

# 修士論文

## ANKOK 実験における背景事象の理解と分離能力 の評価

平成 26 年 1 月 27 日

早稲田大学先進理工学研究科物理及応用物理学専攻寄田研  
究室修士 2 年  
学籍番号 5312A075-5

橋場裕之介

## 概要

近年の様々な宇宙観測により、我々の宇宙の約 23 %は重力相互作用をする暗黒物質 (Dark Matter) で構成されることが示唆されている。特に素粒子論的の立場では、Weakly Interacting Massive Particle(WIMP) が暗黒物質の最有力候補であると考えられている。この粒子は未だ未発見であり、暗黒物質の正体を突き止めることは現代の物理学の大きな課題である。WIMP の直接探索は様々な検出原理、標的物質を用いた実験が世界各国で行われており、複数の実験では WIMP の質量  $10\text{GeV}/c^2$  の領域 (低質量領域) で存在を示唆する実験結果を出している一方で、Xenon100 や LUX といったキセノンを用いた実験によって同じ領域が棄却されている。このように発見と棄却が混在する状況において、異核種を標的に用いた実験によって相互検証をすることが非常に重要である。

早稲田大学寄田研究室では、この低質量領域の暗黒物質探索を目的とし、気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器と呼ばれる検出器を用いた暗黒物質探索実験 (ANKOK 実験) を遂行している。この検出器は標的物質としてアルゴンを用いており、検出器下部の液相と上部の気相で構成されている。WIMP が検出器の液相へ入射すると、WIMP とアルゴン原子核が相互作用をし、その際に一次シンチレーション光 (S1) と電離電子が発生する。この電離電子が検出器内部にかけられた電場によって検出器上部へドリフトし、気相に取り出された際に気相のアルゴン原子核と反応することで二次シンチレーション光 (S2) が発生する。こうして発生した二種類の光を検出し、S1 の早い成分 (fast component) と遅い成分 (slow component) の光量比と、S1/S2 比が、WIMP による原子核反跳事象と  $e^-$  による電子反跳事象とで異なるという性質を利用することで、WIMP とその背景事象 ( $e^-$ ) を高い精度で分離することが可能である。

主な背景事象としては検出器部材やアルゴンの放射性同位体  $^{39}\text{Ar}$  が発する  $e^-$  や、環境中性子による弾性散乱が挙げられる。前者は前述した分離方法によって除去可能であるが、環境中性子による弾性散乱事象は WIMP 事象と区別することが難しい。そこで、環境中性子束の少ない地下施設といった実験環境での実験を行うことや、水やポリエチレンを用いたシールドングによって中性子の遮蔽を行うことが必要となる。

本研究では、まず 1 相型のプロトタイプ検出器を用いて、S1 の波形分別による背景事象分離能力の評価を行った。電子反跳事象のサンプルとして  $^{57}\text{Co}$ 、原子核反跳事象のサンプルとして  $^{252}\text{Cf}$  のデータを取得し、波形分別のパラメータとして slow/total を用いることで、2 成分が分離できていることを確認した。さらに slow/total 分布を、単純な二項分布と統計的ゆらぎにより理解できることを示し、シミュレーションによってそれぞれの事象の典型的な slow/total 分布を再現することができた。この結果を用いて分離能力の評価を行い、signal efficiency 90 %を要求した場合、80KeV/nr の反跳エネルギーに対して  $10^6$  以上の分離能力を持つと評価することが出来た。次に中性子による背景事象の理解と、中性子束が物理感度に与える影響を見積もるために、まずは液体シ

ンチレータを用いた地上（早稲田大学 51 号館 8 階）での中性子束の測定を行った。結果として 2.5MeV 25MeV のエネルギー領域における環境中性子束として  $8 \times 10^{-4}/\text{cm}^2/\text{s}$  という結果を得た。

今回の実験では電場無しの S1 の波形分別を用いた分離能力の評価を行ったが、今後は S1 の電場依存性や S1/S2 比まで含めた最終的な背景事象分離能力の評価を行うことや、今回測定された環境中性子束が物理感度へ与える影響の見積もりを行うことが必要である。さらに地下実験へ向けて、地上と同様に、地下でも中性子束の測定と物理感度への影響の見積もりを行い、本実験における物理感度評価を行うことが今後の課題である。

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>8</b>
1.1	暗黒物質の証拠	8
1.2	暗黒物質の候補	8
1.3	暗黒物質の直接探索	8
<b>2</b>	<b>ANKOK 実験</b>	<b>8</b>
2.1	気液二相型アルゴン光 TPC 検出器	8
2.1.1	アルゴンの性質	9
2.1.2	検出原理	10
2.2	検出器の開発項目	15
2.2.1	光量の向上	20
2.2.2	背景事象分離能力の向上	23
2.3	背景事象	23
2.3.1	e/ との相互作用	23
2.3.2	中性子との相互作用	23
2.3.3	線との相互作用	23
<b>3</b>	<b>背景事象分離能力の評価</b>	<b>23</b>
3.1	1相型プロトタイプ検出器	23
3.2	プロトタイプ検出器を用いたテスト実験	24
3.2.1	実験概要	24
3.2.2	中性子サンプルの取得	24
3.3	分離能力の評価	24
<b>4</b>	<b>中性子束測定実験</b>	<b>26</b>
4.1	中性子の種類	26
4.2	液体シンチレータ	27
4.2.1	液体シンチレータの種類	27
4.2.2	検出原理	27
4.3	液体シンチレータ (BC501A) の性能評価	27
4.3.1	光量評価	27
4.3.2	分離能力評価	27
4.4	中性子束の測定	31
4.4.1	実験セットアップ	31
4.4.2	解析方法	31
4.4.3	結果	35

5	纏めと展望	35
6	謝辞	35
7	参考文献	35

## 目 次

2.1	気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器の概念図 . . . . .	11
2.2	電子反跳と原子核反跳のそれぞれの場合の S1 波形 . . . . .	12
2.3	アルゴン蛍光の発光機構 . . . . .	14
2.4	S1/S2 比による分離の概念図 . . . . .	15
2.5	電離電子の寿命の液体アルゴン純度依存性 . . . . .	16
2.6	電場中の電離電子のドリフト速度 . . . . .	17
2.7	自作の液体フィルター . . . . .	18
2.8	マイクロトール MC1500(SAES 社製) . . . . .	19
2.9	実験系の模式図 . . . . .	21
2.10	冷凍機ヘッド、ヒートシンク、カプトンヒーターの構成 . . . . .	22
2.11	TPB が真空蒸着された反射材 . . . . .	23
2.12	TPB が真空蒸着された光電子増倍管 . . . . .	24
3.1	$^{57}\text{Co}$ による $e^-$ 事象サンプル . . . . .	25
3.2	$^{252}\text{Cf}$ による中性子事象サンプル . . . . .	25
4.1	$^{57}\text{Co}$ 線源データ取得セットアップ . . . . .	27
4.2	$^{57}\text{Co}$ 線源を用いたエネルギー分布 . . . . .	28
4.3	$e^-$ 事象 (左) と中性子事象 (右) の PSD 分布 . . . . .	28
4.4	$^{57}\text{Co}$ のデータと二項分布 . . . . .	29
4.5	$^{252}\text{Cf}$ のデータと二項分布 . . . . .	30
4.6	環境中性子束測定実験セットアップ . . . . .	31
4.7	total/fast 分布 . . . . .	32
4.8	1 ~ 2MeV で一様なエネルギーの中性子の反跳エネルギー分布 . . . . .	33
4.9	水素-中性子弾性散乱における陽子の散乱角分布 . . . . .	33
4.10	水素-中性子における弾性散乱断面積 . . . . .	34
4.11	A/E 分布と expacs 分布から計算した反応レート . . . . .	34

## 表 目 次

2.1	Ar、Xe、Krの諸特性 . . . . .	10
2.2	モニタリング項目 . . . . .	21
3.1	$^{57}\text{Co}$ のイベントセレクション . . . . .	25
3.2	$^{252}\text{Cf}$ のイベントセレクション . . . . .	25

# 1 序論

我々の宇宙のエネルギー密度において、目に見える物質が占める割合はわずか5%に過ぎず、残りの95%は正体不明のエネルギーで構成されているということが、近年の研究により示唆されている。その中でも全体のおよそ24%は正体不明の物質であり、これは暗黒物質 (Dark Matter) と呼ばれる物質で、残りは暗黒エネルギー (Dark Energy) と呼ばれている。暗黒物質には様々な候補が考えられているが、その中には標準理論では説明できない未知の粒子も含まれており、暗黒物質の正体を突き止めることは現在の物理学の大きな課題の1つである。現在世界中で暗黒物質探索実験が行われており、日々新たな結果が出てきている。

