

P6 課題研究  
希ガスシンチレータ

穴田 貴康      西村 広展      湯浅 翠

平成16年3月24日

# 目次

第1章	はじめに	3
第2章	希ガスシンチレータ	4
第3章	実験装置	5
3.1	使用素材、使用機器	5
3.2	予備実験	5
3.2.1	ADCの基本的な性質	10
3.2.2	32CH QDC(V792)の動作確認	10
3.2.3	ADCのchannel値とChargeの関係	11
3.2.4	PMTの絶対GAIN	12
3.3	セットアップ	14
第4章	実験データと解析	17
4.1	スペクトル	17
4.2	飛程	18
4.3	マントルから放出される $\alpha$ 線以外の成分	18
4.3.1	宇宙線ミューオンのKr、Xe中におけるエネルギー損失	19
4.4	マントルから放出される $\alpha$ 線の遮蔽	20
4.5	ADC channelからphoto-electron数への変換	22
第5章	シミュレーション	24
5.1	モデル	24
5.2	エネルギー損失とシンチレーション効率	24
5.3	立体角	24
5.4	$\alpha$ 粒子のエネルギー損失シミュレーション	26
5.5	マントルからでてくる $\alpha$ 粒子	28
5.6	simulate	28
第6章	解析	34
6.1	実験データとシミュレーションデータ	34
6.2	発光光子数の決定	34
6.3	$\alpha$ 線発生頻度の決定	35

<b>第7章</b>	<b>結果とまとめ</b>	<b>38</b>
7.1	希ガスのシンチレーション効率 . . . . .	38
7.2	マントル中のトリウム含有量 . . . . .	38
7.2.1	まとめ . . . . .	38
<b>第8章</b>	<b>プログラムソース</b>	<b>40</b>
8.1	VME . . . . .	40
8.2	立体角 . . . . .	44
8.3	ある特定のエネルギーの $\alpha$ 線に対するシミュレート . . . . .	44
8.4	マントル内部での $\alpha$ 粒子の動き . . . . .	49
8.5	random simulate . . . . .	50
<b>第9章</b>	<b>謝辞</b>	<b>52</b>

# 第1章 はじめに

$\mu$ -TPC は  $\mu$ -PIC(micro pixel chamber) を用いた time projection chamber で、荷電粒子の3次元飛跡をとらえる検出器である。 $\mu$ -TPC は dark matter 検出器や MeV  $\gamma$  線検出器、中性子検出器としての応用が期待される。この中では Q 値が大きい中性子線検出器がもっとも実現が簡単であると思われる。中性子が入射したときに生じる proton については 3 mm の軌跡が確認されている。proton がシンチレーションガスと衝突するときが発生する光子それぞれが  $\mu$ -PIC に到達する時間差から、proton の相対的な軌跡を知ることができるが、絶対的な軌跡を知るためには反応の絶対時刻を知らせる trigger が必要である。中性子が  ${}^3\text{He}$  を含む Kr ガス中に入射すると、



により  ${}^3\text{H}$  が生じる。p と  ${}^3\text{H}$  が希ガス中を走りガス原子を電離させる時に同時にシンチレーション光が放出される。これをとらえることによって、中性子検出器の trigger とすることができる。このことを念頭において本実験では、 $\alpha$  線の希ガス中でのシンチレーション効率を調べることを目標にする。

## 第2章 希ガスシンチレータ

高純度な希ガスはシンチレータとして用いることができる。シンチレーション光の発生機構は以下のような過程をたどる。

1. 荷電粒子がガス中を通過
2. 荷電粒子が気体分子を励起
3. 励起分子が基底状態に戻る際に光子放出

シンチレーション光の平均波長は近紫外領域にあるので、その領域付近に有感な光電子増倍管 (PMT) を用いる。

気体のシンチレーション効率は低いが、遷移が 2~3 ns またはそれ以下という非常に短い時間内に起こるため、トリガーとして用いるには最適である。

また、気体シンチレータは非常に広い範囲にわたって粒子エネルギーとエネルギー損失との間に比例関係がある。

本実験で用いた気体シンチレータの特性を表 2.1 に示す。

気体	発光の平均波長	4.7 MeV の $\alpha$ 線当り $\lambda > 200$ nm の光子の数
Kr	318 nm	2100
Xe	325 nm	3700
Ar	250 nm	1100
He	390 nm	1100
N	390 nm	800
NaI(Tl) (比較用)	410 nm	41000

表 2.1: 大気圧における気体シンチレータの特性

## 第3章 実験装置

ここでは本実験に用いた素材、機器やこれらの性質を調べるための予備実験、セットアップ等について述べる。

### 3.1 使用素材、使用機器

写真 3.1 のように真空耐圧容器 (0~2 atm)、真空ポンプ (排気速度 12 l/min、到達真空度 1.3 Pa)、ガスを用意した。真空耐圧容器の蓋には写真 3.2 のように、信号読みだし用、HV 用の口がそれぞれ 2 個ずつ、ガス注入用、排気用の口がそれぞれ 1 個ずつ、計 6 個の口がある。また容器内部の圧力を知るために圧力計を取り付けた。密封容器の中には光電子増倍管 (PMT) 2 本を束ねて入れる。以後これらを区別するため、PMT A、PMT C と呼ぶことにする。本実験で用いた PMT は浜松フォトニクス社製 H3695-10 である。光電面の直径は 8 mm で、広い波長帯域に感度をもつものを選んだ。写真 3.3、図 3.4、図 3.5 参照。

本実験では  $\alpha$  線源としてマントルを用いる。マントルはランタンの発光体で、電球に例えるとフィラメントの役割をするものである。写真 3.6 参照。マントルには少量のトリウムが添加されており、このトリウムが放射性壊変に伴って  $\alpha$  線や  $\beta$  線を放出する。トリウム系列を図 3.7 に示す。

シンチレーション材料としてクリプトンとキセノンを用意した。また VME の性能上、signal を増幅する必要があったため、電圧帰還型オペアンプ (LM7171、スルーレート 4100 V/ $\mu$ s) を用いて反転増幅器を作った。これを図 3.8 に示す。この増幅器は、幅 5 ns、Pulse Height 数十 ~ 数百 mV の signal を 130 倍に増幅する。図 3.9、図 3.10 参照。

その他、次のような機器を使用した。高圧電源 (MODEL RPH-030)、FAN-IN/OUT (MODEL 740)、DISCRIMINATOR (MODEL 705)、COINCIDENCE UNIT (MODEL 466)、GATE GENERATOR (N-TM 307)、ATTENUATOR、2CH 50nS DELAY (N-TS 050)、32CH QDC (MODEL V792)、コンピュータ (cr7<sup>1</sup>)、FUNCTION GENERATOR (CFG253)。

### 3.2 予備実験

本実験に入る前にいくつかの予備実験を行った。ここではそれらの詳細について述べる。

---

<sup>1</sup>P6 部屋のコンピュータの中の一台中

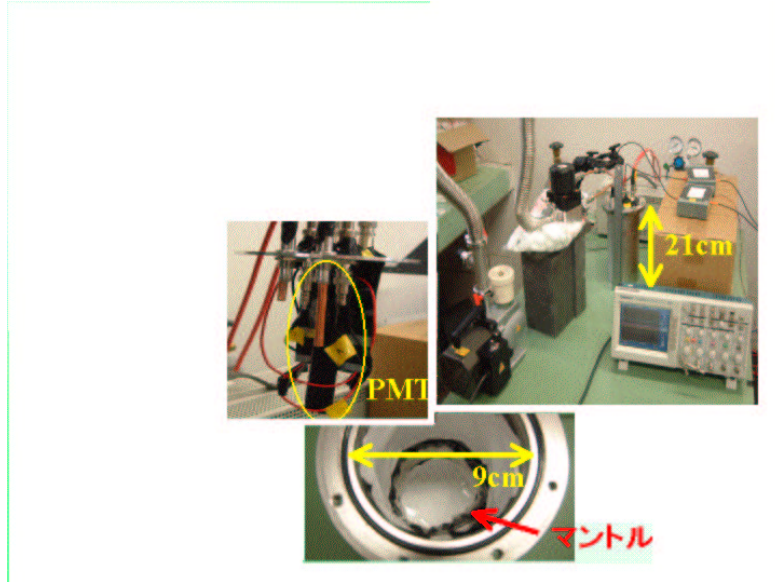


図 3.1: 使用機器

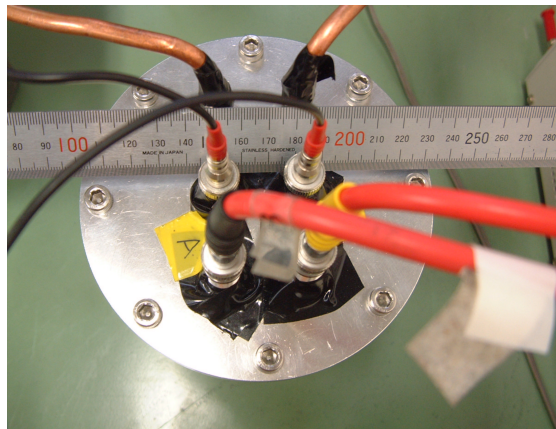


図 3.2: 真空容器の蓋

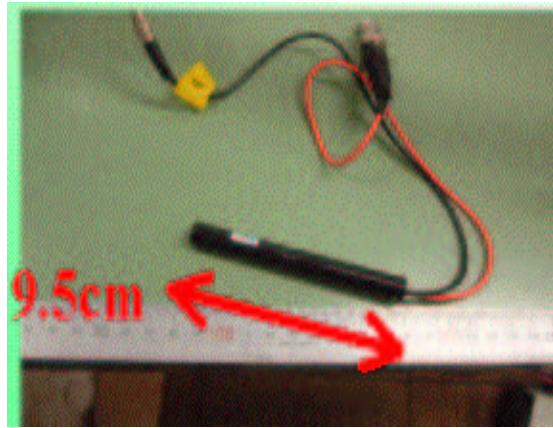


図 3.3: H3695-10

### 光電子増倍管アッセンブリ

型名	外形	PMT管径	内蔵PMT型名	カーブNo.	波長範囲	外形寸法	ダイノド構造/段数	最大定格		陽極-陰極間電圧	ルーメン感度
								暗電流	陽極-陰極間印加電圧		
H3695-10	φ11.3	3/8	R2496	400S	160 ~ 650	⑧	L/8	-1500	0.37	-1250	100

ルーメン感度	ゲイン	暗電流		時間特性			パルスリニアリティ		備考
		Typ. (nA)	Max. (nA)	Tr (ns)	Tt (ns)	TTS (ns)	2% (mA)	5% (mA)	
100	1.1 × 10 <sup>6</sup>	2	50	0.7	9.0	0.5	3	7	H3695-11 (信号回路 50 Ω 内蔵)

### ヘッドオン型光電子増倍管

型名	最大感度面有効径 (mm)		カーブNo.	最高感度波長 (nm)	光電面種類	窓材質	外形寸法	ダイノド構造/段数	ソケット及びソケットアッセンブリ	陽極-陰極間電圧 (V)	平均陰極電流 (mA)
	φ10 mm (3/8")	φ12 mm (1/2")									
R2496	φ10 mm (3/8")	φ12 mm (1/2")	400S	420	BA	Q	L/8	E678-11N*	1500	0.0	

ルーメン感度 (μA/lm)	青感度指数 (CS 5-58)	赤感度比 (R-68)	放射感度 (mA/W)	ルーメン感度		放射感度 (A/W)	ゲイン	暗電流 (30分後)		時間特性 (昇降時間/半高幅)	備考	型名
				Min. (A/lm)	Typ. (A/lm)			Typ. (nA)	Max. (nA)			
60	100	9.5	76	30	100	8.0 × 10 <sup>4</sup>	1.0 × 10 <sup>6</sup>	2	50	0.7	9.0	R2496

