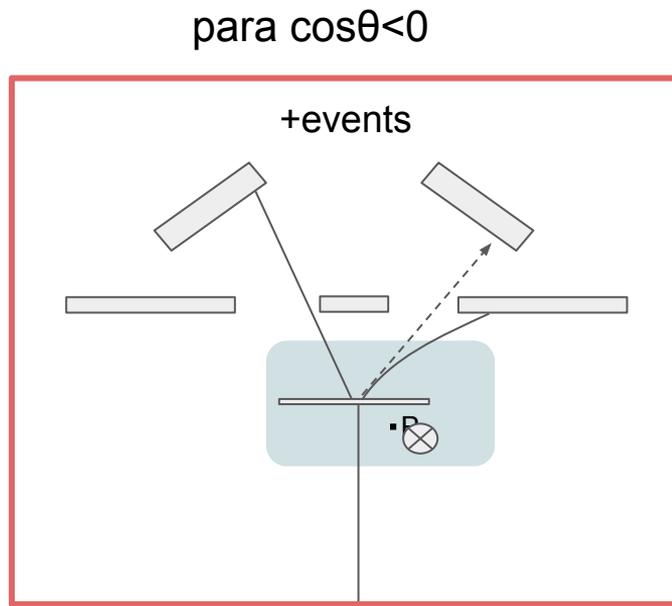


磁場由来のAsymmetryは左右対称ではないのかなあ🤔

仮定2 :  $+event(anti) = +event(para)$



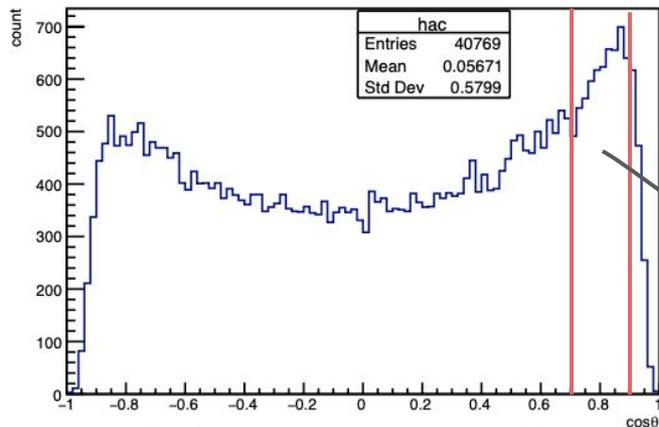
=



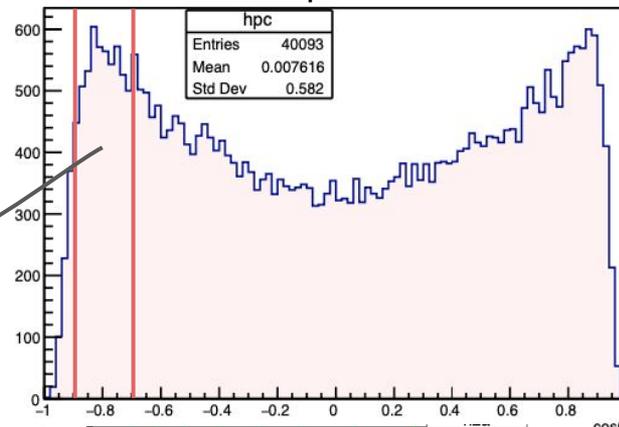
磁場によって  
antiに入るようになるイベント数 = paraに入るようになるイベント数

# 仮定2：補正

anti 全エネルギーでのカウント数

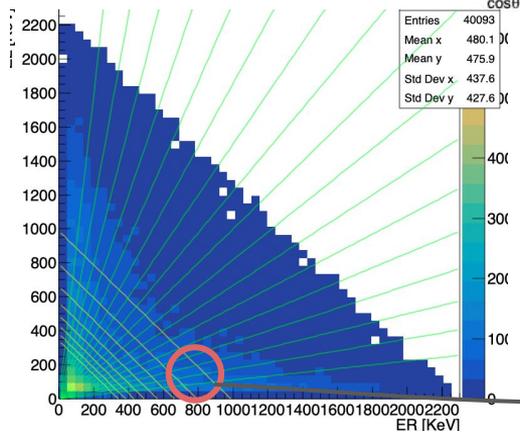


para

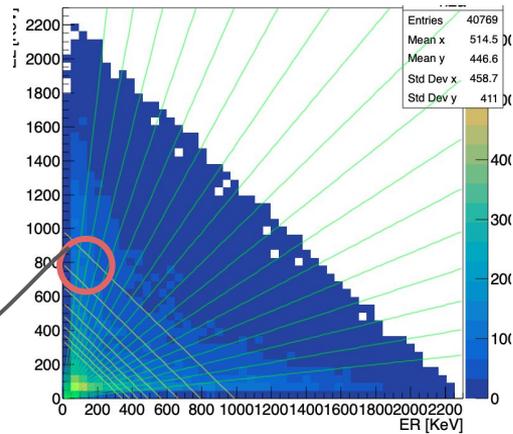


差し引く

anti  
ER [KeV] vs  
EL [KeV]



para  
ER [KeV] vs  
EL [KeV]