本章では暗黒物質の証拠やいくつかの候補、また現在の暗黒物質の直接探索の現状について説明する。

## 1.1 暗黒物質の証拠

テスト

## 1.2 暗黒物質の候補

## 1.3 暗黒物質の直接探索

# 2 ANKOK 実験

ANKOK 実験とは早稲田大学寄田研究室が行っている、気液二相型アルゴン光 TPC 検出器を用いた暗黒物質の直接探索実験の名称である。2011 年度までは気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器の基礎開発を行い、2012 年度から暗黒物質の直接探索のための実験として ANKOK 実験を立ち上げ、研究を遂行している。本実験の目的は、複数の実験で暗黒物質の存在が示唆される質量領域 (低質量領域) の探索にある。低質量の WIMP と標的の相互作用では、発生するシンチレーション光は非常に小さいため、検出器の高感度化が重要な鍵となる。

本章では、気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器の検出原理や検出器の開発項目、また主な背景事象である 線や中性子、また 線とアルゴンの相互作用について述べる。

## 2.1 気液二相型アルゴン光 TPC 検出器

ANKOK 実験では気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器による暗黒物質探索を行っている。TPC (Time Projection Chamber) とは入射粒子が検出器内を通過した際に発す

る信号を捕らえ、その飛跡を3次元で再構成することのできる検出器である。本節では我々が標的に用いているアルゴンの性質や、検出器の検出原理について説明する。

### 2.1.1 アルゴンの性質

暗黒物質の直接探索実験に置いては、様々な媒質が標的として用いられる。NaI やゲルマニウムなどの固体や、 $CF_4$  といった気体標的、また現在最も高感度の制限を掛けている実験では液体 Xe が用いられている。ここでは我々が標的に用いるアルゴンの性質や、暗黒物質探索を行う上での特長について述べる。

一般的に希ガス元素が暗黒物質に用いられる理由として以下の項目が挙げられる。

1. 原子番号が大きい
2. シンチレーション光、電離電子の検出が可能
3. 発光量が大きい (W 値が小さい)

#### ・原子番号が大きい

第1章でも述べたが、WIMP と標的原子との相互作用にはスピンの依存する SD 相互作用とスピンに依存しない SI 相互作用の2種類がある。SI 相互作用において、その断面積は

$$\sigma_A^{SI} \propto A^2 \quad (2.1)$$

と表されるため、原子番号の大きい原子では反応断面積が大きくなる。

#### ・シンチレーション光、電離電子の検出が可能

液体アルゴンは入射粒子との相互作用により、原子が励起されることで発するシンチレーション光と軌道電子の電離により生じる電離電子が発生する。詳細は次項で述べるが、この2種類の信号を検出することで、反応点の3次元的位置の情報を得ることや、背景事象の分離が可能となっている。

#### ・発光量が大きい

一般的に高い発光量を持つとされる NaI シンチレータの発光量 (40000photon/MeV) と同程度である。高発光量の標的を用いることで探索感度の向上する (エネルギー閾値を下げる) ことが可能となる。実際には液体希ガス中に含まれる不純物 ( $O_2$ ,  $N_2$ ) によるクエンチングなどにより光量は減少する。

他の希ガス元素と液体アルゴンの性質とを比較したのが以下の表である。

Ar と Xe とを比較すると、Ar の方が原子番号、密度が小さく、W 値も電離、励起ともに大きいため、WIMP との反応の頻度と光量については Xe の方が有利であると言える。しかし、fast、slow の時定数では Ar では 6.5ns と 1600ns、Xe では 2.0ns と 10.65ns

	Ar	Kr	Xe
Atomic Number Z	18	36	54
Atomic Weight A	39.95	83.8	131.3
Density( $g/cm^3$ )	1.39	3.45	3.06
Melting Point(K)	83.8	115.8	161.4
Boiling Point(K)	87.3	119.8	165.1
Drift Velocity(mm/ $\mu$ sec)@1(5)kV/cm	1.8(3.0)	2.4(4.0)	2.2(2.7)
Mobility(cm/V/s)	0.107	0.057	0.041
Radiation Length(cm)	14.3	4.76	2.77
dE/dx(MeV/cm)	2.11	3.45	3.89
W-value(eV)(ionization)	23.30	18.6	15.6
W-value(eV)(scintillation)	19.5	15.5	14.7
fast(ns)	6.5	2.0	2.0
slow(ns)	1600	10.7	10.65
Refractive Index @170nm	1.24	1.41	1.60
Dielectric constant	1.51	1.66	1.95

表 2.1: Ar、Xe、Kr の諸特性

とその違いが小さい。詳細は後述するが、つまり波形分別においてはこの時定数の差によって Ar の方が強い波形分離能力を持つ。さらにコスト面においては Ar が空気中に自然に含まれる元素であるため、非常に安価であるのに比べて Xe はそのおよそ 1000 倍ほど高価であり、かつ回収を必要とするため、回収システムが必要となる。そのため Ar では非常に機動性の高い実験が行う事ができる。

### 2.1.2 検出原理

前節で述べたアルゴンの性質を利用して構築される、気液二相型アルゴン光 TPC 検出器の検出原理について説明する。図 2.1 に気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器の概念図を示す。

検出器下部は液体アルゴン、上部は気体アルゴンで満たされていて、液面は検出器に取り付けられたアノードとカソードの間に保たれている。この検出器の上下部分を覆うように光検出器（光電子増倍管）が配置されている。さらに検出器の上から下に向かって  $kV/cm$  程度のドリフト電場が掛けられている。ただし液面付近には取り出し電場と呼ばれる大きな電場が印加されている。

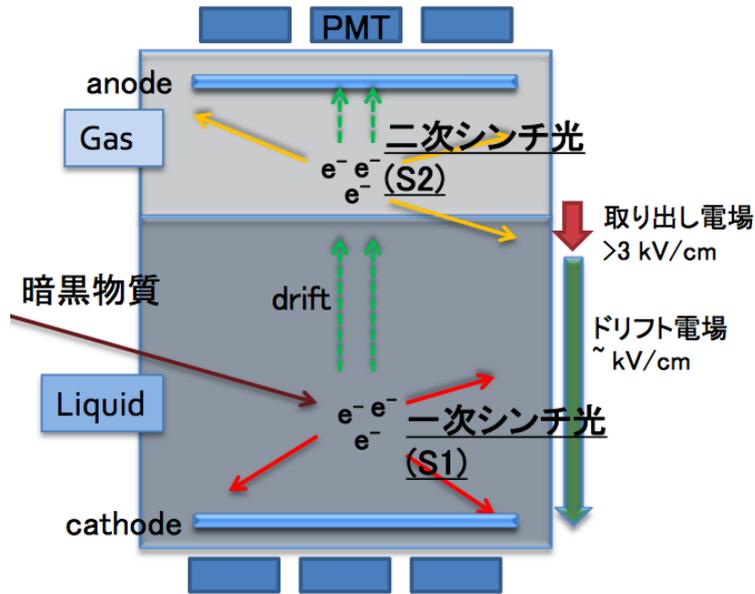


図 2.1: 気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器の概念図

液相に WIMP が入射すると、液体アルゴン原子と原子核反跳をし、反跳されたアルゴン原子核が他のアルゴン原子と相互作用することで、電離電子と一次シンチレーション光 (S1) が発生する。ここで発生した電離電子は検出器内部のドリフト電場によって検出器上部に向かってドリフトし液面付近の取り出し電場によって気相に取り出される。この際に気相のアルゴン原子と相互作用することで二次シンチレーション光 (S2) が発生する。以上の過程で発生した S1、S2 は検出器上下に設置された光電子増倍管で検出される。

この現象は入射粒子が  $e^-$  の場合にも起こる。この場合  $e^-$  がアルゴン原子の軌道電子と電子反跳することで同様に S1、S2 を発生させる。ただしこの場合には、前者のような原子核反跳事象の場合と S1 の波形や S2/S1 比が異なるという性質がある。このような性質を利用して気液二相型アルゴン光 TPC 検出器は暗黒物質と  $e^-$  のような背景事象を分離することができる。

次に、上記の 2 つの背景事象の分別方法について説明する。

**S1 の波形分別 (PSD: Pulse Shape Discrimination)** S1 には早い発光成分 (fast component) と遅い発光成分 (slow component) が存在し、それぞれ表 2.1 に示したように異なった時定数で減衰してゆく。S1 を用いた波形分別の概念図を図 2.2 に示す。図 2.2 から、 $e^-$  による電子反跳と WIMP による原子核反跳では fast 成分と slow 成分の光量比が異なることが分かる。このような光量比の違いは fast 成分と slow 成分の発光機構の違いに起因している。その違いについて説明する。