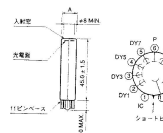


図 3.4: 光電子増倍管 H3695-10



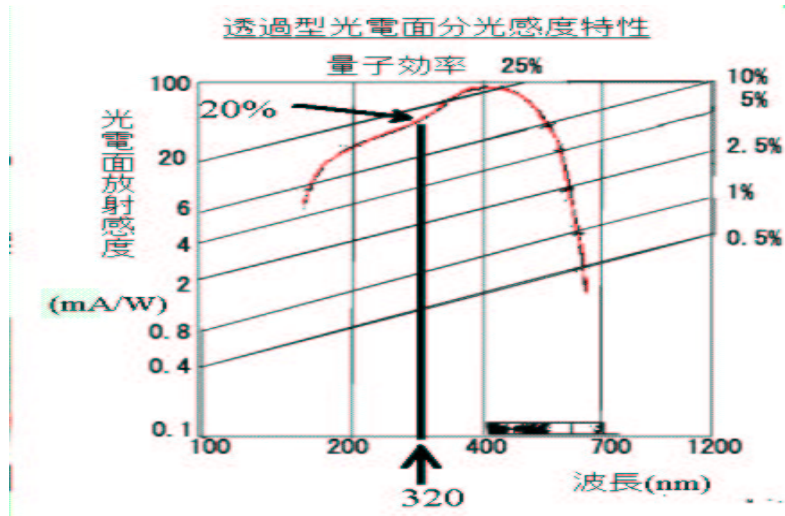


図 3.5: 透過型光電面分光感度特性

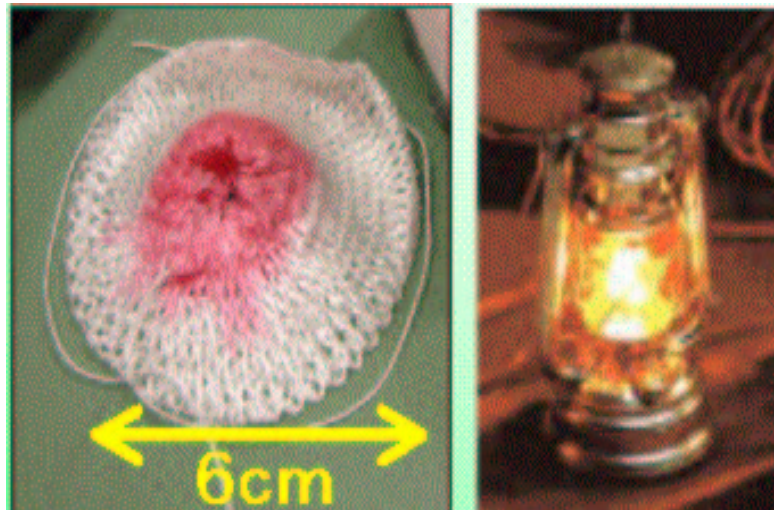


図 3.6: マントル

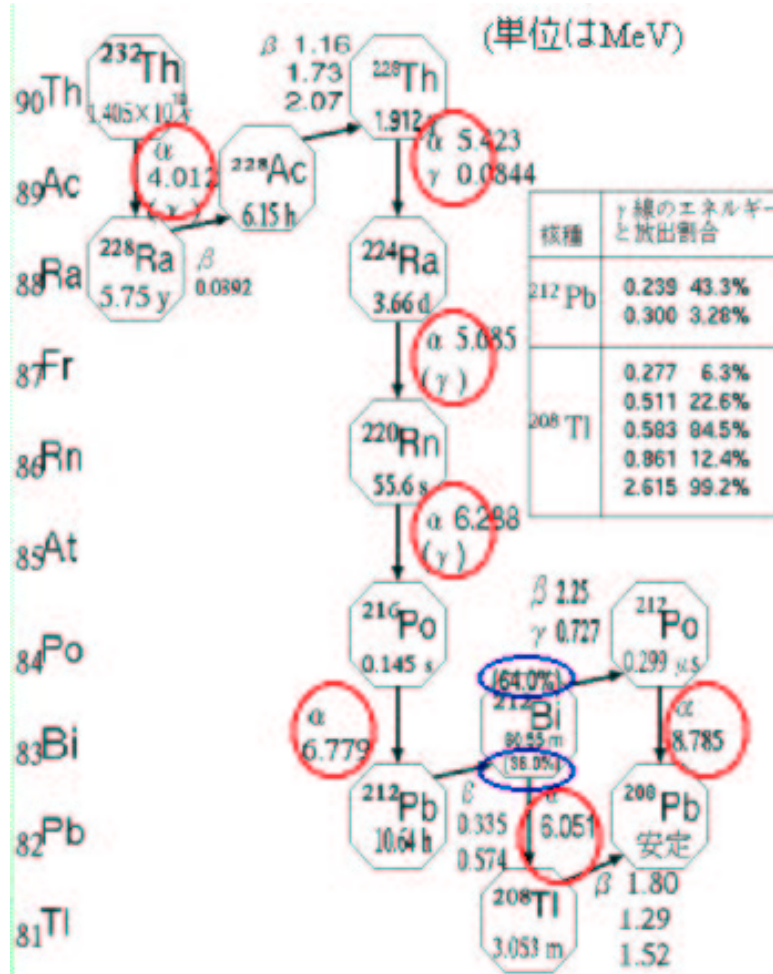


図 3.7: トリウム系列 [4]. 放射線のエネルギーの単位は MeV.

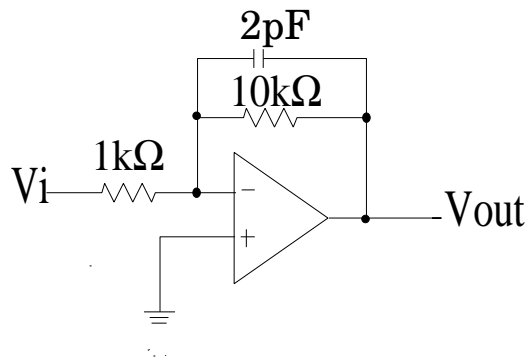


図 3.8: 反転増幅器

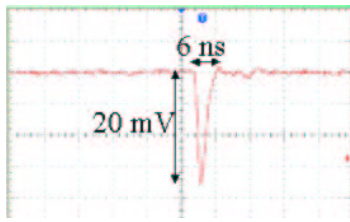


図 3.9: 増幅前の signal

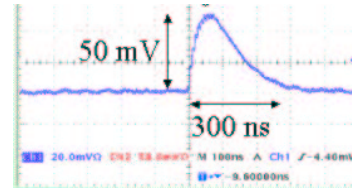


図 3.10: 増幅後の signal

### 3.2.1 ADC の基本的な性質

本実験で使用した ADC は CAEN 社製 32CH QDC(Model V792) に内蔵されており、12-bit、電荷積分型である。正の Input signal に対して signal の全電荷量をゲート信号が入っている時間全体で積分する。この積分値が ADC 値として返される。この ADC を VME で動かすプログラムは後にまとめてある。実際は ADC 値として 0 channel から 4096 channel の数値が得られる。そこで、ADC の channel 値と入力電荷量の関係を調べるために次のような実験を行った。

### 3.2.2 32CH QDC(V792) の動作確認

本実験で用いた ADC は Input signal を入力しなくてもある値を ADC 値として返すようにできている。これを pedestal 値という。この ADC の場合、図 3.11 のような広がりを持った pedestal 値を返す。この pedestal は、それぞれ 32CH QDC の 23 channel と 28 channel についてとったものである。これらの入力 channel は本実験においてこれから使用する channel である。23 channel を PMT C に、28 channel を PMT A につないだ。

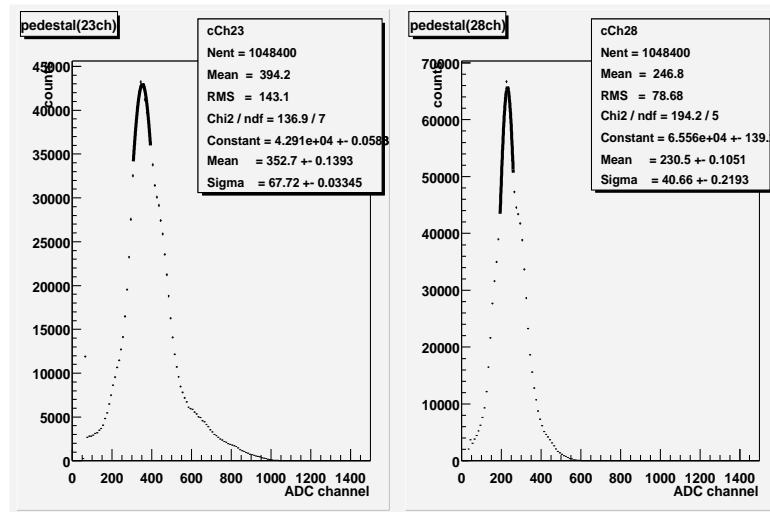


図 3.11: pedestal

### 3.2.3 ADC の channel 値と Charge の関係

ADC の channel 値と Charge の関係を調べるためにはまず、ある一定量の電荷が ADC に入るような状態を作る必要がある。FUNCTION GENERATOR からの矩形波 (10 kHz) を図 3.12 に示すような微分回路に通すと、幅がおおよそ 100 ns で Pulse Height は FUNCTION GENERATOR の Amplitude に応じて変わる signal を作る事ができた。これは図 refampsig2 に示すような実際の signal に立ち上がりの様子等が類似している。FUNCTION GENERATOR の Amplitude を変えることで、ADC への入力電荷量を変化させることができる。この人工的に作った signal を利用して ADC の channel 値と入力電荷量の関係を調べることにする。signal の Pulse Height を  $V$  [V] とおき、signal の形を底辺が  $t$  [ns]、高さが  $V$  [V] の三角形と近似すると、ADC の入力インピーダンスが  $50 \Omega$  なので入力電荷量  $Q$  は

$$Q = \frac{V \times t \times 10^{-9} \times 1/2}{50} \text{ [C]} \quad (3.1)$$

と書ける。測定では Gate 幅を 300 ns とし、Pulse Height を 10 mV から 100 mV まで 10 mV ずつ、100 mV から 500 mV まで 50 mV ずつ、500 mV から 1700 mV まで 100 mV ずつ変化させた。

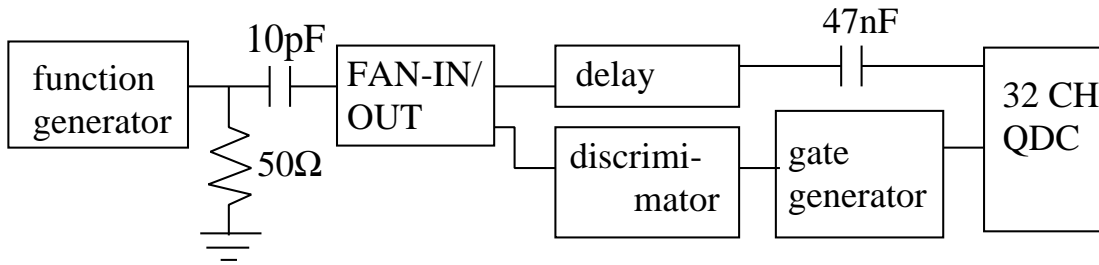


図 3.12: setup

縦軸に  $Q$  [pC]、横軸に pedestal を 0 とした ADC 値 [channel] をとって、データをプロットしたものが図 3.13、図 3.14、図 3.15 である。pedestal は図 3.16 に示してある。160 channel 付近を境として ADC channel 値と Charge の関係のふるまいが異なるので、160 channel 以下のグラフを別に示した。ただし 23 channel については 160 channel 以下で ADC の channel 値と Charge の間に線型関係が認められなかった。図 3.13 のプロットは

$$Q = (0.45 \pm 0.0048) \times \text{ADC} + (88.59 \pm 3.18) \quad (3.2)$$

と fitting されているので FSR(=4096 channel) に対する電荷量は

$$Q = 1909 \sim 1955 \text{ [pC]} \quad (3.3)$$

と計算される。つまり 1 pC は 2.096 ~ 2.146 channel に相当する。図 3.14 のプロットは

$$Q = (0.2876 \pm 0.005947) \times \text{ADC} + (44.71 \pm 4.202) \quad (3.4)$$

と fitting されているので FSR(=4096 channel) に対する電荷量は

$$Q = 1194 \sim 1251 \text{ [pC]} \quad (3.5)$$

と計算される。つまり 1 pC は 3.273 ~ 3.430 channel に相当する。図 3.15 のプロットは

$$Q = (0.3684 \pm 0.0219) \times \text{ADC} + (28.73 \pm 1.492) \quad (3.6)$$

と fitting されている。160 channel 以下では、28 channel を用いてこの関係式を使うことにする。

メーカーによると ADC の最大読み出し電荷量は 400 pC である。これとの相異は、signal が高速であるために signal が 32CH QDC に入る際に減衰してしまっていることに由来すると考えられる。またこれに比べるとわずかではあるが、pedestal 値が 200 ~ 300 channel 付近にあることや pedestal 値のゆらぎ、offset 電圧読み値の誤差なども含まれると考えられる。以上のことを考慮した上で、以後、ADC の最大読み出し電荷量として 23 channel は

$$Q = 0.45 \times 4096 + 88.59 = 1932 \text{ [pC]} \quad (3.7)$$

28 channel は

$$Q = 0.2876 \times 4096 + 44.71 = 1223 \text{ [pC]} \quad (3.8)$$

を用いることにする。

### 3.2.4 PMT の絶対 GAIN

PMT の GAIN は

$$\text{GAIN} = \frac{\text{陽極から出た電子数}}{\text{光陰極から出た電子数}} \quad (3.9)$$

で与えられる。図 3.3 を見ると、陽極-陰極間印加電圧は -1250 V とされているが、いま Input signal をできるだけ増幅したいため、印加電圧を PMT A には上限値の -1500 V、PMT C には -1400 V かけることにする。そこで、各々の PMT についてそれぞれ -1500 V、-1400 V における GAIN を調べる実験を行った。PMT に全く光が入らない場合でも、PMT の光電面やダイノードから飛び出す熱電子による signal が検出される。これらの中で、PMT の光電面から飛び出す熱電子が最も増幅度が大きく、これが one-photo-electron に対する PMT の増幅度であると考えられる。従って PMT に全く光を入れない状態で計測することによって電子の素電荷が分かっているので PMT の GAIN を知ることができる。図 3.17 のように PMT を完全に遮光して計測を行った。160 channel 以下では 23 channel が使えないため、両方とも 28 channel を用いて測定を行った。

PMT A、PMT C に対する結果はそれぞれ図 3.18、図 3.19 のようになった。横軸は pedestal を 0 とした ADC 値 [channel]、縦軸はカウント数である。光が全く入らないと考えられる夜に蛍光灯を消して計測した場合と図 3.20 のように一致しているので、光もれでないことが確認できる。図 3.18、図 3.19 より one-photo-electron に対応するピークが pedestal から  $(40 \pm 5)$  channel のところに現れていることが分かる。図 3.15 より、 $(40 \pm 5)$  channel は  $(44 \pm 2)$  pC に相当する。いま、

$$1.6 \times 10^{-7} \text{ pC} \times \text{PMTGAIN} \times \text{AMPGAIN} = (44 \pm 2) \text{ pC} \quad (3.10)$$

が成り立ち  $\text{AMPGAIN} = 130 \pm 10$  であるから、

$$\text{PMTGAIN} = 1.9 \times 10^6 \sim 2.4 \times 10^6 \quad (3.11)$$

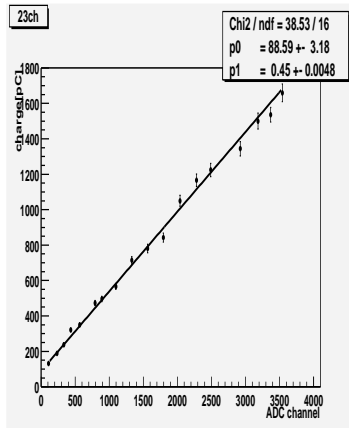


図 3.13: ADC channel と charge の関係 (ch23)

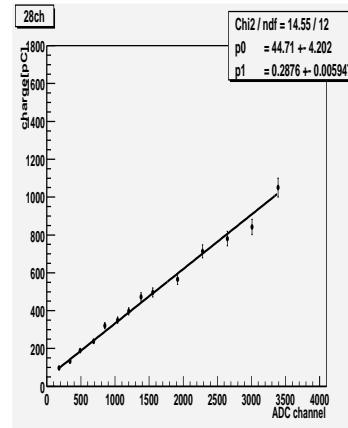


図 3.14: ADC channel と charge の関係 (ch28)

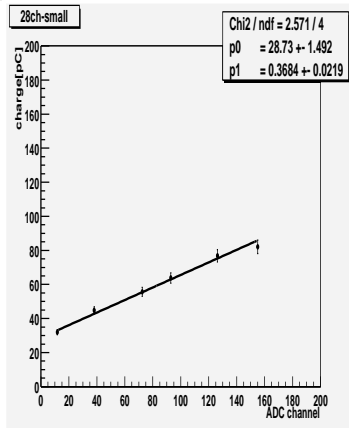


図 3.15: ADC channel と charge の関係 (160ch 以下 ch28)