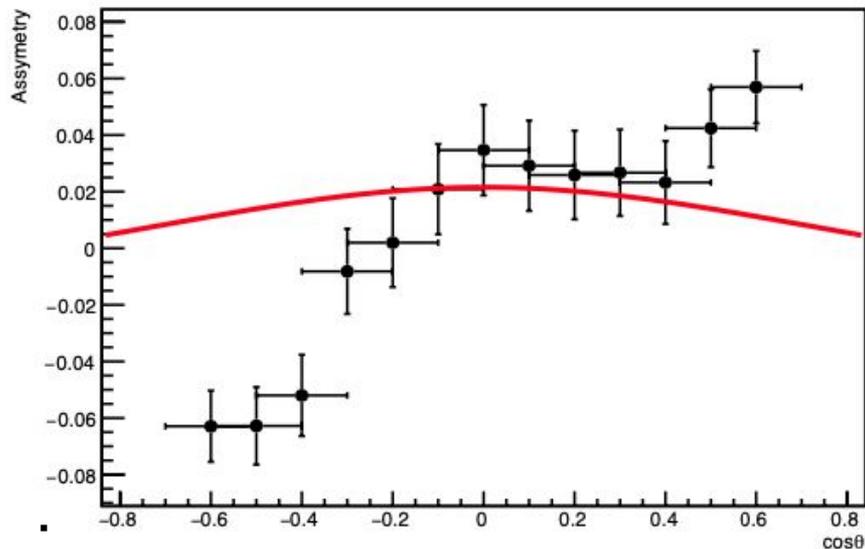


差し引く

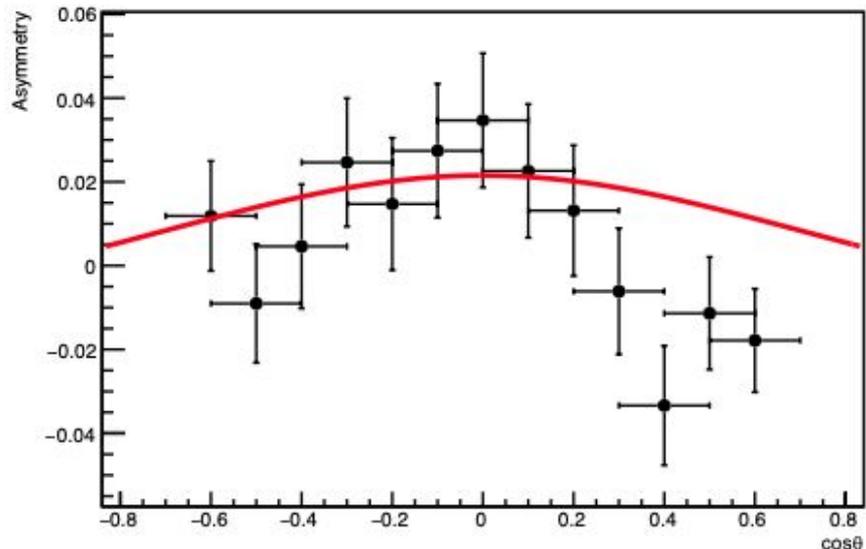
# 仮定2: Assymetry補正後

$\beta = 0.94 \pm 0.05$ におけるAsymmetry

補正前



補正後



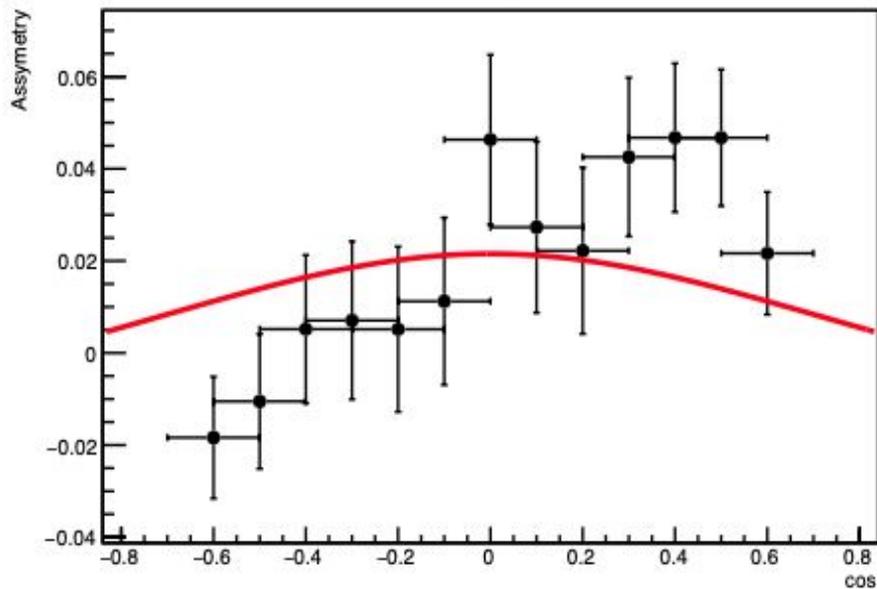
仮定1より理論値に近づいてきた印象

paraの $\cos\theta < 0$ の+eventが大きすぎて $\cos\theta > 0.2$ あたりでは理論とのずれ

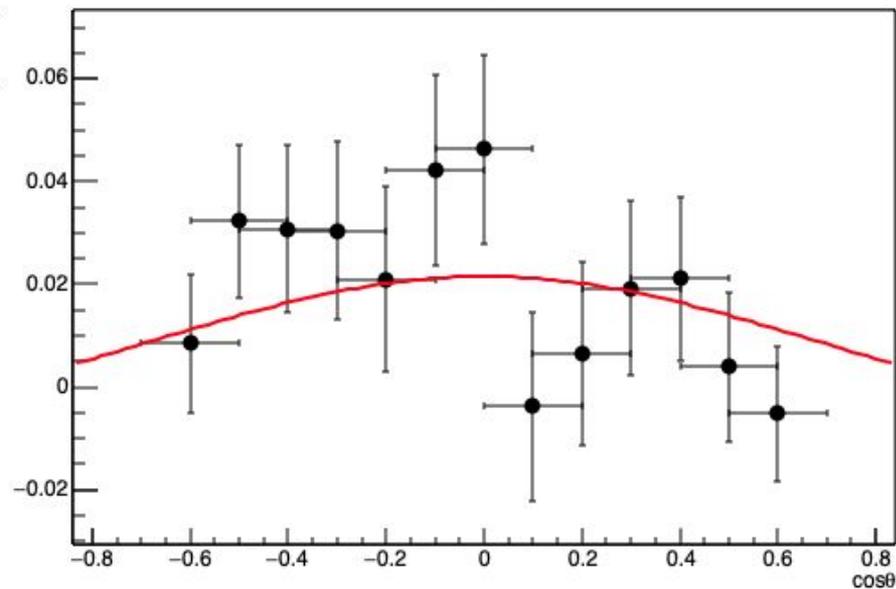
## 仮定2 : GEANT4では・・・

$\beta = 0.94 \pm 0.05$ でのAsymmetry

補正前

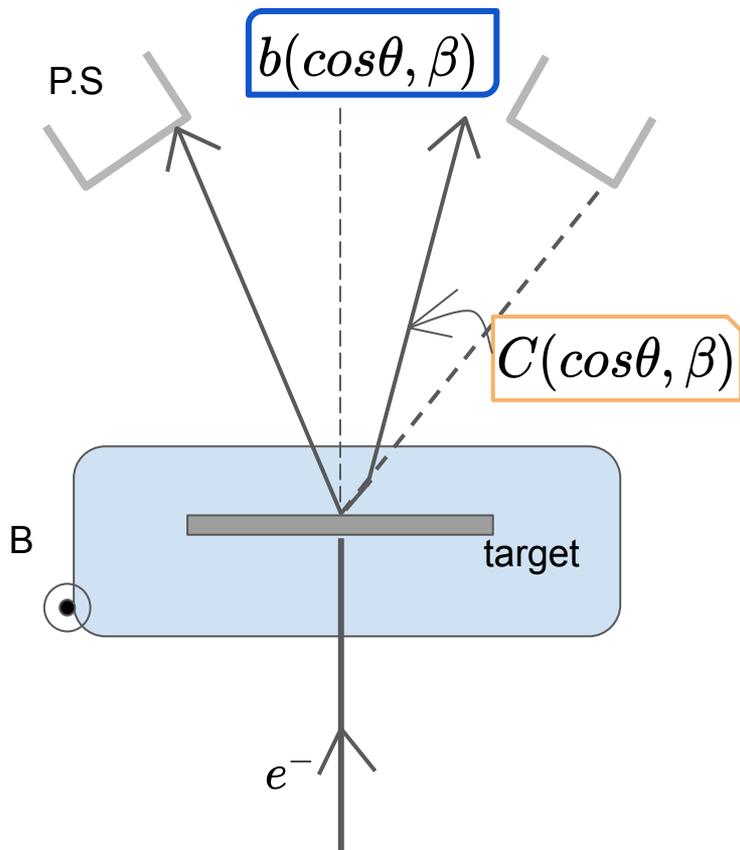


補正後



仮定1よりはいい感じ、統計量を増やして考す。

仮定3:  $\pm\text{event}(\text{anti/para}) \propto C(\text{anti/para})$



磁場なしの時  
CM系散乱角 $\theta$ 、入射電子速度 $\beta$ の計数

$$\underline{C(\cos\theta, \beta)}$$

磁場ありの時  
P.S.に入らなくなった計数

$$\underline{b(\cos\theta, \beta)} = r_b(\cos\theta, \beta) \cdot C(\cos\theta, \beta)$$

とCに比例する係数  $r_b(\cos\theta)$  を考える。またこれはtargetによらず一定とする。

(target周辺磁場と装置Geometryに拠ると仮定)

## $r_b(\cos\theta)$ の求めかた

$$\frac{C_{ob}(\cos\theta')}{C(\cos\theta')} = \frac{C(\cos\theta') + b(\cos\theta')}{C(\cos\theta')} = (1 + r_b(\cos\theta'))$$

$$C(\cos\theta') = C(\cos\theta = 0) \times \frac{\sigma(\cos\theta')}{\sigma(\cos\theta=0)}$$

$\cos\theta=0$ では磁場の影響受けないとして

$$= C_{ob}(\cos\theta) \times \frac{\sigma(\cos\theta')}{\sigma(\cos\theta=0)}$$

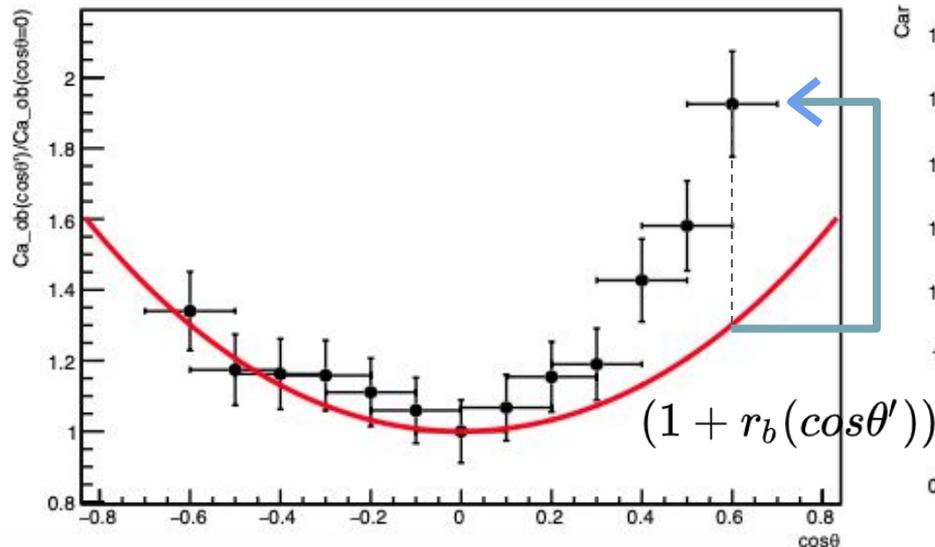
$$(1 + r_b(\cos\theta')) = \frac{C_{ob}(\cos\theta')}{C_{ob}(\cos\theta=0)} \times \frac{\sigma(\cos\theta=0)}{\sigma(\cos\theta')}$$