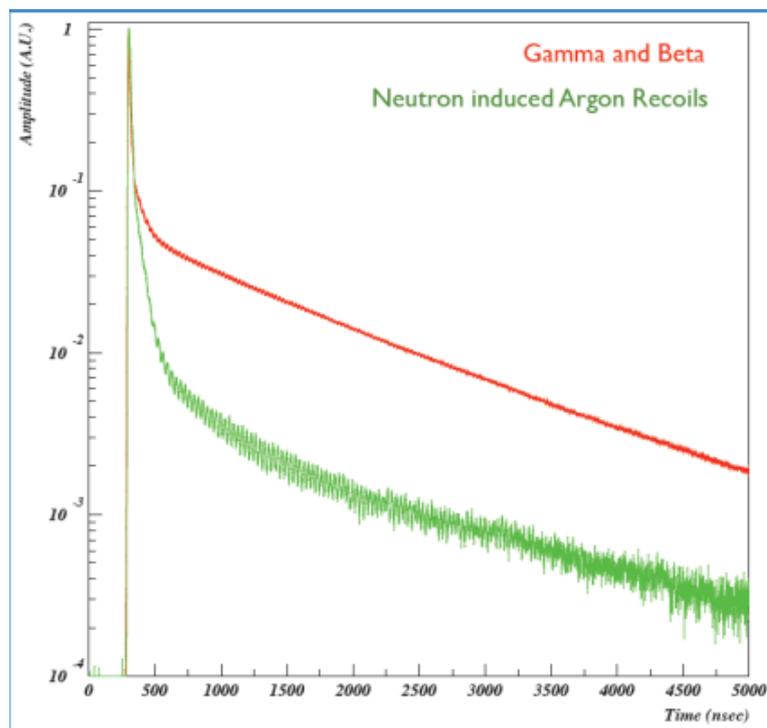
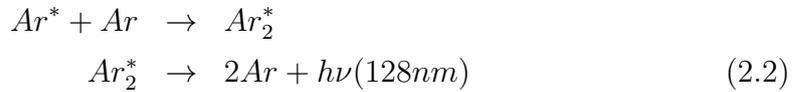


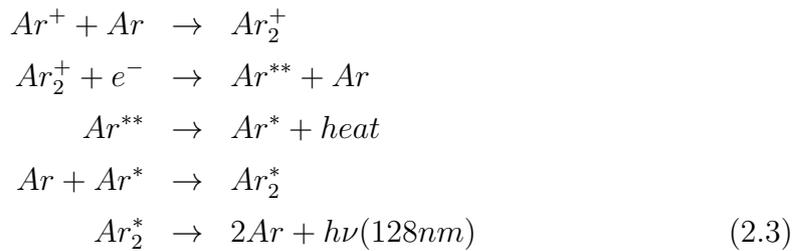
図 2.2: 電子反跳と原子核反跳のそれぞれの場合の S1 波形

まず、アルゴン蛍光の発光機構は大きく分けて励起光と再結合光の2つに分類される。

・励起光の発光機構

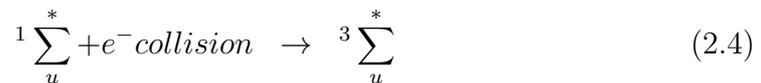


・再結合光の発光機構



さらに、上記のアルゴン分子の励起状態  $Ar_2^*$  には2つの分子励起状態が存在し、それぞれスピンの1重項と3重項に対応していて、スピン1重項  $^1\Sigma_u^*$ 、スピン3重項  $^3\Sigma_u^*$  と表される。それぞれの励起状態の寿命が fast 成分、slow 成分の時定数に対応している。この発光機構をまとめたものが図 2.3 である。

この2種類の分子励起状態、 $^1\Sigma_u^*$  と  $^3\Sigma_u^*$  の分子の数の比によって fast 成分と slow 成分の光量比が決まる。この分子数の比は式 2.4 のように、電子との衝突で励起状態が遷移する過程の頻度により決められる。この頻度は電子の密度に依存する。



$\frac{dE}{dx}$  が大きい場合には  $Ar^+$  と  $e^-$  が再結合することで電子密度が小さくなる、つまり式 2.4 の頻度は  $\frac{dE}{dx}$  が小さい場合に比べて少なくなり、相対的に  $^3\Sigma_u^*$  の割合が減ることで、結果的に fast 成分と slow 成分の比は小さくなる。以上に挙げた機構により、S1 波形を用いた背景事象の分離が可能となる。

S1/S2 比による分離 S2 の光量は S1 と同時に生成される電離電子の数に比例するため、比例蛍光とも呼ばれている。つまり S1 と電離電子数との比が S1/S1 比として検出されることで背景事象の分離を行うことができる。この分離の概念図を図 2.4 に示す。

以上の2つの分離方法を用いて信号と背景事象となる  $e^-$  とを分離する事ができる。後述するが、背景事象には線、中性子も含まれ、これらの事象は上記の2つの分離方法では分離する事が難しい。

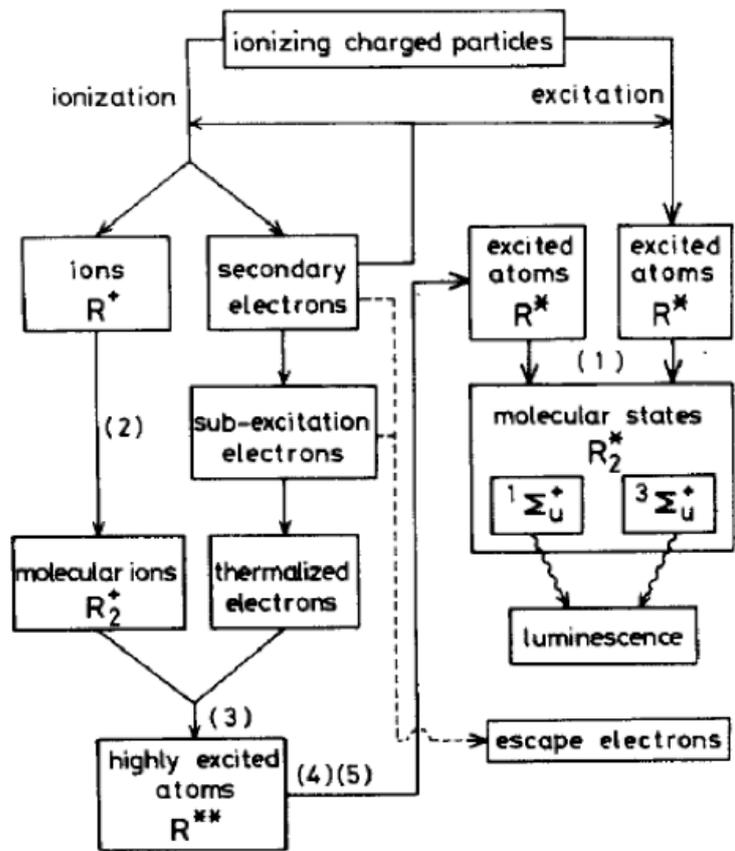


図 2.3: アルゴン蛍光の発光機構

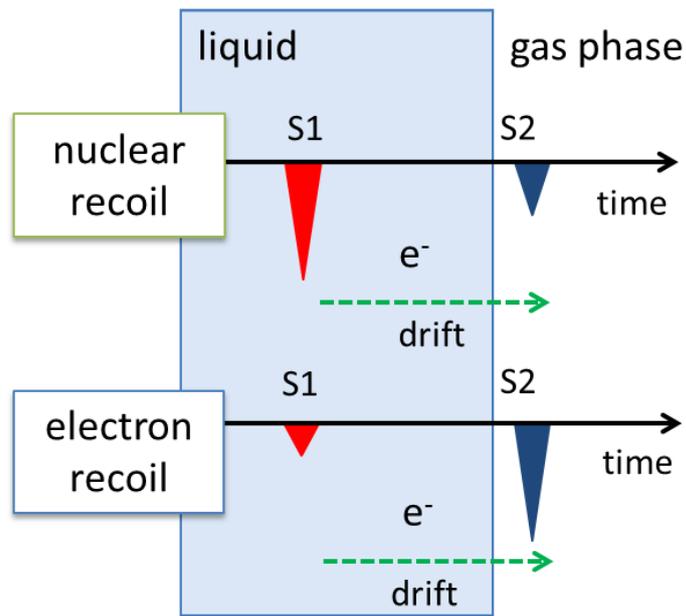


図 2.4: S1/S2 比による分離の概念図

## 2.2 検出器の開発項目

気液二相型アルゴン光 TPC 検出器の開発項目としては以下の項目が挙げられる。

1. アルゴンの高純度化と純度維持
2. 高電圧印加システムの構築
3. 真空紫外光 (128nm) の読み出し
4. 安全管理の確立
5. 光量の向上
6. 背景事象分離能力の評価と向上

これまでの研究によって、上記 1~4 の項目について、アルゴン純度 ~ 1ppb とその維持、コッククロフト・ウォルトン回路を用いた ~ 1kV/cm のドリフト電場の印加、波長変換材 (TPB) を用いた真空紫外光の読み出しをそれぞれ達成している。現在の研究課題として 5,6 の項目の研究を行っている。本節では上記 1,4 についてその詳細を説明し、次節において 5,6 の項目について述べる。

### アルゴンの高純度化と純度維持

アルゴン中の不純物は、その種類と含有量によって、電離電子の捕獲 ( $O_2, H_2O, CO_2$ ) とシンチレーション光のクエンチング ( $O_2, N_2$ ) を起こすことが知られている。