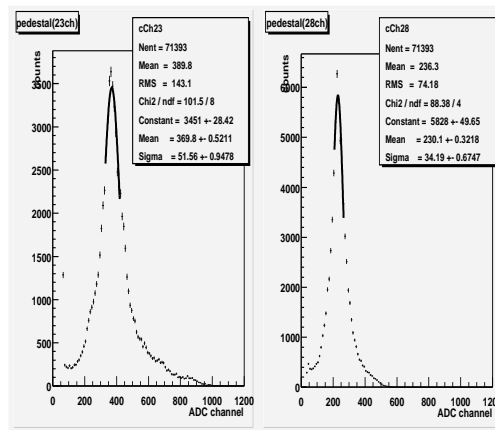


図 3.16: pedestal

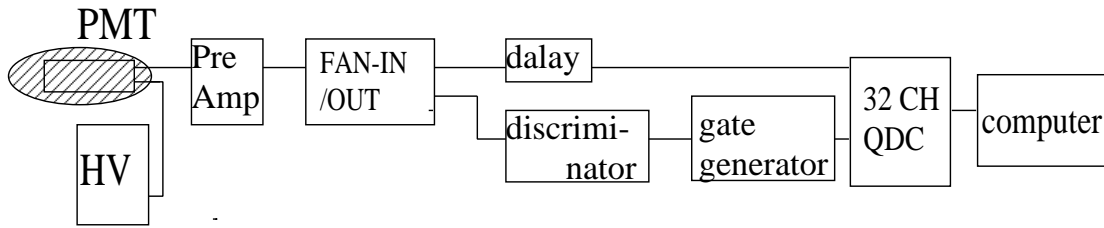


図 3.17: setup

となる。つまり PMT A、PMT C のそれぞれ  $-1500\text{ V}$ 、 $-1400\text{ V}$  における絶対 GAIN は  $1.9 \times 10^6 \sim 2.4 \times 10^6$  であることが分かった。浜松フォトニクスのマニュアル値 (図 3.3) と矛盾しない値が得られた。

### 3.3 セットアップ

ここでは本実験において使用した機器や DAQ のセットアップについて述べる。図 3.21 のようなセットアップを組んだ。真空耐圧容器内部にはマントルと PMT を図 3.22 のように配置する。マントルは切り開いて真空耐圧容器の側面を一周するようにはりつけた。真空容器をガス (Kr、Xe) で満たす際には 3 回フラッシュを行い、ガスは大気圧に等しくなるように注入する。2 本の PMT の GAIN を合わせるため、PMT A には  $-1500\text{ V}$  を、PMT C には  $-1400\text{ V}$  をかけることにする。discriminator は  $-12\text{ mV}$ 、GATE 幅は  $300\text{ ns}$  とする。FAN-IN/OUT の offset はノイズが入らない程度に、ATTENUATOR は signal が overflow しないように調節する。

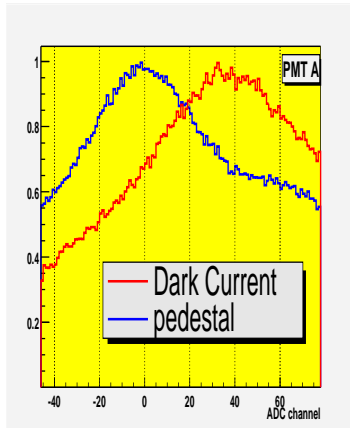


図 3.18: one-photo-electron に対する ADC channel 値 (PMT A)

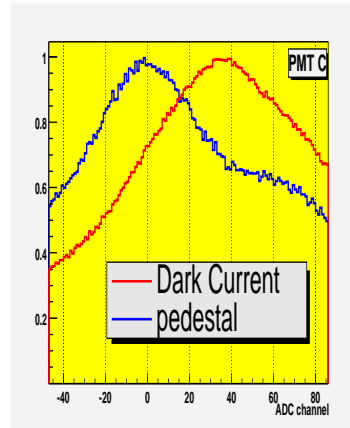


図 3.19: one-photo-electron に対する ADC channel 値 (PMT C)

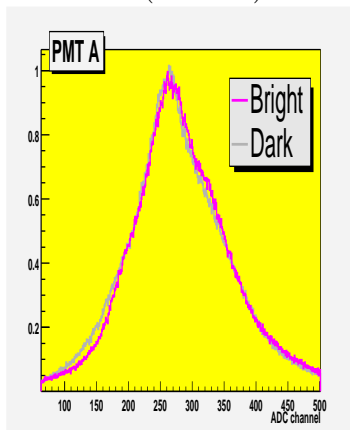


図 3.20: 光もれがないことの確認



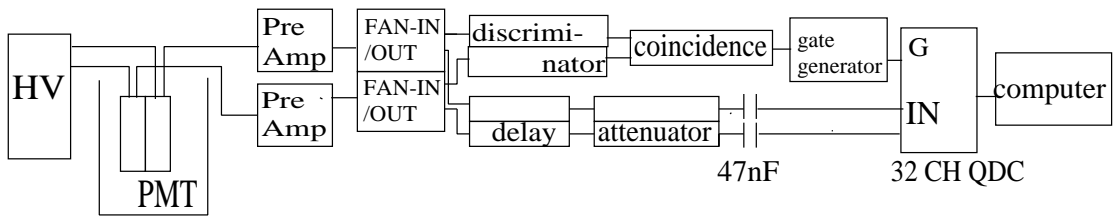


図 3.21: setup

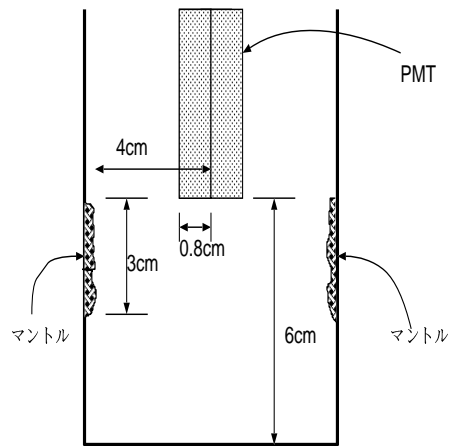


図 3.22: 真空容器内部

# 第4章 実験データと解析

## 4.1 スペクトル

まず、容器内に Kr を満たし、マントルを入れ、内壁に黒画用紙を貼った状態でスペクトルをとった。PMT A の signal は QDC の 28 channel、PMT C は 23 channel に入れた。PMT C の方は、QDC の入力チャンネルの関係でスペクトルがうまくとれない。それ故 PMT C は以後コインシデンスをとってゲートを開くためだけに利用することにする。

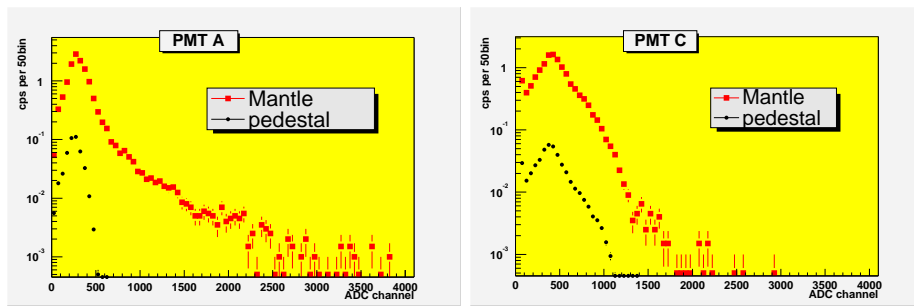


図 4.1: Kr ガスによるシンチレーションのスペクトル

図 4.2 は Kr と黒画用紙はそのままにして、マントルの入った状態と取り除いたときのスペクトルの違いを表したものである。これを見ると、確かにマントルを入れたことにより容器内部で光っていることが確かめられる。

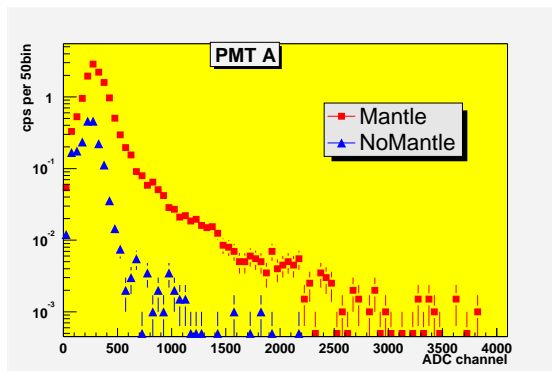


図 4.2: マントル

## 4.2 飛程

ここでは本実験で後に使用する物質中における荷電粒子 ( $\alpha$ 線、 $\beta$ 線) の飛程を表にした。

$\alpha$ 線のエネルギー (MeV)	4.0	5.4	5.7	6.1	6.3	6.8	8.8
Kr 中における飛程 (cm)	2.3	3.2	3.4	3.7	4.0	4.4	6.3
Xe 中における飛程 (cm)	1.6	2.4	2.5	2.7	2.9	3.3	4.7
ポリエチレン中における飛程 ( $\mu\text{m}$ )	25	39	43	48	50	57	87
ナイロン中における飛程 ( $\mu\text{m}$ )	22	35	38	43	45	51	77

表 4.1: 物質中における  $\alpha$  線の飛程

$\beta$ 線のエネルギー (MeV)	0.04	0.1	0.5	1	2
Kr 中における飛程 (cm)	1.4	6.4	74	180	380
Xe 中における飛程 (cm)	1.0	4.5	51	120	260
ポリエチレン中における飛程 ( $\mu\text{m}$ )	29	140	1,800	4,400	10,000

表 4.2: 物質中における  $\beta$  線の飛程

## 4.3 マントルから放出される $\alpha$ 線以外の成分

この節では、図 4.1 のスペクトルの、トリウム系列で放出される  $\alpha$  線以外の成分について考える。

我々が考えたのは以下の 4 つの要因である。

1. トリウム系列で放出される  $\beta$  線、 $\gamma$  線
2. 容器内壁に含まれる放射性物質による  $\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線
3.  $^{85}\text{Kr}$  の  $\beta$  崩壊に伴い放射される  $\beta$  線、 $\gamma$  線
4. 宇宙線ミューオン

これらのうち、4 について少し詳しく考えてみることにする。

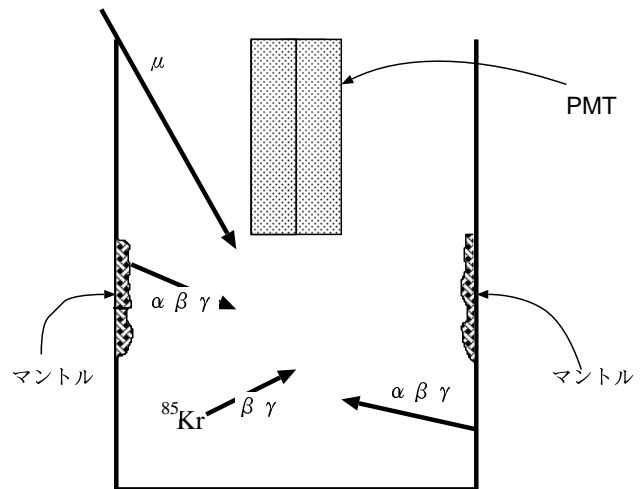


図 4.3: スペクトルの成分

### 4.3.1 宇宙線ミュオンの Kr、Xe 中におけるエネルギー損失

荷電粒子のエネルギー損失は Bethe-Bloch の式で求めることができ、

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) \right] \quad (4.1)$$

で与えられる [1]。ここで、 $2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$  であり、

$r_e$ : 古典電子半径 = $2.817 \times 10^{-13} \text{ cm}$	$m_e$ : 電子の質量
$N_a$ : アボガドロ定数 = $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$I$ : 平均励起ポテンシャル
$Z$ : 吸収物質の原子番号	$A$ : 吸収物質の原子量
$\rho$ : 吸収物質の密度	$z$ : 入射粒子の電荷
$\beta = v/c$ : 入射粒子の速度	$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
$W_{max}$ : 1回の衝突で入射粒子が与え得る最大のエネルギー	

である。 $W_{max}$  は正面衝突の場合に与えるエネルギーで、入射粒子の質量が電子の質量よりも十分に大きい場合、

$$W_{max} \simeq 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \quad (4.2)$$

で与えられる。入射粒子がミュオンの場合、入射粒子の質量が電子の質量よりも十分に大きいので、この式を使う。

式 4.1 の定数をまとめると次の式になる。

$$-\frac{dE}{dx} = \text{const.} \times \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln(\text{const.} \times (\beta\gamma)^2) - \beta^2 \right] \quad (4.3)$$

となる。定数部分に表 4.3 に示した値を代入し、グラフにしたのが図 4.4 である。縦軸は密度をかけて単位長さ当りのエネルギー損失にし、横軸は入射  $\gamma$  線のエネルギーをとっている。密度は標準状態の理想気体であるとして計算した。

宇宙線ミュオンのように十分エネルギーが高くと、そのエネルギー損失はほとんど minimum ionizing particle (MIP) によるものになる。MIP のエネルギー損失を読み取ると、Kr で  $-dE/dx \simeq 5.1 \text{ keV/cm}$ 、Xe でも  $-dE/dx \simeq 7.3 \text{ keV/cm}$  である。大きく見積もっても、容器の高さは 21 cm 程度なので、Xe の場合で 150 keV 程度しかエネルギーを損失しない。これは  $\alpha$  線のエネルギー損失に比べ十分に小さい値である。

gas	Z	A [g/mol]	I [eV]	d [mg/cm <sup>3</sup> ]
Kr	36	83.8	352.0	3.74
Xe	54	131.29	482.0	5.86