targetをAIとPaで変えて  
(1+r)を算出し比べてみるこ  
とで仮定3が妥当かわか  
る。

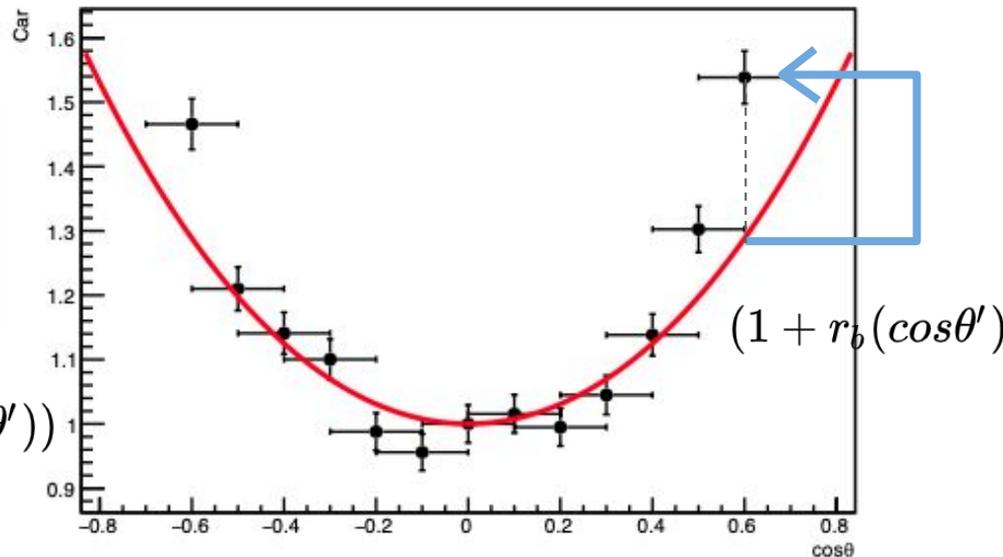
# 仮定3: 補正

$\cos\theta=0$ で規格化した計数Cと理論値  $\beta=0.94\pm 0.05$ の  
時

Al



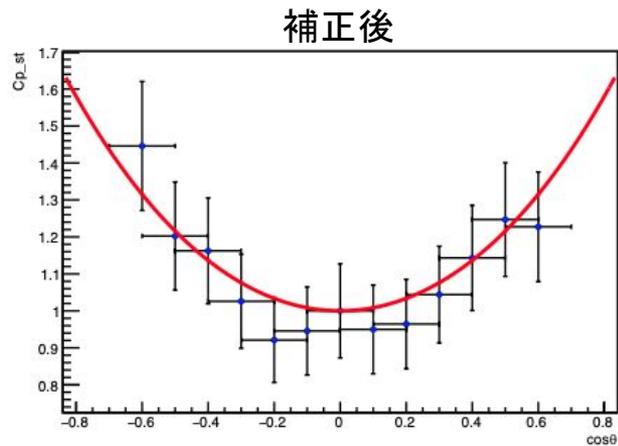
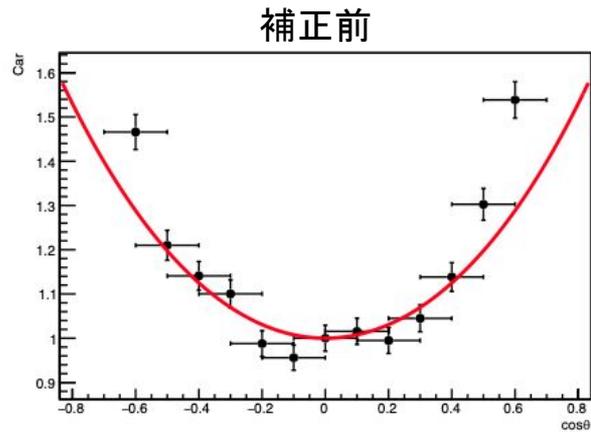
Pa



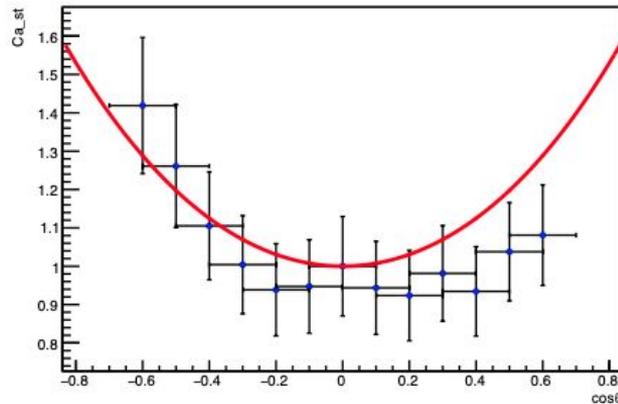
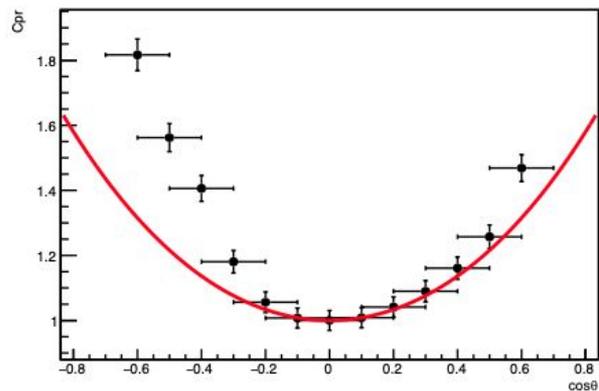
target Al の結果から  $r_b(\cos\theta)$  を求め、Paでのgeomytry由来のBGの寄与を打ち消す。

# 仮定3:補正前後のCaとCpの様子

anti

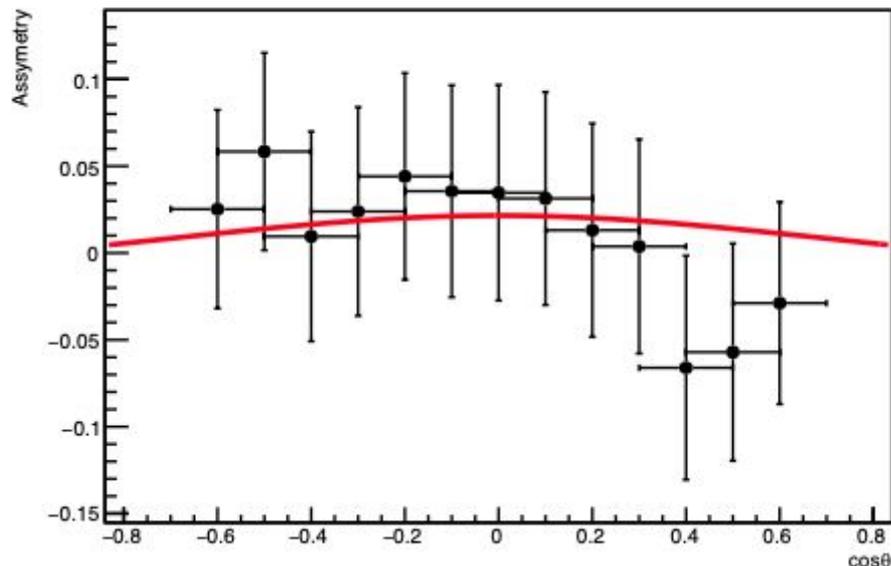
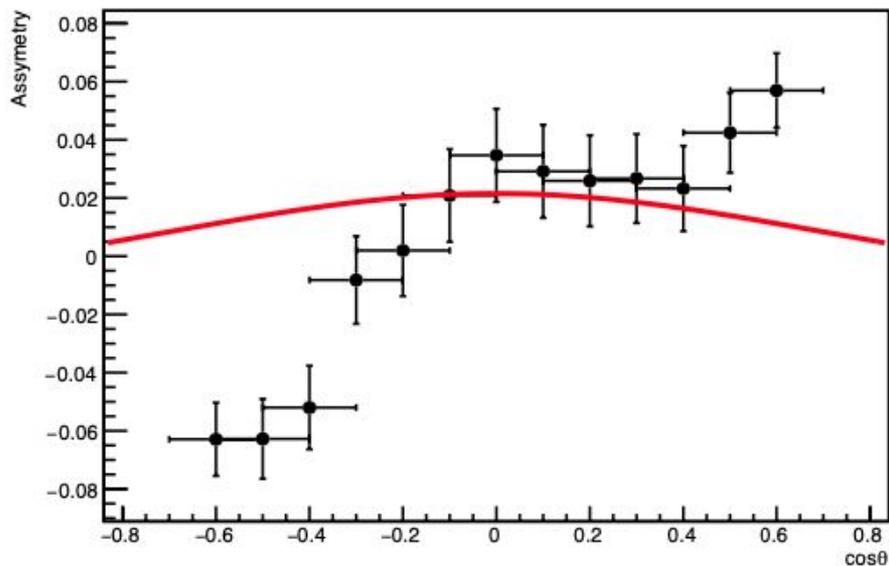