・電離電子の捕獲

電気陰性度の大きい酸素原子を含む  $O_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$  によって、電離電子の捕獲が行われるため、ドリフト電子はある寿命を持って減衰する。アルゴン中の不純物が全て酸素分子であることを仮定すると、その寿命は液体アルゴン純度によって図 2.5 のように減衰する。

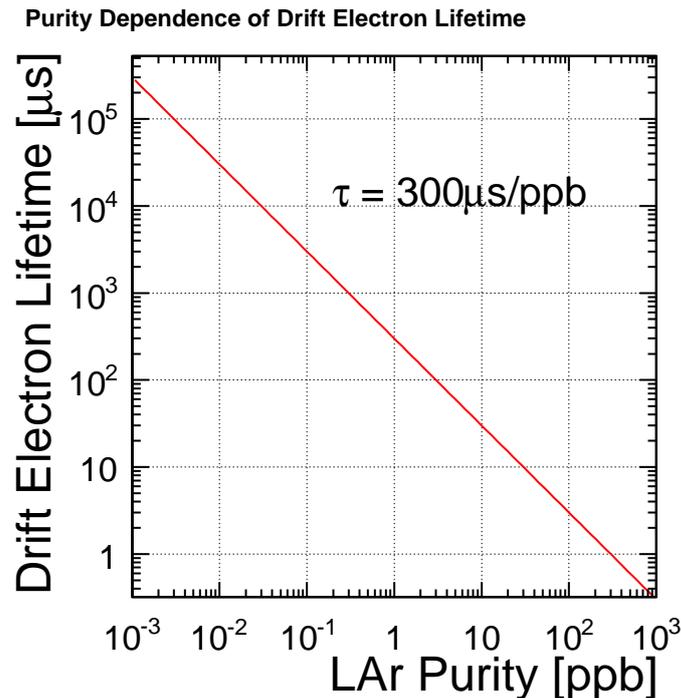


図 2.5: 電離電子の寿命の液体アルゴン純度依存性

液体アルゴン中の電離電子のドリフト速度は図 2.6 のように測定されている。例えば 1kV/cm のドリフト電場において、20cm のドリフトをさせる場合には  $\sim 100 \mu\text{s}$  程度のドリフト時間がかかる。つまり発生した電離電子の 70 % を取り出す場合には  $\sim 1 \text{ppb}$  程度の液体アルゴン純度が必要ということになる。

・シンチレーション光のクエンチング

励起されたアルゴン分子が  $O_2$ 、 $N_2$  と 2.6、2.6 過程を起こすことで、発光を伴わずに基底状態へと遷移するため、発光量の現象が起こる。この過程は発光までの時間が長い方が確率的に多く起こるため、 $^3\Sigma_u^*$  の励起状態に対して起こりやすく、結果として slow 成分の時定数を減少させる。

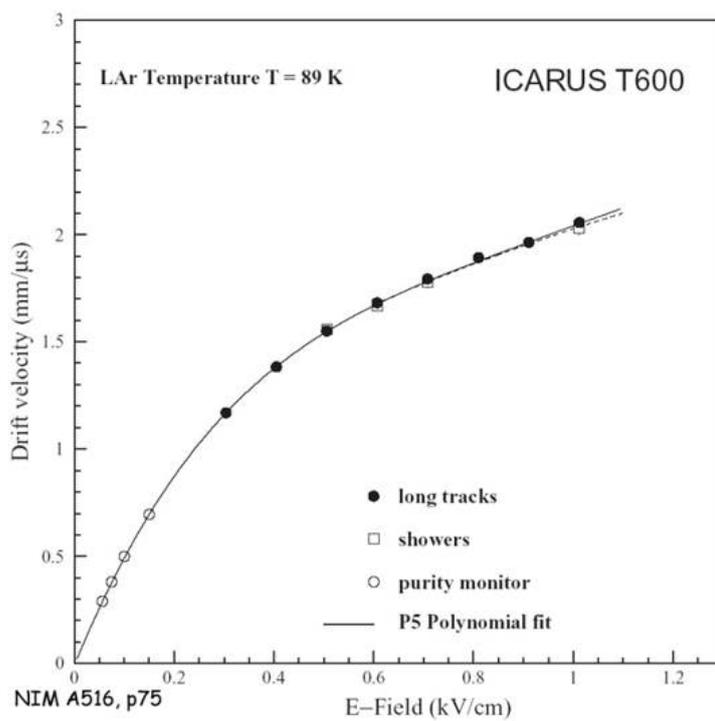


図 2.6: 電場中の電離電子のドリフト速度



上に挙げた不純物 ( $O_2, N_2, CO_2, H_2O$ ) は導入する液体アルゴンに元々含まれるもの、容器内部に初期に残っていたものや検出器部材からアウトガスとして常に放出し続けられることによりアルゴン純度を悪化させる。また、配管にリークがある場合にはリーク箇所からの混入が起こるため、実験中は常に容器内部を正圧に保たなければならない。我々の実験ではアルゴンの高純度化、純度維持のために以下の方法をとっている。

[液体アルゴン導入前の容器真空引き]

実験開始前の容器真空引き ( $\sim 10^{-4}Pa$ ) により部材のアウトガスと初期に残存する不純物の低減。

[液体フィルターによる液体アルゴン初期純度の向上]

銅とモレキュラーシーブの入った自作の液体フィルター (図 2.7) により、初期にタンク内の液体アルゴンに含まれる不純物の除去。

[気体アルゴン循環時のマイクロトール導入による純度維持]

実験中に放出されるアウトガスにより発生する不純物の除去 (図 2.8)。

以上の対策によって、アルゴン純度  $\sim 1ppb$  の達成と 2 週間程度の純度維持を行う事に成功した。



図 2.7: 自作の液体フィルター



図 2.8: マイクロトル MC1500(SAES 社製)

## 安全管理の確立

表 2.1 にあるように、液体アルゴンの沸点は1 気圧で-186 と非常に低温である。つまり実験中の温度管理が非常に重要となり、低温維持が破れた場合には液体アルゴンが気化することで、容器の内圧が急上昇する危険性がある。それに伴う容器の破損や、アルゴンの漏洩による窒息などの自体を防ぐためにも徹底した安全管理が不可欠である。また実験の質としても、一定温度、圧力の環境下での安定したデータ取得は重要な要素である。ここでは ANKOK 実験におけるスローコントロール、モニタリングシステムについて説明する。

### ・スローコントロールシステム

まず実験設備や配管系の模式図を図 2.9 に示す。実験開始時は液体アルゴンタンクから液体フィルターを通して ~ ppb 程度まで純化された液体アルゴンが導入される。液体アルゴンの導入後の容器の温度は、冷凍機と水冷式コンプレッサーを用いて冷却することにより維持されている。その際外部からの熱流入を減らすため容器は真空断熱構造になっており、常に外槽の真空引きを行っている。また冷凍機とヒートシンクの間にはカプトンヒーターを挟み加熱することで冷凍能力の調節を行っている (図 2.10)。ヒーターの ON/OFF は PID コントローラによる制御を行っている。液体アルゴンの保持と同時に、循環ポンプを用いてマイクロツールを通した循環が行われており、その際の熱流入を減らすため、循環の入口と出口は熱交換器を通してある。これによって冷凍機の冷凍能力の範囲内での熱流入に抑える事が出来ている。

### ・モニタリングシステム

実験中には以下の項目についての測定、及び管理を行っている。

表??の測定値はデータロガーに送られ、異常な値を示した場合には関係者へのメール送信が行われ、同時に現場では音声による警告アナウンスが放送されるようになっている。以上のスローコントロールシステムによって 2 週間程度の安定運転に成功している。

## 2.2.1 光量の向上

2.1.2 節で述べた様に、シンチレーション光は不純物によるクエンチングによって減少する。他にも検出器側面などで失われる光や、TPB で波長変換されずに失われるもの、さらに光電子増倍管で光電効果を起こさないものなどによって最終的に検出される光量は発生する光量より小さくなる。

ANKOK 実験においては検出効率の最大化のために、側面への反射材の導入 (図 2.11)、反射材と光電子増倍管表面への TPB 真空蒸着 (図 2.12) を行っている。