表 4.3: 使用した希ガスのデータ

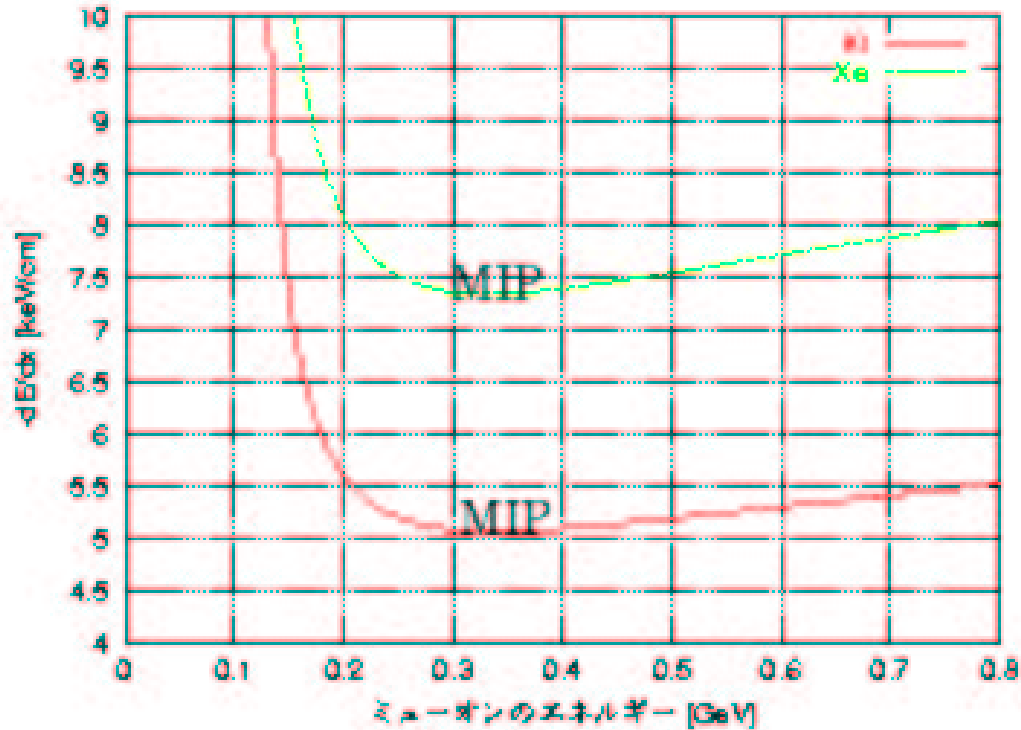


図 4.4: Bethe-Bloch Formula

#### 4.4 マントルから放出される $\alpha$ 線の遮蔽

本実験ではマントルから放出される  $\alpha$  線による希ガスシンチレーション光を調べるのが目的であるので、それ以外の成分をスペクトルから除去したい。そのためにはマントルから放出される  $\alpha$  線のみを遮蔽したスペクトルをとり、図 4.1 のスペクトルから差し引けばよい。

我々はポリエチレンを用いて  $\alpha$  線を遮蔽することにした。ポリエチレン中における  $\alpha$  線と  $\beta$  線の飛程は、§ 4.2 の表 4.1、4.2 に示した。

表からマントルから放出される  $\alpha$  線の飛程は最大で  $87 \mu\text{m}$  であることがわかる。ポリエチレンを 4 枚重ねて厚さを計ったところ、 $100 \mu\text{m}$  であったので、これでマントルからの  $\alpha$  線は完全に遮蔽されることになる。トリウム系列に含まれる  $^{228}\text{Ra}$  の  $\beta$  崩壊による  $\beta$  線 ( $0.04 \text{ MeV}$ ) も止まってしまうが、元々この  $\beta$  線はエネルギーが  $\alpha$  線のエネルギーに比べ十分に小さいため、スペクトルの主要な成分になることはないので無視することにする。

図 4.5 にマントルあり (Mantle)、マントルなし (NoMantle)、マントルをポリエチレンで遮蔽 (Mantle(Shield)) の 3 つのスペクトルを並べてみた。マントルなしと遮蔽のスペクトルはあまり変わらないが、500~1000 channel 辺りを見るとマントルなしよりも遮蔽の方がカウントレートが多い。おそらくこれはトリウム系列で放出される  $\beta$  線によるシンチレーション光が捕らえられているのであると思われる。

この遮蔽した時のスペクトルを遮蔽しない時のスペクトルから引いたのが図 4.6 である。

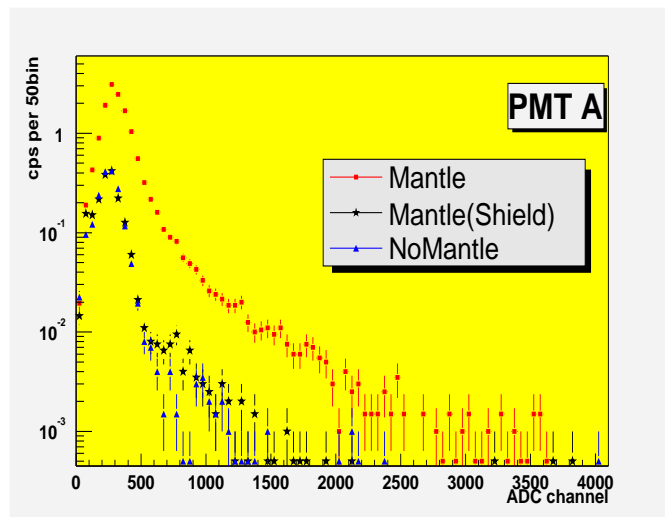


図 4.5: ポリエチレンによる  $\alpha$  線の遮蔽

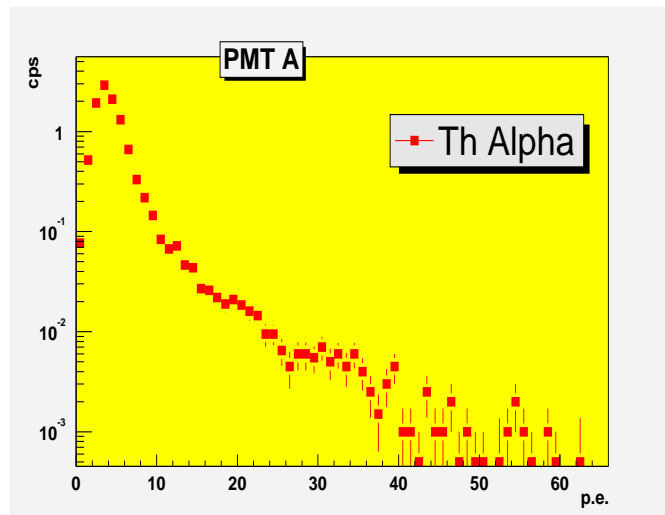


図 4.6: マントルから放出される  $\alpha$  線のスペクトル

## 4.5 ADC channel から photo-electron 数への変換

これまでの議論から、ADC channel から photo-electron 数へ変換することが可能である。photo-electron 数から PMT に入射した光子数に変換するには量子効率を正確に知っている必要があるが、光子の波長により量子効率は変わるため、photo-electron に変換するに留める。

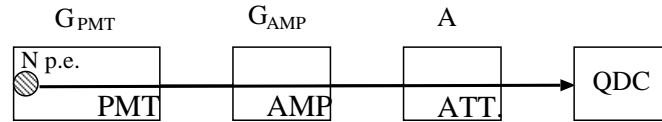


図 4.7:

PMT の光電面で  $N$  個の photo-electron ができたとする。まず、式 3.10 から、 $\text{PMTGAIN} \times \text{AMPGAIN} (=G)$  がわかる。また、ATTENUATOR で factor  $A$  だけ減衰させる。ここまでで QDC に入る Charge 量が計算できる。QDC に入る Charge 量  $Q$  は

$$Q = N \times e \times G \times A \quad (4.4)$$

となる ( $e$ : 素電荷)。§ 3.2.2 の式 3.4、3.6 を用いるとこの  $Q$  を pedestal 値を引いた ADC channel へと変換できる。この計算を逆算すると、ADC channel から photo-electron 数  $N$  が求まる。

実際に横軸を photo-electron 数 (p.e.) に変換したスペクトルを示す。Kr だけでなく Xe についてもスペクトルをとった。A の値は Kr については 8 dB なので  $1/2.51$ 、Xe は 16 dB なので  $1/6.31$  である。

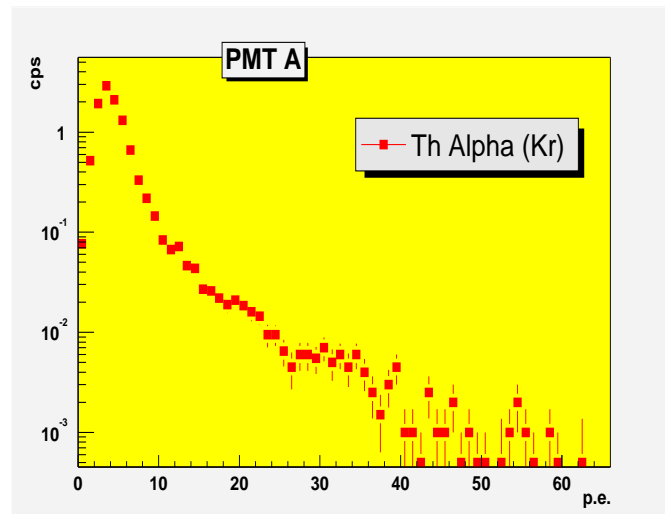


図 4.8: p.e. に変換 (Kr)

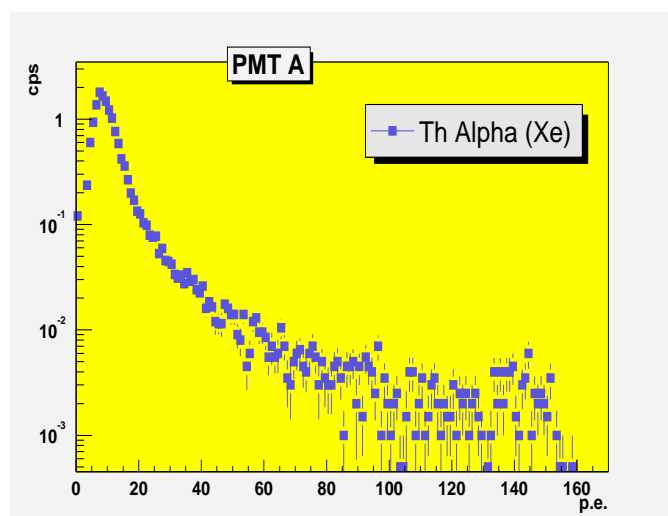


図 4.9: p.e. に変換 (Xe)



## 第5章 シミュレーション

実験によられたスペクトルを定量的に評価することを目標に、マントルから飛び出した $\alpha$ 粒子が希ガス中でシンチレーション光を発生させ、その光子がPMT光電面に衝突するまでの過程を計算する。

### 5.1 モデル

本実験で用いた容器内部は図3.22のようになっている。容器内は純度100%の希ガスで満たされているとし、壁面での光反射、 $\alpha$ 粒子との相互作用などは無視する。またマントル中のトリウム崩壊による $\alpha$ 線以外の放射線についても無視し、トリウム系列の $\alpha$ 線とマントル、容器内希ガスとの相互作用のみを考える。

### 5.2 エネルギー損失とシンチレーション効率

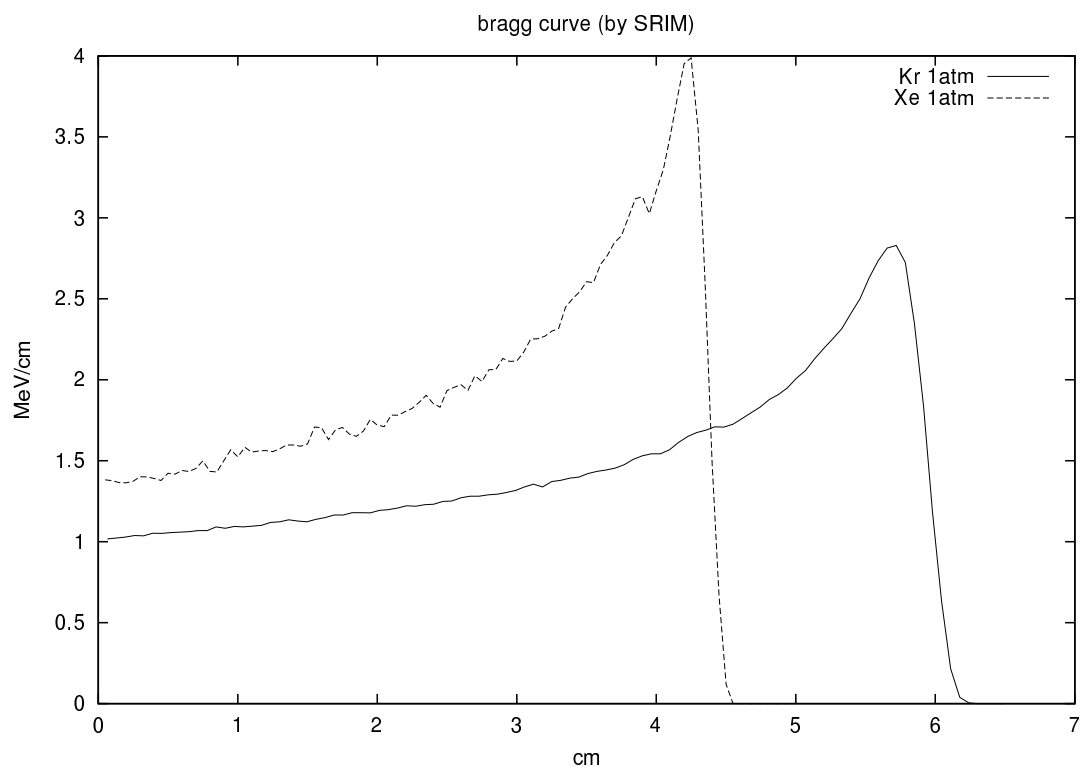
**$\alpha$ 線のふるまい** マントル中、および希ガス中では $\alpha$ 線は直線運動をするとし、Bragg曲線によって表せるエネルギー損失を受けながら減速し、止まるものとする。SRIMという計算ソフトで、 $\alpha$ 粒子の物質中でのエネルギー損失を計算できる。このソフトであらかじめ9MeV  $\alpha$ 線のBragg曲線を決定しておく。(図5.1)9MeV以下の $\alpha$ 粒子のエネルギー損失に関しては、9MeVのBragg曲線をもとに計算する。

**シンチレーション効率**  $\alpha$ 粒子のエネルギー損失に対するシンチレーション効率は一定であるとし、 $\alpha$ 粒子の軌跡上ではエネルギー損失に比例する光子が等方的に放出されると仮定する。

### 5.3 立体角

発光時における放出光子数が一定ならば、1発光現象においてPMT光電面がうける光子数は発光地点から光電面を見込む立体角にのみ依存する。(容器の壁による光子の反射はないと仮定している。)そこで円柱瓶中の各点における光電面に対する立体角を計算した。

立体角はある点から面を眺めた時、その面を点からの距離1の球面に投影したときの面積で定義されている。今回求めるべき立体角を解析的に計算するのは難しそうなので、各点における天球にメッシュをかけて、その中でPMTが占める面積を求めることとする。



⊠ 5.1: 9MeV bragg curve

**$z = \text{一定}$ での立体角**  $z = \text{一定}$ での各  $(x, y)$  での立体角を出力するプログラムがプログラム 8.2 節である。SSTEP=0.01 として  $H = 1$  の時の実行結果が図 5.2 である。色により立体角の大きさを表してある。これより明らかに光電面に対して垂直な軸に対する回転対称性がみられる。