para



# 仮定3: Asymmetry 補正後

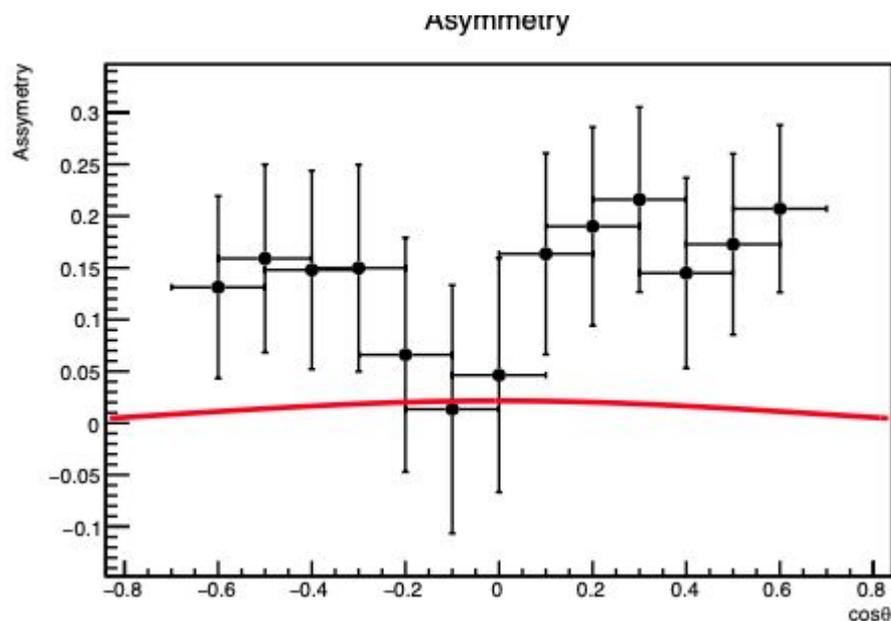
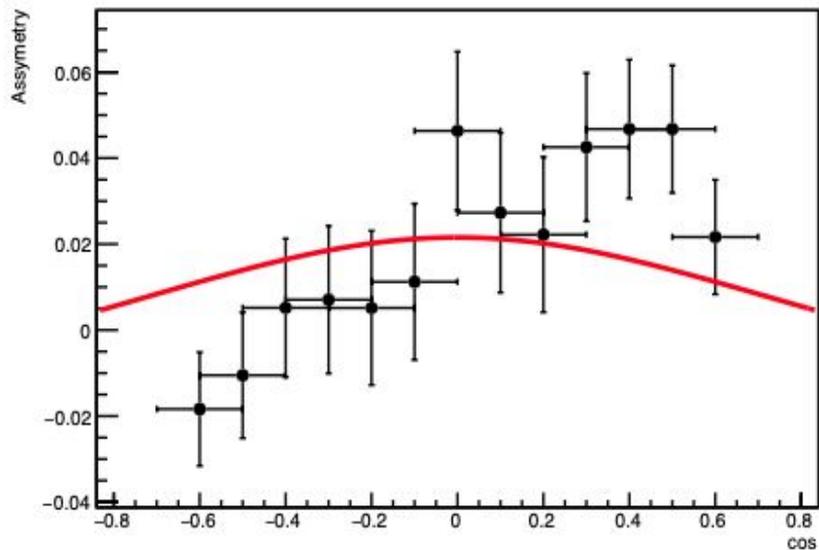
$\beta = 0.94 \pm 0.05$  Asymmetry



AIの統計量の少なさから誤差が大きくて判断しかねる。

# 仮定3:GEANTでは・・・

イベント数少なくざるから明日たす



# バックグラウンドイベントの評価

考えられるメラー散乱以外の反応

- ・全エネルギーを落とさずにシンチに掠る
- ・多重メラー散乱
- ・真空槽内での乱反射
- ・target以外の場所でのメラー散乱
- ・宇宙線
- ・数十nsくらいで起こった二つの $\beta$ 電子

など

## 一つの $\beta$ 線が起こすイベント(多重メラー散乱etc...)

元のベータ線のエネルギーより小さいエネルギーしか落とさない  
ので、今回の実験のようにエネルギー分布を全部使う場合取り除くのが難しい

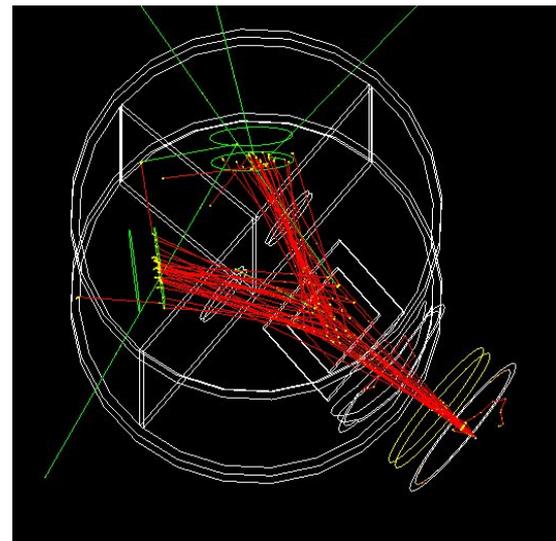
->Geant4上で本実験を再現し、どのくらいの割合でこういったイベントが混じっているかを評価することにした。

# Geant4によるBack Groundシミュレーション

	evts	%
total	1166	100
メラー散乱して全エネルギーをシンチレーターに落としたイベント	857	73.50
All Back Grounds	309	26.50

## Back Grounds詳細

メラー散乱したが全エネルギーをシンチレーターに落とさなかったイベント	228	19.55
真空槽内で乱反射して2つのシンチレーターに入射したイベント	38	3.26
光子が発生し、シンチレーター内でコンプトン散乱したイベント	30	2.57
その他	13	1.11



偏極率を大きくする

偏極率を小さくする

# 1 $\beta$ 線が起こすイベントの評価

- 偏極率を小さくする効果

3.26+2.57+1.11 ~ 7%程度

- 偏極率を大きくする効果

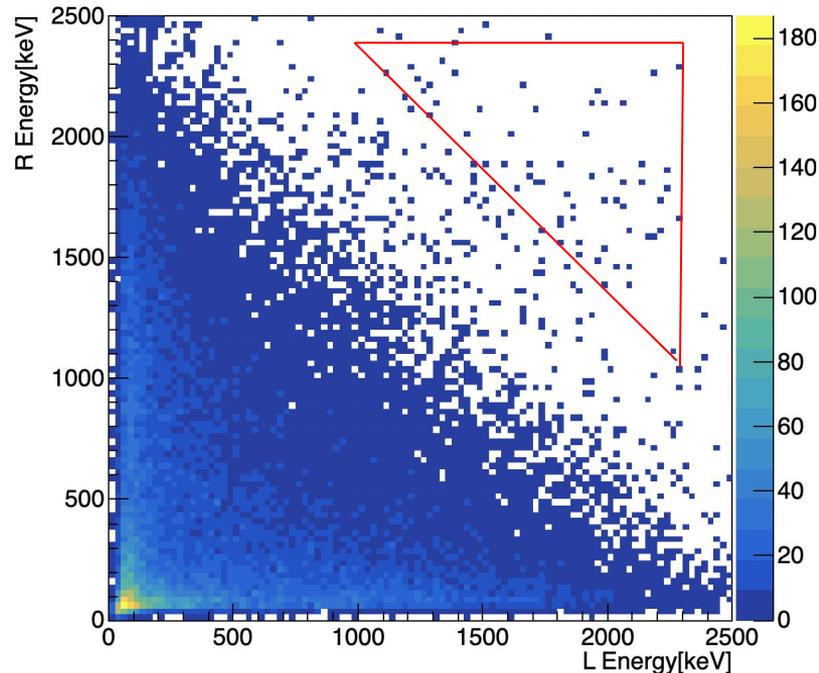
今回は $\beta=0.85, 0.9, 0.95$ の3点を用いるので、

19.55\*0.1 ~ 2%程度?