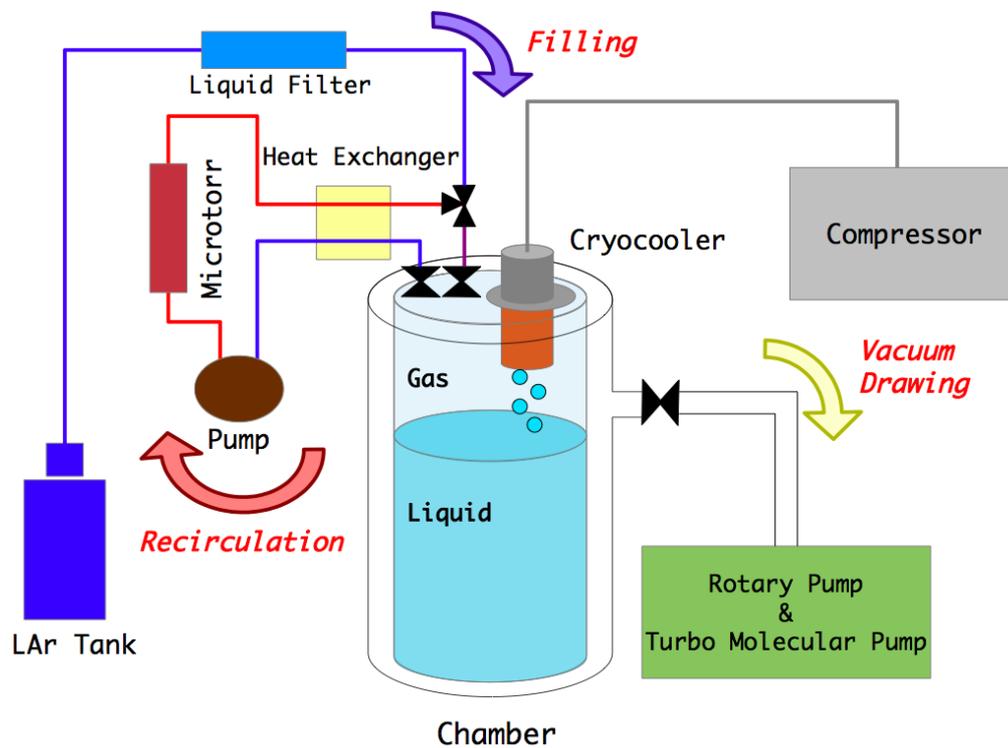


図 2.9: 実験系の模式図

測定項目	測定器	運転範囲
容器圧力	デジタル圧力計	1.0atm ~ 1.3atm
容器外槽真空度	ピラニー真空計	< 0.4Pa
液体アルゴン液面	液面計	
冷凍機温度	白金抵抗	~-184.5
検出器内部温度	白金抵抗	液相 ~ -184.5 気相 > -184.5
ヒーター電流	電流計 (電源付属)	
循環流量	マスフローメータ	~ 40L/min
コンプレッサー水量		
コンプレッサー水温	K 熱電対	
酸素濃度	酸素濃度計	20.9 %
光電子増倍管に流れる電流	電流計 (iseg 付属)	

表 2.2: モニタリング項目

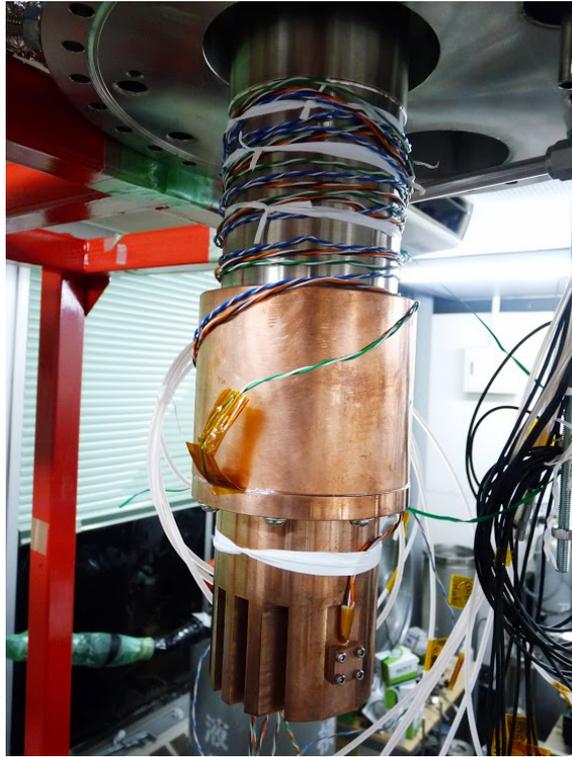


図 2.10: 冷凍機ヘッド、ヒートシンク、カプトンヒーターの構成



図 2.11: TPB が真空蒸着された反射材

#### 2.2.2 背景事象分離能力の向上

### 2.3 背景事象

#### 2.3.1 $e^-/\gamma$ との相互作用

#### 2.3.2 中性子との相互作用

#### 2.3.3 線との相互作用

## 3 背景事象分離能力の評価

本章では1相型プロトタイプ検出器を用いた実験の概要と背景事象分離能力の評価方法、結果について述べる。本研究では章 2.1.2 で述べた2つの分離方法（S1波形分別、S1/S2比による分別）のうち、S1波形分別（PSD）をもちいた分離能力の評価を行った。PSDによる分離能力を評価するために、今回は液体1相式のプロトタイプ検出器を用いた実験を行っている。

### 3.1 1相型プロトタイプ検出器

今回の実験に用いた1相型プロトタイプ検出器について説明する。検出器の写真を図??に示す。二つの光電子増倍管を向かい合わせ、反射材で側面を覆うことで光検出効率を高めている。検出器のサイズは直径55.8mm、長さ60mmとなっており、検出器



図 2.12: TPB が真空蒸着された光電子増倍管

内部のアルゴン質量は ~ 200g である。

この検出器を用いて液体実験を 2013/12/23 ~ 2013/12/27 にかけて行った。

## 3.2 プロトタイプ検出器を用いたテスト実験

### 3.2.1 実験概要

### 3.2.2 中性子サンプルの取得

## 3.3 分離能力の評価

ここでは取得した高統計 事象と純度の高い中性子事象を用いて分離能力の評価を行う。それぞれのデータについてイベントセレクションを行った。それぞれの Cut と Efficiency を表 3.1 と表 3.2 に載せる。なおここでは PSD パラメータとして Slow/Fast を用いる。

それぞれのセレクション後の PSD 分布を図 3.1 と図 3.2 に示す。

これらの分布を二項分布シミュレーションによって理解する。シミュレーションモデルを以下のように立てる。

- ・全光量に対して Fast、Slow 光量がある確率の二項分布をする
- ・上記の確率にはエネルギー依存性がある

Cut	Number of Events	Efficiency[%]
Saturation		
Trigger Timing		
Ground RMS		
Multiple Scattering		

表 3.1:  $^{57}\text{Co}$  のイベントセレクション

Cut	Number of Events	Efficiency[%]
Saturation		
Trigger Timing		
Ground RMS		
Time of Flight		

表 3.2:  $^{252}\text{Cf}$  のイベントセレクション

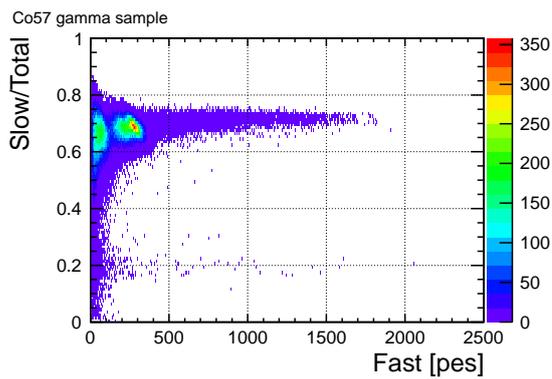


図 3.1:  $^{57}\text{Co}$  による  $e^-$  事象サンプル

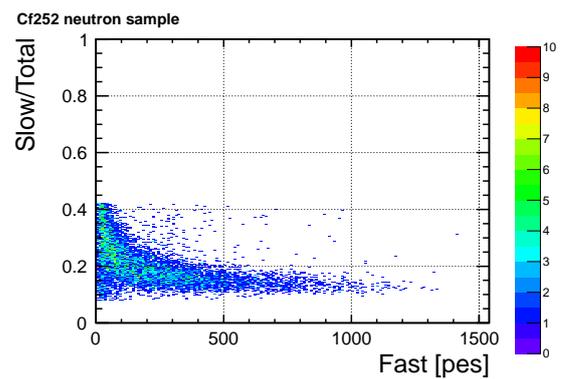


図 3.2:  $^{252}\text{Cf}$  による中性子事象サンプル

- ・ Fast、Slow 光量は PMT のゲインのばらつき (landau 分布) により分散する
- ・ Fast、Slow 光量はその光量によらず一定のばらつきを持つ

以上のモデルを用いて二項分布シミュレーションを行う。

## 4 中性子束測定実験

気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器では、 $e^-$  による電子反跳事象は除去可能であるが、中性子による弾性散乱事象は信号との区別が難しい。そのため環境中性子束の少ない地下施設での実験、水やポリエチレンシールドを用いた高速中性子の遮蔽を行うことが必要である。本研究では中性子背景事象の理解と、中性子束が物理感度に与える影響の見積もりを行うことを目的として、まずは液体シンチレータを用いた地上での環境中性子束の測定を行った。