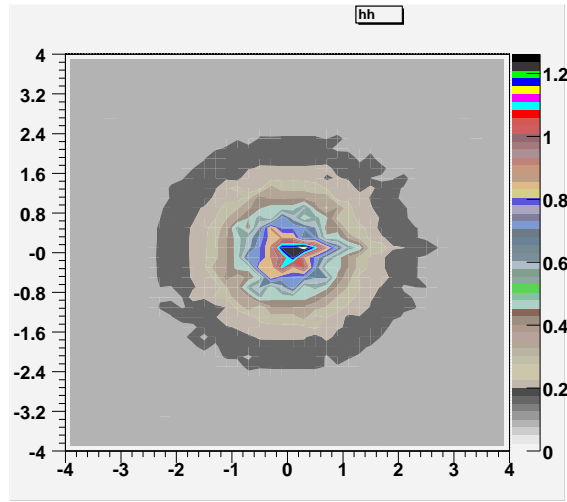


図 5.2:  $z = \text{const}$  における立体角

**$r$ - $z$  依存性** 立体角は前節の結果から明らかなように方位角方向に関しては対称性があるので PMT 面の中心とした円柱座標上での  $r, z$  で立体角は決定できる。そこで、円柱座標系での  $r, z$  の点における立体角を容器の大きさである  $0 < r < 4, 0 < z < 6$  の範囲内の微小体積  $0.01 \text{cm}^3$  毎に計算しておき、 $\alpha$  粒子が発光した各点に適用させるものとする。

グラフにすると図 5.3。同様に色により立体角の大きさが表現されている。

## 5.4 $\alpha$ 粒子のエネルギー損失シミュレーション

プログラム 8.3 節は初期エネルギー (8MeV) の  $\alpha$  線に対して、初期位置と運動方向を与えた時の円柱容器中での  $\alpha$  粒子の飛程、各軌跡上のエネルギー損失、その点における定円盤 (PMT 光電面) を見込む立体角を出力する。

**実行結果** 実行すると

```
[nisimura@cr6 NORANDOM]$ ./onerun eightMeV_x_-x_z01.dat
readdata
file:eightMeV_x_-x_z01.dat open!!

set start points
z=0.1

phi=0

set start direction
```

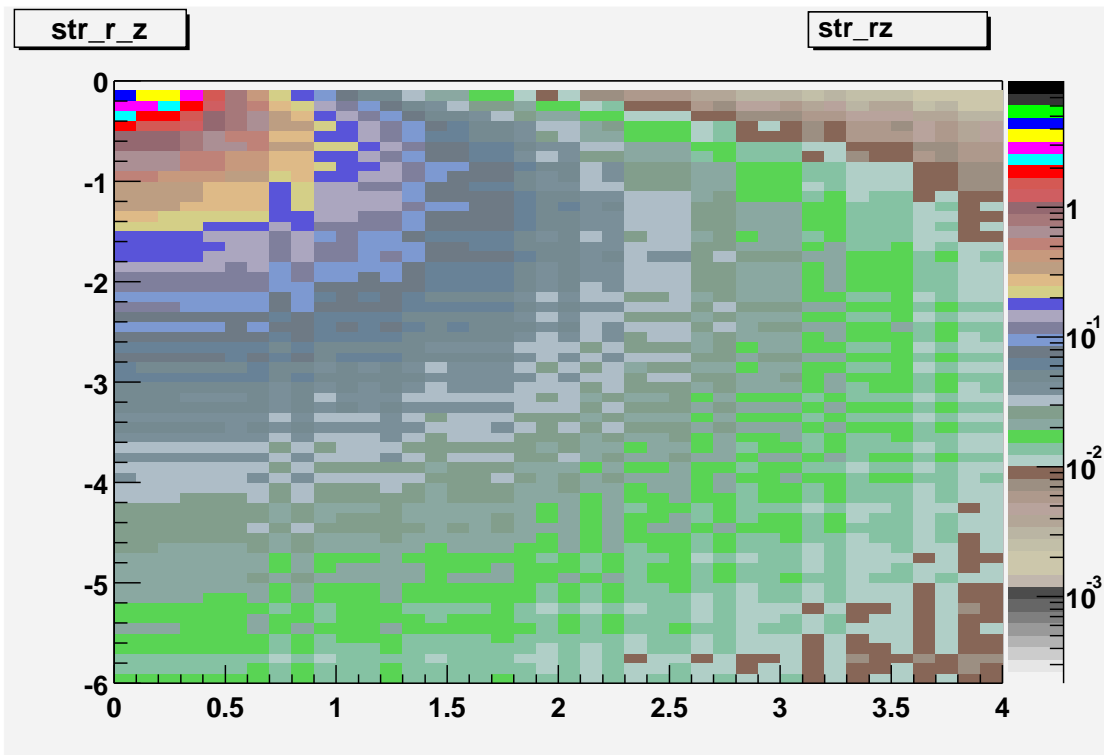


图 5.3:

```
the=1.57079
```

```
phi=3.14159
```

```
0.551682 0.722578
```

```
[nisimura@cr6 NORANDOM]$
```

このような出力がえられ `eightMeV_x_x_z01.dat` に各点のデカルト座標 ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ )、それまでの飛行距離、エネルギー損失、エネルギー、立体角 1、立体角 2、という 8 列のデータが書き込まれる。 $\alpha$  粒子によるシンチレーション光は、生成イオン対の個数に比例し、これは各点における粒子のエネルギー損失にほかならない。そしてシンチレーション光は等方的に放出されるので、PMT がうけとるシンチレーション光は、エネルギー損失と立体角の積に比例する。いくつかの初期設定のパラメータにたいしてそれらのデータをグラフ化したものが図 5.4~図 5.9 である。どのパラメーターも  $y = 0$ ,  $z = \text{const}$  上を動くように設定した。図 5.4~図 5.9 をみてもわかるように正面に粒子が通過したときにエネルギーをたくさん受け取ることができる。また、ほんのわずかに離れるだけでその PMT がうけとるエネルギーは急激に減少する。

## 5.5 マントルからでてくる $\alpha$ 粒子

今回の実験で用いた  $\alpha$  線源はガスランタン用マントルである。このマントルの中にはトリウムが添加されている。 $\alpha$  粒子はトリウムから放出されるが、トリウムがマントル中に均等に添加されているとするとマントル内部で放出された  $\alpha$  粒子はマントル中でエネルギーを落としつつ、マントルの外に飛び出す。このためガス中で光る  $\alpha$  粒子のエネルギーはさまざまであることが予想される。このエネルギーを求めるのが本節の主題である。

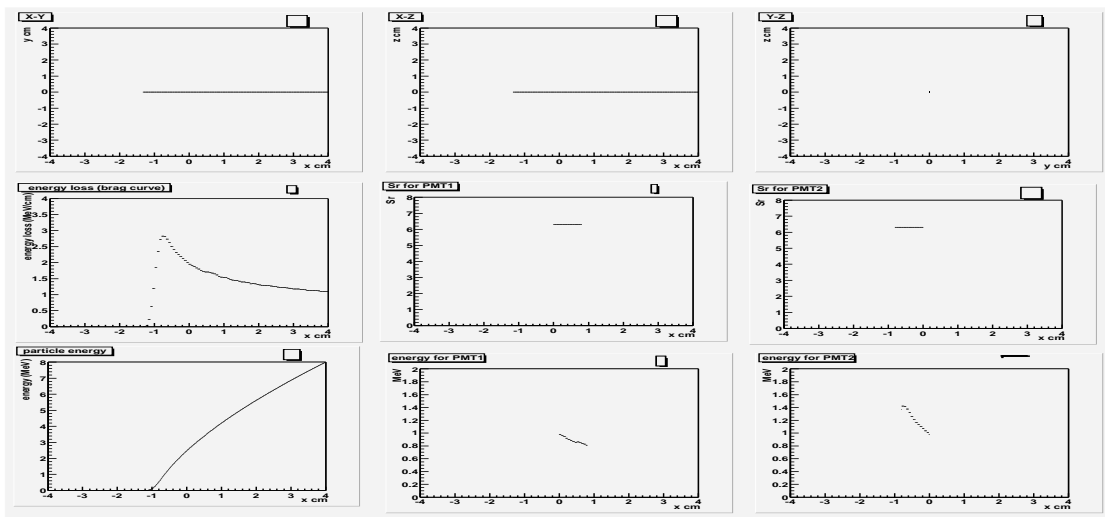
**マントル** マントルの主な素材を 6-6 ナイロンであるとする。この中での  $\alpha$  粒子 9MeV の飛程は  $\sim 70 \mu\text{m}$  程度である。トリウム系列において放出される  $\alpha$  線のうち最大エネルギーは 9MeV 弱なので、 $70 \mu\text{m}$  より深いところにあるトリウムからの  $\alpha$  線は外部にでない。そこで厚さ  $100 \mu\text{m}$  の範囲でのみの  $\alpha$  線の振舞を考える。またこの厚さはマントル全体の厚さ ( $300 \mu\text{m}$ ) に対して薄く、無限平面として考える。

プログラム 8.4 節が深さ  $0 \sim 80 \mu\text{m}$  内のランダムな深さから、ランダムな方向に、トリウム系列中のいずれかの  $\alpha$  粒子が飛び出したときの  $\alpha$  粒子がマントルの外に飛び出したときのエネルギーを計算するものである。

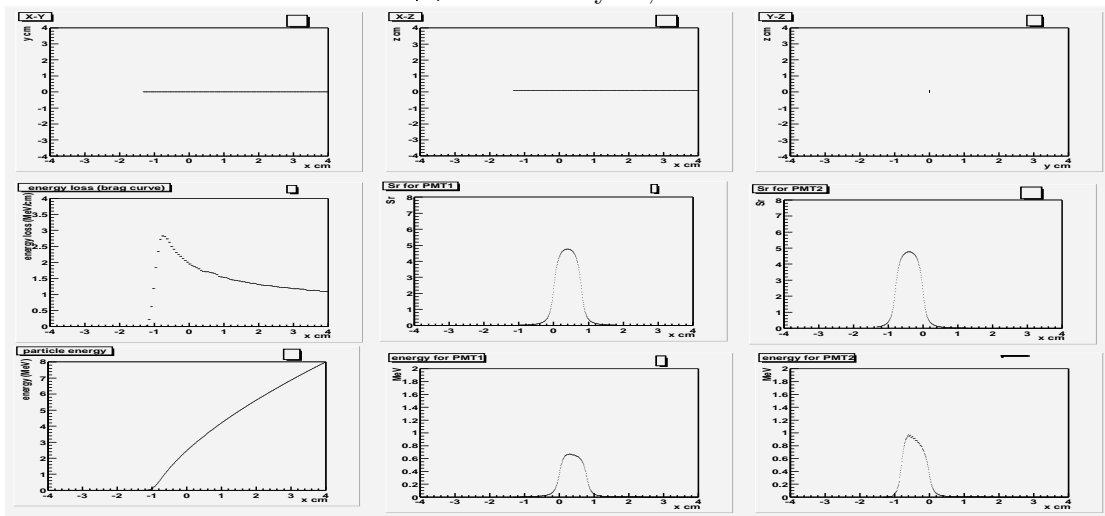
**実行結果** 図 5.10 がトリウム系列の  $\alpha$  粒子エネルギー。図 5.11 がマントルの表面 (厚さ  $80 \mu\text{m}$ ) から外部に飛び出す  $\alpha$  粒子エネルギースペクトルである。100000counts のうちおよそ 80000counts は方向が違う、もしくは表面に達することができないことがわかる。また低いエネルギー領域には少なく、初期エネルギーに近いものが多い。

## 5.6 simulate

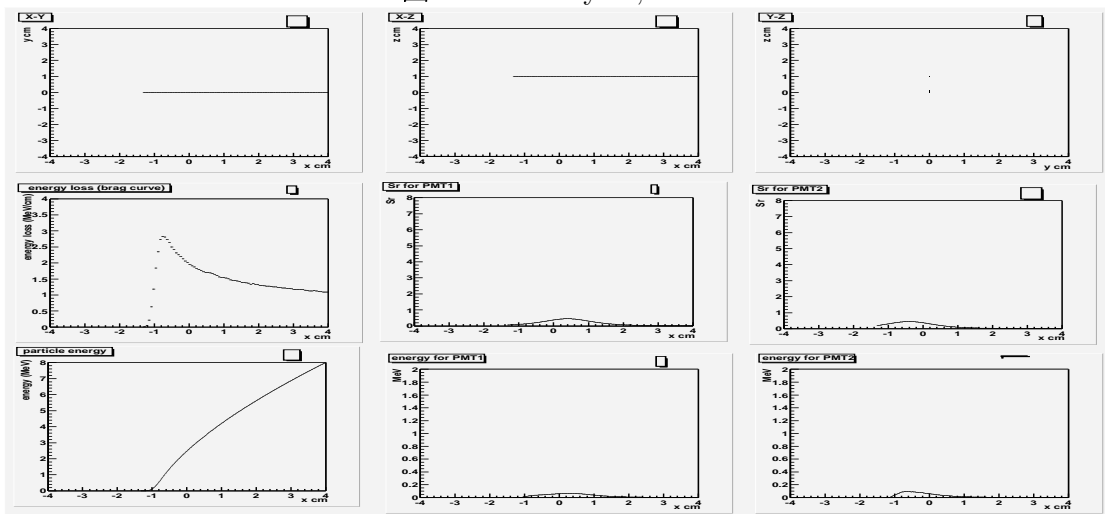
前節までの結果などを踏まえて本実験での PMT に到達する光子数をシミュレートする。