# 二つのβ線が偶然入るイベント(Accidental Event)について

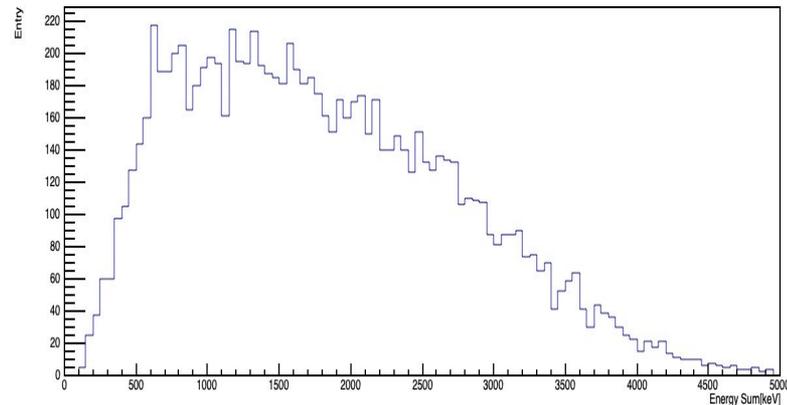
赤線の中のようなSrβ線のエネルギーより高いところは、多くがこのイベントと考えられる。

->この場所のイベント数から  
Accidental Eventがどのくらいの割合存在しているかを見積もりたい。



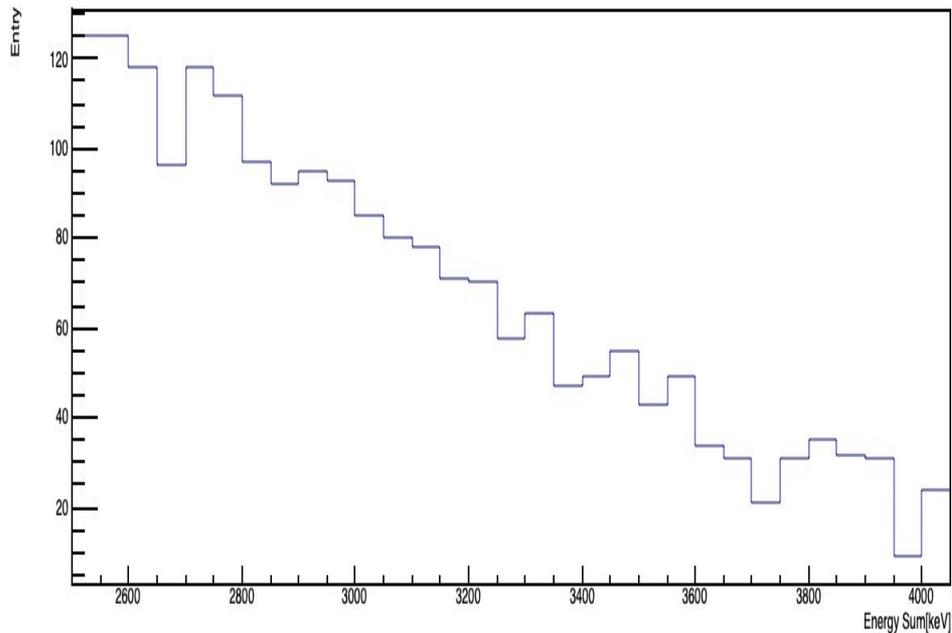
# Accidental Eventが作るエネルギー分布の予測

1. 二つのシンチレーターの信号を Coincidenceを取らずに読み出すことで今回の実験で得られる $1\beta$ の分布を得る。
2. ランダムにイベントを選ぶことで $2\beta$ によるイベントを予測する

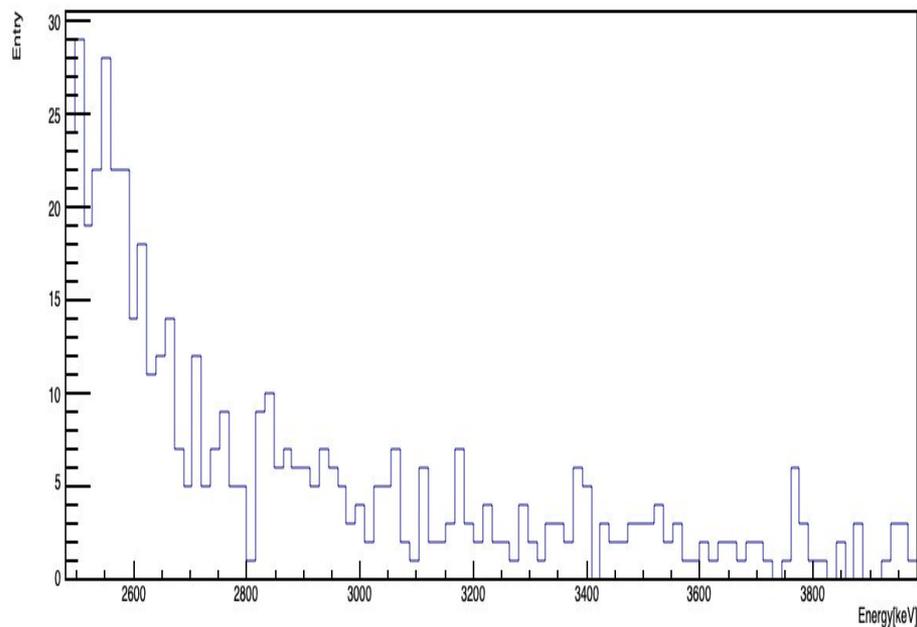


予測したAccidental EventによるEnergy和 (ER+EL)の分布

# Accidental Eventの評価



Accidental Event のEnergy和  
(2500keV以上)



本実験で得られたEnergy和の分布  
(2500keV以上)

あまり上手く形が合わない

# まとめ

想像以上にメラ-散乱以外の Asymmetry が大きく細かい解析が必要

今はまだ統計も溜まっておらず、シミュレーターの速度も物理とさほど変わらないのでなかなか断定的な結論が出しにくい。

# 謝辞

指導教員の中家さん、隅田さん、木河さん

TAの菅島さん、武市さん

大変お世話になりました。

本当にありがとうございました！

# 補足スライド

# スーナーモデル

・磁化  $M$  [A/m] とターゲットの電子偏極率  $\chi$  の変換にはスーナーモデルを用いた。強磁性体の磁化は外殻電子のスピンの偏極による。

原子一つあたりの磁気モーメント  $\mu_F$  [Am<sup>2</sup>] とボーア磁子  $\mu_B$  [Am<sup>2</sup>]

真空透磁率  $\mu_0$  [Am/T], 単位体積あたりの原子数  $n_{atom}$  [1/m<sup>3</sup>]

外殻の ± スピン 電子数  $N_+$   $N_-$

$$\mu_F = (N_+ - N_-) \cdot \mu_B$$

$$M = \mu_F \cdot n_{atom} / \mu_0$$

→ 磁化の大きさから ± 電子数の偏りがわかる

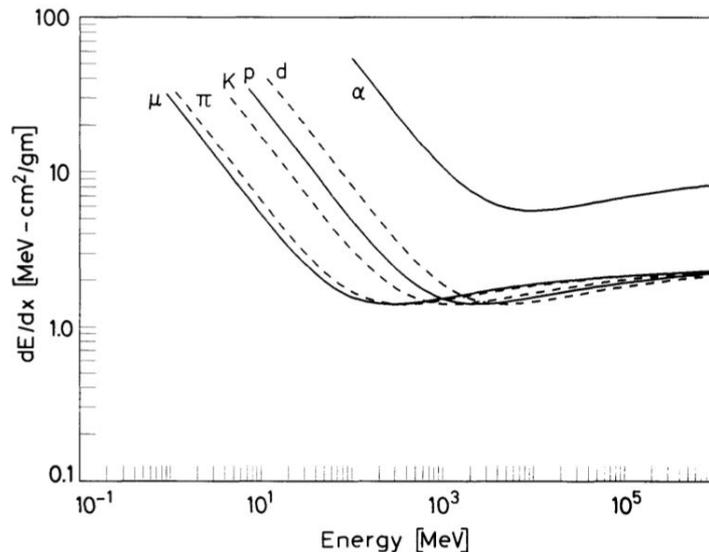
$$Pt = 0.0361 \times M$$

# 宇宙線について

宇宙線 $\mu$ のMIPのイオン化損失は、プラスチックシンチレーター中で

約2MeV/cm

-> 厚さ1.5cm ある今回のプラスチックシンチレーターでは、ほとんどの $\mu$ の貫通イベントはほとんど除けているはず

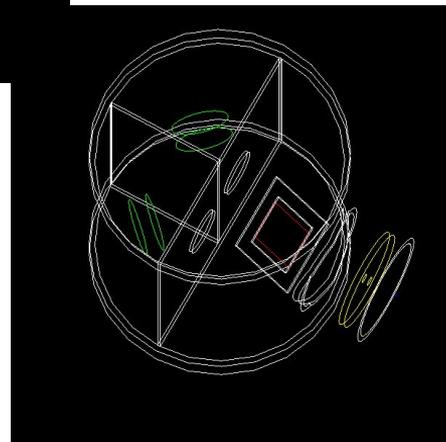
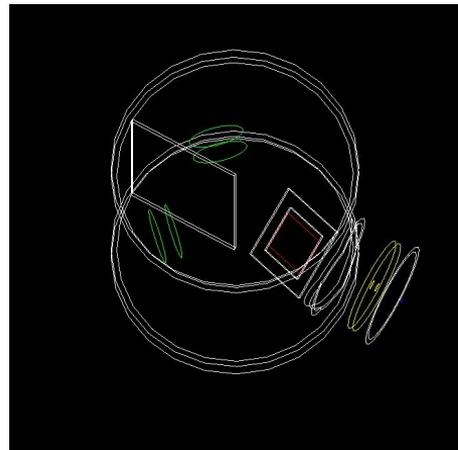