### 4.1 中性子の種類

地上、あるいは地下に存在する中性子は以下のような過程で発生する。

- ・ 岩盤中に含まれる  $^{232}\text{T}$ 、 $^{235}\text{U}$  系列の放射性同位体が自発的核分裂をすることにより生じる。
- ・ 岩盤中に含まれる  $^{232}\text{T}$ 、 $^{235}\text{U}$  系列の放射性同位体の崩壊により発生した  $\alpha$  線が岩盤物質の原子核と ( $\alpha, n$ ) 反応を起こし放出される。
- ・ 宇宙線  $\mu$  が岩盤物質と原子核破砕を起こした際に発生する。

中性子はそのエネルギー領域によって 3 種類に分類され、それぞれ反応の種類が異なる。

**熱中性子 ( $< 0.5\text{eV}$ )** 非常にエネルギーの低い中性子。物質中で減速され熱平衡状態 (マクスウェル分布) にある。アルゴン原子核に捕獲されアルゴン原子核を励起、その後励起された原子核は  $\gamma$  線を放出し基底状態に戻る。

**中速中性子**

**高速中性子 ( $> 500\text{KeV}$ )** アルゴン原子核と弾性散乱、非弾性散乱をしエネルギーを失ってゆく。非弾性散乱の場合には原子核を励起させ、基底状態に戻る際に  $\gamma$  線を放出するが、弾性散乱の場合には 2 相型検出器でも分離が難しい。

## 4.2 液体シンチレータ

### 4.2.1 液体シンチレータの種類

### 4.2.2 検出原理

## 4.3 液体シンチレータ (BC501A) の性能評価

### 4.3.1 光量評価

作成した液体シンチレータ検出器の光量評価を行う。図 4.1 に示すように、鉛で囲まれた液体シンチレータに  $^{57}\text{Co}$  線源を直付けしデータ取得をした図 4.2 に取得したエネルギー分布を示す。図 4.2 に見える  $^{57}\text{Co}$  の全吸収ピーク (122KeV) 付近を exponential で背景事象が分布するとして、gaussian でフィットすると gaussian の mean から、光量は  $1.17 \pm 0.01 \text{pe/KeV}$  と評価した。

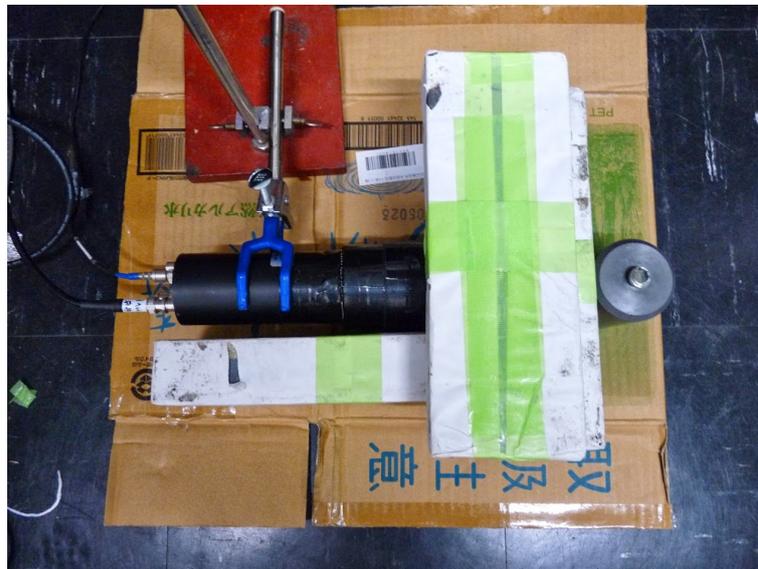


図 4.1:  $^{57}\text{Co}$  線源データ取得セットアップ

### 4.3.2 分離能力評価

ここでは液体シンチレータ (BC501A) の  $e^-$  と中性子の分離能力評価を行う。 $e^-$  事象のサンプルとして  $^{57}\text{Co}$ 、中性子事象のサンプルとして  $^{252}\text{Cf}$  を用いる。それぞれ取得したデータに対し PSD パラメータとして Fast/Total を縦軸、横軸に全光量 (Fast+slow) をとった分布 (PSD 分布) を図 4.3 に示す。

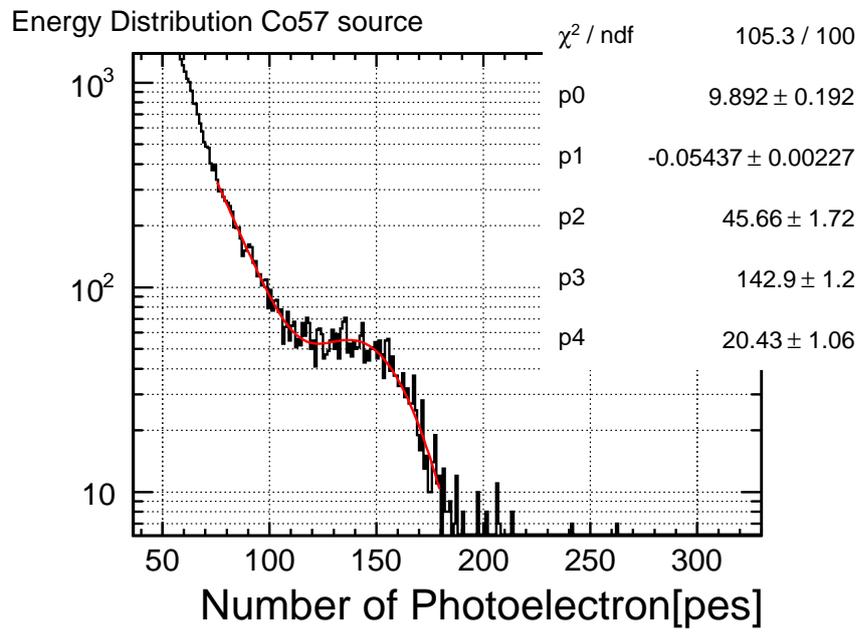


図 4.2:  $^{57}\text{Co}$  線源を用いたエネルギー分布

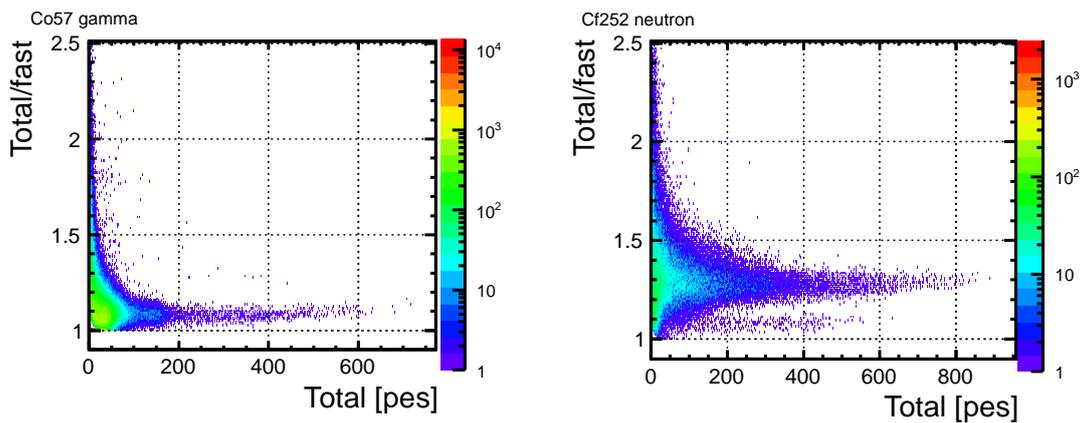


図 4.3:  $e^-$  事象 (左) と中性子事象 (右) の PSD 分布

図 4.3 から  $e^-$  事象では PSD  $\sim 1.10$ 、中性子事象では PSD  $\sim 1.25$  付近に分布することが分かる。それぞれのサンプルを用いて 3.3 章と同様に二項分布によってこれを再現する。 $^{57}\text{Co}$  と  $^{252}\text{Cf}$  についてそれぞれ 10pe ごとのエネルギーに区切った場合のデータと二項分布によるシミュレーション結果を図 4.4( $^{57}\text{Co}$ ) と図 4.5( $^{252}\text{Cf}$ ) に示す。ここでは分離が難しくなる低光量領域 (0 ~ 120pe) の結果を載せている。