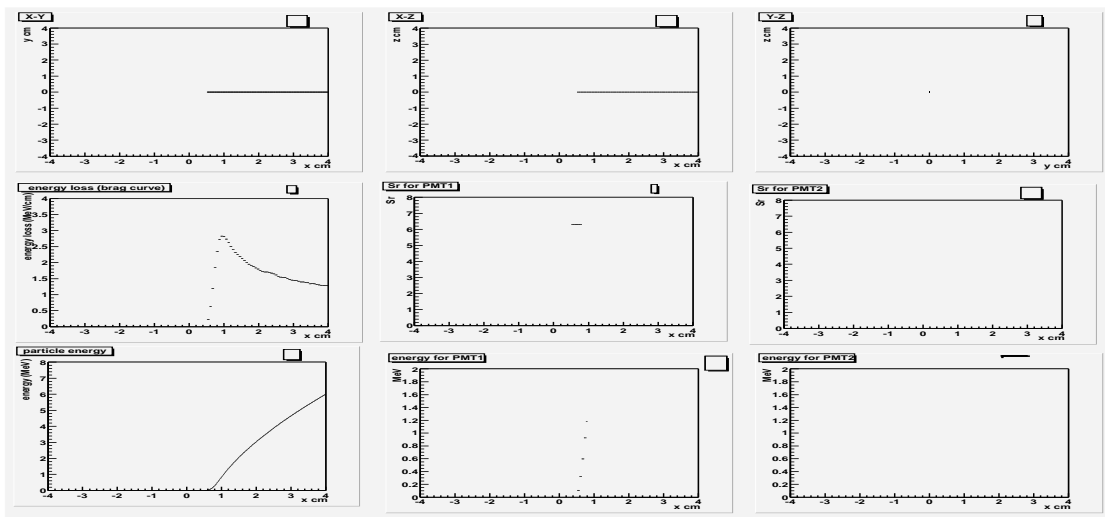
☒ 5.4: 8MeV  $y=0, z=0$



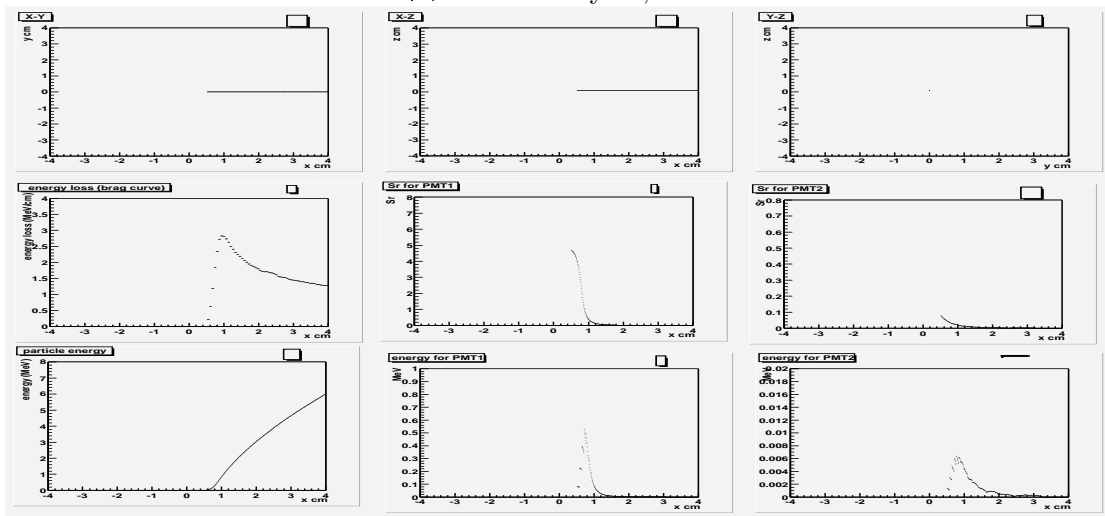
☒ 5.5: 8MeV  $y=0, z=0.1$



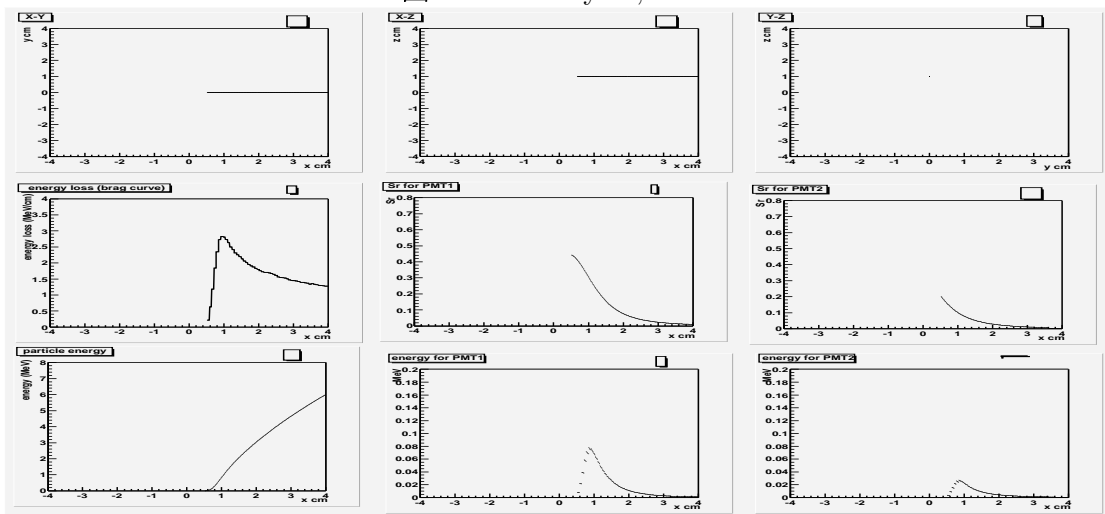
☒ 5.6: 8MeV  $y=0, z=1$



☒ 5.7: 6MeV  $y=0, z=0$



☒ 5.8: 6MeV  $y=0, z=0.1$



☒ 5.9: 6MeV  $y=0, z=1$

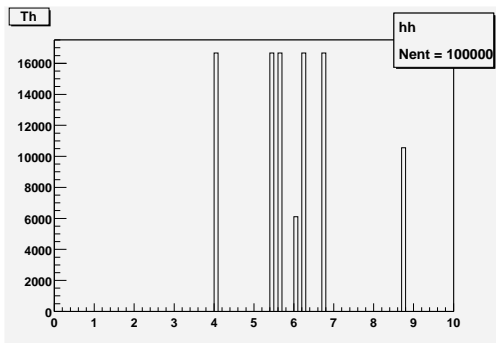


図 5.10: マントル中のトリウム

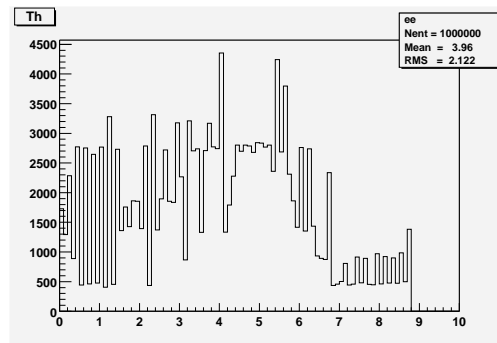


図 5.11: マントル中のトリウム

プログラム 8.5 節は、次のようなものである。

1. 立体角データを読み込む。
2. Bragg 曲線を読み込む。
3. 円柱の側面の内マントルのある部分から  $\alpha$  粒子の放出地点と放出方向をランダムに選ぶ。
4. マントル中からでて来る  $\alpha$  粒子のエネルギーを計算する。
5.  $\alpha$  粒子の軌跡にそって立体角とエネルギー損失の積を積分する。

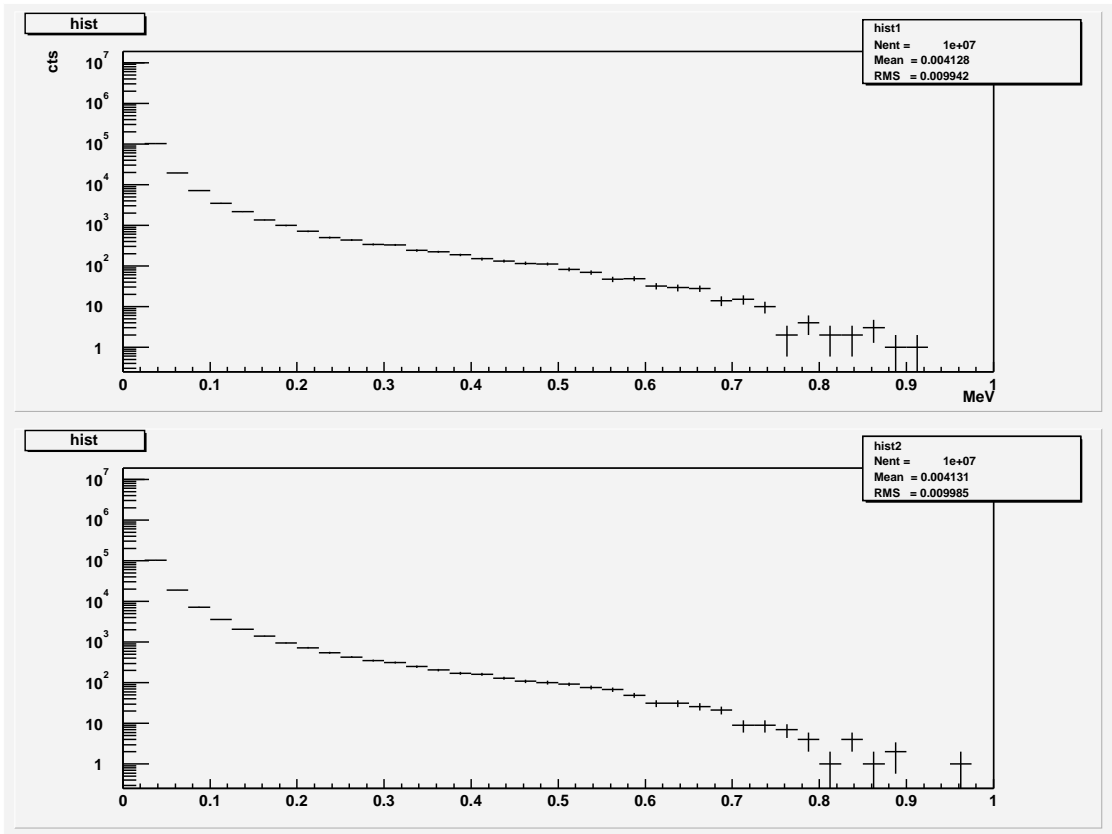
**結果** 図 5.12 が実行結果である。上が PMT1、下が PMT2。横軸は PMT が受け取る光子数に相当するエネルギーである。また file:logarun には

```
LOOP=1000000 decay=8538003
```

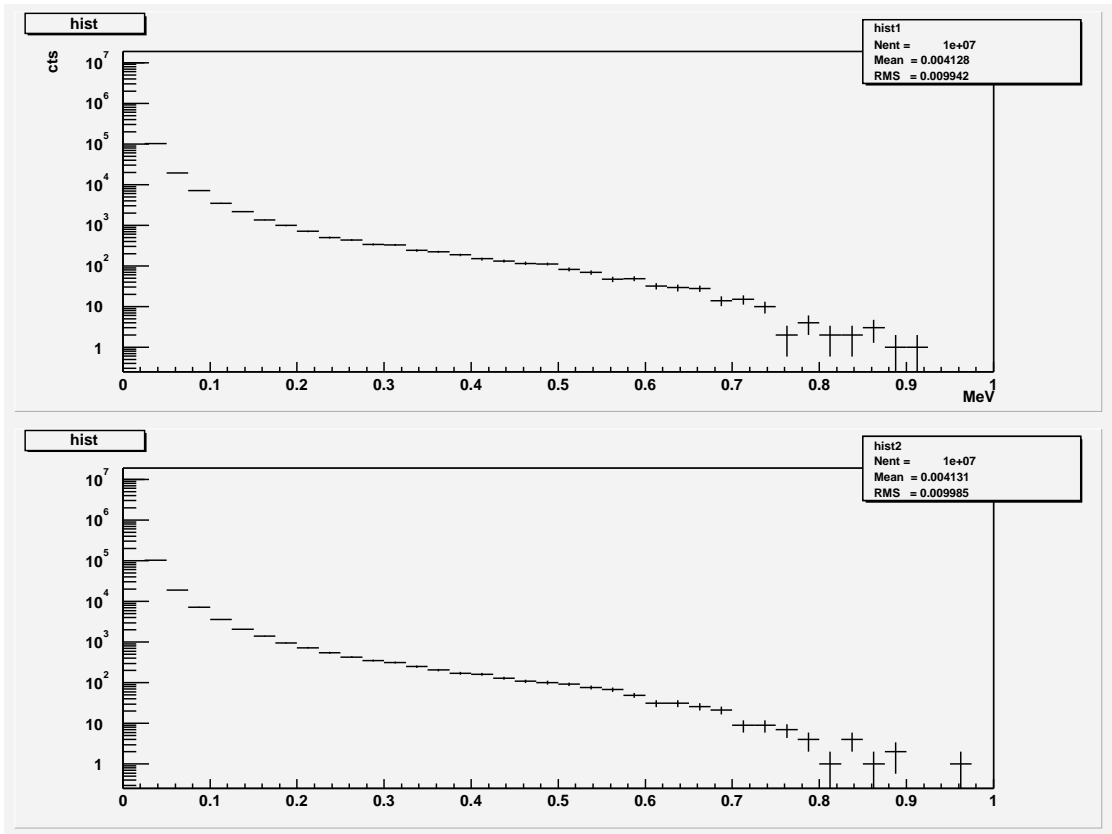
と出力されマントルの表面から厚さ  $80 \mu\text{m}$  以内の点で放出された  $\alpha$  線 8538003 個の内 1000000 個が容器の中を走ったことがわかる。これはマントルの表面から  $80 \mu\text{m}$  以内でトリウム崩壊により生じた  $\alpha$  粒子のうち 12% がマントルの外に出ることができることを示している。

Xe の場合が図 5.13





☒ 5.12: Kr



☒ 5.13: Xe

## 第6章 解析

本実験で得られたデータとシミュレーションを行い得られたデータを比べることにより、本実験で得られたデータの意味付けを行う。

### 6.1 実験データとシミュレーションデータ

図 6.1、6.2 が実験データ、図 6.3、6.4 がシミュレーションデータである。

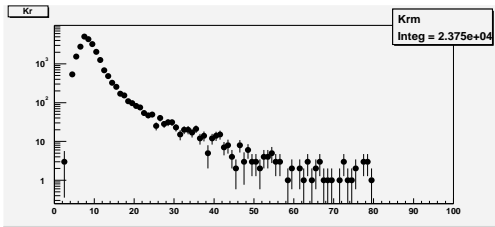


図 6.1: pmt スペクトル (実験 Kr) 横軸は p.e.