W.R.Leo Techniques for Nuclear and  
Particle Physics Experiments  
より

# AI仕切りの設計とGeant4シミュレーションによるバックグラウンドの見積もり

Back Groundを小さくするために、PMT間のAI仕切り(←過去の実験set upに近い)に加えて、シンチレーターに入射する電子の角度を制限する仕切り板を付け加え、メラース散乱以外のイベントがシンチレーターに入るのを防ぐ

有用性をGeant4を用いて検証した

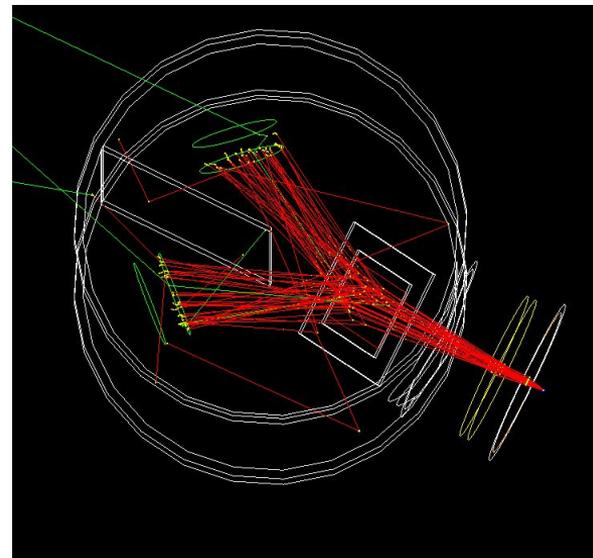


# BG simulation (PMT間の仕切りのみ)

	evts	%
total	1445	100
メラー散乱して全エネルギーをシンチレーターに落としたイベント	870	60.21
All Back Grounds	575	39.79

## Back Grounds詳細

メラー散乱したが全エネルギーをシンチレーターに落とさなかったイベント	374	25.88
光子が発生し、シンチレーターでコンプトン散乱したイベント	35	2.42
真空槽内で反射して2つのシンチレーターに入射したイベント	152	10.52
その他	14	0.96



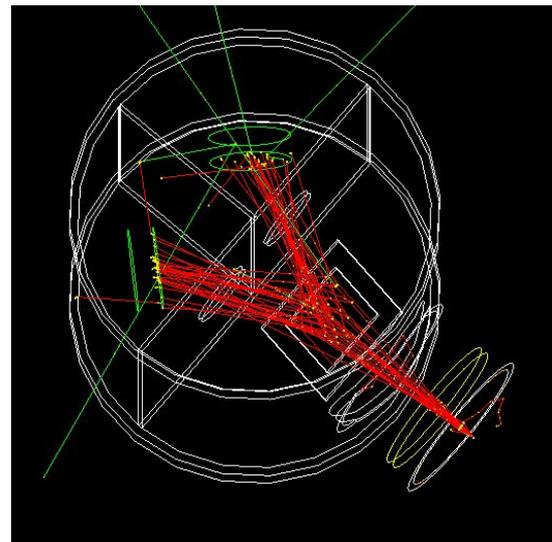
シミュレーションの様子

# BG simulation (本実験セットアップ)

	evts	%
total	1166	100
メラー散乱して全エネルギーをシンチレーターに落としたイベント	857	73.50
All Back Grounds	309	26.50

## Back Grounds詳細

メラー散乱したが全エネルギーをシンチレーターに落とさなかったイベント	228	19.55
光子が発生し、シンチレーターでコンプトン散乱したイベント	30	2.57
真空槽内で反射して2つのシンチレーターに入射したイベント	38	3.26
その他	13	1.11



シミュレーションの様子

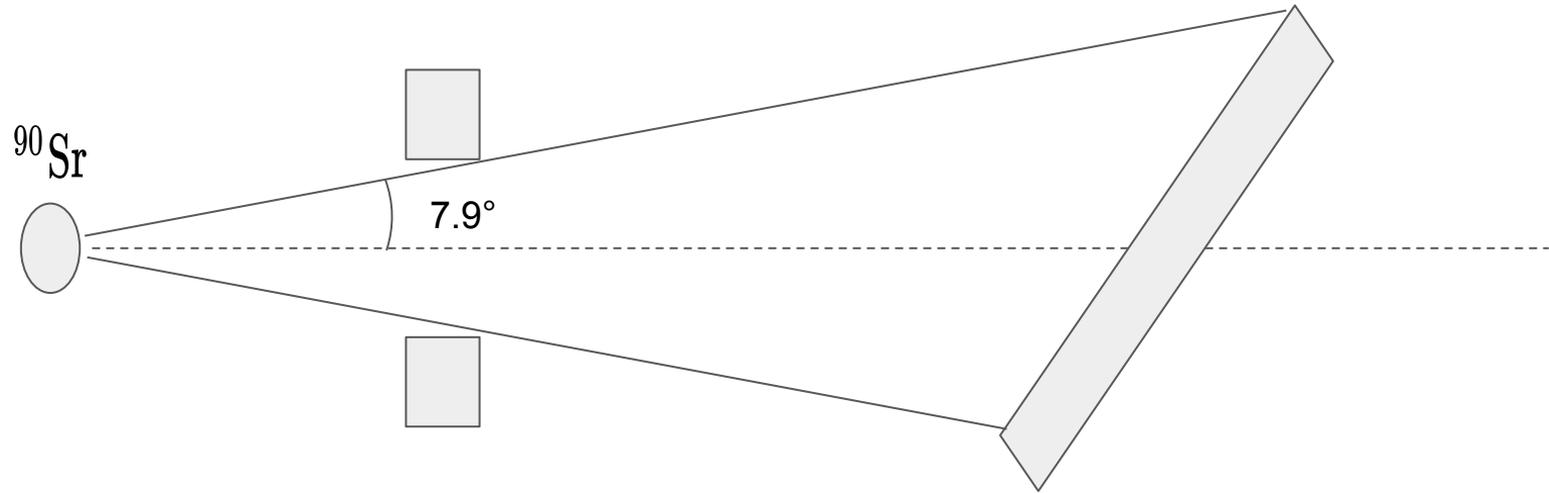
# シミュレーション結果

	PMT間の仕切りのみ		本実験の仕切り	
メラー散乱	870		857	1.5%減
真空槽内での乱反射	152	→	38	75%減
メラー散乱したが全エネルギーを落とさなかった	374		228	39%減