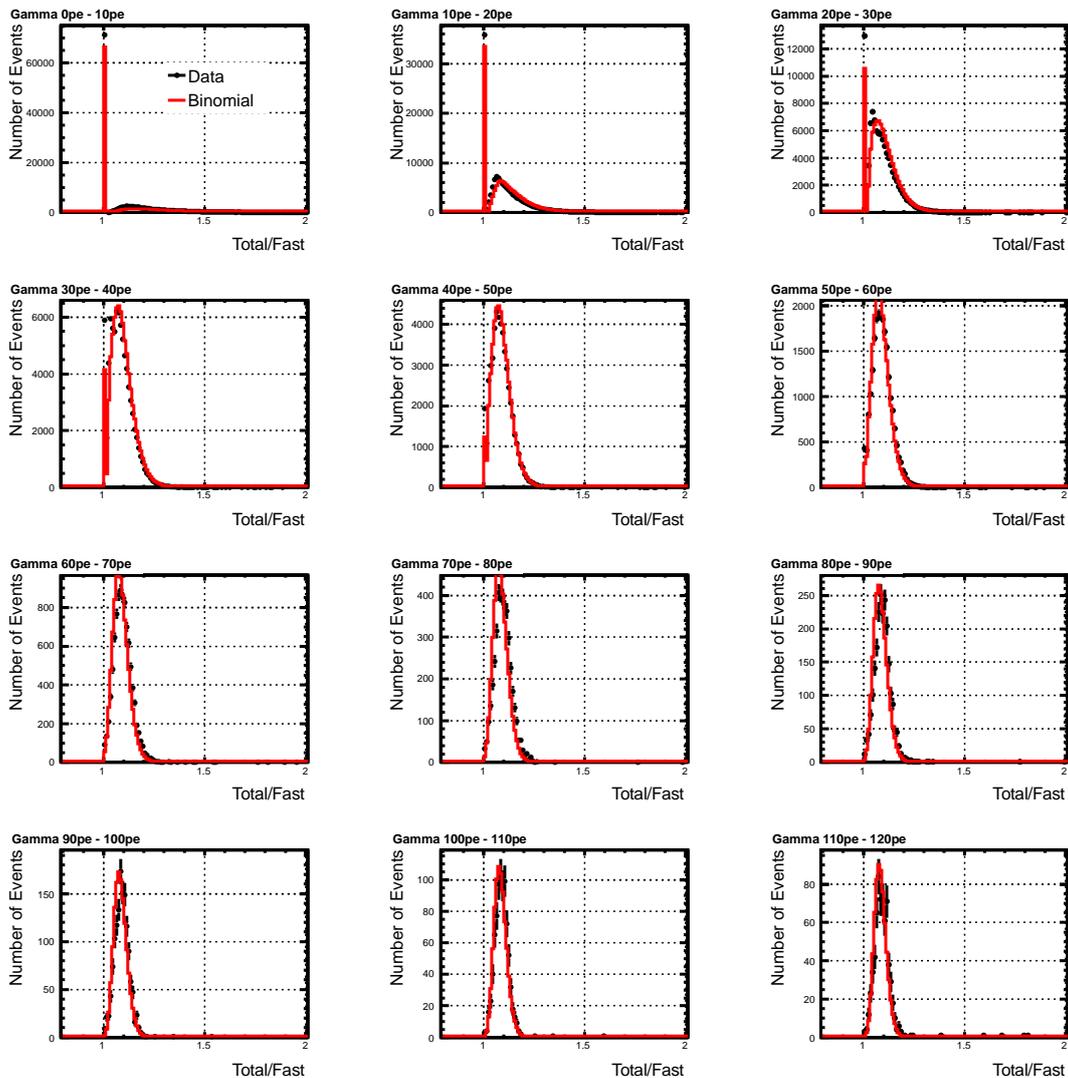


図 4.4:  $^{57}\text{Co}$  のデータと二項分布

0 ~ 20pe (0 ~ 17KeVee) までには中性子事象に含まれる の影響でデータを再現することが難しい。鉛による 遮蔽や TOF を用いたとしても中性子と水素原子核による非弾性散乱によって が放出される事象が起こるため、低光量領域における 事象を除ききることは難しい。

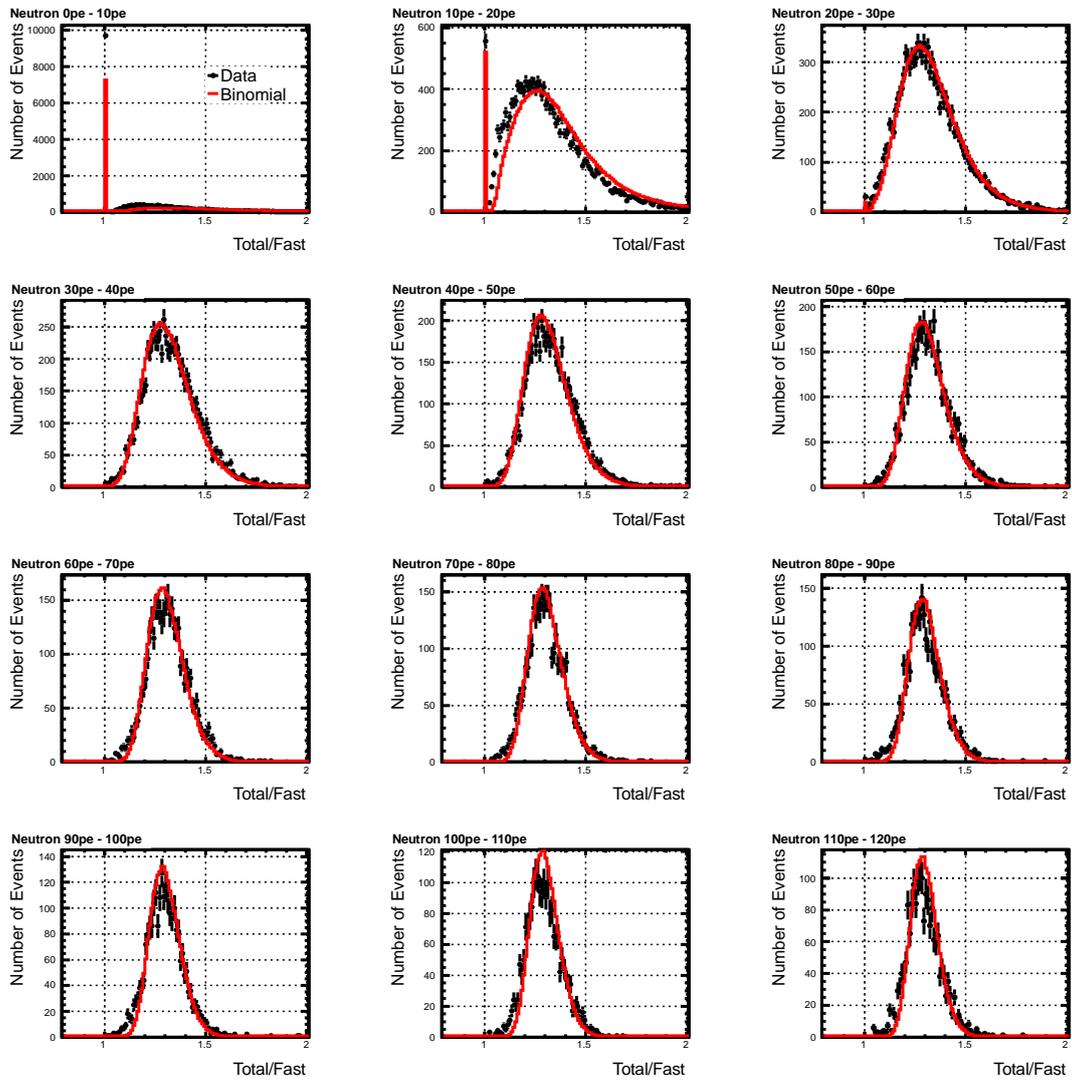


図 4.5:  $^{252}\text{Cf}$  のデータと二項分布

## 4.4 中性子束の測定

液体シンチレータ (BC501A) を用いて環境中性子束の測定を行った。以下で実験セットアップと解析方法を説明する。

### 4.4.1 実験セットアップ

環境中性子束測定の実験セットアップについて説明する。液体シンチレータ検出器を図 4.6 のように配置する。周囲は鉛ブロックで覆われていて、環境線の遮蔽を行っている。光電子増倍管からの信号は Flash ADC へ送られ、Self Trigger でのデータ取得を行っている。このセットアップで約 10 時間のデータ取得を行った。

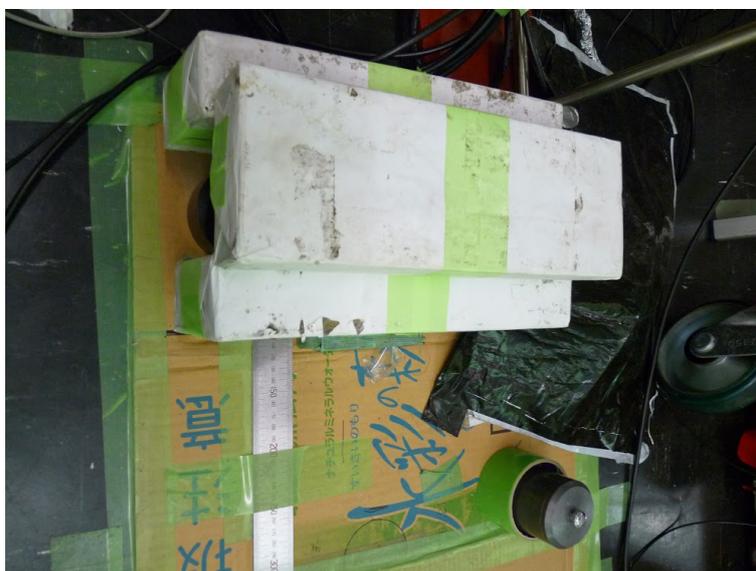


図 4.6: 環境中性子束測定実験セットアップ

結果として得られた total/fast の分布を図 4.7 に示す。

total/fast ~ 1.1 付近には 事象群、total/fast ~ 1.3 付近にはわずかではあるが中性子事象が観測されていることが分かる。

### 4.4.2 解析方法

本章では、取得した環境中性子データから環境中性子束を算出するための解析方法について述べる。液体シンチレータ中の水素原子と中性子の弾性散乱においては、式 ?? に示した様に、同じ入射エネルギーを持つ中性子でも、反跳角によって異なる反跳エネルギーを落とし、そのエネルギーが検出される。つまり入射中性子のエネルギー