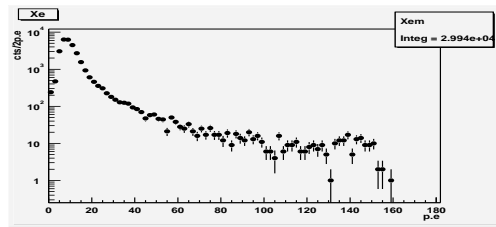


図 6.2: pmt スペクトル (実験 Xe)

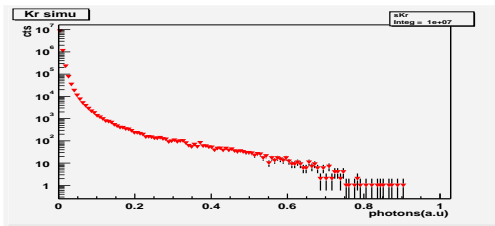


図 6.3: pmt スペクトル (シミュレート Kr)

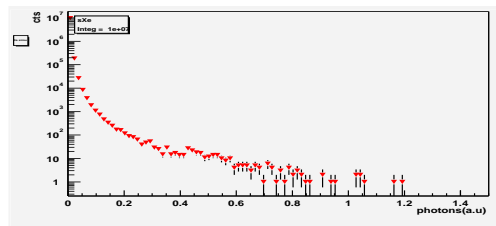


図 6.4: pmt スペクトル (シミュレート Xe)

二つのデータを比べると似たような形のスペクトルとなっている。ただしシミュレーションの方は横軸と縦軸が確定していない。横軸の決定にはエネルギー損失 MeV 当たりの発光光子数の決定が、縦軸の決定には  $\alpha$  線の放射頻度、つまりトリウム崩壊速度の決定が伴う。

### 6.2 発光光子数の決定

実験データとシミュレーションデータの横軸を合わせるため、スペクトルの形で判断する。スペクトルの減衰度合をべきで表し、シミュレーションデータのある二点間での減

衰度合のべきの変化率をもとめ実験データにおいてこの変化率を持つ二点を決定した。そしてそれぞれのグラフで二つのべきが交わる点(スペクトルが折れ曲がる点)と原点が一致するとして発光光子数を決定した。

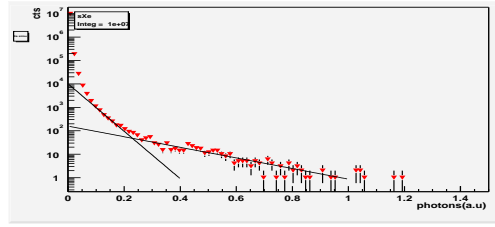
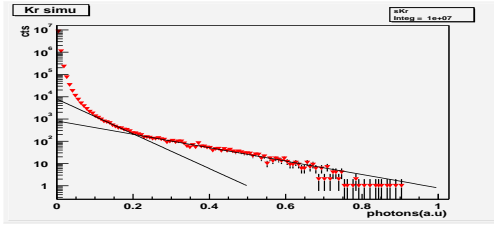


図 6.5: pmt スペクトル (シミュレート Kr)fit 図 6.6: pmt スペクトル (シミュレート Xe)fit

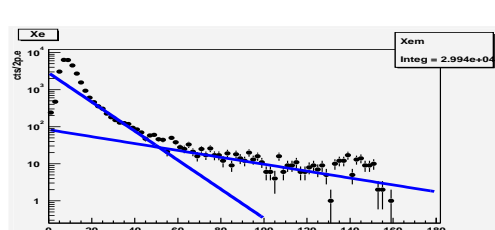
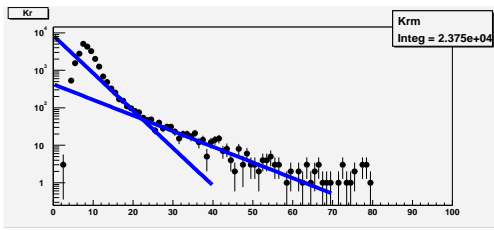


図 6.7: pmt スペクトル (実験 Kr)fit 横軸は p.e. 図 6.8: pmt スペクトル (実験 Xe)fit

交点は  $N$  を  $\alpha$  粒子エネルギー損失 1MeV 当たりの発光光子数とすると、

	Kr	Xe
シミュレートデータ [a.u.]	$0.26 \pm 0.05$	$0.23 \pm 0.05$
実験データ [p.e.]	$22 \pm 4.4$	$50 \pm 10$

図 6.9: fit の交点

$N \times (\text{シミュレートデータ}) \times (\text{量子効率}) = \text{実験データ}$ となるので、いま量子効率を  $0.2 \pm 0.04$  とすると図 6.10 となる。

文献値によれば 4.7MeV で Kr 2100photons Xe 3700photons となっており MeV あたりに換算すると Kr 450photons Xe 790photons となり一致している。

### 6.3 $\alpha$ 線発生頻度の決定

前節で求めた交点より右に含まれているイベント数を用いてでシミュレーションデータの縦軸を規格化する。A を一秒あたりにつき  $\alpha$  粒子が容器内を走る全イベント数とすると、シミュレーションデータの全イベント数は 10000000events なので図 6.11 のように計算される。よって

$$A \times (\text{シミュレーションデータ}) = (\text{実験データ})[\text{events/s}]$$

Kr	$N = 400 \pm 150[\text{photons}]$
Xe	$N = 1100 \pm 400[\text{photons}]$

図 6.10: MeV あたりのシンチレーション光子数

$$\text{Kr } A \times 3800/10000000 = 600/2000$$

$$A = 800 \pm 670[\text{events/s}]$$

$$\text{Xe } A \times 700/10000000 = 800/2000[\text{events/s}]$$

$$A = 5700 \pm 5400[\text{events/s}]$$

となる。

以上の A と N を用いシミュレーションデータを x 軸方向に (N × 量子効率) 倍、y 軸方向に A/10000000 倍して、実験データと重ねたグラフが図 6.12、6.13 である。

低 p.e では V792 モジュールが感度が少ないと思われるため実験データとシミュレートデータにずれが生じているが、そのほかのところではなかなかいい一致をみている。

	シミュレーションデータ $A \times (\text{交点より右にあるイベント数}) / (\text{全イベント数})$	実験データ $(\text{交点より右にあるイベント数}) / \text{計測時間}$
Kr	$A \times 3800 \pm 1900[\text{events}] / 10000000[\text{events}]$	$600 \pm 400[\text{events}] / 2000[\text{s}]$
Xe	$A \times 700 \pm 500[\text{events}] / 10000000[\text{events}]$	$800 \pm 500[\text{events}] / 2000[\text{s}]$

図 6.11: 交点以上におけるイベント発生率

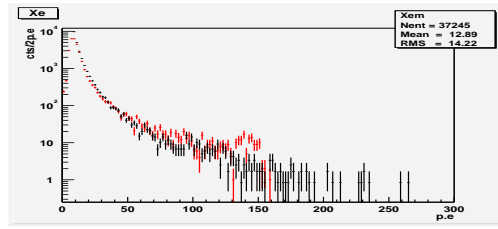
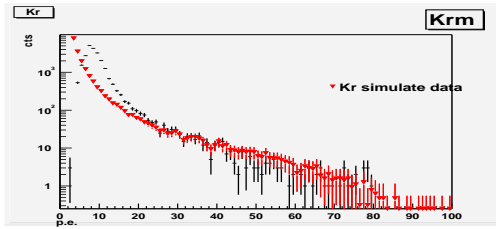


図 6.12: pmt スペクトル (実験 Kr 黒 シミュレーション 赤△)      図 6.13: pmt スペクトル (実験 Xe 赤 シミュレーション 黒)

## 第7章 結果とまとめ

### 7.1 希ガスのシンチレーション効率

本実験により図 6.10 で表される希ガスの 1MeV あたりのシンチレーション光子数が見積もることができた。またこの値は文献値とも矛盾していない。

**$\mu$ -TPC 中性子検出器 trigger への応用**  $^3\text{He}$  と中性子の衝突によって生じるプロトン、トリトンが、本実験で観測した  $\alpha$  線と同程度のシンチレーション効率をもつと仮定すると、この反応における Q 値は 0.764MeV であるので Kr 中では  $300 \pm 100[\text{photons}]$ 、Xe 中では  $\pm 850[\text{photons}]$  のシンチレーション光が期待できる。PMT により確実に光子を検出するためには 10 個以上の光子が光電面に入射しないとイケないとする、Kr ならば 5%、Xe ならば 2% の立体角を確保すればよい。

### 7.2 マントル中のトリウム含有量

6.3 節において容器中における  $\alpha$  粒子発生頻度を見積もったがこれは希ガスの種類によらないはずなので、 $\alpha$  線発生頻度は二つの希ガスに対する見積もりの重なっている部分とできる。よって 300Hz から 1500Hz と見積もられる。

シミュレーションの結果よりマントルの表面から厚さ  $80 \mu\text{m}$  の範囲のトリウムから放出された  $\alpha$  線のうち 88% はマントル内部で停止し、外部にとびだすのは 12% である。マントル全体の厚さは  $300 \mu\text{m}$  であり一つのトリウム崩壊に対し 6 個の  $\alpha$  粒子が生じるので  $4700 \pm 3100$  個/s のトリウムが崩壊している。トリウムの半減期は  $4.4 \times 10^{17}[\text{s}] (1.4 \times 10^{10}[\text{year}])$  なので、マントルに含まれるトリウム原子核数は

$$(4700 \pm 3100) \times 4.4 \times 10^{17} / \ln 2 = (3.0 \pm 2.0) \times 10^{21} [\text{個}]$$

となる。トリウムの原子量は 232 なので質量に換算すると  $(1.2 \pm 0.8)[\text{g}]$  となる。本実験では 1.3g のマントルを 2 枚使用したので質量比にして  $(46 \pm 31)\%$  のトリウムがマントルに含まれていることになる。

#### 7.2.1 まとめ

本実験ではガスランタン用マントル中に含まれるトリウムからの  $\alpha$  線による希ガスシンチレーション光を観測した。PMT の光電面が小さく集光率が非常に悪かったために精確

な定量評価は得られなかったが、中性子 TPC の self trigger として利用できる十分な発光量は確認できた。またマントル中のトリウム含有量は 10 % 以上という結果になった。



## 第8章 プログラムソース

### 8.1 VME

```
/* subv792.c */
/*v792_2ko.c*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <sys/times.h>
#include <time.h>

#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <sys/mman.h>
#include <unistd.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/param.h>
#include <sys/ioctl.h>
#include "vmedrv.h"

#include "v792.h"
#include "checktime.h"

#define BUFFER_BASE 0xf00000
#define CONTROL_BASE 0xf01000
#define TH_LEVEL 0x0

#define LOOP 1
#define MAXTIME 1000

#define READCH1 23
#define READCH2 28
size_t mapsize;
char *ctrl_base;
char *buf_base;

int v792(FILE *fpw)
{
    int vmedev[2];
    int rc;
    long vmeaddr;
    int *ptr;
    short *sptr;
    int i,j,k;
    int data[256];

    double lap;
    time_t nowtime,stime;
```

```

int cl;

short sdata;
int words;
int pos;
short type;
int offset;
int temp;
int adc,ov,un,ch,crate,cnt,ec,expectedch;
int adcstore[32];

/*START TIME CHECK*/
checktime(0);

/*MAP*/
if((vmedev[0] = open("/dev/vmedrv24d16", O_RDWR)) == -1){
    perror ("open: /dev/vmedrv24d16");
    return 1;
}
if((vmedev[1] = open("/dev/vmedrv24d32", O_RDWR)) == -1){
    perror ("open: /dev/vmedrv24d32");
    return 1;
}

mapsize = getpagesize();
vmeaddr = (CONTROL_BASE/mapsize)*mapsize;
offset = CONTROL_BASE%mapsize;

ctrl_base = mmap(0, mapsize, PROT_READ|PROT_WRITE,MAP_SHARED,
    vmedev[0],vmeaddr);

ctrl_base += offset;

if (MAP_FAILED == ctrl_base){
    perror("mmap");
return 1;
}

vmeaddr = (BUFFER_BASE / mapsize)*mapsize;
offset = BUFFER_BASE % mapsize;
buf_base = mmap(0, mapsize, PROT_READ|PROT_WRITE,MAP_SHARED,
    vmedev[1],vmeaddr);
buf_base += offset;
if (MAP_FAILED == buf_base){
    perror("mmap");
return 1;
}

/*Setup */

sptr = (short *) (ctrl_base + QDC_SS_RESET);
*sptr = 0xffff;

/* soft reset */

```

```

sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_SET_ONE); /*QDC_SET_ONE=0x6 Bitset1register*/
*sptr = SOFT_RESET; /*SOFT_RESET is 0x80 */

sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_CLEAR_ONE); /*QDC_CLEAR_ONE=0x8 BitClear1register*/
*sptr = 0xffff;

/* All channel enabled.
Th-level is setted at TH_LEVEL. */

/*pedestal*/
sptr=(short *)(ctrl_base + 0x60);
/* printf("%x\n",*sptr);*/
*sptr=255;

for(i=0;i<32;i++){
sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_TH + i * sizeof(short));
*sptr = TH_LEVEL + CH_EN;
}

/* on ctrl register 1 */

sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_CTRL_ONE);
/** *sptr = 0x0000; **/ /* ref. section 4.14 */
*sptr = 0x0000;

/* on Fast Clear Window register */

sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_FCLR);
*sptr = 0x0000; /* ref. section 4.25 */

/* on Bit Set 2 register */

sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_SET_TWO);

*sptr = AUTO_INCR + EMPTY_PROG + ALL_TRIG;
*sptr = AUTO_INCR + EMPTY_PROG + SLIDE_ENABLE + ALL_TRIG;
*sptr = 0x4880;

/* on Crate Select Register */

sptr = (short *)(ctrl_base + QDC_CRATE);
*sptr = 0x1;

/* OUTPUT header currentCH+10000 */
fprintf(fpw,"%6d",10000+READCH1);
fprintf(fpw,"%6d\n",10000+READCH2);

cl=1;
stime=time(NULL);
while(cl==1){
i++;

nowtime=time(NULL);
if (nowtime-stime>MAXTIME)cl=0;

```

```

    sptr = (short *) (ctrl_base + QDC_STATUS_ONE);

    do{
sdata = *sptr;
    }while((sdata &0x1) == 0);

    /* dump of MEB */

    pos = 0;

    do{
    ptr = (int *) (buf_base);
    data[pos] = *ptr;

    type = ((data[pos] >> 24) & 0x7);
    pos++;
    }while(type != EOB);

    for(k=0;k<32;k++)adcstore[k]=0;

    /*sort */
    for(k=0;k<32;k++){
        type= (data[k] >>24) & 0x7;
        if(type ==2){
j=0;
        }

        if(type == 0x0){

temp=data[k];
adc =(temp & 0xfff);
ch =((temp >>16) &0x3f);
un =((temp >>13) &0x1);
ov =((temp >>12) &0x1);

if(j%2==0)expectedch=(j)/2;
else expectedch=(j)/2+16;

while(expectedch != ch){
    j++;
    if(j%2 == 0) expectedch=(j)/2;
    else expectedch=(j)/2+16;
}
if(ov==0) adcstore[expectedch] = adc;
else adcstore[expectedch] = 4096;
        }
    }

    /* for(j=0;j<32;j++){
        if(adcstore[j] != -1)printf("%4d ",adcstore[j]);
    else printf("0 ");
    } */

    /* OUTPUT7ch15ch */
    fprintf(fpw,"%4d ",adcstore[READCH1-1]);
    fprintf(fpw,"%4d",adcstore[READCH2-1]);

```

```

    fprintf(fpw, "\n");
    /*CHECK EVENT TIME*/
    checktime(i+1);
}

/* Clear */

sptr = (short *) (ctrl_base + QDC_CLEAR_TWO);
*sptr = SET2_CLEAR;

return 0;
}