欲しいイベントをあまり減らさずにバックグラウンドを減らすことに成功した。

# コリメーター

コリメーター写真

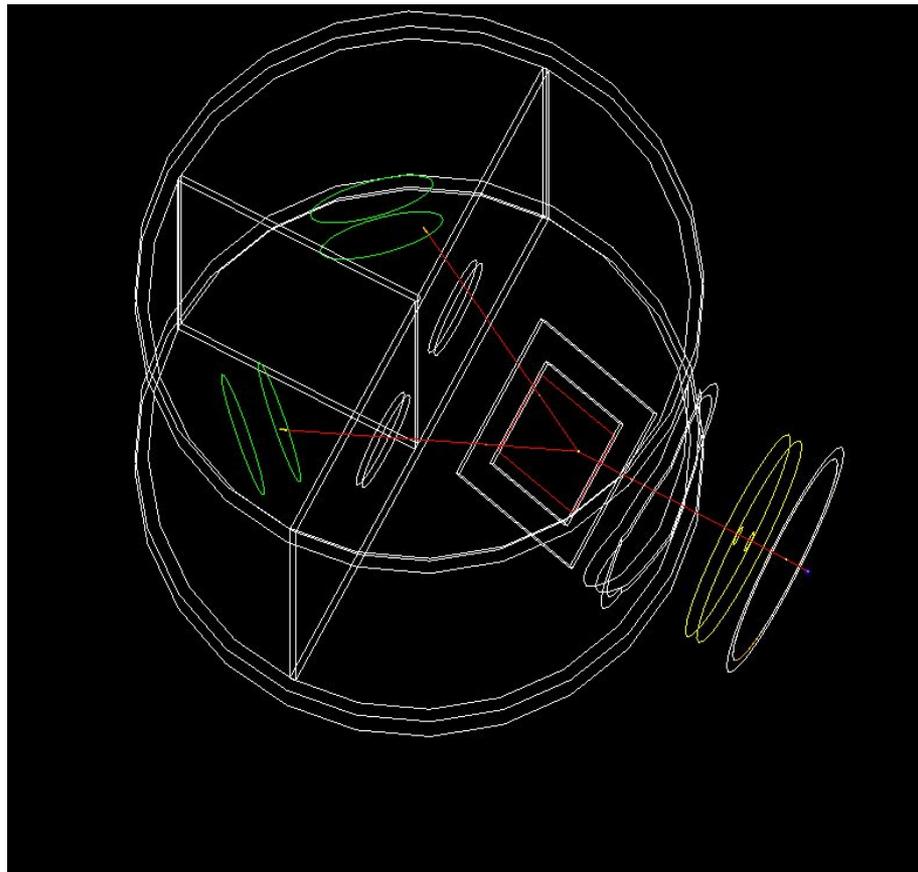


真空槽内に入射する電子が target に当たるものになるように絞る

# Geant4上でシミュレートした粒子の軌跡

メラー散乱

今回の実験で欲しいイベント



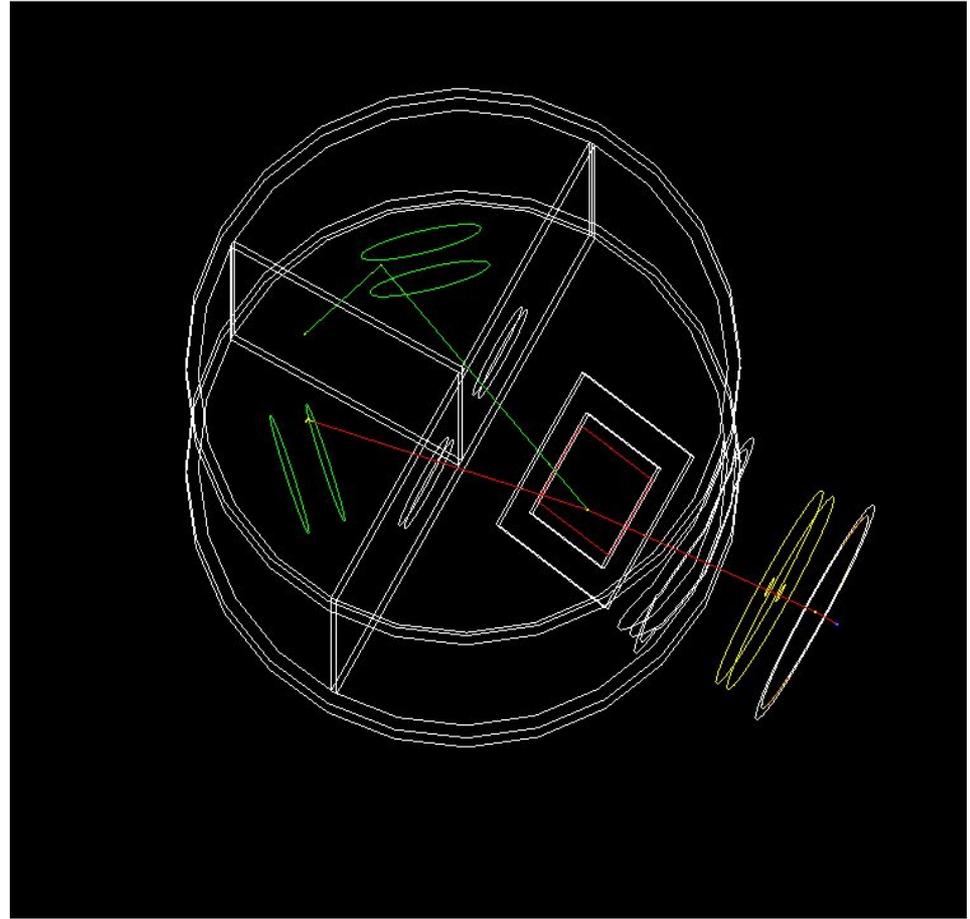
メラー散乱したが、シンチレータ表面で反射したイベント

低エネルギーにおけるアシンメトリーを大きくすると思われる。



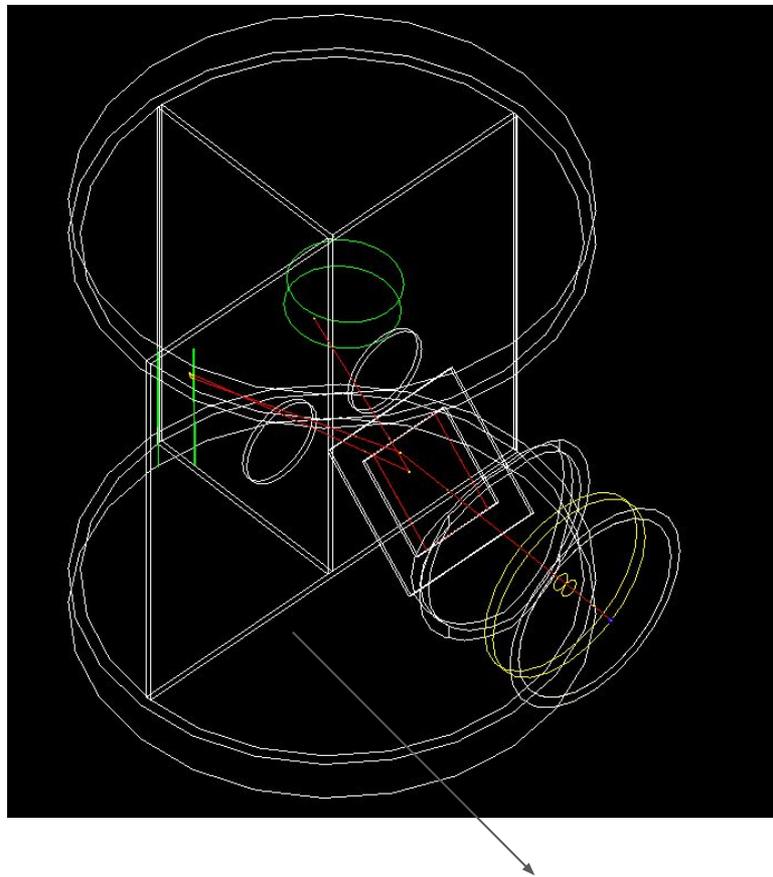
発生した光子がシンチレーター内で  
コンプトン散乱することで起こるイベ  
ント