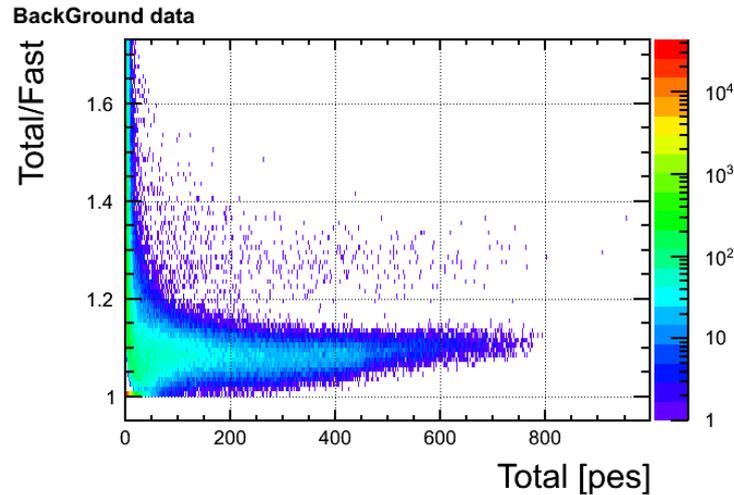


図 4.7: total/fast 分布

を見積もるためには、ある入射エネルギーを持つ中性子が弾性散乱を行った場合に落とす反跳エネルギーの分布を知る必要がある。

まずはシミュレーションにより生成した 1MeV ~ 2MeV の一様なエネルギー分布の入射中性子における反跳エネルギー分布を図 4.8 に示す。また反跳角分布として Geant4 シミュレーションにより生成した分布 (図 4.9) を用いている。

図 4.8 より、反跳エネルギーは 2MeV を最大値として低いエネルギーまで分布していることが分かる。

ここで、入射中性子のエネルギー分布として A/E 則を仮定し、中性子束として 2.5MeV ~ 25MeV のエネルギー領域において  $5.6 \times 10^{-3} \text{count/cm}^2/\text{s}$  となるように A を決める。この入射中性子のエネルギー分布に図 4.10 に示すような水素原子との弾性散乱の反応断面積を掛け合わせることで、1 個の水素原子との反応レートの分布を求める。こうして計算された反応レートと、expacs(参考文献 [3]) を用いた場合の分布を比較したものを図 4.11 に示す。

次にデータを用いて、あるエネルギー領域における中性子事象数を算出する。4.3.2 で生成した、中性子に対する二項分布シミュレーションを用いて、データを 2 成分フィットすることでデータ中の中性子事象の fluctuation を求める。その fluctuation と全事象数の積を中性子事象数として求める。

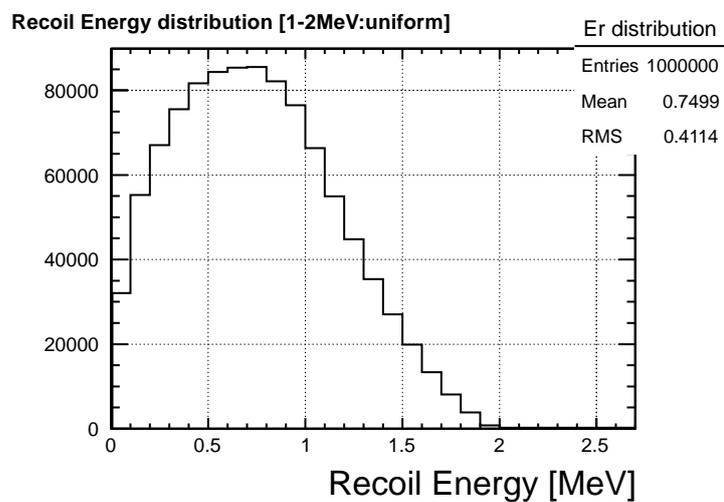


図 4.8: 1 ~ 2MeV で一様なエネルギーの中性子の反跳エネルギー分布

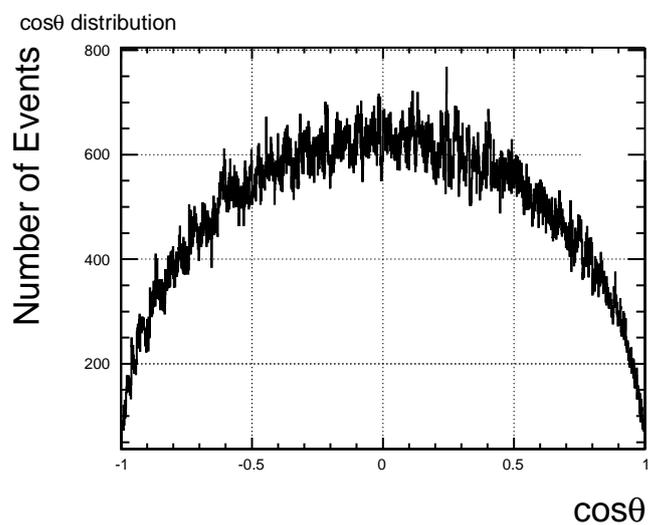


図 4.9: 水素-中性子弾性散乱における陽子の散乱角分布

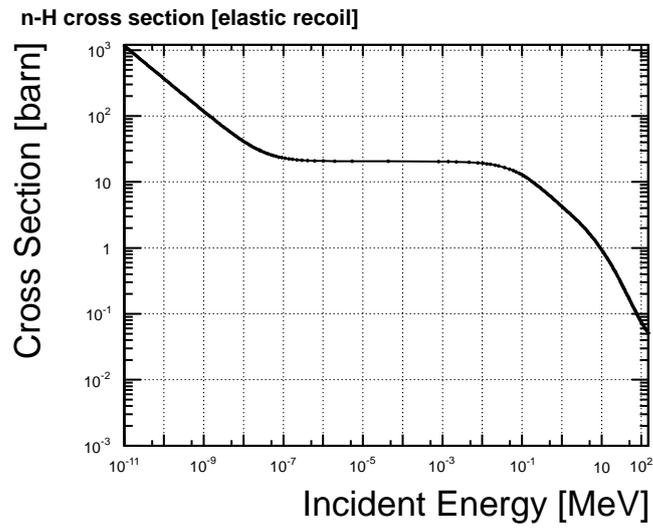


図 4.10: 水素-中性子における弾性散乱断面積

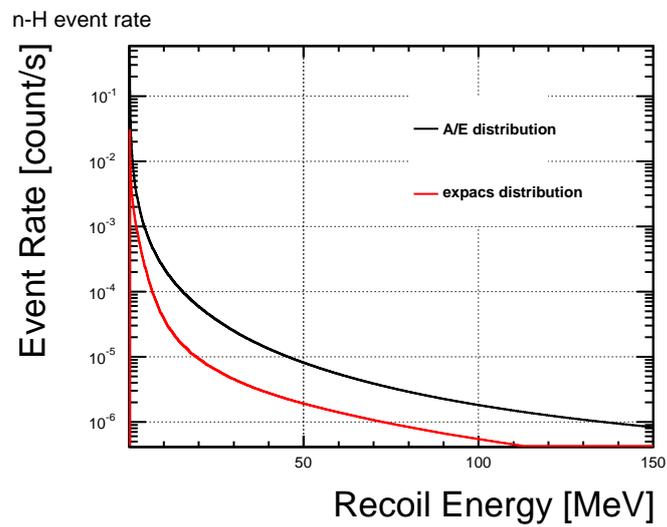


図 4.11: A/E 分布と expacs 分布から計算した反応レート

#### 4.4.3 結果

## 5 纏めと展望

纏めと展望

## 6 謝辞

謝辞

## 7 参考文献

### 参考文献

- [1] WArP Collaboration, "Effect of Nitrogen contamination in liquid Argon", [arXiv:0804.1217v1[nucl-ex]], April(2008)
- [2] M.Antonello et al, "Analysis of Liquid Argon Scintillation Light Signals with the ICARUS T600 Detector", ICARUS-TM/06-03
- [3] <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>