```

## 8.2 立体角

```

main(){
    struct point np; /*発光点*/

    struct discus d1,d2; /*pmt 円盤*/
    struct angle a1,a2; /*角度*/
    double i;
    double th,r;

    /*初期設定*/
    d1.o.x=0;
    d1.o.y=0;
    d1.o.z=0;
    d1.r=0.4;

    for(np.z=0;np.z<=H;np.z+=SSTEP){
        for(r=0;r<=R;r+=SSTEP){

            np.x=r;
            np.y=0;

            a1.the=0;
            a1.phi=0;
            i=0;
            for(a1.the=0;a1.the<(PI/2);a1.the+=ASTEP){
for (a1.phi=0;a1.phi<2*PI;a1.phi+=(ASTEP/sin(a1.the))){
                if(dincheck(&d1,&a1,&np)==1){
                    /**printf("%lf %lf\n", a1.the, a1.phi);**/
                    i+=ASTEP*ASTEP;
                }
            }
        }
        printf ("%lf %lf %f\n", np.x, np.z, i);
    }
}
}
}
}
}

```

## 8.3 ある特定のエネルギーの $\alpha$ 線に対するシミュレート

```

#include <stdio.h>
#include<math.h>

```

```

#include<time.h>
#include<stdlib.h>

#define PI 3.14159

#define R 4 /*円柱の半径*/
#define H 6 /*円柱の高さ*/
#define PR 0.4 /*PMT 半径*/

#define D 0.01/*円柱表面 MESH*/
#define LOOP 1000
#define V 0.01/*空間増分*/
#define MV 1e-4 /*マントル中の空間増分*/
#define SKIN 80 /*マントル表面部の定義厚さ(マイクロメートル)*/

#define E_DATAMAX 200 /*エネルギー損失データをいれる配列のMAX*/
#define S_DATAMAX 600 /*立体角データをいれる配列のMAX*/

#define EMAX 9 /*エネルギー損失が計算できるMAX*/

/*変数定義*/
struct point {
/*三次元ベクトル構造体の定義*/
    double x;
    double y;
    double z;
};

struct sr{
/*立体角のセット*/
    double w1;/*sr for PMT1*/
    double w2;/*sr for PMT2*/
};

struct angle{
/*極座標での角度成分*/
    double the;
    double pi;
};

struct eloss{
/*エネルギー損失 ブラック曲線データ格納スペース*/
    double s[E_DATAMAX];
    double loss[E_DATAMAX];
};

struct sdata{
/*立体角データ格納スペース*/
    double p[S_DATAMAX][S_DATAMAX];
};

/* $\alpha$ 線が走り出す円柱表面上の点を指定する関数 makstart*/
makestart(struct point *psp,struct point *pv,struct angle *ang){
    double st; /*方位角*/
    int i=0;
/*標準入力より入力*/
    while(i==0){
        printf("\nset start points\nz=");

```

```

    if (scanf("%lf",&(psp->z))==EOF)i=0;
    if ((psp->z) <= H/2 && (psp->z) >=0)i=1;
};

while(i==1){
    printf("\nphi=");
    scanf("%lf",&(st));
    if (st<2*PI && st >=0)i=2;
};

psp->x=R*cos(st);
psp->y=R*sin(st);

while(i==2){
    printf("\nset start direction \nthe=");
    scanf("%lf",&(ang->the));
    if (ang->the <=PI && ang->the >=0)i=3;
};
while(i==3){
    printf("\nphi=");
    scanf("%lf",&(ang->pi));
    if (ang->pi <=2*PI && ang->pi >=0)i=4;
};

pv->x=V*cos(ang->pi)*sin(ang->the);
pv->y=V*sin(ang->pi)*sin(ang->the);
pv->z=V*cos(ang->the);

/** fprintf(ff,"%lf %lf %lf %lf %lf\n",psp->x,psp->y,psp->z,ang->the,ang->pi);**/
/** fclose(ff);**/
return;
}

/* checkin_outside 与えられた点が円柱内にあるなら 1*/
int checkin_outside(struct point *pnp){

    if(pow(pnp->x,2)+pow(pnp->y,2)<pow(R,2) && pnp->z<H && pnp->z > 0)return 1;
    else return 0;
}

/*点 pnp をベクトル pv にそって移動*/
int run(struct point *pnp,struct point *pv){
    pnp->x+=pv->x;
    pnp->y+=pv->y;
    pnp->z+=pv->z;
    return checkin_outside(pnp);
}

/*立体角を計算*/
str(struct point *pnp,struct sr *pnsr,struct sdata *data){
    int i=0,j=0;
    int rr1,rr2,z;
double r1,r2;
double a,b,c;

r1=sqrt((pnp->x-PR)*(pnp->x-PR)+pnp->y*pnp->y);
r2=sqrt((pnp->x+PR)*(pnp->x+PR)+pnp->y*pnp->y);

```

```

rr1=(int)(r1*100+0.5);
rr2=(int)(r2*100+0.5);
z=(int)(pnp->z*100+0.5);

pnsr->w1=data->p[rr1][z];
pnsr->w2=data->p[rr2][z];
}

/*エネルギー損失計算用設定*/
setloss_va(double se,double *offset,struct eloss *m){
double e=EMAX,de;
for(*offset=0;e>se;(*offset)+=V){
if(energyloss(*offset,&de,m)==-1)e=0;
e-=de*V;

}
}

/*gas エネルギー損失を計算。ブラックカーブを読み出す*/
energyloss(double s,double *de,struct eloss *m){
int i=1;
while(m->s[i]<s)i++;
if (m->s[i]-s > s-m->s[i-1])*de=m->loss[i-1];
else *de=m->loss[i];
if (*de==0) return -1;
return;
}

main(int argc,char *argv[]){
int i,cts=0;/*LOOP conter,flush check,decay counter*/
struct point np,v;/*α の位置ベクトルと,速度ベクトル*/
struct sr nsr;/*立体角*/
struct eloss mdata,gdata;/*ブラックカーブ*/
struct sdata srdata; /*立体角データ*/

struct angle nang; /*走る方向*/
double energy;/*粒子エネルギー*/
double de;/*エネルギー損失*/
double gain1,gain2;/*PMT がみえる全エネルギー損失*/
double j,vj;/*走った距離,virtual*/

FILE *fp; /**/
int loop;
double Ene=8;/*飛び出すエネルギー*/

loop=argc-1;
srand((unsigned)time(NULL));
readmdata(&mdata);
readgdata(&gdata);
readsdata(&srdata);
printf("readdata\n");
i=0;
while(cts<loop){
if((fp=fopen(argv[cts+1],"w"))!=NULL)printf("file:%s open!!\n",argv[cts+1]);
makestart(&np,&v,&nang); /*start position*/
cts++; /*all counter*/
}
}

```



```

energy=Ene; /*start energy*/
setloss_va(energy,&vj,&gdata); /*set brag data*/
j=vj;gain1=0;gain2=0; /*set default*/

/*running*/
while(run(&np,&v)==1 && energy>0){
    j+=V;
    str(&np,&nsr,&srdata);
    if(energyloss(j,&de,&gdata)==-1){energy=0;}
    energy-=de*V;

    gain1+=nsr.w1*de*V/4/PI;
    gain2+=nsr.w2*de*V/4/PI;
    fprintf(fp,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",np.x,np.y,np.z,j-vj,de,energy,nsr.w1,nsr.w2);
}

if(j>vj){/*ガス中を走った時のみ出力,LOOPをカウント*/
    i++;
    printf("%lf %lf\n",gain1,gain2);

}
else printf("noflash\n");
fclose(fp);
}

fp=fopen("logarun.dat","a");
fprintf(fp,"LOOP=%d decay=%d \n",LOOP,cts);
fclose(fp);
}

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define E_DATAMAX 200
#define S_DATAMAX 600
struct eloss{
    double s[E_DATAMAX];
    double loss[E_DATAMAX];
};
struct sdata{
    double p[S_DATAMAX][S_DATAMAX];
};
readmdata(struct eloss *m){
    int i=0;
    double a,b,c;
    FILE *fp;

    fp=fopen("mantle.txt","r");
    while(fscanf(fp,"%lf %lf %lf\n",&a,&b,&c)!=EOF){
        m->s[i]=a*1e-8;
        m->loss[i]=b*100;
        i++;
    }

    fclose(fp);
    return ;
}

readgdata(struct eloss *g){

```

```

int i=0;
double a,b,c;
FILE *fp;

fp=fopen("Kr.txt","r");
while(fscanf(fp,"%lf %lf %lf\n",&a,&b,&c)!=EOF){
    g->s[i]=a*1e-8;
    g->loss[i]=b*100;
    i++;
}
fclose(fp);
return ;
}

readsdata(struct sdata *x){
    FILE *fp;
    double a,b,c;
    int i,j;
    fp=fopen ("str.txt","r");
    for(j=0;j<600;j++)for(i=0;i<400;i++)if(fscanf(fp,"%lf %lf"%lf\n",&a,&b,&c)!=EOF){
        x->p[i][j]=c;
    }
    fclose(fp);
    j=0;
    return;
}

```

## 8.4 マントル内部での $\alpha$ 粒子の動き

```

main(){
    int i;
    double depth,j,vj;/**/
    double se,energy,de;/**/
    double pi,the,dv;/**/
    FILE *fp;
    struct eloss mdata; /**/
    readmdata(&mdata);/*マントルの BragCurve データを読み込む*/

    fp=fopen("test.dat","w");
    srand((unsigned)time(NULL));

    for(i=0;i<LOOP;i++){
        /*スタートの深さランダム*/
        depth=(rand()%SKIN)*(1e-4); /*表面厚さ SKIN  $\mu$  m*/
        /*飛び出す方向ランダム*/
        pi=2*PI*(rand()%360)/360;
        the=2*PI*(rand()%180)/360;
        dv=MV*cos(the); /*深さ方向の変化*/

        /*飛び出すエネルギー*/
        switch(rand()%6){
            case 0:
                if((rand()%100)<64){
                    se=8.785;

```

```

break;
    }
    else se=6.051;break;
case 1:se=6.779;break;
case 2:se=6.288;break;
case 3:se=5.685;break;
case 4:se=5.423;break;
case 5:se=4.012; break;
}
fprintf(fp, " %f %f %f\n",depth,pi,the);/*ランダムチェック用*/

energy=se;

setloss_va2(energy,&vj,&mdata); /*Brag 曲線にスタート点を打つ*/

j=vj;
while(energy>0.001 && depth>0){
/*エネルギー損失*/
if(energyloss(j,&de,&mdata)==-1)energy= 0;

/*エネルギー減少*/
energy-=de*MV;
/*前進*/
j+=MV;
depth-=dv;
/*printf("%f %f %f\n",energy,de,depth);*/
}
printf("%f\n",energy);
}
fclose(fp);
}

```

## 8.5 random simulate

```

main(){
int i,cts=0;/*LOOP conter,flush check,decay counter*/
struct point np,v;/* $\alpha$  の位置ベクトルと, 速度ベクトル*/
struct sr nsr;/*立体角*/
struct eloss mdata,gdata;
struct sdata srdata;

struct angle nang; /*走る方向*/
double energy;/*粒子エネルギー*/
double de;/*エネルギー損失*/
double gain1,gain2;/*PMT がみえる全エネルギー損失*/
double j,vj;/*走った距離,virtual*/

FILE *fp;
srand((unsigned)time(NULL));

readmdata(&mdata); /*マントル中 Brag curve data*/
readgdata(&gdata);/*Kr 中 Brag curve data*/
readsdata(&srdata);/*Xe 中 Brag curve data*/

i=0;
while(i<LOOP){

```

```

makestart(&np,&v,& nang); /*start position*/
cts++; /*all counter*/

energy=runmantle(&np,& nang,& mdata); /*energy of alpha from mantle*/
setloss_va(energy,&vj,&gdata); /*set brag data*/
j=vj;gain1=0;gain2=0; /*set default*/

/*running*/
while(run(&np,&v)==1 && energy>0){
    j+=V;
    str(&np,&nsr,&srdata);
    if(energyloss(j,&de,&gdata)==-1){energy=0;}
    energy-=de*V;
    gain1+=nsr.w1*de*V/4/PI;
    gain2+=nsr.w2*de*V/4/PI;
}

if(j>vj){/*ガス中を走った時のみ出力,LOOPをカウント*/
    i++;
    printf("%lf %lf\n",gain1,gain2);
}

}

fp=fopen("logarun.dat","a+");
fprintf(fp,"LOOP=%d decay=%d \n",LOOP,cts);
fclose(fp);
}

```

## 第9章 謝辞

身内さんは本実験で使用した装置の使用法、様々な実験結果の考察、実験に対する姿勢等、実験のほぼ全てに渡って親切に指導して下さいました。本当にありがとうございました。松本さん、身内さん、TAの西田さんはゼミを通じて本当にお世話になりました。ゼミでやったことが実験をする上で非常に役に立ちました。穴田君、西村君をはじめP6のみなさんと共に相談しあい、お互いに高め合えたことはかけがえのない貴重な時間であったと思います。どうもありがとう。そして研究室の皆様には宇宙線研究室の機具や装置を使用させていただいて、感謝しております。我々の実験を支えてくださった皆様方に心より感謝いたします。

湯浅 翠

10月から実験を始めてからはや5ヵ月。最終的に綺麗な結果はでなかったけれども、この間に勉強できたことは非常にたくさんあります。その大半は身内さんの影響下にあったことは絶対に否定できません。実験の方向性から方法、まとめ方まで懇切丁寧なご指導ありがとうございました。また、西田さんを筆頭に宇宙線研究室の方々にはときにはP6部屋まで足をはこんでいただいた上でのご指導から、発表会におけるきびしいツッコミまで本当に勉強になりました。ありがとうございます。最後に共に実験をした穴田君と湯浅さんなしではこの実験は語れないでしょう。ありがとうございました。本当に最後になりましたが、X組の御三方、楽しいP6部屋をありがとうございました。

西村 広展

最初は本当に何もわからない状態で実験を始めましたが、担当教官の身内さんは、私的の外れな質問も真剣に聞いて下さり、正しい方向へと導いて下さいました。共同実験者の西村君、湯浅さんとは様々なことを議論し合い、高め合うことができ、貴重な体験になりました。また、もう一方のグループのメンバーとも実験の状況などを話し合う機会があり、刺激をうけあいながら実験を進めることができました。宇宙線研究室の皆様は、私たちの実験をサポートして下さいました。皆様に心からの感謝を申し上げます。

穴田 貴康

## 関連図書

- [1] W.R.Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1994.
- [2] F.A.F.Fraga, et al., *Study of Scintillation Light from Microstructure Based Detectors*, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.47, No.3, 2000.
- [3] J.B.Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, Pergamon Press, 1964
- [4] 日本アイソトープ協会編, *アイソトープ手帳* 10 版, 丸善株式会社, 2002.