$|\cos\theta|$ が大きいところでアシンメ  
トリーを小さくすると思われる。

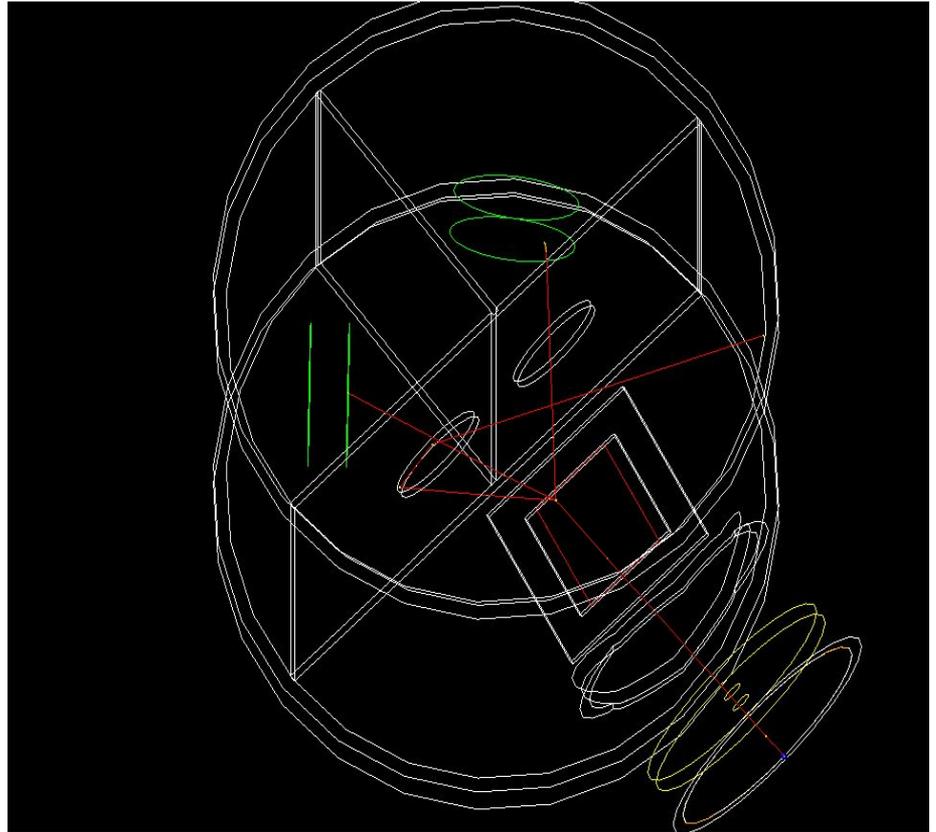


一つの電子が真空槽内を反射して  
二つのシンチレータに入射するイベント

全体的にアシンメトリーを小さく  
すると思われる。

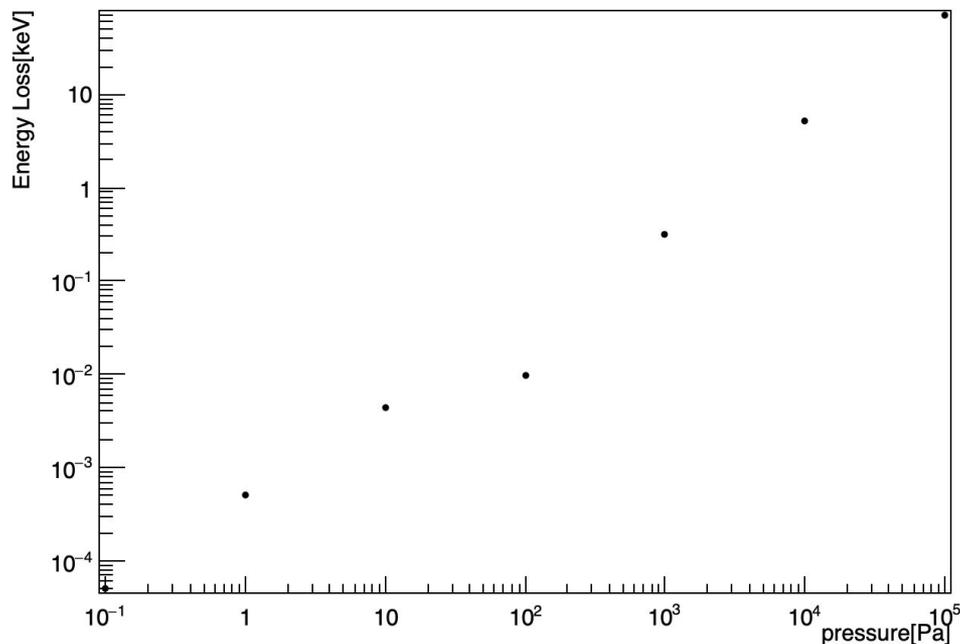


## 多重メラー散乱



# 真空度による空気中でのエネルギー損失の違い

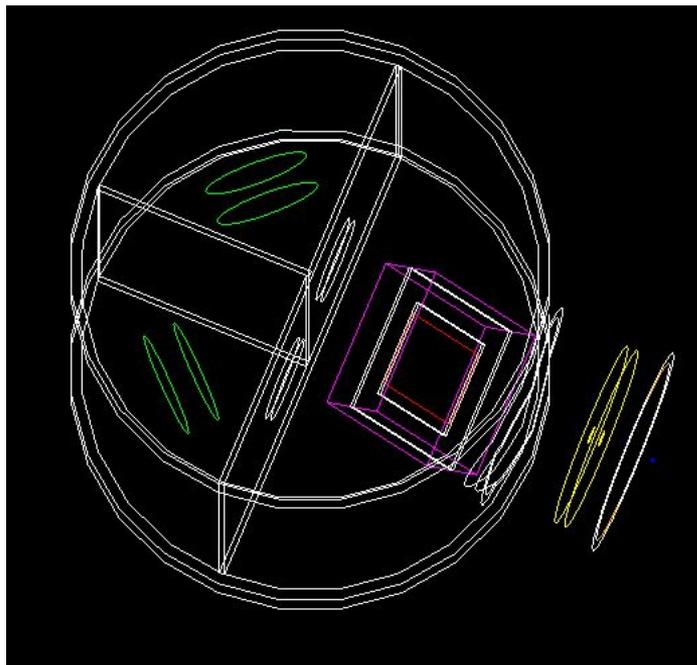
- 正確には、発射時エネルギー(1MeV)-targetでのエネルギー損失-シンチレーターでのエネルギー損失。



注 かなり昔の図なので source の位置や target 角度などが最新のものと異なる。

# Geant4による磁場の影響の見積もり

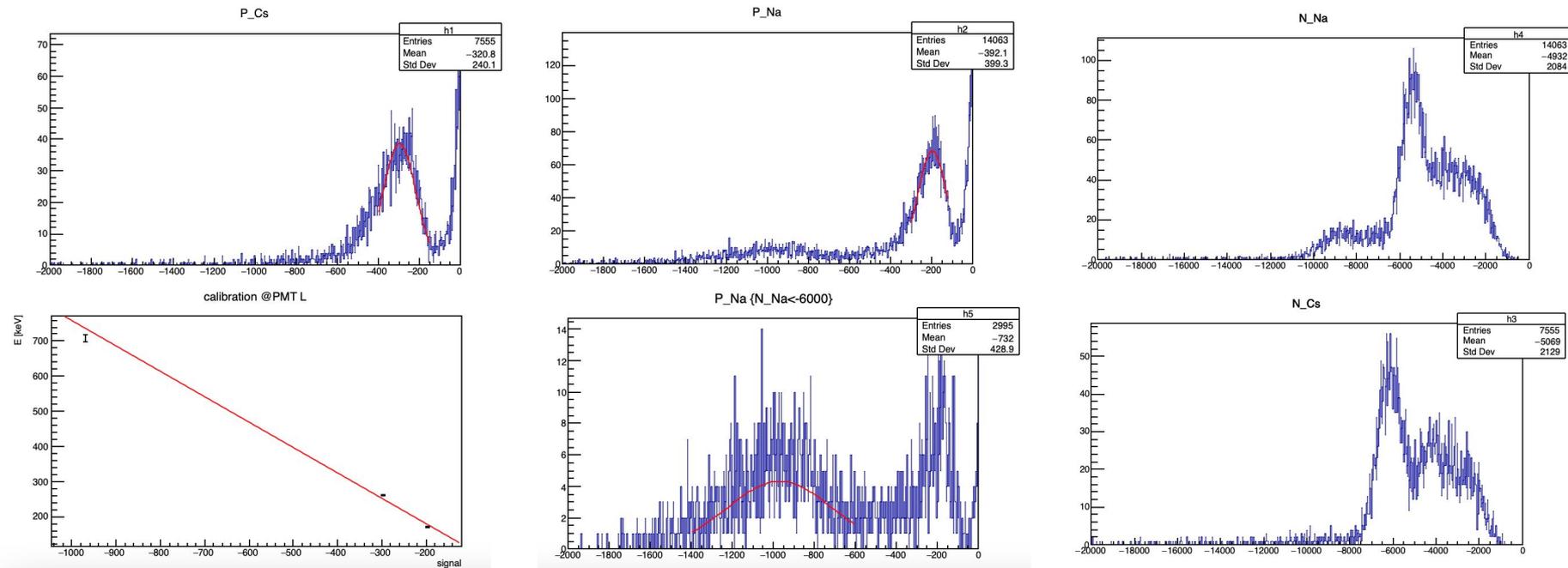
- 図のピンクの範囲に $\pm 1\text{mT}$ の磁場をかけた。
- target電子の偏極率は0.035で行っている。



# Geant4シミュレーション バックグラウンドの見積もり

- 全エネルギーがシンチレーターに落ちたかどうかは、シンチレーターから粒子が飛び出しているかどうかで判断した。
- シンチレーターでのEnergythresholdは $\gamma$ が2.4keV、 $e^-$ が14.5keVで行った。
- 光子がコンプトン散乱したイベントは50keV以上のエネルギーをシンチレーター内に落としたものを数えた。

# Calibration @PMT L



# Calibration @PMT R

